

模拟真实进口条件的压缩部件试验方法研究

梁 俊, 刘晓晨, 赵汝彬, 夏 联, 张 良

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 为获取压缩部件比在常规大气进气条件下开展部件试验更加真实的试验结果, 介绍了2种模拟真实进口条件的压缩部件试验设备及方法, 并对不同试验方法获取的试验结果进行了对比。结果表明: 采用进口加温加压供气的方式可在部件试验器上模拟整机环境下高压压气机进口条件; 采用低温供气节流的方式可在部件试验器上模拟风扇/增压级部件高空低温低压条件; 模拟真实进口条件试验可开展部件级的真实工况考核试验以及雷诺数对压缩部件影响等研究试验; 压缩部件模拟真实进口条件下的试验结果与整机或高空台试验结果存在一定差异, 这与测试布局, 试验件加工、装配以及各部件匹配影响等因素有关。

关键词: 压缩部件; 试验方法; 模拟真实进口条件; 加温加压; 低温低压; 航空发动机

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620(2024)06-0017-07

DOI: 10.3724/j.GTER.20240047

Test method of the real inlet conditions simulation for compression component

LIANG Jun, LIU Xiaochen, ZHAO Rubin, XIA Lian, ZHANG Liang

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621000, China)

Abstract: To obtain more realistic test results for compression components compared to conventional atmospheric inlet conditions, two kinds of compression component test equipment and methods simulating real inlet conditions were introduced, and the test results obtained by different test methods were compared. The results show that the use of inlet heating and gas supply pressurization can simulate the inlet conditions of high-pressure compressors in the engine environment on the component tester, and the use of low-temperature gas supply throttling can simulate the high-altitude, low-temperature, and low-pressure conditions of fan/booster stage components on the component tester. The simulation of real inlet condition test can carry out the real working condition assessment tests on the component level and research experiments on the influence of Reynolds number on compression components. There is a certain difference between the test results of the compressed component simulation under real inlet conditions and that of the whole engine or high-altitude simulation test, which is related to factors such as test layout, test piece processing, assembly, and the influence of component matching.

Key words: compression component; test method; simulating real inlet conditions; heating and pressurization; low temperature and low pressure; aero-engine

1 引言

尽管目前计算流体力学发展日益成熟和完善, 但试验研究在航空发动机研制过程中仍具有不可替代的地位和作用。航空发动机试验主要分为整机试验和部件试验。其中, 部件试验的优势在于能够获得比整机试验更加全面、详细和准确的流场参数, 但

其最大的劣势是无法模拟部件在整机环境下的相互影响^[1]。另外, 目前采用大气进气的压缩部件试验无法模拟压缩部件在高空低温低压环境下雷诺数对风扇/增压级性能的影响, 也无法获取高压压气机在整机环境下进口高温高压对其机械性能及间隙等的影响。

收稿日期: 2024-09-06

作者简介: 梁 俊(1986-), 女, 四川绵阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事压气机试验技术研究。

对于高空长航时飞行器发动机,由于飞行高度较高,大气压力、温度和密度随飞行高度升高而降低,导致飞行雷诺数不断减小,为此雷诺数对发动机的影响不容忽视。国外较早注意到了航空发动机的低雷诺数问题,并为此开展了相应的研究工作。国内外研究表明,低雷诺数工况下风扇/压气机的压比、效率、流量和稳定工作裕度均有不同程度的减小,从而影响发动机的推力和耗油率^[2-6]。

为了能够更加真实地获取压缩部件的性能,美国普·惠公司的压气机试验器可模拟从地面到高空的各种进气条件,包括加温、降温、加压和真空。俄罗斯中央航空发动机研究院于1960年建成的通用全尺寸压气机试验器,其动力最高转速为17 000 r/min,进口压力范围为5~10 kPa,进口温度范围为-50~250 ℃,大气进气下最大空气流量为360 kg/s,可用于真实尺寸压气机部件和模型等科研试验^[7]。国内目前只能在整机环境下实现高压压气机真实进口压力和温度工作条件,通过高空台试验获取低压部件高空低温低压环境下的性能,无法在部件试验器上获取压缩部件真实工作进口条件的试验结果。

