

桥梁顶升技术在内河航道改造中的应用

范晓君

(浙江省交通规划设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 在内河航道提升改建过程中,过往建设的桥梁通航净高较低,不能满足高等级航道的通航需求,往往成为航道提升过程中的限制因素。桥梁顶升技术对既有桥梁的改造相比拆除重建方案节约资金、节省工期。现以长湖申线航道西延工程紫梅桥改建工程为例,该桥采用PLC液压同步顶升系统,液压千斤顶与机械跟随千斤顶组合的顶升方法,安全、快速地完成了对紫梅桥全桥整体顶升的改建任务,使改建后主桥通航孔满足 $60\text{ m} \times 7\text{ m}$ 限制性Ⅲ级航道通航净空,达到航道提升的改建目标。顶升改建方案节约建设资金、缩短施工周期,具有良好的经济及社会效益。

关键词: 桥梁顶升;液压千斤顶;机械跟随千斤顶

中图分类号: U445.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)10-0206-07

0 引言

随着内河航道等级的提升,桥梁净空不足成为航道提升的制约。在浙江省内河航道改造过程中,较多跨航桥梁建成时间较短,使用条件较为良好,采用桥梁顶升技术对既有桥梁改造可节约资源、节省工期。现以长湖申线航道西延改造工程中紫梅桥顶升作为案例,阐述内河航道提升过程中顶升桥梁的设计思路^[1-3]。

1 工程概况

长湖申线西延航道作为长湖申线航道的延长线,由安吉阳光坝至吴兴区湖州船闸,是长三角地区重要的内河水运通道,全线规划为Ⅲ级航道,改建后各桥位处需满足 $60.0\text{ m} \times 7.0\text{ m}$ 通航净空。

紫梅桥位于安吉县梅溪镇镇区,于2002年建成。桥梁全长141 m,桥梁配跨为 $16+80+2 \times 16+13(\text{m})$,主桥为刚性吊杆系杆拱桥,上跨长湖申线西延航道,通航净高不足7 m,是此次航道改建过程中的制约因素。

主桥计算跨径78 m,布置两榀钢筋混凝土拱肋,系梁、横梁、吊杆均为预应力混凝土结构,主桥下部结构为双柱接高低盖梁式桥墩,基础为群桩接承台式基础;引桥为16 m、13 m预应力混凝土简支空心板,下部结构为桩柱接盖梁式基础。

1.1 原桥技术标准

道路等级:三级公路,设计速度30 km/h;

设计荷载:汽-20,挂-100,人群 3.5 kN/m^2 (顶升后荷载等级维持原桥);

线型要素:西侧纵坡3%,东侧纵坡2%,竖曲线半径2 000 m,横坡1.5%。

1.2 桥梁断面

引桥标准断面: $0.25+1.5$ (护栏人行道)+ 2×4.5 (机动车)+ $1.5+0.25$ (人行道护栏)=12.5(m);

主桥加宽断面: $0.25+1.5$ (护栏人行道)+ 1.15 (拱肋)+ 2×4.5 (机动车)+ 1.5 (拱肋)+ 0.25 (人行道护栏)=14.8(m)。

1.3 桥梁状况

根据《梅溪-荆湾K0+304新梅溪大桥桥梁定期检查报告》全桥技术状况评定为2类,主要存在桥面破损、混凝土剥落、表层钢筋锈胀等问题,经小修后可进行顶升改造。图1为紫梅桥实景。



图1 紫梅桥实景

2 桥梁改建

该桥改建采用全桥整体顶升技术,顶升后引桥加跨,改建后路线全长770 m,桥梁全长165 m,全桥配

收稿日期:2021-01-28

作者简介:范晓君(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁工程设计工作。

跨 2×20(加跨)+80+2×16+13(原桥整体顶升)(m)。

2.1 整体顶升

主引桥采用整体顶升，整体抬升高度 3.3 m，顶升后主跨可满足 60 m×7 m 限制性Ⅲ级航道通航净空，顶升后桥梁维持原桥竖曲线要素。

图 2 为紫梅桥已建桥型布置图。

2.2 引桥加跨

西侧桥头起点改建后存在下穿道路需求，拆除西侧 1 跨 16 m 空心板，新增 2 跨 20 m 简支空心板引桥。

2.3 台后接线

该桥整体抬升后，挖除原道路路基及浆砌片石挡墙，改用高填方泡沫混凝土路基填筑。

紫梅桥采用全桥整体同步顶升，顶升主桥及东侧 3 跨引桥，桥梁顶升总体施工流程为：辅助结构施工(反力基础、分配梁等)→设备的安装调试→封闭交通→断柱及顶升施工→墩台加高与改造→桥面系等附属设施重建。

