

国家计量技术规范

编制说明

名 称： 飞机轮廓视觉测试技术规范

编制单位： 北京航空航天大学

二〇二六年八月

1 任务来源及计划要求

1.1 任务来源

根据《市场监管总局办公厅关于印发 2025 年国家计量技术规范制定、修订及宣贯计划的通知》，《飞机轮廓视觉测试技术规范》国家计量技术规范（计划编号：MTC32-2025-07）由全国航空专用计量测试技术委员会提出并归口，起止年限为 2025 年至 2026 年。

1.2 起草单位及起草人

规范主要起草单位：北京航空航天大学、中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所；规范参与起草单位：中国飞行试验研究院、思看科技（杭州）股份有限公司、沈阳飞机工业（集团）有限公司、北京航天计量测试技术研究所、成都飞机工业（集团）有限责任公司。

本规范的牵头单位北京航空航天大学长期从事航空航天测试、三维视觉测量、机器人测量与数字化检测等研究工作，具备飞机轮廓视觉测量系统设计、测量方法建模与点云数据处理方面的技术积累；中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所长期承担航空专用计量测试技术研究、计量技术规范制修订和航空计量技术支撑工作，熟悉国家计量技术规范编写要求和航空计量应用需求；中国飞行试验研究院、沈阳飞机工业（集团）有限公司、成都飞机工业（集团）有限责任公司等单位具有飞机制造、装配、试验、维修和检测应用经验；思看科技（杭州）股份有限公司、北京航天计量测试技术研究所等单位在三维视觉测量设备、空间位姿测量及计量验证方面具有相关技术基础。

起草人均来自上述起草单位，在飞机轮廓视觉测试及相关科研领域具有丰富的实践经验，并具备较扎实的测量不确定度理论基础。

1.3 制定背景

在航空工业领域，飞机轮廓是表征飞机气动外形、制造装配质量和维修状态的重要几何信息。机身、机翼、发动机短舱和尾翼等部位构成了大尺度复杂自由曲面，其外形轮廓直接关系到飞机气动性能、装配状态、维修质量和运行安全。

飞机轮廓数据可用于外形符合性检查、装配状态分析、数模比对、维修检测、试飞前状态核查以及数字化质量追溯等场景，是飞机制造、试验、维修和质量控制过程中的重要基础数据。

随着航空装备大型化、复杂化和数字化程度不断提高，传统依赖人工测量、局部样板检查或单点尺寸检测的方式，已难以满足飞机轮廓大范围、高效率、非接触和可追溯测量的需求。视觉测量技术具有非接触、数据量大、测量效率高、适合复杂外形获取等特点，已逐步应用于飞机轮廓测量和数字化检测。飞机整机或大部段轮廓测量通常需要在较大空间范围内获取多视场点云数据，并将不同测量位置、不同局部坐标系下的点云数据统一转换至全局坐标系，最终形成完整飞机轮廓点云数据。该过程涉及光学基准组网、位姿跟踪测量设备、三维视觉测量设备、运载模块、总控模块、测量路径规划、局部点云数据采集、坐标转换、多位置点云全局统一与数据处理等多个环节。任何一个环节缺少统一要求，均可能导致测量流程不一致、点云数据表达不统一、测量结果难以比对、数据可追溯性不足和测量质量难以评价等问题。

目前，航空领域针对飞机轮廓视觉测量的系统组成、测量流程、数据处理、结果表达和不确定度评定尚缺少统一的国家计量技术规范，不同单位在实际应用中存在测量方法不统一、结果表达不一致、数据可追溯性不足等问题，难以满足飞机制造、试验、维修和检测中对轮廓测量结果准确性、一致性和可比性的需求。鉴于此，制定《飞机轮廓视觉测试技术规范》具有较强的现实需求和迫切性，可为航空企业、试验单位、维修保障单位、检测机构和计量技术机构规范开展飞机轮廓视觉测试提供统一技术依据，促进相关技术在航空领域的规范化应用，减少生产商与用户之间的技术争议，并推动相关测试活动与国际通行要求衔接。

同时，飞机轮廓视觉测试涉及空间坐标建立、点云数据获取、坐标转换和几何参数评价等多个环节，测试结果不仅需要满足工程应用需求，还应满足量值可追溯、结果一致性和测量不确定度评价要求。因此，有必要从计量角度建立统一的技术要求、测试流程和结果表达方法，为不同测试机构开展飞机轮廓视觉测试提供一致的技术依据。

