

广西壮族自治区工程建设地方标准

DB

DBJ/T45-xxx-2025

备案号：Jxxxxx-2025

工程结构数字图像法位移测量技术规程

Technical Specification for Displacement Measurement of Engineering

Structures Using Digital Image Processing

(征求意见稿)

2026年xx月xx发布

2026年xx月xx实施

广西壮族自治区住房和城乡建设厅发布

前　　言

根据广西壮族自治区住房和城乡建设厅《自治区住房和城乡建设厅关于下达 2024 年度第二批全区工程建设地方标准制（修）订项目计划的通知》（桂建标[2024] 4 号）的要求，规程编制组经广泛调查研究，结合广西区内工程结构位移测量的需求及特点，认真总结了数字图像法位移测量技术的工程实践经验，参考国家、行业现行有关标准，并在广泛征求意见的基础上，制订了本规程。

本规程共分为 8 章，主要技术内容包括：总则、术语、基本规定、测量流程、测量设备、静态位移测量、动态位移测量、测量报告。

本标准由广西壮族自治区住房和城乡建设厅提出并归口管理，由广西机场管理集团有限责任公司负责具体技术内容的解释。本标准部分技术内容可能涉及专利，使用前需进行专利评估。本标准执行过程中，如有意见和建议，请反馈给广西机场管理集团有限责任公司（地址：南宁市江南区吴圩镇南宁吴圩国际机场 T2 航站区航信二期办公楼 A 座，邮编：530048，联系电话：0771-2885792，E-mail：315978014@qq.com），以供修订时参考。

本标准主编单位：广西机场管理集团有限责任公司
广西大学
中铁十四局集团第三工程有限公司

本标准参编单位：中国建筑第八工程局有限公司
中国建筑第二工程局有限公司

本标准主要起草人员：

本标准主要审查人员：

目 次

1 总则	1
2 术语	2
3 基本规定	4
3.1 应用场景	4
3.2 现场要求	5
3.3 数据管理	6
4 测量流程	7
5 测量设备	9
5.1 一般规定	9
5.2 成像设备	9
5.3 镜头	11
5.4 边缘计算模块	12
5.5 靶标	13
5.6 照明系统	14
5.7 供电系统	14
5.8 数据采集、处理与传输系统	15
5.9 仪器校验	16
6 静态位移测量	19
6.1 一般规定	19
6.2 设备安装与防护	19
6.3 静位移解算	20
7 动态位移测量	23
7.1 一般规定	23
7.2 动位移解算	23
8 测量报告	24
附录 A：数字图像相关法位移测量原理	25
A.1 尺度因子	25

A.2 整像素原理	25
A.3 亚像素原理	27
附录 B: 工程结构位移测量记录表	30
用词说明	31
引用标准名录	32
附: 条文说明	33

Contents

1	General Principles	1
2	Terminology	2
3	Basic Provisions	4
3.1	Application Scenarios	4
3.2	On-site Requirements	5
3.3	Data Management	6
4	Measurement Procedures	7
5	Measurement Equipment	9
5.1	General Provisions	9
5.2	Imaging Devices	9
5.3	Lens	11
5.4	Edge Computing Module	12
5.5	Targets	13
5.6	Lighting System	14
5.7	Power System	14
5.8	Data Collection, Processing, and Transmission System	15
5.9	Instrument Calibration	16
6	Static Displacement Measurement	19
6.1	General Provisions	19
6.2	Equipment Installation and Protection	19
6.3	Static Displacement Calculation	20
7	Dynamic Displacement Measurement	23
7.1	General Provisions	23
7.2	Dynamic Displacement Calculation	23
8	Measurement Report	24
	Appendix A: Principle of Digital Image Correlation Method for Displacement Measurement	25
A.1	Scale Factor	25

A.2 Principles for Whole pixel.....	25
A.3 Principles for Sub-pixel.....	27
Appendix B: Displacement Measurement Record Table for Engineering Structures	30
Vocabulary Explanation	31
List of Referenced Standards	32
Appendix: Explanation of Provisions	33

1 总则

1.0.1 为规范和指导工程结构数字图像法位移测量技术的应用，提高结构非接触位移测量的便利性和精确性，做到技术先进、数据可靠、安全使用、经济合理，制定本规程。

1.0.2 本文件规定了工程结构中利用数字图像法测量位移的基本规定、测量流程、测量设备、静态位移测量、动态位移测量及测量报告。

1.0.3 本文件适用于广西壮族自治区行政区域内工程结构的非接触式数字图像法位移测量。

1.0.4 工程结构的数字图像法位移测量方法，除应符合本规程规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 数字图像法 digital image method

利用数字成像元件，得到以像素为基本元素的、可以用计算机或数字电路储存和处理的数字图像，并对数字图像进行预处理和信息提取的方法。

2.0.2 位移测量 displacement measurement

利用设备或数据，对结构的位移指标进行测量，并获得位移结果。

2.0.3 成像设备 imaging device

由成像元件、镜头、基座等部件组成的满足薄透镜成像原理、用于采集数字图像的设备。

2.0.4 靶标 target

与被测物刚性连接的光学标记物，作为数字图像法的跟踪目标，由包含特征图案的靶面、安装支架与安装基座组成。

2.0.5 标定 calibration

通过确定相机成像模型的内部参数和外部参数，建立图像中像素位置与物体表面真实物理空间坐标之间的精确数学关系。

2.0.6 模板匹配法 template matching method

在数字图像处理中，在检测区域上以像素为移动单位进行滑动搜索与该模板图像最相似的目标，通过相似度评价函数对变形前的模板图像与变形后的图像进行相似度计算，根据相似度确定最佳匹配位置，得到模板图像的像素级别位移结果的方法。

2.0.7 数字图像相关 digital image correlation

一种通过非接触方式分析物体表面自然或人工散斑图案在变形前后数字图像灰度分布的变化，实现全场测量物体表面位移场和应变场的

光学测量方法。该方法通过在被测物体表面选取一个包含特定灰度信息的子区（模板），在变形后的图像中搜索与该子区灰度分布最匹配的区域，从而确定该子区的位移。通过亚像素插值算法，可实现亚像素级别的位移测量精度。

2.0.8 尺度因子 scale factor

在相机光轴垂直于被测物平面，且成像透视畸变可忽略或已校正的理想简化模型下，图像像素坐标系中单位像素位移所对应的被测物平面上的实际物理位移量。它通常通过标定过程获得，是将图像像素位移转换为实际物理位移的关键参数。

3 基本规定

3.1 应用场景

3.1.1 符合下列条件时，可采用数字图像法进行工程结构垂直及水平位移的测量：

- 1** 难以使用接触法进行测试，具有全场多点测试需求的应用场景；
- 2** 被测表面具备可追踪的纹理特征，或具备架设靶标的条件，且测试距离不宜大于 200 米；
- 3** 现场具有光线柔和、亮度均匀的视觉场景，或具备可控的补光条件；
- 4** 测量时工程结构不处于高温状态，且温度波动较小，环境热流扰动的影响程度低；
- 5** 工程结构主要发生面内二维位移，其垂直于成像平面方向的位移（离面位移）可以忽略的情形。

3.1.2 数字图像法位移测量技术适用于以下工程结构领域：

- 1** 空间结构、高耸结构、桥梁结构的静态、动态位移测量；
- 2** 索杆结构的动态位移测量；
- 3** 水工结构、边坡、隧道衬砌等工程结构的静态位移监测。

3.1.3 数字图像法位移测量技术不适用于浓雾、强光、强磁、高温、重度粉尘、爆炸冲击等恶劣环境条件下的测试。

3.1.4 数字图像法位移测量技术仅针对工程结构的面内二维位移测量，不适用于有离面运动的结构位移测量。

3.2 现场要求

3.2.1 测量设备架设应符合下列要求：

- 1 相机及支架应稳固安装，避免因外力（如风力、地面振动）导致的相机位置改变，从而影响测试精度；
- 2 测量前应保证成像设备、镜头和三脚架之间连接稳固，保证成像设备与计算机采集系统的数据连接线接触良好；
- 3 相机视野应能覆盖测量区域，不被物体遮挡；
- 4 相机光轴宜与被测面垂直，当相机光轴不垂直于检测对象（靶标）表面时，应实测倾斜角度并进行倾斜修正；
- 5 测量前需进行对焦和曝光校准，确保靶标图像清晰且无过曝/欠曝。
- 6 应对测点与测量仪器予以防护，避免日照、风雨、振动和周围其他干扰；
- 7 测量设备安装运行后，应保持供电和通信畅通，以避免在线系统停止工作和数据缺失；

