



兆瓦级高温热泵用向心透平气动设计与性能分析

孙靖武, 赵香龙, 韩小寒, 王 昊, 王志得, 王宏刚
(北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

摘要: 面向高比例可再生能源并网下的长时储能需求, 卡诺电池系统对高温热泵中核心膨胀装置的气动性能与运行可靠性提出了更高要求。针对某3 MW级高温热泵示范系统中的空气向心透平, 在给定边界条件下开展设计与性能评估。设计参数为: 进口总压0.546 MPa、总温328.25 K、出口静压0.125 MPa、流量10.031 kg/s、转速7956 r/min。采用一维热力计算与三维数值模拟相结合的方法开展研究。一维设计以反动度、速比、气流角等7个参数为变量, 先经粒子群算法全局寻优, 再通过序列二次规划对叶高、子午收缩角等结构参数进行局部细化。非定常效应由非线性谐波法求解。分析了动叶叶片数、入口压力变化及动静干涉对透平性能的影响。一维与三维对比表明: 等熵效率偏差3.37%, 流量偏差2.49%, 功率偏差3.16%。动叶叶片数由12增至17时, 吸力面低速区面积先缩小后扩大, 叶片数14~15片时流动均匀性最佳。入口压力偏离设计值 $\pm 20\%$ 范围内, 等熵效率高于85%。非定常透平效率较定常结果低约2.2个百分点, 主要归因于静叶尾迹与动叶栅的周期性干涉。上述结果可为兆瓦级卡诺电池系统中向心透平的工程设计提供参考。

关键词: 卡诺电池; 高温热泵; 向心透平; 气动设计; 数值模拟

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0321

中图分类号: TK 14

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3765-09

Aerodynamic design and performance analysis of a centripetal turbine for a megawatt-scale high-temperature heat pump

SUN Jingwu, ZHAO Xianglong, HAN Xiaohan, WANG Hao, WANG Zhide, WANG Honggang
(National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: To support long-duration energy storage under high-penetration renewable energy integration, the Carnot battery system imposes higher requirements on the aerodynamic performance and operational reliability of the centripetal turbine, the core expansion device in its high-temperature heat pump. This study presents the design and performance evaluation of an air-based centripetal turbine for a 3 MW high-temperature heat pump demonstration project under specified boundary conditions. The design parameters are as follows: inlet total pressure, 0.546 MPa; inlet total temperature, 328.25 K; outlet static pressure, 0.125 MPa; mass flow rate, 10.031 kg/s; and rotational speed, 7956 r/min. A coupled one-dimensional (1D) thermodynamic and three-dimensional (3D) numerical framework is adopted for the aerodynamic design. In the 1D design, seven core aerodynamic parameters (reaction degree, velocity ratio, flow angles, etc.) are used as optimization variables. Global optimization is

收稿日期: 2026-04-13; 修改稿日期: 2026-06-22。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U25B6014)。

第一作者: 孙靖武 (1997—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为储能技术、热力电池、熔盐储热, E-mail: 20112858@ceic.com; 通信作者: 王宏刚, 正高级工程师, 研究方向为卡诺电池、液流电池、炭基固体超高温储热技术、固体氧化物燃料电池、电氢化多能协同, E-mail: 20089532@ceic.com。引用本文: 孙靖武, 赵香龙, 韩小寒, 等. 兆瓦级高温热泵用向心透平气动设计与性能分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3765-3773。

Citation: SUN Jingwu, ZHAO Xianglong, HAN Xiaohan, et al. Aerodynamic design and performance analysis of a centripetal turbine for a megawatt-scale high-temperature heat pump[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3765-3773.

initially executed via particle swarm optimization, followed by local refinement of structural parameters, such as blade height and meridional contraction angle, using sequential quadratic programming. Subsequent 3D modeling is conducted on the NUMECA platform with approximately 1.75 million cells per passage. The Spalart-Allmaras turbulence model is employed, and unsteady effects are solved by the nonlinear harmonic method. The impacts of rotor blade count, off-design conditions, and unsteady flow characteristics are systematically investigated. Comparative analysis between the 1D and 3D results reveals deviations of 3.37%, 2.49%, and 3.16% for isentropic efficiency, mass flow rate, and output power, respectively. As the rotor blade count increases from 12 to 17, the suction-side low-velocity region initially contracts before expanding, achieving optimal flow uniformity at 14–15 blades. When the inlet pressure deviates by $\pm 20\%$ from the design value, the isentropic efficiency of the turbine remains above 85%. Furthermore, the unsteady efficiency is lower than the steady result, mainly driven by periodic interactions between the stator wakes and the rotor cascade. These findings provide a practical engineering reference for designing centripetal turbines in megawatt-scale Carnot battery systems.