1.4 起草过程

1.4.1 预研阶段

全国航空专用计量测试技术委员会（以下简称“委员会”）作为国家市场监督管理总局成立的专业技术委员会，承担着全国航空专用计量技术规范起草、审定任务。《飞机轮廓视觉测试技术规范》国家计量技术规范申报立项前，委员会秘书处组织专家对本规范进行了广泛的调研，经过调研，北京航空航天大学承担了本规范的牵头起草工作，并成立由北京航空航天大学、中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所、中国飞行试验研究院、思看科技（杭州）股份有限公司、沈阳飞机工业（集团）有限公司、北京航天计量测试技术研究所、成都飞机工业（集团）有限责任公司参加起草组成的规范起草组。规范起草组成员即时查阅国内外相关资料，在前期项目研究、文献资料分析和调研的基础上，规范起草组召开了多次会议，讨论并确定了开展规范起草工作的原则、程序、步骤和方法，起草形成文本初稿。

1.4.2 起草阶段

2025 年 5 月 31 日，国家计量技术规范制定计划下达。

2025 年 6 月 2 日，规范起草组通过线上+线下的形式召开了规范起草启动会。会上，牵头起草单位向与会专家介绍了规范的立项背景，并结合前期各单位申请加入规范起草组情况，介绍了规范起草工作组的暂定方案、规范制定原则和框架内容，确定了下一步工作计划。

2025 年 6 月至 7 月，起草组编写了规范草案，并将规范草案发送到规范起草组所有成员征求意见。根据意见对规范草案进行修订，形成了规范初稿。

2025 年 7 月 2 日至 4 日，起草组参加委员会组织的贵阳会议，围绕技术规范开展的专题讨论、专家论证、技术审查、征求意见处理及下一步工作计划等情况进行了汇报。

2025 年 7 月至 9 月，起草组对本规范的主要参考文件 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》、JJF 1951—2021《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》、GJB 8538—2015《单（多）目视觉测量系统标定与精度测试方法》和 GJB 8539—2015《结构光视觉测量系统标定与精度测试

方法》等进行了详细学习和研讨，对规范进行了结构性调整，增强了规范的实用性和可读性。

2025 年 10 月至 11 月，形成《飞机轮廓视觉测试技术规范》的初审稿，并提交委员会。

2025 年 12 月 18 日，委员会组织对初审稿进行会议审定。会上，起草组向委员会汇报了规范起草工作情况，听取了委员及专家的意见。会后，起草组按照专家意见进行了较大的内容调整，形成预审稿。

2026 年 3 月 12 日至 13 日，起草组邀请行业内专家及规范主要使用者召开研讨会，根据会议意见对规范预审稿进行再修订，形成征求意见稿。

2026 年 5 月 1 日至 7 月 12 日，通过网站公示、电子邮件、微信等方式，向飞机制造、试验、维修、检测、计量机构、视觉测量设备研制单位、高校和科研机构等进行了广泛而全面的意见征集工作。

2026 年 7 月 13 日，起草组针对征求意见情况进行讨论，并逐条给出处理意见，形成送审稿。

2026 年 7 月 23 日，全国航空专用计量测试技术委员会于 2026 年 7 月 21 日至 24 日在江西省景德镇市召开计量技术规范审定会，并于 7 月 23 日对《飞机轮廓视觉测试技术规范》进行审定。经审定，该技术规范编写格式符合国家计量技术规范编写要求，提交的各项资料齐全完整，符合技术规范审定要求，同时专家组对规范文本提出了进一步修改意见。

2026 年 7 月 24 日至 2026 年 8 月 28 日，根据评审意见进行修改，并提交委员会。

2 编制原则、主要内容及其确定依据

2.1 编制原则

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》和 JJF 1951—2021《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》共同构成本规范编制的基础性系列规范；GJB 8538—2015《单（多）目视觉测量系统标定与精度测试方法》和 GJB 8539—2015《结构光视觉测量系统标定与精度测试方法》为视觉测量系统参

数标定和精度测试提供专项技术依据。在规范编制过程中，重点遵循以下原则：

- 1) 一致性原则：对编制过程中涉及的国内外计量技术规范 and 标准文件进行分析研究，保持术语、结构、量值溯源和测量不确定度要求与现行国家计量技术规范协调一致；
- 2) 科学性原则：以飞机轮廓视觉测量原理、工程应用经验、相关标准和试验验证为技术支撑，保证技术内容科学、准确；
- 3) 可操作性原则：结合飞机制造、试验、维修和检测现场实际，明确测试任务、系统配置、测试条件、测量流程、质量控制、数据处理和结果表达，对关键环节设置可核查条件及异常处置要求，使条款可执行、可检查、可记录、可复核；
- 4) 简易性原则：规范内容和技术表述简洁易懂，且在实际应用中无歧义。

