

对转涡轮气动技术研究进展

高杰¹, 李彦静¹, 牛夕莹²

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:对转涡轮技术是有效提高发动机功率密度、效率,减少陀螺效应的重要手段之一,但因其设计难度很大,在实际工程应用中仍面临一系列技术挑战。主要从对转涡轮在不同领域中的应用、气动设计及性能分析、内部流动分析及优化和气动试验技术四个方面对国内外近十年来对转涡轮气动技术的研究进展进行综述,并指出未来应进一步深入认识不同类型对转涡轮内部复杂流动机理及调控方法,并加强试验技术研究,为实现对转涡轮在不同领域中的应用提供技术支撑。

关键词:对转涡轮;气动设计;流动机理;试验方法;气动特性

中图分类号:TK472 **文献标识码:**A **DOI:**10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.09.007

[引用本文格式]高杰,李彦静,牛夕莹.对转涡轮气动技术研究进展[J].热能动力工程,2021,36(9):51-59. GAO Jie, LI Yan-jing, NIU Xi-ying. Research advances in contra-rotating turbine aerodynamic technology[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 51-59.

Research Advances in Contra-rotating Turbine Aerodynamic Technology

GAO Jie¹, LI Yan-jing¹, NIU Xi-ying²

(1. School of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001;
2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: The contra-rotating turbine technology is one of the important technical means to effectively improve the power density and efficiency and to reduce the gyroscopic effect for engines. However, due to the difficulty of its design, it still faces a series of technical challenges in practical engineering application. The domestic and foreign development of the research about the contra-rotating turbine aerodynamic technology in recent ten years are reviewed in four aspects, including the application of the contra-rotating turbine in different fields, the aerodynamic design and performance analysis, the internal flow analysis and optimization and the aerodynamic experiment technology. Besides, it is pointed out that, in the future, it is necessary to deeply understand the internal complex flow mechanism and regulation methods of different types of contra-rotating turbines, and to strengthen the experiment technology research, so as to provide the technical support for the application of the contra-rotating turbine in different fields.

Key words: contra-rotating turbine, aerodynamic design, flow mechanism, experimental method, aerodynamic characteristics

收稿日期:2021-02-19; 修订日期:2021-03-29

基金项目:国家自然科学基金(51979052); 国家科技重大专项(2017-III-0010-0036)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51979052); National Science and Technology Major Project(2017-III-0010-0036)

作者简介:高杰(1985-),男,河南镇平人,哈尔滨工程大学教授。

引 言

对转涡轮是指在不同领域的多转子发动机中,相邻两级涡轮转子旋转方向相反的涡轮。对转涡轮技术在气动方面充分利用上游转子叶片产生的气流预旋,以减小下游涡轮级导叶的偏转角,进而减少下游导叶数,甚至取消下游导叶,是一种有效提高发动机功率密度、效率,减少陀螺效应的重要技术手段。

对转涡轮技术首先在航空领域获得了成功应用,例如 F119、TRENT1000 等新一代军用、民用飞机的发动机涡轮部件均采用了对转涡轮气动布局,这已显示出其多方面的优越性。目前,已经或者即将在舰用燃气轮机、弹用发动机、火箭发动机及水下无人航行器动力等领域上获得应用。因此,先进的对转涡轮技术不仅具有重要的军事意义,还具有显著的社会效益和经济效益。

国外对于对转涡轮的研究和发展,重视程度很高。美国麻省理工学院、NASA 刘易斯研究中心、俄罗斯中央航空发动机研究院和英国罗罗公司等研究机构在对转涡轮设计和验证等方面做了大量工作,从最初的一维基础理论分析到内部流场分析,再到实际应用,对转涡轮技术目前已经达到了较高的水平。

自上世纪九十年代起,国内针对对转涡轮进行了大量的基本概念研究,中科院工程热物理研究所最早从事这方面工作,近来又深入开展了应用基础探索。工程热物理研究所、北京航空航天大学等单位在对转涡轮设计方法、试验台以及数值模拟等方面进行了大量工作。但总体上我国针对对转涡轮的研究还处于基础阶段,其中仍存在诸多尚未解决的技术难点,距离真正的实际应用还有一段漫长的路要走。

鉴于季路成^[1]和周琨等人^[2]已对 2012 年以前在航空发动机对转涡轮气动技术方面的研究进行了综述和总结,本文主要综述国内外近十年来不同领域对转涡轮气动技术方面的研究情况,详细论述对转涡轮在不同领域中的应用、气动设计及性能分析和内部流动分析及优化等方面的研究进展。简要总结对转涡轮气动试验技术,力图梳理出对转涡轮气动技术的发展脉络。最后,对未来的研究重点和发展趋势进行展望。

1 对转涡轮在不同领域中的应用

1.1 在不同类型航空发动机上的应用

转涡轮最先在航空涡喷/涡扇发动机上的应用显示出其在气动性能、冷却设计、结构及提高飞机机动性能等方面与常规涡轮相比具有不可比拟的优势^[1-2]。在气动性能上,高低压涡轮对转可使低压涡轮充分利用上游转子出口气流预旋,从而减小导叶稠度,甚至取消导叶,提高了涡轮气动效率。在冷却设计上,低压涡轮导叶低稠度或者无导叶设计大大减少了所需的冷气量,从而提高了航空发动机的推力,降低了耗油率。在结构上,对转涡轮技术的采用进一步缩短了涡轮轴向长度,减少了零件数,从而减轻了涡轮重量,使得涡轮的结构更为简化紧凑,提高了发动机的推重比。此外,在提高飞机机动性方面,应用对转涡轮技术的航空发动机具有总陀螺力矩小的天然优势,俨然成为军用战斗机的理想动力系统。

