

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.01.02

# 探索便携式坐标测量类设备软件验证方法

李美琦, 徐超, 郭威

(航空工业成都飞机工业集团有限责任公司, 四川 成都 610091)

**摘要:** 一般检定规程或校准规范只是对探索便携式坐标测量类仪器的综合误差或硬件指标进行检定、校准, 而没有对其软件功能和算法的正确性进行验证和确认。本文依据实际工作中的管控要求, 对软件验证和确认的重要性、难点进行分析, 提出了一种简便、易于操作, 适用于企业内部计量测试机构使用的基于算法比较和设备比较的软件验证方法, 并通过激光跟踪仪软件验证实例, 具体描述了验证过程和验证结果。

**关键词:** 软件验证; 算法比较法; 设备比较法; 便携式坐标测量设备

**中图分类号:** TB9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2019)01-0005-05

## Exploitation of Software Verification Method of Portable Coordinate Measuring Equipment

LI Meiqi, XU Chao, GUO Wei

(AVIC Chengdu Aircraft Industry Group Co., Ltd, Chengdu 610091, China)

**Abstract:** General verification rules or calibration specifications only check and calibrate the comprehensive errors or hardware indicators of portable coordinate measuring instruments, but do not verify the correctness of their software functions and algorithms. According to the requirement of management and control in practical work, this paper analyzes the importance and difficulty of software verification and validation, and puts forward a simple and easy-to-operate software validation method based on algorithm comparison and equipment comparison, which is suitable for internal measurement and testing organizations in enterprises. The validation process and validation results are described concretely through a software validation example of laser tracker.

**Key words:** software validation; algorithm comparison method; equipment comparison method; portable coordinate measuring equipment.

## 0 引言

随着信息技术的快速发展, 自动化测量设备已广泛应用于计量、检测、生产等多个领域。测量、测试设备的许多复杂功能通过测量软件来实现, 但一般检定规程或校准规范只针对仪器的综合误差或硬件指标进行规定, 而没有对其软件功能和算法的正确性进行验证和确认, 因此在使用过程中, 计量设备算法可能存在缺陷, 导致测量结果不准确, 例如: 坐标测量机仅参照 JJF 1064《坐标测量机校准规范》<sup>[1]</sup> 对其探测误差、尺寸示值误差进行校准, 但坐标测量机具备形状、位置公差分析, 坐标系建立、转换, 多种版本数模读入、导出等功能, 现有校准方法并没有对其软件功能进行验证和确认, 可能会对测量结果的正确性产生影响。因此, 本文依据企业自身测量设备管控要求, 对软件验证和确认的重要性及难点进行分析, 并结合军民机生产实际需求, 针对便携式坐标测量设备提出了可在企业内部实施的软件验证方法。

## 1 软件确认的重要性及软件验证的定义

### 1) 软件确认的重要性

在科技飞速发展的今天, 不法厂商或个人受利益驱动, 通过软件设置、参数更改或远程遥控等方式, 即可对仪器仪表输出的数据或结果进行人为干预, 其手法极其隐蔽难以发现, 如: 加油机“偷油”, 出租车计价器虚报里程, 电子称短斤少两, 以及近期曝光的大众公司“排放门”事件, 都是利用法规上的漏洞和计量监督手段的缺失, 制造并使用了存在作弊隐患的计量器具造成的。有的厂家在软件设计时, 刻意给软件设置了“单点应对性”, 就是针对检定规程或型式评价大纲中的“检测点”, 控制软件使输出的数据在“检测点”上始终合格, 而真正的测量值却不一定合格<sup>[1]</sup>。

因此, 测量软件对保障测量结果的准确性和可靠性起到至关重要的作用, 尤其是涉及贸易结算、安全防护、医疗卫生、环境监测、资源保护、法制评价、公正计量等法制管理的计量器具软件的准确性、可靠

性、安全性<sup>[2]</sup>，日益受到各国的高度重视。GJB 9001《质量管理体系要求》<sup>[3]</sup>中也对监视和测量用计算机软件的验证和确认进行了规定。因此如何评估、验证测量软件对测试结果的影响，保障计量设备的一致性、准确性、法制性将成为计量科学研究的新课题。

## 2) 软件验证的定义

软件验证是根据特定程序测试一个或多个软件特性是否符合要求的技术操作，目的在于验证软件是否满足规定需求或是发现预期结果与实际结果之间的差别，并提供客观证据对计量器具软件进行认定。

