|  |  |
| --- | --- |
| ICS  | 17.160 |
| CCS  |

|  |
| --- |
| D:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T.pngD:\000000部门项目\09标准化插件开发\程序源代码\StandardEditor_ShanDongKeXieYuan\团标首页面字母T后面的反斜杠.png XZBX |

J 04 |

西安市质量与标准化协会团体标准

T/XZBX 0085—2025

视觉振动测量多模态数据融合技术指引

Guideline for multimodal data fusion technology in visual vibration measurement

2025 - 09 - XX发布

2025 - 09 - XX实施

西安市质量与标准化协会  发布

目次

[前言 III](#_Toc206865096)

[引言 V](#_Toc206865097)

[1 范围 1](#_Toc206865098)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc206865099)

[3 术语和定义 1](#_Toc206865100)

[4 总体原则 2](#_Toc206865101)

[5 系统架构 3](#_Toc206865102)

[6 关键技术 4](#_Toc206865103)

[7 实验与应用规范 5](#_Toc206865104)

[8 质量评估 6](#_Toc206865105)

1. 前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由西安市质量与标准化协会提出并归口。

本文件起草单位：昆明理工大学机电工程学院。

本文件主要起草人：王 森。

1. 引言

随着结构健康监测、精密制造和复杂装备运行安全需求的提升，振动测量作为获取结构动力学信息和运行状态的重要手段，逐渐从单一的传感器测量发展为基于视觉和多模态数据融合的新型测量方式。传统加速度计、位移计等接触式传感器虽然具有较高精度，但在大尺度结构、复杂环境或不便布设传感器的场景中往往存在局限。近年来，非接触式的视觉振动测量技术迅速发展，能够通过高帧率相机、激光测振仪等设备实现对目标表面振动的远程捕捉与分析。

多模态数据融合技术则为视觉振动测量注入了新的活力。通过融合视觉、声学、惯性传感器、激光测振等多源数据，可以充分发挥不同测量手段的优势，实现更高的测量精度、更强的鲁棒性和更全面的结构状态认知。例如，在桥梁、航空航天器及大型机械设备的运行监测中，多模态融合技术能够有效提高微小振动的识别能力，并为安全评估与预测维护提供可靠依据。

然而，目前在视觉振动测量与多模态数据融合领域，仍存在测量精度标准不统一、数据融合方法多样但缺乏规范、应用场景需求差异较大等问题。因此，制定统一的技术指引十分必要。本文件旨在为科研机构、工程单位和设备制造商提供可操作性强的指导，明确视觉振动测量与多模态数据融合的基本原则、关键技术要求、实验与应用规范，推动该领域标准化发展，提升工程应用的科学性与可靠性。

视觉振动测量多模态数据融合技术指引

* 1. 范围

本文件规定了视觉振动测量多模态数据融合的总体原则、系统架构、关键技术、实验与应用规范及质量评估等内容。

本文件适用于科研机构、工程单位和设备制造商在进行视觉振动测量及其多模态数据融合研究、系统设计、工程应用和结果分析时的参考。

本文件不适用于单一模态的振动测量技术，也不涵盖单纯图像处理与模式识别中的通用算法研究。

* 1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 22239—2019 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求

