DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260741

桥梁整体顶升钢支撑与同步控制关键技术研究

陆　涛
(上海隧道工程有限公司,上海市 200032)

摘　要: 针对城市快速路改造大纵坡多联连续梁整体顶升存在同步控制精度偏低、超高钢支撑稳定性不足、梁体纵向伸缩诱发水平偏移等难题,依托上海S32立交盐朝公路跨线桥(最大顶升高度6.489 m)工程,研发适配超大高差纵坡工况的一体化顶升成套技术。提出“交替分级顶升+格构钢管支撑+模糊PID双闭环液压同步+三维动态纠偏”技术体系;结合几何变形理论、MIDAS屈曲仿真、PLC控制算法优化与现场全参量监测开展系统研究。研究结果表明,顶升同步精度≤0.5 mm,4×4ϕ609×16格构支撑一阶稳定系数为17,协同纠偏可控制梁体水平位移≤5 mm。相较拆建方案,成本降低35%、工期缩短40%、全生命周期碳排放减少42%,可为同类工程提供理论依据与标准化施工范式。

关键词: 大纵坡;交替分级顶升;格构钢支撑;模糊PID双闭环;三维动态纠偏;碳排放
中图分类号: U443;TU997　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0378-06

Research on Key Technologies of Steel Supports and Synchronous Control for Integral Bridge Jacking

LU Tao
(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Aiming at the problems such as low synchronous control accuracy, insufficient stability of ultra-high steel supports, and horizontal displacement induced by longitudinal expansion and contraction of the beam body in the overall jacking of large longitudinal slope multi-span continuous beams in urban expressway renovation, relying on the Shanghai S32 Interchange Yanchao Highway Overpass Project (with a maximum jacking height of 6. 489m), a complete set of integrated jacking technology suitable for the working conditions of super-large height difference longitudinal slope has been developed. A technical system of “alternating staged jacking + lattice steel pipe support + fuzzy PID double closed-loop hydraulic synchronization + three-dimensional dynamic deviation correction” is proposed. A systematic study is carried out by integrating geometric deformation theory, MIDAS buckling simulation, PLC control algorithm optimization and on-site full-parameter monitoring. The results show that the synchronous jacking accuracy is ≤ 0. 5mm. The first-order stability coefficient of the 4×4ϕ609×16 lattice support is 17. The coordinated deviation correction can control the horizontal displacement of the beam body ≤ 5mm. Compared with the demolition and construction schemes, the cost is reduced by 35%, the construction period is shortened by 40%, and the carbon emissions throughout the life cycle are reduced by 42%, which can provide a theoretical basis and standardized construction model for similar projects.

Keywords: large longitudinal gradient; alternating staged jacking; latticed steel support; fuzzy PID dual closed-loop; 3D dynamic deviation correction; carbon emission

0　引　言

城市交通路网改扩建需求持续增长,桥梁整体顶升技术凭借经济性优、绿色无损、对交通干扰小等优势,已成为既有桥梁改造工程的主流施工方案。据中国公路学会桥梁和结构工程分会(2023)[1]统计,国内近5年桥梁顶升工程年均应用增速达27%,现有工程最大顶升高度已突破9.8 m。但大高差调坡顶升施工仍存在3类突出技术难题:多联连续梁顶升同步控制精度不足,易诱发梁体附加内力;超高竖向支撑体系整体稳定控制难度大;复杂纵坡工况下梁体纵向、横向位移难以协同调控。

以盐朝公路跨线桥整体顶升工程为依托,严格遵循《桥梁顶升移位改造技术规范》(GB/T 51256-2017)[2]相关技术规定,创新提出交替分级顶升成套

收稿日期:2026-07-05
作者简介:陆涛(1989—),男,本科,工程师,从事桥梁施工工作。

施工工艺。通过有限元数值仿真与现场全过程动态监测相结合的研究手段,系统性攻克上述技术瓶颈。工程应用结果表明,该成套技术体系可降低施工成本 35%、缩短施工工期 40%,具备显著的经济、环境与社会效益。

