

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.02.15

飞机静强度试验摄影测量系统的现场校准技术研究

崔岩梅^{1*}, 周宁¹, 欧阳海宁¹, 尧建平², 高战朋², 唐薇²

(1. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710089)

摘要: 针对飞机静强度试验中摄影测量系统无法适用现场校准方法与装置、复杂现场环境影响测量精度与效率等难题, 提出多维度计量校准技术, 构建碳纤维六面体框架实验室校准装置, 实现高精度空间坐标传递, 测量不确定度 U 为 $1.6 + (L/300) \mu\text{m}$, $k = 2$; 辨识温湿度 ($10 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $10\% \sim 90\% \text{ RH}$) 对测量精度的影响 (最大相对误差为 0.0064%), 采用蓝光照明降低光照干扰; 并设计便携式现场校准器突破传统局限。试验结果表明: $4.5 \sim 6.5 \text{ m}$ 测量范围内系统误差不超过 $\pm 0.3\%$, 满足静强度试验需求, 为摄影测量系统在静强度试验中的标准化应用提供技术支撑。

关键词: 摄影测量系统; 多维度计量; 环境因素辨识; 现场校准; 碳纤维材料; 蓝光照明技术; 飞机静强度试验; 空间坐标传递

中图分类号: TB9; V21

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 02-0171-09

Research on on-site calibration technology of photogrammetry system for aircraft static strength test

CUI Yanmei^{1*}, ZHOU Ning¹, OUYANG Haining¹, YAO Jianping², GAO Zhanpeng², TANG Wei²

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

2. Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Aiming at the problems in photogrammetric systems for aircraft static strength tests, such as the lack of applicable on-site calibration methods and devices, and the impact of complex on-site environments on measurement accuracy and efficiency, this paper proposes a multi-dimensional metrological calibration technique. A laboratory calibration device with a carbon fiber hexahedral frame was constructed to realize high-precision spatial coordinate transmission, with a measurement uncertainty U equals $1.6 + (L/300) \mu\text{m}$, $k = 2$. The influence of temperature and humidity ($10 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $10\% \sim 90\% \text{ RH}$) on measurement accuracy (maximum relative error 0.0064%) was identified, and blue light illumination was adopted to eliminate light interference. A portable on-site calibrator was designed to break through traditional calibration limitations. Test results show that within the measurement range of $4.5 \sim 6.5 \text{ m}$, the system error does not exceed $\pm 0.3\%$, which meets the requirements of static strength tests and provides technical guarantee for the standardized application of the photogrammetry system in static strength tests.

收稿日期: 2026-02-13; 修回日期: 2026-04-13; 录用日期: 2026-04-14; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: 工业和信息化部飞机专项科研项目 (MJ-2017-J-86)

引用格式: 崔岩梅, 周宁, 欧阳海宁, 等. 飞机静强度试验摄影测量系统的现场校准技术研究[J]. 计测技术, 2026, 46(2): 171-179.

Citation: CUI Y M, ZHOU N, OUYANG H N, et al. Research on on-site calibration technology of photogrammetry system for aircraft static strength test[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2): 171-179.



Key words: photogrammetry system; multi-dimensional metrology; identification of environmental factors; on-site calibration; carbon fiber material; blue light illumination technology; aircraft static strength test; spatial coordinate transmission

0 引言

在飞机结构静强度试验中,机翼变形测量是适航认证的关键环节。随着宽翼展飞机设计技术的不断发展,传统测量技术的局限性日益凸显,而摄影测量技术的优势则愈发显著。传统拉线位移传感器因单点测量、空间遮挡、观测数据受限等特性,在大空间测量覆盖性、动态响应能力及复杂环境适应性方面存在明显不足,难以满足现代航空航天领域大数据量、高效率、空间大角度偏转等测试需求^[1-4]。摄影测量系统凭借非接触、多点同步测量和实时性等优势,成为飞机制造和飞行试验现场变形测量领域的应用热点^[5-6]。

目前,国内外关于摄影测量系统的研究主要集中在测试精度提升、测量误差分析及计量校准方法优化等方面。摄影测量系统的精度受多种因素影响,朱文芳^[7]通过双相机工业摄影测量系统实验系统分析了各类影响因素,并提出了优化建议;马彤彤等人^[8]聚焦几何因素,给出宇航场景下最优几何布设原则;徐永等人^[9]综述了各类校准技术及发展方向;黄桂平等人^[10]从计量检定角度,提出装置便携化发展方向和标准化检定思路;谭泽祥等人^[11]针对基准尺摄影测量系统开展误差分析和方法优化,为工业摄影测量技术应用及后续创新奠定了基础。

