

郭鑫,袁晟,颜东煌,等.不对称 V 型斜跨钢箱拱桥索力优化及控制[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022, 37(3):51-60. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.008

GUO X, YUAN S, YAN D H, et al. On Cable Force Optimization and Control of Asymmetric V-shaped Skew Span Steel Box Arch Bridge[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(3):51-60. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.008

# 不对称 V 型斜跨钢箱拱桥索力优化及控制

郭鑫<sup>1,2\*</sup>,袁晟<sup>1,2</sup>,颜东煌<sup>1</sup>,彭坤帅<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.长沙理工大学 检测咨询有限责任公司,湖南 长沙 410076)

**摘要:**以某座不对称 V 型斜跨钢箱拱桥为工程背景,建立有限元模型,结合现有拱桥与斜拉桥合理成桥状况调索方法,采用刚性支承连续梁法、零位移法、刚性吊杆法和最小弯曲能量法这 4 种常规调索方法对此异型拱桥成桥吊杆索力进行初调,并采用影响矩阵法对索力进行优化,发现常规调索方法得到的成桥索力分布较不均匀,优化后能得到较为均匀的索力,并一定程度改善结构在成桥恒载状况下的变形及受力.考虑异型拱桥施工过程中吊杆张拉工序对结构受力的影响,采用 4 种不同的张拉工序,对比分析张拉过程中吊杆索力极值、主拱圈扭矩极值、平面内弯矩极值、平面外弯矩极值及平面外位移极值,发现采用方案一(即中间至两端错位张拉吊杆)为最合理的张拉工序,研究成果对异型拱桥的设计及施工均有一定的应用价值.

**关键词:**V 型斜跨拱桥;钢箱拱桥;斜吊杆;合理成桥状态;索力优化

**中图分类号:**U448 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)03-0051-10

## On Cable Force Optimization and Control of Asymmetric V-shaped Skew Span Steel Box Arch Bridge

GUO Xin<sup>1,2</sup>, YUAN Sheng<sup>1,2</sup>, YAN Donghuang<sup>1</sup>, PENG Kunshuai<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Testing Consulting Co., Ltd., Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

**Abstract:** In this paper, an asymmetric V-shaped inclined span steel box arch bridge is used as the engineering background. By establishing a finite element model and referring to the existing arch bridges and cable-stayed bridges, four conventional adjustment methods, namely rigid support continuous beam method, zero displacement method, rigid boom method, and minimum bending energy method are used to make preliminary adjustments to the cable force of the approaching boom of the shaped arch bridge. The analysis results find that the cable force distribution obtained by the conventional adjustment methods is not uniform. After the optimization of cable force by the influence matrix method, the cable force is more uniform and the deformation and force of the structure under constant load are improved to a certain extent. Considering the influence of the tensioning sequence on the structure during the construction of the shaped arch bridge, the influence of four different tensioning sequences on the five extreme values of boom force, main arch ring torque, in-plane bending moment, out-of-plane bending moment, and out-of-plane displacement is analyzed. It is found that the most reasonable tensioning process is to

收稿日期:2022-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878073;52078054);湖南省交通科技项目资助(201932);湖南省自然科学基金资助项目(2021jj30730);湖南省研究生科研创新项目(CX20200832;CX201900650)

\*通信作者,E-mail:gxingsust@163.com

use option 1, i.e. the tensioning of the boom is staggered from the middle to both ends. The research results have some application value to the design and construction of shaped arch bridges.

**Keywords:** V-shaped inclined span arch ring; steel box arch bridge; inclined suspende; reasonable completion state; cable force optimization