近年来,研究人员逐步探讨了对转涡轮技术在其他类型航空发动机上应用的可行性。王强等人^[3]介绍了对转技术在涡轴发动机上的应用情况,即燃气涡轮与动力涡轮的转子逆向旋转,使得动力涡轮首级导叶稠度减小,或取消导叶,这样可以使对转动力涡轮气动效率会更高;并减轻结构重量,结构更为紧凑;大大减小或抵消单向旋转转子作用在直升机或旋翼机上的陀螺力矩,从而改善其悬停和过渡飞行时的稳定性。目前,国内外已经在 TVD-10、Ariel 系列、Ardiden 系列、TM333 及 MTR390 等涡轴发动机上采用对转涡轮技术,主要有 1+1、1+2 和 1+3/2 等气动布局形式。Bellocq 等人^[4-5]探讨了在开式转子发动机上所应用的多级对转涡轮的零维与一维总体设计及性能分析,该多级对转涡轮通过分别安装在轮毂和机匣上的动叶交错布置并发生对转,以取消导叶,从而大幅降低重量、降低陀螺力矩及提高效率等。郭昊雁等人^[6]探讨了将对转涡轮技术用于某型弹用发动机的改型设计上,三维设计研究指出:采用 1+1 对转涡轮后,在保证高压涡轮较高性能的前提下,低压涡轮导向叶片的折转角大大减小。

另外,Burgett 等人^[7]研究了对转涡轮用于无人机发动机的可行性,研究指出,带有无导叶对转涡轮的三转子发动机比传统的两转子设计性能更差,这可能是自由动力涡轮对转技术不太适合多工况点操作所致。

1.2 在火箭发动机上的应用

减少火箭及其发动机重复成本的主要方法就是限制零件数量和简化机械结构。涡轮泵在火箭发动机总成本中占很大一部分(约为30%),因此应该对涡轮泵进行设计简化。根据火箭发动机的工作原理,低温火箭发动机推力室通常采用两个独立的涡轮泵来供应推进剂液氢和液氧。因此,可以采用正反转涡轮,使得氧化剂泵和燃料泵处于单一壳体内,简化了涡轮泵的结构。同时可以优化每个泵的特性参数,从而提高了整体效率。对于液氧/甲烷发动机,采用正反转涡轮也能减小涡轮泵的尺寸和重量^[8-9]。总体上,发动机比冲的提高使得研究人员把正反转涡轮作为未来发展的一种好的方案。

1.3 在闭式动力循环上的应用

Paniagua 等人^[10]研制了一种用于高超声速推进系统闭式氦气循环的多级无导叶对转涡轮,如图1所示。通过分别安装在轮毂与机匣上的旋转动叶交错布置发生对转,从而取消了多排导叶。通过采用重复级叶型、多维度参数优化等获得了较好的变工况性能和较低的成本。这与 Bellocq 等人^[4-5]有关开式转子发动机上采用的多级对转涡轮具有相似的总体布局。

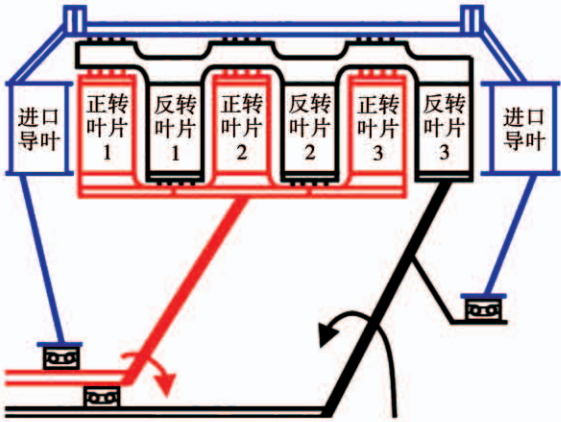


图1 多级对转涡轮布置图

Fig. 1 Multistage contra-rotating turbine layout

1.4 在舰用燃气轮机上的应用

Cox 等人^[11]介绍了用于最新型 WR-21 舰用燃气轮机的变几何动力涡轮的气动设计情况。由于需要在多工况条件下工作,且采用了可调导叶技术,如图2所示,为了进一步提高动力涡轮效率,动力涡轮相对于燃气发生器涡轮反转,以充分利用上游出口气流预旋,从而降低动力涡轮可调导叶数量和导叶折转角。由图2知,所设计的可调导叶近似于平板结构。近来,赵梓旭等人^[12]也探讨了对转涡轮在舰用燃气轮机上的应用情况,并基于改进遗传算法对其进行了对转改造一维优化设计。

