

中国钢结构协会标准

空间结构三维点云建模与检测 评价技术规程

T/CSCS XXX-2026

主编单位：清华大学

批准单位：中国钢结构协会

施行日期：2026年X月X日

前 言

根据中国钢结构协会《关于发布中国钢结构协会 2026 年第一批团体标准编制计划的通知》（中国钢协〔2026〕16 号）文件要求，编制组经广泛调查研究，认真总结工程实践经验，参考国家、行业相关标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本规程。

本规程共 10 章及 2 个附录，主要内容包括：1.总则；2.术语和符号；3.基本规定；4.点云采集与预处理；5.点云数据质量评价；6.点云构件分割、特征提取与几何模型生成；7.结构变形检测；8.结构力学建模与安全评价；9.孪生建模与虚拟预拼装；10.成果交付与技术报告。

本规程由中国钢结构协会负责管理，由清华大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议，请反馈至清华大学土木工程系（地址：北京市海淀区清华大学新土木馆）。

本规程主编单位：清华大学

参编单位：

本规程参编人员：

本规程审查人员：

目 次

1. 总则.....	1
2. 术语和符号.....	3
2.1 术语.....	3
2.2 符号.....	7
3. 基本规定.....	11
3.1 一般规定.....	11
3.2 检测评价工作流程.....	14
3.3 检测精度与数据成果质量要求.....	17
4. 点云采集与预处理.....	19
4.1 一般规定.....	19
4.2 仪器设备与人员要求.....	19
4.3 测站布设与规划.....	21
4.4 数据采集与靶标拼接.....	21
4.5 点云降噪与精配准要求.....	22
4.6 其他点云采集手段.....	25
5. 点云数据质量评价.....	27
5.1 一般规定.....	27
5.2 预检评价体系.....	27
5.3 点云质量预检评价.....	32
6. 点云构件分割、特征提取与几何模型生成.....	34
6.1 一般规定.....	34
6.2 构件实例分割.....	35
6.3 节点与杆件中心线特征提取.....	38
6.4 结构几何模型生成.....	40
6.5 点云处理结果评价指标体系.....	41
6.6 点云处理结果评价.....	45
7. 结构变形检测.....	48
7.1 一般规定.....	48

7.2 整体变形检测.....	51
7.3 局部变形检测.....	56
8. 结构力学建模与安全评价.....	63
8.1 一般规定.....	63
8.2 基于实测几何形态的结构有限元模型生成.....	64
8.3 力学模型修正.....	67
8.4 结构计算与状态评价.....	71
9. 孪生建模与虚拟预拼装.....	73
9.1 一般规定.....	73
9.2 温度影响分析与预测.....	76
9.3 虚拟预拼装.....	80
9.4 施工控制与模型闭环更新.....	82
10. 成果交付与技术报告.....	86
10.1 一般规定.....	86
10.2 成果交付内容与格式.....	88
10.3 报告编制要求.....	91
附录 A 指标参数计算方法.....	94
A.1 点云预检评价指标.....	94
A.2 点云处理结果评价指标.....	98
附录 B 构件实例分割典型方法.....	101
B.1 区域生长法.....	101
B.2 特征聚类法.....	102
B.3 单模板匹配法.....	103
B.4 多模板匹配法.....	103
B.5 半刚性最优步进迭代配准法.....	104
B.6 机器学习与深度学习方法.....	105
本规程用词说明.....	106
引用标准名录.....	107

1. 总则

1.0.1 为规范三维点云方法进行空间结构的数据采集，以及几何建模、力学建模、孪生建模、位形检测、变形检测、虚拟预拼装及结构评价等技术工作，做到安全可靠、技术先进、评定准确，制定本规程。

【条文说明】

空间网格结构受力高效，具有自重轻、刚度大、跨越能力强且结构造型优美等优点，在建筑与基础设施领域中得到广泛应用。从结构类型角度，空间网格结构涵盖了空间网架、网壳、平面及立体桁架、张拉整体结构等多种形态。从行业分布看，空间网格结构在到国民经济的各个关键领域得到发展：在房屋建筑领域，它是大跨度的体育场馆、博物馆、展览馆、影剧院及加油站等公共建筑与房屋建筑的首选形态之一；在交通枢纽领域，航站楼、高铁站、火车站及大型客运中心普遍采用大跨度网格屋盖；在桥梁工程中，桁架桥作为重要的跨越手段被大量使用；此外，在电力系统和石油化工行业中，高压输电铁塔、石油井架、特种设备支撑架等空间网格结构同样发挥着不可替代的支撑作用。空间网格结构的广泛存在，决定了其运维安全具有重大的社会影响和经济意义。

空间结构的稳定与变形属于其力学性能的核心属性，整体变形、构件弯曲变形与板材屈曲变形既由受荷与缺陷诱发，又反映其宏—微观受力状态；多项工程案例表明，持续下挠与大量杆件变形将导致在役结构最终垮塌，在建结构因受力体系快速转化、安全风险更显著高于服役阶段。然而，现阶段以全站仪、目视、靠尺为主的传统测—评手段“测不全、测不准”，难以满足全场变形检查、带变形结构计算评价的工程需求。存在的弊端包括：一是精度与效率的矛盾，单点测量不仅速度慢，且由于空间网格结构节点密集、杆件缺乏特征点，依靠人工瞄准极易产生视觉误差，同时难以获取覆盖全场的连续形貌数据；二是杆件弯曲的检出难，全站仪主要针对节点坐标进行测量，对于杆件中部的弯曲、扭曲等局部变形几乎无法有效检出；三是作业环境风险高，传统人工上人检查不仅受限于视线遮挡和作业平台，更存在较高的安全风险。这种信息稀疏的检测现状，导致结构安全评价存在较大的主观性和不确定性。

近年来，随着三维激光扫描、无人机载雷达建模等技术的成熟，采用三维点云进行结构检测已成为土木工程智能化的重要发展方向。相比传统手段，三维点云具有高密度、非接触、全场景、高精度等显著优势。通过获取结构表面的海量点位，能够实现从几何点到几何模型的飞

跃。基于点云数据的 Scan-to-BIM 可用于竣工交付与数字化移交，而 Scan-to-FE Model 则能将实测的构件弯曲、节点偏差直接引入计算模型，实现真正意义上的结构安全精细化评价。然而，尽管技术潜力巨大，目前行业内仍缺乏针对空间网格结构点云处理的专项标准，在点云自动化分割、构件识别精度、变形评价指标等方面尚无规可依。三维激光扫描虽已成为研究热点，但在结构安全的测—评方向仍受制于点云精度不足、海量点云语义提取难、扫描几何模型缺乏力学内涵、多模块建模耗时数周乃至数月等瓶颈，未能取代全站仪与人工方法。

本规程的编制，其意义是规范空间结构三维点云方法从数据采集，到几何建模、力学建模、孪生建模以及位形检测、变形检测、虚拟预拼装及结构评价等系列工作的全技术流程，填补空间网格结构智能化检测领域的标准空白，推动我国大跨度空间结构管养水平向数字化、智能化迈进。

1.0.2 本规程适用于各类空间结构在建设与服务期间采用三维点云方法进行的数据采集、几何建模、力学建模、孪生建模、位形检测、变形检测、虚拟预拼装和结构安全评价等工作。

【条文说明】

本规程的具体应用情形应符合本规程第 3.1.2 条～第 3.1.4 条的规定。

1.0.3 空间结构的检测评价除应执行本规程外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

【条文说明】

建模、变形检测、受力评价、施工控制等具体要求应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2. 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 空间结构点云分割 point cloud segmentation of spatial structure

空间结构点云分割为识别结构的三维点云数据，将其进行有效分类并提取出独立的杆件、节点等构件实体的过程。

2.1.2 几何模型 geometric model

几何模型为基于三维点云构件实例分割与特征提取成果生成的，包含空间结构的节点集、杆件集、节点与杆件拓扑关系以及实际几何形态以及杆件实际中心线、初始几何缺陷的三维数字化表达模型。

2.1.3 力学模型 mechanical model

力学模型为基于实测几何模型或设计数据建立的，赋予了确定的杆件截面参数、材料本构关系、支座边界约束及荷载作用，用于结构受力分析、变形计算与安全状态评价的有限元计算模型。

2.1.4 孪生模型 digital twin model

孪生模型为在空间结构几何模型与力学模型的基础上，融合施工阶段、现场气象预测及虚拟预拼装等多源动态信息构建的，能够真实映射与计算评估物理实体状态的数字化模型。

2.1.5 扫描到特征模型 scan-to-Feature model

本规程所指扫描到特征模型为利用三维激光扫描获取的实测点云数据，经过空间特征提取与轴线重构后建立的、包含结构真实几何位形与变形状态及其相关语义与属性信息的模型。

2.1.6 扫描到 BIM 模型 scan-to-BIM model

扫描到 BIM 模型为利用三维激光扫描等手段获取的实测点云数据，经过点云预处理、构件分割、特征提取与参数化重构后建立的建筑信息模型。

2.1.7 局部坐标系 local coordinate system

局部坐标系为测量设备自身参考中心为原点（0,0,0）的相对坐标系。

2.1.8 全局坐标系 global coordinate system

全局坐标系为多站点云经配准后形成的统一坐标系。

2.1.9 结构坐标系 structural coordinate system

结构坐标系为与设计轴网对齐，X/Y 方向对应主轴方向，Z 方向为竖向的坐标系。

2.1.10 点云精配准 fine registration of point cloud

点云精配准为在完成粗配准的基础上消除相邻站点点云数据残余误差，实现高精度对齐的过程。

2.1.11 架站式三维激光扫描 terrestrial laser scanning

架站式三维激光扫描为通过架设于地面的高精度三维激光扫描仪，主动发射激光获取空间结构表面高密度几何形体三维坐标的方法。

2.1.12 无人机载激光扫描（ULS） UAV laser scanning

无人机载激光扫描为以无人飞行器平台为载体，集成激光扫描仪、GNSS 接收机和惯导系统，对大跨度屋面、空间网格结构等进行整体快速扫描的方法。

2.1.13 手持式/移动式 SLAM 激光扫描 handheld/mobile SLAM laser scanning

手持式/移动式 SLAM 激光扫描为利用手持设备或移动载具搭载激光扫描仪，在移动过程中基于同步定位与建图技术，实时、连续地获取目标对象及周围空间环境三维点云数据的方法。

2.1.14 检测精度分级 detection accuracy grading

检测精度分级为根据空间结构的重要性、检测目的及现场条件，将点云绝对位置精度及节点坐标检测限差划分为 A 级、B 级、C 级三个控制水平的指标体系。

2.1.15 控制点法 control point method

控制点法为通过从整体点云中提取同名节点、端点或控制网格点，并与设计或初始基准坐标对比来计算结构整体位移和偏差的分析方法。

2.1.16 构件实例分割 structural element instance segmentation

构件实例分割为在点云预分类与背景剔除的基础上，同时实现节点点云与各根杆件点云的实例化独立分离及编号管理的过程。

2.1.17 自重变形修正 dead-load deformation correction

自重变形修正为在建立基于实测几何形态的有限元模型时，消除由于结构自身重力引起变形的累积效应，从而反演得到结构无应力状态设计或加工几何位形的修正方法。

2.1.18 温度变形修正 temperature-induced deformation correction

温度变形修正为消除数据采集时的现场环境温度与结构设计基准常温状态之间的温差所导致的结构热胀冷缩几何变形，从而进行数据对齐和应力修正的校正方法。

2.1.19 位形 configuration

结构或构件在特定时刻及荷载、温度、支承条件下的空间位置与几何形态。实测位形为采集时刻的实际几何状态，基准位形为用于比较的参考几何状态。

2.1.20 初始几何缺陷 initial geometric imperfection

结构或构件在所考察加载或分析过程开始前，相对于理想计算几何存在的形状或位置偏差，如杆件初弯曲、节点初始偏位及结构初始整体倾斜。

2.1.21 先验模型 prior model

在当前点云处理之前已获得、用于提供构件几何、类别或连接关系等参考信息的模型，可来源于设计图纸、BIM 模型或既有检测成果。

2.1.22 虚拟预拼装 virtual preassembly

在实际安装前，利用构件或模块的数字模型模拟定位与装配，检查接口偏差、几何干涉及安装可行性的过程；模型可结合实测几何及目标工况下的力学变形确定。

2.1.23 结构整体挠度 global structural deflection

结构整体挠度为反映结构沿重力方向或规定方向整体变形的几何量，由同节点相对于检测基准的方向偏差或位移变化量及其空间分布确定。

2.1.24 杆件局部坐标系 member local coordinate system

杆件局部坐标系为以杆件轴线或端点连线方向为纵轴，并依据截面主方向或经确认的参考方向确定其余坐标轴，用于表达杆件局部几何特征和变形分量的坐标系。

2.1.25 节点邻域坐标系 nodal neighborhood coordinate system

节点邻域坐标系为根据节点相连杆件方向或经确认的局部基准建立，用于描述节点及其邻近区域几何关系和局部偏差的坐标系。

2.1.26 局部凹陷 local dent

局部凹陷为杆件局部表面相对于邻近未变形表面、设计曲面或初始实测曲面，沿参考面法向向构件内部偏离所形成的局部几何变形。

2.1.27 截面整体畸变 overall cross-section distortion

截面整体畸变为杆件截面轮廓、主要尺寸或各组成部分相对位置发生的整体性几何变化，包括圆管截面椭圆化、箱形或方管截面边长及对角线变化、H形截面翼缘间距变化及腹板偏移等。

2.1.28 语义标签 semantic label

语义标签为附加于点云点或点集、用于标识其所属对象类别的属性信息，可用于区分杆件、节点及背景等语义类别。

2.1.29 实例标签 instance label

实例标签为附加于点云点或点集、用于唯一标识其所属具体对象的属性信息，可用于区分同一语义类别中的不同杆件、节点或其他独立实体。

2.1.30 检测基准 detection reference

检测基准为用于与结构实测几何状态进行比较，以确定结构变形、位移或几何偏差的参考状态、参考模型或参考控制点。

2.1.31 整体变形 overall deformation

整体变形为以结构或安装单元总体位形为对象，通过节点空间位置变化反映的结构整体几何状态变化，包括结构整体挠度、水平位移和支座位移等。

2.1.32 局部变形 local deformation

局部变形为以单根杆件、局部表面、单个截面或节点为对象所表征的局部几何状态变化，包括杆件初弯曲与非正常弯曲、局部凹陷、截面整体畸变和节点坐标空间偏差等。

2.1.33 成果交付等级 deliverable level

成果交付等级为根据成果使用目的、完整程度及后续应用要求，对空间结构三维点云检测评价成果交付深度进行划分的等级，包括展示浏览级、几何复核级、检测判定级和评价应用级。

2.2 符号

2.2.1 几何量

L ——空间结构跨度；

L_i ——第 i 根杆件的计算长度；

R ——计算邻域的搜索半径；

R_i ——第 i 根杆件的设计截面外半径；

R_{fit} ——圆管杆件截面经最小二乘拟合所得的最优半径；

A_{total} ——评估段参考圆柱侧面的理论全面积；

$A_{covered}$ ——点云在评估段参考圆柱侧面上的有效覆盖面积；

A_{empty} ——评估段参考圆柱侧面未获得有效点云覆盖的面积，即空洞面积；

f_i ——第 i 根杆件的弯曲检测值；

f_{ij} ——第 j 个截面中心点对应的弯曲偏离距离；

f_i^r ——第 i 根杆件的相对弯曲量；

f_i^a ——第 i 根杆件的绝对弯曲矢高；

ρ_i ——第 i 根杆件的弯曲矢高比；

Ψ ——圆管截面椭圆化率；

C_i ——第 i 个点的局部曲率；

S ——特征聚类中的局部点云发散度。

2.2.2 质量指标

LPD ——局部点云密度；

OVR ——遮挡空洞率；

OR ——离群点比例；

PDU ——空间采样均匀性；

TC ——拓扑可连接性；

SNR ——视觉显著性噪声比；

CQS ——点云数据质量预检综合得分；

$RMSE$ ——算法收敛残差；

η_{scan} 、 η_{node} 、 η_{rod} ——扫描完备率、节点识别完备率、杆件识别完备率；

δ_{axis} ——轴心线偏移量；

σ_{surf} ——截面拟合残差；

TQS ——点云处理结果质量综合得分。

2.2.3 统计量

P ——参与统计、近邻搜索或配准评价的目标点云集合；

S ——参与圆管杆件截面拟合残差评价的有效点云集合；

N ——所统计点云中的总点数；

n_i ——该杆件截面中心点数量。

M ——点云三维包围盒划分所得的正方体体素网格总数；

$I(\cdot)$ ——条件指示函数；

$|\cdot|$ ——作用于集合时表示集合元素个数，作用于标量时表示绝对值。

2.2.4 坐标与位移

P_i ——第 i 个点的三维坐标

p_{im} ——第 i 个节点或控制点的实测坐标三维向量；

p_{i0} ——第 i 个节点或控制点的相应基准坐标三维向量；

Δp_i ——第 i 个节点或控制点的位置改变或三维位移向量；

Δx_i ——第 i 个节点或控制点在工程（结构）坐标系 X 轴方向的坐标偏差；

Δy_i ——第 i 个节点或控制点在工程（结构）坐标系 Y 轴方向的坐标偏差；

Δz_i ——第 i 个节点或控制点在工程（结构）坐标系 Z 轴方向的坐标偏差；

p_i^m ——第 i 个节点的实测坐标；

p_i^0 ——第 i 个节点的相应基准坐标；

c_{ij} ——第 i 根杆件第 j 个截面中心点坐标；

b_{ij} ——由第一端节点指向截面中心点的向量；

$b_{ij}^\perp$ ——第 j 个截面中心点到端点连线的垂直偏离向量；

x'_{ij} 、 y'_{ij} 和 x'_{ik} 、 y'_{ik} ——第 j 个截面中心点和第 k 个截面中心点在杆件局部横截面平面内的投影坐标；

h_i ——第 i 个节点或控制点的水平合位移；

d_i ——第 i 个节点或控制点的三维合位移；

v_i ——第 i 个节点或控制点的竖向位移偏差；

z_{im} ——第 i 个节点或控制点的实测 Z 轴坐标；

z_{i0} ——第 i 个节点或控制点的基准 Z 轴坐标；

e_x, e_y, e_z ——结构坐标系 X 、 Y 、 Z 轴方向的单位向量；

e_i ——第 i 个对应接口节点或控制点的两侧位置之间的相对偏差；

ΔL_T ——合龙段或嵌补构件长度的温度修正量；

ΔL_G ——合龙段或嵌补构件长度的自重或卸载修正量；

ΔL_B ——合龙段或嵌补构件长度的边界条件转换修正量；

ΔL_W ——合龙段或嵌补构件长度计算中计入的焊接收缩、安装间隙或工艺预留量。

3. 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 本规程适用于地面三维激光扫描仪（TLS）、手持结构光三维扫描仪（SL）、手持或背包 SLAM 三维激光扫描（HMLS）、机载与车载激光雷达扫描仪（ALS、MLS）、多视角几何三维重建或倾斜摄影（SfM）等三维点云采集装置或方法，对网架结构、网壳结构、桁架结构、索网结构、张弦结构、弦支穹顶结构、塔架等各式空间结构进行数据采集、几何建模、力学建模、孪生建模以及位形检测、变形检测、虚拟预拼装及结构评价的技术工作。

【条文说明】

地面三维激光扫描仪（TLS）是采用激光测距原理，快速获取物体表面密集三维点云数据，从而建立其三维模型的科学仪器。三维激光扫描仪每秒钟可以采集几十万至几百万的点云数据，单个测站即可获取几百万至几千万的点云数据，可以将整个环境进行 1:1 全尺寸测量，获取全面的几何信息，为使用者提供了高度准确和详细的景观、结构和物体图像。在工程现场，一般使用地面架站扫描操作。手持结构光三维扫描仪（SL）精度高但测量范围小，适用于小型结构模型或结构局部高精测量。手持或背包 SLAM 三维激光扫描（HMLS）、机载与车载激光雷达扫描仪（ALS、MLS）等，采用高精度惯导、GNSS/RTK、激光雷达点云配准的 SLAM 即时定位方案或后处理解算方案，建图方式的精度一般低于地面三维激光扫描仪（TLS），但可作为结构建图的有效补充方法，如对屋盖上表面开展三维建模等。多视角几何三维重建或倾斜摄影等三维点云采集方法，是采用相互重叠的多视角图像生成三维模型，建图精度相比于前述方案更低，一般较少应用于结构的测量、测绘场景。

3.1.2 出现下列情况之一时，可采用本规程规定的方法对空间结构进行三维点云建模与检测评价：

1. 施工阶段结构的检测、控制与验收：用于施工过程中分阶段几何形态控制及竣工验收阶段的整体挠度、水平位移、支座位移及局部变形检测，施工变形控制，结构模块、单元等虚拟预拼装，结构数字孪生，结构空间位形复核等。
2. 在役结构状态检测：用于无图结构建模，既有结构整体线形与变形复核、构件初始缺陷与损伤检测、节点空间坐标偏差检测等。

3. 结构安全评价：在前两类检测成果基础上，建立反映实际几何形态的有限元模型，对结构在自重、活载、温度等作用下的承载性能进行评价。

3.1.3 出现下列情况之一时，宜采用本规程规定的方法对空间结构进行三维点云建模与检测评价：

1. 跨度大、节点多、构件遮挡严重，采用全站仪、水准仪等手段难以全面获取整体几何信息的；
2. 施工过程中需对预应力张拉、提升、卸载等关键工况进行整体线形测量与变形监控的；
3. 竣工验收阶段需对整体挠度、水平位移、支座位移及局部变形等进行全面复核的；
4. 既有结构设计资料齐全但需复核实际几何形态、建立结构数字档案的；
5. 既有结构遭受地震、风、雪、火灾、撞击等灾害或意外作用，需进行损伤普查与变形复核的；
6. 既有结构拟进行改造、扩建、加固或改变使用功能，需对实际几何形态及力学性能进行评价的；
7. 其他需要获取结构整体高密度几何形态信息的情况。

3.1.4 出现下列情况之一时，应采用本规程规定的方法对空间结构进行三维点云建模与检测评价：

1. 既有空间结构缺少图纸或图纸不全情况下的检测鉴定任务；
2. 既有空间结构已经出现较复杂的结构与构件变形的检测鉴定任务。

【条文说明】

空间结构几何形态复杂，在没有图纸的情况下，仅靠全站仪少量测量节点等难以重建结构几何模型，应采用本规程方法扫描、建模。对于已经出现复杂变形的空间结构，应采用本规程方法全场检测节点坐标与杆件变形。

3.1.5 检测精度等级应根据结构的重要性、检测目的及现场条件综合确定，并应符合下列规定：

1. 重要公共建筑、体育场馆、机场航站楼等重要空间结构的竣工验收、变形检测及承载能力评价，应采用 A 级精度，并应符合本规程表 3.3-1 的规定；
2. 一般大跨度空间结构的施工监测、变形检测和定期复核，可采用 B 级精度，并应符合本规程表 3.3-1 的规定；
3. 仅用于结构整体形态普查、初步损伤筛查或方案比选阶段的工程，可采用 C 级精度，并应符合本规程表 3.3-1 的规定；
4. 同一工程中不同检测项目宜采用相同精度等级；当因现场条件限制确需降低精度等级时，应在检测报告中说明并对评价结论作相应处理。

【条文说明】

同一工程宜采用统一的精度等级，以保证不同检测项目之间的结果具有可比性。当受现场条件限制（如现场空间受限、扫描站位不足、光照条件差）确需降低精度等级时，应在检测报告中说明限制原因，并对基于该检测结果得出的评价结论作相应的降级处理或增加复核。

3.1.6 空间结构三维点云检测评价，除应符合本规程外，尚应符合国家、行业现行有关标准的规定。

【条文说明】

本条明确本规程与国家、行业现行相关标准的关系。空间结构三维点云检测评价涉及测绘、检测、结构评价等多个专业领域，除应符合本规程规定外，尚应符合《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344、《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621、《空间网格结构技术规程》JGJ 7、《地面三维激光扫描作业技术规程》CH/Z 3017 等有关标准的规定。

3.1.7 采用点云数据进行结构安全评价时，应符合下列规定：

1. 当设计图纸、竣工资料齐全且检测结果与图纸吻合时，结构计算参数宜按图纸取值，点云检测成果可作为复核依据；
2. 当设计资料缺失或检测结果与图纸明显不符时，应按点云实测数据建立结构几何模型，并按点云数据进行变形检测；

3. 对带有显著初始缺陷或长期变形的既有结构，宜建立反映实际几何形态的有限元模型进行分析，并应按本规程第 8.3 节的规定进行力学模型修正。

【条文说明】

本条规定采用点云数据进行结构安全评价的取值原则。当设计图纸与竣工资料完备、且实测结果与图纸吻合时，几何参数以图纸取值可与既有设计文件对接、便于复核；实测结果与图纸不符时以点云检测成果取值可反映结构的实际状态；对存在显著变形的既有结构，宜采用反映实际几何形态的模型，并通过第 8 章规定的自重与温度补偿还原真实的力学状态。

3.1.8 三维点云检测评价的成果应具备完整性、可追溯性和可复现性，原始点云、配准成果、分割成果与几何模型应分类归档保存。

【条文说明】

完整性、可追溯性、可复现性是工程质量检测成果的基本要求。原始点云记录了检测时结构最真实的几何状态，是所有后续处理与评价的基础；配准成果、分割成果与几何模型作为中间产品，是复核结论、比对多期数据、开展再分析的必要资料。

