

DOI: 10.7672/sgjs2026080115

复杂调坡条件下旧桥连续梁同比例异步顶升 施工技术*

王磊

(中铁大桥局第九工程有限公司,广东 中山 528400)

[摘要] 长春—深圳高速公路新港路大桥改扩建部位为缓和曲线段,桥面纵横坡调整复杂且传统同步顶升技术难以满足横坡渐变条件下各支撑点顶升量非线性分布的控制要求。针对该工程特点,提出旧桥连续梁同比例异步顶升智能施工技术。该技术通过优化旋转轴线和千斤顶布置,确定各支撑点顶升控制值,并利用 PLC 智能控制系统实施多点分步异步顶升,使梁体围绕目标轴线逐步完成等角度旋转;结合梁体自重反压预压、支承体系分步转换和全过程实时监测,实现了顶升调坡施工的精确控制。工程实践表明,连续梁横坡由 1.7% 调整为 -0.3%,最大顶升量为 15.1cm,顶升及落梁过程平稳,桥面标高和纵横坡满足设计要求,并缩短了施工工期、降低了工程成本。

[关键词] 桥梁;顶升;智能控制;支座;监测

[中图分类号] U445

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0115-05

Construction Technology for Proportional Asynchronous Jacking of Existing Continuous Girder Bridges Under Complex Gradient Adjustment Conditions

WANG Lei

(The 9th Engineering Co., Ltd., MBEC, Zhongshan, Guangdong 528400, China)

Abstract: The reconstruction and expansion section of Xingang Road Bridge on the Changchun-Shenzhen Expressway is located in a transition curve segment, where deck elevation and transverse gradient adjustment are complex, and conventional synchronous jacking can not satisfy the control requirements arising from the nonlinear distribution of jacking heights at different support points under varying superelevation conditions. In view of these engineering characteristics, an intelligent construction technology for proportional asynchronous jacking of existing continuous girder bridges was proposed. By optimizing the rotation axis and jack layout, the jacking control values at each support point were determined, and a PLC-based intelligent control system was adopted to realize deck elevation adjustment. In addition, self-weight-based preloading, stepwise transition of the bearing system under restricted working space, and real-time monitoring throughout the construction process were integrated to ensure the safety and precise control of gradient adjustment. Field application showed that the transverse gradient of the existing bridge was adjusted from 1.7% to -0.3%, with the maximum jacking height of 15.1cm. The jacking and lowering processes remained stable, the deck elevation and longitudinal/transverse gradients satisfied the design requirements, and both the construction duration and project cost were reduced.

Keywords: bridges; jacking; intelligent control; bearings; monitoring

0 引言

在交通需求持续增长的驱动下,既有桥梁的扩容改造已成为提升路网整体效能的核心举措。顶升技术以其不拆除原结构即可提升桥高的显著优势,已然成为桥梁功能升级的优选方案。Gao 等^[1]

* 中铁大桥局集团有限公司科学技术研究与开发项目(2023-25-重点)

[作者简介] 王磊,副总经理,高级工程师, E-mail: 18013016550@163.com

[收稿日期] 2025-11-22

结合路桥顶升改建工程实例,系统研究了桥梁顶升技术,分析了顶升高度、形式、坡度调整方法及自重,并设计同步顶升方案,提出顶升施工流程及控制要点,证明桥梁顶升关键技术可行,且施工方法安全可靠。

顶升技术在改扩建工程中得以广泛应用在于其具备以下优势:①最大化利用原有桥梁结构^[2],经济实用,现代大型桥梁的设计寿命通常为 100 年,近 20 年建成的桥梁多数仍具备充足承载力,顶升技术可完整保留原结构体系,确保承载性能与使用功能不受影响,显著提升旧桥利用率^[3],大幅度降低建设成本;②绿色施工,环境扰动小,桥梁顶升施工可规避拆除环节,从源头消除建筑废料与粉尘污染^[4],特别是在生活区改造中,其无需大型机械的特点有效规避噪声污染,最大限度地保障居民日常生活不受干扰^[5];③精准可控,施工高效安全,顶升技术采用的 PLC 液压变频同步顶升控制系统^[6-7],可将顶升过程同步精度误差控制在较小范围,全面保障施工安全,此外,相较于拆除重建,顶升施工可大幅度缩短施工周期^[5];④交通影响微量,桥梁顶升施工无需全封闭交通^[8],仅需实施局部临时管控,最大限度地保障了区域交通系统的正常运行。