现有摄影测量系统校准技术研究已从校准方法、动态校准装置、坐标系校准及测量重复性分析等多角度开展。文献[12-15]分别从不同角度进行了报道,但相关校准方案仍未使摄影测量方法获得适航认证。

摄影测量方法尚未获得适航认证的根本症结在于缺乏统一的现场校准规范。当前行业内尚未形成公认的校准方法,导致现有方法无法通过计量学意义上的溯源性验证,难以保证在整个测试空间内数据采集的准确性和结果的可重复性。这种不确定性使得航空适航审定机构无法将其纳入认证体系,进而导致静强度试验现场仍需依赖基

于拉线传感器的传统测量手段。而传统方法存在安装复杂、测量效率低等固有缺陷,已成为制约试验进度的主要瓶颈。

要实现摄影测量系统现场校准技术的突破,需要系统性解决三大核心难题:

1) 现场校准的规范化难题

现场校准的规范化是实现摄影测量系统现场校准技术突破的最大难题。飞机静强度试验现场需要实现力加载、位移测量、应变测量三位一体的长期同步测试^[16],要求摄影测量系统在现场连续数月不间断地采集并处理数据。位移超差可能会导致长期测试结果失效,因此,现场校准是保障测量准确性和稳定性的关键环节,但是目前尚无现场校准的规范化参考资料。国内虽已出台JJF 1951-2021《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》^[17],可用于指导摄影测量系统实验室校准装置的设计和校准实施,但未涉及现场校准方法;德国工程师协会的VDI/VDE 2634^[18-19]、美国材料与试验协会的ASTM E1318-19^[20]也未涉及现场校准内容。

2) 现场使用中的多测量系统坐标系统一难题

大型构件测试现场常需多套摄影测量系统(可能涉及多个厂家)同时工作,须在统一坐标系下完成结果判定,由于各厂商配套靶标类型多样,须经坐标系多次转换完成坐标系统一,坐标系多次转换将引入系统误差,影响判定准确性。

3) 现场校准环境复杂难题

大型试验现场空间结构复杂,温湿度波动、振动、光照不均匀等环境因素均会引入测量误差,为抑制这些误差,需要进行额外操作,降低了测量效率。

针对静强度试验摄影测量系统的现场校准难点和研究空白,提出多维度计量^[21]的校准技术体系,通过实验室校准装置构建、环境因素量化分析和便携式校准器设计协同创新,实现摄影测量系统从实验室溯源到现场应用的全流程精度控制,为飞机结构强度全机静强度试验引入新一代位移

测量方案，为实现静强度试验的高效现场校准提供计量保障和重要技术支撑。

1 多维度计量校准技术体系构建

1.1 多维度计量校准的提出

静强度试验的校准需求主要集中于两方面：
① 需满足通用性和规范化要求，统一各类摄影测量系统的靶标、测试与评估方法，覆盖行业需求，为适航试验提供有力支持；② 现场校准的实现，

关键在于考虑现场环境影响，综合考量多种现场因素并进行量化处理。

实验室校准装置遵循传统计量校准理念，在理想实验室环境下开展工作；而现场校准装置则依据现场实际需求设计；根据多维度计量的研究思路，系统分析实验室与现场的差异，对环境因素进行分类辨识，重点研究对位移测量影响显著的环境应力，通过物理隔离/试验修正两种方式降低其对测量的影响。

