



T/CECS XXX—202X

中国工程建设标准化协会标准

预制混凝土构件机器视觉检测标准

**Standard for machine vision inspection of precast concrete
components**

(征求意见稿)

中国 xx 出版社

中国工程建设标准化协会标准

预制混凝土构件机器视觉检测标准

Standard for machine vision inspection technology of precast concrete components

T/CECS XXX—202X

主编单位：中国建筑标准设计研究院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X年XX月XX日

中国xx出版社

202X 北京

前 言

《预制混凝土构件机器视觉检测标准》（以下简称规程）是根据中国工程建设标准化协会《关于印发《2025年第一批协会标准制订（修订）计划》的通知》（建标协字〔2025〕22号）的要求进行编制的。编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分为8章，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、设备要求、预制构件成像、预制构件检测、数据分析对比、检测结果保存。

本标准由中国工程建设标准化协会建筑产业化分会归口管理，由中国建筑标准设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释。标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，规程的发布机构不承担识别专利的责任。本标准在使用过程中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送至解释单位（地址：北京市海淀区首体南路9号主语国际，邮政编码：100048，电子邮箱：hanwenlong9122@163.com），以供修订时参考。

主编单位：中国建筑标准设计研究院有限公司

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总 则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 主要符号	3
3 基本规定	4
4 设备要求	6
5 预制构件成像	10
5.1 一般规定	10
5.2 图像获取	10
5.3 图像预处理	11
6 预制构件检测	14
6.1 一般规定	14
6.2 特征识别	14
6.3 尺寸测量	16
7 数据分析对比	23
8 检测结果保存	24
用词说明	25
引用标准名录	26

Contents

1 总 则

1.0.1 为规范预制混凝土构件机器视觉检测技术的应用，做到技术先进、数据可靠、安全适用，制定本标准。

【条文说明】近年来国家大力推广装配式建筑，装配式建筑已成为我国建设领域重要的建造技术。标准化、系列化、高品质的预制混凝土构件，是装配式建筑的重要组成，直接影响装配式混凝土建筑主体结构的质量。目前，国内外预制混凝土构件质量检验普遍采用传统人工检测，检测效率低且受人为因素影响大，无法满足生产厂商大规模批量生产的检验需求，使得现有预制混凝土构件出厂检验流于形式，未起到促进预制混凝土构件高品质发展的初衷。

近年来，三维激光扫描、机器视觉检测等非接触检测技术以其高效、准确的特点，在工业零件的高效在线检测领域得到了广泛应用，极大地提升了生产效率和产品质量。然而，在预制混凝土构件这一特定领域，由于其定制化程度高、标准化程度相对较低，以及生产环境复杂多变等特点，这些先进检测技术的应用相对滞后。本标准编制组依托“十四五”国家重点研发计划项目《装配式混凝土建筑主体结构质量智能检测监管关键技术与示范》，从检验技术、设备、计量和评价方法等方面对预制混凝土构件机器视觉检测技术开展了系统性研究工作，形成了预制构件尺寸与缺陷即时检验成套技术与设备。依托研究成果，在预制混凝土构件实际生产中开展了大规模应用测试，测试结果表明，与传统人工检测相比，机器视觉检测技术不受人为因素影响，能够持续、稳定地提供准确的检测结果；单条产线质检人员可由3名减少至1名，降低人工成本约30万元；可实现预制构件模具检、隐检的全面覆盖，提前预警，降低生产成本；可大幅提高预制构件质检有效率及智能化水平，实现质量可追溯。

制定本标准的目的，是进一步规范、推动机器视觉检测技术在预制混凝土构件质量检测中的应用，推动建立适用于工业化、规模化制造的预制混凝土构件产品在线即时检验技术体系。

1.0.2 本标准适用于预制混凝土构件生产过程中成品检验、模具检验和隐蔽工程的机器视觉检测。

1.0.3 预制混凝土构件机器视觉检测除应符合本标准规定外，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 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 预制混凝土构件 precast concrete component

在工厂或现场预先生产制作的混凝土构件。简称预制构件。

2.1.2 机器视觉 machine vision

采用计算机模拟人的视觉功能，从客观事物的图像中提取信息，进行处理并加以理解，最终用于实际检测、测量和控制。

2.1.3 三维矩阵相机组 three-dimensional matrix camera set

由平行光轴和多台工业相机按空间矩阵排列组成的高速采集三维成像设备，用于图像获取和三维动态成像。

2.1.4 三维点云 three-dimensional point cloud

由三维矩阵相机组通过多视角同步采集的二维图像，经算法处理生成的、表征预制混凝土构件表面几何形态的离散三维坐标数据集，与图像像素对应，可通过图像处理和图像识别算法得到物体边缘的三维坐标。

2.1.5 三维矩阵相机测量基线

由三维矩阵相机多台工业相机镜头焦点所组成的平面矩阵的尺寸值。

2.1.6 图像测量分辨率 image measurement resolution

图像测量系统可以测到的受检物体上的最小可分辨特征尺寸。

2.1.7 图像测量像素平面分辨率 pixel plane resolution for image measurement

图像中像素的一个像元尺寸在测量空间所对应的被测物在与图像平面平行方向上的实际空间尺寸。

2.1.8 图像测量像素深度分辨率 pixel depth resolution for image measurement

图像中像素的一个像元尺寸在测量空间所对应的被测物在与图像平面垂直方向上的实际空间尺寸。

2.1.9 测量视场范围 field of view

在指定距离上，图像测量系统可以测量到的被测物体的可视范围，也就是图像像素所覆盖的被测物体范围。

2.1.10 工作距离 work distance

镜头的最下端到被测物之间的最佳测量距离。

2.2 主要符号

D —— 视野长；
 G —— 相机传感器短边尺寸；
 F_r —— 帧率
 N —— 视野内成像数；
 V —— 预制混凝土构件运动速度；
 W —— 相机短边的视野范围；
 W_D —— 工作距离；
 f —— 焦距。