Keywords: Carnot battery; high-temperature heat pump; centripetal turbine; aerodynamic design; numerical simulation

可再生能源发电占比不断上升, 电力系统对大规模、长时储能的需求越来越迫切^[1]。在现有的储能技术中, 卡诺电池基于“电→热→电”的转换路径, 具有选址限制少、寿命长、环保、易于和火电机组改造结合等优点, 被认为是一种很有前景的长时储能方案^[2]。卡诺电池的核心是把热泵储热和热机发电两个过程耦合起来。高温热泵负责完成从电到热的转换, 其中压缩机和透平是关键旋转部件^[3]。透平的作用是回收高压气体的压力能并转化为机械功, 实现能量的高效再利用。

对于兆瓦级卡诺电池系统而言, 工质通常为高压气体(如空气或超临界二氧化碳), 其工作参数严格受限于特定的热力循环设计^[4]。在此类应用背景下, 相较于轴流形式, 向心透平在中等流量及较高膨胀比条件下具有结构紧凑、效率稳定等特点, 因而在储能系统中具有较好的应用前景^[5]。然而, 在兆瓦级应用条件下, 透平设计需同时满足效率、功率及结构约束等多重要求, 传统经验方法难以兼顾多目标需求^[6]。此外, 储能系统运行过程中存在明显的负荷波动特征, 透平需在一定范围内偏离设计工况运行, 这对其气动匹配与稳定性提出更高要求^[7-9]。当前国内外研究多聚焦于卡诺电池的系统循环构型及热力学分析^[10-11], 而对其核心旋转机械, 尤其是兆瓦级向心透平的精细化、专用化设计研究

相对不足^[12-14]。这一研究的不充分可能导致透平性能制约系统整体经济性与技术可行性。因此, 有必要在具体工程背景下, 对向心透平开展针对性的设计与性能分析。

作者所在团队将于某电厂搭建 3 MW 高温热泵, 该热泵以空气为循环工质, 基于逆卡诺电池循环原理, 将火电厂乏汽、闭式冷却水等低品质废热或废弃风光电回收并重新利用, 提升循环工质品位, 提供超过 560℃ 的高品质热能。热泵产生的高品质能量与熔盐储热介质进行热交换后进行能量存储和发电利用。空气向心透平作为高温热泵中主要的功量回收部件, 通过将高压空气膨胀降压降温, 回收工质部分做功能力。本研究以此 3 MW 级高温热泵示范项目为依托, 聚焦于兆瓦级卡诺电池系统中高温热泵所用向心透平, 开展其结构参数的专门设计与优化研究。本研究建立了一套涵盖一维热力设计、三维参数化建模、计算流体动力学仿真及关键参数影响规律的系统化方法, 为卡诺电池这一重要储能技术核心部件的工程化应用提供直接的理论依据与技术支撑。

1 设计与数值模型

1.1 一维气动设计

此空气工质向心透平主要给定设计参数如表 1

所示，在此条件下，开展向心透平一维气动设计。

表 1 空气向心透平给定边界参数

Table 1 Given boundary parameters of the air centripetal turbine

给定参数	数值
进口总压/MPa	0.546
进口总温/K	328.25
出口静压/MPa	0.125
质量流量/(kg/s)	10.031
转速/(r/min)	7956

轮周效率 η_u 是衡量透平做功能力及效率的关键指标，其表达式如式(1)所示^[15]：

$$\eta_u = 2\chi_a[\phi \cos \alpha_1 \sqrt{1 - \Omega} - \bar{D}^2 \chi_a + \bar{D} \psi \cos \beta_2 \sqrt{\Omega + \phi^2 (1 - \Omega) + \bar{D}^2 \chi_a^2 - 2\chi_a \phi \cos \alpha_1 \sqrt{1 - \Omega}}]$$

(1)

式中，涉及 7 个气动参数， Ω 为反动度， $\bar{D}$ 为轮径比， α_1 为动叶入口气流角， β_2 为动叶出口相对气流角， ϕ 为静叶栅速度系数， ψ 为动叶速度系数， χ_a 为速比。在参数选取过程中，需满足膨胀比、静叶叶栅出口马赫数、冲角等参数气动约束条件^[16]，并确定静叶速度系数、动叶速度系数、轮径比等参数。

本研究开发一种气动参数与结构参数分阶段联合优化的 MATLAB 代码。其核心为：首先，将设计变量合理划分为以反动度、速比、进出口气流角等为核心的一维气动参数组；其次，构建以透平效率为目标的优化模型，并采用具有全局搜索能力的粒子群算法对该组参数进行全局优化^[17-19]，获得初步气动设计基准。在此基础上，第二阶段引入与叶高、间隙、子午流道尺寸等相关的结构参数组，以第一阶段得到的最优气动解为起点，采用序列二次规划局部优化算法^[20-21]，在精细化的气动损失模型与严格的几何约束下，对气动与结构参数进行协同寻优。本研究一维设计中采用的损失模型包括：静叶型损失、动叶型损失、叶顶泄漏损失、轮盘摩擦损失和余速损失，各损失项的经验系数依据向心透平一维设计经验确定。这一“全局-局部”两阶段策略有效克服了传统设计方法变量耦合强、易陷入局部最优的缺点，能够在设计初期实现气动性能与结构可行性的深度匹配，此算法经与序列二次规划局部优化算法对比，设计叶片数一致，且主要设计参数偏差范围均在 5% 以内。一维设计的主要结果如表 2 所示。

