

T

ICS 29.240.20

CCS K 47

团体标准

T/CWDPA XXX—2026

桥梁钢结构数字化拼装与焊接智能管 控规程

Specification for digital assembly and intelligent welding control of bridge
steel structure

(征求意见稿)

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国西部开发促进会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总体要求 2

5 数字化勘测与数据采集 3

6 基于 BIM 与点云融合的数字化拼装 4

7 现场实体拼装数字化管控 6

8 焊接智能管控 7

9 多源数据融合与质量溯源 9

10 成果与资料归档 10

附录 A（规范性） 三维激光扫描作业流程 13

附录 B（资料性） 数字化拼装偏差记录表 14

附录 C（资料性） 数字化拼装报告模板 15

前言

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

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中交一公局第五工程有限公司提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次发布。

桥梁钢结构数字化拼装与焊接智能管控规程

1 范围

本文件规定了桥梁钢结构施工现场数字化拼装与焊接智能管控的总体管控要求、数字化勘测与数据采集、BIM与点云融合数字化拼装、现场实体拼装数字化管控、焊接智能管控系统、焊接工艺智能分析与预警、多源数据融合与质量溯源及成果与资料归档的技术要求。

本文件适用于公路桥梁钢箱梁、钢桁梁、钢管拱等钢结构现场数字化拼装与焊接智能管控。

2 规范性引用文件

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

GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求

GB 50661 钢结构焊接规范

GB/T 51212 建筑信息模型应用统一标准

JTG/T 3651 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

数字化虚拟拼装 digital virtual assembly

利用三维激光扫描、建筑信息模型等技术获取钢结构节段的实测几何信息，在数字空间中进行虚拟匹配和拼装模拟，以替代或辅助传统实体预拼装的技术方法。

3.2

三维点云 three-dimensional point cloud

通过三维激光扫描获取的、以三维坐标形式表示的物体表面海量点集数据，用于表征钢结构节段的实际几何形态。

3.3

点云- BIM 配准 point cloud to BIM registration

将三维激光扫描获取的点云数据与设计BIM模型进行坐标对齐和几何匹配的过程，用于比对实测构件与设计模型的偏差。

3.4

拼装偏差 assembly deviation

钢结构节段在数字化虚拟拼装或现场实体拼装过程中，实测几何信息与设计理论值之间的差异值。

3.5

焊接智能采集终端 intelligent welding data acquisition terminal

安装在焊接设备上的数据采集装置，用于实时采集焊接电流、电压、焊接速度、热输入等工艺参数，并通过网络上传至管控平台。

3.6

焊接工艺预警 welding process warning

当焊接实时参数偏离预设工艺窗口时，系统自动发出的警示信号，用于提示现场操作人员及时调整。

3.7

点云配准 point cloud registration

将不同扫描站点获取的多站点云数据通过坐标变换拼接至统一坐标系的过程，用于形成完整的节段点云模型。

3.8

智能管控平台 intelligent management and control platform

集成数据采集、存储、分析、预警和展示功能的软件系统，用于数字化拼装与焊接智能管控的统一管理。

3.9

拼装顺序 assembly sequence

钢结构节段在现场拼装过程中各节段就位的先后次序，由数字化虚拟拼装确定。

3.10

归一化偏差 normalized deviation

将不同量纲的拼装偏差值转换为统一度量尺度的无量纲数值，用于多类型偏差的综合比较和分级判定。

3.11

质量溯源 quality traceability

通过多源数据关联，从质量问题结果反向追溯其产生原因和影响要素的过程。

4 总体要求

4.1 管控方案编制

4.1.1 桥梁钢结构数字化拼装与焊接智能管控实施前应编制专项管控方案。方案应与施工组织设计同步编制、同步审批、同步实施。

4.1.2 专项管控方案应包含下列内容：

- a) 工程概况与钢结构特点；
- b) 数字化拼装技术路线与精度目标；
- c) 三维激光扫描方案与测点布设；
- d) BIM 模型处理与虚拟拼装流程；
- e) 现场实体拼装数字化管控措施；
- f) 焊接智能管控系统部署方案；
- g) 焊接工艺参数采集与预警阈值；
- h) 多源数据融合分析与质量溯源方案；
- i) 成果资料归档与数字化交付要求。

