

空间结构三维点云建模与检测评价技术规程

编制说明

主管单位：中国钢结构协会

主编单位：清华大学

2026-09-23

一、工作简况

1. 任务来源与编制背景

空间网格结构具有受力效率高、自重轻、刚度大、跨越能力强及结构造型优美等特点，在建筑与基础设施建设中网架结构被广泛应用。空间网格结构从结构形式分类包括空间网架、网壳、平面及立体桁架、张拉整体结构等多种类型；在行业应用方面，空间网格结构已广泛应用于国民经济的多个重要领域。在房屋建筑领域，它是大跨度体育场馆、博物馆、展览馆、影剧院及加油站等建筑常用的结构形式之一；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；在桥梁工程领域，桁架桥作为重要结构得到了大量应用；此外，在电力系统和石油化工行业中，高压输电铁塔、石油井架及特种设备支撑架等空间网格结构也承担着重要功能。空间网格结构广泛的应用范围，决定了保障其运行与维护安全具有重要的社会意义和经济价值。

对于空间网格结构而言，合理的空间位形和受力状态是保证其承载能力与稳定性的基础。在服役阶段，结构变形是表征其健康状态最直观、最重要的指标之一，其中包括如整体挠度、水平位移等整体变形，也包括单根杆件的初弯曲、局部磕碰凹陷等局部变形。相关研究与工程案例表明，在役空间网格结构的失效往往始于局部杆件失稳，杆件的非正常弯曲变形会明显降低其承载效率，并进一步影响整体结构安全。同时，变形检测也是施工质量检查与竣工验收的重要环节。在模块化吊装、高空散装等施工过程中，结构实际成型状态与设计模型之间的几何偏差，会直接影响结构的初应力分布和受力性能。因此，建立覆盖施工质量检查与长期服役阶段的空间网格结构变形检测体系，具有十分重要的意义。

现有空间网格结构变形检查方法已难以充分满足不断提高的精细化管养要求。传统以全站仪为主的单点测量方法存在较为明显的局限：一是测量精度与作业效率之间的矛盾，单点测量效率较低，且空间网格结构节点密集、杆件缺少明显特征点，人工瞄准容易引入视觉误差，同时难以获得覆盖全场的连续几何形貌信息；二是杆件局部弯曲检测困难，全站仪通常以节点坐标测量为主，对于杆件中部的弯曲、扭曲等局部变形，难以实现有效识别与测量；三是现场作业风险较高，传统人工登高检查受到通视条件和作业平台的限制，也存在较大的安全风险。

这种以有限测点为基础的检测方式，难以完整反映结构的实际几何状态，使结构安全评估仍存在一定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发展与成熟，基于三维点云的结构检测已成为土木工程智能化发展的重要方向。与传统测量手段相比，三维点云具有点位密集、非接触、覆盖范围广及测量精度高等优势。通过采集结构表面的大量空间点位，能够实现由离散几何信息向结构几何模型的转化。基于点云数据的 Scan-to-BIM 可服务于竣工交付和数字化移交，Scan-to-FE Model 则可将实测杆件弯曲、节点偏差等信息引入计算模型，为结构安全精细化评估提供更加贴近实际状态的模型依据。然而，尽管三维点云技术具有较大的应用潜力，行业内仍缺少面向空间网格结构点云处理的专项标准，点云自动化分割、构件识别精度及变形评价指标等方面尚未形成统一的技术要求。本标准的编制，旨在规范从数据采集、点云分割、变形识别到力学模型生成的全过程技术工作，补充空间网格结构智能化检测领域的标准体系，推动我国大跨度空间结构管养向数字化、智能化方向发展。

2. 主要工作过程

本规程编制工作采用分工撰写与集中讨论相结合的方式开展。编制初期，编制组根据规程的适用范围、主要技术内容及章节设置进行任务分工，由各成员承担相应章节的撰写工作，围绕点云采集与预处理、质量评价、构件分割与几何模型生成、结构变形检测、力学建模与安全评价、孪生建模与虚拟预拼装及成果交付等内容，分别形成各章节初稿。

在各章节初稿形成后，编制组通过多次工作会议不断开展集中讨论，重点梳理规程的整体技术路线、章节安排及各部分内容之间的逻辑关系。针对三维点云从采集、评价、处理、建模的工作流程，逐步明确各章节的技术任务、输入条件和成果要求，协调前后章节之间的数据传递、指标引用及方法衔接，完善规程的整体框架。

