

天 津 商 业 大 学 毕 业 设 计 (论 文)

气液两相制冷剂流动特性及相分离控制

**Flow characteristics of gas-liquid two-phase refrigerant
and phase separation control**

学 院: 机械工程学院
教 学 系: 制冷与空调系
专业班级: 能源与动力工程 1501 班
学生姓名: 王启帆
指导教师: 孙志利 讲师

2019 年 6 月 6 日

目录

内容摘要	I
Abstract	III
1 引言	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 分流器分类及分流原理	5
1.3 国内外气液两相流分配研究现状	8
1.4 国内外研究现状及发展动态分析	47
1.5 研究内容和技术路线图	56
1.6 本章小结	58
2 分流器的理论分析及设计	59
2.1 整流喷嘴式分流器结构	59
2.2 流型整定原理	60
2.3 两相流临界流动特性	66
2.4 整流喷嘴式分流器结构尺寸	78
2.5 整流喷嘴式分流器优势	78
2.6 本章小结	79
3 分流器分流特性及相分离控制的实验研究	80
3.1 实验方法比较	80
3.2 实验装置及测试方法	80
3.3 实验数据处理方法	85
3.4 实验结果及分析	86
3.5 本章小结	93
4 结论及展望	95
4.1 结论	95
4.2 展望	97
参考文献	107
发表论文及参与科研情况说明	126
附录：开题报告（数据报告）	132
致谢	157

内容摘要：在干式蒸发器中，面临的主要问题为如何提高传热效率。其中，相分离导致的两相制冷剂分流不均，尤其是耦合非均匀换热的相分离严重影响干式蒸发器传热性能，导致其换热能力下降 30%~50%。因此，如何实现两相制冷剂均匀分流，抑制由非均匀换热引起的相分离成为提高干式蒸发器传热性能的关键。传统分流器由于其在分流原理上存在先天不足，在变工况时，会出现均匀分流性能下降甚至失去均匀分流能力的情况。为解决上述问题，保障干式蒸发器在各工况下均能实现均匀分流，须对气液两相流体的分流特性和相分离抑制机理进行研究。本文以节流后气液两相制冷剂在多支路中的分流过程为研究对象，将分流过程受分流原理、上游流体流动状态、下游支路非均匀换热以及气液两相流体物性对相分离现象的影响进行综合考虑。基于临界流理论抑制非均匀换热导致的相分离，建立全过程抑制相分离现象的理论模型。采用理论分析和实验研究相结合的手段，主要结论如下：

(1) 考虑到上流流动状态、气液两相流分流原理和下流非均匀换热对相分离的影响，以及环状流和雾状流是对均匀分流最有利的流型，提出基于“旋流整定+临界分流”分流理念的整流喷嘴式分流器和基于“雾化整定+临界分流”分流理念的雾化喷嘴式分流器。此外，考虑到传统的分流器设计理念的不合理性，提出新型分流器设计理念，即将分流器与膨胀阀设计为一体化装置，共同承担节流压降。并根据此理念设计开发整流喷嘴式分流器和雾化喷嘴式分流器，设计和撰写具有节流和分流功能的膨胀阀和分流器的膨胀分流一体化装置。

(2) 对基于“旋流整定+临界分流”分流理念的整流喷嘴式分流器进行理论分析和结构设计，阐述整流机理和两相流临界流动机理：流型整定是通过整流元件将上流不均匀、不对称的流型调整为理想环状流，克服上流流动状态对分流特性影响；临界分流是通过音速喷嘴使两相流达到当地音速，克服下流各支路非均匀换热对分流特性影响，解决各流路阻力不一致、压力波振荡等不良因素对干式蒸发器传热性能影响。探索建立环状扰动和环状整定对环状流中液体分布均匀性的理论模型，优

化设计旋流叶片和整流器。建立采用临界流理论抑制相分离现象的理论模型，优化设计音速喷嘴。建立整流喷嘴式分流器分流模型及全过程相分离现象的理论模型。

(3) 基于理论分析结果，设计和开发了整流喷嘴式分流器，并在冷风机性能测试实验台上进行测试。实验研究不同库温下，整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器的分流性能，以及其对冷风机传热性能的影响。研究表明：

整流喷嘴式分流器的不均匀度最小，在运行工况接近设计工况(蒸发温度为 -28°C ，库温为 -18°C)时，整流喷嘴式分流器分流效果最好，且远低于其他形式的分流器，不均匀度只有 0.78%，气液两相制冷剂经过旋流叶片的环流扰动作用和整流器的流型整定作用后环状流流型更加均匀稳定，使整流喷嘴式分流器分流效果最好。

整流喷嘴式分流器对应冷风机制冷量、传热系数和冷风机综合性能最大。在库温为 $-20^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 的范围内，与喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器相比，整流喷嘴式分流器对应的冷风机制冷量分别提高了 3.0%~3.2%，9.2%~10.9%，16.3%~20.1%和 22.7%~25.4%，对应的冷风机传热系数分别提高了 0.7%~3.2%、0.9%~7.7%、10.1%~17.5%和 13.2%~22.3%。整流喷嘴式分流器可从根本上克服相分离导致的制冷剂分流不均和非均匀换热引起的相分离对冷风机传热性能的影响，大幅度降低制冷系统生产成本，可在冷风机及类似干式蒸发器中推广应用。

本研究成果将有助于阐明非均匀换热工况下的气液两相制冷剂相分离抑制机理，丰富和完善多相流分流理论，为涉及两相流分流应用领域提供基础支持。

关键词：干式蒸发器；临界喷嘴；相分离；分流器；传热性能

Abstract: In dry evaporators, the main problem is how to improve heat transfer efficiency. Among them, the mal-distribution of two-phase refrigerants caused by phase separation, especially the phase separation coupled with non-uniform heat transfer, seriously affects the heat transfer performance of the dry evaporator, resulting in a decrease of 30% ~ 50% in the heat transfer capacity of the dry evaporator. Therefore, how to achieve uniform distribution of two-phase refrigerants and restrain the phase separation caused by non-uniform heat transfer becomes the key to improve the heat transfer performance of the dry evaporator. Due to the inherent deficiency of the traditional distributor in the distribution principle, the uniform distribution performance will be decreased or even the uniform distribution capacity is lost when the operating conditions are changed. In order to solve the above problems and ensure that the dry evaporator can achieve uniform distribution under all working conditions, the distribution characteristics and phase separation suppression mechanism of gas-liquid two-phase fluid must be studied. The distribution process of the gas-liquid two-phase refrigerant in the multi-branch after throttling is taken as the research object in this paper, the influence of flow state of upstream fluid, non-uniform heat transfer of downstream branch and physical properties of gas-liquid two-phase fluid on the phase separation phenomenon are comprehensively considered. Based on the critical flow theory to suppress the phase separation caused by non-uniform heat transfer, a theoretical model was established to suppress the phase separation phenomenon in the whole process. With the combination of theoretical analysis and experimental research, the main conclusions are as follows:

(1) Considering the effect of upstream flow state, distribution principle of gas-liquid two-phase flow and downstream non-uniform heat transfer on the phase separation, and the annular flow and mist flow are the most favorable flow patterns for uniform distribution, the rectifying nozzle-type distributor based on the distribution principles of "swirl setting & critical distribution" and atomizing nozzle-type distributor based on the distribution principles of "atomization setting & critical distribution" are proposed, respectively. In addition, considering the irrationality of the traditional design idea of the distributor, a new design concept of the distributor is put forward, that is, the throttle pressure drop is shared by the distributor and the expansion valve. And according to this concept, the rectifying nozzle-type distributor and atomization nozzle-type distributor are designed and developed, and an integrated device for expansion valve and distributor with throttling and distribution functions is designed and written.

(2) The theory analysis and structure design of the rectifying nozzle-type distributor based on the distribution principle of "swirl setting & critical distribution" is carried out, and the rectifying mechanism and the critical flow mechanism of two-phase flow are

expounded. The flow pattern tuning is to adjust the up-flow non-uniform and asymmetrical flow pattern to ideal annular flow by rectifying element, so as to overcome the influence of up-flow flow state on the distribution characteristics. The critical distribution is to make the two-phase flow reaches the local sound speed by means of the sonic nozzle, overcome the influence of the non-uniform heat transfer of each branch of the downflow on the distribution characteristics, and solve the bad factors such as the inconsistent resistance of each flow path, the influence of the pressure wave oscillation and other bad factors on the heat transfer performance of the dry evaporator. A theoretical model for the uniformity of liquid distribution in annular flow caused by annular disturbance is established to optimize the design of swirl blades. The theoretical model of suppressing the phase separation phenomenon by using the critical flow theory is established, and the sonic nozzle is optimized. The distribution model of the rectifying nozzle-type distributor and the theoretical model of the phase separation phenomenon of the whole process are established.

(3) Based on the results of theoretical analysis, the rectifying nozzle-type distributor is designed and developed and tested on the test bench of performance of the fin-tube evaporator. The distribution performance of rectifying nozzle-type distributor, nozzle type distributor, gas-liquid separation distributor, CAL distributor and Venturi distributor at different storage temperatures and their effects on the heat transfer performance of fin-tube evaporator were studied experimentally. The results show that:

The non-uniformity of the rectifying nozzle-type distributor is the smallest. When the operating condition is close to the design condition (evaporation temperature at $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ and storage temperature at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$), the rectifying nozzle-type distributor has the best distribution effect and is much lower than other types of distributors, and the unevenness is only 0.78%, the annular flow pattern of the gas-liquid two-phase refrigerant is more uniform and stable after the swirl disturbance of the swirl vane and the flow pattern setting of the rectifier, which makes the distribution effect of the rectifying nozzle-type distributor the best.

The corresponding cooling capacity, heat transfer coefficient and comprehensive performance of the fin-tube evaporator are the largest in the rectifying nozzle-type distributor. When the storage temperature is in the range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, compared with nozzle type distributor, gas-liquid separation distributor, CAL distributor and Venturi distributor, the corresponding cooling capacity of rectifying nozzle-type distributor increases 3.0% ~ 3.2%, 9.2% ~ 10.9%, 16.3% ~ 22.1% and 22.7% ~ 25.4% respectively, the corresponding heat transfer coefficients increased by 0.7% ~ 3.2%, 0.9% ~ 2.7%, 10.1% ~ 17.5% and 13.2% ~ 22.3%, respectively. The rectifying nozzle-type distributor can

fundamentally overcome the influence of mal-distribution of refrigerate caused by phase separation and phase separation caused by non-uniform heat transfer on the heat transfer performance of the fin-tube evaporator, and greatly reduce the production cost of the refrigeration system. It can be widely used in fin-tube evaporators and similar dry evaporators.

The research results of this project will help to clarify the mechanism of gas-liquid two-phase refrigerant phase separation suppression under non-uniform heat transfer conditions, enrich and perfect the theory of multi-phase separation, and provide basic support for the application field of two-phase flow diversion.

Key Words: Dry evaporator; Critical nozzle; Phase separation; Distributor; Heat transfer performance

1 引言

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

在制冷系统中，干式蒸发器是广泛应用的蒸发换热设备，主要型式为翅片式干式蒸发器和管壳式干式蒸发器，其中翅片式干式蒸发器主要应用在单元式空调机、多联机末端和冷库制冷系统用蒸发器等领域，管壳式干式蒸发器主要应用在冷水/热泵机组等领域。在干式蒸发器中，面临的主要问题为如何提高传热效率。通过文献调研发现，影响干式蒸发器传热效率的主要因素为以下三个方面：

- (1) 空气侧和水侧的对流换热系数低和换热不均匀（约占 15%~25%）；
- (2) 蒸发器流程布置及加工工艺（约占 15%~25%）；
- (3) 气液两相制冷剂分流不均匀（约占 30%~50%）。

单独或组合的影响因素（1）和（2）会引起制冷剂在流动过程中分布不均匀，恶化干式蒸发器传热过程，导致影响因素（3）所占比例持续增大，这是因为由影响因素（1）和（2）会导致部分制冷剂回路大幅度过热，而另一部分制冷剂回路的出口处还存在液态制冷剂，改变制冷剂侧的流动特性。分析可知^[2]，相比（3）所述影响因素，（1）和（2）所述影响因素均相对较弱。

在气液两相制冷剂分流过程中，受气液两相流流动及传热的不稳定性影响，下游各支路气液流量和干度并不完全一致，即出现相分离现象，造成气液两相制冷剂分流不均^[3-6]。此外，各蒸发支路非均匀换热导致各支路阻力的不一致性增大，恶化了气液两相制冷剂在支路中出现的相分离现象，干式蒸发器传热性能显著降低^[7]。

传统分流器由于其在分流原理上存在先天不足，无法解决气液两相分流原理、上游流体流动状态、下游支路非均匀换热、安装角度和分流器结构等因素对干式蒸

发器传热性能的影响。尤其是在变工况或部分负荷运行时，会出现均匀分流性能下降甚至丧失均匀分流能力的情况。

相分离导致的气液两相制冷剂分流不均，尤其是耦合非均匀换热引起的相分离严重影响干式蒸发器传热性能，导致其传热性能下降高达 30%~50%。因此，如何实现气液两相制冷剂均匀分流，抑制由非均匀换热引起的相分离成为提高干式蒸发器传热性能的关键。

为解决上述问题，保障干式蒸发器在各工况下均能实现均匀分流，须对气液两相流体的分流特性和相分离抑制机理进行探索研究。本文基于以上研究背景，突破传统分流及设计理念，设计和开发新型分流器，以解决现有分流技术中存在的技术缺陷，克服相分离影响因素对干式蒸发器传热性能的影响，保证在变工况下仍有较好的分流效果和较宽的使用范围，进而提高整个制冷系统的工作性能。

1.1.2 相分离的影响因素和危害

1.1.2.1 相分离的影响因素

与单相流相比，气液两相流相互作用机理复杂，受到的相分离影响因素很多^[8]。但根据对相分离影响的原因，主要可以分为以下几类：

(1) 气液两相分流原理

分流器的分流原理主要分为两类，一类是“先混合、后分流”，另一类是“先分流、后混合”。基于不同分流原理的分流器，受到工作条件、实际应用限制等的影响差异很大。基于“先分流、后混合”分流原理的分流器需要采用气液分离器等分离设备，分流器体积庞大，并且各支路出口压力不一致，受安装空间的限制，无法在家用空调等小型制冷设备中使用；且如何克服下游各支路阻力不一致导致的相分离现象是必须解决的重点和难点问题。基于“先混合、后分流”分流原理的分流器降压较大，且在流量较小时，由于来流不能完全混合，很难实现气液两相的均匀分流；且该原理主要是降压增速的方法使气液两相流充分混合，这将会导致阻力显著增加。

（2）上游流体流动状态

上游流体流动状态包括入口干度，质量流量、流体物性和入口流型等。其中，分流器的分流特性强烈依赖于入口流型。

干度越大，分流越不均匀。这是因为气泡运动的随机性使气泡在流道中分布不均匀，同时气泡占据了流道大部分体积，导致液相流量分配不均匀，不同体积分数的气相对液相流量分配的影响也不相同^[9]。

质量流量越大，气相和液相速率越大，分流越均匀。这是因为速率大的液相与分流器壁面的碰撞效果明显，液滴容易打散形成雾状流，气液混合程度非常好，分配效果最理想^[10-12]。

流型会影响进入分流器的气液两相分布均匀对称性，当进口气、液相分布不对称时，会直接影响两相分流均匀性。在两相流流型中，环状流和雾状流流型下的制冷剂气液相分布对称，有利于流量均匀分配^[89]；而间歇流是环状流失稳的一种流型，这种流型下的制冷剂气液相分布不对称，不利于均匀分配^[13]。

（3）下游支路非均匀换热

气液两相流体在管内流动为非绝热流动，外界环境与管内流体发生热量交换，气态制冷剂逐渐变多，制冷剂体积变大，流速也变快，制冷剂的流动阻力也会增大^[14]。当蒸发器各支路非均匀换热时，换热量大的支路中气态制冷剂较多，流速快，相应的流动阻力会较大；而换热量小的支路中气态制冷剂较少，流速小，相应的流动阻力较小，从而引起各支路阻力不一致。支路阻力不一致导致气液两相流在流动过程中发生不稳定扰动，使系统多支路发生周期性或间歇性振荡，振荡的压力波通过支路向上游传递，影响两相流均匀分流过程，恶化相分离现象^[15]。且不同制冷剂的实际工作压力不同，产生的压力波动也会有差异，从而造成分配效果的差别^[89]。

（4）安装角度

分流器垂直安装时，由于没有重力作用的影响，液膜均匀分布，可实现均匀分

流。分流器倾斜角度安装时，由于重力作用的影响，流体气液相的分布不均匀对称，密度较大的液相会朝偏离的一侧累积，液膜加厚，使得位置靠下的分流管内制冷剂流量增加，从而造成流量分配不均^[16]。

（5）制造加工误差

在实际加工中，由于制造工艺等方面的限制，很难保证分流器结构对称性，导致制冷剂分流不均^[17]。

（6）分流器结构

分流器入口连接存在弯曲结构时，这些弯曲结构会使气液两相制冷剂受离心力和惯性力的作用而发生偏析现象，使两相制冷剂发生相分离，造成制冷剂分流不均^[18]。此外，不同的分流器流道形式会使流体流动的压力损失不同，导致分流器分流特性不同^[19]。

1.1.2.2 相分离的危害

制冷系统各支路分流不均如图 1-1 所示。由于相分离的发生，导致制冷剂分流不均，使各蒸发支路出口具有不同的过热度，引起冷量偏低和冷量波动，造成蒸发器表面不均匀结霜，在食品冷藏库中会导致食品干耗率的增加。

供液量不足的蒸发支路中，制冷剂快速蒸发成气体，过早进入过热区。处于过热区的蒸发器换热面积不能被充分利用，导致其换热系数大幅度降低^[20]。此外，还会引起短时间内温度迅速变化，在蒸发器管道中产生热应力，严重影响蒸发器安全高效运行^[7]。因此，在设计制冷系统时，需要采用蒸发器留出较大设计余量的方法弥补分流不均造成的换热影响，从而造成原材料的浪费和生产成本的增加^[21]。

供液量较多的蒸发支路中，制冷剂会过度蒸发，造成气体堵塞管道，并且可能会在出口处带有未蒸发完全的液滴^[22]。制冷剂液滴处于不稳定的闪发状态，容易造成压缩机液击，并且会引起膨胀阀阀芯振荡，导致膨胀阀阀门开度减小，供液量减小。供液量减小后，分流器的分流均匀性更差，形成恶性循环，蒸发器的有效换热

面积急剧减少，换热效率下降，蒸发温度偏低，制冷量下降，功率上升，排气温度和冷凝温度升高，整机能效比降低^[227]。蒸发器各支路分流不均示意图如图 1-1 所示，分流不均匀时对应的制冷系统实际循环 T-s 图如图 1-2 所示。

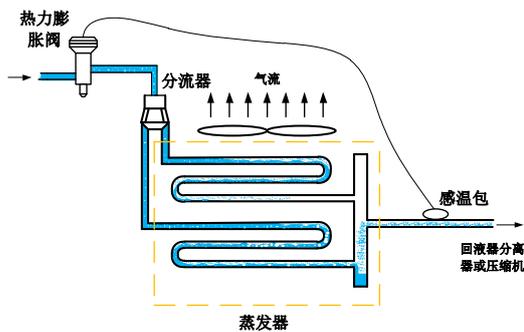


图 1-1 蒸发器各支路分流不均图

Fig.1-1 Schematic diagram of mal-distribution in each branch of evaporator

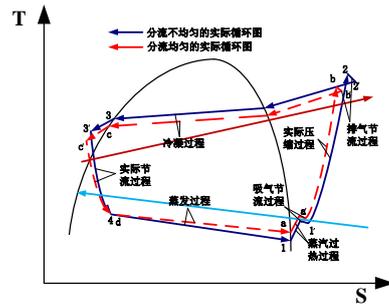


图 1-2 分流不均匀对应的制冷系统 T-s 图

Fig.1-2 T-s diagram of actual refrigeration system corresponding to mal-distribution

1.2 分流器分类及分流原理

1.2.1 分流器分类

分流器按照分流原理可以分为两类：基于“先混合、后分流”分流原理的混相式分流器和基于“先分流、后混合”分流原理的分相式分流器，如图 1-3 所示。

混相式分流器主要包括孔板式分流器^[53]、插孔式分流器^[19]、圆锥式分流器^[119]、反射式分流器^[19]、文丘里分流器^[63]、贮液式分流器^[77]、离心式分流器^[97]和分时分配式分流器^[132]等。

分相式分流器主要包括 CAL 分流器^[64]、冲击式气相分离式分流器^[129]、反击式气相分离式分流器^[129]和分相式分配分流器^[108]。

目前中央空调及柜式空调机主要使用文丘里分流器和普通压降型分流器，即蓬头式分流器^[23]。

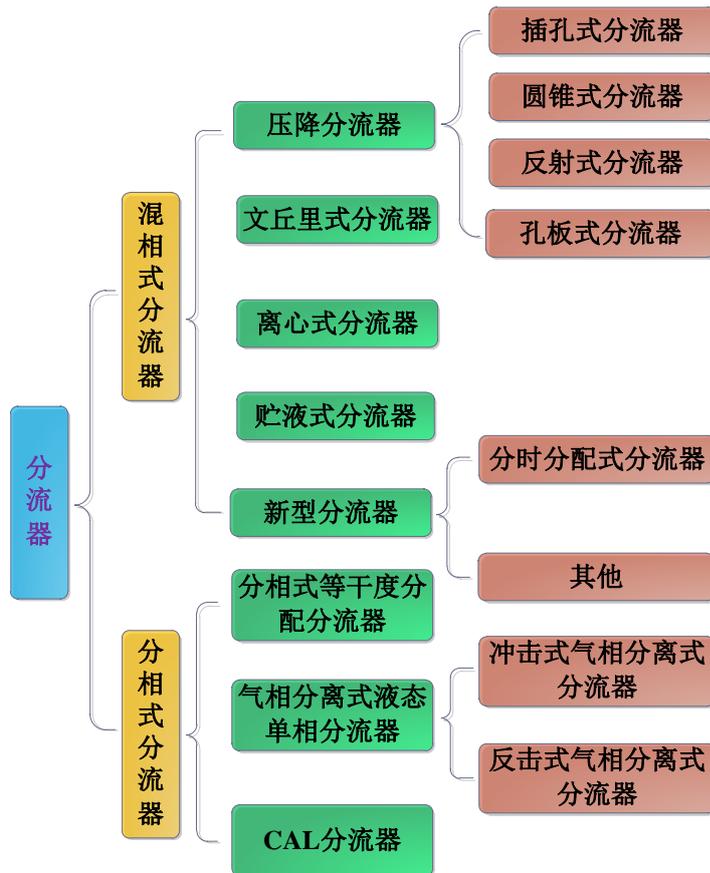


图 1-3 分流器分类图

Fig.1-3 Classification diagram of distributor

1.2.2 分流器分流原理

1.2.2.1 混相式分流器分流原理

混相式分流器采用“先混合、后分流”的分流原理，即在上游设置混合装置，通过增加气液两相制冷剂的扰动来使制冷剂充分混合，然后再供给干式蒸发器各支路，从而实现等干度、等流量分配^[104]。

目前，混相式分流器主要采用的方法是降压增速法（加速管、缩扩喷嘴、节流孔板和节流毛细管）和离心力法（转鼓、转轮、半椭圆叶片和涡轮叶片），但这些方法会导致阻力的显著增加^[22]。

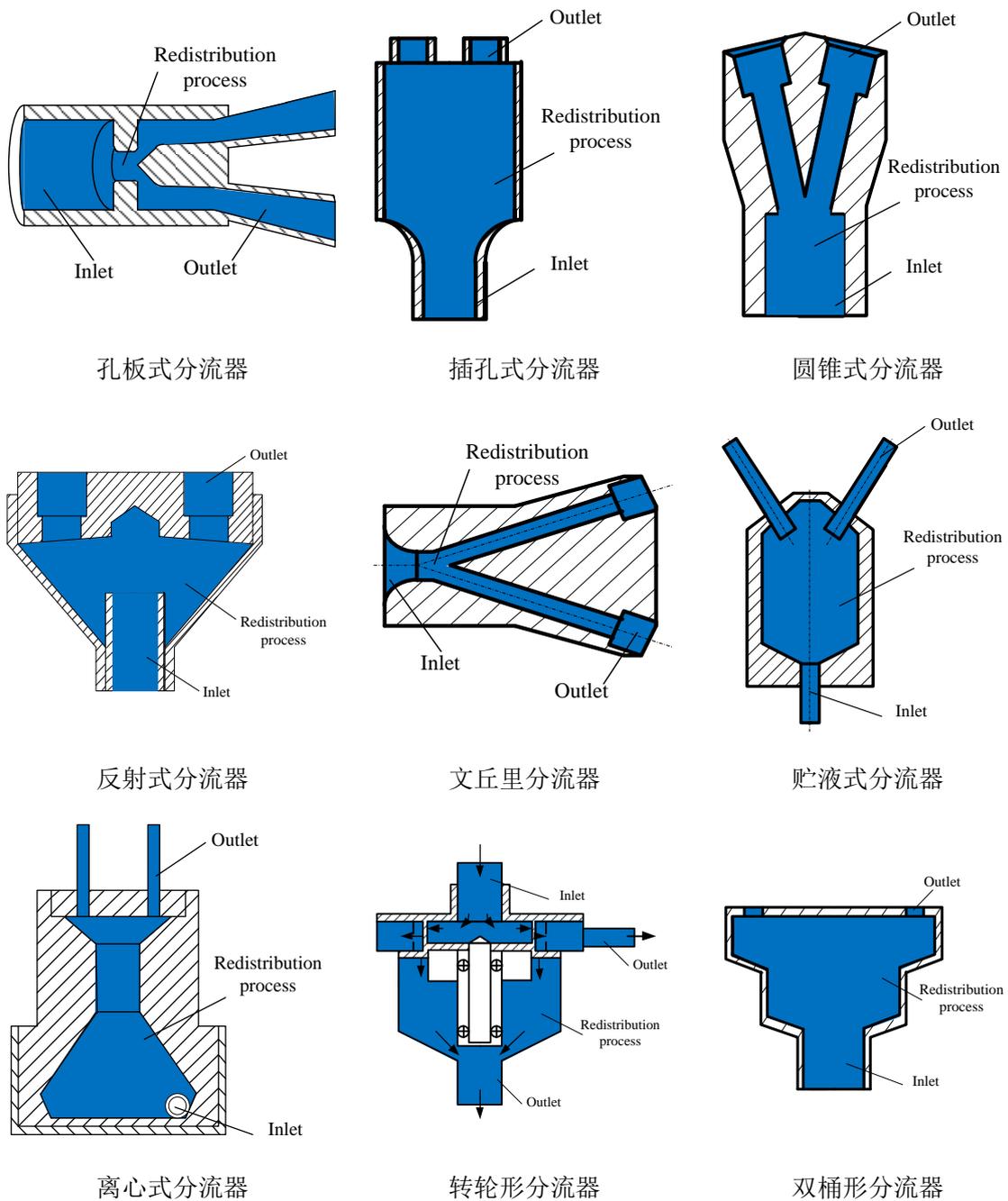


图 1-4 混相式分流器

Fig.1-4 Mixed-phase distributor

1.2.2.2 分相式分流器分流原理

分相式分流器采用“先分流、后混合”的分流原理，目前有两种实现“先分流、后混合”的途径：

- (1) 将气液两相流的均匀分配转化为单相流的分配，再进行混合进入各个支路

[63],

(2) 将气液两相流中的气液完全分离, 只供给蒸发器液态制冷剂, 因为蒸发器的制冷量主要是液态制冷剂的潜热换热量, 气态制冷剂的显热换热量较小^[129, 227]。

“先分流、后混合”的分流原理可避免因气液物性不同而造成气液两相之间对分流性能的相互干扰, 从而实现均匀分流^[24]。

目前主要是采用降低速度和利用重力作用促使气液两相流体分离, 尽量避免气相和液相之间的互相干扰^[63]。

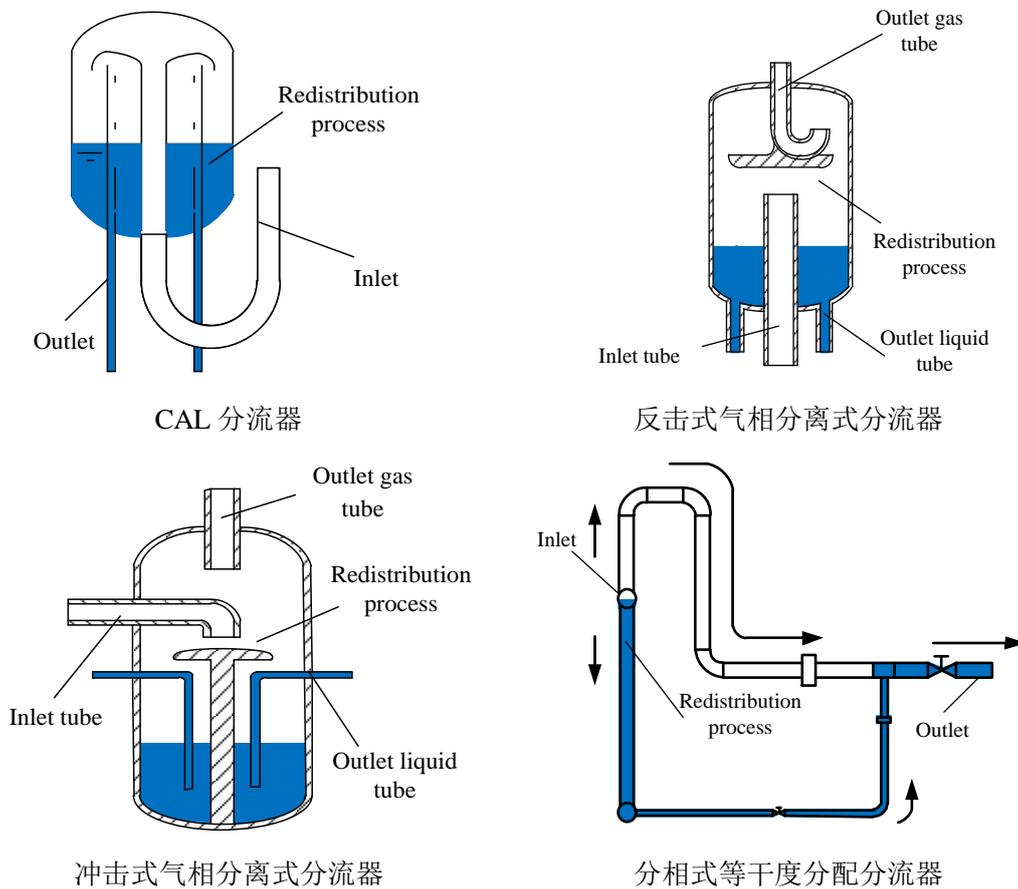


图 1-5 分相式分流器

Fig.1-5 Split-phase distributor

1.3 国内外气液两相流分配研究现状

国内外对气液两相流分配的研究大多集中在 T 型管，集流管和分流器。

其中，T 型管是实现主管两相流分流到支管的通用典型结构，集流管是多个并联的 T 型管组装形成的。T 型管和集流管虽然结构简单、经济集约，但其分流特性受到结构因素的影响，在气液两相流的分配过程中液体和气体选择各自优先路径，导致两条支管（侧支管和直通支管）的容积含气率出现明显差异^[43]，不可避免地出现较严重的相分离现象，导致各支路的干度出现明显的差异^[25, 108]。而且，由于相分离特性复杂，关于 T 型管和集流管的分流特性和相分离控制等方面的研究都不能直接应用在分流器中。

1.3.1 T 型管分流特性的研究现状

国内外学者关于分流特性和相分离控制的研究，大多集中在 T 型管上。

Azzopardi 等人^[26]为改善 T 型管分流特性，将导向板安装在 T 型管内，虽然起到了一定的效果，但只对少部分流型起作用。

Charron 等人^[27]给出环状流的进口流型在垂直进口和水平出口的冲击型 T 型管的相分布数据，研究发现只有在质量分数为 50% 的情况下冲击型 T 型管才有良好的相分流效果。

M.A. Mohamed 等人^[28]对倾斜口双侧冲击型 T 型管中两相流相分离进行实验研究，研究发现质量比的变化会导致单相气体或单相液体在其中一个出口处流动。

Shoham 等人^[29]和 Ahmed Saieed 等人^[30, 31]的实验结果表明支路入口直径比是 T 型管内两相流分布的一个重要参数。

Jun Cao 等人^[5]根据构型理论，用二维数值模型分析连续分叉流体分流器的分配性能。采用水作为工质，对不同分岔角度和入口速度的 Y 形分流器的流量分配均匀性进行定量分析，并给出分布不均的机理假设。

Wen Su 等人^[32]对水平 T 型管中制冷剂相分离进行实验研究，实验中使用制冷剂 R22、R600a 和 R245fa，识别并预测 T 形管入口的间歇流动和环状流动，并建立与压

降耦合的制冷剂分离模型。

J. A. R. Henry^[33]和 Collier, J.G^[34]认为 T 型管分流后两相流相分布均匀性与入口流型密切相关。J. A. R. Henry^[33]对水平放置的 T 型管在三种流型下的相分离控制机理和分流特性进行研究, 研究发现随质量流量增加, 分支管内两相流的干度逐渐接近入口管的入口干度。Collier, J.G 等人^[34]研究水平放置 T 型管的相分离现象和压降特性, 研究发现对于主管直径为 38.7mm、分支管直径为 12.7mm 和 25.4mm 的水平放置的 T 型管, 入口干度的临界值为 0.17, 当入口干度大于 0.17 时, 气体随干度的降低更容易从主管流出。

K. C. Hong^[35]研究入口流型为波状流和环状流时 T 型管中的相分离现象, 研究表明重力对相分离的影响较大。Pei Lu 等人^[36]分析 T 型管中相分离对热循环效率的影响。

Stacey 等人^[37]对进口环状流动条件下小直径 T 型管内两相流分布进行研究。根据实验数据, 接头下游分支的两相流干度与入口干度不相等, 最大干度偏差为 20%。

何奎等人^[38]和陈锦芳^[39]通过可视化实验, 研究入口流型为环状流和弹状流时微型 T 型管中的相分离特性。

E. Wren 等人^[40]采用挡板来控制 T 型管的相分离, 实验结果表明: 在一定条件下, 在两个下游臂之间并没有达到均匀的相分布, 尽管在一定条件下可以抑制相分离的发生。

田敬, 吴明等人^[41]针对冲击型 T 型管气液两相分流时两支路出现干度不相等的现象, 提出了一种有效的改进方案—在三通的两个支路中加装孔板。设计并搭建空气-水回路的实验台, 如图 1-6 所示, 对该冲击型 T 型管进行实验研究, 研究结果表明孔板尺寸取决于入口干度, 当上游流体流动状态发生改变时, 会发生相分离。

Ahmed Saieed 等人^[42]对 T 型管的相分离进行预测, 在波状流和弹状流条件下, 对 5 种不同管径比的 T 型管进行实验研究, 并根据实验数据得到了 6 个数值关联式,

用以评估侧管抽取气、液的流量，以及主管和支管出口的压力。

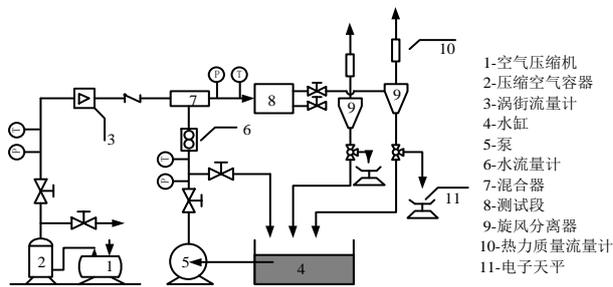


图 1-6 分流性能测试实验系统

Fig.1-6 Schematic diagram of test system for distribution performance

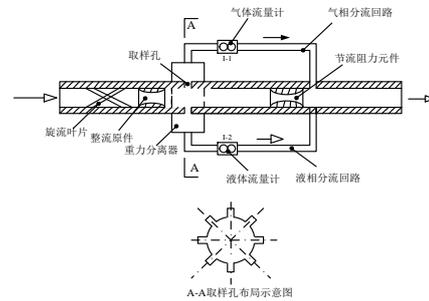


图 1-7 旋流型管壁取样分流器示意图^[48]

Fig.1-7 Schematic diagram of swirled sampling distributor on pipe walls

Emerson dos Reis 等人^[43]通过采用空气-水为实验工质，实验研究弹状流在 T 型管内的流动特性，研究发现 T 型管中液体的累积会导致更多的气体进入侧管，从而引起分流不均。

Kui He 等人^[44]和 Jinfang Chen 等人^[45]分别对微型冲击 T 型管中段塞流分裂特性进行数值研究和实验研究，研究发现 T 型管中相分离的发生会导致蒸发器管道中发生干涸现象。

周云龙等人^[46, 47]采用氮气和不同表面张力的液体（纯水、0.01%SDS 溶液、0.5%SDS 溶液和乙醇）为实验介质，对 T 型微通道内环状气液两相流相分离进行数值模拟和可视化研究，研究管径尺寸、液相表观速度、气相表观速度和液体表面张力对环状流相分离的影响，研究表明：管径尺寸对环状流相分离有较大影响。

曹学文，聂新刚和梁法春等人^[48, 49]设计一种 T 型管结构的取样器—旋流型管壁取样分流器。如图 1-7 所示，分流器有八个均匀布置在管壁周围的取样孔，且取样孔的上游有用于流型调整的旋转叶片。作者采用 CFD 软件分别模拟节流元件尺寸对单相气体分流和气液两相分流的影响，并在多相流试验环道上研究节流元件喉径变化对气相分流系数和液相分流系数的影响。结果表明：旋流取样分流器分配特性受节

流元件尺寸影响显著，前后压力场的变化是分流系数发生变化的根本原因。

Azzopardi 等人^[50]和 Doherty 等人^[51]对 T 型管的相分配的研究进行总结，得出的结论是：在一般情况下，相在交界处的分布并不均匀。相分离的程度取决于入口干度、质量流量、几何形状和流型等因素。因此，气液两相流流经 T 型管时都不可避免地会在下游支管出现相分配不均匀现象。

1.3.2 集流管分流特性的研究现状

集流管是多个并联的 T 型管组装形成的，如图 1-8 所示。

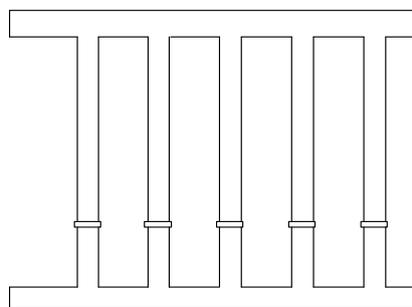


图 1-8 集流管示意图

Fig.1-8 Schematic diagram of manifold

Kim, Nae-Hyun 等人^[52]用 R410A 研究两相混合物在平行流热交换器中的流动分配，测量结果表明液相和气相均分配不均匀。集流管内不均匀分布的增加降低了换热器的热容量，从而降低了系统的能源效率。

S.A.M. Said 等人^[53]研究发现集流管管道内部的流量分配不均匀是由于管道入口处发生静脉收缩所致，为减少集流管中的流量不均匀分配，提出采用孔板和喷嘴，并进行了数值求解。模拟结果表明，采用孔板法可使分流不均减少约 12 倍，采用喷嘴法可使分流不均减少约 7.5 倍。

TeceleMariam 等人^[54]研究了一个或两个入口和 30 个出口分支的水平集流管中空气-水混合物的流动分布。在这些分支中，混合物的干度发生显著的变化。

Agung Tri Wijayanta 等人^[55]以 R22 为实验工质，搭建如图 1-9 所示的试验台，研究下支管水平集流箱中制冷剂的分布，测量进入分支的汽-液相质量流量，提出具有最小分布不均匀性的集流管结构。

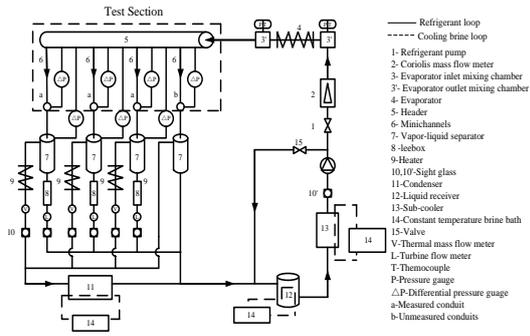


图 1-9 集流管分流性能测试试验台

Fig.1-9 Test bench for distribution performance manifold

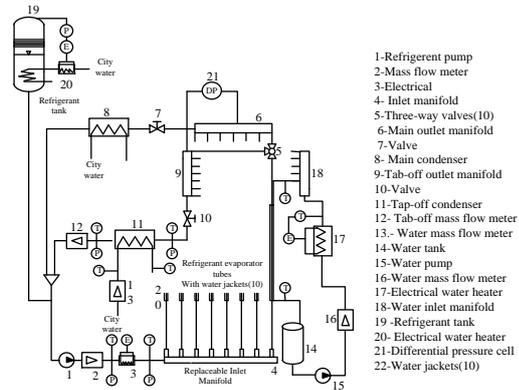


图 1-10 集流管分流性能测试试验台

Fig.1-10 Test bench for distribution performance manifold

Yuguang Jiang 等人^[56]对集流管几何形状进行参数分析，参数分析主要为进出口集流管的流量面积比、进料管的流量与集流管的长径比。研究表明：随着进出口集流管流量面积比的增加，流量分布先改善后减小。王妍等人^[57]对集流管中两相流分配进行可视化实验研究，观测不同入口参数下集流管中两相流的流型变化。

Sivert Vist 等人^[58, 59]搭建如图 1-10 所示的集流管性能测试试验台，研究集流管中的两相制冷剂流量分配。在实验中使用具有 8mm 和 16mm 内径的水平圆管集流管和 10 个向上取向的热交换器管，并且使用 CO₂ 和 HFC-134a 作为制冷剂。相分布结果表明，气相优先分配到第一热交换器管，而大部分液相通过歧管末端的管离开。

Yunho Hwang 等人^[60]对集流管入口位置、集流管数量、支管数目、支管间距对集流管分流特性的影响进行了研究，并采用可视化手段研究蒸发器水平管和垂直管内 R410A 的流量分布，研究发现：集流管入口位置对液相制冷剂的流量分布影响很大，支管数目对不同集流管入口位置下对制冷剂流量分布具有不同的影响。Nae-Hyun

Kim 等人^[13]以空气和水为实验工质，研究其在圆集管连接的 10 根扁管中的分布，研究发现集管中的气液两相流型为环状流时流量分配最均匀。

Marchitto 等人^[61]研究有 16 个垂直出口的圆柱形水平集流管内的两相流分布，测试操作条件、集流管通道分配面积比和入口孔板的影响。实验结果表明，只有当气相或液相被淹没时，才能接近均匀分布。实际上，这几乎是一种单相流动分布。然而，在更广泛的参数范围内，不均匀的相分离问题仍然严重。

1.3.3 分流器分流特性的研究现状

国内外学者和科研人员对分流器分流特性和相分离控制方面做了大量的研究工作。

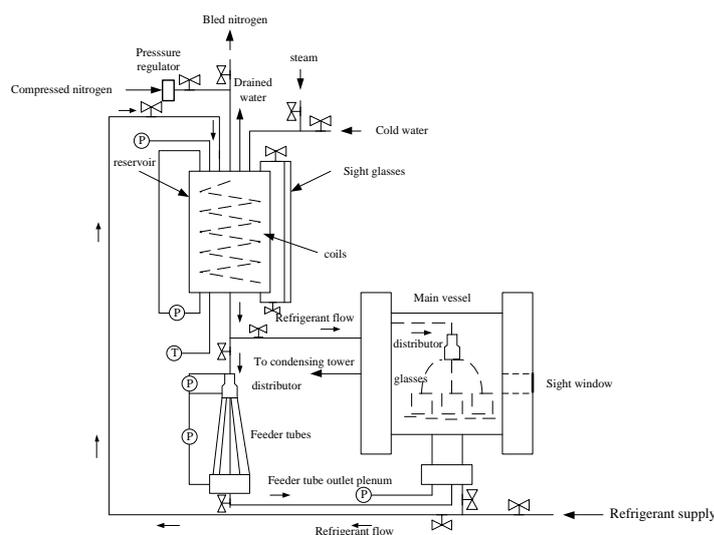


图 1-11 分流性能试验台原理图

Fig.1-11 Schematic diagram of experiment rig for distribution performance

Sheit Sheng Chen^[62]为评价蒸发器用分流器的分流性能，建立一个用以预测流体分布的解析模型。以氮气-水为实验工质，搭建一个如图 1-11 所示的实验装置被用来测试分流器的分流性能，实验研究安装方向、负载条件、制冷剂过冷度和给进液管长度对分流器分流性能的影响。结果表明：进液管长度是控制流量分配的有效参数。

分流器的安装方向、负载条件和制冷剂的过冷度对测试条件范围内的流量分布没有影响。基于 Baroczy 两相流模型和流体力学基本理论，建立制冷剂流动模型。为实现该模型，提出相应的算法，经实验验证：只要流体在进液管处不堵塞，建立的模型成功地预测了在不同条件下的流量分布。