1　工程概况与施工难点

1.1　项目背景

盐朝公路跨线桥位于浦东国际机场交通枢纽核心区,原桥建成于 2015 年,上部结构为简支变连续小箱梁(5 片),下部结构为带盖梁双柱墩(ϕ1.2 m),承台尺寸 9.65 m×5.8 m,高 2 m,桩基础。

因 S32 立交改建需要,需将东幅桥(18# ~ 23#墩)最大顶升 6.489 m。改造后桥梁需满足城-A 级荷载标准,调坡纵坡变化达 5.93%(见表 1),涉及 2 联连续梁(30 m+30 m+25 m、30 m+30 m)的整体抬升。

1.2　主要技术难点

(1)多联连续梁协调控制:各联顶升高度差异显著(0 ~ 6.489 m),需保证不同步位移控制在 5 mm 内。

(2)支撑体系稳定性:最高支撑达 12.5 m,需承受 1 250 t 荷载。

(3)动态位移控制:复杂纵坡条件下开展桥梁顶升作业时,梁体水平投影长度将发生改变,由此产生附加水平位移,此类调坡顶升控制问题已有学者开展专项研究[3]。钢支撑体系应具备充足侧向刚度,用以抵御梁体偏移所施加的水平荷载;同时需设置配套调控措施,实时消除主梁伸长变形对墩柱垂直度产生的不利影响。

1.3　主要解决方案

(1)通过 CAD 模拟得到东、西半幅梁端伸长量分别为 54、57 mm。结构安全允许时可切削伸缩缝梁端 10 ~ 20 mm,降低顶升风险,满足后期伸缩缝安装宽度要求。

(2)顶升前伸缩缝设置楔形垫块,维持缝宽恒定;各墩及伸缩缝处设置钢纵横限位,减小梁体投影变形产生的水平力。

(3)采用 PLC 液压同步系统整体比例顶升,各墩同步抬升,理论位移差可控制在 3 mm 以内。

(4)箱梁端横梁底部布设步履平移装置,抵消调坡投影变形影响;利用梁体与盖梁滑移释放纵向附加应力,同步实现横坡纠偏。

2　大纵坡多联连续梁交替分级顶升工艺

突破传统随动顶升局限,参照连续梁同步顶升团体标准[4],采用 A/B 组千斤顶交替作业模式(见图 1),可有效解决多联梁不同步位移过大问题。

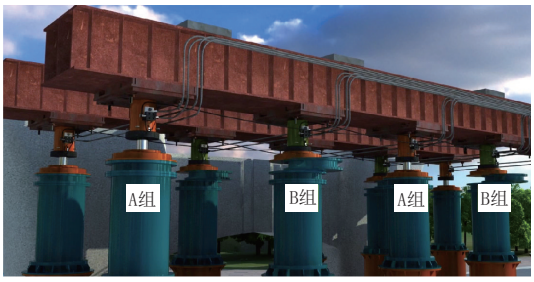


图 1　顶升系统示意图

(1)初始阶段:B 组千斤顶承重,A 组安装钢支撑;

(2)顶升循环:A 组顶升→B 组卸载→B 组接高→交替循环;

(3)安全机制:每台千斤顶设置止回阀避免突发沉降,顶升设备安全防护要求符合桥梁顶升团体标准[5]。

通过技术对比:采用 A、B 千斤顶分区交替承荷、分级接高支撑,单次顶升完成荷载完整置换,支撑压缩变形每循环归零,从根源消除累积位移误差;同步控制精度由传统随动顶升≤3 mm 提升至≤0.5 mm,结构安全系数由 1.5 提升至 2.5,施工效率提升 50%,适配纵坡 5.93%、多墩顶升高差达 6.48 m 的极端工况。

3　支撑体系设计

本工程采用ϕ609×16 mm Q345B 钢管搭建 4×4 格构竖向支撑,相关施工工艺参考文献[6]。支撑纵向

表 1　桥墩设计要素表

	墩号	PZE01(18)	PZE02(19)	PZE03(20)	PZE04(21)	PZE05(22)	PZE06(23)
	跨号		K19	K20	K21	K22	K23
	跨径/m		30	30	25	30	30
东半幅	纵坡变化/%		3.46	3.46	3.46	5.93	5.93
	理论重量/t	540	1 250	1 175	1 175	1 250	650
	顶升高度/m	0	1.038	2.076	2.914	4.719	6.489
	原始墩高/m	5.129	4.880	4.767	3.898	4.085	3.208