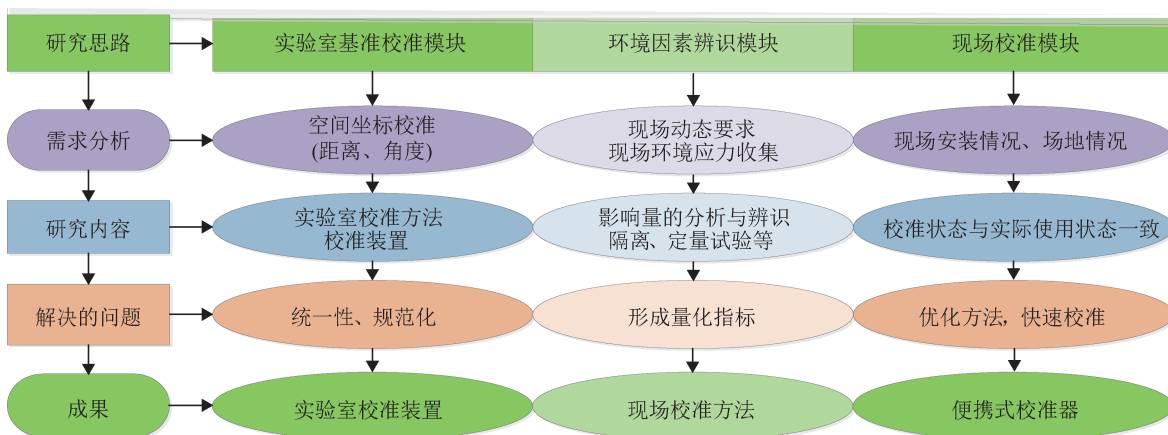


图1 摄影测量系统多维度计量校准技术体系构建框图

Fig.1 Block diagram of multi-dimensional calibration technology system construction for photogrammetry system

1.2 校准技术体系框架设计

基于多维度计量理念，本研究通过核心模块设计构建多维度计量校准技术体系，体系构建框图如图1所示。多维度计量校准技术体系通过3个核心模块完成构建：

1) 实验室校准模块

采用六面体框架结构提供标准空间坐标，建立摄影测量系统的基础溯源路径，确保测量结果的准确性和可追溯性符合要求。

2) 环境因素辨识模块

识别温湿度、光照等关键环境应力，通过试验量化其对测量精度的影响，为现场误差修正提供依据，必要时建立修正模型。

3) 现场校准模块

结合现场测试范围和准确度要求，提出便携式校准器设计方案，实现复杂空间环境下的快速校准与误差修正，满足现场校准的便捷性和高效性要求。

1.3 校准装置的核心设计

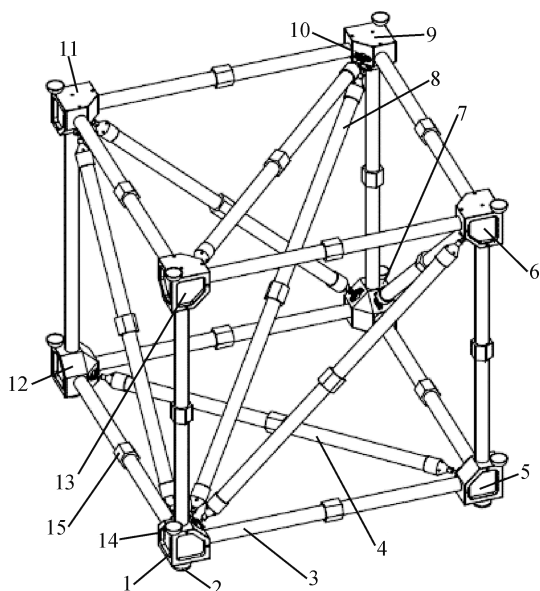
校准装置采用碳纤维材料制造，兼顾实验室校准与现场校准装置的设计需求，其材料特性及设计优势如下：
① 碳纤维具有高强度、高模量、低密度及极低的热膨胀系数等优异特性，其密度仅为铝合金的1/3左右，拉伸强度却远超钢材，这种高比强度特性使得校准装置在保证结构强度的同时，有效减轻了自身重量，便于搬运和调整；
② 从结构力学角度分析，碳纤维材料的高弹性模量保证框架在承受外力作用时能够保持良好的形状稳定性，确保靶球位置的准确性，同时碳纤维具有极低的热膨胀系数(约为 $-0.74 \times 10^{-5}/K$)，所制造的校准装置在温度波动环境下尺寸变化极小，温度变化难以对装置的尺寸精度产生显著影响，能够保障空间坐标的高精度传递；
③ 碳纤维材料的各向异性特点在结构设计中得到充分利用，通过合理设计碳纤维的铺层方向，可以优化结构在不同方向上的力学性能，使其更好地满足校准装

置在测量过程中的受力需求。

碳纤维材料设计对于保障高精度校准、增强结构稳定性、满足便携性需求至关重要,且契合多维度计量校准理念,是实现从实验室校准到现场应用全流程精度控制的重要环节,属于核心设计。

