

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107854

# 低温制冷系统两级喷射器设计与性能分析\*

宋亚杰,王新立,王雷

(山东大学控制科学与工程学院 济南 250061)

**摘要:**本文提出了一种用于渔船低温制冷系统的两级喷射器,并对其进行了优化设计和性能分析。为达到最大引射性能,提出了基于流场参数匹配的两级喷射器优化设计方法,使用计算流体力学仿真软件对两级喷射器进行了建模和参数优化。此外,采用了水冷式冷凝器来减小冷凝器与蒸发器之间的压差,从而获得了更高的引射比。研究表明,所设计的两级喷射器可使蒸发温度低至 248.15 K,第一级和第二级喷射器最优面积比分别为 11.8 和 6.5。中间压力在 253~324 kPa 之间,引射比先增加后减小,在中间压力为 304 kPa 时达到最大值 0.096,此时系统能效比达到 0.074。可以认为,采用优化设计的两级喷射器和水冷式冷凝器,利用渔船余热驱动的低温制冷系统具有较好的节能效果。

**关键词:**两级喷射器;流场匹配;计算流体力学;参数优化

**中图分类号:** TH36 TB61<sup>+</sup>7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

## Design and performance analysis of two-stage ejector for the subzero refrigeration system

Song Yajie, Wang Xinli, Wang Lei

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** In this article, a two-stage ejector for the subzero refrigeration system of fishing vessels is proposed, and the optimization design and performance analysis are studied. A two-stage ejector optimization design method based on the flow field parameter matching is proposed to achieve maximum entrainment performance. The computational fluid dynamics (CFD) method is adopted for the ejector modeling and parameter optimization. In addition, the water-cooled condenser is employed to reduce the pressure difference between condenser and evaporator. In this way, the higher entrainment ratio can be achieved. Simulation results show that the proposed two-stage ejector can achieve evaporating temperature as low as 248.15 K and the optimal area ratios of first and second stage ejector are 11.8 and 6.5, respectively. As the intermediate pressure increased from 253 to 324 kPa, the entrainment ratio rises firstly and then decreases. It reaches a maximum value of 0.096 when the intermediate pressure is 304 kPa, with the coefficient of performance reaching 0.074. It can conclude that it is energy efficient to utilize the waste heat from fishing vessels to drive the subzero refrigeration system with the optimal designed two-stage ejector and a water-cooled condenser.

**Keywords:** two-stage ejector; flow field matching; computational fluid dynamics; parameter optimization

## 0 引言

渔船每年消耗的燃油费用已经达到渔业总成本的 70%,同时还会排放大量的温室气体。除了维持柴油发动机的运行,对收获的水产品进行冷冻保鲜也消耗了大量的能源。此外,柴油发动机的能源效率大约只有 35~40%,一半以上的能量通过冷却水和高温废气排放到环

境<sup>[1]</sup>。利用废热来驱动低温制冷系统,可以减少燃料的消耗,是一种有效的节能方法,具有广阔应用前景<sup>[2]</sup>。现在利用渔船余热驱动的制冷系统主要有 3 种类型,即吸收式制冷、吸附式制冷和喷射式制冷<sup>[3-6]</sup>。其中,喷射式制冷系统结构简单、稳定性好、对舰船摆动不敏感,更有研究意义和使用价值<sup>[7-9]</sup>。

利用太阳能、工业废热等低品位能源驱动的喷射式制冷系统是一种节能环保制冷系统<sup>[10-12]</sup>。与吸附式制冷

系统相比,喷射式制冷系统热效率较高,但系统能效比(coefficient of performance, COP)较低,限制了其在制冷领域的广泛应用。喷射器是喷射式制冷系统的重要组成部分,其引射能力对整个制冷系统的性能有重要影响。

为了提高喷射器的性能和喷射式制冷系统的能源利用效率,国内外研究人员开展了很多关于喷射器建模和几何参数优化的研究<sup>[13-16]</sup>。Huang等<sup>[17]</sup>建立了基于恒压混合假设的分析模型,可以准确预测喷射器的工作状态。随着计算机技术的快速发展,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)广泛用于喷射器流场分析和参数优化设计<sup>[18-21]</sup>。Yan等<sup>[22-23]</sup>通过CFD仿真技术和实验研究了喷射器几何参数对其引射性能的影响。研究表明,喷射器的喷嘴出口位置(nozzle exit position, NXP)和面积比(混合室与喷嘴截面积之比, area ratio, Ar)是影响其引射性能的两个关键参数。此外,对系统进行优化和设计新型喷射式制冷系统是提高COP的另一种途径<sup>[24]</sup>。Sokolov等<sup>[25]</sup>提出一种双喷射器制冷系统,即在冷凝器前平行放置两个独立的喷射器,可以在更宽的冷凝温度范围内保持系统最佳运行状态。陶帅等<sup>[26]</sup>提出一种双温太阳能双级喷射式制冷空调系统,与常规喷射式制冷系统相比,系统效率和性能更高。Yan等<sup>[27]</sup>和Li等<sup>[28]</sup>提出了一种用于多蒸发器制冷系统的带有辅助引射入口的新型喷射器,相比传统喷射器可以有效提高喷射器的性能。

此外,冷凝器与蒸发器之间的压力差也是影响喷射式制冷系统性能的关键参数。制冷系统中使用水冷式冷凝器时,其冷凝压力明显低于风冷式冷凝器,所以使用水冷式冷凝器可以减小蒸发器与冷凝器之间的压差,有效提高喷射器的引射性能。Dong等<sup>[29]</sup>搭建了喷射式制冷系统试验台,通过实验研究发现相比空气冷冷凝器,水冷冷凝器可显著提高喷射式制冷系统能效比。Yan等<sup>[30]</sup>研究了多种操作条件对带有水冷式冷凝器的喷射式制冷系统性能的影响。实验结果表明喷射器出口压力是影响其引射能力的关键参数,采用水冷式冷凝器降低喷射器出口压力,可以有效提高喷射式制冷系统的性能。Ws等<sup>[31]</sup>研究了海水冷却温度对喷射器制冷性能的影响,结果表明冷却水温度升高1 K,冷凝压力将会增加10%。一般,海水平均温度大约293.15~303.15 K,可以作为天然的理想低温冷却源。