拱桥作为一种基本桥型,具有良好的受力特点,理论上能适应各种跨径范围.现阶段,城市桥梁需要具有与城市文化相融合的美学特点,异型拱桥因其造型的独特性而逐步成为城市桥梁的主要桥型之一.异型拱桥因其结构在空间内不具有对称性,其吊杆设计成桥索力、索力施工工序控制对结构在施工过程及成桥后的受力状态具有较大影响.随着经济的快速发展和城市化进程的推进,国内异型拱桥数量不断增加,针对异型拱桥受力状态及索力优化已进行了一定的试验及理论研究.Wang等<sup>[1]</sup>设计并制作某斜跨拱桥的缩尺模型且开展了试验研究,验证实桥的安全性;陈淮等<sup>[2]</sup>基于 ANSYS 探讨 14 种工况条件对斜靠式钢管混凝土拱桥动力特性的影响,了解斜靠式拱桥动力特性的变化规律;肖雄杰<sup>[3]</sup>研究斜吊杆异型系杆拱桥在施工和使用阶段的静、动力特性及结构稳定性,指出吊杆调索对全桥应力水平有较大影响;王会利等<sup>[4]</sup>分析斜跨异型拱桥的静力特性和稳定性,结果表明横桥向荷载是强度和稳定性的控制荷载,在设计过程中要特别关注吊索不平衡水平分力;霍学晋等<sup>[5]</sup>分析 5 座各具特点的异型拱桥的几何非线性行为;李传习等<sup>[6]</sup>研究支架现浇钢筋混凝土异型系杆拱桥合理施工状态,其施工需按分析和计算确定的合理施工工序及施工状态进行;王银刚等<sup>[7]</sup>通过调整主拱圈线型和拱上荷载分布来优化上承式异型拱桥的主拱圈受力状态;朱利明等<sup>[8]</sup>对比多种调索方法对下承式多索面斜吊杆系杆钢拱桥成桥索力进行初调,并进行成桥索力优化;李斐然等<sup>[9]</sup>利用约束松弛的二次规划算法和基于刚度矩阵对弯梁斜跨拱桥合理成桥索力进行优化;杜闯等<sup>[10-11]</sup>利用 ANSYS 对斜跨曲线拱桥施工阶段进行模拟,得出结构在施工过程中的内力、位移响应;白金超<sup>[12]</sup>采用多次调索并优化张拉顺序的方式完成反对称钢筋混凝土拱肋异型系杆拱桥施工控制;Yang<sup>[13]</sup>采用 7 种不同的吊杆张拉方案,研究吊杆张拉顺序对结构受力状态的影响;Xie 等<sup>[14]</sup>采用嵌入矩阵法研究拱桥合理成桥状态并优化吊杆张拉方案.

不对称 V 型斜跨钢箱拱桥结构特殊,由于不平衡水平力、支座受力不均等影响,其合理成桥状态受力复杂,合理成桥索力的获取具有一定难度,同时,拱桥施工过程中,体系受力状况不断发生改变,需要设计合理施工工序,以确保施工过程中结构的安全与稳定.以某不对称 V 型斜跨钢箱拱桥为工程背景,基于有限元分析程序,采用刚性支承连续梁法、零位移法、刚性吊杆法和最小弯曲能量法这 4 种常规调索方法对此异型拱桥成桥吊杆索力进行初调,并采用影响矩阵法对索力进行优化,分析 4 种不同吊索张拉工序对结构内力及吊杆索力极值的影响,以获得最优施工工序.

## 1 工程概况

某中承式 V 型钢箱拱桥,桥跨布置  $45\text{ m}+70\text{ m}=115\text{ m}$ ,桥宽  $42.5\text{ m}$ ,桥型布置见图 1;主梁设计为单箱多室断面,如图 2a 所示;路线中心处梁高  $2.5\text{ m}$ ,主梁平面位于圆曲线内,半径为  $851\text{ m}$ ;主拱圈为六边形钢箱截面,如图 2b 所示,V 型拱圈与主梁分离并斜跨主梁,矢跨比为  $3/7$ ,拱脚采用钻孔灌注桩固定;下部结构中桥台均采用重力式桥台,桥墩采用柱式墩,各墩台与主梁均为斜交,左侧桥台右偏角为  $52^\circ$ ,桥墩为  $55^\circ$ ,右侧桥台为  $78^\circ$ .

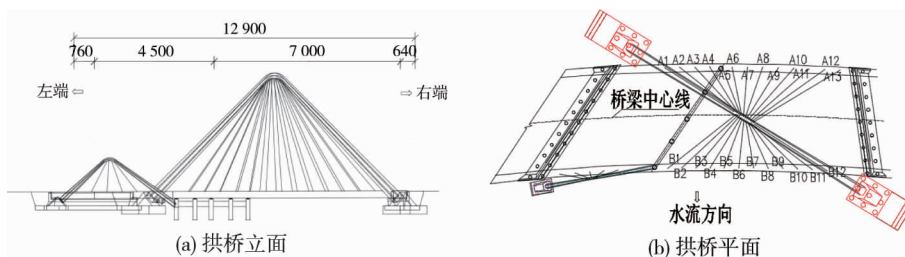


图 1 桥型布置(单位:cm)

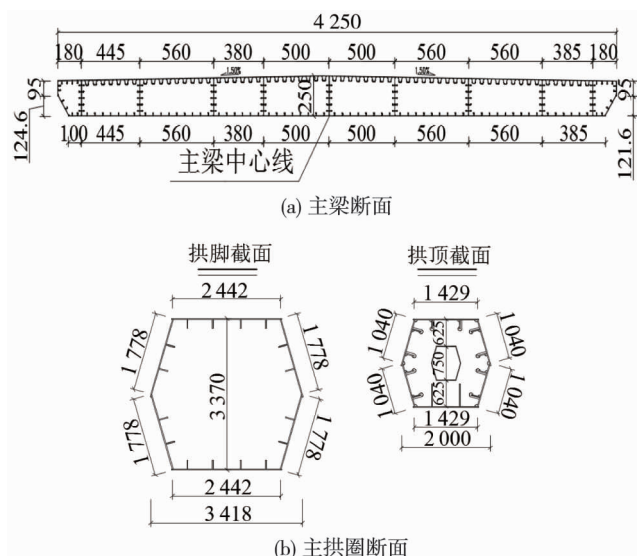


图2 结构断面(单位:cm)