3 基本规定

3.0.1 预制混凝土构件视觉检测宜采用三维矩阵相机组进行图像获取。

【条文说明】传统二维图像测量方法通过模拟人类双眼获取目标场景的方式来实现对三维空间的感知，即针对同一目标从不同角度的两张照片中获得该目标的三维空间坐标，需要预制构件平面与相机的距离保持不变，且存在固有的双目匹配歧义性，无法满足构件品种多样化的要求。三维矩阵相机组视觉检测方法基于矩阵相机自身坐标关系实现空间感知，可消除二维图像识别的匹配歧义，测量精度可达毫米级，测量速度快，不依赖激光、红外等辅助手段，适用于预制构件工厂的质检环境和需求，可通过图像拼接技术实现大场景测量。

3.0.2 机器视觉检测技术可用于预制混凝土构件成品检验、模具检验和隐蔽工程检验等环节的质量检测，适用于下列情况：

- 1 预制混凝土构件成品三维外形尺寸偏差测量；
- 2 预制混凝土构件成品表面平整度、侧向弯曲测量；
- 3 预制混凝土构件成品预埋部件、预留孔洞、预留插筋等外形尺寸及位置偏差测量；
- 4 预制混凝土构件钢筋长度、位置偏差测量；
- 5 预制混凝土构件模具尺寸偏差测量；
- 6 预制混凝土构件模具上预埋件、预留孔洞安装偏差测量。

3.0.3 检测环境应避免强光、强电磁场、强振动、腐蚀性气体和严重粉尘等不利因素。

【条文说明】视觉检测技术虽可适应一定的环境变化，但强光、强电磁场、强振动、腐蚀性气体和严重粉尘等可能影响图像质量，进而影响检测精度和数据处理效率，在设备安装时应注意考虑。

3.0.4 预制混凝土构件机器视觉检测流程包括图像获取、图像处理、三维成像、图像识别、系统数据分析和检测结果保存（图 3.0.4）。

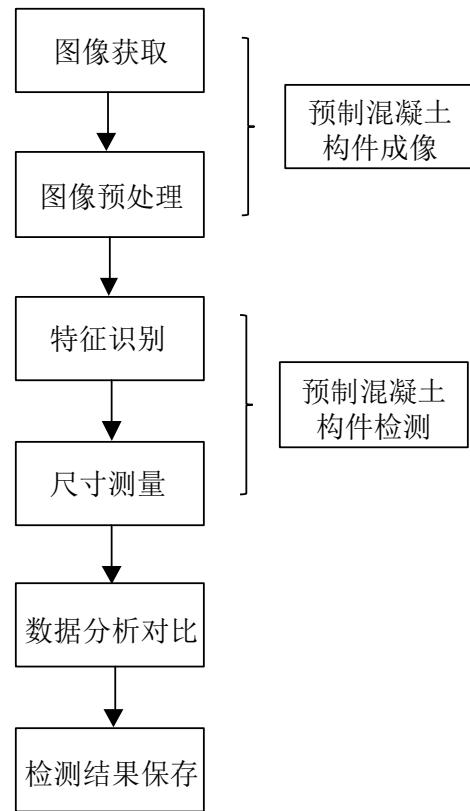


图 3.0.4 预制混凝土构件机器视觉检测流程图

4 设备要求

4.0.1 预制混凝土构件机器视觉检测设备应包括三维成像设备、数据传输存储模块和数据查看及调用终端等功能模块。

4.0.2 预制混凝土构件机器视觉检测设备各功能模块宜根据预制构件特征、成像要求、环境条件、检测距离、响应速度和检测精度等条件或要求合理配置。

4.0.3 三维成像设备应由图像获取设备、三维图像运算设备、电气控制装置和数据采集及处理模块等组成，其中，图像获取设备应包括一组或多组三维矩阵相机组、镜头和光源。

4.0.4 每组三维矩阵相机组宜由四台工业相机组成，并应符合下列规定：

1 相机应使用全局快门工业相机，芯片宜为 CMOS/CCD，数据传输模式为 USB、高速图像数据传输协议（Camera Link）、千兆以太网（Gige）、串行通信协议（1394a/1394b）或非对称的高速点对点串行通信数字接口（CoaXPress）等，颜色为彩色、黑白，接口为 C、CS 或 F；

2 相机分辨率和帧率应满足测量精度及动态响应要求，分辨率不应低于 4000×3000 像素，分辨率宜高于 9000×7000 像素；

3 相机靶面尺寸不应低于 1，宜采用 3.5 吋靶面工业相机；

4 相机像素位深不应低于 12bit；

5 相机成像应反差适中、色调一致、纹理清楚、层次丰富、不失真、无偏色；

6 单台相机最小视场不宜小于 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 。

【条文说明】全局快门工业相机通过同步曝光进行图像采集，大幅缩短曝光时间，从根本上消除果冻现象，适合捕捉运动物体。同时工业相机具有性能稳定、可连续工作时间长的优点，相较于普通相机而言畸变小。

4.0.5 图像获取用工业相机镜头的接口类型应与工业相机的接口类型匹配，并应符合下列规定：

1 镜头靶面尺寸不应低于相机感光元件的尺寸；

2 镜头分辨率不应低于相机感光元件的物理分辨率；

3 镜头景深应满足预制混凝土构件预埋件及钢筋清晰成像的要求；

4 镜头应为定焦镜头，镜头焦距应根据检测距离、精度要求、感光元件像元尺寸及亚像素细分数确定，选用 8mm、16mm、25mm、50mm、100mm 等标准焦距的镜头；

5 调整镜头光圈时应保证图像灰度适中，避免图像过曝或过暗。

4.0.6 图像获取设备的三维矩阵相机组的组成应符合下列规定：

1 三维矩阵相机组的工业相机的图像传感器应布置在同一个平面，工业相机应固定在同一个刚性支架上，四台工业相机的像素扫描线在水平和垂直方向分别对齐；

2 刚性支架宜采用温度系数小的铝合金材质；

3 三维矩阵相机组之间要求固定在同一个刚性支架上，保证多组矩阵相机的刚性连接；

4 单组三维矩阵相机组的测量基线不宜小于 500mm×200mm。

【条文说明】三维矩阵相机组一般由四台工业相机组成，基于矩阵相机自身坐标关系实现空间感知，消除二维图像识别的匹配歧义。为保证三维矩阵相机组中工业相机自身坐标关系的稳定性，将四台工业相机通过刚性支架固定，刚性支架宜采用温度系数小的铝合金材质，避免在环境温度变化时四台工业相机相对位置发生较大变化进而影响测量精度。

