

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.02.10

民用航空发动机全生命周期全链路 测量管理体系建设研究

徐苒, 吴欣欣

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 201306)

摘要: 为打破传统计量保障仅关注测量设备准确性而非测量结果可靠性的局限, 构建了适用于民用航空发动机全链路的测量过程控制管理体系。该体系以提升测量数据质量为目的, 覆盖从部件设计到整机试验, 从适航取证到客户交付所涉及的全部产品测量过程。在测量过程设计阶段, 根据测量需求及过程的关重程度, 分析测量能力, 导出测量质量要求。在测量过程控制阶段, 根据不确定度分析结果, 锁定不确定度来源, 利用测量系统分析、控制图、测量能力审核等手段监控测量过程。在测量有效性验证阶段, 结合科研阶段航空发动机测量过程特点, 建立同族测量过程归集, 通过测量不确定度评定实现质量验证。该体系初期应用于厂内装配执行过程“高压压气机转子装配”项目的测量分级、能力分析、过程监控、结果验证等, 对实现包括试验验证、生产制造等过程的全部相关方测量过程管理具有借鉴意义。

关键词: 民用航空发动机; 全生命周期; 全链路; 测量管理; 测量质量

中图分类号: TB9; V263.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2024) 02-0089-10

Research on the construction of a full life-cycle and full-link measurement management system for civil aviation engines

XU Ran, WU Xinxin

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

Abstract: In order to break the limitation of traditional measurement guarantee that only focus on the accuracy of measuring equipment rather than the reliability of measurement results, a measurement process control management system suitable for the full link of civil aviation engines has been constructed. The system is designed to improve the quality of measurement data, covering the entire product measurement processes from component design to overall test, from airworthiness certification to customer delivery. In the measurement process design stage, according to the measurement requirements and the degree of importance of the process, the measurement capacity is analyzed, and the measurement quality requirements, namely measurement uncertainty, are derived. In the measurement process control stage, according to the results of uncertainty analysis, the sources of uncertainty are identified, and the measurement process is monitored by means of measurement system analysis (MSA), control chart, and measurement capability audit. In the measurement validity verification stage, combined with the characteristics of aero-engine measurement process in

收稿日期: 2024-03-31; **修回日期:** 2024-04-20

基金项目: 中国航发商发测量管理体系建设项目(MR130)

引用格式: 徐苒, 吴欣欣. 民用航空发动机全生命周期全链路测量管理体系建设研究[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 89-98.

Citation: XU R, WU X X. Research on the construction of a full life-cycle and full-link measurement management system for civil aviation engines[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(2): 89-98.



scientific research stage, a same family measurement process collection is established, and quality verification is achieved through the measurement uncertainty evaluation. The system was initially applied to the measurement classification, capability analysis, process monitoring and result verification of the project "high-pressure compressor rotor assembly" during the assembly execution process in the factory, which has a reference significance for establishing the measurement process management of all relevant parties in the process including test verification and manufacturing.

Key words: civil aviation engine; full life cycle; full link; measurement management; measurement quality

0 引言

民用航空发动机产品的全寿命周期包含设计研发、生产制造、试验验证、使用维护等多个阶段,过程漫长且涉及的技术难度大。同时,民用航空发动机产业链规模庞大,覆盖范围广泛,涉及国内外机械、材料、电子、信息等诸多行业^[1-3]。民用航空发动机研制过程中需要开展大量的装配试制和试验验证工作,包括几万个装配测点上万次的迭代测量,十几万小时的部件、整机、飞行试验等,涉及的检测参数极为庞杂^[4]。当前,本单位型号产品仍处于研制阶段,部分项目已进入制造符合性取证阶段,大量的“测量过程”贯穿其中,测量结果的质量直接影响着产品设计、工艺、质量管理过程的缺陷识别、控制和改进。以数据驱动的智能制造,更是建立在高度可靠的测量数据基础之上^[5]。测量管理体系的目的,是通过测量设备和测量过程的管理,提升测量数据质量,将可能产生的不正确的测量结果降至最低程度,控制由于不正确测量结果而产生的基于测量数据的决策风险,确保产品达到各项质量目标。

国外针对测量管理的研究起步较早,已经形成了完备的管理及技术体系^[6]。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方法,以全局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梳理和研究。报告提出“测量过程管理应涉及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^[7]。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、测量时的环境条件等”。NASA测量管理层级结构如图1所示。

