

卡轨式平移技术在上海宝山路地铁轨道站桥梁改造中的应用研究

王 健

中铁二十四局集团有限公司轨道交通分公司，上海

收稿日期：2026年5月29日；录用日期：2026年7月7日；发布日期：2026年7月15日

摘 要

上海市轨道交通3/4号线宝山路站接轨改造工程东接驳区涉及3#、L2、J8、J9、J10共五座桥梁的整体平移与精确安装，施工环境复杂，既有运营线路安全保障要求极高。本文以该工程为依托，系统阐述了卡轨式液压同步平移技术的原理、工艺流程、精度控制体系及安全保障措施，重点介绍了PLC液压同步控制系统、移梁基础设计、卡轨平移装置的工程化应用，并对施工过程中的关键质量控制进行了深入分析。工程实践表明，该技术切实可行，桥梁平移定位精度达到毫米级控制要求，为同类复杂环境下的桥梁改造工程提供了重要参考与技术支持。

关键词

卡轨式平移，PLC液压同步系统，桥梁改造，精度控制，既有线施工

Application of Rail-Clamping Sliding Technology in Baoshan Road Rail Transit Bridge Renovation

Jian Wang

Rail Transit Branch, China Railway 24th Bureau Group Co., Ltd., Shanghai

Received: May 29, 2026; accepted: July 7, 2026; published: July 15, 2026

Abstract

The eastern transfer zone of Shanghai Rail Transit Line 3/4 Baoshan Road Station junction reconstruction project involves the integral lateral sliding and precise installation of five bridge girders

(3#, L2, J8, J9, J10). The construction environment is complex with extremely high safety requirements for existing operating lines. This paper systematically describes the principle, process flow, precision control system and safety measures of the rail-clamping hydraulic synchronous sliding technology based on this project. The engineering application of PLC hydraulic synchronous control system, beam sliding foundation design, and rail-clamping sliding device are highlighted, with in-depth analysis of key control points during construction. Engineering practice shows that this technical solution is feasible, achieving millimeter-level positioning accuracy for bridge sliding, providing important reference and technical support for similar bridge renovation projects in complex environments.

Keywords

Rail-Clamping Sliding, PLC Hydraulic Synchronous System, Bridge Renovation, Precision Control, Construction Adjacent to Existing Rail Line

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着城市更新发展需要, 受限于既有建筑或结构物的功能需要改造进行的顶升和平移工程越来越多。我国已成功实施了千余项平移工程, 实践证明, 其成本仅为拆除重建的 1/4~1/3, 且可大量减少建筑垃圾并对既有建筑尤其是历史建筑进行保护。比较典型的建筑工程案如 2003 年实施的上海音乐厅移位工程、2018 年实施的厦门后溪长途汽车站、2025 年上海张园石库门建筑群整体移位等。典型的桥梁工程如 2019 年上海北横通道天目路跨双铁桥步履式顶推施工、2021 年实施的宁波鄞州大道 - 福庆路跨线桥横向平移加竖向顶升施工[1]-[3]等。

传统平移技术主要以滚轴滑移或牵引顶推, 依赖机械轨道与千斤顶组合[4]。进入 21 世纪以后, 随着 PLC 液压同步控制技术的发展和应用实践, 顶升和平移吨位及面积不断增加, 同时精度达毫米级, 标志控制技术自动化升级。近十年来, 交替步履式顶推技术的应用, 增加了施工效率和提升了施工安全, 其核心为分散式自平衡反力系统与 PLC 协同控制, 精度达 ± 2 mm, 工效提升 30%。

卡轨式平移技术作为大型构筑物整体平移的新方法, 通过特制卡轨装置实现待移结构与轨道的刚性连接, 依托液压推进系统完成受控平移。相较传统滑移法、顶推法, 其在同步精度与稳定性方面优势显著。其原理包括: 通过刚性连接克服传统滑移的摩擦不确定性, 为高精度同步控制提供保障。特制卡轨装置可消除滑移板与轨道的相对位移, 从源头降低姿态失控风险和提升施工精度。结合分布式液压推进与实时传感网络, 可突破多机组同步瓶颈, 弥补现有技术动态响应不足。对于特殊场地限制, 尤其是桥梁等狭长结构, 可解决传统顶推法因反力点设置导致的崩顶隐患。