王俊德^[63]认为增压喷嘴分流器（也称文丘里分流器）只有在混合物的流速接近声速时才能均匀混合，但多次实验表明无论怎样力求达到制造工艺的精确性，都对提高文丘里分流器的分流特性作用很小。与文丘里分流器相比，采用通过减速使气液两相混合物分离，使气、液单相分配之后再混合的 CAL 分流器（如图 1-12 所示）可以使冷量提高大约 7%。

黄东和袁秀玲^[64]对文丘里分流器和 CAL 分流器的压力损失，变工况性能，蒸发器制冷量及换热系数和保存质量进行比较分析，结果表明 CAL 分流器具有储液器和分流器的功能，不需要使气液混合均匀分配，而是气液分离后，在结构上保证分流均匀。

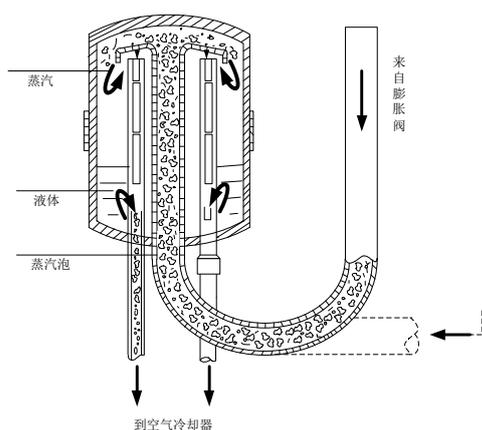


图 1-12 CAL 分流器原理图

Fig.1-12 Schematic diagram of CAL distributor

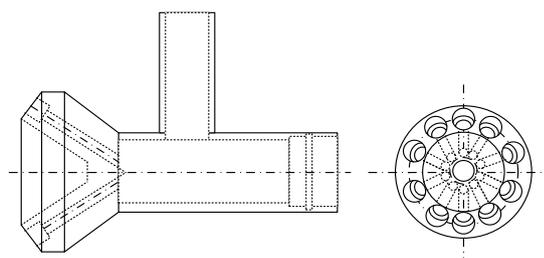


图 1-13 热氨融霜分流器

Fig.1-13 Distributor with thermal ammonia defrosting function

翁建庭等人^[65]对不同工况下节流孔板和毛细管的流动特性以及膨胀阀入口液体

温度对制冷剂流动特性的影响进行实验研究，总结出完整的节流式分流器的选择和计算方法，为节流式分流器的设计提供可靠依据。

高利伟^[66]指出制冷剂的高流速对于分流器能否分流均匀起到了非常重要的作用，并且分流器的孔板和毛细管的规格是分流器能否按照工作的关键因素。为提高气液两相流流速，可在分流器入口端都增设孔板，利用孔板的压力降使制冷剂降压增速，并且在孔板后设置起分流作用的锥体，这样流出膨胀阀的气液两相流被均匀地分配到锥体旁边的各路流程孔中，通过分流器后端毛细管的沿程阻力保持了这种混合状态的平衡^[66]。同时，作者根据热氨融霜的制冷系统的特点，设计了一种新型分流器，如图 1-13 所示，即在分流器上设置旁通管路，从而达到热氨融霜的效果，又可实现均匀分流。

张珺敏^[67]通过研究发现，造成空气源热泵机组在制热工况下出现频繁结霜 / 除霜现象、制热能力变差以及可靠性下降等问题的主要原因之一是分流器的设计不合理和选型不当。作者介绍并分析离心式分流器、文丘里分流器和孔板式分流器（又称喷嘴型分流器），认为孔板式分流器是最佳的选择。因此，作者利用空气源热泵机组测试台，对孔板式分流器进行了研究和改进。研究表明：孔板式分流器的孔板设计的合理设计可有效改善机组的制冷剂分配特性，并提高空气源热泵机组的制热性能。与应用原分流器的系统相比，采用孔板式分流器的系统的名义制冷量提高了 4%，除霜周期由原来的 90 分钟提高到 180 分钟。

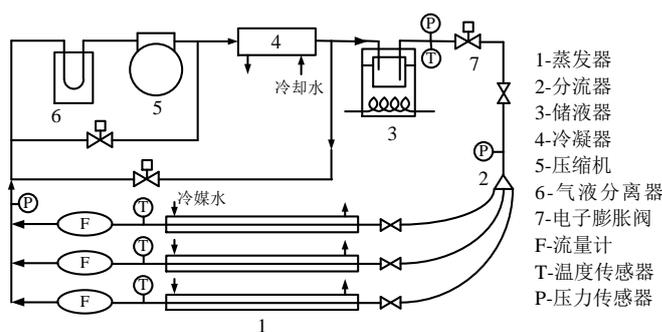


图 1-14 测试装置制冷系统原理图

Fig.1-14 Principle diagram of refrigeration system of test unit

梁俊杰，田怀璋等人^[68]搭建测试装置制冷系统实验台（如图 1-14 所示），研究蒸发器各支路中制冷剂的分配情况，结果表明，即使上流流体混合均匀，如果蒸发器各支路之间存在高度差和阻力不一致，仍会造成制冷剂分流不均。作者根据上流流动状态和下流阻力不一致之间的影响规律，提出了一种新的分流器设计方法，以减少或消除由此引起的分流不均，提高蒸发器的换热效率。

董续君等人^[12]搭建分流器分流性能试验台并进行实验研究，借用统计学相对误差的概念引入分流器性能评价指标，分别从分流器结构、质量流量、安装角度和进液管长度等方面考察和分析空调中分流器的分配特性和噪音特性。研究表明：分流器越接近垂直安装，制冷剂流速越大，流型接近雾状流时，分流器分流效果就越好。同时，作者对改进分流器分流特性的设计进行探索，研究发现可通过调节分流器孔径和利用截面变化来增加紊乱程度，实现制冷剂流型转变为雾状流，促进分流器分流的均匀混合。为减小分流器进液管折弯对分流器分流性能的影响和减小分流器的噪音，作者提出了一些措施。

梁俊杰^[69]为建立制冷剂分流器性能评价体系，开展分流器性能评测体系的研究。作者认为全面的分流性能评估体系必须同时考虑分流性能和噪声性能，其中，分流器分流性能评价体系由分流一致性、分流稳定性、分流重复性和冷量偏差构成。

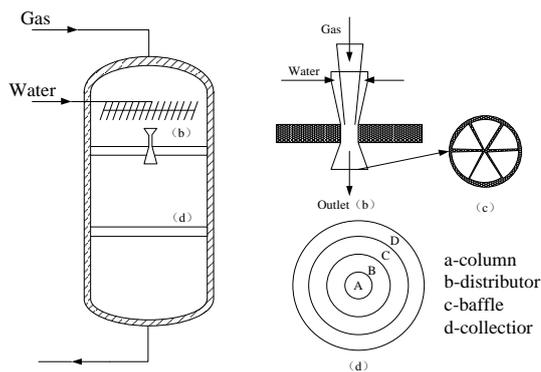


图 1-15 冷模实验装置及分布管的结构简图

Fig.1-15 Schematic of venturi distributor and cold model experimental apparatus

程锦承和程振民等人^[70]在权衡分流器内两相流流型和压降两者相互关系的基础上，根据文丘里管渐缩渐扩的特点，设计了文丘里气液分流管，在底面出口采用挡板来阻挡中心区域的流体以实现液体均匀分配，如图 1-15 所示，具体的原理详解文献[70]。运用 CFD 模拟和试验验证相结合的手段研究喉管段直径大小和气液流量对文丘里气液分布管分配特性的影响，并用 weisman 图^[71]对喷管段基本流型进行分析。结果表明：当分布管喉管段直径较小时，在喉管段气液两相流形成分散流，改善分配性能。

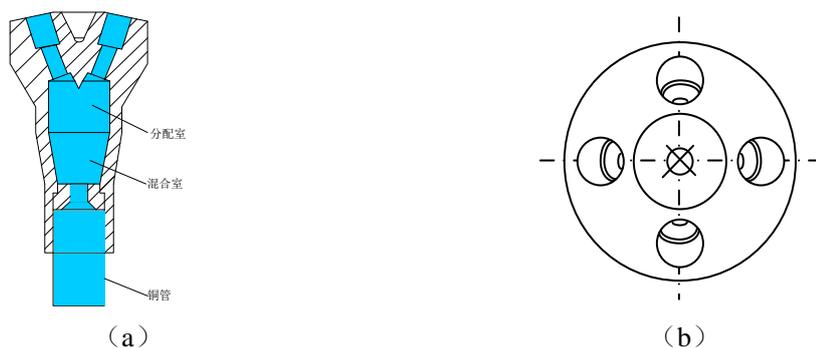


图 1-16 分流器示意图

Fig.1-16 Schematic diagram of distributor

黄晓清等人^[14]提出 4 种在不增加生产制造成本的情况提高空调机组室内机蒸发

器的换热效率的新思路。阐述分流器结构的合理设计可以使换热器中各盘管支路分流均匀，并说明弥散雾状流是提高分流性能追求的最佳流型。根据弥散雾状流的特性，提出一种如图 1-16 所示的分流器。

王志毅等人^[72]通过实验研究分析发现，风冷螺杆机组出现分流不均的主要原因包括以下两点：换热器的进风量不均匀和各换热支路制冷剂流不均匀。通过调整分流器的混合腔内径和调节分流器孔径发现，气液两相流达到雾状流时分流器的分流性能达到最佳。安装达到雾化流的分流器的系统 COP 比原有系统 COP 高 24.5%。

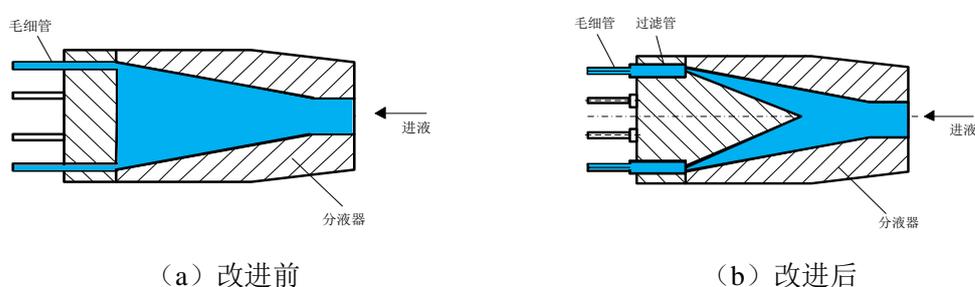
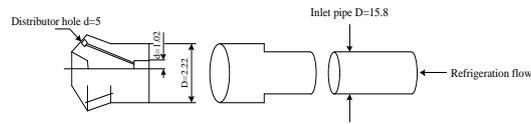


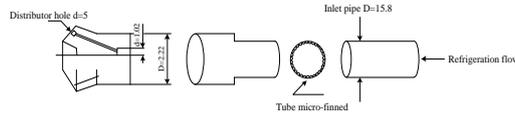
图 1-17 分液头结构示意图

Fig.1-17 Schematic diagram of the structure of the divider head

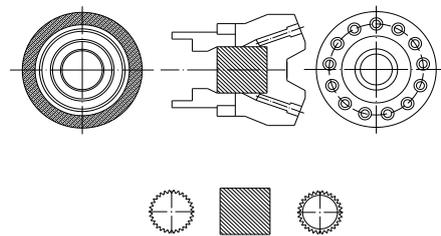
李泽芳和苏庆勇^[73]针对采用毛细管节流的小型单元式空调机制冷系统，介绍分液头分流性能对空调整机性能的影响；为解决分液头与毛细管之间存在的局部堵塞问题，对节流毛细管的分液头改进并进行实验研究。改进设计方案是在毛细管与分液头焊接前增加了过渡管，分液头内部设计减少流体局部阻力损失的导流锥面，如图 1-17 所示。研究表明，改进前的分液头的制冷剂流量最大偏差为-36.9%，各路毛细管间的最大流量差值高达 16.5kg/h，分液头进出口压差为 15.3kPa；而改进后的分液头的制冷剂流量最大偏差仅为 4.3%，各路毛细管间的最大流量差值仅为 2.6 kg/h，分液头进出口压差为 3.2kPa。由此可见改进后的分液头性能更好，分液更加均匀。



(a) 光管连接的文丘里分流器



(b) 内部螺旋形微翅片管连接的文丘里分流器



(c) 内部带滚轴的分流器

图 1-18 分流器示意图

Fig.1-18 Schematic diagram of distributor

Maoyu Wen 等人^[15]选择三种不同结构的分流器：光管连接的文丘里分流器（如图 1-18a 所示），内部螺旋形微翅片管连接的文丘里分流器（如图 1-18b 所示）和内部带滚轴的分流器（如图 1-18c 所示）。搭建如图 1-19 所示的分流器分配性能测试试验台，对改善 R22 制冷系统的分流器中两相制冷剂分流特性进行实验研究。在实验中，展示和讨论了两相流分配对分流器出口的外壁温度和外壁压力，冷却能力和性能系数 COP 的影响。为了理解分流器中两相制冷剂的流量分配，在分流器的出口歧管处进行流动可视化。结果发现，在同一条件下，内部带滚轴的分流器和内螺旋微翅片管相连的文丘里管的流量偏差分别约为 23.5% 和 40.8%，低于光管连接的文丘里分流器的流量偏差。内部带滚轴的分流器和内螺旋微翅片管相连的文丘里管的 COP 分别比光管连接的文丘里分流器大约高 6.3% 和 12.2%。因此，内螺旋微翅片管相连的文丘里管具有最佳的分配效率，并且具有最佳的性能系数，其次是内部带滚轴的

分流器，最后是光管连接的文丘里分流器。

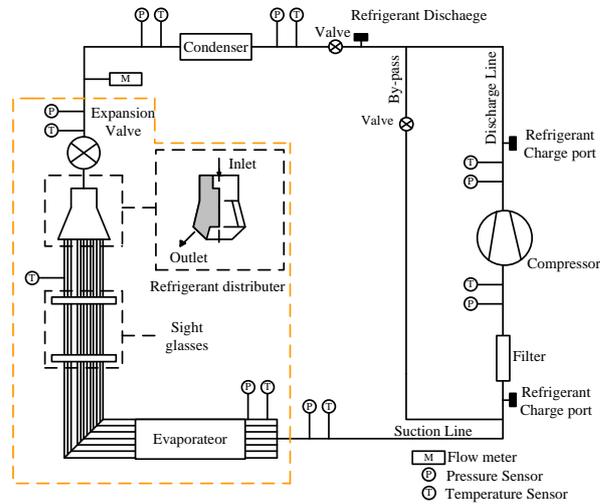


图 1-19 分流性能试验台原理图

Fig.1-19 Schematic diagram of experiment rig for distribution performance

仇嘉，魏文建等人^[9]采用 CFD 数值模拟的方法，研究分流器在单相流动和两相流动时的分流性能；通过对比有无分流器作用时的数值模拟结果，分析分流器对板式换热器并联管道中流量均匀分配的作用；通过改变板式换热器的并联管道数，流体流量和进口干度，研究其对分流器分流特性的影响。研究表明：分流器在单相流动和两相流动中均显著提高了流体分配的均匀性，有效改善板式换热器流体分配特性。并联流道数对换热器流道间流动分配均匀性的影响要大于工作流体流量变化的影响，当并联流道数为 50 时，气液两相和液相的平均流量偏差分别为 5.72% 和 7.12%。

M. Nakayama 等人^[74]提出一种新型分流器，以改进蒸发器的传热性能，从而提高分体式空调的冷却能力。这种分流器由毛细管混合空间和到每个蒸发器支路的两相流分隔空间组成，如图 1-20 所示。搭建如图 1-21 所示的分流器分流性能测试试验台，研究质量流量，干度和安装角度对分流特性的影响。此外，测量安装新型分流器的空调的冷却能力，并与传统分流器进行比较。实验结果表明，不管质量流量，

干度及倾斜角度如何，新型分流器都能将制冷剂两相流均分为每个蒸发器路径。新型分流器的最大冷量偏差比传统分流器减小了 20%~33.3%，采用新型分流器的空调机组的制冷量比采用传统分流器的空调机组的质量量高 1.2%。



图 1-20 压降型分流器示意图

Fig.1-20 Schematic diagram of pressure drop distributor

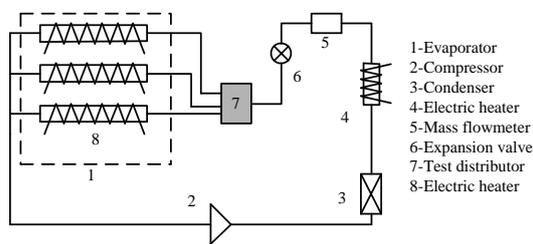


图 1-21 分流性能试验台原理图

Fig.1-21 Schematic diagram of experiment rig for distribution performance

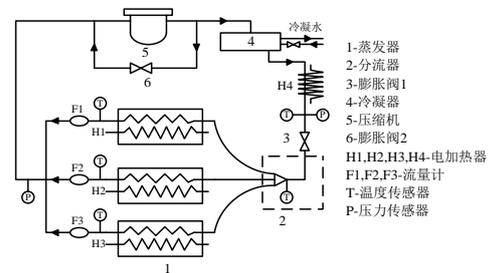


图 1-22 分流性能试验台原理图

Fig.1-22 Schematic diagram of experiment rig for distribution performance

高原，田怀璋等人^[10, 16, 75]搭建了分流器分流特性实验台（如图 1-22 所示），分析发现蒸发器各支路阻力不一致和气液两相制冷剂混合不均匀是引起蒸发器各支路供液不均匀的两个重要原因。并指出：通过调节分流器压降或改进蒸发器可以解决各支路阻力不一致的问题，而气液两相制冷剂混合不均匀需要改进分流器的入口管

道和混合结构。因此，根据气液两相流理论，在传统的压降型分流器的基础上提出一种性能更好的新型分流器，并进行了分流器分流性能的实验研究。传统的压降型分流器和改进的压降型分流器如图 1-20 所示，与传统的压降型分流器相比，改进的压降型分流器有以下两点改进：（1）毛细混合管代替孔板完成两相流动的均匀混合，（2）改进的压降分流器的进口管径比传统的压降型分流器的更小。作者利用统计学中标准误差的概念来整理实验数据，研究结果表明：改进的压降型分流器的分流特性更佳。分流器的安装角度和入口干度是影响分流器性能的主要因素，而入口压力几乎没有影响。

梁俊杰，田怀璋和高原等人^[11]对改进型分流器的分流特性进行实验研究，分析了安装角度、流型、液相表观质量流率与流量偏差之间的关系。实验研究和分析表明：使分流器的安装倾斜角度最小可有效提高分流器的分流性能。分流器结构的改进方向应该是使分流器中的两相流流型转变为雾化流。

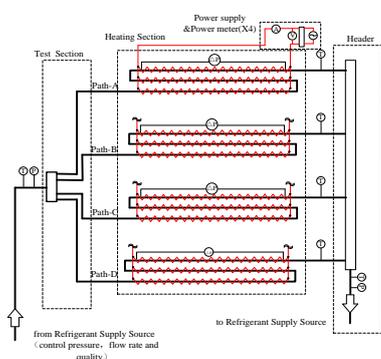


图 1-23 分流性能试验台原理图

Fig.1-23 Schematic diagram of experiment rig for distribution performance

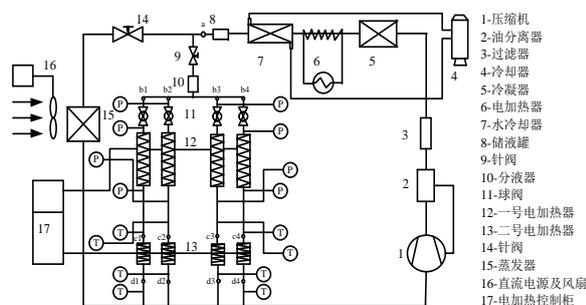


图 1-24 分流性能试验台原理图

Fig.1-24 Schematic diagram of experiment rig for distribution performance

Shun Yoshioka 等人^[76]提出一种非常简单的试验方法，通过测量各支路的压降和传热量，可以得到分流器每根支管的制冷剂干度和流量。搭建实验台（如图 1-23 所

示)对储液型分流器进行测试,并采用田口法^[77]对贮液式分流器进行结构优化,通过优化分流器结构参数,使分流性能得到提升。同时采用可视化手段,对实际的两相流流型进行观察,发现在分流过程中液体会回流并在底部沉积,被后流入的气液带起,形成循环,有利于气液的混合。

韩清和张驰等人^[25, 78, 79]搭建分流器性能的测试实验台—R410A 压缩式制冷系统(如图 1-24 所示),通过 CFD 模拟和实验研究相结合的方法分析了入口流体流动状态参数、几何结构和安装角度等对压降式分流器、离心式分流器和贮液式分流器分流性能的影响,研究发现贮液式分流器相比于传统分流器有压降小,分液效果好以及能适应不同质量流量、入口干度以及安装角度的特点,具有深入研究的价值。因此,采用田口方法对贮液型分流器进行结构参数优化及灵敏度分析,优化的参数有筒体内径,筒体高度,入口管管径和毛细管插入深度等。结果表明:敏感度排序为:筒体直径>筒体高度>进口管直径。

Chi Zhang 等人^[80]通过实验研究不同工况下几种非结构因素、入口管结构、安装方向和毛细管长度对贮液型分流器的影响,开发了一种基于 R410A 空调器测量制冷剂质量流量和干度的实验装置。研究发现在分流器之前由入口管引起的影响很小,安装方向造成的影响很大。

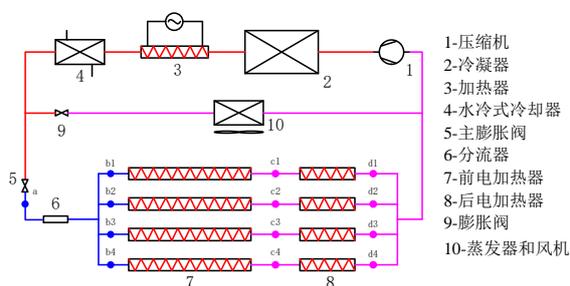


图 1-25 分流性能实验台原理图

Fig.1-25 Schematic diagram of experiment rig for distribution performance

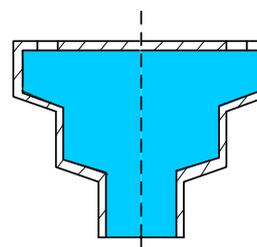


图 1-26 双筒型分流器型原理图

Fig.1-26 Schematic diagram of double-barrel distributor

Chi Zhang 等人^[18]为替代贮液式分流器，提出了一种如图 1-25 所示的双筒型分流器，这种分流器减小了弯管对气液两相分离的影响。搭建如图 1-26 所示的分流器性能测试实验台，采用实验测试和 CFD 数值模拟相结合的手段评估分流性能并理解内部流体动力学流动行为，发现具有适当参数的双筒分流器性能更好。通过田口方法研究并分析顶桶直径，顶桶高度，底桶直径，底桶高度，质量流量和干度等参数的灵敏度，为进一步优化双筒型分流器提供了依据。影响范围从最大到最小依次为：质量流量>底部桶高度>干度>顶部桶高度>底部桶直径>独立的顶部桶直径。优化的双筒分流器具有适当的顶部和底部桶直径以及更大的底部和顶部桶高度。

Jun-Hyeung Kim 等人^[81, 82]分别对分流管不同管径和不同管长、分流器空隙率不均匀以及蒸发器风量不均匀而导致的蒸发器各支路供液不均对 R410A 热泵系统性能的影响进行实验研究，并研究这些因素对系统性能的综合影响。研究表明：分流管管径的影响远大于分流管管长的影响，而且二者均会导致质量流量降低、压降增加以及各支路流量不同。分流器空隙率不均匀会引起质量流量下降、各支路压降不一致以及系统性能下降。而空气分布不均引起各个流路的质量流量下降大致相等，压降有所降低，而且制冷量也大幅下降。

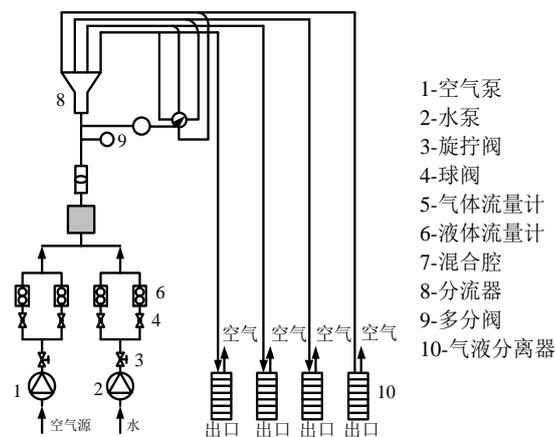
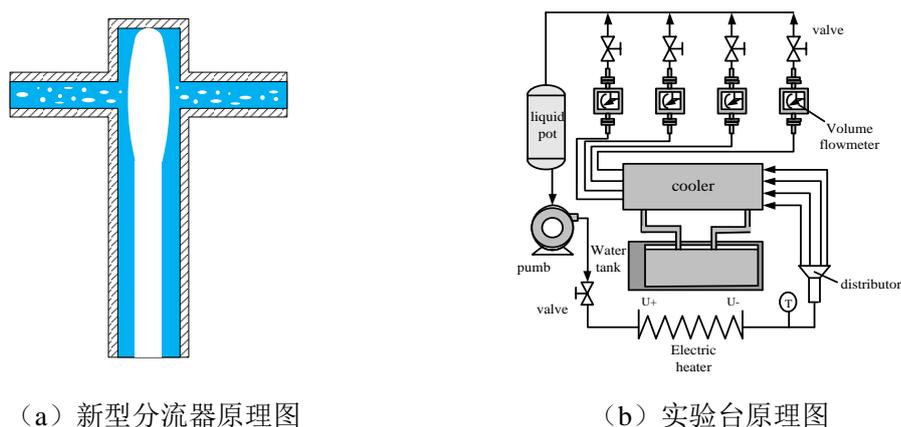


图 1-27 分流器性能测试原理图

Fig.1-27 Principle diagram of performance test for distributor

丁国良团队^[19, 83-91]对小管径空调分流器的分流特性和结构优化进行了深入研究。设计并搭建如图 1-27 所示的采用空气/水模拟制冷剂的分流器性能测试实验台。分别在额定工况和全年能效消耗效率 APF (Annular Performance factor) 指标下, 通过实验分析两相流体流量和安装角度对插孔式分流器^[83, 88, 92]、圆锥式分流器^[84, 85, 90]和反射式分流器^[84, 87]的分流性能的影响。并通过 CFD 模拟对这三种普通压降型分流器结构参数进行优化, 之后对改进后的分流器进行实验。为评价分流器的分流效果, 定义采用总流量偏差率为不均匀度, 并采用 weisman 公式^[71]来判断两相流流型。但不同制冷剂具有不同的物性, 导致气液速度, 空泡系数等差异, 而这些差异都会影响到对分流器的设计。



(a) 新型分流器原理图

(b) 实验台原理图

图 1-28 新型分流器和试验台的原理图

Fig.1-28 Schematic diagram of novel distributor and experiment rig

因此, 丁国良团队^[89]为得到一种对不同制冷剂通用的分流器优化设计结构, 采用 CFD 模拟研究制冷剂 R22、R410A、R32 和 R290 在不同安装角度下在分流器中的分流特性的变化规律。结果表明, 对于高气液密度比的制冷剂(R32、R410A), 在垂直安装条件下, 插孔式分流器的分配效果最好。对于气液密度比小的制冷剂(R22、R290), 圆锥式分流器分配效果最好。基于理论分析和分流器特性的变化规律, 提出

了在实际安装条件下适用于四种制冷剂的分流器结构的总体优化设计方案，并与改进前的分流器性能进行了比较和验证。比较结果表明，改进的分流器结构可以提高分流器的分配性能。

插孔式分流器、圆锥式分流器和反射式分流器虽然且其具有结构简单、制造容易、成本低等优点，并广泛应用于空调系统中，但这些类型的分流器的体积很大，导致室内制冷剂的速度要低得多。低速制冷剂容易发生气液分离，导致大气泡在支流室内流动。分流器通常安装在空调机狭小的空间内，导致重力对气相和液相的不对称影响，从而使分流器内气泡上升，液相下降^[93]。由于重力的不对称作用，气泡流动成为一种不可控、不规则的流动形态。其结果是，当在重力方向上对称地安装两个通道分流器时，这些分流器仅适合于将制冷剂分成两路。对于不对称安装或多路径分流器，会出现不均匀的分布。因此，Guoming Wu, Tao Ren 和 Guoliang Ding 等人^[3]为解决空调多支路换热器中制冷剂分配不均匀的问题，基于环状流是对均匀分流最有利的流型，提出了一种均匀分配环状流的新型分流器，如图 1-28a 所示。提出了详细的设计方法，包括用于计算入口管几何形状以构造环形流的方法，以及用于设计入口管和出口管之间的连接结构以均匀分配环形流的方法。采用透明材料制作新型分流器，设计并搭建一个实验台来观察分流器内的流型，并测试所提出的分流器的分配性能，试验台原理图如图 1-28b 所示。实验结果表明，在任何安装条件下，所提出的分流器在分配性能上都比传统的分流器有很大的优势，并且随着流量的减小，这种优势更加明显。所提出的分流器在水平和垂直安装下的分布不均匀性分别比最常用的锥形分流器低 19.8%和 60.9%。

Zhe Zhang^[94]和 Anjun Jiao^[95]提出了一种在分流器中增加互补流体腔的设计的理念，实验研究分流器结构参数对板翅式换热器流量分布的影响，得到在不同的分流器结构参数下无量纲流量分布参数和雷诺数之间的关系。实验研究表明：通过对分流器结构参数的优化设计可以有效的改善换热器的流量分配特性。

Azridjalaziz 等人^[96]使用水和空气作为两相流的实验工作流体，实验研究分流器倾角对分流器中两相流的流型和分布行为的影响。结果表明，在空气和水的高表面速度下均可实现均匀分布。

Paulo J. Gomes 等人^[98]利用 CFD 模拟方法，研制了一种如图 1-29 所示的新型分流器。分流器由一个空心部件组成，其中有一个使流体均匀分布的实心圆锥形部件。分流器的出口位于实心圆锥形部件之后的径向位置。作者用聚四氟乙烯和不锈钢制作样机，并进行实验测试。研究结果表明：这种新型分流器的最大流量偏差平均低于 3%。

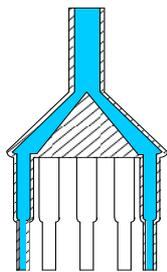


图 1-29 新型分流器示意图

Fig.1-29 Schematic diagram of novel distributor

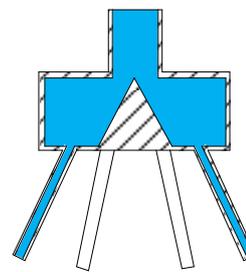


图 1-30 新型分流器示意图

Fig.1-30 Schematic diagram of novel distributor

M. EKREM CAKMAK 等人^[93]设计了一种分流器，由供液管，孔板和分配管组成，如图 1-30 所示。通过 CFD 模拟计算分流器内制冷剂的流动特性，以确定用于供给蒸发器各个通道的制冷剂。计算分流器内制冷剂的速度，空隙率和总压力，并与从实验获得的数据进行比较，绘制了分流器内的两相流状态图，并探讨了两相流在分流器出口处的影响。

王彦坤^[99]实验研究分流管对蒸发器中制冷剂流量均匀性的影响，研究表明，分流器将气液两相制冷剂混合均匀的程度，蒸发器盘管工艺结构造成的流动阻力差异以及蒸发器盘管的高度差异都会导致蒸发器盘管中的流动阻力和制冷剂流量不同，

其直接结果是蒸发器换热效果差，制造成本增加。

袁培，孙冰等人^[100]调研发现由于在制造公差或污垢引起的管径变化对制冷剂分配不均匀度进行量化分析方面的相关研究较少。因此，作者采取控制变量法进行数值模拟，对不同分流器管道管径对气液两相制冷剂分配均匀性的影响进行研究。研究表明：所研究的分流器支管管径对制冷剂流量分配有较大影响。

杨杰^[101]研究分流器对翅片管式蒸发器性能的影响。针对分流器分流性能改善提出了 3 种方案，分别为增加带有液风险回路分配管的长度，选择合适尺寸的节流孔板和在分流器进口增加筛片。并在 AHRI 340/360 (I-P) -2005 规定的额定制冷工况下对根据上述改进方案改进后的分流器进行性能研究。引入蒸发器出口平均过热度，蒸发器分配不均匀度和过热度标准方差作为分流器的分流性能评价指标。结果表明，增加带有液风险回路分配管的长度方案和选择合适尺寸的节流孔板方案可以有效改善蒸发器的制冷剂分配均匀性，并且能提升机组性能。而增加筛片在此机组中没有明显改善效果，但是已经在北美机组中得到了应用。

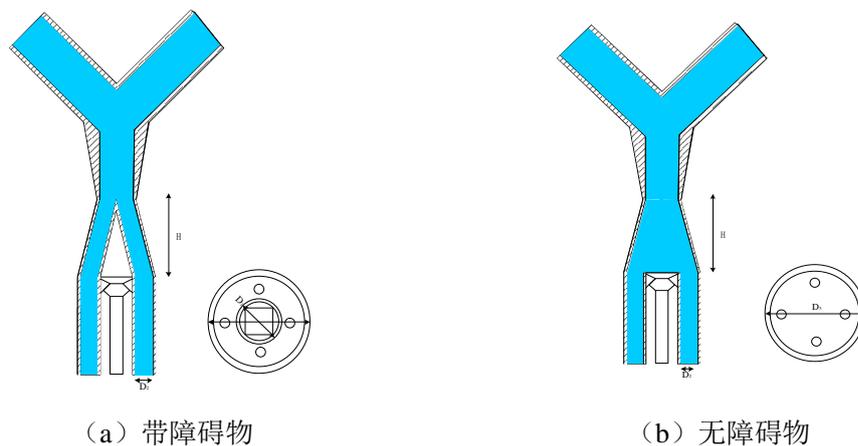


图 1-31 锥形分流器示意图

Fig.1-31 Schematic diagram of cone-type distributor

柳士开等人^[102]采用 Fluent 软件对管式分流器性能进行数值模拟，通过对比直口

管分流器、侧圆孔同方向的斜口管分流器在有、无碎流板时的流体分布均匀性和压降来判断这三种分流器的分配特性。结果表明：带有碎流板的分流器的分配性能显著提高，但分流器的压降增加。

Mariana Garcia 等人^[103]为将数值模拟应用于气流分流器的设计过程中，并提供乙醇和向日葵油单相流动和两相流(乙醇-向日葵油流)相分布的数据，对生物柴油的流量和相分布均匀性进行分析。不同分流器(如图 1-31 所示)采用不同的数值方法，包括单相流、多组分流和流体体积(VOF)模拟。基于 VOF 的模型与水流实验数据吻合较好。粘性主导的油流在所有提出的分流器中都表现出良好的分配。

R. F. Stoitsits 等人^[104]认为多相流分流中的一个重要问题是相分离。相分离发生在管道中的分支处；由于多相流具有较大的动量，密度较高的相会倾向于流入直的或者最小偏离的支管中，而密度较低的相会倾向于流入最偏离的支管。管截面上气、液相速度不同和分布不均匀是导致多相流相分离的重要原因，因此，作者提出了“先混合、后分流”的相分离控制方式。

吴裕远, 吴铁晖和陈流芳^[105, 106]回顾两相流体分配结构对气液两相分配特性的影响，指出传统的“先混合，后分配”方法存在缺陷，在改善相分离上有很大的局限性。基于单相流更容易均匀分配的物理性质，提出了“先分配，后混合”的方法，这种新方法更容易达到气液两相均分分配的目的。应用该新方法和新结构于的乙烯冷箱后，其冷端传热温差降低到 3 K。

Hrnjak, Pega S^[107]讨论了在换热器中单向流和两相流条件下分流器到多个微通道的分流情况，认为现有两相分流器的原理可以归结为两种：一种是“先混合、后分流”，另外一种则“先分流、后混合”，这两种相分离控制手段对于数目不多的通道是有效的，但当通道数超过 30 时，制冷剂流量分配就会变得复杂，难以实现均匀分配，从而影响了换热器的性能。

张炳东, 刘丹和王栋^[108, 109]采用“先分流、后分配”的相分离控制方法，提出了

一种新的两相流等干度分配的方法—分相分配法，并根据分相分配法研发了分相式分流器，如图 1-32 所示。作者为考核分流器在各种工况下的分流能力，搭建以空气-水为实验工质的分流器分流性能测试试验台，如图 1-33 所示。通过改变分相式分流器入口的气、液相折算速度，研究分流器对气液两相混合物的分离能力。结果表明：在入口流型为分层流、波状分层流、弹状流、段塞流和部分环状流的情况下，气液两相流体均能在分配元件内得到较好分离，保证在单相或接近单相的状态下进行分配，支路与主路间的平均干度偏差小于 1.6%^[108]。同时发现，气路中携带少量的液滴或者液路中携带少量气泡，都不会影响分相式分流器的正常工作。在上部集管中分层流，波状分层流和段塞流的情况下，每个出口分支与入口管之间的最大质量偏差小于 $\pm 1\%$ ，在环形流中小于 $\pm 5\%$ 。

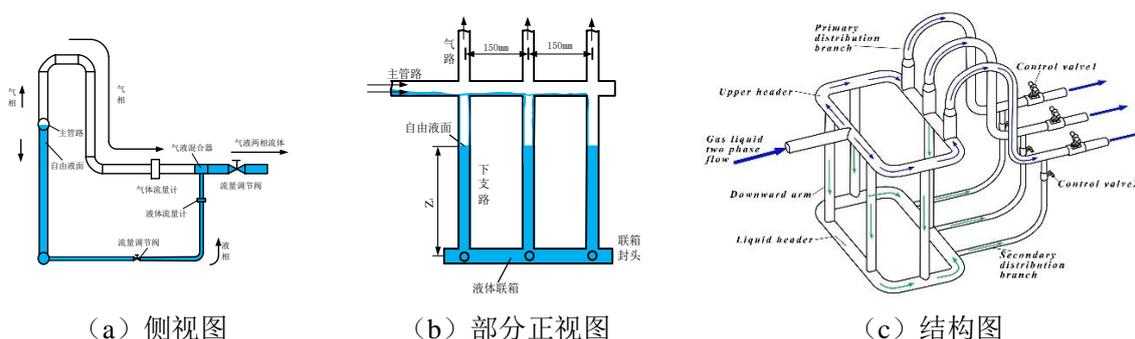


图 1-32 分相式分流器示意图

Fig.1-32 Schematic diagram of split-phase distributor

孙媛等人^[110]认为气液两相流分相分配法计量分离器存在结构复杂、液位难稳定等问题，为克服这些问题，设计了一种如图 1-34 所示的新型气液两相流管束分离器，并采用数值模拟和实验验证的手段分析得到气、液折算速度和入口流型对新型气液两相流管束分离器分离效果的影响。研究表明：在分层流、段塞流和环状流流型条件下，分离器内气液分离效果较好，且分离器内气液相界面保持稳定，维持在分离器中部。

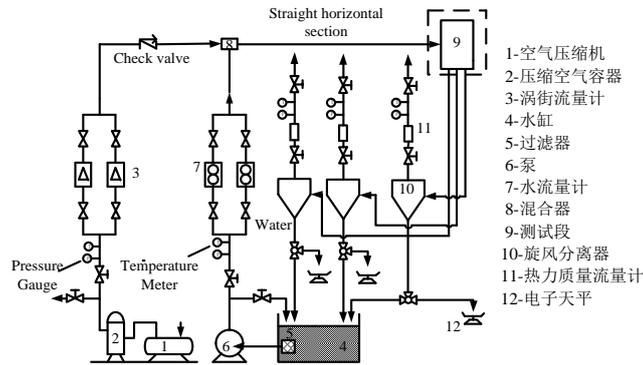


图 1-33 分流器性能测试原理图

Fig.1-33 Principle diagram of performance test for distributor

Pauley J C 等人^[111]申请了一个如图 1-35 所示的气液两相分流器，其分流方法与分相分配法类似，该方法必须采用气液分离系统，从而增加了分流器的尺寸和成本。此外，该装置只能在特定压力和气体质量范围内正常工作。

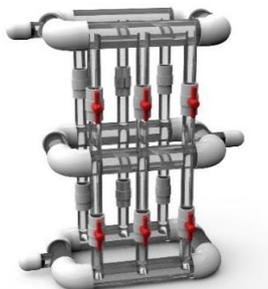


图 1-34 气液两相流管束分离器结构示意图

Fig.1-34 Structure diagram of gas-liquid two-phase flow tube bundle separator

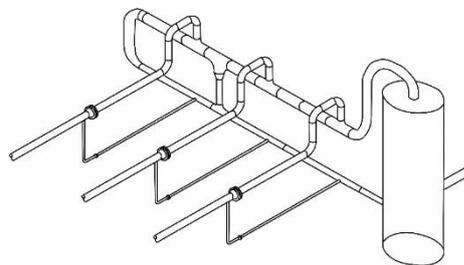


图 1-35 分流器结构图

Fig.1-35 Structure diagram of distributor

袁培，姜国宝等人^[112, 113]为研究采用“先分流、后混合”的相分离控制方法的分流器的分配特性及结构对翅片式换热器的下游翅片区域气液分配均匀性的影响，搭建空气-水分流器性能的测试实验台（如图 1-36 所示）进行实验研究，并使用 CFX 对分流器的分布特性进行数值研究。研究表明：所研究的分流器结构克服了液体流

量偏差比气体大的问题，能够提高气液在板翅式换热器层间翅片通道分配的均匀性。

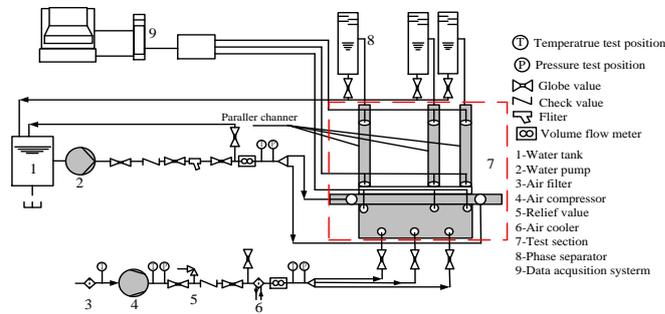


图 1-36 分流器性能测试原理图

Fig.1-36 Principle diagram of performance test for distributor

李焱，李玉星等人^[24]认为“先混合，后分流”的分流方法不能解决在导流翅片中流向突变时气液分离引起的气液两相流体分配不均问题，因此采用“先分配，后混合”的方法提出了一种应用于板翅式换热器的新型分流器，如图 1-37 所示。为保证模拟的多介质实用性，用 **Fluent** 软件分别对以天然气气液混合物和空气-水两相流为工质进行数值模拟，研究气液流量和气液比对分流器分流特性的影响。研究表明：分流器的分流不均匀度随流量的增加而增加，且不均匀度受液相流量的影响比气相大。该新型分流器与以“先混合，后分配”为分配方法的封头^[114, 115]和笛形管^[116]分配结构相比，分配不均匀度减小了一个数量级，有效提高了板翅式换热器的换热效率。

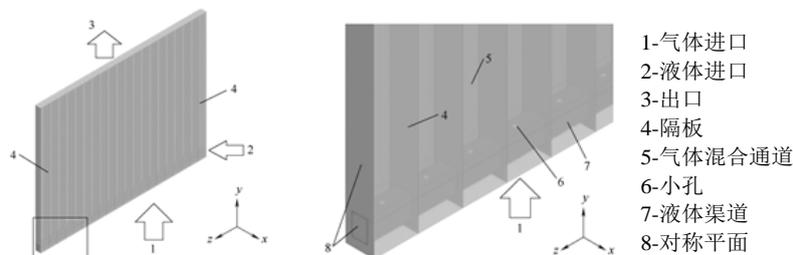


图 1-37 分流器的几何模型结构示意图

Fig.1-37 Schematic diagram of geometric model structure of distributor

之后李焱，李玉星等人^[117]采用 CFD 分别对“先混合、后分配”的传统分配方式（如图 1-38a 所示）和“先分配、后混合”的新型分配方式（如图 1-38b 所示）进行数值模拟。通过分析换热器入口气液流量分布的不均匀度和流量标准方差等评价指标，对两种分配方式的分配性能进行评估。研究表明：相同流量条件下，新型分配方式比传统分配方式的气液分配不均匀度更小。两种方式的气液分配不均匀度随流量的增大而增大。随着液相质量分数增加，传统分配方式的气液不均匀度降低，而新型分配方式的气液分配不均匀度小幅度升高，但新型分配方式的分配不均匀度一直比传统分配方式小。新型分配方式比传统分配方式更能有效地提高板翅式换热器的流体流动分配均匀性。

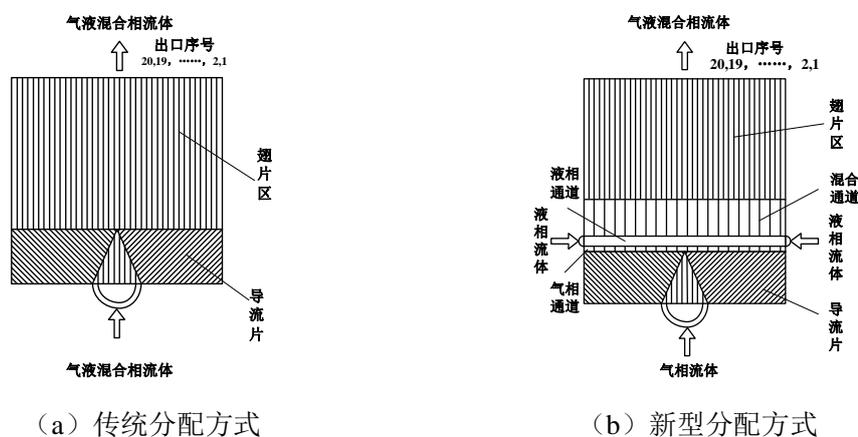


图 1-38 换热器单层通道不同入口方式结构示意图

Fig.1-38 Schematic diagram of different inlet modes for single-layer channel of heat exchanger