当前桥梁顶升技术研究集中于同步顶升领域,部分学者针对不同工程提出了创新方案。Xu 等^[9]基于抗倾覆稳定理论,提出单柱墩桥同步顶升加固技术。通过建立有限元模型开展参数敏感性研究,揭示关键参数影响规律,并经现场试验验证,该方法能有效提升单柱墩桥稳定性。Zhang 等^[10]提出了行走多点同步顶推施工技术,通过在桥墩上安装顶推装置逐步推进钢箱梁,突破大跨钢箱梁吊装要求的局限。刘杰等^[11]研究的多桥梁整体同步顶升施工技术,融合支座垫石增高、盖梁接高、断柱接高等多种顶升方式,实现桥梁多跨同步调坡顶升。Wang 等^[12]针对大型预制桥梁多点同步顶升控制问题,提出电液闭环位移控制系统和主从控制方案,建立同步顶升液压系统数学模型并应用模糊 PID 控制器。经 MATLAB 仿真及试验验证,该系统具备高精度、大负载适应性强等优势,能显著提升施工效率与安全。Liu 等^[13]基于富伊高速公路小屯桥钢箱梁整体智能顶升项目,提出融合同步液压顶升、智能监控、自动对齐的新型顶升系统及控制方法。经有限元分析验证,该系统和控制方法可保障顶升过程的可靠性与安全性。

然而,常规同步顶升技术难以应对缓和曲线段横坡渐变的复杂调坡需求。本文提出同比例异步

顶升智能施工技术并应用于长春—深圳高速公路新港路大桥改扩建工程。该技术通过智能控制与实时监测系统,成功实现旧桥连续梁的安全、精准、高效顶升调坡,为同类工程提供了有力的技术支撑。

1 工程概况

新港路大桥左幅 2~5 号墩及右幅 1~4 号墩区域为连续梁结构,跨径布置为 (25+40+33)m。梁体高 2m,桥面全宽 12.5m。作为既有高速公路改扩建项目(双向 4 车道扩至双向 8 车道),需对连续梁进行顶升施工。因线路设计速度由 100km/h 提升至 120km/h,需同步调整梁体横坡,从原 1.7% 调整为 -0.3%,即整体逆时针旋转 -2%。梁体最大顶升量为 15.1cm,位于缓和曲线超高变化段。工程难点如下:①新旧桥拼接需控制沥青铺装错台 $\leq 5\text{mm}$;②中间花瓶墩三支座间距小、操作空间受限;③顶升高度最大为 15.1cm,需保证梁体结构安全。

2 同比例异步顶升调坡技术原理

基于围绕旋转轴线等比例旋转,针对连续梁位于缓和曲线超高变化段(顺桥向各横断面目标横坡不一致)的特点,通过计算确定最佳旋转轴线。利用 PLC 智能控制系统控制各支撑点千斤顶按横桥向等比例行程动作,使梁体围绕旋转轴线进行多次等角度旋转,最终实现纵横坡的精准调整。

3 核心操作流程

3.1 前期准备

3.1.1 旋转轴线与支撑点设计

新港路大桥现浇梁位于曲线段,需避开中心线选取最优旋转轴线,以中心线内移 11cm 的曲线中心点为旋转轴线,误差最小(见图 1)。结合两端盖梁空间条件,沿旋转轴线对称布置 4 条纵向千斤顶布置线(见图 2),间距分别为 2,1.9,2m。