2. 工程概况

上海市轨道交通 3/4 号线宝山路站接轨改造工程是上海市重大城市更新项目的重要组成部分。该工程旨在对现有轨道交通线路节点进行结构性改造, 以提升线路运营效率与安全性, 同时满足轨道交通网络扩容发展需求。东接驳区改造是整个工程的核心施工区域, 涉及 3#桥梁、L2 桥梁、J8 桥梁、J9 桥梁及 J10 桥梁共五座构筑物的改造作业。东接驳区(东 A 区)待移桥梁均为城市轨道交通高架结构, 梁体重量大、体量可观, 且各桥梁结构形式不尽相同。各桥梁具体参数如下:

3#桥梁：为连续箱梁结构，作为区域内主要承重构件，梁体自重较大，平移距离约为纵向调位距离。
L2 桥梁：位于接驳区连接段，结构形式为简支梁，需进行横向平移及纵向调位组合操作。J8、J9、J10 桥梁：为同批次分区段板梁，三者协同平移，施工时序相互关联，需统筹安排。

各桥梁平移施工需在确保既有运营轨道交通线路安全运营的前提下进行，天窗施工时间极为有限，对施工效率和精度提出了双重挑战。

工程区域地处上海冲积平原，地层以饱和软黏土、淤泥质黏土为主，工程地质条件较差。上部覆盖层厚度约 15~20 m，浅层地基承载力特征值约为 80~120 kPa，难以直接满足重型施工设备及移梁作业对基础的承载要求。地下水位埋深浅，一般距地面约 0.5~1.0 m，施工过程中地下水影响不可忽视。针对上述地质条件，工程采用注浆加固与临时钢板铺设相结合的方式地进行地基处理，确保移梁基础的稳定性。本工程重点难点主要集中在以下几个方面：

(1) 毗邻既有运营线路施工：东接驳区紧邻轨道交通 3/4 号线现有运营区间，施工全过程须严格执行“零干扰”原则，任何施工振动、位移均不得影响既有结构安全。

(2) 施工空间狭窄：东接驳区场地受城市道路、地下管线及周边建筑物限制，可用施工空间极为有限，大型设备进场、调度及工序转换均受到严格约束。

(3) 桥梁平移精度要求高：《桥梁顶推技术标准》(DG/TJ08-2476-2025)第 7.3.11 条规律¹，根据施工过程中的不确定性影响，桥梁就位后需与既有桥台、支座系统精确对接，结合后期可通过姿态微调及支座修正，本工程平面定位误差控制在 ± 5 mm 以内，高程误差控制在 ± 3 mm 以内，对施工测量与过程控制提出了极高要求。

(4) 工期紧张，天窗时间有限：关键施工期作业时间只能利用春节期间，通过交通中断方式实施，因此在准备好所有工序号，预定 7 天完成作业即恢复交通，要求各工序高效衔接，设备调度精准到位。

3. 卡轨式平移技术原理

3.1. 技术概述

卡轨式平移技术是一种专用于大型构筑物整体平移的工程技术，其核心思想是利用特制卡轨装置将待移结构物(桥梁梁体)与平移轨道进行刚性连接，再借助液压推进系统对结构物施加推力，使其沿预设轨道实现受控平移。与传统的滑移法、顶推法相比，卡轨式平移具有以下显著优势[1][2]：

(1) 侧向约束能力强：卡轨装置对轨道形成双面夹持，有效防止梁体在平移过程中发生侧偏，平移轨迹精度更易控制；

(2) 推进力效率高：液压千斤顶通过卡轨装置对梁体施加水平推力，作用点位置准确，力的传递路径清晰，推进效率高；

(3) 适应性强：可根据梁体形状、重量及平移距离进行参数调整，适用于多种桥梁结构形式；

(4) 安全冗余度高：卡轨装置具备自锁功能，在推进装置失压或施工暂停时，梁体不会发生自行滑移，安全性显著优于无约束的滑移方案。

3.2. 卡轨装置构造原理

卡轨顶推系统适用于长距离、快速、直线段平移，不同于摩擦式平移施工，其工作原理是利用卡齿啮合机构咬合滑道齿条[4]，由连续顶推千斤顶提供推进力，实现梁体的连续步进式推进，施工工效可达 20 m/h~30 m/h。卡轨平移装置主要由以下部分组成(图 1 所示)。