为进一步扩宽压缩部件试验工况范围,获取更能反映真实工作环境下的压缩部件性能结果,本文针对压缩部件模拟真实进口条件下的试验原理、试验设备、试验方法以及相关数据处理开展了研究,可有效弥补大气进气压缩部件试验无法真实模拟压缩部件进口条件的缺陷,使得压缩部件试验结果更接近真实工况。

2 试验原理

模拟高压压气机进口高温高压以及风扇/增压级进口高空低温低压环境,需要采用高压供气或进口节流的方式实现。此类试验基于常规试验工作原理,结合自身工作特点达到模拟真实进口条件的目的,其工作原理见图1。

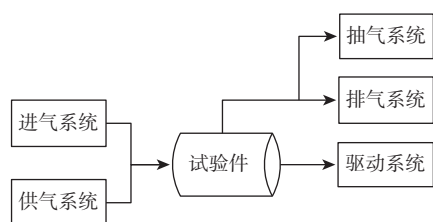


图1 模拟真实进口条件试验工作原理

Fig.1 Working principle of simulating real inlet conditions

2.1 加温加压试验原理

高压压气机位于风扇/增压级之后,整机环境下其进口压力和温度均高于环境条件,因此常规大气进气压气机试验方法无法模拟其工作环境。采用加温加压试验器可有效解决上述问题,能完成真实进口条件下高压压气机性能评定试验,其中包括性能试验、疲劳试验和极限试验^[8-9]。

为模拟高压压气机进口高温高压条件,加温加压试验器采用供气机组供入不同温度的高温高压气体,经过掺混得到试验所需的温度,再通过耐高温调节阀控制进入高压压气机,从而实现进入高压压气机的空气压力和温度与整机环境下进口保持一致。相对于地面大气进气条件下的压气机性能试验,进气加温加压条件下的压气机试验具有以下明显特点:①进气采用高温高压供气,试验过程中需要由地面大气进气工况转换到加温加压进气工况;②因加温加压条件下压气机产生的轴向力远远大于自身轴承的额定载荷,为此试验器需具备轴向力平衡的功能,以确保压气机轴承的轴向力在许用范围之内。

2.2 低温低压试验原理

模拟高空低温低压环境采用低温供气机组供入低温干燥空气,并通过与常温空气掺混得到试验所需温度;通过调节进口节流阀、降低进口压力的方式实现进口低压。由于进口压力较低,可能存在试验件出口压力低于大气压的情况,为此需要通过抽气机组将排气抽出。低温低压部件试验器营造高空环境的方法与高空台试验器的区别在于,高空台营造了负温负压环境,试验件整体处于高空环境,而低温低压部件试验器只是提供了一种负温负压进气条件,试验件处于地面工况,因此对试验件以及连接处的密封性要求更高。

3 试验设备

模拟真实进口条件的试验设备除了常规试验器的进气系统、排气系统、驱动系统、辅助空气系统、润滑系统、测控系统外,还增加了供气系统和抽气系统。加温加压试验器和低温低压变雷诺数试验器的具体结构和特点如下。