G. Li, S. H. Frankel 等人^[119, 120]为研究 CFD 模型在制冷剂分流器中两相流的应用进行研究。为比较 FLUENT 和 PHOENICS 两种商用 CFD 软件^[119]，将 FLUENT5.5 和 PHOENICS 的预测结果与文献中关于空气和气体两相流分布的实验结果进行了比较。比较结果表明：FLUENT5.5 无法预测可用的实验数据，而 PHOENICS 预测与所

有情况下的测量结果非常接近。然而，对于典型的制冷剂分流器几何形状和一组操作条件,FLUENT5.5和PHOENICS的两相分布和分离的预测非常相似,但PHOENICS使用复杂。因此,FLUENT适用于研究改进的制冷剂分流器设计。

Zhiwei Fan 等人^[121]通过构造方法设计和优化了七个不同结构的分流器。通过CFD模拟研究比较它们的流量分配性能和能量耗散。通过在板上具有所有分布矩形通道的分流器上的实验来验证CFD模拟的可靠性。结果表明,分布渠道的对称性对流量分布的性能具有决定性的影响。增加通道分支的代数将改善流量分布均匀性,但另一方面增加能量消耗。在所有七个结构分流器中,推荐具有二分配置,Y型结和直互连通道的分流器,因为它具有更好的流量分配性能和更低的能量耗散。

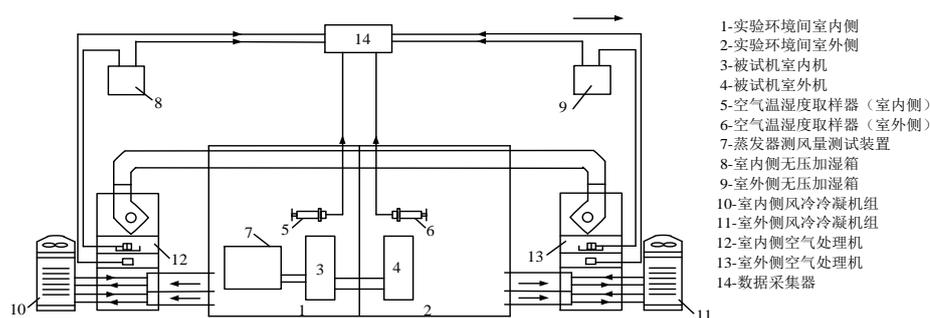


图 1-39 整机性能测试实验台原理图

Fig.1-39 Schematic diagram of performance test bench of whole machine

孙文卿, 屈静等人^[122]通过CFD对干式壳管式蒸发器中的流量分配情况进行了数值模拟, 研究发现, 蒸发器中流量的分配不均是由于上部和下部存在涡流区, 中间部位蒸发管与分流板相连部位都存在高压区, 且制冷剂分流过程受重力影响。因此, 设计6种不同结构的锥形分流器。为检验锥形分流器的分流效果, 搭建了如图1-39所示的整机性能测试实验台, 进行安装该分流器前后的整机性能实测研究。通过理论分析、数值模拟和可视化实验, 研究干式壳管式蒸发器的分流情况。结果表明: 安装新型分流器后蒸发器进出口压降由约15kPa下降到约3kPa, COP提高约5%。

Mariana Garcia 等人^[123]应用 3D 打印技术制造分流器，并通过实验测试评估流量均匀性。得到的实验数据给出了矩形分流器，带障碍物的锥形分流器和无障碍物的锥形分流器的非均匀流量系数。分流器在水流量和低流速下进行测试，观察到与气泡的存在相关的流动分布不均。对于高流速，非均匀流量系数降低至低于 1% 的值。给出的结果可用于验证分流器的数值模拟。

液相带气率和气相带液率是影响柱状气液分离器运行的两个重要指标，液相带气和气相带液都会降低柱状气液分离器运行的效率和经济性。在之前的研究中^[124-127]，科研人员为了减小气相带液对柱状气液分离器分离性能的影响，侧重分析和预测气相带液对柱状气液分离器运行的影响。因此，周云龙和倪志勇^[128]采用常温下的水-空气混合物为实验工质进行实验，通过实验研究得到不同液相速度和气相速度下的液相带气特性。研究发现，液相带气量和液相带气率随液相速度的升高先增大后减小。同时，作者进行气液旋流的可视化研究，分析了四种气相运动形态的气核特性。研究发现：气核是造成液相带气的主要原因。液相带气量随气核稳定性的降低而逐渐升高，无气核时由于重力沉降作用液相带气量较小。证实了气核是造成液相带气的主要原因，揭示了不同稳定性的气核对液相带气的影响。

孙志利等人^[129]在传统“先分流、后混合”分流原理的基础上，提出了新型分流理念，即将气液两相分流过程转变为液态单相分流过程。并基于此理念设计开发了两种分相式分流器——冲击式气相分离式分流器和反击式气相分离式分流器。将两种分相式分流器分别安装在冷风机上，并通过空气侧热平衡法测试冷风机的性能。结果表明，安装两种气相分离式分流器可以有效提高冷风机的传热系数，实现了冷风机的传热过程优化。与装有文丘里分流器的冷风机相比，传热系数提高 5%~10%。总体来看，冲击式气相分离式分流器对改善冷风机传热性能的效果更好，安装冲击式气相分离式分流器和反冲击式气相分离式分离器的压降明显降低，文丘里分流器的压降最高。实验结果为改善冷风机传热性能提供了有效的解决方案。

FAY M A^[130]搭建如图 1-40 所示的整机试验台，通过整机实验研究喷射式分流器分流性能对空调系统 COP 和制冷量的影响，并用出口过热度评价分配性能，结果表明：分流器和蒸发器都会影响到蒸发器各支路出口的过热度，锥形分流器分类效果良好时整机性能能效提升 4%，制冷量提高 5%。

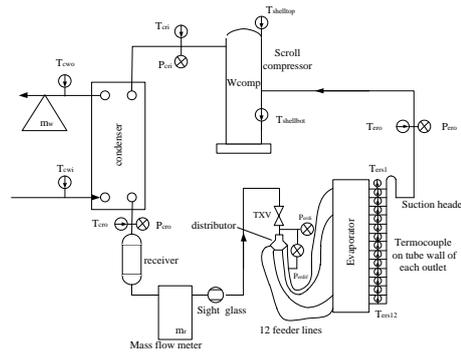


图 1-40 整机性能测试实验台原理图

Fig.1-40 Schematic diagram of performance test bench of whole machine

Azridjal.A^[131]采用空气和水作为试验介质，对两管路分流器进行可视化研究，观测分流器中流型的变化，并对适用于竖直流动流型的 Mandhane-Baker 流型图和适用于水平流动流型的 Sekoguchi 流型图进行验证。研究表明：当分流器的垂直安装，增大流速时，分流器的分流性能上升。

王栋和梁法春^[132-134]利用两相流采样原理，介绍一种基于分时原理的气液两相流测量方法，提出了转轮型分流器和转鼓分流器，如图 1-41 和图 1-42 所示。搭建如图 1-43 所示的试验台，在空气-水两相流动测试环路中进行实验。在实验期间发生的流动模式包括分层流动，分层波浪，团状流动和环形流动。实验结果表明，无论流型如何，该采样方法都能测量两相流量，且流量测量误差小于 $\pm 5\%$ 。考虑到分离后流体已成为两个单相流，测量可靠性得到显著提高。该分流器的优点是从整个截面中提取流体，而不是局部位置，分流不受流型、气液流量、车轮转速等因素的影响，

基本上消除了相分离现象。但转轮型取样分流器的分配核心机构转轮结构非常复杂，难以制造，且其是运动部件，在气液比大的时候容易发生卡堵赫尔震动现象，加速转轮的磨损^[135]。

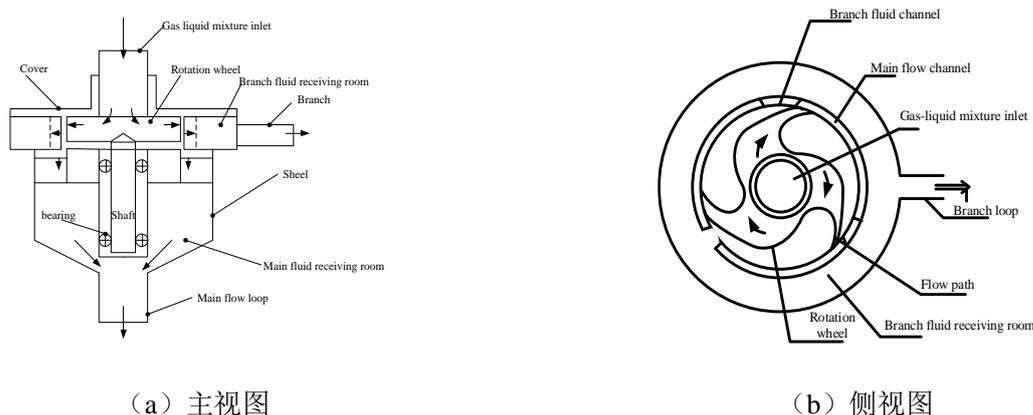


图 1-41 转轮分流器结构示意图

Fig.1-41 Schematic diagram of rotary wheel distributor

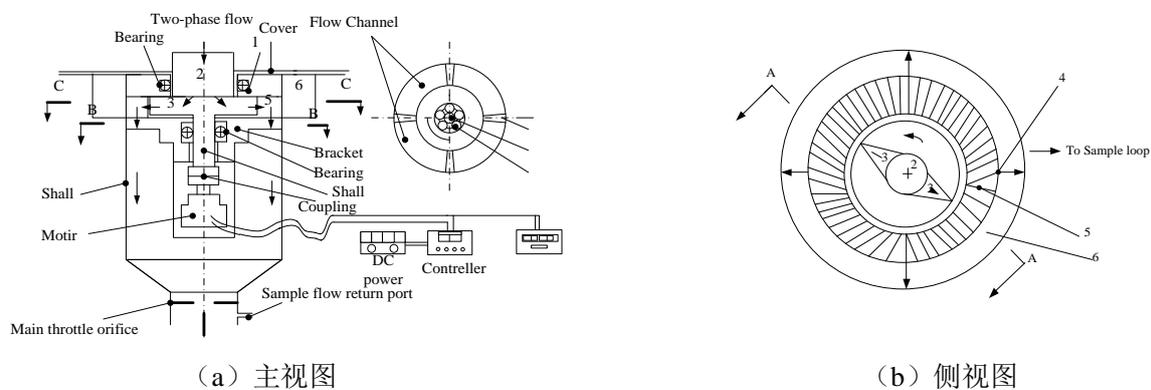


图 1-42 转鼓分流器结构示意图

Fig.1-42 Schematic diagram of drum distributor

黄善仿，王栋等人^[136]分析发现流动的压降特性是等干度分配的决定性因素。在两相流体流速较高时，不同管道的流量比例和流量大小没有关系。要想获得等干度分配的结果，就需要对两相流流型进行调整和矫正。使其整流成为均匀混合的均相流，同时降低局部阻力效应。通过调研，作者发现两相流分配中引入一些新的结构，

例如加速管^[57, 137]、转轮和转鼓^[133, 138, 139]，可以对两相分布进行调节，使得各支路的分配系数相等。加速管属于重力分配的范畴，其通过减小管道直径使两相流加速，进而改变两相的分布特性，使流型接近单向流，两相分配均匀性有所提高。转轮和转鼓属于离心力分配的范畴，利用离心力使两相流均匀混合，并且支路的局部阻力越弱，均匀分配的效果越好。总体上，通过离心力实现两相流等干度分配性能要好于重力效应，且两相流的分配系数能稳定在 0.07。

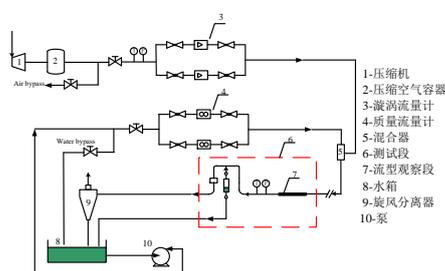


图 1-43 分流器性能测试原理图

Fig.1-43 Principle diagram of performance test for distributor

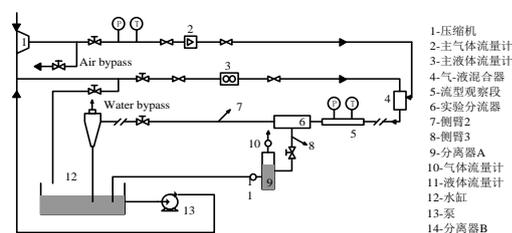


图 1-44 分流器性能测试原理图

Fig.1-44 Principle diagram of performance test for distributor

梁法春、王栋和杨桂云等人^[140-145]认为在入口设置加速管或者混合器^[57, 104]无法从根本上消除相分离，而转鼓型和转轮型^[132-134]两种分配机构结构复杂且在气液比大的时候容易发生卡堵现象。为实现对气液两相流的均匀分配，设计一种具有多个分流喷嘴的新型分流器，并搭建试验台（如图 1-44 所示）对其分流特性进行实验研究。此分流器结构紧凑，不需要分离设备和运动部件，基本不需要维护，能够在宽广的试验范围内维持稳定，具有良好额环境适应性，有望在高压两相流分配系统中得到应用，但此类分流器结构复杂，体积庞大，目前只广泛应用于石油化工和化学工业中。多个分流喷嘴的新的分流器的核心部件是喷嘴和旋流叶片，因此，方召君，梁法春等人^[146]采用数值模拟方法研究水平管内气液两相流经过旋流叶片的流动特点和分离效果，并以空气-水为实验工质，在气液两相流实验环道上开展实验，并开

展了管内相分离和流量的非介入式测量。模拟结果表明早旋流叶片的作用下，入口段的两相流流型由层流或段塞流转变为了环状流，且环状流的液膜相对比较均匀。孙媛^[147]设计了三种整流叶片，分别为半椭圆叶片、旋流叶片以及涡轮叶片，通过数值模拟和试验验证对整流叶片进行定分析，得到四种流型下各叶片的整流效果，分析发现旋流叶片作为分流器的整流装置具有最佳的整流效果。

Dandong Wang 等人^[148]搭建如图 1-45 所示的分流器性能测试实验台，研究发现分流器供液管长度，倾斜角度，气流不均匀度和分流管长度是装有分流器的多回路蒸发器中流量分布的四个影响因素。

采用实验测试和数值模拟相结合的方法评估这些因素对过热均匀性和制冷剂分配性能的影响。此外，提出一种用于优化制冷剂分配的进料管补偿方法，其涉及与主膨胀装置连接的每个回路中的进料管的压降微调，以在所有回路出口处获得更均匀的过热性能。为采用这种方法，开发了一种模型来预测每个回路的最佳进料管长度。实验结果表明，在气流不均匀的条件下使用预测长度的分流管时，过热均匀性显着提高，当气流非均匀系数为 0.6 时，蒸发器冷却能力可提高 35%。

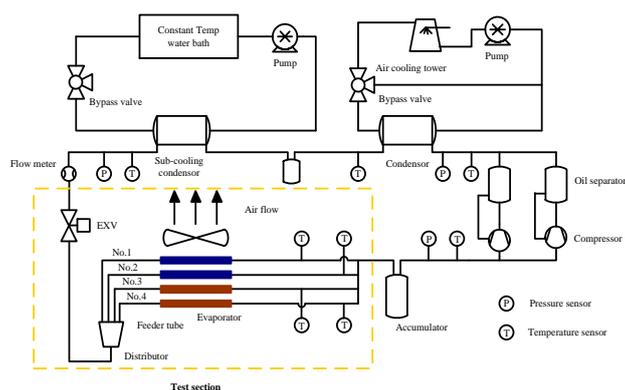


图 1-45 分流器性能测试原理图

Fig.1-45 Principle diagram of performance test for distributor

Lin Wang 等人^[149]提出分流重组式流量分流器，以提高微反应器的生产率。张吕

鸿等人通过 CFD 模拟和实验研究了在预分流器中的液体流动特性，预分流器通常设置在分流器的顶部进行初始分配。对预分布器进行了两相建模，并应用了自由表面模型的均匀模型。通过与实验数据的比较，验证了该方法的有效性。利用对不同预分流器的模拟结果，研究流量、位置和方向对出流分布的影响。此外，还分析了预分布器出口分布对槽内液体均匀性的影响。所得结论可用于大型液体分布器和预分布器的结构设计。

Xiaofeng Guo 等人^[150]介绍了一种多功能换热反应器，它由树枝状(树形)分流器和集热器、16 个平行的微型通道和 T 型混合器组成。对所提出的换热反应器的流量分布特性、预压降特性和传热性能进行了测试和讨论。首先采用 CFD 模拟方法对流场分布均匀性进行表征，然后通过可视化实验对流场分布均匀性进行定性验证。结果表明，采用树形分流器和集热器的换热器-反应器的设计使多通道系统的应用成为可能。

A. Elgozali 等人^[151]研究液体粘度和表面张力对低喷射式气体分流器中水泡柱水力传质特性的影响，低喷射式气体分流器如图 1-46 所示。

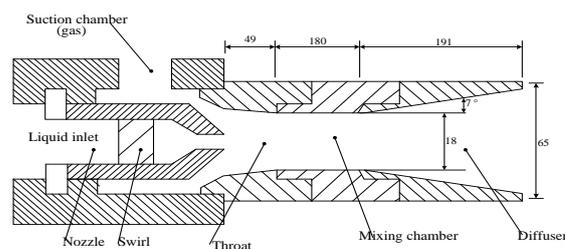


图 1-46 喷射式气体分流器原理图

Fig.1-46 Schematic diagram of ejector-type gas distributor

同期，国内外学者和企业也申请了许多分流器的专利^[152-157]。

Schneider M G^[158]设计了一个如图 1-47 所示的静态离心式分流器，以平均分配两相制冷剂。然而，在大直径管道中，很难在较低的混合速度下实现膜厚均匀的环

状流动。

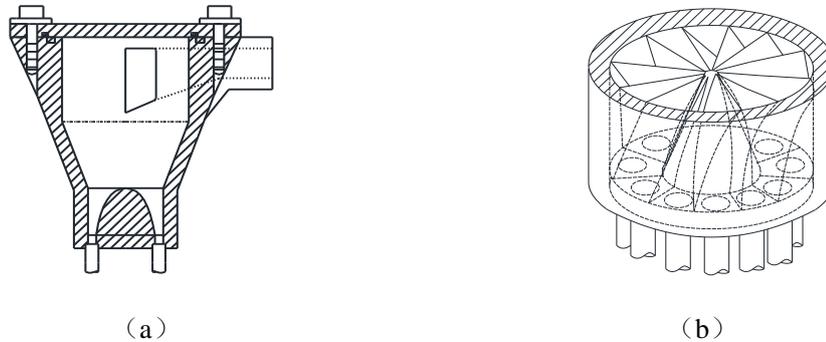


图 1-47 分流器结构图

Fig.1-47 Structure diagram of distributor

曾奇学^[159]设计一种如图 1-48a 所示的分流器，分流器由分液腔、进液口、出液口以及与分液腔导通连接的旁通管组成。这种分流器可以在制冷剂过多时，将多余的制冷剂通过旁通管导入压缩机，用以解决蒸发器内制冷剂无法蒸发完全，以至于带液流出蒸发器的的问题。

张笋等人^[160]设计如图 1-48b 所示的分流器。该分流器由分液腔、进液口、出液口和旋转装置组成。旋转装置位于进液口与若干出液口之间的流道中，可以调节流道中流体的流动速度。

同时，刘家豪等人^[161]为解决流体机械技术领域分流器分流不均的技术问题，设计如图 1-48d 所示的分流器，该分流器由分流主管、与其连通的多条分路、动叶机构等组成。分流主管的混合腔内设置有动叶机构，当制冷剂经过动叶机构时，制冷剂的流动产生的压力使动叶机构转动，而动叶机构在转动时，也带动制冷剂螺旋流动，而且经过动叶机构的打击和导流，使得各个方向分路分得的气液相等，从而解决分流器分流不均的问题。

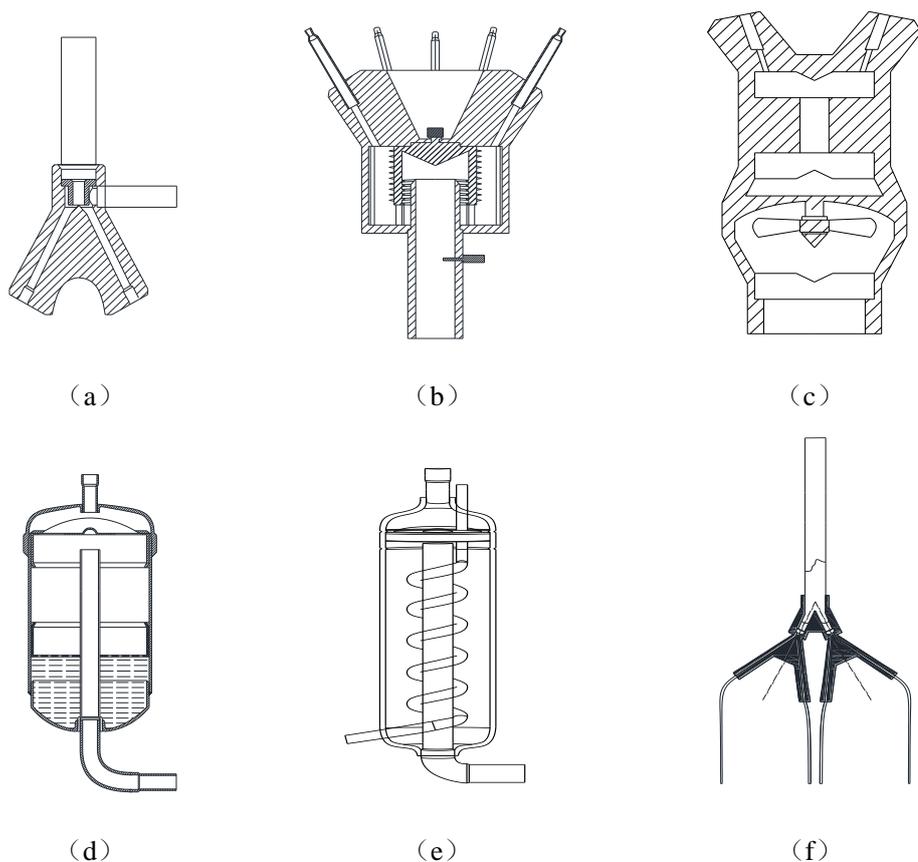


图 1-48 分流器结构图

Fig.1-48 Structure diagram of distributor

陈辉等人^[162]设计如图 1-48d 所示的分流器。该新型分流器是在现有分流器的基础上增加二级气液分离机构。二级气液分离机构位于一级气液分离机构下方，能够对一级气液分离机构未完全过滤的气液混合物再次过滤，大大提升了气液分离效果，避免了液击问题。

黄丕江^[163]设计的如图 1-48e 所示的分流器由壳体、进气管、排气管和回热管组成，该分流器具有分流和回热的功能，不仅节约了制作成本而且能够节省安装空间，同时还能够提高循环性能的优点。

李刚^[164]设计如图 1-48f 所示的分流器。分流器的一级分液头完成一次分液后再通过二级分液头进行进一步分液，减少了一级分液头上一级分流管的数量，相邻一级分流管的之间的距离过近而焊接不便，减小了一级分液腔的大小，保证分流器对

制冷剂分配的均匀度。

1.3.4 两相流流型的现状研究

在气-液、液-液、气-固、液-固四种两相流组合中，气液两相流动最为复杂，气相易于压缩，相交界面易于变形，可以构成许多不同的流型。不同流型的两相流具有完全不同的流动和传热特性，它不仅与每一相是层流或湍流有关，更重要的是与两相交界面的变化和组合密切相关^[165]。因此，流型研究具有特殊重要性。

形态学区分流型法则、识别主观性、构形复杂性和多样性导致流型研究中众多的定义和术语命名，并且至今仍没有完全统一。

对于垂直向上两相流动的流型划分就有几十种^[165, 166]，如表 1-1 所示。

表 1-1 垂直上升管中的气液两相流流型划分

Tab.1-1 Flow pattern division of gas-liquid two-phase flow in vertically rising pipes

研究者	流型分类
Cromer, Sylvan ^[167]	气泡流 (Bubble flow); 弹状流 (Slug flow); 乳沫状流 (Froth flow); 环状流 (Annular flow)
Galegar W.C ^[168]	鼓泡流 (Aerated flow); 弹状流 (Slug flow); 搅拌流 (Turbulent flow); 半环状流 (Semi-annular flow); 环状流 (Annular flow)
Calvert S ^[169]	鼓泡流 (Aerated flow); 塞状流 (Piston flow); 混状流 (Churn flow); 波卷流 (Wave flow); 环状流 (Annular flow); 液滴夹带流 (Entrainment flow)
Spedding ^[170]	气泡流 (Bubble flow); 间断流 (Intermittent flow); 波状流 (Wavy flow); 环状流 (Annular flow); 雾状流 (Mist flow)
Annunziato ^[171]	气泡流 (Bubble flow); 弹状流 (Slug flow); 搅拌流 (Churn flow); 液丝环状流 (Wispy-annular flow); 环状流 (Annular flow)

现在被普遍接受的是 HeWitt 等人提出的五种流型划分，分别为泡状流、弹状流、搅拌流、环状流、液束环状流^[172]。如图 1-49 所示。

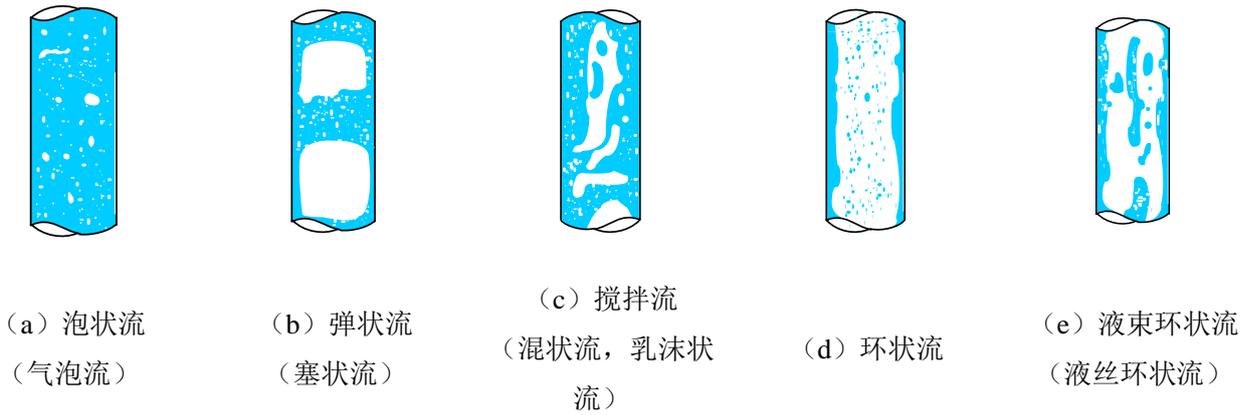


图 1-49 垂直两相流流动流型分类^[172]

Fig.1-49 Classification of flow patterns of vertical two-phase flow

表 1-2 水平两相流流动流型分类

Tab.1-2 Classification of flow patterns of horizontal two-phase flow

流型		原理图
层状流	纯层状流	
	波状层状流	
间歇流	塞状流	
	半弹状流	
	弹状流	
	弥散环状流	
	弥散泡状流	

水平流动下流场受重力场作用, 呈较显著的相分布不均匀性。常见的水平同向流动流型如表 1-2 所示, 即层状流、间歇流和弥散环状流和雾状流^[173, 174]。

气液两相流管内不同的气液相折算速度会呈现出不同的流型，如图 1-50 所示，总体上看对于气液两相流流型，按介质的连续性进行划分，可以分为分散流（连续—弥散流型）、间歇流（连续—间断流型）和分层流（连续—连续流型）^[175]，其中间歇流主要包括弹状流和塞状流，分散流包括雾状流和泡状流，分层流包括纯层状流、波浪分层流以及环状流等。

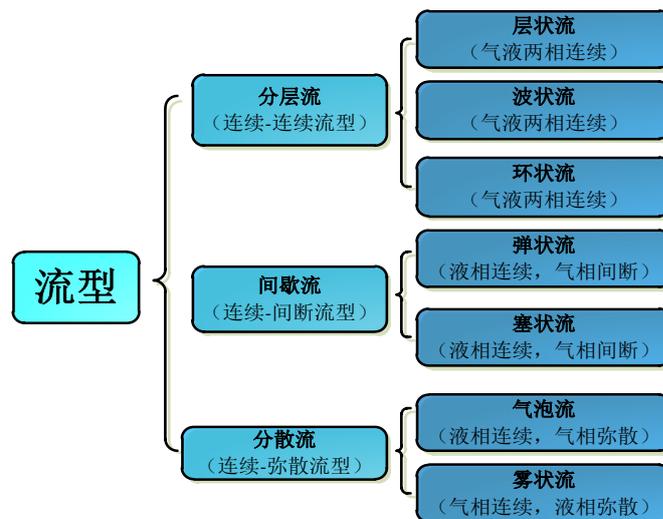


图 1-50 两相流流型按介质的连续性进行划分

Fig.1-50 Two-phase flow pattern divided by the continuity of the medium

在研究两相流的分流过程中，确定研究对象的两相流流型是一个重要步骤。由于两相流的波动性和不稳定性使得均匀分配难以实现，环状流是一种适合于均匀分布的流型，因为它的对称布局。环状流包括环空液膜和中心气芯，其中环空液膜和中心气芯都与入口管的壁面同心^[176]。对称流型朝向对称布置的出口管移动，导致所有出口管中的均匀分布。雾状流受重力的影响最小，其气泡呈泡沫状均匀弥散于整个流道，可使得气液两相均匀混合，从而导致密度的均匀性，也可导致所有出口管的均匀分配^[177]。相比之下，气泡流^[178]，段塞流动^[179]，搅拌流^[180]和分层流动^[181]受重力影响，分流器内部下方的液相所占比例远高于上方液相所占比例，是不稳定的

和不对称的流型，并且如果它们在分流器中发生，则可能导致出口管中的非均匀质量流速。

1.4 国内外研究现状及发展动态分析

1.4.1 国内外研究现状及发展动态分析

(1) 气液两相分流原理对相分离现象的影响

目前，气液两相分流原理可分为两类：“先分流、后混合”^[109]和“先混合、后分流”^[79]。

“先分流、后混合”的气液两相分流原理是将气液两相流体的分流转化成单相流体的分流，在各支路出口压力一致的实验条件下，获得了较好的分流效果。其主要缺点在于需要采用气液分离器，分流器体积庞大^[109]；且如何克服下游各支路阻力不一致导致的相分离现象是必须解决的重点和难点问题。

“先混合、后分流”的气液两相分流原理是在上游设置混合段以充分混合气液两相流体，而后进行分流。该原理的主要缺点是当气体和液体流量小（即为层流流动）时，由于来流不能完全混合，很难实现气液两相的均匀分流；且该原理主要是采用降压增速的方法使气液两相流充分混合，这将会导致分流器内部阻力显著增加。

由于“先分流、后混合”分流原理受安装角度、安装空间、下游各支路阻力不一致导致的相分离影响等限制，本文采用“后混合、先分流”分流原理。为解决“先混合、后分流”分流原理中气液两相均匀分流的难题，本文提出将层流流动转化为紊流流动，气液两相流经流型整定后进入各分流支路。为解决“先混合、后分流”分流原理中大压降导致的蒸发温度大幅度降低和压缩机功耗增大等难题，本文提出新型分流器设计理念，改善分流器大压降对系统性能的影响。

(2) 上游流体流动状态对相分离现象的影响

流体状态参数（入口干度、质量流量和流体物性）和流型等因素对气液两相流的相分离现象有显著的影响，当上游流体流动状态改变时，不可避免发生相分离现

象^[41]。其中，分流器的分流特性强烈依赖于入口流型。在两相流流型中，气泡流、段塞流、搅拌流和分层流是不稳定或不对称的流型，如果它们出现在分流区域，就会导致相分离^[3]。研究表明：雾状流和环状流是最好的对称结构流型^[72, 83, 141]，虽然截面内出现受重力影响的液体分布不均现象，但在使用对称结构的分流装置时能最大限度的提高各支路气液两相流体分流的均匀性^[176, 182, 183]，且雾状流中液体分布均匀性优于环状流中液体分布均匀性。

为克服环状流和雾状流液体分布不均现象，降低分流不均匀性，本文提出采用环流整定和雾化整定来改善管内液体分布不均，增加流型整定过程。

（3）下游支路非均匀换热对相分离现象的影响

气液两相均匀分流不仅取决于上游流体流动状态，还与分流器的下游各支路非均匀换热导致的阻力不一致相关^[184]，即使采用流型整定和均匀对称的分流构型也不能克服下游各支路阻力不一致引起的分流不均。下游各支路阻力不一致主要由两种因素导致，其一是支路的物理参数不一致，引起气液两相流体在支路中绝热流动时的阻力不一致；其二是支路物理参数均保持一致，气液两相流体在管内流动为非绝热流动，外界环境与管内流体发生热量交换引起阻力不一致。

各支路阻力不一致导致气液两相流在流动过程中发生不稳定扰动，使下游多支路发生周期性或间歇性振荡，振荡的压力波通过支路向上游传递，影响两相流均匀分流过程，恶化相分离现象^[10, 185-187]。

为克服下游压力振荡导致的相分离现象，本文提出采用临界流理论来抑制下游压力振荡向上游传递，改善因非绝热流动，特别是非均匀换热的两相流动导致的相分离现象。

（4）以气液两相制冷剂分流为研究对象的相分离现象

在制冷系统中，气液两相制冷剂的分流过程发生在节流后，与空气和水的两相流体相比，气液两相制冷剂的不稳定性更加复杂，更易于出现分流不均和相分离现

象^[89, 176]。节流后的气液两相制冷剂在管内流动特性呈现出空泡率高和稳定性差等特点，气相表观速度和液相表观速度明显不一致，流型复杂性也随之增加^[78, 134]。受气液两相分流原理、上游制冷剂流动状态和下游支路非均匀换热的影响，采用空气和水进行模拟的气液两相制冷剂分流过程与饱和制冷剂气液两相分流过程出现较大偏差^[188-191]，其主要原因是节流过程、分流过程和下游支路同时与外界环境发生热交换，造成气液两相制冷剂流动稳定性差和支路压力振荡，从而影响分流过程。

1.4.2 目前研究工作的不足

通过对国内外研究现状的调研及国内外研究现状发展动态的分析发现，国内外对分流器的研究还存在以下不足：

(1) 国内外关于两相流分流特性和相分离控制等机理研究集中在不可避免地出现较严重相分离现象的 T 型管和集流管，由于相分离特性复杂，关于 T 型管和集流管的分流特性和相分离控制等方面的研究都不能直接应用在分流器中，而且对分流器分流特性和相分离控制的研究非常有限。公开文献中关于两相流分流研究一直关注在分流器结构尺寸及分流过程本身^[80, 84, 148]，而且现有分流器的设计仅靠生产经验，没有完整、详细的理论思想指导。

(2) 研究人员通过在分流器内设置额外阻力元件和导流元件以及对分流器结构参数优化来改善分流器的分流特性，并未提出导致两相流分流不均的根本原因。鲜有将分流过程受分流原理、上游流体流动状态、下游支路非均匀换热以及气液两相流体物性对相分离现象的影响进行综合考虑，未提出全过程理论方法，且对将气液两相分流原理、上游流体流动状态以及下游支路非均匀换热导致的阻力不一致等对相分离的影响也缺乏理论研究和实验数据的支持。

(3) 分流器分流特性的实验研究和数值模拟大多以空气—水为实验工质，鲜有对制冷剂在分流设备中的分流特性的研究。由于不同工质物性（如密度、动力粘度、

摩擦系数和运动粘度等)都存在较大差异,会导致两相流的流动状态、流型等存在差异,因此不能通过空气—水试验模拟实际情况中制冷剂的分流效果。

(4) 传统分流器由于其在分流原理上存在先天不足,传统分流器通常是通过降压增速来实现向蒸发器各个流路的均匀供液,增速可以实现气液两相流的搅动,降压可以缩小蒸发器各个流路的阻力差^[118];但在变工况或者在部分负荷工作时,系统的流量减小,分流器的阻力降低,均匀分流性能下降甚至失去均匀分流能力^[192]。

因此,必须提出新的分流理念,设计和开发新型的分流器,并对新型分流器进行理论分析和实验研究,以解决现有分流技术中存在的技术缺陷,克服上流流动状态和下流非均匀换热对分流性能的影响,进而提高整个制冷系统的工作性能。

1.4.3 问题提出

1.4.3.1 新型分流器及其分流理念

本文为抑制气液两相流体在分流过程中的相分离现象,以节流后气液两相制冷剂在多支路中的分流过程为研究对象,考虑到两相流分流原理、上流流动状态和下游压力振荡对分流特性的影响,提出如图 1-54 所示的分流器设计理论图。

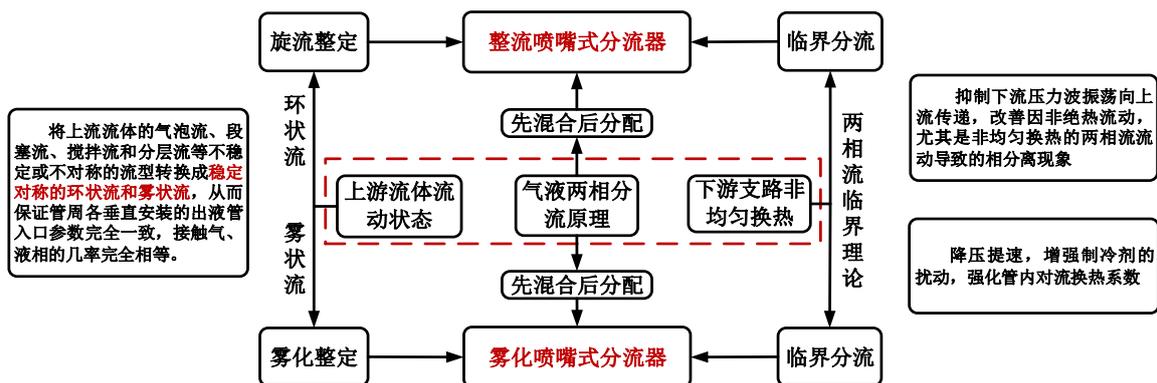


图 1-54 分流器设计理论图

Fig.1-54 Theoretical diagram of design of distributor

如图 1-54 所示,为克服上流流动状态对相分离的影响,基于环状流和雾状流是

对均匀分流最有利的流型，提出“环流整定”和“雾化整定”将上流流体的气泡流、段塞流、搅拌流和分层流等不稳定、不对称、含液率低的流型转换成稳定对称的环状流和雾状流，从而保证管周各垂直安装的分流管入口参数完全一致，接触气、液相的几率完全相等。

为克服下游压力振荡导致的相分离现象，提出“临界分流”，即采用临界流理论来抑制下游压力振荡向上游传递，改善因非绝热流动，尤其是非均匀换热的两相流流动导致的相分离现象；并且喷嘴的降压提速作用可以增强制冷剂扰动，强化下游换热管内的对流换热。

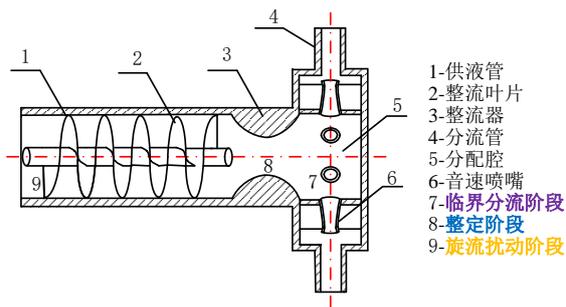
因此，根据“环流整定+先混合、后分流+临界分流”原理，提出如图 1-55a 和 1-55b 所示的整流喷嘴式分流器。根据“雾化整定+先混合、后分流+临界分流”原理，提出如图 1-55c 和 1-55d 所示的雾化喷嘴式分流器。

与现有技术相比，两种新型分流器具有以下优点：

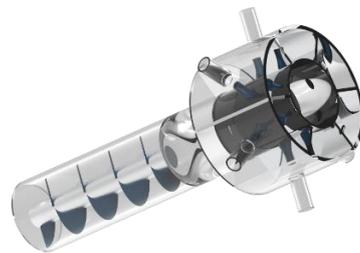
(1) 通过整流元件将膨胀节流后的气液两相制冷剂的不均匀、不对称、含液率低的流型调整为理想流型，克服上流流动状态对分流特性的影响，不受上流流体入口流型的影响，并解决因重力作用（倾斜安装）和离心力作用（分流器结构），传统分流器分流不均的问题。

(2) 通过音速喷嘴使两相流达到当地音速的临界点，克服下流干式蒸发器各支路非均匀换热导致的压力波振荡对分流特性的影响，解决干式蒸发器各流路阻力不一致、压力波振荡、供液高度差等不良因素对分流特性的影响，实现各支路等干度、等流量分流，从而改善干式蒸发器的传热性能，在变工况仍下具有较好的分流效果。

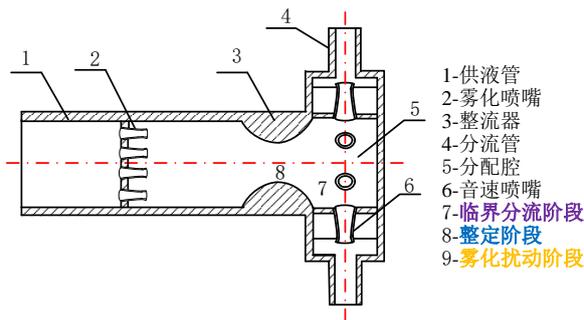
本文主要研究整流喷嘴式分流器的气液两相制冷剂流动特性及相分离控制，将有助于阐明非均匀换热工况下的气液两相制冷剂相分离抑制机理，丰富和完善多相流分流理论，为涉及两相流分流应用领域提供基础支持。



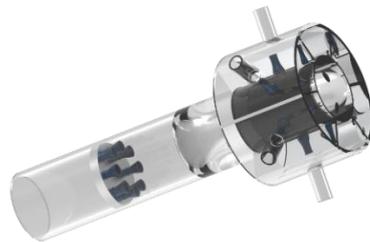
(a) 整流喷嘴式分流器原理图



(b) 整流喷嘴式分流器三维图



(c) 雾化喷嘴式分流器原理图



(d) 雾化喷嘴式分流器三维图

图 1-55 新型分流器结构图

Fig.1-55 Structure diagram of novel distributor

1.4.3.2 新型分流器设计理念及膨胀分流一体化装置

传统的分流器设计理念是分流器与蒸发器共同承担节流后制冷剂的压降，其中，分流器承担 50kPa 的压降^[193]，如图 1-56 中实线表示。但从图 1-57 中可以看出，这种传统的分流器设计理念明显是不合理的：对于压降大约在 50kPa 的制冷剂，如 R744，传统的设计理念对系统性能的影响并不大；但是对于压降小的制冷剂，传统的设计理念会降低蒸发器内的平均蒸发温度，降低系统的运行效率。

为解决上述问题，提出一种新型分流器设计理念，即将分流器与膨胀阀设计为一体化装置，共同承担节流压降，如图 1-56 中的虚线所示。新型分流器设计理念的提出具有以下优点：

- (1) 减小膨胀阀节流过程的不可逆损失；
- (2) 提高的干式蒸发器的平均蒸发温度，从而减小换热温差，降低换热过程的

不可逆损失；

(3) 有利于制冷系统效率的提升和制冷系统的高效运行；

(4) 可解决基于“先混合、后分流”分流原理的分流器大压降导致的蒸发温度大幅度降低和压缩机耗功增大等问题。

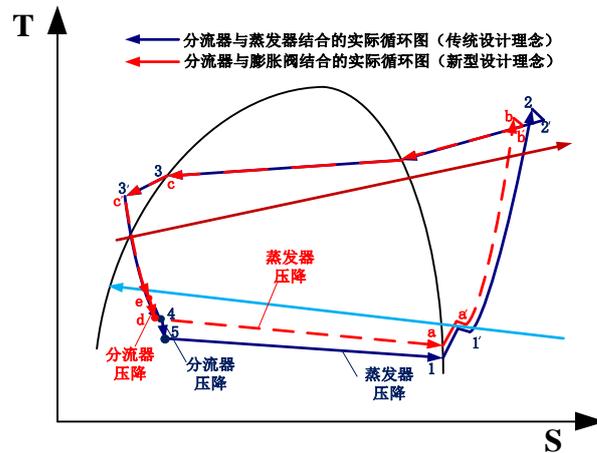
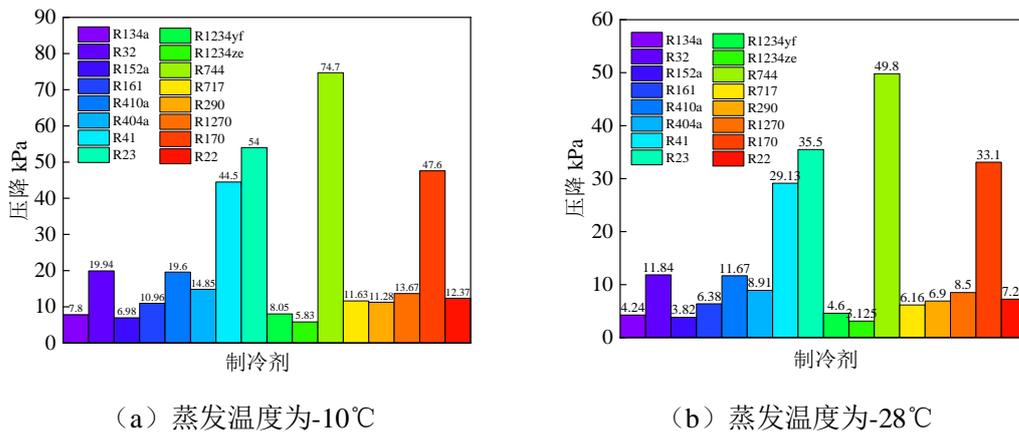