目前国内外对喷射式低温制冷系统的研究,蒸发温度大多在0℃以上。然而,当蒸发温度降低之后,蒸发器和冷凝器之间的压差变大(喷射器的二次流和出口压力)。由于单个喷射器的增压能力有限,传统的单级喷射器可能工作在次临界或者回流模式,导致传统喷射式制冷系统的效率很低甚至不能工作。因此,可以使用喷射器串联来提高增压能力,进而满足低温制冷需求。Ding

等<sup>[32]</sup>设计了一种用于低温制冷系统的两级喷射器,可使制冷温度达到251.15 K,表明两级喷射器用于低温制冷的可行性。Yan等<sup>[33]</sup>设计了一种用于三蒸发器制冷系统的两级喷射器,并研究了混合室长度、面积比等关键几何参数对其性能的影响。结果表明面积比对其性能影响最大。薛浩渊等<sup>[34]</sup>设计了两级真空喷射器,用于提高喷射器内部真空度,与传统单级喷射器相比,性能可以大幅提升。Yan等<sup>[35]</sup>和蔡青峰等<sup>[36]</sup>提出了一种用于多蒸发器制冷系统的两级喷射器,研究了第二级喷射器喷嘴直径变化时,喷射器的面积比、喷嘴出口位置和等压混合室角度对两级喷射器性能的影响。

以上两级喷射器的设计没有考虑两级喷射器之间的参数耦合,难以得到喷射器的最优几何参数。本文针对两级喷射器各级之间参数耦合问题,通过分析喷射器内部流场,提出一种基于流场参数匹配的两级喷射器参数优化设计方法,以中间压力(intermediate pressures,  $P_{inter}$ )作为第一级和第二级喷射器的关联变量,喷射器的面积比、喷嘴出口位置为优化参数,利用CFD方法对两级喷射器进行性能研究和优化设计,获得最优的引射性能和更低的制冷温度,进而提高低温制冷系统的能源利用效率。

## 1 喷射器模型及两级喷射器低温制冷系统原理

传统喷射器的结构如图1所示,主要包括5部分:喷嘴、吸入室、等压混合室、等面积混合室和扩散室。高压的一次流通过收缩-膨胀喷嘴时速度迅速上升达到超音速,同时压力下降,形成局部负压区。高速的一次流将低压二次流吸入混合室,两股流体在混合室中不断混合,最后在扩散室中完全混合并喷出。

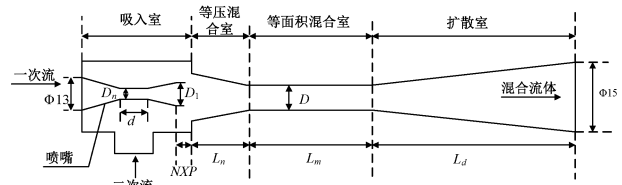


图1 传统喷射器结构图

Fig. 1 Structure diagram of the conventional ejector

一次流和二次流压力恒定时,喷射器的引射比随背压的变化趋势如图2所示。喷射器的工作模式可分为3种:临界模式、次临界模式和回流模式。当背压低于临界背压 $P_{c0}$ 时,喷射器在临界模式下高效工作,此时引射比保持恒定的最大值。当背压略高于 $P_{c0}$ 时,喷射器工作在次临界状态,引射比迅速下降。当背压继续增加时,

喷射器工作在回流模式,流体回流到吸入室,无法正常工作。因此,应将喷射器设计在临界模式下工作,以保持最优引射性能。

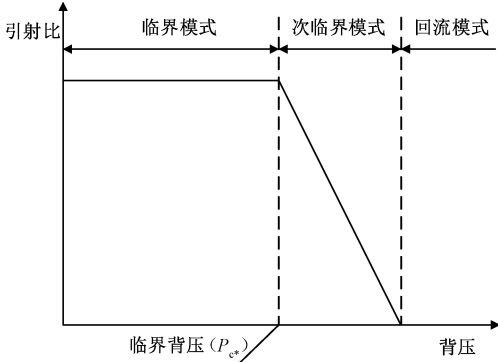


图2 喷射器工作模式图

Fig. 2 Diagram of the ejector operation mode

在喷射式低温制冷系统中,蒸发温度越低,冷凝器与蒸发器之间的压差越高。此时,单级喷射器可能工作在回流状态,失去升压能力。因此,为满足渔船低温冷冻的需求,本文提出并设计了两级喷射器,用于提升高压差下的引射能力,两级喷射器的结构如图3所示。本文采用Yan等<sup>[22]</sup>设计的二维(2D)喷射器模型作为第一级喷射器和第二级喷射器的初始结构。初始喷射器关键几何参数如表1所示。

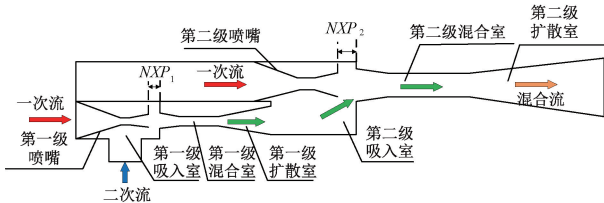


图3 两级喷射器结构图

Fig. 3 Structure diagram of the two-stage ejector

表1 初始喷射器的几何结构参数

Table 1 Geometric values of the baseline ejector

参数	数值	参数	数值
喷嘴扩散长度/m	0.038	面积比	4.40
等面积混合室直径/m	0.055	等面积混合室长度/m	0.23
喷嘴出口直径/m	0.033	等压混合室长度/m	0.14
喷嘴直径/m	0.026	扩散室长度/m	0.72
喷嘴出口位置/m	-0.006 1	—	—