4.0.6 三维图像运算设备可由服务器内置 GPU 卡或 FPGA 卡等三维计算加速单元组成。

【条文说明】三维图像运算设备用于实现图像获取后的三维点云的图像立体匹配自动计算，可在服务器集成 GPU 卡或 FPGA 卡进行图像三维点云自动匹配运算，得到图像三维点云数据用于后续计算分析。采用 GPU 卡或 FPGA 卡进行点云运算具有计算速度快的优点，便于实现软硬一体化及算法芯片化，使双目运算过程中普遍存在的软件多次迭代和非标准化计算转变为完全可预测、具有明确几何意义的标准化运算，且上述运算可芯片化，实现三维矩阵相机的高速、实时三维成像。

4.0.7 三维成像设备宜外接补充照明光源，外接补充照明光源宜选取 LED 光源，并采用表面光的打光方式。

【条文说明】尽管三维矩阵相机视觉检测对环境光线的敏感度低于其他非接触测量技术，但考虑到检测精度、图像运算效率和固定检测部署条件，宜设置 LED 照明补光装置缓解背景干扰问题。

4.0.8 三维成像设备应安装在预制混凝土构件生产线上视野无遮挡、光线稳定的位置，避免直射光、反射光、雨雪等不利环境因素的干扰。

4.0.9 三维成像设备应安装在刚性支架上，刚性支架可采用固定式或移动式，三维矩阵相机与刚性支架间宜采用隔振弹性连接。

【条文说明】三维成像设备的三维矩阵相机组、光源集成安装在同一刚性支架上，可保证矩阵相机自身坐标关系和光环境的稳定性。预制混凝土构件生产线为流水线时，刚性支架可采用固定式安装在生产线上，通过模台移动实现预制构件三维成像扫描；

预制混凝土构件生产线为固定模台时,刚性支架可采用移动式安装在生产线上,通过刚性支架移动实现预制构件三维成像扫描。三维矩阵相机与刚性支架间宜设置隔振垫,消除生产车间振动对三维成像的不利影响,保证三维矩阵相机结构的稳定性和三维成像的质量。

4.0.10 三维成像设备安装完成后应进行调试与标定,标定完成后成像系统的焦距、光圈、相机位置、工作距离等均应保持不变。

【条文说明】三维成像设备安装完成后,需进行调试与标定以保证测量精度。相机焦距、光圈、相机位置、工作距离等参数直接影响三维图像坐标运算,任一参数发生变化时均需对三维成像设备重新标定。

4.0.11 当发生下列情况时,应对三维成像设备进行标定:

- 1 三维成像设备设备首次使用时;
- 2 使用期内满一年未进行标定时;
- 3 三维成像设备发生维修或移动时;
- 4 测量过程中发现异常数值,经分析是三维成像设备导致时。

4.0.12 三维成像设备的数据采集及处理模块应符合下列规定:

1 宜采用嵌入式工业控制计算机或板卡,且具备边缘计算能力;
2 模块运算能力和运算速度应满足响应速度需求;
3 应具有本地存储能力,可缓存不少于30天的原始图像和数据,原始图像宜采用无压缩格式存储。

4.0.13 三维成像设备的电气控制装置宜包括PLC可编程序控制器、空气开关、接近开关和直流电源模块,具备相机及外接补充照明光源供电、照明系统控制、三维矩阵相机拍摄控制和预制混凝土构件信息反馈等功能。

4.0.14 预制混凝土构件机器视觉检测设备的数据传输存储模块应符合下列规定:

1 宜为数据服务器,宜配置机柜、交换机和显示器;
2 应配备多种通讯接口,包括以太网或Wi-Fi、4G或5G、RS485等;
3 数据传输存储模块与服务器断开连接后,应能自动尝试重新连接,并实现数据的本地缓存;
4 数据传输存储模块与服务器重新连接后,应优先将缓存数据发送至服务器。

4.0.15 预制混凝土构件机器视觉检测设备的数据查看及调用终端应符合下列规定:

- 1 应可动态显示测量系统的各种工作状态,并可动态查看当前和历史测量数据;
- 2 应可调用被检测预制混凝土构件的图纸或BIM数据;

3 宜通过光纤与数据传输存储模块连接。

4.0.16 预制混凝土构件机器视觉检测设备的图像测量像素平面分辨率不宜大于0.5mm, 图像测量像素平面分辨率宜按下式计算:

$$R_x = \frac{W_D \mu}{f} \quad (4.0.16)$$

式中: W_D ——工作距离 (mm);

μ ——相机传感器像元尺寸 (μm);

f ——焦距 (mm)。

【条文说明】根据现行国家标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231, 预制混凝土构件模具检验、隐蔽工程检验和成品检验的允许偏差要求均在毫米级。预制混凝土构件目前一般采用平模生产, 视觉检测设备一般通过垂直拍摄获取图像, 其在水平面内的测量精度高于垂直方向。考虑到预制构件平面内特征元素多且视觉检测设备在平面内的测量精度较高, 兼顾检测效率, 要求设备图像测量像素平面分辨率不宜大于0.5mm。图像测量像素平面分辨率可参照测量像素分辨率原理计算确定, 基于图像测量像素平面分辨率要求确定相机分辨率。

4.0.17 预制混凝土构件机器视觉检测设备的图像测量像素深度分辨率不宜大于1.0mm, 图像测量像素深度分辨率宜按下式计算:

$$R_z = \frac{nf}{\Delta_x} - \frac{nf}{\Delta_x + \mu} \quad (4.0.16)$$

式中: n ——矩阵相机两个光轴中心的间距, 也称测量基线 (mm) (mm);

μ ——相机传感器像元尺寸 (μm);

f ——焦距 (mm);

Δ_x ——被测物任意一点在矩阵相机测量基线对应的两幅图像上成像点之间的距离差值 (mm)。

【条文说明】考虑到视觉检测设备在垂直方向(深度方向)的测量精度低于水平面内, 且预制构件在垂直方向的质检特征较少, 兼顾图像处理效率和设备成本, 建议设备图像测量像素深度分辨率不宜大于0.5mm。