图 1-56 分流器设计理念新思路

Fig.1-56 New idea on design concept of distributor



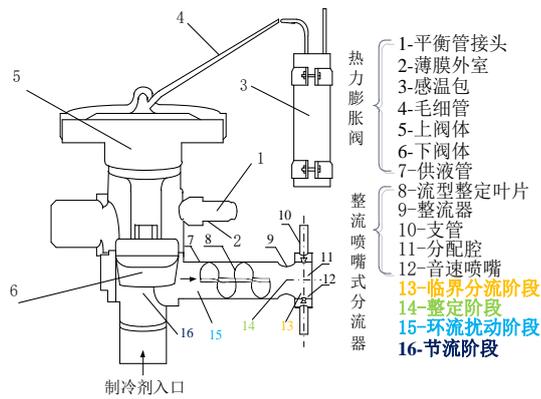
(a) 蒸发温度为-10°C

(b) 蒸发温度为-28°C

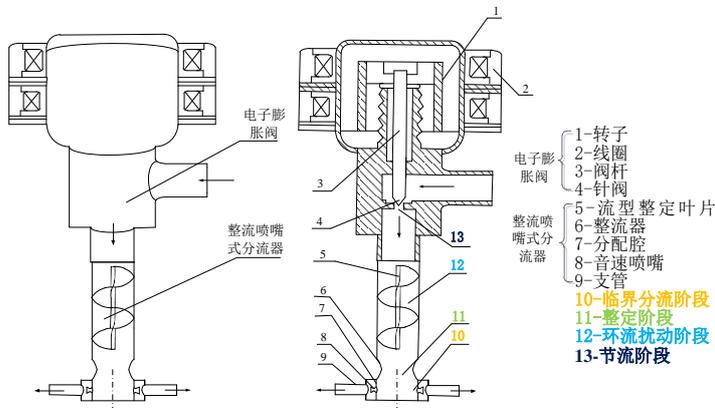
图 1-57 制冷剂降低 1°C 的压降

Fig.1-57 Pressure drop at 1 °C reduction of refrigerant

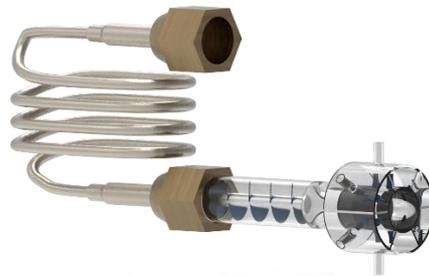
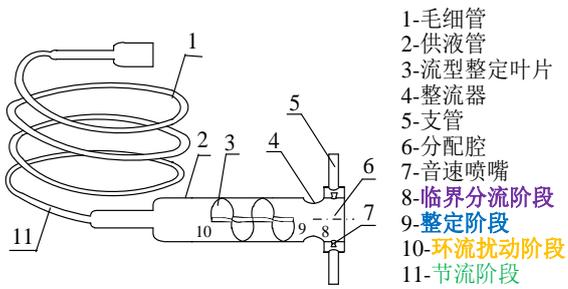
根据新型分流器设计理念，可以设计如图 1-58 所示的具有节流和分流功能的膨胀阀和分流器组合的膨胀分流一体化装置。



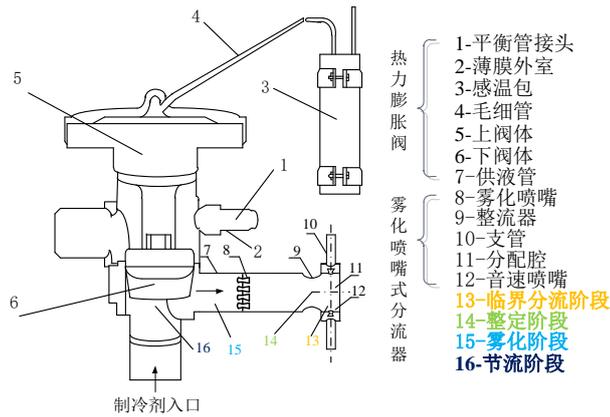
(a) 热力膨胀阀与整流喷嘴式分流器组合的膨胀分流一体化装置



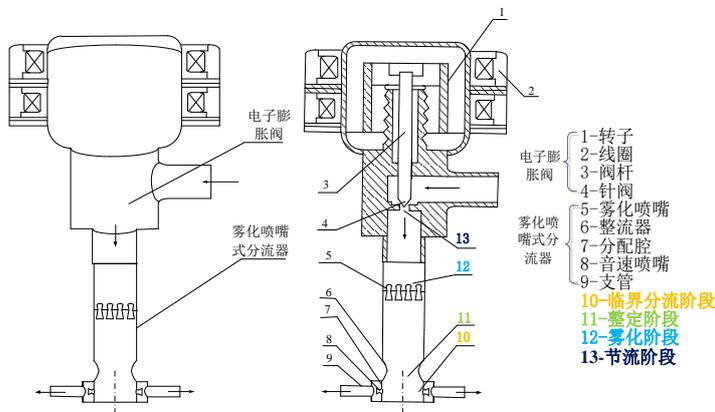
(b) 电子膨胀阀和整流喷嘴式分流器组合的膨胀分流一体化装置



(c) 毛细管与整流喷嘴式分流器组合的膨胀分流一体化装置



(d) 热力膨胀阀与雾化喷嘴式分流器组合的膨胀分流一体化装置



(e) 电子膨胀阀与雾化喷嘴式分流器组合的膨胀分流一体化装置



(f) 毛细管与雾化喷嘴式分流器组合的膨胀分流一体化装置

图 1-58 基于设计理念新思路的新型分流器一体化装置

Fig.1-58 Novel integrated device of distributor based on new idea on design concept

以热力膨胀阀与整流喷嘴式分流器组合的膨胀分流一体化装置为例，具有节流和分流功能的新颖分流器一体化装置的系统原理图如图 1-59 所示。

制冷系统通过膨胀分流一体化装置的作用，在制冷系统变工况或部分负荷运行

时，只要气液两相制冷剂在喷嘴喉部达到临界状态，就能实现等流量、等干度供液，因此，在变工况下仍有较好的分流效果和较宽的使用范围，整机性能大幅度提高。

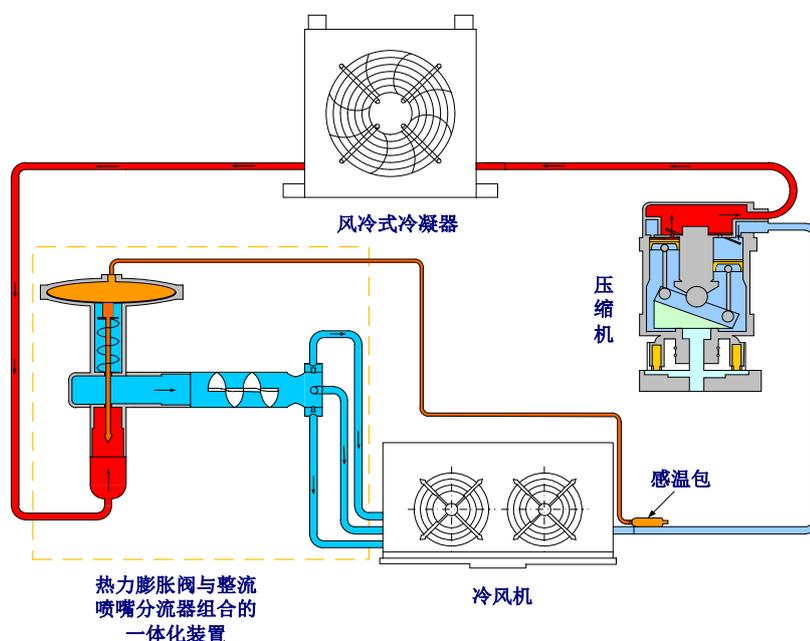


图 1-59 基于设计理念新思路的新型分流器的制冷系统原理图

Fig.1-59 Schematic diagram of refrigeration system based on new ideas of design concept for a novel of distributor

1.5 研究内容和技术路线图

本文的研究内容如下：

为抑制气液两相流体在分流过程中的相分离现象，以节流后气液两相制冷剂在多支路中的分流过程为研究对象，考虑到上流流动状态对分流特性的影响，提出“流型整定”分流理论；考虑下游支路非均匀换热导致的相分离恶化问题，提出基于临界流理论抑制非均匀换热导致的相分离。在课题实施过程中，开展以下研究：

(1) 考虑到上流流动状态、气液两相流分流原理和下游非均匀换热对相分离的影响，环状流和雾状流是对均匀分流最有利的流型，以及临界流理论抑制压力波振荡向上流传递，提出基于“环流整定+临界分流”分流理念的整流喷嘴式分流器和基

于“雾化整定+临界分流”分流理念的雾化喷嘴式分流器。此外，考虑到传统分流器设计理念的不合理性，提出新型分流器设计理念，即将分流器与膨胀阀设计为一体化装置，共同承担节流压降，并根据此理念设计开发整流喷嘴式分流器和雾化喷嘴式分流器，并设计和撰写具有节流和分流功能的膨胀阀和分流器组合的膨胀分流一体化装置。

(2) 对基于“环流整定+临界分流”分流理念的整流喷嘴式分流器的分流理念进行理论分析和结构设计，阐述整流机理和两相流临界流动机理。探索建立环状扰动和环状整定对环状流中液体分布均匀性的理论模型，优化设计旋流叶片和整流器。建立采用临界流理论抑制相分离现象的理论模型，优化设计音速喷嘴，建立整流喷嘴式分流器分流模型及全过程相分离现象的理论模型。

(3) 通过对国内外文献的调研，对实验方法进行汇总分类。为验证理论分析结果，采用 R22 制冷剂，设计并搭建冷风机性能测试试验台，定义分流器分流性能评价指标和冷风机综合传热性能评价指标，实验研究不同库温下，整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器的分流性能，以及其对冷风机传热性能的影响，探索环流整定和临界流理论对分流器分流特性和冷风机传热性能的影响。

本文主要采用理论分析和实验研究相结合的研究手段，研究全过程抑制相分离现象的理论模型。详细技术路线图如图 1-60 所示，具体的研究方案如下：

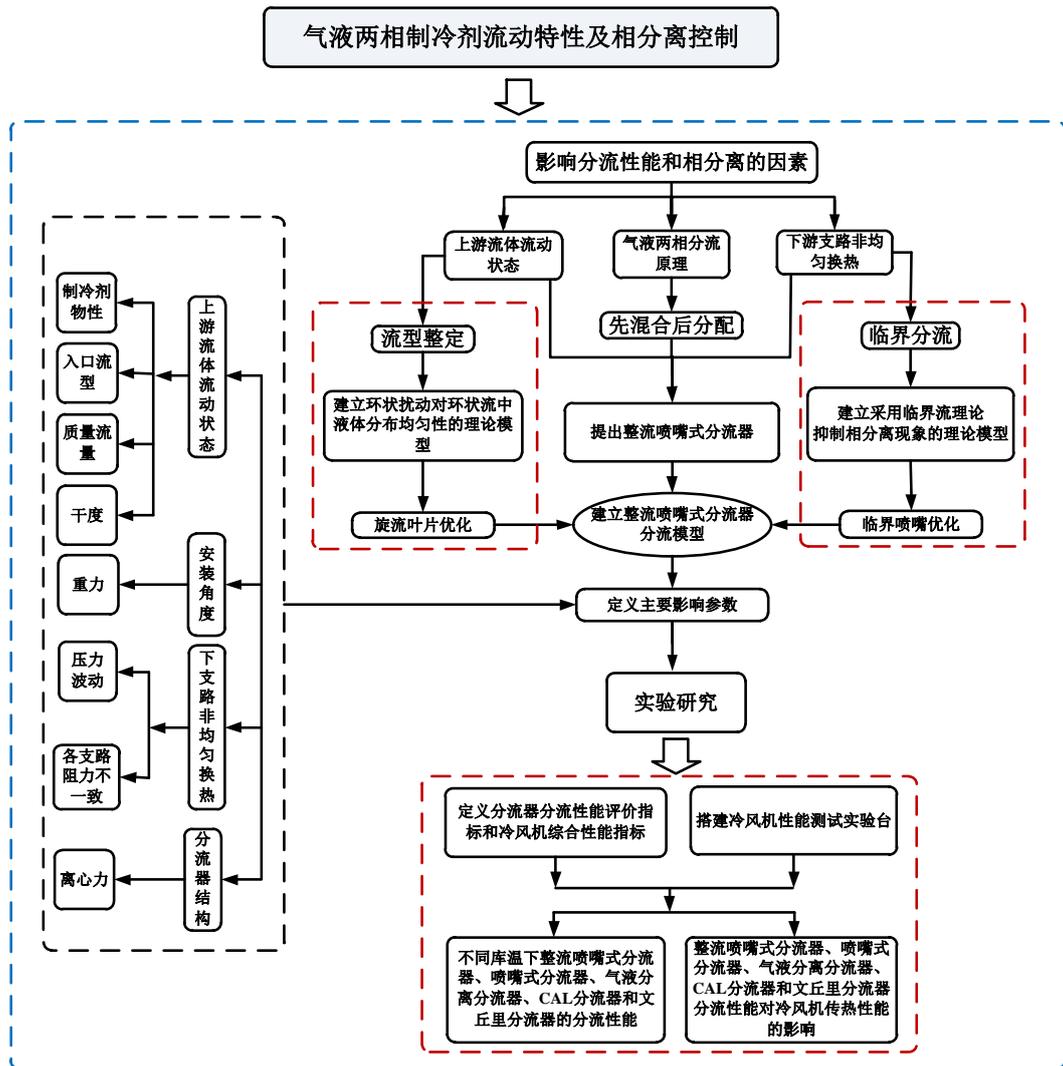


图 1-60 技术路线图

Fig.1-60 Schematic diagram of technology road

1.6 本章小结

传统分流器因分流原理存在先天不足及其分流不均等问题，不能向干式蒸发器均匀供液，从而导致干式蒸发器传热性能下降 30%~50%。通过改进传统分流器分流和设计理念，提出新型分流器设计理念，即将分流器与膨胀阀设计为一体化装置，共同承担节流压降；并根据此理念提出并设计开发基于“流型整定+临界分流”原理的整流喷嘴式分流器和基于“雾化过程+临界分流”原理的雾化喷嘴式分流器。

2 分流器的理论分析及设计

2.1 整流喷嘴式分流器结构

为了不受上游流体流动状态和下游支路非均匀换热导致振荡的压力波通过支路向上游传递对均匀分流的影响，避免相分离现象的发生，根据相分离影响因素及作用机理，提出基于“流型调整+临界分流”的两相流分流过程的相分离控制理论。根据新型分流和设计理念，设计开发整流喷嘴式分流器。整流喷嘴式分流器结构图如图 2-1 所示，整流喷嘴式分流器的三维模型图如图 2-2 所示。

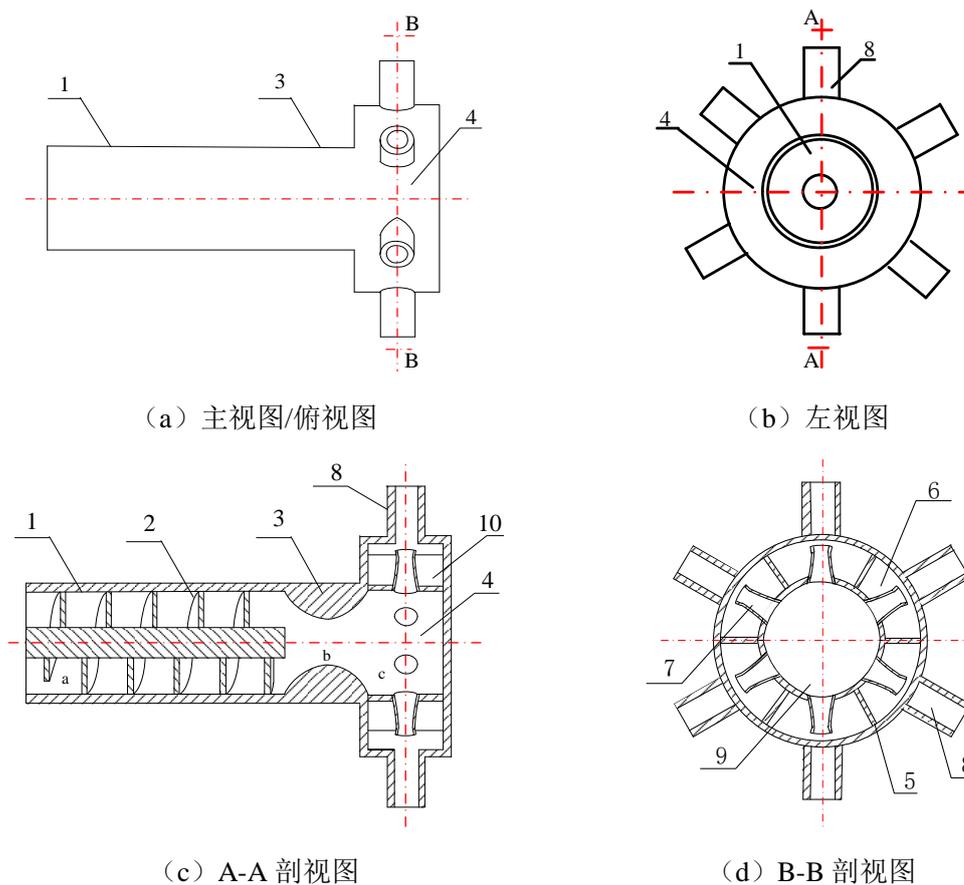


图 2-1 整流喷嘴式分流器结构图

Fig.2-1 Structure diagram of rectifying nozzle-type distributor

整流喷嘴式分流器可分为环流扰动阶段、流型整定阶段和临界分流阶段。

(1) 环流扰动阶段包括两相流供液管 1 和整流叶片 2 组成。

(2) 流型整定阶段包括流体整流器 3。

(3) 临界分流阶段包括分液体 4、隔板 5、分配室 6、音速喷嘴 7、分流管 8、供液腔 9 和环形分配腔 10。

分液体 4 内部设置有中心的供液腔 9 和圆周上的环形分配腔 10，环形分配腔 10 通过隔板 5 分隔成多个分配室 6，以确保各支路之间的流量不会串通，从而避免下支路非均匀换热导致的各支路流量分配不均匀。

每个分配室 6 上连通有分流管 8 和与分流管朝向相同的音速喷嘴 7。由于音速喷嘴结构相同，则其分流特性也将完全一致，从而实现气液两相均匀分流。

两相流供液管 1 内部安装有旋流叶片 2，两相流供液管 1 的出口与流体整流器 3 的进口连接，流体整流器 3 的出口与供液腔 9 连接。

分配室 6、音速喷嘴 7 和分流管 8 以环形分配腔中心线为中心呈圆形阵列布置，且分配室 6、音速喷嘴 7 和分流管 8 的中心线呈一条直线。



图 2-2 整流喷嘴式分流器三维模型图

Fig.2-2 Three-dimensional model diagram of rectifying nozzle-type distributor

2.2 流型整定原理

2.2.1 整流机理

流型调整包括环流扰动阶段和流型整定阶段，在分流器中安装整流叶片和整流器，其目的是通过环流扰动和整流作用将上流来流不均匀、不对称、含液率低的分层流、波浪流和半环状流等流型调整为液膜厚度沿管壁周向分布均匀对称的环状流，以保证各个分流入口接触气液相的几率相等^[143]，保证管道周围各喷嘴入口参数完全一致，从而达到流型整定的作用，如图 2-3 所示。因此，两种整流元件对理想环状流的形成起着至关重要的作用。

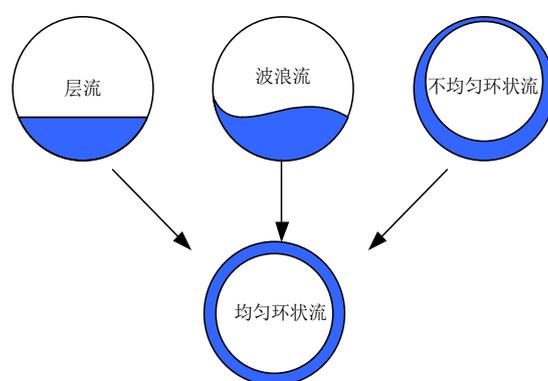


图 2-3 整流作用示意图

Fig.2-3 Schematic diagram of flow pattern setting effect

安装整流叶片的目的：

(1) 通过整流作用使两相流经过整改，利用离心力使气液两相旋流流动，气液两相分布发生变化，从而将上游分层流、波浪流、半环状流等不均匀、不对称、含液率低的流型整改成为管道周围为液体、管中心为气体的均匀对称的环状流^[194-202]；

(2) 通过环状扰动改善管内环状流液体分布均匀性；

(3) 解决在重力作用下，传统分流器因倾斜安装导致的分流不均的问题。

安装整流器的目的：

(1) 将周向液膜的旋转运动调整为沿管壁轴向的运动；

(2) 保证环状流液膜分布的更加均匀, 使气、液相在分配截面上的分布呈现对称性;

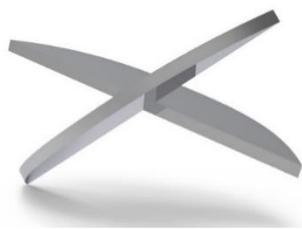
(3) 保证管周各垂直安装的喷嘴入口参数完全一致, 接触气、液相的几率完全相等^[203];

(4) 克服上游流体流动状态对分流特性的影响, 达到流型整定的作用。

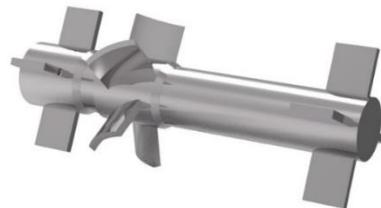
2.2.2 整流叶片

在重力作用下, 环状流是不均匀、不对称的, 这样非常不利于气液两相流的均匀分流, 会恶化分流器的分流性能以及干式蒸发器的传热性能, 因此寻找一种能产生均匀对称的环状流的整流装置是十分必要的。

目前, 整流叶片可以分为两种, 分别为如图 2-4a 所示的半椭圆叶片和如图 2-4b 所示的涡轮叶片, 这两种整流叶片都是利用入口结构使入流的轴向速度转变为利于两相流气液分离的切向速度, 从而对密度不同的气液两相流进行旋流分离^[147]。但半椭圆叶片的环流整定效果不佳; 涡轮叶片由于具有运动部件, 在气液比大的时候不会发生卡堵和震动现象。



(a) 半椭圆叶片



(b) 涡轮叶片

图 2-4 传统整流叶片的结构图

Fig.2-4 Structure diagram of conventional rectifier blade

由于传统整流叶片都存在不可避免的原理和技术缺陷, 本文开发设计了一种新型整流叶片——旋流叶片。

旋流叶片结构简单、成本低，而对它们的研究主要集中在单相流的传热及流动阻力上^[204-206]。旋流叶片可以通过旋流扰动的作用将两相流旋转，在离心力的作用下，实现相分离，形成环状流。

如图 2-5 所示，旋流叶片的结构由中心轴和围绕中心轴的若干相同的螺旋叶片焊接而成。

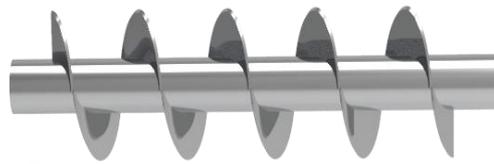


图 2-5 旋流叶片结构图

Fig.2-5 Structure diagram of swirl vane

旋流叶片外径能保证旋流叶片外缘与管道内轮廓贴合紧密，不留缝隙^[146]，这样做的目的是当来流经过旋流叶片时，由于叶片外缘与管壁之间无缝隙，使得流体无法沿管壁继续流动，而是被迫沿着叶片表面方向向下游流动，从而使得来流在叶片的交叉处形成旋转运动，将分层流、波浪流、段塞流等不均匀、不对称、低含液率的流型转变成对称的环状流，并在下游管路处保持一段时间的环状流型，直至由于重力作用及气流的扰动作用使得流型发生变化^[203]。

旋流叶片相比传统整流叶片有如下优点：

- (1) 结构非常简单，制造容易；
- (2) 不为运动部件，因此在气液比大的时候不会发生卡堵和震动现象，磨损小，可靠稳定；
- (3) 有利于提高分流器内部流场稳定性；
- (4) 数值模拟结果表明：旋流叶片将不均匀、不对称的流型转变成均匀对称的环状流的效果更好。

为保证旋流叶片的硬度，旋流叶片采用 2mm 厚的不锈钢片制作。如图 2-6 和表 2-1 所示，旋流叶片选用 5 个周期，螺距 C 为 20mm，内径 d 是 8mm，外径与管道的内径一致都是 45mm。

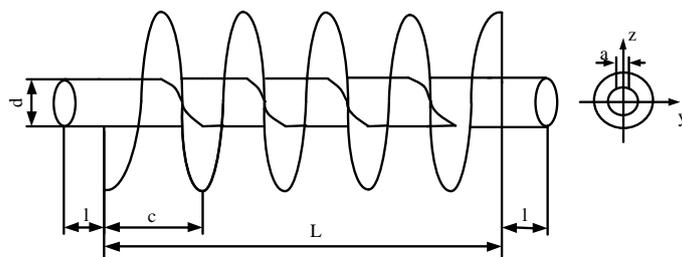


图 2-6 旋流叶片结构图

Fig.2-6 Structure diagram of swirl vane

表 2-1 旋流叶片结构尺寸

Tab2-1 Geometric parameters of swirl vane

l/mm	L/mm	C/mm	a/mm	d/mm
10	100	20	2	8

2.2.3 整流器

目前，整流器可以分为三种，分别为圆柱式整流器、喇叭口式整流器和圆弧过渡式整流器^[207]，如图 2-7 所示。圆柱式整流器和喇叭口式整流器形成的环状液膜不能紧贴着管壁流动而是形成了一股射流，不利于均匀分配；而圆弧过渡式整流器能够很好的消除旋转作用，并且改善流型的对称性使得周向液膜分布更加均匀，但其型线复杂，难以加工^[203]。

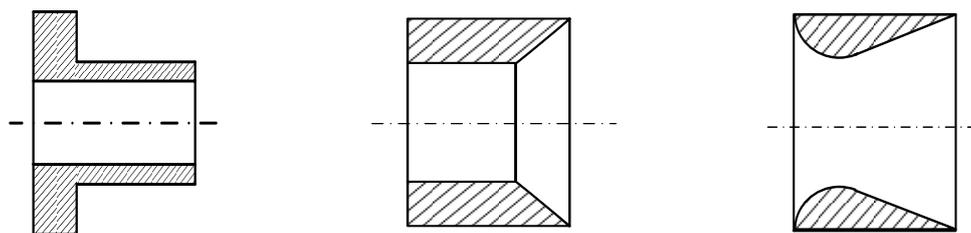




图 2-7 传统整流器结构图

Fig.2-7 Structure diagram of conventional rectifier

因此，本文采用一种新型整流器——圆弧形整流器，如图 2-8 所示。旋流后的流体经过圆弧形整流器后的环状流特别均匀，能紧贴壁面，具有更宽、较好的整流范围，且能量损失较小。



图 2-8 新型整流器结构图

Fig.2-8 Structure diagram of novel rectifier

新型圆弧形整流器的曲率半径直接决定着对环状流流型的转化效果：

(1) 曲率半径过大，对环状流流型的整流效果不好，不能保证分流的均匀性和稳定性；

(2) 曲率半径过小，整流效果可以明显地改善，但会使两相流体流过整流器时压力损失的增加。

曲率减小时，整流器内气相速度分布极为紊乱，甚至出现回流现象，且气相速度分布没有得到充分发展，导致出口压力减小，这意味着两相流经过整流器后的压力损失增大；研究表明：整流器的曲率半径为 25mm 时液膜的厚度都比较均匀，流型的转化效果最好，同时压力损失也较小^[208]。

圆弧型整流器尺寸如图 2-9 所示。

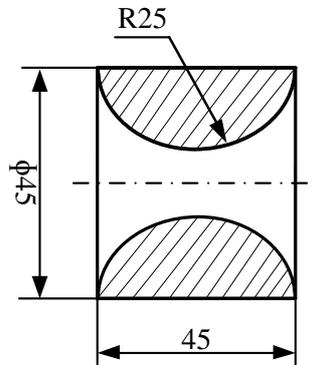


图 2-9 圆弧式整流器结构尺寸

Fig.2-9 Structural dimensions of arc rectifier

2.3 两相流临界流动特性

2.3.1 两相流临界流动原理

气液两相流通过音速喷嘴时，喷嘴的降压加速效应主要发生在喉部附近。利用喷嘴对气液两相流进行加速，目的是促使气液两相流在喷嘴喉部达到当地声速，形成临界流动；并喷嘴的降压提速作用可以增强制冷剂的扰动，强化提高下游换热管内的对流换热。

根据临界流动特性，通过喷嘴的流量大小只受上游滞止参数的影响，而与下游压力波动无关，即通过临界流切断喷嘴下游压力扰动向上游的传播途径^[145]，避免各支路流量受下游蒸发器各支路阻力不一致、供液高差等不良因素的影响，从根本上抑制下游各支管路阻力不一致导致的相分离。只有改变上游的流动参数，才会改变喉部的流动状态。因此，只需要在喷嘴喉部能够达到临界流即可。

2.3.2 气液两相流声速公式

喷嘴内部的两相流之间的摩擦热可以认为由内部流体吸收，而且，气液两相流流过喷嘴的时间很短，与外界换热也很小，因此可以认为两相流在喷嘴中的流动过程属于可逆绝热过程（等熵流动）^[209]。

设气液两相流中气相介质的密度是 ρ_G ，声速是 c_G ，体积弹性模量是 K_G ；液相介质的密度是 ρ_L ，声速是 c_L ，体积弹性模量是 K_L 。气相所占的体积百分数为 α_L 。那么，混合流体的密度 ρ_m 可以表示为：

$$\rho_m = \alpha_G \rho_G + \alpha_L \rho_L \quad (2-1)$$

对于流体介质而言，有体积弹性模量：

$$K = \rho_m c_m^2 \quad (2-2)$$

流体的体积弹性模量是应力 σ 与应变 ε 的比值：

$$K = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2-3)$$

气液两相流混合介质中，应力与应变满足：

$$\sigma_G = \sigma_L = \sigma \quad (2-4)$$

$$\alpha_G \varepsilon_G + \alpha_L \varepsilon_L = \varepsilon \quad (2-5)$$

将式(2-4)和式(2-5)代入式(2-6)中，得混合流体的体积弹性模量为

$$K^{-1} = \alpha K_G^{-1} + (1 - \alpha) K_L^{-1} \quad (2-6)$$

根据式(2-2)，利用混合流体的体积弹性模量式(6)和密度式(2)，就可求得混合流体的声速：

$$c_m = \sqrt{\frac{1}{[\alpha K_G^{-1} + (1 - \alpha) K_L^{-1}][\alpha_G \rho_G + \alpha_L \rho_L]}} \quad (2-7)$$

此即混合流体的 Wood 声速公式^[210]。另外，许多情况下，气体和液体有 $K_G \gg K_L$ ，则可以近似忽略式(2-6)等号右侧的第二项，则式(2-7)与气泡半径远小于流体中的声波波长假设下的气液两相流中的声速^[211]公式相同：

$$c_m = \frac{P_m \delta}{\rho_m} = \frac{P_G \delta}{\rho_m} c_G^2 \quad (2-8)$$

其中， P_m 表示流体中的声压， $\delta = [(1+g)/g] \cdot (\rho_G / \rho_m)$ ，其中 g 是气相介质与液相介质的质量比， $g = m_G / m_L$ 。

气液两相流在喉部达到声速时，流经喷嘴的流体的流量达到稳定值，存在阻塞现象^[209]，即临界流切断喷嘴下游的压力扰动向上游传播，克服了音速喷嘴之间因出口压力不一致导致的相分离。此时，只有改变上游的流动参数，才会改变喉部的流动状态。因此，只需要在喷嘴喉部能够达到临界流即可。

可根据 Wood 声速方程，预测两相流声速和气体的体积含气率（体积分数）和质量含气率（质量分数、干度）的关系图线。

在气液两相流中，气体的体积含气率与气体的质量含气率可以互相转化：

$$X_G = \frac{M_G / \rho_G}{M_G / \rho_G + M_L / \rho_L} \quad (2-9)$$

两边取倒数，可以简化得到

$$1 / X_G = 1 + \frac{\rho_G}{\rho_L} \left(\frac{1}{\phi_G} - 1 \right) \quad (2-10)$$

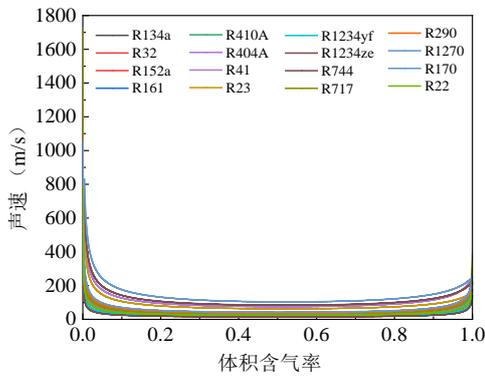


图 2-10 两相流声速随体积含气率的变化
Fig.2-10 Variation of sound velocity with volume void fraction in two-phase flow

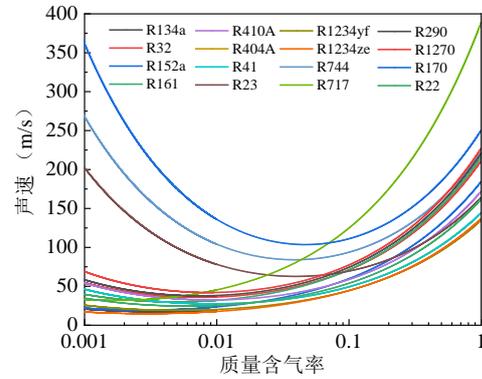


图 2-11 两相流声速随质量含气率的变化
Fig.2-11 Variation of sound velocity with mass void fraction in two-phase flow

图 2-10 为当蒸发温度为 -28°C 时不同制冷剂的两相流声速随体积含气率的变化规律，图 2-11 为当蒸发温度为 -28°C 时不同制冷剂的两相流声速随质量含气率的变化规律。如图 2-10 和图 2-11 所示，气液两相混合物具有低声速的特点，气液两相制冷剂的声速远小于任何一种制冷剂单相气体或单相液体的声速^[212]。体积含气率接近 0 时，制冷剂两相流声速接近于制冷剂液相的声速。体积含气率接近 1 时，制冷剂两相流声速接近于制冷剂气相的声速。随着体积含气率或质量含气率的增大，气液两相制冷剂的声速先减小后增大，存在最小值；其中，R22 制冷剂液相的声速为

790.95m/s，气相的声速为 162.03m/s，而 R22 气液两相混合物的声速大多数情况下为数十米，在体积含气率（空泡率）为 0.495 时达到最小值，只有 24.656m/s 左右。

可见，与单相气体或液体相比，气液两相临界流动更易实现。体积含气率在 0.2 到 0.9 之间时，气液两相制冷剂的声速比较稳定。此外，从制冷剂的两相流声速随体积含气率的变化曲线可以看出，在纯制冷剂液体中加入制冷剂气体和在纯制冷剂气体中加入制冷剂液体时声速都会异常迅速的减小。这是因为气液两相混合物有着液体的密度大的性质，也有气体的压缩性大的性质^[145]。

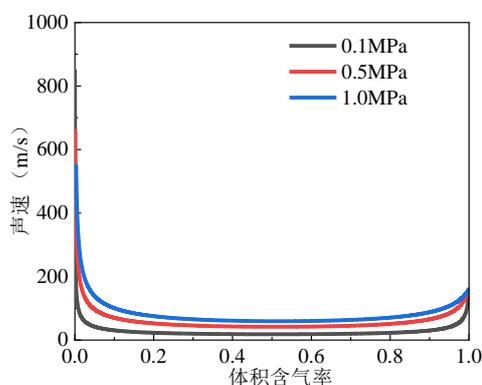


图 2-12 不同压力下 R22 两相流声速随体积含气率的变化

Fig.2-12 Variation of sound velocity of R22 two-phase flow with volume void fraction at different pressures

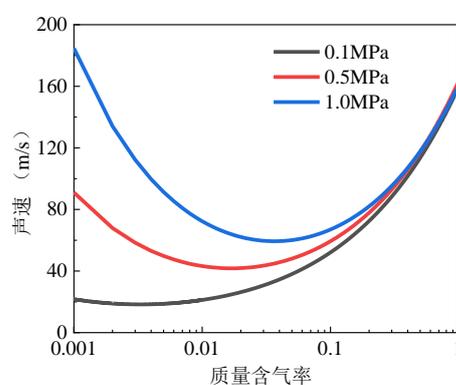


图 2-13 不同压力下 R22 两相流声速随质量含气率的变化

Fig.2-13 Variation of sound velocity of R22 two-phase flow with mass void fraction at different pressures

图 2-12 为不同蒸发压力下 R22 两相流声速随体积含气率的变化规律。从图 2-12 中可以看出，随压力升高纯 R22 液体的声速逐渐减小，而纯 R22 气体的声速逐渐增大。体积含气率在 0.2 到 0.9 之间时，气液两相制冷剂的声速比较稳定。随压力越大，两相流混合声速越大，主要原因是：压力的增大使得气相密度相应的增加，气相的声速就会增大，从而使得两相的声速增大^[145]。

图 2-13 为不同压力下 R22 两相流声速随质量含气率的变化曲线。当质量含气率

大于 0.01 时，随质量含气率的增大，压力对制冷剂两相流声速的影响减小，最终接近纯制冷剂气体的声速。这是因为质量含气率大于 0.01 后，两相流中的液体体积含量比较小，气体占绝大部分体积，气体声速的变化对体系的压缩性影响性也相应的变小。当质量含气率逐渐接近 1 的时候，两相流的声速也接近纯气体的声速^[145]。

从此可见，气液两相流具有低音速的特点^[213]。只要喉部气体体积含气率在 0.2~0.9 之间，或者质量含气率在 0.001~0.1 之间，气液两相流在喉部达到临界时的混合速度都较小。与单相气体或液体相比，气液两相流在喷嘴喉部的阻塞效应容易发生。

2.3.3 音速喷嘴结构设计

喷嘴是使气流膨胀以获得高速流动的设备，在喷嘴内的流体流动可看作一维定常等熵流动。喷嘴计算的目的在于选择喷嘴的外形和尺寸，设计合格的音速喷嘴可保证出口流体均匀一致，达到超音速，紊流度小，且流场中不存在激波^[214]。对于两相流的喷嘴，主要研究能够达到临界流的范围。

2.3.3.1 喉部结构设计

R22 蒸气压缩式制冷系统的 $P-h$ 图如图 2-15 所示，对制冷剂 R22 蒸气压缩式制冷系统进行模拟，针对制冷系统中各部件的能量转换建立相应的数学模型。为简化问题分析，作出以下假设^[215-217]：

- (1) 忽略制冷系统中换热器与周围环境的换热；
- (2) 假设压缩机的压缩过程是绝热且不可逆的；
- (3) 假设制冷剂膨胀过程前后焓值不发生变化；
- (4) 忽略制冷系统中连接管路及换热设备中的压力损失；
- (5) 假设制冷剂压缩过程的等熵效率受压缩机压比的影响。

基于上述假设，系统的基本参数值如表 2-2 所示^[218, 219]。

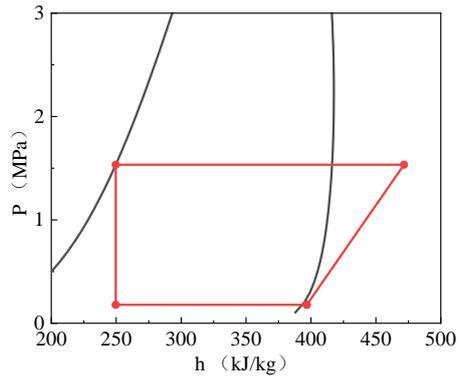


图 2-15 R22 蒸气压缩式制冷系统的 $P-h$ 图

Fig.2-15 $P-h$ diagram of R22 vapor compression refrigeration system

表 2-2 系统的基本参数

Tab.2-2 Basic parameter values of the systems

参数	单位	值	参数	单位	值
制冷量 Q_e	kW	6	机械效率 η_m	%	93
冷凝温度 T_k	$^{\circ}\text{C}$	40	电效率 η_E	%	93
蒸发温度 T_e	$^{\circ}\text{C}$	-28	蒸发器出口过热度	$^{\circ}\text{C}$	5

基于上述条件，制冷系统中各部件的能量平衡和用平衡方程如表 2-3 所示。利用 REFPROP 9.0 对制冷剂的热力学性质进行评价，并利用 MATLAB 求解模型。

表 2-3 制冷系统的平衡方程

Tab.2-3 Equilibrium equation of refrigeration system

部件	能量平衡方程
压缩机	$W_{Comp} = \frac{m(h_{2s} - h_1)}{\eta_s \eta_m \eta_E} = \frac{m(h_2 - h_1)}{\eta_m \eta_E}$
冷凝器	$Q_k = m(h_3 - h_2)$
节流阀	$h_4 = h_3$
蒸发器	$Q_e = m(h_1 - h_4), \quad m = Q_e / (h_1 - h_4)$

压缩机的等熵效率如式 2-11 所示，具体表达如下：

$$\eta_s = 0.874 - 0.0135R_p \quad (2-11)$$

编程计算得：质量流量 $m = 0.0407 \text{ kg/s}$ ，干度 $x = 0.362$ 。由公式 (2-8) 可知 R22 制冷剂两相流声速为 $c_m = 98.49 \text{ m/s}$ 。

假设蒸发器各支路分流均匀，分流器有 4 个供液管，则分流器的每个喷嘴内流量为 $m_i = \frac{m}{n} = \frac{0.0407}{4} = 0.0102 \text{ kg/s}$ 。

在临界流动状态下，不考虑边界层的影响，喉部面积可按下式计算^[220]：

$$A = \frac{m}{\rho_m c_m} = \pi r_{cr}^2 \quad (2-12)$$

式中： m 表示质量流量， ρ_m 表示两相流密度， c_m 表示喉部速度（临界速度）， A 表示喉部面积， r_{cr} 表示喉部半径。

按公式 (2-12) 得 $r_{cr} = 0.0012 \text{ m} = 1.2 \text{ mm}$ ； $d_{cr} = 2r_{cr} = 2.4 \text{ mm}$ 。

2.3.3.2 稳定段结构设计

稳定段的目的是使进入喷嘴的两相流参数均匀，使两相流能够尽量达到速度、压力的平衡，并降低紊流度。稳定段的直径 D_1 和喉部的直径 D_{cr} 有关，对于气液两相流，理论上 L_1 大于喉部直径 D_{cr} 的 10 倍时就能保证两相流混合均匀^[220]。

稳定段长度取 $L_1 = 10d_{cr} = 24 \text{ mm}$ 。

稳定段直径 d_1 取 8 mm 。

在喷嘴入口处： $d_1 = 8 \text{ mm}$ ， $A_1 = \frac{1}{4} \pi d_1^2 = 50.24 \text{ mm}^2 \approx 50 \text{ mm}^2$

2.3.3.3 亚声速收缩段结构设计

亚声速收缩段作为将稳定段来的流体降压、速度达到音速的关键部位，内壁面在加工过程中必须要达到光滑，以实现气流在喷管内的膨胀，降低气体与壁面的摩擦损失^[221]。同时，为保证收缩段的出口流体均匀、平直而且稳定的流动，降低气流在进口截面产生的横向压力梯度和径向分速度，合理的收缩段进口面积和出口面积的比值及收缩段曲线形状是收缩段设计的重要依据。

收缩段的设计方法有多种，一般采用维托幸斯基曲线^[222]，一维流曲线^[221]，五次曲线^[223]、双三次曲线^[214]等方法进行设计。本文采用维托幸斯基曲线方程。因为这种方法的流场过渡自然，涡流比较小，可以在收缩段出口处获得均匀的气流，而且流速也相对较高。

维托幸斯基曲线方程

$$r = \frac{r_{cr}}{\sqrt{1 - \frac{\left[1 - \left(\frac{r_{cr}}{r_1}\right)^2\right] \left(\frac{1-3x^2}{l^2}\right)^2}{\left(1 + \frac{x^2}{l^2}\right)^3}}} \quad (2-13)$$