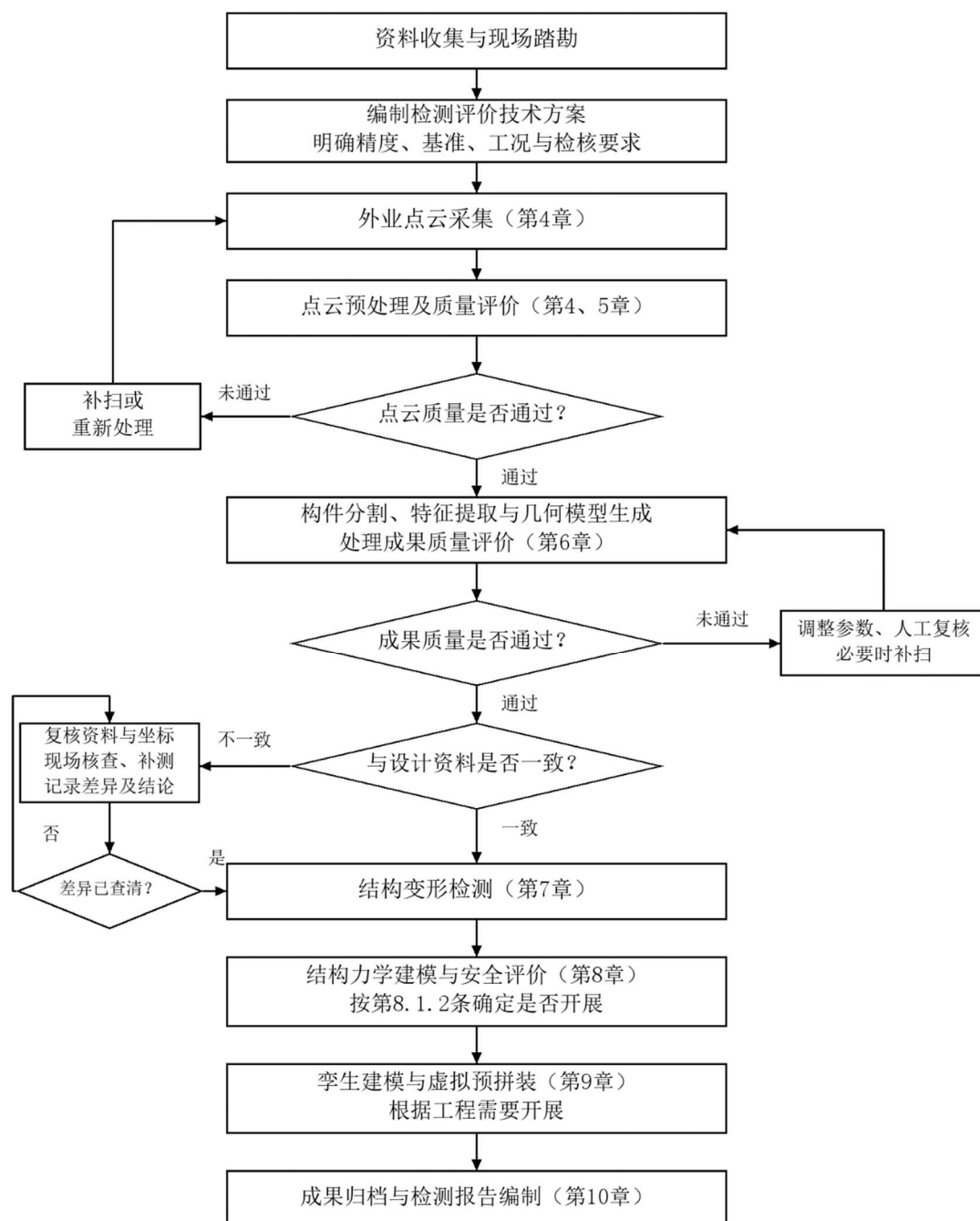
3.2 检测评价工作流程

3.2.1 空间结构三维点云建模与检测评价的工作流程应包括下列步骤：

1. 资料收集与现场踏勘；
2. 编制检测评价技术方案；
3. 外业点云数据采集；
4. 点云数据预处理及质量评价；
5. 构件分割、特征提取与几何模型生成；
6. 结构变形检测；
7. 结构力学建模与安全评价，可根据检测目的和委托要求确定是否开展；
8. 孪生建模与虚拟预拼装，根据工程需要开展；
9. 成果归档与检测报告编制。

【条文说明】

本条给出的工作流程涵盖了从资料收集到成果归档的全部主要环节。其中“结构力学建模与安全评价”根据委托要求和结构状态可选择开展，孪生建模与虚拟预拼装适用于施工控制、合龙控制、卸载控制、模块化拼装等情形，其具体要求应符合本规程第9章的规定。



注：差异核查与处置按第3.1.6条执行；未查清前不进入后续评价。

图 3.2-1 空间结构三维点云建模与检测评价技术流程

3.2.2 资料收集宜包括下列内容：

1. 结构设计文件，包括结构布置图、节点详图、关键工况控制坐标及预起拱值；
2. 施工过程及竣工验收资料，包括施工组织设计、张拉、卸载与提升记录、施工监测数据及竣工验收报告；
3. 历次检测、维修、加固及改造资料；
4. 结构使用与管养记录、灾害与事故记录、运营荷载变化情况；
5. 现场周边环境资料，包括场地空间、电磁干扰、净空条件、通视条件等。

【条文说明】

完整的资料收集是编制合理检测方案、准确解读检测结果的前提。特别是关键工况控制坐标、张拉/卸载/提升记录等，对施工过程结构或存在显著初始变形的结构，是判断实测位形合理性的重要依据。

3.2.3 检测评价技术方案应包括下列内容：

1. 检测目的、对象与范围；
2. 检测精度等级及对应的限差要求；
3. 仪器设备选型、测站与航线布设、靶标布置；
4. 现场作业流程、安全措施及质量控制要点；
5. 点云数据处理、构件分割与结构建模技术路线；
6. 变形检测、力学建模与评价的方法与判定准则；
7. 成果交付内容、格式及质量评价结果。

【条文说明】

技术方案应在现场作业前编制并按管理程序审核。方案内容既覆盖外业采集、又覆盖内业处理与评价，避免因方案与实施脱节导致返工。特别是精度等级与限差要求、变形检测与力学建模的判定准则，应在方案阶段明确，防止后期评价结论出现主观性。

3.2.4 当检测对象处于使用状态或施工过程中时，外业采集时段宜避开人员密集、强烈温度梯度、强风、强振动及强降水等不利时段；当作业条件不可避免时，应在方案中明确补偿与剔除措施。

【条文说明】

空间结构对温度、风、振动等环境因素较为敏感。人员密集时段可能对扫描视线造成大量遮挡，昼夜温差和强烈日照会引起显著温度变形，强风会引起结构颤振和仪器晃动。当作业条件不可避免时，应通过温度记录、时段选取等方式补偿或剔除相应影响。

3.3 检测精度与数据成果质量要求

3.3.1 空间结构三维点云检测精度等级应划分为 A 级、B 级、C 级，并按本规程表 3.3-1 的规定确定。

表 3.3-1 空间结构三维点云检测精度等级

精度等级	适用范围	点云厚度（mm）
A	重要公共建筑、体育场馆、机场航站楼等重要空间结构的竣工验收、变形检测及承载能力评价	2
B	一般大跨度空间结构的施工监测、变形检测、几何形态复核及结构安全评价	5
C	次要结构、临时结构或仅用于结构整体形态普查、损伤筛查的工程	10

【条文说明】

本条参照《城市桥梁检测与评定技术规范》CJJ/T 233 等既有工程检测规范的分级思路，将空间结构三维点云检测分为三个精度等级。A 级用于重要公共建筑、机场航站楼等安全等级最高的空间结构；B 级用于一般大跨度空间结构；C 级用于形态普查、初步筛查等对精度要求相对较低的应用。分级的核心是保证检测精度与结构重要性、评价目的相匹配。

3.3.2 点云数据质量等级应划分为 A 级、B 级、C 级，应按本规程表 5.3-2 的规定确定。评价系数及各系数评分标准应分别按本规程第 5 章与附录 A.1 的规定确定。

【条文说明】

点云数据质量等级用于评价采集所得原始点云是否满足后续处理算法的输入要求,若使用其他指标进行评价,需经验证并在检测报告中说明。

3.3.3 点云处理结果质量等级应划分为 A 级、B 级、C 级,应按本规程表 6.6-2 的规定确定。评价系数及各系数评分标准应分别按本规程第 6 章与附录 A.2 的规定确定。

【条文说明】

点云处理结果质量等级用于评价构件分割与特征提取成果的可信程度,若使用其他指标进行评价,需经验证并在检测报告中说明。

4. 点云采集与预处理

4.1 一般规定

4.1.1 采用地面三维激光扫描仪开展空间结构现场扫描作业应符合下列规定：

1. 结构无死角覆盖：站点布设应完整覆盖全部节点和杆件，消除网格遮挡死角；
2. 拼站足够重叠：相邻站点间应保证足够的点云重叠度，以保证数据拼接精度；
3. 扫描稳定可靠：扫描过程中仪器不应晃动，架设平台应稳固无震动；
4. 节点可识别：点密度应满足球节点中心坐标提取的精度要求；
5. 现场管控：扫描过程中宜减少人员走动，避免遮挡与干扰。
6. 激光安全：现场扫描作业的激光防护应符合现行国家标准《激光产品的安全 第1部分：设备分类、要求》GB 7247.1的有关规定。

4.1.2 由于杆件分割处理等精度要求高，现场作业宜采用三维激光扫描仪的高精度扫描功能。

【条文说明】

本章主要介绍地面三维激光扫描仪的点云采集方法。若需要使用其他扫描方式，应经过严格的精度论证与对比测试，确保所获取的点云质量、点位精度及空间分辨率能够满足后续空间结构节点精准识别、杆件分割处理及高精度三维建模的硬性需求。

4.2 仪器设备与人员要求

4.2.1 空间结构三维点云检测可采用下列一种或多种采集设备组合作业：

1. 架站式三维激光扫描仪（TLS），适用于结构整体几何形态测量及构件特征提取，宜作为主要采集手段；
2. 手持结构光三维扫描仪，适用于小型结构模型、复杂节点、连接构造、局部损伤等小尺度目标的高精度近距离测量；
3. 手持或背包 SLAM 三维激光扫描仪，适用于内部空间、节点密集区域、遮挡严重区域的补充扫描，宜作为地面激光扫描仪的补充手段；

4. 机载与车载激光雷达扫描仪，适用于大跨度屋面、桁架上弦、人工难以到达部位或成批量结构的快速扫描；
5. 多视角几何三维重建或倾斜摄影，可作为辅助手段，用于色彩纹理获取或粗测；
6. 全站仪、GNSS 等大地测量设备，宜与点云数据联合使用，用于建立测站控制网及绝对坐标基准。

【条文说明】

本条列举了空间结构三维点云检测的常用采集设备。架站式三维激光扫描仪（TLS）综合精度和覆盖能力最优，宜作为主要采集手段；手持结构光三维扫描仪（SL）通过投射结构光光栅图案并由相机捕捉图案的形变解算深度，可获得亚毫米级至毫米级的高精度点云，适合复杂节点、连接构造、局部损伤等小尺度目标的近距离高精度测量，但工作距离较短（一般不超过 3m）、对现场光照条件较为敏感，宜与架站式激光扫描仪配合使用；手持或背包 SLAM 三维激光扫描（HMLS）适合内部空间、复杂节点区补测；机载与车载激光雷达扫描仪（ALS、MLS）适合大跨度屋盖及上弦区域采集。

4.2.2 作业所用的三维激光扫描仪在 50 m 距离处的单点测距精度，应符合下列规定：

1. A 级精度作业：单点测距精度的绝对值不应大于 2 mm；
2. B 级精度作业：单点测距精度的绝对值不应大于 4 mm；
3. C 级精度作业：单点测距精度的绝对值不应大于 8 mm。

【条文说明】

单点测距精度是扫描仪的核心指标，也是构件几何提取精度的物理上限。本条规定的 2 mm、4 mm、8 mm 三个等级均为在 50 m 距离处的指标，参照了主流工程用 TLS 的实测水平：在 50 m 距离处 2 mm 对应科研级仪器，在 50 m 距离处 4 mm 对应主流工程级仪器，在 50 m 距离处 8 mm 对应普通工程级或超远距离作业。测距精度指标应以出厂检定证书或权威计量机构出具的检定、校准证书所载数值为准。当最远扫描距离超过 50 m 时，应按仪器测距精度随距离的衰减曲线复核，仍应满足相应精度等级的节点坐标检测限差要求。

4.2.3 扫描仪、雷达、全站仪、GNSS 及配套靶标等设备应在计量检定有效期内使用；检测项目开始前应进行现场校验；校验应包括标准长度比对或已知靶标间距复测，校验偏差不应大于相应精度等级限差的 1/2；精度等级为 A 级的检测项目，校验记录应纳入检测档案。

4.3 测站布设与规划

4.3.1 扫描测站布设应符合下列规定：

1. 测站布设网格：以空间结构柱网轴线为基准，站点沿柱网均匀布设，间距宜取柱距的 1/2 至 2/3；
2. 测站间距上限：不宜超过 15 米，遮挡严重区域应加密；
3. 仰角覆盖：仪器架设高度结合下弦净高，确保扫描仰角可充分覆盖上、下弦节点及腹杆；
4. 马道补充站：如地面站点无法覆盖上弦或局部屋脊区域，应在马道或检修平台增设补充站点；
5. 重叠度要求：相邻测站间的点云重叠度不应小于 30%，遮挡严重区域应加密测站提高重叠度；

【条文说明】

重叠度是多测站点云可靠拼接的基本保证，本规程对该指标统一在本条第 5 款作出规定，第 4.5.3 条的精配准要求引用本款执行，不再另行规定限值。手持式、移动式 SLAM 激光扫描与无人机载激光扫描的作业方式与架站式扫描不同，其重叠度按本规程第 4.5.1 条、第 4.5.2 条的相应规定执行：SLAM 扫描以往返路径间的视距重叠控制，考虑其连续采集、单位时间获取点数远高于架站式扫描，下限取 20%；无人机载激光扫描以相邻航线间的旁向重叠控制，下限亦取 20%。上述差异化规定不适用于架站式三维激光扫描。

4.3.2 扫描测站布设应依据结构平面图预先完成，现场勘查后再进行调整。

4.4 数据采集与靶标拼接

4.4.1 扫描参数应符合下列规定：

1. 点密度：应保证在最大扫描距离处，扫描点云能够覆盖杆件 1/2 截面；

2. 扫描模式：有高精度模式时，应优先使用高精度模式；
3. 扫描角分辨率：应保证在最大扫描距离处的点间距不大于最小杆件直径的 1/10，且不应大于 10 mm；
4. 有效扫描距离：作业前应确认仪器在结构下弦至地面净高下的实际点间距能否满足节点识别需求；
5. 仰角范围：仪器仰角覆盖范围应能够完整扫描到结构上弦层，宜覆盖 60° 以上仰角；

【条文说明】

扫描因杆件直径较小（通常 60 mm~200 mm），对点密度有最低要求，为达到理想的扫描效果，需要正确设置扫描参数。按上述分辨率设置，常规仪器单站扫描时间一般不少于 10 min。

4.4.2 结构扫描作业的坐标系统宜与结构设计坐标系统一致；局部坐标系、全局坐标系与结构坐标系的定义应符合本规程第 2.1 节的规定。

4.4.3 在进行点云拼接时靶标设置应满足下列要求：

1. 靶标应布设在相邻站点均可清晰扫描到的位置，应选择地面稳固区域；
2. 每两个相邻站点间应至少保证 3 个公共靶标（宜取 4~5 个），以满足拼接解算要求；
3. 靶标应在平面和高度方向上均匀分散布设，严禁三靶标共线；
4. 如现场条件允许，可将部分靶标布设于结构下弦附近（绑扎于杆件或节点球），以提高高度方向拼接精度；
5. 靶标固定应牢固，扫描期间不应移动。

4.5 点云降噪与精配准要求

4.5.1 点云预处理应满足下列技术要求：

1. 特征保真优先级：空间结构的去噪核心是球节点与杆件边缘，严禁使用过度平滑的算法；

2. 环境噪声识别：应重点识别并剔除由强光引起的弥散噪声，以及由钢结构表面高反射率产生的虚假“亮斑”点云；

3. 震动误差辨析：若发现点云出现明显的分层或毛刺现象，应分析是否为扫描时架设平台震动所致。对于震动严重的无效站数据，应优先考虑补扫而非强行去噪。

4.5.2 点云降噪应满足下列技术要求：

1. 算法参数设定：

(1) 统计离群点滤波：标准差倍数宜取 1.0~2.0。针对空间结构，邻域搜索点数不宜过多，以免将细小的腹杆端部误判为噪声；

(2) 半径离群点滤波：设定的搜索半径应小于最小杆件直径的 1/4，以确保在剔除孤立离散点的同时，不损伤细长杆件的几何连续性，半径离群点滤波的搜索半径宜取点云平均点间距的 3~5 倍，且不应大于最小杆件直径的 1/4，当二者冲突时，应改用统计离群点滤波或先行提高点云密度；

(3) 强度过滤：对于防锈漆或深色涂层引起的低反射率弱信号点，应结合现场记录的涂层类型，谨慎设定强度阈值，防止误删有效构件点。

2. 人工精细化要求：

(1) 重叠区一致性：多站点云拼接后的重叠区域，若因算法产生的厚度超过 2 mm，应重新检查去噪参数或拼接精度，确保数据不因点云增厚影响变形分析精度。

3. 质量验收标准：

(1) 特征完整度：去噪后单个球节点的有效点云覆盖面应不少于其可见侧面积的 80%，以满足高精度球心提取需求；

(2) 数据量控制：在保证精度前提下，可进行适度的均匀下采样，但应确保单根杆件的横截面点数足以支撑后续的轴线拟合分析。

4.5.3 点云精配准应满足下列技术要求：

1. 算法选择与策略：

(1) 在完成基于靶标或特征点的粗配准后，应进行精配准以消除残余误差；

(2) 对于钢管杆件较多的结构，宜采用点到面的精配准算法，利用杆件圆柱面的法向量约束来提高收敛精度。

2. 重叠度硬性要求：

(1) 相邻站点间的点云公共区域重叠度应符合本规程第 4.2.1 条第 5 款的规定；

(2) 在遮挡严重的复杂节点区域，应通过加密站点确保重叠区包含足够的非共线几何特征。

3. 配准精度指标：

(1) 均方根误差：精配准后的点云标准偏差应控制在 2 mm 以内，以满足后续杆件变形分析的精度要求；

(2) 迭代收敛条件：相邻两次变换矩阵变化的 Frobenius 范数宜小于 1×10^{-6} ，并应同时限制最大迭代次数，防止算法陷入局部最优解导致点云重影。

4. 局部特征权重：在配准过程中，应给予球节点区域点云更高的权重，因为球面的多向几何特性比长管件的单向特性更能有效约束六自由度转换；

5. 坐标系转换原则：

(1) 多站点云拼接配准后形成的全局坐标系，应通过基准点转换，最终对齐至结构设计坐标系；

(2) 严禁在未进行整体平差的情况下直接进行多站顺序累加拼接，防止产生误差累积效应。

6. 拼接质量检查应符合下列要求：

(1) 厚度检测：在拼接重叠区进行切片观察，杆件表面的点云厚度不应明显增加，若出现明显的厚度现象，应重新核对配准参数；

(2) 闭合差评价：对于环状布站的扫描路径，应计算首尾站的回环闭合差，并进行全局优化分配。

4.6 其他点云采集手段

4.6.1 手持式/移动式 SLAM 激光扫描应满足下列要求：

1. 扫描路径规划：

- (1) 闭合环路原则：作业路径应形成闭合环路，通过最终回到起始点或途径已知控制点来触发回环优化，从而有效消除传感器随时间推移产生的累积漂移误差；
- (2) 主路径与走向：在开阔或规则室内区域，主扫描路线原则上应平行于测区长边布设，以减少转弯次数，提高作业效率。对于走廊、狭长通道等狭长地带，应沿通道中心线行进采集；
- (3) 重叠与覆盖：相邻的扫描往返路径之间的视距重叠度不应小于 20%，宜取 30%，在结构复杂的重点区域，应进一步缩小扫描间距以提高重叠度；
- (4) 交叉路线补充：针对结构复杂、遮挡严重的区域，应规划垂直交叉型的扫描路径，以获取建筑物或物体立面及背面的完整点云数据，避免点云阴影或盲区。

【条文说明】

手持式/移动式 SLAM 激光扫描技术可实现边走边扫，无需像地面扫描仪定点架设，而是由人手持或背负在室内巡走。机动性强，适合解决室内、地下空间、大型商场内部装修测量、森林等 GNSS 信号缺失区域的测绘难题。但其精度通常在厘米级，不如地面架站扫描的精度，且长时间作业可能存在闭合差累积。应按上述要求完成扫描，降低误差。

4.6.2 无人机载激光扫描航线规划应满足下列要求：

1. 主航线方向：原则上应平行于测区长边布设，以减少无人机转弯次数，提高作业效率；对于狭长区域，应沿中心线平行布设航线；
2. 重叠度设置：相邻并行航线的旁向重叠度不应低于 20%，宜取 30%，针对高差较大区域，旁向重叠度宜提高至 40%~50%；
3. 飞行高度与速度：无人机对屋盖扫描的相对航高应结合第 3.3.1 条的精度等级反算确定，且相对航高不宜大于仪器标称精度对应距离的 1.5 倍，飞行速度宜在 5 m/s~10 m/s；

4. 仿地飞行要求：当地形起伏较大（高差超过相对航高的 30%）时，应导入高精度 DEM 数据进行仿地航线规划，确保传感器与地表的距离始终保持恒定；
5. 交叉航线补充：对于高层建筑密集区或结构复杂的立交桥区域，宜规划垂直交叉型航线，以获取建筑立面的完整点云；
6. 无人机脉冲发射频率：应根据测区需求设置，当需提高点密度时宜调高脉冲发射频率，当需增大有效测距时宜降低脉冲发射频率；
7. 无人机视场角：宜截取标称视场角中部 60%~80% 的范围，去除边缘精度较差的数据；
8. 无人机扫描频率：依据飞行速度匹配合适的扫描仪线频，应保证点云分布的网格均匀。

【条文说明】

无人机航线规划可依据测区 KML/矢量范围预先在地面站软件中完成，现场勘查后微调；本条规范参数主要依据《无人机机载激光雷达测量技术规范》CH/T 3021-2019、《架空输电线路无人机巡检技术规范》DL/T 1578-2016、《1:5000 1:10000 地形图航空摄影规范》GB/T 15661-2008 等现行标准，如遇规定外情形，可根据相关规范适当调整参数设定。

5. 点云数据质量评价

5.1 一般规定

5.1.1 在进行语义分割、变形识别等算法计算前，应先对点云数据质量进行评价。

5.1.2 根据点云数据的质量状态，点云整体数据状况评定系数及各系数评分标准应按表 5.1-1 的规定确定。

表 5.1-1 点云数据预检质量评价系数

鉴定对象	鉴定内容	评价系数	评分标准
点云数据质量	数据密度与完整性	局部点云密度 (LPD)	当 $LPD \geq 25$ 时为 100 分，当 $LPD < 5$ 时为 0 分，其间线性赋分
		遮挡空洞率 (OVR)	当 $OVR \geq 50\%$ 时为 0 分，当 $OVR = 0\%$ 时为 100 分，其间线性赋分
	数据纯净与可辨识性	离群点比例 (OR)	当 $OR \geq 15\%$ 时为 0 分，当 $OR = 0\%$ 时为 100 分，其间线性赋分
		视觉显著性噪声比 (SNR)	当 $SNR = 1$ 时为 100 分，当 $SNR = 0$ 时为 0 分，其间线性赋分
	空间分布与结构性	拓扑可连接性 (TC)	当 $TC = 100\%$ 时为 100 分，当 $TC = 0$ 时为 0 分，其间线性赋分
		空间采样均匀性 (PDU)	当 $PDU = \ln(N)$ 时为 100 分，当 $PDU = 0$ 时为 0 分，其间线性赋分

【条文说明】

若使用表 5.1-1 以外的其他指标进行评价，需经验证并在检测报告中说明。

5.2 预检评价体系

5.2.1 在点云数据进入后续构件分割、变形识别等复杂处理算法前，宜使用预检评价体系验证点云数据是否满足计算所需的几何特征与数据质量要求。各指标参数的计算应符合本规程附录 A.1 的规定；采用其他算法时，应经验证并在检测报告中说明。

【条文说明】

预检评价指标体系适用于对利用三维激光扫描等手段获取的空间结构原始点云数据质量进行基础筛查与定量评价，可快速判定点云数据基础质量，保障后续算法的稳定运行。除本节正文中规定的主要指标外，若对于点云质量与精度要求极高，可增加评判点云的局部表面粗糙

度（ LSR ）以及局部厚度不确定性（ LTU ），通过最小二乘法对局部的区域内进行平面拟合从而计算区域内点到拟合平面的平均距离以及相邻区域在最小特征值方向上的投影宽度，进一步评价杆件和节点表面点云的离散程度。

若需要了解点云扫描整体完整性，可增加评判点云的扫描完备率（ η_{scan} ），采用人工标注方法标注并计算扫描点云中的杆件数量，并将其与设计图纸/模型中的杆件数量做比值得到扫描完备率，进一步评价扫描点云的整体完整性。

5.2.2 局部点云密度（ LPD ）：表示在给定半径的球形相邻区域内的点的平均数量。计算 LPD 时第一步先计算每个点 P_i 相邻区域内（即与 P_i 距离小于 R ）的点数 k_i ，而后在所有点数取平均值得到 LPD 的值，计算 LPD 时的球形邻域搜索半径 R 宜取 0.05 m。按下式计算：

$$LPD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i, \text{ where } \{P_j \| P_i - P_j\| \leq R\} \quad (5.2.2 - 1)$$

