

全尺寸对转涡轮若干关键 试验技术的应用验证

刘志刚, 曾 军, 赵旺东, 刘 宪, 谢金伟
(中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 江油 621703)

摘 要: 双转子涡轮试验具有极高的试验风险, 而大型全尺寸 1+1/2 对转涡轮试验在国内更是首次开展。为保证试验安全实施, 在查阅国内相关涡轮试验文献和对设备现状评估的基础上, 对对转涡轮关键试验技术展开了研究。研发了集成控制、数据采集和安全控制功能的多任务并行测控系统, 实现了对两个转子系统的联合控制; 建立了“高压优先调节、低压独立控制、高低匹配联调”的对转涡轮匹配联调方法, 制定了切实可行的试验安全保障方案; 为详细了解高低压级间流场, 布置了级间测量系统。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。

关键词: 航空发动机; 双转子; 全尺寸; 1+1/2 对转涡轮; 匹配联调; 试验

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2017) 01-0001-06

Investigation and verification of key technologies in full scale contra-rotating turbine experiment

LIU Zhi-gang, ZENG Jun, ZHAO Wang-dong, LIU Xian, XIE Jin-wei
(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Jiangyou, 621703)

Abstract: The dual-rotor turbine experiment has considerable failure risks and the first domestic full scale 1+1/2 contra-rotating turbine experiment has been successfully carried out in the AECC Sichuan Gas Turbine Establishment. To provide a solid foundation for experiment safety, several key technologies were investigated based on relative literature and test facility status. The combined measurement and control multi-task system was developed to fulfill the synchronously control of the two rotor systems. Upgrades were taken out for the old fashioned hydraulic dynamometer regulation precision improvement and the matching regulation method of "regulate high pressure stage preferentially and low pressure stage catch up independently with the high and low pressure stage matching target" was set up. Besides, a practical safety assurance plan was proposed and the inter-stage measuring probes were applied for a better understanding of the inter-stage flow field characteristics. With those efforts, the multitask control system operated smoothly during the first domestic full scale dual-rotor turbine experiment and the rotating speed regulation precision were improved 4 times with a time saving of 50%. Those key technologies provide fundamental supports for the high performance dual-rotor turbine design and experiment for our country.

Key words: aero-engine; dual-rotor; full scale; 1+1/2 contra-rotating turbine; matching regulation method; experiment

1 引言

对转涡轮作为一种先进的涡轮结构形式, 在提高发动机推重比、降低耗油率以及提高飞机的整机

性能方面具有重要意义^[1-2]。对转涡轮发动机通过精简导叶排, 可减少发动机零部件数量, 减轻发动机质量, 缩短发动机轴向尺寸, 同时还能降低与导叶相

关的摩擦、冷却等气动损失,因此在高性能发动机研制方面具有独特的优势^[3-4]。

早在上世纪70年代,国外航空发动机公司就已经开始研究和应用对转涡轮技术并取得了良好效果^[5]。美国的综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划和先进可承受通用涡轮发动机(VAATE)计划中,多个验证机都采用了对转涡轮设计;普惠F119系列发动机和GE公司YF120系列发动机也都采用了对转涡轮技术^[6]。NASA刘易斯研究中心设计和验证的一种用于火箭发动机的小型无第二级涡轮导向器对转涡轮,转子设计点的总体效率提高了2%,速度降低时效率甚至可以提高7%。此外,美国麻省理工学院^[7]、俄罗斯中央航空发动机研究院^[8-9]、法国空间中心^[10]等国外高校和研究机构的学者们,先后分别研究了对转涡轮的流动特性和设计方法^[11-15]。