GB/T 25631—2010 机械振动 手持式和手导式机械 振动评价规则

GB/T 31101—2023 信息技术 实时定位系统性能测试方法

GB/T 30269.801—2017 信息技术 传感器网络 第801部分：测试：通用要求

GB/T 41095—2021 机械振动 选择适当的机器振动标准的方法

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

视觉振动测量 visual vibration measurement

利用高速相机、视频处理算法等视觉手段，对目标表面的位移或振动信号进行非接触测量与分析的技术。

多模态数据 multi-modal data

来源于不同类型传感器或测量方式的数据集合，如视觉信号、加速度信号、声学信号和激光测振数据等。

数据融合 data fusion

通过一定的算法和模型，将多源异构数据进行综合处理，形成更完整、更准确或更具鲁棒性的测量结果的过程。

特征提取 feature extraction

从原始数据中提取能代表目标振动状态的关键参数或模式的过程，如频率、幅值、相位和模态形态等。

鲁棒性 robustness

系统或算法在存在噪声、数据缺失或外部干扰情况下，依然能够保持稳定性能和可靠性的能力。

* 1. 总体原则
		1. 科学性原则

视觉振动测量与多模态数据融合应以科学实验和工程实践为基础，确保方法论和技术路径具有理论依据和实验验证，避免依赖经验性操作。

* + 1. 系统性原则

整个系统建设应覆盖数据采集、处理、融合、分析和应用的完整流程。各环节之间应相互衔接，保证系统运行的整体性和协调性。

* + 1. 精确性原则

在数据采集与处理过程中，应优先保证测量精度和时空同步性。对于关键指标如频率、振幅和相位，应设定明确的精度要求，减少误差累积。

* + 1. 鲁棒性原则

系统应具备抗干扰能力和适应性，在复杂环境或存在噪声情况下，依然能够输出可靠的测量结果，保证在不同应用场景下的稳定性。

* + 1. 可扩展性原则

技术体系应具有良好的兼容性和扩展性，支持不同类型传感器接入以及多模态数据的灵活融合，以满足未来技术升级和新应用需求。

* + 1. 安全性原则

在多模态数据的采集、传输和存储过程中，应重视数据安全与隐私保护，采取加密、访问控制等措施，防止数据丢失、泄露或被篡改。

* + 1. 应用导向原则

技术应用应以工程需求为导向，强调可操作性和可落地性，确保成果能在桥梁监测、机械设备检测、航空航天结构测试等实际场景中推广应用。

* 1. 系统架构
		1. 总体要求

视觉振动测量多模态数据融合系统应遵循分层设计和模块化集成的原则，确保不同来源、不同精度和不同格式的数据能够在统一框架内高效协同。系统架构不仅要适应实验室研究的需求，还应满足工程应用场景下实时性、稳定性和可扩展性的要求。系统设计仍需兼顾数据采集的多样性、传输的高效性、融合的精确性以及应用的可操作性。

* + 1. 系统分层

系统整体架构可分为感知层、传输层、融合层和应用层。每一层承担独立职能，又通过标准化接口实现高效衔接。

为了更直观地展现系统功能，不同层级的主要职责和技术要点见表1。

1. 系统架构分层功能表

| 层级 | 主要功能 | 技术要点 |
| --- | --- | --- |
| 感知层 | 多源数据采集（位移、速度、加速度等） | 高速相机、激光测振仪、加速度传感器、声学阵列 |
| 传输层 | 数据传输与预处理 | 光纤/5G 网络、边缘计算节点、数据压缩与加密技术 |
| 融合层 | 数据清洗、配准、特征提取与融合建模 | 多传感器融合算法、AI 建模、时频分析 |
| 应用层 | 结果展示与工程应用 | 三维可视化平台、健康监测系统、预测性维护 |

* + 1. 模块化设计

在分层的基础上，系统应进一步细化为多个功能模块：

1. 视觉采集模块：通过高帧率相机采集结构表面微小振动；
2. 信号采集模块：利用加速度计、激光测振仪采集高精度动力学响应；
3. 数据同步模块：实现多源数据的时空对齐与配准；
4. 特征融合模块：采用机器学习或深度学习方法融合多模态特征；
5. 应用输出模块：将结果通过可视化和报告形式反馈至用户。

模块化的优势在于系统可根据需求灵活组合，便于升级扩展与跨平台应用。

* + 1. 数据与接口标准

多模态融合的关键在于统一的数据标准与接口规范。应在系统建设中采用统一的时间戳、坐标基准和数据格式，实现不同设备厂商之间的互操作。接口协议需满足高频采样与大数据量传输需求，同时具备安全认证和访问控制机制，确保数据在共享和传输过程中不被篡改或泄露。