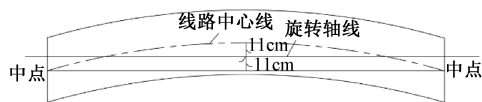


图 1 旋转轴线

Fig. 1 Rotation axis

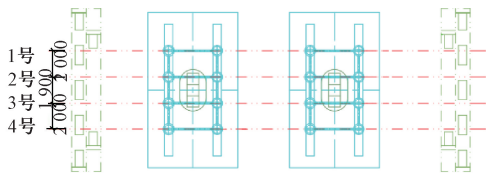


图 2 千斤顶布置线

Fig. 2 Jack layout line

3.1.2 调整值计算

为保证旧桥调坡后与新桥线形顺接、桥面拼接

平顺,调整值计算流程为:实测值与设计值对比→确定目标纵横坡→换算千斤顶理论调整值→形成实际顶升值→校核验证。

1) 横坡调整值计算。通过单联(跨)实测横坡平均值与设计横坡平均值的差值,确定横坡调整值。新港路大桥右幅旧桥顶升前整联横坡平均值为 1.7%,设计值为 -0.3%,整体横坡调整值为 -2%。

2) 纵坡调整值计算。在横坡调整基础上,通过调整后桥面标高与设计标高的拟合分析,确定纵坡调整值,保证顺桥向线形满足设计要求。

3) 千斤顶调整值计算。根据纵横坡调整目标,结合各千斤顶相对于旋转轴线位置,计算各顶点理论调整值。考虑千斤顶顶升值不宜为负,且需预留垫石改造施工空间,在理论调整值基础上将梁体整体抬高 8cm,最终形成各桥墩千斤顶实际顶升值(见表 1)。

表 1 千斤顶实际顶升高

墩号	顶升点			
	1号	2号	3号	4号
4号	0.151	0.109	0.070	0.028
3号	0.151	0.109	0.070	0.028
2号	0.151	0.109	0.070	0.028
1号	0.151	0.109	0.070	0.028

注:正为升,负为降;排序从左到右

4) 校核验证。调整值确定后,还应结合新老桥湿接缝错台控制要求及桥面沥青铺装厚度进行复核,确保旧桥调整后与新桥拟合度最优、拼接错台最小,并使桥面铺装厚度处于合理范围内,满足结构受力和耐久性要求。

3.2 关键施工步骤

现浇连续箱梁同比例异步顶升施工流程如图 3 所示。其中,顶升调坡作业是本次施工的核心环节,支架预压、支座更换及整体落梁是保障施工安全实施的重要环节。

3.2.1 支架预压

中间独柱墩处受桥下空间限制,无法采用常规堆载方式对临时支架进行预压,而支架变形和沉降将直接影响后续顶升调坡精度及梁体结构安全。为此,施工中利用现浇梁自重作为反压荷载,通过千斤顶分级加载实现支架预压。计算表明,中间墩顶升力总和为 19 572kN,现浇梁自重为 2 564t,可满足预压要求。

预压前需记录监测点初始值,并检查支座连接、拼接缝及伸缩缝部位是否存在影响梁体运动的

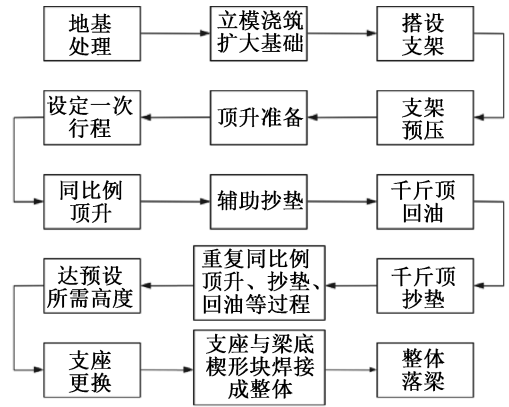


图 3 施工流程

Fig. 3 Construction process

障碍。在加载过程中,先加载至目标顶力的 90%,首小时按 10, 10, 10, 15, 15min 的间隔测读沉降,随后每 30min 测读 1 次。当连续 2h 沉降速率均 < 0.1mm/h 时,判定支架变形趋于稳定,再加载至 100% 荷载并完成最终观测。预压全过程控制千斤顶顶升高度 $\leq 5\text{mm}$,确保梁体不均匀位移始终处于安全范围,为后续顶升调坡作业提供稳定支承条件。