5 预制构件成像

5.1 一般规定

5.1.1 预制混凝土构件成像包括图像获取和图像预处理环节。

5.1.2 预制混凝土构件成像后应生成可用于特征识别、构件分割的三维点云图像。

5.2 图像获取

5.2.1 图像获取时，应根据相机传感器尺寸、镜头焦距和相机视野范围综合计算确定工作距离，工作距离按下式计算：

$$W_D = \frac{Wf}{G} \quad (5.2.1)$$

式中： W_D ——工作距离（mm）；

W——相机短边的视野范围（mm）；

f——焦距（mm）；

G——相机传感器短边尺寸（mm）。

5.2.2 图像获取过程中，应根据外界光照条件动态调整曝光参数。

【条文说明】预制混凝土构件生产车间一般为自然采光，其光照条件在一天内或不同天气下变化较大，在图像获取过程中应根据光照条件变化调整相机曝光参数，以避免图像出现过曝和欠曝的问题。

5.2.3 同一矩阵相机组的相机镜头设置参数应保持一致，并应构建图像自动曝光及色度一致性评价函数。

【条文说明】同一矩阵相机组内的相机镜头参数保持一致，可保证图像灰度值和色度调整一致。

5.2.4 图像数据采集时应同步采集三维矩阵相机组中各个相机在同一时点拍摄的二维图像。

5.2.5 当三维矩阵相机组视场无法覆盖所测量的预制混凝土构件时，宜保持三维矩阵相机组固定，移动预制混凝土构件进行连续拍摄。

【条文说明】预制混凝土构件尺寸一般较大，固定部署的三维矩阵相机组的视场无法一次性覆盖整个预制混凝土构件，此时宜移动预制混凝土构件连续拍摄，通过后期图像拼接获取预制混凝土构件的整体图像。

5.2.6 使用三维矩阵相机组拼接获取移动中的预制混凝土构件图像时，应符合下列规定：

- 1 应保证三维矩阵相机组中四台相机的相对位置在检测过程中不发生变化;
- 2 使用多组矩阵相机组时, 各组矩阵相机间的相对位置在检测过程中应保持不变;
- 3 相邻两次拍摄的图像重合区域不应小于 30%, 重合区域应无明显色彩差异;
- 4 相机的帧率应满足下式的要求:

$$F_r \geq \frac{VN}{D} \quad (5.2.6)$$

式中: V ——预制混凝土构件运动速度 (m/s);

D ——视野长(m);

N ——视野内成像数;

F_r ——帧率(1/s)。

【条文说明】使用三维矩阵相机组拼接获取移动中的预制混凝土构件图像时, 每次测量时预制混凝土构件的位置均会发生变化, 需将每次测量时预制混凝土构件的坐标系映射在同一个坐标系内, 进而将每次测量的三维点云数据拼接在同一个坐标系中。为实现三维点云的高精度拼接, 开展的测试对比表面, 将每次测量的图像和前次测量的图像的重合区域设定不少于30%, 通过重合区域的公共点得到两次测量坐标的空间姿态和位置坐标, 进而计算得到两次坐标的平移矩阵和旋转矩阵参数, 可实现三维点云的高精度拼接, 同时可兼顾检测效率。

5.3 图像预处理

5.3.1 图像采集完成后应对采集的图像进行图像预处理运算, 图像预处理包括图像去噪、图像增强、畸变矫正、图像拼接和构件分割等过程。

【条文说明】图像采集完成后, 需对采集的图像进行预处理运算, 以提高后续三维点云运算的精度和效率。预处理运算可在工控机内完成, 也可在GPU卡上完成, 常用的图像预处理算法包括图像矫畸、图像对齐和裁剪、图像二值化等。

5.3.2 图像去噪处理应符合下列规定:

- 1 当图像中出现与检测对象无关的异常像素或像素簇、且影响图像质量或干扰检测时, 宜通过均值滤波、高斯滤波、中值滤波等方式减少图像中的随机噪声;
- 2 滤波器大小应根据图像噪声强度和分辨率等因素配置;
- 3 图像经去噪处理后信噪比不应低于 30dB, 峰值信噪比不应低于 25dB, 且图像细节损失不应超过 5%。

【条文说明】预制混凝土构件生产环境干扰因素较多, 采用均值滤波、高斯滤波、中值滤波等方式减少图像中的随机噪声, 增强图像中边缘和纹理等重要特征, 有助于提

高后续边缘和关键特征的识别精度。

5.3.3 图像增强处理应符合下列规定：

- 1 图像增强处理宜包括灰度变换、边缘增强等；
- 2 图像灰度变换应修正光照不均、局部欠曝或过曝及阴影干扰等因素引起的亮暗不均问题；
- 3 边缘增强应突出检测目标的轮廓和细节特征。

【条文说明】通过调整图像灰度以改善图像对比度或亮度，修正由于光照不均、局部欠曝或过曝以及阴影干扰等因素引起的亮暗不均问题，保证图像亮度均衡、色彩平滑、视觉一致。

5.3.4 图像畸变校正处理应符合下列规定：

- 1 图像畸变校正处理宜包括几何校正、光学畸变校正等；
- 2 几何校正应将图像比例与形态校准至符合真实情况的几何比例；
- 3 光学畸变校正宜根据镜头的畸变类型选择校正模型，镜头的畸变偏差不应超过 0.02 像素，重投影误差宜小于 0.1 像素。

【条文说明】通过图像畸变校正处理消除因工业相机或环境变化引起的几何形变。几何校正用于校正因拍摄角度或相机位置引起的比例失真或形态偏斜。光学畸变由镜头特性引起，包括径向畸变与切向畸变两类，应根据具体畸变类型选择对应的校正模型。径向畸变模型适用于桶形和枕形畸变，鱼眼畸变模型适用于超广角或鱼眼镜头引起的显著弯曲畸变。