4.1.3 专项管控方案应经监理单位审批后实施，方案变更应重新履行审批手续。

4.2 人员与设备

4.2.1 从事数字化拼装与焊接智能管控的人员应具备下列资格：

- a) 三维激光扫描操作人员应经过专项培训并考核合格；
- b) BIM 建模与点云处理人员应具备相应的 BIM 应用能力；
- c) 焊接智能管控系统运维人员应经过系统操作培训。

4.2.2 数字化拼装与焊接智能管控应配备下列设备：

- a) 三维激光扫描仪，精度应满足拼装精度要求；
- b) BIM 建模与点云处理软件平台；
- c) 焊接智能采集终端及配套传感器；
- d) 数据传输与存储系统；
- e) 智能管控平台及分析预警系统。

4.2.3 三维激光扫描仪应定期进行校准，校准周期不超过 12 个月。校准记录应完整保存。

4.3 环境条件

4.3.1 三维激光扫描应在下列环境条件下进行：

- a) 环境光照条件满足扫描设备正常工作要求；
- b) 被扫描构件表面清洁，无大面积遮挡物；
- c) 扫描站点稳固，无振动干扰。

4.3.2 焊接智能管控系统的数据采集应在焊接作业正常进行的环境条件下持续运行。

4.4 数据安全

4.4.1 数字化拼装与焊接智能管控过程中产生的全部数据应实施统一管理，确保数据的完整性、真实性和可追溯性。

4.4.2 数据传输过程应采取加密措施，防止数据被篡改或泄露。

4.4.3 数据存储系统应具备访问权限控制和操作日志记录功能。

4.4.4 数据管理系统的网络安全应符合 GB/T 22239 的规定。

4.5 质量闭环管理

4.5.1 数字化拼装与焊接智能管控应遵循 PDCA 循环的质量闭环管理原则，即计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）和处理（Act）四个阶段：

- a) 计划阶段：编制专项管控方案，明确管控目标、技术路线和质量标准；
- b) 执行阶段：按照方案实施数字化勘测、虚拟拼装、现场拼装和焊接作业，采集过程数据；
- c) 检查阶段：对拼装偏差和焊接参数进行实时监测和偏差分析，识别质量异常；
- d) 处理阶段：对质量异常进行原因分析、整改处置和效果验证，并将改进措施纳入后续管控方案。

4.5.2 质量闭环管理应以数据为驱动，各阶段的决策和行动应基于监测数据和偏差分析结果进行合理决策。

4.5.3 质量闭环管理的每个阶段应形成可追溯的记录，记录应包括阶段目标、执行情况、检查结果和处置措施。

4.5.4 质量闭环管理应贯穿钢结构施工的全过程，从节段进场到焊缝验收的各环节均应纳入质量闭环管理。

5 数字化勘测与数据采集

5.1 一般要求

5.1.1 钢结构节段进场后应进行三维激光扫描，获取节段实际几何信息。扫描应在节段存放平稳、无外部荷载作用的状态下进行。

5.1.2 三维激光扫描的精度应满足数字化拼装的精度要求。

5.1.3 扫描点云密度应根据拼装精度要求确定。

5.1.4 三维激光扫描作业流程按照附录 A 执行。

5.2 测点布设

5.2.1 三维激光扫描的测点布设应符合下列规定：

- a) 测点应覆盖钢结构节段的全部关键几何特征，包括端面、节点板、连接耳板、加劲肋等部位；
- b) 扫描站点应均匀分布，相邻站点扫描范围的重叠率应不低于 30%；
- c) 关键部位的扫描分辨率应不低于相应精度等级的要求；
- d) 扫描靶标的布设应满足多站点云数据自动拼接的要求。

5.2.2 测点布设方案应在扫描前编制，并经技术负责人确认。

5.3 点云数据采集

5.3.1 点云数据采集应符合下列规定：

- a) 每个扫描站点的采集时间应保证点云数据的完整性和密度要求；
- b) 采集过程中应避免扫描光线被遮挡，出现遮挡时应增加扫描站点；
- c) 扫描仪与构件表面的距离应在设备有效工作范围内；

d) 采集的点云数据应包含完整的坐标信息和反射强度信息。

5.3.2 点云数据采集完成后应在现场进行数据完整性检查，发现数据缺失或质量不满足要求的应及时补扫。

5.4 点云数据预处理

5.4.1 点云数据预处理应包括下列步骤：

- a) 多站点云数据配准与拼接；
- b) 噪声点去除与离群点过滤；
- c) 数据抽稀与精简，保持关键特征的完整性；
- d) 坐标转换与统一。

5.4.2 预处理完成后应对点云数据质量进行检验，检验项目应包括配准精度、点云密度和覆盖完整性。配准误差应控制在拼装精度要求的允许范围内。

5.5 构件实测信息提取

5.5.1 从处理后的点云数据中应提取下列构件实测信息：

- a) 构件外形尺寸；
- b) 端面平整度与垂直度；
- c) 连接孔群位置与孔径；
- d) 关键节点板的位置与角度；
- e) 构件间匹配接口的几何形态。

