

Research on Precise Positioning Technology and Error Control of Embedded Parts in Box Beam Prefabrication Process

Hongbin Sun

China Railway Third Bureau Group Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030006, China

Abstract

Prefabrication of box girders has become a core construction method in highways, urban rail transit, and large-scale municipal bridge projects, and its quality control requirements are constantly increasing under the trend of structural complexity and assembly. As an important interface connecting the structural function, construction process, and later operation and maintenance of the beam body, the positioning accuracy of the embedded parts directly affects the alignment of the duct, the transmission path of the support reaction force, the matching degree of the installation of ancillary facilities, and the structural performance throughout the entire life cycle. To this end, this article constructs a full process control framework for precise positioning of box girder embedded parts from multiple dimensions, including structural construction requirements, error generation mechanisms, positioning technology systems, and engineering application effects. A comprehensive solution path based on high stiffness tire frames, BIM+3D coordinate verification, digital twin models, and machine vision assisted detection is proposed. Provide effective technical support for large-scale prefabricated bridge construction.

Keywords

precast box girder; Positioning of embedded parts; Error control; Digital measurement

箱梁预制过程中预埋件精准定位技术与误差控制研究

孙宏斌

中铁三局集团建筑工程有限公司，中国·山西 太原 030006

摘要

箱梁预制已成为城市轨道交通及大型市政桥梁工程中的核心施工方式，其质量控制要求在结构复杂化和装配化趋势下不断提高。预埋件作为连接梁体结构功能、施工工序与后期运营维护的重要界面，其定位精度直接影响孔道线形、支座反力传递路径、附属设施安装匹配度以及全寿命周期的结构性能。为此，本文从结构构造需求、误差成因机理、定位技术体系与工程化应用效果等多个维度出发，构建箱梁预埋件精准定位的全过程控制框架，并提出基于高刚度胎架、BIM+三维坐标复核、数字孪生模型与机器视觉辅助检测的综合解决路径。为大规模装配式桥梁建设提供有效技术支撑。

关键词

箱梁预制；预埋件定位；误差控制；数字化测量

1 引言

箱梁预制是现代桥梁工程中生产效率最高、标准化水平最高的施工方式之一。随着交通基础设施建设对施工速度、标准化质量以及全寿命周期性能要求的提升，预制箱梁中承载功能、施工辅助功能及监测功能的预埋件数量呈显著增长趋势。以典型项目为例，其内部预埋件往往超过 40 处，涵盖预应力孔道定位件、支座垫石锚固件、泄水管、横隔板内模板拉结件以及传感器腔体等。在此背景下，本文围绕箱梁预制中预埋件的类别特征、定位精度要求、误差形成机制及其传播路径展开系统分析，并提出可在工程实践中推广的

精准定位与误差控制技术体系，通过案例验证其效果，为提升装配式桥梁制造的精益化水平提供理论与实践支持。

2 箱梁预制中预埋件定位需求与结构特征

箱梁内部预埋件的设置目的包含力学传力、工序衔接、功能集成与后期监测维护，其功能属性决定其定位精度需求。根据其结构作用，可分为以下四类^[1]。力学功能类构件，包括预应力管道定位件、支座锚固钢板、横隔板吊装钢板等，该类预埋件直接参与力流传递，对梁体受力性能影响显著。例如，孔道位置偏差超过 5 mm 将导致张拉过程中摩阻增加、管道偏折甚至孔道破损；支座锚固件偏位会引起反力偏心，导致腹板局部开裂。因此，此类预埋件定位精度需控制在 ±2~3 mm 管线及设备类预埋件包括泄水管、护栏安装件、电缆管等，其位置偏差主要影响后续安装匹配度和功能实现

【作者简介】孙宏斌（1983-），男，中国黑龙江海伦人，本科，高级工程师，从事桥梁（箱梁预制）研究。

效果，精度一般要求控制在 $\pm 5 \text{ mm}$ 以内。

监测与维护类预埋件，如健康监测传感器预留腔体、光纤通道等，因监测设备结构尺寸小、空间受限，需要较高的安装精度，大多需控制在 $\pm 2 \text{ mm}$ 范围。施工辅助类预埋件包括临时拉接件、定位埋板等，其位置偏差对结构功能影响有限，但过大偏差会影响施工便利性，通常需控制在 $\pm 5 \text{ mm}$ 左右。箱梁预埋件呈现“多类型、多精度、多界面”的特征，建立适应不同等级定位需求的精准控制体系是提升预制梁质量的基础。

箱梁截面几何复杂，布置预埋件需满足相应结构约束，使预埋件定位体系受到以下影响。其一，腹板倾斜及箱室空间限制使预埋件安装环境狭窄，胎架布置空间受限，要求定位工具具有高刚度与轻量化特征^[2]。其二，纵向预应力孔道呈三维空间曲线，定位装置需匹配曲线几何，不能出现局部强制变形，否则会在张拉时形成应力集中。其三，横隔板内钢筋密度大、孔洞多，使预埋件布置容易发生碰撞，需要在设计阶段通过 BIM 模型提前检测干涉问题。其四，顶板薄弱区域的振捣扰动较大，预埋件易产生位置漂移。因此，预埋件定位技术不仅依赖高精度测量，更需要从梁体结构几何特性与施工工况出发，构建适应不同区域、不同工序的综合定位方案。