5.3.5 通过三维点云拼接算法进行多组图像在两个方向的拼接，获取完成的预制混凝土构件图像三维点云数据。

【条文说明】预制混凝土构件尺寸变化较大，实际检测中难以通过一组三维矩阵相机一次拍摄获得整个预制构件的图像，在两个方向不可避免需通过图像拼接获得整个预制构件的图像。为实现多组图像的高精度拼接，通过测试对比，将每次测量的图像和前次测量的图像的重合区域设定不少于 30%，通过重合区域的公共点得到两次测量坐标的空间姿态和位置坐标，进而计算得到两次坐标的平移矩阵和旋转矩阵参数，实现图像三维点云拼接。为保证检测效率，图像拼接宜通过三维点云自动拼接算法实现，具体包括以下步骤：1) 输入图像；2) 将图像分割成 $S \times S$ 网格区域；3) 对每一个区域分别提取特征点；4) 特征匹配；5) 特征点滤波，使用 F 矩阵、斜率、统计学滤波、RANSAC 等滤波算法；6) 根据特征点计算特征点的空间坐标；7) 使用 ICP、PNP 求取姿态；8) BA 优化姿态；9) 根据姿态进行点云拼接。

5.3.6 在同一模台上同时生产多个预制混凝土构件时，根据排产信息对拼接后的图像三维点云数据进行分割，获得单个预制构件的图像三维点云数据。

【条文说明】为充分利用模台，一般在同一模台上同时生产多个预制构件，拼接后的

图像为整个模台的图像，为便于后续预制构件特征识别和尺寸测量，根据模台预制构件排产信息，对整个模台的图像进行自动分割获得单个预制构件的图像三维点云数据。

5.3.7 预处理后的图像应符合下列要求：

- 1** 预处理后的图像应能真实反映预制混凝土构件的形状、边缘特征；
- 2** 预处理后的图像应具备几何一致性；
- 3** 预处理后的图像像素偏移不应大于 0.5 像素，图像主点位移不应大于 0.1 像素。

6 预制构件检测

6.1 一般规定

- 6.1.1** 预制混凝土构件检测应包括特征识别与尺寸测量环节。
- 6.1.2** 采用机器视觉技术检测预制混凝土构件的尺寸偏差时, 检测项目应按现行国家标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231 的规定选取, 并应符合本标准的相关要求。
- 6.1.3** 采用机器视觉技术进行预制混凝土构件模具、隐蔽工程和成品尺寸偏差检验时, 宜逐件检查。

【条文说明】预制混凝土构件模具、隐蔽工程和成品尺寸偏差检验目前多采用人工尺量方式, 检测效率低, 允许抽样检查或全数检查。预制混凝土构件机器视觉检测设备多集成在生产线上, 且检测效率高, 便于实现全数检查, 因此建议逐件检查以实现提前预警, 降低成品不合格率, 降低生产成本, 提高预制构件质量。

6.2 特征识别

- 6.2.1** 宜采用经过训练的人工智能识别模型进行预制混凝土构件检测项目的特征识别。

【条文说明】图像特征识别方法分为传统图像特征识别方法和基于机器学习的图像特征识别方法。传统图像特征识别方法需手工设计特征描述符, 即由专家根据对图像的理解, 设计出特定的算法来提取图像中的关键点、边缘、纹理等信息, 在受限场景下有效, 但泛化能力有限。近年来, 基于机器学习的图像特征识别方法得到了广泛应用, 其核心是使用深度卷积神经网络(CNN)自动从海量数据中学习特征的层次化表达, 而无需手工设计, 具有自动学习、精度高和泛化能力强等优点。预制混凝土构件类型多、检测特征多, 采用机器学习技术可兼容不同类型预制构件的特征识别。通过采集和标注大量的测量数据, 通过机器学习技术和三维数据结合实现预制构件关键特征的识别, 完成预制构件尺寸与缺陷的自动测量。基于YOLOv11模型开发了预制构件关键特征自动识别模型, 实测表明, 人工智能识别模型针对预制构件轮廓、外伸钢筋、桁架钢筋、预留孔、预埋线盒、预埋件等关键特征的自动识别精度不低于90%, 使用YOLOv11模型为基础网络进行检测的技术方案可满足预制构件检测要求。

- 6.2.2** 选用的预制混凝土构件特征识别模型宜能自动识别预制构件轮廓线、模具轮廓线、钢筋、预埋部件、预留孔、预留洞和外伸钢筋等关键特征。

【条文说明】预制混凝土构件生产检验主要包括预制构件模具检验、隐蔽工程检验和成品检验。根据现行国家标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231-2016, 模

具检验项目主要包括模具轮廓尺寸、对角线差、侧向弯曲和平整度等特征，隐蔽工程检验主要包括钢筋位置、预埋件和预留孔洞等特征，成品检验主要包括外形尺寸、预埋件部件、预留孔、预留洞、外伸钢筋、桁架钢筋、吊环等特征，预制混凝土构件特征识别模型应能自动识别上述特征，从而实现高效、准确检测。

6.2.3 人工智能特征识别模型应采用机器学习方法实现预制混凝土构件特征识别，包括样本标注、模型训练和检测判别等主要步骤，并应符合下列要求：

- 1** 应采集和标注足够量的测量数据作为数据样本，并按合理比例划分训练集与测试集；
- 2** 应设置合理的置信度阈值平衡检测精度和漏检率，训练后模型的特征检测精度不宜低于 95%，漏检率不宜高于 5%；
- 3** 当检测精度和漏检率不满足要求时，应扩大训练集重新进行模型训练；
- 4** 单张图片的检测速度应满足整体检测要求。

【条文说明】预制混凝土构件特征人工智能特征识别模型在进行检测应用前需进行训练，对测试样本特征进行人工标注，训练集与测试集比例可取为 8:2，通过调整置信度阈值平衡检测精度和漏检率。

6.2.4 用于人工智能特征识别模型训练的数据样本应能代表预制混凝土构件实际生产过程中的各种工况，并应包含不同光照条件、不同构件姿态、不同型号规格以及带有常见缺陷和污染物的图像。数据样本应进行定期评估和扩充。

【条文说明】为提高人工智能特征识别模型的适应能力，用于模型训练的数据样本应包括不同类型、不同规格尺寸的预制构件，同时应覆盖生产车间不同时段的光照条件、常见缺陷和污染物等。