式中： r_1 、 r_{cr} 、 r 分别为收缩段入口、收缩段出口及任意 x 处的截面半径，

$l = \sqrt{3}L_2$ ， L_2 为收缩段长度（如图 2-13 所示）。

取喷嘴渐缩角 $\alpha=15^\circ$ 。

因此， $L_2 = r_1 / \tan 15^\circ = 14.928\text{mm}$ ， $l = \sqrt{3}L_2 = 25.856\text{mm}$ ，经 MATLAB 编

程计算可绘制喷嘴收缩段的形状曲线，如图 2-14 所示。

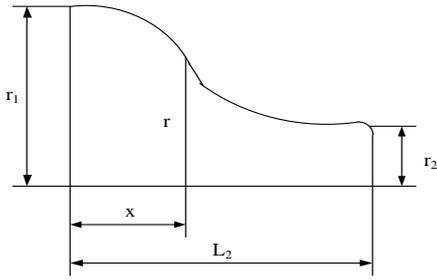


图 2-13 收缩段型线

Fig.2-13 Profile curve of the convergent section

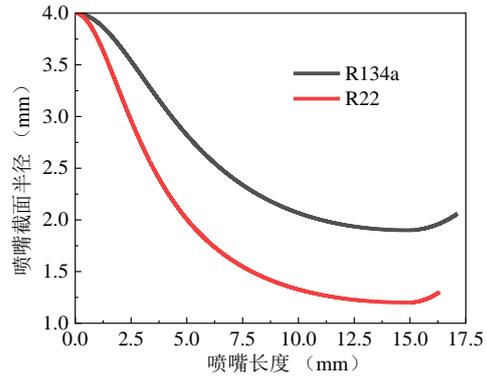


图 2-14 喷嘴收缩段型线

Fig.2-14 Profile of the shrinking segment of the nozzle

2.3.3.4 超音速扩张段结构设计

扩张段采用前段为圆弧加直线的曲线^[224]。

如图 2-15 所示，圆心位于通过喉部的 y 轴上，直线的斜率为 c ，其中， θ_A 即为喷管的最大膨胀角。圆弧的作用在于使喉部的平直音速流向泉流过渡。比较长的一段道线，有利于气流转变成泉流，并以泉流型式加速。直线段越长，越能使流动接近真正的泉流。

用解析式表示前段曲线，在 P 点以前的圆弧

$$y = R + y^* - \sqrt{R^2 - x^2} \quad (0 \leq x \leq x_p) \quad (2-14)$$

P 点以后的直线段

$$y = (x - x_p) \tan \theta_A + y_p \quad (x_p \leq x \leq x_A) \quad (2-15)$$

P 点坐标

$$x_P = R \sin \theta_A, \quad y_P = R + y^* - R \cos \theta_A \quad (2-16)$$

转折点 A 的坐标

$$x_A = r_A \cos \theta_A - \Delta x, \quad y_A = r_A \sin \theta_A \quad (2-17)$$

根据几何关系可以求得

$$\Delta x = y^* \operatorname{ctg} \theta_A - R \operatorname{tg} \frac{\theta_A}{2} \quad (2-18)$$

圆弧半径可取为 $R \geq y^*$ 。根据经验，在这种情况下，喉部的均匀音速流能够近似地变成泉流。

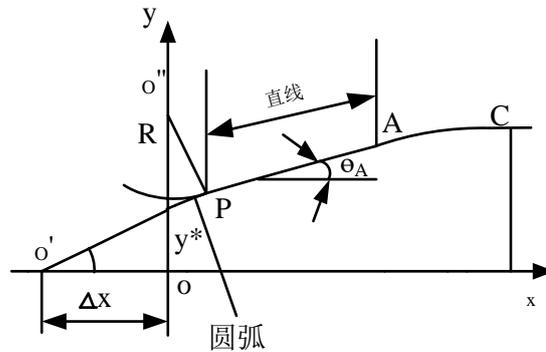


图 2-15 前段为圆弧加直线的喷嘴曲线

Fig.2-15 Nozzle curve with arc plus straight line in front

喷嘴能够使来流达到临界流速即可，喉部直径 $d_{cr} = 2r_{cr} = 2.4\text{mm}$ ，按照喷管出口马赫数 2 设计扩张段(以扩张段入口即喉部为坐标原点)。

经编程计算并绘制出喷嘴扩张段形状曲线。

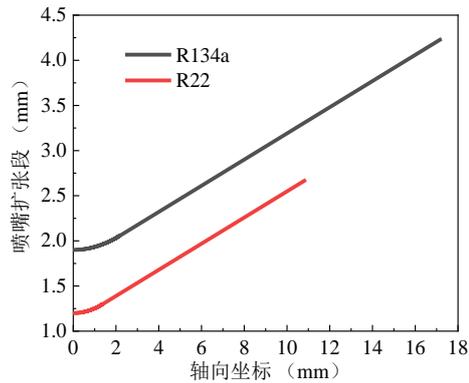
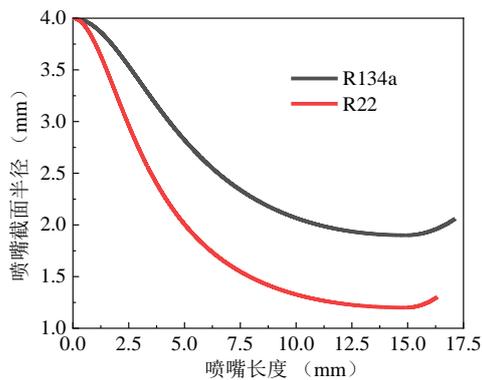


图 2-16 喷嘴扩张段形状曲线

Fig.2-16 Shape curve of nozzle expansion segment

2.3.3.5 音速喷嘴结构尺寸

整流喷嘴式分流器通过旋流叶片和整流器将不均匀、不对称、含液率低的流型调整为理想环状流，从而保证管周各垂直安装的音速喷嘴入口参数完全一致，接触气、液相的几率完全相等。而稳定段的目的是使进入喷嘴的两相流流体参数能够均匀，使得两相流能够尽量达到速度、压力的平衡，并降低紊流度^[220]。因此整流喷嘴式分流器的音速喷嘴设计不需要稳定段，只需要收缩段、喉部和扩张段。音速喷嘴结构尺寸和三维模型图如图 2-17 所示。



(a) 结构尺寸



(b) 三维模型

图 2-17 音速喷嘴

Fig.2-17 Sonic nozzle

2.4 整流喷嘴式分流器结构尺寸

整流喷嘴式分流器的结构尺寸如图 2-18 所示。

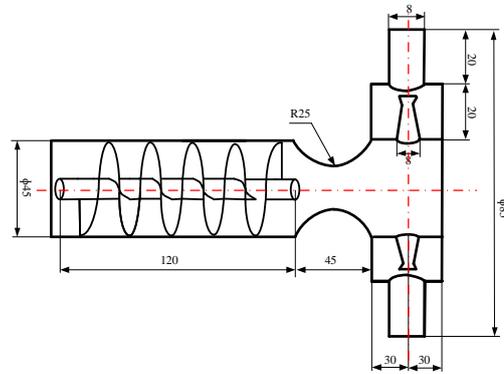


图 2-18 整流喷嘴式分流器的结构尺寸图

Fig.2-18 Structural dimension diagram of rectifying nozzle-type distributor

2.5 整流喷嘴式分流器优势

与现有技术相比：

(1) 传统“先混合、后分流”的分流器通过降压增速的方法使气液两相制冷剂充分混合实现均匀分配，当制冷系统在部分负荷运行或偏离设计工况运行时，其流量和压降降低，与传统分流器降压增速的原理相矛盾。而整流喷嘴式分流器采用截然相反的整流方式——离心力法，即通过旋流叶片的环流扰动作用将气液分离，经整流后形成均匀环状流，实现均匀分配。

(2) 整流喷嘴式分流器通过旋流叶片、圆弧整流器将流型调整为理想环状流，克服上流流动状态对分流特性的影响；解决因重力作用（倾斜安装）和离心力作用（分流器结构），传统分流器分流不均的问题。

(3) 整流喷嘴式分流器通过音速喷嘴使两相流达到当地音速，克服下流蒸发器各支路非均匀换热对分流特性的影响；解决蒸发器各流路阻力不一致、压力波振荡、供液高差等不良因素的影响。

(4) 整流喷嘴式分流器和膨胀阀组合的一体化装置通过节流降压增速将层流流动转化为紊流流动，并经流型整定后进入各分流支路，克服“先混合、后分流”分流原理因流量小而无法均匀分流的原理缺陷，实现各支路均匀供液，改善蒸发器传热性能。

(5) 整流喷嘴式分流器和膨胀阀组合的一体化装置采用新型设计理念，解决基于“先混合、后分流”分流原理的分流器的大压降导致的蒸发温度大幅度降低，压缩机功耗增大的问题。

(6) 制冷系统通过整流喷嘴式分流器的作用，在制冷系统变工况运行时，只要气液两相制冷剂在喷嘴喉部达到临界状态，就能实现均匀供液。因此，在变工况下仍有较好的分流效果和较宽的使用范围。

(7) 整流喷嘴分流器通过结构设计，可有效避免传统分流器进液管弯曲结构引起的离心力作用下的相分离。并且在整机安装时，不需要对有原制冷系统做任何改装，可直接替换传统分流器。

(8) 整流喷嘴分流器无运动部件和控制部件，可靠稳定。

2.6 本章小结

对基于“环流整定+临界分流”分流理念的整流喷嘴式分流器进行理论分析和结构设计，阐述整流机理和两相流临界流动机理：流型整定是通过整流元件将上流不均匀、不对称、含液率低的流型调整为理想环状流，克服上流流动状态对分流特性影响；临界分流是通过音速喷嘴使两相流达到当地音速，克服下流各支路非均匀换热对分流特性影响，解决各流路阻力不一致、压力波振荡、各支路供液高度差等不良因素对干式蒸发器传热性能影响。探索建立环状扰动和环状整定对环状流中液体分布均匀性的理论模型，优化设计旋流叶片和整流器。建立采用临界流理论抑制相分离现象的理论模型，优化设计音速喷嘴，建立整流喷嘴式分流器分流模型及全过程相分离现象的理论模型。

3 分流器分流特性及相分离控制的实验研究

3.1 实验方法比较

通过对关于相分离控制和分流特性的实验研究的文献调研发现，分流器分流性能测试方法主要分为以下三类：

(1) 使用气液混合物，如空气-水混合物或氮气-水混合物，在分流器后的各支管上分别测量气体和液体的流量，用以评估分流器的分流均匀性^[113, 184]。但气液混合物的密度差几乎是用于实际空调系统的制冷剂的 30 倍，与实际的制冷剂物性差距巨大，这将导致两相流的流动状态和行为有很大的差异，从而导致比较大的实验误差。除此之外，各支路分流是否等干度、等流量分流，也受到干式蒸发器各蒸发支路非均匀换热的影响，而这种实验方法无法考虑非均匀换热导致的压力波振荡对均匀分流的影响。

(2) 使用装有分流器的制冷系统，通过电加热器将分流器后的每个蒸发支路的制冷剂加热为具有一定加热状态的单相蒸汽，通过测试和对比分流器出口对应的各蒸发支路的过热来评估分流均匀性^[76, 80]。这种实验方法缺点为：当各蒸发支路进入过热区后，气液两相制冷剂进入干涸点，换热器的传热性能急剧下降，导致各支路的分流差异不明显。

(3) 测量制冷剂在分流后在每个分支管上的液体流量和气体流量，以及各蒸发支路的换热量，通过能量守恒定律计算分流器各出口的干度^[3, 25]。基于这种方法的测试系统相当复杂，需要与分支管的数量相对应的流量计和气液分离器，而且还需要许多流量测量传感器或开关电路来进行流量测量，成本高昂。

3.2 实验装置及测试方法

在制冷系统中，气液两相制冷剂的分流过程发生在节流后，与空气和水的两相流体相比，气液两相制冷剂的不稳定性更加复杂，更易于出现分流不均和相分离现

象^[89, 176]。节流后的气液两相制冷剂在管内流动特性呈现出空泡率高和稳定性差等特点，气相表观速度和液相表观速度明显不一致^[78]，流型复杂性也随之增加。

受气液两相分流原理、上游制冷剂流动状态和下游支路非均匀换热的影响，采用空气和水进行模拟的气液两相分流过程^[188-191]与饱和制冷剂气液两相分流过程出现较大偏差，其主要原因是节流过程、分流过程和下游支路同时与外界环境发生热交换，造成气液两相制冷剂流动稳定性差，支路压力振荡影响分流过程。

此外，传统的三种测试方法均无法研究实际制冷系统中多影响因素下分流器的分流特性，以及相分离导致制冷剂分流不均，尤其是耦合各蒸发支路非均匀换热导致的相分离对干式蒸发器传热性能的影响。因此，本文设计并搭建冷风机性能测试实验台。

3.2.1 实验装置

冷风机性能测试实验台的原理图如图 3-1 所示，该实验台由测试室系统和恒温室系统两部组成。

在恒温室系统中，包括恒温室、制冷机和控制系统。恒温室是通过隔热材料与周围环境进行热隔离的房间。恒温室的温度控制是通过制冷机和电加热器的热平衡来实现的，如图 3-1 所示。

在测试室系统中，包括测试室、分流器测试系统和热湿平衡系统。试验室与恒温室相似，两室由相同的保温材料构成。测试室设置在恒温室内。本设计的目的是准确地计算试验室与恒温室之间的热交换，使温度保持在 0°C 的恒定状态。

分流器试验系统为闭环系统，包括压缩机 1、油分离器 2、水冷凝器 3、储液器 4、截止阀 5、制冷剂质量流量计 6、电磁阀 7、视液镜 8、电子膨胀阀 9、分流器 10、翅片管式蒸发器 11，气液分离器 12，水泵 13 和水质量流量计 14。热湿平衡系统包括电加热器 15 和加湿器 16。在测试室中，热量和湿度平衡由电加热器 15 和加湿器 16 控制。

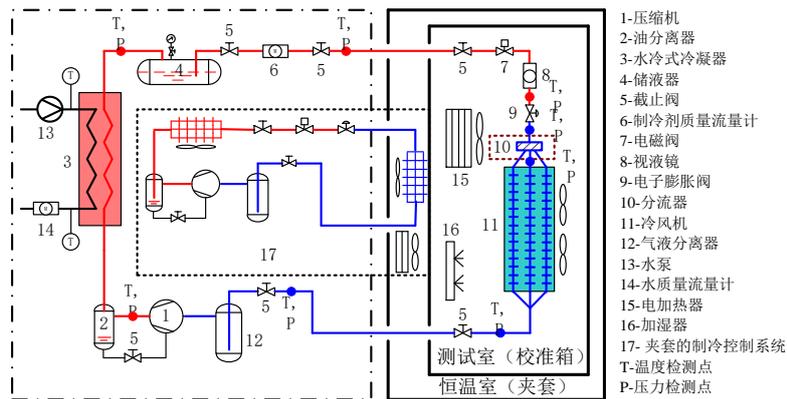


图 3-1 冷风机性能测试实验台

Fig.3-1 Experimental bench for testing the performance of fin-tube evaporator

分流器测试系统作为核心测试系统，提供了分流器和翅片管式蒸发器的所有测试条件。流过回路的流量可以通过电膨胀阀的部分流量来控制。回路中的流量由压缩机频率控制。制冷剂流向测试分流器，进入翅片管蒸发器的进气歧管，然后将流体划分为翅片管蒸发器的 6 个流道，这些流道被相对温暖的空气加热。相对温暖的空气由电加热器加热。翅片管蒸发器的总冷却能力是电加热器加热量和试验室与恒温室之间的换热量之和。通过安装在分流器和翅片管蒸发器进出口处的压力传感器，对分流器和翅片管蒸发器的压降进行了测试。

该冷风机性能测试实验台符合 SB/T 10795-2012/ASHRAE Standard 25-1991 (RA2006)《强制通风与自然对流制冷空气冷却器的试验方法》和 EN328:2003《制冷用强制通风空气冷却器性能试验方法》^[235]。

实验用冷风机的相关参数见表 3-1，管路流程布置见图 3-2。

表 3-1 冷风机的相关参数

Fig.3-1 Relevant parameters of fin-tube evaporator

换热面积 (m^2)	管距×排距 (mm×mm)	管 排	管 列	管径 (mm)	管形式	翅片间 距(mm)	翅片 形式
27.3	37×32	4	12	9.52	光滑管	7	波纹片

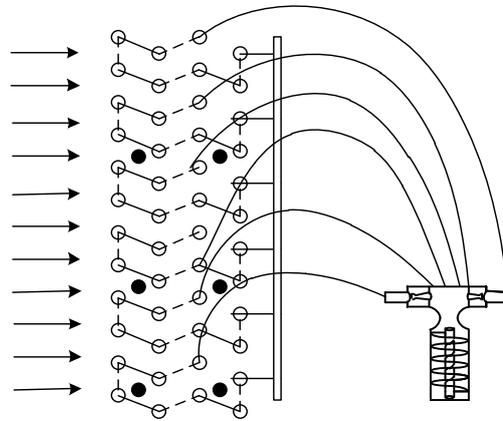


图 3-2 冷风机内部流程图

Fig.3-2 Refrigerant circuitry of the fin-tube evaporator

实验技术参数如下^[236]。

测试能力：

- (1) 1 台单出风或双出风冷风机，冷风机尺寸的长宽高为 2.0m×1.0m×1.2m；
- (2) 单台供冷机组的制冷量为：4kW~25kW，蒸发温度-31℃~2℃，全范围无级可调；
- (3) 校准箱内热平衡功率 0~30kW 可调；
- (4) 库房的漏热系数 17.6W/℃；校准箱内温度在-25℃~+10℃范围内（内外温差<28℃）时，库房的漏热量不大于 500W；
- (5) 库房外侧（夹套）温度可调范围-25℃~+40℃。

实验设备精度：

- (1) 校准箱外侧（夹套）温度不均匀性<0.5℃；
- (2) 校准箱外侧（夹套）温度波动<0.3℃；
- (3) 校准箱内温度不均匀性<0.5℃；
- (4) 校准箱内温度波动<0.3℃；

- (5) 温度测量误差 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$;
- (6) 质量流量测量误差 $\leq 0.2\%$;
- (7) 湿度测量误差 $\leq 3\%$;
- (8) 压力测量误差 $\leq 0.2\%$;
- (9) 电能测量误差 $\leq 0.5\%$ 。

3.2.2 测试方法

本课题在冷风机性能测试系统中分别安装文丘里分流器、CAL 分流器、气液分离式分流器、喷嘴式分流器和整流喷嘴式分流器进行实验测试，表 3-2 为实验工况，图 3-3 为五种分流器的三维结构图。

所用的测试方法是测试冷风机各支路过热度，并通过对比各支路过热度偏差来评估分流器的分流均匀性；通过对比分析不同实验工况下分流器对应的冷风机制冷量、传热系数和综合传热性能，全面、直观地反映出分流器的分流性能，并可反映出相分离导致制冷剂分流不均，尤其是耦合各蒸发支路非均匀换热导致的相分离对干式蒸发器传热性能的影响。

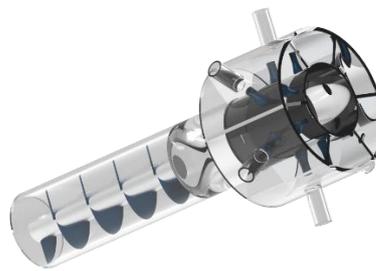
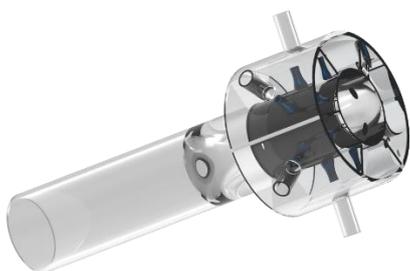
表3-2 实验测试工况

Tab.3-2 The experimental condition

夹套温度/ $^{\circ}\text{C}$		库房温度/ $^{\circ}\text{C}$				
0	0	-4	-8	-12	-16	-20



(a) 文丘里分流器 (b) CAL 分流器 (c) 气液分离式分流器



(d) 喷嘴式分流器

(e) 整流喷嘴式分流器

图 3-3 分流器三维结构图

Fig.3-3 Three-dimensional structure diagram of distributor

3.3 实验数据处理方法

3.3.1 制冷量处理方法

制冷量的数据处理主要有两类：空气侧热平衡法和制冷剂侧焓差法^[236]。

(1) 空气侧热平衡法

空气侧供冷量的计算公式如下：

$$Q_m = K_c(T_3 - T_4) + Q_1 + Q_2 \quad (3-1)$$

式中： K_c 为库房内漏热系数， $W/^\circ C$ ； T_3 为夹套内温度， $^\circ C$ ； T_4 为库温， $^\circ C$ ； Q_1 为库房内电加热器输入热量， W ； Q_2 为冷风机电机散热量， W 。

(2) 制冷剂侧焓差法

冷风机制冷剂侧供冷量的计算公式如下：

$$Q_n = q_m(H_2 - H_1) \quad (3-2)$$

式中： q_m 为制冷剂质量流量， kg/s ； H_1 为进入冷风机液体制冷剂焓值， kJ/kg ； H_2 为离开冷风机气体制冷剂焓值， kJ/kg 。

(3) 平均制冷量

冷风机的实际供冷量应为上述两种方法的平均值，即

$$Q = (Q_m + Q_n) / 2 \quad (3-3)$$

实验中要求这两种制冷量处理方法得到的数据的误差不超过 3%。

3.3.2 过热度处理方法

为能够直观地观察和分析整流喷嘴式分流器的分流均匀性，本文将总过热度偏差率的不均匀度作为分流器分流性能评价指标。不均匀度越小，代表分流器分流越均匀，反之，则表明分流不均匀。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_i - \bar{T}}{\bar{T}} \right| \quad (3-4)$$

式中： $\bar{\varepsilon}$ 为不均匀度； n 为分路数； T_i 为各支路的过热度， $^{\circ}\text{C}$ ； \bar{T} 为冷风街平均过热度， $^{\circ}\text{C}$ 。

3.3.3 冷风机综合性能指标

为了更直观的表现冷风机的性能改善效果，定义冷风机的综合性能指标，公式如下：

$$P = \sqrt{\left(\frac{Q}{Q_0} \right)^2 + \left(\frac{K}{K_0} \right)^2} \quad (3-5)$$

式中： Q —冷风机制冷量， W ； k —冷风机传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； Q_0 为文丘里分流器的制冷量， W ； K_0 为文丘里分流器的传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

3.4 实验结果及分析

3.4.1 分流器分流特性对分流器不均匀度的影响

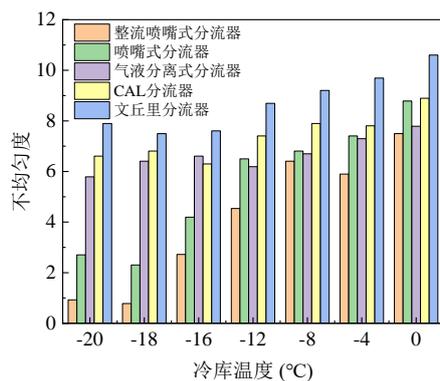


图 3-4 库温对分流器不均匀度的影响

Fig.3-4 Effect of storage temperature on unevenness of distributor

图 3-4 为五种分流器不均匀度随库温的变化规律。如图 3-4 所示，在库温为 -18°C ~ 0°C 时，分流器不均匀度随库温的降低而减小，这是因为随库温的降低，冷风机所需的制冷剂质量流量减小。在库温低于 -18°C 时，整流喷嘴式分流器和喷嘴式分流器的不均匀度上升是因为其偏离设计工况导致的。

同一工况下，分流器不均匀度由大到小依次为：整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器。在运行工况接近设计工况（蒸发温度为 -28°C ，库温为 -18°C ）时，整流喷嘴式分流器的分流效果最好，且整流喷嘴式分流器的不均匀度远低于其他形式的分流器，不均匀度只有 0.78%，这表明气液两相制冷剂经过旋流叶片的环流扰动作用和整流器的流型整定作用后环状流流型更加均匀稳定，使整理喷嘴式分流器分流效果最好，各分流支路过热度差别小，基本上已达到各支路均匀供液。

如图 3-4 所示，库温从 0°C 降至 -18°C 时，整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器的不均匀度分别降低了 89.6%、73.8%、17.7%、23.5%和 29.3%。可以看出整流喷嘴式分流器和喷嘴式分流器随着库温的降低，其不均匀度的降低较快，这是因为随库温的降低，蒸发温度降低，制冷压缩机的输气量减少，制冷剂的质量流量减小，从而导致流速随之降低，喷嘴喉部

制冷剂流速逐渐靠近临界流速，分流效果显著提高。

3.4.2 分流器分流特性对冷风机制冷量的影响

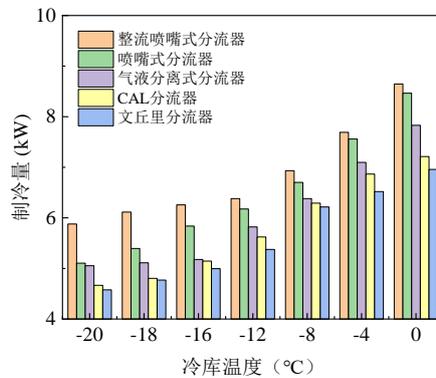


图 3-5 库温对冷风机制冷量的影响

Fig.3-5 Effect of storage temperature on cooling capacity of fin-tube evaporator

图 3-5 为五种分流器对应的冷风机制冷量随库温的变化规律。如图 3-5 所示，冷风机制冷量随库温的升高而增大。在各工况下，五种分流器对应的冷风机制冷量由大到小依次为：整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器。在库温为 0°C（高温库）时，整流喷嘴式分流器对应的冷风机制冷量为 8.65kW，分别比喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器、文丘里分流器对应的冷风机制冷提高了 3.0%，10.9%，20.1%和 25.4%。库温为-18°C（低温库）时，整流喷嘴式分流器对应的冷风机的制冷量为 6.0kW，相比喷嘴式分流器，气液分离式分流器，CAL 分流器和文丘里分流器对应冷风机的制冷量分别提高了 3.2%，9.2%，16.3%和 22.7%。库温从 0°C降低到-20°C时，五种分流器对应的冷风机制冷量分别从 8.65kW，8.4kW，7.8kW，7.2kW 和 6.9kW 降到了 5.9kW，5.1kW，5.0kW，4.7kW 和 4.6kW，分别降低了 46.6%，39.7%，35.5%，35.3%和 34.3%。

在库温为-18°C的设计工况下，整流喷嘴式分流器对应的冷风机制冷量和喷嘴式分流器对应的冷风机制冷量相差明显，这表明旋流叶片的环流扰动作用有效改善分

流器的分流性能。而在较高库温下，整流喷嘴式分流器对应的冷风机制冷量与喷嘴式分流器对应的冷风机制冷量差值减小，这是因为在较高的库温下，气液两相制冷剂质量流量较大，气流速度较高，液膜截面出现扰动波，液膜中不断有液滴被卷入到气体中，同时有液滴不断飞溅沉降回液膜，并产生携带，使得环状流型发生变化；另外流速增大引起整流喷嘴式分流器的压降增大，导致冷风机的平均蒸发温度降低，换热温差增大，不可逆损失增大，最终导致冷风机的制冷量减小。

3.4.3 分流器分流特性对冷风机传热系数的影响

图 3-6 为五种分流器对应的冷风机传热系数随库温的变化规律。如图 3-5 所示，总体来说，冷风机传热系数随库温的升高而增大。但库温为 $-18^{\circ}\text{C}\sim-12^{\circ}\text{C}$ 时，整流喷嘴式分流器对应的冷风机传热系数变化不大，甚至有所降低。这是因为此时整流喷嘴式分流器的不均匀度迅速增大（如图 3-4 所示），导致回气有部分制冷剂吸热不足未完全达到饱和。

五种分流器对应的冷风机传热系数由大到小依次为整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器。整流喷嘴式分流器和喷嘴式分流器对应的冷风机传热系数最大，是因为流型整定和临界分流的作用有效提升了整流喷嘴式分流器的分流效果，使冷风机各管路分流均匀，此外，喷嘴的降压提速作用可以增强制冷剂的扰动，强化提高下游换热管内的对流换热，进而提高冷风机的传热系数。

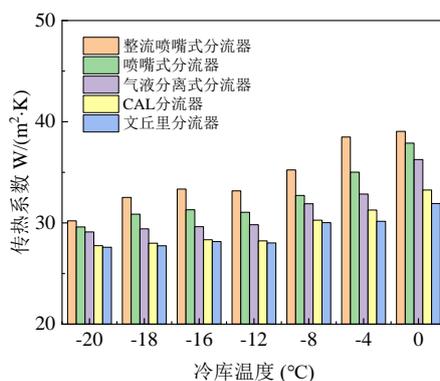


图 3-6 库温对冷风机传热系数的影响

Fig.3-6 Effect of storage temperature on heat transfer of fin-tube evaporator

库温为 0℃（高温库）时，整流喷嘴式分流器对应的冷风机传热系数为 39.0W/(m²·K)，分别比喷嘴式分流器，气液分离式分流器，CAL 分流器和文丘里分流器对应的冷风机传热系数提高了 3.2%，7.7%，17.5%和 22.3%。库温为-18℃（低温库）时，整流喷嘴式分流器对应的冷风机传热系数为 31.8 W/(m²·K)，相比喷嘴式分流器，气液分离式分流器，CAL 分流器，文丘里分流器对应的冷风机传热系数分别提高了 0.7%，0.9%，10.1%和 13.2%。

库温从 0℃变化到-20℃，整流喷嘴式分流器，喷嘴式分流器，气液分离式分流器，CAL 式分流器和文丘里分流器对应的冷风机传热系数分别从 39.0 W/(m²·K)，37.8 W/(m²·K)，36.2W/(m²·K)，33.2W/(m²·K)，31.9W/(m²·K)，降到 30.2 W/(m²·K)，29.6W/(m²·K)，29.1 W/(m²·K)，27.7 W/(m²·K)，27.6W/(m²·K)。整流喷嘴式分流器，喷嘴式分流器，气液分离式分流器，CAL 式分流器和文丘里分流器对应的冷风机传热系数分别下降了 29.1%，21.8%，19.7%，16.5%和 13.5%。

3.4.4 分流器分流特性对冷风机综合性能的影响

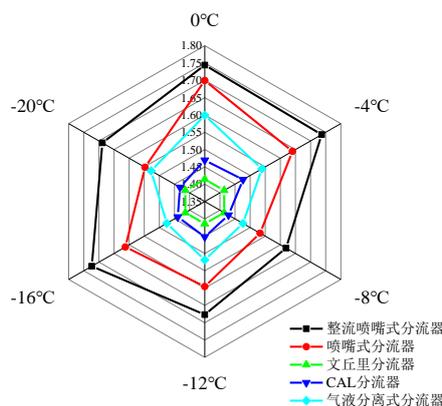


图 3-7 库温对冷风机综合性能的影响

Fig.3-7 Effect of storage temperature on comprehensive performance of fin-tube evaporator

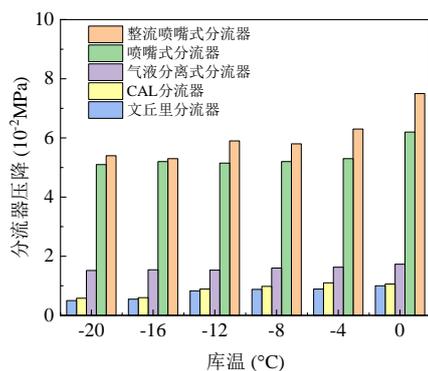
从图 3-7 可看出在各个工况下，采用整流喷嘴式分流器的冷风机综合性能最大。

在-18至-4℃库温下，冷风机综合性能提高显著。整流喷嘴式分流器在较大的库温工况内对冷风机性能都有不错的提升。因此，新型分流器对冷风机综合性能的改善有巨大帮助。

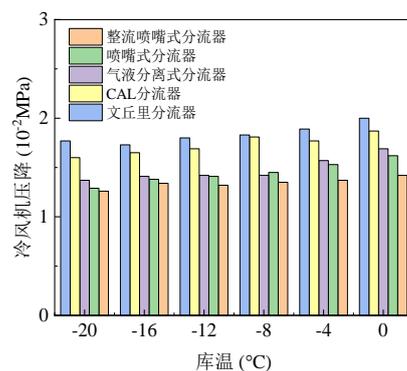
3.4.5 分流器分流特性对冷风机压降的影响

图 3-8a 为分流器的平均压降随库温的变化规律，图 3-8b 为分流器对应的冷风机平均压降随库温的变化规律，图 3-8c 为分流器和冷风机的总压降随库温的变化规律。如图 3-8 所示，五种分流器的压降、对应的冷风机压降和分流器与冷风机的总压降都随着库温的降低而减小，这是因为随着库温的降低，蒸发温度降低，节流阀开度减小，引起制冷系统中制冷剂的流量降低。

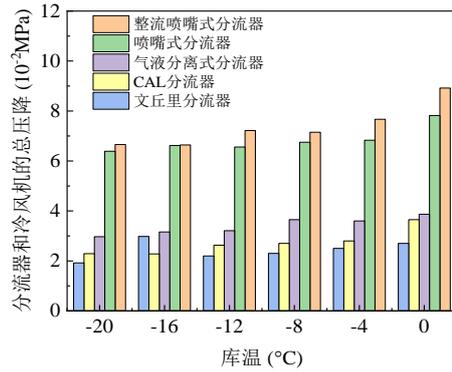
从图 3-8a 可以看出，分离器压降由大到小依次为：整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器。库温为-20℃~0℃的范围内，整流喷嘴式分流器压降分别是喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器的 1.21~1.06 倍、4.34~3.55 倍、7.07~9.31 倍和 7.5~10.8 倍。整流喷嘴式分流器和喷嘴式分流器的压降远高于其他形式的分流器的原因是：气液两相流通过音速喷嘴时，喷嘴的加速降压效应主要发生在喉部附近。



(a)



(b)



(c)

图 3-8 库温对 (a) 分流器压降, (b) 冷风机压降和 (c) 冷风机和分流器的总压降的影响

Fig.3-8 Effect of storage temperature on pressure drop of (a) distributor, (b) evaporator, (c) distributor and evaporator

从图 3-8b 可以看出,分流器对应的冷风机压降又大到小依次为:文丘里分离器、CAL 分流器、气液分离式分流器、喷嘴式分流器和整流喷嘴式分流器。整流喷嘴式分流器对应的冷风机压降最小,说明整流喷嘴式分流器供液充足,冷风机蒸发面积得到更充分的利用。整流喷嘴式分流压降分别是喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器的 0.88~0.98 倍、0.84~0.95 倍、0.76~0.81 倍和 0.71~0.77 倍。

图 3-8c 可以看出,分流器和冷风机的总压降由大到依次为:整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器。在库温为-20°C~0°C 的范围内,整流喷嘴式分流器对应的总压降分别是喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器的 1.14~1.04 倍、2.30~2.24 倍、2.44~2.91 倍和 3.30~3.47 倍。

从图 3-8 可以看出,整流喷嘴式分流器的压降占总压降的百分比最高,其次是喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器。在库温为-20°C~0°C 的范围内,整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器的压降所占总压降的百分比分别为 84.1%~79.8%、77.0%~79.8%、

43.8%~51.2%、25.3%~39.3%和 25.3%~39.3%。

整流喷嘴式分流器的压降大，会导致蒸发温度降低和压缩机功耗增大等问题，但根据本文提出的新型设计理念，可有效解决上述问题。

3.4.6 不确定性度分析

为了评估实验台测量结果的误差和测试手段的正确性，对冷风机制冷量和传热系数数据的不确定度进行了整理计算，具体计算方法参考文献^[225-227]。

在库温为-20℃~0℃的范围内，整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器对应的冷风机制冷量的不确定性度分别为 0.36%~0.48%、0.41%~0.52%、0.46%~0.56%、0.52%~0.57%、0.54%~0.64%；对应的冷风机传热系数的不确定度分别为 3.5%~4.5%、3.8%~4.8%、4.2%~5.0%、5%~7.5%、5.2%~7.2%。因此，实验所测试的冷风机制冷量不确定度不超过 1%，对应的传热系数不确定度不超过 8%。

3.5 本章小结

基于理论分析结果，设计和开发了整流喷嘴式分流器，并在冷风机性能测试实验台上进行测试，实验研究不同库温下，整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器的分流性能，以及其对冷风机传热性能的影响。并引入分流器不均匀度作为分流均匀性评价指标，用于评估分流器分流特性；引入冷风机综合性能指标，用于评估相分离导致的分流不均，尤其是耦合非均匀换热导致的相分离对冷风机传热性能的影响。研究结果表明：

(1) 整流喷嘴式分流器对应的分流器不均匀度和冷风机平均压降最小，说明整流喷嘴式分流器具有很好的分流特性，冷风机蒸发面积得到充分的利用。在运行工况接近设计工况（蒸发温度为-28℃，库温为-18℃）时，整流喷嘴式分流器分流效果最好，且远低于其他形式的分流器，不均匀度只有 0.78%，气液两相制冷剂经过旋流叶片的环境扰动作用和整流器的流型整定作用后环状流流型更加均匀稳定，使整理

喷嘴式分流器分流效果最好。

(2) 安装整流喷嘴式分流器的冷风机的制冷量、传热系数和综合性能最大。在库温为 $-18^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 的范围时，整流喷嘴式分流器对应冷风机的制冷量比喷嘴式分流器，气液分离式分流器，CAL 分流器和文丘里分流器对应冷风机的制冷量分别提高3.2%~3.0%、9.2%~10.9%、16.3%~20.1%和22.7%~25.4%；对应的传热系数分别提高0.7%~3.2%、0.9%~7.7%、10.1%~17.5%和13.2%~22.3%。因此，整流喷嘴式分流器可有效改善冷风机传热性能，从根本上克服了相分离导致的分流不均问题。

总体来看，采用整流喷嘴式分流器有效提高了干式蒸发器的传热效率。

4 结论及展望

4.1 结论

在干式蒸发器中，面临的主要问题为如何提高传热效率。其中，相分离导致的两相制冷剂分流不均，尤其是耦合非均匀换热的相分离严重影响干式蒸发器传热性能，导致其换热能力下降 30%~50%。因此，如何实现两相制冷剂均匀分流，抑制由非均匀换热引起的相分离成为提高干式蒸发器传热性能的关键。传统分流器由于其在分流原理上存在先天不足，在变工况时，会出现均匀分流性能下降甚至失去均匀分流能力的情况。为解决上述问题，保障干式蒸发器在各工况下均能实现均匀分流，须对气液两相流体的分流特性和相分离抑制机理进行研究。本文以节流后气液两相制冷剂在多支路中的分流过程为研究对象，将分流过程受分流原理、上游流体流动状态、下游支路非均匀换热以及气液两相流体物性对相分离现象的影响进行综合考虑。基于临界流理论抑制非均匀换热导致的相分离，建立全过程抑制相分离现象的理论模型。采用理论分析和实验研究相结合的手段，主要结论如下：

(1) 考虑到上流流动状态、气液两相流分流原理和下流非均匀换热对相分离的影响，以及环状流和雾状流是对均匀分流最有利的流型，提出基于“旋流整定+临界分流”分流理念的整流喷嘴式分流器和基于“雾化整定+临界分流”分流理念的雾化喷嘴式分流器。此外，考虑到传统的分流器设计理念的不合理性，提出新型分流器设计理念，即将分流器与膨胀阀设计为一体化装置，共同承担节流压降，并根据此理念设计开发整流喷嘴式分流器和雾化喷嘴式分流器，设计和撰写具有节流和分流功能的膨胀阀和分流器的膨胀分流一体化装置。

(2) 对基于“旋流整定+临界分流”分流理念的整流喷嘴式分流器进行理论分析和结构设计，阐述整流机理和两相流临界流动机理：流型整定是通过整流元件将上

流不均匀、不对称的流型调整为理想环状流，克服上流流动状态对分流特性影响；临界分流是通过音速喷嘴使两相流达到当地音速，克服下流各支路非均匀换热对分流特性影响，解决各流路阻力不一致、压力波振荡等不良因素对干式蒸发器传热性能影响。探索建立环状扰动和环状整定对环状流中液体分布均匀性的理论模型，优化设计旋流叶片和整流器。建立采用临界流理论抑制相分离现象的理论模型，优化设计音速喷嘴，建立整流喷嘴式分流器分流模型及全过程相分离现象的理论模型。

(3) 基于理论分析结果，设计和开发了整流喷嘴式分流器，并在冷风机性能测试实验台上进行测试，实验研究不同库温下，整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器的分流性能，以及其对冷风机传热性能的影响。研究表明：

整流喷嘴式分流器的不均匀度最小，在运行工况接近设计工况（蒸发温度 -28°C ，库温在 -18°C ）时，整流喷嘴式分流器分流效果最好，且远低于其他形式的分流器，不均匀度只有 0.78%，气液两相制冷剂经过旋流叶片的环流扰动作用和整流器的流型整定作用后环状流流型更加均匀稳定，使整流喷嘴式分流器分流效果最好。

整流喷嘴式分流器对应冷风机制冷量、传热系数和冷风机综合性能最大。在库温为 $-20^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 的范围内，与喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器相比，整流喷嘴式分流器对应的冷风机制冷量分别提高了 3.0%~3.2%，9.2%~10.9%，16.3%~20.1%和 22.7%~25.4%，对应的冷风机传热系数分别提高了 0.7%~3.2%、0.9%~7.7%、10.1%~17.5%和 13.2%~22.3%。整流喷嘴式分流器可从根本上克服相分离导致的制冷剂分流不均和非均匀换热引起的相分离对冷风机传热性能的影响，大幅度降低制冷系统生产成本，可在冷风机及类似干式蒸发器中推广应用。

本研究成果将有助于阐明非均匀换热工况下的气液两相制冷剂相分离抑制机理，丰富和完善多相流分流理论，为涉及两相流分流应用领域提供基础支持。

4.2 展望

关于如何有效提高分流器分流性能，克服相分离导致的制冷剂分流不均，尤其是耦合下游各蒸发支路非均匀换热导致的相分离对于式蒸发器传热性能的影响，国内外许多科研工作者和学者都开展了研究工作，分流器分流技术得到了发展和应用，但不可否认的是针对分流器的研究依然处于起步阶段，整体研究不够深入。

公开的文献中关于两相流分流研究一直关注在分流器结构尺寸及分流过程本身，鲜有将分流过程受分流原理、上游流体流动状态、下游支路非均匀换热以及气液两相流体物性对相分离现象的影响进行综合考虑，且未提出全过程理论方法。

因此，本文提出了一种提高系统性能的新型分流器设计理念，并根据此理念设计和开发了整流喷嘴式分流器，并通过理论分析和实验研究对其进行了相对较为全面的研究工作，但仍有许多研究工作有待开展。

(1) 本文设计开发了两种基于“先混合、后分流”分流原理的整流喷嘴式分流器和雾化喷嘴式分流器，本文中仅对整流喷嘴式分流器进行了详细分析，在后续工作开展时将重点对雾化喷嘴式分流器进行分析。对基于“雾化整定+先混合、后分流+临界分流”分流原理的整流喷嘴式分流器进行结构设计及优化：建立雾化扰动对雾状流中液体分布均匀性的理论模型，优化设计雾化喷嘴；建立采用临界流理论抑制相分离现象的理论模型，优化设计音速喷嘴；建立雾化喷嘴式分流器分流模型及全过程相分离现象的理论模型。并通过数值模拟和实验研究相结合的方法对不同因素对气液两相制冷剂分流性能影响、雾化扰动和临界流动对雾状流中液体分布均匀性的影响进行研究，并采用可视化观测实验手段验证理论模型的可靠性。雾化喷嘴式分流器技术路线图如图 4-1 所示。