5.5.2 构件实测信息提取后应与设计值进行初步比对，标注显著偏差部位。

5.6 设备与软件配置

5.6.1 三维激光扫描仪应满足下列性能要求：

- a) 测距精度应不低于 $\pm 2\text{mm}@100\text{m}$ ；
- b) 扫描速度不宜低于 100 万点/秒；
- c) 激光等级应为 Class 1，确保人眼安全；
- d) 设备应具备自动整平和温度补偿功能。

5.6.2 点云处理软件应具备下列功能：

- a) 多站点云自动配准与拼接；
- b) 噪声点自动识别与去除；
- c) 点云数据抽稀与精简；
- d) 坐标转换与统一；
- e) 点云质量自动检验与报告生成。

5.6.3 数字化拼装平台软件应满足下列要求：

- a) 支持 BIM 模型导入、编辑和剖切查看；
- b) 支持点云数据与 BIM 模型的配准和偏差分析；
- c) 支持偏差色谱图、偏差统计表和偏差分布曲线的自动生成；
- d) 支持数字化拼装报告的自动生成和导出。

5.6.4 设备与软件应定期进行性能验证和升级维护，确保处于良好工作状态。性能验证周期不宜超过 6 个月。

6 基于 BIM 与点云融合的数字化拼装

6.1 一般要求

6.1.1 数字化虚拟拼装应以设计 BIM 模型和实测点云数据为基础。BIM 模型应能真实反映钢结构的设计几何形态和连接关系。

6.1.2 数字化虚拟拼装应在现场实体拼装前完成，并经过验证，用于指导现场节段就位和匹配精度控制。

6.2 设计 BIM 模型处理

- 6.2.1 设计 BIM 模型的建立应符合 GB/T 51212 的相关规定。
- 6.2.2 用于数字化拼装的 BIM 模型应满足下列要求：
 - a) 模型应包含钢结构全部节段的完整几何信息；
 - b) 模型应准确反映构件间的连接关系和精度要求；
 - c) 模型坐标系应与现场测量坐标系一致；
 - d) 模型应具备可剖切、可测量、可标注的功能。
- 6.2.3 BIM 模型应按拼装顺序进行拆分和编号，确保与现场节段一一对应。

6.3 虚拟装配约束设置

- 6.3.1 数字化虚拟拼装应设置下列约束条件：
 - a) 设计轴线位置约束；
 - b) 设计高程约束；
 - c) 相邻节段接口匹配约束；
 - d) 连接孔群对位约束。
- 6.3.2 约束条件的设置应符合设计文件和 JTG/T 3651 的相关规定。

6.4 偏差计算分析

- 点云数据与BIM模型配准完成后应进行偏差计算分析，分析内容应包括：
- a) 各节段外形尺寸偏差；
 - b) 节段间接口匹配偏差；
 - c) 整体线形偏差；
 - d) 关键节点位置偏差。
- 6.4.1 偏差计算结果应以偏差色谱图、偏差统计表和偏差分布曲线的形式呈现。
 - 6.4.2 偏差计算分析应在数字化拼装平台上完成，分析结果应自动生成报告。

6.5 拼装偏差分级

- 6.5.1 数字化虚拟拼装发现的偏差应按表 1 的规定进行分级。

表 1 数字化拼装偏差分级

偏差等级	偏差范围	处置措施
I 级	偏差在设计允许偏差范围内	正常拼装，记录偏差数据
II 级	偏差超出设计允许偏差，但不超过允许偏差的1.5倍	分析原因，调整拼装顺序或采取补偿措施
III级	偏差超过设计允许偏差的1.5倍	停止拼装，组织专题分析，制定整改方案