* + 1. 综合说明

通过分层架构与模块化设计，视觉振动测量多模态数据融合系统能够实现从“数据感知—安全传输—融合分析—应用输出”的完整闭环。这样的体系不仅提升了测量的精度和稳定性，还为未来新技术的引入（如边缘计算、人工智能预测建模）提供了开放接口，从而具备长期演进与适应工程应用的能力。

* 1. 关键技术
		1. 总体要求

关键技术要求是保障视觉振动测量和多模态数据融合顺利实施的核心。系统需在数据采集、同步配准、特征提取、融合算法及结果验证等环节达到相应的技术标准，确保结果的科学性、可靠性与可重复性。

* + 1. 数据采集技术

多模态数据采集应涵盖视觉信号、加速度信号、声学信号和激光测振信号等。采集设备需具备高灵敏度和高稳定性，以保证不同模态的数据在同一时间窗口内能够同步反映目标的真实振动特性。

为便于执行，常用数据采集技术及其适用场景见表2。

1. 常用数据采集技术分类

| 技术类型 | 主要设备 | 特点及优势 | 应用场景 |
| --- | --- | --- | --- |
| 视觉采集 | 高速相机、工业相机 | 非接触、覆盖范围大、可视化强 | 大型结构表面振动监测 |
| 惯性采集 | 加速度计、陀螺仪 | 高灵敏度、数据精度高 | 局部振动精密测量 |
| 激光测振 | 激光多普勒测振仪 | 高精度、适用于微小位移检测 | 航空航天及精密设备监测 |
| 声学采集 | 麦克风阵列 | 对异常声振敏感、适合多点协同检测 | 机械设备故障预警 |

这些技术需结合使用，通过合理部署传感器实现全方位、多尺度的数据获取。

* + 1. 数据同步与配准

在多模态融合中，数据同步与配准是核心环节。不同设备的数据在采样率、时间基准和空间坐标上存在差异，需要统一校准。若同步不当，将导致特征提取与融合计算偏差，影响最终结果可靠性。

* + 1. 特征提取与融合算法

在完成数据同步后，应利用特征提取和融合算法实现多模态信息的深度整合。特征提取侧重获取时域、频域和时频域的核心参数；融合算法则需结合统计建模与人工智能方法，提升识别精度与鲁棒性。

主要融合算法及其性能指标要求见表3。

1. 常用融合算法及性能指标

| 融合方法 | 技术特点 | 性能指标要求 | 适用场景 |
| --- | --- | --- | --- |
| 统计融合 | 基于加权平均、卡尔曼滤波 | 精度提升 ≥10%，延迟 ≤0.1 s | 常规工程振动监测 |
| 特征级融合 | 提取不同模态特征并综合建模 | 模态识别率 ≥95%，数据丢失容忍 5% | 多模态协同特征分析 |
| 决策级融合 | 独立判断后再综合决策 | 综合决策正确率 ≥97% | 多设备协同容错控制 |
| 深度学习 | 利用神经网络进行自动特征融合 | 融合精度提升 ≥15%，鲁棒性增强 | 大规模数据、复杂场景分析 |

* + 1. 结果验证与评估

结果验证是保证技术有效性的重要环节。应通过实验验证、对比分析和重复试验来评估测量与融合结果的准确性。必要时需与传统传感器测量结果进行交叉验证。

* + 1. 综合说明

关键技术要求构成了视觉振动测量与多模态数据融合体系的技术基础。从数据采集到特征融合，每一步都必须遵循科学的标准与指标要求。通过合理选择技术路径和算法，可以确保测量结果既具备高精度，也具备在复杂环境中的稳定性和鲁棒性。

* 1. 实验与应用规范
		1. 总体要求

实验与应用规范旨在确保视觉振动测量和多模态数据融合在实验室研究与工程实践中具备统一标准和可重复性。规范应涵盖实验环境布置、设备配置、数据采集流程以及应用场景适配，保证结果真实可靠并具备推广性。