国内对对转涡轮研究起步较晚,其中蔡睿贤^[12-4]较详细地介绍了对转涡轮的设计要素,刘思永^[16]、方祥军^[17]、季路成^[18]、赵庆军^[19]等分别针对对转涡轮设计技术、气动性能分析及进口热斑等特征进行了研究。季路成等^[18]指出,目前国内在对转涡轮研制方面的设计和优化主要依靠模拟方法来实现,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和设计经验的积累。然而,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。中科院常温短周期模型对转涡轮试验有效测试时间仅有约200 ms,而北京航空航天大学建成的对转涡轮试验台尺寸较小,无法开展全尺寸对转涡轮试验^[20]。本文介绍了中国航发四川燃气涡轮研究院开展的国内首次全尺寸对转涡轮连续试验。该试验采用1+1/2对转涡轮,高、低压涡轮分别使用高、低压水力测功器作为负载进行调节。为提高试验效率,试验人员研制升级了集成测控系统,改进合并了两台不同型号水力测功器的供水系统,升级了功率调节器,提高了水力测功器的稳速精度。针对对转涡轮的运行特性,进行了高低压涡轮匹配联调探索和安全试验流程梳理;在高低压涡轮级间布置探针进行了涡轮级间参数测量,发现级间探针测得的压力偏高,无法用于高、低压涡轮性能的分别评估。对上述技术的研究和应用,保障了全尺寸1+1/2对转涡轮试验的顺利开展,提高了试验效率,减少了试验时间;相关工程经验的积累,对我国类似的大中型双转子涡轮试验器建设和对转涡轮试验的开展具有重要的参考价值。

2 试验设备和试验件

图1为中国航发四川燃气涡轮研究院的涡轮综合试验器结构示意图,表1列出了该试验器的主要指标。流经涡轮进口截面的空气或燃气(简称主气),通过调节阀后经流量喷嘴进入燃烧室加温至试验所需涡轮进口温度,然后经进气蜗壳沿轴向进入试验件,膨胀做功后再经排气冷却器排入大气或由抽气机组抽走。经涡轮冷却空气流路进入涡轮的气流(简称冷气)通过进气阀后进入冷气分配罐,经各路流量孔板流出,再通过调节阀调至试验要求的流量和压力后进入试验件。

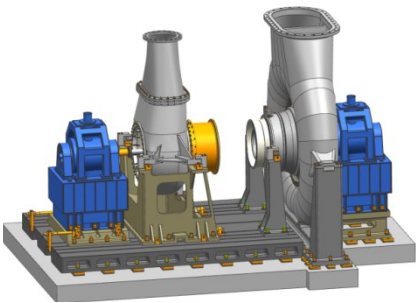


图1 涡轮综合试验器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the turbine combined test rig

表1 涡轮综合试验器的试验能力

Table 1 Capacity of turbine combined test rig

参数名称	参数范围
涡轮进口总压 p_0 /MPa	≤ 0.5
涡轮进口总温 T_0 /K	383 ~ 783
高压涡轮最高转速 n_H /(r/min)	12 500
高压测功器最大功率 N_H /kW	9 500
低压涡轮最高转速 n_L /(r/min)	15 000
低压测功器最大功率 N_L /kW	2 757
冷气最大压力 p_c /MPa	0.6
主气最大流量 G_0 /(kg/s)	19
冷气最大总流量 G_c /(kg/s)	4
涡轮极限膨胀比 π^*	12
涡轮出口总压 p_{02} /MPa	≥ 0.028

全尺寸1+1/2对转涡轮性能试验件,由第一级导叶、第一级动叶和第二级动叶组成。图2为安装在试验台架上的试验件,高压涡轮轴向前伸出进气蜗壳与水力测功器相连,低压涡轮轴向后伸出排气蜗壳与水力测功器相连。试验涡轮发出的功由水力测功器吸收并测量;控制系统通过调节进气阀开度改变涡轮进口压力,调节排气蝶阀开度改变涡轮总压膨胀比,调节水力测功器的进、排水阀开度改变涡轮