在讨论与修改过程中，编制组结合各章节的具体内容，对术语定义、技术指标、计算方法及适用条件进行反复梳理，重点处理章节之间内容重复、规定不一致或衔接不充分等问题。各成员根据会议讨论意见修改所负责章节，再由编制组

集中复核，按照“分工撰写—集中讨论—修改完善—再次核对”的方式持续推进，使各部分内容逐步形成相互关联、前后协调的技术体系。

在各章节内容逐步完善的基础上，编制组对全文进行汇总整理，统一条文表述、术语符号及相关引用关系，并结合整体技术流程进一步检查正文、附录与条文说明之间的对应关系，最终完成本规程修改稿的编制工作。

3. 主要参加单位和工作组成员

本规程主编单位为清华大学，参编单位有：北京城建集团有限责任公司、中铁建设集团有限公司、北京市建筑设计研究院股份有限公司、国网安徽省电力有限公司电力科学研究院、东南大学等。

本规程主要编制人员为刘宇飞、樊健生等。

二、标准编制原则和主要内容的论据

1. 编制原则与技术体系

本规程以工程使用目的确定检测精度、建模深度和交付内容。数据采集、输入质量、处理结果质量分别控制，并保留补测、重新处理和独立复核环节；允许根据结构形式和数据条件选用不同分割算法，以可检验的成果要求评价方法适用性。检测基准、坐标、单位、构件编号和版本贯穿全过程，使检测值能够追溯至原始数据和现场工况。

第 1 至 3 章规定规程适用范围、术语、全流程及等级；第 4 至 6 章规定采集、质量评价和几何模型生成；第 7 至 9 章规定变形检测、力学评价和施工应用；第 10 章规定交付与报告；附录 A 细化指标计算方法；附录 B 列举分割方法。整体形成覆盖数据采集至工程应用的全过程技术体系。

2. 规程主要技术内容的论据

本规程主要技术内容以相关研究论文、算例分析、实验验证和工程实践为依据。其中，评价方法、评价指标及其分级判据，主要通过算例分析和实验验证论证其合理性与适用性；点云采集、现场作业及其他检测参数，主要参考相关研究论文和工程实践，并与现行相关标准的要求相协调。对于不同来源的技术依据，结合其研究对象、试验条件和应用范围进行分析，明确其在空间结构点云建模与检测评价中的适用条件。

点云输入质量采用局部点云密度、遮挡空洞率、离群点比例、空间采样均匀性、拓扑可连接性和视觉显著性噪声比等指标，分别反映数据的密度、完整性、纯净程度及空间分布特征；处理结果质量采用算法收敛残差、识别完备率、轴心线偏移量和截面拟合残差等指标，反映构件识别及几何特征提取成果的可信程度。对评价方法和指标的验证，通过实际的算例及实验数据，分析点云密度、遮挡程度、噪声比例和构件几何特征变化对处理结果的影响。通过比较不同数据条件下的点云质量情况与处理结果误差，检验各指标能否反映相应的质量问题，并分析指标之间的关联及综合评分的稳定性。

构件实例分割、特征提取及几何模型生成方法，主要参考点云分割、几何拟合、模板匹配和模型配准等方面的研究论文，其方法性能主要通过具有真值的真实算例样本进行验证，分析节点与杆件的漏检、误检、实例混淆及几何提取误差。

整体与局部变形检测方法，以结构几何测量、杆件变形识别及相关工程检测研究为基础。节点位移、杆件弯曲、局部凹陷、截面畸变和节点局部偏差等指标，主要通过具有已知几何变化的算例和可独立量测的实验对象进行验证，对杆件弯曲检测，考虑不同弯曲方向和形态从而比较检测值与参考值的差异；对局部凹陷和截面畸变，结合点云精度及目标尺度分析其可检出能力。

实测力学建模、模型修正及孪生应用方法，主要参考实测几何重构、有限元分析、参数识别和施工过程模拟等方面的研究成果，并结合算例分析和实验验证其应用效果。论证重点包括实测几何缺陷的表达、模型转换的一致性、采集工况与目标状态的区别，以及自重、温度和支承条件变化对计算结果的影响。模型修正效果采用未参与参数识别的独立响应进行验证；虚拟预拼装及施工预测结果与相应工况下的接口量测、安装或卸载后的复测结果进行比较，检验了其对实际工程状态的反映能力。

