

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.06.11

高压压气机性能试验件测试与校准方案设计要点

郑芳芳

(中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司, 上海 201306)

摘 要: 航空发动机正向研制过程中需要经历多种试验验证, 试验过程中又需要测量各种类型的参数以表明产品符合性。高压压气机性能试验中试验件上需要测量的参数涵盖种类较为齐全, 以其作为范例对航空发动机主要测试系统及其校准方案设计进行分析阐述。总结测试系统设计过程以及其中需要关注的设计要点和注意事项, 并针对测试系统制定量值溯源方案, 明确校准要求, 确保数据准确, 为航空发动机其他试验件及类似参数测试系统设计实施提供参考。

关键词: 高压压气机性能试验; 测试系统设计; 量值溯源方案; 设计要点; 注意事项

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)06-0054-07

Design Points of Instrumentation and Calibration Scheme for High Pressure Compressor Performance Test

ZHENG Fangfang

(AECC Shanghai Commercial Aircraft Engine Manufacture Co. Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: In the development of aero-engine, many kinds of tests are needed to be verified, and various kinds of parameters need to be measured to show the strict conformity. In the performance test of high pressure compressor, there are nearly all kinds of parameters to be measured, which can be used as an example to analyze the design and implementation of the main instrumentation system and calibration scheme for aero-engine. This paper has provided a reference for the design and implementation of the other aero-engine test rig and similar instrumentation, by summarizing the design processes, including the key points of the instrumentation system and the notices in the design, by establishing a traceability system and clarifying the calibration requirements.

Key words: high pressure compressor performance test; instrumentation system design; traceability system;; design points; notices

0 引言

发动机研制过程中, 需要对部件、材料、整机进行大量的地面模拟和飞行试验模拟后才能确定发动机的性能、耐久性和操纵性^[1]。民用航空发动机研制过程更需要通过设计模型、理论计算分析、制造工艺数据、检验数据、试验测试数据来向适航当局、客户、市场表明发动机的设计符合性和制造符合性, 需要开展材料性能测试、零部件考核试验、系统试验、部件性能试验、核心机整机试验、飞行试验等工作, 以系统工程的思路一步步验证确认设计需求。尤其在核心机整机试验、飞行试验过程中, 有大量的测试验证数据难以在试验件上尽数获取, 且越集成风险越大, 因此较多的测试数据在前期零部件和系统、部件试验件上尽可能地完成测试, 为后续试验开展数据积累。

根据 ISO10012 标准, 量值溯源体系的策划和实施应贯穿产品研发、制造、试验、运营全生命周期^[2-4]。

国外对大型试验设备关键参数校准技术开展了大量研究工作, 通常采用现场模拟实际工况或标准产品测试等对测量系统进行原位校准或在线校准^[5], 而国内目前主要还是基于离线校准、设备级校准。

随着测试技术的进步, 高压压气机性能试验已经基本实现了对各类参数的测试和数据获取, 覆盖了性能试验中常见类型的测试需求, 因此本文以高压压气机性能试验件测试系统为例, 对其设计过程和校准方案制定过程进行深入分析, 为其他试验件测试系统设计和校准实施提供参考与借鉴。

1 高压压气机性能试验件测试系统需求

在大气进气条件下, 高压压气机试验可分为全尺寸压气机试验、模型压气机试验、研究性压气机试验。试验项目主要包括: 压气机的总性能、基元性能及部分级性能试验和压气机性能调试与诊断^[6]。主要目的包括: 获取压气机的总性能; 测定压气机的稳定工作

边界线，确定喘振裕度；测取压气机进出口气流参数场和压气机壁面静压沿程分布；进行压气机性能调试和诊断。通过这些试验的结果来判断压气机是否达到压比、流量、效率和喘振裕度的设计指标，为修改设计提供数据依据^[1]。

随着压气机设计要求的不断提高，试验件的测试需求从早期的进出口温度压力、级间温度压力、气流角等参数逐步演变成更丰富的流程参数、空气系统参数、脉动压力参数、振动参数、应力应变参数，以及其他特种参数，如叶尖间隙、叶尖振幅等。对上述的高压压气机性能试验件上测试需求进行梳理，如表 1 所示。这里还未包括压气机试验器上所实施的监测参数的测试和采集。