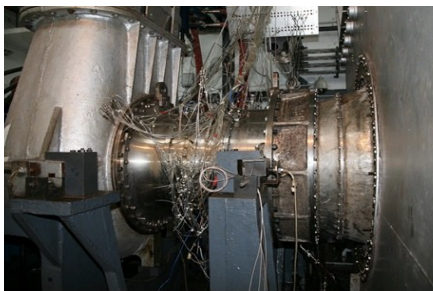


图2 全尺寸1+1/2对转涡轮试验件
Fig.2 Full scale 1+1/2 contra-rotating turbine

轮转速,调节冷气进气阀和冷气放空阀改变冷气分配罐总压,调节各冷气分路上的电动调节阀开度改变冷气流量比。试验中所有测量参数均由数据采集系统实时录取后保存到数据库,关键参数经处理后在大屏幕上集中显示。

3 关键试验技术

涡轮综合试验器进行过大量的导向器和单转子涡轮部件试验,但进行双转子对转涡轮试验尚属首次。为此,针对1+1/2对转涡轮的结构特点,试验中需着重考虑以下技术问题:

- (1) 1+1/2对转涡轮的高、低压转子相对独立运行,试验中要对两个转子系统联合控制,需解决两台水力测功器供水的协同稳定问题——既要保证供水压力稳定,又要保证转速稳定可调。此外,试验主气供气系统和燃油系统要快速同步调节,以满足不同试验状态的调节需求;试验中使用多路冷气进行封严和轴向力平衡供气,各系统间的数据流应及时共享,统一使用和存储。为此,需研发测控集成系统,完成试验状态控制、试验数据采集、试验数据即时计算和入库等功能。
- (2) 对转涡轮试验件的低压涡轮无导向器,试验中高低压转子间有很多的自耦合转速,如果高低压转子匹配不好将造成低压转子工作状态不稳定,可能会导致低压涡轮启动时反转、高转速时振动异常、气流自激震荡剧烈等危险状况。为此,需结合以往经验探索研究试验风险控制和高低压匹配联调试验方法。
- (3) 对转涡轮总性能测试方案参照航标^[21]的相关要求实施,使用稳态总温总压复合探针进行级间流动参数测量。但对转涡轮级间为超跨声流动,转子相对转速大,流动环境复杂,流场非定常性十分显著,加之试验件高低压涡轮轴向间距较小,探针前缘

距高压涡轮动叶尾缘近,因此采用总温总压探针可能导致流场参数测量不准。此外,级间探针的迎风面特征尺寸与高低压涡轮轴向间距之比较大,可能对级间流动,尤其是激波系产生严重影响。

针对以上试验需求,研究人员进行了全尺寸对转关键试验技术的探索和工程应用验证。

3.1 测控集成系统

为适应对转涡轮试验对控制、数据采集及安全监控的需求,研制升级了测控集成系统。该系统由调度管理子系统、数据采集子系统、控制子系统、数据处理子系统、数据库子系统及配套设备等组成,见图3。

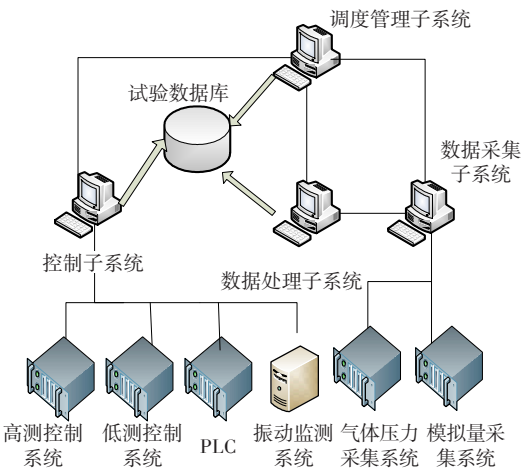


图3 测控集成系统结构示意图
Fig.3 Schematic diagram of the combined measurement and control system

调度管理子系统对试验状态调整控制和试验数据录取存储进行统一调度管理。数据通过高速以太网进行交换共享,数据入库指令下发后,控制子系统的设备参数和数据处理子系统的试验件性能数据各自存入试验数据库,由调度管理子系统对数据库里的两类数据进行关联以便试验数据分析。

