

三级有机工质离心透平气动性能研究

宋艳苹¹, 刘海燕¹, 黄典贵²

(1. 河南城建学院能源与建筑环境工程学院, 平顶山 467036;
2. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 以有机工质 R123 为工质, 基于一维气动分析理论, 设计了三级离心透平, 并采用数值模拟方法研究了不同工况下的透平气动性能。结果表明: 设计工况下, 三级等叶高直叶片离心透平轮周效率可达到 86.7%; 在变工况条件下, 离心透平轮周效率随着膨胀比的增大先增大后减小, 离心透平各级的膨胀比、焓降和反动度等热力参数随着级组膨胀比的变化从高压级到低压逐级增大, 最末级变化最大。

关键词: 离心透平; 数值模拟; 变工况; 有机工质

中图分类号: TK14 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.044003

The aerodynamic analysis on the three stages centrifugal turbine of forganic working fluid

SONG Yan-Ping¹, LIU Hai-Yan¹, HUANG Dian-Gui²

(1. School of Energy and Architectural Environment Engineering,
Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China;

2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on one dimensional aerodynamic analysis theory, a three-stage centrifugal turbine was designed by using R123 as working fluid. The aerodynamic performance of the centrifugal turbine was studied by numerical simulations. Numerical results showed that the wheel efficiency of the three-stage centrifugal turbine with equal blades and high straight blades can reach 86.7% under design conditions. Under the off-design conditions, the efficiency increases initially with increasing expansion ratio, reaches a maximum and then decreases. The thermal parameters such as expansion ratio, enthalpy drop and reaction degree of each stage of centrifugal turbine increase from high pressure stage to low pressure stage with the change of expansion ratio of each stage group, and the last stage changes the most.

Keywords: Centrifugal turbine; Numerical simulation; Off-design; Organic working fluid

1 引言

有机朗肯循环以氟利昂、烷烃类等低沸点工质进行热功转换, 应用于低品位热源发电系统中可提高循环热效率, 在近年来备受关注^[1-2]。但是有机

工质声速低, 体积流量变化大的热力特征, 增加了膨胀机设计的难度, 成为有机朗肯循环发电技术中的研究热点, 也引起了国内外学者的广泛关注^[3-4]。现阶段关于有机工质膨胀机的研究主要集中在以螺杆式为代表的容积型膨胀机和向心式透平^[5-7]。

收稿日期: 2021-02-16

基金项目: 河南省科技攻关项目(192102310475); 河南省高等学校重点科研项目(21A470001); 上海市科委科研计划(17060502300)

作者简介: 宋艳苹(1980-), 女, 博士, 主要从事热机气动热力学研究。E-mail: 30040101@hncj.edu.cn

但是螺杆膨胀机膨胀比和功率均会受到螺杆长度限制;向心透平其结构固有特点使得气流膨胀的气动特性与几何变化特性不匹配,功率等级也会受到固有限制.随着中低品位热源发电技术的进一步发展,机组功率越来越大,越来越需要研发功率等级更高的有机工质膨胀机满足工业应用的要求.

离心透平是一种新型膨胀机,其流动结构见图 1. 气流从内径流入外径流出,通流截面旋成半径随着气流膨胀方向而增大,即工质体积流量增大的同时通流截面也呈现增大趋势,使气动与几何相匹配^[8]. 该透平用于工质比容变化较大的有机朗肯循环系统可降低通流部件设计难度,叶高变化较小甚至设计为等叶高直叶片即可满足气动要求. 这一特征使得从流动机理上看可减小流动的三维效应;从制造方面来看可降低通流部件的加工制造的难度;从功率方面来看仅依靠改变叶高即可改变流量调整功率,适应不同热源条件下循环系统的功率要求^[9].



图 1 离心透平示意图

Fig. 1 The structure of centrifugal turbine

Persico 等^[10]开发了一维气动设计程序并以戊烷为工质对离心透平进行气动设计,并利用数值模拟方法进行了性能研究. 谭鑫等^[11-13]以理想气体为工质,研究了离心透平的通流部件动叶栅、静叶栅、进气道、无叶扩压器、出气道的设计方法,并采用数值模拟方法分析了透平级及整机的性能. Li 等^[14]设计了以水蒸气为工质的三级离心透平,并采用数值模拟方法研究了变工况特性. Luo 等^[15]设计了以超临界 CO₂ 为工质的 10 MW 单级离心透平并用数值模拟的方法分析了设计工况下透平的性能及变工况条件下不同转速、膨胀比、质量流量等对透平性能的影响.