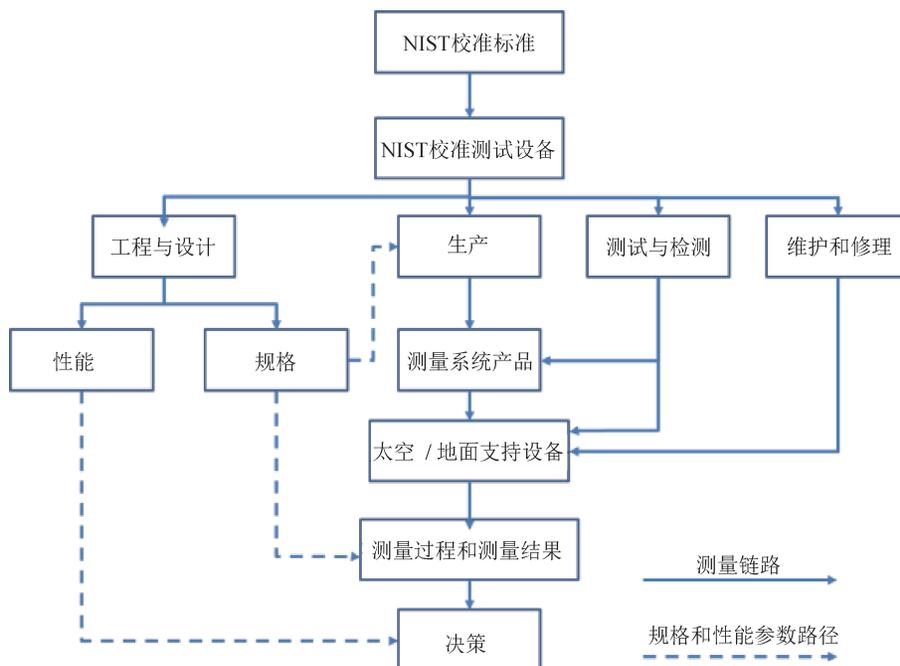
国际标准化组织发布了ISO 10012-2003《测量管理体系——测量过程和测量设备的要求》^[5],其已成为最权威的测量过程管理国际标准,并在我国汽车制造、生物医药等领域广泛应用。

我国航空发动机测量管理研究起步较晚,虽然发布了标准GJB 5109-2004《装备计量保障通用要求检测和校准》^[8],但该标准着眼于测量设备的准确度控制而非测量参数的不确定度控制,没有明确可行的测量质量技术控制手段。为适应传统计量保障向现代测量管理的转变,航发集团在先后印发的《中国航空发动机集团有限公司质量手册(2024版)》中,明确规定了测量管理体系建设要求:通过对测量设备和测量过程的管理,提升航空发动机参数测量质量。

民用航空发动机全生命周期测量参数众多、链路复杂、涉及的相关方多,给相关测量过程的管理提出了挑战。本文以满足型号测量保障任务要求为出发点,构建民用航空发动机全生命周期全链路测量管理体系。根据测量过程的关键/重要程度,规范测量过程设计;利用测量系统分析、控制图、测量能力审核等手段监控测量过程;结合民用航空发动机科研阶段测量过程特点,建立同族测量过程归集,并采用测量不确定度评定、测量比对、公差验证等方法实现测量有效性分析。最后介绍该体系在“高压压气机转子装配”项目中的实际应用,为相关领域的研究人员提供借鉴。

1 体系建设方案

民用航空发动机全生命周期包括产品部件设计、整机试验、适航取证、客户交付、维修保障



注：NIST为美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology)。

图1 NASA测量管理层级结构

Fig.1 NASA measurement management hierarchy

的整个过程；全链路指上述各过程所涉及的全部相关方的产品检测工艺控制过程。构建民用航空发动机全生命周期全链路的测量管理体系，就是规范上述过程中涉及的全部测量活动，实现测量

结果有效性控制，确保测量数据可追溯、测量质量可量化，从而提高测量结果的可靠性，为基于测量的决策活动提供高质量数据来源^[9]。民用航空发动机全生命周期全链路测量示意如图2所示。