间距2.9、3.05、2.9 m,横向均匀布置传荷;沿腹板每2 m布设100×6 mm Q235方钢水平桁架,形成网格约束结构,抑制钢管柱侧移(见图2)。

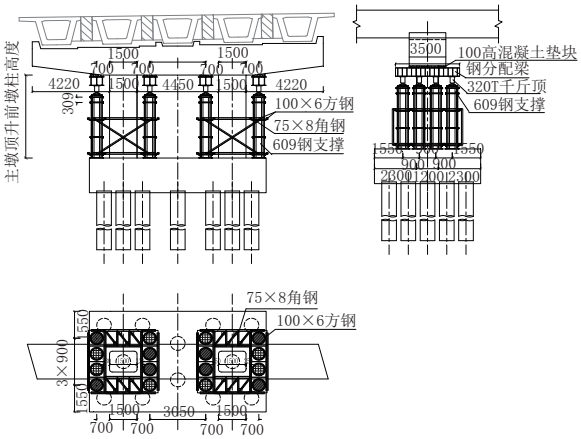


图2　主墩顶升结构布置图(单位:mm)

立柱采用M20、8.8级高强螺栓法兰连接,以≤2 mm不锈钢垫片将法兰间隙调至0.5 mm内,保证立柱垂直度;方钢与法兰满焊,焊缝高度≥8 mm,焊接执行《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》(JTG/T 3651—2022)[7],节点抗剪承载力为设计荷载的1.2倍。有限元验算表明,该支撑体系可承受顶升过程中的复杂组合应力(见图3)。



(a)　(b)

图3　顶升设备现场布置图

采用MIDAS开展钢支撑受力仿真,超高格构支撑有限元建模方法可参考束学智等研究成果[8],结构材料均采用Q235钢材,顶升结构高度按照最高2.0 m计,钢支撑高度模型取10 m。

强度分析:支撑体系最大等效应力为111.8 MPa(见图4),小于Q235钢材设计强度值205 MPa,满足《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)[9]相关规定。

屈曲分析:第一阶失稳模态中,最小的稳定系数为17>4.0(见图5)。

位移控制:最大侧移量2.1 mm,远低于规范限值10 mm(见图6)。

4　同步控制系统

4.1　硬件配置

执行单元:PLC液压同步控制系统是大高度桥

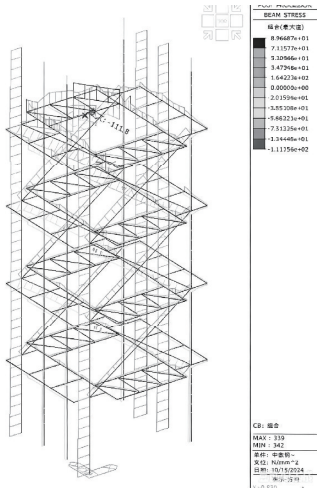


图4　最不利荷载作用下应力图

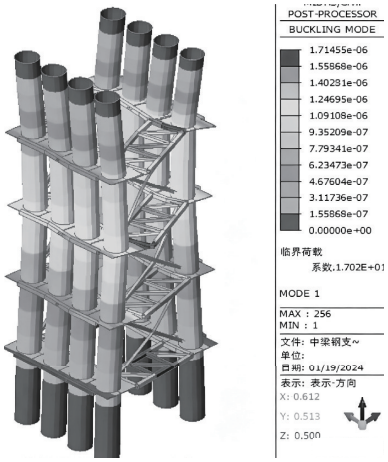


图5　一阶失稳模态

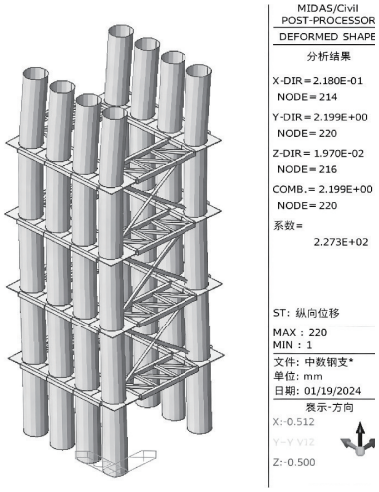


图6　顶升钢支撑位移控制

梁顶升核心装备[10],配置4台320 t级液压千斤顶(行140 mm),配备高精度压力传感器(误差±0.5%FS),单组最大推力达1 600 kN,同步精度控制在±0.5 mm以内。