3.2.2 同比例异步顶升调坡作业

顶升调坡过程中,各支撑点根据其横桥向位置关系实施等比例异步顶升控制,使梁体围绕旋转轴线逐步完成等角度旋转。该控制方式可使梁体在顶升过程中保持一致的旋转趋势,从而避免局部顶升过快或姿态突变,保证复杂调坡条件下梁体姿态调整的连续性、平稳性与可控性。

为减小相邻行程间的受力扰动,将总顶升过程划分为 100 个分过程,单次顶升行程控制在 2mm 内。顶升前,先使千斤顶与分配梁贴合,建立初始受力状态;随后按预设步距逐级实施顶升。每完成 1 个行程后,及时采用钢板进行抄垫,以缩小千斤顶与分配梁间的空隙并形成临时稳定支撑。当千斤顶行程达到额定行程的 80% 时,暂停顶升并进行工况转换,由千斤顶受力转变为抄垫受力。抄垫密实后,千斤顶回油,并在其顶部重新设置垫块后继续实施下一阶段顶升。顶升→抄垫→回油→再顶升的循环控制方式可有效解决大行程顶升过程中支承空隙积累和局部受力集中问题,保证梁体姿态平稳调整。

顶升全过程由 PLC 智能控制系统统一控制(见图 4),并对各支撑点位移和压力进行同步监测。施工中,位移数据由拉线式位移传感器实时采集,并与系统反馈值进行对比复核;压力数据由液压系统同步获取,并在控制平台集中显示。控制指标为:位移传感器同步误差 $\leq 1\text{mm}$,任一千斤顶压力误

差 $\leq 5\%$;顶升阶段支撑点不均匀位移控制在 2mm 以内,抄垫阶段控制在 5mm 以内。当位移或压力数据超出控制阈值时,系统自动报警并停止作业,经现场复核、故障排查和参数修正后方可继续实施。

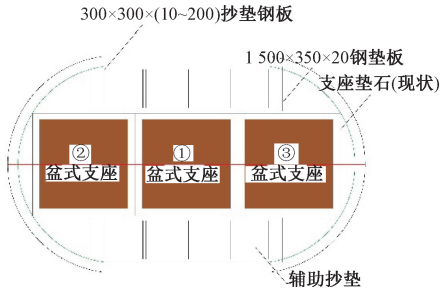


图4 PLC 智能控制平台

Fig. 4 PLC intelligent control platform

3.2.3 支座更换

顶升调坡完成后,需根据梁体新的空间位置和支承条件实施垫石改造及支座更换。边墩处作业条件较好,可直接进行支座更换;中间花瓶墩处3个支座间距小、操作空间有限,常规整体拆换难度较大。针对该问题,采用交替抄垫与分步置换相结合的方法,在有限空间内分阶段完成旧支座拆除、新支座安装及垫石改造。其基本思路为:在梁体顶升至设计控制高度后,先利用千斤顶及辅助抄垫形成临时稳定支撑,再通过对部分支座位置实施先行抄垫与局部卸载,分阶段拆除旧支座并完成垫石改造;随后安装新支座并逐步解除临时抄垫,使梁体荷载在施工过程中平稳转移,最终实现支撑体系的安全转换。该方法规避了在狭小空间内一次性整体拆换支座所带来的受力突变风险,为后续整体落梁及支座受力恢复提供了可靠条件。

3.2.4 整体落梁

顶升调坡及支撑体系转换完成后需实施整体落梁,使梁体逐步恢复至设计支承状态。由于横坡调整后原楔形块底面已难以满足与支座密贴的要求,且现场空间限制了凿除重建作业,因此采用镀锌楔形钢板(见图5)进行调平处理。楔形钢板厚度按式(1)进行计算,四角预留与支座对应的4个螺栓孔,并采用粘钢胶固定,防止钢板滑落。

$$h_1 = h_2 = 20 - bi/2 - aj/2 \quad (1)$$

式中: i 为线路横坡坡度; j 为线路纵坡坡度。

参照顶升控制方式,整体落梁过程划分为100个分过程,单次落梁行程控制在2mm以内,并将不平衡位移差控制在2mm以内。施工中继续使用PLC智能控制系统对各支撑点实施协调控制,并同步监测位移和受力变化,使梁体按既定姿态逐步下