表 1 高压压气机性能试验件测试需求分类表	
分类	参数
稳态温度	流程总温
	壁面温度
	腔温
稳态压力	流程总压
	流程静压
	壁面静压
	腔压
	气流速度/方向
动态压力	脉动总压
	脉动静压
振动	振动加速度
动应力	转子件动应力
	静子件动应力
力	轴向力
角度	VSV 角度
叶尖参数	叶尖间隙
	叶尖振幅

在高压压气机性能试验常见的测试需求中，流程参数通常包括主流道的总温、总压、壁面静压、附面层、气流角等。空气系统参数通常包括静子腔或转静子腔的腔温腔压、静子件的壁面温度，可能还会有转子腔的腔温腔压、转子件（如盘）壁面温度等。脉动压力参数一般是指进出口的脉动静压，目的是安全监控，目前逐步增加到叶尖脉动、出口脉动总压、级间脉动静压等。

在压气机性能试验标准和级间参数测试试验标准中均提出了对测量参数的允许误差要求^[6-7]，如表 2 所示。

表 2 压气机试验部分测量参数允许误差	
测量参数	允许误差
压力	$\pm 0.2\%$
脉动压力	$\pm 10\%$
进口温度	$\pm 0.5\text{ K}$
出口温度	$\pm 1\text{ K}$
气流方向	$\pm 1^\circ$

2 测试系统设计要点及注意事项

对一台高压压气机性能试验件而言，要完成一系列试验任务，往往需要通过改装布置上测量这些参数的传感器，测试系统框图如图 1 所示。

测试系统的总体设计需要注意以下几点：

- 1) 应与设计人员充分沟通测点位置，且应基于同一个“坐标系”确定测点“坐标”，避免方向错误或者安装错误影响后续数据分析准确性；
- 2) 应保证所有测量传感器能够安全、稳定地布置在所需测量位置，在保证测量准确性的同时不能因测试硬件自身而影响试验件的安全；
- 3) 应合理设计传感器安装接口，避免装配干涉及内部测试引线无法在装配过程中顺利使用等问题。

为确保试验件设计与测试设计能够满足试验目的，在试验件设计之初便启动测试系统的设计，则效果将更佳，一般设计流程如下所述：

- 1) 确定试验目的和试验科目；
- 2) 测试要求制定，一般由设计人员基于试验要求分解出所需测量的参数，并与测试人员进行初步的可行性沟通，可根据经验确定测试要求的可实现性，包括测量范围、测量精度等；
- 3) 测试系统方案设计，主要根据试验件结构方案初步设计测试系统，此时最好能明确提出测试改装的接口需求，可为设计人员下一步改装设计和强度分析提供支撑；
- 4) 测试系统工程设计，主要聚焦于测试系统本身的设计工作，包括探针、测力环等非标仪器仪表的设计，安装支架、贴片布线路径设计、旋转信号引出装置设计、货架传感器选型等；
- 5) 测试硬件配置，该阶段任务包括非标仪器仪表、支架或接口等加工、货架传感器采购等；
- 6) 工艺规程制定，将后续测试硬件装配、应变片贴片、引线布线引出等工艺过程制定清晰，便于后续实施人员的装配、测量。