* + 1. 实验环境布置

实验环境应尽量减少外界干扰，包括光照变化、环境振动和电磁噪声等。实验场地需配备稳定支撑平台、恒定照明系统和隔振装置，以保障视觉与非接触测量的精度。

* + 1. 设备配置

设备配置需根据实验目标和应用需求进行组合。视觉测量设备、加速度传感器、激光测振仪、声学采集设备等应合理布局，确保测量对象表面可视性良好，且多模态传感器之间具备空间与时间的协调性。

为了便于实验设计与应用部署，常见实验与应用设备配置模式见表4。

1. 常见实验与应用设备配置模式

| 配置模式 | 主要设备组合 | 应用场景 |
| --- | --- | --- |
| 视觉主导型 | 高速相机 + 视频处理单元 | 大型结构表面振动检测 |
| 混合传感型 | 高速相机 + 加速度计 + 激光测振仪 | 桥梁、航空航天结构动力学分析 |
| 声学补充型 | 高速相机 + 麦克风阵列 | 机械设备运行异常检测 |
| 全模态协同型 | 相机 + 加速度计 + 激光测振 + 声学阵列 | 多源复杂场景下的综合状态监测 |

* + 1. 数据采集与处理流程

数据采集应严格按照同步与配准要求执行，确保不同模态数据在时间和空间上对齐。采集到的数据需经过预处理，再进入融合分析环节。

* + 1. 工程应用规范

在实际工程中，应结合具体场景制定应用规范：

1. 桥梁监测：重点监控低频振动和模态参数，及时预警潜在结构风险；
2. 机械设备检测：重点关注高频微振动，用于早期故障诊断；
3. 航空航天应用：要求极高的测量精度和鲁棒性，用于关键部件运行监测。

为了统一应用效果，不同场景下的应用重点和管理要求见表5。

1. 工程应用场景与规范要点

| 应用场景 | 重点监测内容 | 管理要求 |
| --- | --- | --- |
| 桥梁监测 | 振型、频率变化、位移响应 | 实时监测，预警响应时间 ≤ 10 s |
| 机械检测 | 高频微振动、异常噪声 | 定期检测，精度误差 ≤ 5% |
| 航空航天 | 关键部件振动模态参数 | 高精度监测，鲁棒性优先 |
| 建筑结构 | 长周期振动、风致响应 | 连续监测，数据记录可追溯 |

* + 1. 综合说明

实验与应用规范为视觉振动测量和多模态数据融合提供了标准化的操作框架。从实验环境到设备配置，再到数据处理与应用落地，每一步均需严格遵循规范要求，确保研究成果具有工程推广价值和长期应用可靠性。

* 1. 质量评估
		1. 总体要求

质量评估是保证视觉振动测量和多模态数据融合结果科学性与可靠性的关键环节。通过建立系统化的评估体系，可以在实验和工程应用中对测量结果进行验证，并推动方法和流程的持续改进。

* + 1. 数据质量评估

数据质量是后续融合与分析的基础。应从完整性、准确性和一致性三个方面进行检查，确保采集的数据真实有效。

为便于操作，数据质量评估的主要内容见表6。

1. 数据质量评估要点

| 评估维度 | 主要指标 | 管理要求 |
| --- | --- | --- |
| 精度提升 | 融合结果与基准值差异 | 融合后精度较单一模态提升 ≥10% |
| 鲁棒性 | 抗噪能力、数据缺失容忍度 | 信号噪声比提升 ≥15%，容忍缺失 ≤5% |

表6 数据质量评估要点（续）

| 评估维度 | 主要指标 | 管理要求 |
| --- | --- | --- |
| 实时性 | 数据处理与输出延迟 | 延迟 ≤ 0.5 s |

* + 1. 系统综合评估

系统的综合评估不仅应包括数据与融合效果，还需覆盖整体架构的稳定性、应用适应性和长期可靠性。可通过长期运行测试和跨场景验证，全面评价系统的工程适用性。

* + 1. 综合说明

质量评估是保障研究成果和工程应用效果的核心手段。通过对数据质量、融合效果和系统稳定性的系统化评估，可以实现结果的科学验证和持续优化，确保视觉振动测量与多模态数据融合在实际应用中长期可靠。

