

曲线钢箱梁步履式顶推施工组织与实践

王东辉

(中铁二十二局集团第一工程有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150221)

摘要: 曲线钢箱梁顶推施工是跨线桥梁建设中的关键环节, 尤其在小半径曲线段, 其线形控制难度大、同步精度要求高, 对工程的质量与安全具有决定性影响。现以扶余市公铁立交桥为背景, 开展步履式顶推施工组织设计与实践研究。通过液压同步顶推与全过程监测, 并结合顶推线形实时纠偏、顶推稳定性控制、跨铁路安全施工、温度控制与地基沉降防控等综合措施, 形成一套高精度顶推施工方案。工程实践表明, 该方案实现梁体轴线偏差 3 mm、竖向偏差 5 mm 的高精度控制, 显著缩短铁路封锁时间, 提升施工效率, 并节约工程成本约 15%, 为同类跨线桥梁施工提供可靠的技术借鉴与实践范例。

关键词: 曲线钢箱梁; 步履式顶推; 施工组织

中图分类号: U445.462

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0330-05

Organization and Practice of Incremental Launching Construction for Curved Steel Box Girders

WANG Donghui

(China Railway 22d Bureau Group Corporation Limited, First Engineering Co., Ltd., Harbin 150221, China)

Abstract: The incremental launching construction of curved steel box girders is a key link in the construction of overpass bridges. Especially in small-radius curve sections, its linear shape control is difficult and the synchronization accuracy requirements are high, which has a decisive impact on the quality and safety of the project. Taking the highway-railway overpass in Fuyu City as the background, the organizational design and practical implementation of incremental launching construction are studied. Through hydraulic synchronous incremental launching and full-process monitoring, combined with real-time alignment correction of incremental launching, stability control of incremental launching, safe construction across railways, temperature control, foundation settlement prevention and control and other comprehensive measures, a set of high-precision incremental launching construction scheme is formed. The engineering practice shows that this scheme can achieve the high-precision control with a girder axis deviation of 3 mm and a vertical deviation of 5 mm, which significantly reduces the railway closure time, enhances the construction efficiency, and saves the engineering cost about by 15%, providing a reliable technical reference and practical model for the construction of similar overpass bridges.

Keywords: curved steel box girder; incremental launching; construction organization

0 引言

曲线钢箱梁桥线形复杂、受力敏感, 其施工是桥梁工程中的关键难点。顶推法广泛应用于直线桥, 但在小半径曲线段施工中^[1], 仍面临导向控制^[2-3]、扭转变形^[3]与同步精度^[4-5]等挑战。步履式顶推技术^[6]作为新兴解决方案, 通过多点同步液压控制, 有效提升曲线适应性与施工可控性, 已在多项跨线工程^[7-9]中成功实践。现有研究多集中于顶推力学行

为、同步控制及临时结构优化^[10-15], 表明该技术具有良好的发展前景, 但在具体工程中的组织与实践细节仍需系统总结。本文结合扶余市公铁立交桥工程, 探讨曲线钢箱梁步履式顶推的施工组织、过程控制与实践效果, 以为类似工程提供参考。

1 工程概况

1.1 概况

扶余市富民路公铁立交桥主桥采用双幅预应力混凝土与钢箱梁组合结构, 上跨扶陶公路及京哈铁路电气化干线。铁路限界要求桥下最低净空不小于 8.30 m, 本文工程实际净空约 9.05 m, 满足要求。

收稿日期: 2025-12-26

作者简介: 王东辉(1989—), 男, 本科, 工程师, 从事桥梁施工技术与管理。

本项目施工场地毗邻铁路干线,施工作业须严格遵循铁路运营部门安全管理规定,关键施工活动均须在规定短暂时间窗口内完成。铁路两侧各有既有框构桥和道路引堤,桥梁拼装场地狭小且紧邻营业线,施工中既要确保梁体不侵入铁路限界,又要避免施工机械及人员侵限,安全风险高顶推,桥梁平面布置图如图 1 所示。