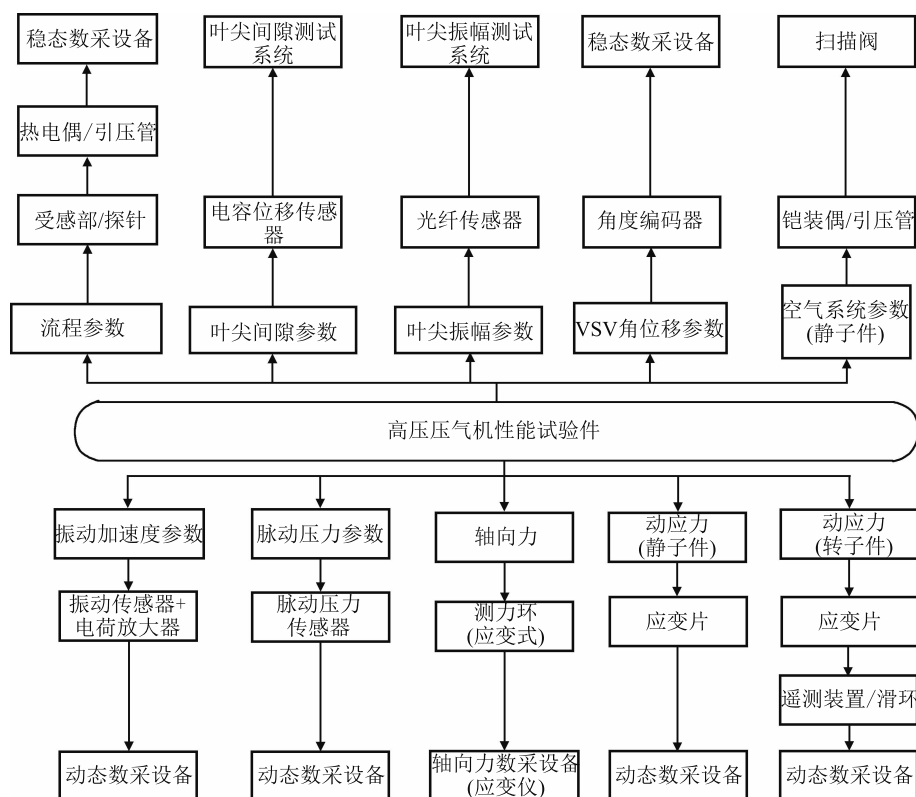


图1 高压压气机性能试验件测试系统框图

测试系统涉及参数种类繁多，每一类参数所涉及的测试方案设计要点各异，下面对设计要点和注意事项进行总结阐述。

2.1 非标类设计

2.1.1 探针

高压压气机性能试验中常用的探针包括：插入式总温探针、总压探针、总温总压复合探针、尾迹靶、附面层探针、叶型探针、方向探针等。常用的探针如图2所示。

探针设计过程中，除了需要考虑安装接口的结构尺寸输入外，还需要重点关注测点位置的气动环境参数，如最高温度、最大压力、气流角和对应马赫数等，这些环境参数为探针内部结构设计、强度分析提供了依据。

一般流道插入式探针选用带滞止罩式，使其拥有较大的不敏感角。一般情况下都采用单支点安装形式，因此强度分析可直接采用理论的悬臂梁模型计算应力应变分布、最大挠度、固有频率等参数。为减小对流道的影响，还应根据设计的探针尺寸计算堵塞比。当探针足够长时，测点通常选用等环面布置方式，当探针长度不足时，可选用等高布置。

叶型探针往往用于级间参数测量，如压气机级间

的压力或者温度分布测量。因级间空间狭小，且叶片较多，直接采用插入式探针不仅容易导致堵塞比不符合要求，也可能因其安装于转静子叶片间而带来磕碰风险，因此测量级间参数时一般选用叶型探针方式。该方式即将滞止罩、热电偶或引压管按照测点位置要求布置在静子叶片上，连同叶片形成叶型探针。一般叶型探针布点数量需根据叶高考虑，当叶高足够时，可将所有测点布置于同一个叶片上，当叶高不够时，可将所有测点沿叶高分别分布于邻近的几个叶片上。

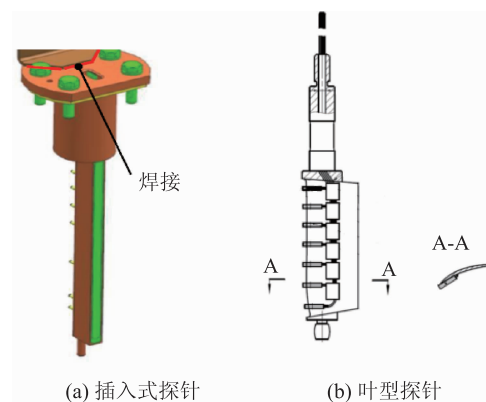


图2 常用探针图

2.1.2 测力环

测力环因其用于测量轴向力且形状为环状而得名,如图3所示。测力环主要安装于推力轴承及其轴承座之间,且通常为非正式装机件,因此在不同试验中,需根据轴承及轴承座结构尺寸,以及所测量的参数范围针对性地设计不同的测力环。

