

基于步履式顶推技术的 B 匝道钢箱梁施工关键技术研究

毕建民 徐元 余黎明

新疆北新路桥集团股份有限公司，新疆乌鲁木齐，830002；

摘要：随着城市快速路与现有跨线桥梁的改造提升，B 匝道钢箱梁的拼装与吊装面临场地狭窄、跨度大、自重重等难题。针对传统起重机方式难以实施的问题，本研究提出了一种基于步履式顶推技术的施工方案：将钢箱梁分节拼装于顶推平台上，通过多套同步液压顶推设备“步履式”地将整跨梁体缓慢推移至设计位置。文章详细介绍了步履式顶推系统的配置（如液压顶升缸、平移缸和横向纠偏缸等）、施工工艺流程及设备关键参数。施工过程中采用集中 PLC 控制多点同步顶推，实时监测位移、应力等参数，并实施自动纠偏措施。工程结果表明，顶推过程平稳可控，顶推精度满足设计要求（控制误差仅为毫米级别），未出现结构安全性问题，施工效率显著提高。研究总结了 B 匝道钢箱梁步履顶推的成效与经验，为类似工程的顶推施工提供了实践参考。

关键词：步履式顶推；钢箱梁；施工工艺；同步控制；监测

DOI：10.69979/3029-2727.25.08.001

引言

近年来，随着桥梁结构向大跨度、大吨位方向发展以及施工工艺智能化水平的不断提升，步履式顶推施工方法因其施工干扰小、安全性高、设备适应性强，在城市桥梁与立交体系中得到了日益广泛的应用^[1-3]。例如，廖梓旭^[4]在京哈高速前所互通 B 匝道桥钢混组合梁顶推施工中，采用 Midas Civil 建立有限元模型，分析多工况下的挠度与支点反力，并结合现场布置实现分阶段精准控制，确保了顶推过程的安全与高效；王巧莲等^[5]提出多点步履式顶推同步控制策略，通过压力动态调节与传感监控，有效保障了高墩大跨桥梁的施工稳定性；祁斌强^[6]在 G312 泾河大桥施工中利用步履式多点连续顶推法，结合调平梁与千斤顶集成监控系统，实现了复杂工况下钢箱梁的精确就位。综上，步履式顶推技术在空间受限、构件自重大的匝道桥与城市高架桥施工中具有明显优势，具备良好的工程适应性和发展前景^[7-9]。

与此同时，智慧建造、数字孪生与 BIM 等新型信息技术的不断深化应用，显著提升了桥梁施工全过程的自动化与智能化水平。在此背景下，步履式顶推技术与现代施工管理体系高度契合，通过在关键结构节点部署传感器网络，实现对顶推结构状态的实时感知、数据回传与智能决策，极大增强了施工的可视化与调控能力^[10]。此外，随着桥梁跨径和重量的持续增大，传统滑移与吊装方式面临作业高度高、交通干扰大、施工风险高等问题，而步履式顶推方式凭借推力均匀、路径可控、设备可重复利用等优势，已逐步成为跨越高速、铁路等复杂环境下的优选施工手段^[11]。

本文以 B 匝道钢箱梁顶推工程为研究对象，系统探

讨步履式顶推施工的关键工艺流程、设备系统配置与同步控制策略，重点分析施工过程中的位移监测与纠偏方法，并通过实际工程验证其安全性、可控性与高精度控制能力。研究成果可为类似复杂结构桥梁的顶推施工提供理论借鉴与工程实践参考。

1 施工工艺与关键技术

1.1 顶推施工方案与设备结构

B 匝道钢箱梁顶推施工采用柔性支架+多点步履式同步顶推方案。在墩顶及临时支架上布置顶推平台，整跨箱梁节段在岸上或近岸平台完成拼装焊接后，吊装至支架上进行受力转换，然后由步履式顶推设备承接并开始顶推。步履式顶推系统由机械结构系统、液压系统和电气控制系统组成，其主要构件包括固定基座、滑移基座、竖向顶升油缸、纵向平移油缸、横向调整油缸等。竖向顶升油缸安装于下部支撑结构内，用于控制梁体与顶推装置的接触与脱离；平移油缸置于滑移基座上，负责沿桥梁轴向的推进；横向油缸用于纠正梁体横向偏移。