2 实验室校准装置设计

针对摄影测量系统校准的通用性和规范化需求,参考JJF 1951-2021《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》^[17],研制实验室标准装置,如图2所示。该校准装置为正六面体框架结构,标称棱长为1 m,采用靶标基座进行靶球的固定,以靶球中心两两之间的坐标位移作为标准空间尺寸,为摄影测量系统提供尺寸和角度校准基准。



注: 1-紧固螺丝; 2-支架固定地脚; 3、4、8-多种方向的测量杆; 10-安装接头组件; 5、6、7、9、11、12、13、14-8个顶点支撑块; 15-可以安装靶标或靶标基座的测量块。

图2 实验室校准装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of laboratory calibration device

实验室校准装置的设计具备以下特点: ① 六面体框架结构为校准装置提供了稳定的几何构型,其对称结构可均匀分布外部载荷,减少因受力不均导致的结构变形; ② 框架采用碳纤维材料制造,热膨胀系数低、受温度影响小,且材料为空心,

重量轻、便于移动; ③ 采用靶标基座固定靶球,以靶标基座的中心为公共点,作为坐标系统一的参考基准; ④ 校准装置技术指标优良,为充分体现其校准能力,采用三坐标测量机标准球作为校准靶球,并利用三坐标测量机对8个顶点靶标进行球心距标定,实现量值传递。根据校准证书,该校准装置对顶点球心距的测量不确定度为 $U = 1.6 + (L/300) \mu\text{m}$, $k = 2$,满足摄影测量系统的校准要求。

3 环境因素辨识与量化分析

3.1 关键环境应力筛选

根据现场测试经验和理论分析,温度、湿度、光照和振动是影响摄影测量系统性能的主要环境因素: ① 在静强度试验现场试验条件良好,无明显振动源时,振动对测量的影响可忽略;若现场存在振动源,可通过地基修建等方式进行物理隔离; ② 光照因素对测试结果影响显著,光照不均匀、杂散光及反光靶标反射率差异等综合作用,可能导致测试标记点无法识别,轻则引入较大误差,重则使测试结果无效; ③ 温湿度对几何量测量准确度至关重要,是必须考虑的环境参数;本研究采用试验方法定量确定温湿度的综合影响,对于存在确定函数关系的情况,可根据现场环境数据直接修正测量结果。综上分析,对摄影测量系统影响显著的环境因素为温湿度和光照。

3.2 温湿度耦合效应的试验量化

为定量研究温湿度对摄影测量系统位移测量的影响,利用温湿箱模拟现场环境(静强度试验厂房,温度为 $10 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度为 $10\% \sim 90\% \text{ RH}$),开展校准装置的温湿度耦合效应试验,进行无遮挡的顶点坐标测试,必要时进行坐标修正。

3.3 蓝光照明技术

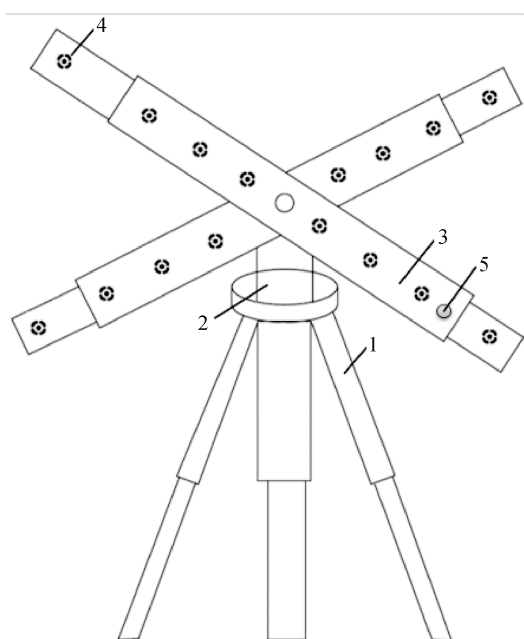
针对光照不均匀、自然光、杂散光影响测量准确度等问题,文献[22]提出了照明系统优化设计方法。本文采用 465 nm LED蓝光频闪灯配合摄影测量系统进行精密测量,蓝光在物体表面形成条纹图像,由于蓝光波长较短,具备更高分辨力和细节捕捉能力,可提高测量精度;同时,蓝光可形成均匀的光分布,对大型或不规则形状物体