测力环设计中的主要参数包括:环内外径尺寸、凸台数量及分布位置、凸台宽度、应变片粘贴位置等。作为力传感器,测力环采用在环上布置应变片组成全桥的方式实现测力功能。

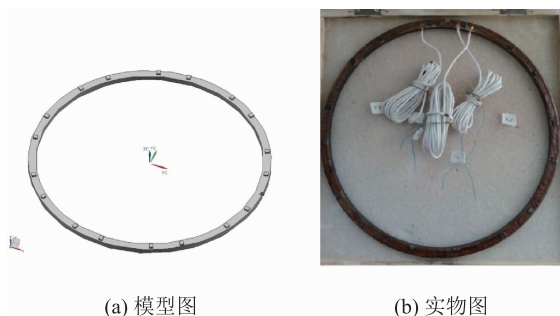


图3 测力环图

2.2 货架类选型

2.2.1 脉动压力传感器

脉动压力是航空发动机研制过程中必不可少的测量参数。脉动压力传感器因其快速的响应能力,准确的测量性能被广泛应用。目前航空发动机中常用的脉动压力传感器主要有两种工作原理:压阻式原理(如kulite压力传感器)与压电式原理(如kistler压力传感器)。其中,压阻式压力传感器既可测量脉动压力,也可测量稳态压力,因而具有更广泛的应用范围。

选用脉动压力传感器时除了考虑测量范围、测量精度外,更重要的是考虑其耐温能力、响应能力以及结构尺寸,因为在高压压气机性能试验中脉动压力的测量环境往往温度较高且空间紧凑。两种常用的脉动压力传感器如图4所示。

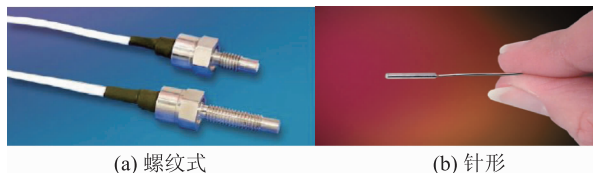


图4 螺纹式及针形脉动压力传感器

2.2.2 振动传感器

振动参数是航空发动机研制及使用过程中必须测量的安全监控参数,在压气机试验中亦是如此。目前,

航空发动机中常用的振动传感器包括BK、Endveco、kistler等。振动传感器选型时除了考虑频率范围、加速度范围、测量精度外,还需要特别考虑耐温能力,因为压气机出口及后机匣位置的温度往往超过了一般振动传感器的耐温范围。

为准确测量振动加速度,振动传感器往往需要通过支架安装于机匣安装边等位置,传感器及支架见图5。为避免支架自振或共振对测量结果产生影响,设计支架时需要对其固有频率进行计算分析。

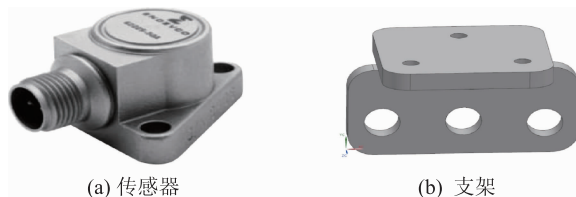


图5 振动加速度传感器及其支架示意图

2.2.3 叶尖参数测试传感器

叶尖参数主要指叶尖间隙参数和叶尖振幅参数,这两种参数的测量一般也会被作为特种测试开展。

2.2.3.1 叶尖间隙测试传感器

叶尖间隙(BTC, Blade Tip Clearance)测试,主要测量的是转子叶片叶尖与机匣间的距离,在航空发动机试验中一般测量风扇叶尖间隙、压气机叶尖间隙和涡轮叶尖的间隙。