- 6.5.2 偏差分级判定应由具有中级及以上技术职称的人员负责。

6.6 偏差整改闭环流程

- 6.6.1 II级偏差的整改应符合下列规定：
 - a) 分析偏差产生的原因，包括制造误差、运输变形、存放变形等；
 - b) 制定偏差调整方案，包括拼装顺序调整、接口修整、加垫调整等；
 - c) 调整完成后重新进行数字化拼装验证。
- 6.6.2 III级偏差的整改应符合下列规定：
 - a) 暂停该节段的拼装作业；
 - b) 组织设计、制造、施工各方进行专题分析；
 - c) 制定专项整改方案并经设计单位确认；
 - d) 整改完成后重新进行全流程数字化拼装验证。

6.6.3 偏差整改的每个环节应有记录，包括整改措施、实施人员、验证结果和确认签字。

6.7 数字化拼装成果应用

6.7.1 数字化拼装成果应在下列施工环节中应用：

- a) 节段进场质量复核，验证进场节段与数字化拼装模型的一致性；
- b) 现场拼装顺序和就位方案的制定，依据数字化拼装确定的拼装顺序和理论坐标；
- c) 拼装过程中的精度控制，将数字化拼装确定的偏差调整方案作为现场就位的依据；
- d) 焊接顺序和工艺参数的优化，依据数字化拼装确定的接口匹配状态。

6.7.2 数字化拼装成果应转化为现场可执行的作业指导文件。指导文件应在施工前交底至现场作业人员，并在施工过程中作为精度控制的依据。

6.7.3 数字化拼装成果在现场应用过程中，应根据实测数据进行动态更新。

6.7.4 当现场实测数据与数字化拼装预测值的偏差超出允许范围时，应重新进行数字化拼装分析并更新指导文件。

7 现场实体拼装数字化管控

7.1 一般要求

7.1.1 现场实体拼装应以数字化虚拟拼装成果为依据，指导节段就位和精度控制。

7.1.2 现场实体拼装过程中应采用数字化手段对拼装精度进行实时监测和记录。

7.2 基于数字拼装成果指导现场就位

7.2.1 数字化虚拟拼装完成后应向现场施工人员提供下列指导文件：

- a) 节段拼装顺序图；
- b) 各节段理论就位坐标；
- c) 接口匹配精度要求；
- d) 偏差调整方案与补偿量。

7.2.2 现场节段就位时应按照数字化虚拟拼装确定的坐标进行定位，定位精度应满足设计要求。

7.3 线形监测

7.3.1 现场实体拼装过程中应对钢结构线形进行持续监测。监测点应设置在节段关键截面位置。

7.3.2 线形监测数据应与数字化虚拟拼装预测线形进行实时比对。偏差超过预警值时，系统应自动发出提示。

7.3.3 线形监测的频率应根据拼装进度确定，每个节段就位后应及时采集线形数据。

7.4 匹配精度复核

7.4.1 现场实体拼装完成后应对关键接口的匹配精度进行复核。复核应采用三维激光扫描或全站仪测量方式。

7.4.2 匹配精度复核内容应包括：

- a) 接口缝宽均匀性；
- b) 接口错边量；
- c) 接口处高程与轴线偏差；
- d) 连接孔对位精度。

7.4.3 复核结果与数字化虚拟拼装预测值的偏差应在设计允许范围内。超差的应分析原因并采取纠正措施。

7.5 数字化管控记录要求

7.5.1 现场实体拼装数字化管控应建立完整的记录体系，记录应覆盖下列内容：

- a) 每个节段的就位时间和就位坐标；
- b) 节段就位过程中的偏差监测数据及偏差调整记录；
- c) 线形监测数据及与数字化拼装预测值的比对结果；

- d) 接口匹配精度复核数据及偏差判定结果;
 - e) 偏差超限时的预警信息和处置记录。
- 7.5.2 管控记录应采用电子化方式,通过智能管控平台自动采集、自动存储,不得人工篡改。
- 7.5.3 管控记录应支持按节段编号、时间区间和偏差类型等多维度检索和导出。
- 7.5.4 管控记录应作为现场拼装质量验收的依据,纳入竣工资料归档。

8 焊接智能管控

8.1 一般要求

- 8.1.1 桥梁钢结构现场焊接应采用焊接智能管控系统,实现焊接过程参数的实时采集、传输、存储和分析。
- 8.1.2 焊接智能管控系统的建设与运行应与数字化拼装系统协同,形成统一的施工数据管理平台。