控制子系统负责对试验器的各设备系统参数进行测量,同时对各执行装置进行控制。整个系统由PLC控制系统、电气系统、控制上位计算机、高压水力测功器控制器、低压水力测功器控制器等构成。根据设备控制需要,除高、低压水力测功器控制器外,PLC底层还建立了多个独立的PID控制模块,对涡轮进口压力、温度,涡轮出口压力,测功器供水压力等进行独立控制。

测功器转速控制稳定性受供水压力波动的影响,而水力测功器运行时耗水量变化剧烈、波动频率

快,加之两台水力测功器之间的相互影响,增大了供水压力的控制难度。为此对两台水力测功器的供水系统进行了改造,增加一个公用供水稳压罐,在稳压罐顶部通入压缩空气,PLC控制系统以稳压罐液位为控制目标,通过快速调节阀控制进入稳压罐的水量,当稳压罐里液位稳定时,其供水压力必然稳定。对转涡轮试验验证表明,供水系统改造后,当稳压罐液位在 ± 15 mm范围内波动时,测功器供水压力波动从 ± 50 kPa减小到 ± 7 kPa以内,目前设备可将水位稳定在 ± 10 mm范围内。

3.2 试验流程和风险控制

根据对转涡轮试验要求和试验器自身特点,为减少试验状态调节时间,对试验中的高低压涡轮状态调节方案进行了探讨。为正确录取设计状态时的高低压涡轮性能试验数据,需要高低压涡轮分别达到设计转速和膨胀比,但二者间的膨胀比又互相影响,因此存在相互匹配和联合调节问题。高压水力测功器具备恒转速、恒功率功能,可通过高压水力测功器稳定高压涡轮转速,且具有一定的稳定精度;低压水力测功器无恒转速功能,需通过不断调整使低压涡轮转速在预定范围内保持相对稳定,以达到设计状态。为进一步提高低压水力测功器的稳速精度,试验人员对原水力测功器手阀控制方式进行了改造,采用了步进电机加T型螺纹丝杠减速装置的方式,对低压水力测功器的负载调节器进行控制,将低压水力测功器的稳速精度从 ± 60 r/min提高到了 ± 15 r/min,精度提高4倍,能够满足试验调节需求。最终确定的调节方案是稳定高压涡轮转速,调节低压涡轮转速和膨胀比,如图4所示,即“高压优先调节、低压独立控制、高低匹配联调”。

对转涡轮由于高压涡轮动叶叶型弯扭较大,起动时流量小,周向速度相对大,速度三角形偏离设计状态,气流较为紊乱,可能造成低压涡轮反转。根据测功器的使用要求,测功器在加水后(转速3 000 r/min以上)禁止反向运行,以免出现故障影响试验安全。如果出现低压涡轮转子与高压涡轮同向(与理论相反)运行,可适当加快进口压力调节,使高压涡轮尽快在设定工况下运行。低压涡轮转子低于3 000 r/min反向运行时,低压水力测功器(未加水时)能允许短时间运行。