采集精度、测站间距、点云重叠度、靶标数量与布置、扫描点间距、滤波参数、截面取样间距及温度采样间隔等检测和作业参数，主要参考相关研究论文及工程实践经验确定。

成果交付与报告编制要求，主要依据工程检测、结构分析及数字化交付的实际需要，并参考相关标准和工程应用经验制定。通过明确不同交付等级的内容、质量要求和使用条件，统一点云、模型、图表及报告之间的对应关系，使成果能够支持工程复核、跨软件交换和后续应用。

3. 解决的主要问题

本规程主要解决了空间结构三维点云建模与检测评价过程中,数据采集要求、处理质量判据及工程应用条件缺少统一衔接的问题。通过对点云输入质量和处理结果质量分别进行评价,明确数据进入后续处理及工程应用的基本条件,并减少因点云稀疏、遮挡、噪声和误分割造成的结果偏差。

空间网格结构点云规模极其庞大,常达数亿甚至数十亿点,且现场扫描必然存在视线遮挡、设备盲区及脚手架/马道等环境噪点干扰。规程需要明确并规范智能化点云分割算法的适用条件与容错机制。针对复杂环境与严重遮挡下,点云模型的构件自动分割识别作业标准化问题,本规程制定了在缺失点云与无关噪点干扰下,针对圆管、方管等多种截面形式杆件以及球节点、相贯节点等各类复杂节点的自动识别与实例分离的准确率、完整率等评价指标界限,解决从整体点云到单根杆件的精准分割问题。

实际扫描获取的杆件点云往往只有单侧或部分表面。对此本规程考虑了实测几何缺陷的杆件真实形态重构与变形提取计算规则,统一了离散点云到构件力学骨架的几何拟合算法规则。包括:规范如何利用圆柱面/多边形拟合或中心轴线追踪算法,从残缺的点云表面精确提取出单根杆件的三维空间中心线(轴线);明确如何剔除装配误差,科学定义并计算单根杆件的三维初始弯曲度及节点空间坐标的空间偏差;制定统一的构件级变形限值判别依据。

针对从实测几何模型向精细化力学评估模型 Scan-to-FE Model 的映射机制的问题,本规程重点规范了如何将识别出的千万级海量几何坐标及局部杆件初弯曲、节点坐标偏移等实测初始缺陷,通过静力模型修正、全局优化算法或等效几何矩阵引入到结构分析软件中;建立了包含实测缺陷的半刚性/铰接网格结构安全评估流程,使得计算出的残余承载能力能够真实反映结构当前的服役状态。

三、主要试验或验证情况分析

本规程的编制以空间结构构件分割、实测几何缺陷提取及有限元模型重构等方面的前期研究为基础,结合三维点云技术在空间结构检测与建模中的应用需求,对相关方法的技术原理、适用条件及质量控制要求进行梳理。项目申请书介绍了点云构件识别、杆件真实形态提取及实测缺陷引入力学模型等方面的研究基础,

修改稿条文说明进一步涉及点云密度、遮挡、噪声及典型杆件弯曲形态对处理结果的影响。这些研究内容为规程技术路线、评价指标及检测方法的确定提供了基础，也构成后续算例分析和实验验证的主要方向。

在点云数据质量方面，研究主要关注数据密度、表面覆盖程度及噪声干扰对构件识别和几何拟合的影响。空间结构杆件细长、节点密集，现场扫描容易出现单侧覆盖、局部缺失和点云分布不均匀等情况，影响截面中心、杆件轴线及节点位置的提取。针对这些问题，规程设置了局部点云密度、遮挡空洞率、离群点比例等指标，并补充考虑空间采样均匀性、拓扑可连接性和节点区域的局部质量。相关研究认识可用于解释指标的物理含义及其与后续处理误差的关系；各指标阈值、权重和等级界限的合理性，则需结合不同数据条件下的算例与实验结果进一步论证。

在构件实例分割与几何特征提取方面，研究涉及基于点云特征、模板匹配及半刚性配准等方法的节点和杆件识别，以及由构件表面点云提取节点中心、截面中心和杆件实际轴线的技术路径。此类研究为整体点云向构件级几何模型的转化提供了方法基础。验证工作重点考察了不同结构形式、节点构造和遮挡条件下的识别表现，通过与经确认的参考模型比较，分析节点与杆件的漏检、误检、实例混淆及几何提取误差，同时明确各类方法的适用范围和限制条件。

