

燃气轮机二次空气系统流体网络数值方法研究进展

刘子祎^{1,3}, 王辉², 李星星², 王偲臣^{1,3}

(1. 中国科学院工程热物理研究所 先进燃气轮机实验室, 北京 100190;

2. 国家管网集团联合管道有限责任公司 西部分公司, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对燃气轮机二次空气系统流体网络数值模拟技术, 回顾了流体网络数值计算方法和流程以及典型流阻元件流动与传热特性机理等方面的研究进展; 重点归纳总结了篦齿封严、轮缘密封和旋转盘腔等二次空气系统重要流阻元件特性分析的常用研究方法 with 结果; 在此基础上, 提出二次空气系统流体网络数值模拟技术的发展需求和方向, 主要包括: 完善二次空气系统稳态计算方法, 降低算法初值敏感性并提升收敛速度; 流阻元件多物理场耦合数值模拟研究及特性分析; 提高元件一维流动模型的计算精度, 优化单个流阻元件及其在整个系统中的相互作用, 进而提高二次空气系统整体设计水平。

关键词: 二次空气系统; 流体网络法; 数值模拟; 流阻; 换热; 流动参数

中图分类号: TK472

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.01.001

[引用本文格式] 刘子祎, 王辉, 李星星, 等. 燃气轮机二次空气系统流体网络数值方法研究进展[J]. 热能动力工程, 2024, 39(1): 1-11. LIU Zi-yi, WANG Hui, LI Xing-xing, et al. Advances in numerical methods for fluid networks in secondary air systems of gas turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 1-11.

Advances in Numerical Methods for Fluid Networks in Secondary Air Systems of Gas Turbines

LIU Zi-yi^{1,3}, WANG Hui², LI Xing-xing², WANG Si-chen^{1,3}

(1. Advanced Gas Turbine Laboratory, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190; 2. Western Branch of National Pipe Network Group United Pipeline Co., Ltd., Urumuqi, China, Post Code: 830000; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100049)

Abstract: Aiming at the numerical simulation technology of the fluid network in the secondary air system of gas turbines, the research progress in numerical calculation methods and processes, flow characteristics and heat transfer mechanisms of typical flow resistance components, and other aspects are reviewed. The common research methods and results for analyzing the characteristics of important flow resistance components in the secondary air system, such as labyrinth seals, rim seals, and rotating disk cavities, are emphatically summarized. On this basis, the development needs and directions of fluid network numerical simulation technology for secondary air systems are proposed, mainly including improving the steady-state calculation methods for secondary air systems, reducing the sensitivity of initial values of the algorithm and improving the convergence speed, carrying out the multi-physical field coupling numerical simulation study and characteristic analysis of flow resistance elements, improving the calculation accuracy of one-dimensional flow models for elements, and optimizing individual flow resistance elements and their interactions in the entire system, thereby improving the overall design level of the secondary air system.

收稿日期: 2023-04-13; 修订日期: 2023-05-07

基金项目: 中科院战略性先导科技专项(E22C080101)

Fund-supported Project: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (E22C080101)

作者简介: 刘子祎(1995-), 男, 中国科学院工程热物理研究所硕士生。

Key words: secondary air system, fluid network method, numerical simulation, flow resistance, heat exchange, flow parameters

引 言

目前,燃气轮机技术的发展趋势是向高效率和低污染方向发展,通过采取提高压比、涡轮进口温度和部件效率等措施不断提高热效率^[1]。近几十年来,涡轮进口温度正以每年约 20 ~ 30 °C 的速度增加^[2],远超耐高温金属材料的研发速度。二次空气系统为燃气轮机在所有工况条件下提供可靠的工作环境,因此,合理的空气系统设计计算对保证燃气轮机高效、安全可靠运行至关重要。

国内外针对二次空气系统的设计计算均采用流体网络求解和元件模型化的方法,将复杂的三维流体结构离散成一维流体元件和节点组成的拓扑结构,采用经验关系式计算每个元件的流动与传热,并结合网络拓扑关系求解方程组,以确定每个元件的流量与换热量及每个节点的温度、压力等参数^[3]。

国外对于流体网络法建模的研究起步较早,1936 年,Cross^[4]已经对空气系统的流体网络建模方法进行了详细阐述,考虑流体压力和阻力平衡简化各流路的动量方程,并联立方程组求解得到各流路的流量和压力。美国 NASA 最早将流体网络法应用于航空发动机的设计计算,基于实验数据得到不同类型元件的动量方程,对各元件单独求解^[5]。1989 年,Kumar 等人^[6]开发了一维稳态流体网络通用模拟程序,用于预测涡轮冷却通道的流动和换热,为系统发展流体网络通用算法奠定了基础。直到 20 世纪 90 年代初,流体网络数值模拟才真正趋于完善,并应用于航空发动机的二次空气系统。Kutz 等人^[7]提出用管道和腔室表达空气系统的流体网络,对元件使用动量方程,对腔室使用连续方程和能量方程的求解方法,并探讨了典型元件的流动特性和数学模型,其研究成果被广泛借鉴参考。文献[8-11]研究了流路管道压力损失、旋转效应和壁面传热等,改进了旋转孔板、篦齿封严等典型元件的建模及计算方法。国内对于流体网络法建模研究起步较晚,文献[12-15]对流体网络法的研究基于元件等截面积的假设,不考虑进出口动量的变化,限制了其在涡轮内部的计算精度。郭文等人^[16]考虑了元件截面积变化与进出口动量变化,可以比较准确地计算出叶片内部冷却流量和压力、温度分布,以及冷气沿程的压力损失,但仅限于定常计算。吴宏等人^[17-20]

研究了篦齿封严等典型元件的一维非定常计算模型,以及空气系统、盘腔结构的一维非定常计算,取得了较好的结果。

近年来,二次空气系统流体网络数值计算方法虽已愈趋成熟,对于算法实现和流阻元件特性研究尚有以下方面需不断改进完善:在求解复杂网络时还存在收敛速度和稳定性较低的情况;流阻元件在宽工况条件下的流动特性仍需进行扩充;对于流阻元件的机理研究还需进一步整合模化形成相关数学模型。

本文从流体网络数值计算方法和流程及典型流阻元件流动传热的特性机理等方面对国内外燃气轮机二次空气系统流体网络数值方法的研究情况进行综述,重点归纳总结了篦齿封严、轮缘密封及旋转盘腔等二次空气系统重要流阻元件特性分析的常用研究方法,最后对未来的研究重点和发展趋势进行展望。