传感单元:沿桥梁纵向布置32个激光位移计(测量精度0.01 mm)及24个应变片(灵敏度1 με),实时采集顶升位移和结构应力数据。

控制核心:基于西门子S7-1500系列PLC搭建控

制系统,PLC 液压同步顶升系统基础应用理论可参考早期工程研究[11],采样频率 100 Hz,支持多通道数据同步处理。具备故障自诊断和冗余备份功能。

4.2　控制策略

系统采用位移-力双闭环模糊 PID 自适应同步控制体系,该控制策略在高速桥梁顶升工程中已得到验证[12],可实现毫米级同步精度与荷载动态平衡:

(1)现有技术短板:单一位移闭环控制未考虑各墩荷载不均、钢支撑压缩非线性、纵坡梁体滑移附加力,易出现油压震荡、顶升超调;

(2)创新算法改进:构建激光位移高精度外环 + 千斤顶油压内力内环双闭环,引入模糊 PID 动态修正控制参数,设置 5% 荷载偏差力补偿阈值、±1 mm 位移预警阈值双重安全逻辑;

(3)理论突破:实现多支点非线性耦合荷载下毫米级同步调控,解决大纵坡调坡顶升梁体纵向伸长带来的荷载动态偏移难题。

5　动态纠偏措施

5.1　墩柱纠偏

利用步履器与墩柱限位组合进行纠偏调节。

(1)调坡顶升过程中,梁体旋转导致投影长度增大,纵向摩擦力作用于墩身,曲线连续梁顶升采用步履器实现墩柱动态纠偏。

(2)调坡顶升为整体顶升,为减小步履器纠偏对主梁的顺桥向作用力,采用逐墩纠偏方式。

(3)顶升全过程主梁纵向变形为先伸长、后回缩,需根据变形工况对步履器顶推方向进行一次反向切换。

5.2　主桥偏移

采用楔形钢板纠偏。

如图 7 所示,在顶升过程中,随着纵坡调整,梁体投影长度增长。由于梁体伸长,千斤顶中心会偏离支撑中心,需要将千斤顶调整对中支撑中心;梁体旋转时,千斤顶随之旋转,需在千斤顶尾部增加楔形块调平。

每 5 个行程楔形钢板调整一次,保证千斤顶垂直度≤5‰。

6　施工监测与预警

6.1　监测体系

建立“三位一体”监测网络,见表 2。

6.2　预警机制

制定三级响应预案。

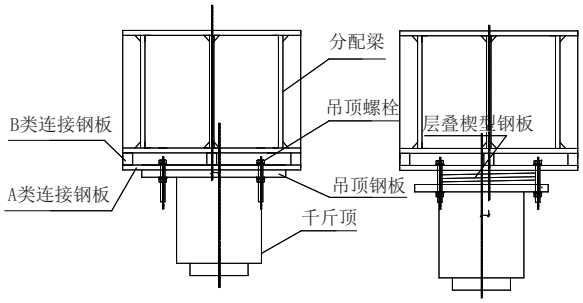


图 7　千斤顶安装示意图

表 2　“三位一体”网络监测表

监测项目	仪器	控制标准
梁体位移	全站仪(0.5″)	相邻点差≤2 mm
支撑应力	振弦式传感器	σ≤180 MPa
裂缝发展	裂缝观测仪	宽度增量≤0.02 mm

Ⅰ级(黄色):位移差>2 mm,自动暂停;

Ⅱ级(橙色):应力超限 85%,人工干预;

Ⅲ级(红色):结构异常,人员撤离;