3 顶升实施方案

3.1 技术难点

3.1.1 结构吨位大，顶升高度高

紫梅桥主桥总吨位约 3 300 t，全桥合计约 4 125 t，全桥整体顶升高度为 3.3 m，顶升具有吨位大，接高长度高的特点，需采用合理的顶升方案，选择合适的临时支撑体系。

3.1.2 主墩为水中墩且施工期保持通航

主跨通航孔为长湖申线西延航道，往来船舶多为集装箱和散货驳船，为浙北地区重要的山区河流航道，短时间内存在因降雨导致水位变化较大的可能。紫梅桥主墩位于水域中，顶升施工期间航道保持

通航，因此施工期需尽量避开汛期，且减少施工作业周期，以减少施工期船舶或漂流物撞击的风险。

3.1.3 主桥顶升精度控制严格

紫梅桥主桥为 80 m 刚性吊杆系杆拱桥，吊杆、系梁、横梁均为预应力混凝土结构，拱肋为钢筋混凝土结构，顶升期间主桥 4 支点不可能处于严格平动，会产生因各点的不同步而导致的结构扭转，进而引起结构的应力重分布，顶升就位后若无法消除该偏差，该应力即变为结构的永存应力，因此该项目对桥梁的顶升精度经计算后选择合理的控制区间，同时施工期增设主桥位移、应力、裂缝监控措施。

因此，如何选择合适的顶升系统，合理的顶升方案，保证顶升精度，确保桥梁安全、快速地施工，是该工程成败关键。

3.2 顶升高度

紫梅桥主跨通航孔航道设计线与桥梁设计中线交角 75°，通航孔按限制性三级航道 60 m×7 m 通航净空设计，净空最低点为主桥西侧 K1+967.6 处，桥面高程 10.615 m，桥梁结构高度(含铺装)为 1.468 m，梁底高程 10.615-1.468=9.147(m)；该桥位处设计最高通航水位 5.23m，净高 7m，梁底最低点净空富余 0.2 m，通航孔范围内梁底高程应不小于 5.23+7+0.2=12.43(m)；理论顶升高度 12.43-9.147=3.283(m)。此次采用主引桥整体顶升，各墩顶升高度均为 3.30 m，纵坡及竖曲线维持不变，西侧 3%，东侧 2.0%，竖曲线半径 2 000 m。图 3 为已建前后路线纵断面图。