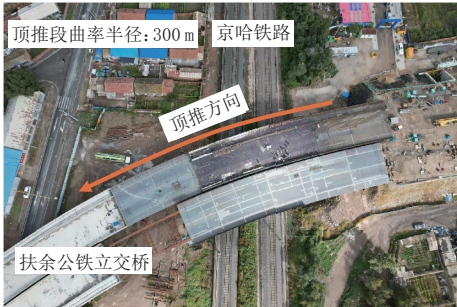


图 1 顶推桥梁平面布置图

1.2 钢箱梁

主钢箱梁设计为单箱双室直腹板断面,顶宽为 15.025 m,底宽 10 m,中心线处梁高 2 m,并通过单侧 2.5 m 悬臂结构实现。为满足排水与线路要求,左、右幅箱梁顶面分别设置 1.5% 单向横坡与 4% 纵向坡度;其中横坡通过调整腹板高度形成,并保持梁底水平。结构板顶板厚度范围为 16~20 mm,底板 16~24 mm,腹板厚 16 mm,并在各板均设置纵向加劲肋以增强刚度。箱梁内部设有横隔板,其标准间距为 3 m。单幅钢箱梁总重约 840 t,左右幅合计约 1 680 t,曲率半径为 300 m,桥梁横断面布置图如图 2 所示。

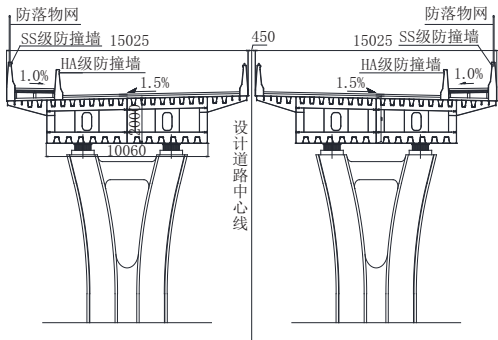


图 2 桥梁横断面布置图(单位:mm)

1.3 施工重难点分析

基于以上约束,钢箱梁施工工艺宜采用步履式顶推法,该工艺可最大程度地减少对铁路运营干扰,避免在铁路上方进行大跨度吊装。同时需要克服的难点有:(1)曲线段线形精确控制,多点顶推液压系统同步控制,防止轨迹偏离;(2)最大 45 m 中跨悬臂状态下挠度与稳定性控制,必须对其悬臂挠度及稳定性实施严格监测;(3)顶推跨越铁路时,施工时间

窗口受限,施工组织需确保关键工序按时执行,确保梁体与接触网及轨道之间保持规范所要求安全间距;(4)顶推施工过程中地基沉降风险与钢箱梁温度控制。

2 顶推施工流程与总体方案

2.1 步履式顶推简介

步履式顶推装置^[16-17]的作业过程基于一个循环往复的步进式原理,其核心是通过竖向与水平液压系统的协同动作,实现钢梁顶推。整个过程中钢梁始终保持稳定平衡的状态。如图 3 所示,单个标准顶推行程可分解为 4 个阶段:一是顶升阶段,启动竖向顶升油缸,各油缸同步举升,使钢梁整体脱离垫块;二是推移阶段,竖向顶升油缸保持支撑状态,启动水平顶推油缸。油缸推动钢梁沿预定方向水平移动,直至水平顶推油缸完成一个设定行程;三是下降阶段,启动竖向顶升油缸并使各竖向油缸同步缩回,带动钢梁及上部滑移结构平稳下落至油缸与钢梁完全脱离接触,此时钢梁重量由临时垫块支撑;四是复位阶段,启动水平顶推油缸进行回缩动作,为执行下一个顶推行程做好准备。