## 2 软件测试的难点

国家质量监督检验检疫总局于 2007 年 8 月 21 日批准发布了 JJF 1182 - 2007《计量器具软件测评指南》<sup>[2]</sup>，用于指导计量器具软件测评工作，依据该指南，计量器具软件测评分为基本技术特征和特定技术要求两大类，包含：①软件标识；②算法和功能正确性；③涵盖预防误操作和防止欺骗性使用在内的软件保护；④涵盖缺陷侦测和稳定性保护在内的硬件特性支持；⑤计量数据自动和长期存储；⑥通信系统传输；⑦相关组件指定与分离及组件接口指定；⑧维护与升级；⑨操作系统和硬件兼容性，可移植性等内容<sup>[2]</sup>。其测试方法和测试手段是建立在代码走查和法制管控基础上的型式评价内容，企业内部的计量机构没有相应能力和条件依据该指南对计量器具软件进行测评和验证。

## 3 计量设备软件验证方法

为适应军民机生产过程中对计量设备软件所提出的验证和确认要求，本文结合工作实际，提出了适用于企业内部的软件验证方法，以确认计算机软件具备预期功能，并保证算法、逻辑正确，且具备一定的容错能力和可靠性。软件验证方法分别为：

### 1) 白盒测试法

由具备相关计算机编程知识和熟悉测试过程与方法的技术人员，对所涉及的计算机软件的源程序代码进行分析和研究，确认其正确性、科学性。

### 2) 黑盒测试法

将被验证的计算机软件与其配套测试硬件视为一个仅有输入端和输出端的黑盒子，由熟悉测量设备、测试方法和测试过程的技术人员，在设备输入端接入已知量值的标准量，并将输出端示值与输入端标称值进行比较，从而确认测量软件的正确性。

### 3) 算法比较法

由熟悉测量设备、测试过程与方法的技术人员，使用商业计算软件(如 Microsoft Excel 或永中 Office 等)对从测量设备中得到的原始测量数据进行计算，并将计算结果与使用设备配置的计算机软件得到的结果进行比较，从而判断测量软件的准确性。

### 4) 设备比较法

对同一被测对象或参数，在相同的测试环境，由熟悉测量设备、测试过程和测试方法的同一测试人员，在利用被验证的软件及其配套硬件设备进行测量后，再将其测量结果与利用准确度相当或更高的另一种测量设备进行测量所得到的结果进行比较，以判断软件功能是否符合要求。

## 4 坐标类计量设备软件验证方法实例

选择型号为 API RADIANT，软件为 Spatial Analyzer (Version: 2014.11.11) 的激光跟踪仪进行实验，基于算法比较、设备比较的原则，对激光跟踪仪及其软件进行验证。激光跟踪仪是集形位公差分析、坐标系建立和转换、温度补偿、数模读取、分析等多种功能于一体的便携式坐标测量设备，软件验证也以上述几种主要功能作为测试重点。

### 4.1 形位公差功能验证

验证设备形位公差(GD&T)测量与分析功能的正确性，采用设备比较法进行，选用几何量实物标准器(如：标尺、角度块、标准环规、标准芯棒、偏心轴等)对尺寸、角度、圆度、圆柱度、平面度、平行度、垂直度、同心度/同轴度、位置度功能进行验证。为减小温度变化对验证过程的影响，被测试设备应在满足其校准规范的环境下进行，具备温度补偿功能的设备还应按要求开启温度补偿功能，验证结果如表 1 所示。

形位公差功能验证方法的有效性说明：验证公差要求应参照被验证测量系统的系统准确度进行，本例中跟踪仪测量误差为  $\pm(15\text{ }\mu\text{m} + 6\text{ }\mu\text{m}/\text{m})$ ，所测标准器最大尺寸为 1000 mm，最小尺寸为 100 mm，跟踪仪距被测件约 2 m，因此被验证的测量系统误差为  $\pm 25\text{ }\mu\text{m}$ 。由表 1 可知，测试结果偏差小于系统允许误差，因此形位公差功能验证满足要求。

### 4.2 坐标转换验证

验证激光跟踪仪的坐标系建立、转换功能的正确性，采用设备比较法进行，使用经过检测的工装及工装坐标系作为标准器。用被验证的设备按工程图纸要求测量并建立实际工装坐标系，再通过测量比对特征