8.2 焊接采集终端部署

- 8.2.1 每台焊接设备应配置独立的焊接智能采集终端。采集终端应具备下列功能:
- a) 实时采集焊接电流、电压、焊接速度;
 - b) 实时采集焊接热输入、层间温度;
 - c) 支持无线或有线数据传输;
 - d) 具备本地数据缓存和断点续传功能。
- 8.2.2 焊接采集终端的安装应符合下列规定:
- a) 终端应固定安装在焊接设备上,不得影响正常焊接操作;
 - b) 传感器与焊接回路的连接应可靠、安全;
 - c) 终端安装完成后应进行功能测试,确认数据采集正常。

8.3 工艺参数实时采集

- 8.3.1 焊接智能管控系统应实时采集下列工艺参数:
- a) 焊接电流,采样频率应不低于 10Hz;
 - b) 焊接电压,采样频率应不低于 10Hz;
 - c) 焊接速度,采样频率应不低于 1Hz;
 - d) 热输入量,由系统自动计算;
 - e) 层间温度,采样频率应不低于 1Hz;
 - f) 焊丝送进速度,采样频率应不低于 1Hz。
- 8.3.2 采集的工艺参数应以时间序列形式完整记录,每条记录应包含时间戳和设备标识。

8.4 环境参数同步采集

- 8.4.1 焊接智能管控系统应同步采集下列环境参数:
- a) 环境温度;
 - b) 环境湿度;
 - c) 风速,室外焊接时采集。
- 8.4.2 环境参数采集频率应与焊接工艺参数采集频率保持一致。
- 8.4.3 环境参数超出焊接工艺规程允许范围时,系统应自动发出预警,提示暂停焊接作业或采取防护措施。

8.5 数据传输与存储

- 8.5.1 焊接工艺参数和环境参数应通过无线网络或有线网络实时传输至智能管控平台。数据传输延迟应不超过 5s。
- 8.5.2 数据存储应符合下列规定:
- a) 原始采集数据应完整保存,不得修改或删除;
 - b) 数据存储格式应采用通用数据格式;

c) 数据应定期备份，备份周期应不超过 7d。

8.6 工艺参数异常判别

- 8.6.1 焊接电流的异常判别应符合下列规定：
- a) 实测电流持续偏离工艺窗口上限或下限超过 5%时，应判定为异常；
 - b) 电流波动幅度超过工艺窗口范围的 30%时，应判定为异常。
- 8.6.2 焊接电压的异常判别应符合下列规定：
- a) 实测电压持续偏离工艺窗口上限或下限超过 5%时，应判定为异常；
 - b) 电压波动幅度超过工艺窗口范围的 30%时，应判定为异常。
- 8.6.3 热输入的异常判别应符合下列规定：
- a) 实测热输入超出工艺规程允许范围时，应判定为异常；
 - b) 热输入超出允许范围可能影响焊缝力学性能的，应按 GB 50661 的相关规定重新进行焊接工艺评定。
- 8.6.4 层间温度的异常判别应符合下列规定：
- a) 实测层间温度低于工艺规程要求的下限时，应判定为异常；
 - b) 实测层间温度高于工艺规程要求的上限时，应判定为异常。

8.7 超限预警

8.7.1 焊接工艺参数超限预警等级应按表 2 的规定划分。

表 2 焊接工艺超限预警等级

预警等级	预警条件	处置措施
注意级	参数接近工艺窗口限值的90%	发送提示信息，提醒操作人员关注
警戒级	参数超出工艺窗口限值，持续时间不超过30s	自动报警，通知质检人员现场确认
危险级	参数超出工艺窗口限值，持续时间超过30s，或多项参数同时超限	自动停止焊接作业，组织原因分析

8.7.2 预警信息应通过智能管控平台实时推送给现场操作人员、质检人员和施工管理人员，推送方式应包括平台消息和手机短信。

8.8 现场处置闭环管控

- 8.8.1 警戒级预警的现场处置应符合下列规定：
- a) 现场操作人员应在收到预警后立即检查焊接状态；
 - b) 质检人员应在 15min 内到达现场确认；
 - c) 确认异常原因并采取调整措施后，应记录处置过程和结果。
- 8.8.2 危险级预警的现场处置应符合下列规定：
- a) 系统自动停止焊接作业；
 - b) 组织焊接工程师、质检人员和质量管理人员进行联合分析；
 - c) 制定纠正措施并经技术负责人批准后方可恢复焊接；
 - d) 对该段焊缝应进行无损检测，确认焊缝质量合格。
- 8.8.3 所有预警处置记录应纳入质量档案，作为焊缝质量追溯的依据。