另外,在起动升速到试验转速的过程中,如果高低压涡轮转差过大,会引起低压涡轮进气攻角偏离设计值过大并可能导致低压涡轮失控。为此,在制

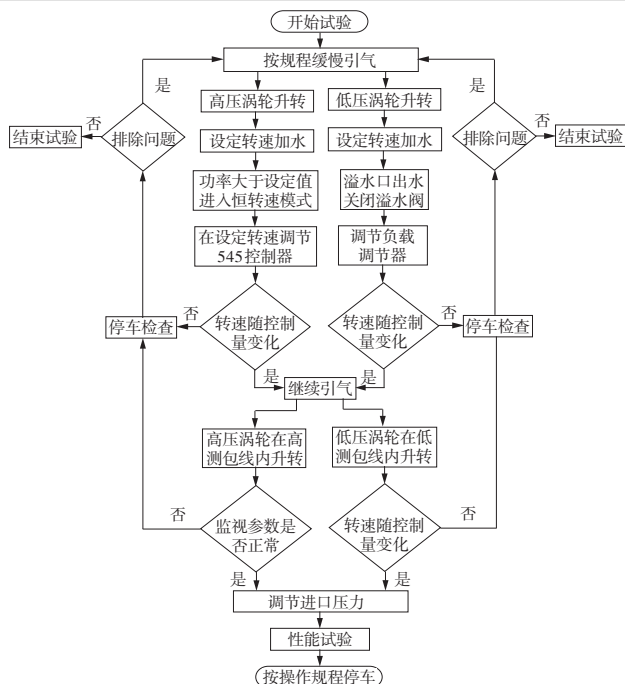


图4 对转涡轮试验流程图

Fig.4 Flow diagram of the contra-rotating turbine experiment

定试验控制方案时,确定低压涡轮追随高压涡轮进行调节的控制方案,确保起动过程中高低压涡轮折合转速差不大于0.3。

由于对转涡轮结构的特殊性,高低压涡轮盘之间的腔压无法直接测量。机械运行试验中发现,使用常规涡轮级间腔压估算公式得到的对转涡轮级间腔压偏大,导致显示的低压转子轴向力过大。机械运行试验后对轴向力计算公式进行修正,使显示轴向力与转子真实轴向力尽量接近。试验中,通过调节腔压力将高压转子轴向力控制在安全范围内,再通过增大临近腔压力降低低压转子轴向力,同时通过监控轴承座及滑油回油温度来确保试验安全。图5给出了试验中高、低压涡轮轴向力的时间历程,证

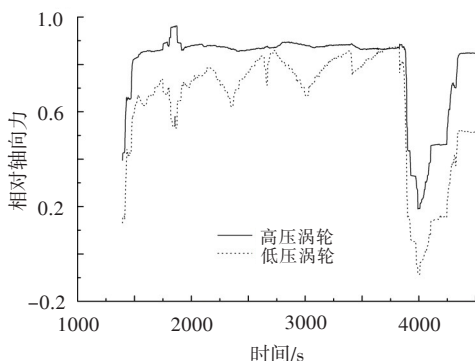


图5 对转涡轮轴向力时间历程

Fig.5 Real time monitoring history of axial force

实了轴向力控制方法的有效性。

3.3 级间流场测量

机械运行试验采用3支梳状总温总压复合探针(图6)进行级间测量。对转涡轮高低压涡轮间距较小,为防止探针与转动部件碰磨,试验前计算出转子相对探针的位移为0.2 mm,此位移值加上轴承最大轴向活动量0.55 mm,远小于转子与探针的间距,不会出现碰磨危险。图7给出了试验中测得的级间总压分布。由图可知,3支探针测得的级间总压分布规律一致,数值也比较接近。试验还发现,在涡轮总效率与理论设计值吻合的情况下,根据级间压力计算出的级效率分配与理论设计值相比,高压涡轮效率明显偏高,低压涡轮效率明显偏低,说明3支探针测得的高低压涡轮级间压力值偏大。



图6 级间测量探针
Fig.6 Inter-stage measuring probe

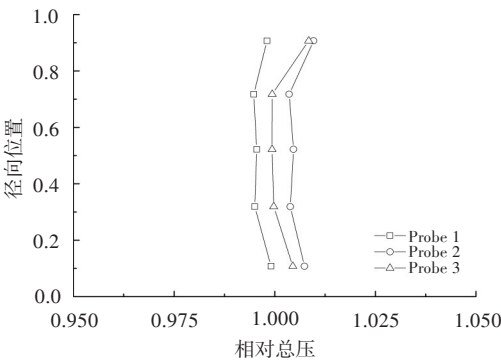


图7 级间压力分布
Fig.7 Inter-stage pressure distribution

级间测量探针的使用参照了航标^[21]的相关规定,3支探针的测量结果可以排除测试硬件或方法的错误,证明常规压力探针无法真实准确地测量级间超跨声流场的性能参数。对转涡轮级间的超跨声流动环境复杂,流场的非定常性和非均匀性显著,同时探针支杆迎风面特征尺寸与高低压涡轮轴向间距之比

