

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.02.03

国外航空发动机参数量值溯源体系综述

王玉芳¹, 王亮², 李少壮¹

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 464000)

摘要: 在搜集、整理、研究国外航空发动机量值溯源体系建设总体情况的基础上, 重点介绍了国外量值溯源体系的顶层设计、相关标准规范体系建设的总体概况, 并以国外著名航空发动机公司的量值溯源体系为例, 阐述了国外航空发动机计量体系的先进性和完备性, 为我国航空发动机参数量值溯源体系的建设提供参考。

关键词: 航空发动机; 参数溯源; 计量保障

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)02-0009-04

An Overview of the Traceability System of Foreign Aero Engine Parameters

WANG Yufang¹, WANG Liang², LI Shaozhuang¹

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 464000, China)

Abstract: On the basis of collecting, collating and studying the overall situation of the overseas aviation engine measurement traceability system, this paper mainly introduces the top-level design of the overseas measurement traceability system and the general situation of the construction of relevant standard specification system. Taking the value traceability system of famous foreign aero-engine companies as an example, this paper expounds the advanced and completeness of the foreign aviation engine metering system. This paper provides reference for the construction of the parameter measurement system of aviation engine in China.

Key words: aero engine; parameter traceability; metrological guarantee

0 引言

计量作为联合国工业发展组织认定的国家质量基础要素之一, 其技术水平和能力直接体现了国家总体的工业技术发展实力。欧美国家的政府管理部门和企业组织对计量测试能力的发展建设给予了高度重视, 特别是与航空发动机相关的研发生产企业, 对发动机研制过程中的计量保证工作与计量保证能力建设给予了充分的投入, 在航空发动机技术发展方面发挥了有力的支撑作用。国外类似发动机这样的大型工业产品的计量保证工作, 经历了3个发展阶段: 第一阶段是传统计量, 即在实验室进行全参数、全量程量值传递; 第二阶段是在第三代发动机研制末期, 在装备研制现场开始进行计量校准服务, 计量和型号研制开始结合起来; 第三阶段是从第四代发动机研制开始, 因发动机研制技术复杂性、使用保障性要求提高, 计量全面融入发动机研制流程, 并开始进行可计量性设计, 计量对型号研制、生产、使用的保证能力大幅度提升。

以罗罗、普惠、GE、赛峰等为代表的国外著名的航空发动机公司和研发机构对测量数据准确度保证和相关

量值溯源工作都非常重视, 量值溯源体系的策划和实施贯穿了产品研发、试验、运营整个生命过程^[1]。国外对大型试验设备关键参数的校准技术开展了大量的研究工作, 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, 相关技术比较成熟。

发达国家在溯源体系的顶层设计方面运用系统工程的方法, 整合了测试需求提出、测量系统设计、校准系统设计、测量过程控制、测量可靠性、测量风险控制等方面的要素, 相关的标准、指南、规范体系日臻成熟^[2-5]。

1 国外量值溯源体系的顶层设计

1994年, NASA编制了《NASA Reference Publication 1342 Metrology-Calibration and measurement processes guidelines》, 该报告运用系统工程的方法, 以全局的视角对测量质量控制、测量要求的提出、测量系统设计、测量溯源、校准间隔控制等方面进行了系统的梳理和研究^[6]。

溯源性方面, 如图1所示, 报告将其扩展至测量系统的设计、制造、测试和维护环节, 同时将性能参

数、规格、决策等环节与传统的溯源环节综合考虑,形成了更宽泛的溯源性架构。

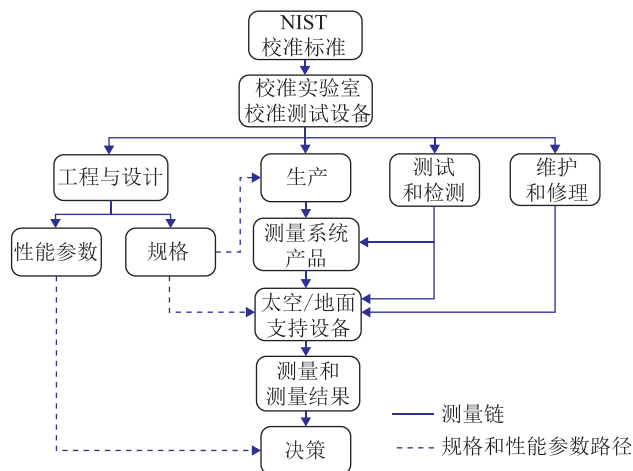


图1 NASA 溯源性层级结构

报告提出“溯源性涉及到测量链上每一个节点的测量标准、测量技术、周期校准、数据分析、统计过程控制、可靠决策。这些可用于重构测量的信息,必须文件化并保存以保证测量溯源的完整性。对每一个节点,文件应包括其最终项目的特定量值、测量不确定度要求、测量不确定度预算、校准使用的标准、测量时的环境条件”。