1.1 两级喷射器低温制冷系统工作原理

降低冷凝压力也是提高系统效率的有效途径。在渔船上,与空气相比,293.15~303.15 K的海水可作为理想的冷却剂。低温冷却剂的传热过程更好,冷凝压力更低。

因此,本文在喷射式低温制冷系统中采用了水冷式冷凝器。水冷式和风冷式两级喷射器制冷系统的原理如图4所示。带有风冷式冷凝器和水冷式冷凝器的两种制冷系统的压-焓图如图5所示。高压制冷剂在发生器中加热(对应于 $g \rightarrow a$ 点,压力不变,焓值增加)。然后进入喷射器,以超音速通过喷嘴喉部,在喷嘴出口形成低压区域,从蒸发器中吸入制冷剂。两股流体在喷射器中混合,伴随着势能转换成流体的动能,并从喷射器出口处流出(一次流对应 $a \rightarrow c$ 点,压力减小,焓值增加;二次流对应 $f \rightarrow b \rightarrow c$ 点,压力升高,焓值增加)。混合制冷剂进入冷凝器中冷却(对应 $c \rightarrow d$ 点,压力不变,焓值减小),然后通过泵回到发生器(对应 $d \rightarrow g$ 点,压力升高),部分混合制冷剂通过膨胀阀进入蒸发器完成循环(对应 $d \rightarrow e \rightarrow f$ 点)。由于采用水冷式冷凝器,可使制冷剂的冷凝压力降低,所以水冷式制冷系统中喷射器的背压低于风冷式制冷系统,即 $P_{c1}$ 小于 $P_e$ ,同时,喷射器背压降低可以在保持喷射器性能的前提下使二次流压力降低,即 $P_{b1} < P_b$ 。

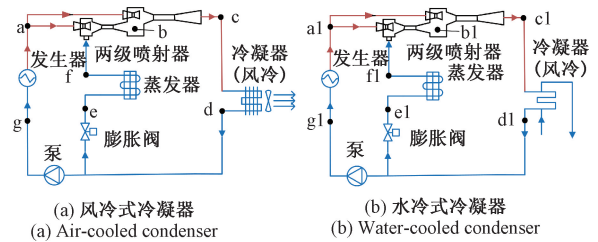


图4 两级喷射器低温制冷系统原理

Fig. 4 Schematic diagram of the two-stage ejector subzero refrigeration system

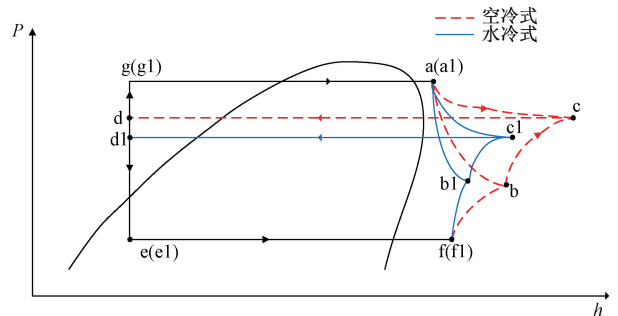


图5 风冷和水冷式冷凝器的两级喷射式低温制冷系统压-焓图

Fig. 5 P-h diagrams of the two-stage ejector-based subzero refrigeration system with air-cooled and water-cooled condensers

1.2 流体力学流场分析

在计算喷射器内部流场时,做出如下假设:内部流场稳定;内部流体过热且无冷凝;喷射器壁面是绝热的,并且膨胀过程是等熵过程<sup>[32]</sup>。基于以上假设的喷射器求

解方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(u_i(\rho E + P))}{\partial x_i} = \vec{\nabla} \cdot \left( \alpha_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j(\tau_{ij}) \right) \quad (3)$$

其中,  $\tau_{ij}$  是应力张量, 用式(4)表示:

$$\tau_{ij} = \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4)$$

其中,  $\alpha_{\text{eff}}$ 、 $\mu_{\text{eff}}$  和  $\delta_{ij}$  分别是有效导热系数, 有效动态粘度和克罗内克函数。

引射比是喷射器制冷能力的常用指标, 可用式(5)表示:

$$Er = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (5)$$

其中,  $\dot{m}_s$  和  $\dot{m}_p$  分别是二次流和一次流质量流量。

本文提出的两级喷射器的整体引射比( $Er_0$ )可以由第一级和第二级喷射器的引射比( $Er_1$  和  $Er_2$ )确定, 计算公式如下:

$$\dot{m}_p = \dot{m}_{p,1} + \dot{m}_{p,2} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{\text{out}} = \dot{m}_p + \dot{m}_s \quad (7)$$

$$Er_1 = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_{p,1}} \quad (8)$$

$$Er_2 = \frac{\dot{m}_{p,1} + \dot{m}_s}{\dot{m}_{p,2}} \quad (9)$$

$$Er_0 = \frac{Er_1 \times Er_2}{1 + Er_1 + Er_2} \quad (10)$$

其中,  $\dot{m}_{p,1}$  和  $\dot{m}_{p,2}$  分别是第一级和第二级喷射器的一次流质量流量。

此外, 本文中所提出的两级喷射式低温制冷系统的 COP 可由式(11)定义:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\dot{Q}_{\text{gen}}} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = \dot{m}_{\text{evap}} (\dot{h}_f - \dot{h}_e) \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{\text{gen}} = \dot{m}_{\text{gen}} (\dot{h}_a - \dot{h}_g) \quad (13)$$

其中,  $\dot{Q}_{\text{evap}}$  和  $\dot{Q}_{\text{gen}}$  分别是蒸发器和发生器的换热速率;  $\dot{m}_{\text{evap}}$  和  $\dot{m}_{\text{gen}}$  分别是蒸发器和发生器的质量流量;  $\dot{h}_e$  和  $\dot{h}_f$  分别是蒸发器的进口和出口的焓值;  $\dot{h}_g$  和  $\dot{h}_a$  分别是发生器进口和出口的焓值。

### 1.3 CFD 模型建立与仿真设置

利用 Gambit 2.4.6 作为网格生成器建立 CFD 模型, FLUENT 15.0 作为 CFD 求解器进行仿真分析。模型一共生成了大约 200 000 个四边形网格, 如图 6 所示。经分析和验证, 该数量的网格可以在保证仿真精度的同时降低对计算资源的消耗, 减少仿真时间。