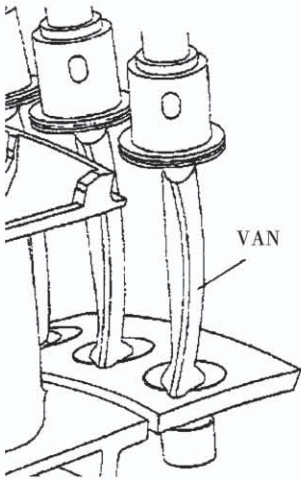


图2 可调喷嘴(VAN)结构

Fig. 2 Variable area nozzle(VAN) structure

1.5 在水下航行器动力上的应用

对转涡轮发动机在效率、质量和陀螺力矩等方面具有优势,在美国早期的 MK13, MK14 和 MK15 小型无人水下航行器上得到成功应用。因此,对转涡轮发动机有希望成为未来大中型无人水下航行器的动力主机,为水下航行器增大航速和航程提供巨大动力,目前主要是西北工业大学^[13-16]从事水下航行器这方面研究。

水下航行器动力在使用对转涡轮时,对原热动力系统改动不大,只需采用2个涡轮盘通过气动耦合实现对转,但转速不成固定比例。一级涡轮仅拖动推进器,二级涡轮仅拖动辅机,在一级涡轮后面增加一级反向涡轮,充分利用前级涡轮出口燃气所携带的动能,可大幅减小余速损失,提高涡轮发动机效率。

另外,对转涡轮在船用低速机与涡轮增压器匹

配^[17]和海洋发电水涡轮^[18]等方面也有所应用。虽然对转涡轮在不同领域的具体结构和所发挥的作用不尽相同,但在效率、质量及陀螺力矩等方面具有很大优势,可成为未来发展的一种候选方案。因此,需要针对对转涡轮在不同领域的具体应用开展有针对性的基础理论、气动设计及试验验证等工作。

2 对转涡轮气动设计及性能分析

对转涡轮的实际工程应用越来越显示出其多方面的优越性和应用形式的多样性^[19]。对转涡轮按气动特征可分为 $1+1$ 、 $1+1/2$ 、 $1+3/2$ 布局形式,如图3所示以及 $N \cdot 1/2 + N \cdot 1/2$ 等布局形式且其设计难度因形式不同而有所不同^[20]。



图3 不同对转涡轮结构

Fig. 3 Different contra-rotating turbine structures

2.1 $1+1$ 型对转涡轮

$1+1$ 型对转涡轮指的是两个完整的单级或者多级涡轮对转,如常见的 $1+1$ 和 $M+N$ 对转涡轮。其技术难度小,对气动性能提升明显,气动设计方法和设计工具可参考常规涡轮。国内已经开展了大量的针对性研究,基本掌握了技术难点,而在国外也已经获得工程应用^[21-22]。

2.2 $1+1/2$ 型对转涡轮

$1+1/2$ 型对转涡轮指的是 $1+1$ 型对转涡轮的下游涡轮无导叶。与常规涡轮甚至是 $1+1$ 型对转涡轮相比,实用的 $1+1/2$ 型对转涡轮具有独特的设计特点:

(1) 为了向下游低压涡轮提供足够预旋,上游高压涡轮出口流动是超声速的。因此需采用收缩扩张型叶栅通道,并且导致高压转子内出现复杂的波系结构,使得其出口落后角很难控制,给高压转子叶型设计、气动性能评估造成很大困难^[1,23-24]。而精心选择高压涡轮叶型缩扩比及型线曲率^[25]、采用低载荷系数低压涡轮设计^[26]等手段有助于降低高压转子出口马赫数和气动损失;

(2) 高低压涡轮转子间的相对转速极高,约为常规涡轮和 $1+1$ 型对转涡轮的两倍,大幅增强了涡轮流场的非定常干扰效应^[1,24]:一方面导致 $1+1/2$ 型对转涡轮的变工况特性区别于常规涡轮和 $1+1$ 型对转涡轮,需要有针对性的研究 $1+1/2$ 型对转涡轮的特性计算方法^[27-28];另一方面增加了高低压涡轮的宽工况匹配设计难度,需要深入开展流动机理研究;

(3) 由于对转涡轮内三维强激波系、激波与附面层干扰、转静与转转强非定常效应等因素的存在,严重影响了涡轮损失模型的精度^[1],降低了三维数值模拟的计算精度^[29],为此需开发或者修正相应算法;

(4) 高压涡轮转子通道全叶高方向的超声速流导致其内部流动处于超临界状态,通过单纯地调节低压涡轮出口背压对高压涡轮特性没有影响,这使得对转涡轮的工作状态调节机制面临新的困难,而高压涡轮的导叶可调对此有一定的积极作用^[30-31]。不过高压涡轮变几何设计难度极大,有关常规涡轮变几何设计方面的工作可提供一定参考^[32]。

2.3 1 + 3/2 型对转涡轮

考虑到 1 + 1/2 型对转涡轮存在的技术风险,为了提高对转涡轮的适用范围,1 + 3/2 型对转涡轮正成为一种不错的选择,如常见的 1 + 3/2, 1 + 5/2 型对转涡轮等。陈云等人^[33]的设计研究指出,1 + 3/2 型对转涡轮设计必须以合适的高压涡轮为原型基础,其下游低压涡轮的特性与常规涡轮基本一致,低压涡轮第一级转子叶片在各个工作状态下效率水平均较高。