表1 形位公差功能测试结果

| 验证项目   | 距离/mm                   | 角度/(°) | 直径/mm    | 圆度/mm                                                                             | 圆柱度/mm                                                                            | 平行度/mm                                                                            | 平面度/mm                                                                              | 垂直度/mm                                                                              | 同轴度/mm                                                                              | 位置度/mm                                                                              |
|--------|-------------------------|--------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 符号     | N/A                     | N/A    | N/A      |  |  |  |  |  |  |  |
| 理论值    | 1008.1900               | 90     | 139.9970 | 0.0000                                                                            | 0.0000                                                                            | 0.0000                                                                            | 0.0000                                                                              | 0.0000                                                                              | 0.0254                                                                              | 0.0000                                                                              |
| 测量值    | 1008.2052,<br>1008.1722 | 90     | 139.9995 | 0.0076                                                                            | 0.0076                                                                            | 0.0102                                                                            | 0.0051                                                                              | 0.0051                                                                              | 0.0229                                                                              | 0.0229                                                                              |
| 偏差     | 0.0152,<br>-0.0178      | 0      | 0.0025   | 0.0076                                                                            | 0.0076                                                                            | 0.0102                                                                            | 0.0051                                                                              | 0.0051                                                                              | -0.0025                                                                             | 0.0229                                                                              |
| 验证公差要求 | ±0.0254                 | ±0.003 | ±0.0254  | 0.0254                                                                            | 0.0254                                                                            | 0.0254                                                                            | 0.0254                                                                              | 0.0254                                                                              | 0.0254                                                                              | 0.0254                                                                              |
| 所用标准件  | 标尺                      | 角度块    | 标准环规     | 标准环规                                                                              | 标准芯棒                                                                              | 大理石平尺                                                                             | 大理石平板                                                                               | 大理石直角尺                                                                              | 标准偏心轴                                                                               | 位置度量规                                                                               |

点(OTP 点)坐标值的方式来验证该功能的正确性。由于被验证设备软件具有最佳拟合、轴对准、USMN 三种建立和转换坐标系的方式,因此应分别对上述三种不同方式进行验证。为减少温度变化对验证过程的影响,应在满足工装检测环境的条件下进行测试,具备温度补偿功能的设备还应按要求进行温度补偿。

4.2.1 最佳拟合功能验证

在测试软件中输入经过检测的工装基准 ERS 点和特征 OTP 点的理论值。根据工装点位选用适当的适配器、反射镜测量工装基准 ERS 点,运用被验证软件中

的最佳拟合功能建立坐标系,坐标拟合偏差应满足基准建立的要求。在拟合坐标系后,测量至少 3 个已知特征 OTP 点,OTP 点的坐标测量值与理论值之差应满足相应工装图纸要求,验证结果如表 2 所示。

4.2.2 轴对准功能验证

根据工装点位选用适当的适配器、反射镜测量工装上的 3 个基准 ERS 点,运用被测试软件中的轴对准功能建立坐标系,在轴对准坐标系下,测量该工装至少 3 个已知特征 OTP 点,OTP 点的坐标测量值与理论坐标值之差应满足相应工装图纸要求,验证结果如表 3 所示。

表2 最佳拟合功能验证结果

|                      |                                                                     |       |             |            |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------|-------|-------------|------------|
| 工装编号                 | 气温                                                                  | 工装温度  | 标尺温度        | 大气压力       |
| FAJ XXXXX - 1 Unit 1 | 21.5℃                                                               | 20.6℃ | 20.6℃       | 961.5 mbar |
| 描述                   | 测量工装上的 24 个 ERS 点,进行最佳拟合(自动比例补偿),然后测量 OTP 点,比较 OTP 点的坐标测量值与坐标理论值的偏差 |       |             |            |
| 最佳拟合结果               | 0.1143 mm                                                           |       | 最佳拟合公差要求    | ±0.1270 mm |
| OTP 点测试结果            | 0.0965 mm                                                           |       | OTP 点测试公差要求 | ±0.1270 mm |
| 描述                   | 测量工装上的 24 个 ERS 点,进行最佳拟合(固定比例补偿),然后测量 OTP 点,比较 OTP 点的坐标测量值与坐标理论值的偏差 |       |             |            |
| 最佳拟合结果               | 0.1270 mm                                                           |       | 最佳拟合公差要求    | ±0.1270 mm |
| OTP 点测试结果            | 0.1194 mm                                                           |       | OTP 点测试公差要求 | ±1270 mm   |