1 流体网络数值计算方法

二次空气系统是指主燃气通道中的气流以外其他所有气体流路组成的系统,其气流都来自压气机和风扇,根据使用该气流部位所需的流量、压力、温度等在适当位置引出空气,经过一系列引气管道、密封件、孔和盘腔等流动结构元件输送至相对低压的涡轮或其他部位,实现冷却高温零部件、封严、轴向负荷控制及转静间隙控制等功能后,最后通过管路或与主流汇合排出机体。其典型布局如图 1 所示。

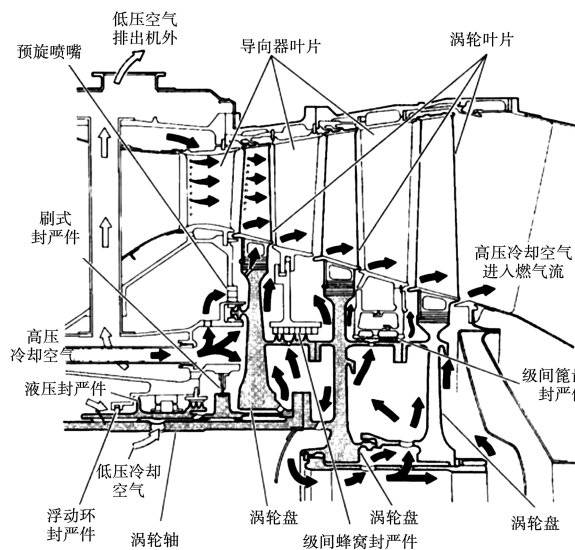


图 1 典型空气系统流路和结构^[21]

Fig.1 Typical air system flow path and structure^[21]

流体网络法是将二次空气系统抽象简化成元件和节点组成的流体网络,对各典型流动结构进行分析,建立可模拟其流动特征的元件模型,并按流路布

局的拓扑关系将各元件连接形成完整的内流空气系统计算网络。由元件和节点构建的简单流体网络如图 2 所示。

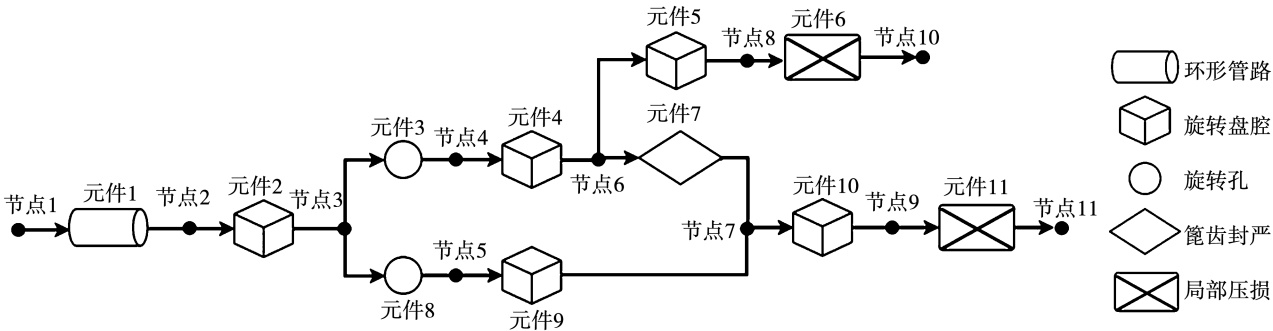


图 2 元件-节点流体网络
Fig. 2 Element-node fluid network

流体网络法计算原理是通过将空气系统中的流阻和换热特性抽象成一些典型的流阻和换热元件,应用已有的经验或半经验理论关系式建立数学模型。基于一维可压流动和换热的特性公式,将二次空气系统的工程计算转化为数学上的网络求解。流体网络计算的流动控制方程组包括连续方程、动量方程及能量方程,同时还应考虑旋转及换热等影响。

因此,二次空气系统的数学模型为非线性方程组。该方法计算分为两重迭代过程,首先给定系统网络的已知条件,即各进口节点总温总压、出口节点静压、旋转部件转速以及各元件的几何参数和流阻特性。对各腔给定温度和压力初值,根据初值和元件特性计算各分支的流量,用流量平衡残差修正腔室压力直至收敛,之后由能量平衡关系对温度场进行修正,根据修正后的温度重新修正压力,直至分支流量、各节点温度和压力均达到收敛。计算流程如图 3 所示。

近年来,二次空气系统流体网络数值计算的研究重点主要为系统稳态数值计算方法的改进,以降低算法初值敏感性并提升收敛速度,并完善多物理场、多计算域的耦合求解方法。

数值方法改进方面,在国外,Muller^[22]提出在节点压力场初始化时提取节点压力平均值的方法;Gallar 等人^[23]开发了空气系统瞬态响应程序,实现对变工况条件的计算;Chowdhury 等人^[24]采用逐点计算方式求解方程组;Chaquet 等人^[25]提出了一种研究边界条件不相容性和耦合问题的收敛性方法。

在国内,潘耘峰^[26]构建了自定义元件并应用于

流体网络分析;张婷婷等人^[27]、包航凯^[28]、王磊等人^[29]在提高算法的收敛性方面进行了深入研究;赵鸿琛^[30]开发了一维流体网络计算程序并通过数值计算加以验证。

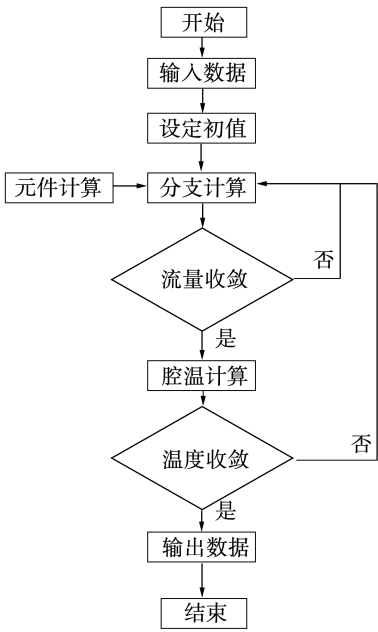


图 3 流体网络法计算流程^[21]
Fig. 3 Calculation flow chart of fluid network method^[21]

多物理场、多计算域耦合求解方面,在国外,Hunt 等人^[31]实现了流固共轭传热耦合建模;Izadi 等人^[32]耦合了外部换热、结构传导和叶片内冷网络;Ganine 等人^[33]实现了对空气系统的流-热-固耦合建模。在国内,侯升平等人^[15]开发应用程序并进行了流固耦合的算例验证;林立^[34]通过数值模拟分

析了盘腔流动状态与转速和流量等关键参数的关系;郭晓杰^[35]通过对空气系统的流体域计算和热端部件固体域热分析建立了耦合计算平台;吴宏升^[36]提出了在流体网络建模计算中对简单分支采用四阶龙格-库塔法积分求解,对复杂分支采用经验损失系数求解的方法。

