航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Jun. 15 2018 Vol. 29 No.06 15-19

# 民用飞机参数溯源链研究与分析

林恬*，张学涛，李少壮
航空工业北京长城计量测试技术研究所，北京 100095

**摘　要**：本文面向民用飞机整机、结构、系统等产品的工程测量需求，通过分析对比国内外民用飞机的计量保障现状，提出应从产品设计、制造、试验、试飞和运营维修等过程中定义的关键测量参数出发，结合产品参数溯源链的梳理分析活动，系统研究分析这些典型环节中各类通用／专用测试设备、综合性试验系统及其校准技术现状。最后，通过总结提炼当前民用飞机产品参数量值溯源的普遍问题，针对性地提出了完善民用飞机计量保障体系的工作建议，供民用飞机工程技术与管理人员共同探讨。

**关键词**：民用飞机；参数溯源链；计量保障；关键测量参数；计量标准参数；适航取证

**中图分类号**：TB9；V271　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.06.015

计量是实现单位统一、保障量值准确可靠的活动。计量技术对民用飞机工业保证产品质量和性能可靠起着重要的基础支撑作用，主要体现在两个方面：一是保证全产业链的数据一致性。民用飞机工业具有国际分工、全球采购的特点，需要建立统一的计量标准，保证不同产品承制商提供的数据一致性，确保飞机集成质量。二是保证全生命周期的数据准确性。民用飞机工业必须满足适航管理要求，需要运用成熟的计量方法，验证产品从研制到运营各阶段提供的数据准确性，确保飞机性能安全。

当前国内民用航空制造企业已建立的计量保障体系大多只关注到测量设备的层面，忽视了对测量过程的控制，绝大部分计量工作仍是计量器具实验室检定／校准活动，难以满足飞机研制过程的测量保证及支持产品适航符合性验证的技术需求，亟待从加强测量过程控制、完善计量保障体系的角度出发，开展民用飞机参数溯源链研究与分析，建立起“飞机产品参数－测试设备参数－校准设备（含工作计量器具）参数－计量标准参数－计量基准参数”的完整溯源链[1]。

## 1 民用飞机计量保障国内外现状

波音公司、空中客车公司、罗尔斯－罗伊斯公司、通用电气公司等欧美先进民用航空制造企业，经过几十年的技术积累，普遍建立了包含产品测试验证与计量评价在内的完备的产品研发制造和使用维护技术体系。他们本着“产品的全生命周期及其配套服务均建立在测量工作基础上”的认知，高度重视在产品研发设计、生产制造过程及售后技术服务的全生命周期中系统地开展计量技术及其管理，积极推进在线检测、实时监测、分析预测与故障诊断等计量技术的应用，保证了产品发展各个环节数据的一致、准确、实时和高效。此外，还通过建立工程基础数据库，加强全产业链计量数据的积累、分析和应用，进而逐步提升产品质量控制和安全运营的保证能力，使得产品在全球市场始终处于领先地位。

国内航空工业经历了“引进研仿、转包生产、自主研制”的发展阶段，计量工作也从最初“建立起来、传递下去”的传统实验室标准量传模式，逐步向产品研制生产与使用维护的测试设备现场、综合的计量保障模式转变。随着民用飞机产品研制生产与使用维护向综合化、集成化、数字化方向的不断发展，计量保障工作面临严峻挑战：一是“在线生产、离线检测”的既有保障模式已经不适应型号研制、产业发展和国际合作的需要；二是计量和校准标准、规范、方法、手段和装置存在巨大缺口，特别是航空发动机、航空设备和系统等关键参数的计量手段严重不足；三是对复杂系统集成、大型结构装配、综合试验、数字化生产、绿色环保等新型计量技术研究进展缓慢。因此，当前的重点任务是从改造计量保障模式、完善量值溯源能力的角度出发，系统地梳理民用飞机研制过程中整机、结构、系统、部件产品的关键参数及其在设计、制造、试验、试飞、运用维修等环节中存在的计量技术短