移梁轨道(导轨)：采用 H 型钢或工字钢制作，铺设于精加工后的移梁基础面上，轨道中心线与桥梁

¹<https://www.shanghai.gov.cn/gwk/search/content/7b65c5411d0c44a8955f01c36d2903be>

平移方向一致。轨道面须经过精密调平，高差控制在 0.5 mm/m 以内，以保证梁体平移过程中受力均匀。

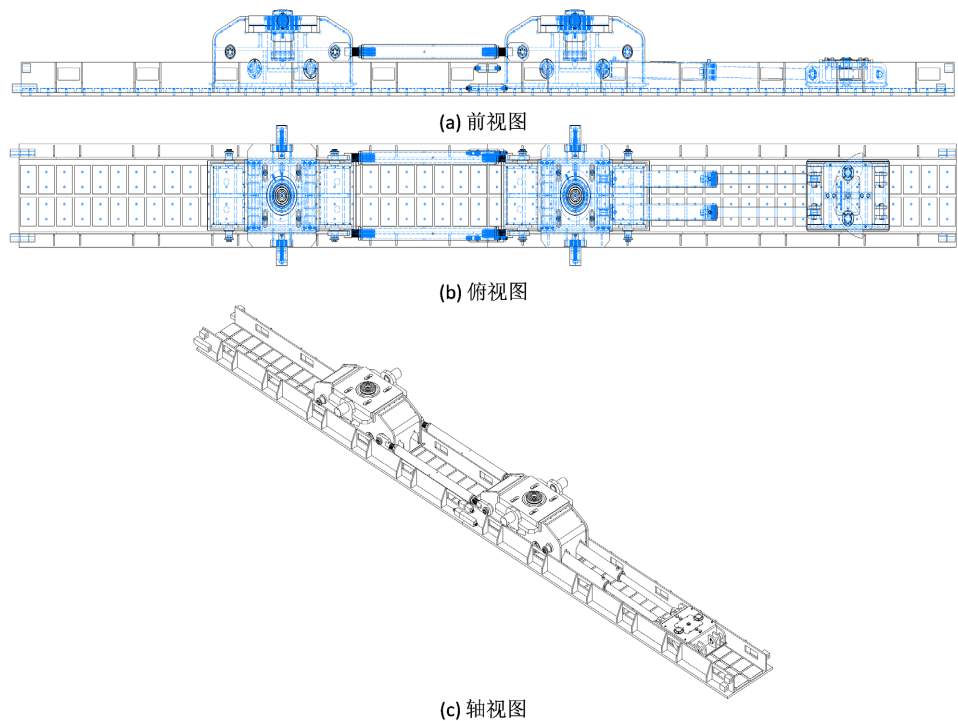


Figure 1. Diagram of the rail-clamping equipment
图 1. 顶推卡轨设备三维图

卡轨滑靴：安装于梁体底部预设牛腿或临时牛腿上，滑靴内嵌有聚四氟乙烯(PTFE)低摩擦衬板，与轨道顶面形成润滑接触；滑靴两侧卡爪伸入轨道翼缘之下，形成竖向限位，同时两侧卡板对轨道腹板形成夹持，提供横向约束。

液压推进装置：采用双作用液压油缸，通过反力座将推力施加于卡轨滑靴，单个油缸推力一般为 500~2000 kN，根据梁体重量和摩擦系数选型配置。基于光滑金属表面摩擦系数取值，并通过润滑油降低摩擦力，摩擦系数为 0.05~0.1，偏不利取值 0.1。根据顶升力和摩擦力计算，新旧梁共需要 400t 卡轨滑脚 59 套，40t 卡轨顶推器 46 台。