2 流阻元件特性分析

尽管不同的二次空气系统结构布局千变万化,但是在流路中引起流动参数变化的都可以归纳为孔板、旋转通道、转静间隙封严和腔室等几类元件,空气流过每类元件都具有不同的流动和换热特征。二次空气系统流体网络分析的准确性很大程度取决于元件模型对物理对象描述的合理性。

2.1 基本通用元件

基本通用元件包括管道、孔口和局部损失元件等,这些通用元件不仅存在于燃气涡轮空气系统中,在一些其他工程的管网系统计算中也经常涉及,因此对其特性的研究已经比较充分。

Miller^[37]建立的通用元件模型,如弯管、阀门、管道、孔板及三通接头等,已在管网计算商业软件中得到应用。Alexiou 等人^[38]提出的具有转-静边界的旋转通道通用组件模型和孔口元件模型也被广泛采用,模型如图 4 所示。

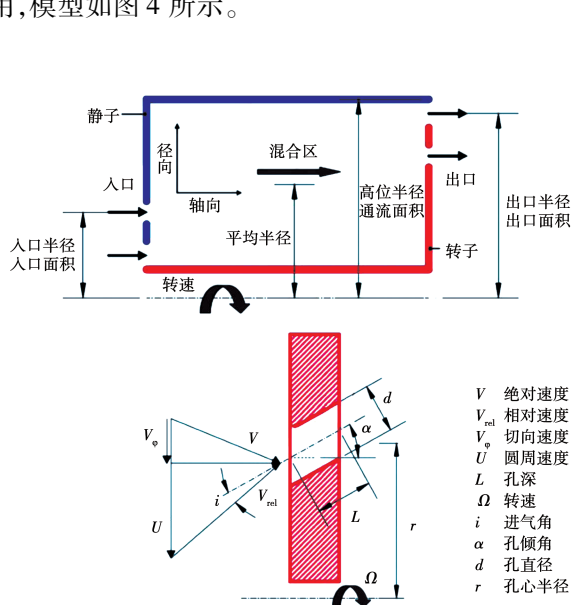


图 4 转-静旋转通道通用组件及孔口元件模型^[38]

Fig. 4 Common rotor-stator component

and orifice element models^[38]

对于二次空气系统中一些稍微复杂的结构,如

非规则截面流道、各类复杂腔室等,由于结构的独特性,缺乏一些通用的数学模型,目前的处理方法是统一视为局部损失元件。对于不同的结构模型,损失系数需要依据实际经验进行赋值^[39]。

在空气系统计算中需要考虑的典型流阻元件主要包括以篦齿为主的内部节流封严、轮盘缘板转静间隙处封严以及旋转盘腔。

2.2 篦齿封严

篦齿封严是空气系统中最常见的重要部件之一,其基本原理是基于一系列翅片和腔体的压降。气流产生涡系以及增强剪切层作用对压力进行耗散,从而降低转静间隙的流量泄漏,以实现气路封严、防止滑油泄漏和高温气体倒灌及流量分配的功能。尽管近年出现了刷式封严、指尖封严、石墨封严等性能更好的新型封严结构,但受技术条件限制,目前篦齿封严仍是最广泛使用的动密封方式。篦齿封严最早的结构如图 5 所示,采用的是标准的直通齿形,后续发展出斜齿、台阶齿、交错齿等。密封间隙是影响篦齿封严特性的最敏感尺寸,为控制间隙,避免或减缓齿尖磨损,在静子表面采用蜂窝结构和表面涂层技术。篦齿结构的演变推动了相关研究工作的开展。

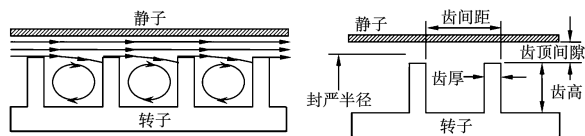


图 5 篦齿封严的内部流动和几何参数^[40]

Fig. 5 Internal flow and geometric parameters of labyrinth seal^[40]

泄露量是用来衡量篦齿封严性能最重要的参数,在不同几何参数和运行工况下,无法用统一的公式来准确计算泄露量^[41]。对于篦齿封严元件特性,已经建立了一些半经验模型。直通式篦齿封严理想流量计算模型最早由 Martin^[42]提出,在此基础上引入流量系数 C_d 和携带因子 K 等经验系数来考虑实际篦齿中的粘性效应影响。Vermes^[43]提出了用残余流量因子表征携带因子,并推导了其与篦齿几何参数的关系式。Zimmermann 等人^[44]根据实验数据提出了一种计算直通式篦齿携带因子的方法。从文献调研看,针对篦齿封严泄漏特性的数值研究,大都

采用 Stocker^[45] 系数来衡量篦齿的泄漏特性。

针对篦齿结构参数和运行工况对泄漏量的影响,国内外学者进行了大量有关篦齿封严流动特性的研究工作。Willenborg 等人^[46]研究了篦齿封严的泄漏系数与雷诺数、马赫数及结构尺寸之间的关系。Lee^[47]通过实验研究了直齿和台阶齿的叶顶间隙、齿数和齿前倾角等几何参数对泄漏的影响,并用流动函数描述了密封性能。王海等人^[48]研究了斜齿泄漏系数、流场、压力和马赫数变化的内在联系,以及不同齿数与压比情况下临界截面位置、流量、马赫数等参数的变化规律和原因。Zhang 等人^[49]较为全面地研究了几何参数对密封泄漏量的影响,指出影响泄漏系数的主要参数是密封间隙、齿尖厚度、齿数和齿前倾角,同时指出当台阶高度是密封间隙宽度的两倍以上时,其对密封性能的影响可以忽略不计。郭佳男等人^[50]通过实验和数值计算研究了齿数、齿顶间隙、压比和雷诺数对篦齿泄漏流量和流量系数的影响,其台阶式篦齿流场云图如图 6 所示。

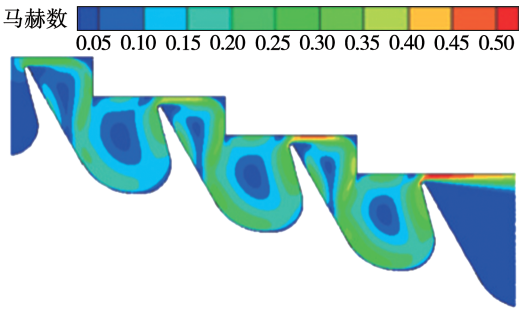


图 6 台阶式篦齿流场云图^[50]

Fig. 6 Flow field nephogram of stepped labyrinth seal^[50]