3.3 顶升系统设计

3.3.1 控制系统

该桥为保证顶升精度和安全，采用 PLC 液压控

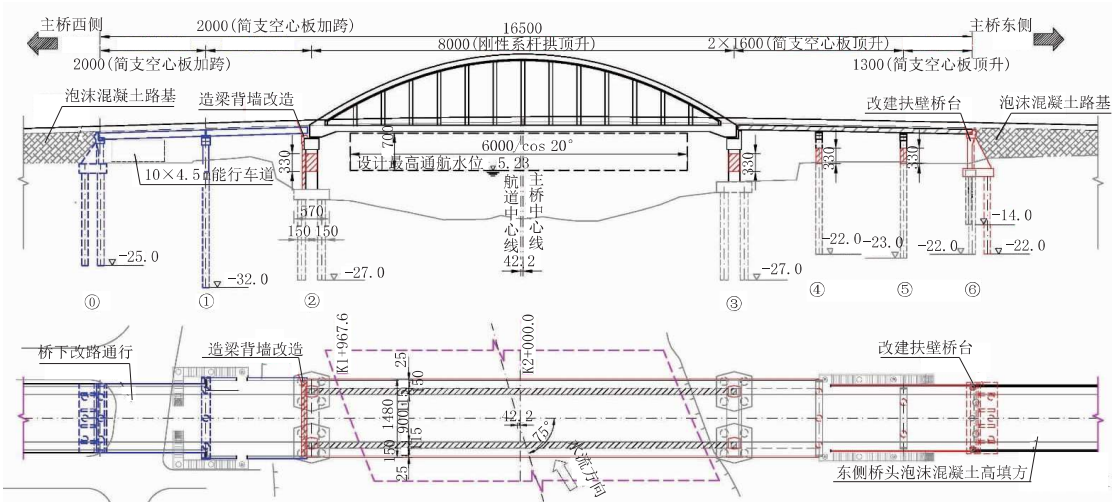


图 2 紫梅桥改建桥型布置图(单位:标高 m,其余 cm)

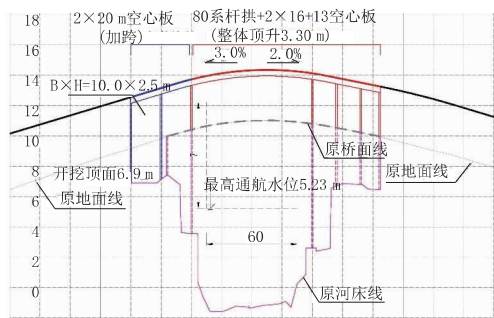


图3 改建前后路线纵断面图(单位:m)

制同步顶升系统。该系统建立在力和位移双闭环的控制基础上。由液压千斤顶根据实际荷重抬升桥梁,同时与相应的位移传感器组成位移闭环,以便控制桥梁顶升的位移和姿态,使顶升过程中对结构同时起到力和位移双控的目的。系统理论同步位移精度 $\pm 2\text{ mm}$,压力误差 $\leq 5\%$ 。

3.3.2 千斤顶选用和顶升方式

为防止在顶升过程中突发停电等意外情况,致使千斤顶卸载导致严重的安全事故,该工程采用液压千斤顶与机械跟随千斤顶组合的顶升方法。液压千斤顶需选择具有自锁定回油装置和顶升力调节装置的千斤顶;机械跟随千斤顶需选择具有位移实时跟随和断电等情况下机械自锁定功能装置的千斤顶。整个顶升过程以10 cm为一个行程,逐步顶升至设计标高。

每个顶升行程具体分为四个步骤(见图4)。

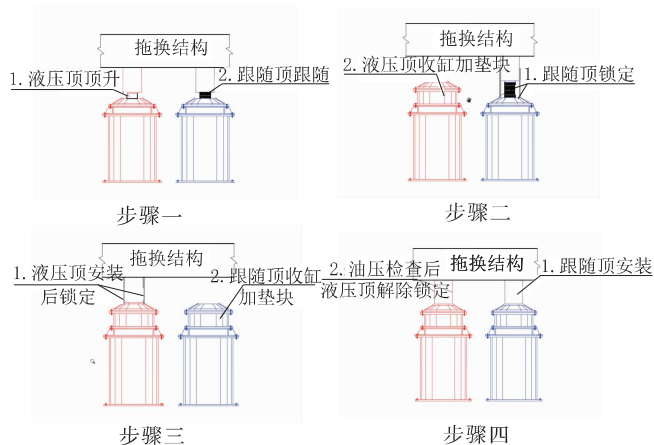


图4 一个顶升行程示意图

3.3.2.1 液压千斤顶顶升,机械跟随顶跟随

液压千斤顶向上顶升,机械跟随千斤顶实时进行无间隙旋转位移跟随,确保机械跟随顶与拖换结构间的密贴。机械跟随千斤顶内部采用机械螺纹承载,通过机械螺纹的弹性变形来承受上部的荷载。一旦液压千斤顶出现爆管等危险情况,可即时由跟随千斤顶进行支承,确保被顶升构件不致发生塌落风险。