PLC 液压同步控制系统：通过位移传感器实时监测各推进点位移量，由 PLC 主控系统自动计算偏差并调节各油缸供压，确保多点同步推进误差在允许范围以内。

3.3. PLC 液压同步控制原理

PLC 液压同步控制系统是本工程卡轨平移技术的核心控制平台。系统主要由以下功能模块组成。

液压泵站：为各推进油缸提供液压动力源，系统额定工作压力为 31.5 MPa，配备多级安全泄压阀，防止超压损坏。

比例阀组：通过电液比例控制阀对各油缸压力和流量进行独立精确调节，实现推力与速度的闭环控制。

位移传感器系统：在每个推进点安装高精度线性位移传感器(分辨率 0.01 mm)，实时采集各点推进量，数据通过现场总线传输至 PLC 主控单元。

主控 PLC 单元(图 2 所示)：以实时监测数据为基础，按照预设的同步推进算法，计算各油缸应有的

推力和位移修正量，通过比例阀组闭环反馈调节，确保多点同步偏差不超过 $\pm 2\text{ mm}$ 。

监控与显示系统：操作人员可通过触摸屏人机界面实时查看各推进点状态、压力曲线及偏差报警信息，支持手动/自动模式切换，具备紧急停止功能。

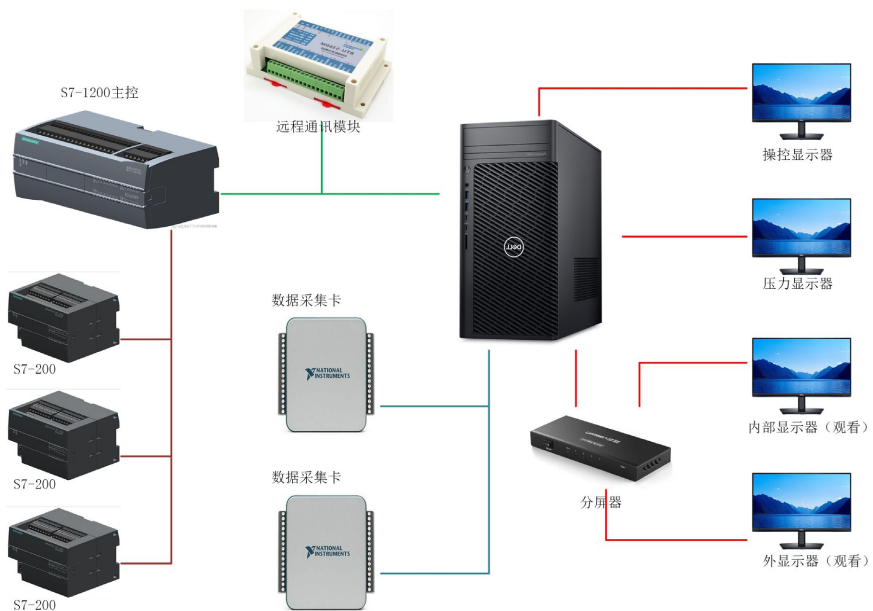


Figure 2. Diagram of PLC system
图 2. 控制系统示意图

4. 施工工艺流程介绍

4.1. 整体施工工艺流程

东接驳区桥梁平移施工总体工艺流程如下：

施工准备→伸缩缝及附属设施拆除→移梁基础施工→移梁体系安装(导轨铺设、卡轨装置安装)→施工平台搭设→PLC 液压设备安装调试→试推进(空载验证)→正式平移施工→精调就位→支座及垫石改造→精度验收→后续结构恢复。

4.2. 移梁基础施工

移梁基础是平移施工成功的关键前提。参考上海地区类似工程的处理方式，但受限于城市密集区施工环境影响，受限较多[4] [5]。考虑到场地地质条件较差，本工程采用以下方案进行基础处理：

(1) 地基注浆加固：对移梁影响范围内的地基进行袖阀管注浆处理，注浆深度不小于 3 m，注浆后地基承载力特征值提高至不低于 180 kPa。

(2) 临时基础梁设置：在导轨下方设置间距 1.0~1.5 m 的 I40 工字钢横梁作为临时基础梁，将集中荷载扩散至更大范围地基面上，基础梁两端设置调平垫块，确保顶面高差不超过 0.5 mm。

