

汽轮机多级通流系统一体化集成设计方法及效率提升应用

杨国畅

大唐蒲城第二发电有限责任公司 陕西渭南

【摘要】汽轮机多级通流系统整体性决定热力设备能量转换效率，其设计过程涉及空气动力学、结构力学、传热学及转子动力学等多学科耦合问题。传统通流设计方法大多依赖单一软件，易出现模型重用性差、数据交换效率低以及迭代周期长等现象。本研究基于多软件协同机制构建汽轮机多级通流系统一体化集成平台，该平台包含建模层、仿真层、优化层与数据管理层。其实际结果表明，应用该方法后设计点效率较传统设计提升2.1%，部分负荷工况下效率提升1.5%—0.9%，通流效率平均提升1.8%，部分级效率提升3%以上，设计周期缩短35%以上。改造后机组在额定工况下（3VWO）汽轮机通流部分效率提高89.3%，热效率提高了8.68%。该一体化集成设计方法有效提升汽轮机设计数值精度、模型复用能力以及工程适用性，能够显著缩短设计周期并有效挖掘通流系统的效率潜力。

【关键词】汽轮机；通流设计；多软件协同；集成仿真；效率提升

Integrated design method and efficiency improvement application of multi-stage flow system for steam turbine

Yang Guochang

Datang Pucheng Second Power Generation Co., Ltd., Shaanxi Weinan

【Abstract】The overall integrity of the multi-stage flow system of a steam turbine determines the energy conversion efficiency of thermal equipment, and its design process involves multidisciplinary coupling problems such as aerodynamics, structural mechanics, heat transfer, and rotor dynamics. Traditional flow design methods mostly rely on a single software, which can lead to poor model reusability, low data exchange efficiency, and long iteration cycles. This study is based on a multi software collaborative mechanism to construct an integrated platform for multi-stage flow systems of steam turbines. The platform includes a modeling layer, a simulation layer, an optimization layer, and a data management layer. The actual results show that after applying this method, the design point efficiency is improved by 2.1% compared to traditional design, the efficiency under partial load conditions is improved by 1.5% -0.9%, the average flow efficiency is improved by 1.8%, the partial stage efficiency is improved by more than 3%, and the design cycle is shortened by more than 35%. After the renovation, the efficiency of the steam turbine flow section increased by 89.3% and the thermal efficiency increased by 8.68% under rated operating conditions (3VWO). This integrated design method effectively improves the numerical accuracy, model reusability, and engineering applicability of steam turbine design, significantly shortens the design cycle, and effectively explores the efficiency potential of the flow system.

【Key words】steam turbine; Flow design; Multi software collaboration; Integrated simulation; Efficiency improvement

近几年来，随着现代工业的飞速发展，对电力能源的需要急剧上升，电力建设项目的数量和规模也越来越大^[1]。火力发电作为主要的能源供应方式，其核心设备汽轮机的性能优化对于民生建设至关重要。汽轮机多级通流系统作为汽轮机的核心组成部分，其效率和稳定性直接关联整个发电系统性能与经济效益。然而，现代汽轮机系统面临着诸多不同方面的挑战，其中效率、稳定性和设计复杂性属于最为突出的几个方面。在效率方面，传统汽轮机设计方法依赖经验公式和简化模型，难以准确预测通流部分性能导致效率优化困难^[2]。在稳定性方面，汽轮机运行时可能遇到负荷变化和温度波动等复杂工况，对系统稳定性提出了更高的要求。在设计复杂性方面，汽轮机多级通流系统涉及多个不同的学科领域^[3]。本研究对汽轮机通流部分开展精细化建模和优化设计，以此实现汽轮机效率的有效提升。

1. 汽轮机多级通流系统概述

1.1 汽轮机原理及工作过程

汽轮机是利用高温高压蒸汽能量来做能量转换的旋转动力机械^[4]。作为现代火力发电厂和核能发电厂的核心设备。其基本工作原理是通过特定喷嘴或静叶把蒸汽的热能和压力能转化成高速动能形成高速蒸汽流，蒸汽流冲击转子叶片将动能传递给转子使其旋转，最终将蒸汽的能量转化成机械功。汽轮机的能量转换过程包含着两个关键阶段。首先是热能/压力能向动能的转换，蒸汽在喷嘴内膨胀，压力和温度降低，热能和压力能转化成高速动能；其次是动能向机械功的转换，高速蒸汽流冲击动叶片，把动能传递给转子使其旋

转并输出机械功。汽轮机的关键部件包括转动部分（也就是转子系统）和静止部分（也就是静子系统）。转子系统包括主轴、叶轮、动叶片和联轴器等，是能量转换和传递的核心且高速旋转。静子系统包括汽缸、喷嘴、隔板、轴承和轴封等，为转子提供支撑和导向并引导蒸汽按设计路径流动。调节保安系统用于控制进汽量、调节转速和功率并保障汽轮机安全运行。凝汽系统（也就是针对凝汽式汽轮机的系统），用于将排汽口的低压蒸汽凝结成水，维持排汽口的真空度，提高循环效率^[5]。