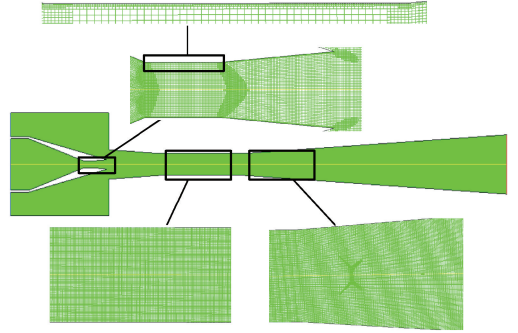


图6 喷射器模型的网格结构

Fig. 6 The grids of the ejector model

在 CFD 仿真时, 湍流模型的选择对计算结果的影响很大, 重整化群 (renormalization-group, RNG)  $k-\varepsilon$  模型常被用来求解喷射器内部流场, 其准确性已经被实验验证<sup>[37-38]</sup>。数值计算选择 SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) 算法和标准壁面函数。制冷剂使用 R134a, 设置为理想气体。喷射器一次流和二次流入口设置为“pressure inlet”, 出口设置为“pressure outlet”, 边界条件如表 2 所示。其中一次流制冷剂设置为过热状态。仿真的收敛条件为各方程残差均小于  $10^{-6}$ , 且计算出的入口和出口的质量流量满足质量守恒方程。

表 2 两级喷射器的边界条件

Table 2 Boundary conditions of the two-stage ejector

边界名称	压力/kPa	温度/K
一次流	2 633	361.15
二次流	106	248.15
出口	665	298.15

### 1.4 网格无关性验证

为了证明仿真结果与网格数量的无关性, 在相同的边界条件下 (一次流压力: 2 633 kPa, 二次流压力: 106 kPa 和中间压力: 324 kPa) 对网格数量分别为 118 636 的粗网格, 209 123 的中等网格, 327 373 的精细网格和 381 955 的超精细网格进行了仿真测试。4 个不同网格模型的喷射器轴向压力分布如图 7 所示, 可以看出, 中等和精细网格的曲线趋势几乎相同。同时, 比较了不同网格的喷射器进出口质量流量和引射比, 比较结果

如表3所示。其中误差( $\varphi$ )表示不同网格模型的引射比计算结果相对误差。从表3中可以看出,随着网格数的增加,计算结果越来越接近。中等和精细网格的引射比计算误差为1.608%,精细网格和超精细网格的引射比计算误差为1.672%。从计算结果可以看出中等网格可以满足CFD仿真的准确性,而且增加网格数量会使计算时间增加。因此,综合考虑仿真结果的精确性和计算资源的经济性,为节省计算时间,本文选用209 123网格数的模型进行后面的分析。

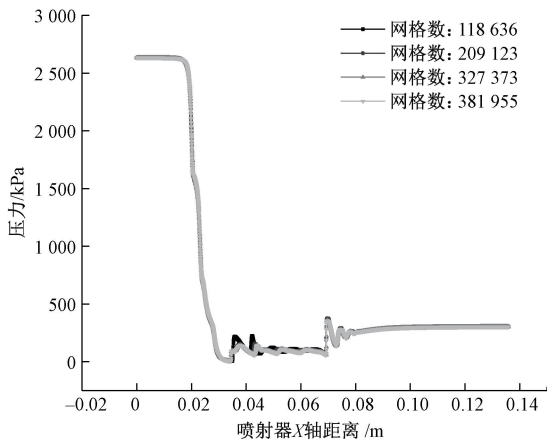


图7 不同网格数的轴向压力分布

Fig. 7 Pressure distribution of axial pressure with different grid levels

表3 不同网格模型的计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation results under different grid levels

网格数	$\dot{m}_p / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$\dot{m}_s / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$Er$	$\varphi / \%$
118 636	0.022 3	0.006 4	0.287 0	-
209 123	0.022 3	0.006 1	0.273 5	4.703
327 373	0.022 3	0.006 0	0.269 1	1.608
381 955	0.022 3	0.005 9	0.264 6	1.672

### 1.5 CFD仿真模型验证

为了验证所建立的喷射器CFD仿真模型的准确性,设计并搭建了引射器测试平台,由蒸发器,发生器,冷凝器以及泵组成。实验流程如下,高压制冷剂在发生器中加热后进入喷射器,在喷嘴出口处形成低压区域,从蒸发器中吸入制冷剂。两股流体在喷射器中混合,从出口处流出。混合制冷剂进入冷凝器中冷却,然后由泵回到发生器,部分混合制冷剂进入蒸发器完成循环。