3.2.2 测量设备的测点放样与站点布设应符合下列规定：

- 1 应根据测点至相机距离、镜头焦距、图像传感器像元尺寸及测量分辨率要求等综合考虑拍摄站点位置，确定可行的靶标距离和布局，进而确定标定板的尺寸和类型；
- 2 站点布置时，如需局部调整布置方案，应做好记录；
- 3 站点布设时应选择购买或加工合适的支撑结构，保证成像设备与安装支架连接良好，不松动，无振动，且对站点做好防护措施。
- 4 现场测点放样应事先准备详细的测点布置方案，应根据结构形式、结构材料以及测量要求等合理选择；

3.3 数据管理

3.3.1 在应用数字图像法测量进行工程结构位移测量时，数据的处理及管理应在软件中自动实现。

3.3.2 以下原始数据应进行存储和备份，且禁止修改：

- 1** 采集时间和地点；
- 2** 未校正的原始图像序列；
- 3** 成像元件标定参数文件；
- 4** 成像元件和镜头型号。

3.3.3 以下过程数据宜进行储存和备份：

- 1** 计算参数设置文件；
- 2** 几何校正后的图像序列；
- 3** 位移结果数据文件；
- 4** 异常记录文件。

3.3.4 使用位移结果数据前，应进行数据的整体相关性评估。数据出现明显的失相关时，该数据禁止用于工程结构的测量报告。

3.3.5 采集的图像若存在遮挡、过曝、振动干扰等事件，需在图像数据头文件中标注时间区间。

4 测量流程

4.0.1 测量工作应包括测量前准备、现场测量和数据处理三个阶段，可按图 4.0.1 执行。

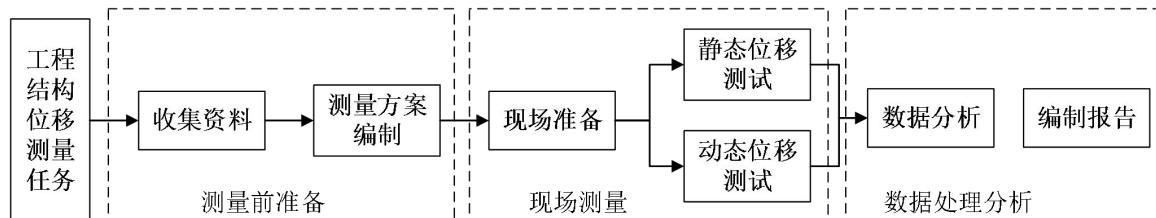


图 4.0.1 工程结构位移测量工作流程

4.0.2 测量前准备阶段工作内容包括：

- 1** 资料收集。应按照现行国家标准《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB50982 的相关规定，根据位移测量内容收集结构的基本信息，包括设计资料、竣工资料、历次测量及维修加固资料等；
- 2** 测量环境踏勘。主要包括位移测量的现场工作条件、结构状况以及实际使用状况等；
- 3** 测量方案编写。根据位移测量的要求，结合现场的测量条件和静态位移、动态位移测量方法进行编写，主要包括测点布置、测量工况、测量方式等。

4.0.3 现场测量阶段工作内容包括：

- 1** 现场准备。包括测点布置、仪器设备准备、仪器设备安装调试等；
- 2** 现场测量。按照预定的测量方案进行相关工作，实时采集、分析并存储各测点的数据。

4.0.4 数据处理阶段工作内容包括：

1 数据分析。对原始测量数据进行处理与分析，提取静态位移、动态位移分析评估需要的参数信息；

2 编制报告。根据位移数据分析结果，结合理论计算对试验结果作出判断与评价，形成测量报告。

5 测量设备

5.1 一般规定

5.1.1 基于数字图像法的非接触式位移测量设备包括移动式与在线固定式两类。

5.1.2 移动式位移测量设备包括成像设备及配套镜头、工控机或计算机（包括笔记本、平板电脑）、靶标、照明系统、三脚架、供电系统（充电电瓶、电池）以及数据线等。移动式位移测量设备一般用于工程结构的短时静态与动态位移测量。

5.1.3 在线固定式位移测量设备应具备边缘计算能力，可实时处理图像数据，得到多点位移时程，硬件主要包括成像设备及配套镜头、边缘计算模块、靶标、防护壳、照明系统、供电设备（市电或太阳能板）以及各类接头等。在线固定式位移测量设备一般用于工程结构的长期静态与动态位移监测。

5.1.4 测量设备运输过程中应确保设备安全，避免碰撞或强烈振动。

5.1.5 测量设备需定期进行保养、维护、清洁。

5.1.6 测量设备应定期进行检定或校准，测量前应对设备功能进行检查。

5.2 成像设备

5.2.1 成像设备应符合下列要求：

- 1** 成像设备宜采用工业相机和配套镜头，以获得期望的视场、靶距、景深、空间分辨率、时间分辨率和噪声水平；
- 2** 工业相机宜采用单色（黑白）成像元件，且避免采用可自动调整的镜头和/或相机成像系统；

3 成像设备的像素数量应根据测量精度要求确定，可按下列公式进行计算：

$$N = \frac{1}{n^2} \times \frac{W \times H}{\Delta\omega \times \Delta h} \quad (5.2.1)$$

式中：

N ——成像元件的像素数量；

n ——亚像素插值倍数；

W ——测量区域真实宽度（mm）；

H ——测量区域真实长度（mm）；

$\Delta\omega$ ——测量区域宽度方向单个像素对应的物理尺寸（mm/像素）；

Δh ——测量区域长度方向单个像素对应的物理尺寸（mm/像素）。

4 当测量目标位置变化快时，快门宜选择全局曝光的电子快门，快门速度和帧率应满足动态测量的要求；

5 成像设备内部集成的图像增强处理应避免测量图像特征信息的丢失；

6 根据测试目的、成像设备的性能指标和工程结构自振频率设置采样频率以及数据采集长度；采样频率不宜小于模拟信号频谱中最高频率的 5 倍，频率分辨率不宜低于 0.01Hz；

7 在需要获取大视场二维位移信息时，宜选用多目相机，应在使用前标定成像参数、相机间的相对位置关系。在使用时应保证数据的同步采集，可采用硬件同步触发、时间戳对齐、GPS 授时等方式。

5.2.2 对于在线固定式位移测量设备，成像设备可实时传输采集图像至微型工控机（智能硬件），并在边缘端直接进行分析计算处理，实现位移的在线监测，且可将数据通过 Wi-Fi、4G/5G、LoRa 等传输至网络。

5.2.3 成像设备采用的工业相机硬件参数宜满足下列要求：

- a) 环境温度: $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- b) 环境相对湿度: $< 95\%$;
- c) 相机分辨率: 应根据测量精度和视场要求按公式(5.2.1)计算确定, 且不宜低于 1920×1080 像素;
- d) 曝光方式: 帧曝光, 全局快门;
- e) 位移测量精度: $< 1/50000$ 视场;
- f) 光谱范围: $> 350\text{ nm}$;
- g) 测量距离: 不小于 200m (配合镜头);
- h) 支持靶标数: 不小于 30 个;
- i) 视频帧率: 静态测试: 不小于 1 帧/分钟; 动态测试: 不小于 30 帧/秒;
- j) 温度控制: 成像系统内置恒温控制装置, 控制误差不大于 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- k) 防护等级: 不小于 IP65。

5.2.4 成像设备在使用前应进行标定, 按现行国家标准《近景摄影测量规范》GB/T12979、《工程摄影测量规范》GB50167 的相关规定执行。

5.3 镜头

5.3.1 镜头的选择和使用应符合下列要求:

- 1** 镜头应失真小、可标定、成像清晰;
- 2** 镜头靶面尺寸不应小于成像元件尺寸;
- 3** 镜头的分辨率不应小于成像元件的物理分辨率;
- 4** 镜头焦距的选择应根据测量工作距离、图像传感器尺寸、视场范围确定, 可按以下公式确定所需焦距大小:

$$\frac{S_s}{FOV} = \frac{l_l}{D_m} \quad (5.3.1)$$

式中：

S_s ——图像传感器尺寸，单位：mm；

l_l ——镜头焦距，单位：mm；

D_m ——测量距离，即相机镜头到检测目标的距离（相当于物距），单位：mm；

FOV ——视场，即成像元件可检测到的最大区域，单位：mm。

5 宜采用具有锁定可调零件（如：对焦环、光圈调节环、变焦设置）等功能的镜头，以降低相机参数改变的可能性。

5.3.2 对于变视野测量情形，可采用变焦镜头通过焦距及靶距来调节视野与图像尺度，镜头调焦环应具有锁定装置。

5.3.3 对于有离面位移的平面位移测量情形，应采用远心镜头来降低测量误差，如果无法使用远心镜头，应使用长焦镜头将靶距增至最大，从而将离面运动引起的测量误差降至最低。

5.4 边缘计算模块

5.4.1 边缘计算模块在位移测量系统中负责数据采集、预处理、实时计算和传输，需结合位移测量需求、环境条件及系统集成性综合考虑。

5.4.2 边缘计算模块应具有体积小、功耗低、可实时计算、低延迟、高可靠等特点，且方便与工业相机一同部署。

5.4.3 边缘计算模块宜采用低功耗芯片（如 ARM 架构），选择高效位移解算算法以降低计算复杂度，避免全量数据上传导致的带宽消耗和能耗增加。模块需支持任务卸载与动态资源分配，在保证测量精度的同时

延长设备续航。

5.4.4 边缘计算模块需在本地完成数据预处理（如噪声过滤、特征提取）、多点位移实时解算、快速响应异常事件，减少数据传输至云端的时延。

5.4.5 边缘计算模块具备相机图像及视频流输入、多种通信协议（如 Modbus、OPCUA、MQTT 等）及强大的协议转换与适配能力。模块需支持 4G/5G、Wi-Fi 作为主通信链路回传数据，且宜集成 LoRa、NB-IoT 等低功耗广域网技术用于本地传感器组网或作为备用链路。

5.4.6 模块需预留足够的网络接口（如千兆网口）、光纤接口以满足不同布设场景的需求。

5.5 靶标

5.5.1 靶标的选择和使用应符合下列要求：

1 靶标可分为自发光靶标与外部补光靶标两种形式，在自然光能见度较低时，宜采用红外激光照射、自发红外光等方式维持靶标的被观测状态；

2 靶面应采用防水及耐腐蚀性能材料加工制作，上面喷涂特征图案等纹理信息，靶标防水等级不应低于 IP65；

3 在红外激光照射及自发红外光情形下，靶面图案应清晰且具有高对比度；

4 靶标尺寸、图案和布设位置需根据测量距离和测试精度预先设计，并与成像设备的分辨率相匹配。

5.5.2 靶标安装支架与安装基座应稳固可靠，可选择钢制或混凝土材料的安装基座，防止靶标抖动影响测量精度。

5.6 照明系统

5.6.1 照明系统由照明光源及对应的安装基座组成，其功能为向相机成像提供照明条件，照明光源可与成像系统整合成一体机形式，方便安装。

5.6.2 照明光源宜采用红外激光照射，光谱波长宜大于 800nm，并应选择对人体肉眼无害的波长范围，其照度和功率应根据现场的测量距离与能见度综合确定。

5.6.3 照明系统应具有防水及耐腐蚀性能，其防水等级不宜低于 IP65。

5.7 供电系统

5.7.1 供电系统由供电模块及对应的防护设备组成，为成像设备、靶标、照明系统、工控机、边缘计算模块及采集与传输系统供电。

5.7.2 供电系统输出应保证连续稳定，宜具有断电报警的功能。

5.7.3 供电模块分为 220V 交流供电、太阳能供电、充电电瓶三种模式，条件具备的情况下，宜优先使用 220V 交流供电，充电电瓶一般用于移动式位移测量设备的供电，太阳能系统一般用于野外固定式位移测量设备的长期监测系统供电。宜设计冗余供电方案（如市电+UPS+太阳能电池），并进行长时间放电测试。

5.7.4 供电模块应根据支持的硬件选择，其额定功率应不低于所支持硬件峰值功率的 1.3 倍。

5.7.5 当使用 220V 交流供电时，宜配置不间断电源（UPS），不间断电源容量宜满足 24 h 连续监测的要求。

5.7.6 当使用太阳能供电时，应根据监测需求及当地的气候条件综合选择太阳能供电系统，系统供电宜满足连续 14 天无日照的监测需求。

5.7.7 采集模块的输入电压应兼容直流 12V 与 24V，具备宽压工作功能。

5.8 数据采集、处理与传输系统

5.8.1 基于数字图像法的非接触式位移测量设备应具备相机参数设置、数据采集和处理、数据储存等主要功能，包括：

- 1** 具备工业相机工作状态、通信状态的监测和显示功能；
- 2** 具备工业相机采集帧率、曝光时间、增益等参数调整功能；
- 3** 具备多点目标位移的自动计算功能，可实时显示多点位移数据时程曲线或列表，实时保存位移文本数据；
- 4** 系统宜具备位移数据包括误差诊断、异常值处理、极值统计、相关性分析、趋势性分析、比对分析等处理分析和图标显示功能。
- 5** 具备不小于 30 天的位移数据存储空间，能够实现在网络中断情况下原始数据的本地存储，并在网络恢复后将数据回传至监控中心。
- 6** 具备图像或视频数据本地存储回放功能，图像或视频数据存储方式宜采用循环更新存储方式。对于静态位移测试，普通图像或视频存储宜不小于 14 天，突发事件图像或视频应进行转移备份存储并永久保存；对于动态位移测试，可仅存储感兴趣测试区域的视频流裁剪图片及降帧的全场缩略图像，普通图像或视频存储宜不小于 14 天，突发事件图像或视频应进行转移备份存储并永久保存。
- 7** 应保证固定式位移测量设备在复杂环境下（光影变化、基点扰动、硬件发热等）的匹配精准度。

5.8.2 数据采集前应调试成像设备位姿及光圈并对焦，成像设备应连接至计算机或边缘计算模块，以便于从采集软件上查看实时图像。

5.8.3 确定成像设备站点、位姿后，在数据采集软件中根据各靶标的位置确认测点编号，并做好工况记录工作，宜包含下列内容：

- 1** 工程概况；
- 2** 测量目的及依据；

- 3** 测量范围、内容；
- 4** 成像设备及其参数；
- 5** 计算机采集系统参数；
- 5** 测点布置；
- 6** 测量工况；
- 7** 数据处理。

5.9 仪器校验

5.9.1 位移测量设备出厂前应对每批次的设备进行精度校验，每批次的设备检验比例不小于 3%，且不少于 3 台。

5.9.2 位移测量设备校验的环境条件应满足下列要求：

- a) 温度：(20±5) °C；
- b) 湿度：不大于 85% RH；
- c) 其他：无振动，无波动气流。

5.9.3 检验时，应严格按照制造商所提供的仪器说明书操作，检查仪器外观无损伤，将仪器稳固地安装于基座上，将靶标成像于仪器视场中间，设置适当的亮度和采样率，标定后进行检验。