收稿日期：2018-04-08；　退修日期：2018-04-24；　录用日期：2018-05-16
* 通信作者 . Tel.：010-62457103　E-mail：lintianjob@126.com
*引用格式：Lin Tian, Zhang Xuetao, Li Shaozhuang. Research and analysis of parameter traceability chain of civil aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (06)：15–19. 林恬，张学涛，李少壮．民用飞机参数溯源链研究与分析 [J]. 航空科学技术，2018, 29 (06)：15–19.*

板，大力发展与之相适应的计量方法、设备和标准，实现与国际接轨，满足民用飞机型号研制和产业发展需要。

## 2 参数溯源链研究与分析

民用飞机性能参数是由设计活动给定，由零部件、设备、系统等产品生产制造活动实现，依靠试验试飞活动确认和运营维修活动保持。当飞机适航取证时，必须具备充分的证据表明：在设计、生产制造、试验验证和运营维修的过程中，表征飞机性能参数的各环节工程参数能得到可靠的量值溯源保证。本文飞机参数溯源链研究分析分别围绕设计、生产制造、试验试飞及运营维修活动，梳理研究各过程项目中的关键被测参数、试验测试设备参数、校准设备与计量标准参数的量值溯源关系，判断关键被测参数的量值是否可以经由一条完整溯源链与国家计量标准参数对接，进而明确各过程是否保持量值统一。

### 2.1 参数溯源链的研究分析方法

参数溯源链的研究分析过程方法概况起来可分为：

（1）根据产品（功能、性能等指标）和产品实现过程（工艺、试验等要求）的定义描述，确定可量化的参数。

（2）根据产品及其实现过程的量值控制要求（产品设计说明、工艺或试验设计文件等），确定上述参数的量值范围和使用允许误差。

（3）根据参数的量值范围和使用允许误差，确定相应参数的测试设备、方法、环境和程序文件。

（4）分析测试过程中测试设备的准确性、测试方法的正确性、测试环境认知的完整性、测试操作的规范性和测试数据评价的合理性，综合判断参数是否可测、量值是否受控。

（5）根据测试设备的功能用途和工作原理，确定测试设备的计量特性和需计量的技术参数，并按照测试设备的实际使用状态，确定上述参数的测量范围和最大允许误差。

（6）根据参数的测量范围和最大允许误差，确定相应参数的计量设备、方法、环境和程序文件。

（7）分析计量过程中测量设备或标准的准确性、测量方法的正确性、测量环境认知的完整性、测量操作的规范性和测量数据评价的合理性，综合判断参数是否可计量、量值溯源途径是否完备。

分析过程中产生需要关注 10 项技术要素，这些要素是构成每项飞机产品溯源链体系的必备要素。参数溯源链的构成、技术要素的分解、溯源链研究分析的过程以及三者的关系如图 1 所示。