实验和仿真计算得到的引射比如图8所示。从图中可以看出,仿真计算值与实验值的相对误差在10%以下。

因此,本文建立的CFD仿真模型能够准确预测喷射器的引射性能,用于后续的喷射器参数优化和性能分析是可接受的。

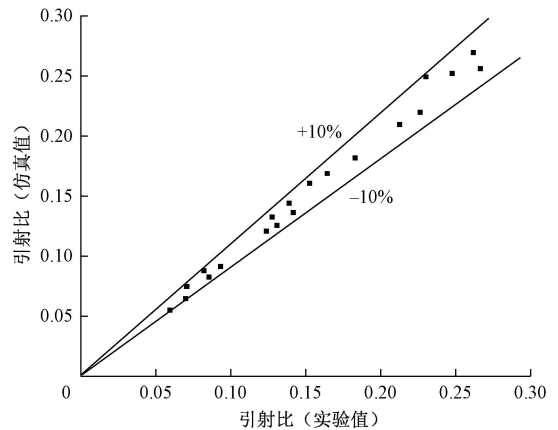


图8 仿真计算与实验得到的引射比对比结果

Fig. 8 Comparison results of entrainment ratio between simulation and experiment

### 1.6 两级喷射器优化设计流程

两级喷射器的引射比和升压能力是影响喷射式低温制冷系统性能的两个关键参数。由于两级喷射器之间存在耦合关系,单独对每级喷射器优化设计,无法实现两级喷射器整体性能的优化。因此,本文提出以中间压力为匹配参数的两级喷射器优化方法。优化流程如下,首先根据发生器和冷凝器的容量、渔船的制冷需求确定工况参数(一次流、二次流和出口压力温度等)。然后,初始化中间压力,即连接第一级扩散室和第二级吸入室的腔室压力(如图3所示)。将中间压力作为第一级喷射器的背压,固定一次流和二次流工况参数,利用所建立的CFD模型对 $Ar_1$ 和 $NXP_1$ 进行优化,得到最优 $Er_1$ 。根据第一级喷射器的仿真结果,可以得到第二级喷射器的二次流温度。然后,根据中间压力和中间温度,通过调节 $Ar_2$ 和 $NXP_2$ 来优化第二级喷射器,使 $Er_2$ 达到最大,从而确定整体最优引射比 $Er_0$ 。

## 2 结果分析

### 2.1 喷射器内部流场分析

单级喷射器内部流体的压力分布如图9所示,边界条件为:一次流压力2 633 kPa,二次流压力106 kPa,出口压力324 kPa。由图9可以看出,高压的一次流通过喷嘴时压力急剧减小,并在喷嘴出口形成一个低压区。由于喷嘴出口压力低于二次流压力,一次流通过剪切作用挟带二次流进入混合室。两股流体在混合室内不断混合,两者压力逐渐趋于一致,最后一起进入扩散室。在扩

散室内流体动能不断转化为势能,两股流体压力升高,最终达到 324 kPa 的出口压力。

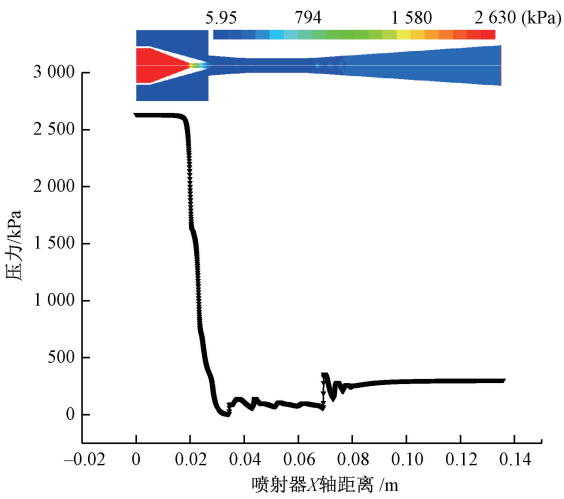


图 9 喷射器内部压力分布云图和 X 轴压力分布  
Fig. 9 Contours of pressure and pressure distribution of axial static pressure

相同边界条件下的喷射器内部速度和温度分布如图 10 和 11 所示。由图 10 可以看出,喷射器内部的速度分布与压力分布相反。一次流在喷嘴内速度迅速上升,将压力势能转化为流体动能。在喷嘴出口处压力达到最低,速度达到最大。一次流和二次流在混合管中逐渐混合均匀,其中高速的一次流速度不断下降,二次流速度不断上升,最终在扩散室内趋于一致。由图 11 可以看出,喷射器内部高温的一次流经过喷嘴时温度迅速下降,与速度场相对应,速度最大时温度最低,一次流和二次流混合过程中温度逐渐上升。从速度和温度云图中可以看出在喷嘴出口、等压混合室内和扩散室入口处形成激波,压缩喷射器内部流体,使压力迅速下降,而速度迅速上升,温度最低的地方激波最明显。激波的位置和个数对喷射器引射性能影响很大。

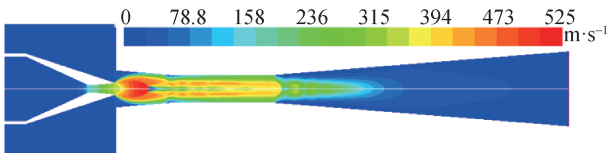


图 10 喷射器内部流场速度云图  
Fig. 10 Contours of velocity inside the ejector

### 2.2 喷射器内部流场匹配

不同中间压力下对应最优面积比的第一级喷射器内部流体马赫数云图分布如图 12 所示。对于第一级喷射器,最优面积比确定的情况下,中间压力越小,表示出口背压减小,喷射器二次流与背压之间的压差减小,从而提

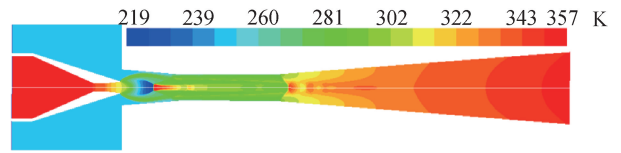


图 11 喷射器内部流场温度云图  
Fig. 11 Contours of temperature inside the ejector

高引射性能。由图 12 可以看出,中间压力越大,喷射器内部激波从扩散室入口向喷嘴出口处移动,并且激波个数变少,内部压力、温度波动特性变缓,能量转换过程变弱,导致引射性能下降。与此同时,中间压力越大,一次流与二次流完全混合的位置在扩散室中向出口偏移。因此,对于第一级喷射器,应该使中间压力尽量低,从而提高引射性能。

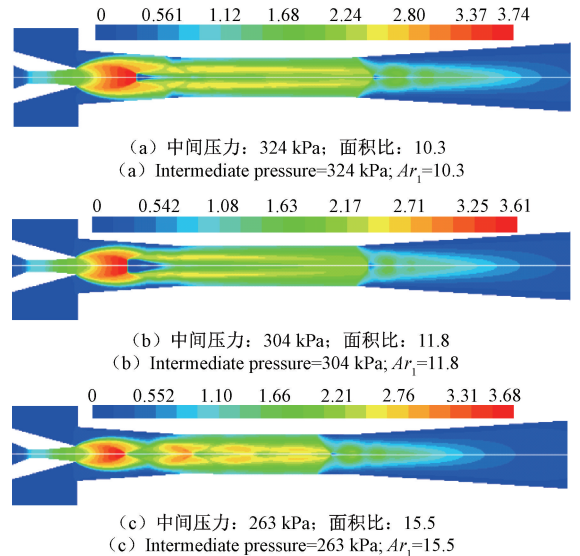


图 12 不同中间压力对应最优面积比的第一级喷射器内部流场马赫数云图  
Fig. 12 Contours of Mach number of the first stage ejector with optimal  $Ar_1$  under different  $P_{inter}$