表 2 空气向心透平主要设计结果

Table 2 Main design results of the air centripetal turbine

设计结果	数值
静叶叶片片数/片	19
静叶进口直径/mm	961.6
静叶出口直径/mm	825.0
静叶叶片高度/mm	13.7
静叶弦长子午面投影/mm	68.3
动叶叶片片数/片	14
动叶进口直径/mm	751.2
动叶出口中径/mm	363.0
动叶出口轮毂面直径/mm	302.2
动叶出口机匣面直径/mm	423.8
动叶进口高度/mm	15.0
动叶出口高度/mm	60.8
子午面宽度/mm	226.2
等熵效率/%	89.24
输出功率/MW	0.95

1.2 三维建模与计算方法

基于一维设计结果，采用 NUMECA 平台进行三维参数化建模。叶片造型在 NUMECA AutoBlade 模块中完成。静叶与动叶均采用弯扭叶片型式，子午面轮毂线和机匣线由 6 阶 Bezier 曲线（7 个控制点）定义，依据表 2 中的进出口直径、叶高及子午面宽度等一维设计结果，通过“定两边、改中间”的方法固定首尾控制点坐标并调整中间控制点，形成合理的子午流道。中弧线方面，静叶采用 2 阶 Bezier 曲线，动叶采用 4~5 阶 Bezier 曲线以准确描述从径向到轴向的气动特征；叶片厚度分布通过 Side curves 中的控制点进行调节。具体参数设置及导出的几何文件在 AutoGrid5 中完成网格划分。为提高近壁面计算精度，对边界层区域进行加密处理。通过网格无关性验证，如图 1 所示，当单流道网格数量约为 175 万时，计算结果趋于稳定，该网格方案下最小正交角 16.201°、最大长宽比 1133.8、最大延展比 2.9021，所有指标均满足 NUMECA 推荐标准（分别满足大于 10、小于 3000、小于 5），网格质量良好，此时静叶和动叶的网格结构如图 2 所示。数值计算中，入口边界条件设定为总温与总压，出口为平均静压，动静叶交界面采用混合平面方法；湍流模型选用 Spalart-Allmaras 模型^[22-23]，以兼顾计算精度与收敛效率。叶顶间隙在一维设计优化中通过序列二次规划方法确定，最

优径向间隙取动叶出口叶高的1.5%，约0.91 mm，轴向间隙取进口叶高的5.9%，约0.88 mm。后续三维模拟均采用该间隙值，未再将其作为变量进行研究。

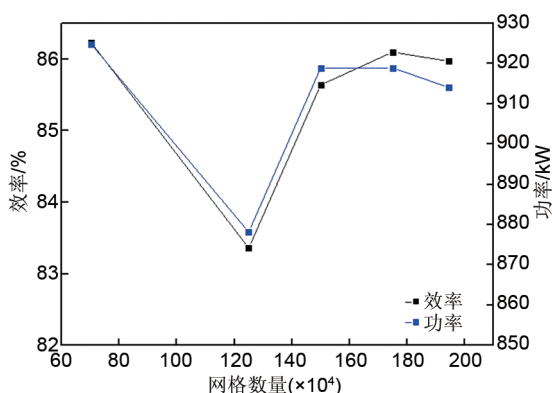


图1 向心透平网格无关性验证
Fig. 1 Grid-independence verification of the centripetal turbine

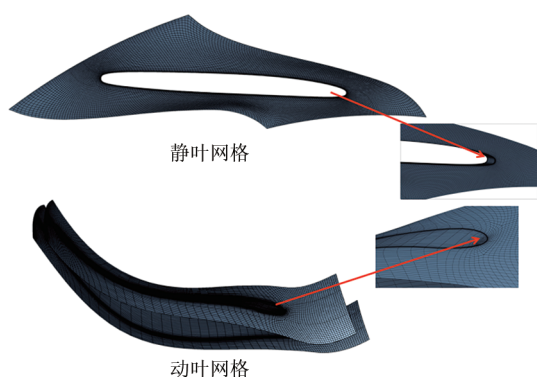


图2 单通道静叶和动叶结构及网格
Fig. 2 Structure and grid of the single-passage stator and rotor blades

2 设计结果验证与流动特性分析

将三维数值模拟结果与一维设计值进行对比，汇总于表3。两者在等熵效率、质量流量和输出功率上的相对偏差分别为3.37%、2.49%和3.16%，偏差均在可接受范围内，证明一维设计方法的工程有效性。造成上述偏差的主要原因在于：一维设计阶段采用半经验损失模型近似估算透平内部各项损失，难以完全反映真实三维黏性流动中的复杂涡结构与耗散过程。

为进一步分析透平内部流动结构及叶顶区域的局部流动特征，图3和图4分别给出了设计工况下透平整体流场分布及叶顶间隙处的流线结构。从整

体流场分布可以看出，流体在静叶出口后进入动叶通道，并沿叶片弯曲方向逐渐向径向内侧流动，整体流线分布较为连续，未出现明显大范围流动分离现象。主流区域速度分布较为均匀，表明在设计工况下透平内部流动组织良好。进一步观察叶顶间隙区域流线分布可以发现，在动叶顶部附近存在明显的泄漏流动结构。高压侧流体通过叶顶间隙向低压侧迁移，在吸力面附近形成局部回流与旋涡结构，并沿流向向下游发展。该泄漏流与主流相互作用，使得局部区域流线发生偏转，同时在近壁区域形成低速区。上述流动结构表明，叶顶间隙泄漏是透平内部不可忽视的局部流动特征，其不仅改变主流流动方向，还会在局部区域引入附加损失，对整体气动性能产生一定影响。