报告以测量和校准过程设计为核心,向上扩展至测量要求提出的规范性,向下扩展至溯源要求、校准间隔控制等环节。

报告提出了开展测量活动前应进行测量要求定义,而测量要求定义包括10个阶段,即任务描述、系统性能描述、确定系统性能参数、确定部件性能参数、确定测量参数、确定测量要求、测量系统设计、确定校准过程要求、校准系统设计、确定溯源性要求。

报告融入风险分析理论,引入测量决策风险概念,指出测量结果是用于决策的,对决策风险的评估将决定测量可靠性目标,而测量可靠性目标将决定测量和校准过程设计和控制的细节。报告中提出了根据测量应用关键度和困难度确定测量不确定度置信水平,提出了与可靠性理论中的平均无故障时间(MTBF)类似的测量系统平均超差时间(Mean Time Between Out Of Tolerance, 简称 MTBOOT),以及期末不超差概率等可靠性指标。报告指出应利用上述可靠性指标对测量系统进行可靠性建模分析,根据可靠性分析结果优化校准间隔,以满足测量要求中的可靠性要求。

2 国外量值溯源相关标准规范体系

从上世纪五、六十年代起,GE, RR 等对于发动

机性能测试中的各参数影响规律进行了深入细致的研究分析,形成了众多的技术标准规范性的研究结果,客观上已经成为无法回避的技术垄断。此外,在航空发动机的发展过程中,整个工业基础技术标准体系是支撑发动机技术性能不断进步的根本保证。政府持续不断的大力引导与扶持、企业间的竞争与合作推动行业协(学)会参与建立技术标准。欧美国家航空发动机行业当前普遍采用美国机动车工程师协会(SAE)颁布的发动机专业相关技术标准,以满足民用发动机在研制、生产、适航取证、运营、维护及管理等方面的需要。SAE 标准被公认为国际性标准,其在全球范围内具有广泛的协调一致性。截止至2013年,SAE 航空航天理事会推进系统分部下设的16个标准化技术委员会(含一个特别委员会)颁布各类标准共1319项。其中,航空航天推进系统通用标准(E-25 发布)为1020项。标准类别包括航空航天信息报告(AIR)、推荐惯例(ARP)、航空航天标准(AS)等。其中各技术委员会发布的AS类标准数量为888项。在这些标准、规范和技术报告中,结合工程实践提出了一些原理、试验结论、经验数据以及最新技术或仍需评估的技术信息等。这些技术标准文件中都包含有为数众多的测试、试验、校准等相关信息,支撑着航空发动机测试试验技术的建设发展,为国外航空发动机参数的量值溯源工作提供了技术支撑^[7-9]。

在其标准规范中,每一个关键参数的计量测试方法都能在研究报告或操作手册中找到详细的规定。比如在ARP4990《涡轮流量计燃油流量计算》中,详细规定了用涡轮流量计进行燃油质量流量测量和修正的方法,包括:燃油特性如密度、粘度和低热值的测量和修正方法,利用涡轮流量计的校准曲线进行温度和压力修正的方法,以及如何用上述参数进行修正后得到低热值修正的燃油质量流量。对于低热值的测量,甚至考虑了样品在称重时受的空气浮力的影响。影响因素不仅考虑全面,而且在大量验证试验活动的基础上都用经验公式进行了量化,在使用时只需要根据具体的情况进行选用或简化。这些量化公式为测量不确定度分析和评定,以及确定每个影响量的测量准确度要求提供了保证。

美国的AEDC(Arnold Engineering Development Center)七十年代就编制了《SAE AEDC-TR-73-5 航空燃气涡轮发动机测量的不确定度指南》(Uncertainty In Gas Turbine Measurements),至今仍被航空发动机行业所引用,该手册为了使各燃气轮机试验设备获得的数据之间具有可比性,提出了一种规范化的误差分析和不确定度评定方法,主要内容包括误差分类、误差传递、量值溯源、

不确定度模型等内容。该手册对燃气轮机试验过程中常用的空气流量、单位燃油消耗率、推力、燃油流量、压力、温度等测量系统进行了描述,对可能的误差来源进行了分析,并进行了不确定度评定。手册结构清晰,由于有实例分析和计算,使读者较易理解,专业性、针对性和实用性较强。该手册得到广泛的应用,在工程界发表的很多文献和书籍都引用了该手册(包括 JSGS-87231 及 JSSG-2007A),虽然该手册中有部分概念和不确定度评定细节与目前我国采用的标准不同,但对于航空和燃气轮机行业的工程师仍很有参考价值。值得注意的是该手册的作者 Dr. R. B. Abernethy 为普惠公司成员和 ASME 成员,并参加起草了 ASME PTC19.1 的早期版本。