2.4 N · 1/2 + N · 1/2 型对转涡轮

上述 1 + 1 型、1 + 1/2 型、1 + 3/2 型对转涡轮最多只能省掉一排导向叶片,对于级数较多的涡轮,采用对转涡轮技术的减重效果并不明显。Paniagua 等人^[10]、赵巍等人^[34-35]研制了一种通过分别安装在轮毂与机匣上的旋转动叶交错布置并发生对转的多级无导叶对转涡轮,如图 1 所示,取消了多排导叶,减重效果明显。最常见的 1/2 + 1/2 型对转涡轮由于高压涡轮反动度过大,此时不需要来流预旋即能满足本身做功需要,且其可为下游提供足够预旋,满足低压涡轮做功需要。

总体上,现有研究针对不同设计要求的 1 + 1 型、1 + 1/2 型和 1 + 3/2 型对转涡轮开展了气动设计和试验研究。为了进一步深入认识对转涡轮对应用领域的适用性,并期待从对转涡轮自身特点出发为未来发展提供思路,赵巍等人^[36]进一步对比研究了 1 + 1, 1 + 1/2, 1 + 3/2 型对转涡轮的气动设计特征。具体研究结果如图 4 所示,在相同气动和转速等设计要求下,1 + 1 型对转涡轮低压导叶受高压转子出口预旋影响,能够实现的折转有限,高低压级出功比低于 1 + 1/2 型对转涡轮,效率与其相当,但明显高于同转涡轮;相比其他两型对转涡轮,1 + 3/2 型高压转子出口相对马赫数最低,低压第 1 级转子叶片折转有限,高低压级出功比最小,效率最高^[36]。

另外,综合国内外研究现状可以发现,目前关于对转涡轮的研究中考虑冷气影响的较少。虽然在有些温度不太高的应用领域不存在这一问题,但在航空发动机领域,高低压涡轮必须对叶片进行冷却。因此,在对转涡轮的设计中计及冷气作用影响是十分重要的^[37],需着重考虑大冷气量下通流设计及叶片列匹配、高出口马赫数叶型尾缘激波控制、高来流

马赫数叶型设计以及高负荷涡轮叶片通道中通道涡对冷气效果的影响等问题。

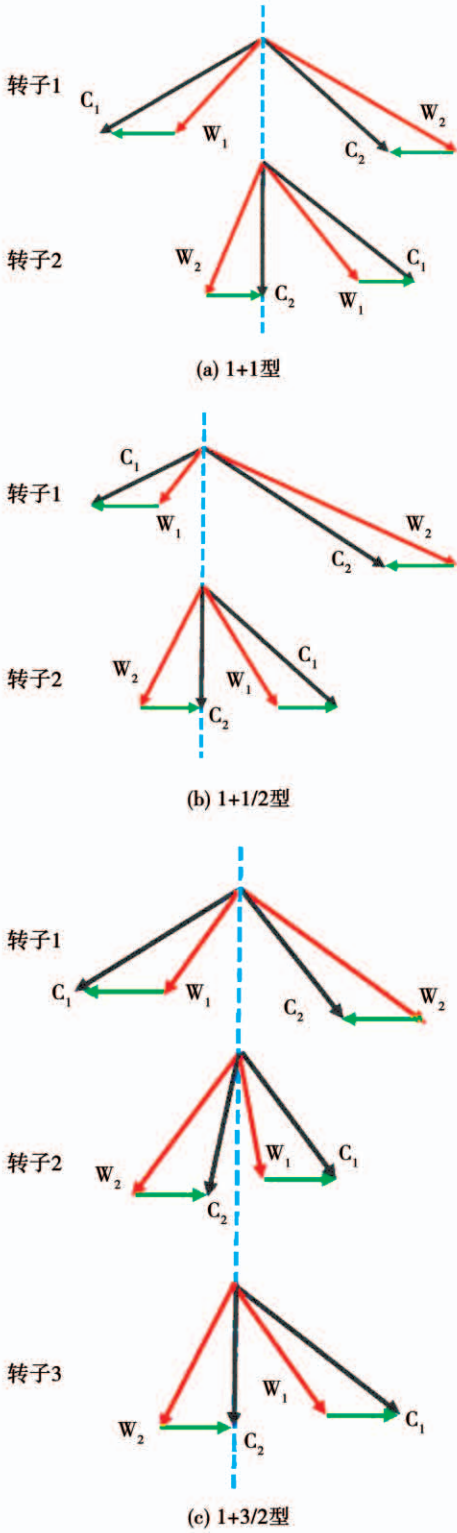


图4 不同对转涡轮的基元级速度三角形对比
Fig.4 Comparison of elementary stage velocity triangles for different contra-rotating turbines

3 对转涡轮内部流动分析及优化

鉴于 1+1 型对转涡轮的技术难度小,现有研究较少,主要借助于非定常计算研究,关注其内部存在的时序效应和变工况性能优化^[38-39]。定常与非定常研究指出:低工况下,低压涡轮导叶弯折方向与高压涡轮动叶旋转线速度方向相反,低压导叶由于负冲角在压力面前缘产生流动分离,这是其低工况流动损失增大的主要原因。基于分离角的压力面优化方法能提高其低压导叶前缘压力面的气流速度,增强了其对负冲角的适应性。