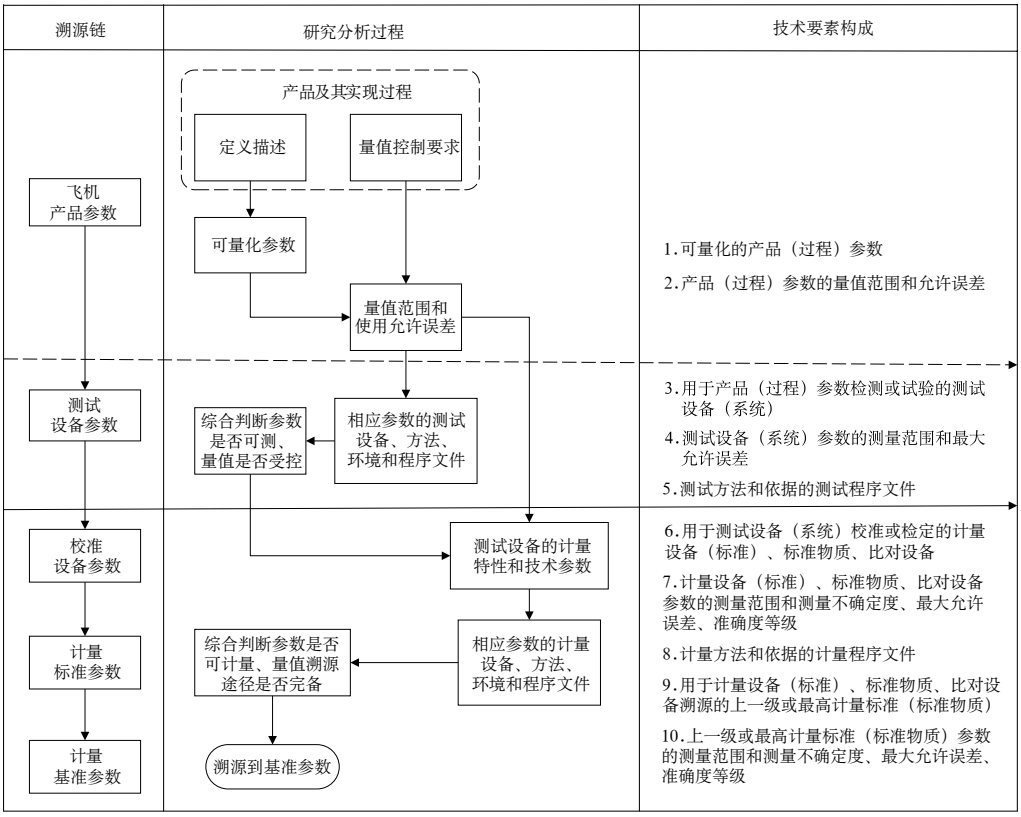


图 1 参数溯源链的研究分析过程及技术要素

Fig.1 Research and analysis process and the technical factors of parametric traceability chain

### 2.2 参数溯源链现状分析实例

按照上述方法，本文选取民用飞机设计、生产制造、试验验证和运营维修的过程中的风洞试验（气动设计）、制造过程检测、系统及成品试验、结构强度试验、飞行试验、系统综合试验、运营维修检测等 7 个重要环节，对它们中的关键被测参数、试验测试设备参数、校准设备以及计量标准参数的量值溯源关系进行梳理研究分析。这个工程中的主要工作和其中发现的具体主要问题见表 1。