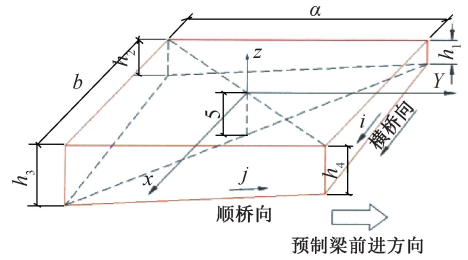


图5 楔形钢板

Fig. 5 Wedge-shaped steel plate

放,避免局部受力突变和支承失衡。落梁完成后,应确保支座与楔形钢板密贴良好,利用原有锚栓完成支座固定,解除临时约束并安装防尘橡胶片,最终实现梁体受力体系恢复和支承状态稳定。施工完成后支座如图6所示。



图6 施工完成后支座

Fig. 6 Bearing after construction completion

4 多样化监测

在顶升施工中,采用多层次、多手段的实时监测体系确保过程可控与结构安全。监测方式如表2所示。

表2 监测方式

Table 2 Monitoring methods

监测方式	精度/范围	功能
拉线式位移传感器	$\pm 0.1\text{mm}$ (行程 300mm)	实时动态监控梁体位移,槽钢防护抗干扰
百分表+全站仪	高程误差在 $\pm 10\text{mm}$	复核位移数据,控制顶升姿态
应变监测装置	应力增量 $\leq 1.2\text{MPa}$	布设于中墩顶面与跨中底面,实时预警结构健康
液压系统数字监控	压力超限自动停机	PLC平台可视化显示压力/位移数据
人工巡查	—	对跨中、墩顶等重点部位外观进行检查,发现裂缝等异常立即停工处理

5 效益分析

5.1 经济效益

1) 工期显著缩短。顶升前期准备可独立提前进行。交通转换完成后即可启动顶升,全程仅需约20d。相比于传统拆除重建(约75d),单幅桥即可缩短工期约55d,整体工程可缩短工期约110d。

2) 成本大幅度降低。桥梁拆除重建方案费用

为402万元(旧桥拆除、新建现浇梁分别为83万元、319万元),顶升方案费用为91.6万元(材料、人工和设备费用分别为42.6万元、7万元、42万元)。桥梁顶升方案相比于拆除重建方案,节省费用约310.4万元。此外,旧桥紧邻新建桥梁,大规模拆除重建的强烈振动和扰动易危及邻近新建桥梁的安全稳定。顶升技术则在大幅度降低成本的同时,凭借扰动小、影响可控的优势,有效降低了邻近施工的风险成本。

5.2 社会环保效益

1) 环保优势显著。与拆除重建相比,同比例异步顶升施工几乎不产生噪声,避免拆除过程中产生的建筑垃圾与扬尘污染;最大限度地利用原有桥梁结构,减少了资源浪费,符合绿色施工理念,最大限度地保护生态环境。

2) 社会影响积极正向。旧桥地处生活区,采取顶升施工无须中断交通,避免因拆除重建导致的交通拥堵和出行不便,大幅度降低对居民生活影响;同时规避噪声、扬尘引发的矛盾,提升社会认可度。

3) 推动技术进步与行业发展。该技术的智能化推动施工由人工向科技驱动转型,减少人工误差,提升工效与安全性,促进桥梁顶升领域智能化发展,示范效应显著。

6 结语

1) 复杂调坡条件下,旧桥连续梁横桥向各支撑点顶升量呈差异化分布,施工控制的关键在于以旋转轴线为基准实现各控制点位移的协调分配,从而保证梁体姿态调整的连续性与稳定性。

2) 采用PLC智能控制系统实施多点分步异步顶升,结合梁体自重反压预压、支座更换及全过程实时监测,可有效控制顶升过程中的位移偏差、受力变化和落梁适配风险。

3) 工程应用表明,同比例异步顶升智能施工技术能实现旧桥连续梁桥面标高及纵横坡协调调整,保证顶升、支座恢复和整体落梁过程平稳实施,适用于既有高速公路改扩建中连续梁调坡顶升施工。

参考文献:

[1] GAO H S, LI B C, JIAN J S, et al. Integral jacking of concrete continuous box beam bridge [J]. Structures, 2023, 54: 1026-1045.