3.3.2.2 机械跟随顶锁定,液压顶收缸

顶升至设计行程后,机械跟随顶机械锁定,此时机械跟随顶依靠自身结构承压,处于锁定阶段。待所有机械跟随顶锁定后,液压顶收缸,加垫10cm厚度支撑垫块。

3.3.2.3 液压顶锁定,机械跟随顶收缸

液压顶安装后进行机械锁定,此时液压顶依然保持供油,但可同时依靠自身结构锁定装置承压,机械跟随顶收缸,加垫10 cm厚支撑垫块。

3.3.2.4 机械跟随顶安装,检查后解除锁定

机械跟随顶安装后对动力系统进行检查,确保油压供电一切正常后,解除液压顶机械锁定,进入第二个行程以此往复。

3.3.3 临时支撑体系

顶升结构传力路径,反力基础 $\rightarrow$ 千斤顶临时支撑 $\rightarrow$ 托换体系 $\rightarrow$ 上部结构。

3.3.3.1 反力基础

原结构采用桩接承台式基础,且承台尺寸较大,可优先采用承台作为反力基础;原结构为桩柱式基础可采用抱柱梁反力基础(见图5、图6)。



图5 抱柱梁钢筋绑扎之实景



图6 抱柱梁浇筑之实景

3.3.3.2 钢管支撑

顶升临时支撑采用 $\Phi 609$ 钢管支撑,钢管外壁609 mm,壁厚16 mm,法兰直径750 mm。钢管支撑与结构反力基础通过化学螺栓连接,钢管支撑竖向采用法兰螺栓连接。钢管长度为10、20、50、100、200 (cm)模块化参数。顶升前按规定高度配置,顶升过程

中不断更换上述支撑垫块(见图 7、图 8)。



图 7 千斤顶和支撑钢管之实景



图 8 支撑钢管之实景

3.3.3.3 托换体系

原桥采用盖梁的下部结构形式,托换体系优先选用盖梁,盖梁外侧倒角可通过植筋后浇三角垫块,增加受力点;柱式墩和桥台位置可采用钢分配梁托换体系(见图 9、图 10)。



图 9 盖梁三角垫块施工之实景



图 10 桥台钢分配梁之实景

3.3.4 限位措施

由于千斤顶、钢支撑垂直度安装误差和各种不确定性因素的影响,顶升过程中上部结构不可避免地会存在水平位移偏差,需设置限位装置,对可能出现的水平偏位进行限制。

该桥采用钢结构限位柱,限位柱断面尺寸 500 mm × 500 mm。限位柱通过预埋钢筋固定于下部基础,与固结在上部的限位墩组成引桥限位措施。限位柱与限位墩之间预留 10 mm 间距(见图 10、图 11)。



图 11 桥墩限位柱之实景

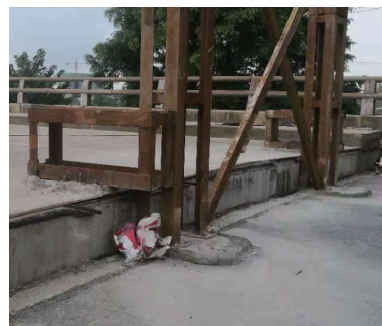


图 12 桥台限位柱之实景

3.3.5 墩柱接高

主桥断柱顶升就位后,凿除立柱上下切割面混凝土 30 cm,露出主筋长度不小于 6 倍钢筋直径,将立柱新老混凝土结合部分进行表面凿毛,主筋采用挤压套筒机械连接,达到一级接头标准。绑扎箍筋后浇筑混凝土,采用比原混凝土等级高一个标号的自密实补偿收缩混凝土,待混凝土强度达到设计强度后再拆除顶升设备(见图 13、图 14)。



图 13 立柱凿毛露出主筋之实景

3.4 主引桥顶升方案

3.4.1 千斤顶布置

顶升各墩位置均设置一组液压千斤顶,一组跟随千斤顶,每组的设计总吨位安全系数均不小于 2.0 (见表 1)。



图 14 立柱连接施工之实景

表 1 紫梅桥千斤顶布置表

位置	编号	总恒载 /kN	千斤顶		最小安全 系数
			顶升组 /t	跟随组 /t	
桥台	0	新建桥跨	—	—	—
引桥	1		—	—	—
主桥	2	16 576.3	8 × 200+4 × 500	12 × 400	2.2
	3	16 959.9	8 × 200+4 × 500	12 × 400	2.1
引桥	4	3 582.7	6 × 200	6 × 200	3.3
	5	3 008.3	4 × 200	4 × 200	2.7
桥台	6	1 124.1	6 × 200	6 × 200	10.7