5.9.4 检验内容及设备如表 5.9.4 所示。

表 5.9.4 位移测量设备检验内容及设备

序号	检验内容	检验用设备
1	竖、横向位移示值误差	位移测量系统（螺旋测微器 MPE: 0.05 mm）
2	竖、横向位移重复误差	

5.9.5 竖、横向位移示值误差应分别在 20 m、40 m 距离进行检验，检验步骤如下。

a) 将被校仪器放置在距靶标约 20 m 处，连接并精确整平仪器。

将靶标固定在位移测量装置的平台上，用机器视觉测量仪瞄准靶标，调整焦距使靶标清晰成像于屏幕中间。待仪器稳定后开始标定，竖向移动靶标，位移测量装置移动的距离作为测量的参考值，用机器视觉测量仪测量相应的竖向位移。按式（5.9.5）计算竖向位移示值误差。按测量范围均匀分布 10 个测量位置，测量各位置的实测位移值。取 10 个位置中示值误差最大值作为 20 m 处竖向位移测量示值误差。检验过程示意图见图 5.9.5。

$$\Delta L_i = L_i - L_0 \quad (5.9.5)$$

式中：

ΔL_i ---第 i 点位移示值误差；

L_i ---第 i 点位移实测值；

L_0 ---位移基准值。。

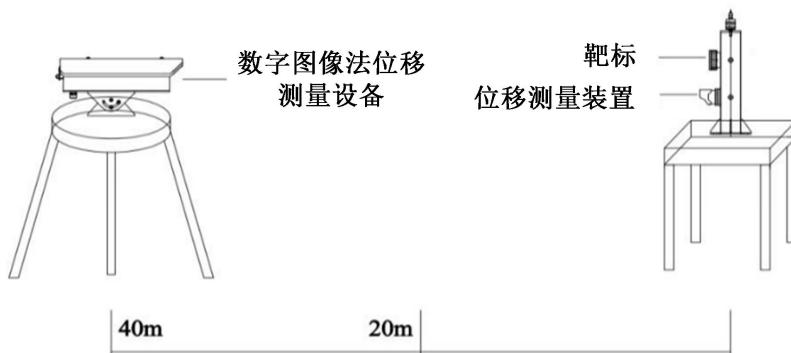


图 5.9.5 位移测量设备检验图

b) 将靶标移动到起始位置，重新获取基准点。横向移动靶标，按上述步骤进行横向位移示值误差的校准，得到 20 m 处横向位移示值误差。

c) 将被校仪器放置在距靶标 40m 处，按上述步骤进行竖、横向位移示值误差的校准，得到 40m 处竖、横向位移示值误差。

5.9.6 竖、横向位移重复误差检验按如下方法进行：将被测仪器放置在距靶标约 20m 处，重复 5.9.5 条的操作，获取基准点。竖向移动靶标 1mm，测量仪器的实测位移值，重复测量 10 次，按公式（5.9.6）计算竖向位移测量的重复性。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - L)^2}{n-1}} \quad (5.9.6)$$

式中：

S --- 第 i 点位移实测值误差；

L_i --- 第 i 点位移实测值；

L --- 位移测量平均值。

5.9.7 数字图像法位移测量设备竖、横向位移示值误差及重复性误差应满足 5.2.5 的相关要求。

6 静态位移测量

6.1 一般规定

6.1.1 工程结构长期静态位移监测应采用在线固定式位移测量设备，短期静态位移测试则可采用移动式和在线固定式位移测量设备。

6.1.2 静态位移测量中，采样频率应权衡观测对象的实际位移速率、设备的硬件条件进行设置，确保采集到的数据能反映真实的位移情况。

6.2 设备安装与防护

6.2.1 进行静态位移测量时，测量设备的设置应符合以下规定：

- 1** 相机与靶标间的视线方向与结构运动方向夹角宜为 90° ；
- 2** 靶标面应与相机成像面尽量平行，以获得较为完整的纹理信息；
- 3** 在相机景深范围内，宜选取稳固的位置，布设一个位移参考点；
- 4** 一台相机的视场及景深不能完全覆盖测点区域时，可增加相机数量。

6.2.2 在线固定式位移测量设备应安装在绝对稳固的基座上（如专用观测墩），如无稳固的结构物，需要浇筑基础并埋设内灌混凝土的钢制或 PVC 管立杆，或直接浇筑混凝土柱进行安装，且应确保相机与待测结构（及靶标）之间全程无遮挡，并考虑植物生长、临时堆放物等未来可能的影响。

6.2.3 在立杆（混凝土立柱）顶部安装位移测量设备，利用瞄准器找到靶标的大概方向，调试完成后，固定住机器；在现场安装设备机柜，将供电电源引入机柜，机柜距离地面宜大于或等于 30 cm ；在立杆上安装照明系统，照明系统补光须确保覆盖的靶标清晰可见，调试完成后，固

定照明系统；最后加装保护罩，避免位移测量仪本体受外部环境因素的影响。

6.2.4 应根据测量距离选择靶标规格，成像结果中的靶标像素尺寸不宜低于 31×31 像素，保证位移解算算法的稳定运行。

6.3 静位移解算

6.3.1 设备安设完毕后应进行预处理操作，包括相机标定、试采集、精度验证：

1 相机标定。通过相机标定建立相机图像像素坐标与现场真实世界坐标之间精确换算关系，对于距离 50m 以内的位移测试，可以采用传统的棋盘格法进行标定；对于 50m~200m 以内距离，可根据测点至相机距离、镜头焦距、图像传感器像元尺寸、主点像素坐标以及测点像素坐标直接计算标定系数，也可采用高精度二维基准尺法、大尺寸人工标志点阵列法、基于场景已知尺寸的标定法等进行标定，可通过标志已知尺寸除以像素长度获得尺度因子；

2 试采集。在位移测量设备正式安装点，对所有靶标进行不少于 24 小时的视频图像连续试采集。检查系统在昼夜温差、光照变化、热流扰动、振动干扰下的稳定性；

3 精度验证。宜采用二维滑台对测试用可移动靶标施加已知位移，与视觉系统测试结果进行交叉验证，确认标定的有效性及系统测试精度。静位移测量精度应符合表 6.3.1 的规定：

表 6.3.1 静态位移测量允许误差

测量距离	允许误差
10m	$\pm 0.5\text{mm}$
50m	$\pm 1.0\text{mm}$

100m	$\pm 4.0\text{mm}$
200m	$\pm 8.0\text{mm}$

4 预处理操作前应对相机进行预热，以使得在标定或图像采集前相机处于稳定的工作温度；

5 尽量选择阴天、温度稳定的时段进行相机标定与精度验证。

6.3.2 由于静态位移测试时间间隔长，宜根据相机标定、试采集与精度验证数据以及环境温湿度、相机温度、光照强度、气压等信息，编制位移测试补偿算法，提升数字图像法位移测试精度。

6.3.3 位移解算过程应按以下流程操作：

1 宜对采集的视频图像进行图像增强、异常剔除的预处理，通过调整对比度，削弱雾气或光照不均的影响，删除有遮挡图片；

2 在初始参考图中选择被测靶标的感兴趣区域（ROI），可人工点选，也可通过人工智能算法，锁定各靶标位置，实现 ROI 的自动化选择；

3 通过视频图像追踪算法得到测点的位移。常见的追踪算法包括数字图像相关技术（DIC）、SIFT 或者 SURF 特征点匹配、光流法、边缘检测、质心检测、角点检测等。对于测试精度要求较高的测量场景，宜优先采用数字图像相关技术（DIC）进行靶标的静态像素位移解算，相关原理见附录 A。推荐整像素搜索采用 FNCC 算法，亚像素匹配采用 IC-GN 算法，由于上下两帧图像静态位移变化量可能较大，宜采用较大的搜索范围；

4 引入补偿算法对原始像素位移序列进行处理，消除部分环境因素影响；

5 测点实际位移为通过相机标定得到的尺度因子乘以位移解算得到的像素位移；

6 原始静态位移序列包含高频噪声（如图像噪声、大气扰动），宜根据测试目标，采用高通、带通或卡尔曼滤波进行平滑，提取有效位移信息。

6.3.4 建立定期校准（检查相机参数是否变动）、异常数据预警、设备状态巡检的机制，确保系统长期运行的可靠性。

7 动态位移测量

7.1 一般规定

7.1.1 工程结构动态位移长期监测应采用在线固定式位移测量设备，短期动态位移测试则可采用移动式和在线固定式位移测量设备。

7.1.2 采用数字图像法进行工程结构动态位移测量，可进一步分析得到结构的动力特性和动态响应特征。

7.1.3 动态位移测量时，采样频率应满足奈奎斯特定理。测量数据用于精确分析结构自振特性，例如自振频率和阻尼比时，采样频率宜大于分析频率的 5 倍。

7.1.4 测量设备的设置参照本规程第 5.2~5.9 条相关规定。

7.1.5 设备安装与防护参照本规程第 6.2 条相关规定。

7.2 动位移解算

7.2.1 由于动态位移测试采样频率高，环境温湿度、相机温度、光照强度、气压等环境信息短时变化量小，可简单通过视场中布设的固定参考靶标，引入补偿算法，实现对测试目标位移结果的实时修正。