2.2 规范主要内容及其确定依据

2.2.1 适用范围

本规范适用于采用飞机轮廓视觉测试系统，对飞机机身、机翼、发动机短舱和尾翼等外部轮廓开展点云数据采集、处理和测量的测试活动。

该范围明确了规范的适用对象、系统形式和测试活动边界。坐标转换、多位置点云全局统一、质量检查和结果表达属于实现上述测试活动的具体技术过程，在后续章节中分别规定，不在范围中重复展开。

本规范主要针对飞机外部轮廓几何信息测试，不涉及飞机内部结构、材料性能以及非几何特性的测试。

2.2.2 引用文件

本规范引用了下列文件，相关内容通过规范性引用构成本规范必不可少的条款：

- 1) JJF 1071—2010 《国家计量校准规范编写规则》
- 2) JJF 1001—2011 《通用计量术语及定义》
- 3) JJF 1059.1—2012 《测量不确定度评定与表示》
- 4) JJF 1951—2021 《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》

5) GJB 8538—2015《单（多）目视觉测量系统标定与精度测试方法》

6) GJB 8539—2015《结构光视觉测量系统标定与精度测试方法》；

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改单）适用于本规范。

2.2.3 术语和定义

本规范术语和定义主要包括：位姿跟踪测量设备、三维视觉测量设备、参数标定、编码标志点、测量路径、光学基准组网等。

术语和定义的来源及解析如下：

1、位姿跟踪测量设备 pose tracking measurement equipment

参考来源：① GJB 8538—2015《单（多）目视觉测量系统标定与精度测试方法》中涉及利用单目或多目视觉系统实现空间目标位置和姿态参数测量的相关技术；

② 飞机大范围视觉测量中，三维视觉测量设备需在多个空间位置进行局部点云采集，不同测量位置之间需要通过位置和姿态参数建立统一的空间坐标关系。

本规范中的位姿跟踪测量设备主要用于测量三维视觉测量设备相对于全局参考坐标系的位置和姿态，其输出的位姿参数作为局部点云坐标转换和全局统一表达的重要输入。该设备与直接获取飞机表面三维点云的三维视觉测量设备在系统中承担不同功能。

本规范：基于设备采集的图像中的可识别标志特征，对设备相对于参考坐标系的位置和姿态进行跟踪测量，并持续输出相应位姿参数的视觉测量设备。

2、三维视觉测量设备 three-dimensional vision measurement equipment

参考来源：① JJF 1951—2021《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》中规定了基于结构光扫描获取被测对象表面三维几何信息的光学三维测量系统；

② GJB 8538—2015《单（多）目视觉测量系统标定与精度测试方法》中涉及单目、多目视觉测量系统的参数标定和精度测试方法；

③ GJB 8539—2015《结构光视觉测量系统标定与精度测试方法》中规定了结构光视觉测量系统的相关参数标定和精度测试方法。

考虑飞机轮廓视觉测试可采用双目视觉、结构光、线结构光以及其他满足测试要求的三维视觉技术，本规范不限定具体传感器结构和技术实现方式，而从其测量功能和输出数据形式进行统一界定。双目线结构光等仅作为典型三维视觉测量技术路线，不构成对设备形式的限制。

本规范：利用光学成像方式获取被测对象表面几何信息，并经图像处理和三维重建输出被测对象表面点云数据的非接触式视觉测量设备。

3、参数标定 parameter calibration

参考来源：① GJB 8538—2015《单（多）目视觉测量系统标定与精度测试方法》中涉及视觉测量系统相机参数、成像模型及相关几何参数的确定；

② GJB 8539—2015《结构光视觉测量系统标定与精度测试方法》中涉及结构光视觉测量系统内部参数及系统几何关系的标定；

③ JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》中对“校准”具有明确的计量学含义。

原规范采用“标定”术语。根据专家审定意见，为避免与 JJF 1001—2011 规定的计量学“校准”概念发生混淆，将本规范中用于确定相机成像模型参数、镜头畸变参数、设备之间相对位置姿态以及坐标转换关系等数学参数的过程统一称为“参数标定”。参数标定用于建立视觉测量、三维重建、位姿解算和坐标转换所需的数学模型和几何关系，不替代测量设备计量性能的校准和量值溯源。