2017 年,我们以 R123 为工质,设计了单级离心透平,利用数值模拟的方法分析了设计工况下透

平的性能及变工况条件下不同转速、进汽压力、背压、初温等对透平性能的影响^[16]. 本文在此研究基础上,从透平的一维气动基本理论出发,结合有机工质的物性特征,改变透平的转速和几何结构,设计了以 R123 为工质的三级离心透平,并利用数值模拟的方法验证了其气动特性,研究了多级有机工质离心透平在变工况条件下级与级组的热力学参数和性能变化规律.

2 离心透平气动设计

2.1 设计参数

本文根据有机工质的物性特征,离心透平的流动特征,基于质量守恒、能量守恒和滞止转焓守恒方程,选取流动损失模型,根据某太阳能热源有机朗肯循环系统透平热力学参数(见表 1),选取 R123 为流动工质,设计了三级离心透平.

表 1 离心透平热力学参数

Tab. 1 The parameters of the centrifugal turbine

热力学参数	设计值
进口总温/K	373.23
进口总压/MPa	0.785 64
出口背压/MPa	0.11
设计转速/rpm	6 000
质量流量/kg · s ⁻¹	12.4
透平功率/kW	300
轮周效率/%	84

2.2 气动设计结果

离心透平级内气流流动方向由内径向外径流动见图 2,气流在叶轮内进口直径小于出口直径. 因此首先定义参数径比表示叶栅出口直径与进口直径之比,从通流特征来看,径比增大,气流在膨胀过程中随着径比增大而通流截面旋成面直径增加,可以减小叶片扩张角,减小叶顶二次流损失;但是从热力特性来看,动叶出口圆周速度大于动叶进口圆周速度 $U_2 > U_1$,离心力的惯性作用使气流被压缩,其物理意义为气流由于惯性力被压缩反而会消耗膨胀功. 径比越大动叶进出口圆周速度变化越大,惯性力对气流的压缩作用越大. 其次从几何结构的特性进行分析可知,平均直径小,径比太小,叶片宽度过小,负荷分配难度大;当平均直径较大,可适当减小进而减小透平整体结构尺寸. 因此径比的变化成为影响透平的性能的主要参数之一.

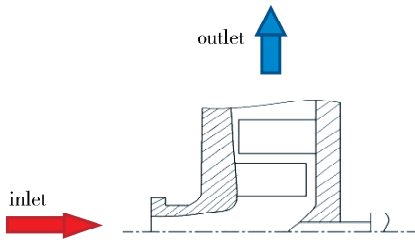


图 2 级内通流示意图
Fig. 2 The through-flow of stage

本文综合考虑离心透平的气动性能和几何特征, 将级的径比、速比、反动度、叶片扩张角等设为优化条件, 以轮周效率最大为目标, 对离心透平进行气动设计, 经过多次迭代计算, 得到离心透平气动优化设计结果见表 2. 设计的三级离心透平为等叶高设计, 叶片的扩张角为 0, 径比的取值范围在 1.05~1.25 之间.

表 2 离心透平气动优化设计结果

Tab. 2 The aerodynamic parameters of the centrifugal turbine

热力学参数	设计值		
	第一级	第二级	第三级
喷嘴速度系数	0.97	0.97	0.97
动叶速度系数	0.94	0.95	0.95
转速/rpm	6 000	6 000	6 000
流量/kg · s ⁻¹	12.4	12.4	12.4
速比	0.47	0.78	0.99
反动度	0.03	0.4	0.55
进口气流角/°	12	14	20
径比	1.22, 1.2	1.15, 1.15	1.1, 1.1
动叶进口直径/m	0.198 2	0.282 1	0.365 3
动叶出口直径/m	0.237 9	0.324 5	0.401 8
叶高/m	0.034 29	0.034 29	0.034 29
轮周效率/%	86.9		