7.2.2 宜采用数字图像相关法（DIC）进行像素位移的测量，由于采用高采样频率，上下两帧图像位移变化量一般较小，可采用较小的搜索范围，具体根据位移变化速率来确定。

7.2.3 原始动态位移序列包含高频噪声（如图像噪声、大气扰动）与低频噪声（环境引起的趋势项），宜根据测试目标，采用带通或卡尔曼滤波进行平滑，提取有效位移信息。

7.2.4 其余动位移解算要求参照本规程第 6.3 条相关规定。

8 测量报告

8.0.1 测量报告应结论明确、用词规范、文字简练，对于容易混淆的术语和概念，以文字解释或图例、图像、图表说明。

8.0.2 测量报告应包括但不限于以下内容：

- 1** 工程概况
- 2** 位移测量目的与依据
- 3** 测量内容
- 4** 测量方法及设备
- 5** 测点布置
- 6** 测量实施情况
- 7** 测量数据和结果，包括典型的位移时程和频谱图、测量结果图表等，测量记录表可参照附录 B。

附录 A：数字图像相关法位移测量原理

(资料性)

基于数字图像相关的位移测量原理是通过在目标点移动前的图像上选取参考子集，并以此参考子集为匹配图像在其移动后的图像上查找与之匹配目标子集，通过对比参考子集初始位置与目标子集位置，获得被测目标的像素位移，再通过尺度因子 k 转换获得目标实际位移值。

A.1 尺度因子

尺度因子 k (mm/pixel)，定义为

$$k = \frac{d}{p} \quad (\text{A.1})$$

其中， d 和 p 分别为参照物实际长度和像素长度。

在实际应用中，利用尺度因子需要注意相机的光轴与目标点平面法线夹角是否为零，若不为零则需修正后才可用于变形计算。

A.2 整像素原理

整像素初值搜索算法原理是通过在初始参考图像上选取参考子集，并以此参考子集为匹配图像在变形后的图像匹配模板区域查找目标子集（目标子集与参考子集像素尺寸相同），通过对比参考子集初始位置与变形后目标子集位置，获得被测目标的整像素位移。

传统的归一化互相关函数 (Normalized Cross-Correlation, NCC) 常被用来衡量 2 个信号之间的相似性。通过将 NCC 相关函数进行优化得到零均值归一化互相关 (Zero-Normalized Cross-Correlation, ZNCC) 函数，实现了图像更稳健和准确的匹配，进而提出了快速互相关整像素搜

索算法 FNCC，整像素计算主要为模板匹配法，原理如图 A.2 所示，实现步骤如下：

步骤 1 在目标点移动前的图上选取一个参考子集 $f(x, y)$ ，其中心点像素坐标记为 (x_0, y_0) ，灰度均值为 f_m ，尺寸为 $N \times N$ ($N = 2a + 1, a \in \mathbb{N}^*$) 个像素。

步骤 2 目标点移动后，获得图像记为 $g'(x', y')$ ，灰度均值为 g_m ，其尺寸为 $M \times M$ ($M = 2b + 1, b \in \mathbb{N}^*, b > a$) 个像素，在 $g'(x', y')$ 中选取与参考子集尺寸相同的区域（红色框）进行逐行逐列搜索，并将红色框中区域与参考子集 $f(x, y)$ 进行 ZNCC 运算，计算该区域与参考子集的相似度，用于查找与之匹配的子集，即：

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - f_m] [g(x+x', y+y') - g_m]}{\sqrt{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - f_m]^2 \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [g(x+x', y+y') - g_m]^2}} \quad (\text{A.2.1})$$

步骤 3 选取 $R(x, y)$ 最大值所对应的子集作为找寻到的目标子集，记为 $g(x', y')$ ，该目标子集左上角第一个像素点坐标用 (k_c, l_c) 表示， k_c 和 l_c 分别为目标子集中左上角像素点坐标与坐标原点 O 在 x 和 y 方向上的像素距离，此时该目标子集的中心像素位置坐标即为目标点移动后的位置查找结果，记为 (x_1, y_1) ，即

$$\begin{cases} x_1 = k_c + \frac{N-1}{2} \\ y_1 = l_c + \frac{N-1}{2} \end{cases} \quad (\text{A.2.2})$$

坐标 (x_1, y_1) 与坐标 (x_0, y_0) 之间的差值为像素位移，通过亚像素迭代算法可实现亚像素级别的测量精度，经尺度因子 k 转为实际位移后，即可获得目标点的真实位移值 (u, v) ， u 和 v 分别为 x 和 y 方向的位移值。

根据上述原理即可实现目标点面内位移测量。

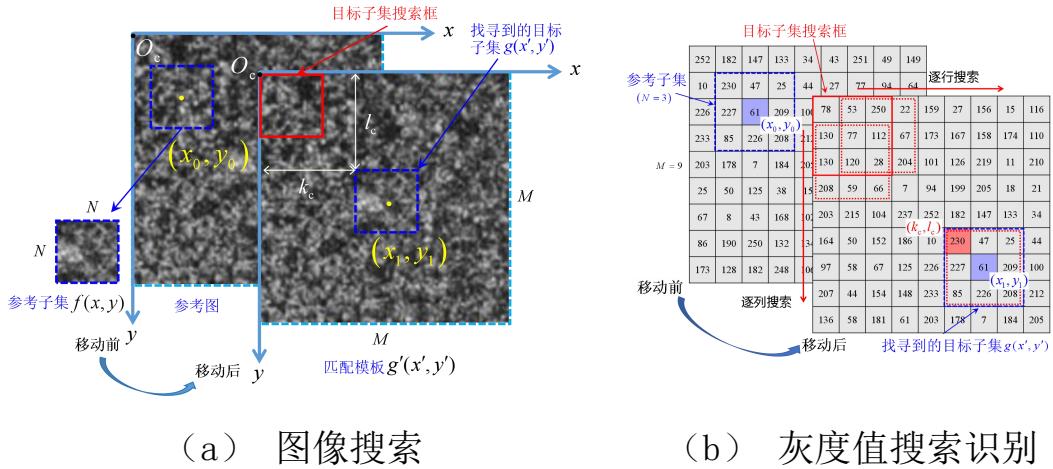


图 A.2 FNCC 算法子集搜索

A.3 亚像素原理

通过整像素初值搜索算法获得的位移是整数倍像素位移，难以满足高精度测量要求，可采用亚像素差值算法可进一步提升位移测量精度。

亚像素匹配算法原理是采用前期整像素初值搜索算法提供的迭代初值，通过形函数将其迭代收敛至亚像素级别的局部最优解来实现更高精度的位移测量。20世纪80年代提出了正向累加牛顿-拉夫森(Forward Additive Gauss-Newton method, FA-NR)算法，用于将模板图像快速匹配至目标图像，该算法采用归一化相关函数NCC对参考子集和目标子集的相关度进行评判，引入形函数理论，采用牛顿-拉夫森迭代法对形函数进行多次优化获得局部最优解，并求解相关度函数的极值获得迭代步长。2001年，提出的反向组合高斯牛顿算法(Inverse Composition Gauss-Newton, IC-GN)，用于模板图像快速匹配目标图像。FA-NR通过计算目标子集的增量，寻找与参考子集匹配程度最好的形变子集，而IC-GN则计算参考子集增量，通过增量变形获得变形后的参考子集，进而采用零均值归一化最小平方距离(Zero-mean Normalized Sum of