3.1 加温加压试验器

加温加压试验器结构与常规试验器结构上的最大差异在于进气系统和排气系统,见图2。由于加温加压试验器有大气进气和加温加压2种工作模式,因

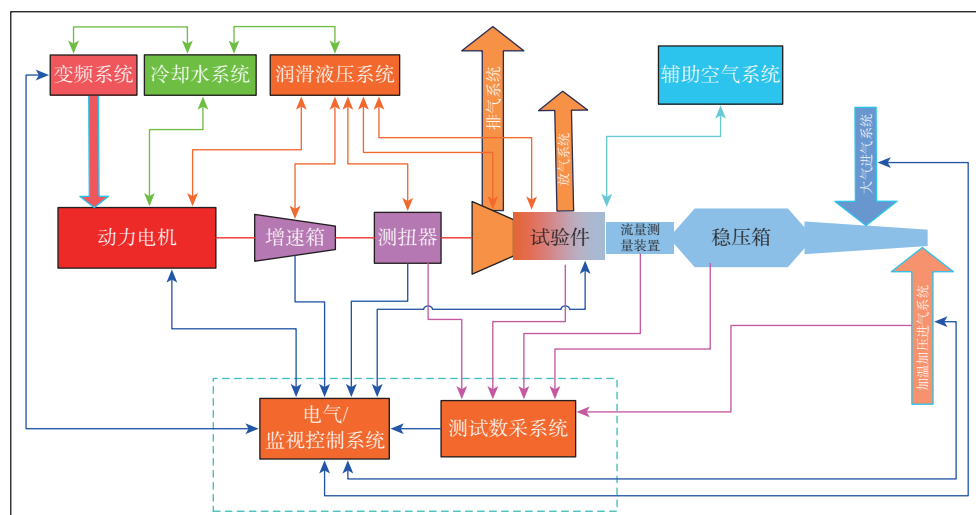


图2 加温加压试验器原理图

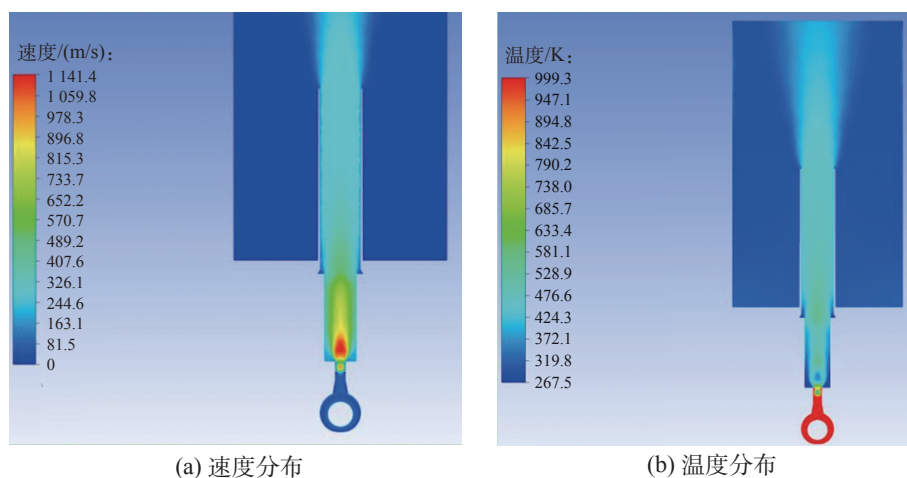
Fig.2 Principle of heating and pressurization test rig

此进气部分也分为大气进气和加温加压进气2种。主要由供气调温调压装置、进气管路、进气整流段、流量测量段等部分组成。加温加压进气条件时,供气机组提供的高温空气和中温空气通过掺混器掺混后进入试验器主进气管路,然后由进气调节阀和放空阀按照试验需求调节流量和压力,最后经流量测量段进入试验件。由于进口温度较高,需要选择耐高温的阀门并考虑进气管路的膨胀。

加温加压试验下,由于排气压力和温度高于大气进气试验,因此需考虑排气冷却和高温引起的排气节气门卡滞问题。有别于大气进气试验器,加温加压试验器的轴系对其进行了冷却,排气系统则采用高温调节阀和二级引射的方式,通过引射可有效降低排气速度和温度。数值模拟结果如图3所示。

3.2 低温低压变雷诺数试验器

低温低压变雷诺数试验器的进气系统与加温加压试验器的类似,采用供气掺混调温的方式,通过进口节流阀获取试验所需的低温低压条件,供气条件下采用掺混器调节试验件进口温度。由于不同飞行高度不同雷诺数条件下试验件的物理流量变化较大,为确保宽范围内流量的测量精度,试验器采用了不同量程流量计形成的流量测量组,见图4。试验器排气系统分为直排式和抽气式2种。直排式排气系统主要由排气节气门、排气机匣、排气蜗壳、轴系、膨胀节、冷却器、排气管道、截止阀等组成;抽气式排气系统与直排式排气系统共用排气节气门、排气机匣、排气蜗壳、轴系、膨胀节、冷却器,排气管路通过与抽气机组连接后由抽气机组将试验件排出的气体抽出。