目前叶尖间隙测试系统主要为货架类,常见的包括Rotadata和Fogale公司的产品,近几年国内也逐步开展研制,如天津善测公司的相关产品。测量叶尖间隙的方式较多,如光纤式、微波式等。Rotadata公司有测量叶尖间隙的系列测试系统,目前国内采购并投入使用的主要是其电容调频式叶尖间隙测试系统。Fogale公司主要推出电容调幅式叶尖间隙测试系统。

压气机测量叶尖间隙位置多为单层机匣,压气机后几级可能涉及双层机匣,此时主要关注安装结构,避免无法安装传感器,或传感器铠装引线过度弯折。高压涡轮和低压涡轮叶尖间隙测试时主要注意涡轮叶片的结构,如h型叶片和H型叶片对传感器安装及标定都有不同的要求。

2.2.3.2 叶尖振幅测试传感器

叶尖振幅(BTT, Blade Tip Timing)测试,主要基于叶片到达时间来测量转子叶片叶尖在转动过程中发生的振幅,BTT叶尖定时系统也因此得名。目前该测试以监测发动机安全为主,同时也有基于此测试原理和数据开展非接触式叶尖振幅测量叶片动应力的应用

研究,国内当前投入应用较少。

常见的叶尖振幅测试系统主要来自于 Rotadata 公司、Hood 公司,两者均采用光纤式测量原理,因此在选用时主要考虑传感器耐温能力、软件数据处理能力等。因叶尖振幅数据往往为欠采样,为确保测量准确性,一般每级会安装 5 个以上的传感器。如 Hood 公司的叶尖振幅测试系统提供了传感器布局软件,将每级叶片数量、需避开位置等信息输入后,该软件可计算出最优安装位置。

2.3 布线类设计

2.3.1 静子件/转子件参数布线

静子件参数主要包括静子腔、转静子腔的腔温腔压,静子件(如机匣、管路、导叶等)壁面温度、动应力等。这些参数的测点可布置在静子件上,且所有引线均可通过静子件逐步引出试验件外。

转子件参数主要包括转子腔(如旋转盘腔)的腔温腔压、转子件(如动叶、盘、轴等)壁面温度、动应力等。这些参数的测点只能布置在转子件上,传感器或者引线将随着转子件旋转。

该类测点布线时应尽可能地满足以下要求:

- 1) 选用已有开孔位置,减少密封要求;
- 2) 引出位置尽量综合,减少机匣开孔数量;
- 3) 避开小空间引线,减少因操作空间狭小带来的风险(如引不出、引线损坏等);
- 4) 路线尽量不跨部件/单元体,减少引线与装配之间的配合难度。

目前国内在部件或者核心机、整机试验件上较少

测量转子腔温腔压、壁温等参数,而是以动应力测量为主。其中,测量腔压时需要特别注意的是:压力测点会受到因引线路径设计方案产生的高度差而引入的额外重力影响,且传感器本身因其膜片在旋转状态下会因离心力而产生额外变形,若要准确测得腔压,需将因旋转额外产生的压力计算并去除。

2.3.2 旋转信号引出

转子件参数信号引出时需通过旋转信号引出装置,如滑环、遥测等,通过该装置将旋转件上测得的温度、压力或者应变传输给静子结构上的引线,进而通过测控间的数据采集系统进行采集、计算、分析。

1) 滑环:一般用来传输应变片或者热电偶的电信号。目前用于航空发动机的国产滑环通道数有限,常用的是 20 通道。国外 aerodyn 等公司,可根据需求定制滑环产品,包括最高转速、通道数、安装结构等。

2) 遥测:一般由发射模块、天线、接收模块组成,目前常用的遥测系统包括 Rotadata, Datatel 和 Manner 等公司的产品。其中 Manner 公司遥测产品主要用于常温环境试验,如立式旋转试验器等。遥测采用非接触式传输,可在一定程度上降低对空间的要求;遥测的应变模块、温度模块等可定制布置于发射模块上,实现更多通道的同时测试。