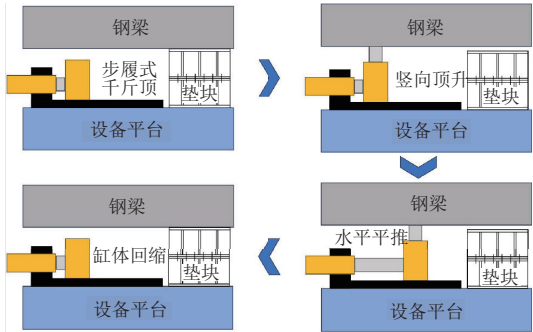


图 3 步履式顶推示意图

2.2 顶推施工流程

基于桥梁结构特点及现场施工条件,该项目钢箱梁安装遵循累积滑移原理采用步履式顶推方法。在 6 号桥台逐段拼装钢梁节段,当形成一定长度梁段后,利用布置于各临时支点上步履式千斤顶系统将梁体整体向前顶推一个行程;随后继续拼装后续节段,再次顶推作业,直至梁体整体到达设计位置。顶推方向从 6 号桥台向 4 号桥墩推进。为应对曲线顶推路径,拼装台座及各临时支墩均按圆曲线布设,千斤顶控制系统中集成主动横向纠偏功能。顶推施工完成后,中跨及边跨剩余短节段采用吊装方式与已顶推梁段进行连接,如图 4 所示。施工工艺流程可划分为五个主要阶段:导梁及临时支架设计布置、

钢箱梁制作运输、梁段吊装定位与焊接、循环式顶推作业、后续梁段拼接,如图5所示。

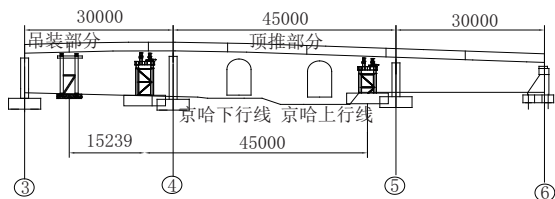


图4 顶推施工示意图(单位:mm)

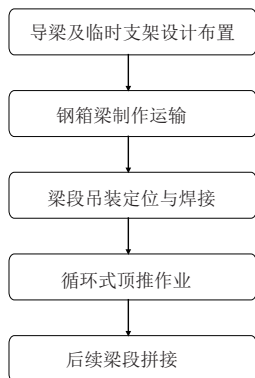


图5 顶推流程示意图

2.3 顶推施工总体方案

支点设计要充分考虑地基承载力及临时结构强度。各临时支墩基础采用钢筋混凝土独立基础,平面尺寸约为 $16.0\text{ m}\times 6.5\text{ m}$,厚度 0.8 m 。基底经碎石换填处理,确保地基承载力不低于 192 kPa 。临时墩身为由两根规格为 $609\text{ mm}\times 16\text{ mm}$ 钢管柱及缀材构成门式刚架。顶部设置分配梁以传递千斤顶反力。导梁作为步履顶推施工的关键临时构件,设计为变截面焊接工字钢梁,总长为 27 m ,是最大顶推跨度的60%,分为3节,每节长度为 9 m 。导梁设计时下缘预设适当上拱度,以补偿顶推悬臂状态下导梁及主梁的弹性下挠,确保导梁前端能够顺利到达对岸墩顶。导梁前端设有导向装置与滚轮,以降低顶推阻力并限制梁体横向偏移。支点布置方面,顶推节段长度为 $12\sim 16\text{ m}$,重量为 $40\sim 52\text{ t}$ 。成对设置的临时支架或墩柱构成顶推支点,承受顶推过程中的梁体荷载。根据顶推跨径与梁长变化,设置多组步履支点。在梁体未跨越铁路前,主要支点布置于6号桥台附近拼装区及各永久桥墩区域;随着顶推进程,要确保梁体在顶推全程中始终具备3~4个有效支承点,严格控制悬臂长度,现场导梁与临时支墩示意图如图6和图7所示。