式中： N ——点云中点的总数量；

k_i ——第 i 个点在其相邻区域内的点数。

其赋分规则应为：当 $LPD \geq 25$ 时为 100 分，当 $LPD < 5$ 时为 0 分，其间线性赋分。

【条文说明】

点云密度对质量分析具有重要作用，随着点云密度的增加，算法处理精度也会逐渐增高并趋于稳定。编制组研究表明，算法计算每个截面的圆心时，截面内的点数应达到 5 个~25 个才能使圆心计算较精确，若点云的密度太低导致每个截面内不足 5 个点，算法则会报错而不能计算出正确的圆心。

5.2.3 遮挡空洞率（ OVR ）：表示在局部区域内因为扫描或遮挡等问题导致的构件点云数据的缺失程度。计算时应以设计半径和评估段长度建立参考圆柱侧面，将属于该杆件的候选点云按周向弧长和轴向位置展开至二维参数域，通过网格化统计确定有效覆盖侧面积，并按未覆盖侧面积与评估段理论侧面积之比计算。展开网格的目标尺寸宜取 0.005 m~0.010 m，所采用的值应在检测报告中注明。按下式计算：

$$OVR = \frac{A_{empty}}{A_{total}} \quad (5.2.3 - 1)$$

式中： A_{empty} ——构件点云沿主轴法平面二维网格化投影的空白面积；

A_{total} ——构件理论全面积。

其赋分规则应为：当 $OVR \geq 50\%$ 时为 0 分，当 $OVR=0\%$ 时为 100 分，其间线性赋分。

【条文说明】

点云中常常会因为扫描角度、杆件遮挡等原因产生许多单侧杆件。编制组研究表明，当点云的单侧遮挡非常严重或是杆件表面点云覆盖率不足 50%，就会导致计算出的圆心与轴线向有数据一侧发生偏移，从而使得后续变形识别产生较大的误差。

5.2.4 离群点比例（OR）：表示出原始点云中噪声和杂质的占比。利用噪声点远离节点和杆件点云的特征，将与相邻点的平均距离过远的点判定为离群点，从而计算出离群点在总点数中的比例。按下式计算：

$$P_{outlier} = \{p_i \in P: d_i > m_d + \alpha s_d\} \quad (5.2.4 - 1)$$

$$d_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \|p_i - p_j\| \quad (5.2.4 - 2)$$

$$m_d = \text{median}(d_1, \dots, d_N) \quad (5.2.4 - 3)$$

$$s_d = 1.4826 \text{MAD}_d \quad (5.2.4 - 4)$$

$$\text{MAD}_d = \text{median}_i |d_i - m_d| \quad (5.2.4 - 5)$$

$$N_{outlier} = |P_{outlier}| \quad (5.2.4 - 6)$$

$$OR = \frac{N_{outlier}}{N} \times 100\% \quad (5.2.4 - 7)$$

式中： p_i ——点云中的第 i 个点；

d_i ——第 i 个点与其局部邻域内其他相邻点之间距离的平均值；

m_d ——全局点云中所有点的 d_i 的中位数；

MAD_d ——近邻平均距离的中位数绝对偏差，即各点近邻平均距离 d_i 与其中位数 m_d 之差的绝对值的中位数；

s_d ——近邻平均距离的稳健尺度估计值；

$|\cdot|$ ——集合的元素个数。

其赋分规则应为：当 $OR \geq 15\%$ 时为 0 分，当 $OR=0\%$ 时为 100 分，其间线性赋分。

【条文说明】

异常点的存在会干扰算法的正常运行，导致分类结果出现偏差。利用 3σ 原则的统计方法可以检测异常点。基于数据服从正态分布的假设，通过聚类将点云数据分成不同的簇，不属于任何簇或离簇中心较远的数据点被视为异常点。编制组研究表明，当噪声点比例大于 15%，算法运行过程中会将干扰点识别为虚假的杆件或是因为噪声点的干扰导致原本连通的杆件被识别为几段细小的散碎杆件，从而导致语义分割错误以及后续的变形识别产生较大的误差。

5.2.5 空间采样均匀性（PDU）：表示在扫描过程中点云分布不均匀的程度。将包含点云的空间按固定边长 100 mm 划分为正方体体素网格，统计每个网格内点的数量，从而比较点的数量是否存在较大差异。按下式计算：

$$PDU = - \sum_{n=1}^N p_n \ln(p_n) \quad (5.2.5 - 1)$$

式中： p_n ——为第 n 个正方体内的点的数量占所有正方体点数和的百分比。

其赋分规则应为：当 $PDU = \ln(N)$ 时为 100 分，当 $PDU = 0$ 时为 0 分，其间线性赋分。

【条文说明】

在实际扫描过程中尽管架设多个扫描站点，但仍会出现距离站点近的点云密度大距离站点远的点云密度小的特点，如果点云分布较不均匀就会导致算法在对点云进行语义分割时计算出的轴线出现偏移，从而导致识别和计算误差。当点云空间分布完全均匀即 $p_1 = p_2 = \dots = p_N = \frac{1}{N}$ 时 PDU 可取得最大值为 $\ln(N)$ ，当点云空间分布极不均匀时 PDU 趋近于 0。

5.2.6 拓扑可连接性（TC）：利用被识别为杆件的点与最近节点点云的最小距离评价点云中是否出现了断裂的情况。符合下列条件的杆件应判定为拓扑完整杆件：①杆件点云两端至相邻节点点云的最小距离均不大于 3 倍杆件半径与 3 倍点云平均点间距的较小值；②杆件点云沿理论轴线投影的相邻投影点最大间隙不大于 0.1 倍杆长与 0.1m 的较小值。按下式计算：

$$TC = \frac{N_{\text{valid}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (5.2.6 - 1)$$

式中： N_{total} ——结构理论杆件总数；

N_{valid} ——被判定为拓扑完整的杆件数量。

其赋分规则应为：当 $TC = 100\%$ 时为 100 分，当 $TC = 0$ 时为 0 分，其间线性赋分。

【条文说明】

依据《钢结构工程施工质量验收标准》（GB 50205-2020）及节点构造特征并参考拓扑重构文献以及既有工程数据的经验值定义判断阈值为 3 倍杆件半径与 3 倍点云平均点间距的较小值以及 0.1 倍杆长与 0.1m 的较小值。

5.2.7 视觉显著性噪声比（ SNR ）：利用节点处曲率大的特征将曲率作为权重提高节点处评价占比，验证节点处是否有质量问题。按下式计算：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N C_i \cdot d(P_i, \text{Plane})^2}{\sum_{i=1}^N C_i}} \quad (5.2.7 - 1)$$

$$SNR = 1 - \frac{\sigma}{D} \quad (5.2.7 - 2)$$

式中： σ ——曲率显著性加权平均偏差；

C_i ——局部曲率，作为权重以提高节点等高曲率部位的评价占比；

$d(P_i, \text{Plane})$ ——点 P_i 到最小二乘法计算所得的理想拟合平面的距离；

D ——工程允许公差上限。

其赋分规则应为：当 $SNR = 1$ 时为 100 分，当 $SNR = 0$ 时为 0 分，其间线性赋分。

【条文说明】

在结构的节点处以及节点与杆件连接处如果噪声较多或是点云质量不够，就会导致算法识别节点出现错误，从而对结构分析产生较大的影响。所以通过视觉显著性噪声比指标重点评价重要部位处点云的质量，利用局部曲率 C 作为权重以增加节点等高曲率区域的评价占比。 σ 作为加权平均偏差，其值越小说明节点处的点云越平滑、噪声越低。依据《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205-2020 中关于节点及杆件加工/安装允许偏差的规定，可取 $D = 5 \text{ mm}$ 。

5.3 点云质量预检评价

5.3.1 对于 $OR > 15\%$ 或 $OVR > 50\%$ 或 $LPD < 5$ 的点云数据，都应对初始点云数据进行预处理或是再次扫描得到质量合格的点云后才可投入后续算法继续运行。

【条文说明】

如果局部点云密度不满足要求算法无法计算轴线以及界面中心；遮挡空洞率太高算法计算出的轴线会产生偏移，从而对变形识别带来较大误差；离群点比例过高算法会产生虚假杆件导致语义分割错误，导致在错误的杆件上进行变形识别产生错误的结果。所以离群点比例、遮挡空洞率、局部点云密度三个指标对后续算法的成功执行具有决定性的作用。如果这三个指标不合格，后续算法的语义分割、空间关系判断以及变形计算将产生较大误差，或是导致算法发散从而计算异常终止。

5.3.2 对于 $OR \leq 15\%$ 、 $OVR \leq 50\%$ 且 $LPD \geq 5$ 的点云数据，应再次将 6 个指标加权计算最终预检得分，权重宜按表 5.3-1 进行取值。最终点云质量得分（ CQS ）计算公式如下：

$$CQS = 0.2 \times OR + 0.2 \times LPD + 0.2 \times OVR + 0.1333 \times TC + 0.1333 \times PDU + 0.1333 \times SNR \quad (5.3.2 - 1)$$

表 5.3-1 多维加权指标权重分配

指标名称	权重
离群点比例（ OR ）	20%
局部点云密度（ LPD ）	20%
遮挡空洞率（ OVR ）	20%
拓扑可连接性估计（ TC ）	13.33%
空间采样均匀性（ PDU ）	13.33%
视觉显著性噪声比（ SNR ）	13.33%

【条文说明】

对于通过 OR 、 OVR 与 LPD 筛查的点云数据，需通过多维加权评价指标进一步综合评估其数据质量。各指标权重的分配严格依据数据质量对后续杆件分割、截面拟合及中心轴线提取等算法收敛性与解算精度的物理影响机制进行量化设定，将具有决定性因素的 OR 、 OVR 与

LPD 三个指标设为较高权重 20%，以保证后续算法运行的稳定性；将其余三个指标的权重设为 13.33%，以补充表征点云的空间分布形态与节点区域的局部几何特征。

5.3.3 根据点云数据的质量状态，点云整体数据状况评定等级分为 A 类、B 类、C 类，见表 5.3-2。

表 5.3-2 点云数据预检质量评价等级

点云数据质量等级	判定标准
A 类	OR、OVR、LPD 通过检验且加权总分高于 85
B 类	OR、OVR、LPD 通过检验且加权总分位于 60 至 85
C 类	OR 或 OVR 或 LPD 未通过检验或加权总分低于 60

【条文说明】

若点云数据的质量等级为 A，则说明此数据在后续算法运行中流畅迅捷，处理结果置信度高；若点云数据的质量等级为 B，则说明此数据在后续算法运行不会出现原理性问题，结果置信度较高；若点云数据的质量等级为 C，则说明此数据运行算法的结果置信度较低，需对点云预处理或重新扫描。

5.3.4 对于质量等级评定为 C 类的点云数据，应对初始点云数据重新进行预处理或重新扫描，并应经再次评价达到 B 类及以上后方可投入后续算法。

6. 点云构件分割、特征提取与几何模型生成

6.1 一般规定

6.1.1 本章规定空间结构三维点云数据的构件实例分割、节点与杆件特征提取、几何模型生成与质量评价的方法、流程与要求。

【条文说明】

本章面向空间结构三维点云的构件级处理。本章所称“构件”包括节点与杆件两类主要元件；“构件实例分割”即将点云中每一个节点、每一根杆件作为独立个体进行分离，为后续特征提取、几何建模与力学评价提供分对象的输入数据。

6.1.2 构件实例分割与几何模型生成的输入点云数据应符合下列规定：

1. 已完成多测站配准、去噪、采样等预处理，点云数据质量评价等级应符合本规程第 5 章的有关规定，且不应低于 B 类；
2. 点云数据应附有可追溯的配准精度、采集参数和坐标基准信息。

6.1.3 构件实例分割、特征提取与几何模型生成宜按下列流程进行：

1. 整体点云的预分类与背景剔除；
2. 构件实例分割，同时输出节点与杆件实例；
3. 节点中心与杆件中心线的特征提取；
4. 节点—杆件拓扑关系建立；
5. 三维几何模型生成；
6. 分割与建模成果质量评价。

【条文说明】

本条给出的流程是自“整体到局部、几何到语义”的处理顺序：先剔除背景，再分离构件实例，然后提取节点—杆件的几何特征、建立拓扑关系，最后生成结构几何模型。质量评价环节贯穿全过程，各阶段成果均应按本规程第 6.7 节的规定进行评价，并应记录评价指标。

6.1.4 几何模型生成应遵循下列原则：

1. 节点与杆件的对应关系应与点云数据中识别的实际拓扑一致；
2. 几何参数应优先采用点云直接测量值；
3. 当某一构件因严重遮挡或损伤无法直接提取时，可采用合理假设并在成果中明确标识；
4. 应保留原始点云与各级处理成果之间的对应关系，便于追溯。

6.2 构件实例分割

6.2.1 构件实例分割应同时实现节点点云与杆件点云的实例化分离，分割结果应支持下列后续处理：

1. 节点中心坐标的提取；
2. 杆件中心线与截面参数的提取；
3. 节点—杆件拓扑关系的建立。

【条文说明】

将节点与杆件同步实例化分离，可保证节点—杆件拓扑关系的完整性，为后续几何建模与有限元建模提供直接对接。如仅分离杆件而忽略节点，则杆件端部的归属关系不明确，节点中心坐标提取也无法开展。

6.2.2 构件实例分割应根据结构形态、点云质量与先验信息可获得性等条件选择适宜的方法。工程实践中可采用本规程附录 B 列举的方法之一或多种组合使用，也可采用其他经工程实践验证的方法；所采用的方法均应针对目标结构形式进行验证。

【条文说明】

空间结构类型繁多、点云质量差异大、先验资料完整性不同，任何单一方法都不能覆盖所有情形。所选方法应针对目标结构形式经过验证——例如某方法在螺栓球网架上表现良好，但用于焊接相贯节点管桁架时可能出现节点识别错误，应通过对照实测节点/杆件数量、几何精度等指标验证后再用于工程实践。

6.2.3 构件实例分割方法的选择宜按下列原则确定，各方法的具体实施要素可参见本规程附录 B：

1. 结构形态较为规则、缺乏三维模型提供的结构几何信息时，宜采用区域生长法；
2. 含多类杆件、节点形式多样的复杂空间结构，宜采用特征聚类法；
3. 点云稀疏、不全或存在严重遮挡且结构形态较为规则时，宜采用单模板匹配法；
4. 具有三维模型提供的结构几何信息时，宜采用多模板匹配法；
5. 具有三维模型提供的结构几何信息且结构存在显著整体变形（或整体变形与局部变形耦合）、刚性模板匹配难以稳定收敛时，宜采用半刚性最优步进迭代配准法；
6. 具备充足的标注样本或已建立面向空间结构的预训练模型时，可采用机器学习与深度学习方法；

6.2.4 在同一工程中，可根据结构不同区域的点云质量与构件复杂程度，组合采用本规程附录 B 所列的多种方法，并应在分割成果中明确标识各区域所采用的方法。

6.2.5 构件实例分割的处理结果应满足下列要求：

1. 节点与杆件实例应与结构中实际的节点和杆件一一对应；
2. 单根杆件实例的点云应连续完整，不应被错误分割；
 - (1) 节点区域应完整覆盖连接该节点各杆件的端部点云；
 - (2) 相邻杆件之间的实例分割边界应清晰；
 - (3) 当工程具有设计模型可作参考时，宜按第 3.1.6 条核实差异后将分割成果与设计模型比对复核；工程成果质量应符合第 6.6 节及其用途对应的要求。

【条文说明】

本条给出构件实例分割在工程应用时对分割结果的定性要求，可通过对分割成果的目视检查或与设计模型比对复核判定。设计模型应先与实体核实；无设计模型时，应采用人工标注或独立复核成果作为量化评价依据。方法适用性验证不能替代工程成果的质量评价。

6.2.6 所采用的构件实例分割方法在工程应用前应进行适用性验证，验证内容应符合下列规定：

1. 应以覆盖典型结构形式、节点形式及不同点云质量条件（含遮挡、缺失等不利工况）的代表性样本作为测试集，测试集应含人工标注或高精度参考模型作为验证基准；
2. 节点漏检率不应大于 5%，误检率不应大于 3%；
3. 相邻杆件之间的实例分割混淆率不应大于 2%；
4. 验证过程、测试集构成、指标计算方法及验证结果应形成方法适用性验证记录并存档。

【条文说明】

本条列出的量化指标属于方法固有性能，应在应用于具体工程前通过测试集离线验证。测试集样本可来源于历史工程数据、公开点云数据集、合成数据或专门标注的样本，应覆盖典型结构形式、节点形式及包含遮挡、缺失等不利工况。编制组研究表明，漏检率 5%、误检率 3%、混淆率 2%可作为构件实例分割方法适用性验证的控制指标。工程中具有设计模型可作参考时，应先按第 3.1.6 条核实其与实体的一致性，再作为比对依据。方法适用性验证合格不能替代第 6.6 节的工程成果质量评价。方法适用性验证记录应完整可追溯，作为本工程分割方法选型的直接依据。

6.2.7 构件实例分割成果应记录下列内容：

1. 各节点、杆件实例的唯一编号；
2. 构件类型，包括节点类型（球节点、相贯节点、异形节点等）与杆件类型（直杆、曲杆、变截面杆等）；
3. 杆件两端对应的节点编号；
4. 实例点云的点数与质量指标；
5. 所采用分割方法与关键参数。

【条文说明】

成果记录内容是保证成果可追溯、可复现的必要条件。所采用分割方法与关键参数尤为重要，不同方法的分割结果在边界处可能有系统性差异，应在成果中明确以便后续复核。

6.2.8 当存在下列不利情况时，应在分割成果中明确标识并在质量评价报告中说明：

1. 杆件被严重遮挡，按本规程第 5.2.3 条计算的遮挡空洞率大于 50%；
2. 杆件部分区域点云密度严重不足；
3. 杆件因塑性变形、损伤或加固改造导致几何形态明显偏离设计；
4. 多根杆件因紧邻、交叉或铸钢节点包覆而难以分离。

6.2.9 对于完整性差或可信度低的分割结果，宜采用人工干预、增加扫描站点或补充其他测量手段进行修正。

6.3 节点与杆件中心线特征提取

6.3.1 节点中心坐标的提取方法应根据节点类型选择：

1. 球节点宜采用球面最小二乘拟合，以球心坐标作为节点中心；
2. 焊接相贯节点宜以汇交各杆件中心线延长后的交汇区域形心作为节点中心，或采用基于节点拓扑局部配准的方法，以节点区域点云模板与原始点云的局部配准结果确定节点位置；
3. 铸钢节点或复杂异形节点宜采用几何模板匹配方法，以模板特征参考点的拟合坐标作为节点中心。

【条文说明】

不同类型节点的几何特征差异较大，宜针对性地选择提取方法。球节点具有理想球面，最小二乘拟合可获得高精度球心；焊接相贯节点无明显几何中心，通常以汇交杆件轴线的交汇形心或节点区点云模板配准结果确定；铸钢节点或异形节点通常需要针对具体节点类型建立几何模板，通过模板匹配确定特征参考点作为节点中心。

6.3.2 当采用本规程第 6.2.3 条第 5 款及附录 B.5 规定的半刚性最优步进迭代配准法进行构件实例分割时，可直接以分割收敛后的节点位置作为节点中心坐标。

6.3.3 杆件中心线提取应符合下列规定：

1. 圆管或圆杆件宜采用圆柱面拟合，以拟合圆柱轴线作为杆件中心线；

2. 矩形或异形截面杆件宜先采用平面拟合得到截面位姿，再以截面形心连线确定中心线；

3. 弯扭、变截面等复杂曲杆件宜采用微分切片与截面参数拟合的方法，按下列要素实施：

- (1) 将杆件点云沿初步轴线方向按等长切片，切片长度宜取杆件截面外径的 1 倍~2 倍，且不宜大于杆件全长的 1/20；
- (2) 对每片点云在垂直轴线方向的投影面进行截面拟合，得到截面中心；
- (3) 将各切片截面中心按轴线方向排序连接，构成实际杆件中心线。

【条文说明】

不同截面形式的杆件适用不同的中心线提取方法。圆管或圆杆件可直接采用圆柱面拟合；矩形或异形截面杆件应先通过平面拟合确定截面位姿，再以截面形心连线得到中心线；弯扭、变截面等复杂曲杆件宜采用微分切片方法，将杆件按等长切片、逐片进行截面拟合，将各切片截面中心排序连接得到实际中心线。此方法在处理复杂曲杆件时可有效避免整体拟合带来的几何失真。

6.3.4 当现场存在重力、施工荷载等可仿真荷载引起的结构变形干扰时，宜采用考虑物理仿真位移剔除的双向配准方法：

1. 基于先验荷载与材料参数对结构进行物理仿真，预估荷载变形；
2. 从点云中扣除可仿真荷载变形分量；
3. 通过半刚性正向配准与刚性反向配准的迭代，得到稳定的位形识别结果；扣除前的原始实测位形应予保留，扣除的仿真变形分量及所采用的荷载、材料参数应在成果中记录。

【条文说明】

扫描过程中结构处于带载状态，实测点云已包含自重、施工荷载等作用下的变形。物理仿真位移剔除方法通过预先仿真计算可预估的荷载变形分量，从点云中扣除后再进行半刚性正向配准与刚性反向配准，可显著提高识别精度。

6.3.5 杆件几何参数的提取应包括下列内容：

1. 杆件长度，按相邻节点中心间距计算；
2. 截面尺寸，包括外径、壁厚、宽度、高度等；
3. 杆件直线度或曲率参数；
4. 端部连接位置与连接形式。

6.4 结构几何模型生成

6.4.1 结构几何模型应包括下列基本要素：

1. 节点集，包含各节点的编号、空间坐标、节点类型；
2. 杆件集，包含各杆件的编号、端节点编号、截面参数、长度、曲率；
3. 拓扑关系，即节点与杆件之间的连接关系；
4. 实际几何形态，包括杆件实际中心线、节点实际位置以及初始几何缺陷等信息。

【条文说明】

本条列出几何模型的四类基本要素。节点集、构件集、拓扑关系是最基本的几何—拓扑信息，可支持有限元杆系建模；实际几何形态包括构件实际中心线、节点实际位置及初始几何缺陷等信息，是精细力学分析和高保真数字孪生的必要输入。

6.4.2 结构几何模型应区分名义几何模型与实际几何模型：

1. 名义几何模型为以节点中心、直线杆件中心线及设计截面参数表示的简化模型，对应设计状态，用于常规设计、复核；
2. 实际几何模型为以点云提取的实际节点坐标、实际杆件中心线（含初始弯曲）及实际截面参数表示的精细模型，反映点云实测状态，用于既有结构安全评价、施工偏差检测、变形分析等。

【条文说明】

同一工程可视需要同时输出两套模型，通过对比可直观展示结构与设计的偏差。

6.4.3 结构几何模型可按用途分为下列层级：

1. 拓扑级模型，仅含节点—杆件连接关系信息，用于结构整体性核查；
2. 中心线级模型，含节点坐标与杆件中心线，用于结构有限元杆系建模；
3. 实体级模型，含完整截面与构件外形，用于碰撞检测与 BIM 协同；
4. 高保真级模型，含构件初始几何缺陷与实测变形信息，用于精细力学分析。

【条文说明】

本条给出的四个层级从简单到详细依次递进：拓扑级用于整体性核查，模型体量最小；中心线级用于有限元杆系建模，是最常用的模型层级；实体级含完整外形，用于碰撞检测和 BIM 协同；高保真级含初始几何缺陷与实测变形，用于精细力学分析。使用者应根据具体分析需求选择适当层级，避免过度建模造成资源浪费。

6.4.4 几何模型的输出格式应满足后续分析需求，宜采用通用的中性数据交换格式，并应附质量评价报告与坐标基准说明。

【条文说明】

中性数据交换格式指不依赖特定软件、可由多种软件读写的公开格式。几何模型交付常用的中性格式包括产品数据交换标准格式和建筑信息模型数据交换格式等，选用时应确认接收方软件的读取能力，并应保证构件编号、截面属性和坐标基准在转换后不丢失。

6.4.5 应建立几何模型与设计模型的映射关系，当二者的几何偏差超过设计文件或专项方案规定的限值时，应在模型中明确标识并在成果交付时说明。

6.5 点云处理结果评价指标体系

6.5.1 在完成空间结构点云的构件实例分割与特征提取后，宜采用点云处理结果评价体系配合工程图纸或模型，对处理结果的几何精度等方面进行综合评估，验证输出结果的可信度。各指标参数的计算应符合本规程附录 A.2 的规定；采用其他算法时，应经验证并在检测报告中说

【条文说明】

本评价指标体系主要适用于有设计图纸、竣工资料或 BIM 模型依托的情况。在此条件下，通过将点云处理提取出的轴线、节点坐标、截面尺寸与设计基准进行对齐和严密比对，能够高精度量化评估算法生成的几何模型对物理实体真实状态的还原程度。

针对服役时间久远、设计资料缺失或无图纸与模型的结构，由于缺乏直接的设计坐标与尺寸基准，无法直接计算指标具体数值，在此工况下，可基于几何拓扑是否自洽、网格节点间连接关系是否闭合及统计截面拟合等数据的分布特征进行结果可信度评价。若利用深度学习和智能化点云分割算法进行计算，可利用算法正确分类的点在总点数的占比计算语义分割准确率进行结果可信度评价。

6.5.2 根据点云数据的处理结果，点云处理结果质量评定系数及各系数评分标准应按表 6.5-1 的规定确定。

表 6.5-1 点云处理结果质量评价等级

鉴定对象	鉴定内容	指标名称	评分标准
点云处理结果	构件分割与识别质量	算法收敛残差（ $RMSE$ ）	当 $RMSE=0$ 时为 100 分，当 $RMSE\geq\max(0.75\bar{d},3mm)$ 时为 0 分，其间线性赋分。
		识别完备率（ η ）	按节点识别完备率与杆件识别完备率两项指标中的较低方的数值确定，将其数值赋为百分制分数
	几何特征提取质量	轴心线偏移量（ δ_{axis} ）	当 $\delta_{axis}=0$ 时为 100 分，当 $\delta_{axis}>\max(L_i/1000,5mm)$ 时为 0 分，其中 L_i 为杆件计算长度，其间线性赋分
		截面拟合残差（ σ_{surf} ）	当 $\sigma_{surf}\geq8mm$ 时为 0 分，当 $\sigma_{surf}=0$ 时为 100 分，其间线性赋分