3 测试系统校准方案及注意事项

基于上述测量参数要求、测试系统设计,为确保数据准确,对被测参数的量值溯源过程进行了梳理,溯源方案框架如图 6 和图 7 所示。

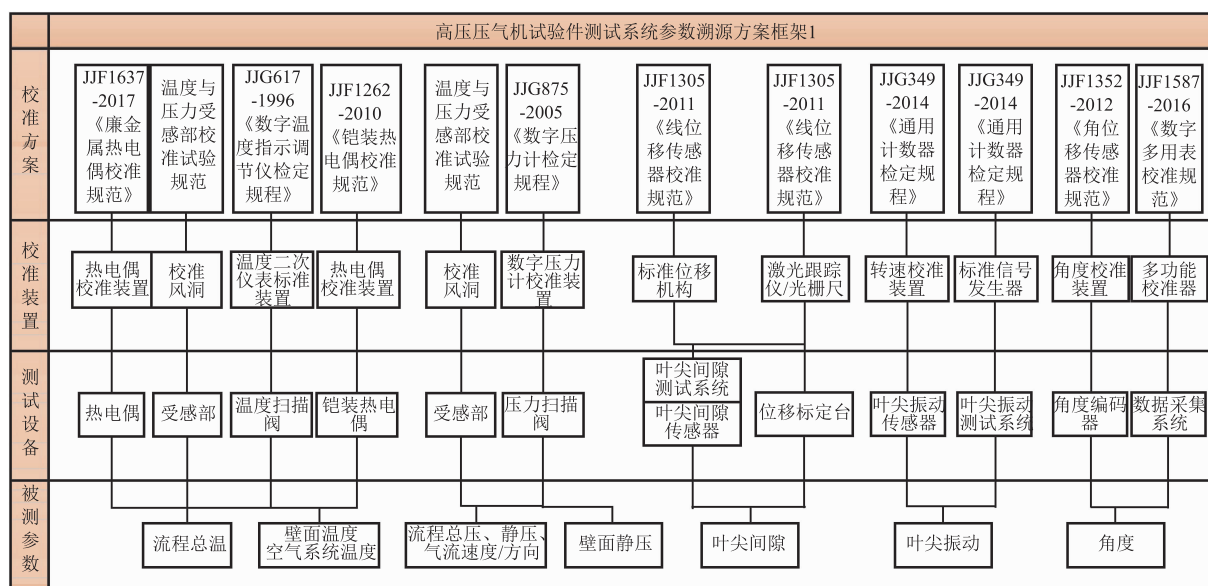


图 6 高压压气机试验件测试系统参数溯源方案框架 1

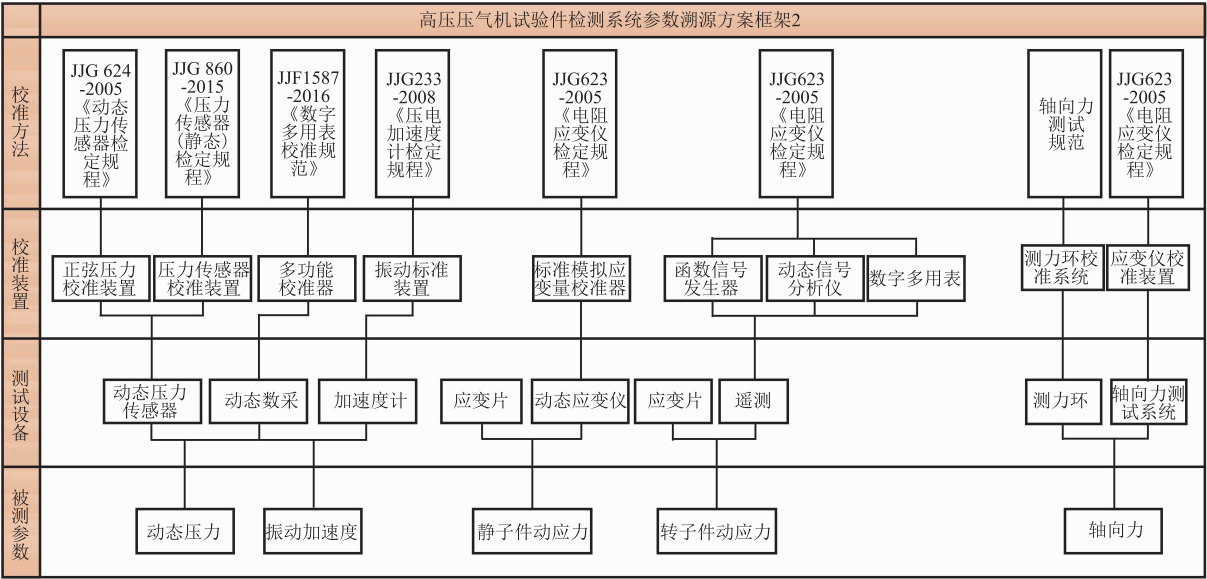


图 7 高压压气机试验件测试系统参数溯源方案框架 2

在该试验件测试系统中，有较多非标类或特种测试系统需重点考虑其校准要求，其他货架传感器或者数采系统均可直接采用现行有效的校准规范和检定规程。

下面重点对探针、测力环、叶尖间隙测试系统的校准要求及注意事项进行总结。

3.1 探针的校准要求及注意事项

根据不同的测量要求可将探针分为温度探针和压力探针，其中方向探针基于压力测量结果和探针设计结构计算得到方向角及压力分量值。

1) 温度探针

总温探针的校准分几步开展：首先，在热电偶装入探针壳体之前先进行校准，合格后装入；在加工成探针后应进行多项校准，如在热风洞中校准探针的温度测量精度，在常温风洞中进行温度恢复系数的校准。目前，一般都会开展常温风洞校准工作，得到在不同马赫数下的温度恢复系数；热风洞校准需进一步研究并逐步投入应用，以得到更准确的评价。