较大,这种压力测量偏高的反常情形可能与探针和级间流动尤其是激波系发展之间互相干扰影响有关,值得进一步探索。为解决高马赫数条件下的级间测量问题,应注意解决探针的气动外形、发展非接触测量方法(如LDV等),以减轻对级间流场的干扰,获得准确的级间流场参数。

4 应用验证

经上述设备改造和关键试验技术探索,全尺寸对转涡轮试验在设计点状态下稳定运行,对转涡轮的总膨胀比达到设计值。测控集成系统的研制升级和对转涡轮匹配联调方法的应用,大大缩短了试验状态调节时间,仅通过一次试验(预计2~3次)就顺利完成对转涡轮全部性能试验,节约试验时间50%,节约试验经费超过50%。

图8为出口相对马赫数的试验测量值与计算值的对比,图9为对转涡轮总效率随总膨胀比的变化。可见,高压涡轮相对物理转速不变时,随着低压涡轮相对物理转速的增大,效率曲线向右移动,最高效率值也逐渐提高;低压涡轮相对物理转速不变时,

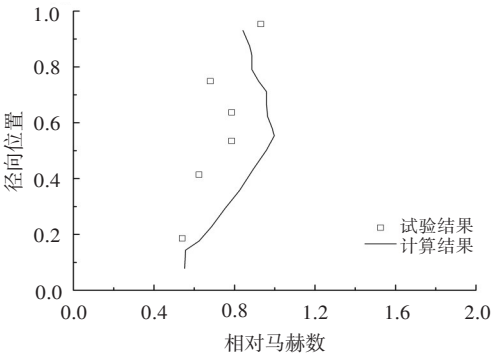


图8 出口马赫数沿径向的分布
Fig.8 Mach number distribution at the turbine outlet

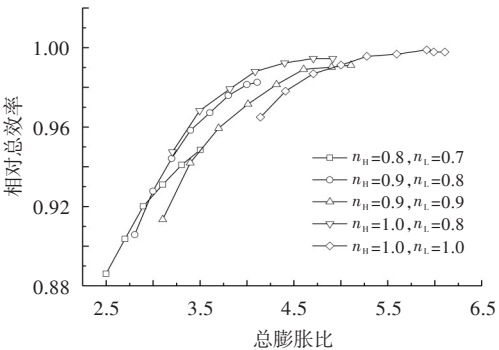


图9 对转涡轮总效率随总膨胀比的变化
Fig.9 The change of contra-rotating turbine efficiency with the total expansion ratio

随着高压涡轮相对物理转速的增大,效率曲线向上移动。

5 结论

针对国内首次全尺寸1+1/2对转涡轮连续气源试验,探索了若干关键试验技术,确保了双转子涡轮试验的安全高效完成,获得的试验数据有力地支持和促进了我国对转涡轮设计和优化理论的发展,证明以上几项关键试验技术具有较好的工程应用价值。对实施效果进行深入分析可得出以下结论:

(1) 研发的基于多任务并行的测控集成系统,有效集成了试验控制、试验数据采集和入库以及安全监控等功能。两台不同型号水力测功器的供水系统改造后,低压水力测功器的稳速精度提高了4倍;PLC底层各系统独立的PID控制模块,有效提高了调节速率和稳速精度。测控集成系统的开发经验和水力测功器的升级改造方法,具有重要的推广应用价值。

(2) 根据全尺寸1+1/2对转涡轮的试验特征和试验设备状态,探索确立了“高压优先调节、低压独立控制、高低匹配联调”的试验调节方案。该方案可快速调整对转涡轮高、低压级的设计工况和变工况转速,降低了试验状态稳定难度,缩短了50%以上试验时间,节约了大量的试验经费。通过腔压和轴向力的即时修正,对轴向力进行了有效控制,确保了试验安全。