在结构变形检测方面，重点研究了典型长细比杆件、半波及双波弯曲形态等，为截面取样数量、取样间距及弯曲指标的设置提供分析基础。相关验证以具有已知几何形态的数值算例和能够独立量测的实验对象为依据，比较不同取样条件下的轴线重构结果、最大弯曲值及其位置，并分析端部节点定位误差、局部点云缺失和截面拟合误差的影响。对于局部凹陷、截面畸变及节点偏位，结合目标尺度和测量精度，分析其可检出范围及结果稳定性，区分真实几何异常与噪声、误分割或拟合失稳造成的异常结果。

在实测力学建模与模型修正方面，研究主要涉及将实测节点坐标、杆件轴线及初始几何缺陷映射至有限元模型，并结合结构实际工况开展计算分析。其验证重点包括几何信息在模型转换过程中的保持情况、构件连接关系的正确性，以及自重、温度和支承条件对实测位形及计算响应的影响。对于模型修正采用了未参与参数识别的独立实测响应进行检验，分析修正前后计算结果与实测结果的差异。

用于虚拟预拼装和施工控制时，将目标工况下的预测结果与接口量测、安装或卸载后的复测结果进行比较，检验模型的工程适用性。

为形成可追溯的技术依据，相关验证资料应按照所支撑的条文和技术内容分类整理。论文资料应列明题录、研究对象、主要结论及引用位置；算例资料应包括几何模型、参数设置、参考值、计算方法和结果；实验资料应包括试件或工程概况、仪器设备、采集条件、独立量测方法、原始数据及误差分析。对评价方法和指标，应同时说明样本数量、数据分布、临界条件及不符合预期的情况，避免仅以单个成功算例或平均误差作为判定依据。

具体支撑论文题录包括：《Automated inspection and monitoring of member deformation in grid structures》；《Member separation and deformation recognition of spatial grid structures in-service》；《Point cloud segmentation and construction verification for large-span modular steel structures》；《Semirigid optimal step iterative algorithm for point cloud registration and segmentation in grid structure deformation detection》；《Refined safety assessment of steel grid structures with crooked tubular members》；《Safety assessment of existing pin-jointed grid structures with crooked members using static model updating》；《Deformation prediction of large-span spatial structure considering adverse weather conditions》；《FE model updating of grid structure considering deformation of crooked members》；《Mechanics-based digital twin model for structural construction using 3D scanning and FE model updating》；《Initial geometric imperfections simulation and construction control standard of complex surface reticulated shells using measured 3D scan data》；《在役空间网格结构的安全监测与杆件变形指标研究》；《钢桁架结构三维激光扫描及提升过程变形智能识别研究》；《复杂空间节点加载试验与三维激光扫描量测技术研究》；《基于空间位形的在役索膜结构有限元模型修正与安全评估》；《复杂大跨空间钢结构施工过程综合监测技术研究》；《大跨斜腿钢管桁架结构施工卸载监测技术研究》；《大跨斜腿钢管桁架结构日照非均匀温度场研究》；《外部化学爆炸后门式刚架厂房的安全性鉴定》。

四、标准涉及专利的情况

本规程不涉及专利，且本规程允许采用多种技术路径，不将指定商业软件或特定设备作为实施条件。

五、预期社会效益及对产业发展的作用

1. 结构检查与公共安全效益

规程实施后，预期可提高空间结构几何信息的覆盖程度，使杆件弯曲、局部凹陷和节点偏位等异常能够按对象编号定位、复测和跟踪。将数据质量与结论使用条件关联，有助于减少因缺测、误识别和基准混用造成的误判，为场馆、交通枢纽及工业设施的维护和专项评价提供更完整的几何依据。

2. 施工质量与资源利用效益

虚拟预拼装可提前检查接口错位、安装干涉和合龙条件，温度及支承状态分析有助于合理安排安装窗口和调整量。现场复测与模型更新结合，预期可减少重复测量和部分返工，并改善高空或难接近部位的检查组织。具体效果取决于结构复杂程度、现场覆盖条件和数据处理能力，不能将潜在收益直接表述为已实现的节约率。

3. 产业协同与成果转化作用

统一质量指标、对象编号、交换格式和交付层级，有利于检测单位、设计单位、施工单位及软件开发单位建立一致的数据接口，促进算法从研究结果转化为可复核的工程服务。开放的方法选用机制也有利于不同设备和软件参与应用，降低重复建模和数据格式转换造成的协作成本。