篦齿封严风阻温升特性研究方面,比较有代表性的经验公式由 McGreehan 等人^[51]提出,认为光滑静子表面的台阶型篦齿在前一半封严齿中产生约 70% 的风阻温升。Willenborg 等人^[52]通过实验和有限元计算指出传热主要由雷诺数决定。Denecke 等人^[53]对影响风阻温升的参数做了无量纲分析,认为风阻系数与进出口压比、轴向雷诺数、周向马赫数、旋流系数、无量纲几何参数、比热比和普朗特数等有关。纪国剑等人^[54]研究了蜂窝结构尺寸对风阻温升特性的影响,表明了总温升随蜂窝直径的增大而减小。Sun 等人^[55]采用理论分析、数值模拟与实验相结合的方法系统地研究了篦齿封严的风阻温升特

性。晏鑫等人^[56-59]采用流体计算软件 CFX 对篦齿封严进行了三维数值计算,分析了压比、转速、预旋、质量流量和几何参数等对篦齿封严风阻温升的影响与变化关系。王鹏飞等人^[60]基于实验条件并结合 $k-\varepsilon$ 湍流模型数值计算对篦齿风阻温升特性进行研究,其实验装置如图 7 所示。研究表明,篦齿泄漏流温升随进出口压比、雷诺数、封严间隙与齿尖厚度比的增加而减小,随转速的增加而增大,台阶型封严篦齿前两道封严齿内的温升占总温升的 60%,并提出了台阶型篦齿泄漏流温升的经验公式。

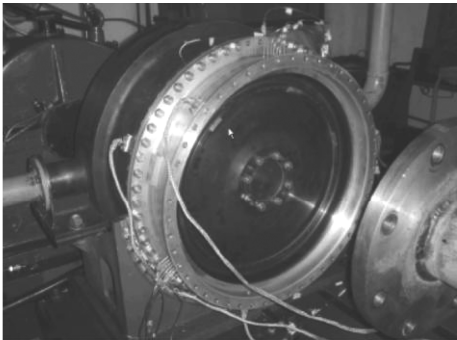


图 7 旋转篦齿实验台^[60]

Fig. 7 Test rig of rotating labyrinth seals^[60]

综上所述,国内外诸多学者采用数值模拟和实验方法对篦齿封严的流动特性、密封泄漏影响因素以及发展篦齿温升精确预测的相关研究已比较充分全面,计算模型也在不断修正完善,可以较好地满足元件模型分析计算需求。

2.3 轮缘密封

燃气入侵是涡轮转静盘腔可能遇到的严重问题,燃气入侵必然导致盘温升高,甚至盘心过热、轴承损坏等严重后果。轮缘密封位于涡轮转静盘腔的顶部边缘,具有增大燃气入侵流阻、为盘腔提供冷却气流等功能,并可阻止主流高温高压燃气进入盘腔,防止涡轮盘和轴承过热引起的安全性问题^[61]。涡轮盘腔内封严冷气量对于燃气轮机整机性能和相应热端部件的寿命至关重要,冷气不足会导致主流高温燃气入侵至盘腔深处,冷气过量会降低整机效率以及经济性。因此,轮缘密封研究重点主要在最小封严流量和封严效率方面。

关于燃气入侵和轮缘密封的研究早在 20 世纪 70 年代就已开始。Owen 等人^[62-65]及其团队对燃

气入侵的理论研究最经典,将燃气入侵盘腔的原因分为3种,即轮盘泵效应导致的旋转诱导、外部压力不均匀导致的外部诱导、旋转诱导和外部诱导同时存在的复合诱导,旋转诱导和外部诱导的燃气入侵原理分别如图8和图9所示。现有研究数据表明,外部诱导比旋转诱导所需的封严流量大得多。

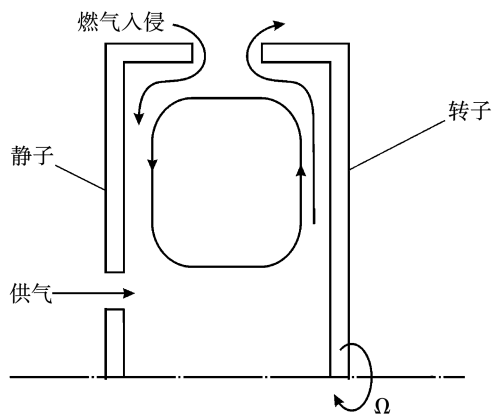


图8 旋转诱导燃气入侵原理^[65]

Fig. 8 Principle of rotationally-induced gas ingress^[65]

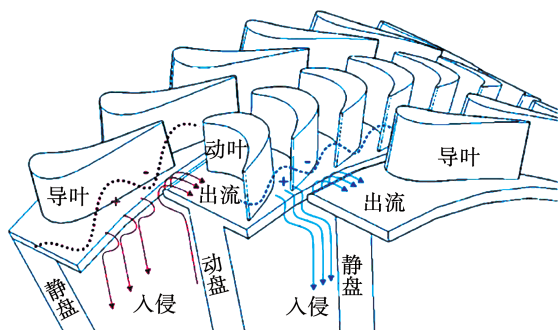


图9 外部诱导燃气入侵原理^[62]

Fig. 9 Principle of externally-induced gas ingress^[62]

Green 等人^[66]首次对包含完整涡轮级结构的轮缘密封进行了实验。Bohn 等人^[67]带领团队建立了旋转实验台,给出了几种典型结构封严流量的经验关系式。Sangan 等人^[68]、Owen^[62-64]提出并发展了模拟轮缘密封的孔板流量模型,给出了旋转诱导和外部诱导下最小封严流量的计算模型。随后,Zhou 等人^[69]提出了孔板流量模型中最小封严流量与流量系数之比的最佳值,从而提高了最小封严流量的预测精度。在国内,Liu 等人^[70]进一步把复杂转静盘腔内周向压力波的定量影响纳入孔板流量模型,从而扩大了模型的适用范围。在燃气入侵理论预测

方面,Owen 等人^[71]发现,径向外流闭式转静系盘腔是实际应用中涡轮盘腔的主要形式,无量纲湍流参数 λ_t 对腔内流态有重要影响。Savov 等人^[72]提出一种基于湍流的燃气入侵预测模型。Chew 等人^[73]认为,燃气入侵是非定常、多模态过程。Johnson 等人^[74]提出一种非定常涡轮叶片压力场对燃气入侵影响的估算方法。Rabs 等人^[75]指出开尔文-亥姆霍兹不稳定性是导致轮缘间隙流动问题复杂的主要原因。Jakoby 等人^[76]指出,转静盘腔内存在3个大尺度低频脉动,其低频旋转结构如图10所示。由图10可知,低频低压区主流入侵明显,非定常仿真解比定常解更接近实验获得的封严效率。