本规范：在规定条件下，利用几何参数已知的标定物或标志点，确定三维视觉测量设备的成像模型参数、镜头畸变参数以及三维视觉测量设备相对于位姿跟踪测量设备坐标系的位置和姿态参数，并建立测量系统坐标转换关系的过程。

4、编码标志点 coded target

参考来源：① GJB 8538—2015《单（多）目视觉测量系统标定与精度测试方法》中涉及视觉测量系统采用特征目标进行识别、定位及参数确定的相关方法；

② 大范围视觉测量中通常采用具有确定几何特征和唯一或可区分编码信息的人工标志建立空间对应关系，并用于视觉定位、参数标定和坐标转换。

本规范中的编码标志点主要作为光学基准组网和位姿跟踪测量的信息载体。考虑不同视觉测量系统所采用的编码形式、图案、尺寸和制造方式存在差异，本规范仅从可识别性、几何属性及使用功能方面进行定义，不限定具体编码形式和

产品实现；结合当前工程应用，列举环形编码标志点和点分布型编码标志点两类典型形式，以便后续组网布置和参数要求统一表述。

本规范：具有特定编码图案和明确几何属性，可由视觉测量设备重复识别并用于匹配、定位、参数标定或坐标转换的标志点。按编码方式主要可分为环形编码标志点和点分布型编码标志点两类：环形编码标志点由中心定位圆点及外围环形编码带构成，点分布型编码标志点由多个圆点按特定几何排列构成。

5、测量路径 measurement path

参考来源：飞机整机及大部段轮廓具有尺寸大、结构复杂、测量区域广和局部遮挡明显等特点，单一测量位置通常难以完成规定区域的全部点云数据采集，需要由运载模块携带视觉测量模块在多个空间位置和姿态下依次完成数据获取。

测量路径除包括视觉测量设备在空间中的运动位置外，还包括各测量位置对应的姿态及其先后连接关系。实际测量路径需要综合考虑飞机结构、测量区域、视觉测量设备视场、工作距离、遮挡关系、光学基准组网可见性以及现场安全距离等因素，是测试方案和正式测量程序中的重要组成部分。

本规范：测量设备或传感器为完成规定区域数据采集，按预定顺序经过的空间位置、姿态及其连接关系。

6、光学基准组网 optical reference network

参考来源：① GJB 8538—2015《单（多）目视觉测量系统标定与精度测试方法》中涉及视觉测量过程中基于空间特征目标进行定位和坐标关系确定的相关技术；

② 飞机整机及大部段视觉测量需要在大范围空间内建立稳定的统一坐标参考，使视觉测量模块在不同测量位置获得的位姿参数和局部点云能够转换至同一全局坐标系。

本规范采用编码标志点构成光学基准组网，为位姿跟踪测量和局部点云全局统一提供空间参考。考虑不同飞机型号、测量空间、设备视场和测量能力存在差异，本规范不限定具体标志数量、组网形状和产品形式，而从空间稳定性、可识别匹配性以及建立或维持全局坐标系的功能进行规定。具体组网覆盖、标志可见性、空间分布、稳定性、冗余性和坐标一致性等要求在测量系统相关条款中进一步规定。

本规范：由空间分布稳定、成像清晰且可识别匹配的编码标志点构成，用于建立或维持飞机轮廓视觉测量全局坐标系的空间基准。

综上，本规范术语和定义主要围绕飞机轮廓视觉测试的系统组成、空间基准建立、参数关系确定、位姿获取、三维数据采集及多位置测量等关键环节设置。按照专家审定意见，对已有标准具有明确含义且在本规范中无特殊含义的通用术语不再重复定义，重点保留飞机轮廓视觉测试过程中需要统一理解和使用的专用术语。

对于已有 JJF、GB、GJB 等标准中已有明确含义且在本规范中无特殊含义的通用计量术语，本规范直接采用相关标准定义，不再重复规定；对于涉及系统组成、空间基准建立、坐标转换和多位置测量过程的专用术语，则结合飞机轮廓视觉测试应用特点进行定义，以保证规范实施过程中的统一理解。