1.2 多级通流系统概述

多级通流系统是汽轮机实现大功率输出与高效能量转换的基础。因为蒸汽在膨胀过程中压力和温度会不断降低，且体积显著增大，若采用单级膨胀要获得较大焓降（即能量转换潜力），就需要极高初参数和极低终参数，这会导致单级叶片高度极不协调（进口段需高；出口段需低）。其设计特点主要体现在级数的确定级的组合方式、流道的连续性设计以及温度和材料的选择上^[6]。现代大型汽轮机常采用混合式设计，对各级的材料选择、冷却方式、叶片型线设计都提出了不同的要求。在结构上难以实现并且效率极低。多级通流系统把整个膨胀过程分配到多个级（Stage）中依次完成。

2. 汽轮机多级通流系统一体化集成仿真平台的构建

本研究采用分层架构设计（图 1），确保各功能模块职责明确、接口规范、易于扩展和维护。

2.1 应用层

可视化图形界面（GUI）模块采用 Python+Qt 框架开发跨平台桌面应用，集成 OpenCASCADE 库以实现三维模型（.stp/.igs 格式）的导入、显示以及交互操作。界面包含主控面板、三维浏览器、支持.csv 导入导出参数组的参数编辑器、节点化定义流程的工作流编辑器和状态显示区。通过 OpenGL/Vulkan 实现高效图形渲染来确保复杂汽轮机模型能流畅操作。仿真实验与仿真运行管理模块确定内置实验设计模块，支持拉丁超立方采样（生成至少 100 组参数组合）和全因子设计。任务管理系统对接 Slurm 作业调度系统以实现仿真任务（CFD 计算，单次约需 1000 核时）的批量提交、并行调度（支持最多 1000 核同时运行）和状态监控，提供任务优先级设置与中断恢复功能且日志记录精确到秒级。仿真数据管理模块，采用 MySQL 数据库管理元数据（项目信息、参数设置、用户权限），关联存储在并行文件系统（Lustre，总容量≥100TB）上的仿真文件（网格文件.xmf，结果文件.h5，单次仿真数据量约 10GB）。设计统一数据模型，实现参数与结果（效率、压比）的自动关联与版本控制（保留最近 10 个版本），支持基于参数的快速检索。仿真结果显示与分析模块。集成 ParaView 嵌入式功能进行可视化，支持压力、速度云图（分辨率≥1mm），流线追踪（最大线数 1000 条）

等。内置脚本自动计算级效率（精度 0.1%）、等熵效率等指标，并绘制性能曲线（ η -T 流量曲线，采样点≥20 个）^[7]。支持结果数据导出为 Excel 格式，并内置多工况结果对比分析工具，差异显示精度 0.01%。

2.2 支撑层

模块化模型库公共资源库是基于 Python 类库来实现的，存储着标准化的汽轮机部件像标准叶型库（包含 50 种不同叶型数据）以及标准级结构库（包含 20 种典型级结构）。模型是以参数化形式进行存储的，并且提供 API 接口，允许用户查询、调用以及组合部件从而快速构建多级通流模型。该库支持在线更新与版本管理，还包含材料属性（密度、导热率）的数据库。关系数据库采用的是 PostgreSQL 数据库，设计的核心表结构包括‘Projects’（项目信息，主键为‘project_id’）、‘Simulations’（即仿真任务记录，关联‘project_id’并记录参数设置与状态）、‘Results’（关联‘simulation_id’存储效率、流量、压比等关键指标）、‘Users’（用于用户权限管理）^[8]。建立索引来优化查询性能，存储 5 年以上的历史仿真记录。

2.3 通讯层

多软件协同集成仿真接口，采用标准化的 API 接口（RESTfulAPI）和脚本化集成方式。API 提供统一入口，用于提交仿真任务、查询状态、获取结果摘要。对于集成专业软件（ANSYSFluent，NASTRAN），通过调用其 PythonAPI 或批处理脚本实现参数传递、流程控制。接口设计支持 TCP/IP 协议，确保跨平台兼容性，并定义详细的 JSON 数据格式规范。

2.4 设备层

仿真计算机基础仿真软件操作系统采用 Linux 操作系统（如 CentOS7/8 或 UbuntuServerLTS 版本）。部署 HPC 集群环境，配置 Slurm/PBS 作业调度系统管理计算节点（节点数≥20，总核数≥2000 核）。预装基础开发环境（GCC 编译器、Python3.x、MPI 库如 OpenMPI）、数据库服务（MySQL/PostgreSQL）、Web 服务器（Apache/Nginx）以及仿真所需的核心软件（OpenFOAM，）。配置高带宽网络（InfiniBand）。