进行测量时,能保证整个测量区域内光的均匀性,屏蔽自然光干扰、抑制环境杂散光,即使在复杂的工业环境中,也能保证测量结果的准确性和稳定性,避免外界光线变化的影响。

4 便携式校准器的设计及现场校准方法

4.1 便携式校准器的设计

图3为便携式校准器结构示意图。图4(a)为便携式校准器实物图,图4(b)为便携式校准器与GOM型摄影测量系统组成的现场校准设备。便携式校准器采用抽拉式“十字架”设计,主体材料为碳纤维,由可调高三脚架、三轴云台、伸缩标定杆、靶标点及磁吸坐标球组成。



注: 1-可调高三脚架; 2-三轴云台; 3-伸缩标定杆;
4-靶标点; 5-磁吸坐标球。

图3 便携式校准器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the portable calibrator structure

便携式校准器具有以下技术优势:

1) 便携性好

采用碳纤维材料制造的标定杆可伸缩(展开尺寸 $3.6\text{ m} \times 3.6\text{ m}$, 2根标定杆可以展开成十字结构,也可以收回折叠成一字结构,折叠后的包裹尺寸为 $2.2\text{ m} \times 0.3\text{ m}$),三脚架支持快速拆装。

2) 空间覆盖能力强

标定杆展开后展宽可达 3.6 m ,十字结构将测



(a) 便携式校准器实物图
(a) Physical image of portable calibrator



(b) 现场校准设备
(b) On-site calibration equipment

图4 现场校准装置实物图

Fig.4 Physical image of on-site calibration device

量区域扩展至整个竖直平面,满足现场校准范围;三轴云台支持 $0^\circ \sim 360^\circ$ 旋转,可在竖直平面内形成多角度校准基准。

3) 定位精度高

通过精密导轨与销钉锁死机构可以进行位置锁定,从而保证装置多次伸缩的重复性,经三坐标测量机检定,定位重复性 $< 20\ \mu\text{m}$ 。

4.2 现场校准实施流程

现场校准实施流程: ① 装置部署: 将校准器安装于被测结构附近的非变形区域,并调整至最大展宽状态; ② 数据采集: 将摄影测量系统对校准器上的靶标点进行多角度(间隔 45°)采集,每组角度获取3次重复数据; ③ 误差分析: 对比测量值与标准值,计算各方向的位置偏差与角度误差; ④ 模型修正: 基于最小二乘法拟合系统误差模型,对相机内参、外参进行实时修正。

5 试验验证

5.1 实验室校准精度验证

使用三坐标测量机对实验室校准装置靶标球心坐标进行距离和角度校准,结果表明:校准装置棱长测量误差不超过 $\pm 15\mu\text{m}$ 、角度测量误差不超过 $\pm 0.02^\circ$,验证了实验室校准装置的高精度。

5.2 实验室校准装置的温湿度耦合试验验证

静强度试验厂房现场环境参数为温度 $10\sim 30^\circ\text{C}$,湿度 $10\%\sim 90\%\text{RH}$,为了定量研究温湿度对应位移测量的影响,本文利用温湿箱模拟现场环境,开展校准装置的温湿度耦合效应试验,采用激光跟踪仪(型号为ATS-600,距离测量重复性

为 $\pm 10\mu\text{m}$)测量校准装置顶点坐标变化。

实验室校准装置放置于试验箱内,激光跟踪仪放置于试验箱外,每次进行无遮挡的4个顶点的坐标测试,选择激光跟踪仪的最佳工作距离 2m 作为测试距离,所使用激光跟踪仪的距离测量重复性优于 $10\mu\text{m}$ 。

调整温湿箱,按3种环境条件进行测试——常温状态下;温度 10°C 状态下;温度 30°C 、湿度 $90\%\text{RH}$ 状态下。每种环境条件下,首先关闭温箱盖,进行 60min 定温,定温完成后,打开试验箱盖快速完成坐标测试,随后进行下一个环境条件的坐标测试。温湿度耦合条件下的校准装置顶点距离测试结果如表1所示。

表1 温湿度耦合条件下的校准装置顶点距离测试结果

Tab.1 Test results of the vertex distance of the calibration device under temperature-humidity coupling conditions