2.2.4 正文部分

本规范正文按照“概述-技术要求-测试条件-测量系统、测量标准及辅助设备-测量程序-测量报告”的逻辑组织，主要内容及其确定依据如下：

1) 4 概述：从用途、结构和工作原理三个方面说明飞机轮廓视觉测试。结构部分说明机身、机翼、发动机短舱和尾翼等典型外部轮廓组成，具体测试区域和项目由测试任务及适用技术文件确定。工作原理采用“局部点云采集与全局坐标统一表达”的总体思路，通过光学基准组网建立全局坐标系，由位姿跟踪测量设备获取三维视觉测量设备的空间位姿，将多位置采集的局部点云转换至全局坐标系，经数据处理形成完整飞机轮廓点云，并据此计算外形尺寸及轮廓与形面偏差等几何测量结果。

2) 5 技术要求：根据飞机外轮廓测试任务，将测试项目划分为外形尺寸测试和轮廓与形面偏差测试两类，可单独实施或组合实施。外形尺寸测试主要覆盖整机总体包络、规定站位截面及局部外轮廓的长度、宽度、高度、跨度、截面尺寸和特征间距等；轮廓与形面偏差测试用于评价实测外轮廓相对于设计理论外形或参考模型的二维轮廓偏差和三维形面偏差。考虑不同飞机型号、技术状态和应用场景差异较大，本规范规定测试项目分类、测试程序、数据处理和结果表达的一般要求，不统一规定具体型号飞机或部件的技术指标限值；标称值、允许偏差及合格判定要求由设计文件、工艺文件、维修文件或合同文件确定。

3) 6 测试条件：从环境条件、被测对象状态以及测量设备和软件状态三个方面提出要求。环境条件重点规定温度、相对湿度、照度、振动、气流、大气压力以及电磁和供电条件，并给出相应的常规控制、核查和记录要求；被测对象应保持任务规定的技术状态，表面条件应满足成像和点云采集要求；测量设备和软件应满足测试任务要求且校准状态有效。相关要求按照可执行、可检查、可记录的原则设置，对可能影响测量结果的环境因素应采取控制或修正措施，影响不可忽略时纳入测量不确定度评定。为兼顾不同设备的适用范围，照度等与设备工作能力密切相关的条件优先按设备允许范围控制，设备无明确规定时给出常规参考范围；正式测试前应逐项核查，超限后先采取措施并重新核查，无法满足时停止测试或按适用技术文件进行影响评估。设备和软件状态还应确认预热、自检、连接稳定、时间同步、软件版本受控以及数据存储空间和备份条件。

4) 7 测量系统、测量标准及辅助设备：明确飞机轮廓视觉测量系统以视觉测量设备为核心，由光学基准组网、视觉测量模块、运载模块和总控模块组成，其中视觉测量模块包括位姿跟踪测量设备和三维视觉测量设备。规范同时明确三维视觉测量设备相机坐标系、位姿跟踪测量设备局部坐标系和全局坐标系三类坐标系及其关系，并按照“先硬件后软件、先基准后测量”的顺序完成系统配置。针对各模块分别规定组成、核心功能和技术要求；测量系统性能指标至少包括尺寸测量误差与重复性、曲面配准偏差、点云间距与必测区域覆盖率，并结合扫描速率与效率、单站测量范围和全局坐标系建立精度等指标评价系统能力。测量标准及辅助设备根据测试项目、系统性能检查和测量不确定度要求选择，主要包括几何标准器、设计数据及参考模型以及数据处理设备和软件。相关要求采用功能性和设备中立的表述，不限定具体设备品牌、结构形式和技术路线，以保证规范的适用性和技术兼容性。

5) 8 测量程序：按照“测试准备→建立全局坐标系→参数标定→测量路径规划→现场数据采集→测量过程质量控制与补测→点云数据处理→测量结果计算”的顺序组织。测试准备阶段确认任务要求并完成设备、被测对象和环境条件检查；通过光学基准组网建立并验证全局坐标系，确认相机成像参数和设备间相对位姿等标定参数有效；测量路径依据测试区域、设备性能、工作距离、遮挡、组网可见性和安全要求规划，并保证必要的站位及点云重叠。现场采集过程中同步获取

位姿参数、原始图像和局部点云，并在离场前完成组网状态、区域覆盖、数据对应关系、点云质量和系统性能等检查，对缺失或异常区域按规则补测。点云数据处理依次进行数据校验、坐标转换、必要的滤波去噪和离群点处理，并在处理结果检查合格后开展轮廓尺寸计算以及轮廓与形面偏差表征。为提高现场可操作性，第8章进一步规定各环节按照“执行-检查-记录-通过后进入下一环节”的闭环方式实施，并细化全局坐标系验证、相对位姿标定与试采集、路径演练、采集实时质量检查、异常处置与恢复、数据完整性校验与备份、补测及复核等操作要求。