近期 NASA 编制了《NASA-HDBK-8739.19-3 测量不确定度分析原理和方法》《NASA-HDBK-8739.19-4 测量决策风险分析》等规范,对相关技术进行了详细的描述;ASME PTC 系列标准《ASME PTC 19.1 Test Uncertainty 测试不确定度》《ASME PTC 19.2 Pressure Measurement Instruments and Apparatus 压力测量仪器和设备》《ASME PTC 19.3 Temperature Measurement 温度测量》《ASME PTC 19.5 Flow Measurement 流量测量》等对发动机测试计量工作数据准确度保证有着很高的参考价值^[10,11]。

3 国外航空企业及机构量值溯源体系

3.1 罗罗公司(RR)

罗罗公司建立了完善的计量测试及管理体系,开展的计量检测活动贯穿了产品整个生命过程。在研发领域,主要解决两类问题:一是哪些单个组件及子系统的特性需要计量,以及何时计量的问题;二是发动机在工作时,如何对其内部过程进行计量检测。在研发阶段,进行 3000 多个相关数据的检测,并利用这些数据对质量确认,确保罗罗产品能够得到不断提升和改进。在生产制造阶段,对生产过程中每一个环节的相关产品部件性能进行计量确认,包括公司内部生产的组件、外部供应链上的产品部件、装配集成阶段以及出厂前终端产品整体性能的计量确认。在售后服务阶段,对售后产品的性能进行维护,涉及产品性能检测和问题诊断。早在 2006 年,罗罗就已经通过卫星实时监测它的 3000 多台发动机的运行数据并进行分析。

3.2 通用电气公司(GE)

GE 公司对计量与测试设备采用分级管理模式。在其组织内部,计量测试的管理被划分为四级,第一级为公司最高级别标准,第二级为传递标准(工作级别标

准),第三级为工作计量器具,第四级为测试、试验设备,所有的计量和测试设备、器具均需溯源到国家标准或国际计量标准。在公司内部,所有校准或校验合格的计量和测试设备都属于其中的一级,通过与高一级的标准比较进行计量和测试设备的校准。产品性能参数、测试试验设备、校准设备和计量中心、计量测试实验室的计量标准构成了一条完整的量值溯源链,保证了发动机产品参数的量值统一和数据准确。

3.3 美国空军阿诺德工程研究中心(AEDC)

AEDC 设有精密测量设备试验室(Precision Measurement Equipment Laboratory, PMEL),PMEL 是美国空军计量校准机构(Air Force Metrology and Calibration, AFMETCAL)认证的试验室,PMEL 为 AEDC 的温度、压力、电压、露点等测量设备提供校准服务,以保证所有测量可以溯源到美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)。

AEDC 拥有大量的试验器,很多试验器属于专用测试设备,除了保证各直接测量参数使用的测量设备的准确,还开展了大量的间接参数测量设备乃至整个系统的综合校准,包括:使用专用设备对发动机流量管流出系数进行校准研究,采用阵列式临界文丘里管对多个高空模拟试验舱进行空气流量校准,对发动机试车台推力进行综合校准研究等,有力保证了航空发动机试验数据的准确。

AEDC 还运用系统工程的思路,以保证数据准确为目标,统筹考虑数据有效性和质量保证性,将溯源工作集成到试验程序中。例如在试验前综合考虑所有可能影响数据准确性的因素,包括控制试验设备技术状态、优化试验程序、开展现场系统校准、优化测量截面测点布局、关键测量点冗余设计、通过数据验证技术剔除包含粗大误差的数据、开展试验前的检查以确保试验成功。图 2 显示了美国阿诺德工程研究中心(AEDC)规定的试验前的活动。

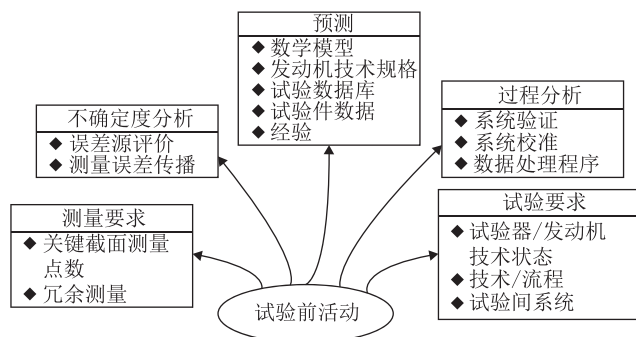


图 2 阿诺德工程研究中心规定的试验前活动

3.4 俄罗斯中央航空发动机研究院 (CIAM)