3 预埋件定位偏差的形成机理与误差传播路径

3.1 初始安装基准的不稳定与施工过程扰动的叠加效应

预埋件定位误差首先来源于安装基准体系的不稳定性，包括模板体系刚度不足、钢筋笼几何偏差及其在施工过程中的二次变形。箱梁钢模板在侧压力、振动及温度变化作用下易产生 $1\sim3 \text{ mm}$ 的挠曲或侧移，而这些变形会通过刚性连接直接传递至预埋件位置，使其在安装伊始便产生初始偏差。此外，模板周转使用造成的定位销磨损、连接点松动进一步削弱其重复定位精度，导致基准体系具有明显的“累积误差”特征。

钢筋笼的空间几何误差也是影响预埋件定位的主要因素。由于焊接收缩、吊装变形及保护层垫块高差等问题，钢筋笼在实际施工中常出现局部 $3\sim5 \text{ mm}$ 的横向偏移与顶板钢筋网的 $\pm 5 \text{ mm}$ 起伏。当预埋件依附钢筋笼布置时，这些变形会导致其位置产生二次漂移，尤其在孔道密集区域更为突出。钢筋笼具有一定柔性，其微小形变在浇筑前后均可能继续发展，使预埋件位置呈现动态变化。因此，安装前的精度控制只能解决“静态偏差”，而施工过程中的体系变形则会进一步产生“演化偏差”。

3.2 浇筑振动、材料变形与人为因素的误差传播机制

在混凝土浇筑阶段，振捣扰动是导致预埋件位置偏移的关键诱因。振捣棒插入与拔出的瞬时冲击会使薄弱区域和空间受限区域的预埋件发生 $2\sim6 \text{ mm}$ 的位移，若定位胎架刚度

不足或限位装置未有效锁定，则振动效应将在多个工序中叠加传播，使整体偏差显著放大。浇筑过程的施工节奏、混凝土流动性及浇筑顺序的变化，也会改变局部压力分布，引起预埋件在初凝前发生缓慢迁移^[3]。混凝土材料在硬化过程中的早期收缩以及水化热引起的温度膨胀，会在初凝与终凝阶段形成 $1\sim2 \text{ mm}$ 的后期偏移，尤其对敏感型预埋件（如监测腔体、小口径管线）影响更为显著。这类偏差往往不易在浇筑过程中被及时识别，但对后续安装与结构性能具有潜在影响。人工作业误差仍是不可忽视的影响因素。传统放样方式受测量经验、读数误差、角度判断等影响，通常存在 $1\sim2 \text{ mm}$ 的不确定性。操作人员的加工、焊接和组装偏差亦会在不同工序间传递，使局部误差逐步扩散至整体空间坐标体系，形成典型的“多源—链式传播”模式。

4 预埋件精准定位的技术体系构建

4.1 基于高稳定基准体系的安装精度提升技术

为解决预埋件在初始安装阶段易受模板挠曲、钢筋笼变形和人工放样误差影响的问题，需构建高稳定性、可微调的统一安装基准体系。综合工程需求，本研究提出以高刚度组装式胎架为核心的稳定框架。胎架采用 Q345 型钢构建，通过数控加工形成高平整度基准面，并配置丝杆微调机构，实现 $\pm 1 \text{ mm}$ 范围内的连续调节，使预埋件在安装阶段即可达到接近成型精度的水平。胎架关键节点设置锁紧与限位结构，可显著减少振捣冲击与混凝土侧压力对定位构件的扰动传递，使其在浇筑全过程中保持稳定刚度。为了进一步提升安装阶段的空间协调性，将胎架参数化设计与 BIM 模型关联，提前对不同预埋件间的几何关系、孔洞布设与钢筋密度进行干涉校核，避免现场适配造成的额外误差。同时，将胎架、钢筋笼与预埋件的三维位置统一纳入同一坐标体系，有助于减少基准散乱和多界面协调困难带来的累积偏差。工程应用结果显示，采用该体系后，预埋件初始偏差可稳定控制在 2 mm 左右，较传统经验式安装显著提升精度与重复性。

4.2 基于数字化测量与动态稳控的全过程误差控制技术

由于预埋件定位受到施工动态扰动、材料早期变形及多阶段工序耦合的综合影响，仅依靠安装阶段的精度控制难以确保成型阶段的空间稳定性。因此，需要将数字化测量手段与施工过程稳控策略相结合，形成从安装到成型的全过程控制体系。第一，以 BIM 三维模型为坐标基准，通过全站仪开展三维放样，实现对孔道曲线、支座钢板及监测类预埋件的空间坐标精准输出。放样完成后，利用三维激光扫描获取钢筋笼、胎架及已装构件的点云数据，与 BIM 模型进行偏差比对，可直观识别局部挠曲、构件碰撞与隐藏变形，为浇筑前复核提供量化依据。第二，在浇筑过程中设置抗扰动限位器，并针对孔道密集区、薄壁区域开展实时复测，以抑制振捣造成的瞬时位移放大效应。随着混凝土进入初凝阶