2.3 叶型设计

根据气动设计确定的动静叶栅的进出口直径及子午面流道参数, 以及动静进出口气流角等叶型几何参数, 利用中弧线叠加厚度法构造动静叶型^[17]. 用三阶四次 Bezier 曲线表达中弧线切线角度和叶片厚度曲线, 然后在中弧线上叠加厚度构造生成吸力面和压力面曲线. 叶片的前缘和尾缘分别采用半径不等的圆弧, 圆弧的半径参考轴流和向心透平叶型设计. 叶片型线由前缘、尾缘、吸力面曲线和压力面曲线四部分光滑连接组成. 图 3 和图 4 分别为二维叶型示意图和三维几何结构图.

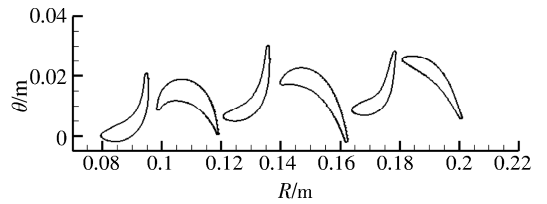


图 3 三级亚音速透平二维叶型示意图
Fig. 3 Blade profile of the three-stage centrifugal turbine

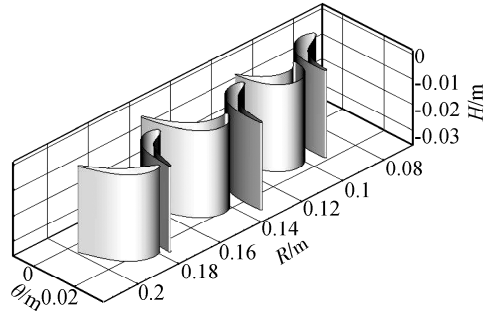


图 4 三级亚音速透平动静叶几何示意图
Fig. 4 3-D model of rotors and stators

3 离心透平的数值模拟

3.1 工质物性

工质物性的准确性是保证模拟计算准确性的基础, 本文根据实际气体状态方程 Soave Redlich Kwong Dry Refrigerants 方程计算有机工质热物理性质.

3.2 数值方法

三级离心透平共有三排静叶和三排动叶六列叶栅, 在叶型优化设计和数值模拟验证时计算资源消耗较大. 为了平衡计算资源的限制和计算精度的要求, 数值模拟湍流模型选用 $k-\epsilon$ 模型, 对动静叶流道进行网格划分, 流道内网格整体拓扑结构为 H-O-H 型, 叶片周围边界层为 O 型网格. 为了减小计算资源消耗, 数值模型简化为单流道, 设置为周期性边界条件, 如图 5 所示单流道的三级离心透平数值模型. 边界条件设置为: 进口边界条件给定总温和总压, 出口边界条件为平均静压. 动静叶之间的交界面处理方法为混合平面法, 计算物理时间步长为 0.000 1 s.

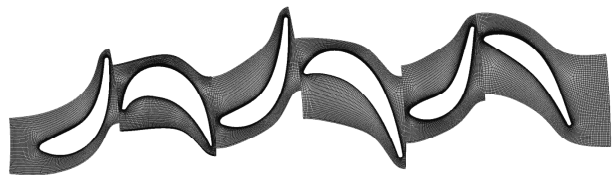


图 5 网格示意图
Fig. 5 Grids for cascades

3.3 网格无关性

网格的划分精度会影响数值模拟结果的准确性,本文首先进行了网格无关性验证,采用相同的拓扑结构,通过改变网格壁面法向增长率和全局因子,设计了 5 种不同数量的计算网格,网格单元数量在 40 万~320 万之间. 验证结果表明:当网格数量的增加到 199 万时,质量流量和轮周效率趋于稳定见表 3. 综合考虑计算资源和精度,选取了网格 4 进行计算和结果分析,网格壁面法向增长率为 1.2,平均 y^+ 值为 55.