【条文说明】

若使用表 6.5-1 以外的其他指标进行评价，需经验证并在检测报告中说明。

6.5.3 算法收敛残差（ $RMSE$ ）：利用配准后的均方根误差定量计算表示出算法的收敛性，表示在算法配准后计算模型与点云数据的距离，其阈值应为 $0.75\bar{d}$ 与 $3mm$ 两者的较大值。 $\bar{d}$ 为点云平均点间距，应按本规程附录 A.2.1 的规定在参与配准误差计算的同一点云上统计，并应在检测报告中注明所采用的 $\bar{d}$ 值。同时 $RMSE$ 不应大于本规程第 3.3.2 条规定的相应精度等级单点测距精度的 1.5 倍。按下式计算：

$$d_i = \min_{p_j \in P, j \neq i} \|p_i - p_j\|_2 = \min_{p_j \in P, j \neq i} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \tag{6.5.2 - 1}$$

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (6.5.2 - 2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|RP_{i,design} + t - P_{i,scan}\|^2} \quad (6.5.2 - 3)$$

式中： P ——目标点云集合

p_i —— P 中的第 i 个点，其三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) ；

p_j —— P 中除 p_i 自身外距离其最近的点其三维坐标为 (x_j, y_j, z_j) ；

n ——参与配准误差计算的点对总数量；

R ——旋转矩阵；

t ——平移向量；

$P_{i,design}$ ——设计模型中第 i 个采样点的三维坐标；

$P_{i,scan}$ ——扫描点云中，与计算模型第 i 个点相对应的目标点三维坐标。

其赋分规则应为：当 $RMSE=0$ 时为 100 分，当 $RMSE \geq \max(0.75\bar{d}, 3mm)$ 时为 0 分，其间线性赋分。

【条文说明】

在算法运行过程中会将计算生成的模型与点云进行对齐从而完成杆件和节点的语义分割以及变形计算，如果计算模型与点云的误差较大则说明算法生成的计算模型有错误，从而导致后续的分割、变形计算等步骤出现较大误差，使得输出结果不可信，应重新调整算法的配准参数。编制组研究表明，当 $RMSE < 0.75\bar{d}$ 时配准已经基本收敛，且可以保证后续分割与变形识别结果的可靠性，故将其阈值设定为 $0.75\bar{d}$ 。算法迭代收敛过程（实际迭代步数、残差迭代历史及残差振荡次数）属于算法自身的运行诊断信息，宜随处理成果一并记录和交付，作为判断配准可靠性的辅助依据，不作为独立评分指标。

6.5.4 识别完备率（ η_{node} 、 η_{rod} ）：利用准确识别的节点或杆件数量与设计模型中节点或杆件的总数做比值，得出识别完备率。

$$\eta = \frac{N_{identified}}{N_{total}} \times 100\% \quad (6.5.3 - 1)$$

式中： η ——节点或杆件的识别完备率；

$N_{identified}$ ——正确识别的节点或杆件数量；

N_{total} ——设计模型中节点或杆件的总数。

其赋分规则应按节点识别完备率与杆件识别完备率两项指标中的较低方的数值确定，将其数值赋为百分制分数。

【条文说明】

识别完备率用于反映算法对结构节点和杆件的检出完整程度。节点与杆件是构成空间结构几何模型及拓扑关系的基本对象。若节点识别不完整，则会导致节点坐标、节点位移及节点—杆件连接关系缺失；若杆件识别不完整，则会导致杆件变形漏检、构件拓扑中断，使后续生成的几何模型与有限元模型不能完全反映实际结构状态，从而降低输出结果的可信度。

6.5.5 轴心线偏移量（ δ_{axis} ）：利用轴线两个端点与设计轴线节点的距离来表示计算轴线出现的偏移程度。按下式计算：

$$\delta_{axis} = \frac{\|P_{start,m} - P_{start,d}\| + \|P_{end,m} - P_{end,d}\|}{2} \quad (6.5.4 - 1)$$

式中： $P_{start,m}$ 、 $P_{end,m}$ ——算法计算得出的轴线起点、终点坐标；

$P_{start,d}$ 、 $P_{end,d}$ ——结构设计的轴线节点的起点、终点坐标。

其赋分规则应为：当 $\delta_{axis}=0$ 时为 100 分，当 $\delta_{axis}>\max(L_i/1000, 5mm)$ 时为 0 分，其中 L_i 为杆件计算长度，其间线性赋分。

【条文说明】

在计算杆件的变形时，算法利用每个截面的质心与计算提取出的轴线的距离计算杆件的挠度值。如果算法计算出的轴线与实际结构的轴线产生偏差，则会导致变形计算出现较大的误差以及后续有限元模型计算承载力产生附加弯矩。依据编制组研究表明，若轴线偏移量大于 5mm

则会导致后续在模型中求解变形与力产生较大误差，同时考虑轴心线端点由圆柱面拟合得到，其偏移量必然包含仪器测距误差、配准残差与算法拟合误差的合成，将该指标阈值设定为 $L_i/1000$ 与 5 mm 中的较大值。此外，提取轴线对应的挠度曲线应连续、平滑，呈锯齿状突变时表明轴线提取结果可信度较低，宜复核处理参数；杆件表面点云覆盖率不足（如低于可见侧面积的 50% ）时，拟合轴线会向有数据一侧偏移，评价轴线偏移量时宜结合遮挡情况判断其可信度。截面拟合半径与设计半径的对比可作为辅助核查手段，但其偏差量级通常小于扫描仪单点测距精度，点云难以有效分辨，不宜作为量化评分指标，必要时宜采用卡尺等接触式测量抽样复核。

6.5.6 截面拟合残差（ σ_{surf} ）：利用点云中点到计算轴线的距离计算点云中噪声的含量。按下式计算：

$$\sigma_{surf} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d(P_i, L_{axis}) - R_{fit})^2} \quad (6.5.5 - 1)$$

式中： n ——参与该截面拟合计算的点云总点数，即被评估杆件的提取点总数；

$d(P_i, L_{axis})$ ——点到轴线的垂直距离；

R_{fit} ——拟合半径。

其赋分规则应为：当 $\sigma_{surf} \geq 8\text{mm}$ 时为 0 分，当 $\sigma_{surf} = 0$ 时为 100 分，其间线性赋分。

【条文说明】

若扫描点到拟合截面的距离大于精度范围，则说明点云中有大量噪声点，使算法在拟合截面、计算变形时产生较大误差。激光扫描仪在 10 到 20 米内的测距精度约为 $4\text{ mm} \sim 7\text{ mm}$ 、点云精度约为 $6\text{ mm} \sim 8\text{ mm}$ ，故将该指标阈值定义为 8 mm 。

6.6 点云处理结果评价

6.6.1 对于 $RMSE \geq \max(0.75\bar{d}, 3\text{mm})$ 或 $\eta < 60$ 分的处理结果，都应调整计算参数或重新扫描更高质量的原始点云后再次运行。

【条文说明】

如果算法收敛残差系数不合格则说明算法在将设计模型与点云模型对齐时出现较大的误差，从而使得算法在后续的语义分割、变形分析中因为对应关系错误而可信度较低；如果识别完备率系数不合格则说明算法未能识别出较大部分的杆件与识别，使得结果中可能忽略了有变形的杆件或有位移的节点，导致结果置信度降低。

6.6.2 对于 $RMSE < \max(0.75\bar{d}, 3mm)$ 且 $\eta \geq 60$ 分的处理结果，应再次将 4 个指标加权计算最终预检得分，权重宜按表 6.6-1 进行取值。最终点云质量得分（ TQS ）计算公式如下：

$$TQS = 0.3 \times RMSE + 0.3 \times \eta + 0.2 \times \delta_{axis} + 0.2 \times \sigma_{surf} \tag{6.6.2 - 1}$$

表 6.6-1 多维加权指标权重分配

指标名称	权重
算法收敛残差（ $RMSE$ ）	30%
识别完备率（ η ）	30%
轴心线偏移量（ δ_{axis} ）	20%
截面拟合残差（ σ_{surf} ）	20%

【条文说明】

对于通过 $RMSE$ 与 η 筛查的处理结果，需通过加权评价进一步综合评估其置信度。各指标权重的分配严格依据算法处理过程中以及处理结果中对置信度与参考性的物理影响机制进行量化设定，将具有决定性因素的 $RMSE$ 与 η 两个指标设为较高权重 30%，以保证输出结果的置信度；将其余两个指标的权重设为 20%，以补充表征输出结果的全局参考性。

6.6.3 根据点云处理结果的质量状态，处理结果质量评定等级由硬性指标核验与加权指标评分，分为 A 类、B 类、C 类，见表 6.6-2。

表 6.6-2 点云数据预检质量评价等级

处理结果质量等级	判定标准
A 类	$RMSE$ 与 η 通过检验且加权指标总分高于 85
B 类	$RMSE$ 与 η 通过检验且加权指标总分位于 60 至 85

C 类	$RMSE$ 与 η 未通过检验或加权指标总分低于 60
-----	-----------------------------------

【条文说明】

若处理结果的质量等级为 A，则说明点云处理结果高度可靠，构件语义分割精确，结果可直接用于实际工程指导；若处理结果的质量等级为 B，则说明处理结果合格，能够反映结构真实的变形；若处理结果的质量等级为 C，则说明处理结果不可靠，不能真实反映物理实体状态，应调整参数再次计算或重新扫描更高质量的点云数据。

6.6.4 对于质量等级评定为 C 类的处理结果，应调整参数再次计算或重新扫描更高质量的点云数据，并应经再次评价达到 B 类及以上后方可指导实际工程。

6.6.5 几何模型质量评价报告应包括下列内容：

1. 输入点云数据来源、密度及配准精度；
2. 分割与建模采用的方法及参数；
3. 各项质量评价指标及其质量等级；
4. 异常构件、缺失构件及人工干预情况说明；
5. 与设计模型的差异说明。

7. 结构变形检测

7.1 一般规定

7.1.1 本章规定的结构变形检测方法可用于空间网架、网壳、桁架、张弦结构、索网和塔架等空间结构在施工、验收及服役阶段的几何变形检测。

【条文说明】

本章以完成质量核验、构件分割、特征提取和几何建模的结构点云为基础，重点规定检测基准、节点杆件匹配、指标计算和异常复核。三维点云主要反映结构可见表面的几何状态，适用于施工过程控制、竣工验收、服役阶段巡检及异常部位复核。点云扫描不能替代材料强度、焊缝内部质量、螺栓预拉力及封闭截面内部状况等专项检测；对遮挡、缺失、强反射或不能稳定成像的区域，应标明范围并补充测量或采用其他检测方法。

7.1.2 结构变形检测应包括整体变形检测和局部变形检测。整体变形应包括结构整体挠度、水平位移和支座位移；局部变形应包括杆件初弯曲与非正常弯曲、局部凹陷、截面整体畸变和节点坐标空间偏差。

【条文说明】

整体变形以结构或安装单元的总位形为对象，空间结构主要通过节点空间位置变化反映；局部变形以单根杆件、局部表面、单个截面或节点的局部几何状态为对象。局部节点坐标空间偏差用于表示扣除邻域共同运动后的节点剩余偏差，与用于表达整体位形的节点位移应予区分。支座沉降、整体扭转等指标难以由点云数据直接可靠反映，宜结合专项测量方法和结构分析另行确定；整体倾斜可按第 7.2.6 条由不同高程节点组的平均水平位移差评价。

7.1.3 结构变形检测应根据检测目的、结构形式、施工或使用阶段和现场条件，确定检测项目、范围、基准、精度、计算方法和复核要求，并宜收集并核查下列资料：

1. 设计、施工、竣工及设计变更资料；
2. 结构力学模型、结构几何模型及其坐标系统说明；
3. 测量控制网、坐标与高程基准、既有监测点及历次检测资料；
4. 检测时的荷载、环境条件、支承状态、施工阶段及临时措施资料；

5. 检测区域可视范围、遮挡情况，以及结构改造、维修、撞击、火灾、腐蚀或超载记录。

【条文说明】

检测目的不同，对范围、精度和成果深度的要求也不同。验收检测宜覆盖规定的控制部位并满足限值判定要求，日常巡查可重点筛查变形敏感和历史异常部位，专项复核则宜提高局部覆盖和重复观测要求。设计、施工、竣工、变更、力学模型和历次检测资料是确定检测基准及解释结果的重要依据；荷载、环境条件、支承状态和临时措施，以及改造、维修、撞击、火灾、腐蚀或超载记录，有助于区分结构变形、施工偏差和环境作用造成的几何变化，宜结合检测目的进行核查。资料不完整时，可采用现场控制基准或经确认的替代资料，但应说明替代依据及其对结论的影响。

7.1.4 结构变形检测应以经质量核验的结构点云以及由构件分割、特征提取和几何建模获得的构件、节点及几何模型成果为输入，宜按输入成果核验、检测基准建立、同名节点杆件匹配、变形指标计算、异常复核和成果编制的程序进行，并应符合下列规定：

1. 输入节点杆件编号、拓扑关系和几何特征应保持一致；
2. 遮挡、缺失、低质量及人工修正区域应保留相应标识；
3. 用于变形检测的几何特征应保留与原节点、杆件及几何模型的对应关系；
4. 输入成果不能满足变形计算要求时，应复核或补充相应数据。
5. 检测所需的节点实测坐标、杆件轴线、截面中心点序列及杆件表面点云应由构件分割、特征提取或几何模型生成结果获得，其节点杆件编号体系应与选定检测基准保持一致。

【条文说明】

检测前应核查点云及几何模型的完整性和可用性，确认构件、节点的编号及拓扑关系一致，轴线、中心坐标、截面等几何特征满足相应变形指标的计算要求。遮挡、缺失、低质量及人工修正区域可能影响构件和节点匹配及检测结果的可靠性，故应保留相应标识。由原始成果提取或计算得到的检测特征，应能够追溯至相应的构件、节点及几何模型，以便进行数据复核和异常定位。当输入成果的完整性或精度不能满足变形计算要求时，应补充采集、重新处理或采用

其他适宜的检测方法。节点实测坐标可由节点点云几何拟合、相连杆件轴线交汇或拓扑约束下的几何模型配准确定，并应与相应的杆件和节点编号建立对应关系。

7.1.5 结构变形检测基准应根据检测目的确定，可采用设计模型、施工阶段控制模型、竣工或初始实测模型、历史期次实测模型，或设置在结构变形影响范围外且位置稳定的控制点。多期检测应统一坐标系统、节点和杆件编号、检测基准及统计口径；检测条件不一致时，应记录其差异并分析对检测结果的影响。

【条文说明】

不同检测基准所得结果具有不同含义。以设计模型或施工阶段控制模型为基准时，检测结果反映实测状态相对于目标位形的几何偏差；以竣工、初始实测或历史期次模型为基准时，检测结果反映结构在相应时段内的位形变化；采用控制点建立检测基准时，控制点宜布设在结构变形影响范围外，并应在各期检测中保持位置稳定和便于复测。多期检测还应记录温度、荷载、日照、支承状态和施工阶段等条件。实际结构的制作、安装偏差可能影响变形计算，必要时宜采用卸载前后或相近工况下的实测结果进行比较。

7.1.6 结构变形检测应根据检测基准，计算结构整体变形和局部变形的变形指标。采用自动化或半自动化算法时，应记录算法类型、主要参数及结果复核情况。对接近或超过限值、变化异常或与结构受力状态不一致的结果，应进行复核；必要时，应采用其他适用方法补充验证。

【条文说明】

变形计算结果表示结构实测几何状态相对于检测基准的差异或变化。算法及参数记录主要用于保证计算过程可追溯、可复核。异常结果宜复核原始点云、构件分割与特征提取结果、计算参数及现场工况；对超过控制值或可能影响工程决策的部位，宜采用局部补测或独立测量方法复核，如可采用全站仪、水准仪或其他适用方法进行补充验证。受杆件厚度、点云密度、扫描方向和遮挡影响的离散表面点，不宜直接作为节点位移或结构整体挠度的计算依据。

7.1.7 检测结果应统一坐标系统、计量单位和偏差符号，并应给出相应节点或杆件的编号、变形类型、变形方向、变形值、计算方法及检测精度；检测基准及评价依据应予说明。

【条文说明】

坐标系统、计量单位和偏差符号是成果复核的基础。检测结果应能定位至具体节点或杆件，

并可追溯至相应数据和计算方法。采用工程坐标系、模型坐标系或构件局部坐标系时，应明确转换关系，并在数据表、图件和模型中保持一致。

7.2 整体变形检测

7.2.1 整体变形检测应包括结构整体挠度、水平位移和支座位移的检测，检测对象、检测方法和成果要求宜按表 7.2.1 的规定执行。

表 7.2.1 整体变形检测项目

序号	检测项目	主要检测对象	主要检测方法	成果要求
1	结构整体挠度	同编号节点实测位置	计算节点沿重力方向或规定方向的坐标差，必要时扣除支座共同位移	节点竖向位移、结构竖向位移分布及最大挠度
2	水平位移	同编号节点实测位置	节点水平坐标差；不同高程的节点组平均水平位移差	节点水平位移、结构水平合位移及整体倾斜
3	支座位移	支座节点实测位置	计算支座节点与设计位置、初始实测位置或历史期次位置的坐标差	支座水平位移、竖向位移及合位移

【条文说明】

表 7.2.1 的三类项目构成整体变形检测的基本内容。相关研究将空间结构的整体变形表述为节点位移，并通过几何模型先验求取节点实际位置，同时便于与设计模型、结构力学模型相对应。因此，本节以同编号节点坐标差作为整体变形的基本数据。挠度曲线、位移云图或等值面可由节点结果插值形成，但其用途主要是整体分布表达，不宜替代节点实测数值。

结构整体挠度主要反映结构沿重力方向的整体变形，水平位移主要反映结构在水平面内的整体移动和倾斜，支座位移用于反映结构边界位置的变化。缺少可靠基准或节点位置质量不足时，可给出实测位形，不宜作出判定性结论。

7.2.2 整体变形检测应将由本规程第 6 章获得的实测节点坐标与所选检测基准统一至同一坐标

系统，并根据同编号节点实测坐标计算整体变形；参与计算的节点宜覆盖全部能够可靠识别的节点；不能全部覆盖时，应包括支座、边界、跨中、主要受力杆件交会处、刚度突变处及变形敏感部位。

【条文说明】

几何模型可采用所选检测基准的杆系模型或有限元模型。整体配准用于确定结构点云与几何模型的初始空间关系，为节点定位和变形计算提供基础。

节点体系明确的空间结构宜使用全部可靠识别的节点，而不只选取少量人为控制点。节点覆盖不完整时，应优先选取能够反映结构边界条件和整体变形特征的节点。网架和桁架宜包括支座、边界、跨中、跨度分点、主桁交会和刚度突变处；网壳宜包括边界环梁、屋脊、谷线及曲率变化明显部位；张弦和索结构宜包括锚固端、索夹、撑杆端及竖向变形敏感部位。整体变形不宜由构件表面随机取点计算，以免将截面尺寸、局部弯曲或扫描方向影响误计为整体位移。

7.2.3 整体配准宜采用刚性配准与拓扑约束下的半刚性配准相结合的方法。刚性配准应依据检测基准统一坐标系统；半刚性配准宜保持节点连接关系及杆件截面几何特征，并用于确定节点实测位置。配准结果应检查距离残差、有效对应比例及节点连接连续性。

【条文说明】

刚性配准是指对点云或几何模型整体施加统一的旋转和平移变换，使不同数据处于同一坐标系统中，配准过程中不改变结构对象的尺寸、相对位置和几何形态。刚性配准可采用控制点、结构特征点或最近邻迭代等方法，其所采用的控制点或稳定区域应与检测基准一致，避免消除结构的真实整体位移。仅采用整体刚性配准时，各节点的局部偏差可能在整体平移和转动参数求解过程中相互补偿。此时，虽然总体距离残差较小，但配准结果未必能够准确反映各节点、杆件及局部区域相对于检测基准的实际偏差。

半刚性配准是指在完成整体刚性配准的基础上，允许节点、杆件或局部几何对象在一定约束条件下进行有限调整，使几何模型适应结构的实测位形。半刚性配准不同于任意非刚性变形，其调整应受到节点连接关系、杆件轴线连续性、构件长度或截面几何特征等条件约束，不应任意改变构件截面形态或破坏节点连接关系。

实际应用中，宜先通过刚性配准统一一点云与几何模型的坐标系统，再采用拓扑约束下的半刚性配准确定节点实测位置和构件局部位形。配准质量可通过距离残差、有效对应比例及节点

连接连续性等指标进行检查；必要时，还应结合关键节点和异常部位的人工复核结果进行判定。

7.2.4 节点位移应根据同编号节点的实测坐标与基准坐标计算。实测节点坐标可由分割后的节点点云拟合确定，也可根据拓扑约束配准（半刚性配准）所得的相应模型顶点或相连杆件端点确定。节点分量位移、水平合位移、三维合位移及竖向偏差应按式（7.2.4-1）～式（7.2.4-4）计算。

$$\Delta \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_i^m - \mathbf{p}_i^0 = [\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i]^T \quad (7.2.4-1)$$

$$h_i = \sqrt{(\Delta \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{e}_x)^2 + (\Delta \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{e}_y)^2} \quad (7.2.4-2)$$

$$d_i = \|\Delta \mathbf{p}_i\| = \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2 + (\Delta z_i)^2} \quad (7.2.4-3)$$

$$v_i = \Delta \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{e}_z = z_i^m - z_i^0 \quad (7.2.4-4)$$

式中： $\mathbf{p}_i^m$ 为第*i*个节点的实测坐标； $\mathbf{p}_i^0$ 为相应基准坐标，可为设计坐标、初始实测坐标或上一周期实测坐标； $\Delta \mathbf{p}_i$ 为三维位移向量； Δx_i 、 Δy_i 、 Δz_i 分别为坐标分量差； h_i 为第*i*个节点的水平合位移； d_i 为第*i*个节点的三维合位移； v_i 为第*i*个节点的竖向偏差； $\mathbf{e}_x$ 、 $\mathbf{e}_y$ 、 $\mathbf{e}_z$ 分别为标系统X、Y、Z方向单位向量。

【条文说明】

节点位移计算适用于实测结构与基准模型之间节点编号对应关系明确的情况。采用模型配准时，可取与同一节点关联的变换后模型顶点坐标平均值作为节点实测坐标；也可根据节点形式和点云特征，采用球面拟合、相连杆件轴线交会或多个杆件端点联合估计等方法确定。对同一项目，节点位置的确定方法应保持一致。以设计模型为基准所得为节点位置偏差，以初始或历史实测模型为基准所得为节点位移或变化量，两者不宜混称。单个节点的位移极值应结合邻近节点、配准残差和重复计算结果复核。

7.2.5 结构整体挠度应根据同编号节点沿重力方向或检测方案规定方向的位移确定，并应符合下列规定：

1. 以设计模型或施工阶段控制模型为基准时，应计算实测节点与相应基准节点的方向偏差；
2. 以竣工、初始实测或历史期次为基准时，应计算同编号节点的位移变化量；
3. 采用支座作为相对基准时，应明确基准节点，并宜扣除稳定支座节点的共同位移；

4. 采用插值形成挠度曲线或挠度面时，应说明插值方法和有效范围，并应保留实测节点值。

【条文说明】

空间结构的整体挠度宜由同编号节点沿重力方向的位移及其空间分布确定。以设计或施工阶段模型为基准时，计算结果包含制作和安装偏差；以初始或历史期次为基准时，计算结果反映相应时段内的实际位移变化。对于存在初始加工与安装偏差的结构，可将两个状态下各节点相对设计位置的偏差作差，以获得节点在两状态间的位移。采用支座相对基准时，可扣除支座节点的共同位移；支座较多时，可根据稳定支座节点建立参考平面。由节点位移插值得到的挠度曲线或挠度面应与实测节点值区分，最大值判定宜优先采用节点实测结果。

7.2.6 水平位移检测应根据同编号节点的水平坐标差计算水平合位移及各方向分量。水平位移检测结果应给出最大值、方向、位置和位移矢量分布。

【条文说明】

水平位移应由同编号节点的 X、Y 坐标差计算。大跨结构宜重点关注支座、边界及主要传力节点；塔架、桅杆等竖向结构可将同一高程或同一结构层的可靠节点作为一组，采用组内节点水平位移的平均值表示该高程的整体平移，并由不同高程节点组的平均位移差和高程差评价结构的整体倾斜程度。组内离散较大时，应检查是否存在局部节点偏移、构件变形或节点识别误差。采用相对基准时，还应核查支座、基底或边界是否稳定。

7.2.7 支座位移检测应以设计位置、初始实测位置或历史期次位置为检测基准，并宜符合下列规定：

1. 宜采用能够可靠识别的支座节点或支座控制点作为检测对象；
2. 应计算同编号支座节点或控制点的实测坐标相对于检测基准坐标的差值，宜分别计算支座水平位移、竖向位移及合位移，必要时可按结构规定方向分解；
3. 具有多期检测数据时，宜按同编号支座节点或控制点计算位移变化。

【条文说明】

支座位移反映结构支承位置相对于检测基准的位置变化。采用设计位置作为基准时，所得结果反映支座实际位置相对于设计位置的偏差；采用初始实测位置或历史期次位置作为基准时，