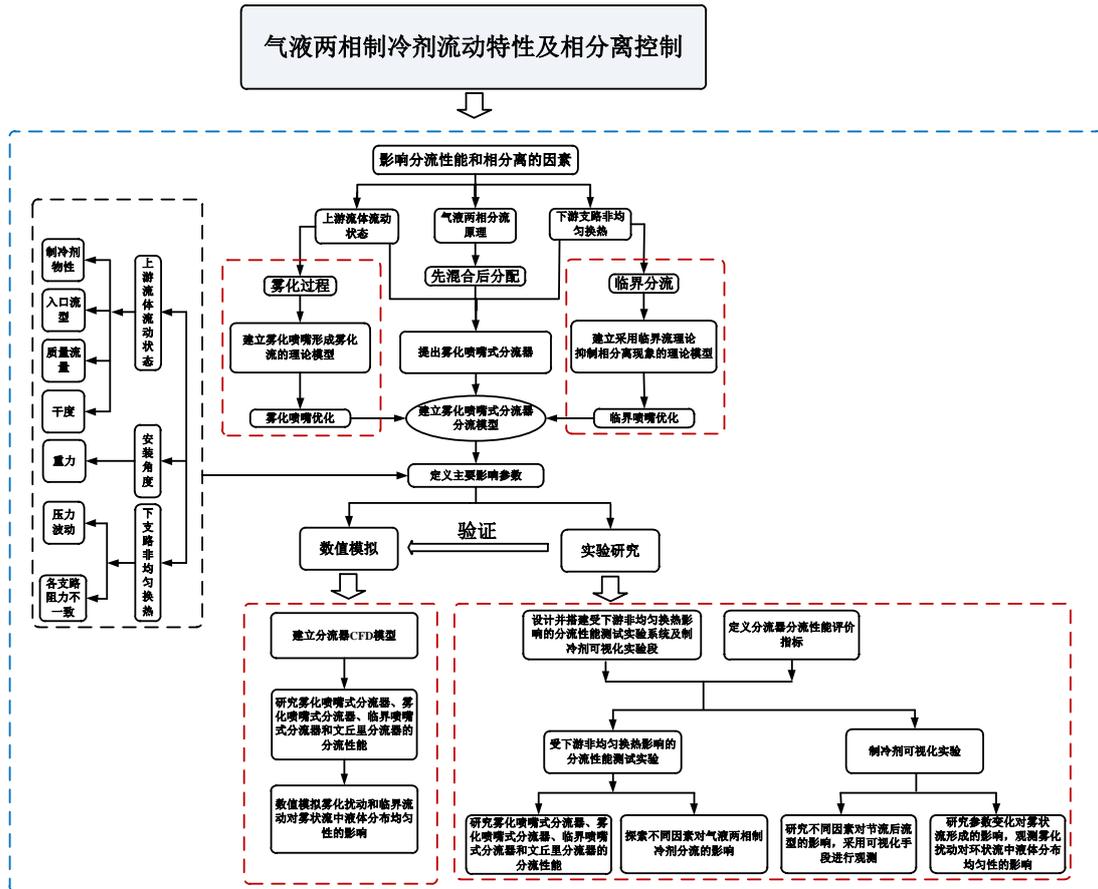


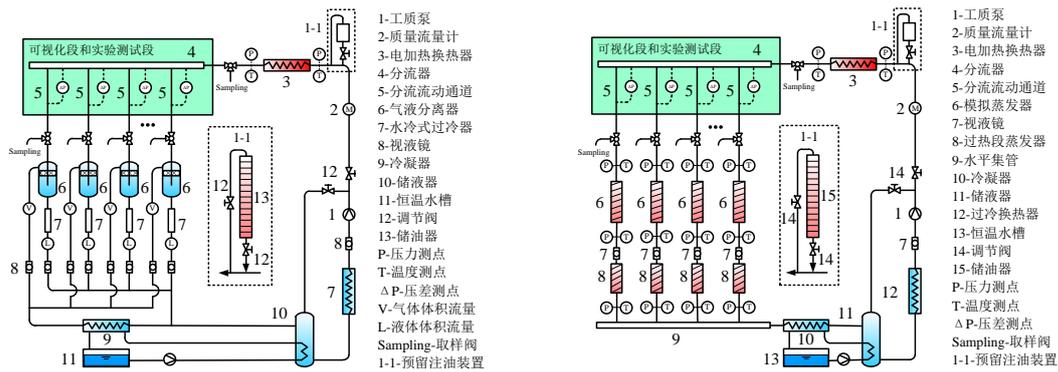
图 4-1 雾化喷嘴式分流器技术路线图

Fig.4-1 Technical roadmap of atomizing nozzle-type distributor

(2) 设计并搭建了受下游非均匀换热影响的分流性能测试实验台及制冷剂可视化段，但无法避免实际制冷系统中润滑油对两相制冷剂分流存在影响。因此，在后续工作开展时，设计并搭建一套为避免实际制冷系统中润滑油对两相制冷剂分流存在影响的节流后制冷剂可视化实验段及分流性能测试实验系统。设计了两套无润滑油的实验测试系统。两套系统均是通过电加热换热器 3 控制节流后气液两相制冷剂实验参数。分流器入口温度通过电加热换热器 3 控制，分流器入口压力通过工质泵 1 频率调节控制，分流器入口流量通过调节阀进行调节。系统的基本原理如图 4-2 所示，图 4-2a 为不受下游非均匀换热影响的分流性能测试实验系统，图 4-2b 为受下游非均匀换热影响的分流性能测试实验系统。

如图 4-2a 所示，气液两相制冷剂在工质泵 1 的输送下，流过质量流量计 2，经电加热蒸发器 3 进入实验测试段，在实验测试段前部设置可视化观测管段，将不同型号的分流器在实验测试段安装并进行性能测试，气液两相制冷剂通过分流器进入下游支路，在下游支路中设置气液分离器 6，将气液两相制冷剂进行分离，气相制冷剂通过气液分离器上部管路进入气体质量流量计，液相制冷剂经气液分离器下部管路进入水冷式换热器 7 进行过冷后进入液相质量流量计，分别测试各个支路气相制冷剂和液相制冷剂的流量，在气相和液相分离后的管路中分别安装视液镜 8。如图 2a 所示的多支路气相制冷剂经气相收集管路集中后，进入冷凝器 9 进行冷凝，液相制冷剂经液相收集管路集中后直接进入储液器 10。为冷凝器 9 和储液器 10 进行供冷的装置为恒温水槽 11，水冷式过冷器 7 用于保持制冷剂过冷状态，调节进入工质泵 1 的制冷剂参数，截止阀 12 用于调节系统中制冷剂循环量，13 为预留储油装置，兼具取样作用。此外，系统中设置了多个取样阀和测量点，用于测量分析系统中制冷剂热力学状态参数。

图 4-2b 为受下游非均匀换热影响的分流性能测试实验系统，该系统主要测试受下游参数影响的分流器相分离特性。考虑到气液两相制冷剂需进入换热管段 6/7，因此系统中不宜在分流器后安装气液分离器，相分离特性测试采用间接测试方法，即采用模拟蒸发器 6 和过热段蒸发器 8，其中模拟蒸发器段 6 对分流后制冷剂进行加热，液体制冷剂完全蒸发，此时的换热量即为液体蒸发时吸收的热量和漏冷量之和，从而间接测量液体制冷剂流量，其中漏冷量在实验开展前测试得到。气体进入过热段蒸发器后单相气体被加热，测量加热量，并计算进出口焓值，即可得到该支路的制冷剂总流量，最终根据制冷剂总流量和液体流量计算得到支路的制冷剂分流量，以此分析分流器的相分离特性。



(a) 不受下游非均匀换热影响的分流性能测试实验系统 (b) 受下游非均匀换热影响的分流性能测试实验系统

图 4-2 节流后制冷剂可视化实验段及分流性能测试实验系统

Fig.4-2 Visual experiment section of refrigerant after throttling and experimental system for testing distribution performance

在分流器测试实验系统中，设置多段分流过程的可视化观测段，如图 4-3 所示。为解决观测过程中受结霜或结露影响观测的问题，在观测管路外设计氮气夹层，隔离观测管路与周围湿空气直接接触，利用 CamRecord 600 高速摄影仪观测可视化段流型，利用 E+H 高精度质量流量计测量实验系统流量。

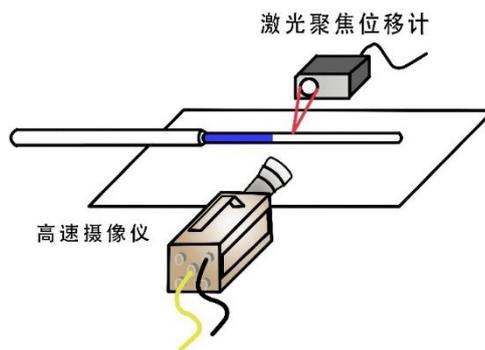
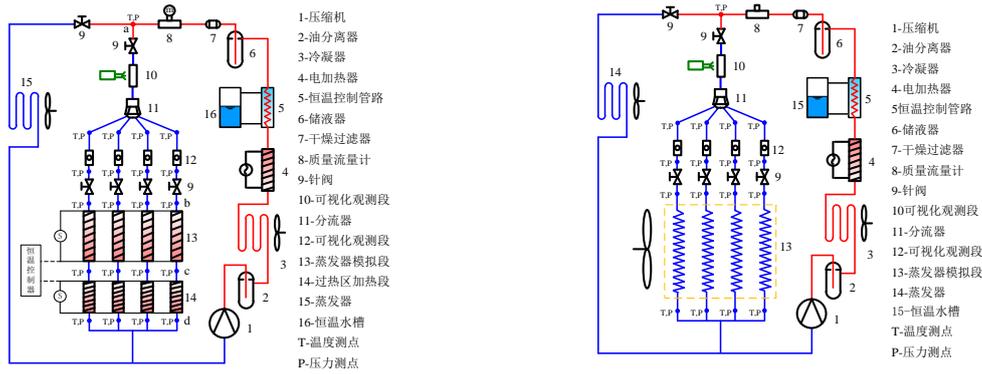


图 4-3 液膜厚度观测系统
Fig.4-3 Liquid film thickness observation system

(3) 为研究等热流和等壁温条件下的分流器分流性能，设计并搭建等热流和等壁温分流性能测试试验台，如图 4-4 所示，分别实验研究等热流和等壁温条件下分流器的分流特性。



(a) 等热流的分流器型测试实验系统

(b) 等壁温的分流器型测试实验系统

图 4-4 分流器分流性能测试实验系统

Fig.4-4 Experimental system for testing distribution performance of distributor

(4) 在项目实施过程中，分流器广泛应用于各种型式的干式壳管式蒸发器，对干式壳管式蒸发器内制冷剂的均匀分配特性进行研究。并将分流器应用于不同型式蒸发器，并开展实验测试。

(5) 进一步深化理论分析内容，设计出高效、可靠且易于加工的旋流叶片和音速喷嘴，研究得到能够反映更加真实的分流器内部流场的数学模型。设计和定型不同制冷量、不同设计工况下的多种形式蒸发器用临界喷嘴式分流器，为临界喷嘴式分流器的设计提供完整、详细的思想指导和理论依据。

(6) 继续分析和挖掘分流器的分流机理问题。广义热力学优化存在两个探索方向，一种是寻求目标函数的极值，例如，熵产最小、功率最大等，另一种则是从设计合理的结构和过程出发获得最佳目标值，即构形理论(Constructal Theory)^[228, 229]。构形理论可以描述为“事物结构源自于性能达到最优”。在后续的研究工作中，研究开发基于构形理论的多形式分流器，尤其是绝热工况用分流器。

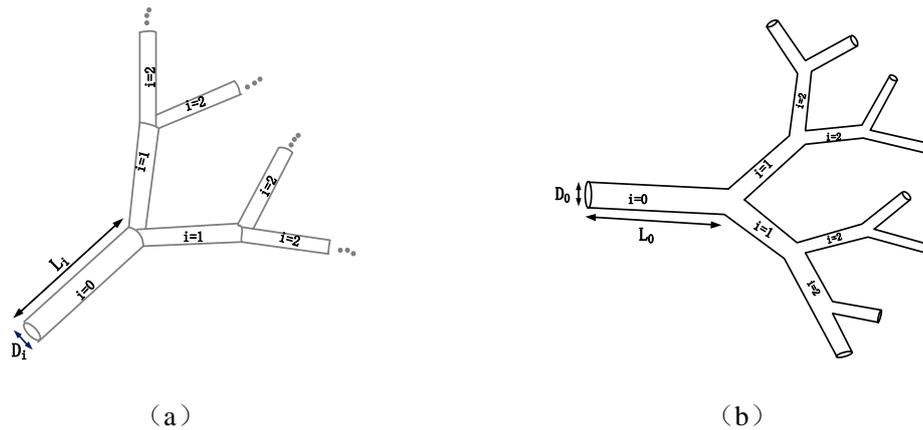


图 4-5 构形理论

Fig.4-5 Constructal Theory

(7) 相变载冷剂用分流器。相变载冷剂（如 CO_2 ）通过在工质泵的推动下，经分流器进入下游多支路蒸发器时为单相液体，不存在相分离现象，但可能存在载冷剂流量分流不均问题。在多支路蒸发器内，由于蒸发器各支路非均匀换热引起的压力波振荡，产生的压力波向上游传递，导致相变载冷剂用分流器的分流性能恶化，严重影响相变载冷剂换热器性能。为解决上述问题，保障蒸发器在各工况下均能实现均匀分流，须设计专用的相变载冷剂用分流器。如图 4-6 所示，相变载冷剂由两相流供液管和隔板、分配室、音速喷嘴、分流管、供液腔、环形分配腔组成，其核心部件为音速喷嘴。根据两相流临界理论，音速喷嘴使气液两相制冷剂在喉部达到当地声速时，形成临界流动，流切断喷嘴下游压力扰动向上游的传播途径，避免各支路流量受下游蒸发器各支路阻力不一致、供液高差等不良因素的影响，在变工况下仍有较好的分流效果和较宽的使用范围。

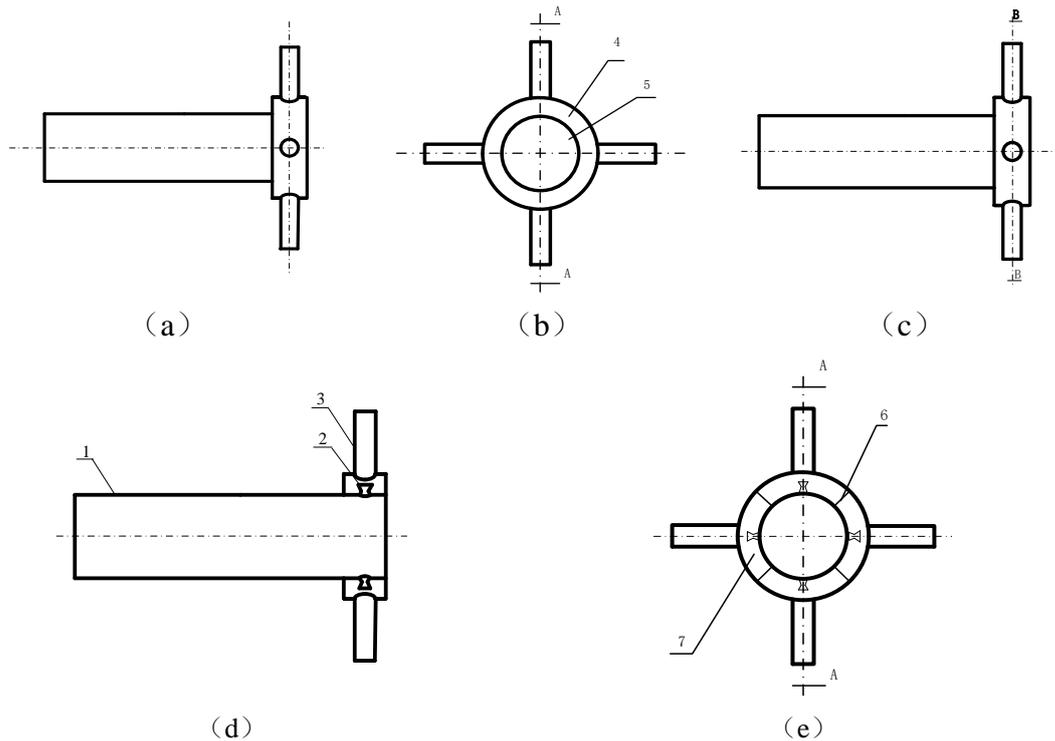


图 4-6 相变载冷剂用分流器

Fig.4-6 Phase-change coolant distributor

相变载冷剂用分流器的载冷系统原理图如图 4-7 所示。相变载冷剂用分流器的载冷系统包括压缩机、冷凝器、制冷剂储液器、旁通阀、冷凝蒸发器、相变载冷剂储液器、工质泵、电磁阀、控制阀、相变载冷剂用分流器和压控阀；压缩机的出口与冷凝器的进口连接，冷凝器的出口与储液器的进口连接，储液器的出口与旁通阀的进口连接，旁通阀的出口与冷凝蒸发器的制冷部分进口连接，冷凝蒸发器的制冷部分出口与压缩机的进口连接；冷凝蒸发器的载冷部分出口与相变载冷剂储液器的第一进口连接，相变载冷剂储液器的第一出口与工质泵的进口连接工质泵的出口分别与电磁阀和压控阀连接，电磁阀与控制阀连接，控制阀与相变载冷剂用分流器连接，相变载冷剂用分流器与干式蒸发器进口连接，干式蒸发器出口与相变载冷剂储液器的第二进口连接；压控阀与相变载冷剂储液器的第二进口连接，相变载冷剂储液器的第二出口与冷凝蒸发器载冷部分的入口连接。

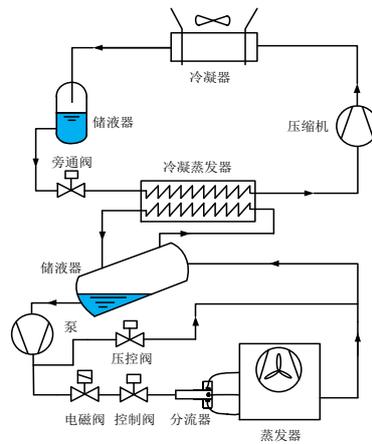


图 4-7 相变载冷剂用分流器的载冷系统原理图

Fig.4-7 Schematic diagram of cooling-carrying system for phase-change coolant distributor

(8) 临界分流理论抑制热沉内制冷剂震动。为了满足电子器件发展需求，需要更高效的冷却技术解决其散热问题^[230-232]。微通道散热器的发展源于解决集成电路中的散热问题，相对于传统的冷却方式，微通道热沉在芯片冷却方面显示出巨大优势^[233, 234]。但当微通道热沉内各支路非均匀换热时，换热量大的支路中气态制冷剂较大，流速快，相应的流动阻力会较大；而换热量小的支路中气态制冷剂较少，流速小，相应的流动阻力较小，从而引起各支路阻力不一致。支路阻力不一致导致气液两相流在流动过程中发生不稳定扰动，使系统多支路发生周期性或间歇性振荡，振荡的压力波通过支路向上游传递，影响热沉内制冷剂均匀分流过程，恶化热沉传热性能。

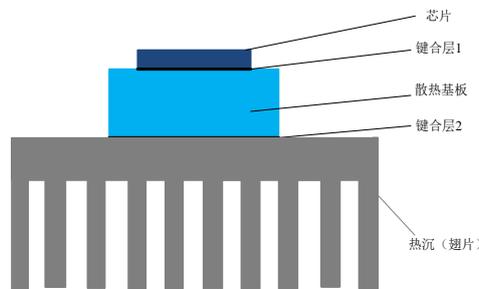


图 4-8 热沉冷却原理图

Fig.4-8 Schematic diagram of heat sink cooling

(9) 基于环流扰动理论开发高效干式蒸发器，原理图如图 4-9 所示。

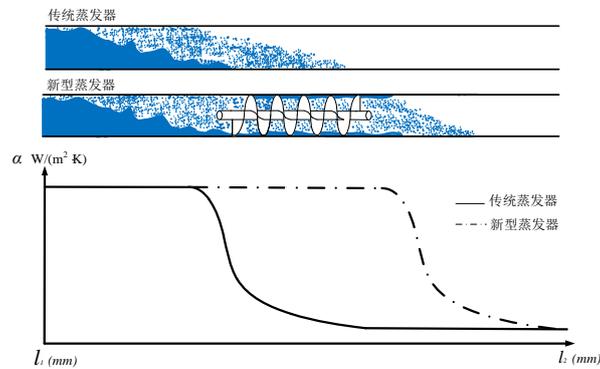


图 4-9 新型高效干式蒸发器

Fig.4-9 Novel high efficiency dry evaporator

在干式蒸发器内制冷剂不断蒸发，气体制冷剂增多，造成管壁液膜太薄，甚至引起液膜无法与管壁接触，导致干式蒸发器的传热系数急剧下降，过早出现干涸现象。虽然采用能够均匀分流的分流器可以最大限度的改善干式蒸发器传热性能，但也无法解决传统干式蒸发器因过早进入干涸点而导致的传热性能下降的难题。研究表明：环状流是对高效传热最有利的流型，这是因为环状流的液体与管壁接触，干式蒸发器的制冷量主要是液态制冷剂的潜热换热量，而气态制冷剂的显热换热量较小。

因此，必须设计和开发新型高效干式蒸发器，并对新型干式蒸发器进行理论分析和实验研究，以解决现有蒸发技术中存在的技术缺陷，解决干式蒸发器过早进入干涸点对传热性能的影响，提高干式蒸发器传热性能，降低干式蒸发器的制造成本和整个系统的运行成本。

为抑制气液两相流体在蒸发过程中的干涸现象，实现干式蒸发器高效传热，提出如图 4-9 所示的干式蒸发器设计理论图。如图 4-9 所示，基于环状流是对高效传热

最有利的流型，提出“环流扰动”将雾状流等不利于液态制冷剂与管壁充分接触的流型转换成液膜沿薄面均匀分布的环状流，从而延迟干式蒸发器内制冷剂进入干涸点，强化传热，使换热面积得到更加充分的利用。

因此，根据“环流扰动”强化换热原理，提出新型高效干式蒸发器。与现有技术相比，新型干式蒸发器通过旋流元件将蒸发过程中气液两相制冷剂的不利于液态制冷剂与管壁充分接触的流型转换为液膜沿薄面均匀分布的环状流，克服因液态制冷剂无法与管壁充分接触而导致的传热系数大幅度降低的问题，从而实现干式蒸发器高效换热，使其换热面积得到更充分的利用。

在课题实施中，拟开展以下研究：

1) 研究蒸发过程中气液两相制冷剂环状流流型形成和均匀稳定机理，建立环流扰动对液体分布均匀性影响的理论模型。

对分流后气液两相制冷剂环状流流型进行研究，利用气液两相流的基础理论，分析分流后气液两相制冷剂压力、温度、干度和流量，以及蒸发管的换热量对环状流流动形成和均匀稳定的影响及其作用机理。蒸发过程中，在多因素作用下，气液两相制冷剂的流型往往是不利于高效传热的流型或不均匀稳定的环状流，恶化传热过程。为促进环状流的形成和均匀稳定，解决环状流液体分布不均匀问题，采用环流扰动的方式促使雾状流等流型转变为环状流，并改善环状流液体分布均匀性。探索建立环流扰动对环状流形成和环状流液体分布均匀性影响的理论模型，并采用可视化观测手段验证理论模型的可靠性。

2) 开发并测试新型高效干式蒸发器，确定高效冷风机的设计方案。

测试高效干式蒸发器的实际运行参数，并对其进行理论分析和结构优化，确定全系列高效干式蒸发器用的设计方案。

参考文献

- [1] 鲁红亮, 陶红歌, 胡云鹏, 等. 平行流换热器中热流体分布均匀性的研究进展[J]. 制冷学报. 2010, 31(06): 39-45.
- [2] M C J, V P W, A D P. Effects of non-uniform refrigerant and air flow distributions on finned-tube evaporator performance[C]. 2003.
- [3] Wu G, Ren T, Ding G, et al. Design and visualized validation of a distributor with uniform refrigerant distribution by forming annular flow[J]. International Journal of Refrigeration. 2019, 98: 238-248.
- [4] Dabiri S, Hashemi M, Rahimi M, et al. Design of an innovative distributor to improve flow uniformity using cylindrical obstacles in header of a fuel cell[J]. Energy. 2018, 152: 719-731.
- [5] Cao J, Kraut M, Dittmeyer R, et al. Numerical analysis on the effect of bifurcation angle and inlet velocity on the distribution uniformity performance of consecutive bifurcating fluid flow distributors[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2018, 93: 60-65.
- [6] Han L, Duan X L, Gong R Z, et al. Physic of secondary flow phenomenon in distributor and bifurcation pipe of Pelton turbine[J]. Renewable Energy. 2019, 131: 159-167.
- [7] Hu K, Zhu J, Zhang W, et al. Effects of evaporator superheat on system operation stability of an organic Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering. 2017, 111: 793-801.
- [8] Ablanque N, Oliet C, Rigola J, et al. Two-phase flow distribution in multiple parallel tubes[J]. International Journal of Thermal Sciences. 2010, 49(6): 909-921.
- [9] 仇嘉, 魏文建, 张绍志, 等. 基于CFD数值模拟的板式换热器分配器性能研究[J]. 机械工程学报. 2010, 46(14): 130-137.
- [10] 高原, 田怀璋, 曾艳, 等. 改进型分液器的流量分配性能[J]. 制冷与空调. 2002(04): 12-14.

- [11] 梁俊杰, 田怀璋, 高原, 等. 改进型分液器流量分配性能的实验研究[J]. 制冷与空调. 2004(02): 25-27.
- [12] 董续君. 空调器中制冷剂分流器及其组件的性能研究[C]. 中国杭州: 2005.
- [13] Kim N, Han S. Distribution of air - water annular flow in a header of a parallel flow heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008, 51(5-6): 977-992.
- [14] 黄晓清, 吴俊鸿, 杨杰, 等. 家用空调机组蒸发器优化设计[J]. 制冷技术. 2013(2): 66-69.
- [15] Wen M, Lee C, Tasi J. Improving two-phase refrigerant distribution in the manifold of the refrigeration system[J]. Applied Thermal Engineering. 2008, 28(17-18): 2126-2135.
- [16] 高原, 田怀璋, 袁秀玲. 分液器的结构型式及其在制冷系统中的应用[J]. 低温与超导. 2001(01): 22-27.
- [17] 叶务占. 关于家用空调器分流器单体差异对产品性能一致性影响分析[J]. 日用电器. 2013(07): 45-48.
- [18] Zhang C, Wang D, Chen J, et al. Experimental and numerical investigations of the double-barrel distributor for air conditioner[J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. 2015, 23(03): 1550018.
- [19] 高晶丹. 采用小管径换热器的房间空调器特性研究[D]. 上海交通大学, 2014.
- [20] Mendonça Lopes M G, Santana H S, Andolphato V F, et al. Flow uniformity data on 3D printed flow distributors[J]. Data in Brief. 2019, 23: 103799.
- [21] 焦安军, 厉彦忠, 张瑞, 等. 物流分配的不均匀性对紧凑式换热器效能的影响[J]. 西安交通大学学报. 2001(03): 265-269.
- [22] 师艳平. 液化天然气冷箱并联配管的介质分配机理及流量均匀分配策略研究[D]. 山东大学, 2018.
- [23] 马南. 空调制冷系统用分流器结构分析[J]. 制冷与空调. 2006(02): 82-84.
- [24] 李焱, 李玉星, 胡其会, 等. 一种新型板翅式换热器气液分配器分配特性的敏感性分析[J]. 化

工学报. 2013, 64(06): 2007-2014.

[25] 韩清. 制冷剂分液器性能研究[D]. 上海交通大学, 2014.

[26] J A B, A P, H G A. Annular two-phase flow split at an impacting T[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 1987, 13(5): 605-614.

[27] Y C, B W P. Gas-liquid annular flow at a vertical tee junction—Part I. Flow separation[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 1995, 21(4): 569-589.

[28] Mohamed M A, Soliman H M, Sims G E. Experimental investigation of two-phase flow splitting in an equal-sided impacting tee junction with inclined outlets[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011, 35(6): 1193-1201.

[29] O S, S A, P B J. Two-phase flow splitting in a horizontal reduced pipe tee[J]. *Chemical Engineering Science*. 1989, 44(10): 2388-2391.

[30] Saieed A, Pao W, Hewakandamby B, et al. Experimental investigation on the effect of diameter ratio on two-phase slug flow separation in a T-Junction[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018, 170: 139-150.

[31] Saieed A, Pao W, Hashim F M. Effect of T-junction diameter ratio on stratified-wavy flow separation[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018, 51: 223-232.

[32] Su W, Hwang Y, Deng S, et al. Experimental study on phase separation of refrigerant at horizontal T-junction[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2018, 105: 217-233.

[33] R. H J A. Dividing annular flow in a horizontal tee[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 1981, 7(3): 343-355.

[34] Collier J G, Mayinger F. Single-phase and two-phase flow behavior in primary circuit components[M]. *Two-phase flows and heat transfer*, 1997.

[35] C H K. Two-phase flow splitting at a pipe tee[J]. *Journal of Petroleum Technology*. 1978, 30(2): 290-296.

- [36] Lu P, Deng S, Zhao L, et al. Analysis of pressure drop in T-junction and its effect on thermodynamic cycle efficiency[J]. *Applied Energy*. 2018, 231: 468-480.
- [37] T S, J A B, G C. The split of annular two-phase flow at a small diameter T-junction[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2000, 26(5): 845-856.
- [38] 何奎, 汪双凤, 黄间珍. 气液两相流在微小T型三通中的相分配特性[J]. *化工学报*. 2011, 62(S1): 92-96.
- [39] 陈锦芳. 气液两相流在微小三通内的相分配特性研究[D]. 华南理工大学, 2015.
- [40] Wren E, Azzopardi B J. Affecting the phase split at a large diameter T-junction by using baffles[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2004, 28(8): 835-841.
- [41] 田敬, 吴明, 王帅, 等. 应用改型三通实现气液两相流的等干度分配[J]. *化工学报*. 2014, 65(03): 836-842.
- [42] Saieed A, Pao W, Ali H M. Prediction of phase separation in a T-Junction[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018, 97: 160-179.
- [43] Dos Reis E, Goldstein L. Fluid dynamics of horizontal air - water slug flows through a dividing T-junction[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2013, 50: 58-70.
- [44] He K, Wang S, Zhang L. Transient split features of slug flow at an impacting micro-T-junction: A numerical study[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, 112: 318-332.
- [45] Chen J, Wang S, Zhang X, et al. Experimental investigation of two-phase slug flow splitting at a micro impacting T-junction[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, 81: 939-948.
- [46] 周云龙, 刘博, 孙科. T形微通道内环状气液两相流相分离[J]. *化工进展*. 2013, 32(07): 1489-1494.
- [47] 周云龙, 杨美, 米列东. 数值模拟微小三通管支管倾角对环状流相分配的影响[J]. *化学反应工程与工艺*. 2013, 29(01): 35-41.
- [48] 曹学文, 聂新刚, 梁法春, 等. 旋流型管壁取样分配器分流特性[J]. *中国石油大学学报(自然*

科学版). 2013, 37(04): 151-154.

[49] 曹学文, 吴梁红, 宗媛, 等. 旋流型管壁分配器取样孔分流特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版). 2011, 35(01): 119-123.

[50] J A B. Phase separation at T junctions[J]. Multiphase Science and Technology. 1999, 11(4).

[51] Doherty A P, Murphy A, Spedding P L. Fluid flow in an impacting symmetrical tee junction II: two-phase air/water flow[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2009, 4(4): 424-431.

[52] Kim N, Byun H. Refrigerant distribution in a minichannel evaporator having vertical headers[J]. Heat Transfer Engineering. 2014, 35(11-12): 1105-1113.

[53] Said S A M, Ben-Mansour R, Habib M A, et al. Reducing the flow mal-distribution in a heat exchanger[J]. Computers & Fluids. 2015, 107: 1-10.

[54] Teclemariam Z, Soliman H M, Sims G E, et al. Experimental investigation of the two-phase flow distribution in the outlets of a horizontal multi-branch header[J]. Nuclear Engineering and Design. 2003, 222(1): 29-39.

[55] Wijayanta A T, Miyazaki T, Koyama S. Refrigerant distribution in horizontal headers with downward minichannel-branching conduits: Experiment, empirical correlation and two-phase flow pattern map[J]. Experimental Thermal and Fluid Science. 2017, 81: 430-444.

[56] Jiang Y, Qin J, Xu Y, et al. The influences of the header geometry on hydrocarbon fuel flow distribution in compact parallel channels[J]. Aerospace Science and Technology. 2018, 79: 318-327.

[57] 王妍, 徐宝全, 王树众, 等. 水平并联管系统中两相流流量分配特性的可视性研究[J]. 西安交通大学学报. 1998(07): 65-69.

[58] Vist S. Two-phase refrigerant distribution in round tube manifolds[J]. ASHRAE Transactions. 2004, 110: 307.

[59] Vist S, Pettersen J. Two-phase flow distribution in compact heat exchanger manifolds[J]. Experimental Thermal and Fluid Science. 2004, 28(2-3): 209-215.

- [60] Y H, H J D, R R. Refrigerant distribution in minichannel evaporator manifolds[J]. Hvac&R Research. 2007, 13(4): 543-555.
- [61] Marchitto A, Devia F, Fossa M, et al. Experiments on two-phase flow distribution inside parallel channels of compact heat exchangers[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2008, 34(2): 128-144.
- [62] Chen S S. Refrigerant distribution model development[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [63] 王俊德. 用于制冷剂部分蒸发的新型分配器[J]. 流体工程. 1984(06): 62-64.
- [64] 黄东, 袁秀玲. 一种新型的多路分液器[J]. 制冷与空调. 1998(04): 21-24.
- [65] 翁建霆, 张利敏, 董天禄. 制冷用氟利昂液体分配器性能的实验研究[J]. 制冷技术. 1997(02): 3-6.
- [66] 高利伟. 分液器的原理和应用[J]. 低温与特气. 2007(04): 9-10.
- [67] 张琍敏. 制冷剂分配器对空气源热泵机组制热性能的影响[J]. 制冷与空调. 2017, 17(05): 49-54.
- [68] 梁俊杰, 田怀璋, 陈林辉, 等. 制冷剂在蒸发器中的流量分配及分流管设计[J]. 石油化工设备. 2004(01): 30-33.
- [69] 梁俊杰. 论两相流分流器性能评价体系[C]. 中国云南昆明: 2005.
- [70] 程锦承, 程振民, 方向晨, 等. 文丘里气液分布管的实验研究与数值模拟[J]. 华东理工大学学报(自然科学版). 2007(04): 456-459.
- [71] J W, D D, J G. Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines[J]. International Journal of Multiphase Flow. 1979, 5(6): 437-462.
- [72] 王志毅, 陈松, 潘祖栋. 改进风冷螺杆热泵机组的分液器性能实验研究[J]. 低温与超导. 2008(03): 37-39.
- [73] 李泽芳, 苏庆勇. 单元式空调机节流毛细管分液头的改进与实验[J]. 装备制造技术. 2008(03):

18-19.

[74] Nakayama M, Sumida Y, Hirakuni S, et al. Development of a refrigerant two-phase flow distributor for a room air conditioner[J]. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. 2000: 497.

[75] 高原, 田怀璋, 袁秀玲. 分液器在制冷系统中的应用[J]. 制冷与空调. 2001(05): 30-32.

[76] Yoshioka S, Kim H, Kasai K. Performance Evaluation and Optimization of A Refrigerant Distributor for Air Conditioner[J]. Journal of Thermal Science and Technology. 2008, 3(1): 68-77.

[77] Ghani J A, Choudhury I A, Hassan H H. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2004, 145(1): 84-92.

[78] 韩清, 张驰, 徐博, 等. 制冷剂分液器分配特性的实验研究[J]. 制冷学报. 2014, 35(03): 1-7.

[79] Han Q, Zhang C, Chen J. Experimental and CFD investigation of R410a distributors for air conditioner[J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. 2014, 22(02): 1440002.

[80] Zhang C, Wang Y, Chen J. Optimization of the reserve-type distributor for R410A air conditioner[J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. 2014, 22(04): 1450022.

[81] Kim J, Braun J E, Groll E A. A hybrid method for refrigerant flow balancing in multi-circuit evaporators: Upstream versus downstream flow control[J]. International Journal of Refrigeration. 2009, 32(6): 1271-1282.

[82] Kim J, Braun J E, Groll E A. Evaluation of a hybrid method for refrigerant flow balancing in multi-circuit evaporators[J]. International Journal of Refrigeration. 2009, 32(6): 1283-1292.

[83] 翁晓敏, 胡海涛, 丁国良, 等. 新型插孔式分流器的结构优化设计及实验验证[J]. 制冷技术. 2014, 34(05): 25-30.

[84] 高扬, 翁晓敏, 丁国良, 等. 适合小管径空调器的分配器分流性能评价与结构优化[J]. 制冷学报. 2016, 37(02): 93-100.

[85] 高扬, 翁晓敏, 丁国良, 等. 全年能效消耗效率指标下的分配器分配特性分析及结构优化设

计[J]. 制冷技术. 2015, 35(04): 22-27.

[86] 任滔, 丁国良, 韩维哲, 等. 空调器中采用小管径的影响分析及研发思路[J]. 制冷技术. 2012(1): 49-52.

[87] 翁晓敏, 高晶丹, 胡海涛, 等. 反射式分流器的分流性能研究及结构改进[J]. 制冷技术. 2013, 33(04): 41-44.

[88] 高晶丹, 丁国良, 陈国胜, 等. 插孔式分流器分流性能的实验研究[J]. 制冷技术. 2013, 33(02): 6-9.

[89] 高扬, 翁晓敏, 丁国良, 等. 不同制冷工质在分配器中的分配特性分析及结构优化设计[J]. 制冷技术. 2015, 35(03): 28-33.

[90] 高晶丹, 丁国良, 胡海涛, 等. 不同结构分流器的分流性能比较[J]. 制冷技术. 2013, 33(03): 24-26.

[91] 高扬. 小管径空调分配器的分流特性分析和结构优化[D]. 上海交通大学, 2016.

[92] 高晶丹. 插孔式分流器的性能研究及结构改进[C]. 中国湖北武汉: 2013.

[93] Cakmak M E, Direk M, Mert M S, et al. Elucidating flow behavior in refrigerant flow distributors with computational simulations[J]. 2015.

[94] Zhang Z, Li Y, Xu Q. Experimental research on the effects of distributor configuration on flow distribution in plate - fin heat exchangers[J]. Heat Transfer—Asian Research. 2004, 33(6): 402-410.

[95] Jiao A, Baek S. Effects of distributor configuration on flow maldistribution in plate-fin heat exchangers[J]. Heat Transfer Engineering. 2006, 26(4): 19-25.

[96] A A, A M, F S. Distribution of two-phase flow in a distributor[J]. J. Eng. Sci. Technol. 2012, 7(1): 41-55.

[97] 杨智峰, 周伟峰, 焦华超, 等. 新型带均流作用的万向型分流器性能研究[J]. 科技创业家. 2013(08): 68-70.

[98] J G P, M F C, T S V M. New liquid flow distributor design using CFD and

experimental validation[C]. Braganca, Spain: 2009.

[99] 王彦坤. 分流管对蒸发器中制冷剂流量均衡的影响[C]. 上海.

[100] 袁培. 分液器制冷剂均匀分配性能研究[C]. 中国江苏扬州: 2015.

[101] 杨杰. 制冷剂分配器对翅片管式蒸发器性能的影响[J]. 制冷与空调. 2018, 18(06): 41-44.

[102] 柳士开, 薄守石, 李伟, 等. 管式气液分配器数值模拟研究[J]. 石油炼制与化工. 2018, 49(01): 65-69.

[103] Lopes M G M, Santana H S, Andolphato V F, et al. CFD analysis of flow distributor designs for numbering-up of biodiesel synthesis[J]. Chemical Engineering Research and Design. 2018, 138: 458-471.

[104] F S R, T P M. Improved static mixer design for achieving equal phase splitting at pipe junctions [J]. International Thermal Operations/Heavy Oil Symposium. Society of Petroleum Engineers. 1999.

[105] 吴裕远, 吴铁晖, 陈流芳. 双相变换热器气液均匀分配特性及典型结构研究的新进展[J]. 西安交通大学学报. 2007(04): 383-388.

[106] 吴裕远. 双相变换热器气液均匀分配典型结构的研究新进展[C]. 中国安徽合肥: 2009.

[107] S H P. Flow distribution issues in parallel flow heat exchangers[J]. ASHRAE Transactions. 2004, 110(1).

[108] 张炳东, 刘丹, 王栋. 分相式气液两相流体等干度分配方法[J]. 西安交通大学学报. 2010, 44(05): 106-110.

[109] Zhang B, Zhang X, Wang D, et al. Equal quality distribution of gas - liquid two-phase flow by partial separation method[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2013, 57: 66-77.

[110] 孙媛, 曹学文, 梁法春, 等. 气液两相流管束分离器数值模拟与实验验证[J]. 油气储运. 2018, 37(08): 885-890.

[111] C P J, G S J L, L B E. Apparatus and method for controlling and measuring steam quality[P]. U.S. Patent 6,250,131. 2001-6-26.

- [112] 袁培, 姜国宝, 张菲妮, 等. 板翅式换热器两相流分配器[J]. 化工学报. 2011, 62(S1): 31-36.
- [113] Yuan P, Jiang G B, He Y L, et al. Performance simulation of a two-phase flow distributor for plate-fin heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering. 2016, 99: 1236-1245.
- [114] Wen J, Li Y, Wang S, et al. Experimental investigation of header configuration improvement in plate - fin heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering. 2007, 27(11-12): 1761-1770.
- [115] 张哲, 田津津. 板翅式换热器封头结构的物流分配特性[J]. 化学工程. 2009, 37(01): 15-18.
- [116] Wang C, Yang K, Tsai J, et al. Characteristics of flow distribution in compact parallel flow heat exchangers, part II: Modified inlet header[J]. Applied Thermal Engineering. 2011, 31(16): 3235-3242.
- [117] 李焱, 李玉星, 胡其会, 等. 板翅式换热器不同气液入口分配方式的分配性能对比分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版). 2014, 38(02): 135-141.
- [118] 杜建通, 张荣玲. 制冷系统在非设计工况下的运行特性及问题分析[J]. 流体机械. 1999(08): 58-62.
- [119] Li G, Frankel S, Braun J E, et al. Application of CFD models to two-phase flow in refrigerant distributors[J]. HVAC&R Research. 2005, 11(1): 45-62.
- [120] G L, E B J, A G E. Evaluating the performance of refrigerant flow distributors[J]. 2002.
- [121] F Z, Z X, Y W. Numerical investigation of constructal distributors with different configurations[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2009, 17(1): 175-178.
- [122] 孙文卿, 屈静, 鹿世化. 干式壳管式蒸发器内新型分液器的数值模拟[J]. 制冷学报. 2017, 38(03): 56-62.
- [123] Mendonça Lopes M G, Santana H S, Andolphato V F, et al. Flow uniformity data on 3D printed flow distributors[J]. Data in Brief. 2019, 23: 103799.
- [124] 元爱红. 管柱式旋流分离器[J]. 油气田地面工程. 2005(03): 62.
- [125] 金向红, 金有海, 王建军, 等. 气液旋流分离技术的研究[J]. 新技术新工艺. 2007(08): 85-88.
- [126] 胡艳华. 小型柱式气液旋流分离器在海洋平台的应用前景分析[C]. 中国福建厦门: 2009.

- [127] Mantilla I, Shirazi S A, Shoham O. Flow field prediction and bubble trajectory model in gas-liquid cylindrical cyclone (GLCC) separators[J]. *Journal of Energy Resources Technology*. 1999, 121(1): 9.
- [128] 周云龙, 倪志勇. 柱状气液分离器液相带气特性分析[J]. *化工机械*. 2014, 41(03): 282-285.
- [129] 孙志利, 臧润清, 姬卫川. 气相分离式分流器对冷风机性能影响的实验研究[J]. *冷藏技术*. 2017, 40(03): 12-16.
- [130] A F M. Effect of conical distributors on evaporator and system performance[D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.
- [131] A A, A M, F S. Distribution of two-phase flow in a distributor [J]. *J. Eng. Sci. Technol*. 2012, 7(1): 41-55.
- [132] Wang D, Liang F, Peng Z, et al. Gas - liquid two-phase flow measurements by full stream batch sampling[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2012, 40: 113-125.
- [133] Dong W, Zong Hu L. Gas - liquid two-phase flow measurement using ESM[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2002, 26(6): 827-832.
- [134] Liang F, Wang D, Chen J, et al. Gas - liquid two-phase flow equal distribution using a wheel distributor[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014, 55: 181-186.
- [135] 张文敬. 旋流型管壁取样分配器优化设计及应用研究[D]. 中国石油大学, 2010.
- [136] 黄善仿, 王栋, 林宗虎. 气液两相流等干度流量分配方法研究[J]. *工程热物理学报*. 2012(10): 1727-1730.
- [137] 吴东垠, 林宗虎. 水平并联管子系统中气液两相流在联箱内的压力分布研究[J]. *热能动力工程*. 1994(03): 168-175.
- [138] 王栋, 林益, 林宗虎. 取样管型分流分相式气液两相流体流量计[J]. *工程热物理学报*. 2002(02): 235-237.
- [139] 王栋. 分流分相式气液两相流体流量计[D]. 西安交通大学, 2000.

- [140] 梁法春,王栋,林宗虎. 新型三通分配器中环状流相分离预测[J]. 工程热物理学报. 2007(01): 71-73.
- [141] 梁法春,王栋,林宗虎. 水平管气液环状流在新型分配器中的分配研究[J]. 西安交通大学学报. 2006(01): 106-110.
- [142] 梁法春,王栋,林宗虎. 新型分配器中环状流相分配研究[C]. 北京. 2004, 651-656.
- [143] 梁法春,杨桂云,王金龙,等. 基于临界分流理论的气液两相流均匀分配器[J]. 化工学报. 2014, 65(10): 3798-3804.
- [144] 梁法春,王栋,杨桂云,等. 气液两相流临界分配特性及相分离控制[J]. 西安交通大学学报. 2015, 49(01): 53-58.
- [145] 杨桂云. 气液两相流临界分配特性及应用研究[D]. 中国石油大学(华东), 2014.
- [146] 方召君,梁法春,谢振强,等. 基于离心法引发的气液两相环状流的数值模拟及流量测量研究[J]. 科学技术与工程. 2017, 17(02): 1-4.
- [147] 孙媛. 气液两相流小比例取样与流量测量研究[D]. 中国石油大学(华东), 2016.
- [148] Wang D, Liu C, Yu D, et al. Influence factors of flow distribution and a feeder tube compensation method in multi-circuit evaporators[J]. International Journal of Refrigeration. 2017, 73: 11-23.
- [149] Wang L, Kong X, Qi Y. Optimal design for split-and-recombine-type flow distributors of microreactors based on blockage detection[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2016, 24(7): 897-903.
- [150] Guo X, Fan Y, Luo L. Multi-channel heat exchanger-reactor using arborescent distributors: A characterization study of fluid distribution, heat exchange performance and exothermic reaction[J]. Energy. 2014, 69: 728-741.
- [151] A E, V L, M F. Influence of viscosity and surface tension on performance of gas - liquid contactors with ejector type gas distributor[J]. Chemical Engineering Science. 2002, 57(15):

2987-2994.