6.3　测点布设

如图 8 所示,顶升期间位移监测点每联 3 跨设 8 个测点布置在墩顶位置,东半幅共 14 个测点。

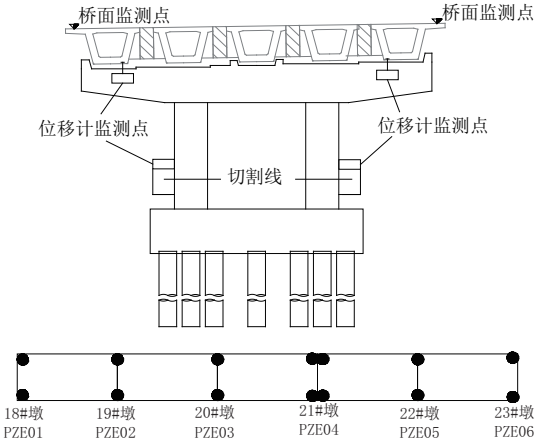


图 8　位移监测点布置示意图

如图 9 所示,顶升期间位移监测点根据结构受力特点,分别在每一联墩顶负弯矩区布设 6 个应变,东半幅设 3 个监测断面,共 18 个梁体应变测点。

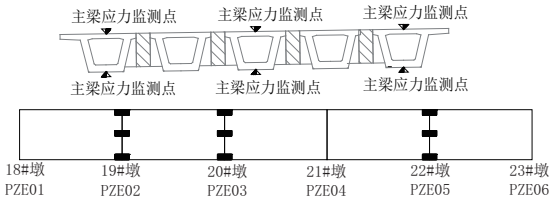


图 9　应力监测点布置示意图

7　实施效果

7.1　顶升实测效果

由表 3、4、5 及图 10 可见,桥面高程顶升误差、桥

墩高程顶升误差、桥面横向位移均在 5 mm 以内。

表 3　桥面顶升数据测量

测点位置	墩柱顶升高度/mm	桥面顶升高程/m	实测高程/m	误差/mm
18#东侧	0	11.609 0	11.610 6	1.6
18#西侧	0	12.026 4	12.023 4	−3.0
19#东侧	100 8	12.367 4	12.37	2.6
19#西侧	100 8	12.766 1	12.768 2	2.1
20#东侧	201 6	12.967 8	12.970 7	2.9
20#西侧	20 16	13.344 4	13.347 1	2.7
21#东侧	285 6	13.353 4	13.353 5	0.1
21#西侧	285 6	13.690 7	13.692 1	1.4
21#东侧	285 6	13.320 1	13.319 3	−0.8
21#西侧	285 6	13.768 6	13.770 8	2.2
22#东侧	463 1	14.378 0	14.381 4	3.4
22#西侧	463 1	14.838 6	14.835 9	−2.7
23#东侧	640 5	15.302 3	15.302 2	−0.1
23#西侧	640 5	15.751 7	15.753 5	1.8

表 4　桥面顶升数据测量

桥墩编号	测点编号	桥墩顶升高度/m	理论高程/m	实测高程/m	误差/mm
18#墩	18#1	0	9.325	9.3247	−0.3
	18#2	0	9.364 6	9.366 2	1.6
19#墩	19#1	1.008	10.275 4	10.278 1	2.7
	19#2	1.008	10.380 2	10.383 3	3.1
	19#3	1.008	10.129 1	10.132 6	3.5
	19#4	1.008	10.467 8	10.471	3.2
20#墩	20#1	2.016	10.733 4	10.734 6	1.2
	20#2	2.016	10.864 2	10.866 6	2.4
	20#3	2.016	10.120 1	10.122 3	2.2
	20#4	2.016	10.549 4	10.551 3	1.9
21#墩	21#1	2.856	11.08	11.081 2	1.2
	21#2	2.856	10.323 7	10.324 2	0.5
	21#3	2.856	11.105	11.105 6	0.6
	21#4	2.856	11.392 7	11.392 2	−0.5
22#墩	22#1	4.631	11.946 5	11.946 1	−0.4
	22#2	4.631	12.409 8	12.407 7	−2.1
	22#3	4.631	12.205	12.204 3	−0.7
	22#4	4.631	12.439 9	12.438 1	−1.8
23#墩	23#1	6.405	13.095 8	13.097 3	1.5
	23#2	6.405	13.375 8	13.374 5	−1.3
	23#3	6.405	13.118 1	13.118 5	0.4
	23#4	6.405	13.355 3	13.356 4	1.1