单位: mm

所计算两点	温度 20°C 、湿度 $30\%\text{RH}$ 时两点距离校准结果	温度 10°C 时两点距离测量值	温度 30°C 、湿度 $90\%\text{RH}$ 时两点距离测量值	温度 10°C 时测量值与校准结果差值	温度 30°C 、湿度 $90\%\text{RH}$ 时测量值与校准结果差值
P1-P2	887.361	887.362 9	887.385 5	0.001	0.024
P1-P3	1 298.153	1 298.161	1 298.192	0.008	0.039
P1-P4	984.955 8	984.947 8	985.022 6	-0.008	0.067
P2-P3	911.118	911.063 4	911.110 1	-0.055	-0.008
P2-P4	1 298.089	1 298.006	1 298.139	-0.083	0.050
P3-P4	887.698	887.656 8	887.743 9	-0.041	0.046

通过温湿度耦合试验量化分析了温湿度对校准装置的影响,温湿度变化导致的最大距离偏差为 $-83\mu\text{m}$ (10°C)和 $+67\mu\text{m}$ (30°C , $90\%\text{RH}$),相对误差均小于 0.01% ,符合现场测试误差要求,表明温湿度对校准装置的影响可忽略,验证了校准装置良好的环境适应性。

5.3 现场校准验证试验

在某型飞机静强度试验现场,试验环境条件为:温度 20°C 、相对湿度 $50\%\text{RH}$,测试距离设定为 $4.5\sim 6.5\text{m}$ (该测试距离结合现场试验空间条件,并综合考虑摄影测量系统视场可完整覆盖被测对象等因素确定)。

根据现场条件设计校准方案,现场校准的位置关系如图5所示,布置校准装置和待校准的2套

测量系统〔辰维摄影测量系统(郑州辰维科技股份有限公司生产)与GOM ARAMIS 12M摄影测量系统〕,将2个标定杆的伸缩部分全部拉出,分别固定后,调整2个标定杆呈 90° 夹角,使其所在平面与测量轴线垂直,2套待校准的摄影测量系统同步展开测试。旋转十字标定杆,每旋转 45° ,2套摄影测量系统分别采集标记点的3组数据,十字标定杆旋转一周后,完成8个位置、24组数据的采集,将辰维与ARAMIS测量得到的数据与标准值进行对比,得到摄影测量系统在该测试距离的测试误差。调整不同的测量距离,重复上述校准过程。

2套测试系统的距离测试结果如表2所示,可见2套系统的测量误差均不超过 $\pm 0.3\%$,满足航空试验要求。

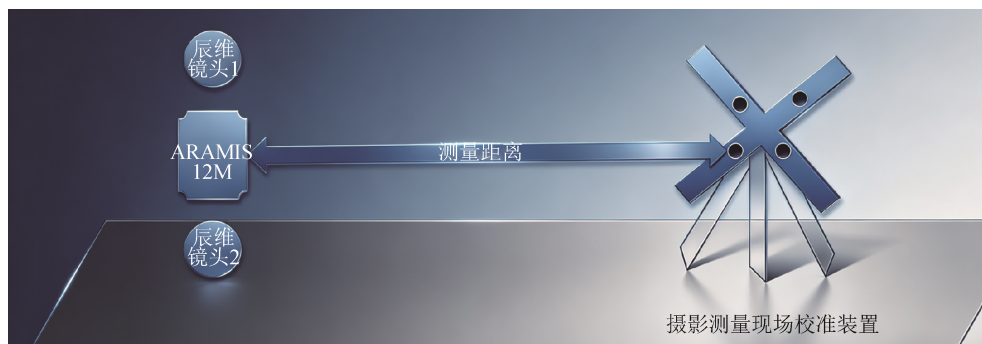


图5 现场校准的位置关系示意图

Fig.5 Position relation diagram of field calibration

表2 2套测试系统的距离测试结果比较表

Tab.2 Comparison table of distance test results between two sets of testing systems