[152] 张晓光, 刘爱军, 李孜, 等. 分流器及具有其的空调器[P]. CN108844262A. 2018-11-20.

[153] 孙治兵, 郑存义. 一种制冷剂均匀分液器[P]. CN107289680A. 2017-10-24.

[154] 叶后兵. 空调分液器[P]. CN204006823U. 2014-12-10.

[155] 钱国献. 一种空调分液器[P]. CN203881011U. 2014-10-15.

[156] 林少坤. 分液器[P]. CN203798039U. 2014-08-27.

[157] 李好学, 李凤丽, 樊旭旭, 等. 一种分液器[P]. CN103925751A. 2014-09-17.

[158] G S M, A B W. Centrifugal two-phase flow distributor[P]. U.S. Patent No. 5,059,226.

1991-10-22.

[159] 曾奇学. 分液器[P]. CN208536458U. 2019-02-22.

[160] 张筭, 刘磊, 胡乾龙, 等. 分液器及空调器[P]. CN107741108A. 2018-02-27.

[161] 刘家豪, 卫广穹, 李庆, 等. 一种分流器及制冷系统[P]. CN108954989A. 2018-12-07.

[162] 陈辉, 赵旭敏, 黄海伟, 等. 一种分液器及具有其的压缩机[P]. CN108954995A. 2018-12-07.

[163] 黄丕江, 仲明凯. 分液器及空调器[P]. CN208108567U. 2018-11-06.

[164] 李刚. 一种分液器[P]. CN206944540U. 2018-01-30.

[165] G H. Handbook of multiphase systems[J]. 1982.

[166] Y T, D B, E D A. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas - liquid flow in vertical tubes[J]. AIChE Journal. 1980, 26(3): 345-354.

[167] Cromer S, Huntington R L. Visual studies of the flow of air-water mixtures in a vertical pipe[J]. Transactions of the AIME. 1940, 136(1): 79-90.

[168] C G W, B S W, L H R. More data on two-phase vertical flow[J]. Petroleum Refiner. 1954, 33: 208.

[169] S C, B W. Upward cocurrent annular flow of air and water in smooth tubes[J]. AIChE Journal. 1955, 1(1): 78-86.

- [170] L S P, T N V. Regime maps for air water two phase flow[J]. Chemical Engineering Science. 1980, 35(4): 779-793.
- [171] Annunziato M, Girardi G. 'Statistical Methods to Identify Two-Phase Regimes: Experimental Results for Vertical Large Diameter Tubes[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Two-Phase Flow. 1985: 361-380.
- [172] F H G. Measurement of two phase flow parameters[J]. Nasa Sti/recon Technical Report A. 1978: 179.
- [173] Rollmann P, Spindler K. A new flow pattern map for flow boiling in microfin tubes[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2015, 72: 181-187.
- [174] 马鲁英, 张丽. 关于水平管道两相流流型判别的问题[J]. 石化技术. 2016, 23(12): 228-245.
- [175] 劳力云, 郑之初, 吴应湘, 等. 关于气液两相流流型及其判别的若干问题[J]. 力学进展. 2002(02): 235-249.
- [176] Ding Y, Jia L, Yin L, et al. Theoretical investigation on convective condensation annular flow of R410a inside rectangular microchannel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, 131: 698-708.
- [177] Baragh S, Shokouhmand H, Ajarostaghi S S M. Experiments on mist flow and heat transfer in a tube fitted with porous media[J]. International Journal of Thermal Sciences. 2019, 137: 388-398.
- [178] Wang J, Cheng Y, Li X, et al. Experimental and LBM simulation study on the effect of bubbles merging on flow boiling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, 132: 1053-1061.
- [179] Rodrigues R L P, Bertoldi D, Dos Santos E N, et al. Experimental analysis of downward liquid-gas slug flow in slightly inclined pipes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science. 2019, 103: 222-233.
- [180] Abdulkadir M, Mbalisigwe U P, Zhao D, et al. Characteristics of churn and annular flows in a large diameter vertical riser[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2019, 113: 250-263.

- [181] Ramji S, Pushpavanam S. Liquid-liquid extraction in laminar two-phase stratified flows in capillary microchannels[J]. *Chemical Engineering Science*. 2019, 195: 242-249.
- [182] Anglart H. Progress in understanding and modelling of annular two-phase flows with heat transfer[J]. *Nuclear Engineering and Design*. 2019, 345: 166-182.
- [183] Sun D, Xu J, Wang Y, et al. Effect of gravity levels on the flow pattern modulation by the phase separation concept[J]. *Computers & Fluids*. 2015, 108: 43-56.
- [184] Liang F, Sun Y, Fang Z, et al. Application of multi-slot sampling method for gas-liquid two-phase flow rate measurement[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016, 79: 213-221.
- [185] E V, E P I. The role of thermal disequilibrium in critical two-phase flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2002, 28(1): 21-50.
- [186] Tuo H, Hrnjak P. Enhancement of vapor – liquid separation in vertical impact T-junctions for vapor compression systems with flash gas bypass[J]. *International Journal of Refrigeration*. 2014, 40: 43-50.
- [187] Tuo H, Hrnjak P. Vapor – liquid separation in a vertical impact T-junction for vapor compression systems with flash gas bypass[J]. *International Journal of Refrigeration*. 2014, 40: 189-200.
- [188] Gupta B, Nayak A K, Kandar T K, et al. Investigation of air – water two phase flow through a venturi[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016, 70: 148-154.
- [189] Falcone N, Bersano A, Bertani C, et al. Characterization of water-air dispersed two phase flow[J]. *Energy Procedia*. 2017, 126: 66-73.
- [190] Chalgeri V S, Jeong J H. Flow patterns of vertically upward and downward air-water two-phase flow in a narrow rectangular channel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 128: 934-953.
- [191] Kong R, Kim S. Characterization of horizontal air – water two-phase flow[J]. *Nuclear Engineering and Design*. 2017, 312: 266-276.

- [192] 孙志利, 臧润清, 姬卫川. 整流喷嘴式等流量分液器及制冷系统[P]. CN204373280U. 2015-06-03.
- [193] 申江. 制冷装置设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [194] Chang S W, Yang T L. Forced convective flow and heat transfer of upward cocurrent air - water slug flow in vertical plain and swirl tubes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2009, 33(7): 1087-1099.
- [195] Cazan R, Aidun C K. Experimental investigation of the swirling flow and the helical vortices induced by a twisted tape inside a circular pipe[J]. *Physics of Fluids*. 2009, 21(3): 37102.
- [196] 柳姗. 高压空气系统气液分离器数值模拟与试验研究[D]. 武汉科技大学, 2014.
- [197] 李恒, 张琪, 曲占庆, 等. 管柱式气水旋流分离器分离率的数值模拟研究[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*. 2004(S1): 890-895.
- [198] 周帼彦. 螺旋片导流式分离器气液两相流的数值模拟与试验研究[D]. 南京工业大学, 2003.
- [199] 周帼彦, 凌祥, 涂善东. 螺旋片导流式分离器分离性能的数值模拟与试验研究[C]. 西安.
- [200] W C S, W L A, T C H. Influence of spiky twisted tape insert on thermal fluid performances of tubular air - water bubbly flow[J]. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009, 48(12): 2341-2354.
- [201] L G, R M, O S. Swirling gas - liquid two-phase flow—experiment and modeling Part I: swirling flow field[J]. *Journal of fluids engineering*. 2004, 126(6): 935-942.
- [202] Gomez L, Mohan R, Shoham O. Swirling Gas - liquid two-phase flow—experiment and modeling Part II: turbulent quantities and core stability[J]. *Journal of Fluids Engineering*. 2004, 126(6): 943.
- [203] 马宁. 旋流型管壁取样分配器技术研究[D]. 中国石油大学, 2009.
- [204] Liang Y, Liu P, Zheng N, et al. Numerical investigation of heat transfer and flow characteristics of laminar flow in a tube with center-tapered wavy-tape insert[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2019,

148: 557-567.

[205] Tusar M, Ahmed K, Bhuiya M, et al. CFD study of heat transfer enhancement and fluid flow characteristics of laminar flow through tube with helical screw tape insert[J]. Energy Procedia. 2019, 160: 699-706.

[206] Liu X, Li C, Cao X, et al. Numerical analysis on enhanced performance of new coaxial cross twisted tapes for laminar convective heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018, 121: 1125-1136.

[207] 刘玉梅. 旋流型管壁取样分配器技术研究[D]. 中国石油大学, 2008.

[208] 吴梁红. 旋流型管壁取样分配器数值模拟和实验研究[D]. 中国石油大学, 2011.

[209] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

[210] B W A. A textbook of sound[M]. London: Neill & Co. Ltd., 1960.

[211] Y H D, S P M. On the propagation of sound in a liquid containing gas bubbles[J]. The physics of fluids. 1961, 4(8): 970-975.

[212] 李应林, 飞周, 张小松, 等. 制冷剂两相流音速对引射器喷嘴结构的影响[J]. 东南大学学报:自然科学版. 2015, 45(1): 91-96.

[213] 赵良举, 曾丹苓. 两相流超音速流动、激波及其应用研究[J]. 热能动力工程. 2002(04): 332-335.

[214] 曹禹. 超音速分离器实验系统的研究与分析[D]. 西安石油大学, 2018.

[215] Sun Z, Wang Q, Xie Z, et al. Energy and exergy analysis of low GWP refrigerants in cascade refrigeration system[J]. Energy. 2019, 170: 1170-1180.

[216] 孙志利, 王启帆, 谢志远, 等. 三级复叠式制冷系统低温级制冷剂的应用分析[J]. 热科学与技术. 2018, 17(6): 481-488.

[217] Sun Z, Wang Q, Dai B, et al. Options of low Global Warming Potential Refrigerant Group for a three-stage cascade refrigeration system[J]. International Journal of Refrigeration. 2019.

- [218] Aghazadeh Dokandari D, Setayesh Hagh A, Mahmoudi S M S. Thermodynamic investigation and optimization of novel ejector-expansion CO₂/NH₃ cascade refrigeration cycles (novel CO₂/NH₃ cycle)[J]. *International Journal of Refrigeration*. 2014, 46: 26-36.
- [219] Rezayan O, Behbahaninia A. Thermo-economic optimization and exergy analysis of CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems[J]. *Energy*. 2011, 36(2): 888-895.
- [220] 宋连敏. 气液两相流文丘利喷嘴节流特性研究及流量计量[D]. 中国石油大学(华东), 2016.
- [221] 杨帆. 气-液两相流高速旋流分离器研究[D]. 西安石油大学, 2011.
- [222] 刘建华, 陈一坚, 段军, 等. 激光切割超音速喷嘴设计[J]. *激光技术*. 2000(01): 48-52.
- [223] 李记东. 超音速/高超音速喷管变比热型面设计与数值模拟[D]. 西北工业大学, 2004.
- [224] 张宏义, 张发启, 孙权. 二维超音速喷管设计仿真研究[J]. *机械设计与制造*. 2011(10): 132-134.
- [225] 郁夏夏, 路阳, 张维加, 等. 空气焓差法测量制冷量不确定度的理论与实验分析[J]. *制冷技术*. 2013, 33(04): 15-18.
- [226] 李书明. 不确定度分析方法在暖通空调实验中的应用[J]. *制冷*. 2011, 30(01): 34-40.
- [227] 姬卫川. 蒸发器用分流器的理论分析与实验研究[D]. 天津商业大学, 2016.
- [228] Chen L, Feng H, Xie Z, et al. Progress of constructal theory in China over the past decade[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 130: 393-419.
- [229] Miguel A F. Toward an optimal design principle in symmetric and asymmetric tree flow networks[J]. *Journal of Theoretical Biology*. 2016, 389: 101-109.
- [230] 周嘉, 唐志国, 闵小滕, 等. 微小单锥体热沉射流流动及换热特性研究[J]. *工程热物理学报*. 2017, 38(11): 2399-2407.
- [231] Z W, H X, Y J. Co-design of multicore architectures and microfluidic cooling for 3D stacked ICs[J]. *Microelectronics Journal*. 2014, 45(12): 1814-1821.
- [232] Ling Z, Zhang Z, Shi G, et al. Review on thermal management systems using phase change

materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, 31: 427-438.

[233] 李勇铜, 巩亮, 徐明海, 等. 金属泡沫复合微肋微通道热沉的流动传热特性分析[J]. *科学通报*. 2019, 64(02): 215-222.

[234] 王喆, 刘洪涛, 莫政宇, 等. 自相似结构微通道热沉内部流动特性及结构优化[J]. *机械工程学报*. 2018, 54(14): 185-190.

[235] 王汉青. 预混喷嘴式分流器对改善冷风机性能的实验研究[D]. 天津商业大学, 2018.

[236] 刘亚哲, 臧润清. 冷冻冷藏装置冷风机性能实验研究[J]. *制冷学报*, 2014, 35(05): 61-65+82.

发表论文及参与科研情况说明

攻读本科期间发表的论文

- [1] Zhili Sun, **Qifan Wang**, Zhiyuan Xie et al. Energy and exergy analysis of low GWP refrigerants in cascade refrigeration system. *Energy*, 2019,170:1170-1180. [JCR 二区, Top 期刊; 影响因子: 4.968; 总引: 5 次, 他引: 5 次]
- [2] Zhili Sun, **Qifan Wang**, Baomin Dai et al. Options of low Global Warming Potential refrigerant group for a three-stage cascade refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 2019,100:471-483. [JCR 二区, 影响因子: 3.233; 总引: 5 次, 他引: 5 次]
- [3] Zhili Sun, **Qifan Wang**, Dandan Su et al. Comparative analysis of thermodynamic performance of CO₂ cascade refrigeration system assisted with expander and mechanical subcooling, *International Journal of Energy Research*, 2019, 1-17. [JCR 二区, TOP 期刊; 影响因子: 3.343; 总引: 1 次, 他引: 1 次]
- [4] Zhili Sun, Cui Qi, **Qifan Wang**, et al. Experimental study on CO₂/R32 blends in a water-to-water heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114303. [JCR 二区, TOP 期刊; 影响因子: 4.026]
- [5] Zhili Sun, **Qifan Wang**, Dandan Su, et al. Experimental study on improving the performance of fin-tube evaporator with rectifying nozzle type critical distributor. *International Journal of Refrigeration*. IJIR-D-19-00446R2, 已返修. [JCR 二区, 影响因子: 3.177]
- [6] **Qifan Wang**, Zhili Sun, Youcai Liang, et al. Research and development of distributor in the refrigeration system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. RSER-D-19-03277, 在审. [JCR 一区, Top 期刊; 影响因子 10.556]

- [7] 孙志利, 王启帆, 谢志远 等. 三级复叠式制冷系统低温级制冷剂的应用分析. **热科学与技术**, 2018,17(06):481-488. [CSCD 检索, 影响因子: 0.654; 总引: 2 次, 他引: 2 次]
- [8] 孙志利, 王启帆, 苏丹丹. 基于均匀分流的干式壳蒸发器性能研究. **高等学校工程热物理第二十五届全国学术会议**, 已录用.
- [9] 孙志利, 苏丹丹, 王启帆. 干式蒸发器用分流器研究进展. **2019 中国制冷学会学术年会**, 已录用.
- [10] 王彩云, 孙志利, 王启帆. 太阳能吸收式部分复叠 CO₂ 双级压缩制冷系统. **2019 中国制冷学会学术年会**, 已录用.
- [11] 谢志远, 孙志利, 王启帆 等. 中温循环制冷剂对三级复叠式制冷系统性能的影响. **制冷与空调**, 2018,18(06):27-31. [影响因子: 0.402]
- [12] 崔奇, 孙志利, 刘圣春 王启帆 等. 膨胀机和内部换热器对复叠式制冷系统性能的影响. **制冷与空调**, 2018,18(05):22-27. [影响因子: 0.402]
- [13] 王雪, 孙志利, 崔奇 等. 独立式过冷循环对改善单级蒸气压缩制冷系统性能分析. **冷藏技术**, 2018,41(01):8-17.
- [14] 李紫薇, 孙志利, 干苗根 等. 回热器对单级蒸气压缩式制冷系统性能的影响. **冷藏技术**, 2018,41(02):21-25.
- [15] 崔奇, 孙志利, 李紫薇 等. 基加利修正案背景下低 GWP 制冷剂应用的再分析. **冷藏技术**, 2017,40(04):7-18.
- [15] 苏丹丹, 孙志利, 王启帆, 焦峰. 内部换热器对三级复叠式制冷系统性能影响的热力学分析. **冷藏技术**, 2019,42(02):49-55.

攻读本科期间申请的专利

实用新型专利

- [1] 孙志利, 王启帆, 崔奇 等. 基于涡流管制冷的钻头冷却系统. CN206925643U
- [2] 孙志利, 崔奇, 王启帆 等. 一种制冷系统故障分析及性能测试实验平台. CN207352871U
- [3] 孙志利, 刘静, 石康吉 等. 多功能六温区家用保鲜冷冻系统. CN206817853U
- [4] 孙志利, 石康吉, 王雪 等. 一种水—水热泵系统综合性能试验台. CN207081561U
- [5] 孙志利, 李紫薇, 崔奇 等. 二氧化碳制冷半导体发电附加过冷循环系统. CN207081243U
- [6] 孙志利, 谢志远, 石康吉 等. 发动机余热回收发电与太阳能联合的制冷空调系统. CN206797059U
- [7] 孙志利, 王启帆. 毛细管和雾化喷嘴式等流量分流器组合的一体化装置. 201920791586.6
- [8] 孙志利, 王启帆. 毛细管和整流喷嘴式分流器组合的一体化装置. 201920791567.3
- [9] 孙志利, 王启帆, 苏丹丹 等. 不受下游非均匀换热影响的分流性能测试实验系统. 201920792525.1
- [10] 孙志利, 王启帆, 焦峰 等. 受下游非均匀换热影响的分流性能测试实验系统. 201920791599.3
- [11] 孙志利, 王启帆. 相变载冷剂用分流器及载冷系统. 201920792510.5

国家发明专利申请

- [1] 孙志利, 王启帆, 崔奇 等. 基于涡流管制冷的钻头冷却系统. 201710376170.3
- [2] 孙志利, 崔奇, 王启帆 等. 一种制冷系统故障分析及性能测试实验平台. 201710621209.3
- [3] 孙志利, 苏丹丹, 谢志远 王启帆 等. 典型北方农村独栋建筑能源节能供给系统.

201811272437.5

[4] 孙志利, 李紫薇, 崔奇 王启帆 等. 二氧化碳制冷半导体发电附加过冷循环系统.

201710621225.2

[5] 孙志利, 王雪, 石康吉 等. 发动机低品位能源回收利用的空调系统.

201710669838.3

[6] 孙志利, 谢志远, 石康吉 等. 发动机余热回收发电与太阳能联合的制冷空调系统. 201710376191.5

[7] 孙志利, 王启帆. 毛细管和雾化喷嘴式等流量分流器组合的一体化装置.

201910457557.0

[8] 孙志利, 王启帆. 毛细管和整流喷嘴式分流器组合的一体化装置.

201910458425.X

[9] 孙志利, 王启帆, 苏丹丹 等. 不受下游非均匀换热影响的分流性能测试实验系统.

201910458483.2

[10] 孙志利, 王启帆, 焦峰 等. 受下游非均匀换热影响的分流性能测试实验系统.

201910457614.5

[11] 孙志利, 王启帆. 相变载冷剂用分流器及载冷系统. 201910457585.2

[12] 田绅, 高泓源, 郭鑫, 孙悦桐, 王启帆 等. 一种基于嵌入式热管传热强化的相变蓄冷板的热管理系统. 201910601650.4

攻读本科期间证书情况

[1] 全国大学生英语六级

[2] 全国大学生英语四级

[3] 全国 CAD 技能等级考试一级证书

[4] 全国 CAD 技能等级考试二级证书

[5] 工业产品类计算机绘图师岗位能力证书

[6] 工业产品类三维数字建模师岗位能力证书

[7] 全国计算机等级考试二级合格证书

[8] 机动车驾驶证

攻读本科期间奖励情况

[1] 天津市第十二届投影制图竞赛二等奖

[2] 天津市大学生数学竞赛二等奖

[3] 天津市第八届CAD竞赛一等奖

[4] 天津市第十二届高校暖通制冷创新设计大赛优秀奖

[5] 第九届全国大学生数学竞赛（非数学类）二等奖

[6] 天津市第十三届高校暖通制冷创新设计大赛三等奖

[7] 天津市高校暖通制冷创新精神奖

[8] 第四届中国“互联网+”大学生创新创业大赛天津市区比赛暨2018年天津市大学生创新创业大赛主赛道三等奖

[9] 天津市第十四届高校暖通制冷创新设计大赛一等奖

[10] 天津市第十四届高校暖通制冷创新设计大赛二等奖

[11] 天津市第十四届高校暖通制冷创新设计大赛三等奖

[12] 四届中国互联网+大学生创新创业设计大赛天津商业大学二等奖

[13] 天津商业大学华为杯暖通智冷创新设计大赛二等奖

[14] 天津商业大学华为杯暖通智冷创新设计大赛二等奖

[15] 天津市第十四届高校暖通制冷创新设计大赛成功参加奖

[16] 天津市第十四届高校暖通制冷创新设计大赛成功参加奖

[17] 天津市第十四届高校暖通制冷创新设计大赛成功参加奖

[18] 天津市第十四届高校暖通制冷创新设计大赛成功参加奖

[19] 全国大学生英语竞赛成功参赛奖

- [20] 第十五届“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛天津商业大学二等奖
- [21] 2015-2016年度天津商业大学壹等奖学金
- [22] 2015-2016年度天津商业大学三好学生
- [23] 2016-2017年度天津商业大学壹等奖学金
- [24] 2016-2017年度天津商业大学优秀团员
- [25] 2016-2017年度天津商业大学三好学生
- [26] 2017-2018年度天津商业大学贰等奖学金
- [27] 2017-2018年度天津商业大学优秀团员
- [28] 2018年度奥纳尔贰等奖学金
- [29] 2018-2019年度天津商业大学壹等奖学金
- [30] 2018-2019学年天津商业大学优秀毕业生
- [31] 首钢京唐第十二届全国大学生节能减排社会实践与科技竞赛二等奖
- [32] 首钢京唐第十二届全国大学生节能减排社会实践与科技竞赛三等奖
- [33] 首钢京唐第十二届全国大学生节能减排社会实践与科技竞赛三等奖
- [34] 首钢京唐第十二届全国大学生节能减排社会实践与科技竞赛成果转化专项赛铜奖
- [35] “盾安环境杯”第十三届中国制冷空调行业大学生科技竞赛一等奖
- [36] “盾安环境杯”第十三届中国制冷空调行业大学生科技竞赛二等奖
- [37] 第十六届挑战杯全国大学生课外学术作品竞赛天津赛区二等奖
- [38] 第十六届挑战杯全国大学生课外学术作品竞赛天津商业大学一等奖

附录：开题报告（数据报告）

气液两相制冷剂流动特性及相分离控制

学 院	机械工程学院	教 学 系	制冷与低 温工程系	专业班 级	能源与动力工程 1501 班
学生姓 名	王启帆	学号	20151732	指导教 师	孙志利
毕业设计（论文）题目		气液两相制冷剂流动特性及相分离控制			
<p>一、选题依据</p> <p>1.1 研究目的</p> <p>在制冷系统中，干式蒸发器是广泛应用的蒸发换热设备，主要型式为翅片式干式蒸发器和管壳式干式蒸发器，其中翅片式干式蒸发器主要应用在单元式空调机、多联机末端和冷库制冷系统用蒸发器等领域，管壳式干式蒸发器主要应用在冷水/热泵机组等领域。在干式蒸发器中，面临的主要问题为如何提高传热效率。影响干式蒸发器传热效率的主要因素主要为以下三个方面：</p> <ul style="list-style-type: none">（1）空气侧和水侧的对流换热系数低和换热不均匀（约占 15%~25%）；（2）蒸发器流程布置及加工工艺（约占 15%~25%）；（3）气液两相制冷剂分流不均匀（约占 30%~50%）。 <p>单独或组合的影响因素（1）和（2）会在干式蒸发器中引起制冷剂流动分布不均匀，恶化干式蒸发器传热过程，导致因素（3）占比持续增大。分析可知，相比（3）所述影响因素，（1）和（2）所述影响因素相对较弱。在气液两相制冷剂分流过程中，受气液两相流流动及传热的不稳定性影响，下游各支路气液流量和干度并不完全一致，即出现相分离现象，造成气液两相制冷剂分流不均。此外，各蒸发支路非均匀换热导致各支路阻力的不一致性增大，恶化了气液两相制冷剂在支路中出现的相分离现象，干式蒸发器传热性能显著降低。传统分流器由于其在分流原理上存在先天不足，无法解决气液两相分流原理、上游流体流动状态、下游支路非均匀换热、安装角度和分流器结构等因素对干式蒸发器传热性能的影响。尤其是在变工况时，会出现分流性能下降甚至丧失分流能力的情况。</p> <p>相分离导致的气液两相制冷剂分流不均，尤其是耦合非均匀换热引起的相分离严重影响干式蒸发器传热性能，导致传热性能下降高达 30%~50%。因此，如何实</p>					

现气液两相制冷剂均匀分流，抑制由非均匀换热引起的相分离成为提高干式蒸发器传热性能的关键。

为解决上述问题，保障干式蒸发器在各工况下均能实现均匀分流，须对气液两相流体的分流特性和相分离抑制机理进行探索研究。本项目基于以上研究背景，在层流流动中，提出“层流流动-紊流流动-流型整定”分流理论；在紊流流动中，提出“紊流流动-流型整定”分流理论；考虑到下游各支路非均匀换热导致的相分离恶化问题，提出采用临界流理论抑制非均匀换热导致的相分离。以理论分析为基础，设计和开发基于“环流整定+临界分流”原理的整流喷嘴式分流器和基于“雾化整定+临界分流”原理的雾化喷嘴式分流器。

1.2 研究意义及必要性

1.2.1 国内外研究现状及发展动态分析

(1) 气液两相分流原理对相分离现象的影响。

气液两相分流原理可分为两类：“先分流、后混合”和“先混合、后分流”。

“先分流、后混合”的气液两相分流原理是将气液两相流体的分流转化成单相流体的分流，在各支路出口压力一致的实验条件下，获得了较好的分流效果。其主要缺点在于需要采用气液分离器，体积庞大，且如何克服下游各支路阻力不一致导致的相分离现象是必须解决的重点和难点问题。

“先混合、后分流”的气液两相分流原理是在上游设置混合器以充分混合气液两相流体，而后进行分流。该原理的主要缺点是当气体和液体流量小（即为层流流动）时，由于来流不能完全混合，很难实现气液两相的均匀分流；且该原理主要是降压增速的方法使气液两相流充分混合，这将会导致阻力显著增加。

由于“先分流、后混合”分流原理受安装角度、安装空间、下游各支路阻力不一致导致的相分离影响等限制。因此，本项目采用“后混合、先分流”分流原理。为解决“先混合、后分流”分流原理中气液两相均匀分流的难题，提出将层流流动转化为紊流流动，经流型整定后进入各分流支路。为解决“先混合、后分流”分流原理中大阻力导致的蒸发温度大幅度降低和压缩机功耗增大的难题，提出新型分流器设计理念，改善分流器大压降对系统性能的影响。

(2) 上游流体流动状态对相分离现象的影响

流体状态参数和流型等因素对气液两相流的相分离现象有显著的影响，当上游流体流动状态改变时，不可避免发生相分离现象。在两相流流型中，气泡流、段塞流、搅拌流和分层流是不稳定或不对称的流型，如果它们出现在分流区域，就会导致相分离。研究表明：雾状流和环状流是最好的对称结构流型，虽然截面内出现受重力影响的液体分布不均现象，但在使用对称结构的分流装置时能最大限度的提高各支路气液两相流体分流的均匀性，且雾状流中液体分布均匀性优于环状流中液体分布均匀性。为克服环状流上下液体分布不均现象，降低分流不均匀性，本项目提

出采用环流整定和雾化整定来改善管内液体分布不均，增加流型整定过程。

(3) 下游支路非均匀换热对相分离现象的影响

气液两相均匀分流不仅取决于上游流体流动状态，还与分流器的下游各支路非均匀换热导致的压力不一致相关。即使采用扰动环流和均匀对称的分流构型也不能克服下游各支路压力不一致引起的分流不均。下游各支路压力不一致主要由两种因素导致，其一是支路的物理参数不一致，气液两相流体在支路中绝热流动阻力不一致；其二是支路物理参数均保持一致，气液两相流体在管内流动为非绝热流动，外界环境与管内流体发生热量交换引起阻力不一致。

支路阻力不一致导致气液两相流在流动过程中发生不稳定扰动，使系统多支路发生周期性或间歇性震荡，震荡的压力波通过支路向上游传递，影响两相流均匀分流过程，恶化相分离现象。

为克服下游压力震荡导致的相分离现象，提出采用临界流理论来抑制下游压力震荡向上游传递，抑制因非绝热流动，特别是非均匀换热的两相流动导致的相分离现象。

(4) 以气液两相制冷剂分流为研究对象的相分离现象

在制冷系统中，气液两相制冷剂的分流过程发生在节流后，与空气和水的两相流体相比，气液两相制冷剂的不稳定性更加复杂，更易于出现分流不均和相分离现象。节流后的气液两相制冷剂在管内流动特性呈现出空泡率高和稳定性差等特点，气相表观速度和液相表观速度明显不一致，流型复杂性也随之增加。受气液两相分流原理、上游制冷剂流动状态和下游支路非均匀换热的影响，采用空气和水进行模拟的气液两相分流过程与饱和制冷剂气液两相分流过程出现较大偏差，其主要原因是节流、分流过程和下游支路同时与外界环境发生热交换，造成气液两相制冷剂流动稳定性差，支路压力震荡影响分流过程。

1.2.2 目前研究工作的不足

通过对国内外研究现状的调研及国内外研究现状发展动态的分析发现，国内外对分流器的研究还存在以下不足：

(1) 国内外关于两相流分流特性和相分离控制等机理研究集中在不可避免地出现较严重相分离现象的 T 型管和集流管，由于相分离特性复杂，关于 T 型管和集流管的分流特性和相分离控制等方面的研究都不能直接应用在分流器中，而且对分流器分流特性和相分离控制的研究非常有限。公开文献中关于两相流分流研究一直关注在分流器结构尺寸及分流过程本身，而且现有分流器的设计仅靠生产经验，没有完整、详细的理论思想指导。

(2) 研究人员通过在分流器内设置额外附加阻力元件和导流元件以及对分流器结构参数优化改善分流器的分流特性，并未提出导致两相流分配不均的根本原因。鲜有将分流过程受分流原理、上游流体流动状态、下游支路非均匀换热以及气液两

相流体物性对相分离现象的影响进行综合考虑，未提出全过程理论方法，且对将气液两相分流原理、上游流体流动状态以及下游支路非均匀换热导致的阻力不一致等对相分离的影响也缺乏理论研究和实验数据的支持。

(3) 分流器分流特性的实验研究和数值模拟大多以空气—水为实验工质，鲜有对制冷剂在分流设备中的分流特性的研究。由于不同工质物性（如密度、动力粘度、摩擦系数和运动粘度等）都存在较大差异，会导致两相流的流动状态、流型等存在差异，因此不能通过空气—水试验模拟实际情况中制冷剂的分流效果。

(4) 传统分流器由于其在分流原理上存在先天不足。传统分流器通常是通过降压增速来实现向蒸发器各个流路的均匀供液，增速可以实现气液的搅动，降压可以缩小蒸发器各个流路的阻力差；但在变工况或者在部分负荷工作时，系统的流量减小，分流器的阻力降低，均匀分流性能下降甚至失去均匀分流能力。

因此，必须设计和开发新型的分流器，并对新型分流器进行理论分析和实验研究，以解决现有分流技术中存在的技术缺陷，克服上流流动状态和下流非均匀换热对分流性能的影响，进而提高整个制冷系统的工作性能。

二、研究内容和研究方法

2.1 研究内容

为抑制气液两相流体在分流过程中的相分离现象，以节流后气液两相制冷剂在多支路中的分流过程为研究对象，考虑到上流流动状态对分流特性的影响，提出“流型整定”分流理论；考虑下游支路非均匀换热导致的相分离恶化问题，提出基于临界流理论抑制非均匀换热导致的相分离。在课题实施过程中，开展以下研究：

(1) 考虑到上流流动状态、气液两相流分流原理和下流非均匀换热对相分离的影响，以及环状流和雾状流是对均匀分流最有利的流型，提出基于环流整定+临界分流”分流理念的整流喷嘴式分流器和基于“雾化整定+临界分流”分流理念的雾化喷嘴式分流器。此外，考虑到传统的分流器设计理念的不合理性，提出新型分流器设计理念，即将分流器与膨胀阀设计为一体化装置，共同承担节流压降，并根据此理念设计开发整流喷嘴式分流器和雾化喷嘴式分流器，并设计和撰写具有节流和分流功能的膨胀阀和分流器的膨胀分流一体化装置。

(2) 对基于“环流整定+临界分流”分流理念的整流喷嘴式分流器的分流理念进行理论分析和结构设计，阐述整流机理和两相流临界流动机理。探索建立环状扰动和环流整定对环状流中液体分布均匀性的理论模型，优化设计旋流叶片和整流器。建立采用临界流理论抑制相分离现象的理论模型，优化设计音速喷嘴，建立整流喷嘴式分流器分流模型及全过程相分离现象的理论模型。

(3) 通过对国内外文献的调研，对实验方法进行汇总分类。为验证理论分析结

果, 采用 R22 制冷剂, 设计并搭建冷风机性能测试试验台, 定义分流器分流性能评价指标和冷风机综合性能评价指标, 实验研究不同库温下, 整流喷嘴式分流器、喷嘴式分流器、气液分离式分流器、CAL 分流器和文丘里分流器的分流性能, 以及其对冷风机传热性能的影响。

2.2 研究方法

本课题主要采用理论分析和实验研究相结合的研究手段, 研究全过程抑制相分离现象的理论模型。详细技术路线图如图 1 所示, 具体的研究方案如下:

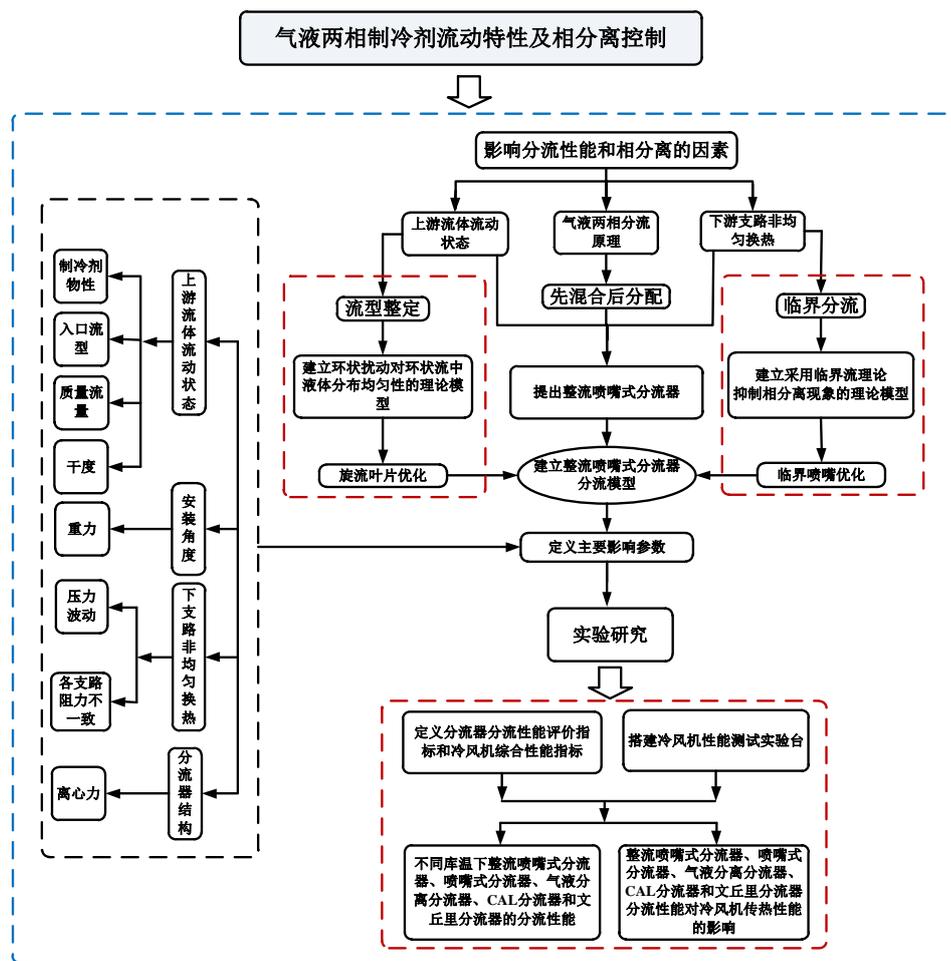


图 1 研究技术路线图

Fig. 1 Schematic diagram of technology road

冷风机性能测试系统如图 2 所示, 该系统由恒温室系统和测试室系统两部组成。

在恒温室系统中, 包括恒温室、制冷机和控制系统。恒温室是通过隔热材料与周围环境进行热隔离的房间。恒温室的温度控制是通过制冷机和电加热器的热平衡来实现的, 如图 3-1 所示。

在测试室系统中，包括测试室、分流器测试系统和热湿平衡系统。试验室与恒温室相似，两室由相同的保温材料构成。测试室设置在恒温室内。本设计的目的是准确地计算试验室与恒温室之间的热交换，使温度保持在 0℃ 的恒定状态。

分流器试验系统为闭环系统，包括压缩机 1、油分离器 2、水冷凝器 3、储能器 4、截止阀 5、制冷剂质量流量计 6、电磁阀 7、视液镜 8、电子膨胀阀 9、分流器 10、翅片管式蒸发器 11，气液分离器 12，水泵 13 和水质量流量计 14。热湿平衡系统包括电加热器 15 和加湿器 16。在测试室中，热量和湿度平衡由电加热器 15 和加湿器 16 控制

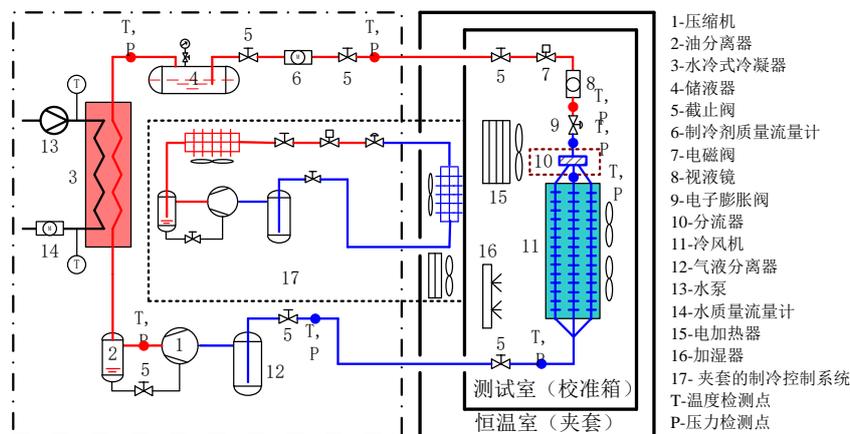


图 2 冷风机性能测试实验台

Fig.2 Experimental bench for testing the performance of air cooler

分流器测试系统作为核心测试系统，提供了分流器和翅片管式蒸发器的所有测试条件。流过回路的流量可以通过电膨胀阀的部分流量来控制。回路中的流量由压缩机频率控制。制冷剂流向测试分流器，进入翅片管蒸发器的进气歧管，然后将流体划分为翅片管蒸发器的 6 个流道，这些流道被相对温暖的空气加热。相对温暖的空气由电加热器加热。翅片管蒸发器的总冷却能力是电加热器加热量和试验室与恒温室之间的换热量之和。通过安装在分流器和翅片管蒸发器进出口处的压力传感器，对分流器和翅片管蒸发器的压降进行了测试。

三、预计可获得的成果

- (1) 搭建可开展节流后两相剂可视化实验段及分流性能测试的系统实验台；
- (2) 揭示环流扰动对环状流中液体分布均匀性的影响，探索非均匀换热导致的相分离现象抑制机理，建立全过程抑制相分离现象的理论模型；
- (3) 在国际著名学术期刊（如 Int J Multiphas Flow、Applied Energy、Int J Heat Mass Tran 和 Int J Refrigeration）上发表 SCI 检索文章 2-3 篇；

(4) 申请国家发明专利 1-2 项。

四、工作进度计划

2018 年 3 月 4 日-2018 年 3 月 10 日撰写开题报告；
2018 年 3 月 11 日至 2018 年 3 月 17 日相关英文论文的英译中翻译，一篇；
2018 年 3 月 18 日至 2018 年 3 月 31 日完成实验台搭建；
2018 年 4 月 1 日至 2018 年 4 月 7 日毕业实习了解设备结构和生产工艺；
2018 年 4 月 8 日至 2018 年 4 月 28 日完成实验测试；
2018 年 4 月 29 日至 2018 年 5 月 19 日完成实验理论分析和论文撰写；
2018 年 5 月 20 日至 2018 年 5 月 26 日整理论文并撰写发表论文；
2018 年 5 月 27 日至 2018 年 6 月 2 日论文查重及撰写；
2018 年 6 月 3 日至 2018 年 6 月 9 日准备毕业设计答辩；
2018 年 6 月 11 日至 2018 年 6 月 15 日毕业设计答辩。

五、与开题有关的主要参考文献

- [1] 高原, 田怀璋, 袁秀玲. 分液器的结构型式及其在制冷系统中的应用[J]. 低温与超导. 2001(01): 22-27.
- [2] 胡卫荣. 空调换热器用铜量对空调器性能的影响分析[J]. 能源研究与信息. 2015(1): 38-42.
- [3] 冼志健, 王开发. 小管径铜管换热器的性能及成本分析[J]. 制冷与空调. 2013, 13(5): 65-66.
- [4] 任滔, 丁国良, 韩维哲, 等. 空调器中采用小管径的影响分析及研发思路[C]. 上海.
- [5] 任滔, 丁国良, 韩维哲, 等. 空调器中采用小管径的影响分析及研发思路[J]. 制冷技术. 2012(1): 49-52.
- [6] 高晶丹. 采用小管径换热器的房间空调器特性研究[D]. 上海交通大学, 2014.
- [7] 史琳, 朱明善. 家用/商用空调用 R32 替代 R22 的再分析[J]. 制冷学报. 2010, 31(1): 1-5.
- [8] Li G, Frankel S, Braun J E, et al. Application of CFD Models to Two-Phase Flow in Refrigerant Distributors[J]. HVAC&R Research. 2005, 11(1): 45-62.
- [9] Qi Z. Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles – A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014, 38: 754-764.
- [10] 高扬. 小管径空调分配器的分流特性分析和结构优化[D]. 上海交通大学, 2016.
- [11] Yoshioka S, Kim H, Kasai K. Performance Evaluation and Optimization of A Refrigerant Distributor for Air Conditioner[J]. Journal of Thermal Science and

Technology. 2008, 3(1): 68-77.

[12] J S S, L S, B R S. Pressure drop of HFC refrigerants inside evaporator and condenser coils as determined by CFD[J]. Applied energy. 2001, 70(2): 169-178.

[13] V P W. Potential benefits of smart refrigerant distributors[M]. DIANE Publishing, 2002.

[14] J K, E B J, A G E. Analysis of refrigerant flow distribution in evaporators[J]. International Refrigeration and Air Conditioning. 2008: 966.

[15] Blecich P. Experimental investigation of the effects of airflow nonuniformity on performance of a fin-and-tube heat exchanger[J]. International Journal of Refrigeration. 2015, 59: 65-74.

[16] Yuan X, Wang Y, Liu J, et al. Experimental and numerical study of airflow distribution optimisation in high-density data centre with flexible baffles[J]. Building and Environment. 2018, 140: 128-139.

[17] Liang S Y, Wong T N, Nathan G K. Numerical and experimental studies of refrigerant circuitry of evaporator coils[J]. International Journal of Refrigeration. 2001, 24(8): 823-833.

[18] Lu H, Zhang Z, Yang L. A review on airflow distribution and management in data center[J]. Energy and Buildings. 2018, 179: 264-277.

[19] P F. Adiabatic Developing Two-phase Refrigerant Flow in Manifolds of Heat Exchangers[D]. Illinurs: University of Illinois at Urbana, 2004.

[20] S H P. Flow Distribution Issues in Parallel Flow Heat Exchangers[J]. ASHRAE Transactions. 2004, 110(1).

[21] Lee J, Kwon Y, Kim M H. An improved method for analyzing a fin and tube evaporator containing a zeotropic mixture refrigerant with air mal-distribution[J]. International Journal of Refrigeration. 2003, 26(6): 707-720.