(3) 导轨铺设与调平：H 型钢导轨铺设于基础梁上，采用水准仪配合楔形调平块进行精确调平，整条导轨顶面高差控制在 $\pm 1\text{ mm}$ 以内，轨道间距偏差控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内。

4.3. 卡轨平移装置安装

卡轨装置的安装质量直接关系到平移过程的安全性与精度。结合桥梁预制场地布置，同样受限于施

工场地限制，需要仔细设计卡轨平衡线路并布置卡轨(见图 3 和图 4) [6]。主要安装步骤如下：

- (1) 梁体底部牛腿预制加工，采用 Q355B 钢材，焊接质量等级不低于二级；
- (2) 卡轨滑靴与牛腿采用高强螺栓连接，螺栓规格为 M24，预紧力矩按照设计要求执行；
- (3) PTFE 衬板安装前，对轨道顶面进行打磨处理，使表面粗糙度 $Ra \leq 6.3 \mu m$ ，然后涂抹专用润滑脂，降低平移阻力；
- (4) 液压推进油缸安装于反力座上，油缸轴线与梁体平移方向偏差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内；
- (5) 所有管路连接完成后进行系统压力试验，试验压力为工作压力的 1.5 倍，保压时间不少于 30 min，无泄漏为合格。

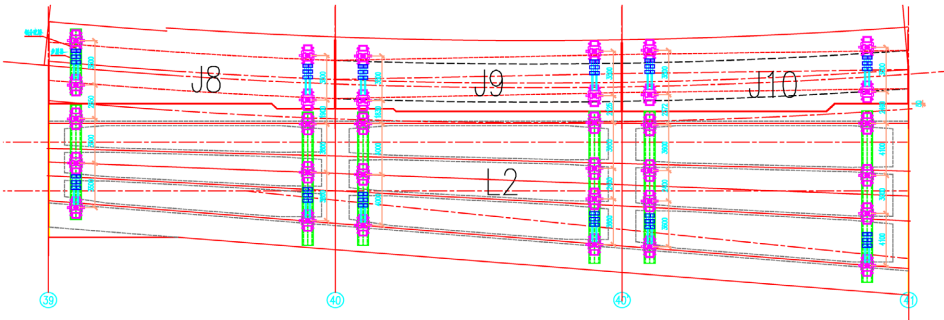


Figure 3. Layout of the new beam L2 and J8-J10 rail clamping equipment
图 3. 新建梁 L2 和 J8-J10 卡轨设备平面布置图

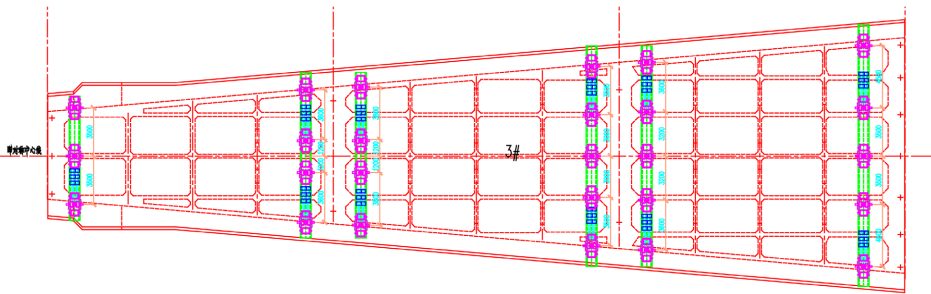


Figure 4. Layout of the rail clamping equipment for the exiting beam No. 3
图 4. 旧梁 3#梁卡轨设备平面布置图

4.4. 卡轨式顶推系统

本工程卡轨设备主要技术参数：顶升力 400 t，顶升行程 140 mm；摩擦系数取 0.1，相应顶推力 40 t，顶推行程 900 mm。各梁卡轨设备配置计算如表 1 所示。

Table 1. Configuration of rail clamping equipment for each beam
表 1. 各梁体卡轨设备配置

序号	梁号	顶升重量(t)	所需顶推力(t)	卡轨设备(台)
1	3#旧梁	2529t	252.9t	26
2	L2 新梁	2109t	210.9t	21
3	J8 新梁	331.4t	33.14t	4
4	J9 新梁	331.4t	33.14t	4
5	J10 新梁	331.4t	33.14t	4