表 1　各环节参数梳理及溯源链现状分析情况

Table 1　Analysis of the parameter combing and traceability status on each stage

| 重要环节 | 主要工作 [2-5] | 发现问题 |
|---|---|---|
| 风洞试验（气动设计） | 从初步设计和详细设计阶段开展的部分验证性试验入手，梳理研究试验项目中的关键被测参数、试验测试设备参数、校准设备以及计量标准参数的量值溯源关系，涉及的试验有风洞模型测力试验、风洞模型测压试验、流场校测试验、低速动导数试验、动力模拟试验、气动噪声试验 | 风洞作为大型试验系统其风洞主体机械结构无量值溯源手段及方法，无技术标准及技术手段；另外，相关动态校准技术有待完善，如现有的试验前模型姿态角的静态测量无法反映试验时飞行器模型姿态角动态真实情况，试验模型姿态角量值溯源不完善 |
| 制造过程检测 | 从产品生产制造工艺大纲入手，梳理研究产品的生产制造工艺控制参数、工艺设备 / 检测设备参数、校准设备 / 计量标准器具参数的量值溯源关系。参数量值溯源体系架构主要包含了以下 9 个方面：材料性能检测、复合材料工艺检测、无损检测、热处理工艺检测、表面处理工艺检测、喷丸工艺检测、机械加工工艺检测、钣金工艺检测、装配工艺检测 | 随着信息技术的发展，许多传统的检测转变为数字化检测，目前仍停留在检测设备校准层面，新兴的数字化制造的综合在线检测校准技术尚为空白 |
| 系统及成品试验 | 从产品试验大纲入手，梳理研究试验中被测参数、试验测试设备参数、校准设备 / 计量标准器具参数的量值溯源关系，涉及燃油系统及成品试验、空气管理系统及成品试验、液压系统及成品试验、飞行控制系统及成品试验、综合监视系统及成品试验、客舱核心系统及成品试验、大气数据系统及成品试验、高升力系统及成品试验、氧气系统及成品试验、起落架系统及成品试验、辅助动力系统及成品试验、雷电防护试验 | 该环节涉及的大型、多参数专用试验设备由于大型无法搬动、种类繁多结构复杂、同类设备数量少等特点，实验室计量无法满足其实际计量需求，其现场模拟实际工况对测量系统校准（原位校准）或在线校准空白较多，缺乏统一规范 |
| 结构强度试验 | 从产品试验大纲入手，全面梳理民用飞机型号各类结构强度试验中的测控技术参数，以及获取这些参数量值所使用的计量器具或测控设备型号与主要技术要求，量值传递与溯源途径，涉及全机静力与疲劳试验、全机共振试验、起落架落震与摆振试验、离散源撞击试验、全机落震与坠撞及结构水平冲击试验、结构噪声控制试验、结构部件振动强度试验 | 动强度数据采集系统需完善动态指标校准手段，高速摄像系统的校准方法研究有待开展 |
| 系统综合试验 | 从产品试验大纲入手，梳理研究试验中被测参数、试验测试设备参数、校准设备 / 计量标准器具参数的量值溯源关系，涉及航电系统综合试验、飞控系统综合试验、液压系统综合试验、动力系统综合试验、燃油系统综合试验、防火系统综合试验、环控系统综合试验、电气系统综合试验 | 产品的计量性设计考虑不足，导致专用设备测试不得不通过研制专用测试设备来解决产品的设计验证与评价问题，然而有一部分参数项目即便研制专用测试设备也难以实现有效的设计验证与评价 |
| 飞行试验 | 从试飞测试大纲入手，梳理研究试验中被测参数、试验测试设备参数、校准设备 / 计量标准器具参数的量值溯源关系，涉及品质试验、颤振试验、结构载荷试验、环控试验、最小离地速度试验、气动噪声试验、结冰试验 | 仅对飞行试验过程中使用的测量设备进行了有效溯源，而没有对飞行试验测试过程中的各个环节引入的不确定度分量进行系统分析，无法对飞行试验结果的不确定度进行综合评定 |
| 运营维修检测 | 对民用飞机运营维护参数体系量值溯源的梳理分析，涉及飞机结构检查、飞机系统 / 动力检查、飞机区域检查、飞机闪电 / 高强度辐射场防护系统检查 | 航空公司与制造厂商沟通不够，导致设计、制造与实际使用脱节；专用试验器方面投入的力度薄弱，由于大多数运营维护点分散，很难满足需求，大多数缺乏相应统一的校准方法和规范做技术支持 |

同时，从这些环节中共梳理出相关的 2448 项可量化的产品（过程）关键参数，经过统计分析，可按照计量技术的完备成熟度将它们划分为“A”“B”“C”“D”4 类状态，统计结果见表 2，不完善有待提升补充新建的占比约 30%。

表 2　参数量值溯源现状分类统计结果

Table 2　The classified statistical results of the parametric traceability status

| “量值溯源现状”分类 | 数量 / 项 | 百分比 /% |
|---|---|---|
| 溯源条件成熟完善 A | 1704 | 70 |
| 溯源条件有待提升 B | 595 | 24 |
| 溯源条件有待补充 C | 100 | 4 |
| 溯源条件尚不具备 D | 49 | 2 |

### 2.3 参数溯源链的研究分析结论

经过上述民用飞机参数溯源链研究分析，表明设计、制造、试验、运维过程中大部分参数的计量手段和设备基本完善，但存在问题具有一定的普遍性和相似性，具体可以归纳为以下几个方面：