(3) 1+1/2对转涡轮级间距离狭小、流动复杂,采用常规探针测量虽获取了部分重要的级间参数,但也发现高马赫数下常规探针对级间流场的干扰较大,导致级间压力测量值偏高的反常情形出现。针对对转涡轮的级间测量,应探索使用迎风面积小、气动造型好、频响高的固定或移动式探针,同时开展非接触测量技术研究(如LDV等)。

参考文献:

- [1] Wintucky W T, Stewart L W. Analysis of two-stage counter-rotating turbine efficiencies in terms of work and speed requirements [R]. NACA RM E57L05, 1958.
- [2] Cai R X, Wu W, Fang G. Basic analysis of counter-rotating turbines [R]. ASME 90-GT-108, 1990.
- [3] 蔡睿贤. 对转涡轮基本分析[J]. 航空学报, 1992, 13(1): 57—63.
- [4] 蔡睿贤. 有关对转涡轮基本设计与应用的进一步思考[J]. 航空动力学报, 2001, 16(3): 93—198.
- [5] 刘思永, 王 屏, 方祥军, 等. 无导叶对转涡轮新技术在高推比航空发动机中的运用[J]. 航空动力学报, 2002, 17(4): 495—499.
- [6] 雒伟伟. 基于流动控制的无导叶对转涡轮性能研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2012.
- [7] Louis J F. Axial flow counter-rotating turbines[R]. ASME 85-GT-218, 1985.
- [8] Sotsenko Y V. Thermogasdynamic effects of the engine turbines with the contra-rotating rotors[R]. ASME 90-GT-63, 1990.
- [9] Ponomariov B A, Sotsenko Y V. Using contra-rotating rotors for decreasing sizes and component number in small GTE[R]. ASME 92-GT-414, 1992.
- [10] Pemple P, Ruet L. Counter-rotating turbine designed for turbopump rocket engine[R]. AIAA 2003-4768, 2003.
- [11] Daniels W A, Johnson B V, Graber D J. Aerodynamic and torque characteristics of enclosed co/counter rotating disks [R]. ASME 89-GT-177, 1989.
- [12] Paniagua G, Szokol S, Varvill R. Contra-rotating turbine aerodesign for an advanced hypersonic propulsion system [J]. Journal of Propulsion and Power, 2008, 24(6): 1269—1277.
- [13] Huber F W, Branstrom B R, Finke A K, et al. Design and test of a small two stage counter-rotating turbine for rocket engine application[R]. AIAA 93-2136, 1993.
- [14] Weaver M M, Manwaring S R, Abhari R S, et al. Forcing function measurements and prediction of a transonic vaneless counter rotating turbine[R]. ASME 2000-GT-375, 2000.
- [15] Haldeman C W, Dunn M G, Abhari R S. Experimental and computational investigation of the time-average and time-resolved pressure loading on a vaneless counter-rotating turbines[R]. ASME 2000-GT-0445, 2000.
- [16] 刘思永, 王 屏, 方祥军, 等. 无导叶对转涡轮新技术气动设计探讨[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2002, 15(1): 20—23.
- [17] 方祥军, 刘思永, 王 屏, 等. 一种低压无导叶对转涡轮特性分析与设计[J]. 推进技术, 2005, 26(3): 234—238.
- [18] 季路成, 陈 江, 项 林, 等. 1+1/2对转涡轮模型试验件气动设计[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(6): 943—946.
- [19] 赵庆军. 无导叶对转涡轮流动特性分析及其进口热斑迁移机理研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2007.
- [20] 刘思永, 王 屏, 卢聪明, 等. 超跨音对转涡轮试验台[J]. 航空动力学报, 2002, 17(4): 404—406.
- [21] HB7081-2012, 航空燃气涡轮发动机轴流涡轮气动性能试验方法[S].