Squared Difference, ZNSSD) 相关度函数对参考子集与目标子集进行相关度评判，从而更新形函数参数，并将其代入下一次迭代，直至达到设置的收敛条件。IC-GN 算法相较 FA-NR 具有更好的计算效率和鲁棒性。目前，在相机噪声、环境噪声等的影响下，IC-GN 算法的亚像素位移识别精度可达到 ± 0.02 像素。

本节采用一阶形函数（结构只发生平移和拉伸收缩变形，需考虑变形对子集中各像素点的影响），基于 ZNSSD 相关度函数，对 IC-GN 算法进行介绍。

一阶形函数为：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+u_x & u_y & u \\ v_x & 1+v_y & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3.1})$$

ZNSSD 相关度函数为：

$$C_{\text{ZNSSD}}(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \left(\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\sqrt{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N [f(x_i, y_j) - f_m]^2}} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\sqrt{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}} \right)^2 \quad (\text{A.3.2})$$

式中： x_0 、 y_0 表示变形前子集中心点纵、横坐标， x_1 、 y_1 代表子集中的点变形后的纵横坐标， Δx 、 Δy 表示在变形前子集中心点与子集中各像素点的相对纵、横距离； u 与 v 为形变参数中 x 和 y 方向上的刚体位移分量， u_x 与 u_y 和 v_x 与 v_y 分别为 u 与 v 在 x 和 y 方向上的位移梯度，其中 u 与 v 为整像素初值搜索算法计算得到的位移迭代初值； $f(x_i, y_j)$ 为参考子集坐标 (x_i, y_j) 处的灰度值； $g(x'_i, y'_j)$ 为目标子集坐标 (x'_i, y'_j) 处的灰度值。

通过 ZNSSD 相关度函数判断和迭代获得最终形参向量 \mathbf{p} （施加在目标子集上的预先计算的变形参数向量），表达式为：

$$\mathbf{p} = (u, v, u_x, u_y, v_x, v_y)^T \quad (\text{A.3.3})$$

\mathbf{p} 向量中的 u 与 v 值即为亚像素基本的像素位移，像素位移信息乘以尺度因子 k 之后转换为实际位移。

附录 B：工程结构位移测量记录表

工程结构位移测量记录表（DIC 方法）

1. 工程基本信息					
工程名称		测量日期		天气条件	
测量位置		温度 (°C)		湿度 (%)	
测量人员					
2. 设备与标定参数					
相机型号		镜头焦距 (mm)		像元尺寸 ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	
拍摄帧率 (fps)		标定板格点尺寸 (mm)		尺度因子 (mm/像素)	
3. 散斑与 DIC 参数设置					
散斑类型		散斑材料		散斑尺寸 (像素)	
子集大小	子集搜索步长				
4. 数据采集记录点					
序号	图像文件名	数据存储路径	时间	光照条件	备注
1					
5. 审核与签字					
测量结果审核人				审核日期	
备注					
说明：					
图像文件命名建议：工程名_日期_序号（如 XX 大桥_20251015_001）					
异常情况需详细描述（如“09:15-09:20 因人员经过导致遮挡”）					
本记录表需与原始图像数据一同存档					
测量负责人签字：_____ 日期：_____					

用词说明

1.0.1 执行本规程条文时，对于要求严格程度的用词说明如下，以便在执行中区别对待。

1 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；

反面词采用“严禁”。

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；

反面词采用“不应”或“不得”。

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”或“可”；

反面词采用“不宜”。

1.0.2 规程中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为：

“应按……执行”或“应符合……的要求(或规定)”。

如非必须按指定的标准、规范的规定执行时，写法为“可参照……执行”

引用标准名录

本规程引用下列标准。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。

1. 《工程测量标准》 GB 50026
2. 《工程摄影测量规范》 GB 50167
3. 《民用建筑可靠性鉴定标准》 GB 50292
4. 《近景摄影测量规范》 GB/T 12979
5. 《工程结构数字图像法检测技术规程》 T/CECS 1114-2022
6. 《建筑与桥梁结构监测技术规范》 GB 50982
7. 《混凝土坝安全监测技术标准》 GB/T 51416
8. 《公路桥梁结构监测技术规范》（JT/T 1037- 2022）
9. 《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》（JT/T 1037-2016）

工程结构数字图像法位移测量技术规程

条文说明

目 次

1 总 则	36
2 术语	37
3 基本规定	38
3.1 适用场景	38
3.3 数据管理	39
4 测量流程	39
5 测量设备	40
5.1 一般规定	41
5.2 成像设备	42
5.3 镜头	45
5.4 边缘计算模块	46
5.5 靶标	47
6 静态位移测量	47
6.2 设备安装与防护	48
6.3 静位移解算	48
7 动态位移测量	50
7.1 一般规定	50

Contents

1	General Principles	36
2	Terminology	37
3	Basic Provisions	38
3.1	Application Scenarios	38
3.3	Data Management	39
4	Measurement Procedures	39
5	Measurement Equipment	40
5.1	General Provisions	41
5.2	Imaging Devices	42
5.3	Lens	45
5.4	Edge Computing Module	46
5.5	Targets	47
6	Static Displacement Measurement	47
6.2	Equipment Installation and Protection	48
6.3	Static Displacement Calculation	48
7	Dynamic Displacement Measurement	50
7.1	General Provisions	50

1 总 则

1.0.1 数字图像法作为近年来新兴的检测方法，以其非接触、高精度、方便快捷、平台扩展性强、与人工智能技术衔接良好等优势，在工程结构检测领域呈现出越来越广泛的应用前景。

目前，数字图像法已成功应用于结构表面裂缝检测、结构与构件的尺寸与变形测量、桥梁结构动静态位移测量等方向，应用效果良好。

近年来基于数字图像法的位移测量技术已在国内外得到大力发展，建立了高帧率高精度工业相机、边缘检测、自动标定、亚像素算法、红外靶标全天候识别、无靶标识别、数字图像相关（DIC）、边缘计算、实时监测技术等技术体系，应用范围涵盖了桥梁结构、高层建筑、空间结构、水工结构物、公路边坡、隧道等场景。

为规范工程数字图像法位移测量技术的应用，做到技术先进、数据可靠、安全适用、经济合理，本规程围绕总则、术语、基本规定、测量流程、测量设备、静态位移测量、动态位移测量以及测量报告进行描述，检测内容具体为位移测量。

2 术语

术语是根据现行国家标准《工程摄影测量规范国家标准》GB50167、《近景摄影测量规范》GB/T12979等有关规定给出的。

2.0.1 数字图像位移测量方法体系包括边缘检测法、光流法、特征点匹配、DIC等技术路线，各种方法的优劣对比见表2.07。本标准推荐模板匹配法和DIC方法作为核心方法，因其具有明确的精度指标（分别为像素级和亚像素级）和成熟的工程验证经验。其他方法在使用时应通过专项论证确认其测量精度。

表1 数字图像方法对比表

方法	精度	适用场景	优点	局限性
模板匹配	像素级	刚性小变形	简单实时	精度低，光照敏感
DIC	亚像素级	复杂变形/全场测量	高精度、全场数据	需散斑制备，计算复杂
光流法	亚像素级	连续小位移	无需标记	光照敏感，大位移失效
边缘检测	像素级	规则几何结构	易实现	依赖清晰边缘
相位相关	亚像素级	全局平移	抗噪性强	仅适用于平移
特征点匹配	像素级	大位移/旋转	适应性强	计算量大，特征点依赖

2.0.8 尺度因子在相机标定中也常被称为标定系数，它主要指内参矩阵中的参数，如 α_x 和 α_y ，这些参数表示图像坐标轴上每单位物理距离（如毫米）对应的像素数量，反映了像素尺寸与焦距的比例关系，用于将归一化坐标映射到像素坐标。

3 基本规定

3.1 适用场景

3.1.1 本条规定了采用数字图像法进行工程结构位移测量的基本前提条件。数字图像法作为一种先进的光学非接触测量技术，具有全场、实时、高精度等优点，但其成功应用高度依赖于测量环境、目标特征和结构行为本身。制定本条的核心目的是界定该技术的有效应用边界，确保测量数据的可靠性与准确性，避免在不适宜的场景下误用导致测量失败或数据失真。