表3 一维设计与三维模拟结果对比

Table 3 Comparison between one-dimensional design and three-dimensional simulation

项目	等熵效率	流量	输出功率
一维设计计算	89.24%	10.031 kg/s	0.95 MW
模拟计算	86.23%	9.780 kg/s	0.92 MW
相对误差	3.37%	2.49%	3.16%

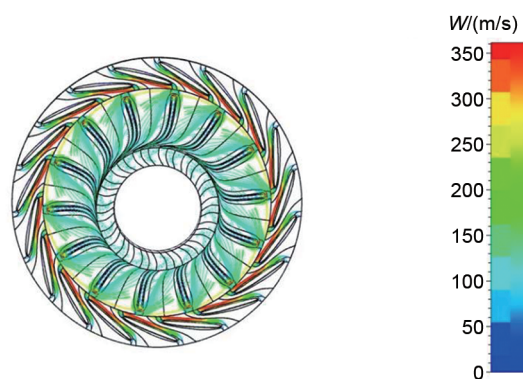


图3 流场分布
Fig. 3 Flow field distribution

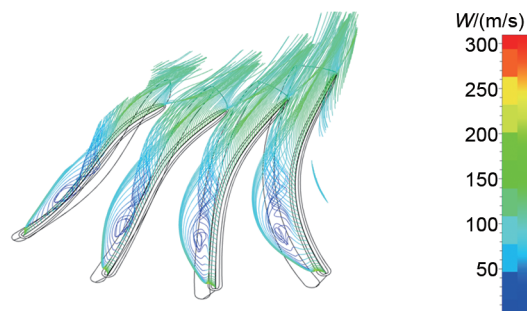


图4 叶顶间隙泄漏流线
Fig. 4 Streamlines of tip leakage flow

图5给出了设计工况下的静压和静温分布。从静压看,流体从外向内流动时压力逐渐下降,高压区集中在静叶入口附近,动叶出口处压力明显降低,说明气体在流动中逐步膨胀做功。静温分布也类似,沿流动方向温度逐渐降低。静叶段温度变化相对平缓,动叶通道内温度下降更明显,说明这里是主要的能量转换区域——流体膨胀将内能转化为机械能,带动转子输出功率。从径向看,静压和静温在不同半径上都保持连续变化,没有突变,说明设计工况下流动比较稳定,能量转换过程平滑。

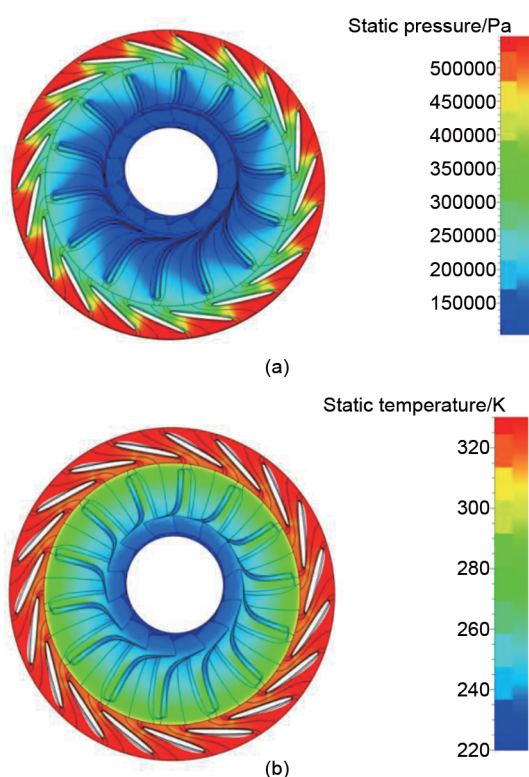


图5 设计工况下透平内 (a) 静压和 (b) 静温分布
Fig. 5 (a) Static pressure and (b) Static temperature distribution in the turbine under design condition

静叶和动叶不同叶高处(20%、50%、80%叶高)的静压分布如图6所示。从整体趋势来看,各叶高位置的静压分布规律基本一致,但在局部区域存在一定差异,反映出明显的径向非均匀性。对于静叶[图5(a)],流体在叶片前缘附近经历快速加速,静压出现显著跃升,随后在叶道中前段(约0.1~0.3归一化流线范围)达到局部峰值。之后沿流向静压逐渐降低,并在叶道中后段呈现较为平缓的衰减趋势。在接近出口区域(归一化流线接近1.0)时,受尾迹及局部流动分离影响,静压出现小幅回

升与波动。不同叶高位置之间的压力分布整体较为接近,但在前缘及出口附近存在一定差别,其中低叶高(20%叶高)处波动相对更为明显,说明端壁效应对流动结构具有一定影响。对于动叶[图5(b)],静压沿流线整体呈单调下降趋势,体现出动叶内以做功膨胀为主的流动特征。在叶片进口附近(归一化流线接近0)存在明显的压力峰值,随后迅速下降并进入连续衰减阶段。与静叶相比,动叶内的压力梯度更加平缓,但在靠近进口区域仍可观察到一定程度的压力波动,这与来流非均匀性及叶栅相互作用有关。从径向分布来看,不同叶高位置的静压曲线在中后段基本重合,而在进口附近存在差异,表明动叶入口区域的三维效应更为显著。