俄罗斯航空发动机参数量值由国家计量溯源体系来保障,在航空发动机研制过程中所有计量保障工作由总计量师统一管理,计量保证工作由专人协调,计量传递最终溯源到俄罗斯最高计量部门——门捷列夫研究院。航空工业部门则由曙光标准计量研究院统一管理计量工作,在发动机研制、生产及服役期间对所有的计量校准过程都有一套完整的管理体系和具体方法,并已纳入计量管理程序。

俄罗斯的 CIAM 试验基地有相当高的计量检测技术水平,并拥有先进的检测及校准设备,CIAM 试验基地拥有既满足自身要求,又满足行业要求的所有发动机参数测量标准和装置。其校准系统的多项标准代表着国家计量的最高水平,实验中心的计量部门已被授予检验测量设备、鉴定完成测量的方法和评审计量文件的权利。同时,各型航空发动机研制都需编制专门的计量保证大纲,用于落实贯彻计量校准的要求,并确保航空发动机研制全过程测量数据的准确性与一致性。

4 结论

航空发动机被喻为飞机的“心脏”。由前述国外航空发动机研制生产单位针对发动机参数量值的管理和技术保障工作实践可以看到,对不断发展进步的航空发动机技术而言,支撑其参数量值可靠溯源的计量保障体系建设是一项重要的基础工作。

我国的航空发动机产品在由仿制到自主研发的发展道路上不断进取,已经形成了从活塞螺旋桨发动机到大型涡扇发动机的全系列产品,在支撑国防武器装备发展和自主民用航空产品方面发挥了越来越显著的作用。

发展大型航空发动机产品,必须坚持自主创新的发展思路,立足既有技术基础,积极对标国际先进技术标准,不断提升相关的技术保障能力。航空发动机参数量值溯源体系的建设,是发展大型航空发动机产品不可或缺的重要基础工作,需要从产品参数的量值溯源手段、技术标准规范、管理保证机制等多个方面着手,系统规划、持续推进,并使其成为产品研制工程实践活动的一个有机的组成部分。

目前,我国大型客机发动机研制正处于起步阶段,为了与国际接轨,航空发动机溯源体系建设必须高标准、严要求。梳理大客发动机验证机参数溯源现状,对

标国际先进,找出系统存在的不足,明确参数溯源体系建设的方向,在技术能力、标准规范、组织管理等方面加强航空发动机参数溯源体系建设,才能为航空发动机研制做好保驾护航工作。

参 考 文 献

- [1] ISO 10012 - 2003, Measurement management systems - Requirements for measurement processes and measuring equipment [S]. 2003.
- [2] MIL - STD - 1839D, CALIBRATION AND MEASUREMENT REQUIREMENTS[S]. 2010.
- [3] MIL - HDBK - 1839A, CALIBRATION AND MEASUREMENT REQUIREMENTS[S]. 2010.
- [4] JSSG - 2007B, ENGINES, AIRCRAFT, TURBINE[S]. 2007.
- [5] ASME PTC 19.1 - 2005, Test Uncertainty[S]. 2005.
- [6] Castrup H T, Eicke W G, Hayes J L, et al. Metrology: Calibration and measurement processes guidelines [J]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1994, 95.
- [7] NASA - HDBK - 8739.19 - 2, Measuring and Test Equipment Specifications, NASA Measurement Quality Assurance Handbook[S]. 2010.
- [8] NASA - HDBK - 8739.19 - 3, Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods, NASA Measurement Quality Assurance Handbook[S]. 2010.
- [9] NASA - HDBK - 8739.19 - 4, Estimation and Evaluation of Measurement Decision Risk, NASA Measurement Quality Assurance Handbook[S]. 2010.
- [10] MALLOY D. Improved data validation and quality assurance in turbine engine test facilities [R] AIAA, SAE, ASME, and ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit, 29 th, Monterey, CA. 1993, 5 - 6.
- [11] AC43 - 207, Correlation, Operation, Design, And Modification Of Turbofan/Jet Engine Test Cells[S]. 2002.

收稿日期: 2018 - 01 - 03



王玉芳 (1976 -), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航空发动机测试计量及数值仿真。

2005 年毕业于北京理工大学机电工程学院, 同年到航空工业计量所工作至今。主持参与了航空基金、国防及工信部科研项目多项, 先后发表学术论文 20 余篇, 编译撰写国外航空发动机测试及校准译文集系列、民用航空发动机参数溯源链手册等专业书籍多套。