根据第一级喷射器的仿真结果,可以得到第二级喷射器二次流的压力、温度等参数。不同中间压力下对应最优面积比的第二级喷射器内部流体马赫数云图分布如图 13 示。对于第二级喷射器,当最优面积比确定时,中间压力越大,表示二次流压力变大,二次流与背压之间的压差减小,从而提高引射性能。由图 13 可以看出,与第一级喷射器相反,随着中间压力的增大,第二级喷射器内部激波位置从喷嘴出口向扩散室入口处移动,且激波个数变多,内部压力、温度波动特性变强,能量转换过程强烈。因此,对于第二级喷射器,应使中间压力尽量高,从而提高引射性能。

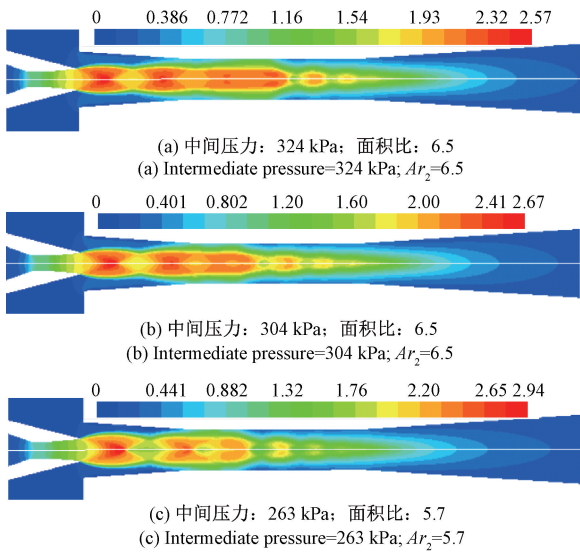


图 13 不同中间压力对应最优面积比的第二级喷射器内部流场马赫数云图

Fig. 13 Contours of Mach number of the second stage ejector with optimal  $Ar_2$  under different  $P_{inter}$

综上所述,中间压力作为第一级和第二级喷射器的匹配参数,对其内部流场分布和引射能力的影响很大。基于以上流场匹配分析结果,本文以中间压力和温度为两级喷射器匹配参数对其进行优化设计。综合考虑中间压力对第一级和第二级喷射器的影响,其范围设置为 253~324 kPa。

### 2.3 两级喷射器优化设计

根据提出的两级喷射器优化方法,基于流场参数和流场匹配分析结果,以中间压力为两级喷射器的关联变量,以面积比和喷嘴出口位置为优化参数,对第一级和第二级喷射器进行优化设计。第一级和第二级喷射器在不同中间压力下的最优引射比变化情况如图 14 所示。对于第一级喷射器,中间压力的增加,说明出口背压上升,导致第一级喷射器的引射比随中间压力增加而减小。与第一级喷射器不同,中间压力作为第二级喷射器的二次流压力,其升高可以减小小喷射器二次流与背压(冷凝压力)之间的压差,提高引射能力,从而使第二级喷射器的引射比随中间压力的增加而变大。

在对两级喷射器分别设计的基础上,通过选择各自的最优引射比,根据式(10),可计算出不同中间压力下的整体引射比( $Er_0$ ),如图 15 所示。由图 15 可以看出,两级喷射器的  $Er_0$  随中间压力的增大先增大后减小。中间压力为 304 kPa 时, $Er_0$  达到最大值 0.096。此时,第一级和第二级喷射器的最优面积比分别为 11.8 和 6.5。然而,在上述中间压力(304 kPa)时,两级喷射器的各自引射性能均未达到最优,这说明对两级喷射器进行整体设

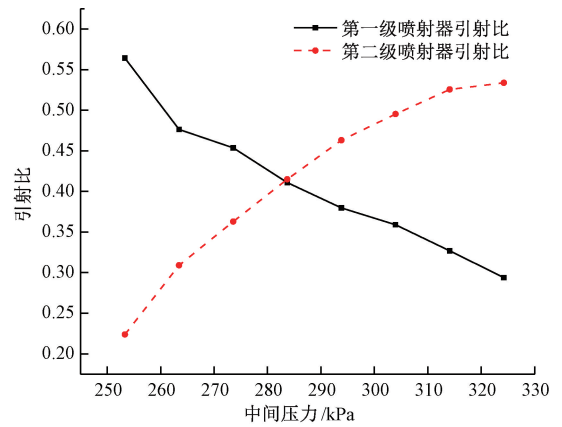


图 14 不同中间压力下的第一级、第二级引射比  
Fig. 14  $Er_1, Er_2$  of two-stage ejector under different  $P_{inter}$

计的必要性,也说明了中间压力对整体性能的影响。通过与中间压力为 253 kPa 时的引射比相比较,优化后的两级喷射器的  $Er_0$  从 0.072 提高到 0.096,提高了 33.33%,表明采用基于流场参数匹配的设计方法可以使两级喷射器具有更好的引射性能。

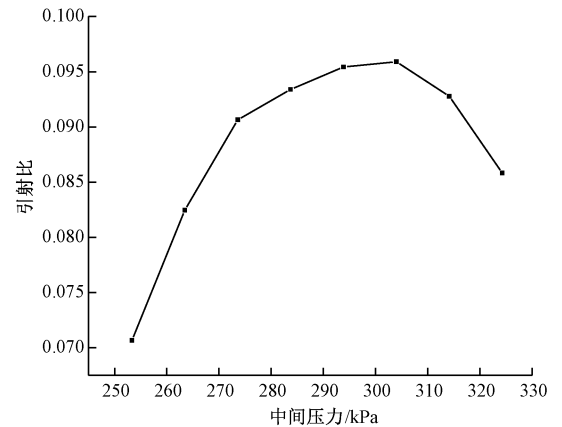


图 15 两级喷射器在不同中间压力下的整体引射比  
Fig. 15  $Er_0$  of two-stage ejector under different  $P_{inter}$