[22] 王志毅, 陈松, 潘祖栋. 改进风冷螺杆热泵机组的分液器性能实验研究[J]. 低温与超导. 2008(03): 37-39.

[23] 鲁红亮, 陶红歌, 胡云鹏, 等. 平行流换热器中热流体分布均匀性的研究进展[J]. 制冷学报. 2010, 31(06): 39-45.

[24] M C J, V P W, A D P. Effects of non-uniform refrigerant and air flow distributions on finned-tube evaporator performance[C]. 2003.

[25] 韩清. 制冷剂分液器性能研究[D]. 上海交通大学, 2014.

[26] Ablanque N, Oliet C, Rigola J, et al. Two-phase flow distribution in multiple parallel tubes[J]. International Journal of Thermal Sciences. 2010, 49(6): 909-921.

- [27] 王俊德. 用于制冷剂部分蒸发的新型分配器[J]. 流体工程. 1984(06): 62-64.
- [28] Hu K, Zhu J, Zhang W, et al. Effects of evaporator superheat on system operation stability of an organic Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering. 2017, 111: 793-801.
- [29] Nakayama M, Sumida Y, Hirakuni S, et al. Development of a Refrigerant Two-Phase Flow Distributor for a Room Air Conditioner[J]. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. 2000: 497.
- [30] Wen M, Lee C, Tasi J. Improving two-phase refrigerant distribution in the manifold of the refrigeration system[J]. Applied Thermal Engineering. 2008, 28(17-18): 2126-2135.
- [31] 曾艳, 高原, 田怀璋, 等. 气液两相流在制冷机械中的应用[J]. 制冷与空调. 2001(06): 45-49.
- [32] 高原, 田怀璋, 曾艳, 等. 改进型分液器的流量分配性能[J]. 制冷与空调. 2002(04): 12-14.
- [33] 梁俊杰, 田怀璋, 高原, 等. 改进型分液器流量分配性能的实验研究[J]. 制冷与空调. 2004(02): 25-27.
- [34] Kim N, Han S. Distribution of air-water annular flow in a header of a parallel flow heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008, 51(5-6): 977-992.
- [35] 周云龙, 蔡辉, 洪文鹏, 等. 水平管内油气水三相间歇流向环状流转换的研究[J]. 热能动力工程. 2001(04): 377-379.
- [36] 叶务占. 关于家用空调器分流器单体差异对产品性能一致性影响分析[J]. 日用电器. 2013(07): 45-48.
- [37] 梁俊杰. 论两相流分流器性能评价体系[C]. 中国云南昆明: 2005.
- [38] 吴裕远, 吴铁晖, 陈流芳. 双相变换热器气液均匀分配特性及典型结构研究的新进展[J]. 西安交通大学学报. 2007(04): 383-388.
- [39] 吴裕远, 陈流芳. 最新低温技术"类环状流微膜蒸发板翅式冷凝蒸发技术"成果介绍[J]. 中国科学基金. 2002, 16(6): 348-350.
- [40] Han Q, Zhang C, Chen J. Experimental and CFD investigation of R410a distributors for air conditioner[J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. 2014, 22(02): 1440002.
- [41] Zhang C, Wang D, Chen J, et al. Experimental and Numerical Investigations of the Double-Barrel Distributor for Air Conditioner[J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. 2015, 23(03): 1550018.
- [42] Borhani N, Thome J R. Intermittent dewetting and dryout of annular flows[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2014, 67: 144-152.

- [43] Mendonça Lopes M G, Santana H S, Andolphato V F, et al. Flow uniformity data on 3D printed flow distributors[J]. *Data in Brief*. 2019, 23: 103799.
- [44] 李焱, 李玉星, 胡其会, 等. 板翅式换热器不同气液入口分配方式的分配性能对比分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*. 2014, 38(02): 135-141.
- [45] 师艳平. 液化天然气冷箱并联配管的介质分配机理及流量均匀分配策略研究[D]. 山东大学, 2018.
- [46] 焦安军, 厉彦忠, 张瑞, 等. 物流分配的不均匀性对紧凑式换热器效能的影响[J]. *西安交通大学学报*. 2001(03): 265-269.
- [47] 张炳东, 刘丹, 王栋. 分相式气液两相流体等干度分配方法[J]. *西安交通大学学报*. 2010, 44(05): 106-110.
- [48] 梁法春, 王栋, 林宗虎. 新型三通分配器中环状流相分离预测[J]. *工程热物理学报*. 2007(01): 71-73.
- [49] 孙志利, 臧润清, 姬卫川. 气相分离式分流器对冷风机性能影响的实验研究[J]. *冷藏技术*. 2017, 40(03): 12-16.
- [50] 李焱, 李玉星, 胡其会, 等. 一种新型板翅式换热器气液分配器分配特性的敏感性分析[J]. *化工学报*. 2013, 64(06): 2007-2014.
- [51] 周云龙, 刘博, 孙科. T形微通道内环状气液两相流相分离[J]. *化工进展*. 2013, 32(07): 1489-1494.
- [52] J A B, A P, H G A. Annular two-phase flow split at an impacting T[J]. *International journal of multiphase flow*. 1987, 13(5): 605-614.
- [53] Y C, B W P. Gas-liquid annular flow at a vertical tee junction—Part I. Flow separation[J]. *International journal of multiphase flow*. 1995, 21(4): 569-589.
- [54] Mohamed M A, Soliman H M, Sims G E. Experimental investigation of two-phase flow splitting in an equal-sided impacting tee junction with inclined outlets[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011, 35(6): 1193-1201.
- [55] R F J. Options are available for pipeline and compressor-station drip design[J]. *Oil Gas J*. 1980, 78(13).
- [56] J A B, A S P. Two-phase flow split at T junctions: effect of side arm orientation and downstream geometry[J]. *International journal of multiphase flow*. 1992, 18(6): 861-875.
- [57] O S, S A, P B J. Two-phase flow splitting in a horizontal reduced pipe tee[J]. *Chemical Engineering Science*. 1989, 44(10): 2388-2391.
- [58] Saieed A, Pao W, Hewakandamby B, et al. Experimental investigation on the effect of diameter ratio on two-phase slug flow separation in a T-Junction[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018, 170: 139-150.
- [59] Saieed A, Pao W, Hashim F M. Effect of T-junction diameter ratio on

stratified-wavy flow separation[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018, 51: 223-232.

[60] Cao J, Kraut M, Dittmeyer R, et al. Numerical analysis on the effect of bifurcation angle and inlet velocity on the distribution uniformity performance of consecutive bifurcating fluid flow distributors[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2018, 93: 60-65.

[61] Su W, Hwang Y, Deng S, et al. Experimental study on phase separation of refrigerant at horizontal T-junction[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2018, 105: 217-233.

[62] R. H J A. Dividing annular flow in a horizontal tee[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 1981, 7(3): 343-355.

[63] Collier J G, Mayinger F. Single-phase and two-phase flow behavior in primary circuit components[M]. *Two-phase flows and heat transfer*, 1997.

[64] C H K. Two-phase flow splitting at a pipe tee[J]. *Journal of Petroleum Technology*. 1978, 30(2): 290-296.

[65] Lu P, Deng S, Zhao L, et al. Analysis of pressure drop in T-junction and its effect on thermodynamic cycle efficiency[J]. *Applied Energy*. 2018, 231: 468-480.

[66] T S, J A B, G C. The split of annular two-phase flow at a small diameter T-junction[J]. *International journal of multiphase flow*. 2000, 26(5): 845-856.

[67] 何奎, 汪双凤, 黄间珍. 气液两相流在微小 T 型三通中的相分配特性[J]. *化工学报*. 2011, 62(S1): 92-96.

[68] 陈锦芳. 气液两相流在微小三通内的相分配特性研究[D]. 华南理工大学, 2015.

[69] O S, P B J, Y. T. Two-phase flow splitting in a tee junction—experiment and modelling[J]. *Chemical Engineering Science*. 1987, 42(11): 2667-2676.

[70] T H S, M S H, T L J R. Phase separation in impacting wyes and tees[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 1989, 15(6): 965-975.

[71] Wren E, Azzopardi B J. Affecting the phase split at a large diameter T-junction by using baffles[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2004, 28(8): 835-841.

[72] 田敬, 吴明, 王帅, 等. 应用改型三通实现气液两相流的等干度分配[J]. *化工学报*. 2014, 65(03): 836-842.

[73] Saieed A, Pao W, Ali H M. Prediction of phase separation in a T-Junction[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018, 97: 160-179.

[74] Dos Reis E, Goldstein L. Fluid dynamics of horizontal air–water slug flows through a dividing T-junction[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2013, 50: 58-70.

[75] He K, Wang S, Zhang L. Transient split features of slug flow at an impacting

micro-T-junction: A numerical study[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, 112: 318-332.

[76] Chen J, Wang S, Zhang X, et al. Experimental investigation of two-phase slug flow splitting at a micro impacting T-junction[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, 81: 939-948.

[77] 曹学文, 聂新刚, 梁法春, 等. 旋流型管壁取样分配器分流特性[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*. 2013, 37(04): 151-154.

[78] 曹学文, 吴梁红, 宗媛, 等. 旋流型管壁分配器取样孔分流特性[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*. 2011, 35(01): 119-123.

[79] J A B. Phase separation at T junctions[J]. *Multiphase Science and Technology*. 1999, 11(4).

[80] Doherty A P, Murphy A, Spedding P L. Fluid flow in an impacting symmetrical tee junction II: two-phase air/water flow[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 2009, 4(4): 424-431.

[81] Teclemariam Z, Soliman H M, Sims G E, et al. Experimental investigation of the two-phase flow distribution in the outlets of a horizontal multi-branch header[J]. *Nuclear Engineering and Design*. 2003, 222(1): 29-39.

[82] Jiao A, Zhang R, Jeong S. Experimental investigation of header configuration on flow maldistribution in plate-fin heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2003, 23(10): 1235-1246.

[83] Wijayanta A T, Miyazaki T, Koyama S. Refrigerant distribution in horizontal headers with downward minichannel-branching conduits: Experiment, empirical correlation and two-phase flow pattern map[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017, 81: 430-444.

[84] Raul A, Bhasme B N, Maurya R S. A Numerical Investigation of Fluid Flow Maldistribution in Inlet Header Configuration of Plate Fin Heat Exchanger[J]. *Energy Procedia*. 2016, 90: 267-275.

[85] Jiang Y, Qin J, Xu Y, et al. The influences of the header geometry on hydrocarbon fuel flow distribution in compact parallel channels[J]. *Aerospace Science and Technology*. 2018, 79: 318-327.

[86] 王妍, 徐宝全, 王树众, 等. 水平并联管系统中两相流流量分配特性的可视性研究[J]. *西安交通大学学报*. 1998(07): 65-69.

[87] Vist S. Two-Phase Refrigerant Distribution in Round Tube Manifolds[J]. *ASHRAE Transactions*. 2004, 110: 307.

[88] Vist S, Pettersen J. Two-phase flow distribution in compact heat exchanger

- manifolds[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2004, 28(2-3): 209-215.
- [89] Y H, H J D, R R. Refrigerant distribution in minichannel evaporator manifolds[J]. *Hvac&R Research*. 2007, 13(4): 543-555.
- [90] Marchitto A, Devia F, Fossa M, et al. Experiments on two-phase flow distribution inside parallel channels of compact heat exchangers[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2008, 34(2): 128-144.
- [91] Chen S S. Refrigerant distribution model development[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [92] 黄东, 袁秀玲. 一种新型的多路分液器[J]. *制冷与空调*. 1998(04): 21-24.
- [93] 翁建霆, 张利敏, 董天禄. 制冷用氟利昂液体分配器性能的实验研究[J]. *制冷技术*. 1997(02): 3-6.
- [94] 高利伟. 分液器的原理和应用[J]. *低温与特气*. 2007(04): 9-10.
- [95] 张琨敏. 制冷剂分配器对空气源热泵机组制热性能的影响[J]. *制冷与空调*. 2017, 17(05): 49-54.
- [96] 梁俊杰, 田怀璋, 陈林辉, 等. 制冷剂在蒸发器中的流量分配及分液管设计[J]. *石油化工设备*. 2004(01): 30-33.
- [97] 董续君. 空调器中制冷剂分流器及其组件的性能研究[C]. 中国杭州: 2005.
- [98] 程锦承, 程振民, 方向晨, 等. 文丘里气液分布管的实验研究与数值模拟[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*. 2007(04): 456-459.
- [99] J W, D D, J G. Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 1979, 5(6): 437-462.
- [100] 李泽芳, 苏庆勇. 单元式空调机节流毛细管分液头的改进与实验[J]. *装备制造技术*. 2008(03): 18-19.
- [101] 仇嘉, 魏文建, 张绍志, 等. 基于 CFD 数值模拟的板式换热器分配器性能研究[J]. *机械工程学报*. 2010, 46(14): 130-137.
- [102] 高原, 田怀璋, 袁秀玲. 分液器在制冷系统中的应用[J]. *制冷与空调*. 2001(05): 30-32.
- [103] Ghani J A, Choudhury I A, Hassan H H. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters[J]. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, 145(1): 84-92.
- [104] 韩清, 张驰, 徐博, 等. 制冷剂分液器分配特性的实验研究[J]. *制冷学报*. 2014, 35(03): 1-7.
- [105] Zhang C, Wang Y, Chen J. Optimization of the reserve-type distributor for R410A air conditioner[J]. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. 2014,

22(04): 1450022.

[106] Kim J, Braun J E, Groll E A. A hybrid method for refrigerant flow balancing in multi-circuit evaporators: Upstream versus downstream flow control[J]. International Journal of Refrigeration. 2009, 32(6): 1271-1282.

[107] Kim J, Braun J E, Groll E A. Evaluation of a hybrid method for refrigerant flow balancing in multi-circuit evaporators[J]. International Journal of Refrigeration. 2009, 32(6): 1283-1292.

[108] 翁晓敏, 胡海涛, 丁国良, 等. 新型插孔式分流器的结构优化设计及实验验证[J]. 制冷技术. 2014, 34(05): 25-30.

[109] 高扬, 翁晓敏, 丁国良, 等. 适合小管径空调器的分配器分流性能评价与结构优化[J]. 制冷学报. 2016, 37(02): 93-100.

[110] 高扬, 翁晓敏, 丁国良, 等. 全年能效消耗效率指标下的分配器分配特性分析及结构优化设计[J]. 制冷技术. 2015, 35(04): 22-27.

[111] 翁晓敏, 高晶丹, 胡海涛, 等. 反射式分流器的分流性能研究及结构改进[J]. 制冷技术. 2013, 33(04): 41-44.

[112] 高晶丹, 丁国良, 陈国胜, 等. 插孔式分流器分流性能的实验研究[J]. 制冷技术. 2013, 33(02): 6-9.

[113] 高扬, 翁晓敏, 丁国良, 等. 不同制冷工质在分配器中的分配特性分析及结构优化设计[J]. 制冷技术. 2015, 35(03): 28-33.

[114] 高晶丹, 丁国良, 胡海涛, 等. 不同结构分流器的分流性能比较[J]. 制冷技术. 2013, 33(03): 24-26.

[115] 高晶丹. 插孔式分流器的性能研究及结构改进[C]. 中国湖北武汉: 2013.

[116] Elucidating Flow Behavior In Refrigerant Flow Distributors With Computational Simulations[J]. 2015.

[117] Wu G, Ren T, Ding G, et al. Design and visualized validation of a distributor with uniform refrigerant distribution by forming annular flow[J]. International Journal of Refrigeration. 2019, 98: 238-248.

[118] Zhang Z, Li Y, Xu Q. Experimental research on the effects of distributor configuration on flow distribution in plate - fin heat exchangers[J]. Heat Transfer—Asian Research. 2004, 33(6): 402-410.

[119] Jiao A, Baek S. Effects of Distributor Configuration on Flow Maldistribution in Plate-Fin Heat Exchangers[J]. Heat Transfer Engineering. 2006, 26(4): 19-25.

[120] A A, A M, F S. Distribution of two-phase flow in a distributor[J]. J. Eng. Sci. Technol. 2012, 7(1): 41-55.

[121] 杨智峰, 周伟峰, 焦华超, 等. 新型带均流作用的万向型分流器性能研究[J]. 科

技创业家. 2013(08): 68-70.

[122] J G P, M F C, T S V M. New Liquid Flow Distributor Design using CFD and Experimental Validation[C]. Braganca, Spain: 2009.

[123] 王彦坤. 分液管对蒸发器中制冷剂流量均衡的影响[C]. 上海.

[124] 袁培. 分液器制冷剂均匀分配性能研究[C]. 中国江苏扬州: 2015.

[125] 杨杰. 制冷剂分配器对翅片管式蒸发器性能的影响[J]. 制冷与空调. 2018, 18(06): 41-44.

[126] 柳士开, 薄守石, 李伟, 等. 管式气液分配器数值模拟研究[J]. 石油炼制与化工. 2018, 49(01): 65-69.

[127] Lopes M G M, Santana H S, Andolphato V F, et al. CFD analysis of flow distributor designs for numbering-up of biodiesel synthesis[J]. Chemical Engineering Research and Design. 2018, 138: 458-471.

[128] F S R, T P M. Improved static mixer design for achieving equal phase splitting at pipe junctions [J]. International Thermal Operations/Heavy Oil Symposium.Society of Petroleum Engineers. 1999.

[129] 吴裕远. 双相变换热器气液均匀分配典型结构的研究新进展[C]. 中国安徽合肥: 2009.

[130] Zhang B, Zhang X, Wang D, et al. Equal quality distribution of gas-liquid two-phase flow by partial separation method[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2013, 57: 66-77.

[131] 孙媛, 曹学文, 梁法春, 等. 气液两相流管束分离器数值模拟与实验验证[J]. 油气储运. 2018, 37(08): 885-890.

[132] C P J, G S J L, L B E. Apparatus and method for controlling and measuring steam quality[P]. U.S. Patent 6,250,131. 2001-6-26.

[133] 袁培, 姜国宝, 张菲妮, 等. 板翅式换热器两相流分配器[J]. 化工学报. 2011, 62(S1): 31-36.

[134] Yuan P, Jiang G B, He Y L, et al. Performance simulation of a two-phase flow distributor for plate-fin heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering. 2016, 99: 1236-1245.

[135] 文键. 改善板翅式换热器封头流场分布的一种措施[C]. 中国陕西西安: 2003.

[136] 焦安军, 厉彦忠, 张瑞, 等. 封头结构对板翅式换热器物流分配不均匀性的影响[J]. 化工学报. 2003(07): 907-912.

[137] 张哲, 田津津. 板翅式换热器封头结构的物流分配特性[J]. 化学工程. 2009, 37(01): 15-18.

[138] 张哲. 板翅式换热器物流分配的研究概述[C]. 中国陕西西安: 2003.

- [139] 张哲, 厉彦忠, 焦安军. 板翅式换热器封头结构的数值模拟[J]. 化工学报. 2002(11): 1182-1187.
- [140] Wen J, Li Y, Wang S, et al. Experimental investigation of header configuration improvement in plate-fin heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering. 2007, 27(11-12): 1761-1770.
- [141] Wang C, Yang K, Tsai J, et al. Characteristics of flow distribution in compact parallel flow heat exchangers, part II: Modified inlet header[J]. Applied Thermal Engineering. 2011, 31(16): 3235-3242.
- [142] Two-phase flow distribution of air – water annular flow in a parallel flow heat exchanger[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2006, 32: 1340-1353.
- [143] 杜建通, 张荣玲. 制冷系统在非设计工况下的运行特性及问题分析[J]. 流体机械. 1999(08): 58-62.
- [144] G L, E B J, A G E. Evaluating the performance of refrigerant flow distributors[J]. 2002.
- [145] F Z, Z X, Y W. Numerical investigation of constructal distributors with different configurations[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2009, 17(1): 175-178.
- [146] 孙文卿, 屈静, 鹿世化. 干式壳管式蒸发器内新型分液器的数值模拟[J]. 制冷学报. 2017, 38(03): 56-62.
- [147] Mendonça Lopes M G, Santana H S, Andolphato V F, et al. Flow uniformity data on 3D printed flow distributors[J]. Data in Brief. 2019, 23: 103799.
- [148] 元爱红. 管柱式旋流分离器[J]. 油气田地面工程. 2005(03): 62.
- [149] 金向红, 金有海, 王建军, 等. 气液旋流分离技术的研究[J]. 新技术新工艺. 2007(08): 85-88.
- [150] 胡艳华. 小型柱式气液旋流分离器在海洋平台的应用前景分析[C]. 中国福建厦门: 2009.
- [151] Mantilla I, Shirazi S A, Shoham O. Flow Field Prediction and Bubble Trajectory Model in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone (GLCC) Separators[J]. Journal of Energy Resources Technology. 1999, 121(1): 9.
- [152] 周云龙, 倪志勇. 柱状气液分离器液相带气特性分析[J]. 化工机械. 2014, 41(03): 282-285.
- [153] 姬卫川. 蒸发器用分流器的理论分析与实验研究[D]. 天津商业大学, 2016.
- [154] A F M. Effect of conical distributors on evaporator and system performance[D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.
- [155] A A, A M, F S. Distribution of two-phase flow in a distributor [J]. J. Eng. Sci. Technol. 2012, 7(1): 41-55.

- [156] Wang D, Liang F, Peng Z, et al. Gas-liquid two-phase flow measurements by full stream batch sampling[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2012, 40: 113-125.
- [157] Dong W, Zong Hu L. Gas-liquid two-phase flow measurement using ESM[J]. Experimental Thermal and Fluid Science. 2002, 26(6): 827-832.
- [158] Liang F, Wang D, Chen J, et al. Gas-liquid two-phase flow equal distribution using a wheel distributor[J]. Experimental Thermal and Fluid Science. 2014, 55: 181-186.
- [159] 黄善仿, 王栋, 林宗虎. 气液两相流等干度流量分配方法研究[J]. 工程热物理学报. 2012(10): 1727-1730.
- [160] 吴东垠, 林宗虎. 水平并联管子系统中气液两相流在联箱内的压力分布研究[J]. 热能动力工程. 1994(03): 168-175.
- [161] 王栋, 林益, 林宗虎. 取样管型分流分相式气液两相流体流量计[J]. 工程热物理学报. 2002(02): 235-237.
- [162] 王栋. 分流分相式气液两相流体流量计[D]. 西安交通大学, 2000.
- [163] 梁法春, 王栋, 林宗虎. 水平管气液环状流在新型分配器中的分配研究[J]. 西安交通大学学报. 2006(01): 106-110.
- [164] 梁法春, 王栋, 林宗虎. 新型分配器中环状流相分配研究[C]. 北京.
- [165] 梁法春, 杨桂云, 王金龙, 等. 基于临界分流理论的气液两相流均匀分配器[J]. 化工学报. 2014, 65(10): 3798-3804.
- [166] 梁法春, 王栋, 杨桂云, 等. 气液两相流临界分配特性及相分离控制[J]. 西安交通大学学报. 2015, 49(01): 53-58.
- [167] 杨桂云. 气液两相流临界分配特性及应用研究[D]. 中国石油大学(华东), 2014.
- [168] 方召君, 梁法春, 谢振强, 等. 基于离心法引发的气液两相环状流的数值模拟及流量测量研究[J]. 科学技术与工程. 2017, 17(02): 1-4.
- [169] 孙媛. 气液两相流小比例取样与流量测量研究[D]. 中国石油大学(华东), 2016.
- [170] 王汉青. 预混喷嘴式分流器对改善冷风机性能的实验研究[D]. 天津商业大学, 2018.
- [171] 梁法春, 王栋, 林宗虎. 气液两相流体流量或质量含气率的液体取样测量方法[J]. 热能动力工程. 2008(03): 256-258.
- [172] Wang D, Liu C, Yu D, et al. Influence factors of flow distribution and a feeder tube compensation method in multi-circuit evaporators[J]. International Journal of Refrigeration. 2017, 73: 11-23.
- [173] Wang L, Kong X, Qi Y. Optimal design for split-and-recombine-type flow distributors of microreactors based on blockage detection[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2016, 24(7): 897-903.
- [174] Guo X, Fan Y, Luo L. Multi-channel heat exchanger-reactor using arborescent

distributors: A characterization study of fluid distribution, heat exchange performance and exothermic reaction[J]. Energy. 2014, 69: 728-741.

[175] A E, V L, M F. Influence of viscosity and surface tension on performance of gas-liquid contactors with ejector type gas distributor[J]. Chemical Engineering Science. 2002, 57(15): 2987-2994.

[176] 黄丕江, 仲明凯. 分液器及空调器[P]. CN208108567U. 2018-11-06.

[177] 曹焱, 钟成, 鲁艺, 等. 一种分液器[P]. CN108620146A. 2018-10-09.

[178] 吴禄, 吕浩福, 吴小鸿. 一种分液器及压缩机[P]. CN108592467A. 2018-09-28.

[179] 李孟涛, 唐威力. 具有旁通的分液器[P]. CN207907554U. 2018-09-25.

[180] 陈亮亮, 陈晓阳, 孙文倩, 等. 分液器及具有其的换热器[P]. CN207907555U. 2018-09-25.

[181] 丁怡, 陈敬煜, 陈武洲. 一种分液器[P]. CN207886717U. 2018-09-21.

[182] 陈亮亮, 陈晓阳, 孙文倩, 等. 分液器及具有其的换热器[P]. CN108562075A.

[183] 郭奕晗, 彭楚堂, 王琳, 等. 分液器结构及具有其的空调器[P]. CN108562076A. 2018-09-21.

[184] 张阔, 朱长动, 冯玉强, 等. 分液器及其系统[P]. CN207826619U. 2018-09-07.

[185] 黄丕江, 仲明凯. 分液器及空调器[P]. CN108413663A. 2018-08-17.

[186] 张笋, 刘磊, 刘金喜, 等. 分液器及空调器[P]. CN207688475U. 2018-08-03.

[187] 余少波, 霍喜军, 林婵琼. 分液器和压缩机[P]. CN207570166U. 2018-07-03.

[188] 卢林高, 赵旭敏, 蔡庆波, 等. 分液器、压缩机、空调器系统及具有其的空调器[P]. CN207501502U. 2018-06-15.

[189] 李刚. 一种分液器[P]. CN206944540U. 2018-01-30.

[190] 曹颖, 朱江程, 周涯宸. 分液器及具有其的空调系统[P]. CN107621101A. 2018-01-23.

[191] 郭衢, 沈慧, 王珂. 分液器支架及空调器[P]. CN206905219U. 2018-01-19.

[192] 孙志利, 臧润清, 姬卫川. 分相式制冷剂气液分液器及制冷系统[P]. CN204388444U. 2015-06-10.

[193] 孙志利, 臧润清. 一种具有均匀分液功能的透平膨胀机及制冷系统[P]. CN204373279U. 2015-06-03.

[194] 孙志利, 臧润清, 姬卫川. 整流喷嘴式等流量分液器及制冷系统[P]. CN204373280U. 2015-06-03.

[195] 冯维庆, 杨春雪, 李旭, 等. 一种分液器及空调器[P]. CN208567219U. 2019-03-01.

[196] 李栋, 王云. 一种分液器及具有该分液器的制冷系统[P]. CN208059361U. 2018-11-06.

- [197] 张笋, 刘磊, 胡乾龙, 等. 分液器及空调器[P]. CN107741108A. 2018-02-27.
- [198] 邹温锋, 杨虹, 李金奎, 等. 制冷系统及其分液器[P]. CN106403406A. 2017-02-15.
- [199] 张晓光, 刘爱军, 李孜, 等. 分流器及具有其的空调器[P]. CN108844262A. 2018-11-20.
- [200] 刘家豪, 卫广穹, 李庆, 等. 分流器及制冷系统[P]. CN108931083A. 2018-08-20.
- [201] 陈辉, 赵旭敏, 黄海伟, 等. 一种分液器及具有其的压缩机[P]. CN108954995A. 2018-12-07.
- [202] 刘家豪, 卫广穹, 李庆, 等. 一种分流器及制冷系统[P]. CN108954989A. 2018-12-07.
- [203] 孙治兵, 郑存义. 一种制冷剂均匀分液器[P]. CN107289680A. 2017-10-24.
- [204] 程剑国, 范少稳, 霍喜军. 分液器[P]. CN206504510U. 2017-09-19.
- [205] 余少波. 分液器及具有其的压缩机[P]. CN107166824A. 2017-09-15.
- [206] 叶后兵. 空调分液器[P]. CN204006823U. 2014-12-10.
- [207] 钱国献. 一种空调分液器[P]. CN203881011U. 2014-10-15.
- [208] 李晨晨. 分液器及装有该分液器的空调[P]. CN104061722A. 2014-09-24.
- [209] 李好学, 李凤丽, 樊旭旭, 等. 一种分液器[P]. CN203837344U. 2014-09-17.
- [210] 林少坤. 分液器[P]. CN203798039U. 2014-08-27.
- [211] 邓向明. 分液器及具有该分液器的空调器[P]. CN103954083A. 2014-07-30.
- [212] 李好学, 李凤丽, 樊旭旭, 等. 一种分液器[P]. CN103925751A. 2014-09-17.
- [213] 严荐强, 陈江平, 胡四清, 等. 一种具有分液器的致冷系统[P]. CN103925751A. 2014-05-21.
- [214] 严荐强, 陈江平, 胡四清, 等. 一种分液器[P]. CN203605549U. 2014-05-21.
- [215] 高燕生, 顾吉林. 一种分液器[P]. CN103626109A. 2014-03-12.
- [216] 严荐强, 陈江平, 胡四清, 等. 一种分液器[P]. CN103604257A. 2014-02-26.
- [217] 何金汉. 分液器[P]. CN203414002U. 2014-01-29.
- [218] 何金汉. 改良型分液器[P]. CN203385247U. 2014-01-08.
- [219] 冯成军, 朱贱明. 一种空调器的分液器[P]. CN203203306U. 2013-09-18.
- [220] 陈启明, 陶林. 空调分液器[P]. CN203083218U. 2013-07-24.
- [221] 乔明武, 汪强, 王慧荣, 等. 一种分液器[P]. CN203033743U. 2013-07-03.
- [222] 舒迎, 胡陈. 一种用于蒸发器的分液器[P]. CN202928221U. 2013-05-08.
- [223] 郑坚江, 侯丽峰. 分液器[P]. CN202915610U. 2013-05-01.
- [224] 阳志伟, 龙波. 分液器[P]. CN202709567U. 2013-01-30.
- [225] 张伯根. 分液器[P]. CN302310136S. 2013-01-30.
- [226] 翁书京, 翁淇滢. 多通道分液器[P]. CN102838067A. 2012-12-26.

- [227] 张高祥. 一种新型分液器[P]. CN202630533U. 2012-12-26.
- [228] 许成威, 刘阳, 高永胜. 一种空调器用分液器[P]. CN202547204U. 2012-11-21.
- [229] 周闪光, 岑悦, 苏守亮. 一种空调分液器[P]. CN202547206U. 2012-11-21.
- [230] 贾亚奇, 黎法运, 高永红, 等. 一种压缩机分液器的结构[P]. CN202547214U. 2012-11-21.
- [231] 张伯根. 分液器[P]. CN202478654U. 2012-10-10.
- [232] G S M, A B W. Centrifugal two-phase flow distributor[P]. U.S. Patent No. 5,059,226. 1991-10-22.
- [233] 曾奇学. 分液器[P]. CN208536458U. 2019-02-22.
- [234] G H. Handbook of multiphase systems[J]. 1982.
- [235] Y T, D B, E D A. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas - liquid flow in vertical tubes[J]. AIChE Journal. 1980, 26(3): 345-354.
- [236] Rollmann P, Spindler K. A new flow pattern map for flow boiling in microfin tubes[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2015, 72: 181-187.
- [237] 马鲁英, 张丽. 关于水平管道两相流流型判别的问题[J]. 石化技术. 2016, 23(12): 228-245.
- [238] X T, S H P. Flow and heat transfer in microchannels 30 to 300 microns in hydraulic diameter[R]. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004.
- [239] W L T, U P J. Prediction of the transition criterion to annular flow in two-phase flow pattern of refrigerants[J]. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering. 2003, 46(4): 618-624.
- [240] Ding Y, Jia L, Yin L, et al. Theoretical investigation on convective condensation annular flow of R410a inside rectangular microchannel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, 131: 698-708.
- [241] Anglart H. Progress in understanding and modelling of annular two-phase flows with heat transfer[J]. Nuclear Engineering and Design. 2019, 345: 166-182.
- [242] Lee J. Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening[J]. Nuclear Engineering and Technology. 2019, 51(2): 410-423.
- [243] Yu P, Zhu K, Sun T, et al. Heat transfer rate and uniformity of mist flow jet impingement for glass tempering[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017, 115: 368-378.
- [244] Zhong Y, Hu L, Chen D, et al. CFD simulation on the flow and heat transfer characteristics of mist flow in wire-wrapped rod bundle[J]. Nuclear Engineering and Design. 2019, 345: 62-73.

- [245] Baragh S, Shokouhmand H, Ajarostaghi S S M. Experiments on mist flow and heat transfer in a tube fitted with porous media[J]. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019, 137: 388-398.
- [246] Wang J, Cheng Y, Li X, et al. Experimental and LBM simulation study on the effect of bubbles merging on flow boiling[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 132: 1053-1061.
- [247] Liu W, Bai B. Transition from bubble flow to slug flow along the streamwise direction in a gas-liquid swirling flow[J]. *Chemical Engineering Science*. 2019, 202: 392-402.
- [248] Kang C, Zhang W, Mao N, et al. Effects of the wake flow on bubble patterns downstream of a cylindrical nozzle[J]. *Chemical Engineering Research and Design*. 2019, 145: 128-140.
- [249] Rodrigues R L P, Bertoldi D, Dos Santos E N, et al. Experimental analysis of downward liquid-gas slug flow in slightly inclined pipes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019, 103: 222-233.
- [250] Drury R, Hunt A, Brusey J. Identification of horizontal slug flow structures for application in selective cross-correlation metering[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2019, 66: 141-149.
- [251] A R, A W, O D. Experimental study on the hydrodynamic behavior of gas-liquid air-water two-phase flow near the transition to slug flow in horizontal pipes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 130: 187-203.
- [252] Abdulkadir M, Mbalisigwe U P, Zhao D, et al. Characteristics of churn and annular flows in a large diameter vertical riser[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2019, 113: 250-263.
- [253] van Nimwegen A T, Portela L M, Henkes R A W M. Modelling of upwards gas-liquid annular and churn flow with surfactants in vertical pipes[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2018, 105: 1-14.
- [254] Wang K, Ye J, Bai B. Entrained droplets in two-phase churn flow[J]. *Chemical Engineering Science*. 2017, 164: 270-278.
- [255] Liu T Y, Chan H N, Grimshaw R H J, et al. Internal rogue waves in stratified flows and the dynamics of wave packets[J]. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. 2018, 44: 449-464.
- [256] Li J, Martin J E, Carrica P M. Large-scale simulation of ship bubbly wake during a maneuver in stratified flow[J]. *Ocean Engineering*. 2019, 173: 643-658.
- [257] Ramji S, Pushpavanam S. Liquid-liquid extraction in laminar two-phase stratified

- flows in capillary microchannels[J]. *Chemical Engineering Science*. 2019, 195: 242-249.
- [258] Santos D S, Faia P M, Garcia F A P, et al. Oil/water stratified flow in a horizontal pipe: Simulated and experimental studies using EIT[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019, 174: 1179-1193.
- [259] Kattan N, Thome J R, Favrat D. Flow Boiling in Horizontal Tubes: Part 1—Development of a Diabatic Two-Phase Flow Pattern Map[J]. *Journal of Heat Transfer*. 1998, 120(1): 140.
- [260] N K. Contribution to the heat transfer analysis of substitute refrigerants in evaporator tubes with smooth or enhanced tube surfaces[D]. Verlag nicht ermittelbar, 1996.
- [261] Padovan A, Del Col D, Rossetto L. Experimental study on flow boiling of R134a and R410A in a horizontal microfin tube at high saturation temperatures[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2011, 31(17-18): 3814-3826.
- [262] Rollmann P, Spindler K, Müller-Steinhagen H. Heat transfer, pressure drop and flow patterns during flow boiling of R407C in a horizontal microfin tube[J]. *Heat and Mass Transfer*. 2011, 47(8): 951-961.
- [263] Yan Q, Jia L, An Z, et al. A comprehensive criterion for slug-annular flow transition based on flow boiling of R134a in microchannels[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019, 105: 1-9.
- [264] Li H, Hrnjak P. Flow visualization of R32 in parallel-port microchannel tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 128: 1-11.
- [265] Li X, Jia L, Dang C, et al. Visualization of R134a flow boiling in micro-channels to establish a novel bubbly-slug flow transition criterion[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018, 91: 230-244.
- [266] Gao W, Xu X, Liang X. Flow boiling of R134a in an open-cell metal foam mini-channel evaporator[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, 126: 103-115.
- [267] Nangle-Smith S, Cotton J S. A mechanistic approach to developing two phase flow pattern transition maps for two-phase dielectric fluids subject to high voltage polarization[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, 127: 1233-1247.
- [268] Wijayanta A T, Miyazaki T, Koyama S. Refrigerant distribution in horizontal headers with downward minichannel-branching conduits: Experiment, empirical correlation and two-phase flow pattern map[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017, 81: 430-444.
- [269] Wijayanta A T, Miyazaki T, Koyama S. Liquid–vapor phase distribution in

horizontal headers with upward minichannel-branching conduits[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016, 76: 264-274.

[270] S S D. Properties of cocurrent gas-liquid flow[M]. *Advances in chemical engineering*. Academic Press, 1964: 199-277.

[271] Wojtan L, Ursenbacher T, Thome J R. Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I—A new diabatic two-phase flow pattern map[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005, 48(14): 2955-2969.

[272] Dabiri S, Hashemi M, Rahimi M, et al. Design of an innovative distributor to improve flow uniformity using cylindrical obstacles in header of a fuel cell[J]. *Energy*. 2018, 152: 719-731.

[273] Han L, Duan X L, Gong R Z, et al. Physic of secondary flow phenomenon in distributor and bifurcation pipe of Pelton turbine[J]. *Renewable Energy*. 2019, 131: 159-167.

[274] Liang Y, Liu P, Zheng N, et al. Numerical investigation of heat transfer and flow characteristics of laminar flow in a tube with center-tapered wavy-tape insert[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2019, 148: 557-567.

[275] Tusar M, Ahmed K, Bhuiya M, et al. CFD study of heat transfer enhancement and fluid flow characteristics of laminar flow through tube with helical screw tape insert[J]. *Energy Procedia*. 2019, 160: 699-706.

[276] Liu X, Li C, Cao X, et al. Numerical analysis on enhanced performance of new coaxial cross twisted tapes for laminar convective heat transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, 121: 1125-1136.

[277] Rashidi S, Zade N M, Esfahani J A. Thermo-fluid performance and entropy generation analysis for a new eccentric helical screw tape insert in a 3D tube[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2017, 117: 27-37.

[278] Moghadas Zade N, Akar S, Rashidi S, et al. Thermo-hydraulic analysis for a novel eccentric helical screw tape insert in a three dimensional tube[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2017, 124: 413-421.

[279] Shukri E S. Numerical Comparison of Temperature Distribution in an Annular Diffuser Fitted with Helical Screw-Tape Hub and Pimpled Hub[J]. *Energy Procedia*. 2017, 141: 625-629.

[280] Zhang X, Liu Z, Liu W. Numerical studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube fitted with helical screw-tape without core-rod inserts[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013, 60: 490-498.

[281] Guo J, Xu M, Cheng L. Numerical investigations of circular tube fitted with helical

screw-tape inserts from the viewpoint of field synergy principle[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2010, 49(4): 410-417.

[282] Eiamsa-Ard S, Promvong P. Thermal characteristics in round tube fitted with serrated twisted tape[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2010, 30(13): 1673-1682.

[283] Rahimi M, Shabani S R, Alsairafi A A. Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2009, 48(3): 762-770.

[284] Sivashanmugam P, Suresh S. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2007, 31(4): 301-308.

[285] Eiamsa-Ard S, Promvong P. Heat transfer characteristics in a tube fitted with helical screw-tape with/without core-rod inserts[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2007, 34(2): 176-185.

[286] Sivashanmugam P, Nagarajan P K. Studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with right and left helical screw-tape inserts[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2007, 32(1): 192-197.

[287] Sivashanmugam P, Suresh S. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2007, 27(8-9): 1311-1319.

[288] Sivashanmugam P, Suresh S. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2006, 26(16): 1990-1997.

[289] K R P, K S S. Laminar flow heat transfer and pressure drop in a circular tube having wire-coil and helical screw-tape inserts[J]. *Journal of heat transfer*. 2013, 135(2): 21901.

[290] 李恒, 张琪, 曲占庆, 等. 管柱式气水旋流分离器分离率的数值模拟研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*. 2004, 19(z1): 890-895.

[291] 周帼彦, 凌祥, 涂善东. 螺旋片导流式分离器分离性能的数值模拟与试验研究[J]. *化工学报*. 2004(11): 1821-1826.

[292] 周帼彦. 螺旋片导流式分离器气液两相流的数值模拟与试验研究[D]. 南京工业大学, 2003.

[293] 刘雯, 程小莉, 陈勇, 等. 管内螺旋导流板引发的气液两相旋流场[J]. *机械工程学报*. 2013, 49(22): 164-169.

[294] Sharifi K, Sabeti M, Rafiei M, et al. Computational fluid dynamics (CFD) technique

to study the effects of helical wire inserts on heat transfer and pressure drop in a double pipe heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering. 2018, 128: 898-910.

[295] 梁法春, 方召君, 郑洪峰, 等. 一种气液两相流计量装置和方法[P]. CN105222831A. 2016-01-06.

[296] 刘大有. 两相速度平衡条件下的两相流声速[J]. 力学学报. 1990(06): 660-669.

[297] Liang F, Song L, Sun Y. An experimental investigation of phase separation of gas-liquid two-phase flow through a small break[J]. Chemical Engineering Research and Design. 2015, 102: 161-170.

[298] Liang F, Sun Y, Fang Z, et al. Application of multi-slot sampling method for gas-liquid two-phase flow rate measurement[J]. Experimental Thermal and Fluid Science. 2016, 79: 213-221.

[299] Liang F, Wang D, Chen J, et al. Gas-liquid two-phase flow sampling measurement using a swirl sampler[J]. Flow Measurement and Instrumentation. 2013, 33: 145-152.

[300] Liang F, Chen J, Wang J, et al. Gas-liquid two-phase flow equal division using a swirling flow distributor[J]. Experimental Thermal and Fluid Science. 2014, 59: 43-50.

[301] Gupta B, Nayak A K, Kandar T K, et al. Investigation of air-water two phase flow through a venturi[J]. Experimental Thermal and Fluid Science. 2016, 70: 148-154.

[302] Falcone N, Bersano A, Bertani C, et al. Characterization of water-air dispersed two phase flow[J]. Energy Procedia. 2017, 126: 66-73.

[303] Chalgeri V S, Jeong J H. Flow patterns of vertically upward and downward air-water two-phase flow in a narrow rectangular channel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, 128: 934-953.

[304] Kong R, Kim S. Characterization of horizontal air-water two-phase flow[J]. Nuclear Engineering and Design. 2017, 312: 266-276.

[305] 仇嘉, 魏文建, 张绍志, 等. 基于 CFD 数值模拟的板式换热器分配器性能研究[J]. 机械工程学报. 2010, 46(14): 130-137.

指导教师意见

同意本课题进入设计（论文）阶段。

指导教师签字： 年 月 日

致 谢

毕业论文在天津商业大学机械工程学院孙志利老师的指导下完成。

己亥之年，丁酉之月，余临毕业，时近月余，有感于师长效教之恩，是以为情造文，铭而致谢。时光飞逝，岁月无声。四年生涯已然接近尾声，仿佛一切未曾觉醒；昔日得失不足为念，终将成为亲切的回忆；尽管追求真理的道路举步维艰，但我依然乘风破浪，砥砺前行。

举世不师，故道益离，三年有余，作者于本科期间之所以能行远自迩，离不开导师那悉心之指导，倾心之传教。导师严谨之治学作风、敏锐之洞察力、深邃之热力学思想无时不让人醍醐灌顶。是其为予开启学术之门、点燃科研之火花、照亮前进之方向。饮水者不可不知其源，施惠者不可不感其恩，吾累受导师之教育之恩，没齿难忘。导师一路相伴，助吾前行，得以使本文顺利完成。在论文完成之际，谨向恩师致以衷心的感谢和崇高的敬意。成为您关门弟子是吾莫大之荣幸，愿您今后工作顺利，生活幸福！

诸位同学鼎力相助在吾脑际留下永恒。感谢苏丹丹、原梦雪、焦峰、朱继阳、王彩云、崔奇等各位同门并肩作战，感谢王霄杰、徐玉状、徐军鹏等至交排忧解难，四年里，皆为君为予栽一架秋千，荡起无数快乐；皆为君为予植一棵绿树，撒下无数惬意。我亦高兴，亦悲伤。终将我们会离开天商，走向未知的远方。

感谢父母、亲戚和女友将心比心，是您们的理解和支持使我在校完成我的学业，勉励我以梦为马，不负韶华。离别之际，时光穿梭，记忆回流。洗尽铅华，吾仍乃纯真的追梦少年、懵懂的求学书郎。抬望眼，国家时代在召唤，士不可以不弘毅；伏木案，明德济世求真知，励志笃学不言弃！

王启帆

2019年6月于天津商业大学