（1）缺乏产品或专用测试设备的可计量性设计。通过对当前工程实践中存在的依赖既有技术方法与手段、量值溯源不完善的参数项目进行分析，发现其中一大部分原因就是产品的计量性设计考虑不足。现实中有许多不得不通过研制专用测试设备来解决产品的设计验证与评价问题，甚至有一部分参数项目即便研制专用测试设备也难以实现有效的设计验证与评价，而如果在最初产品设计过程中能提出合理

的计量性设计要求，则完全可能实现利用通用测试设备满足其测量需求。

（2）大型综合性试验系统的现场计量评价有待加强。随着现代飞机产品设计综合化、集成化的程度越来越高，目前大多数在用的大型综合性试验系统普遍具有多类参数综合 / 虚拟测试、多种设备 / 信号复杂交联、大规模 / 自动化 / 实时数据采集等技术特点，但既有的计量评价工作仍然采用单参数、实验室、手动的校准方式，这种校准方式往往由于试验系统计量时的状态与工作时的状态不一致而产生难以把握的系统误差，同时由于大型综合性试验系统通常是由使用单位自行校准，缺乏行业的统一规范和监管，存在着同一类试验系统校准方法各异、校准项目不完善或缺项、校准效率低成本高等问题，在一定程度上也将制约产品的研制和取证进度。

（3）数字化工程带来了新的计量保障问题。近年来，随着航空数字化工程的不断推进，产品数字化定义技术、数字样机技术、数字化工艺与虚拟装配技术、数字化管理技术等已在多个军用飞机和民用飞机型号的研制中得到了深入应用，各大飞机主机厂所也相继建成了若干条数字化生产线，在飞机设计制造协同一体化平台的建设过程中，由数字量代替模拟量进行数据传递是必须要解决的关键计量技术问题。目前，传统的计量模式无法适应飞机设计制造协同一体化平台的建设需要，亟须以产品数字化模型为驱动对象，面向产品设计、加工、装配的数据交互和传递过程，开展关键环节的数字化计量保障技术研究，完善数字化工程的量值溯源体系。

## 3 结束语

民用飞机参数溯源链研究分析的工作实践表明，我国民用飞机产品的自主创新发展亟须更加高效完善的计量保障工作予以支撑，对产品参数量值溯源业务活动中已经呈现出来的技术短板，亟须加强建设以尽快补足完善。由此延伸出提升民用飞机计量保障工作的几点思考与建议：

（1）注重提升民用飞机计量技术能力。一是补充完善民用飞机产品参数量值溯源能力，开展民用飞机产品特殊参量的计量标准装置、适航符合性验证相关的计量技术、民用飞机产品和专用测试设备的可计量性设计方法以及民用飞机研制工程现场的计量测试技术及评价方法研究等民用飞机计量测试共性基础能力研究。二是发展完善大型复杂试验系统的综合评价手段，围绕产品的设计验证与性能试验活动，建立并完善现场测试与校准能力，实施重大试验过程的计量测试保证示范工程，研究现场环境参数对试验系统校准结果的影响评价方法与修正技术、仿真测试及计量评价技术、网络化测试与校准技术等，建立方法、规范、装置等，健全民用飞机产品工程质量保证和适航验证能力，支撑民用飞机产业良性发展。三是开展极端复杂条件下的计量测试技术、特种传感测试技术、精细计量测试技术、非介入 / 非接触计量测试技术、智能 / 实时计量测试技术等研究，形成方法、规范和装置，提升民用飞机产品自主研制过程的技术创新能力，跨越民用飞机产业发展的技术瓶颈。

（2）健全民用飞机计量标准规范。从民用航空产品适航取证对计量技术保障的需求出发，针对民用航空产品的研发制造的全流程、生产与后期使用维护的全生命，直接面对飞机、直升机、发动机、航空电子设备等航空产品，开展产品计量技术的研究和相关技术标准规范的建设，确保国内民用航空产品制造业与最终用户的计量专业技术保障活动中采用的相关技术标准与规范统一。