### 2.4 性能对比

为表明本文设计的两级喷射器的性能优势,本节将设计的两级喷射器与前人研究结果开展对比研究。前人基于质量流量匹配,未考虑压力、温度等流场参数耦合问题,设计了一种用于渔船空冷式冷凝器低温制冷系统的两级喷射器。研究表明,在空冷冷凝器蒸发温度为 255.15 K 时,两级喷射器的  $Er_0$  可达到 0.081,而在蒸发温度为 251.15 K 时,由于增压的需求,两级喷射器的  $Er_0$  下降到 0.073<sup>[32]</sup>。采用水冷式冷凝器结合本文提出的基于流场参数匹配的优化设计方法,设计的两级喷射器蒸发温度可低至 248.15 K,引射比可达到 0.096,比空冷式冷凝器系统提高了 31.51%。优化后的两级喷射式低温

制冷系统的 COP 可达到 0.074,比空冷式冷凝器系统提高 29.82%,表明该方法设计的两级喷射器制冷性能更好,比较结果如表 4 所示。

表 4 两种不同类型冷凝器的低温制冷系统性能对比

Table 4 Performance comparison of subzero refrigeration system with two types of condensers

性能指标名称	单喷射器 制冷系统	两级喷射器制冷系统		
		空冷式	水冷式	提高百分比
蒸发温度	达不到零下	251.15 K	248.15 K	-
引射比	-	0.073	0.096	31.51%
系统能效比(COP)	-	0.057	0.074	29.82%

### 3 结 论

本文针对两级喷射器各级之间参数耦合问题,通过分析喷射器内部流场,提出了基于流场参数匹配的优化设计方法。通过建立 CFD 仿真模型,开展了两级喷射器整体优化设计和性能研究,分析了两级喷射器在实际工作条件下的引射性能。以两级喷射器的中间压力作为关联变量,通过优化各级喷射器的面积比和喷嘴出口位置两个关键几何参数,使两级喷射器的整体引射比达到最大。研究结果表明:

1) 中间压力作为第一级和第二级喷射器的关联变量,对两级喷射器的引射性能影响很大;

2) 通过调整面积比,在不同中间压力时,可以使各级喷射器在临界模式下工作,达到最佳性能。在中间压力为 304 kPa 时,整体引射性能达到最优,此时第一级和第二级喷射器的面积比分别为 11.8 和 6.5;

3) 采用提出的基于流场参数匹配的两级喷射器优化方法,可以有效提升喷射器性能。优化后的两级喷射器的引射比可达到 0.096,相比于之前基于质量流量匹配优化的两级喷射器提高了 31.51%,系统能效比达到 0.074,提高了 29.82%。说明设计的两级喷射器可以有效提高渔船低温制冷系统能源利用率。

### 参考文献

[ 1 ] 林中顶. 关于我国渔船轮机节能研究[J]. 中国水运, 2016(11): 62.  
LIN ZH D. Research on energy conservation of China's fishing boat turbine [ J ]. China Water Transport, 2016(11): 62.

[ 2 ] CHENG X, YIN Y, GUO Y, et al. Experimental study on a novel air conditioning system for deep cascade utilization of waste heat [ J ]. Applied Thermal

Engineering, 2022, 200: 117695.

[ 3 ] BENCHARIF M, NESREDDINE H, PEREZ S C, et al. The benefit of droplet injection on the performance of an ejector refrigeration cycle working with R245fa [ J ]. International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid, 2020, 113: 276-287.

[ 4 ] LIANG X, ZHOU S, DENG J J, et al. Thermodynamic analysis of a novel combined double ejector-absorption refrigeration system using ammonia/salt working pairs without mechanical pumps [ J ]. Energy, 2019, 185: 895-909.

[ 5 ] 陈少杰, 陈光明. 渔船动力余热制冷技术[J]. 制冷学报, 2014, 35(6): 28-34.  
CHEN SH J, CHEN G M. Refrigeration technology of fishing boat power waste heat [ J ]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(6): 28-34.

[ 6 ] ANIL K, ANISH M. Thermodynamic analysis of novel ejector-assisted vapour absorption-resorption refrigeration systems[J]. Energy, 2022, 244(PB):123154.

[ 7 ] XU X G, LI Y S, YANG S Y, et al. A review of fishing vessel refrigeration systems driven by exhaust heat from engines[J]. Applied Energy, 2017, 203: 657-676.

[ 8 ] CHEN G, SUN X, XUAN Y, et al. Review of ejector research and applications in refrigeration[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(3): 1-18.

[ 9 ] GIORGIO B, LORENZO C, PAOLO B, et al. Ejector refrigeration: Perspectives and comparative analysis[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2116(1): 012090.

[ 10 ] LI S Y, YAN J, LIU Z, et al. Optimization on crucial ejector geometries in a multi-evaporator refrigeration system for tropical region refrigerated trucks[J]. Energy, 2019, 189: 116347.

[ 11 ] VAN NGUYEN V, VARGA S, SOARES J, et al. Applying a variable geometry ejector in a solar ejector refrigeration system [ J ]. International Journal of Refrigeration, 2020, 113: 187-195.

[ 12 ] MANUEL L J, JOSÉ G, VICENTE D, et al. Optimization of the thermal storage system in a solar-driven refrigeration system equipped with an adjustable jet-ejector[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45: 103495.