2) 压力探针

压力探针在试验件上往往实现的是压力信号的引出，真正对压力信号进行采集分析的是在后端试验台架上的压力扫描阀或者压力传感器和配套数采系统。此时压力探针对于测量结果的影响主要来自于其结构的设计，一般对于压力探针的校准仅在常温风洞中测量探针的不敏感角，与设计及测试环境参数进行比较，使得在真实的不敏感角范围内获得更为准确的压力信号。

3.2 测力环的校准要求及注意事项

测力环的校准主要为了获得力值与所测得的桥路电压之间的关系，并将其输入数采系统软件，实现轴向上力的实时测量与显示。测力环校准系统示意图如图 8 所示。为了获得准确的关系以及不确定度，校准过程一般分为单环标定和组合标定两部分，这两部分均为静态校准。

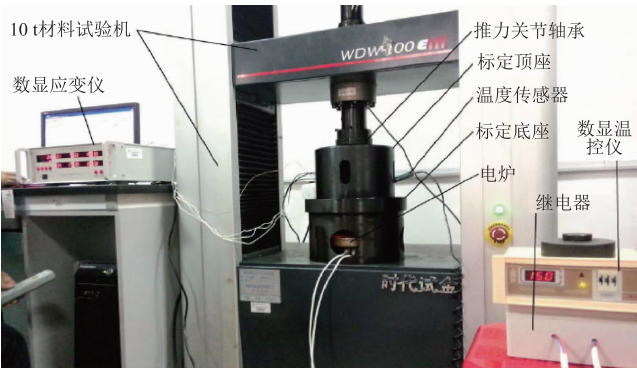


图 8 测力环校准系统示意图

单环标定指将测力环单件置于力学试验机上，按测量范围逐点施加载荷并测得对应电压值。单环标定可获得初步的拟合曲线以及灵敏度等参数，也可将单环置于滑油环境进行油浸和温度影响测试，可用于评价测力环本身特性。