(a) 速度分布

(b) 温度分布

图3 引射器计算结果

Fig.3 Computational results of ejector

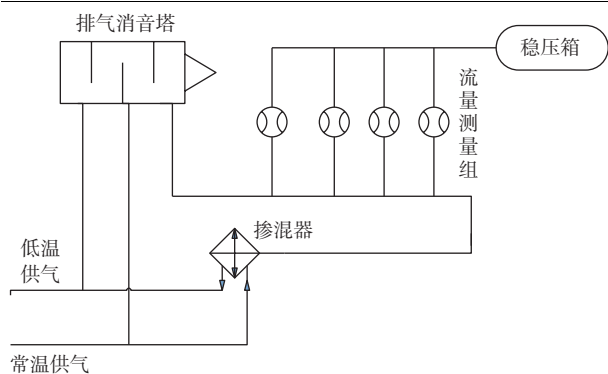


图4 低温低压试验器的供气系统

Fig.4 Supply system of low temperature and low pressure test rig

4 试验方法

模拟真实进口条件的压缩部件试验均基于相似原理的模拟方法进行,试验应具备几何相似、运动相似和动力相似条件。2种模拟不同进口条件的试验,其方法和流程因试验目的不同而有所不同。

4.1 加温加压试验方法

4.1.1 试验方法及流程

基于加温加压试验的自身特点,通过大量试验研究出了相应的操作流程和方法(图5)。该方法主要包括设备启动及准备、试验状态调节与数据采集、设备退出3个阶段。其中,试验状态调节中供气转换和轴向力平衡是最为关键的步骤。首先在大气进气条件下启动设备、升速至压气机慢车转速并稳定运行,然后逐渐关闭大气进气调节阀,同时打开供气阀。此时,需要关注压气机工作点和轴向力,确保压

气机稳定在工作点附近。完成供气转换后,升速至试验转速,调节进口压力和温度,满足要求后录取压气机性能数据。采用该方法可有效降低进口压力和温度变化对试验件的冲击,防止轴向力超限导致试验件损坏。

4.1.2 供气转换

试验过程中采用大气进气的方式启动,当试验件升速至稳定运行转速后,通过逐渐关闭进气阀并同时打开供气阀的方式完成自然进气向加温加压供气的转换。转换过程中,由于进气压力和温度的变化会使压气机的状态(压比、换算转速)随之变化,为此需要调节排气阀的位置,确保压气机在工作线附近工作。为确保试验过程中供气转换调节的效率和安全性,解决由于供气压力突变导致压气机无法稳定工作的问题,试验器采用了PID控制自动调控方式,确保供气压力在略高于大气压值保持稳定。

4.1.3 轴向力平衡

对于压缩部件试验,由于在无涡轮部件反向力的作用下,其轴向力远大于核心机或整机,特别是在加温加压试验下,试验件的流量和负荷明显增大,使得轴向力进一步增加,因此加温加压试验的最大难点是轴向力平衡。为减小压气机轴承所承受的轴向力,试验器采用了具有轴向力平衡装置的测扭器,同时利用腔压计算或应力环的方式适时获取压气机的轴向力,并通过轴向力平衡装置产生的反向拉力来保证压气机的轴向力在轴承可承受范围内。

4.2 低温低压试验方法

开展低温低压试验前,应先开展地面大气进气试验,获取压缩部件的性能及工作边界,然后在此基础上根据试验内容制定相应的低温低压试验。试验过程中,涉及供气条件下启动以及排气抽气转入/转出等难点。当试验件升速至目标转速后,调节供气压力和温度使其满足试验要求,再调节排气节气阀门逐点录取性能曲线。然而在此过程中进口压力会逐渐升高,因此该过程有2种操作方式。方式一:在录取等转速性能点时调节进气调压装置、保持进口压力不变,该方式可模拟压气机进口压力,即发动机所处的飞行高度;方式二:保持进气调压装置开度不变,此时随着压比的升高,进口来流压力随之增加,而等转速线上各点的雷诺数基本保持不变。总体来说,2种不同操作方式获取的试验结果差异较小,但是方式二的操作相对简单,可根据试验目的或内容

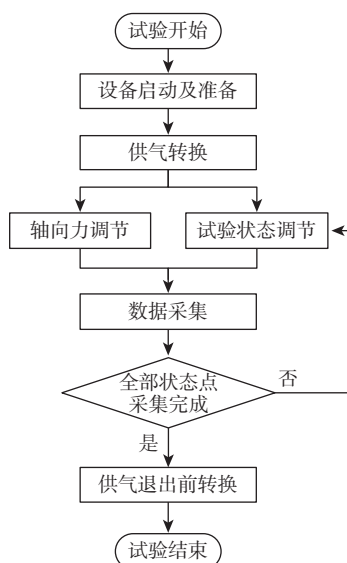


图5 加温加压试验流程

Fig.5 Testing procedures of heating and pressurization

选择不同的操作方式。

根据目前已开展的低温低压试验的经验,该试验操作过程中需注意以下几点:

(1) 在启动试验器驱动电机过程中,需确保供入的低温空气流量满足试验件当前转速下所需的流量,供气流量低于试验件所需流量时会出现失稳现象,供气流量也不宜过大,否则会导致压缩部件进入风车状态。

(2) 进口温度通过冷气与常温空气掺混调节,在调节过程中,进口压力、流量均会发生变化,各参数间相互关联和影响,需注意进口压力、温度、流量以及试验件工作状态等各参数之间的关联匹配。

(3) 升、降速以及抽气转入/转出过程中,需密切关注压气机工作点位置,通过调节排气节气门或抽气压力确保其正常工作。

5 试验结果分析

针对上述2种模拟真实进口条件下的试验方法,

开展了某型多级压气机加温加压试验以及增压级低温低压试验。为研究该试验方法与大气进气部件试验以及核心机试验结果的差异,对其试验数据进行了对比分析。

5.1 加温加压试验

图6为部件加温加压试验与核心机加温加压试验结果的对比。由图可知,部件加温加压试验与核心机加温加压试验的流量-压比特性较吻合,但其效率较核心机试验结果偏高。初步分析认为,这与测点布局、测量方法和试验件装配条件等有关。图7为加温加压试验与大气进气试验结果的对比。可以看出,98%相对换算转速下2种试验方法的结果基本吻合,均在试验误差范围内;但90%相对换算转速下2种试验方法获取的流量与效率均存在差异。初步分析认为,是由于压气机可调导叶角度不重复、叶尖和轴向间隙不同等原因导致。因试验件和试验数据样本较少,无法准确给出造成2种试验结果不吻合的原因,具体原因有待深入研究。

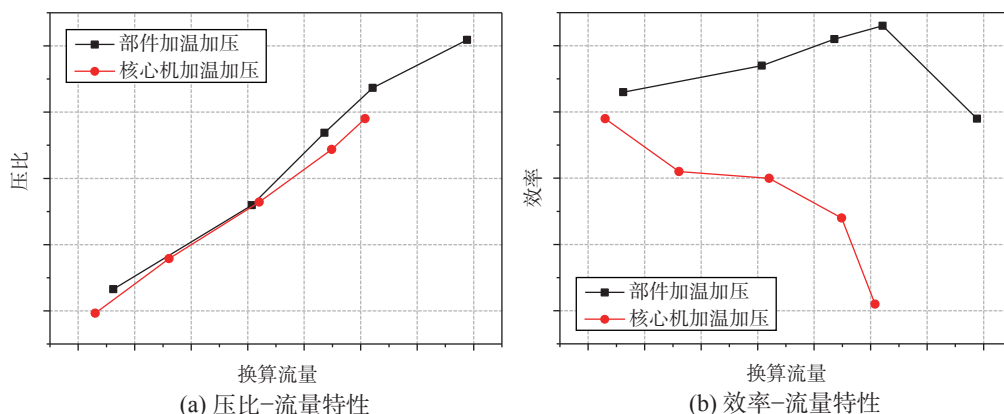


图6 部件加温加压试验与核心机加温加压试验结果对比

Fig.6 Comparison of heating and pressure test results between component and core-engine