表 3 网格无关性验证

Tab. 3 Verification of grid independence

网格序号	网格数/万	质量流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	轮周效率/%
网格 1	40.2	12.5	86.12
网格 2	70.3	12.445	86.45
网格 3	116.9	12.443	86.59
网格 4	199.3	12.445	86.75
网格 5	320.2	12.443	86.85

3.4 数值模拟计算结果

表 4 表示在设计工况下级的数值模拟结果与气动设计结果对比,结果表明等叶高直叶片的离心透平气动性能可以满足设计要求,离心透平的轴功为 356 kW,大于设计轴功 330 kW,等熵效率为 86.75%. 数值模拟结果与一维气动设计结果偏差 0.15%,质量流量与一维气动设计值偏差 0.3%,表明数值模拟与气动设计有较好的一致性,气动设计程序可以满足对多级有机工质离心透平的初步设计.

表 4 数值模拟结果与气动设计比较

Tab. 4 The contrast of design value and CFD value

参数	1D	CFD
等熵效率/%	86.9	86.75
流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	12.4	12.44
轴功/kW	356	357

图 6、图 7、图 8 分别为 50% 叶高处流线图、压力云图和静熵云图. 在叶栅流道内,流线光滑顺畅,没有流动分离与流动堵塞. 由压力云图和速度云图可知,动叶内压力降落逐级增大,第一级喷嘴出口和最末级动叶出口气流速度较大,流场细节特征与一维设计中参数变化规律一致. 静熵分布云图

显示在动静叶交界面处由于流动尾迹产生的熵增较大,在动静叶栅流道内没有明显的熵增.

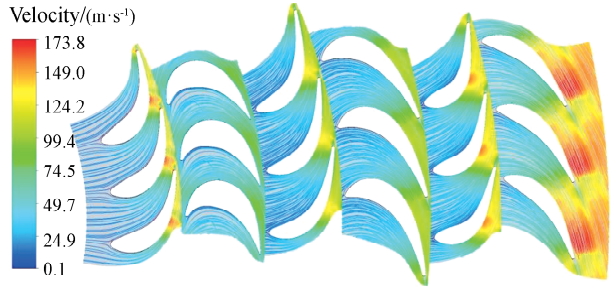


图 6 50% 叶高处流线图
Fig. 6 The streamline at 50% span



图 7 50% 叶高处压力分布云图
Fig. 7 The pressure distribution at 50% span

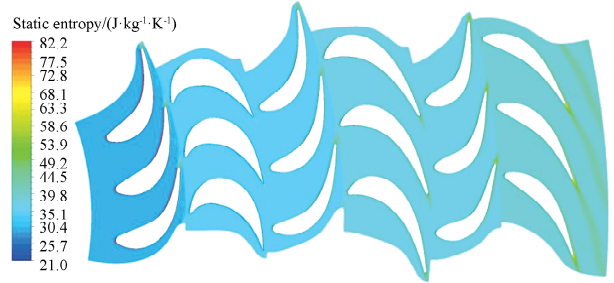


图 8 50% 叶高处熵分布云图
Fig. 8 The entropy distribution at 50% span

4 变工况性能

离心透平是根据给定的热力参数和转速进行设计的,但是在实际运行过程中,受冷热源和负荷变化的影响,透平的运行工况会偏离设计值. 多级离心透平在变工况条件下,级组内流动特征发生变化,各级间的焓降重新分配,各级的速比和反动度均会变化进而影响透平运行的经济性和安全性. 因此本文基于气动分析理论,给定进口总温和背压时,进汽压力在 0.33~0.785 64 MPa 之间(膨胀比 3~7.14)变化,结合数值模拟方法研究了离心透平变工况条件下热力参数和整体性能的变化规律.

4.1 级组内各级焓降的变化规律

图 9 为 330 kW 三级亚音速离心透平给定进口总温和背压时, 进汽压力在 0.33~0.785 64 MPa 之间(膨胀比 3~7.14)变化, 各级膨胀比随着级组膨胀比的变化曲线. 在级组膨胀比增大时, 第一级膨胀比基本不变, 第二级以后各级膨胀比随着级组膨胀比的增大而增大, 最末级膨胀比随着级组膨胀比的增大而急剧增大.

图 10 为各级焓降随着级组膨胀比的变化曲线. 各级焓降随着级组的膨胀比增大而增大, 尤其是最末级焓降变化最大. 但是在透平第一级, 由于有机工质的特殊物性规律, 在进口总温不变的工况下, 进口总压越大, 蒸汽状态越接近饱和区, 比热比 C_p/C_v 会随之增大, 因此在级内膨胀比基本不变时, 焓降却随着级组的膨胀比增大而减小. 第二级焓降在级组膨胀比大于 7 时减小, 与此原理相同.