表3 轴对准功能验证结果

|                      |                                                                      |       |             |            |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------|-------|-------------|------------|
| 工装编号                 | 气温                                                                   | 工装温度  | 标尺温度        | 大气压力       |
| FAJ XXXXX - 1 Unit 1 | 21.5℃                                                                | 20.6℃ | 20.6℃       | 961.5 mbar |
| 描述                   | 测量工装上的 3 个 ERS 点,使用 3-2-1 方法建立坐标系,然后测量 OTP 点,比较 OTP 点的坐标测量值与坐标理论值的偏差 |       |             |            |
| OTP 点测试结果            | 0.1016 mm                                                            |       | OTP 点测试公差要求 | ±0.1270 mm |

4.2.3 USMN 功能验证

使用被验证的激光跟踪仪及其软件在第一站位测量工装基准 ERS 点和公共点后，移动跟踪仪到站位二，再次测量公共点，公共点数量不应少于 7 个，运用被

测试软件中的 USMN 功能统一坐标系。再测量该工装上至少 3 个已知特征 OTP 点，OTP 点的坐标测量值（USMN 后测量得到的坐标值）与理论坐标值之差应满足相应工装图纸的要求，验证结果如表 4 所示。

表 4 USMN 功能验证结果

|                     |                                                                |             |            |           |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|------------|-----------|
| 工装编号                | 气温                                                             | 工装温度        | 标尺温度       | 大气压力      |
| FAJ XXXXX -1 Unit 1 | 21.3℃                                                          | 20.4℃       | 20.5℃      | 964.1mbar |
| 描述                  | 测量至少 7 个公共点，执行 USMN 功能统一坐标系，然后测量 OTP 点，比较 OTP 点的坐标测量值与坐标理论值的偏差 |             |            |           |
| OTP 点测试结果           | 0.0991 mm                                                      | OTP 点测试公差要求 | ±0.1270 mm |           |

坐标转换功能验证方法的有效性说明：采用工装做为验证标准进行上述功能验证时，应考虑工装自身制造准确度的要求，本例中工装坐标系及其特征点（OTP 点）的制造误差均为 ±0.1270 mm，因此将该功能验证的可接受标准定为 ±0.1270 mm，由实验结果可知，测试结果均在允许公差的范围，因此坐标转换功能验证满足要求。

4.3 温度补偿功能验证

验证坐标测量类设备的温度补偿功能的正确性，采用设备比较法进行，选取经过校准的不同材质的标尺，分别在 3 个不同的温度条件下进行测量，使用软件自带的温度补偿功能实现温度、材料补偿，计算标尺长度，测量结果误差应小于 20℃时的理论长度偏差。验证数据如表 5 所示。

表 5 温度补偿功能验证结果

| 标尺材质 | 标尺理论长度/mm | 标尺温度/℃ | 标尺测量长度(补偿后)/mm | 允许偏差/mm | 偏差/mm  |
|------|-----------|--------|----------------|---------|--------|
| 钢    | 1000.2266 | 22.1   | 1000.2926      | ±0.0762 | 0.0660 |
|      |           | 21.1   | 1000.2825      |         | 0.0559 |
|      |           | 18.2   | 1000.2952      |         | 0.0686 |
| 铝    | 1000.5314 | 22.2   | 1000.5924      | ±0.0762 | 0.0610 |
|      |           | 20.8   | 1000.6025      |         | 0.0711 |
|      |           | 18.1   | 1000.5898      |         | 0.0584 |
| 碳纤维  | 1006.4242 | 21.9   | 1000.4801      | ±0.0762 | 0.0559 |
|      |           | 20.8   | 1006.4475      |         | 0.0533 |
|      |           | 18.2   | 1006.4852      |         | 0.0610 |

温度补偿功能验证方法的有效性说明：由于标尺材料的均匀性、热膨胀系数的不确定度以及测量设备自身误差的影响，实际测试结果可适当放宽，在此以客户可接受的 ±0.0762 mm 作为验证合格与否的判定标准，由表 3 可知，测试结果偏差小于允许偏差，因此温度补偿功能验证满足要求。