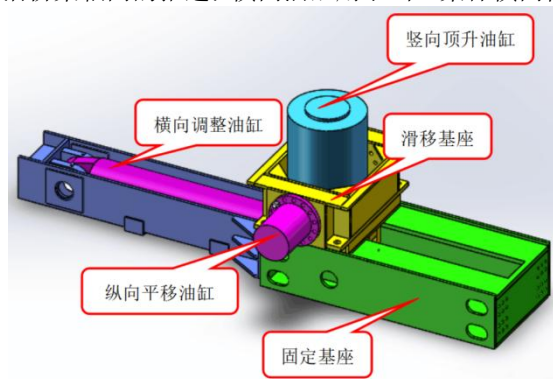


图 1 步履式顶推设备整体效果图

1.2 顶推工艺流程

顶推工艺流程主要包括：①组装箱梁：在现场支架平台上，逐节将钢箱梁吊装就位并焊接成整体，进行必要的调整以保证节段接口吻合；②受力转换：利用竖向顶升缸将拼装好的梁体从临时垫块抬升并转换到顶推滑移基座上，使梁体由支撑面接触到顶推装置；③同步顶推：启动步履式顶推设备，以同步循环的方式将梁体分段顶推，每次顶推距离为一个桁间长度或设计值，直至梁体横移至设计位置；④就位落梁：顶推到位后，通过两侧竖向油缸将梁体缓慢落梁至永久支座处，拆除顶推设备和支架，完成施工。

整体顶推布置如图2所示，在桥梁一侧设置顶推平台和临时墩，沿顺桥向布置滑道与步履机，使得箱梁在平台上逐步向前滑移直至合龙。项目共采用16套步履式顶推装置分布于临时支架塔架中心位置，多点同步施力，提高了推送均匀性。顶推过程中，各设备协调运动，步履缸、推送缸和横向调节缸协同工作，以保持梁体整体连贯同步移动。

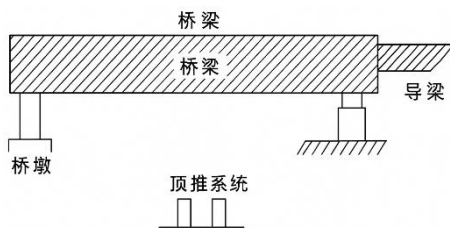


图2 整体顶推布置

1.3 滑动面设计与步履顶推优势

在滑动面下方可设置聚四氟乙烯滑块或导轨，以降低摩擦阻力，保证连续顶推。相比传统拖拉式顶推，步履顶推的优势在于：推力连续、步骤可控，顶推时对下部支撑架的水平力小；设备可调节性强，能适应钢梁的错位校正需求；施工无需大型转塔起重机，减少了临时设施用量和工期。在B匝道施工中，充分利用步履顶推的原位拼装与多点同步推送优势，保证了钢箱梁从组装到就位的过程平稳安全、精度可控^[12]。

2 施工监测与控制策略

2.1 同步顶推控制与力位协调机制

顶推施工中必须对位移和受力进行严格监控，并在出现偏差时及时纠偏。同步控制方面，本工程采用PLC集中同步液压控制系统，对所有步履机（千斤顶）实行并联控制，使力和位移协调反馈。系统可对每台顶推千斤顶的压力、位移等进行闭环控制，实现多点顶推同步精度 $\pm 2.0\text{mm}$ ^[13]。为保证水平同步，推送缸与顶升缸交