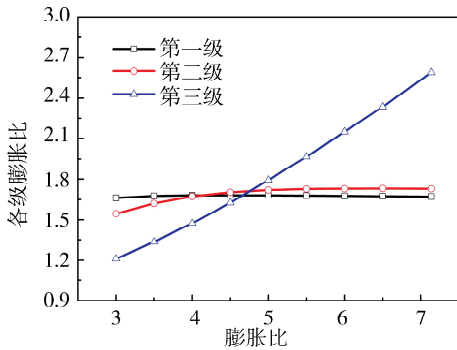


图 9 各级膨胀比的变化曲线

Fig. 9 Variation of expansion ratio for each stage

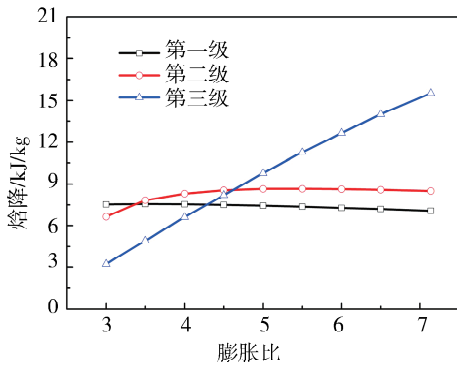


图 10 各级焓降的变化曲线

Fig. 10 Variation of enthalpy drop for each stage

4.2 级组内各级反动度变化规律

在变工况条件下, 各级膨胀比和焓降随之变化, 各级内反动度也会随之变化. 图 11 为各级反动度随膨胀比的变化规律. 第一级, 当级组膨胀比变化时, 膨胀比和焓降变化很小, 级的速比基本不变, 反动度也基本不变; 中间级, 随着级组膨胀比的

增大, 级的焓降增大、速比减小, 反动度先增大后减小, 但是变化较小; 最末级, 级组膨胀比增大时, 承担主要的变工况负荷, 级的膨胀比和焓降随着增大, 且由于最末级原设计反动度比较大, 反动度随着膨胀比的增大而迅速增大, 与理想气体离心透平的反动度变化规律理论分析一致.

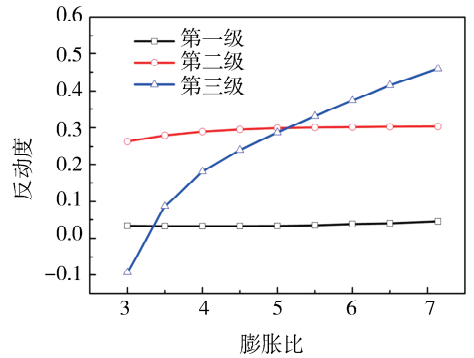


图 11 各级反动度随膨胀比变化曲线

Fig. 11 Variation of reaction degree for each stage

4.3 透平级组效率随着膨胀比和转速变化的影响

图 12 为离心透平等熵效率随着膨胀比的变化规律. 在不同的转速下, 透平效率随膨胀比的增大先增大后减小, 存在一个最佳膨胀比, 使等熵效率达到最大值; 转速越大, 等熵效率曲线的峰值越向后移. 转速为 $1.2n_0$, 在膨胀比小于 5 时, 级组的等熵效率迅速下降.

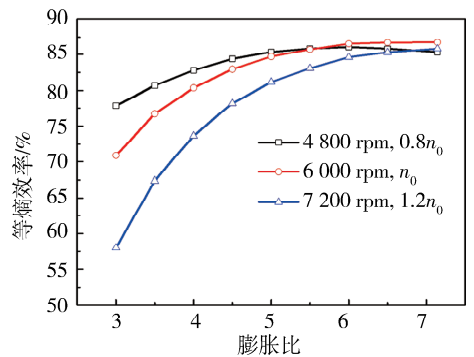


图 12 离心透平级组效率随膨胀比变化曲线

Fig. 12 Efficiency vs. expansion ratio at different rotation speeds

由图 9~图 11 级组内各级的焓降、效率和膨胀比的变化规律可知: 最末级焓降变化最大, 变工况负荷主要由最末级承担. 因此进一步研究了三级亚音速离心透平在不同转速下, 最末级轴功随着膨胀比的变化. 图 13 为最末级在不同转速下轴功随着膨胀比的变化, 在转速为 $1.2n_0$, 膨胀比小于 5 时输出轴功明显急剧减小, 膨胀比为 3 时最末级做负功. 在转速为 $0.8n_0$, 轴功变化最小.