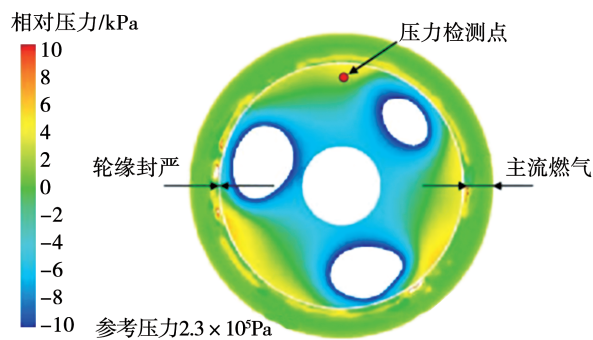


图10 转静盘腔低频旋转结构^[76]

Fig. 10 Low frequency rotating structure of rotor-stator disk cavity^[76]

目前,轮缘密封燃气入侵流动特性研究已经广泛应用于指导二次空气系统和封严结构设计。随着精细化设计理念的深入以及数值仿真和测试技术的进步,应用非定常仿真和测试技术研究盘腔内流场,将是燃气入侵和轮缘密封的重点研究方向。

2.4 旋转盘腔

旋转盘腔是二次空气系统的重要组成部分,由于高速旋转所产生的离心力、哥氏力和由离心力衍生的浮升力,使得旋转盘腔内流动与换热特别复杂^[77]。根据其结构形式可分为转静系盘腔和转转系盘腔,压气机盘腔是典型的转转盘腔,而涡轮盘腔则多为转静盘腔。由于盘腔内部流动结构十分复杂,将其整体作为一个元件建模无法准确表征其流动特性。因此,通常需要将其沿径向分割为若干腔室单元,在每个单元中,按照不同径向位置的流动特征分别计算流动参数,得到沿径向分布的旋流、压

力、温度变化,从而实现盘腔元件建模,其分级方式如图 11 所示。

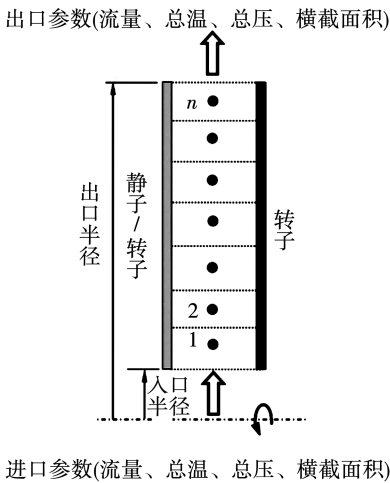


图 11 转-静盘腔与转-转盘腔的径向分级建模^[45]
Fig. 11 Radial hierarchical modeling of rotor-stator disk cavity and rotor-rotor disk cavity^[45]

在空气系统中,转转盘腔是压气机盘腔的典型特征,冷却空气通常由低位轴向通流而不存在径向进出,因此对其研究更多关注对盘面换热特性的影响,对于空气系统整体流阻计算的影响较小。而复杂的转静盘腔则通常用于高压涡轮盘冷却、封严和为叶片提供冷气,其流阻特性的准确计算直接关系到轮缘密封、动叶冷却甚至整机的安全可靠运行。

国内外学者对转静盘腔的流动特性进行了大量的研究工作,并建立了相对完善的理论体系。对于简单转静盘腔内的流动结构,Batchelor^[78]认为,在转静盘之间存在 3 个区域,即转盘附件边界层、静盘附件边界层以及两边界层之间的旋转核心区,静盘边界层内的流体径向内流,转盘边界层内流体径向外流,旋转核心区的流体则以一定转速作旋转运动。而 Stewartson^[79]认为,转盘与静盘之间不存在旋转核心,流体切向速度在轴上分布由转盘转速逐渐减至静盘的零。Daily 等人^[80-81]通过实验研究发现,根据无量纲参数转静间距比、旋转雷诺数的变化,转静盘腔内可能出现 4 种不同流态形式,并给出了盘面转矩系数的关联式。Owen 等人^[82]将转静盘腔腔室划分为核心区和源区两部分,提出转静盘腔一维流动模型,并获得广泛应用。Poncet 等人^[83]研究了转静盘腔中 Batchelor 与 Stewartson 两种流态的转化

规律,提出采用当地流量系数将气体转速与边界条件相关联。

林立等人^[84]通过数值模拟和实验,对转静盘腔传统一维流动模型中源区边界及核心区气体转速的计算提出修正,有效改进了一维模型对腔内径向压差的计算精度。柳光等人^[85]通过数值模拟研究得出,转静盘腔内流动由进口旋转比、湍流参数和间距比决定,修正了不同间距比工况下旋转比幂指数关系式,并进一步计算出盘腔内的压力分布。

在传热方面,国外的 Roy 等人^[86]、Pellé 等人^[87]以及国内的徐国强^[88]、丁水汀等人^[89]也都在考虑旋转、来流、几何的影响下总结出了许多经验关联式,通过轮盘冷却效率和温差系数考察轮盘表面换热。

3 总结与展望

(1) 二次空气系统稳态计算研究中,流体网络算法已相对成熟,但计算稳定性有赖于初值设置,在求解复杂网络时存在收敛速度和稳定性较低的情况。研究表明,采用构造隐式迭代格式以扩大迭代步长,引入松弛因子的线性求解方法可以提高算法的收敛性;将蒙特卡罗方法计算结果作为流量残差法节点参数初值,在降低算法对初值敏感性的同时提升了收敛速度。对已有计算程序数值方法改进完善,开发快速求得精确收敛解的计算程序,将是二次空气系统流体网络数值计算的研究重点。

(2) 国内外学者针对典型流阻元件流动与换热特性机理已开展了大量研究工作,但通常是站在独立部件的角度展开,例如对于轮缘封严的关注重点主要放在研究最小封严流量与封严效率,对旋转盘腔则关注其盘面换热特性与盘腔内流动结构等,得到的结论可以很好地用于指导部件设计。而在整个系统中,典型流阻元件彼此间存在着流动上下游互相影响的关系,其沿程流阻和换热特性相关研究缺少相关应用于流体网络计算的模型。因此,优化每个流阻元件的数值模型及其在整个系统中的相互作用关系是提高二次空气系统设计水平的重要研究方向。

(3) 目前应用的旋转盘腔一维计算模型中,主要考虑旋流引起的旋转温升,没有考虑壁面换热的

影响,风阻温升也没有形成较为统一的计算模型。应在盘腔每个径向单元间的能量平衡关系中综合考虑风阻效应、壁面换热、旋转泵效应引起的沿程温升,对相应的元件模型进行优化,提高一维流动模型的计算精度。