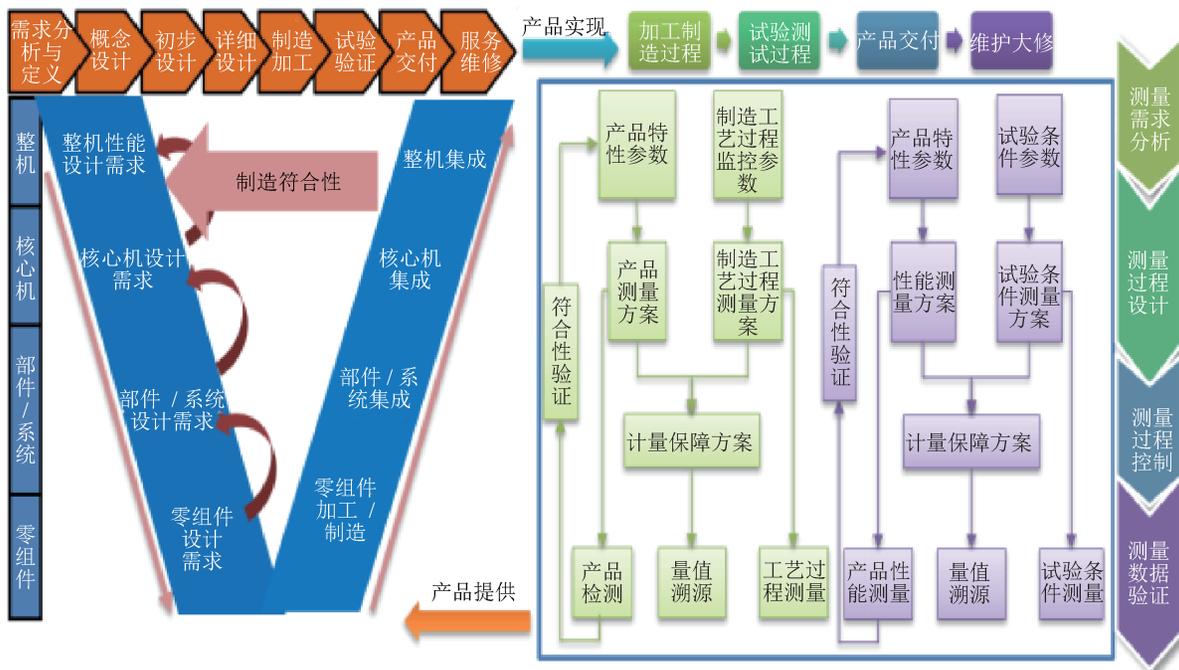


图2 民用航空发动机全生命周期全链路测量示意图

Fig.2 Schematic diagram of full link measurement for the whole life cycle of civil aviation engine

测量管理体系以计量测试技术为基础，对测量需求、系统配置、测量能力分析、不确定度控制、量值溯源、结果验证等要素进行有效管控，实现关键数据的识别及有效获取、数据挖掘分析和测量系统准确评估。体系分为需求层、控制层及支撑层。其中需求层为图2所示的产品全生命周期

期各阶段测量需求及其测量质量要求。控制层是依照标准建立的体系管理及技术文件，用于指导体系的落地实施，主要关注测量结果与测量需求的符合性，确保产品数据传递链的有效控制，保障型号产品测量数据溯源准确、结果可靠^[8]。控制层的管理要素如图3所示。

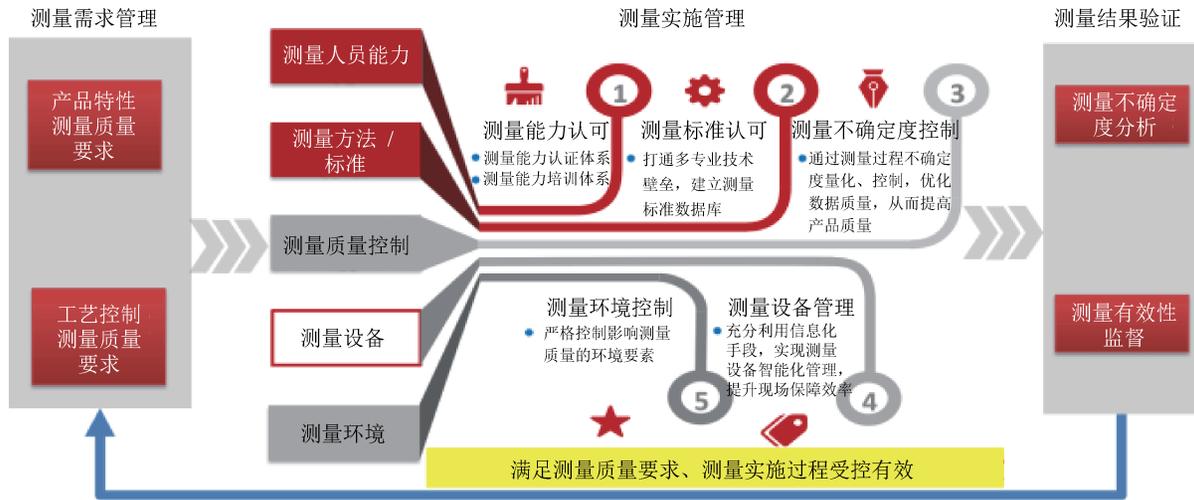


图3 测量管理体系控制层管理要素

Fig.3 Measure management system control layer management elements

支撑层是实施控制过程中针对流程管理、测量数据分析以及过程绩效控制的信息化系统。利用大数据智能分析，实现流程改进、过程监督、测量数据及质量在线分析，通过过程控制与数据管理实现测量管理体系全流程贯穿。