4.5. 移梁施工过程

正式平移施工分为以下阶段推进。

阶段一：初始顶升与脱支承在正式推移前，首先利用液压顶升系统将梁体顶升约 5~10 mm，使梁体与原支承脱离，让梁体荷载完全转移至卡轨滑靴上，确认梁体状态稳定后，方可开始水平推进。

阶段二：匀速平移推进 PLC 系统按照预设速度(一般为 0.5~2.0 m/h)驱动各油缸同步推进，系统实时监控各点位移，自动修正偏差。平移过程中，安排专人在梁端及中部进行目视巡视，发现异常立即停机处理。

阶段三：减速就位当桥梁距目标位置约 200 mm 时，平移速度降至 0.1 m/h 以下，进入精确就位阶段。通过高精度全站仪配合反光棱镜进行实时位移监测，每推进 20 mm 采集一次测量数据，指导操作人员进行微调。

阶段四：精调固定梁体推入目标位置后，利用顶推调位装置对平面偏差进行精调，直至各控制点坐标偏差均满足 ± 5 mm 要求，然后进行临时固定，待支座安装完成后正式落梁。

5. 精度控制

5.1. 测量控制网的建立与实施方案

为确保平移施工精度，工程建立了专用的施工测量控制网：

(1) 在施工区域外稳定区域设置 4 个一级控制点，采用全站仪按三角网形式进行观测，控制网精度优于 ± 2 mm；

(2) 在移梁基础边缘设置若干工作控制点，通过一级控制点进行传递，工作控制点平面精度优于 ± 3 mm；

(3) 在每座梁体的四个角部各布置一个监测棱镜，平移全过程实时跟踪监测，监测频率为每 5 min 一次，异常情况加密至每 1 min 一次。

对应测量控制网要求，建立的监控量测体系，主要监测项目包括：

(1) 梁体变形监测：平移全过程对梁体挠度和横向变形进行监测，变形量超过设计值的 50%时发出预警。

(2) 基础沉降监测：在移梁基础四周布置沉降观测点，每次推进前后各观测一次，沉降累计值超过 5 mm 时暂停施工并查明原因。

(3) 设备状态监测：对液压泵站油温、油压及各油缸工作状态进行连续监测，发现异常立即停机检查。

5.2. 平移精度控制措施

(1) 轨道精度控制：导轨铺设完成后，采用精密水准仪对全线轨道顶面高程进行复测，高差偏差超过 1 mm 的部位重新调整，直至满足要求。

(2) 同步误差控制：PLC 系统设置同步报警阈值为 5 mm，当任意两点推进量差值超过该阈值时，系统自动暂停并发出报警，待人工确认偏差原因并处理后方可恢复推进。

(3) 横向偏位控制：利用卡轨装置对轨道的横向夹持作用，将平移过程中的横向偏位限制在 ± 3 mm 以内，同时在轨道两侧设置导向挡块作为二重保护。

(4) 累计误差监控：每推进 500 mm 进行一次全面测量复核，及时发现并修正累计误差，防止误差叠加超出允许范围。

5.3. 就位精度验收标准

参照相关技术规范，本工程桥梁就位精度验收标准如表 2 所示。

Table 2. Positioning accuracy index of the beam
表 2. 梁体就位精度指标

检验项目	允许偏差	检验方法
梁体中心线平面偏差	±5 mm	全站仪测量
梁体顶面高程偏差	±3 mm	精密水准仪测量
梁体纵向轴线偏差	±5 mm	全站仪测量
支座中心与设计位置偏差	±5 mm	钢板尺量测

工程实际就位精度经验收检测，各项指标均满足上述控制要求，实际部分梁体中心线偏差仅为 1~2 mm，达到了预期精度目标。

6. 工程实施效果

本工程东接驳区五座桥梁的平移及安装施工历时约 30 天(含天窗等待时间)，实际推移总行程约 15 m，总体施工进度顺利，未发生任何安全事故[7]。各项施工结果如下：