6.2.5 特征识别模型应建立版本管理制度。当预制混凝土构件形式变化较大、生产工艺发生重大调整或识别精度持续下降时，应对特征识别模型进行更新、重新训练和验证，并保存更新记录。

6.2.6 对于遮挡、反光、边缘模糊等导致特征提取困难的情况，宜采用多特征融合、上下文推理等算法进行综合判断，或标记为需人工复核项，不应输出不确定的识别结果。

【条文说明】预制混凝土构件生产环境较为复杂，干扰因素多，因干扰导致特征提取困难时，特征识别模型应予以标注，以避免漏检。

6.2.7 预制混凝土构件特征识别完成后，应输出包含特征类型、像素坐标、置信度等信息的结构化数据，并宜将识别结果叠加在原始图像或三维点云模型上进行可视化校核。

6.3 尺寸测量

6.3.1 尺寸测量前应对预制混凝土构件机器视觉检测设备的尺寸测量精度进行校准和计量,宜采用专用校准装置和标定板作为预制混凝土构件机器视觉检测设备的标准计量基准,并通过软件标定,将标定板影像测量结果校准至与标准计量基准保持一致,校准方法可参考现行国家标准《影像测量仪校准规范》JJF 1318 的有关规定。

【条文说明】预制混凝土构件机器视觉检测设备的尺寸测量包括硬件图像采集和软件处理计算两个步骤。在进行尺寸测量前应对预制混凝土构件机器视觉检测设备的精度进行标定,预制混凝土构件机器视觉检测设备一般为定制设备,目前尚无校准规范,但其与影响测量仪的测量原理基本类似,可参考现行国家标准《影像测量仪校准规范》JJF 1318对其进行校准和计量。实际应用中,可将多个标定板放置在同一个标定架上,标定板黑白格采用专用铝合金材料激光刻蚀加工,保证黑白格的尺寸精度,将标定板调整至同一平面上,通过软件标定,将影像测量结果校准至与标定板实际尺寸一致,进而完成设备的校准和标定。

6.3.2 预制构件的轮廓尺寸测量应按下列流程进行:

- 1 在二维图像上寻找边缘和中部的直线特征,提取直线之间的交叉点作为轮廓角点;
- 2 基于三维点云平面形成预制构件的外部、内部表面;
- 3 通过三维点云数据集合获得预制构件外轮廓、内部预埋件的边缘尺寸。

【条文说明】获得经过预处理后的单个预制构件的图像三维点云数据后,首先在二维图像上通过霍夫变换在垂直和水平方向寻找边缘和中部的直线特征,然后将上述直线之间的交叉点形成轮廓的角点,进一步结合三维点云平面形成构件的外部、内部的轮廓表面,通过三维数据拟合直接得到构件的外部轮廓尺寸、内部预埋件的边缘尺寸。

6.3.3 将预制构件外轮廓测量数据与预制构件外轮廓设计信息比对,进行缺棱掉角、棱角不直、翘曲不平、飞出凸肋等外形缺陷检测。

【条文说明】机器视觉检测技术可用于预制构件外形缺陷的检测,受限于图像处理和计算效率,目前尚难以应用于孔洞、夹渣、疏松、外表缺陷的检测。

6.3.4 通过预制构件的外轮廓计算得到构件表面两个对角线的长度,取其绝对值的差值作为对角线差。

6.3.5 模具、预制构件表面平整度的测量应按下列流程进行:

- 1 基于模具或预制构件轮廓识别结果,获得表面三维点云分布;
- 2 采用平面拟合算法寻找最大公共平面;
- 3 计算所有点云相对最大公共平面在垂直方向的偏离值,取偏离值绝对值最大

值作为表面平整度偏差值。

6.3.6 模具、预制构件侧向弯曲的测量应按下列流程进行：

- 1 基于模具或预制构件外轮廓识别结果，获得外轮廓各边两端点连线直线；
- 2 计算外轮廓各边所有点云相对两端点连线直线在垂直方向的偏离值，取偏离值绝对值最大值作为侧向弯曲值。

6.3.7 通过外伸钢筋的两边外轮廓计算得到外伸钢筋中心线，基于外伸钢筋中心线测量外伸钢筋中心线位置偏移和外露长度偏差。

6.3.8 对于叠合楼板钢筋桁架，宜通过特征识别获取钢筋桁架上弦钢筋的中心线，基于上弦钢筋中心线测量钢筋桁架露出预制底板混凝土上表面的高度。

【条文说明】叠合楼板是目前建筑中应用最为广泛的预制构件，钢筋桁架外露高度直接影响楼板厚度和水电管线穿设。对于钢筋桁架外露高度测量，首先识别寻找钢筋桁架上弦钢筋的中心线，通过上弦钢筋的中心线计算其相对预制底板混凝土表面所在平面的高度偏差得到钢筋桁架露出预制底板混凝土表面的高度。上述算法同样可以用于预制构件钢筋笼隐蔽工程的识别检测。

6.3.9 对于预埋钢板、预埋螺栓、预埋线盒、预留孔、预留洞和吊环等检查项目，通过特征识别获取上述检查项目的边缘特征，基于边缘信息计算规格尺寸、中心线位置、外露长度或外露高度等信息。

【条文说明】预制构件上普遍存在预埋钢板、预埋螺栓、预埋线盒、预留孔、预留洞和吊环等部件，也是预制构件质量检验的重点，机器视觉检测技术可通过特征识别获得上述部件的边缘信息，基于边缘信息计算其位置和规格尺寸偏差。

6.3.10 机器视觉检测技术对预制楼板类构件成品检验尺寸偏差测量的适用范围及其人工测量校准方法应符合表 6.3.10 的规定。

表 6.3.10 预制楼板类构件成品检验尺寸偏差测量的适用范围及其人工测量校准方法

项次	检查项目		人工测量校准方法	适用性
1	规格尺寸	长度	用尺量两端及中间部，取其中偏差绝对值较大值	适用
2		宽度	用尺量两端及中间部，取其中偏差绝对值较大值	适用
3		厚度	用尺量板四角和四边中部位置共8处，取其中偏差绝对值较大值	适用
4	对角线差		在构件表面，用尺量测两对角线的长度，取其绝对值的差值	适用
5	外形	表面平整度	用2m靠尺安放在构件表面上，用楔形塞尺量测靠尺与表面之间的最大缝隙	适用