所得结果反映支座在结构使用或施工过程中的位置变化；具有多期检测数据时，宜采用相同的支座节点或控制点进行比较，以获得各支座位置随时间或施工阶段的变化。

支座位移宜采用支座节点或能够稳定表征支座位置的控制点计算。检测时应保证实测对象与检测基准中的支座编号及位置一一对应，并统一坐标系和位移正方向。支座节点难以直接可靠识别时，可采用支座几何特征或与其相连构件的几何关系辅助确定支座控制点。支座位移可分解为水平位移和竖向位移，并可根据需要计算合位移。对于具有明确滑移方向的支座，可进一步按支座设计滑移方向及其垂直方向计算位移分量。支座发生共同位移时，其检测结果可作为结构整体挠度等变形计算中基准修正的依据。

7.2.8 多期整体变形比较应采用一致的节点杆件编号、节点位置确定方法和对应关系。温度、荷载、支承状态或施工阶段差异具备可靠修正依据时，可进行修正；无可靠依据时，应在成果中说明其影响。

【条文说明】

多期比较可用于分析整体挠度、水平位移和支座位移随时间或施工阶段的变化。各期应采用一致的节点杆件编号、节点位置确定方法和对应关系；处理方法或参数发生变化时，应进行一致性核查，必要时重新处理历史数据。对于存在初始制作或安装偏差的结构，宜采用同编号节点在两期实测状态下的坐标差，或采用两期节点相对设计位置偏差之差。温度、荷载、支承和施工状态存在差异时，可在具备可靠依据的情况下修正，否则应并列说明。变化量接近定位误差、配准误差或重复计算波动时，不宜解释为有效结构变化。

7.2.9 整体变形检测成果应包括检测对象和基准说明、节点对应关系、节点实测坐标、位移或偏差结果及异常复核记录，并应提供相应的挠度分布图、位移矢量图或偏差分布图。用于后续结构力学模型生成与安全评价时，应提供可映射的节点坐标、整体位移及相应质量标识。

【条文说明】

整体变形成果宜同时提供节点数值表和图形成果。数值表应能由对象编号追溯至检测基准、节点实测坐标、偏差或变化量和复核状态；图件可采用节点位移矢量图、挠度分布图、偏差云图或等值线图。采用插值图表达整体分布时，应标明实测节点位置、插值方法和有效范围，不能只列单个最大值或仅提供色谱图。检测值应依据设计文件、专项方案或现行标准判定；结构承载、稳定和安全性应另行通过结构计算分析或专项鉴定判断。

7.3 局部变形检测

7.3.1 局部变形检测应包括杆件初弯曲与非正常弯曲、局部凹陷、截面整体畸变和节点坐标空间偏差的检测，检测对象、检测方法和成果要求宜按表 7.3.1 的规定执行。受力关键、稳定敏感、受损或历史异常部位宜优先检测。

表 7.3.1 局部变形检测项目

序号	检测项目	主要检测对象	主要检测方法	成果要求
1	杆件初弯曲与非正常弯曲	杆件轴线、截面中心点序列及端部节点	计算绝对弯曲矢高、相对弯曲量及多期轴线比较	最大弯曲值、位置及变化量
2	局部凹陷	杆件表面疑似凹陷区域及其邻近未变形区域	以邻近未变形区域建立参考面，由法向偏差计算凹陷深度和范围	最大深度、位置及范围
3	截面整体畸变	截面几何形状	同参数位置拟合截面轮廓并比较尺寸，圆管截面可计算椭圆化率	尺寸变化、畸变或转角
4	节点坐标空间偏差	同编号节点实测位置	计算节点坐标差	节点坐标与分量偏差

【条文说明】

表 7.3.1 的四类项目覆盖杆件、表面、截面和节点层面的主要局部几何异常。局部变形检测使用由构件分割和特征提取得到的构件实例、节点、轴线、截面及几何模型，不重复规定基础识别算法。受压长细杆件、关键传力构件、重要节点、受损部位和历史异常部位宜优先检测。

7.3.2 局部变形检测应采用由构件分割、特征提取和几何建模获得的杆件、节点、轴线、截面中心点序列及表面点云，并应根据检测项目建立杆件局部坐标系或节点邻域坐标系。遮挡、缺失、低质量和人工修正区域应保留相应标识；影响拟合的连接板、加劲肋、螺栓、焊缝、孔洞及附着物，宜根据检测目的保留或删除。

【条文说明】

杆件局部坐标系宜以杆件轴线为纵轴，并根据截面主方向确定其余坐标轴；节点邻域坐标系可根据相连杆件方向或经确认的局部基准建立。连接构造和附着物可能影响轴线、截面轮廓或参考面拟合，处理时应沿用构件分割和特征提取成果中的范围及标识，不应将真实变形误作

离群点剔除。点云覆盖不足或遮挡严重时，应标明有效检测范围，不宜采用无依据的补点结果进行限值判定。

7.3.3 杆件初弯曲与非正常弯曲检测应采用杆件轴线或截面中心点序列进行计算，并应符合下列规定：

1. 初弯曲检测应以设计轴线、施工阶段控制轴线或杆件端点连线为检测基准；非正常弯曲检测应以初始实测轴线、历史期次轴线或经确认的参考轴线为检测基准；
2. 每根受检杆件的截面中心点数量不应少于 9 个，且相邻截面中心点的轴向间距不应大于杆件计算长度的 $1/8$ ；杆件两端邻近位置、跨中及疑似异常部位应加密，加密区段的截面中心点间距不宜大于该杆件计算长度的 $1/20$ ；截面中心点序列宜采用连续曲线拟合形成杆件轴线；
3. 用于确定端点连线的杆件端部位置应采用相应节点的实测坐标，必要时可结合相连接杆件轴线交会结果进行校核。

【条文说明】

杆件轴线或截面中心点序列是杆件弯曲计算的基础。初弯曲反映杆件相对于设计轴线、施工阶段控制轴线或端点连线的几何不直度；非正常弯曲反映当前轴线相对于初始实测轴线、历史期次轴线或其他经确认基准的变化。已有可靠杆件轴线时，可沿轴线按统一参数位置提取截面中心点；需由点云提取截面中心点确定杆件轴线时，应保持截面中心点与杆件编号及轴向参数位置的对应关系；多期检测宜采用相同或相近的轴向参数位置。

截面中心点的数量和间距直接影响弯曲形态及最大弯曲值的识别精度，宜根据杆件长度、预期弯曲形态、点云覆盖情况及拟合质量确定。编制组以典型长细比杆件、半波与双波弯曲形态开展的数值试验表明，一般情况下每根受检杆件宜设置不少于 9 个截面中心点，相邻截面中心点的轴向间距不宜大于杆件长度的 $1/8$ ；对于长杆件、弯曲形态复杂或存在疑似异常的部位，仅满足最低数量要求仍可能不足，应根据实际情况在异常部位及其邻近范围加密截面。截面中心点用于表征杆件实际中心轴线时，不宜直接以相邻中心点组成的折线作为最终检测轴线，以免截面位置和数量对弯曲计算产生较大影响；宜采用样条曲线、分段多项式曲线或其他适宜的连续曲线进行拟合，使所得轴线能够反映杆件整体及局部弯曲形态。存在明显局部折弯或曲率突变时，可结合局部加密截面进行分段拟合。

端部连接区可能受球节点、变截面及连接构造影响，截面中心点宜避开相应范围；采用节点实测坐标确定杆件端部位置，可减少首末截面点云截断对端点连线的影响；节点位置不稳定时，宜结合相连杆件轴线交会结果进行复核。

7.3.4 杆件绝对弯曲矢高应以两端基准节点的连线为基准，计算各截面中心点至端点连线的垂直距离，并取其中的最大值。杆件端点连线向量、截面中心点至端点连线的垂直偏离向量、弯曲偏离距离和绝对弯曲矢高可按式（7.3.4-1）～式（7.3.4-6）计算。

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{p}_{i2} - \mathbf{p}_{i1} \quad (7.3.4-1)$$

$$L_i = \|\mathbf{a}_i\| \quad (7.3.4-2)$$

$$\mathbf{b}_{ij} = \mathbf{c}_{ij} - \mathbf{p}_{i1} \quad (7.3.4-3)$$

$$\mathbf{b}_{ij}^\perp = \mathbf{b}_{ij} - \frac{\mathbf{b}_{ij} \cdot \mathbf{a}_i}{\|\mathbf{a}_i\|^2} \mathbf{a}_i \quad (7.3.4-4)$$

$$f_{ij} = \|\mathbf{b}_{ij}^\perp\| = \frac{\|\mathbf{b}_{ij} \times \mathbf{a}_i\|}{\|\mathbf{a}_i\|} \quad (7.3.4-5)$$

$$f_i^a = \max_{1 \leq j \leq n_i} f_{ij} \quad (7.3.4-6)$$

式中： $\mathbf{p}_{i1}$ 、 $\mathbf{p}_{i2}$ 分别为第*i*根杆件的两端基准节点， $\mathbf{a}_i$ 为第*i*根杆件的端点连线向量； L_i 为杆件计算长度； $\mathbf{c}_{ij}$ 为第*i*根杆件第*j*个截面中心点坐标； $\mathbf{b}_{ij}$ 为由第一端节点指向截面中心点的向量； $\mathbf{b}_{ij}^\perp$ 为第*j*个截面中心点到端点连线的垂直偏离向量； f_{ij} 为第*j*个截面中心点对应的弯曲偏离距离； f_i^a 为第*i*根杆件的绝对弯曲矢高， n_i 为该杆件截面中心点数量。

【条文说明】

绝对弯曲矢高反映杆件轴线或截面中心点序列相对于两端基准节点连线的最大偏离程度。采用端点连线作为计算基准，可减少杆件整体平移和转动对弯曲计算的影响。计算时，先根据两端基准节点坐标确定端点连线，再计算各截面中心点至该连线的垂直偏离向量及其模，并取最大值作为杆件绝对弯曲矢高。绝对弯曲矢高的位置应采用相应截面中心点的位置表示，其方向可根据最大弯曲矢高处的垂直偏离向量确定。

截面中心点的数量和分布会影响最大值的识别，点位过少或异常部位点云缺失时，可能低估实际弯曲矢高，故疑似弯曲部位宜适当加密。端部节点定位误差会改变端点连线，计算结果异常时应复核节点实测坐标和轴线交会残差。存在设计预拱或预弯时，应结合设计轴线进行判

别，不宜将预设几何形态直接认定为非正常弯曲。

7.3.5 杆件相对弯曲量宜取各截面中心点正交投影至垂直于杆件端点连线的平面后，投影点之间的最大距离。杆件弯曲检测值宜取绝对弯曲矢高与相对弯曲量的较大值，弯曲矢高比宜取弯曲检测值与杆件计算长度的比值，并可按式（7.3.5-1）～式（7.3.7-3）计算。

$$f_i^r = \max_{1 \leq j < k \leq n_i} \sqrt{(x'_{ij} - x'_{ik})^2 + (y'_{ij} - y'_{ik})^2} \quad (7.3.5-1)$$

$$f_i = \max(f_i^a, f_i^r) \quad (7.3.5-2)$$

$$\rho_i = \frac{f_i}{L_i} \quad (7.3.5-3)$$

式中： f_i^r 为第*i*根杆件的相对弯曲量； x'_{ij} 、 y'_{ij} 和 x'_{ik} 、 y'_{ik} 为第*j*个截面中心点和第*k*个截面中心点在杆件局部横截面平面内的投影坐标； f_i 为第*i*根杆件弯曲变形计算值。对需区分变形原因的构件，应同时列出 f_i^a 和 f_i^r ，不宜仅报告单一最大值； ρ_i 为第*i*根杆件的弯曲矢高比。

【条文说明】

相对弯曲量反映截面中心点序列在杆件横向平面内的最大离散程度，其不以单个端点或固定轴线位置作为距离起点，可用于辅助识别端部节点定位偏差或轴线整体偏移造成的绝对弯曲矢高低估。局部坐标系的 z' 轴与杆件端点连线方向一致， x' 轴和 y' 轴位于其法平面内。相对弯曲量取任意两个截面中心点投影距离的最大值，其计算结果不受局部坐标原点位置及横截面内坐标轴转动的影响。

相对弯曲量对孤立异常点较为敏感，计算前应复核截面中心点的拟合质量，并剔除由遮挡、误分割或拟合失稳形成的异常点。式（7.3.6）所得数值可用于弯曲异常筛查；需要分析变形原因时，应分别给出绝对弯曲矢高和相对弯曲量。弯曲矢高比为无量纲指标，可用于不同长度杆件之间的比较，但不宜直接等同于杆件曲率或结构安全判据。

杆件弯曲异常判定宜优先采用设计文件、专项检测方案或现行有关标准规定的限值。无明确限值时，弯曲矢高比可取 1/1000 作为初筛参考阈值，节点坐标空间偏差的初筛阈值可取现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205-2020 规定的相应允许偏差。检测值超过初筛阈值仅表明存在疑似异常，宜复核点云覆盖、构件分割、截面中心点拟合、端部节点定位和拟合残差，并结合杆件受力性质及现场状况确认；存在明显离群点时，应剔除后重新计算。

初筛结果不应代替现行标准的限值判定、结构验算或安全评价。

7.3.6 局部凹陷检测应以杆件表面疑似凹陷区域及其邻近未变形区域为检测范围，宜采用邻近未变形区域拟合参考面，并沿参考面法向计算表面点至参考面的带符号距离。不能可靠建立邻域参考面时，可采用设计曲面或初始实测曲面。凹陷区域宜按连续点集确定，检测结果应给出最大深度、位置及范围。局部凹陷深度应按实测截面轮廓相对于参考截面轮廓沿截面法向的最大内凹距离确定；可检出的局部凹陷深度不宜小于点云单点测量精度的 3 倍，并应考虑构件表面粗糙度的影响。

【条文说明】

参考面应能够反映杆件未变形时的局部表面形态。采用邻近未变形区域拟合时，宜避开焊缝、孔洞、连接板、加劲肋及其他构造突变。凹陷识别阈值宜结合点云精度、表面粗糙度和检测目的确定。边缘离散、反射异常及少量孤立点不宜直接判定为凹陷；疑似区域点云覆盖不足时，宜补充采集或采用其他方法复核。对于圆管或曲面杆件，可采用轴向、环向展开图表示凹陷范围。

局部凹陷深度用于表征截面局部向构件内部偏离正常截面轮廓的程度。参考截面可根据检测目的采用设计截面、理论截面、初始实测截面或相邻正常截面。计算时，宜将实测截面轮廓与参考截面轮廓配准，在疑似凹陷区域沿参考截面轮廓法向计算实测点至参考轮廓的距离，并取其中最大内凹距离作为局部凹陷深度。

局部凹陷的可检出能力受点云测量误差及构件表面粗糙度等因素影响。当凹陷深度与点云测量误差处于同一量级时，难以可靠区分真实凹陷与测量噪声。为降低噪声对局部凹陷判定的影响，规定可检出的局部凹陷深度不宜小于点云单点测量精度的 3 倍。对于表面粗糙或点云离散程度较大的构件，宜根据正常区域点云相对拟合表面的离散程度对可检出深度进行适当提高。

按本规程第 4.2.2 条规定的单点测距精度控制值，A、B、C 级精度作业对应的局部凹陷可检出深度下限约为 6 mm、12 mm 和 24 mm。考虑空间结构常用杆件截面尺度及局部凹陷检测要求，局部凹陷检测宜采用 A 级或 B 级精度作业；采用 C 级精度作业时，应结合构件截面尺寸和预期凹陷尺度对可检出性进行核查，当检测精度不能满足要求时，应提高检测精度或采用其他适用方法进行复核。

7.3.7 截面整体畸变检测应沿杆件长度方向在杆件轴向同一参数位置提取截面点集，拟合截面

轮廓或计算截面特征尺寸，并与设计截面、理论截面、初始实测截面或相邻正常截面等检测基准进行比较。检测截面宜垂直于构件实测轴线；当杆件发生明显弯曲或扭转时，应根据局部轴线方向建立检测截面。检测结果应给出截面主要尺寸变化、轮廓偏差或特征参数变化；必要时，可给出圆管截面椭圆化率、箱形或方管截面的边长及对角线变化、H 形截面的翼缘间距及腹板偏移等指标。圆管截面椭圆化率可按式（7.3.8）计算。

$$\psi = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_0} \times 100\% \quad (7.3.7 - 1)$$

式中： ψ 为截面椭圆化率； $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$ 分别为实测截面的最大直径和最小直径； D_0 为设计直径或初始实测等效直径。

【条文说明】

截面整体畸变是指杆件截面轮廓、主要尺寸及各组成部分相对位置发生的整体性变化，主要包括圆管截面椭圆化，箱形或方管截面的边长、夹角及对角线变化，以及 H 形截面的翼缘间距、翼缘倾斜和腹板偏移等。截面点集宜在垂直于杆件局部轴线的平面内提取。切片厚度应兼顾有效点数量和截面形态保持，避免因切片过厚引入杆件弯曲、扭转或轴线倾斜的影响。当杆件存在明显弯曲或扭转时，宜根据局部轴线方向连续建立检测截面。

圆管截面可采用最大直径、最小直径、等效直径和椭圆化率等参数评价；箱形或方管截面可采用边长、对角线、夹角及轮廓拟合偏差等参数评价；H 形截面可采用翼缘间距、翼缘倾斜、腹板偏移及组成板件相对位置等参数评价。疑似异常部位宜沿杆件轴向连续提取多个截面，以判断截面整体畸变的范围及变化趋势。检测时应明确设计截面、初始实测截面、历史期次截面或相邻正常截面等检测基准。采用不同检测基准所得结果反映的含义不同，不宜直接混用。

7.3.8 节点坐标空间偏差应在同编号节点的实测坐标与检测基准坐标差值基础上，扣除由相邻稳定节点确定的邻域共同位移后计算。检测结果应给出节点实测坐标、邻域共同位移及扣除邻域共同位移后的各坐标分量偏差。

【条文说明】

节点坐标的确定方法应与节点构造和点云覆盖情况相适应。球形节点可采用球面拟合；采用相连杆件轴线交会时，应检查轴线交会残差；板式、相贯或异形节点可采用特征面、特征线、孔中心或多个杆件端点联合确定。同一项目应统一节点坐标的确定方法。

节点坐标空间偏差用于反映单个节点相对于其邻域共同运动的局部异常，不同于第 7.2.4 条所规定的节点整体位移。计算时，应先根据受检节点实测坐标与检测基准坐标计算节点位移，再扣除相邻稳定节点的邻域共同位移。相邻稳定节点宜优先选取与受检节点直接相连、点云质量可靠且无明显局部变形或定位异常的节点；直接相连节点不足或存在异常时，可根据结构拓扑关系适当扩大邻域范围。邻域共同位移宜采用所选稳定节点位移向量的平均值确定；存在明显离群值时，应剔除异常节点后重新计算。点云覆盖不足、稳定邻域节点数量不足或不同方法所得结果差异较大时，应补充检测或采用其他几何特征复核。

7.3.9 局部变形检测成果应按杆件或节点编号给出检测位置、检测基准、计算方法、主要参数、变形值及复核结果。超限或异常部位应附定位图、局部点云图及相应的轴线图、截面图或偏差分布图。检测结果应依据设计文件、专项检测方案或现行相关标准判定。

【条文说明】

杆件弯曲宜附轴线和弯曲矢高图，局部凹陷宜附参考面和法向偏差分布图，截面整体畸变宜附典型截面图，节点坐标空间偏差宜附节点坐标及分量偏差表。异常结果应能追溯至相应杆件、节点和原始点云，并应说明遮挡、缺失及处理假定对结果的影响。局部几何异常可作为复测、监测或结构分析的依据，未经相应验算或专项鉴定，不宜直接判定为结构安全问题。

8. 结构力学建模与安全评价

8.1 一般规定

8.1.1 本章规定基于三维点云几何模型进行结构力学建模、力学模型修正、力学计算与安全评价的方法和要求。

【条文说明】

本章面向“以实测几何为输入的力学分析与安全评价”任务。相比传统“设计几何+设计假定”的评价方式，基于实测几何的评价可反映结构实际受力状态，尤其适用于存在显著初始缺陷或长期变形的既有结构。

8.1.2 出现下列情况之一时，应按本章规定进行结构力学建模与安全评价：

1. 几何检测结果显示结构存在显著的初始几何缺陷或长期变形；
2. 结构设计资料缺失或与实际情况存在明显出入；
3. 既有结构进行改造、扩建、加固或改变使用功能；
4. 结构遭受地震、风、雪、火灾、撞击等灾害或意外作用后；
5. 委托方提出需要基于实测几何的结构力学评价。

【条文说明】

本条列举了适用于按本章方法评价的五类典型工程情形。前四类情形对应几何检测发现明显变形、资料缺失、结构改造或灾损后的评价需求；第五类情形涵盖委托方主动提出的评价要求。当不符合本条所列任一情形时，可按常规方法进行安全评价，不必开展本章的实测几何建模。

8.1.3 结构力学建模与安全评价的工作流程对应第 3.2.1 条的结构力学建模与安全评价环节，应包括下列步骤：

1. 基于实测几何形态生成结构有限元模型；
2. 力学模型修正，应按本规程第 8.3.1 条的规定开展；
3. 荷载施加与作用组合；

4. 结构计算分析;
5. 状态评价与等级判定;
6. 评价报告编制。

【条文说明】

本条给出的工作流程涵盖从有限元模型生成到评价报告的全部主要环节。力学模型修正是按需开展的处理步骤，其内容包括自重变形、温度变形、施工累积变形的修正以及构件刚度与连接刚度的参数修正，针对基于实测位形直接计算响应偏差较大的情形。

8.1.4 结构力学建模与安全评价所采用的有限元分析软件，应经典型算例验证。分析所采用的单元类型、材料参数、边界条件、荷载工况、求解设置及软件名称与版本，应在评价报告中记录。

8.2 基于实测几何形态的结构有限元模型生成

8.2.1 用于力学建模的输入点云应达到第 5 章 B 类及以上，处理成果应达到表 6.6-2 的 B 类及以上；用于承载能力或灾损评价时，处理成果应达到 A 类，并应采用 A 级检测精度。关键受力构件、节点及连接关系应完整并经复核，未核实的假定不得直接作为安全评价依据。空间结构有限元模型宜采用杆系单元。

【条文说明】

空间结构的构件数量通常达数千根以至上万根，采用杆系单元（杆单元、梁单元）可在保证力学精度的前提下将模型规模控制在可承受范围。

8.2.2 有限元节点宜按其在结构中的位置与作用进行分类，并区别处理：

1. 主节点：与结构实际构件交点对应的节点，其坐标应由点云配准与节点拟合结果直接确定；
2. 次节点：因以直代曲、变截面或其他分析需要而在有限元模型中新增的节点，其坐标应优先采用本规程第 6.3.3 条提取的实测截面中心点坐标；实测截面中心点不足或缺失时，可由相邻主节点与已有实测中心点插值确定；

3. 特殊节点：与支座体系、拉索体系或其他边界元件相关的节点，其坐标与约束应按实际工作状态确定。

【条文说明】

有限元节点分为主节点、次节点、特殊节点三类。主节点对应结构实际构件的交汇点，坐标由点云配准与节点拟合直接确定；次节点因以直代曲、变截面等原因新增，优先采用实测截面中心点，缺失时才按已测点插值；特殊节点对应支座、拉索等边界元件，坐标与约束按实际工作状态确定。该分类为后续位形偏差的正向计算与反向推演提供了基础。

8.2.3 有限元模型的几何参数应按下列原则取值：

1. 主节点坐标应优先采用点云建模的实测坐标；
2. 次节点坐标应优先采用实测截面中心点坐标；需插值时，应沿杆件轴向按弧长参数插值，并应保证插值曲线通过全部实测截面中心点；
3. 杆件长度应按相邻节点中心间距计算；
4. 杆件截面参数宜采用实测值，缺失时可参考设计值；
5. 当杆件弯曲矢高比大于设计文件或国家现行有关标准规定的允许值时，应在模型中按次节点位置引入实测初始几何缺陷，缺陷的幅值、方向与形态应按本规程第 7 章的检测成果确定。

【条文说明】

本条规定了几何参数的取值优先级：主节点坐标以点云实测结果为准，次节点优先采用实测截面中心点，缺失时按已有实测点插值，杆件长度按节点中心距计算。当杆件弯曲超出设计文件或国家现行有关标准规定的允许值时，应在模型中按次节点位置引入初始几何缺陷，避免因几何模型过于理想化导致计算响应与实际显著偏离。

8.2.4 对于含变截面、弯扭等复杂截面杆件，模型生成应符合下列规定：

1. 变截面杆件应沿轴线分段定义截面参数；
2. 杆件扭转可通过截面绕轴线的旋转角度进行定义；

3. 当曲线杆件的截面真实平面与点云投影平面之间存在夹角，且该夹角对截面几何参数的影响不可忽略时，应按相邻控制点连线构造局部切向量，据此还原截面真实几何参数；截面几何特性的修正量可按夹角余弦的倒数计算；

【条文说明】

对于含弯扭、变截面等复杂截面杆件，模型的关键在于反映其实际截面几何。变截面可通过沿轴线分段定义截面参数实现；杆件扭转可通过截面绕轴线的旋转角度定义。曲线杆件的实际截面平面与点云投影平面之间存在夹角 β ，当 β 不可忽略时，应按相邻控制点连线构造局部切向量，据此还原截面真实几何参数。

8.2.5 模型单元类型的选用应符合下列规定：

1. 网架结构、桁架结构主受力杆件宜采用杆单元或梁单元；
2. 网壳结构、张弦结构中的刚性受弯构件宜采用梁单元；
3. 拉索、吊索、系索应采用只受拉单元或索单元，并计入初始预张力、松弛及对计算结果有影响的垂度效应；
4. 节点连接刚度宜根据节点构造特点合理简化，对刚度有明显影响的复杂节点宜建立局部精细模型。

【条文说明】

不同结构形式的杆件受力特点不同，宜选用相应单元类型。网架、桁架结构主要承受轴力，采用杆单元或梁单元；网壳、张弦结构中的刚性受弯构件采用梁单元；拉索、吊索等只承受拉力，采用只受拉单元。复杂节点区若节点连接刚度对结构性能有明显影响，宜建立局部精细模型进行专门分析。索结构应采用经核实的索力或无应力索长建立与采集工况对应的初始平衡态。