3.1.2 本条明确了标准的适用范围。本标准对桥梁工程、建筑工程、水利工程、道路工程等工程结构的位移测量相关技术内容进行了规定。

3.1.3 本条作为排除条款，是对第 3.1.1 条适用条件的重要补充与反向界定。其制定目的在于：数字图像法依赖于稳定的光学成像环境和成像设备的可靠运行。基于数字图像法的技术原理与设备本质，明确划定其不可行或风险极高的应用禁区，以防止在极端恶劣环境下因方法失效而导致数据误判、设备损坏乃至安全事故，确保测量工作的科学性与安全性。

3.1.4 本条旨在明确基于单相机系统的二维数字图像法在位移测量维度上的根本性限制。它并非对应用场景的普通约束，而是对该技术测量原理与能力边界的界定。制定本条的核心目的是：防止因忽略或误解该方法的基础假设，将其错误地应用于三维位移场测量，从而导致所得位移数据包含不可校正的系统性偏差，最终导致对工程结构安全状态的严重误判。

3.3 数据管理

3.3.2 为保证数据可追溯性与完整性，数据存储应优先采用原始、无损压缩格式。如需减少存储空间占用，可采用有损压缩方式，但应严格控制图片与视频的压缩率，避免因压缩过度导致关键信息损失。

4 测量流程

4.0.2 应依据位移测量的具体目标与范围，获取并审阅结构的设计图纸、计算书、竣工图纸、材料报告等基础信息，以及反映结构历史状态与性能演变的历次位移监测报告、检测记录、维修加固方案及验收文件；

踏勘工作应重点核查相机架设位置至目标区域的光路通视性、环境光照条件、环境振动源、空间操作限制及安全作业条件；

详细记录结构待测区域的表面状况，如平整度、纹理、既有损伤等；并同步了解结构在计划测量时段内的实际荷载类型、分布及变化规律，如交通流量、设备运行状态等。

5 测量设备

5.1 一般规定

5.1.1 本条旨在从应用场景和功能定位出发，对数字图像法位移测量设备进行系统性分类，明确“移动式”与“在线固定式”两大基本架构，为测量方案设计、设备选型与配置提供明确的依据。

5.1.2 本条明确了移动式测量设备的核心组成与典型应用场景，其规定意在强调该配置应是一个功能完整的便携式测量系统，而非单一的成像装置，主要服务于临时性、周期性的现场测试任务，需兼顾性能与现场机动性。

5.1.3 本条定义了在线固定式监测系统的关键特征与硬件构成，核心在于强调其必须具备原位实时数据处理与传输能力（边缘计算），以满足长期、自动化、无人值守监测的需求，其设计重点在于可靠性、耐久性与系统集成度。

5.1.4 本条旨在规定测量设备运输过程中的基本防护要求，其根本目的在于防止精密的光学与电子部件因不当搬运而遭受物理损伤或光学校准状态失效，从而确保设备到达现场后能立即投入正常工作状态，保障测量基准的稳定性。

5.1.5 本条确立了测量设备需进行预防性维护的基本原则，旨在通过定期、计划性的保养、清洁与检查，消除设备隐患，防止因灰尘、污渍、机械部件老化或性能退化导致的测量质量下降或系统故障，保证设备在全生命周期内的可靠性与测量一致性。

5.1.6 本条是确保测量数据准确性与计量溯源性的规定。它明确了两个层次的精度保障要求：“定期检定或校准”用于建立和维护设备的计量基

准，保证数据输出的绝对准确性；“测前功能检查”则是确保设备在本次具体测量任务中处于正常工作状态，两者共同构成数据可信度的根本支撑。

5.2 成像设备

5.2.1 该条文对成像设备中工业相机、相机像素数量、快门、图像处理能力、大视场二维位移测量等进行了规定。

1 成像元件宜采用工业相机，原因在于：①工业相机一般经过特殊设计，结构紧凑结实、不易损坏，连续工作时间长，可在较差的环境下使用，一般的家用数码设备是做不到这些的；②通过家用数码设备获得的图像数据一般经过了家用数码设备内置的图像预处理，如滤波或平滑等，可能造成原始图像一些特征信息的丢失，而这些丢失的特征信息对于本章位移测量来说又是至关重要的；③家用数码相机的数据传输速率不高，难以满足现场实时测量的要求。

在一定的测量精度要求下，可采用下列几种方式提高测量分辨率：
①采用更大焦距的镜头；②采用更高分辨率的工业相机；③缩小测量距离。采用方式①和②，在现场测量时，现场更换镜头或工业相机不太方便，还可能造成测量设备成本直线上升；采用方式③，会相应的缩小测量范围；而采用基于亚像素的数字图像处理技术，在硬件设备和测量距离不变的条件下，便可极大提高测量分辨率。

2 本条旨在确立数字图像法位移测量中工业相机选型与配置的核心技术原则，目的在于，通过明确推荐采用单色（黑白）成像传感器并严禁使用自动调整功能，从数据采集源头最大限度地消除由成像系统自身引入的随机性变量与噪声，确保图像序列在灰度、对焦及几何关系上的绝对稳定，为后续高精度的位移计算与分析提供可靠、可重复、无内

部干扰的原始图像数据基础。

3 成像元件的像素数量计算示例

1) 测量要求

测量区域: $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$

要求位移精度: 0.1mm

亚像素算法: $n = 10$ (可将 1m 精度提升至 $1/10=0.1\text{mm}/\text{像素}$)

2) 单像素物理分辨率需求:

整像素算法: 需 $\Delta\omega = 0.1\text{mm}/\text{像素}$;

使用亚像素算法后: 相当于允许 $\Delta\omega = 0.1 \times 10 = 1\text{mm}/\text{像素}$

(因为算法将精度提升 10 倍), 采用式(1)计算时按照 $\Delta\omega = 0.1\text{mm}/\text{像素}$ 进行计算。

3) 相机所需像素计算:

整像素算法像素数量需求

$$N = \frac{1}{n^2} \times \frac{W \times H}{\Delta\omega \times \Delta h} = \frac{1}{1^2} \times \frac{1000 \times 1000}{0.1 \times 0.1} = 10000 \text{ (万像素)} \quad (1)$$

亚像素算法像素数量需求

$$N = \frac{1}{n^2} \times \frac{W \times H}{\Delta\omega \times \Delta h} = \frac{1}{10^2} \times \frac{1000 \times 1000}{0.1 \times 0.1} = 100 \text{ (万像素)} \quad (2)$$

在上述测量要求下, 达到 0.1mm 的测量精度, 整像素算法成像元件需要 10000 万像素相机, 而亚像素成像元件仅需要 100 万像素相机即可满足要求。

4 本条旨在确立对动态位移目标进行数字图像测量时, 相机曝光模式与采集参数的设置准则。其目的在于, 通过规定使用全局快门并匹配足够的快门速度与帧率, 从硬件采集层面消除由成像系统自身原理缺陷导致的动态图像畸变(果冻效应)和运动模糊, 确保在目标快速运动过程中捕获的每一帧图像都具有严格的时空一致性与清晰度, 从而为动

态位移时程的准确重建提供可靠的数据基础。这是实现有效动态测量的核心前提之一。

5 数字图像素材质量较好且满足检测与测量要求，可不进行图像增强处理。若图像中存在曝光过度、曝光不足、包含阴影、相邻图像色彩差异过大等问题，可进行色彩增强处理；若图像存在异常像素或需要增强图像局部细节等，可进行图像降噪增强处理。

6 本条目的是同时保证位移时程信号在时域与频域分析的完整性与准确性。通过规定采样频率下限，旨在防止频率混叠，确保能无失真地捕获结构的动态响应；通过规定频率分辨率要求，旨在确保能够有效辨识密集模态或细微的频率变化。

7 本条旨在规定采用多目相机系统实现大视场、高精度全场位移测量的要求。目的是通过统一的空间基准与时间基准，将多个独立视场融合为一个可精确分析的完整测量场。其系统标定旨在建立各相机间精确的几何关系，而严格的同步控制旨在消除图像间的时间差，二者共同构成了多视场数据能够进行有效拼接与二维融合分析的先决条件。