顶推系统采用XY-BL系列液压步履顶推设备,包括步履顶推器、液压泵站及计算机同步控制系统三部分。本项目选用 500 kN 级步履顶推器,单台最

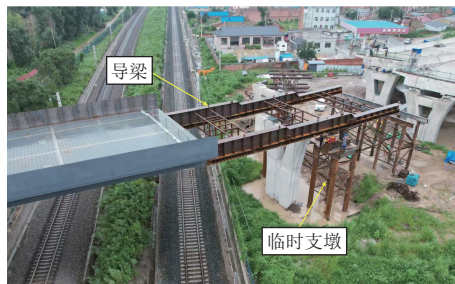


图6 导梁临时支墩施工现场图

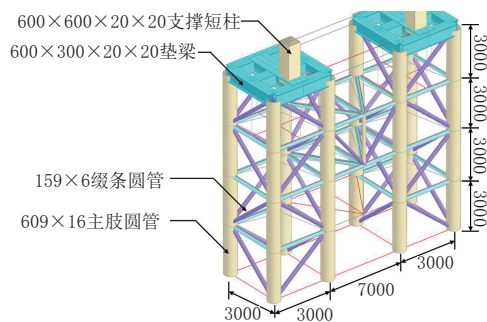


图7 临时支墩示意图(单位:mm)

大设计行程约 0.5 m ,通过顶升、前移、落梁和回程4个步骤实现梁体循环前进。顶升阶段通过压力传感器反馈调节使支点反力处于设计允许范围内;前移阶段通过位移传感器保证各千斤顶同步行进,任一顶推器达到行程终点即停止整体前移,防止同步误差累积;随后千斤顶落梁,进入下一工作循环。若检测到支点受力异常或位移偏差超出设定阈值,系统将自动报警并暂停顶推,待故障排除后继续作业。系统还集成梁体轴线监控功能,若偏移量接近预警值,限位系统将启动横向纠偏,确保梁体沿设计中线推进。顶推作业拟于铁路夜间天窗期内进行,左幅钢梁在铁路封锁窗口开启后,将5个节段连续顶推约 75 m ,到达设计位置后落梁,随后撤出顶推设备。右幅钢梁顶推分为3个阶段:第1阶段在铁路营业时将已拼装的3个节段顶推至距离铁路 5 m 处暂停;第2阶段在铁路天窗期内,继续顶推约 2 m 通过上行线,随后暂停并拼装后续钢箱梁;第3阶段在最后指定天窗内完成剩余 57 m 顶推并落梁就位。整体顶推施工自首段梁拼装开始至两幅梁全部就位预计历时2个月,其中实际铁路封锁顶推作业累计占用约6个夜间天窗,现场施工图如图8所示。

3 现场问题与应对策略

3.1 顶推线形纠偏与液压同步控制

为精确控制曲线段钢箱梁顶推轨迹,本文工程构建一套集主被动限位约束与液压实实时同步控制于一体的闭环纠偏系统,并成功在曲率半径为 300 m 的



图8 顶推施工现场图

曲线段顶推过程中应用。

在被动约束层面,系统中各顶推千斤顶支座两侧设置机械式侧向限位装置,设定单侧最大允许突发偏移量为 $\pm 5\text{ mm}$,从物理结构上对梁体横向突发位移进行刚性约束,防止突发性大幅度偏移。

在主动控制层面,项目采用XY-BL-500型步履式液压顶推器与XY-KZ-01型计算机同步控制系统。该系统具备500 t额定顶升能力和100 t横向纠偏能力,可实现横桥向的精确微调。曲线顶推的纠偏不能简单采用发现偏差、反向顶推的直线思维,而必须考虑曲线几何的适配性。在曲线段,纠偏动作的几何意义更为复杂,横向调整量需与当前曲率半径、已行进弧长及剩余弧长进行耦合计算。为此,控制系统采用CAN总线32通道同步控制,通过部署于各支点的位移传感器实时反馈位置信息,中央控制器根据预设的曲线方程动态解算各点所需的横向调整量,实现沿曲线切线方向推进、沿法线方向纠偏的几何适配控制。系统实时采集荷载及位移数据,动态调节各项推点的位移同步精度,从动力源上消除曲线行进导致的偏载与轨迹漂移。