8.2.6 支座约束条件的施加应符合下列规定：

1. 支座位置宜采用点云检测得到的实测坐标；
2. 支座约束形式应反映其实际工作状态；

8.2.7 材料本构应按下列原则取用：

1. 钢材力学性能应按下列规定取用：设计资料齐全且结构未遭受灾害作用时，可按设计文件取用；设计资料缺失、材质不明或结构遭受火灾、高温、腐蚀等作用时，应按现场取样检测结果取用；
2. 索材的弹性模量应按出厂检验报告或实测值取用；
3. 当进行非线性分析时，应反映材料的实际应力—应变关系。

8.2.8 有限元模型生成完成后应进行下列校核：

1. 模型主节点、杆件中心线与经核实的几何成果应建立映射，坐标转换和状态修正量应可追溯；导入前后对应几何量的偏差不得超过方案分配给模型转换环节的误差限值；
2. 节点、构件与计算单元应建立对应表；分段新增次节点和单元应另行标识，非预期悬空节点、重复单元及错误连接应为零；
3. 模型自由度、单元类型和网格密度应满足分析目的，曲杆及稳定分析的离散精度应按本规程第 8.2.1 条进行加密校核；
4. 自重工况下应核对全部外荷载与支座反力的三向合力及关于同一参考点的合力矩，平衡残差应满足方案规定的求解容差；并应核查总质量、重力方向、约束自由度、支承位移和异常反力。

【条文说明】

模型校核是保证力学计算结果可信的必要步骤。几何一致性核查可发现节点插值、单元划分等环节的错误；拓扑核查可发现连接关系错误；合力与合力矩平衡可辅助发现荷载、单位或模型输入错误，但不能单独证明约束正确，仍应检查刚体位移及异常反力。校核发现问题应回到相应处理环节修正，不应带病进入后续计算。

8.3 力学模型修正

8.3.1 采用实测几何建立力学模型时，应识别实测位形中不属于结构待评价状态的变形成分并予以修正。修正内容应包括下列方面：

1. 自重及采集时刻已施加荷载引起的变形；

2. 采集时刻温度与目标状态温度差异引起的变形；
3. 施工累积变形、长期变形等与评价目的无关的位形成分；
4. 初始几何缺陷、服役损伤等引起的构件刚度与连接刚度变化。

【条文说明】

实测位形是结构在采集时刻各种作用共同影响下的结果，直接用于计算将把这些作用重复计入。本条按成因区分四类修正：前三类改变模型几何，第四类改变模型参数。工程中应根据评价目的判断哪些成分需要修正——例如以竣工验收为目的时，自重变形通常应保留在模型中；以复核加工放样几何为目的时，则应扣除。

8.3.2 修正的目标状态应在评价方案中明确，并应与检测基准、荷载工况和温度条件相对应。

【条文说明】

目标状态可为无应力构形、设计参考状态或某一约定的荷载与温度组合下的位形。无应力构形指零应力的放样几何，多用于加工放样复核与虚拟预拼装；设计参考状态指设计文件规定的荷载与温度组合对应的位形，多用于既有结构安全评价。二者含义不同，计算结果不可混用，故要求在方案中明确。

8.3.3 修正所需的实测数据应符合下列规定：

1. 应记录点云采集时刻的结构温度、环境气温和已施加荷载状态；结构受太阳辐射作用显著时，尚应记录辐照、风速等气象参数及测点位置；
2. 温度测点应覆盖向阳面、背阳面、阴影区及不同标高、不同截面类型的构件，其数量与采样间隔应满足所选修正方法的要求；
3. 用于修正参数识别的实测响应数据，应与点云采集在时间上对应，并应记录采集条件。

【条文说明】

温度数据的详细采集要求可按本规程第 9.2 节的规定执行。同一工程既进行本节修正又进行第 9 章温度预测时，温度数据宜统一采集，避免按两套要求重复布点。

8.3.4 修正方法应根据结构形式、可获得的实测数据和精度要求选用，并应符合下列规定：

1. 所选方法应与结构的受力特性相适应；对超静定程度高、支座约束较强的结构，不应采用忽略约束作用的简化方法；
2. 预应力空间结构的自重变形修正，应同时具备索力实测值或无应力索长资料；不具备时，不应单独进行自重变形修正，并应在成果中说明；
3. 采用仿真计算结果修正实测几何时，仿真所用的荷载、材料参数与边界条件应有设计文件或实测依据，修正前后的位形均应保留。

【条文说明】

自重变形修正可采用反向迭代、直接扣除理论变形或影响矩阵反演等方法：反向迭代以实测几何为初值反向施加自重迭代求解，物理概念清晰，适用于非线性程度高的结构；直接扣除法计算量小，适用于线性程度高、刚度较大的结构；影响矩阵法适用于受力特性可精确表达的情形。温度变形修正可按温度场的空间分布特征选用：温度分布均匀且结构可自由变形时，可按线胀系数进行几何修正；存在明显温度梯度或结构约束较强时，应按实测或计算温度场分区施加温度作用求解。需注意，按线胀系数均匀缩放几何的做法隐含“结构可自由膨胀”的假设，对高次超静定的空间网格结构，均匀温度作用仍会产生自平衡温度内力与不均匀位移，此时不宜采用该简化做法。

预应力结构的实测位形是自重与预应力共同作用的结果，二者不可分离。缺少索力或无应力索长资料时，反向施加自重无法得到无应力构形，故本条第 2 款作出限制。

8.3.5 待修正的参数应限于不能由点云直接测定的量，可包括节点连接刚度、边界约束刚度、损伤构件的等效刚度折减系数、材料弹性模量、索力或无应力索长等。由点云直接测定的节点坐标、杆件中心线与初始几何缺陷幅值，应作为已知量按实测值固定，不应作为待修正参数。

【条文说明】

若将点云已测定的几何量同时列为待修正参数和匹配目标，优化问题将退化——令待修正的几何量等于实测值即可使残差为零，所得解与结构刚度、损伤、边界条件无关，模型修正未获得超出点云几何本身的信息。因此本条要求几何量固定、只修正不可直接测定的参数。不能

由点云获取的材料强度、截面锈蚀减薄、连接缺陷等信息，应通过现场检测取得并作为已知量或待修正参数的取值依据。

8.3.6 修正后的力学模型应采用未参与修正的独立实测响应进行验证，验证响应可包括已知荷载增量下的位移增量、实测应变或内力、支座反力、自振频率与振型。计算响应与实测响应的偏差限值应在评价方案中明确；不满足时应重新选择修正参数或匹配目标，不应通过增加参数数量强行拟合。

【条文说明】

以参与修正的数据检验修正结果，等于用算法的收敛条件检验算法本身，必然通过，不构成独立验证。偏差限值与结构形式、响应量类型和实测精度有关，宜按工程实际确定：位形类响应的偏差限值可参照本规程第 3.3.1 条及经审核方案确定的节点坐标检测限差确定，响应量接近实测精度下限时，应计入实测量本身的不确定度。

8.3.7 用于多期对比的变形检测，各期次点云宜统一到同一目标状态；不具备可靠修正依据时，应按本规程第 7.2.6 条的规定说明其影响，且不应据以作出变形发展趋势的判定性结论。

【条文说明】

本条与第 7 章的变形检测衔接。多期点云若在不同温度、不同荷载状态下采集，未经统一即直接相减，所得"变形"中将混入温度与荷载引起的可逆位移。

8.3.8 力学模型修正应在评价报告中记录下列内容：

1. 修正的种类、目标状态及其选取依据；
2. 所采用的修正方法、计算程序及主要参数取值；
3. 待修正参数及其取值范围，以及修正前后的参数值；
4. 独立验证所用的响应数据、偏差结果及其判定；
5. 修正前后的结构位形，以及未作修正的成分及其影响说明。

8.4 结构计算与状态评价

8.4.1 结构计算分析的内容应根据评价目的确定，并应符合下列规定：

1. 用于承载能力评价时，应包括静力承载力计算和稳定性分析；
2. 单层网壳、大跨度网壳及张拉结构，应进行考虑几何与材料非线性的整体稳定分析；
3. 位于抗震设防区的结构，应包括动力特性分析和抗震性能验算；
4. 大跨度轻质屋盖结构，应包括风振响应分析和雪荷载作用分析；
5. 承受反复荷载的结构，宜进行疲劳与耐久性分析；
6. 含显著损伤的结构，应按本规程第 8.4.4 条进行极限承载力分析。

8.4.2 结构荷载作用与作用组合应按现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001、《建筑结构设计荷载规范》GB 50009、《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002 以及现行行业标准《空间网格结构技术规程》JGJ 7 的有关规定执行。构件与节点的承载力验算，应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定；索结构尚应符合现行行业标准《索结构技术规程》JGJ 257 的有关规定。既有结构荷载应根据现场调查核实，计入新增设备、吊挂、积灰及可能积水等影响；使用功能变化时应按实际或拟定用途确定荷载取值，并记录与设计资料的差异。

8.4.3 结构状态评价应包括下列内容，并应符合下列规定：

1. 构件与节点承载力应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 和现行行业标准《空间网格结构技术规程》JGJ 7 的有关规定验算，构件应力比不应大于 1.0；
2. 结构整体稳定性与构件稳定性应符合现行行业标准《空间网格结构技术规程》JGJ 7 的有关规定；
3. 节点连接的承载力应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定验算；
4. 结构挠度、节点位移与转角不应大于设计文件或现行行业标准《空间网格结构技术规程》JGJ 7 规定的限值；
5. 结构动力性能与舒适度应符合国家现行有关标准的规定；

6. 抗震性能应按现行国家标准《建筑抗震鉴定标准》GB 50023 的有关规定评定；

7. 杆件弯曲、节点缺陷等局部损伤对结构整体性能的影响，应按本规程第 8.4.4 条计入并评定。

8.4.4 对于含弯曲杆件、节点损伤等局部缺陷的结构，应将实测缺陷与损伤引入力学孪生模型，采用考虑几何与材料非线性的分析方法，在最不利荷载组合下进行极限承载力分析，并应给出结构的剩余安全储备。

【条文说明】

本条针对含损伤结构的评价方法。传统线弹性分析难以反映局部损伤诱发的内力重分布与整体失稳机理。将实测损伤直接引入力学孪生模型后进行非线性分析，通过非线性极限承载力分析量化结构剩余安全储备。

8.4.5 结构状态评价等级与超限对策，应符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153、《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 及国家现行有关标准的规定；安全评价报告的内容与格式，应符合本规程第 10.3 节的规定。

9. 孪生建模与虚拟预拼装

9.1 一般规定

9.1.1 空间结构在施工控制、合龙控制、卸载控制、复杂节点安装、分段或模块化拼装、虚拟预拼装以及服役期状态追踪中，宜开展孪生建模。孪生模型宜以三维点云实测几何为基础，并应与设计资料、施工过程资料、温度与支承工况、材料与截面参数、有限元分析模型相互关联。孪生模型应随实际结构状态同步更新，宜用于施工阶段结构位形、节点位置、接口状态、支承反力和构件受力状态的分析与预测；其预测结果宜应用于实际结构的施工控制，关键工序完成后应对实际结构进行复测或扫描，并将实测结果映射至孪生模型进行同步更新。

【条文说明】

本条规定了孪生建模与虚拟预拼装的适用情形和基本数据基础。空间结构通常具有跨度大、构件数量多、节点连接复杂、施工阶段边界条件变化明显等特点。施工过程中，结构实际状态会受到构件加工偏差、运输与堆放变形、现场安装误差、焊接变形、温度作用、临时支承条件和卸载过程等因素影响。仅依据设计模型进行施工模拟，往往难以充分反映结构现场实际状态。

采用三维点云实测几何建立孪生模型，可将结构实际几何状态纳入施工分析和控制过程，使模型计算结果与现场状态具有对应关系。对于合龙控制、卸载控制、复杂节点安装、分段或模块化拼装复核等工作，孪生模型可用于预测目标工况下的节点位形、接口相对位置、支承反力和构件受力状态，为现场施工控制提供依据。

9.1.2 孪生建模与虚拟预拼装前，应编制专项实施方案。专项实施方案应包括建模目的、结构范围、施工阶段、扫描测区、坐标系统、温度和工况记录、模型精度要求、复核指标、成果交付内容和责任分工。

【条文说明】

本条规定了孪生建模与虚拟预拼装前编制专项实施方案的要求。孪生建模与虚拟预拼装涉及点云采集、数据预处理、构件识别、模型转换、有限元分析、温度修正、施工阶段模拟、成果复核和现场反馈等多个环节。各环节之间相互影响，前期资料或精度要求不明确时，可能导致后续模型无法满足施工控制或复核要求。

专项实施方案应根据工程特点和成果用途确定。用于施工展示、安装复核、合龙预测、卸载控制、结构评价或运维移交的模型，其建模深度、数据精度和成果形式均不相同。因此，应在实施前明确建模目的、结构范围、施工阶段、关键测区、坐标基准、温度和工况记录要求、模型精度要求、接口数据格式、复核指标和成果交付内容。

9.1.3 孪生模型可按用途分为几何孪生模型、力学孪生模型和施工过程孪生模型。几何孪生模型应表达实测构件位置、节点坐标、杆件中心线、接口轮廓和几何缺陷；力学孪生模型应表达截面、材料、边界、荷载、初始几何缺陷和模型修正参数；施工过程孪生模型应表达施工阶段、临时支承、吊装单元、约束转换、合龙或卸载顺序。

【条文说明】

几何孪生模型主要用于表达结构实测几何状态，包括节点空间坐标、杆件中心线、构件轮廓、接口位置、杆件局部弯曲和几何缺陷等内容。该类模型是偏差检测、虚拟预拼装和力学模型生成的基础，其重点在于几何对象识别准确、构件编号清晰、偏差结果可复核。

力学孪生模型是在几何孪生模型基础上建立的结构分析模型，应表达结构拓扑、截面、材料、边界条件、荷载作用、连接刚度、支承条件和初始几何缺陷等信息。用于施工控制或结构评价时，力学孪生模型还应根据实测数据和现场监测结果进行必要修正，使其计算响应能够反映结构实际状态。

施工过程孪生模型用于表达施工阶段和工况转换过程，包括临时支承、吊装单元、分区拼装、合龙顺序、卸载步骤、边界转换和体系转换等内容。空间结构施工过程中的结构受力状态与最终成型状态可能存在显著差异，因此施工过程信息是进行施工预测和虚拟预拼装的重要基础。

9.1.4 孪生模型采用的坐标系统、单位、构件编号、节点编号、测区编号和版本编号应与点云成果、设计模型、有限元模型和施工记录保持一致。不同软件或不同阶段模型之间发生坐标转换、尺度转换、拓扑简化或构件合并时，应形成映射表。

【条文说明】

本条规定了坐标系统、单位、编号和版本管理的统一要求。孪生建模通常涉及点云数据、设计模型、加工模型、有限元模型、施工记录和现场监测数据等多源信息。不同数据来源可能

采用不同坐标系统、单位体系、构件编号和模型版本，若缺少统一规则，将影响模型转换、偏差分析、构件定位和成果复核。

坐标系统统一是孪生建模的基础。点云成果宜与工程控制网、设计模型或施工测量基准建立明确关系。存在坐标转换、高程基准转换、模型旋转、尺度变换或局部坐标转换时，应记录转换参数和适用范围。多期扫描或施工全过程控制项目，应保证各期数据能够统一到同一基准下进行比较。

编号统一是实现模型对象追溯的重要条件。节点编号、杆件编号、构件编号、测区编号和文件编号应与设计资料、施工资料和有限元模型保持对应。虚拟预拼装中发现的接口偏差、孔群偏差、碰撞或超限问题，应能定位到具体构件和节点；结构计算中发现的高应力构件、异常位移或异常支承反力，也应能对应到现场实物。

版本管理用于保证模型使用的可追溯性。施工过程中模型可能因复测、设计变更、工况变化、参数修正或施工措施调整而更新。不同版本模型的适用阶段和结论可能不同，因此应保存模型版本、更新时间、修改内容、参数来源、适用工况和确认记录。

9.1.5 孪生建模采用的点云数据质量应符合本规程第 5 章的有关规定，且点云数据质量等级不应低于 B 类。用于施工控制和虚拟预拼装的点云，关键节点、接口、支座、临时支承和合龙口区域应进行重点扫描；当遮挡导致关键几何无法识别时，应补测或复核。

【条文说明】

本条规定了孪生建模所用点云数据质量和关键部位补测要求。点云数据质量直接影响构件识别、几何拟合、模型转换、虚拟预拼装和结构分析结果。若点云存在遮挡严重、配准误差较大、点密度不足、噪声过多或关键部位缺失等问题，后续模型的可靠性将受到影响。

用于施工控制和虚拟预拼装的点云，应重点保证关键部位的完整性和精度。关键部位通常包括合龙口、接口节点、复杂连接节点、支座、临时支承、吊装单元边界、嵌补构件端部、杆件交汇区和局部变形显著区域。对这些部位宜增加测站、优化扫描角度、提高点密度或采用多源测量方法，以满足后续精细建模和偏差复核要求。

对于点云难以可靠识别的细部，不宜仅依靠软件自动拟合或人工推断。螺栓孔径、孔群中心、板厚、焊缝坡口、被遮挡接口、支座接触面等信息，可采用全站仪、近景摄影测量、尺量、

卡尺量测、加工资料或设计文件进行补充。补充数据的来源、测量方法和精度应在成果文件或报告中说明。

本条与点云数据质量评价要求相衔接。对低置信度区域、缺失区域和人工修正区域，应在模型和成果说明中标识。

9.1.6 孪生模型不应直接以未经补偿的施工期实测位形作为成型状态或设计状态。存在自重变形、温度变形、临时支承变形、卸载变形或边界条件变化影响时，应按本规程第 8 章进行补偿或按本章规定进行施工阶段预测。

【条文说明】

本条规定了施工期实测位形使用时的补偿和工况识别要求。空间结构在施工阶段常处于临时支承、局部成形、分区拼装、未完全约束或边界条件转换状态。扫描所得位形是特定时间、特定温度、特定荷载和特定支承条件下的结构状态，不能直接等同于设计成型状态或目标安装状态。

施工期实测位形可能包含自重变形、温度变形、临时支承变形、吊装姿态影响、施工荷载影响和卸载过程影响。例如，合龙前接口位置会随温度变化、临时支承状态和目标合龙时刻而改变；卸载前结构位形与卸载后结构位形也可能存在明显差异。若直接采用扫描时刻位形作为控制依据，可能导致合龙长度、预偏量、卸载量或几何偏差判断产生偏差。

因此，孪生建模和虚拟预拼装应明确实测位形所对应的工况条件，并根据需要进行自重补偿、温度补偿、边界条件转换或施工阶段预测。对于一般复核工况，可采用经验证的简化方法；对于合龙、卸载、体系转换等关键工况，宜采用力学孪生模型进行分析，并结合现场复测数据进行校核。

9.2 温度影响分析与预测

9.2.1 施工阶段进行孪生建模、合龙预测、卸载控制、嵌补构件切割长度确定或虚拟预拼装时，应考虑气温及构件温度变化对结构位形和接口状态的影响。

【条文说明】

空间钢结构受温度作用影响明显，尤其是大跨度屋盖、网壳、桁架、张弦结构和分区拼装结构。气温变化会引起构件伸缩、节点位移、支承反力变化和合龙口相对位置变化。施工控制中若忽略温度影响，可能导致合龙尺寸、预偏量、卸载控制值或成型位形判断出现偏差。

9.2.2 温度预测应根据施工控制目标确定预测对象、预测时段和预测精度。预测对象可包括环境气温、构件表面温度、构件平均温度、关键区域温差和合龙目标时刻温度。

【条文说明】

不同施工任务对温度预测对象的要求不同。一般位形复核可采用环境气温或代表性构件温度；合龙、卸载、支承转换等关键工况，宜预测关键构件温度和结构温度分布。预测对象明确后，才能合理选择测点布置、数据采样间隔和预测模型。

9.2.3 温度预测宜按下列流程实施：

1. 确定预测目标和控制工况；
2. 布置温度测点并采集历史数据；
3. 收集气象预报、日照、风速、湿度等外部数据；
4. 进行数据清洗、异常值处理和时间同步；
5. 选择预测模型并进行训练或参数标定；
6. 对预测结果进行误差检验；
7. 将预测温度输入孪生模型进行温度变形分析；
8. 根据复测结果对预测模型和孪生模型进行更新。

9.2.4 温度数据采集应包括环境气温和构件温度。环境气温测点宜布设在通风、避开局部热源和强反射影响的位置；构件温度测点宜布设在关键构件、合龙口附近、向阳面、背阳面、阴影区、不同标高和不同截面类型构件上。

9.2.5 温度采样间隔应根据预测时段和施工控制要求确定。用于日变化规律分析时，采样间隔不宜大于 30 min；用于合龙、卸载或短时施工控制时，采样间隔宜为 5 min~10 min；温度变化剧烈时应加密采样。

【条文说明】

采样间隔过大时，可能无法反映日照突变、云量变化或风速变化引起的短时温度波动。合龙和卸载控制通常对目标时刻温度较敏感，因此宜采用较高频率采样。

9.2.6 温度数据应与点云采集、结构监测和施工记录进行时间同步。每次扫描、合龙、卸载、支承调整或构件安装时，应记录对应时刻的环境气温、构件温度、天气状况、日照状态、风速和施工状态。

【条文说明】

孪生模型中的温度作用应与结构实测位形对应。若点云扫描时间、温度采集时间和施工记录时间不一致，会影响温度补偿和模型修正结果。时间同步是后续温度预测和结构位形预测的基础。

9.2.7 温度数据应进行质量检查。对缺失值、突变值、传感器漂移和明显异常数据，应进行标识和处理，处理方法应在成果资料中说明。

【条文说明】

缺失值与异常数据的常用处理方法包括线性插值、相邻测点校核、滑动平均、箱线图法和基于历史规律的异常值识别方法等，可根据数据特点和施工控制要求选用。

9.2.8 温度预测模型可采用统计预测模型、机器学习模型、深度学习模型、物理热分析模型或组合预测模型。模型选择应根据数据量、预测时长、施工控制精度和现场实施条件确定，并应采用现场实测数据进行训练、校准或修正；训练数据应覆盖晴天、阴天、雨天、昼夜变化和典型施工时段，不能覆盖目标施工天气条件时，应说明预测结果的不确定性。

【条文说明】

不同预测模型适用条件不同：历史温度数据较少或预测时段较短时，可采用线性外推、移动平均、指数平滑、自回归、ARIMA 或气象预报修正等简化统计方法，其中气象预报修正法可将当地气象预报温度按现场实测偏差修正，适用于缺少长期历史数据的现场；具备连续温度监测数据、预测目标为未来数小时至数日时，宜采用机器学习或深度学习时序预测模型，常用模型包括随机森林、支持向量回归、长短期记忆网络和时间卷积网络等，输入变量可包括历史气温、构件温度、太阳辐照度、风速、湿度、时间、日期、天气类型和构件朝向等，模型应通过现场数据训练或校准，不宜直接套用其他工程模型参数；构件温度受太阳辐射、遮挡、风速和边界换热影响显著时，宜采用物理热分析模型或物理约束的数据驱动模型，热分析应考虑太阳辐射、长波辐射、对流换热、构件朝向、表面吸收率和周边遮挡条件，工程中可采用"实测温度修正+热分析计算"的方法提高预测可靠性；温度预测模型对天气类型和季节条件敏感，应说明训练数据范围和适用条件。

9.2.9 用于一般施工位形预测时，环境气温预测误差不宜大于 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；用于合龙、卸载和关键接口控制时，目标时刻关键构件温度预测误差不宜大于 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。当预测误差超过上述范围时，应重新校准预测模型；重新校准后预测误差仍超限时，不应将预测结果直接用于合龙、卸载等关键工序的施工控制。

9.2.10 温度预测结果应转换为孪生模型中的温度作用。采用环境气温预测值时，应根据构件位置、朝向、日照和风速条件确定构件温度；采用构件温度预测值时，可直接作为构件温度荷载或温度场输入。

【条文说明】

结构温度作用最终应体现在构件温度或结构温度场中。环境气温只是外部条件，不能在所有情况下直接等同于构件温度。对于受日照影响明显的构件，应进行环境气温到构件温度的转换。

9.2.11 温度预测成果应包括下列内容：

1. 预测对象和预测时段；
2. 测点布置和数据来源；
3. 采用的预测模型及主要参数；

4. 输入变量和数据处理方法;
5. 预测温度曲线或目标时刻预测值;
6. 误差评价结果;
7. 温度不确定性范围;
8. 对结构位形、接口偏差或施工控制值的影响。

9.3 虚拟预拼装

9.3.1 空间结构的分段构件、分区模块、复杂节点、转换桁架、合龙段、嵌补构件、异形连接件和现场安装难度较大的构件,宜在安装前开展虚拟预拼装;当存在下列情况之一时,应开展考虑结构自重、温度与支承状态影响的虚拟预拼装:

1. 构件尺寸大、接口数量多或现场实体预拼装条件受限;
2. 构件加工、运输、堆放或吊装过程可能引起明显几何偏差;
3. 合龙口、嵌补构件或关键节点安装精度要求较高;
4. 结构安装顺序复杂,存在碰撞、干涉或安装空间不足风险;
5. 设计文件、加工模型、实测点云或现场复核结果之间存在明显差异。

存在其他可能影响安装精度或施工安全的情况时,也宜开展虚拟预拼装。

【条文说明】

虚拟预拼装用于在正式安装前复核构件、节点、接口和安装顺序的匹配关系。对于空间结构,现场实体预拼装往往受场地、吊装、工期和成本限制,采用点云实测数据和数字模型开展虚拟预拼装,可提前发现接口错位、孔群不匹配、构件碰撞和合龙困难等问题。