1.1 体系文件方案

测量管理的文件体系依照 ISO 10012-2003 《测量管理体系——测量过程和测量设备的要求》建立，由手册、程序文件与作业指导书组成，管理文件体系架构如图4所示。

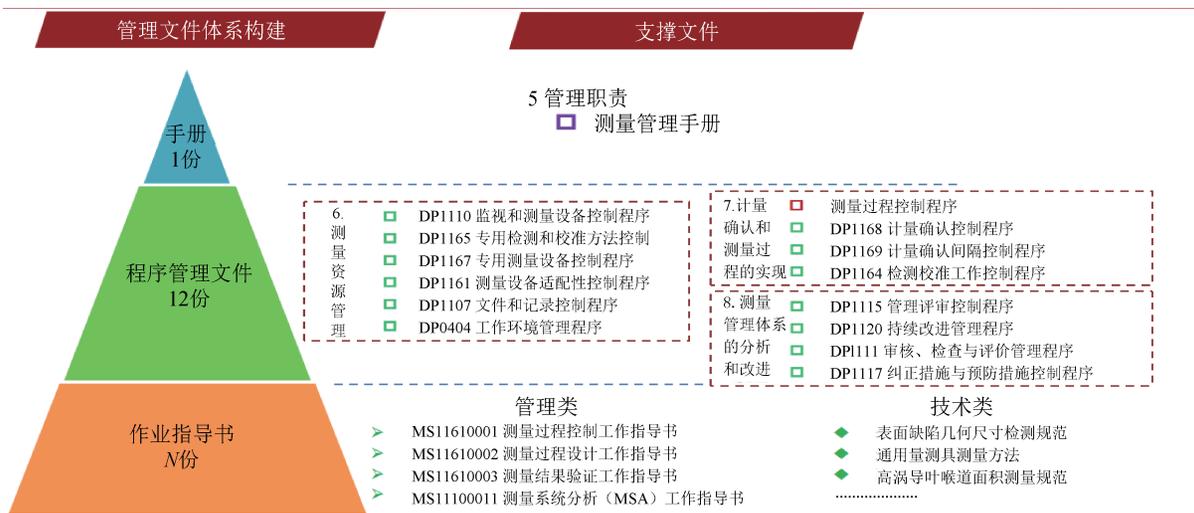


图4 管理文件体系架构

Fig.4 Management document system architecture

第一层测量管理手册是整个测量管理体系的纲领性文件,原则性地概括各要素的落实要求,主要内容包括以下几个方面。

1) 管理者代表任命书。

2) 总体要求,包括但不限于法制要求、技术能力要求、质量管理要求、用户要求。

3) 管理职责:规定各层级、各部门在测量管理工作中的职责范围,明确测量管理体系组织框架图、职能分配表。

4) 测量管理质量目标:明确覆盖体系执行、改进关键绩效的质量目标,应根据公司当前科研实际情况合理制定。

5) 体系过程及其相互作用的描述:简要说明资源管理、测量确认和测量过程实现以及测量管理体系分析和改进要求^[10]。

6) 管理评审:明确管理评审的频次、内容、计划、实施、输入/输出以及后续工作。

第二层管理层程序文件逐一描述了手册中各体系要素的详细控制方法与管理流程,是针对手册的细化;业务模块应涵盖手册全部内容,包含但不限于以下4方面信息。

1) 各类资源的控制要求

各类资源的控制包括人力资源控制、监视和测量设备控制、计算机信息系统控制、设备的维护/保养控制及环境控制。

2) 量值溯源控制要求

量值溯源控制要求包括监视和测量设备计量确认管理、适用性管理及送检管理等^[11]。

3) 测量过程控制要求

测量过程控制包括测量过程设计管理、测量过程实施管理、测量结果验证管理及测量不确定度管理等。

4) 管理体系的控制要求

管理体系的控制包括文件的控制、管理评审控制程序和记录的控制、内部审核程序控制、顾客满意度/监视/不合格和改进管理及质量目标分解考核管理办法等。

第三层执行层作业指导书,囊括了涉及技术要求的设计文件、工艺性测量文件、测量仪器的检验规程、校验方法、相关记录以及其他与测量

管理体系有关的表单等,应依据过程中涉及的测量专业技术及管理要求,按需编制。

1.2 过程控制要求

结合民用航空发动机产品科研取证阶段特点可知,体系控制的重点为实现测量能力与测量质量的匹配。以发动机关键、一般特性为过程控制要点,提出涵盖测量过程设计、测量过程实施、测量结果验证的分级匹配管理制度^[12]。