参考文献:

- [1] 李孝堂. 燃气轮机的发展及中国的困局[J]. 航空发动机, 2011, 37(3): 1-7.
LI Xiao-tang. Development of gas turbine and dilemma in China [J]. Aeroengine, 2011, 37(3): 1-7.
- [2] 张成利, 王新军, 王 松, 等. 燃气轮机二次空气系统的设计要求与布置特点分析[J]. 燃气轮机技术, 2010, 23(2): 39-42, 52.
ZHANG Cheng-li, WANG Xin-jun, WANG Song, et al. An analysis of design requirements and configuration features of gas turbine secondary air system[J]. Gas Turbine Technology, 2010, 23(2): 39-42, 52.
- [3] 吴俊宏. 流体网络方法在航空发动机中的应用[C]//第十二届中国 CAE 工程分析技术年会论文集, 长春, 2016.
WU Jun-hong. Application of fluid network methods in aeroengines [C]//Proceedings of the 12th China CAE Engineering Analysis Technology Annual Conference, Changchun, 2016.
- [4] CROSS H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors [J]. University of Illinois Bulletin, 1936, 286(1): 42-47.
- [5] DAMEROW W P, MURTAUGH J P. Experimental and analytical investigation of the coolant flow characteristics in cooled turbine airfoils[R]. Washington: NASA Report No. CR-120883, 1972.
- [6] KUMAR G, ROELKE R. A generalized one-dimensional computer code for turbomachinery cooling passage flow calculations[R]. Reno: AIAA-89-2574, 1989.
- [7] KUTZ K J, SPEER T M. Simulation of the secondary air system of aero engines[J]. Journal of Turbomachinery, 1994, 116(2): 306-315.
- [8] EBENHOCH G, SPEER T M. Simulation of cooling systems in gas turbines[J]. Journal of Turbomachinery, 1996, 118(2): 301-306.
- [9] ALEXIOU A, MATHIOUDAKIS K. Secondary air system component modeling for engine performance simulations[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(3): 031202. 1-031202. 9.
- [10] BENRA F K, DOHMEN H J, SCHNEIDER O. Application of an enhanced 1D network model to calculate the flow properties of a pre-swirl secondary air system [C]//ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air, Berlin, Germany, 2008.
- [11] CARCASI C, FACCHINI B, GORI S. Heavy duty gas turbine simulation: Global performances estimation and secondary air system modifications [C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air, Barcelona, Spain, 2006.
- [12] 吴丁毅. 内流系统的网络算法[J]. 航空学报, 1996, 17(6): 653-657.
WU Ding-yi. Network technique of internal systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996, 17(6): 653-657.
- [13] 陆海鹰, 杨燕生, 王 鸣. 航空发动机空气系统特性的数值模拟[J]. 航空发动机, 1997, 6(1): 6-13.
LU Hai-ying, YANG Yan-sheng, WANG Ming. Numerical simulation of air system characteristics of aeroengine [J]. Aeroengine, 1997, 6(1): 6-13.
- [14] 刘玉芳, 邓化愚, 郭 文, 等. 发动机空气系统的改进设计[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2001, 14(3): 48-53.
LIU Yu-fang, DENG Hua-yu, GUO Wen, et al. Improvements on engine air system design [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2001, 14(3): 48-53.
- [15] 侯升平, 陶 智, 韩树军, 等. 流固网络一体化模拟方法探索及应用[J]. 航空动力学报, 2010, 25(3): 509-514.
HOU Sheng-ping, TAO Zhi, HAN Shu-jun, et al. Simulation approach to the fluid-thermal network and the application [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(3): 509-514.
- [16] 郭 文, 吉洪湖, 蔡 毅, 等. 高压涡轮导叶内冷通道流动特性计算分析[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 831-835.
GUO Wen, JI Hong-hu, CAI Yi, et al. Computational analysis of the HP turbine nozzle guide vane internal flow characteristics [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 831-835.
- [17] 吴 宏, 李 澎, 陶 智, 等. 直齿直通式篦齿封严计算模型[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2180-2187.
WU Hong, LI Peng, TAO Zhi, et al. Rectangular tooth straight through labyrinth seal analytical model [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2180-2187.
- [18] 吴 宏, 李 澎, 刘冬冬, 等. 旋转通道一维非定常计算模型[J]. 航空动力学报, 2013, 28(8): 1681-1688.
WU Hong, LI Peng, LIU Dong-dong, et al. One-dimensional unsteady analytical model of rotating passage [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(8): 1681-1688.
- [19] 吴 宏, 李 澎, 黄丹萍, 等. 二次空气系统盘腔一维非定常计算方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2801-2809.
WU Hong, LI Peng, HUANG Dan-ping, et al. One-dimensional unsteady simulation method of cavity in secondary air system [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2801-2809.
- [20] 李 澎, 吴 宏, 陶 智. 二次空气系统一维非定常计算方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(7): 1710-1720.
LI Peng, WU Hong, TAO Zhi. One-dimensional unsteady calculation method of secondary air system [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(7): 1710-1720.
- [21] 刘松龄, 陶 智. 燃气涡轮发动机的传热和空气系统[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018.
LIU Song-ling, TAO Zhi. Heat transfer and air system of gas turbine engine [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University