国内外学者对 1+1/2 型对转涡轮内部流场的复杂性进行了一系列研究,Praisner 等人^[40]和 Zhao 等人^[41]的研究指出,对转涡轮的非定常数值计算需将高压涡轮动叶纳入计算模型之中,否则下游叶片的非定常激振力会被严重低估,对下游流场的预测也会失真。綦蕾等人^[42]和王晓杰等人^[43]分别采用扇段区域缩放方法和全环非定常方法对比研究了 1+1/2 型对转涡轮内部非定常流动现象。

对于对转涡轮轴向间距的影响,Subbarao 等人^[44]的非定常与定常研究指出,在特定的轴向间距下,存在更好的尾迹传输与流动图谱,此时对转涡轮气动效率最高。另外,Subbarao 等人^[45]的研究进一步指出,存在最佳的对转涡轮高压与低压转子转速比,使得涡轮性能最佳。

由于无导叶对转涡轮低压转子叶片相对较薄,在受到负荷较大的高压级尾流作用时,产生的叶片变形不可忽略,并且会影响流体的非定常脉动,因此在数值计算中有必要采用流固耦合分析方法。对此,赵振华等人^[46]和魏泽明等人^[47]基于瞬态流固耦合数值分析方法开展了相关计算研究分析。而 Berruti 等人^[48]则基于单级动态模型涡轮试验研究了涡轮叶片的激振力特性。

近来,部分国内研究人员逐步开展了对转涡轮盘腔内流动和换热特性的非定常数值研究,分别针对仅有涡轮盘腔结构^[49-50]和考虑通道主流影响^[51-52]两种情况。但鉴于对转涡轮旋转盘腔内流动传热与常规涡轮较为相似,相关研究还比较少。

需要指出的是,现有有关 1+1/2 型对转涡轮内部流动的研究依然比较少,缺乏对其内部激波与旋涡相互作用占主导的强非定常复杂流动的深层次

认识。1+3/2 型对转涡轮作为 1+1/2 型的改进型,其内部流动方面的研究报道还很少。此外,虽然 1+1/2 型对转涡轮的变工况特性区别于常规涡轮和 1+1 型对转涡轮,对转涡轮内部流动的研究在公开出版物中却更为少见。

4 对转涡轮气动试验技术

涡轮气动性能试验研究是涡轮设计与优化过程中必不可少的关键环节,能够验证与检验涡轮设计优化情况,并发现涡轮内流动的新现象与新问题。考虑到对转涡轮内部流动的复杂性,开展涡轮气动试验更为关键。在此背景下,欧美等西方发达国家在上个世纪便建成了涡轮短周期试验台,如剑桥大学、麻省理工学院和俄亥俄州立大学等^[1,53]。随后逐步建成了一批连续供气单级或多级对转涡轮试验台,并开展了大量的试验研究。例如格拉茨工业大学等的跨声速两级对转涡轮试验台^[54],其由 3 MW 压气机站驱动,涡轮总压比约为 4,高压级与低压级膨胀比分别为 3,1.3,且高压级导叶工作在堵塞状态,具备非定常精细流场测试能力。

由于对转涡轮试验难度大、风险高,国内对转涡轮试验能力发展缓慢,导致在对转涡轮研制方面的设计优化主要依靠数值模拟方法来实现,缺乏试验数据的验证和支撑,制约了对转涡轮设计手段的提升。国内于 2000 年开始在中科院工程热物理研究所建设对转涡轮暂冲式短周期试验台^[1],该试验台能够提供大约 200 毫秒的折合转速稳定段,试验重复性较好,完全能够满足涡轮性能测试的需要,但测量精度还有待进一步提高。从当前的研究情况可以看出,短周期试验测试技术受自身非稳态特性的限制,主要用于涡轮内部流动机理分析与涡轮初步设计,未能扩展到涡轮设计研发中。

随着对转涡轮研究的逐步深入,北京航空航天大学建设了连续供气的超跨声速对转涡轮模型试验台^[53,55],该试验台能够不间断地对涡轮性能数据进行录入,并且模型对转涡轮处于稳定工作状态。试验台能够提供 0~3.5 kg/s 压缩空气,同时气源供气压力可达 0.7 MPa,经过加温器后气流温度可达 473 K,出口排气压力为 0.11 MPa,试验件转速最高为 40 000 r/min,试验件最大外径为 200 mm,2 台电涡流测功机吸收功率最高为 800 kW,满足涡轮试验

要求。不过,由于该超跨声速对转涡轮试验台尺寸较小,只能进行对转涡轮模化试验。虽然模化试验能够显著地降低试验成本和试验风险,缩短试验周期,但对于对转涡轮的研制来说,全尺寸对转涡轮试验则更为关键。

近年来,中国航发四川燃气涡轮研究院建设了双转子涡轮试验台,并于国内首次开展了具有极高试验风险的连续供气全尺寸对转涡轮试验^[56],其进口总压最大为 0.5 MPa,最大总温为 383 ~ 783 K,高、低压涡轮最高转速为 12 500 和 15 000 r/min,主气与冷气最大流量分别为 19 和 4 kg/s。为保证试验安全实施,研发了集成控制、数据采集和完全控制功能的多任务并行测控系统,建立了“高压有限调节、低压独立控制、高低匹配联调”的对转涡轮匹配联调方法。试验证明,多任务系统运行良好,低压水力测功器稳速精度提高 4 倍,试验件轴向力控制方法有效,试验时间缩短 50% 以上,为我国高性能双转子涡轮设计技术的发展奠定了基础。