1.2.1 测量需求控制

测量需求的提出应在测量目的、当前测量水平以及成本方面取得平衡,做到参数不遗漏、测量不冗余、测量可溯源。其次,测量需求的表述应力求完整,便于可测量性、可计量性设计工作的顺利开展。要素包括但不限于以下方面。

1) 依照产品关键特性、关键过程定义,说明测点的关键/重要程度。

2) 测点信息:部件/系统名称、位置信息等。

3) 测点参数:可以用名称/符号表示,例如温度/ T 、压力/ P 等。

4) 测量范围或量值,动态特性参数应给出动态范围。

5) 测量质量要求:可以用测量允许误差、公差及测量不确定度表示,当用测量不确定度表示时,无特殊情况则 $k=2$;必要时,应明确不同量程的测量质量要求。

6) 测试环境条件及气动热力参数:应通过测点的温湿度、压力、振动、电子干扰、流场等工况明确该项指标。

7) 产品研制中应优先采用国家法定计量单位,若确需采用非法定计量单位时,必须经计量部门确认。

测量需求经过计量部门、测量实施部门评审批准后方可生效,如果变更则须由上述两部门会签。

1.2.2 测量过程设计控制

根据测量需求的关键/重要程度,相应的测量过程按照以下原则分级定义:①关键/重要特性为关键测量过程;②其他过程为一般测量过程。

针对关键测量过程,其选配的测量设备计量特性应满足:选配的测量设备不确定度(或允许误

差)与被测量要求的测量不确定度(或允许误差)之比应不低于1:4;对于一般测量过程,上述关系应不低于1:3。测量范围应覆盖被测参数范围的1.1~1.5倍。

测量能力指数 M_{cp} 是用于量化过程能力的指标,设计的测量过程不确定度 U 应满足公式(1)。

$$M_{cp} = \frac{U_i}{U} = \frac{\Delta}{U} = \frac{T}{2U} \quad (1)$$

式中: U_i 为被测量要求的测量不确定度, Δ 为被测量要求的允许误差, T 为被测量要求的公差。关键测量过程的 $M_{cp} \geq 4$;一般测量过程的 $M_{cp} \geq 3$ 。

应通过技术培训、考核、授权等管理方法,规范测量实施人员资质。同时,应建立授权期内的测量审核评价机制,以持续确保测量人员的能力水平。

针对包括航空专用测量设备在内的全部测量设备,建立满足国家量值溯源要求的计量保障途径。除非国家现行计量技术标准有其他规定,否则被校测量设备与校准标准设备测量不确定度比不低于4:1。

测量过程设计文件经过计量部门、测量需求部门评审批准后方可生效,如果变更则须由上述两部门会签。

1.2.3 测量过程实施控制

针对关键测量过程以及未通过测量符合性评估的一般测量过程实施监督和控制,以确保测量结果的不确定度满足式(1)要求。主要的研究内容包括以下5个方面。

1) 测量方法管理

应对装配工艺、测量程序、试验大纲、测试方案、操作规程等涉及的测量方法进行管理。针对关键测量过程、不满足测量不确定度要求以及客户关心的测量过程,方法的控制应包含以下内容:①建立测量方法的优化、评价、验证及固化体系;②建立针对自编方法的确认要求、针对公开标准/规范的方法证实要求;③明确规定采用核查标准法、设备比对法、测量审核与实验室比对等手段,实施方法的有效性确认。

2) 测量过程监督管理

测量过程的监督应覆盖测量人员、测量设备

及测量方法。结合民用航空发动机科研生产阶段的特点,应采取适宜的技术手段进行过程监督。例如,对于简单的测量过程采用相同或不相同的方法进行重复测量,对保留产品进行再测量,测量结果之差应不大于测量过程导出的计量要求;对于复杂测量过程可以采用核查标准、控制图、测量系统分析等方法。以比对验证法与公差验证法为例进行介绍。

① 比对验证法

针对验证项目及被测样件,工程测量实施人员编制测量程序,并使用现场三坐标机完成测量,得到测量值 y ,不确定度评定结果为 $U(k=2)$ 。针对同一个验证项目及被测样件,执行精密测量的几何量检测人员编制测量程序,并使用计量型三坐标机完成测量,得到参考值 y_{ref} ,不确定度评定结果为 $U_{ref}(k=2)$ 。比对数据计算公式为

$$E_n = \frac{|y_{ref} - y|}{\sqrt{U_{ref}^2 + U^2}} \quad (2)$$

式中: E_n 为比对系数。依照JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》^[12]计算测量不确定度。当 $E_n \leq 1$ 时,验证通过,该工程测量项目测量能力获得认可;当 $E_n > 1$ 时,验证不通过,该工程测量项目测量能力不获得认可。应特别关注 $0.8 < E_n \leq 1$ 的情况,在这种情况下应对测量结果不确定度进行详细分析,判断其是否满足要求。