替工作，始终保证梁体底板无滑移；若各点推力不平衡，控制系统会自动调整各千斤顶压力输出，避免局部过载。

2.2 梁体纠偏策略与调姿技术措施

纠偏措施方面，梁体的中心线位移、横向偏移和支点荷载等均在监测之列。一旦发现梁体偏离中心线超出容限，施工管理中心会指令启用横向千斤顶进行调整。在现场亦可通过观测导梁和标靶的位置，手动微动调整设备位置。同时可利用钢箱梁内置可调系杆或外部微调螺栓等对梁体进行微偏移，以精调线形和标高。步履式顶推装置自带横向调节缸（ $\pm 50\text{mm}$ 行程）可实现快速纠偏，对微小偏移可先用步履机缓慢“漂移”调整后再继续推送，确保每步顶推后梁体保持设计轨迹。

2.3 实时监测系统与智能化安全保障

监测手段方面，施工现场搭建了集中监控站，对顶推全过程进行实时监测^[14]。监测内容包括步履机油缸压力、顶推位移、梁体偏移、支撑沉降及应力变化等关键指标。其中，位移通过位移传感器和人工观测相结合的方式测得，千斤顶压力通过压力传感器实时反馈；梁体偏移采用全站仪按5米间距进行布控测量，支撑沉降通过水准仪每日复测，应力变化则利用应变片进行周期性数据采集或事件触发记录。特别是在永久墩与临时墩位置布设有应力/应变监测点，用于连续记录墩顶推力和滑道支撑反力。

所有监测数据统一接入PLC集中控制系统，通过集控终端进行实时分析、显示与报警管理，构建了完整的顶推过程监控体系。当监测数据出现超限趋势时，系统可自动发出预警，联动调整顶推节奏或暂停设备运行，从而确保施工安全。监测系统为施工全过程提供了可靠的同步控制与纠偏数据支撑，有效保障了顶推作业的稳定性和精度控制，显著降低了顶推施工中的结构和操作风险。

3 工程结果与效果分析

3.1 顶推过程及线形控制成效

本工程顶推累计行程约为144m，分两段顺利完成合龙。整个顶推作业持续11天，施工窗口安排在每天夜间4小时内，整体进度满足施工计划要求。在顶推过程中，钢箱梁结构始终保持稳定状态，未出现振动、冲击或不均匀变形等异常现象，线形与标高控制效果良好。梁体最终顶推至设计位置后，实测结果表明其平面偏移控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，标高误差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内，均优于设计容许偏差范围。进一步监测数据显示，梁体中线偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，整体线形误差不超过 $\pm 10\text{mm}$

(设计允许偏差为 $\pm 20\text{mm}$)，充分验证了施工工艺和现场控制措施的有效性。

3.2 控制系统运行效果与设备表现

PLC同步控制系统在顶推施工过程中运行稳定，对各步履机千斤顶实施闭环控制，有效实现了顶推力和位移的多点协调。系统基于实时采集的传感器数据，自动调整各项推单元的输出压力，显著降低了局部超载或不同步造成的偏移风险。各项推点的同步控制精度优于 $\pm 2.0\text{mm}$ ，满足工程高精度控制要求。图1中可见，液压顶升油缸和顶推油缸集成于滑移基座上，设备运行平稳，梁底板与滑移基座之间接触紧密。施工完成后，对梁体线形和支座位移精度进行复核，结果显示各断面均满足设计要求，支座落点无明显偏移，进一步印证了步履设备的控制精度和施工可靠性。

3.3 监测系统应用与安全性能评估

施工过程中未发生任何安全事故，各临时支架及墩台结构在顶推阶段所承受的反力、变形与应力始终处于设计安全范围内^[15]。为保障施工安全，现场布设了压力传感器、位移传感器、应变计等多种监测手段，建立了数据采集与云端传输系统，构建了全过程自动化监控和预警机制。系统可实时记录各关键监测点数据，并通过PLC集中控制终端进行实时分析与报警管理。施工期间未出现监测超限现象，测点数据与设计复核计算结果高度一致，表明顶推过程中的荷载分布、结构响应与计算模型吻合度高，验证了本次步履式顶推施工路径合理、控制措施得当。综上，B匝道钢箱梁步履顶推工程平稳完成，成果可靠，为同类大吨位钢结构桥梁顶推施工提供了可复制的实践经验。