5 总结与展望

对转涡轮由于在效率、质量及陀螺力矩等方面的优势而有望在不同的领域获得应用,但对转涡轮的设计难度很大,尤其是实用的 1 + 1/2 型对转涡轮。其具有与常规涡轮和 1 + 1 型对转涡轮不同的独特设计特征,因此在进行对转涡轮设计时,首先必须对其内部的激波与旋涡相互作用占主导的强非定常复杂流动有深刻认识,而相关机理研究是对转涡轮设计技术不断发展的理论基础。因此,对转涡轮气动技术迫切需要继续开展研究,今后研究的主要方向包括:

(1) 需要针对不同类型对转涡轮在不同领域的具体应用开展有针对性的基础理论、气动设计及优化等工作,以理清不同类型对转涡轮的具体使用领域、使用范围和效能,从而帮助对转涡轮设计者决策;

(2) 需要进一步深入认识全工况条件下对转涡轮内部复杂流动机理,对于对转涡轮在航空发动机、舰用燃气轮机等动力装置上应用时存在的流量调节问题,可通过耦合变几何涡轮技术予以实现,这给对转涡轮的气动设计技术提出了新的要求,为此需深入开展流动机理研究;

(3) 对于有冷气需要的对转涡轮应用来说,需着重考虑全工况条件下大冷气量下对转涡轮通流设计及叶片列匹配、高出口马赫数叶型弱化激波造型以及冷气与通道主流/二次流的相互干扰等问题;

(4) 加强试验的研究,尤其是连续供气双转子对转气动性能试验。并采用先进的流动测量手段,以提高试验的测量精度和可靠性,从而积累高精度基础试验数据,为对转涡轮研制以及数值算法验证提供参考。对于对转涡轮内部复杂流动的高精度预测问题,还需开发或者修正相应的算法。

参考文献:

- [1] 季路成. 对转涡轮研究的回顾与展望[J]. 航空发动机, 2006, 32(4): 49-53.
JI Lu-cheng. Review and prospect of counter-rotating turbine research[J]. Aeroengine, 2006, 32(4): 49-53.
- [2] 周琨, 邹正平, 刘火星, 等. 航空发动机对转涡轮气动设计技术研究进展[J]. 科技导报, 2012, 30(15): 61-74.
ZHOU Kun, ZOU Zheng-ping, LIU Huo-xing, et al. Aerodynamic design of counter-rotating turbine for aero-engine[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(15): 61-74.
- [3] 王强, 李维. 前功率输出式涡轴发动机涡轮结构布局改进[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2010, 23(3): 27-30.
WANG Qiang, LI Wei. Improvement of turbine structure for turboshaft engine with front output shaft[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010, 23(3): 27-30.
- [4] Bellocq P, Garmendia I, Legran J, et al. Preliminary design and performance of counter rotating turbines for open rotors, Part I: 1-D methodology[C]//ASME Paper No. GT2016-57918, 2016.
- [5] Bellocq P, Garmendia I, Legrand J, et al. Preliminary design and performance of counter rotating turbines for open rotors, Part II: 0-D methodology and case study for a 160 PAX aircraft[C]. ASME Paper No. GT2016-57921, 2016.
- [6] 郭昊雁, 徐凌志. 某低压涡轮反转方案设计[C]. 中国航空学会第八届动力年会, 2014.
GUO Hao-yan, XU Ling-zhi. The low stage turbine counter-rotating scheme design[C]. The 8th Power Annual Conference of Chinese Aeronautical Society, 2014.
- [7] Burgett L M, Takahashi T T. Comparison of vaneless counter-rotating power extraction engines for UAV propulsion[C]. AIAA Aviation 2019 Forum, AIAA 2019-3016, 2019.
- [8] Pempie P, Ruet L. Counter-rotating turbine designed for turbopump rocket engine[C]. 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2003-4768, 2003.
- [9] 马杰伟. 火箭发动机的正反转涡轮设计[J]. 火箭推进, 2004, 30(2): 54-58.