[2] 晏江驰. 现浇连续箱梁顶升设计与施工技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(16): 156-158.

YAN J C. Research on jacking design and construction technology of cast-in-place continuous box girder[J]. Theoretical research in urban construction, 2025(16): 156-158.

[3] 赵罡颀. 长距离组合箱梁整体同步顶升施工技术[J]. 施工技

术, 2020, 49(6): 80-83.

ZHAO G J. Construction technology of integral synchronous jacking of long-distance composite box girder [J]. Construction technology, 2020, 49(6): 80-83.

- [4] 吕小兵. PLC液压同步顶升控制系统在桥梁支座更换中的应用研究[J]. 价值工程, 2024, 43(21): 91-93.
- LÜ X B. Research on the application of PLC hydraulic synchronous jacking control system in bridge support replacement [J]. Value engineering, 2024, 43(21): 91-93.
- [5] 潘文学, 潘震. 多跨简支连续组合箱梁桥整体交替同步顶升施工及应用研究[J]. 建筑监督检测与造价, 2022, 15(5): 47-52, 68.
- PAN W X, PAN Z. Research on integral alternating synchronous jacking construction and application of multi span simply supported continuous composite box girder bridge [J]. Supervision test and cost of construction, 2022, 15(5): 47-52, 68.
- [6] 罗李盛. PLC液压同步顶升调整桥梁坡度施工的技术应用[J]. 智慧城市, 2021, 7(23): 147-148.
- LUO L S. Technical application of PLC hydraulic synchronous jack-up to adjust bridge slope construction [J]. Intelligent city, 2021, 7(23): 147-148.
- [7] 陈帅, 肖瑶, 张阳. 桥梁顶升施工工艺质量与造价控制研究[J]. 中国招标, 2025(5): 139-141.
- CHEN S, XIAO Y, ZHANG Y. Research on quality and cost control of bridge jacking construction technology [J]. China tendering weekly, 2025(5): 139-141.
- [8] 柳永华. 浅谈桥梁拼宽改造中顶升施工技术的应用[J]. 四川水泥, 2025(2): 114-116.
- LIU Y H. Discussion on the application of jacking construction technology in bridge widening reconstruction [J]. Sichuan cement, 2025(2): 114-116.
- [9] XU H, DONG Y D, SONG X, et al. Numerical and experimental investigation of the jack-up technology based on anti-overturning of the single-column pier bridge [C]//Proceedings of the 2023 5th International Conference on Structural Seismic and Civil Engineering Research (ICSSCER 2023), 2023.
- [10] ZHANG L, SHANG P. Construction technology of top push method for erecting large span steel box beams of railway bridges [J]. Electronics science technology and application, 2024, 11(4): 8462.
- [11] 刘杰, 贾秋炳. 多桥梁顶升方式整体同步施工技术应用研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(21): 181-184.
- LIU J, JIA Q B. Study on application of integral synchronous construction technology of multi-bridge jacking method [J]. Technology innovation and application, 2024, 14(21): 181-184.
- [12] WANG J J, ZHAO J Y, LI W L. The mathematical modeling, simulation, and practice of a multipoint synchronous lifting control case study for bridges [J]. Mathematical problems in engineering, 2019, 2019(1): 5936434.
- [13] LIU X F, LI M L, GENG Z, et al. Research on mechanical characteristics and key technology of integral intelligent lifting construction of large-span heavy steel box girder [J]. PLoS One, 2025, 20(6): e0326918.