表 5　桥面横、纵向位移测量数据　　单位:mm

联号	墩号	横向位移	纵向位移
第一联	18#墩	2	3
	21#墩	2	4
第二联	21#墩	3	3
	23#墩	4	2

注:横向位移以向东为正,纵向位移以向南为正。

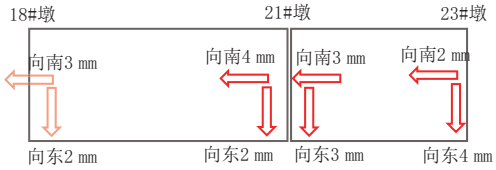


图 10　纵、横向偏移最大值示意图

7.2　顶升同步精度

通过激光位移计实时监测 14 个顶升点位移数据(采样频率 1 Hz),结果显示所有点位同步偏差均控制在 0 ~ 3 mm 范围内,达标率 100%。其中最大瞬时偏差为 2.7 mm(东幅桥第 2 联顶升阶段),远低于主梁不同步竖向位移限值 5 mm。采用双闭环控制算法,未出现异常抖动或超调现象,表明控制系统对非线性荷载响应良好。

7.3　水平位移与结构变形

经全站仪三维扫描监测,顶升后梁体横向最大偏移量为 4 mm,较理论报警值 10 mm 减小 60%。墩柱偏移量均控制在 0 ~ 5 mm 范围内,未触发限位装置报警。特别地,在顶升量最大的 23#墩,采用步履行走器进行动态纠偏后,墩柱最终偏移量仅为 4 mm。

7.4　混凝土结构完整性

裂缝控制:全过程采用精度 0.01 mm 的裂缝观测仪实施实时跟踪监测。监测数据显示,既有桥梁原有裂缝日宽度变化量小于 0.02 mm,顶升施工阶段未产生新增裂缝,各项指标满足《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)[13]相关限值要求。

伸缩缝调节:通过桥面纵向限位,顶升过程中动态调整缝宽,将主梁伸缩缝变形量控制在±2 cm 内,为主梁后期温度变化引起的伸长与缩短空间。

7.5　钢支撑体系性能验证

应力监测:在格构柱关键截面布置 14 组振弦式应变片,实测应力最大值为 115 MPa(设计值 215 MPa),应力比 53.5%,表明支撑体系处于弹性工作阶段。

变形监测:钢管柱竖向压缩量最大为 1.8 mm,与有限元计算值(2.1 mm)吻合度达 90%,验证了施工模拟的准确性。

8　经济效益与社会效益

对比传统拆除重建方案,旧桥整体顶升具备显著经济优势[14],本工程通过技术创新与精细化管理实现综合效益提升,具体如下:

经济效益:较传统拆除重建方案节约造价 1 520 万元,主要得益于旧桥结构的完整保留与模块化钢支撑体系的重复利用率(达 90%)。工期 45 d,

相比拆除重建方案缩短 20 d，可有效减少期间设备租赁费用。

环保效益：全过程践行绿色施工理念，采用无损切割与旧料资源化再利用工艺，共计削减建筑垃圾 3 800 t，相较传统拆除重建方案碳排放量降低 42%，各项指标满足《建筑与市政工程绿色施工评价标准》（GB/T 50640—2023）[15]三星级绿色施工要求，可为城市交通基础设施改扩建工程打造低碳可持续施工示范样板。

社会效益：本工程顶升过程中具备足够的安全储备，并有效控制顶升偏位，对浦东国际机场 T3 航站楼交通提升具有重大意义。

参考文献：

[1] 中国公路学会桥梁和结构工程分会 .2023 中国桥梁顶升技术发展报告[R]. 北京：交通出版社，2023.

[2] GB/T 51256—2017 桥梁顶升移位改造技术规范 [S].

[3] 胡承泽，罗冰，高洪波，等 . 装配式桥梁顶升调坡关键技术研究[J]. 施工技术，2024，53（12）：135-139；161.

[4] T/JSJTQX 42—2023 公路连续梁桥整联同步顶升施工技术规程 [S].

[5] T/JSJTQX 53—2024 桥梁断柱整体顶升施工技术规程 [S].