- MA Jie-wei. Design of forward and reverse turbine of rocket engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2004, 30(2): 54–58.
- [10] Paniagua G, Szokol S, Kato H, et al. Contrarotating turbine aero-design for an advanced hypersonic propulsion system[J]. Journal of Propulsion and Power, 2008, 24(6): 1269–1277.
- [11] Cox J C, Hutchinson D, Oswald J I. The Westinghouse/Rolls-Royce WR-21 gas turbine variable area power turbine design [C]. ASME Paper, 95-GT-54, 1995.
- [12] 赵梓旭, 余又红, 李钰洁. 基于改进遗传算法的某型涡轮对转改造一维优化设计[J]. 燃气轮机技术, 2019, 32(4): 28–33. ZHAO Zi-xu, YU You-hong, LI Yu-jie. One-dimensional optimization design of a certain type of turbine counter-rotation based on improved genetic algorithm [J]. Gas Turbine Technology, 2019, 32(4): 28–33.
- [13] 张进军, 钱志博, 杨杰, 等. 对转涡轮用于水下航行器的初步研究[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(4): 84–89. ZHANG Jin-jun, QIAN Zhi-bo, YANG Jie, et al. Preliminary study of counter-rotating turbines used on underwater vehicles [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2006, 18(4): 84–89.
- [14] 赵民全, 王新平. 水下航行器对转涡轮动力系统建模与仿真[J]. 鱼雷技术, 2017, 25(1): 37–44. ZHAO Min-quan, WANG Xin-ping. Modeling and simulation of counter-rotating turbine power system for underwater vehicle [J]. Journal of Unmanned Undersea System, 2017, 25(1): 37–44.
- [15] 王新平, 党建军, 刘成勇. 水下航行器对转涡轮发动机输出扭矩计算及仿真[J]. 鱼雷技术, 2016, 24(4): 277–282. WANG Xin-ping, DANG Jian-jun, LIU Cheng-yong. Theoretical and simulation study on output torque of counter-rotating turbine for underwater vehicle [J]. Journal of Unmanned Undersea System, 2016, 24(4): 277–282.
- [16] Wang X P, Dang J J. Modeling and simulation of a counter-rotating turbine system for underwater vehicles [J]. Journal of Marine Science and Application, 2016, 15: 478–483.
- [17] ZHAO R C, ZHUGE W L, ZHENG X Q, et al. Design of counter-rotating turbine to improve the off-design performance of turbo-compounding systems [C]. ASME Paper, 2013-94412, 2013.
- [18] Doan M N, Alayeto I H, Padricelli C, et al. Experimental and computational fluid dynamic analysis of laboratory-scaled counter-rotating cross-flow turbines in marine environment [C]. ASME Paper, FEDSM2018-83030, 2018.
- [19] Waldren J J, Clark C J, Grimshaw S D, et al. Non-dimensional parameters for comparing conventional and counter-rotating turbomachines [C]. ASME Paper, GT2019-91632, 2019.
- [20] Ji L C. Analysis of technical challenges in vaneless counter-rotating turbomachinery [C]. ASME Paper, GT2007-27617, 2007.
- [21] SHI W, ZHOU K. Design method for high ma number counter rotating turbine blades [C]. ASME Paper, 2015-43374, 2015.
- [22] 付超, 邹正平, 刘火星, 等. 1+1 对转涡轮气动设计技术研究 [J]. 空气动力学学报, 2012, 30(3): 299–306. FU Chao, ZOU Zheng-ping, LIU Huo-xing, et al. Aerodynamics design of two-stage counter-rotating turbine [J]. ACTA Aerodynamic Sinica, 2012, 30(3): 299–306.
- [23] 周杰, 王会社, 张磊, 等. 带有超高负荷高压级的 1+1/2 对转涡轮低压涡轮的设计与分析 [J]. 汽轮机技术, 2011, 53(6): 401–405. ZHOU Jie, WANG Hui-she, ZHANG Lei, et al. Design and analysis of low pressure turbine of vaneless counter-rotating turbine with highly-loaded high pressure stage [J]. Turbine Technology, 2011, 53(6): 401–405.
- [24] 周杨, 刘火星, 邹正平, 等. 无导叶对转涡轮气动设计技术 [J]. 推进技术, 2010, 31(6): 689–695, 756. ZHOU Yang, LIU Huo-xing, ZOU Zheng-ping, et al. Aerodynamics design of two-stage vaneless counter-rotating turbine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(6): 689–695, 756.
- [25] 张磊, 雒伟伟, 王会社, 等. 流道缩扩比对 1+1/2 对转涡轮高压动叶性能影响的研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(2): 205–209. ZHANG Lei, LUO Wei-wei, WANG Hui-she, et al. Effect of divergent ratio on performance of vaneless counter-rotating turbine high pressure rotor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(2): 205–209.
- [26] 乔加飞, 赵庆军, 徐建中. 某 1+1/2 对转涡轮的气动设计及分析 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(9): 1469–1472. QIAO Jia-fei, ZHAO Qing-jun, XU Jian-zhong. Aerodynamic design and analysis of a vaneless counter-rotating turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(9): 1469–1472.
- [27] ZHOU Q, YIN Z, TAN C Q, et al. Modeling and performance analysis of a dual-shaft counter-rotating gas turbine [C]. ASME Paper No. IMECE2018-86146, 2018.
- [28] 徐静静, 王会社, 周杰, 等. 带有缩放型流道的无导叶对转涡轮特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(5): 755–758. XU Jing-jing, WANG Hui-she, ZHOU Jie, et al. Performance prediction of a vaneless counter-rotating turbine with converging-diverging nozzle [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(5): 755–758.
- [29] Akin M B, Sanz W. The Influence of transition on CFD calculations of a two-stage counter-rotating turbine [C]. ASME Paper, GT2014-26044, 2014.
- [30] 雒伟伟, 张磊, 王会社, 等. 1+1/2 对转涡轮可调高压导叶流场及损失的数值研究 [J]. 推进技术, 2012, 33(3): 346–355. LUO Wei-wei, ZHANG Lei, WANG Hui-she, et al. Numerical investigation of flow and loss in a variable high-pressure guide vane of 1+1/2 counter-rotating turbine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(3): 346–355.
- [31] 雒伟伟, 张磊, 王会社, 等. 可调高压导叶对 1+1/2 对转涡轮