单位: mm

位置	辰维测量结果			ARAMIS测量结果			相对误差 /%		
	点1	点2	点3	点1	点2	点3	点1	点2	点3
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	97.90	334.33	958.32	97.75	334.31	958.58	0.15	0.01	-0.03
3	190.77	652.59	1 870.41	190.63	652.69	1 871.23	0.07	-0.02	-0.04
4	241.40	824.99	2 363.68	241.22	825.09	2 364.45	0.07	-0.01	-0.03
5	273.34	933.49	2 673.71	273.37	933.55	2 674.17	-0.01	-0.01	-0.02
6	255.31	870.61	2 492.75	255.35	870.67	2 492.83	-0.02	-0.01	0.00
7	191.88	652.33	1 866.61	191.99	652.39	1 866.58	-0.06	-0.01	0.00
8	120.68	407.97	1 166.75	120.96	408.19	1 166.63	-0.23	-0.05	0.01

6 结论与展望

本文提出的多维度计量校准技术,有效解决了飞机静强度试验摄影测量系统现场校准难题,相较传统校准方法具有显著优势:采用碳纤维六面体框架的实验室校准装置,显著降低温度形变影响,实现了更高精度的量值溯源;通过蓝光照明与环境应力量化分析,大幅提升了系统对复杂现场环境的适应性;便携式现场校准设备可突破空间约束,在大尺寸测量范围内实现快速、稳定的精度验证。研究成果推动了摄影测量系统在飞机全机静强度试验中工程化应用,为现场测试提供了可靠的计量保障与技术支撑。

试验结果表明:该便携式校准装置仍存在结构短板——抽拉式结构,这种结构存在配合间隙,

易引入测量误差,且整体刚性不足,影响系统精度与长期稳定性。后续将研究基于刚性一体化结构或增设精密锁紧定位机构的方案,通过强化定位约束、优化配合公差提升结构刚度,进一步提高装置的测量准确度与稳定性。

参考文献

- [1] 王建国,李丽华,张志强.飞机结构试验中拉绳式位移传感器的应用局限与改进[J].航空制造技术,2019,42(5):12-18.
WANG J G, LI L H, ZHANG Z Q. Application limitations and improvements of cable displacement sensors in aircraft structural tests [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 42(5): 12-18. (in Chinese)
- [2] 陈志强,刘建军,黄晓燕.航空静强度试验中拉线位移传感器的局限性分析[J].中国测试,2020,46(3):45-50.