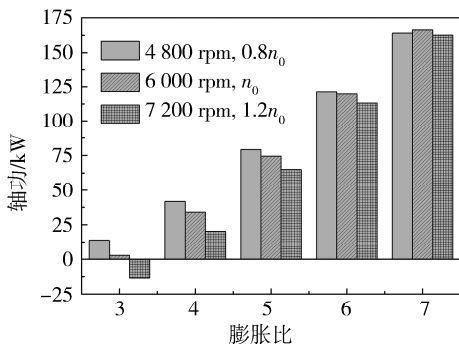


图 13 不同转速下,离心透平第三级轴功变化

Fig. 13 Power vs. expansion ratio at different rotation speed of the last stage

图 14 和图 15 为膨胀比为 3 时, $0.8n_0$ 与 $1.2n_0$ 转速下 330 kW 多级亚音速透平流场的压力云图. 在膨胀比为 3, 转速为 $0.8n_0$ 时, 最末级动叶内压力分布为顺压梯度; 转速为 $1.2n_0$ 时, 末级动叶内进口即产生逆压梯度, 对流动产生较大影响.



图 14 膨胀比为 3, 转速为 $0.8n_0$ 时透平内压力云图

Fig. 14 The pressure contour at the expansion ratio of 3 and the rotation speed of $0.8n_0$



图 15 膨胀比为 3, 转速为 $1.2n_0$ 时透平内压力云图

Fig. 15 The pressure contour at the expansion ratio of 3 and the rotation speed of $1.2n_0$

图 16 和图 17 为膨胀比为 3, 转速为 $0.8n_0$ 和 $1.2n_0$ 的工况下 330 kW 透平级组的流线图. 转速为 $1.2n_0$ 时, 第二级和第三级在动叶入口有较大的冲角, 冲角损失大, 末级在静叶栅流道内出现涡流, 因此在 $1.2n_0$ 时透平效率较低.

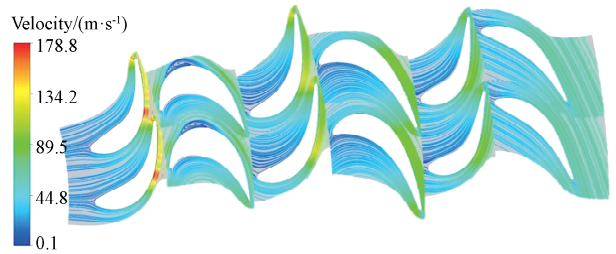


图 16 膨胀比为 3, 转速为 $0.8n_0$ 时透平内流线图

Fig. 16 The streamline distribution at the expansion ratio of 3 and the rotation speed of $0.8n_0$

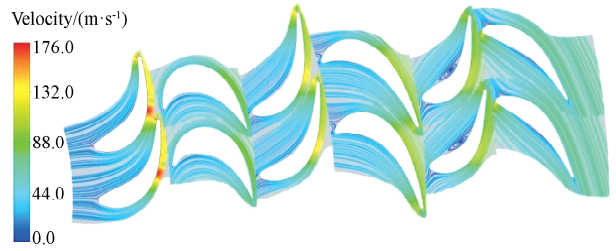


图 17 膨胀比为 3, 转速为 $1.2n_0$ 透平内流线图

Fig. 17 The streamline distribution at the expansion ratio of 3 and the rotation speed of $1.2n_0$