6) 9 测量报告：按照清晰、完整、准确和可追溯的原则规定测量报告内容和质量要求。报告应包括测量对象及技术状态、测试依据、环境条件、测量系统及溯源信息、测量方法和坐标系、测试区域和路径、点云采集与处理参数、轮廓尺寸和轮廓与形面偏差结果、系统性能与数据质量、测量不确定度以及签署和声明等信息。测量结果应给出相应单位和必要的不确定度信息，偏差结果应注明参考对象和对齐基准，点云统计应给出点数、平均间距和覆盖率，重复性结果应给出标准偏差和测量次数；报告形成后还应从完整性、准确性、一致性、可追溯性、规范性和清晰度等方面进行质量检查。

7) 图表关系：图2用于说明飞机轮廓视觉测试的总体工作原理；图3～图10分别用于说明测量系统组成、位姿跟踪测量设备和三维视觉测量设备典型结构、三类坐标系关系、各模块组成及系统功能逻辑；表2给出测试条件及其核查、记录要求，表6和表7分别给出测量系统性能指标及常用测量标准和辅助设备，表8按照实际测试顺序给出总体测量程序，表9～表12分别用于测试前设备检查、编码标志点组网布置、现场数据采集参数和离场前质量检查。上述图表分别从工作原理、系统构成、坐标关系、测试条件、性能要求和操作流程等层面支撑正文条款的理解和实施。

本规范中涉及的环境控制、组网布置、全局坐标系建立与验证、参数标定、站位与采集位姿重叠、点云间距及质量控制等量化要求，综合参考相关计量技术规范 and 视觉测量标准、设备技术性能、工程应用经验及适用性验证情况确定。对于与具体设备性能密切相关的参数，优先采用设备允许或经校准、验证的有效工作范围；对于不同设备和测试任务差异较大的指标，采用任务允许误差比例分配或给出推荐参考值，以兼顾测量可靠性、技术兼容性和现场可实施性。

4 概述、5 技术要求、6 测试条件、7 测量系统、测量标准及辅助设备、8 测量程序和9 测量报告之间形成由“对象与任务-条件与资源-实施过程-结果输出”的完整逻辑链。技术要求明确测试项目及结果类型；测试条件为测量有效实施提供环境、对象和设备状态基础；测量系统、测量标准及辅助设备规定系统组成、功能、性能和相关资源要求；测量程序规定从测试准备、坐标系建立、参数标定、路径规划、数据采集、质量控制与补测、点云处理到结果计算的完整操作流程；测量报告对最终结果、数据质量、测量不确定度和可追溯信息进行统一表达。

附录部分用于补充说明坐标转换和测量不确定度评价。附录A给出方向余弦矩阵、位置矢量和齐次变换矩阵等坐标变换基础；附录B依据JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》的要求，结合点云坐标转换模型，分析三维坐标、旋转参数和平移参数等输入量对全局坐标系下点云坐标结果的影响，给出标准不确定度、灵敏系数、合成标准不确定度和扩展不确定度等评定方法，为飞机轮廓视觉测试结果的量值评价和可靠性分析提供依据。

2.2.5 附录部分

本规范附录部分主要用于支撑坐标转换关系的理解及点云坐标转换不确定度评价。附录 A 给出方向余弦矩阵、位置矢量和齐次变换矩阵等坐标转换基础；附录 B 围绕测量方法、测量设备、测量模型、不确定度来源及评定过程，给出点云坐标转换不确定度评定示例。该示例用于说明评定方法，不作为所有测试任务的固定计算结果。实际测试时，应根据测量系统配置、被测对象特征、测试环境和数据处理方法重新建立测量模型，并依据 JJF 1059.1—2012 要求开展测量不确定度评定。附录 B 主要说明点云坐标转换环节的不确定度传播方法，不替代对外形尺寸、轮廓与形面偏差等最终测量结果的完整不确定度评定；最终结果还应综合考虑点云采样间距、特征提取方法、数据处理算法及环境条件等因素的影响。

具体不确定度内容及确定依据如下：

1) 测量方法：依据本规范第 8 章测量程序开展点云数据获取与处理，并按照 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》的要求，对测试结果的不确定度进行分析和评价。附录中的方法用于说明不确定度评定过程，不作为所有测试任务的固定计算形式。

2) 测量设备及其技术性能：结合飞机轮廓视觉测试系统组成，明确与点云数据测量直接相关的三维视觉测量设备和位姿跟踪测量设备，并依据校准证书、技术文件或性能测试结果确定相关性能参数，为测量模型建立和不确定度评定提供输入依据。