项次	检查项目		人工测量校准方法	适用性
6		楼板侧向弯曲		拉线, 钢尺量最大弯曲处
7		扭翘		四对角拉两条线, 量测两线交点之间的距离, 其值的2倍为扭翘值
8	预埋部件	预埋钢板	中心线位置偏差	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
			平面高差	用尺紧靠在预埋件上, 用楔形塞尺量测预埋件平面与混凝土面的最大缝隙
9		预埋螺栓	中心线位置 偏移	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
			外露长度	用尺量
10	预埋线盒 、电盒	在构件平面的水平方 向中心位置 偏差	用尺量	适用
			与构件表面混凝土高 差	用尺量
11	预留孔	中心线位置偏移		用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
		孔尺寸		用尺量测纵横两个方向尺寸, 取其最大值
12	预留洞	中心线位置偏移		用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
		洞口尺寸、深度		用尺量测纵横两个方向尺寸, 取其最大值
13	预留插筋	中心线位置偏移		用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
		外露长度		用尺量
14	吊环	中心线位置偏移		用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
		留出高度		用尺量
15	桁架钢筋高度		用尺量	适用

【条文说明】参考现行国家标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231的规定,结合机器视觉检测技术的测量适用性编写。

6.3.11 机器视觉检测技术对预制墙板类构件成品检验尺寸偏差测量的适用范围及其人工测量校准方法应符合表 6.3.11 的规定。

表 6.3.11 预制墙板类构件成品检验尺寸偏差测量的适用范围及其人工测量校准方法

项次	检查项目	人工测量校准方法	适用性
----	------	----------	-----

项次	检查项目		人工测量校准方法	适用性
1	规格尺寸	高度		用尺量两端及中间部, 取其中偏差绝对值较大值
2		宽度		用尺量两端及中间部, 取其中偏差绝对值较大值
3		厚度		用尺量板四角和四边中部位置共8处, 取其中偏差绝对值较大值
4	对角线差		在构件表面, 用尺量测两对角线的长度, 取其绝对值的差值	适用
5	外形	表面平整度		用2m靠尺安放在构件表面上, 用楔形塞尺量测靠尺与表面之间的最大缝隙
6		侧向弯曲		拉线, 钢尺量最大弯曲处
7		扭翘		四对角拉两条线, 量测两线交点之间的距离, 其值的2倍为扭翘值
8	预埋部作	预埋钢板	中心线位置偏移	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
			平面高差	用尺紧靠在预埋件上, 用楔形塞尺量测预埋件平面与混凝土面的最大缝隙
9		预埋螺栓	中心线位置偏移	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
			外露长度	用尺量
10		预埋套筒、螺母	中心线位置偏移	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
			平面高差	用尺紧靠在预埋件上, 用楔形塞尺量测预埋件平面与混凝土面的最大缝隙
11	预留孔	中心线位置偏移		用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
		孔尺寸		用尺量测纵横两个方向尺寸, 取其最大值
12	预留洞	中心线位置偏移		用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
		洞口尺寸、深度		用尺量测纵横两个方向尺寸, 取其最大值
13	预留插筋	中心线位置偏移		用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值
				单方向适用

项次	检查项目		人工测量校准方法	适用性
	外露长度		用尺量	适用
14	吊环	中心线位置偏移		用尺量测纵横两个方向的中心线位置,取其中较大值
		与构件表面混凝土高差		用尺量
15	键槽	中心线位置偏移		用尺量测纵横两个方向的中心线位置,取其中较大值
		长度、宽度		用尺量
		深度		用尺量
16	灌浆套筒 及 连接钢筋	灌浆套筒中心线位置		用尺量测纵横两个方向的中心线位置,取其中较大值
		连接钢筋中心线位置		用尺量测纵横两个方向的中心线位置,取其中较大值
		连接钢筋外露长度		用尺量

【条文说明】参考现行国家标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231的规定,结合机器视觉检测技术的测量适用性编写。

6.3.12 机器视觉检测技术对预制梁柱类构件成品检验尺寸偏差测量的适用范围及其人工测量校准方法应符合表 6.3.12 的规定。

表 6.3.12 预制梁柱类构件成品检验尺寸偏差测量的适用范围及其人工测量校准方法

项次	检查项目			人工测量校准方法	适用性		
1	规格尺寸	长度		用尺量两端及中间部, 取其中偏差绝对值较大值	适用		
2		宽度		用尺量两端及中间部, 取其中偏差绝对值较大值	适用		
3		高度		用尺量板四角和四边中部位置共8处, 取其中偏差绝对值较大值	适用		
4	表面平整度			用 2m 靠尺安放在构件表面上, 用楔形塞尺量测靠尺与表面之间的最大缝隙	适用		
5	侧向弯曲			拉线, 钢尺量最大弯曲处	适用		
6	预埋部件	预埋钢板	中心线位置偏移	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值	适用		
			平面高差	用尺紧靠在预埋件上, 用楔形塞尺量测预埋件平面与混凝土面的最大缝隙	适用		
7	预埋螺栓	中心线位置偏移		用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值	适用		
		外露长度		用尺量	适用		

项次	检查项目		人工测量校准方法	适用性
8	预留孔	中心线位置偏移	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值	适用
		孔尺寸	用尺量测纵横两个方向尺寸, 取其最大值	适用
9	预留洞	中心线位置偏移	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值	适用
		洞口尺寸、深度	用尺量测纵横两个方向尺寸, 取其最大值	适用
10	预留插筋	中心线位置偏移	用尺量测纵横两个方向的中心线位置。取其中较大值	适用
		外露长度	用尺量	适用
11	吊环	中心线位置偏移	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值	适用
		留出高度	用尺量	适用
12	键槽	中心线位置偏移	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值	不适用
		长度、宽度	用尺量	不适用
		深度	用尺量	不适用
13	灌浆套筒及连接钢筋	灌浆套筒中心线位置	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值	不适用
		连接钢筋中心线位置	用尺量测纵横两个方向的中心线位置, 取其中较大值	单方向 适用
		连接钢筋外露长度	用尺量测	适用