5 结论

本文以 R123 为工质, 设计了应用于太阳能热源的有机朗肯循环系统离心透平, 并利用数值模拟方法研究了其性能. 研究表明: (1) 基于一维气动分析理论设计的等叶高多级有机工质离心透平, 通过数值模拟计算表明在设计工况下等熵效率为 86.75%, 数值模拟结果与一维气动设计结果偏差小于 1%, 气动设计程序可以满足对多级有机工质离心透平的初步设计. (2) 基于中弧线叠加厚度法设计的离心透平叶型, 在设计工况下, 流道内流线通顺, 无流动分离和逆压梯度, 效率和功率均能达到设计要求. (3) 在变工况条件下, 有机工质离心透平在高转速低膨胀比, 由于圆周速度大, 级的理想焓降小, 速比远大于设计速比, 效率急剧下降; 反之, 在低转速高膨胀比, 级的理想焓降大, 圆周速度减小, 速比远小于设计速比, 也会导致效率下降. 但是受到热源条件的限制, 有机朗肯循环一般不会出现进口压力过高的工况, 而在进口压力降低, 膨胀比较小时, 降低转速运行可改善透平性能. (4) 在变工况条件下, 多级有机工质离心透平级组内焓降重新分配, 最末级焓降、反动度变化最大, 进而导致轴功变化最大, 承担主要的负荷变化.

参考文献:

- [1] Rahbar K, Mahmoud S, Al-Dadah R K, *et al.* Review of organic Rankine cycle for small-scale applications [J]. *Energ Convers Manage*, 2017, 134: 135.
- [2] Lecompte S, Huisseune H, van den Broek M, *et al.* Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery [J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2015, 47: 448.
- [3] Bao J, Zhao L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle [J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2013, 24: 325.
- [4] Twomey B, Jacobs P A, Gurgenci H. Dynamic performance estimation of small-scale solar cogeneration with an organic Rankine cycle using a scroll expander [J]. *Appl Therm Eng*, 2013, 51: 1307.
- [5] Li Y, Ren X. Investigation of the organic Rankine cycle (ORC) system and the radial-inflow turbine design [J]. *Appl Therm Eng*, 2016, 96: 547.
- [6] Zhang Y Q, Wu Y T, Xia G D, *et al.* Development and experimental study on organic Rankine cycle system with single-screw expander for waste heat recovery from exhaust of diesel engine [J]. *Energy*, 2014, 77: 499.
- [7] Wang W, Wu Y, Ma C, *et al.* Preliminary experimental study of single screw expander prototype [J]. *Appl Therm Eng*, 2011, 31: 3684.
- [8] 李银各, 谭鑫, 林显巧, 等. 离心式透平的热力设计与分析[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37: 2103.
- [9] 王乃安, 谭鑫, 黄典贵. 离心透平一维气动设计与优化[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39: 773.
- [10] Persico G, Pini M, Dossena V, *et al.* Aerodynamics of Centrifugal Turbine Cascades [J]. *J Eng Gas Turb Power*, 2015, 137: 112602.
- [11] 谭鑫, 李银各, 林显巧, 等. 离心式透平的变工况特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37: 1201.
- [12] 谭鑫, 郭慧婧, 李会, 等. 基于NURBS曲线的离心透平叶型设计[J]. *热能动力工程*, 2017, 32: 47.
- [13] 谭鑫, 李会, 宋艳苹, 等. 离心透平附属通流部件设计分析[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38: 767.
- [14] Li H, Huang D G. Aerodynamic optimization design of a multistage centrifugal steam turbine and its off-design performance analysis [J]. *Int J Rotat Mach*, 2017, 2017: 4690590.
- [15] Luo D, Liu Y, Sun X, *et al.* The design and analysis of supercritical carbon dioxide centrifugal turbine [J]. *Appl Therm Eng*, 2017, 127: 527.
- [16] 宋艳苹, 谭鑫, 黄典贵. 有机工质离心透平设计与变工况性能研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38: 1665.
- [17] 张晓东, 余世敏, 龚彦, 等. 基于Bezier曲线的涡轮叶片参数化造型及优化设计[J]. *机械强度*, 2015, 37: 266.

引用本文格式:

中文: 宋艳苹, 刘海燕, 黄典贵. 三级有机工质离心透平气动性能研究[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2021, 58: 044003.

英文: Song Y P, Liu H Y, Huang D G. The aerodynamic analysis on the three stages centrifugal turbine of organic working fluid [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2021, 58: 044003.