3) 测量模型及其输入量与输出量：根据飞机轮廓视觉测试的坐标转换原理，建立局部点云坐标向全局坐标转换的测量模型，明确三维坐标、旋转参数和平移参数等输入量，以及全局坐标系下点云三维坐标等输出量。对于标定获得的相对位姿参数，在其稳定性满足要求且其不确定度相对于其他主要不确定度分量可忽略时，可作为常量处理；否则应作为输入量纳入不确定度评定，并给出相应依据。

4) 不确定度来源：结合点云坐标转换模型，分析影响测量结果的主要不确定度来源，包括三维坐标测量误差、旋转参数误差和平移参数误差等，并说明其对最终点云坐标结果的影响。

5) 输入量的标准不确定度：分别给出三维坐标、旋转参数和平移参数等输入量标准不确定度的评定方法，综合考虑设备性能、重复测量、环境条件以及相关技术文件提供的信息确定标准不确定度。

6) 灵敏系数：根据测量模型，计算输出量相对于各输入量的灵敏系数，用于分析不同输入量对点云坐标结果的影响程度；

7) 输出量的不确定度分量：根据各输入量标准不确定度和灵敏系数计算各不确定度分量，进一步获得合成标准不确定度和扩展不确定度，形成点云数据测量结果的不确定度评价方法；

8) 合成标准不确定度：给出输入量互不相关时输出量合成标准不确定度的计算方法；输入量之间存在显著相关性时，应计及协方差项；

9) 扩展不确定度：给出扩展不确定度的计算方法；本示例取包含因子 $k = 2$ ，采用其他包含因子时应说明其确定方法；

10) 点云数据估计值及其测量不确定度：结合表 B.4～表 B.8 给出的参数测量值、输出量估计值、输入量标准不确定度、灵敏系数和输出量不确定度分量，依次计算点云数据中单个三维点的估计值、合成标准不确定度和扩展不确定度，并给出最终测量结果表达；本示例中 $k = 2$ 对应近似 95 % 的包含概率。报告测量结果时，扩展不确定度 U 一般保留一位或两位有效数字，被测量估计值应修约

至与 U 的末位一致；采用基于有效自由度确定的包含因子时，还应给出包含概率和有效自由度。

2.3 与其他规范、标准相比，差异及其原因

现有文件主要针对视觉测量设备或结构光三维测量系统的参数标定、校准和精度测试，尚不能完整覆盖飞机整机或大部段轮廓视觉测试的任务组织、系统协同、多位置点云全局统一、测量路径、数据处理和结果表达。本规范与现有相关技术规范的主要差异见表1。

表1 与现有计量技术规范的对比分析

序号	名称	与本测试规范的对比分析
1	JJF 1951—2021《基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范》	主要规定结构光扫描类光学三维测量系统的校准项目、校准条件、校准方法和校准结果表达，重点评价单套三维测量设备的计量性能。本规范面向飞机轮廓实际测试活动，在利用相关校准结果的基础上，进一步规定大范围测量系统组成、光学基准组网、位姿跟踪、多位置局部点云采集、多位置点云全局统一、测量路径、数据质量控制和测试结果表达。
2	GJB 8538—2015《单（多）目视觉测量系统标定与精度测试方法》	主要针对单目或多目视觉测量系统的成像参数、几何关系、参数标定和精度测试方法，解决视觉测量设备自身参数和精度评价问题。本规范不重复规定具体设备的标定试验方法，而是规定经参数标定的位姿跟踪测量设备和三维视觉测量设备如何协同完成飞机轮廓测试。
3	GJB 8539—2015《结构光视觉测量系统标定与精度测试方法》	主要针对结构光视觉测量系统的参数标定和精度测试，侧重设备级技术性能。本规范将结构光三维视觉测量作为可采用的技术路线之一，采用设备中立的规定方式，重点解决飞机整机或大部段测量中的系统边界、组网适用性、移动测量、点云坐标转换与全局统一、数据处理、轮廓尺寸测量、轮廓与形面偏差结果表征及可追溯报告等问题。

3 试验验证分析，预期的经济效益、社会效益

3.1 试验验证的分析

按照技术规范规定的总体原理和测量流程开展适用性验证，对飞机机身、机翼、发动机短舱和尾翼等典型外部轮廓区域进行视觉测试，获取多个测量位置的局部点云数据及对应位姿参数，通过坐标转换将局部点云统一至全局坐标系，形成完整飞机轮廓点云数据，并对测量系统组成、测试条件、测量流程、数据处理、结果表达和测量不确定度评定方法的可操作性进行综合评价。