六、国际国外标准参考情况与水平对比

本项目按自主编制、参考相关国际标准技术思想的方式组织。国际标准中主要参考 ISO 17123-9:2018 及 ISO 19650-1、ISO 19650-2:2018 等。ISO 17123-9 涉及地面激光扫描仪及附件的现场精密度和重复性检验，可为仪器适用性核查提供参考。本规程在“第 4 章 点云采集与预处理”中，关于三维激光扫描仪器的标定、精度评定和现场系统误差控制，参考该国际标准的相关规定。ISO 19650 系列相关部分提供 BIM 信息管理、协同和交付的基本框架。上述标准的对象和范

围与本规程的构件变形检测、实测力学建模并不相同。本规程在“第 7 章 结构变形检测”中的逆向实体建模交付格式与数字化协同层级划分上，参考该国际标准的理念。

七、在标准体系中的位置及协调性

1. 标准体系定位

本规程定位为空间结构三维点云检测、建模与评价的专项技术文件，在测量、结构检测、设计验算、施工验收与数字化交付之间建立技术衔接。其作用是明确如何获取和评价实测几何信息、如何将其用于相应工程任务，承载能力、稳定性及可靠性等要求仍按适用的国家和行业标准执行。

2. 与法律政策及强制性要求的协调

《中华人民共和国标准化法》规定团体标准由成员约定采用或供社会自愿采用，技术要求不得低于强制性国家标准相关要求。编制和实施应遵循该法及《团体标准管理规定》，保持技术开放、公平和可验证，不设置缺少依据的品牌、设备或算法限制。

工程应用应与《工程测量通用规范》GB 55018、《工程结构通用规范》GB 55001、《钢结构通用规范》GB 55006 及《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002 等适用强制性规范协调；用于既有建筑鉴定、维护或改造时，还应核对相应通用规范。涉及冲突时执行强制性要求，不能以本规程的质量评分、初筛阈值或预警值替代。

3. 与相关技术标准的衔接

测量控制与变形观测衔接工程测量及建筑变形测量标准；检测方案、复核和报告衔接《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344 及《钢结构现场检测技术标准》GB/T 50621；安装偏差与验收衔接 GB 50205；结构分析衔接 GB 50017、JGJ 7 及索结构适用标准。数字模型用于工程判定时，应同时满足相应专业要求，不能以数据格式合格代替技术内容合格。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

本规程编制过程中，编制组在分工撰写的基础上，通过多次集中讨论，重点围绕规程的整体技术路线、章节体系、前后逻辑及内容关联等整体性问题进行梳理和协调。讨论内容主要包括：规程适用范围与各章技术内容是否一致，数据采集、点云处理、变形检测、模型生成与修正及评价分析之间的关系是否清晰，各环节的输入条件与输出成果是否相互衔接，以及术语定义、指标表述和技术要求是否前后一致。针对上述问题，编制组以实际工程应用流程为主，结合各章内容在整体技术体系中的作用，对章节顺序、内容归属及条文之间的引用关系进行统筹调整，合并重复规定、补充必要的衔接要求、明确各环节的任务与边界。对于不同章节之间存在理解差异或表述不一致的内容，通过共同审阅和集中讨论，结合前期研究基础和工程应用需求进行完善，使规程形成层次清晰、逻辑连贯、相互衔接的技术体系。

九、标准性质的建议说明

建议本规程作为自愿采用的中国钢结构协会团体标准发布，采用后按合同、设计文件和专项方案落实相应要求。“应”、“宜”、“可”等用语表示技术要求严格程度，不改变其团体标准属性。

十、贯彻标准的要求和措施建议

对于组织方面，建议协会和编制组面向检测、设计、施工和运维岗位开展宣传，说明适用范围、质量评价及异常复核要求。选取不同结构的试点工程，建立典型点云、基准模型和报告示例，帮助使用单位掌握各指标的应用条件。

对于技术方面，实施单位应将精度等级、独立检查点、补测条件、算法验证、模型校核和报告复核等内容纳入作业流程。同时应保存关键参数和人工修改记录，重要问题和异常数据应落实复测，对涉及承载能力、灾害损伤或重大施工措施的任务应组织相应专业人员共同核查。

十一 废止现行相关标准的建议

本项目为新制定标准，主要补充空间结构点云方法的应用要求，不替代现有测量、检测、设计及施工验收标准，建议不废止现行相关标准。

十二其他应予说明的事项

无。

（全文完）