(1) 平移精度：3#、L2、J8、J9、J10 各桥梁就位精度均满足设计要求，其中平面偏差最大为 3 mm，高程偏差最大为 2 mm，整体精度表现优良。

(2) 既有线路保护效果：施工过程中，既有轨道交通 3/4 号线正常运营未受任何影响，全程监测数据显示既有结构振动、沉降和位移均在安全允许范围以内。

(3) 工期控制：施工工期较计划工期提前 1 天完成，有效减少了对周边交通和居民生活的影响。

与传统的整体拆除重建方案相比，采用卡轨式平移技术具有以下显著优势。

整体平移方案相比拆除重建方案节省工期约 60 天，大幅降低了天窗施工对运营线路的干扰次数。保留利用原有梁体，减少建筑垃圾约 300 t，符合绿色施工要求。平移施工无需高空作业吊装大型梁体，施工风险相比采用架桥机架设方案显著降低。尽管卡轨平移系统一次性投入较高，但从综合工期、人工和安全管理费用考量，总体费用低于拆除重建方案约 15%~20%。

针对本工程梁底空间有限的特点，优化了卡轨滑靴的整体高度，在保证夹持力的同时将滑靴总高度控制在 150 mm 以内，拓展了该技术在净空受限工况下的适用范围。通过多机组协同控制软件模块，实现各机组间的数据实时通讯达到毫秒级响应，从而实现了不同梁体推进点之间的跨机组同步协调，整体同步误差控制精度提升约 30%。

7. 结论

本文以上海市轨道交通 3/4 号线宝山路站接轨改造工程东接驳区桥梁平移及安装工程为依托，系统介绍了卡轨式液压同步平移技术的工程应用，主要得出以下结论：

(1) 卡轨式平移技术通过卡轨装置的双向约束，有效解决了大型桥梁平移过程中侧偏控制难题，结合 PLC 液压同步控制系统，可将多点同步推进误差控制在±2 mm 以内，满足高精度桥梁就位要求。

(2) 在既有运营轨道交通桥梁改造中，通过合理设计移梁基础、建立完善的监控量测体系、严格执行天窗时间管控，可以在确保既有线路安全的前提下高效完成桥梁平移施工。

(3) 支座与垫石同步改造方案有效利用了桥梁平移施工窗口，避免了单独施工带来的额外停运干扰，是合理优化施工工序、压缩总工期的重要举措。

(4) 工程实践证明，卡轨式平移技术在城市复杂环境下的既有轨道交通桥梁改造工程中具有显著技术优势，具有较高的推广应用价值，可为同类工程提供有益参考。

今后,随着 PLC 控制精度和传感器技术的进一步发展,卡轨式平移技术的控制精度和适用范围将进一步拓展,在更复杂的桥梁改造工程中发挥更重要的作用。

基金项目

中铁二十四局集团有限公司科技项目资助(项目编号: SHBSGZ-2025-JS-6)。

利益冲突声明

作者王健,现任职于中铁二十四局集团有限公司轨道交通分公司,为该科研项目主要参与人之一,且为本文背景工程项目经理,承诺不存在其他利益冲突。

参考文献

- [1] 赵毅. 步履式顶推钢箱梁施工关键技术[J]. 工程技术研究, 2020, 5(6): 56-57.
- [2] 毛长江, 赵亚杰, 古松, 等. 桥梁现浇梁高位多向平移施工技术[J]. 施工技术, 2021, 50(12): 57-60.
- [3] 张翀. 一种新型摩擦界面在桥梁平移施工中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2023(5): 148-150+161+21.
- [4] 蓝戊己. 城市更新背景下, 建筑物移位技术在桥梁改造中的应用[C]//同济大学土木工程学院桥梁工程系, 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 桥梁工程与技术网. 第六届全国在役桥梁安全运营保障技术创新大会论文集. 2025: 15.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T 3650—2020 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [6] 沈德申. 全预制装配式城市桥梁快速架设施工实践研究[J]. 交通科技与管理, 2026, 7(5): 68-70.
- [7] 张正. 城市密集区地铁站改造工程研究现状与技术特点分析——快速化、工业化、信息化与精细化施工技术综述[J]. 土木工程, 2026, 15(6): 83-89. <https://doi.org/10.12677/hjce.2026.156158>