验证对象以典型飞机结构区域为主，根据实际验证条件，可结合大尺寸自由曲面等效对象开展补充验证，用于评价规范方法对不同测量范围、结构形式和测试场景的适用性。

验证工作主要包括：

1) 搭建飞机轮廓视觉测量系统，对光学基准组网、视觉测量模块、运载模块、总控模块及数据处理设备和软件的状态进行检查，确认系统满足测试任务要求；

2) 依据飞机型号、测量区域和适用技术文件编制测试方案，明确测量对象、技术指标、测量基准、全局坐标系、设计数据或参考模型、环境条件、测量路径、覆盖要求、数据格式及结果表达方式；在待测飞机周围布置光学基准组网，完成必要的参数标定和坐标关系确认；

3) 根据飞机结构、设备视场、工作距离、遮挡情况、组网可见性和安全要求规划测量路径，正式采集前进行路径演练或低速试运行，核查设备视场、编码标志点可见性、机械臂可达性、碰撞风险和安全间隙；确认通过后，控制运载模块携带视觉测量模块移动至规定位置，同步采集局部飞机轮廓点云数据和对对应位姿参数；

4) 根据参数标定结果和位姿参数将局部点云转换至全局坐标系并完成多位置数据统一；采集过程中检查标志点识别与位姿解算、图像质量、点云间距与完整性及相邻位姿重叠情况，离场前检查组网状态、区域覆盖、数据对应关系和全局点云质量；发现测量区域缺失或数据质量不满足要求时，按补测规则进行补充测量并复核，无法补测时记录原因及其对结果的影响；

5) 对满足要求的点云数据按规定实施采样、滤波、离群点剔除和必要的网格数据生成,记录处理条件、参数和数据版本;分别开展轮廓尺寸计算以及轮廓、形面偏差结果表征,并给出测量系统性能与数据质量信息;需要进行符合性判定时,依据设计、工艺、维修或合同文件规定的技术要求说明判定依据和结论;

6) 根据测试任务评定并表达必要的测量不确定度,形成测量记录、测量报告和技术规范适用性验证报告,对系统组成、测量条件、操作流程、数据处理、质量控制和结果表达进行综合评价。

验证过程中还重点检查测试条件核查与超限处置、全局坐标系验证与参数标定、试采集与路径演练、现场实时质量检查、异常处置与恢复、补测复核以及数据完整性校验和备份等闭环要求,确认相关步骤能够按规范规定执行,并形成相应检查记录或输出结果。

验证结果表明,本规范采用的“局部点云采集-位姿跟踪-全局坐标统一-质量检查-点云处理-结果计算与表达”技术路线符合飞机大范围轮廓视觉测试的实际需求;对飞机轮廓视觉测量系统、光学基准组网、测试方案、路径规划、点云坐标转换与全局统一、数据处理、轮廓尺寸测量以及轮廓、形面偏差结果表征等规定具有可操作性。相关要求采用设备中立和任务驱动的表达,可根据飞机型号、测量范围和目标能力配置,具备行业应用基础。

3.2 预期的经济效益、社会效益

飞机外形轮廓直接关系到气动外形、装配状态、维修质量和运行安全,开展规范化的飞机轮廓视觉测试具有重要意义。

航空领域中飞机轮廓测试涉及飞机研制、生产、试验、维修和保障等多个环节。《飞机轮廓视觉测试技术规范》明确了飞机轮廓视觉测量系统边界、测量条件、测试方案和操作流程、光学基准组网及相关资源、轮廓尺寸测量、轮廓与形面偏差结果表征、点云数据处理、质量检查、测量不确定度和测量结果表达等内容,可指导航空企业、试验单位、维修保障单位、检测机构和计量技术机构规范开展飞机轮廓视觉测试。本规范有助于提高测试活动的科学性、一致性、可比性和可追溯性,降低因坐标基准、模型版本、测量路径和数据处理方法不一致引起的质量风险,提升测量效率和数字化质量控制能力,具有较好的经济效益和社会

效益。

4 与有关法律、行政法规及相关规范、标准的关系

本规范与我国的现行法律法规和国家计量技术规范、标准没有冲突。

5 重大分歧意见的处理经过和依据

无。

6 涉及专利的有关说明

本规范不涉及专利。

7 其他应当说明的事项

无。