- Press,2018.
- [22] MULLER Y. Secondary air system model for integrated thermomechanical analysis of a jet engine[C]//ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air, Berlin, Germany, 2008.
- [23] GALLAR L, CALCAGNI C, PACHIDIS V, et al. Development of a one-dimensional dynamic gas turbine secondary air system model – Part I: Tool components development and validation[C]//ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air, Orlando, Florida, USA, 2009.
- [24] CHOWDHURY N H K, ZIRAKZADEH H, HAN J C. A predictive model for preliminary gas turbine blade cooling analysis[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(9): 1–12.
- [25] CHAQUET J M, CORRAL R. Incompatible boundary conditions in heat equation coupled with air system models[C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2020.
- [26] 潘耘峰. 燃气透平冷却空气系统流体网络法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- PAN Yun-feng. Investigation on fluid network method for the analysis of turbine air cooling system[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [27] 张婷婷, 刘振侠, 吕亚国. 流体网络节点残量修正算法的改进[J]. 航空工程进展, 2012, 3(3): 274–278.
- ZHANG Ting-ting, LIU Zhen-xia, LYU Ya-guo. Improvement of fluid network node residue correction algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(3): 274–278.
- [28] 包航凯. 基于管网法的内部及气膜冷却叶片的传热分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- BAO Hang-kai. Analysis on heat transfer of internal and film cooling blade based on pipe-network method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [29] 王磊, 毛军逢, 邱长波, 等. 基于蒙特卡罗法的航空发动机空气系统稳态算法优化[J]. 推进技术, 2021, 42(11): 2506–2514.
- WANG Lei, MAO Jun-kui, QIU Chang-bo, et al. Optimization of steady state algorithm for aero engine air system based on Monte Carlo method[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(11): 2506–2514.
- [30] 赵鸿琛. 无导叶对转涡轮高低压转子盘腔封引气与流动换热研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- ZHAO Hong-chen. Research on the sealing flow and flow heat transfer in the cavity between high and low pressure rotors of a vaneless counter-rotating turbine[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [31] HUNT D, YUAN Y. Modelling conjugate heat transfer within a gas turbine secondary air system using thermo-fluid system simulation[C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2020.
- [32] IZADI A, MADANI S H, HSSEINI, et al. An integrated approach to simulate gas turbine secondary air system[C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2020.
- [33] GANINE V, CHEW J W, HILLS N J, et al. Transient aero-thermo-mechanical multidimensional analysis of a high pressure turbine assembly through a square cycle[C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2020.
- [34] 林立. 燃气轮机转静系盘腔内流动与传热机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- LIN Li. Research on the mechanism of flow and heat transfer in rotor-stator cavities in gas turbine[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [35] 郭晓杰. 航空发动机空气系统与热分析耦合方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- GUO Xiao-jie. Coupling computational approach of secondary air system and heat transfer in aero-engine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [36] 吴宏升. 燃气轮机总体与空气系统耦合计算方法研究与匹配分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- WU Hong-sheng. Research and matching analysis on coupling calculation method of gas turbine and air system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [37] MILLER D S. Internal flow system[M]. UK: BHR Group Limited, 1978.
- [38] ALEXIOU A, MATHIOUDAKIS K. Secondary air system component modeling for engine performance simulations[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(3): 031202. 1–031202. 9.
- [39] MEITNER P L. Computer code for predicting coolant flow and heat transfer in turbomachinery: NASA TP-2985[R]. Washington: NASA, 1990.
- [40] SULTANIAN B. Gas turbines internal flow systems modeling[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [41] 晏鑫, 李军, 丰镇平. 蜂窝密封内流动传热及转子动力特性的研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(2): 201–216.
- YAN Xin, LI Jun, FENG Zhen-ping. Review of the discharge, heat transfer and rotordynamic characteristics of honeycomb seals[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(2): 201–216.
- [42] MARTIN H M. Labyrinth packings[J]. Engineering, 1908(1): 35–36.
- [43] VERMES G. A fluid mechanics approach to the labyrinth seal leakage problem[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1961, 83(2): 161–169.
- [44] ZIMMERMANN H, WOLFF K H. Air system correlations, Part 1: Labyrinth seals[C]//ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Stockholm, Sweden, 1998.
- [45] STOCKER H L, COX D M. Aerodynamic performance of conventional and advanced design labyrinth seals with solid-smooth abradable, and honeycomb lands: CR-135307[R]. Washington:

- NASA,1977.
- [46] WILLENBORG K,KIM S,WITTIG S. Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123 (4): 815 – 822.
- [47] LEE S I, KANG Y J, KIM W J, et al. Effects of tip clearance, number of teeth, and tooth front angle on the sealing performance of straight and stepped labyrinth seals [J]. Journal of Mechanical and Science Technology, 2021, 35: 1539 – 1547.
- [48] 王 海, 陆海鹰, 谷艳萍. 压比和齿数对直通篦齿封严临界流动和泄漏特性影响的数值模拟 [C]//中国航空学会第七届动力年会论文摘要集, 贵州, 2010.
- WANG Hai, LU Hai-ying, GU Yan-ping. Numerical simulation of the effects of pressure ratio and number of teeth on the critical flow and leakage characteristics of straight-through grate seals [C]// Proceedings of the 7th Annual Power Conference of the Chinese Academy of Aeronautics, Guizhou, 2010.
- [49] ZHANG L, ZHU H, LIU C, et al. Experimental and numerical investigation on leakage characteristic of stepped labyrinth seal [C]// ASME Turbo Expo 2016; Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Seoul, South Korea, 2016.
- [50] 郭佳男, 孙 科, 张 浩, 等. 台阶式篦齿封严特性试验与数值研究 [J]. 航空科学技术, 2019, 30(1): 22 – 28.
- GUO Jia-nan, SUN Ke, ZHANG Hao, et al. Experimental and numerical study on stepped labyrinth seal [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(1): 22 – 28.
- [51] MC-GREEHAN W, KO S. Power dissipation in smooth land honeycomb labyrinth seals [C]// ASME 1989 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Toronto, Ontario, Canada, 1989.
- [52] WILLENBORG K, KIM S, WITTIG S. Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123 (4): 815 – 822.
- [53] DENECKE J, DULLENKOPF K, WITTING S. Experimental investigation of the total temperature increase and swirl development in rotating labyrinth seals: GT2005-68677 [R]. Reno: ASME, 2005.
- [54] 纪国剑, 吉洪湖, 黄云霞, 等. 台阶齿蜂窝衬套封严结构风阻特性的研究 [J]. 润滑与密封, 2012, 37(4): 43 – 47.
- JI Guo-jian, JI Hong-hu, HUANG Yun-xia, et al. Investigation of windage heating on step labyrinth seals with honeycomb bush [J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(4): 43 – 47.
- [55] SUN D, ZHOU M, ZHAO H, et al. Numerical and experimental investigations on windage heating effect of labyrinth seals [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2020, 33: 4020057. 1 – 4020057. 9.
- [56] 晏 鑫, 李 军, 丰镇平. 预旋对迷宫密封内流动传热特性影响的研究 [J]. 热能动力工程, 2008, 23(1): 7 – 10.
- YAN Xin, LI Jun, FENG Zhen-ping. A study of the influence of inlet pre-swirl on flow and heat transfer characteristics in labyrinth seals [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(1): 7 – 10.
- [57] 晏 鑫, 李 军, 丰镇平. 预旋对蜂窝密封和迷宫密封内流动传热特性影响 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 772 – 776.
- YAN Xin, LI Jun, FENG Zhen-ping. Influence of inlet preswirl on discharge and heat transfer characteristics of honeycomb and smooth labyrinth seals [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(4): 772 – 776.
- [58] 晏 鑫, 李 军, 丰镇平. 高速旋转光滑面迷宫密封内流动和传热特性的研究 [J]. 动力工程, 2008, 28(2): 190 – 194.
- YAN Xin, LI Jun, FENG Zhen-ping. Investigations on the flow and heat transfer characteristics in high rotating smooth labyrinth seals [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(2): 190 – 194.
- [59] YAN Xin, LI Jun, SONG Li-ming, et al. Investigations on the discharge and total temperature increase characteristics of the labyrinth seals with honeycomb and smooth lands: GT2008-50399 [R]. Berlin: ASME, 2008.
- [60] 王鹏飞, 郭 文, 张靖周. 旋转封严篦齿风阻温升的试验研究与数值分析 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(6): 1402 – 1408.
- WANG Peng-fei, GUO Wen, ZHANG Jing-zhou. Experimental study and numerical analysis of windage heating in rotating labyrinth seals [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1402 – 1408.
- [61] 高 杰, 黄镜玮, 杜玉锋, 等. 燃气轮机轮缘密封气动技术研究进展 [J]. 航空动力学报, 2021, 36(2): 284 – 299.
- GAO Jie, HUANG Jing-wei, DU Yu-feng, et al. Advances in rim seal aerodynamic technology for gas turbines [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(2): 284 – 299.
- [62] OWEN J M. Prediction of ingestion through turbine rim seals: Part I: Rotationally induced ingress [J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(3): 031005. 1 – 031005. 9.
- [63] OWEN J M. Prediction of ingestion through turbine rim seals: Part II: Externally induced and combined ingress [J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(3): 031006. 1 – 031006. 9.
- [64] OWEN J M. Theoretical modeling of hot gas ingestion through turbine rim seals [J]. Propulsion and Power Research, 2012, 1(1): 1 – 11.
- [65] SCOBIE J A, SANGAN C M, OWEN J M, et al. Review of ingress in gas turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(12): 120801. 1 – 120801. 16.
- [66] GREEN T, TURNER A B. Ingestion into the upstream wheel space of an axial turbine stage [J]. Journal of Turbomachinery, 1994, 116: 327 – 332.
- [67] BOHN D E, DECKER A, MA H W. Influence of sealing air mass flow on the velocity distribution in and inside the rim seal of the upstream cavity of a 1.5-stage turbine [C]// ASME Turbo Expo 2003, Collocated with the 2003 International Joint Power Genera-