3.4.2 主桥顶升

3.4.2.1 主墩顶升

主桥上部结构为 80 m 刚性吊杆系杆拱桥,下部结构为双柱接盖梁式结构,基础为群桩接承台式基础,可充分利用该结构受力特点,采用断柱托盖梁整体顶升,承台作为反力基础,盖梁作为托换体系。传力路径为:原桥基础承台→千斤顶临时支撑→盖梁→系杆拱结构,其中盖梁内侧布置 8 台 200 t 顶升千斤顶,盖梁外侧布置 4 台 500 t 顶升千斤顶,分别对应布置 12 台 400 t 机械跟随顶(见图 15、图 16)。



图 15 主墩顶升施工之实景

3.4.2.2 主桥顶升精度控制

主桥结构采用 midas 建模分析,对原桥各支座竖向位移差值在 $\pm 5 \text{ mm}$, $\pm 10 \text{ mm}$, $\pm 20 \text{ mm}$ 进行计

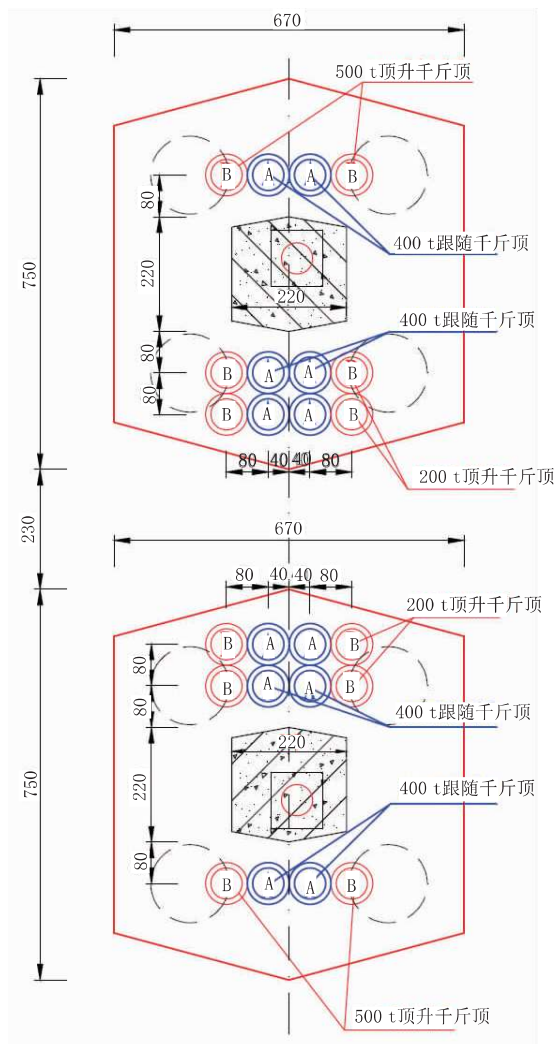


图 16 主墩千斤顶布置图(单位:cm)

算,分别分析结构在各支点不均匀位移对于结构的影响(见图 17、图 18 及表 2)。

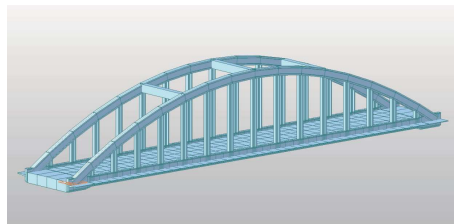


图 17 主桥建模图形

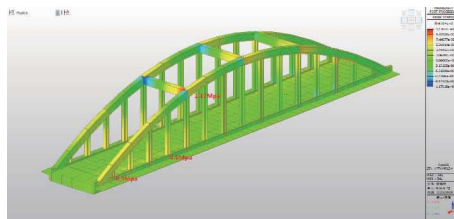


图 18 10 mm 位移差产生的结构二次应力图(单位:MPa)