8.9 焊接质量数字化评定

- 8.9.1 焊接质量数字化评定应基于焊接智能管控系统采集的工艺参数数据、预警记录和无损检测结果，对焊缝质量进行综合评定。
- 8.9.2 焊接质量数字化评定的内容应包括：
- a) 焊接工艺参数符合率，即符合工艺窗口要求的参数记录占全部记录的比例；
 - b) 预警发生频率和预警处置及时率；
 - c) 焊缝无损检测结果及与焊接参数的关联分析结论；

- d) 焊缝质量的综合评定等级。
- 8.9.3 焊接质量数字化评定的结果应按下列规定应用：
 - a) 作为焊缝质量验收的依据之一；
 - b) 作为焊工技能评定的参考依据；
 - c) 作为焊接工艺参数优化的输入数据。
- 8.9.4 焊接质量数字化评定报告应每月编制一次，提交施工管理单位和监理单位备案。

9 多源数据融合与质量溯源

9.1 一般要求

- 9.1.1 数字化拼装偏差数据、焊接过程数据和焊缝无损检测数据应进行关联融合，形成完整的质量数据链。
- 9.1.2 多源数据融合应在统一的施工数据管理平台上完成，实现数据的互查互用。
- 9.1.3 数据融合应覆盖钢结构施工的全部关键工序，包括节段进场复测、数字化拼装、现场就位、焊接施工及焊缝检测等环节。

9.2 数据融合层次

- 9.2.1 多源数据融合应按数据级融合、特征级融合和决策级融合三个层次实施：
 - a) 数据级融合：对原始采集数据进行坐标统一、时间同步和格式转换，形成标准化数据集；
 - b) 特征级融合：从标准化数据集中提取拼装偏差特征、焊接工艺特征和检测结果特征，建立特征关联；
 - c) 决策级融合：基于融合特征进行综合质量评价，形成质量问题判定和处置决策。
- 9.2.2 数据融合的实施应及时在施工数据管理平台上完成，各层次的融合结果应做到记录清晰，可追溯、可验证。

9.3 数据关联

- 9.3.1 数字化拼装偏差数据应与对应的焊缝焊接过程数据进行关联。关联标识应采用统一的构件编码和焊缝编码。
- 9.3.2 焊接过程数据应与焊缝无损检测数据进行关联。每条焊缝的焊接参数记录应与该焊缝的检测报告一一对应。
- 9.3.3 数据关联应支持从设计模型到施工过程数据到检测结果的全链条追溯。
- 9.3.4 数据关联关系应通过统一编码体系实现。构件编码、焊缝编码和检测报告编码应在施工准备阶段统一制定并纳入管控方案。

9.4 数据融合方法

- 9.4.1 拼装偏差数据与焊接过程数据的融合应符合下列规定：
 - a) 将拼装偏差数据中的接口错边量、间隙偏差与对应焊缝的焊接参数进行关联分析；
 - b) 分析拼装偏差对焊接热输入、层间温度等工艺参数的影响规律；
 - c) 建立偏差大小与焊接工艺调整量之间的对应关系。
- 9.4.2 焊接过程数据与无损检测数据的融合应符合下列规定：
 - a) 将每条焊缝的焊接工艺参数与对应焊缝的无损检测结果进行关联；
 - b) 分析焊接参数波动与焊缝缺陷类型、缺陷位置之间的关联性；
 - c) 识别导致焊缝缺陷的关键工艺参数及其临界值。
- 9.4.3 数字化拼装数据与最终成桥线形数据的融合应符合下列规定：
 - a) 将各节段数字化拼装累积偏差与成桥线形实测数据进行比对；
 - b) 分析拼装阶段偏差对成桥线形的影响程度和传递规律；
 - c) 建立累积偏差预警阈值，指导后续节段拼装调整。
- 9.4.4 融合数据应进行可视化展示，展示方式宜包括：
 - a) 施工过程质量数据的时间序列图；

- b) 拼装偏差与焊接参数关联散点图；
- c) 焊缝质量分布热力图；
- d) 质量数据综合仪表盘。

9.5 质量问题溯源分析

9.5.1 出现焊缝质量问题时，应通过多源数据关联进行溯源分析，追溯内容包括：

- a) 该焊缝的数字化拼装偏差数据；
- b) 该焊缝的焊接过程工艺参数记录；
- c) 焊接时的环境参数记录；
- d) 该焊工的资质和操作记录；
- e) 焊接设备的校准和维护记录。