- CHEN Z Q, LIU J J, HUANG X Y. Analysis of limitations of draw-wire sensors in aerostatic strength tests[J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(3): 45-50. (in Chinese)
- [3] 吴明辉, 周海燕, 孙宏伟. 复合材料飞机结构测量中拉线传感器的适用性研究[J]. *航空学报*, 2021, 42(7): 20210012.
- WU M H, ZHOU H Y, SUN H W. Applicability study of cable sensors in composite aircraft structure measurement [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(7): 20210012. (in Chinese)
- [4] 崔岩梅, 李涛, 周宁, 等. 拉线传感器变角度工作条件下的校准[J]. *计测技术*, 2022, 42(4): 77-82.
- CUI Y M, LI T, ZHOU N, et al. Calibration of pull wire displacement sensor under variable angle working condition[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(4): 77-82. (in Chinese)
- [5] 梁晋. 大型飞机飞行过程中机翼的三维动态变形检测方法研究[J]. *航空学报*, 2024, 45(3): 123-130.
- LIANG J. Research on the 3D dynamic deformation detection method of the wing during the flight of a large aircraft [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(3): 123-130. (in Chinese)
- [6] 吕传景. 精密工业测量技术助力大飞机制造精度控制 [N]. *中国航空报*, 2019-06-15(3).
- LYU C J. Precision industrial measurement technology powers accuracy control in large aircraft manufacturing [N]. *China Aviation News*, 2019-06-15(3). (in Chinese)
- [7] 朱文芳. 双相机工业摄影测量系统精度影响因素研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- ZHU W F. Research on accuracy influencing factors of dual-camera industrial photogrammetry system[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020. (in Chinese)
- [8] 马彤彤, 轩亚兵, 王伟峰, 等. 双相机工业摄影测量系统精度影响几何因素测评[J]. *宇航计测技术*, 2017, 37(6): 28-33.
- MA T T, XUAN Y B, WANG W F, et al. Evaluation of geometric factors affecting accuracy of dual-camera industrial photogrammetric system [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2017, 37(6): 28-33. (in Chinese)
- [9] 徐永, 李艳, 瞿剑苏, 等. 工业摄影测量系统校准技术研究进展综述[J]. *计测技术*, 2016, 36(6): 4-8.
- XU Y, LI Y, QU J S, et al. Review on development of calibration methods for industrial photogrammetry systems [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2016, 36(6): 4-8. (in Chinese)
- [10] 黄桂平, 王伟峰, 轩亚兵, 等. 工业摄影测量系统检定方法研究进展. *中国测试*, 2015, 41(7): 10-15.
- HUANG G P, WANG W F, XUAN Y B, et al. Research progress on calibration methods of industrial photogrammetry system [J]. *China Measurement & Test*, 2015, 41(7): 10-15. (in Chinese)
- [11] 谭泽祥, 董明利, 燕必希, 等. 基于摄影测量的基准尺长度测量系统的调节与误差分析[J]. *计量学报*, 2017, 38(5): 553-558.
- TAN Z X, DONG M L, YAN B X, et al. Adjustment and error analysis of length measurement system for scale-bar based on photogrammetry [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(5): 553-558. (in Chinese)
- [12] 李洪儒, 李艳, 瞿剑苏, 等. 一种基于数字摄影测量系统的校准方法研究[J]. *计测技术*, 2018, 38(增刊1): 24-27.
- LI H R, LI Y, QU J S, et al. A calibration method based on digital photogrammetry system [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(supplement 1): 24-27. (in Chinese)
- [13] 李洪儒, 李艳, 瞿剑苏, 等. 摄影测量系统直线动态校准装置研究[J]. *计量技术*, 2018(10): 53-54.
- LI H R, LI Y, QU J S, et al. Research on linear dynamic calibration device of photogrammetry system [J]. *Measurement Technique*, 2018(10): 53-54. (in Chinese)
- [14] 侯乔乔, 高占朋. 基于摄影测量原理的室内大尺寸空间测量定位系统坐标系校准方法研究 [C]// 2018年中国航空测控技术专刊. *中国航空学会*, 2018: 1-5.
- HOU Q Q, GAO Z P. Research on calibration method of indoor large-size space coordinate measuring system based on photogrammetry [C]// *Proceeding of 2018 China Aviation Measurement and Control Technology Symposium*. Chinese Society of Aeronautics, 2018: 1-5. (in Chinese)
- [15] 何长义, 唐琴琼, 李亚男, 等. 数字近景工业摄影测量系统测量重复性研究[J]. *计量与测试技术*, 2021, 48(9): 15-17.
- HE C Y, TANG Q Q, LI Y N, et al. Study on measurement repeatability of digital close-range industrial photogrammetric system [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2021, 48(9): 15-17. (in Chinese)

- [16] 周宁, 冯建民, 宋昊, 等. 多点粘贴式应变测量系统在线校准技术研究[J]. 计量学报, 2025, 46(2): 204-212.
ZHOU N, FENG J M, SONG H, et al. Research on on-line calibration technology of multi-point pasted strain measurement system[J]. Acta Metrologica Sinica, 2025, 46(2): 204-212. (in Chinese)
- [17] 国家市场监督管理总局. 基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范: JJF 1951-2021[S]. 北京: 中国质检出版社, 2021.
National Administration for Market Regulation. Calibration specification for optical 3D measuring systems based on structured light scanning: JJF 1951-2021 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2021. (in Chinese)
- [18] German Institute for Standardization. Optical 3D measuring systems — part 1: imaging systems with point-by-point probing: VDI/VDE 2634-2002[S]. Berlin: Beuth Verlag, 2002.
- [19] German Institute for Standardization. Optical 3D measuring systems — part 3: multiple view systems based on area scanning: VDI/VDE 2634-2008[S]. Berlin: Beuth Verlag, 2008.
- [20] Standard test method for measurement of displacement using digital image correlation: ASTM E1318-19 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2019.
- [21] 周宁. 关于计量科学技术发展若干问题的思考[J]. 计测技术, 2022, 42(1): 1-8.
ZHOU N. Perspectives on the development of metrological science and technology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(1): 1-8. (in Chinese)
- [22] WANG W, LIU W, ZHANG Y, et al. Illumination system optimal design for geometry measurement of complex cutting tools in machine vision[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125: 105-114.

(本文编辑: 刘宇轩 刘圣晨)



第一/通信作者: 崔岩梅(1972—), 女, 研究员, 博士, 主要研究方向为航空传感器计量检测与评价技术。任全国光学计量委员会委员、中国光学技术委员会光电分会委员, 曾主持完成多项型号和科研项目, 获得多项奖项。