[ 13 ] MOHAMED S, SHATILLA Y, ZHANG T J. CFD-based design and simulation of hydrocarbon ejector for



- cooling[J]. *Energy*, 2019, 167: 346-358.
- [14] CHEN W, FAN J, HUANG C, et al. Numerical assessment of ejector performance enhancement by means of two-bypass inlets[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 171: 115086.
- [15] YE L, MENGQI Y, JIANLIN Y. An improved 1-D thermodynamic modeling of small two-phase ejector for performance prediction and design[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 204: 118006.
- [16] RIAZ F, LEE P S, CHOU S K. Thermal modelling and optimization of low-grade waste heat driven ejector refrigeration system incorporating a direct ejector model[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 167: 114710.
- [17] HUANG B J, CHANG J M, WANG C P, et al. A 1-D analysis of ejector performance[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22(5): 354-364.
- [18] 陈佳, 袁朝辉, 郭强, 等. 射流管伺服阀前置级的动态流场分析[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(7): 1731-1737.
- CHEN J, YUAN ZH H, GUO Q, et al. Dynamic flow field analysis of the prestage of jet pipe servo valve[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(7): 1731-1737.
- [19] 彭育辉, 吴智洲, 陈祥榛, 等. 天然气喷射阀动态流量的实时精确计量[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(6): 11-17.
- PENG Y H, WU ZH ZH, CHEN X ZH, et al. Real-time metering method for dynamic flow of natural gas injector[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6): 11-17.
- [20] 任建波, 苗超, 李强, 等. 基于数值仿真的MED-TVC喷射泵参数优化与性能研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(10): 82-88.
- REN J B, MIAO CH, LI Q, et al. Parameter optimization and performance analysis of ejector used in MED-TVC system based on numerical simulation[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(10): 82-88.
- [21] 张心悦, 张海伦, 王雷. 燃料电池氢循环喷射器性能分析与结构优化[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(6): 152-160.
- ZHANG X Y, ZHANG H L, WANG L, et al. Performance analysis and structure optimization of ejector in PEMFC hydrogen cycle [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(6): 152-160.
- [22] YAN J, CAI W J, LI Y Z. Geometry parameters effect for air-cooled ejector cooling systems with R134a refrigerant[J]. *Renewable Energy*, 2012, 46: 155-163.
- [23] YAN J, LIN C, CAI W, et al. Experimental study on key geometric parameters of an R134A ejector cooling system[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 67: 102-108.
- [24] LIU Y, YU J L. Performance analysis of an advanced ejector-expansion autocascade refrigeration cycle [J]. *Energy*, 2018, 165: 859-867.
- [25] SOKOLOV M, HERSHGAL D. Enhanced ejector refrigeration cycles powered by low-grade heat. 3. experimental results [J]. *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 1991, 14(1): 24-31.
- [26] 陶帅, 王辉涛, 朱道飞, 等. 双温太阳能双级喷射式制冷空调系统的节能分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(11): 156-162.
- TAO SH, WANG H T, ZHU D F, et al. Energy saving analysis of double temperature solar energy double stage jet refrigeration and air conditioning system [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(11): 156-162.
- [27] YAN J, LI S, LI R. Numerical study on the auxiliary entrainment performance of an ejector with different area ratio[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 185: 116369.
- [28] LI S, LU J, YAN J, et al. Performance analysis of auxiliary entrainment ejector used in multi-evaporator refrigeration system [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, 32: 101307.
- [29] DONG J M, CHEN X L, WANG W N, et al. An experimental investigation of steam ejector refrigeration system powered by extra low temperature heat source[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, 81: 250-256.
- [30] YAN J W, CHEN G M, LIU C Y, et al. Experimental investigations on a R134a ejector applied in a refrigeration system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 1061-1065.
- [31] WS H, GY Z, LG C. Effects of sea water temperature on the performance of the marine steam jet refrigerator[J]. *Ship Ocean Eng*, 2007, 36(3): 68-70.

- [32] DING Z Q, WANG L, ZHAO H X, et al. Numerical study and design of a two-stage ejector for subzero refrigeration [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 108: 436-448.
- [33] YAN J, WEN N, WANG L, et al. Optimization on ejector key geometries of a two-stage ejector-based multi-evaporator refrigeration system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 175: 142-150.
- [34] 薛浩渊, 王雷, 贾磊. MED-TVC 两级真空喷射泵模型分析及设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7): 114-120.
- XUE H Y, WANG L, JIA L. Model analysis and design of the two-stage vacuum ejector used in MED-TVC system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7): 114-120.
- [35] YAN J, CAI Q, WEN H. Optimization on key geometries of a highly coupled two-stage ejector [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 197: 117362.
- [36] 蔡青峰, 严嘉. 具有一定耦合度的双级喷射器的关键几何尺寸优化研究 [J]. *制冷与空调*, 2021, 21(4): 58-64.
- CAI Q F, YAN J. Study on the key geometries optimization of a coupling two-stage ejector [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2021, 21(4): 58-64.
- [37] NIKIFOROW K, KOSKI P, KARIMAKI H, et al. Designing a hydrogen gas ejector for 5 kW stationary PEMFC system-CFD-modeling and experimental validation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(33): 14952-14970.
- [38] ZHU Y, CAI W, WEN C, et al. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5-6): 898-905.

## 作者简介



宋亚杰, 2019 年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 2022 年于山东大学获得硕士学位, 现为山东大学博士研究生, 主要研究方向为喷射式制冷和喷射理论。

E-mail: songyajie@mail.sdu.edu.cn



王新立 (通信作者), 2010 年于浙江大学获得学士学位, 2015 年于浙江大学获得博士学位, 现为山东大学副研究员, 主要研究方向为喷射式制冷和智能优化。

E-mail: wangxinli@sdu.edu.cn

**Wang Xinli** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhejiang University in 2010, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2015. He is currently an associate professor at Shandong University. His main research interests include ejector-based refrigeration and intelligent optimization.



王雷, 1993 年于山东工业大学获得学士学位, 2000 年于山东大学获得硕士学位, 2004 年于浙江大学获得博士学位, 现为山东大学教授, 主要研究方向为现代检测技术、多相流检测、低品位能源利用中的控制问题。

E-mail: leiwang@sdu.edu.cn

**Wang Lei** received his B. Sc. degree from Shandong Polytechnic University in 1993, received his M. Sc. degree from Shandong University in 2000, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2004. He is currently a professor at Shandong University. His main research interests include modern detection technology, multiphase flow detection and the control problems in low-grade energy resource utilization.