9.3.2 虚拟预拼装模型应包括待拼装构件的实测几何、接口轮廓、节点板或球节点位置、螺栓孔群、焊缝坡口、支座或胎架控制点、吊装姿态和设计允许偏差。对无法由点云可靠识别的孔径、板厚、坡口角度和焊缝间隙,应采用设计资料或现场实测补充。

【条文说明】

接口和节点细部是虚拟预拼装的重点。点云对大尺度几何识别较好，但对孔径、板厚、坡口角度、内侧面和遮挡区域可能识别不足，因此应采用多源数据补充。

9.3.3 构件配准应符合下列规定：

1. 应优先采用经复核的施工控制点、支座基准、节点中心或安装定位基准；
2. 用于接口复核时，不宜仅采用全局最近点配准；
3. 配准后应输出残差统计值；
4. 配准残差应符合本规程第 4.5.3 条的规定；专项实施方案另有更严格要求时，应按专项实施方案执行。当配准残差超限时，应复核点云质量、坐标基准和构件识别结果；
5. 配准所采用的控制点、特征点和剔除点应保存记录。

9.3.4 接口相对偏差宜按式（9.3.1）计算：

$$e_i = \|(P_i^A - u_i^A) - (P_i^B - u_i^B)\| \quad (9.3.1)$$

式中： e_i 为第*i*个接口控制点的相对偏差； P_i^A 、 P_i^B 为两侧构件接口控制点实测坐标； u_i^A 、 u_i^B 为自重、温度、吊装姿态、临时支承或边界转换引起的位移修正量。

【条文说明】

接口偏差应按目标安装工况进行计算。位移修正量可由结构分析模型或孪生模型计算，也可根据经验证的简化方法确定。

9.3.5 虚拟预拼装应检查下列内容：接口间隙、错边量、扭转角、孔群同轴度、节点中心偏差、杆件轴线偏差、局部碰撞、安装顺序可达性、焊接或螺栓施工空间、吊装姿态下的临时稳定性和施工预拱或预偏量。

【条文说明】

具体项目应根据连接形式、施工方法和控制目标选择，不要求所有工程均包含全部项目。

9.3.6 虚拟预拼装的允许偏差应根据设计文件和专项施工方案确定，并应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205 和现行行业标准《空间网格结构技术规程》JGJ 7 的有关规定。无明确规定时，宜采用比现场安装验收允许偏差更严格的预警阈值；对合龙口和关键受力节点，预警阈值宜取验收允许偏差的 50%~80%。

【条文说明】

虚拟预拼装的目的在于提前发现问题，预警阈值一般应严于最终验收限值。对关键接口和合龙部位，应留有施工调整余量。

9.3.7 虚拟预拼装发现超限或干涉时，应提出处置建议。处置建议可包括调整安装顺序、修正临时支承高度、设置预偏量、调整合龙温度窗口、修整坡口、复核孔群、重新加工嵌补构件或进行现场补测。涉及受力路径变化的处置措施，应经结构计算复核。

9.3.8 合龙段或嵌补构件的切割长度宜按目标合龙时刻的接口相对位置确定，可按式（9.3.2）计算：

$$L_c = L_m + \Delta L_T + \Delta L_G + \Delta L_B + \Delta L_w \quad (9.3.2)$$

式中： L_c 为建议切割长度或嵌补构件控制长度； L_m 为扫描时刻实测接口距离； ΔL_T 为温度修正量； ΔL_G 为自重或卸载修正量； ΔL_B 为边界条件转换修正量； ΔL_w 为焊接收缩、安装间隙或工艺预留量。

9.3.9 虚拟预拼装结论应说明成果适用的施工阶段、温度条件、边界条件、模型版本和限制条件。当数据缺失、遮挡严重、配准残差较大或模型假定不满足实际情况时，应说明其对结论的影响。

9.3.10 虚拟预拼装检查结果应按构件、节点、接口或测区形成偏差清单。偏差清单应包括对象编号、偏差类型、实测值、允许值、超限情况、位置说明和处置建议。

【条文说明】

偏差清单是虚拟预拼装成果用于现场施工的主要依据。清单内容应能够直接定位到现场构件或节点，并支持后续复核。

9.4 施工控制与模型闭环更新

9.4.1 施工控制应以孪生模型预测值、现场实测值和允许偏差为依据，形成“预测—实施—复测—修正”的闭环。孪生模型宜根据当前施工状态预测未来目标时刻的结构变形、节点位置、合龙口相对位移、支承反力和关键构件受力状态；预测结果用于指导现场施工后，应对实际结构进行复测或扫描，并将复测结果映射至孪生模型。每一关键施工阶段完成后，应将复测点云、温度、支承状态和施工记录回写至模型版本库，并根据偏差情况对模型进行快速同步更新。

【条文说明】

本条规定了施工控制与模型闭环更新的基本原则。空间结构施工过程中，结构位形、边界条件、临时支承状态和荷载作用会随施工阶段持续变化。孪生模型用于施工控制时，应根据现场实施结果和复测数据进行更新。

预测结果用于指导施工控制；施工完成后通过点云、位移、应变、支承反力、温度等数据进行复测；当实测结果与预测结果存在差异时，应分析原因并修正模型参数或施工假定。通过循环更新，可提高后续施工阶段预测结果的可靠性。

模型更新资料应包括复测点云、施工阶段、温度条件、临时支承状态、卸载步骤和现场处置记录等内容。上述资料应与模型版本对应保存，便于后续复核和责任追溯。

9.4.2 关键施工阶段宜包括分区拼装完成、临时支承转换、合龙前、合龙后、卸载前、分级卸载后、体系转换后和竣工状态。对结构安全影响较大的阶段，应在进入下一工序前完成模型复核。

【条文说明】

本条规定了施工阶段模型复核的关键节点。空间结构在分区拼装、临时支承转换、合龙、卸载和体系转换等阶段，结构受力状态和几何状态变化较大，是施工控制的重点阶段。

关键施工阶段的划分应结合结构形式、施工方法和专项施工方案确定。对于分区拼装结构，应重点关注分区完成后的接口状态；对于设置临时支承的结构，应重点关注支承转换和卸载过程；对于存在合龙段或嵌补构件的结构，应重点关注合龙前后的接口相对位移和温度条件。

对结构安全影响较大的施工阶段，应在进入下一工序前完成复测和模型复核。复核结果满足要求后，方可作为后续施工控制的依据。

9.4.3 施工控制指标宜包括节点三向位移、合龙口相对位移、支座或临时支承反力、关键杆件应力比、整体挠度、杆件轴线偏差、杆件局部弯曲。控制指标应明确测点位置、计算方法、限值、预警值和停工复核值。

【条文说明】

本条规定了施工控制指标的主要内容。施工控制指标应能够反映结构几何状态、受力状态和安装接口状态，并应便于现场测量、计算和判定。节点三向位移、整体挠度主要用于控制结构成型位形；合龙口相对位移、杆件轴线偏差主要用于控制安装精度；支承反力、关键杆件应力比和杆件局部弯曲主要用于控制施工安全。

控制指标应具有明确的测点位置、计算方法和限值要求。对于重要指标，宜设置允许值、预警值和停工复核值。允许值用于判定是否满足施工控制要求；预警值用于提示需加强监测或调整施工措施；停工复核值用于判定是否需要暂停下一工序并进行专项分析。

9.4.4 当复测值与预测值差异超过预警值时，应分析差异来源。差异来源宜按测量误差、温度预测误差、边界条件误差、构件加工安装误差、模型参数误差和施工记录偏差分类；确认原因前，不宜直接采用原预测结果指导下一关键工序。

【条文说明】

本条规定了预测值与复测值差异超限时的处理要求。孪生模型预测结果与现场复测结果存在差异时，应首先分析差异来源，而不宜直接采用原预测结果继续指导后续关键工序。

差异来源可包括测量误差、温度预测误差、边界条件误差、构件加工安装误差、模型参数误差和施工记录偏差等。不同原因对应的处理措施不同。例如，测量误差较大时应复核测量数据；温度条件变化明显时应重新进行温度修正；临时支承状态与模型假定不一致时应修正边界条件；构件安装偏差超限时应提出现场处置或复核计算要求。

对影响结构安全、合龙精度或卸载控制的差异，应在查明原因并完成模型修正后，再确定后续施工控制值。

9.4.5 模型闭环更新后，应保留原模型、更新模型、参数变化、误差变化和适用工况说明。用于后续工序的模型版本应经项目技术负责人确认；涉及结构安全或重大施工措施调整时，应经设计或专项论证确认。

【条文说明】

本条规定了模型闭环更新后的版本管理和确认要求。施工阶段孪生模型会随复测数据、施工状态、设计变更、参数修正和现场处置措施不断更新。不同版本模型的适用工况、计算结果和控制建议可能不同，因此应对模型版本进行管理。

模型更新记录应包括原模型版本、更新模型版本、更新原因、参数变化、误差变化、输入资料来源、适用工况和确认人等内容。模型版本应可追溯、可复核，必要时应能够回溯到更新前状态。

用于后续关键工序的模型版本，应经项目技术负责人确认。涉及结构安全、重大施工措施调整、合龙方案变化或卸载方案变化时，还应按项目管理要求经设计单位或专项论证确认。

10. 成果交付与技术报告

10.1 一般规定

10.1.1 成果交付应根据委托要求、检测目的和成果用途，确定交付的内容、精度和交付等级。

【条文说明】

成果交付内容应根据检测目的和后续使用需求确定，既应满足复核和追溯，也不要求无选择地提交全部中间数据。影响最终结果的原始数据、处理参数和质量记录应予保留，临时文件可按项目约定处理。

10.1.2 交付成果应满足完整性、可追溯性、可复现性和长期可读性的要求，并应采用统一的坐标系统、单位和编号。

【条文说明】

点云、模型、表格和报告应采用一致的坐标系、单位和构件编号。存在坐标转换、单位换算或编号调整时，应提供转换参数或对应表，并标明适用版本，避免后续使用发生错配。

10.1.3 交付文件宜采用通用格式或委托方认可的格式，并应符合下列规定：

1. 点云数据宜采用LAS、E57 等通用点云交换格式；
2. 结构几何模型宜采用IFC、STEP等通用交换格式；结构力学模型采用专用计算文件时，宜同时提供可交换的数据文件或必要的模型参数表；
3. 检测结果、节点坐标、构件参数及统计表宜采用通用电子表格或文本数据格式；
4. 坐标宜以m为单位，并至少保留至 0.001m；构件尺寸、位移及偏差宜以mm为单位；角度宜以度（°）为单位。

【条文说明】

交付格式宜采用通用、可长期读取的文件类型。采用专有格式时，应同时提供可交换格式，或提供必要的读取、转换说明。格式转换不应丢失影响分析的坐标、属性和精度信息。

交付格式应兼顾成果复核、跨软件交换和长期可读性。点云数据采用 LAS、E57 等通用交换格式；结构几何模型采用 IFC、STEP 等通用交换格式；结构力学模型因不同分析软件的数据

据结构存在差异，可保留专用计算文件，但宜同时提供节点坐标、构件编号、截面属性等可交换数据，以便复核和重建。

点云、结构几何模型、结构力学模型、检测表格和技术报告中的坐标系统、单位及构件编号应保持一致。坐标以 m 为单位时，宜至少保留至 0.001m；构件尺寸、位移及偏差宜以 mm 为单位，角度宜采用度（°）。采用其他单位时，应明确说明并提供必要的单位换算关系。

采用专有格式时，应说明相应软件、版本和读取方式，并宜同时提供通用交换格式或必要的转换说明。

10.1.4 采用自动化或半自动化方法时，应在成果文件或技术报告中说明所采用的主要算法、关键参数取值和质量检查结果；对低置信度结果及其人工修正内容应予标识。

【条文说明】

低置信度结果通常由点云遮挡或缺失、噪声干扰、构件交叉以及节点构造复杂等因素引起。对该类结果及其人工修正内容进行标识，有利于区分自动处理结果与人工修正结果，为成果复核和质量追溯提供依据。标识可采用属性字段、成果清单或处理记录等形式，同一内容无需在不同成果文件中重复说明。

10.1.5 成果存在点云缺失、模型简化或精度不足时，应在交付文件和技术报告中说明位置、原因及对使用的影响，并应注明该成果的适用范围和限制条件。

【条文说明】

交付成果的用途应与其精度和完整性相匹配。用于展示、快速筛查或方案比选的数据，不宜直接用于验收判定或结构安全评价。成果说明中应列明主要适用范围和限制。

10.1.6 成果文件应根据工程保密和数据安全要求进行分级管理。多期检测项目应建立期次和版本标识，保证不同期次数据可比。

【条文说明】

涉及重要公共建筑、能源设施或涉密工程的成果文件，应按项目管理要求进行脱敏、加密和访问控制。多期检测应采用统一的版本标识和元数据规则，记录采集日期、处理日期、基准和处理版本。新成果不宜覆盖原有成果，应保留必要的历史版本，以便追踪变化和复核计算。

10.2 成果交付内容与格式

10.2.1 成果应根据用途确定交付等级，并应符合表 10.2.1 的规定。合同或专项方案另有约定时，应按其执行。

表 10.2.1 成果交付等级

等级	适用用途	基本交付内容	限制说明
展示浏览级	汇报展示、快速浏览	点云处理结果及简要说明	不用于验收、施工控制和结构安全评价
几何复核级	局部几何复核、构件定位、异常初筛	展示浏览级成果、局部模型、检测表、关键图件及质量说明	不宜直接用于承载力或稳定性判断
检测判定级	施工控制、竣工验收、既有结构变形检测	几何复核级成果、构件分割成果、变形检测成果及正式报告	应结合设计文件、专项方案和现行标准进行判定
评价应用级	扫描到特征模型构建、结构安全评价、服役期状态追踪	检测判定级成果、安全评价成果及质量控制资料	应经专门复核，并说明模型假定和适用工况

【条文说明】

成果交付等级主要依据使用目的、成果完整程度和后续应用要求划分。展示浏览、几何复核、检测判定和评价应用对数据内容、质量控制及可追溯性的要求依次提高。高等级成果通常包含低等级成果的主要内容，项目实施时可根据合同约定、检测任务和实际数据条件确定交付范围，不要求所有项目均按最高等级交付。

展示浏览级和几何复核级成果主要用于展示、复核和异常初筛，不宜作为验收、施工控制或结构安全评价的直接依据。检测判定级成果应具备检测结果复核和判定所需的数据、模型及质量说明。评价应用级成果用于结构力学模型构建或结构安全评价时，还应保证几何对象、结构对象和力学模型之间的对应关系，并明确模型假定、参数来源及适用工况。

10.2.2 成果宜按表 10.2.2 分类交付。具体交付范围应符合委托内容和检测方案的规定；部分成

果不交付时，应在文件清单或报告中说明原因及对复核的影响。

表 10.2.2 成果交付内容

序号	成果类别	主要交付内容	交付说明
1	点云数据	原始点云、工作点云及关键局部点云	说明坐标系统、覆盖范围、处理状态和文件格式
2	构件分割成果	带有语义标签和实例标签的点云、生成的结构几何模型	说明分割方法、低置信度结果及其人工修正内容
3	变形检测成果	整体、局部变形结果及异常清单	提供检测基准、判据和结论
4	安全评价成果	生成的结构力学模型、结构计算结果	说明模型用途、精度、假定和对象映射关系
5	质量控制资料	点云预处理、构件分割、变形检测、模型生成及安全评价的复核记录，以及第 5 章点云质量评价结果和第 6.7.5 条几何模型质量评价报告	应与检测结论相对应
6	孪生建模与虚拟预拼装成果	孪生模型、温度预测成果、虚拟预拼装偏差清单及施工控制记录	开展相应工作时交付，说明模型版本和适用工况
7	报告与图件	检测报告、附表、附图、照片及文件清单	图件应标明基准、单位和日期

【条文说明】

本表用于明确成果交付的基本类别，并作为检查交付完整性的依据。具体交付内容应结合合同范围和检测目的确定，可根据项目实际情况增减，不要求所有项目均交付表中全部成果。未交付可能影响成果复核、检测结论追溯或后续应用的内容时，应说明未交付原因及其可能影响。不同成果之间内容重复且无独立使用价值时，可合并交付或通过关联文件引用。

10.2.3 点云数据交付应根据成果用途提供原始点云、工作点云及关键局部点云，并应保留所需的坐标、颜色、语义标签和实例标签等属性。数据处理、格式转换或重采样造成属性缺失或变化时，应予说明。

【条文说明】

原始点云用于数据追溯和重新处理；工作点云一般为经去噪、裁剪、抽稀等处理后的数据；关键局部点云主要用于分区、分构件的成果复核。交付内容可根据项目实际需要确定，不要求所有项目均提供全部类型。对属性进行删除、转换、重分类或重采样时，宜记录处理方式、数据来源及属性变化，避免将处理后数据误认为原始数据。正式交付宜至少提供一种通用交换格式；采用专有格式时，宜同时提供通用格式或必要的读取说明。

10.2.4 构件分割成果应满足构件级变形检测和模型映射需要，提供带有语义标签和实例标签的构件点云和生成的结构几何模型。存在点云缺失、误分割、低置信度或人工修正的对象，应单独标识；用于变形检测或安全评价时，应说明其是否纳入后续计算。

【条文说明】

构件分割成果主要包括带标签的构件点云和由分割结果提取的结构几何模型。结构几何模型可包括节点、杆件轴线、构件中心线、截面轮廓或构件表面等，具体内容根据检测目的和交付等级确定。交付时宜说明分割方法、标签含义及人工修正情况。标签编号应具有唯一性和稳定性，并与结构几何模型、变形检测结果、异常清单和报告中的编号保持一致；编号不一致时，宜提供映射关系。对于遮挡严重、构件交叉、节点构造复杂等造成的低置信度或分割不完整对象，应明确其质量状态和采用情况，避免影响后续变形检测和安全评价。

10.2.5 变形检测成果应包括整体和局部变形结果，并应提供检测对象及位置、检测基准、计算方法、实测值和检测结论。超限、异常、低置信度或需复核的对象，应形成异常清单。

【条文说明】

变形检测成果应能够反映检测对象及位置、计算过程和判定依据。整体变形结果可包括结构整体挠度、水平位移、支座位移等；局部变形结果可包括构件弯曲、节点偏移等，具体内容根据检测目的确定。检测基准应说明采用设计状态、初始实测状态或相对基准。异常清单中的对象编号应与点云、模型和报告保持一致，并宜包括异常位置、异常类型、实测数值、限值或判定依据、置信度及复核状态。用于说明异常的图件应能够对应原始点云或模型位置，避免仅凭文字描述而无法复核。

10.2.6 安全评价成果应提供结构力学模型和计算结果，并应说明模型用途、精度、适用工况和主要假定。用于生成结构力学模型的数据应包括节点坐标、截面属性及实测几何缺陷，点云不

能确定的材料、荷载和边界条件等信息，应注明取值依据，不应作为实测结果交付。

【条文说明】

安全评价成果是在点云几何信息、结构资料和计算分析基础上形成的综合成果。结构力学模型宜能够反映构件拓扑、实测位形及实测几何缺陷，并与点云数据、构件分割成果和异常清单建立对应关系。材料参数、荷载及支承条件通常不能由点云直接确定；采用设计文件、竣工资料或经验假定时，应说明资料来源、取值依据及适用范围，不应将其标识为点云实测结果。

展示模型、结构几何模型和结构力学模型的用途及精度要求不同，应分别标识。用于展示或浏览的简化模型不宜直接用于结构计算；用于安全评价的模型应保留必要的构件属性、拓扑关系、边界条件和建模假定。

10.2.7 质量控制资料应包括预处理、构件分割与特征提取、变形检测、模型生成和安全评价等的质量复核结果。质量评价指标的计算范围、样本数量、统计方法和合格判据应予说明。

【条文说明】

质量控制资料应与检测对象和成果用途相适应，用于说明数据处理过程和成果质量是否满足检测与交付要求。相关内容可采用汇总表、质量检查表或处理记录等形式，并可引用已有的预处理、分割、检测、建模、计算的复核资料，不必重复编制相同内容。对关键构件、异常区域、低置信度结果及其人工修正项，宜保留复核结果和处置记录，必要时附相应点云、图件或计算记录，以便成果复核和质量追溯。

10.2.8 成果归档应包括正式报告、最终模型、现场记录及必要的原始数据，文件命名应唯一、简明并可追溯，归档保存期限和存储备份要求应符合工程档案管理有关规定和合同约定。多期检测项目应建立期次索引和版本台账。

【条文说明】

成果归档的目录结构、文件命名和版本规则宜在项目初期统一，并在交付清单中说明。正式成果、历史版本和中间文件应易于区分，版本台账应记录主要变更。成果再次使用前，应核对其基准、精度、适用范围和当前有效性。

10.3 报告编制要求

10.3.1 检测报告应依据检测方案、现场记录、检测计算成果和质量控制资料编制；报告内容应

完整明确、依据充分，与交付成果保持一致，并能支持第三方复核。检测报告的编制尚应符合现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 的有关规定；涉及变形测量成果时，尚应符合现行行业标准《建筑变形测量规范》JGJ 8 的有关规定。本规程第 6.7.5 条几何模型质量评价报告、第 8.3.8 条力学模型修正记录和第 8.4.5 条安全评价报告，可作为检测报告的组成部分出具，也可按委托要求单独出具；单独出具时，检测报告中应予引用并说明其版本。

【条文说明】

检测报告应与交付成果保持一致，关键图件和结论应能相互核对。数据或模型修订后，应同步检查报告及成果清单，避免不同版本混用。

10.3.2 检测报告宜包括表 10.3.1 所列内容，并应与成果交付文件相对应。专项或阶段性报告可根据实际工作简化。

表 10.3.1 检测报告组成内容

序号	报告组成	主要内容
1	工程概况	项目概况、结构形式、工程阶段和检测区域
2	检测目的、范围和依据	委托要求、检测范围、未检测范围及设计文件等相关依据
3	现场条件与数据采集	检测时间、工况、环境条件、仪器设备及数据覆盖情况
4	数据处理与质量评价	坐标基准、去噪与抽稀、缺失区域、质量指标及复核结果
5	构件分割成果	分割方法、特征提取结果、低置信度结果及人工修正情况
6	变形检测成果	检测基准、计算方法、整体与局部变形结果、异常清单、判定依据及多期对比
7	安全评价成果	结构力学模型、实测几何缺陷、模型假定、计算工况、计算结果及适用范围
8	孪生建模与虚拟预拼装成果	孪生模型版本与适用工况、温度预测成果、虚拟预拼装偏差清单及处置建议（开展相应工作时）
9	结论、建议和附件	检测结论、处置建议、成果清单、文件清单及相关记录

【条文说明】

表中内容为报告编制的基本框架，可按项目规模和合同要求合并或细化。无论采用综合报告还是专项报告，检测范围、方法、结果、质量情况和结论等核心内容均应完整。

10.3.3 报告应说明检测范围和未检测范围，记录检测日期、温度、荷载、施工阶段和支承状态等主要工况。对于点云缺失、分割失败或不能可靠识别的区域，应说明原因及其影响。

【条文说明】

报告应明确检测对象、范围和未覆盖区域，并说明遮挡、缺测或数据质量不足对结果的影响。对不在本次任务范围内的结构性能问题，也宜作出边界说明，防止扩大解释。

10.3.4 检测结果应说明采用的算法，结果应以数值成果为主，并宜配合偏差云图和典型部位图表达。图、表、模型和异常清单应相互一致。

【条文说明】

检测结果应以可核查的数值为主，图件用于表示位置、方向和分布。图表应标明构件编号、单位、统计范围和必要的色标，多期成果宜采用一致的表达规则。

10.3.5 报告结论应与检测目的和工作内容相对应。未进行结构计算或专项鉴定时，不应作出结构承载力或整体安全性结论。

【条文说明】

结论应与检测范围、数据质量和采用的判定依据相适应。未经结构验算或专项鉴定，不应由几何偏差直接作出安全性结论。对确认的异常，可提出复测、专项检测或结构分析建议。

10.3.6 报告附件宜包括成果文件清单、现场照片和必要的原始记录等。报告修改后应记录修改内容、原因和日期。

【条文说明】

附件宜包括支持主要结论的成果清单、关键数据、图件和质量记录，并与正文引用相对应。正式报告修改后，应保留修订记录，确保报告、附件和交付数据采用同一签发版本。

附录 A 指标参数计算方法

本附录规定点云数据质量评价与点云处理结果评价各指标参数的计算方法。本附录所列计算方法可采用具备相应功能的点云处理软件或自编程序实现。

A.1 点云预检评价指标

A.1.1 LPD 参数定义与计算原理：对于点云中的任意一点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ，以 P_i 为球心、给定搜索半径 R 构建空间球形区域。遍历点云中的其他点 $P_j(x_j, y_j, z_j)$ ，计算欧氏距离：

$$d(P_i, P_j) = \|P_i - P_j\| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (A.1.1 - 1)$$

式中： $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ——点云中的任意一点；

$P_j(x_j, y_j, z_j)$ ——点云中除 P_i 外其余点。

统计满足 $d(P_i, P_j) \leq R$ 的点 P_j 的数量，即为该点的邻域点数 k_i 。

计算 LPD 时的球形邻域搜索半径 R 宜取 0.05 m；当结构杆件最小外径小于 60 mm 时， R 宜取最小杆件外径的 0.8 倍~1.0 倍。所采用的 R 值应在检测报告中注明。