5.2.3 鉴于长期实时监测的需求，应选择工业相机，工业相机连续工作时间长，拍摄帧率高，传输速率高，环境适应性强。对相机采集数据进行处理时，需要考虑到相机的传输速率，工业相机可分为 USB3.0 接口和 Gige 网口两类，USB3.0 工业相机传输至边缘计算模块距离一般不超过 5 米，Gige 工业相机传输至边缘计算模块距离可达到 100 米。若边缘计算模块（工控机）现场安装不便时，可考虑采用 Gige 接口工业相机，并将边缘计算模块置于便于调试的位置，但考虑到 Gige 网口传输量不及 USB3.0 接口，此时应确保计算帧率满足要求。边缘计算模块一般建议采用单板计算机或嵌入式计算平台，可部署于相机附近，避免远距离传输图像数据，进一步保障系统实时性与稳定性。

5.2.4 相机标定是数字图像方法在工程结构位移测量中确定成像几何关系和空间尺度的关键环节，其目的是获取像素坐标与实际物理坐标之间的转换关系。

在实际工程应用中，常采用基于规则平面标定板的标定方法、基于空间控制点的标定方法以及结合现场工况的在位标定方法等。这类方法通常通过已知几何关系的目标或控制点，建立图像与物理空间之间的对应关系，其中实验室或条件受控场景下以规则标定板方法较为常见，而在中远距离、户外或长期监测条件下，往往结合现场条件采用更具适应性的标定方式，以满足工程实施的可行性要求。

5.3 镜头

5.3.1 非量测型镜头相机包括工业相机和民用相机，常用的接口包括 C 接口、CS 接口、F 接口、V 接口、T2 接口、徕卡接口、M42 接口、M50 接口等，其中 C 接口和 CS 接口是工业相机最常见的国际标准接口。

1 一般通过张正友标定法进行标定，测定并校正镜头畸变参数、焦距、主点位置等单目成像参数。

2 靶面尺寸是指镜头成像圈可覆盖的最大像场直径。该尺寸须大于或等于相机感光元件的有效接收区域尺寸，以确保成像无暗角或边缘信息损失。

3 镜头分辨率是指摄影镜头清晰地再现被摄景物微细节的能力，分辨率定义为，在像面处镜头在单位毫米内能够分辨开的黑白相间的条纹对数。

5.3.2 本条规定了采用变焦镜头实现可变视场测量时的核心操作规范与硬件要求。其目的在于，在充分发挥变焦镜头灵活适应不同测量尺度需求的同时，通过要求调焦环具备可靠的锁定功能，确保在单次连续测

量过程中成像系统内参数的绝对稳定，从而杜绝因焦距意外改变导致的图像比例尺漂移，保障位移数据计算基准的一致性、连续性与可靠性。

5.3.3 本条针对存在离面位移的平面位移测量这一特定误差源，确立明确的镜头选型与系统配置原则。其目的在于抑制或最小化离面运动引起的透视误差，指导优先采用远心镜头从根源上消除误差；在条件受限时，则通过使用长焦镜头并最大化工作距离，将误差影响降至可接受范围，从而在复杂三维运动背景下获取尽可能准确的二维位移测量结果。

5.4 边缘计算模块

5.4.1 边缘计算是指将原本由中心服务器或云端完成的数据处理与计算任务，下沉至靠近数据采集源的现场计算单元，在本地完成数据处理、分析与结果输出的一种计算模式。在基于数字图像法的位移测量系统中，边缘计算模块通常部署于工业相机附近，作为连接图像采集设备与后端监测平台的现场计算节点。

5.4.2 在工程应用中，边缘计算模块通常依托工控机和单板计算机或嵌入式计算平台等硬件载体实现。

1) 工控机：具有计算能力较强、接口资源丰富、环境适应性好的特点，适合用于测点数量多、计算任务复杂或需同时接入多台工业相机的应用场景。但其体积较大、功耗相对较高，对供电条件和安装空间要求较高，不利于在空间受限或长期低功耗监测场景中部署。

2) 单板计算机或嵌入式计算平台：以 ARM 架构为代表的单板计算机或嵌入式平台具有体积小、功耗低、集成度高的优势，适合与工业相机一体化安装，满足工程现场长期连续运行的需求。

5.5 靶标

5.5.1 本条规定了位移测量中靶标设计、制造与使用的综合性技术要求。其目的在于，确保作为位移计算与追踪核心基准的靶标，能够在复杂工程现场的各类光照与环境条件下，始终为成像系统提供稳定、可靠、高信噪比的图像特征，从而保障数据采集的连续性与准确性。靶标由特征图案靶面、安装支架及基座构成，其中特征图案具有明显纹理（散斑、条纹、不规则图案等）信息即可。

5.5.2 本条规定了靶标安装结构的性能要求。通过要求安装支架与基座具备极高的刚度和稳定性，最大限度地隔离环境振动、风荷载等外部干扰对测量基准点的影响，从而确保所测位移数据纯粹反映工程结构自身的变形，避免因安装体系晃动引入无法区分和消除的系统性测量误差。

6 静态位移测量

6.2 设备安装与防护

6.2.1 本条文规定了静态位移测量对设备设置的相关要求。

1 旨在优化成像系统与位移方向间的空间几何关系。通过使视线方向与位移方向正交，最大化目标运动在图像平面上的投影效率与测量灵敏度；

2 最小化因靶标平面与成像平面不平行导致的图像透视畸变，从而保证图像特征的稳定性和一致性；

3 建立测量系统的绝对空间参考基准。即在测量场内设立一个理论上不动的物理点，用于在后期数据处理中识别和剔除由整个测量系统（非结构本身）产生的刚性位移或缓慢漂移，从而分离出纯粹的结构变形。

4 采用多台相机进行结构位移测量时，必须采用硬件同步触发或其他可靠的技术手段，强制所有参与测量的相机在每一个采样时刻严格同步地曝光和采集图像，确保所有相机获取的是同一物理时刻的结构状态信息。

6.2.4 规定了靶标在图像中成像尺寸的量化下限。目的在于确保图像中的靶标区域包含足够数量的像素，以满足亚像素位移算法对模板信息量的最低需求，从而保证位移解算的数学稳定性和最终精度。

6.3 静位移解算

6.3.1 本条规定设备安装后必须执行的预处理操作流程。通过相机标定、环境适应性试采集和精度验证这一系列标准化步骤。

1 建立表征图像空间与物理空间精确映射关系的标定方法。针对

不同的测量距离，提供已验证的、可操作的标定方案，以获取将像素位移转换为真实物理位移所必需的、准确的尺度因子或相机模型参数，这是实现定量化位移测量的首要前提。

2 通过不少于一个完整日周期的连续采集，主动暴露并评估昼夜更替带来的光照、温度等环境因素变化对成像质量与系统稳定性的综合影响，为判断系统是否适应长期监测环境及后续补偿提供关键依据。

3 通过与更高精度等级的标准位移装置进行比对测试，定量评估系统精度是否满足工程应用的最低要求（如表 6.3.1），为测量数据的可信度提供实证支撑与合格判据。

6.3.2 本条目的在于，基于预处理阶段获取的系统响应与环境参数数据，构建误差补偿数学模型，对原始位移测量结果进行软件修正，从而主动抑制温湿度、光照等时变环境因素引起的系统性漂移，提升系统测试精度。

6.3.3 规定了从原始图像到最终位移结果的标准化解算流程。确立一套涵盖图像预处理、目标识别、位移追踪、环境补偿、单位换算与数据滤波的完整数据处理流程，以确保位移解算过程的科学性、一致性与可重复性。

7 动态位移测量

7.1 一般规定

7.1.3 奈奎斯特定理是指信号采样频率必须大于被测信号最高频率成分的至少两倍以上，以确保无失真还原原始信号的强制性准则，工程测试总要达到较好的测试精度，一般采样频率宜大于被测信号最高频率成分的 5 倍以上。