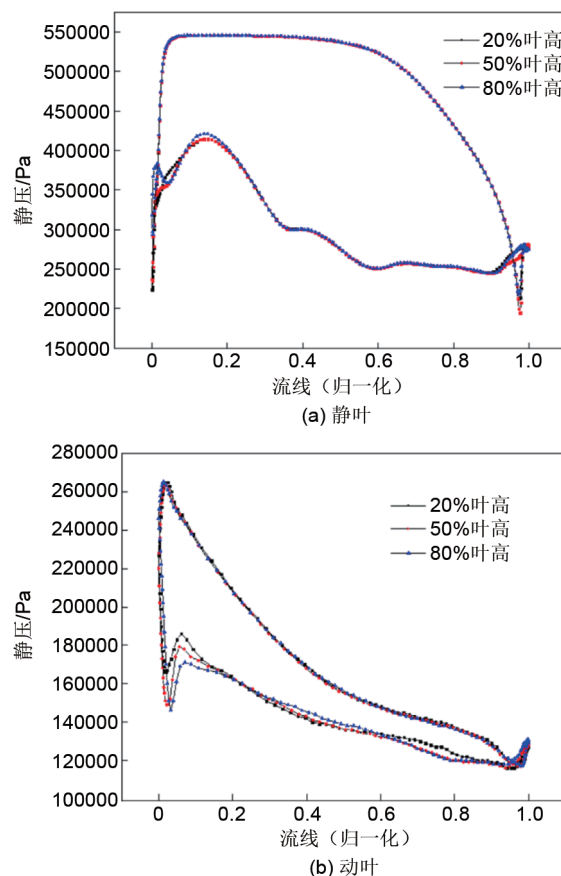


图6 (a) 静叶和 (b) 动叶不同叶高处的静压分布
Fig. 6 Static pressure distribution at different blade heights of (a) Stator and (b) Rotor

3 动叶叶片数影响分析

动叶的叶片数可以根据 Glassman 经验关系式确定,其表达式如式(2)所示^[24]:

$$Z_r = \frac{\pi}{30} (20 + \alpha_1) \tan(90 - \alpha_1) \quad (2)$$

式中, Z_r 为动叶叶片个数; α_1 为动叶进口绝对速度与切向方向的夹角。在初始设计基础上, 选取动叶叶片数为 12、13、14、15、16 及 17 的多种方案进行对比分析, 重点考察叶栅密度变化对流动结构与性能的影响。

图 7 所示为不同动叶叶片数条件下透平内部相对马赫数分布。可以看出, 叶片数变化主要影响动叶通道内低速区范围及主流分布形态。当叶片数为 12 时, 动叶吸力面中后段存在较大范围的低马赫数区域, 且该区域向通道内部延伸较明显, 表明该工况下流体在扩散过程中速度恢复不足, 流动均匀性较差。同时, 尾缘附近可观察到一定范围的速度

不均匀分布。当叶片数增加至 13 时, 吸力面低速区范围有所减小, 但仍较为集中于中后段区域, 说明流动状态有所改善但仍存在明显局部减速区。当叶片数为 14 时, 可以明显观察到吸力面低速区进一步缩小, 其范围主要局限于近壁区域, 通道内主流区域分布更加连续, 表明该工况下流动组织相对更为均匀。当叶片数为 15 时, 整体分布与 14 较为接近, 但吸力面中后段低速区略有扩展趋势, 同时尾缘区域局部速度梯度有所增强, 说明流动均匀性略有下降。当叶片数继续增加至 16 和 17 时, 吸力面附近低马赫数区域再次呈现扩大趋势, 尤其在中后段区域更为明显, 同时通道内速度分布出现一定程度的不均匀性, 表明在较高叶片数条件下, 流动受到更强约束后产生附加损失。综上, 从相对马赫