（3）加强业务管理平台构建。充分考虑我国民用飞机产业化发展要求和计量工作法制化特点，加强民用飞机工业计量监管法规制度建设，进一步完善民用飞机计量保证工作体系，重点加强民用飞机研制全过程的计量监管、大型试验系统和非标设备的计量监管、国际采购过程中的计量监管、产品交付过程的计量监管等方面的法规制度建设。建立计量业务信息数据库和计量业务管理平台，为计量业务活动提供及时的信息支撑，为产品设计、生产、试验等工程技术环节提供计量技术信息支撑，建设与产品数字化设计生产流程相衔接的计量保障服务平台，真正实现计量向产品全生命周期、全流程的融入。

### 参考文献

[1] 张学涛，邢向楠，周世锋，等 . 构建民用飞机参数量值溯源体系的探讨 [J]. 计测技术，2014，34（3）：58-59.
Zhang Xuetao，Xing Xiangnan，Zhou Shifeng，et al. Discussion on building a civil aircraft parameter measurement traceability system[J]. Metrology & Measurement Technology，2014，34（3）：58-59.（in Chinese）

[2] 国防科学技术工业委员会 . GJB 1309—1991 军工产品大型试验计量保证与监督要求 [S]. 北京：国防科学技术工业委员会，1991.
Commission of Science，Technology and Industry for National

Defense. GJB 1309—1991 The requirements of metrological guarantee and supervision for large combination test of military products[S]. Beijing：Commission of Science，Technology and Industry for National Defense，1991.（in Chinese）

[3] 陈迎春，宋文滨，刘洪 . 民用飞机总体设计 [M]. 上海：上海交通大学出版社，2010.
Chen Yingchun，Song Wenbin，Liu Hong. Civil aircraft design[M].Shanghai：Shanghai Jiao Tong University Press，2010.（in Chinese）

[4] Air Transport Association. ATA2200 specification for manufacture’s technical data[S].2001.

[5] SAE. ARP4754 Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems[S]. 1996.

**作者简介**

林恬（1983— ） 女，学士，工程师。主要研究方向：航空计量测试技术研究与管理。

Tel：010-62457103

E-mail：lintianjob@126.com

张学涛（1983— ） 男，硕士，高级工程师。主要研究方向：民用飞机计量测试技术研究与管理。

Tel：010-62455995

E-mail：zhangxuetao@cimm.com.cn

李少壮（1965— ） 男，学士，高级工程师。主要研究方向：国防军工计量测试技术研究与管理。

Tel：010-62457196

E-mail：lishaozhuang@cimm.com.cn

# Research and Analysis of Parameter Traceability Chain of Civil Aircraft

Lin Tian*, Zhang Xuetao, Li Shaozhuang

*AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China*

**Abstract:** This paper aimed at the engineering measurement demands of the whole, structure and system of civil aircraft, by analyzing and comparing the domestic and foreign metrological guarantee status, it is proposed that through the key measurement parameters defined in product design, manufacturing, test, test flight, operation and maintenance, the current situation of various general / special test equipment, comprehensive test system and calibration measurement technology in those typical links should be systematically researched and analyzed according to the combing and analyzing activities of product parameter traceability chain. Finally, through summarizing and refining the common problems of the current civil aircraft product parameter traceability, this paper put forward some suggestions on improving the civil aircraft measurement guarantee system, which can be discussed by civil aircraft engineering technology and management personnel.

**Key Words:** civil aircraft；parameter traceability；metrological guarantee；key measurement parameters；metrological standard parameters；airworthiness certification

**Received:** 2018-04-08； **Revised:** 2018-04-24； **Accepted:** 2018-05-16

***Corresponding author.Tel.:** 010-62457103 **E-mail:** lintianjob@126.com