② 公差验证法

针对验证项目及被测样件,工程测量实施人员编制测量程序,并使用现场三坐标机完成测量,得到测量值 y 。针对同一个验证项目及被测样件,执行精密测量的几何量检测人员编制测量程序,并使用计量型三坐标机完成测量,得到参考值 y_{ref} ,比对数据计算依照式(3)执行。

$$E_j = |y_{ref} - y| \quad (3)$$

式中: E_j 为比对系数,公差要求为 $\Delta_{公差}$,当 $E_j \leq 10\% \Delta_{公差}$ 时,验证通过,该工程测量项目测量能力获得认可;当 $E_j > 10\% \Delta_{公差}$ 时,验证不通过,该工程测量项目测量能力不获得认可。

3) 测量能力管理

应根据装配执行过程中大量几何参数、平衡

参数以及力矩参数的特点,探索建立以标准仲裁实验室为核心的测量能力鉴定体系。

4) 测量不确定度管理

针对关键测量过程、不满足测量不确定度要求以及客户关心的测量过程,测量不确定度的管理应包含以下4方面内容:①应建立测量不确定度分析机制,并通过文件有效发布;②研究针对装配执行过程的实际情况测量,规范同族测量过程、重复性条件下或复现性条件下的测量场景;③应严格控制测量不确定度分析结果的不确定度分量。

5) 测量环境管理

测量环境控制包含以下3个方面内容:①应在测量方法中明确测量环境的要求;②当测量环境对测量结果有影响时,应在测量方法中论述环境对测量结果的影响因素评估分析,并在方法验证或确认过程中加以说明;③在测量不确定度分析过程中,应量化环境引入的不确定度分量,用于指导测量实施过程中的环境控制。

1.2.4 测量结果有效性管理

针对关键测量过程以及未通过测量符合性评估的一般测量过程的测量结果进行不确定度分析,判断是否满足式(1)要求。

结合参数特性、测量方法、人员资质、环境要求一致的特点,设置同族归集验证管理模式,同时满足以下条件的多个关键测量过程,可验证一个关键过程测量结果。

- 1) 检验、检测、试验、工艺或测试人员资质相同。
- 2) 检验、检测、试验、工艺或测试用测量设

备相同;同时其测量范围、准确度等级相同。

- 3) 检验、检测、试验、工艺或测试方法相同。
- 4) 检验、检测、试验、工艺或测试环境相同,或对测量结果没有影响。

2 试点应用案例

测量管理体系首期试点应用于装配执行过程。装配执行过程主要涉及产品几何量及平衡参数测量,也涉及少数工艺过程控制参数(例如力矩、温度、流量、压力等)测量。测量过程中以直接测量为主,测量方法技术成熟度较高。同时,现阶段产品的几何特性及装配工艺控制均趋于稳定,测量过程较固定,为标准化、精细化的测量管理体系落地提供可能。以“高压压气机转子装配”项目为例,介绍测量管理体系的应用成效。

测量过程可测量性设计阶段:根据产品设计图纸,梳理产品特性及工艺控制过程测量需求219项,按照1.2.2节“测量过程设计”要求,完成测量系统计量特性与测量过程不确定度的导出。其中,211项一般测量过程全部满足1:3测量设备选配要求。8项关键过程全部满足1:4测量设备选配要求,由工程三坐标测量系统执行测量,该设备测量数据满足式(4)。

$$\Delta = 1.6 + \frac{2.8L}{1000} \quad (4)$$

式中:L为被测量值,Δ为三坐标允许误差。

8项关键过程属于同族测量过程,可以取一个代表过程——“轴向尺寸测量过程”执行测量过程控制及测量结果有效性分析。关键测量过程(同组代表过程)设计表如表1所示。

表1 关键测量过程(同组代表过程)设计表

Tab.1 Design table for key measurement processes (representative processes of the same group) 单位: mm

参数名称	设计值	设计公差 T	计量要求导出		测量过程不确定度 ($k=2$)要求导出	工程三坐标测量设备	
			测量范围	允许误差 Δ		测量范围	最大允许误差
轴向尺寸	37.80 ~ 37.82	0.02	34 ~ 57	± 0.0025	0.0025	X700 Y1000 Z660	± 0.0018

测量过程控制阶段测量能力管理:针对由工程三坐标执行测量的代表过程,采用测量审核的方

法,以计量型三坐标为参考标准,完成装配现场工程三坐标测量人员基本几何量参数(项目代号)包

括：点(001)、圆(002)、角度(003)、位置度(004)、距离(005)、同心度(006)、同轴度(007)、圆度(008)、圆柱度(009)、平面度(010)、垂直度(011)、平行度(012)、全跳动(013)、圆跳动(014)、轮廓度(015)以及标准件测量(016)的测量能力认可，进一步提升测量质量，控制测量过程不确定度。