9.5.2 溯源分析应形成详细的报告，报告内容应包括但不限于问题描述、数据分析过程、原因判定和整改建议。

9.6 融合数据应用

9.6.1 多源融合数据应用于下列方面：

- a) 钢结构施工质量的综合评价与分级；
- b) 焊接工艺参数的持续优化；
- c) 拼装精度的反馈控制；
- d) 施工质量的趋势分析与预测；
- e) 质量通病的统计分析与预防。

9.6.2 基于融合数据的质量综合评价应按单位工程、分部工程和单元工程分级进行。各等级质量评价结果应纳入竣工资料。

9.6.3 质量趋势分析应定期进行，分析周期宜为每完成 10 个节段拼装或每 30d 进行一次。趋势分析报告应提交施工管理单位和监理单位。

9.7 数据安全与共享

9.7.1 多源融合数据应实施分级管理。构件级数据、焊缝级数据和检测级数据应按照不同要求分别设定访问权限。

9.7.2 数据共享应在建设、施工、监理、检测单位之间按权限实现。数据共享应采用统一的数据接口和交换格式。

9.7.3 融合数据的导出应附加导出时间、导出人员和数据范围说明。导出的数据应保持原始数据的完整性和可验证性。

9.7.4 融合数据管理系统的网络安全应符合 GB/T 22239 的规定。

9.8 持续改进与知识积累

9.8.1 多源数据融合与分析结果应用于施工质量的持续改进。持续改进应包括下列方面：

- a) 拼装工艺的改进：基于偏差数据分析，优化拼装顺序和精度控制方法；
- b) 焊接工艺的改进：基于焊接参数与检测结果的关联分析，优化焊接工艺参数窗口；
- c) 质量控制流程的改进：基于预警处置记录分析，优化质量控制流程和响应机制。

9.8.2 各项目积累的多源融合数据应进行系统化整理，形成企业级质量知识库。知识库应包含：

- a) 典型拼装偏差案例及原因分析；
- b) 典型焊接缺陷案例及工艺参数关联分析；
- c) 质量管控经验总结和最佳实践。

9.8.3 知识库应在新项目中推广应用，实现经验教训的跨项目共享和传承。

10 成果与资料归档

10.1 一般要求

10.1.1 数字化拼装与焊接智能管控的全部成果与资料应按统一标准归档。归档资料应包括纸质文档和电子文档两种形式。

10.1.2 电子文档应采用通用格式，确保长期可读。

10.2 数字化拼装报告

10.2.1 数字化拼装报告应包含下列内容：

- a) 工程概况与拼装范围；
- b) 三维激光扫描方案与执行情况；
- c) 点云数据处理与质量检验结果；
- d) BIM 模型处理与虚拟拼装过程；
- e) 偏差计算结果与偏差分级；
- f) 偏差整改措施与闭环记录；
- g) 数字化拼装结论与现场拼装指导意见。

10.2.2 数字化拼装报告应附有点云数据文件、BIM 模型文件、偏差色谱图和偏差统计表。

10.3 焊接过程数据库

10.3.1 焊接过程数据库应包含下列内容：

- a) 全部焊缝的焊接工艺参数原始采集数据；
- b) 环境参数同步采集数据；
- c) 工艺参数异常分析与预警记录；
- d) 预警处置记录；
- e) 焊缝无损检测结果及与焊接参数的关联记录。

10.3.2 焊接过程数据库应采用结构化存储方式，支持按焊缝编号、时间、焊工等多维度检索。

10.4 原始点云与 BIM 比对成果

10.4.1 原始点云数据应完整保存，不得修改或删除。点云数据存储格式应采用通用格式。

10.4.2 BIM 与点云比对成果应包括：

- a) 配准后的融合模型文件；
- b) 偏差色谱图及偏差统计数据；
- c) 关键部位的偏差剖面图；
- d) 偏差分析报告。

10.5 归档要求

10.5.1 数字化拼装与焊接智能管控资料的归档应符合下列规定：

- a) 资料应按单位工程、分部工程和单元工程分类归档；
- b) 电子文档应与纸质文档内容一致；
- c) 归档资料应编制目录，目录应包括资料名称、编制单位、编制日期和存储位置。