【条文说明】参考现行国家标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231的规定，结合机器视觉检测技术的测量适用性编写。

6.3.13 机器视觉检测技术对预制构件模具检验尺寸偏差测量的适用范围及其人工测量校准方法应符合表 6.3.13 的规定。

表 6.3.13 预制构件模具检验尺寸偏差测量的适用范围及其人工测量校准方法

项次	检验项目、内容		检验方法	适用性
1	长度		用尺量平行构件高度方向, 取其中偏差绝对值较大处	适用
2	宽度、高 (厚)度	墙板	用尺测量两端或中部, 取其中偏差绝对值较大处	适用
3		其他构件		适用
4	底模表面平整度		用2m靠尺和塞尺量	适用
5	对角线差		用尺量对角线	适用
6	侧向弯曲		拉线, 用钢尺量测侧向弯曲最大处	适用
7	翘曲		对角拉线测量交点间距离值的两倍	适用
8	组装缝隙		用塞片或塞尺量测, 取最大值	不适用

项次	检验项目、内容	检验方法	适用性
9	端模与侧模高低差	用钢尺量	适用

【条文说明】参考现行国家标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231的规定，结合机器视觉检测技术的测量适用性编写。

6.3.14 机器视觉检测技术对预制构件隐蔽工程尺寸偏差测量的适用范围及其人工测量校准方法应符合表 6.3.14 的规定。

表 6.3.14 预制构件隐蔽工程尺寸偏差测量的适用范围及其人工测量校准方法

项次	检验项目、内容		检验方法	适用性
1	钢筋	间距	钢尺检查	适用
2		数量	人工目测	适用
3		保护层	钢尺检查	适用
4	外伸钢筋	中心线位置	用尺量测纵横两个方向的中心线位置，记录其中较大值	
5		外露长度	用尺量测	适用
6	预埋件	中心线位置	用尺量测纵横两个方向的中心线位置，记录其中较大值	适用
7		平面高差	钢直尺和塞尺检查	适用
8	预留洞	中心线位置	用尺量测纵横两个方向的中心线位置，记录其中较大值	适用
9		尺寸	用尺量测纵横两个方向尺寸，取其最大值	适用
10	预埋线盒	中心线位置	用尺量测纵横两个方向的中心线位置，记录其中较大值	适用
11		平面高差	钢直尺和塞尺检查	适用
12	灌浆套筒及连接钢筋	灌浆套筒中心线位置	用尺量测纵横两个方向的中心线位置，取其中较大值	单方向适用
13		连接钢筋中心线位置	用尺量测纵横两个方向的中心线位置，取其中较大值	单方向适用
14		连接钢筋外露长度	用尺量测	适用

【条文说明】参考现行国家标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231的规定，结合机器视觉检测技术的测量适用性编写。

7 数据分析对比

7.0.1 预制构件检测完成后，将测量数据与经批准的预制构件设计图纸信息进行对比，计算并输出各项尺寸的偏差值。

7.0.2 数据分析对比系统应具备读取和解析主流格式（如 DWG、DXF、IFC 等）设计文件的能力，可将设计模型中的基准点、基准线、理论尺寸与设备获取的三维点云模型进行精确配准。

7.0.3 尺寸偏差的数据对比分析宜包括下列内容：

- 1** 预制构件及模具规格尺寸、外形与设计值的偏差；
- 2** 预埋钢板、预埋螺栓、预埋线盒、预留孔、预留洞和吊环等局部检验项目的规格尺寸和位置偏差；
- 3** 预制构件缺棱掉角、棱角不直、翘曲不平、飞出凸肋等外形缺陷检测。

7.0.4 数据分析结果应能自动判定各项偏差是否满足现行国家标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231 及设计文件规定的允许偏差要求，并对超出允许偏差要求的检验项目进行预警提示。

7.0.5 数据分析对比系统宜生成可视化的数据分析对比报告，并应包括下列内容：

- 1** 预制混凝土构件型号、批次、检测时间等基本信息；
- 2** 各检验项目测量项理论值与测量值；
- 3** 外形缺陷及尺寸偏差超限项与具体偏差值；
- 4** 模型置信度说明。

7.0.6 预制混凝土构件机器视觉检测设备宜与预制混凝土构件工厂生产管理平台建立数据联动机制，实现即时检验与实时预警。

【条文说明】预制混凝土构件机器视觉检测设备可通过数据接口与预制混凝土构件工厂生产管理平台进行数据交换，及时根据检测结果进行预警，提升预制构件成品率。

7.0.7 应建立数据追溯机制，支持检测结果与原始点云、设计模型、采集时间的绑定存储与多维度查询。

8 检测结果保存

8.0.1 预制混凝土构件机器视觉检测设备应能自动生成、保存检测结果并上传至服务器储存，包括原始记录与检测报告，并应保证数据的真实性、准确性和完整性。

8.0.2 检测结果应包括以下信息：

- 1** 产品类别、产品名称和型号规格；
- 2** 生产时间、班次和操作人员；
- 3** 二维图形、三维点云数据；
- 4** 三维测量关键数据及相关信息在二维或三维上的标注图像；
- 5** 检验项目测量项理论值与测量值；
- 6** 外形缺陷及尺寸偏差超限项与具体偏差值。

8.0.3 电子原始记录及检测报告应由检测员、校核人或审核人签名。

8.0.4 应建立数据备份与恢复机制，定期对检测结果数据进行备份，并确保在数据意外丢失或损坏时可快速恢复。备份策略及周期应根据数据重要性和更新频率确定。

8.0.5 检测结果数据的存储应安全、可靠，并采取必要的加密和权限管理措施，防止未经授权的访问、修改或删除。访问日志应予以保存并可追溯。

8.0.6 检测结果数据的存储期限应符合国家现行有关标准及工程档案管理规定。对于重要工程或具有代表性的预制构件检测数据，宜长期保存。

用词说明

为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

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：

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：

正面词采用“宜”；

反面词采用“不宜”。

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅该日期对应的版本适用于本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231

《影像测量仪校准规范》JJF 1318