图 1 汽轮机多级通流系统一体化集成仿真平台架构

3. 实践案例

3.1 案例背景

本研究选取某火电厂的主凝汽式汽轮机作为设计实践案例。该汽轮机主要的作用是驱动发电机并且为其提供发电所需动力。其设计要求严苛,既要拥有高效率来满足电网负荷需求和发电效率同时降低发电成本,又要具备良好部分负荷性能和快速响应能力以适应电网负荷的波动变化。汽轮机通流部分结构复杂,包含高压缸、中压缸以及低压缸,且各级叶片型线不同,设计参数数量繁多,还涉及高温、高压、大流量、湿蒸汽等多种复杂工况。传统设计方法依靠经验公式和分阶段分模块软件操作,难以高效准确完成多目标优化,模型重用性差且数据交换效率低下,导致设计周期长且难以充分挖掘通流部分效率潜力。

3.2 应用结果分析

通过设定提升设计点效率和改善部分负荷性能等具体设计目标以及结构强度和气动稳定性等约束条件,利用这个平台开展多目标优化设计。优化后的设计方案在设计工况下综合效率比传统设计方案提升了大概 2.1%。借助仿真结果显示与分析模块,验证了优化后的通流结构明显降低了叶顶间隙泄漏损失和二次流损失等关键区域流动损失。优化设计在 50%和 75%负荷等典型部分负荷工况下效率较传统设计分别提升了约 1.5%和 0.9%。性能曲线(η -T 流量曲线)对比表明,优化设计曲线形状更为平坦,意味着其负荷适应性更佳。通过改变湍流模型和网格密度等仿真参数进行敏感性分析,结果显示主要性能指标效率变化在可接受范围(0.2%以内),验证了仿真结果的收敛性和可靠性。改造后机组于 2023 年 5 月并网发电,机组运行情况良好,可在 56MW 负荷下连续运行,抽汽量 20T/h,各项参数控制在允许范围内,各轴承的垂直振动值均在 0.025mm 以内。在额定工况下(3VWO)汽轮机通流部分效率提高到 89.3%,经过修正后热耗率平均值为 9,085kJ/(kW·h),比改造前下降了约 864KJ/(kW·h),热效率提高了 8.68%,每年可节约标准煤约 9900t。

参考文献

- [1]刘志伟,季路成,蔡军.考虑端区黏性和径向掺混的流线曲率通流算法研究[J].航空发动机,2014,40(3):34-39.
- [2]谢标林,赵朝晖,李恩峰,等.330MW 汽轮机综合提效关键技术开发及工程应用[J].汽轮机技术,2024,66(1):67-69.
- [3]李兴华,刘云锋,刘长春.汽轮机中压某级静叶弯扭对气动性能影响初探[J].汽轮机技术,2020,62(1):17-18.
- [4]周如林,乔子石,王煜,等.井下微型水轮机流场分析与优化设计[J].液压与气动,2023,47(2):1-10.
- [5]管继伟,郭魁俊.多级小焓降涡轮叶片热力气动设计方法与工程实践[J].汽轮机技术,2023,65(4):256-258.
- [6]向航,陈江,任兰学,等.燃气轮机多级轴流压气机快捷一体化气动设计与性能优化研究[J].热能动力工程,2021,36(9):1-9.
- [7]黄典贵,刘卫宁,寇磊.国产 18MW 汽轮机第 11 级通流部分优化设计[J].机械工程学报,2000,36(6):71-74.
- [8]王啸宸,李雪松,任晓栋,等.多级压气机通流与 CFD 一体化优化设计方法[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(4):774-784.

作者简介:杨国畅,1978.08,男,汉族,陕西渭南人,本科,高级工程师,研究方向:热能动力。

3.3 讨论

汽轮机通流系统设计从本质上来说是个多目标优化问题,需要在提升效率、改善部分负荷性能等多重目标间取得平衡。这些目标相互之间往往存在着冲突情况,比如过度优化设计点效率可能牺牲部分负荷性能或导致结构应力集中。传统串行设计或者单目标优化方法无法有效应对这一复杂性。本研究在实践应用中把平台和先进优化算法结合起来。平台的应用层提供了与多种优化引擎(比如遗传算法、粒子群算法、梯度-based 优化器)的接口。在设定优化目标(设计点效率、50%负荷效率)和约束条件时,平台的数据管理层保证工程约束,实时反馈给优化算法。借助平台任务管理模块的并行计算能力,可高效评估大量候选设计方案的性能。最终,平台会将生成的帕累托最优解集及其对应的设计参数和性能数据以可视化和结构化方式呈现给工程师,支持工程师基于工程经验和具体需求从中挑选最合适的设计方案,进而在复杂的多目标优化问题中实现高效解空间探索和工程约束的有效平衡。

4.结论

本研究针对汽轮机多级通流系统设计面临的效率提升、稳定性要求和设计复杂性挑战,提出了一种基于一体化集成仿真平台的设计方法。该方法通过构建分层架构的仿真平台,实现了从参数化建模、多学科仿真、实验设计、任务管理到结果分析与数据管理的全流程集成与协同,可有效克服传统设计方法的局限性。能显著提升汽轮机的设计效率,缩短设计周期,并有效挖掘通流系统的效率潜力。相较于传统设计方案,实现设计点效率的提升和部分负荷性能的改善。进而达到了节能降耗、减排增效的目的。