测量过程控制阶段测量监督：采用比对验证的方法，实施测量过程监督。采用计量型三坐标，执行比对重复测量7次，轴向尺寸测量过程监督数据如表2所示。

利用式(2)计算可知，关键过程监督结果通过，测量过程监督有效。

测量结果有效性分析阶段，完成代表测量过程“轴向尺寸”不确定度评定。

采用无尘布或酒精棉将零件表面油污擦除干净后，放置在工程型三坐标的工作台上，建立测量坐标系后，对零件关键尺寸进行接触自动采点测量。

尺寸测量误差 e 的数学模型为

$$e = L_c - L_b + L_c \alpha_c \Delta t_c - L_b \alpha_b \Delta t_b \quad (5)$$

式中： L_c 为标准条件下(20℃时)被评坐标机的显示值， L_b 为标准条件下(20℃时)工件的尺寸， α_c 、 α_b 为被评坐标机和工件的热膨胀系数， Δt_c 、 Δt_b 为被评坐标机和工件偏离标准温度20℃的数值。假设

$$\begin{cases} \delta_\alpha = \alpha_c - \alpha_b \\ \delta_t = \Delta t_c - \Delta t_b \end{cases} \quad (6)$$

式中： δ_α 为热膨胀系数偏差； δ_t 为标准温度偏差。

舍弃高阶微分量

$$L \approx L_c \approx L_b \quad (7)$$

$$\alpha \approx \alpha_c \approx \alpha_b \quad (8)$$

$$\Delta t \approx \Delta t_c \approx \Delta t_b \quad (9)$$

则可推导得到

$$e = L_c - L_b + L \Delta t \delta_\alpha + L \alpha \delta_t \quad (10)$$

主要考虑以下4个方面所引入的测量不确定度。

1) 重复性引入的测量不确定度 u_1

按A类不确定度评定。在相同的条件下，以A、B基准测量直径，分别采集圆周上36个点、18个点和9个点拟合计算直径，每组重复测量6次，采用极差法计算标准差^[13]。

2) 仪器示值误差引入的测量不确定度 u_2

被评坐标机引入的不确定度分量主要来源于设备自身的示值误差。根据其计量确认条件获取最大允许误差，假定服从均匀分布，采用B类评定方法评定^[14]。

3) 被评坐标机和工件的热膨胀系数差引入的测量不确定度 u_3

在10 ~ 30℃范围内，钢制零件热膨胀系数范围为 $(11.5 \pm 1.0) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，假设其光栅尺的热膨胀系数为 $10.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，则两者热膨胀系数之差的范围为 $(0 \sim 2) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，服从均匀分布，采用B类评定方法评定。

4) 被评坐标机和工件的温度差引入的测量不确定度 u_4

估计经等温以后温度差以等概率分布于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内，服从均匀分布，采用B类评定方法评定。

表2 轴向尺寸测量过程监督数据

Tab.2 Axial dimension verification data

测量次数	工程三坐标测量值 y/mm	计量型三坐标测量值 y_{ref}/mm	E_j
1	37.802 0	37.801 1	0.000 9
2	37.801 8	37.800 6	0.001 2
3	37.800 4	37.798 8	0.001 6
4	37.801 3	37.799 6	0.001 7
5	37.801 9	37.800 5	0.001 4
6	37.800 9	37.801 3	0.000 4
7	37.802 2	37.801 5	0.000 7

利用式(11)计算各不确定度分量的灵敏度系数。

$$\begin{cases} c_1 = \frac{\partial e}{\partial L_c} = 1 \\ c_2 = \frac{\partial e}{\partial L_b} = -1 \\ c_3 = \frac{\partial e}{\partial \delta_\alpha} = L\Delta t \\ c_4 = \frac{\partial e}{\partial \delta_t} = L\alpha \end{cases} \quad (11)$$

对于名义尺寸 L 为37.82 mm的钢制零件,热膨胀系数 α 为 $11.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,偏离标准温度的数值的测量结果 $\Delta t = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。计算得到各标准不确定度分量。各标准不确定度分量相互独立,且互不干涉,合成不确定度满足式(12)。

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \quad (12)$$

代表测量过程“轴向尺寸”扩展不确定度评定结果为 $U = 0.0022 \text{ mm}(k = 2)$,满足表1中“测量过程不确定度($k = 2$)要求导出”要求,证明测量结果有效。