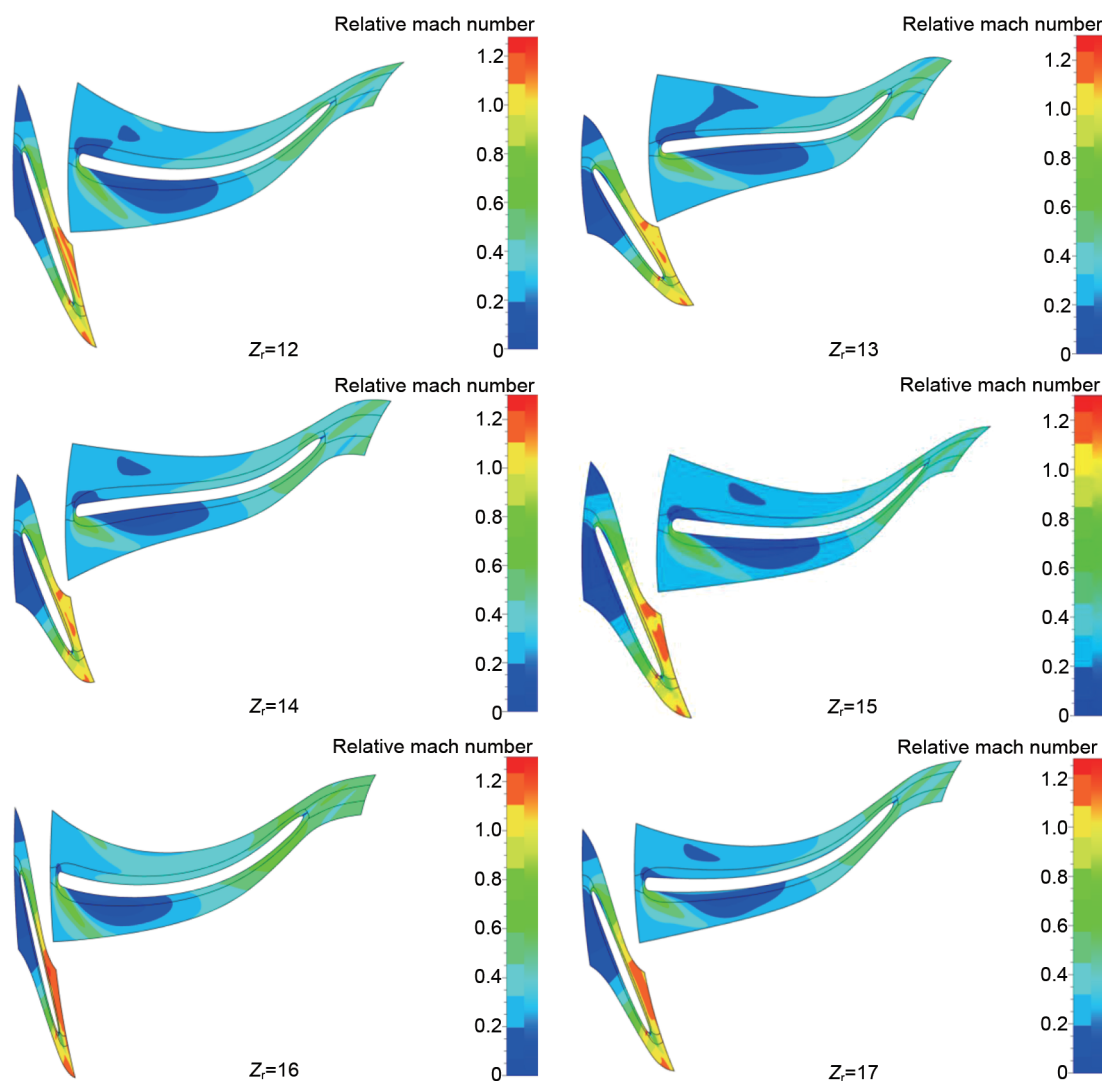


图 7 透平相对马赫数分布随动叶叶片数变化规律

Fig. 7 Relative Mach number distribution with various rotor blades

数分布角度来看, 动叶叶片数对流动结构的影响主要体现在吸力面低速区的演化规律: 随叶片数增加, 该区域先减小后扩大。在本研究工况下, 叶片数为 14、15 时流动分布相对最为均匀。

4 变工况及非定常流动特性分析

卡诺电池储能系统在实际运行中, 由于热源波动或负荷调节, 热泵中透平的运行参数往往会偏离设计值。为保证系统在全工况范围内的稳定高效运行, 需研究向心透平的非设计工况性能, 在保持其他边界条件不变的情况下, 通过改变入口压力 (0.2~0.7 MPa, 40%~130% 负荷变化区间) 分析透平在变工况下的性能变化。

图 8 给出了等熵效率、质量流量和输出功率随进口总压的变化曲线。等熵效率随进口总压升高呈现先上升后趋于平稳并略有下降的非单调变化特征, 在设计进口总压 0.55 MPa 附近达到最大值约 86.2%。从速度三角形角度分析, 进口总压偏离设计值将改变等熵焓降, 使透平实际运行速比偏离最优速比, 偏离程度越大, 气流冲角损失和尾迹损失增幅越显著, 从而导致效率下降。在进口总压 0.44~0.66 MPa 范围内 (相对设计工况 $\pm 20\%$ 的波动区间), 等熵效率均维持在 85% 以上, 说明该透平具备良好的变工况适应性。

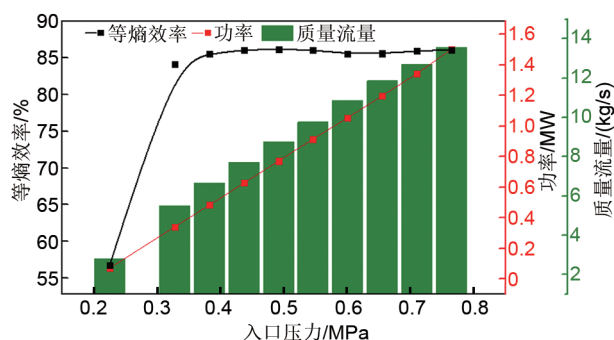


图 8 透平性能随入口压力变化
Fig. 8 Effect of inlet pressure on turbine performance

质量流量随进口总压升高单调递增, 从 0.2 MPa 时的 5.2 kg/s 增至 0.7 MPa 时的 11.8 kg/s, 但递增速率逐渐放缓。该趋势的物理成因在于: 进口总压升高直接增大工质密度, 在通流面积不变的条件下质量流量随之上升; 而当进口总压接近 0.7 MPa 时, 流道喉部马赫数接近 1, 通流能力接近阻塞极