4.4 数模导入功能验证

验证坐标测量类设备所配备的具有数模分析功能

的软件在不同格式数模（例如 IGES，STEP 等格式）导入过程中，特征量和坐标系统是否会发生变化或丢失。采用算法比较法进行，在被测试软件中导入标准数模，分析测得的特征点的位置关系，并与标准数模相应位置关系进行比较。根据常用数模类型，将标准数模转换成 \*.igs，\*.stp 格式，并分别将上述格式的数模导入被测试软件。在被测试软件中对数模中的点与面的关系进行分析，其结果应与标准数模的分析结果一致，

验证结果如表 6 所示。

| 表 6 数模导入验证结果                                                                      |          |      |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|------|---------|
| 标准数模图示                                                                            | 数模导入测试结果 |      |         |
|                                                                                   | 导入数模格式   | 测试点数 | 最大偏差/mm |
|  | *.igs    | 212  | 0.00005 |
|                                                                                   | *.stp    | 212  | 0.00005 |
|  | *.igs    | 169  | 0.00000 |
|                                                                                   | *.stp    | 169  | 0.00000 |
|  | *.igs    | 252  | 0.00000 |
|                                                                                   | *.stp    | 252  | 0.00000 |
|  | *.igs    | 133  | 0.00000 |
|                                                                                   | *.stp    | 133  | 0.00000 |
|  | *.igs    | 489  | 0.00000 |
|                                                                                   | *.stp    | 489  | 0.00000 |

数模导入功能验证方法的有效性说明：数模在导入导出过程中通常不会发生变化，但复杂结构数模有可能会产生变形，为确保其变形不会对产品测量过程产生影响，其验证公差要求应尽可能小，选取零件公差的 1/10 ~ 1/20，在此以  $\pm 0.001\text{ mm}$  作为数模导入验证的要求，由表 6 可知，测试结果的最大偏差小于判定标准，因此数模导入功能验证满足要求。

5 小结

本文所选用的软件验证方法，虽不能像 JJF 1182 – 2007《计量器具软件测评指南》<sup>[1]</sup>那样对软件标识、算法和功能正确性、欺骗性、安全性、稳定性、数据存储、通信传输等功能进行全面的测评，但却提供了一种较为简便、易于操作，适用于企业内部使用的测试方案。随着计算机技术的发展和人们对软件质量要求的不断提高，软件测试必将受到越来越多的关注和推广<sup>[4]</sup>，其测试方法和理论仍需不断的发展和完善。

参 考 文 献

[1] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1064 – 2010 坐标测量机校准规范[S]. 2010.

[2] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1182 – 2007 计量器具软件测评指南[S]. 2007.

[3] 国家质量监督检验检疫总局. GJB 9001C 质量管理体系要求[S]. 2017.

[4] 黄松涛, 水利民. 计量器具软件监测亟待开展[J]. 计量技术, 2009(6): 61 – 63.

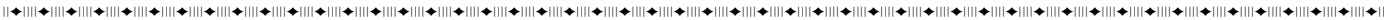
[5] 周煜, 周国庆, 奚文骏. 软件测试技术概述[J]. 中国测试, 2005, 31(3): 56 – 58.

收稿日期：2018 – 09 – 19

作 者 简 介



李美琦(1980 – ), 男, 2003 年毕业于成都理工大学, 获工学学士学位; 现就职于航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司检验检测部计量检测中心, 主要从事几何量计量工作。



《宇航计测技术》2019 年第 1 期目次

|                      |                                      |
|----------------------|--------------------------------------|
| 计量发展综述               | 原子磁强计原子气室无磁加热温控系统设计                  |
| 网络分析仪时域技术概述          | 测量低能 X 射线的自由空气电离室设计                  |
| 理论与前沿技术              | 计量保障技术                               |
| 空间计量与脉冲星导航           | 一种测量雷达散射截面参数现场校准方法                   |
| BPL 长波授时信号传输时延分析     | 无人机动态校准系统研究                          |
| 一种虹膜特征提取与匹配方法        | 基于射频链路的卫星导航系统星间信息传输与仿真研究             |
| GEM – TEPC 调研分析及原理研究 | 陀螺寻北仪现场校准方法探讨                        |
| 量值传递技术               | 磁罗盘空间特性校准装置研究                        |
| 电磁脉冲电场探头转换系数的校准      | 基于 Vc ++ /GL Studio 的通用飞行组合虚拟仪表设计及实现 |
| 测量接收机与矢量网络分析仪测量衰减比较  | 计量综合管理                               |
| 动态真空校准装置的设计          | 军队试验机构计量工作的挑战与对策                     |
| 精密测试技术               |                                      |