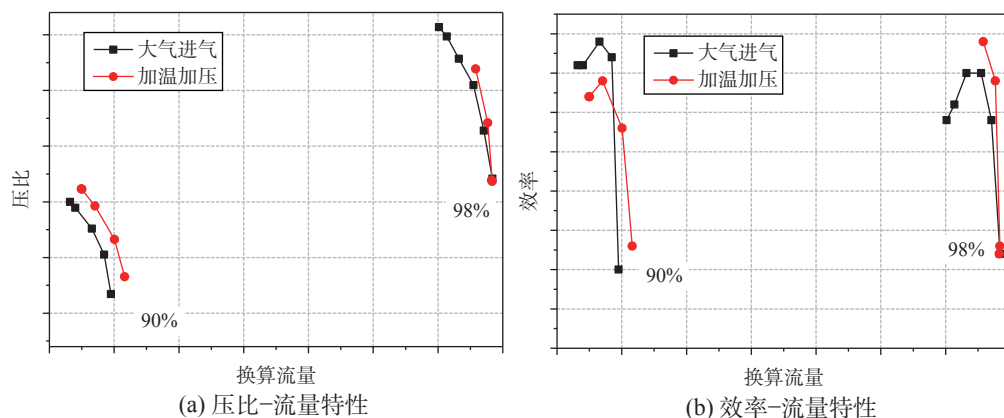


图7 加温加压试验与大气进气试验结果对比

Fig.7 Comparison of results between heating and pressure test and normal test

5.2 低温低压试验

通过低温低压试验可获取雷诺数对压缩部件性能的影响。研究获取了某型增压级在雷诺数从 4.5×10^5 变化至 0.8×10^5 范围内的性能及临界雷诺数。图8为不同雷诺数下增压级性能的变化。试验结果表明,随着进口雷诺数的降低,增压级的流量和效率均减小。为获取该增压级的临界雷诺数,通过试验获取了同一转速、压比不同雷诺数条件下的流量和效率。结果表明,当进口雷诺数小于临界雷诺数后,增压级的性能急剧衰减,呈明显下降趋势,该增压级在设计转速下的临界雷诺数为 2.7×10^5 ,见图9。图10为低温低压部件试验与高空台试验结果对比。可以看出,虽然2种试验方式均为模拟高空低温低压环境,但由于2种试验开展过程中测试布局、试验件加工装配情况、各部件匹配影响、试验数据的分析和处

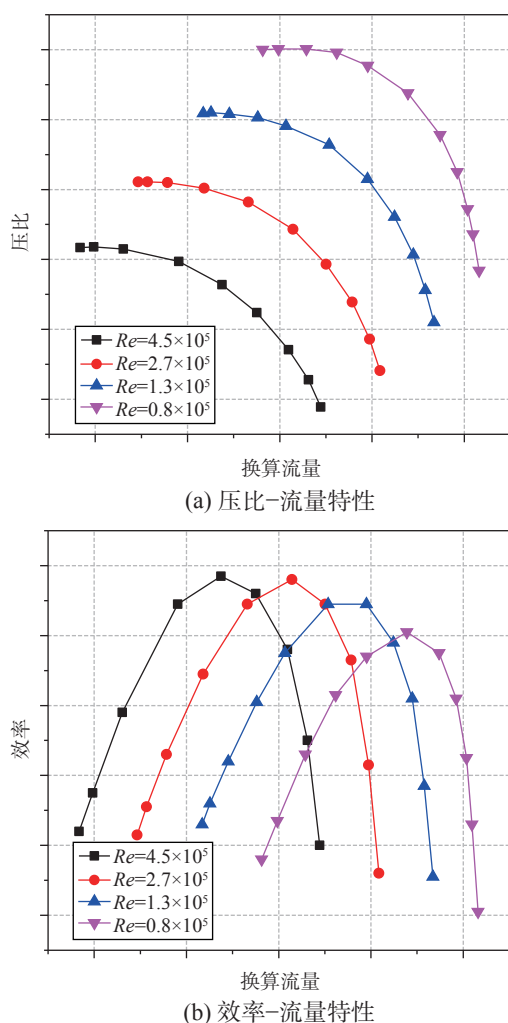


图8 雷诺数对增压级性能的影响
Fig.8 The effect of Reynolds number on the performance of the booster

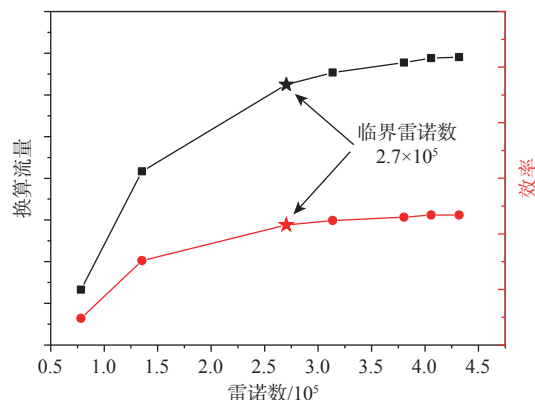


图9 增压级性能随雷诺数的变化趋势
Fig.9 The variation trend of the performance of the booster with Reynolds number