- tion Conference, Atlanta, Georgia, USA, 2003.
- [68] SANGAN C M, LAIWANI Y, OWEN J M, et al. Fluid dynamics of a gas turbine wheel-space with ingestion[J]. *Journal of Power and Energy*, 2014, 228(5): 508 – 524.
- [69] ZHOU K Y, WOOD S N, OWEN J M. Statistical and theoretical models of ingestion through turbine rim seals[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2013, 135(2): 021014. 1 – 021014. 8.
- [70] LIU D D, TAO Z, LUO X. Development of a new factor for hot gas ingestion through rim seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(7): 072501. 1 – 072501. 10.
- [71] OWEN J M, ROGER R H. Flow and heat transfer in rotating disc systems, Volume 1: Rotor-stator systems[M]. Taunton: Research Studies Press, 1989.
- [72] SAVOV S S, ATKINS N R. A rim seal ingress model based on turbulent transport[C]//ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Charlotte, North Carolina, USA, 2017.
- [73] CHEW J W, GAO F, PALERMO D M. Flow mechanisms in axial turbine rim sealing[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part C): Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(23): 7637 – 7657.
- [74] JOHNSON B V, JAKOBY R, BOHN D E, et al. A method for estimating the influence of time-dependent vane and blade pressure fields on turbine rim seal ingestion[C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air, Barcelona, Spain, 2006.
- [75] RABS M, BENRA F K, DOHMEN H J, et al. Investigation of flow instabilities near the rim cavity of a 1.5 stage gas turbine[C]//ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air, Orlando, Florida, USA, 2009.
- [76] JAKOBY R, ZIERER T, LINDBLAD K, et al. Numerical simulation of the unsteady flow field in an axial gas turbine rim seal configuration[C]//ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air, Vienna, Austria, 2004.
- [77] 曹国璋, 陶智, 丁水汀, 等. 航空发动机传热学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- CAO Guo-zhang, TAO Zhi, DING Shui-ting, et al. Aeroengine heat transfer[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005.
- [78] BATCHELOR G K. Note on a class of solutions of the Navier-Stokes equations representing steady rotationally symmetric flow[J]. *The Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics*, 1951, 4(1): 29 – 41.
- [79] STEWARTSON K. On the flow between two rotating coaxial disks[J]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1953, 49(2): 333 – 341.
- [80] DAILY J W, NECE R E. Chamber dimension effects on induced flow and frictional resistance of enclosed rotating disks[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1): 217 – 232.
- [81] DAILY J W, ERNST W D, ASBEDIAN V V. Enclosed rotating discs with superposed throughflow: Mean steady and periodic unsteady characteristics of induced flow[R]. Report No. 64, MIT Department of Civil Engineering, Hydrodynamics Laboratory, 1964.
- [82] OWEN J M, ROGERS R H. Flow and heat transfer in rotating-disc systems, Volume 1: Rotor-stator systems[M]. Taunton: Research Studies Press, 1989.
- [83] PONCET S, CHAUVE M P, SCHIESTEL R. Batchelor versus Stewartson flow structures in a rotor-stator cavity with throughflow[J]. *Physics of Fluids*, 2005, 17: 75110.
- [84] 林立, 谭勤学, 吴康, 等. 中心进气转静盘腔一维流动模型的改进[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(11): 2584 – 2591.
- LIN Li, TAN Qin-xue, WU Kang, et al. Improvement on one-dimensional flow model of rotor-stator cavity with central inlet[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(11): 2584 – 2591.
- [85] 柳光, 杜强, 胡嘉麟, 等. 不同进口条件下向心流转静系盘腔流动特性研究[J]. *推进技术*, 2017, 38(10): 2381 – 2392.
- LIU Guang, DU Qiang, HU Jia-lin, et al. Flow characteristics in a rotor-stator cavity with various radial inflow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(10): 2381 – 2392.
- [86] ROY R P, XU G, FENG J. A study of convective heat transfer in a model rotor-stator disk cavity[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2001, 123(3): 621 – 632.
- [87] PELLE J, HARMAND S. Heat transfer study in a rotor stator system air gap with an axial inflow[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(8/9): 1532 – 1543.
- [88] 徐国强. 转静系旋转盘腔内冷气的流动与换热特性研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.
- XU Guo-qiang. Study on the flow and heat transfer characteristics of cold air in a rotating disk cavity of a rotor stator system[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [89] 丁水汀, 陶智, 徐国强, 等. 旋转盘腔冷却问题的工程评价[J]. *航空动力学报*, 1999, 14(1): 83 – 86.
- DING Shui-ting, TAO Zhi, XU Guo-qiang, et al. An engineering evaluation system of turbine disc cooling configuration[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1999, 14(1): 83 – 86.