3 结论

航空发动机被喻为飞机的“心脏”。本文根据实际测量管理控制和技术保障需求,建立了民用航空发动机全生命周期全链路测量管理体系,利用可测量性设计、测量能力控制、测量过程监督、测量不确定度控制、量值溯源、测量结果验证分析等技术,保障民用航空发动机参数测量质量^[12]。处于科研阶段的民用航空发动机设计状态迭代快,特性参数测量需求多、变化量大。采用同族测量归集方法,在海量测量过程中限定过程监督、结果有效性确认范围,显著提高了效率,避免冗余管理。同时,测量能力评定及程序验证过程均采用精密测量审核工具实现,保障了测量结果的可靠性,为测量管理体系顺利实施提供了有力支撑。民用航空发动机全生命周期全链路测量管理体系首期试点应用于“高压压气机转子装配”项目,提升了产品的测量质量,初步形成了可落地、可执行的管理策略,具备进一步推广应用于后期相关项目的潜力。

参考文献

- [1] 吉军,张定华,李山.民用航空发动机构型管理与更改控制方法[J].计算机集成制造系统,2011,17(11):2514-2525.
JI J, ZHANG D H, LI S. Civil aviation engine configuration management and change control methods [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2011, 17(11): 2514-2525. (in Chinese)
- [2] 蒋平,刘静琳,黄劲东.民用航空发动机运行支持体系架构设计[J].航空发动机,2019,45(4):79-85.
JIANG P, LIU J L, HUANG J D. Architecture design of civil aviation engine operation support system [J]. Aviation Engine, 2019, 45(4): 79-85. (in Chinese)
- [3] 甘露.民用航空发动机风扇性能试验技术发展研究[J].价值工程,2023,42(17):159-161.
GAN L. Research on the development of performance testing technology for civil aviation engine fans [J]. Value Engineering, 2023, 42(17): 159-161. (in Chinese)
- [4] 李应红.航空涡轮风扇发动机试验技术与方法[M].上海:上海交通大学出版社,2014.
LI Y H. Aviation turbofan engine test technology and method [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014. (in Chinese)
- [5] 国际标准化组织.测量管理体系——测量过程和测量设备的要求:ISO 10012-2003[S].北京:国际标准化组织(ISO),2003.
International Organization for Standardization. Measurement management system — requirements for measuring methods and measuring equipment: ISO 10012-2003 [S]. Beijing: International Organization for Standardization (ISO), 2003. (in Chinese)
- [6] NASA. Measuring and test equipment specifications: NASA-HDBK-8739.19-2 [S]// NASA Measurement Quality Assurance Handbook. California, 2010.
- [7] NASA. Estimation and evaluation of measurement decision risk: NASA-HDBK-8739.19-4 [S]// NASA Measurement Quality Assurance Handbook. California, 2010.
- [8] 中国人民解放军总装备部.装备计量保障通用要求检测和校准:GJB 5109-2004[S].北京:总装备部军标出版发行部,2004.
The General Equipment Department of the People's Liberation Army of China. General requirement of metrology support for military materiel test and calibration: GJB 5109-2004 [S]. Beijing: General Armaments Department Mili-

- tary Logo Publishing and Distribution Department, 2004. (in Chinese)
- [9] EICKE W G, HAYES J L, MARK A, et al. Metrology — calibration and measurement processes guidelines [M]. California: Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 1994.
- [10] 黄成, 金炜, 瞿剑苏, 等. 航空发动机室内试车台推力测量及其溯源体系分析[J]. 计测技术, 2020, 40(3): 16–20.
HUANG C, JIN W, QU J S, et al. Thrust measurement and traceability system analysis of aero engine indoor test stand[J]. Metrology & Measurement Technology, 2020, 40(3): 16–20. (in Chinese)
- [11] 肖太龙, 曾贵华. 量子精密测量参数估计优化研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43(4): 44–60.
XIAO T L, ZENG G H. Research progress of parameter estimation optimization for quantum precision measurement [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 44–60. (in Chinese)
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1–2012[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of measurement uncertainty: JJF 1059.1–2012 [S]. Beijing: China National Standardization Commission, 2012. (in Chinese)
- [13] 孙安斌, 曹铁泽, 王继虎, 等. 高端装备大型零部件几何尺寸测量技术现状及趋势[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 41–50.
SUN A B, CAO T Z, WANG J H, et al. Technological development trends of geometric dimension measurements of large parts in the high-end equipment [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 41–50. (in Chinese)
- [14] 何旋, 吴霞, 周自力. 对计量内涵及其发展重点的思考[J]. 计测技术, 2022, 42(3): 79–85.
HE X, WU X, ZHOU Z L. Understanding of metrology connotation and thoughts on development focus [J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(3): 79–85. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 徐茜(1985—), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为航空发动机型号计量保障、测量管理体系、计量技术。