限, 故流量增幅趋缓。以流量系数衡量, 本透平的流量系数变化范围为 0.52~1.18, 与向心透平变工况运行的推荐区间 (0.4~1.2) 基本吻合。

输出功率随进口总压升高呈近似线性增长, 从 0.2 MPa 时的 0.42 MW 增至 0.7 MPa 时的 1.21 MW。定量统计表明, 进口总压每变化 0.055 MPa (约为设计值的 10%), 输出功率相应变化约 9.5%, 二者具有良好的线性关联特征。

本向心透平静叶叶片数为 19、动叶叶片数为 14, 静叶与动叶之间存在相对运动, 且流道内流动具有周期性, 使得透平内部流场呈现明显的非定常特征。这种非定常效应会影响下游叶片的干涉及二次流输运, 进而改变气动损失与效率。考虑动静叶相对运动引起的非定常效应, 采用非线性谐波法 (NLH) [25] 对透平进行分析。NLH 模拟与定常模拟的结果对比如表 4 所示, 结果表明, 相较于稳态计算, 等熵效率降低约 2.21%, 输出功率略有下降, 质量流量变化较小。

表 4 NLH 非定常模拟和定常模拟对比

Table 4 Comparison between NLH unsteady and steady simulation

模拟方法	质量流量/(kg/s)	效率/%	输出功率/MW
定常模拟	9.78	86.23	0.92
NLH 模拟	9.79	84.02	0.90

从图 9 的时均熵分布来看, 高熵区主要出现在三个位置: 静叶尾迹、动叶前缘, 以及动叶通道中部靠近吸力面的一侧。这些地方的能量损失和不可逆过程比较明显。静叶尾迹进入动叶后进一步发展, 与动叶前缘相互作用, 局部熵值明显升高。动

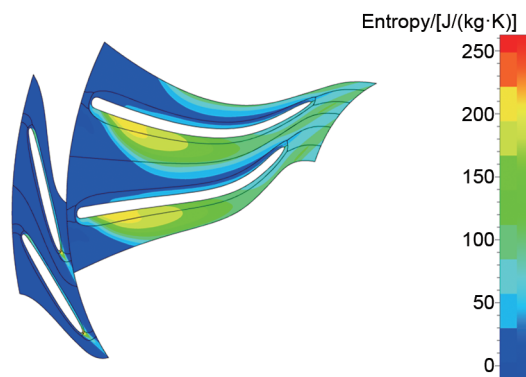


图 9 NLH 非定常模拟熵值分布
Fig. 9 Entropy distribution from NLH unsteady simulation

叶通道内沿吸力面方向有一条连续的高熵带,说明边界层在发展,可能还伴有局部流动分离。端壁附近也有熵增,端壁二次流对损失的贡献不能忽略。总体来看,这个向心透平级内的流动是典型的三维流动:静叶主要负责加速和压力重分布,动叶完成主要的能量转换。损失主要来自叶栅尾迹、边界层发展和端壁二次流。

5 结 论

本研究针对 3 MW 高温热泵向心透平,采用一维设计与三维数值模拟相结合的方法,系统研究了关键结构参数对透平性能的影响,可为相关应用提供参考,得到以下主要结论:

基于“全局(PSO)+局部(SQP)”两阶段优化策略的一维设计方法完成兆瓦级向心透平设计,并进行三维数值仿真模拟,一维设计与三维仿真的等熵效率相差 3.37%,计算结果偏差控制在合理范围内;

动叶叶片数对向心透平性能有显著影响。随动叶叶片数从 12 增加至 17,吸力面低速区先减小后增大,本透平在叶片数 14~15 范围内获得较优的流动均匀性与性能;

采用 NLH 方法量化动静叶干涉引起的效率损失,非定常效率较定常结果低 2.21 个百分点,静叶尾迹与动叶内涡系的相互作用是引起性能波动和附加损失的主要原因。

后续研究可从以下方面深入:第一,依托未来中试装置的实验数据,将实测的等熵效率、功率及压力分布与本研究数值结果进行系统对比,以检验计算模型的预测精度,并据此校准一维损失模型和湍流模型参数;第二,在已验证的模型基础上,进一步开展流固耦合分析,评估非定常气动载荷下动叶片的应力响应与疲劳寿命;第三,引入机器学习等数据驱动方法,探索叶片型线的逆向优化设计,以期获得更高的气动效率。

参 考 文 献

[1] 黎博,陈民铀,钟海旺,等.高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J].中国电机工程学报,2023,43(2):555-580.
LI B, CHEN M Y, ZHONG H W, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2023, 43(2): 555-580.