组合标定指将测力环与轴承组件组合装配后置于力学试验机上进行逐点加载测试，可将装配及轴向上力传递过程对测量带来的影响一并考虑进来，获得的拟合曲线更贴近使用工况。

3.3 叶尖间隙测试系统的校准要求及注意事项

叶尖间隙测试系统常用的电容调频式和电容调幅式因其不同原理有不同的校准要求。

电容调频式因其必须在旋转状态下才能测得数据,因此其校准系统也必须是旋转装置。使特定叶片处于旋转状态下,将传感器固定安装在支架上,通过建立传感器输出的频率与给定间隙之间的关系来完成校准工作,并给出不确定度评定。

电容调幅式因其可在旋转状态或者非旋转状态下校准而被更加广泛地应用,其降低了对校准系统的要求,通用性较好。叶尖间隙测试静态校准系统如图 9 所示。

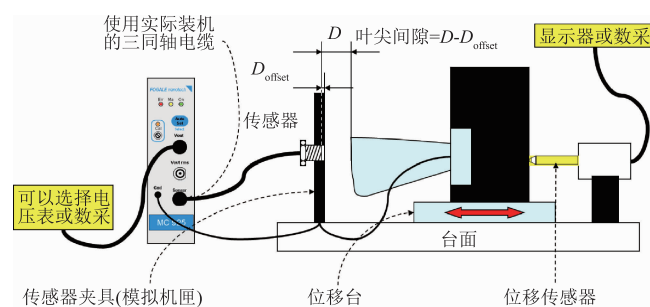


图9 叶尖间隙测试校准系统示意图

电容调幅式测试系统在校准过程中需要注意以下几点:

1) 尽可能用真实叶片,或设计与真实叶片叶尖型面参数一致的模拟叶片。

2) 叶尖间隙传感器及其电缆和配套模块应匹配使用,即该匹配关系从校准沿用至实际工作环境。

3) 叶片和传感器安装在位移台上时,除了对中之外还应在 Z 轴和 Y 轴方向上进行校准。其中, Z 轴的校准为了获得最大/最灵敏输出,因为在相同间隙条件下,叶尖型面越宽的位置产生的电容值越大,便于准确测量; Y 轴的校准为了模拟叶片转动时的切向线速度影响。

4) 根据叶尖类型选择校准类型,如针对中间单峰的叶片、h 型偏单峰叶片和 H 型双峰型叶片需选择对应类型,以获得准确的拟合公式。

4 总结

随着高压压气机性能指标的提高,对其试验件测试技术也提出了更高的要求。本文对高压压气机试验件测试系统设计及校准方案制定进行了介绍和分析,为相关测试系统设计提供技术借鉴。近几年,在高压压气机试验件上已逐步新增了旋转盘腔的腔温腔压测试和轮盘的壁面温度实时测试,并随着测试技术的进步逐步采用了新的测试仪器仪表。今后将继续开展相关新技术的校准方法研究,同时在其他试验任务中还可能增加声学测试、污染物排放测试、示温漆温度场测试等,这些测试系统的设计和校准还有与之对应的特殊要求,在未来的研究中应重点关注。

参考文献

- [1] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [2] ISO 10012 - 2003 Measurement management system - Requirements for measurement processes and measuring equipment[S]. 2003.
- [3] 杨国恩, 马伟, 李诚. 计量测试在商用飞机全寿命周期的应用[J]. 工业计量, 2017(4): 12 - 16.
- [4] 张学涛, 周世锋, 田阳, 等. 浅谈民用飞机适航性与计量测试之间的关系[J]. 计测技术, 2012, 32(2): 55 - 58.
- [5] 王玉芳, 王亮, 李少壮. 国外航空发动机参数量值溯源体系综述[J]. 计测技术, 2018, 38(2): 9 - 12.
- [6] HB 7115 - 94 压气机气动性能试验[S]. 1994.
- [7] HB 20347 - 2016 航空燃气涡轮发动机压气机级间参数测量试验方法[S]. 2016.

收稿日期: 2019 - 09 - 22; 修回日期: 2019 - 10 - 27

作者简介



郑芳芳(1985 -), 女, 浙江舟山人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事航空发动机测试系统设计与校准研究。