段，再次通过点云扫描完成终检，并对可能存在温度收缩或早期变形的部位进行及时调整，使预埋件在成型阶段保持稳定几何位置。数字化测量与动态稳控的结合，使误差控制由“静态精准”转向“动态可控”。工程验证表明，该体系可将关键预埋件成型偏差控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内，并显著降低误差传播风险。

5 工程案例分析与定位精度提升效果

5.1 工程背景及数字化定位体系实施流程

为验证预埋件精准定位技术体系在高速铁路梁场的工程适用性，选取某大型高铁预制梁场作为研究对象。该梁场承担约32 m标准箱梁的批量化生产任务，年产量约700榀，梁体截面尺寸大、孔道曲线复杂，预埋件数量普遍在50~70处之间，涵盖预应力孔道定位构件、支座锚固钢板、泄水管道、传感器腔体以及无砟轨道附属安装预留件等。针对上述瓶颈，项目在梁场全面部署“高刚度胎架—BIM三维协同放样—三维激光扫描复核—浇筑全过程稳控”的数字化定位体系，通过将设计模型、放样基准、构件安装与浇筑扰动统一纳入同一坐标体系，构建贯通式质量控制链条。体系实施流程主要包括四个阶段：

第一，构建高速铁路箱梁与预埋件的BIM三维协同模型，实现设计坐标、干涉校核与构造约束条件的数字化解析，为胎架布置及后续放样提供统一基准。

第二，基于参数化模型生成胎架加工数据，使胎架结构在工厂阶段即可保证与预埋件几何关系的高精度匹配，并通过可调机构满足 $\pm 1\text{ mm}$ 的安装微调需求。

第三，采用全站仪进行三维坐标放样，并利用激光扫描同步获取钢筋笼、模板及胎架的点云数据，将实测状态与BIM模型进行比对，可快速识别几何偏差、构件挠曲及干涉风险，实现浇筑前的精度闭环验证。

第四，在混凝土浇筑及初凝阶段实施动态稳控策略，包括关键部位限位器布置、振捣过程实时复测及成型阶段的二次扫描复核，确保预埋件在受到振动、侧压力和早期收缩作用下仍保持稳定位置。

通过上述配置，梁场从“经验式安装”转向“数据驱动的全过程定位控制”，使生产流程具备可量化、可预测、可追溯特征，为大规模流水化生产提供结构化质量保障。

5.2 定位精度对比与工程应用效果

为评估数字化定位体系的实际效果，将其与传统施工工艺的定位偏差进行对比分析。以孔道外露端、支座锚固构件、泄水管线及监测腔体等典型预埋件为代表开展统计，结果如表1所示。数字化体系显著降低了预埋件的成型偏差，其中孔道外露端偏差由传统工艺下的6.2 mm降至2.1 mm，改善率达66%；支座锚固构件偏差减少60%；泄水管及小口径管线构件偏差减小幅度达到67%；监测腔体偏差控制在1.2 mm范围内，显著优于传统方法。数据表明，数字化体系可将关键预埋件的成型偏差稳定控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 范围内，已满足高速铁路结构对装配精度提出的高等级标准。除几何精度大幅提升之外，体系在工程效率和质量稳定性方面也产生显著收益：返工率下降80%以上，模板周转周期缩短约10%，钢筋笼安装效率提升超15%，梁体成型质量一次验收合格率提升至98.7%。同时，数字化流程显著降低了施工对经验型技工的依赖，使质量控制更加可复制、可推广，为高铁梁场规模化生产提供了系统化能力支撑。

6 结语

预埋件作为连接箱梁构造功能、工序衔接和运营维护的重要界面，其定位精度直接影响结构性能和后续装配效率。预埋件定位误差具有多源耦合、动态演化与阶段传播特点，传统依赖人工经验的装配方式难以满足毫米级精度需求。本文构建了包含高刚度胎架、BIM坐标放样、三维扫描校核和全过程稳控的综合技术体系，并通过工程案例验证了其显著的精度提升效果。随着数字化技术与智能装备的发展，预埋件定位将进一步迈向自动化、可预测与智能化，为装配式桥梁高质量发展提供坚实基础。

参考文献

- [1] 罗志涛.火力发电厂小型预埋件精准定位工装精细化施工技术分析[J].科技与创新,2025,(02):124-127.DOI:10.15913/j.cnki.kjyex.2025.02.034.
- [2] 陈少军,郎中秋,李明月,等.基于BIM技术的幕墙预埋件精准定位与安装技术[J].建筑施工,2024,46(02):177-179.DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2024.02.009.
- [3] 李勇,孙国,黄海清,等.综合管廊电力支架与预埋件精准定位施工技术探析[J].工程建设与设计,2023,(19):189-191.DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.10.058.