在监测与执行层面,针对曲线顶推偏差的非线性累积特征,工程建立高密度姿态监测网络,在导梁顶面、钢箱梁顶板中线位置每隔4 m距离固定棱镜,根据现场实际情况,要满足高度要求且按照就近原则设置不动的位移观测点,测点布置时应满足观测点的通视要求。横向位移测点布置截面为成桥状态的墩顶及对岸桥台截面,截面上的布置位置为顶板上表面的中轴线位置。综合应用全站仪与激光传感器对梁体首尾轴线相对于理论基准线的位置进行持续监测。分别在顶推前、顶推中(每顶推2.5 m测量一次)、顶推就位后采用全站仪观测棱镜。最大横向位移偏差应控制在50 mm以内,在实际施工当中,累计偏差接近50 mm时及时通知操作人员进行横向纠偏,控制系统立即响应,通过微调对侧千斤顶的顶进位移量,或切换油路启动横向纠偏油缸,引导梁体

平稳回归设计轴线。

通过上述系统性的控制策略,最终全桥中线偏差被成功限制在 $\pm 3\text{ mm}$ 之内,远高于规范要求,有力验证该纠偏控制策略的有效性与可靠性。

3.2 悬臂状态下挠度与稳定性控制

顶推过程中钢箱梁的导梁即将抵达4号临时墩时,钢箱梁处于悬臂长度达到最大45 m的中跨悬臂状态,该时刻下钢箱梁的挠度与稳定性是控制顶推施工安全的核心指标。针对这一技术难点,本文工程通过理论分析预判最不利工况、建立全过程监测体系,实现对结构受力与变形的精准控制。

为有效减小悬臂施工带来的附加内力与变形,方案对导梁进行针对性设计。导梁长度为27 m,约为主跨的0.6倍。此设计使导梁在悬臂状态下既能有效分担主梁荷载,又能将端部挠度控制在可接受的范围内。项目采用MIDAS Civil 2022有限元软件对该时刻进行仿真分析,模型示意图如图9所示。计算结果表明,该时刻下最大正应力位于导梁根部,数值为 $92\text{ MPa} < 270\text{ MPa}$,满足要求最大挠度位于导梁悬臂端,为181.9 mm,在后续施工过程中实时监测,如图10和图11所示。

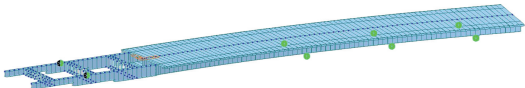


图9 顶推数值模拟模型示意图

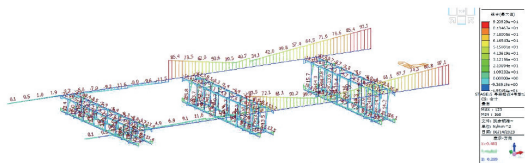


图10 导梁正应力云图(单位:MPa)

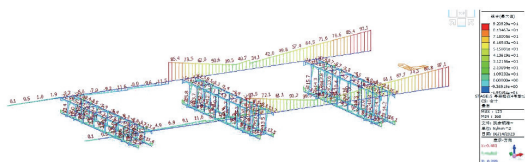


图11 导梁竖向位移图(单位:mm)

在施工过程中,项目建立针对悬臂的专项监测机制。监测重点包括导梁端部标高、钢箱梁关键截面应力应变以及临时墩顶位移。特别是导梁端部标高监测点布设于导梁前端横桥向左右对称位置,当导梁接近前方支墩时,监测人员需根据实测标高与理论对比,判断是否需调整顶推速度或局部起顶,确保导梁平稳登上顶推设备。此外,明确要求在顶推过程中每5 m进行一次导梁挠度与应变的跟踪测量,并与理论计算值进行比对,一旦发现异常立即暂

停作业并分析原因。

通过上述综合控制策略,该工程成功将最大悬臂状态下的结构响应纳入可控范围,确保顶推全过程结构安全与线形稳定。

3.3 跨铁路施工时间限制与安全间距控制

本文工程上跨京哈铁路施工,面临严格的天窗时间限制与营业线安全管控要求。为确保施工期间铁路运营安全,方案从净空验算、工序规划与过程管控3个维度构建控制体系。

净空验算方面,依据铁路部门相关规定,桥下净空控制标准为不小于8.3 m。施工前对导梁底部与轨面实际距离进行精确复核。结果显示,上下行线高差分别为9.048 m与10.545 m,均大于8.30 m的控制标准,具备充足的安全冗余。