由计算结果可知,随着各支点最大位移差的增加,主桥结构的扭转效应逐渐加大,主要体现在预应力混凝土边吊杆应力的增加,由成桥阶段最大应力 0.75 MPa 增加至 1.37 MPa (最大位移差 $\pm 20 \text{ mm}$)。

表 2 顶升施工各构件最大应力一览表

顶升施工	系梁	吊杆	拱肋	横梁(上缘)
成桥最大应力 /MPa	-6.78	0.75	-5.93	1.53
位移差 ± 5 mm	-6.69	0.90	-5.80	1.55
位移差 ± 10 mm	-6.60	1.06	-5.38	1.56
位移差 ± 20 mm	-6.43	1.37	-4.52	1.60

考虑到原桥施工较早,为控制各支点不均匀竖向位移引起的结构扭转二次内力,要求主桥在施工阶段最大相对竖向位移差 $\leq \pm 10\text{ mm}$,成桥使用阶段最大相对竖向位移差 $\leq \pm 5\text{ mm}$ 。

3.4.2.3 顶升通航安全

紫梅桥所在地区为山区航道,水位受短时间降雨变化大,且主桥主墩位于水域中,理论存在失控船舶或漂流物撞击可能。为避免出现该极端情况,该桥施工期根据天气预报,选定为 7 月下旬连续晴天,水位较低且无较大变化情况下施工。施工期由港航部门进行临时桥下安全管制,确保桥梁顶升期间的安全。

3.4.3 引桥顶升

3.4.3.1 引桥墩顶升

引桥墩上部结构为简支空心板,下部结构为桩柱接盖梁式结构,采用断柱托盖梁整体顶升,浇筑下抱柱梁作为顶升反力基础,抱柱梁高度不低于 1.2 m,内侧盖梁底及外侧盖梁加宽后作为托换体系,传力路径为:基础下抱柱梁→千斤顶临时支撑→盖梁→空心板。4 号墩对称布置液压 6 台 200 t 顶升千斤顶,6 台 200 t 跟随千斤顶(见图 19);5 号墩对称布置 4 台 200 t 顶升千斤顶和 4 台 200 t 液压千斤顶(见图 20)。



图 19 4 号墩顶升之实景



图 20 5 号墩顶升之实景

3.4.3.2 桥台顶升

6 号桥台为薄壁式桥台,桥台墙身厚度 70 cm,高 3.0 m,桩接承台式基础,承台尺寸 13.5 m $\times$ 1.9 m $\times$ 1.2 m,下设 5 根直径 1.0 m 钻孔桩,结构尺寸较小,采用直接顶升法。在承台跨内侧静压 16 根 0.25 m $\times$ 0.25 m 预制方桩,在桩顶施工植筋浇筑钢筋混凝土牛腿,做为顶升反力基础。在梁底安装钢分配梁做为托换体系。传力路径为:静压桩→牛腿→千斤顶临时支撑→分配梁→空心板。单墩布置 200t 顶升千斤顶和跟随千斤顶各 6 台。

6 号桥台台后采用高填方泡沫混凝土路基,顶升后高差达到 6.75 m,在梁板顶升就位后切割原背墙,植筋浇筑扶壁式背墙(见图 21~图 23)。

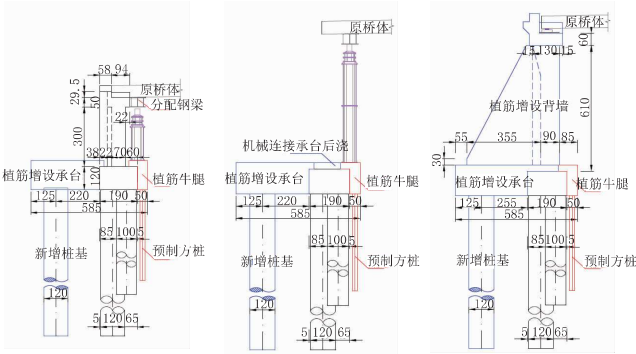


图 21 6 号桥台顶升改造顺序图(单位:cm)