[6] 廖玉珍 . 钢箱梁和混凝土箱梁连续梁桥顶升技术在城市既有跨线桥改造中的应用[J]. 施工技术，2014，43（17）：77-81.

[7] JTG/T 3651—2022 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范 [S].

[8] 束学智 . 超高顶升高度桥梁钢支撑体系有限元仿真分析[J]. 隧道建设（中英文），2021，41（增刊 1）：246-251.

[9] GB 50017—2017 钢结构设计标准 [S].

[10] 辛崇升，卢忠梅，赵毅 .PLC 液压控制系统在桥梁整体同步顶升中的应用[J]. 价值工程，2015，34（21）：118-121.

[11] 汪学谦，汪晓岚，蓝戊己 .PLC 控制液压同步顶升系统在桥梁施工中的应用[J]. 世界桥梁，2005（3）：62-65.

[12] 袁臻，朱文霞，肖汉 .PLC 同步顶升系统在高速公路桥梁改造中的应用[J]. 中外公路，2013，33（5）：170-173.

[13] JTG/T J21—2011 公路桥梁承载能力检测评定规程 [S].

[14] 覃捷 . 旧桥整体同步顶升及支座更换施工技术探讨[J]. 西部交通科技，2020（2）：110-113.

[15] GB/T 50640—2023 建筑与市政工程绿色施工评价标准 [S].

（上接第 363 页）

参考文献：

[1] 陶东辉 . 泥水平衡顶管下穿高速桥梁施工关键技术研究[J]. 建筑技术开发，2024，51（5）：122-124.

[2] 赵伟娟 . 粉土地层顶管下穿高速施工关键技术研究[J]. 工程建设与设计，2023（23）：172-174.

[3] 张旭东，王建平，魏艳菊，等 . 既有公路下穿管道顶管法施工作业安全控制研究[J]. 四川建材，2025，51（1）：154-157.

[4] 吴森阳，陈相，陈棚，等 . 大断面小净距矩形顶管法地铁车站施工风险控制研究—以广州地铁海傍站为例[J]. 隧道建设（中英文），2025，45（2）：382-391.

[5] 马鹏，岛田英树，马保松，等 . 矩形顶管关键技术研究现状及发展趋势探讨[J]. 隧道建设（中英文），2022，42（10）：1677-1692.

[6] 郑鹏程，黄家豪，刘维，等 . 浅覆土矩形顶管下穿机场高速地表变形规律研究[J]. 都市快轨交通，2025，38（3）：91-99.

[7] 许源 . 顶管法在城市中心轨道交通施工中的应用[J]. 城市道桥与防洪，2024（6）：204-207.

[8] 丁菲，邓美龙，郝本峰 . 明挖与顶管法组合施工管廊接合部结构设计与施工[J]. 建筑技术，2023，54（19）：2398-2400.

[9] 李琳，张文涛，冯明月 . 大断面长距离矩形顶管施工变形控制关键因素研究[J]. 粉煤灰综合利用，2025，39（4）：111-116.

[10] 王成宇 . 矩形顶管施工环境变形响应及顶进参数控制研究[D]. 合肥：安徽建筑大学，2024.

[11] 焦吉利 . 煤层气管顶管施工引起的地面变形模拟研究[D]. 包头：内蒙古科技大学，2022.

[12] 刘勇 . 长距离泥水平衡顶管法在市政道路给排水中的应用研究[J]. 建筑技术开发，2025，52（4）：69-71.

[13] 姜仲豪 . 城市中心大断面矩形顶管机弃壳接收及加固技术综述[J]. 隧道与轨道交通，2024（1）：29-33；81.

[14] 肖敏 . 基于复杂环境管线迁改项目的顶管法施工技术研究[J]. 中国新技术新产品，2024（3）：89-91.

[15] 李长康，张园园，赵勇坚 . 基于高敏地质和高标准文物保护条件下的顶管法关键施工技术[J]. 建设监理，2022（11）：85-88；101.

[16] 刘洪波，周顺华，吴迪 . 双层大断面顶管法在上海轨道交通 14 号线静安寺站施工中的应用[J]. 城市轨道交通研究，2022，25（6）：159-162.

[17] 刘吉贞 . 穿越既有地铁线路顶管施工关键技术[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报，2021，20（4）：30-34.