[2] DUMONT O, FRATE G F, PILLAI A, et al. Carnot battery technology: A state-of-the-art review[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101756. DOI:10.1016/j.est.2020.101756.
[3] 王驿凯,赵栋霖,杨曙川,等.区域能源系统中热泵储能技术研究与应用综述[J].东南大学学报(自然科学版),2025,55(3):839-848. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2025.03.026.
WANG Y K, ZHAO D L, YANG S C, et al. Review of pumped thermal energy storage technology and application in district energy systems[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, 55(3): 839-848. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2025.03.026.
[4] NOVOTNY V, BASTA V, SMOLA P, et al. Review of Carnot battery technology commercial development[J]. Energies, 2022, 15(2): 647. DOI:10.3390/en15020647.
[5] 孙冠珂,李文,张雪辉,等.向心涡轮进气结构的气动性能及损失机理[J].航空动力学报,2015,30(8):1926-1935. DOI:10.13224/j.cnki.jasp.2015.08.016
SUN G K, LI W, ZHANG X H, et al. Aerodynamic performance and losses mechanism of radial turbine intake components[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(8): 1926-1935. DOI:10.13224/j.cnki.jasp.2015.08.016
[6] ZHANG J, ZANGENEH M. Multidisciplinary and multi-point optimisation of radial and mixed-inflow turbines for turbochargers using 3D inverse design method[M]//14th International Conference on Turbochargers and Turbocharging. London: CRC Press, 2020: 263-277. DOI:10.1201/9781003132172-19.
[7] WEITZER M, MÜLLER D, KARL J. Two-phase expansion processes in heat pump-ORC systems (Carnot batteries) with volumetric machines for enhanced off-design efficiency[J]. Renewable Energy, 2022, 199: 720-732. DOI:10.1016/j.renene.2022.08.143.
[8] PECCHINI M, PECCOLO S, BENATO A, et al. Analysis of the discharge process of a TES-based electricity storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 100: 113518. DOI:10.1016/j.est.2024.113518.
[9] LIN X J, JIN X R, XU J H, et al. Performance optimization of thermal integrated-Carnot battery for waste heat utilization in industrial integrated energy systems[J]. ENGINEERING Energy, 2026, 20(1): 10553. DOI:10.1007/s11708-026-1055-3.
[10] LI W, WANG S Y, XU S G, et al. An intensive review of ORC-based pumped thermal energy storage[J]. Energy, 2025, 330: 136792. DOI:10.1016/j.energy.2025.136792.
[11] LIANG T, VECCHI A, KNOBLOCH K, et al. Key components for Carnot battery: Technology review, technical barriers and selection criteria[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 163: 112478. DOI:10.1016/j.rser.2022.112478.
[12] MA Q F, HE G L, LI J R, et al. Innovative design and performance evaluation of a compact 1 MW radial inflow turbine with non-azeotropic fluids for ocean thermal energy conversion applications[J]. Energy, 2025, 335: 138105. DOI:10.1016/j.energy.2025.138105.
[13] WAN B C, ZHENG W, ZHANG Z, et al. Aerodynamic design and

- optimization analysis of a 200 kW radial-inflow turbine[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2854(1): 012071. DOI: 10.1088/1742-6596/2854/1/012071.
- [14] 沈代兵, 郝佳豪, 宋衍昌, 等. 百千瓦级二氧化碳储能系统向心透平设计与结构参数优化[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(3): 1270-1285. SHEN D B, HAO J H, SONG Y C, et al. Centripetal turbine design and structural parameter optimization for hundred-kilowatt-class carbon dioxide energy storage system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(3): 1270-1285.
- [15] 赵攀, 温玉聪, 娄聚伟, 等. 超临界二氧化碳向心透平设计与热流固耦合研究[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(11): 83-94. ZHAO P, WEN Y C, LOU J W, et al. Design and thermal-fluid-solid coupling investigation of supercritical carbon dioxide radial inflow turbine[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(11): 83-94.
- [16] 奚忠. 径流透平气动设计及优化方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2012. XI Z. Study on aerodynamic design and optimization methods for radial turbine[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [17] HAN Z H, JIA X Q, LI P. Preliminary design of radial inflow turbine and working fluid selection based on particle swarm optimization [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 199: 111933. DOI:10.1016/j.enconman.2019.111933.
- [18] ZHANG C, LI Y W, TONG Z T. Impact analysis and optimization of the preliminary design parameters for an organic Rankine cycle radial inflow turbine[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, 45(1): 10. DOI:10.1007/s40430-022-03932-x.
- [19] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*. November 27-December 1, 1995, Perth, WA, Australia. IEEE, 2002: 1942-1948. DOI:10.1109/ICNN.1995.488968.
- [20] MUELLER L, VERSTRAETE T. CAD integrated multipoint adjoint-based optimization of a turbocharger radial turbine[J]. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, 2017, 2(3): 14. DOI:10.3390/ijtp2030014.
- [21] WILSON R B. A simplicial algorithm for concave programming[D]. Boston: Harvard University, 1963.
- [22] LV G C, YANG J G, SHAO W Y, et al. Aerodynamic design optimization of radial-inflow turbine in supercritical CO₂ cycles using a one-dimensional model[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 165: 827-839. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.03.005.
- [23] SPALART P, ALLMARAS S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[C]//30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 06 January 1992-09 January 1992, Reno, NV. Reston, Virginia: AIAA, 1992: 439. DOI:10.2514/6.1992-439.
- [24] GLASSMAN A J. Computer program for design analysis of radial-inflow turbines: NASA TN D-8164[R]. Washington DC: NASA, 1976.
- [25] HE L, NING W. Efficient approach for analysis of unsteady viscous flows in turbomachines[J]. *AIAA Journal*, 1998, 36(11): 2005-2012. DOI:10.2514/2.328.