10.5.2 数字化拼装与焊接智能管控资料的保存期限应不少于工程竣工验收后 10 年。

10.6 数字化交付要求

10.6.1 数字化拼装与焊接智能管控成果应采用数字化方式交付，交付内容应包括：

- a) 数字化拼装报告电子版；
- b) 焊接过程数据库完整导出文件；
- c) 原始点云数据及处理后的点云数据文件；
- d) BIM 与点云配准后的融合模型文件；
- e) 偏差分析图谱和偏差统计表；
- f) 预警与处置记录汇总表。

10.6.2 数字化交付文件格式应符合下列要求：

- a) 文本类文件应采用 PDF 格式；
- b) 点云数据应采用通用格式；

- c) 模型文件应采用 BIM 软件通用格式；
 - d) 数据库应采用结构化数据格式。
- 10.6.3 数字化交付应附带数据说明文件，说明文件应包括文件清单、数据结构说明、参数定义和读取方法。
- 10.6.4 数字化交付应在工程竣工验收前完成，交付的成果资料应通过建设单位和监理单位的验收确认。

附 录 A
(规范性)
三维激光扫描作业流程

A.1 作业准备

- A.1.1 扫描前收集钢结构节段的设计图纸、BIM模型和制造资料。
- A.1.2 扫描前对三维激光扫描仪进行检查，确认设备状态正常。
- A.1.3 扫描前对被扫描节段表面进行清理，去除灰尘、油污和松散涂层。

A.2 靶标布设

- A.2.1 靶标布设在节段的稳定部位，不应布设在变形或振动部位。
- A.2.2 靶标的布设应覆盖整个扫描区域，相邻靶标之间的距离不宜大于10m。
- A.2.3 靶标的编号应与扫描站点对应，靶标编号应在扫描日志中记录。

A.3 扫描作业

- A.3.1 扫描作业应按照测点布设方案进行，扫描参数应根据现场条件设定。
- A.3.2 每个扫描站点的扫描时间应保证点云数据的完整性和密度要求。
- A.3.3 扫描过程中应实时监控数据质量，发现异常应及时处理。

A.4 数据检查

- A.4.1 扫描完成后应在现场进行数据完整性检查。
- A.4.2 数据检查应包括点云密度、覆盖范围和配准精度。
- A.4.3 数据检查不合格的应及时补扫。

附 录 B
(资料性)
数字化拼装偏差记录表

数字化拼装偏差记录表格式参见表B. 1。

表 B. 1 数字化拼装偏差记录表

序号	偏差项目	设计值 (mm)	实测值 (mm)	偏差 (mm)	判定
1	节段外形尺寸				
2	端面平整度/垂直度				
3	接口错边量/缝宽				
4	孔群位置				
5	整体线形				
1	节段外形尺寸				

数字化拼装偏差记录还需包括项目名称、节段编号、日期、记录人、偏差原因等必要内容。

附 录 C
(资料性)
数字化拼装报告模板

C.1 报告封面

报告封面可包含下列内容：

- a) 项目名称；
- b) 报告名称：“数字化拼装报告”；
- c) 编制单位名称；
- d) 编制日期；
- e) 版本号。

C.2 报告目录

报告需编制目录，目录应包括各章节标题及对应页码。

C.3 报告正文

C.4 工程概况

概况中清晰描述工程名称和地点、钢结构类型和规模、拼装范围和节段数量、设计单位和施工单位等基本信息。

C.5 扫描方案

包含下列内容：

- a) 扫描设备型号和技术参数；
- b) 扫描站点布置；
- c) 扫描参数设置；
- d) 靶标布设方案。

C.6 数据处理

包含下列内容：

- a) 点云预处理过程；
- b) 点云质量检验结果；
- c) 构件实测信息提取结果。

C.7 数字化拼装

包含下列内容：

- a) BIM 模型处理过程；
- b) 虚拟装配约束设置；
- c) 偏差计算结果；
- d) 偏差分级判定。

C.8 偏差整改

该部分给出偏差原因分析、整改措施、整改后复测结果等内容。

C.9 结论

该部分中给出数字化拼装结论、现场拼装指导意见、质量管控建议等。

C.10 报告附件

报告中需包含下列附件：

- a) 点云数据文件清单；
 - b) BIM 模型文件清单；
 - c) 偏差色谱图；
 - d) 偏差统计表；
 - e) 数字化拼装偏差记录表（格式参见附录 B）。
-