4 结论

本研究针对B匝道钢箱梁施工提出了基于步履式顶推的施工技术方案，重点研究了系统配置、施工工艺、监测控制等关键技术。实践表明，该工艺具有如下优势：

(1) 安全可控：采用多点同步步履顶推和实时监测，实现了顶推过程的全程控制，各项监测指标均在安全范围内。

(2) 精度高：同步控制精度达到 $\pm 2.0\text{mm}$ 级，多次测量验算的梁体位移及线形误差在毫米级内。

(3) 经济高效：无需大型吊机和过多临时支撑，顶推设备可重用，施工周期和成本相比传统方法显著降低。

基于工程经验，建议今后的步履式顶推工程继续推广PLC/液压同步控制系统与智能监测平台的应用，如结

合数字孪生技术实现更加智能化的质量控制。同时，可优化设备参数和布置方案，例如配备自动调平装置和更高精度的传感器，以进一步提高施工效率和精度。此外，针对不同桥型的梁体截面变化，继续研发兼容性更强的步履推送装置（如具有自动角度/变截面适应功能的千斤顶），以扩展该技术在更多复杂桥梁工程中的适用性。总体而言，本工程应用成果验证了步履式顶推在大吨位钢箱梁施工中的可行性和优越性，为类似桥梁顶推施工提供了实践指导和技术参考。

参考文献

- [1] 张喜刚, 刘高, 马军海, 等. 中国桥梁技术的现状与展望[J]. 科学通报, 2016, 61(Z1): 415-425.
- [2] 中国公路学报编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(05): 1-96.
- [3] 赵秋, 陈美忠, 陈友杰. 中国连续钢箱梁桥发展现状调查与分析[J]. 中外公路, 2015, 35(01): 98-102.
- [4] 廖梓旭. 大跨径钢箱组合梁步履式顶推施工研究[J]. 中国高新科技, 2025, (08): 119-121.
- [5] 王巧莲, 王程伟. 大跨度桥梁多点步履式顶推工艺技术研究[J]. 价值工程, 2025, 44(16): 7-9.
- [6] 祁斌强. 钢-混组合梁安装中步履式顶推法的应用[J]. 价值工程, 2025, 44(07): 8-10.
- [7] 龚景森. 桥梁步履式顶推施工与横向纠偏技术分析[J]. 中国公路, 2024, (22): 101-103.
- [8] 毕武. 钢箱梁步履式顶推法施工关键技术研究[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(14): 53-55.
- [9] 韩慧超, 吕之豪, 朱伟庆, 等. 受空间约束时曲线钢箱梁步履式多点顶推策略[J]. 公路交通科技, 2024, 41(09): 160-171.
- [10] 陈建湘. 桥梁施工步履式顶推技术应用分析[J]. 运输经理世界, 2022, (35): 116-118.
- [11] 陈建平. 步履式顶推施工关键技术探讨[J]. 交通世界, 2021, (25): 61-62.
- [12] 曹广飞, 申岩, 焦仲伟, 等. 钢箱梁步履式多点顶推技术实践[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 2797-2801.
- [13] 刘学冬, 王凤武. 基于步履式顶推技术的钢箱梁桥施工风险评价与质量控制分析[J]. 工程建设与设计, 2024, (03): 257-259.
- [14] 赵英杰. 钢箱梁步履式顶推施工工艺及其施工监测控制要点[J]. 四川水泥, 2024, (10): 220-222.
- [15] 王洪桔, 张全帅, 王其林, 等. 大跨度钢箱梁步履式顶推施工安全研究[J]. 山西交通科技, 2023, (02): 72-75.