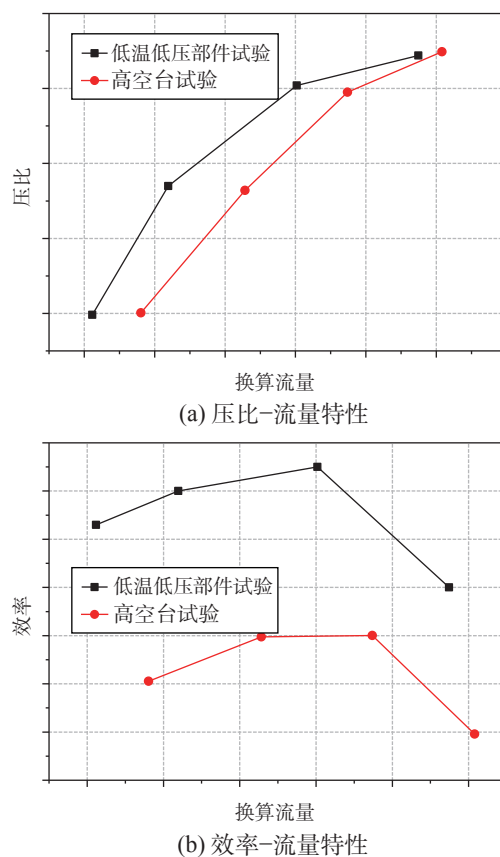


图10 低温低压部件试验与高空台试验结果对比
Fig.10 Comparison of low temperature and low pressure test and altitude simulation results

理方法等原因,导致2种试验获取的流量和效率均存在不同程度的偏差。

6 结论

创建了可模拟真实进口条件下的压缩部件试验流程和方法,主要结论如下:

(1) 常温常压试验由于无法模拟压缩部件在整机环境或高空条件下真实的进口条件,因此无法精准获取部件的真实性能,如加温条件下间隙的变化,雷诺数对部件性能的影响等;

(2) 模拟真实进口条件的部件与核心机或高空台试验结果对比表明,加温加压与低温低压试验方法获取的性能参数中流量和效率变化规律一致,但数值上存在不同程度的差异,说明在部件上开展真实进口条件模拟试验,在一定程度上可反映部件在整机环境下的真实特性,后续将针对部件与整机环境试验结果的差异开展进一步研究;

(3) 研究用增压级在设计转速下的临界雷诺数为 2.7×10^5 ,与《航空燃气涡轮发动机压气机低雷诺数效应试验方法》(HB 20262-2016)^[10]中给出的 2.5×10^5 接近,然而不同转速或者不同压缩部件是否存在差异,还需要作进一步研究。

参考文献:

- [1] 顾 杨,尹红顺,任铭林,等. 加温加压压气机试车台在发动机研制中的作用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008,21(1):18-21.
- [2] WASSELL A B. Reynolds number effects in axial compressors[J]. Journal of Engineering for Power, 1968,90(2):149-156.
- [3] 王 进,骆广琦,陶增元. 雷诺数对压气机特性及发动机稳定性影响的计算和分析[J]. 航空动力学报, 2003,18(1):20-23.
- [4] 肖 洪,吴 虎,廉筱纯. 雷诺数对涡扇发动机性能及稳定性影响[J]. 航空动力学报,2005,20(3): 394-398.
- [5] 赵运生,胡 骏,屠宝锋,等. 雷诺数对大涵道比涡扇发动机性能的影响仿真[J]. 中国机械工程,2013,24(21):2867-2871.
- [6] 王英锋,胡 骏. 雷诺数对轴流压气机稳定性的影响[J]. 航空动力学报,2004,19(1):69-73.
- [7] WILLIAMS D D. Review of current knowledge on engine response to distorted inflow conditions[R]. AGARD CP-400,1986.
- [8] 费金宝. 某组合压气机试验件的设计与验证[D]. 上海:上海交通大学,2017.
- [9] 王桂华,蔚夺魁,洪 杰,等. 航空发动机可靠性试验方法研究[J]. 航空发动机,2014,40(5):13-17.
- [10] 国家国防科技工业局. 航空燃气涡轮发动机压气机低雷诺数效应试验方法[S]. HB 20262-2016,2016.