工序规划方面,所有跨越京哈铁路的顶推作业均严格安排在铁路部门审批的天窗点内实施。根据施工计划,需申请京哈上、下行线各12个垂直天窗。结合设备性能确定关键工序工效:步履顶推器顶进速度按3 m/h控制,对应天窗可顶进4.5 m;落梁工序速度按0.5 m/h控制,每个天窗可落梁0.5 m。以天窗时间为基准的工序分解方式确保关键节点作业均在封锁时间内可控完成。

过程管控方面,顶推过程中实现风险分级管控。将5 m的安全距离作为缓冲区,在跨越上下行线是暂停检查,既为突发情况下的紧急处置预留空间,确保后续顶推始终处于安全可控状态

3.4 地基沉降与钢箱梁温度控制

针对地基沉降风险,本文项目采取全程控制措施。前期准备中除对地基进行换填提升承载力外,开展临时墩基实施静载试验,确保沉降量满足设计要求。顶推过程中,利用高精度水准仪建立系统标高监测机制。当监测到某支点沉降超过2 mm时,在该支点千斤顶底部植入临时钢垫板补偿标高损失,同时减缓顶推速度并持续观测。顶推结束后受力体系转换阶段,采用荷载缓释技术:通过在支座上方梁段临时堆载,使支座预先缓慢承托部分荷载,随后再同步分级卸除临时支撑,平稳完成体系转换,避免因瞬时加载对支座及墩顶结构造成冲击。实践表明,通过上述预控与动态调整相结合的方式,有效防止支架失稳或严重沉降事故。

钢箱梁顶推施工周期内的环境温度变化会诱发梁体热胀冷缩及不均匀变形,进而产生附加应力与轴线偏移。本项目采用系统的温度控制体系。首

先,避免午间强烈日照时进行顶推作业;其次,梁顶布设温度传感器网络,对温度场进行实时监测,当腹板两侧温差超过5℃时,立即暂停顶推并采取洒水降温或覆盖遮阳篷布等措施快速降温;最后,梁段对接焊接时选择在接近日平均气温的时段进行,确保结构在常温下的内力与线形最大限度符合设计预期。实践表明,上述综合措施有效保障顶推精度,施工全程未出现因温度变形导致的卡阻或附加应力超限现象。

4 工程效果评估

扶余公铁立交桥曲线钢箱梁步履式顶推工程已于2023年完成施工。其施工成效验证步履式顶推技术的优越性,顶推施工控制上,施工全过程精准受控,线形平顺且支座就位一次成功,无需二次调整;效率方面,通过12次铁路天窗点作业即完成全部跨线施工,相较传统方案显著压缩对既有运营线的干扰周期,并实现较计划工期提前10 d的进度目标。步履式顶推工艺凭借其多点同步、循环前进的特点,实现平均每夜30 m的推进速度,施工效率较传统工法提升约20%~30%。安全性与经济性同步提升,施工全程实现安全事故零记录,并减少大型吊装设备与临时措施费用,初步估算节约工程成本约15%。

5 结 语

扶余公铁立交桥曲线钢箱梁步履式顶推工程在确保铁路运营安全的前提下,实现钢箱梁快速、高精度的安装就位,验证该技术在复杂环境下的适用性与可靠性。主要结论如下。

(1)步履式顶推技术在高精度线形控制方面具有显著优势。通过实时监测与主动纠偏系统,该工程成功将梁体轴线与竖向偏差控制在3 mm与5 mm以内,适用于对轨迹精度要求高的场景。

(2)该工艺环境适应性突出,尤其适用于跨越铁路、公路等交通干线而无需中断或最小化中断的场景,展现出良好的安全性与时效性。

(3)步履式顶推具备良好的技术经济性与推广适用性。本工程相比传统吊装或现浇方案节约成本约15%。适用于中等跨径、场地受限、需跨越交通干线的钢箱梁或钢桁梁结构,具备在类似工程中推广价值。

参考文献:

- [1] 汪学进.大跨度圆曲线槽型钢梁顶推施工方案比选[J].世界桥梁,2020,48(2):51-55.