A.1.2 OVR 参数定义与计算原理：对于局部区域内的构件（如圆管杆件：设计半径为 R ，长度为 L ），构件理论全面积 A_{total} 计算公式为：

$$A_{total} = 2\pi RL \quad (A.1.2 - 1)$$

完成设计模型与扫描点云的粗对齐后，以参考杆件轴线为局部坐标系的 z 轴，以评估段起点所在截面的轴心为坐标原点。对于属于该杆件评估段的任意点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ，计算其绕参考轴线的周向角度 θ_i ：

$$\theta_i = \text{atan2}(y_i, x_i) \bmod 2\pi \quad (A.1.2 - 2)$$

式中： $\text{atan2}(y_i, x_i)$ ——根据点的局部坐标确定其所在象限的反正切函数；

$\bmod 2\pi$ ——将周向角度归入 $[0, 2\pi)$ 范围。

将构件点云按周向弧长和轴向位置展开至二维参数域，展开坐标 u_i 、 v_i 计算公式为：

$$u_i = R\theta_i, \quad v_i = z_i \quad (A.1.2 - 3)$$

式中： u_i ——一点在参考圆柱侧面上的周向弧长坐标；

v_i ——一点的轴向位置坐标。

展开后的评估区域为：

$$\Omega = [0, 2\pi R) \times [0, L] \quad (A.1.2 - 4)$$

将展开区域沿周向划分为 N_u 列、沿轴向划分为 N_v 行，形成均匀矩形网格，则有：

$$\Delta u = \frac{2\pi R}{N_u}, \quad \Delta v = \frac{L}{N_v}, \quad \Delta A = \Delta u \Delta v \quad (A.1.2 - 5)$$

式中： N_u ——展开区域沿周向划分的列数；

N_v ——展开区域沿轴向划分的行数；

Δu ——周向网格尺寸；

Δv ——轴向网格尺寸；

ΔA ——单个网格面积。

参与统计的候选点应满足评估杆件的空间归属条件，避免将相邻杆件及背景点计入覆盖范围。构建网格覆盖指示函数 I_{ab} ：

$$I_{ab} = \begin{cases} 1, & n_{ab} \geq 1, \\ 0, & n_{ab} = 0. \end{cases} \quad (A.1.2 - 6)$$

式中： n_{ab} ——第 a 列、第 b 行网格内的候选点数量

当网格内存在候选点时，认为该网格对应的参考圆柱侧面区域获得点云覆盖；同一网格内存在多个点时，其覆盖面积不重复计算。构件有效覆盖侧面积 $A_{covered}$ 计算公式为：

$$A_{covered} = \sum_{a=1}^{N_u} \sum_{b=1}^{N_v} I_{ab} \Delta u \Delta v \quad (A.1.2 - 7)$$

则构件投影空白面积（空洞面积） A_{empty} 计算公式为：

$$A_{empty} = A_{total} - A_{covered} \quad (A.1.2 - 8)$$

遮挡空洞率 OVR 应按构件投影空白面积与构件理论全面积之比计算。展开网格的目标尺寸宜取 0.005 m~0.010 m，所采用的值应在检测报告中注明。

【条文说明】

对于 A_{total} 可直接根据设计图纸或实测测量得到构件参数，按公式 $A_{total} = 2\pi RL$ 计算得出，而后将所有杆件的 A_{total} 累加。

A.1.3 OR 参数定义与计算原理：对于点云中的任意一点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ，采用 K 近邻算法查找距离其最近的 k 个邻点 P_j 。计算 P_i 到这 k 个邻点的欧氏距离均值 d_i ：

$$d_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \|P_i - P_j\| \quad (A.1.3 - 1)$$

式中： $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ——点云中的任意一点；

P_j ——采用 K 近邻算法查找距离 P_i 最近的 k 个邻点。

统计全局点云中所有 N 个点的近邻平均距离，计算其中位数 m_d ：

$$m_d = \text{median}(d_1, d_2, \dots, d_N) \quad (\text{A.1.3} - 2)$$

计算各点近邻平均距离 d_i 与中位数 m_d 之差的绝对值，并取其中位数，得到中位数绝对偏差 MAD_d ：

$$MAD_d = \text{median}_{i=1, \dots, N} |d_i - m_d| \quad (\text{A.1.3} - 3)$$

中位数绝对偏差用于表征近邻平均距离的离散程度，可减小少量极端离群值对统计结果的影响。采用正态分布一致性修正系数 1.4826，将其换算为稳健尺度估计值 s_d ：

$$s_d = 1.4826 MAD_d \quad (\text{A.1.3} - 4)$$

基于中位数与稳健尺度构建离群点判别阈值。若某点的近邻平均距离满足 $d_i > m_d + \alpha s_d$ ，则判定该点为离群点。离群点集合 P_{outlier} 定义为：

$$P_{\text{outlier}} = \{p_i \in P: d_i > m_d + \alpha s_d\} \quad (\text{A.1.3} - 5)$$

统计离群点集合的数量 $N_{\text{outlier}} = |P_{\text{outlier}}|$ ；离群点比例 OR 应按离群点数量与点云总点数之比计算。

计算平均距离时的近邻点数 k 宜取 10~20。

A.1.4 PDU 参数定义与计算原理：将包含点云的三维包围盒空间划分为 M 个固定边长为 100 mm 的正方体体素网格。第 n 个正方体网格内点数占总点数的百分比 p_n 计算公式为：

$$p_n = \frac{n_n}{N} \quad (\text{A.1.4} - 1)$$

式中： n_n ——第 n 个体素网格内的点数；

N ——点云总点数。

A.1.5 TC 参数定义与计算原理：结构理论杆件总数 N_{total} 应根据设计图纸或设计模型确定。对于算法分割出的任意一根杆件（设计半径为 R ，长度为 L ），若要判定其为“拓扑完整杆件”，应同时满足下列两个工程判定条件：

1. 杆件点云 S_{member} 的两端应能够分别找到对应的两个邻接节点点云 S_{node1} 和 S_{node2} 。杆件点云与两端节点点云的最小距离 d_{min1} 和 d_{min2} 均应小于等于 3 倍杆件半径与 3 倍点云平均点间距的较小值：

$$d_{min1} = \min_{p \in S_{member}, q \in S_{node1}} \|p - q\| \leq \min(3R, 3\bar{d}) \quad (A.1.5 - 1)$$

$$d_{min2} = \min_{p \in S_{member}, q \in S_{node2}} \|p - q\| \leq \min(3R, 3\bar{d}) \quad (A.1.5 - 2)$$

式中： d_{min1} 、 d_{min2} ——所评价杆件点云与对应节点点云之间的最小欧氏距离；

S_{member} ——所评价杆件的点云集合；

S_{node1} 、 S_{node2} ——与该杆件对应的邻接节点点云集合；

p ——杆件点云集合 S_{member} 中的任意点；

q ——节点点云集合 S_{node} 中的任意点；

R ——所评价杆件的设计截面外半径。

2. 将该杆件的所有点投影至其理论轴线上，得到一维轴线投影位置集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 。

计算相邻投影点之间的最大间隙 $G_{max} = \max(x_{i+1} - x_i)$ ，最大间隙不超过 0.1 倍杆长 L 且不应大于 0.1m：

$$G_{max} \leq \min(0.1L, 0.1) \quad (A.1.5 - 3)$$

当且仅当杆件同时满足 $d_{min1}, d_{min2} \leq 2R$ 且 $G_{max} \leq \min(0.1L, 0.1)$ 时，该杆件被认定为拓扑完整：

$$N_{valid} = \sum_{i=1}^{N_{total}} \mathbb{I} \left(\left(d_{min1, 2, i} \leq \min(3R, 3\bar{d}) \right) \wedge \left(G_{max, i} \leq \min(0.1L, 0.1) \right) \right) \quad (A.1.5 - 4)$$

A.1.6 SNR 参数定义与计算原理：对于局部区域内的任意点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ，取其 k 近邻点集，构建 3×3 协方差矩阵并进行特征值分解，求得特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$ 。利用最小特征值 λ_3 占特征值之和的比例衡量点 P_i 处的局部曲率变化，以此提高节点等复杂构造部位在质量评价中的权重：

$$C_i = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (A.1.6 - 1)$$

式中： C_i ——点 P_i 处的局部曲率指标；

λ_1 ——点 P_i 的局部邻域点集协方差矩阵的特征值。

计算局部邻域点集的质心 $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 。最小特征值 λ_3 对应的单位特征向量 $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ 即为理想拟合平面的单位法向量。点 P_i 到该最小二乘法拟合平面的垂直距离计算公式为：

$$d(P_i, \text{Plane}) = |(P_i - \bar{P}) \cdot \vec{n}| = |(x_i - \bar{x})n_x + (y_i - \bar{y})n_y + (z_i - \bar{z})n_z| \quad (A.1.6 - 2)$$

式中： $\bar{P}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ ——局部邻域点集的质心；

$\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ ——最小特征值 λ_3 对应的单位特征向量。

以局部曲率 C_i 作为权重因子，对点云的距离偏差进行加权方根求和：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N C_i \cdot d(P_i, \text{Plane})^2}{\sum_{i=1}^N C_i}} \quad (\text{A.1.6} - 3)$$

式中： σ ——曲率显著性加权平均偏差；

$d(P_i, \text{Plane})$ ——点 P_i 到最小二乘法计算所得的理想拟合平面的距离；

A.2 点云处理结果评价指标

A.2.1 RMSE 参数定义与计算原理：对于目标点云集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ ，首先计算点云中每个点与其最近邻点 $p_j (j \neq i)$ 的欧氏距离 d_i ：

$$d_i = \min_{p_j \in P, j \neq i} \|p_i - p_j\|_2 = \min_{p_j \in P, j \neq i} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (\text{A.2.1} - 1)$$

式中： p_i ——目标点云集合中的第 i 个点；

p_j ——目标点云集合中除 p_i 自身外，参与最近邻搜索的候选点；

x_i 、 y_i 、 z_i ——点 p_i 在所采用坐标系中的三个坐标分量；

x_j 、 y_j 、 z_j ——点 p_j 在同一坐标系中的三个坐标分量。

统计全局点云中所有 N 个点的平均距离，作为点云平均点间距：

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (\text{A.2.1} - 2)$$

设配准变换中的旋转矩阵为 $R \in SO(3)$ ，平移向量为 $t \in \mathbb{R}^3$ ，可得空间变换矩阵 T ：

$$T = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2.1} - 3)$$

式中： T ——采用齐次坐标表示的空间刚体变换矩阵；

R ——配准变换中的旋转矩阵；

t ——配准变换中的平移向量。

对设计模型采样点 $P_{i,\text{design}}$ 与扫描点云对应目标点 $P_{i,\text{scan}}$ ，参与配准误差计算的点对数为

n 。算法收敛均方根误差 RMSE 计算公式为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|RP_{i,design} + t - P_{i,scan}\|^2} \quad (A.2.1 - 4)$$

式中： $P_{i,design}$ ——设计模型中第 i 个采样点的三维坐标；

$P_{i,scan}$ ——扫描点云中，与计算模型第 i 个点相对应的目标点三维坐标。

A.2.2 δ_{axis} 参数定义与计算原理：在全局坐标系下，设设计模型中节点 j 的理论几何中心坐标向量为 $P_{design,j} = (x_{d,j}, y_{d,j}, z_{d,j})^T$ 。经过算法几何拟合后，汇交于该节点的 M 根实际提取杆件的端点坐标向量为 $P_{calc,j}^{(m)} = (x_{c,j}^{(m)}, y_{c,j}^{(m)}, z_{c,j}^{(m)})^T$ 。第 m 根杆件在节点 j 处的局部偏心位移向量 $\vec{\Delta}_j^{(m)}$ 为：

$$\vec{\Delta}_j^{(m)} = P_{calc,j}^{(m)} - P_{design,j} = \begin{pmatrix} x_{c,j}^{(m)} - x_{d,j} \\ y_{c,j}^{(m)} - y_{d,j} \\ z_{c,j}^{(m)} - z_{d,j} \end{pmatrix} \quad (A.2.2 - 1)$$

式中： $P_{design,j}$ ——设计模型中节点 j 的理论几何中心坐标向量；

$x_{d,j}, y_{d,j}, z_{d,j}$ ——设计节点 j 的理论几何中心在全局坐标系中的三个坐标分量；

$P_{calc,j}^{(m)}$ ——汇交于该节点的 M 根实际提取杆件的端点坐标向量；

$x_{c,j}^{(m)}, y_{c,j}^{(m)}, z_{c,j}^{(m)}$ ——该杆件拟合轴线端点在全局坐标系中的三个坐标分量。

其空间欧氏距离为：

$$\|\vec{\Delta}_j^{(m)}\|_2 = \sqrt{(x_{c,j}^{(m)} - x_{d,j})^2 + (y_{c,j}^{(m)} - y_{d,j})^2 + (z_{c,j}^{(m)} - z_{d,j})^2} \quad (A.2.2 - 2)$$

对于全结构 N_{nodes} 个节点，全网架轴心线整体偏移量 δ_{axis} 计算公式为：

$$\delta_{axis} = \frac{1}{N_{nodes}} \sum_{j=1}^{N_{nodes}} \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \|\vec{\Delta}_j^{(m)}\|_2 \right) \quad (A.2.2 - 3)$$

式中： N_{nodes} ——参与整体偏移量评价的节点总数；

M ——汇交于所评价节点 j 并参与计算的杆件数量。

对于单根杆件 m ，其轴心线偏移量也可通过计算拟合轴线的起点、终点坐标与设计轴线起点、终点坐标的欧氏距离均值表示：

$$\delta_{axis} = \frac{\|P_{start,m} - P_{start,d}\| + \|P_{end,m} - P_{end,d}\|}{2} \quad (A.2.2 - 4)$$

式中： $P_{start,m}$ 、 $P_{end,m}$ ——算法计算得出的轴线起点、终点坐标；

$P_{start,d}$ 、 $P_{end,d}$ ——结构设计的轴线节点的起点、终点坐标。

【条文说明】

在完成杆件拟合与拓扑分割后，算法通过圆柱面拟合或中心线提取算法计算得到各杆件在两端节点处的中心线交点，可在算法导出的杆件文件中直接读取。同时，从导入的设计模型中提取对应的节点坐标值 $P_{start,d}$ 、 $P_{end,d}$ 。而后则可根据公式计算 δ_{axis} 。

A.2.3 σ_{surf} 参数定义与计算原理：截面拟合残差应采用完成去噪与离群点剔除后的单根圆管杆件有效点云进行计算。设参与评价的点云集为 $S = \{P_1, P_2, \dots, P_K\}$ ，拟合轴线为 L_{axis} ，截面最小二乘法得出的最优拟合半径为 R_{fit} 。截面拟合残差应按式计算：

$$\sigma_{surf} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d(P_i, L_{axis}) - R_{fit})^2} \quad (A.2.3 - 1)$$

式中： n ——参与该杆件拟合残差统计的有效点数；

p_i ——有效点云集中的第 i 个点；

L_{axis} ——该杆件经拟合确定的中心轴线；

$d(P_i, L_{axis})$ ——点 P_i 到拟合轴线的垂直距离；

R_{fit} ——该杆件截面经最小二乘拟合所得的最优半径。

【条文说明】

在算法完成杆件点云提取与轴线拟合时，会计算每个点到拟合轴线的欧氏垂直距离，残差数组与拟合半径 R_{fit} 可直接从算法拟合模块的输出结构体中提取。同时读取该点云文件的总点数，即可计算得出 σ_{surf} 。

附录 B 构件实例分割典型方法

本附录规定构件实例分割典型方法的适用条件与实施要素，方法的选用应符合本规程第 6.2 节的有关规定。

B.1 区域生长法

B.1.1 区域生长法适用于结构形态较为规则、缺乏 BIM 等先验信息的空间结构构件实例分割。

【条文说明】

区域生长法的核心特征是仅依赖点云本身的几何特征、无需外部先验。其数学基础是：对于正常直杆件，杆件表面法向量 $\mathbf{n}$ 与杆件轴线 $\mathbf{p}$ 基本正交，即 $|\mathbf{p} \cdot \mathbf{n}|$ 小于给定的正交判据阈值（阈值取值见 B.1.2）。方法适用于焊接球或螺栓球网架等构造相对规则的空间结构。

B.1.2 区域生长法的实施应符合下列规定：

从点云中选取顶点作为种子顶点集合，种子顶点的邻域搜索半径宜取杆件平均直径的 1 倍~2 倍；为提高邻域搜索效率，可先将点云转化为网格模型，形成三角面片，基于面片的邻接拓扑关系和顶点编号快速获取指定顶点的邻域点；

对种子顶点及其邻域点计算法向量，由相邻顶点法向量的叉积估算杆件轴线方向 $\mathbf{p}$ ；

以“杆件表面法向量 $\mathbf{n}$ 与轴线方向 $\mathbf{p}$ 基本正交”作为判据（正交关系阈值 $|\mathbf{p} \cdot \mathbf{n}|$ 宜取 0.1~0.2），从种子顶点出发沿邻接拓扑关系递归扩展，将满足判据的邻接顶点归入同一杆件实例（内部循环）；

完成一根杆件的扩展后，从剩余顶点中选取新的种子顶点，重复上述扩展过程（外部循环），直至所有顶点完成分类；

对不满足正交判据、位于杆件交汇位置或曲率变化较大的顶点，可归入节点区域，供后续节点识别使用。

【条文说明】

种子顶点邻域搜索半径的取值决定了法向量估算精度：取值过小时相邻顶点数不足以稳定估算轴线方向，取值过大时容易跨越杆件-节点边界。将点云先转化为三角面片后，可基于面片的邻接拓扑（相邻面片共享边或共享顶点）快速获取指定顶点的邻域，避免逐点计算 kd-tree 邻域搜索的开销。正交关系阈值 $|\mathbf{p} \cdot \mathbf{n}|$ 的物理含义是允许的最大偏离角度： $|\mathbf{p} \cdot \mathbf{n}|=0.1$ 对应约 84.3°

夹角, $|\mathbf{p} \cdot \mathbf{n}|=0.2$ 对应约 78.5° 夹角, 即偏离正交角度不超过约 $6^\circ \sim 12^\circ$; 对于弯曲显著的杆件可适当放宽阈值。

B.2 特征聚类法

B.2.1 特征聚类法适用于含多类杆件、节点形式多样的复杂空间结构构件实例分割。

【条文说明】

特征聚类法通过计算点云的局部空间拓扑特征(如线性度 L 、发散度 S 等)区分节点区与杆件区。节点区点云在局部呈现较高的发散特征, 杆件区呈现较高的线性特征。剔除节点邻域过渡点后对剩余点云进行欧氏距离聚类, 即可将节点点云和杆件点云分别分离为独立实例。

B.2.2 特征聚类法的实施应符合下列规定:

提取点云的局部空间拓扑特征(如线性度、发散度等), 用以区分节点点云与杆件点云;

按特征划分得到节点点云与杆件点云, 并以邻域搜索剔除节点附近的过渡点;

对节点点云与杆件点云分别采用基于欧氏距离的实例分割, 杆件点云的聚类距离阈值宜取杆件平均直径的 $1/2$ 倍 ~ 1 倍, 节点点云的聚类距离阈值宜取节点等效直径的 $1/2$ 倍 ~ 1 倍, 分离单个节点实例与单根杆件实例;

依据杆件与节点的邻接搜索结果, 确定杆件两端对应的节点编号, 邻接搜索半径宜取杆件端部到最近节点距离的 1.5 倍 ~ 2 倍。

【条文说明】

局部拓扑特征的计算通常基于协方差矩阵的三个特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$: 线性度 $L=(\lambda_1-\lambda_2)/\lambda_1$, 值越接近 1 表示点云越呈线状(杆件特征); 发散度 $S=\lambda_3/\lambda_1$, 值越大表示点云越呈块状(节点特征)。剔除过渡点的邻域搜索半径宜取节点等效直径的 1 倍 ~ 1.5 倍, 避免节点邻域点被误分入杆件实例。欧氏聚类距离阈值取杆件平均直径的 $1/2 \sim 1$ 倍, 可平衡"同一杆件不断裂"与"相邻杆件不合并"的要求。

B.3 单模板匹配法

B.3.1 单模板匹配法适用于点云稀疏、不全或存在严重遮挡且结构形态较为规则的空间结构构件实例分割。

【条文说明】

单模板匹配法基于点云与模板的刚性配准。模板可选取单根标准杆件的理想点云，通过在原始点云中滑动搜索最匹配位置来识别所有杆件。方法对点云稀疏、单侧遮挡等不利工况有良好的适应性，是空间网格结构点云处理中较早发展的方法之一。

B.3.2 单模板匹配法的实施应符合下列规定：

依据结构形态构建标准杆件与节点的模板点云；

通过迭代刚性配准在原始点云中识别杆件位置，配准收敛判据宜采用相邻两次迭代的点云对应点距离均方根变化率，宜小于 1×10^{-4} ，并应同时限制最大迭代次数；

对识别出的杆件进行分离，并同步确定节点中心位置。

【条文说明】

模板点云可采用理想圆柱面等间距采样生成，模板长度宜取待检测杆件平均长度。刚性配准可采用迭代最近点算法或其改进算法。收敛判据的变化率阈值 1×10^{-4} 为经验值，工程实践中可根据点云精度适当放宽或收紧；最大迭代次数可取 100 次左右，以防止不收敛工况下的死循环。

B.4 多模板匹配法

B.4.1 多模板匹配法适用于具有 BIM 等先验模型的空间结构构件实例分割。

【条文说明】

多模板匹配法充分利用 BIM 设计模型的完整先验信息。全参数化模板库覆盖工程中出现的各类节点类型、杆件截面类型、连接构造，以 BIM 几何作为初始位姿可显著缩短匹配搜索范围。方法适用于施工阶段、施工偏差不大的工程点云处理。

B.4.2 多模板匹配法的实施应符合下列规定：

根据 BIM 设计模型构建覆盖各类节点与杆件的全参数化模板库；

以 BIM 几何作为初始位姿，对扫描点云分批进行模板匹配；
通过多模板匹配实现多类截面杆件并存的精细分割。

【条文说明】

参数化模板库应按截面类型（圆管、方管、H 型钢、变截面等）、节点类型（球节点、相贯节点、法兰节点等）分类组织。以 BIM 几何作为初始位姿后，每根杆件仅需在其 BIM 位置附近进行小范围刚性配准，搜索空间大幅缩小，从而提高整体处理效率。

B.5 半刚性最优步进迭代配准法

B.5.1 半刚性最优步进迭代配准法适用于具有 BIM 等先验模型且结构存在显著整体变形（或整体变形与局部变形耦合）的空间结构构件实例分割。

【条文说明】

半刚性最优步进迭代配准法在传统模板匹配的刚性配准基础上引入了半刚性变换。对于存在明显整体变形、悬挑变形、施工累积变形等的空间结构，刚性模板匹配的目标函数往往陷入局部最优或无法收敛。该方法通过截面、节点、连接等几何约束构造能量函数，采用双层循环迭代格式求解——内循环在给定刚度下求解变换矩阵，外循环更新刚度参数——从而在保持结构整体几何合理性的同时允许局部变形。方法尤其适合高空、远距离扫描所得的低质量点云。

B.5.2 半刚性最优步进迭代配准法的实施应符合下列规定：

基于 BIM 等设计先验，直接组织覆盖整体结构的源点云，作为分割与位形识别的模板；

半刚性正向变换：以源点云中各顶点对目标点云的最近点对应约束，引入截面、节点及连接等几何约束构造能量函数，按双层循环迭代格式（内循环在给定刚度下求解变换矩阵，外循环更新刚度参数）求解，使源点云逐步对齐至目标点云所在的实测位形；

刚性反向变换：以半刚性正向变换得到的源点云为输入，通过刚性变换将其整体还原至设计坐标系下；

基于半刚性正向变换矩阵与刚性反向变换矩阵，由源点云与目标点云的对应关系直接完成构件实例分割、节点位置识别与杆件变形识别。

【条文说明】

能量函数由点对距离项、截面几何保持项、节点连接约束项加权组合而成，各项权重体现"点云拟合精度"与"结构几何合理性"的平衡。内循环采用最小二乘或 Levenberg-Marquardt 方法求解；外循环的刚度更新可采用步进衰减策略，初始阶段允许较大的局部变形，逐步收敛至稳定构形。

B.6 机器学习与深度学习方法

B.6.1 机器学习与深度学习适用于具备充足的标注样本或已建立面向空间结构的预训练模型的构件实例分割。

【条文说明】

基于深度学习的点云分割是近年来快速发展的方向。适合空间结构点云处理的网络可采用点级特征学习类语义分割网络与基于实例掩码预测的实例分割网络。当已有工程项目积累了较多标注数据时，可通过迁移学习加速新工程的模型训练。

B.6.2 机器学习与深度学习方法的实施应符合下列规定：

所采用的网络架构应针对空间结构点云的几何特征进行设计或迁移适配，宜采用面向点云数据的语义分割与实例分割网络；

训练样本宜来自与目标结构形式、节点形式相似的工程项目，样本数量应满足所采用网络的训练要求，并宜覆盖目标结构的主要节点形式与杆件类别；样本不足时可采用合成数据扩充、迁移学习或自监督学习等手段；

训练样本应建立统一的标注规范，标注内容应包括节点类型、杆件类别及节点—杆件拓扑关系等标签；

应建立预测结果的不确定性评价方法，对置信度较低的分割结果应在成果中明确标识；

模型在具体工程应用前，应在该工程中具有代表性的样本上完成验证测试，验证样本比例不宜少于总样本的 20%，分割结果应符合本规程第 6.2.6 条的精度要求。

【条文说明】

本条对训练样本、标注规范、不确定性评价和工程验证提出要求，避免"端到端黑盒"结果直接用于工程实践。样本量下限的取值基于工程经验：过少的样本无法覆盖空间结构中节点—杆件的空间分布多样性，导致模型泛化能力不足。

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，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”，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用词，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《激光产品的安全 第1部分：设备分类、要求》GB 7247.1
- 2 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 3 《钢结构设计标准》GB 50017
- 4 《建筑抗震鉴定标准》GB 50023
- 5 《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153
- 6 《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205
- 7 《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344
- 8 《工程结构通用规范》GB 55001
- 9 《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002
- 10 《空间网格结构技术规程》JGJ 7
- 11 《建筑变形测量规范》JGJ 8
- 12 《索结构技术规程》JGJ 257

（全文完）.