- 轮性能影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2741–2748.
- LUO Wei-wei, ZHANG Lei, WANG Hui-she, et al. Effects of high-pressure guide vane adjustment on 1 + 1/2 counter rotating turbine [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2741–2748.
- [32] 高杰, 郑群, 岳国强, 等. 燃气轮机变几何涡轮气动技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(11): 1141–1150.
- GAO Jie, ZHENG Qun, YUE Guo-qiang, et al. Advances in variable geometry turbine aerodynamic technology for gas turbines[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(11): 1141–1150.
- [33] 陈云, 胡松岩, 王雷. 1 + 3/2 无导叶对转涡轮设计特点分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(4): 20–23, 62.
- CHEN Yun, HU Song-yan, WANG Lei. Analysis of design characteristics for 1 + 3/2 vaneless counter-rotating turbine[J]. Aero-engine, 2011, 37(4): 20–23, 62.
- [34] ZHAO W, WU B, XU J Z. Aerodynamic design and analysis of a multistage vaneless counter-rotating turbine[J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 137(6): 061008. 1–061008. 12.
- [35] 赵巍, 吴冰, 徐建中. 多级无导叶对转涡轮气动设计研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(2): 238–241.
- ZHAO Wei, WU Bing, XU Jian-zhong. Aerodynamic design of multi-stage vaneless counter-rotating turbines[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(2): 238–241.
- [36] 赵巍, 隋秀明, 赵庆军, 等. 对转涡轮内部流动机理及设计方法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(10): 1376–1390.
- ZHAO Wei, SUI Xiu-ming, ZHAO Qing-jun, et al. Counter-rotating turbine flow mechanism and aerodynamic design[J]. Science in China: Technology Science, 2020, 50(10): 1376–1390.
- [37] 王宇峰, 温风波, 王松涛, 等. 考虑冷气的某对转涡轮设计简述与流场分析[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(1): 54–61.
- WANG Yu-feng, WEN Feng-bo, WANG Song-tao, et al. Designing overview and flow field analysis of an air-cooled counter-rotating turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(1): 54–61.
- [38] 张宝, 雒伟伟, 张华彪, 等. 1 + 1 对转涡轮 1.5 级时序效应数值研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(2): 290–294.
- ZHANG Bao, LUO Wei-wei, ZHANG Hua-biao, et al. Numerical study on the clocking effect of a 1 + 1 counter-rotating turbine 1.5-stage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(2): 290–294.
- [39] 常骥越, 赵巍, 雒伟伟, 等. 1 + 1 对转涡轮变工况性能分析与优化设计[J]. 推进技术, 2017, 38(7): 1483–1490.
- CHANG Qi-yue, ZHAO Wei, LUO Wei-wei, et al. Aerodynamic performance analysis and improvement of a counter-rotating turbine at off-design conditions[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(7): 1483–1490.
- [40] Praisner T J, Grover E A, Mocanu R, et al. Predictions of unsteady interactions between closely coupled high pressure-and low pressure-turbines with co-and counterrotation[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(6): 061008. 1–061008. 8.
- [41] ZHAO Q J, DU J Y, WANG H S, et al. Tip clearance effects on inlet hot streak migration characteristics in high pressure stage of a vaneless counter-rotating turbine[J]. Journal of Turbomachinery, 2010, 132(1): 011005. 1–011005. 8, 2010.
- [42] 綦蕾, 潘尚能, 李维, 等. 1 + 1/2 对转涡轮非定常流动数值模拟[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1825–1835.
- QI Lei, PAN Shang-neng, LI Wei, et al. Numerical simulation of unsteady flow in a vaneless counter-rotating turbine[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1825–1835.
- [43] 王晓杰, 张伟潘, 潘尚能, 等. 1 + 1/2 对转涡轮全环非定常数值模拟[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2017, 30(3): 21–28.
- WANG Xiao-jie, ZHANG Wei-hao, PAN Shang-neng, et al. Numerical simulation of full scale unsteady flow in 1 + 1/2 counter-rotating turbine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2017, 30(3): 21–28.
- [44] Subbarao R, Govardhan M. Identification of wake convection and flow outline in the interface region of blade rows with axial gap in a counter rotating turbine[C]. ASME Paper, GTINDIA2019–2634, 2019.
- [45] Subbarao R, Govardhan M. Studies on the outline of flow improvement with speed ratio in a counter rotating turbine[C]. ASME Paper, GTINDIA2019–2636, 2019.
- [46] 赵振华, 陈伟, 陈敏. 对转涡轮低压转子叶片的流固耦合数值分析[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(9): 1424–1428.
- ZHAO Zhen-hua, CHEN Wei, CHEN Min. Numerical analysis of low pressure rotor blade using fluid-structure interaction method in counter-rotating turbine[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(9): 1424–1428.
- [47] 魏泽明, 赵巍, 隋秀明, 等. 1 + 1/2 对转涡轮高压动叶叶顶间隙变化规律及影响作用[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(1): 49–54.
- WEI Ze-ming, ZHAO Wei, SUI Xiu-ming, et al. Investigation on the tip clearance variation of the high pressure rotor blade of a vaneless counter-rotating turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(1): 49–54.
- [48] Berruti T, Maschio V. Experimental investigation on the forced response of a dummy counter-rotating turbine stage with friction damping[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(12): 122502. 1–122502. 9.