图 22 6 号台顶升之实景



图 23 台后扶壁浇筑之实景

3.4.3.3 引桥加跨及台后接线

第 1、第 2 跨引桥为新增加跨,上部结构采用 20 m

空心板引桥,下部结构为桩柱接盖梁式基础。0号桥台亦采用扶壁式桥台,后方为路基加高段,挖除原路基路面及浆砌片石挡墙,采用泡沫混凝土高填方路基重新浇筑。

4 主桥顶升监控措施

紫梅大桥位移监控采用拉线式传感器,设2个断面共4个测点,分别位于2号、3号墩主梁两侧。于7月20日正式开始顶升,7月30日顶升完成,共历时11 d。累计顶升高度3.30 m。顶升过程平稳,同一断面2个横向测点间位移差值不大于2 mm,4个测点最大位移差值不大于5 mm(见图23、图24)。

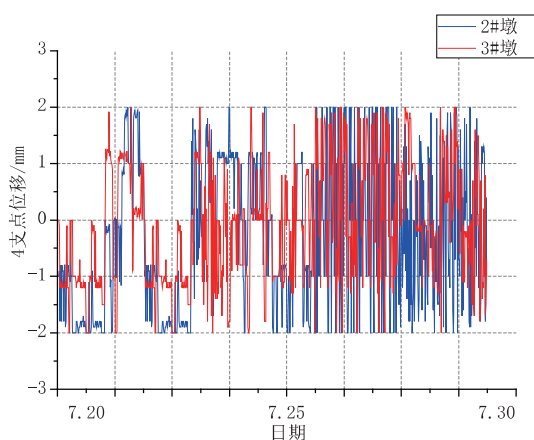


图23 主桥顶升断面位移差值曲线图(单位:mm)

5 结论

紫梅桥上跨长湖申线西延航道,该项改建采用PLC液压同步顶升系统,液压千斤顶与机械跟随千斤顶组合的顶升方法,安全、快速地完成了对紫梅桥全桥整体顶升的改建任务,使改建后主桥通航孔满足60 m×7 m限制性Ⅲ级航道通航净空,达到航道

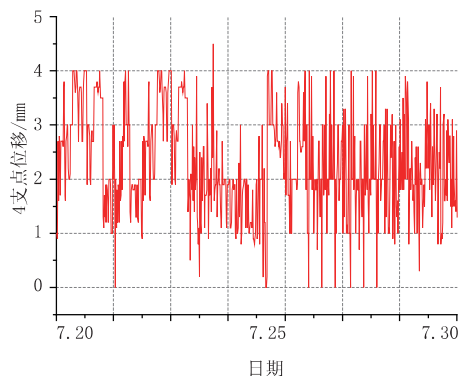


图24 主桥顶升4支点最大位移差值曲线图

提升的需求。

该桥工程建设费用4 550万元(桥梁改建1 058万元)。由2019年6月封道至2020年3月通车,共计施工期9个月,从断柱施工至墩柱接高后拆模的千斤顶临时支撑期间共历时45 d。若采用新建同等规模桥梁,工程建设费用5 480万元(新建桥梁1 988万元),施工工期约2 a。

顶升改建相比拆除重建改建方式,充分利用了原桥结构,同时相比新建同等跨径、结构的桥梁,施工工期明显缩短。起到了节约建设资金、缩短周期的效果。在内河航道改建过程中,当原桥结构较为良好,桥梁主要受限于通航孔高度不足时,桥梁顶升改建方案具有明显的经济、时间优势,具有较好的社会效益。

参考文献:

- [1] 李志峰,金跃群,范晓君等.长湖申线航道西延工程港口大桥施工图设计说明书[R].杭州:浙江省交通规划设计研究院,2017.
- [2] 金跃群,杨扬.内河航道桥梁顶升技术应用探讨[J].结构工程师,2016,32(S4):183-189.
- [3] DB 33/T 936—2014,内河桥梁整体顶升技术规程[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com