本桥主拱共设置 25 根吊索,上游侧布置 13 根索,编号 A1~A13,下游侧布置 12 根索,编号 B1~B12;吊杆采用 61 根 7 mm 镀锌高强度低松弛预应力钢丝组成,标准强度为 1 670 MPa;副拱吊索采用刚性镀锌钢管(材质 Q345C),外包 HDPE 护套。

## 2 有限元模型

采用 MIDAS Civil 2020 有限元软件建立全桥空间梁格模型,有限元模型如图 3 所示,利用有限元模型分析其空间受力性能。主梁及拱肋、桩基础采用梁单元模拟,主梁为单箱十室断面,采用 11 道纵梁截面模拟,全桥共设置 43 道横隔板,并在桥墩台处各设置 4 道沿支座方向横隔梁。吊杆调索阶段采用桁架单元模拟,分析施工过程中结构受力时采用索单元模拟。全桥共有节点 1 029 个,单元 1 358 个,结构荷载均与设计文件参数保存一致,主要构件材料特性如表 1 所示。

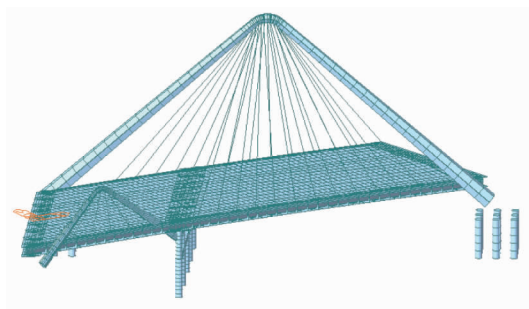


图3 全桥空间梁隔模型

表1 主要构件材料特性

构件	材料类型	弹性模量/MPa	容重/(N/mm <sup>3</sup> )
主梁	Q345	2.06e5	7.85e-5
主拱圈	Q345	2.06e5	7.85e-5
吊杆	镀锌高强度低松弛钢丝	2.05e5	7.85e-5
桩基础	C40	3.25e4	2.50e-5

## 3 成桥索力

### 3.1 合理恒载状态

#### 3.1.1 合理成桥状态的控制参数

拱桥作为一种通过吊杆传递主梁所承受竖向荷载的超静定结构,其合理恒载状况是结构各构件达到设计预期的成桥线型、内力等,且满足使用阶段设计需求的一种成桥状况。对于斜跨拱桥而言,吊杆倾斜使吊杆对主梁的作用与斜拉桥相似,而主拱圈采用斜跨方式跨越主梁,主拱圈与吊杆在空间中均不具备对称性,因此,斜跨拱桥的合理成桥状态均复杂于常规拱桥及斜拉桥。针对此类斜跨拱桥合理成桥状况分析,主要控制参数包括:

1) 主梁参数控制:主梁内力符合规范要求,降低桥墩处负弯矩及跨中处正弯矩,具有一定的安全储备,保证安全,控制经济指标;主梁成桥线型符合规范要求,具有合理的纵坡、横坡及预拱度。

2) 主拱圈参数控制:主拱圈以受压为主,尽可能避免或减小拉应力值;因为主拱圈吊杆锚固点不具有对称性,所以主拱圈截面会产生较大的平面外弯矩和扭矩。因此,需要严格控制主拱圈成桥线型符合设计要求,减少主拱圈在拱圈平面外的变形,尽可能减小平面外弯矩和扭矩。

3) 吊杆参数控制:吊杆索力分布均匀,避免相邻吊杆间出现索力大幅波动,斜拉索面积与索力相匹配,既要满足安全系数所考虑的设计余量,也要避免出现过大垂度。

4) 支座参数控制:由于此斜跨拱桥中间设有桥墩,且主梁与桥墩台斜交,易出现偏载引起支座脱空,因此,支座以受压为控制标准,避免出现负反力及脱空情况。

### 3.1.2 初调恒载索力

斜跨拱桥初调恒载索力方法与斜拉桥类似,通过控制主梁位移、结构刚度等方式得到吊杆成桥状况的成桥索力,采用零位移法、刚性吊杆法、刚性支承连续梁法、最小弯曲能量法得出成桥恒载索力,结果如图4所示。

通过以上4种成桥调索方法得到的吊杆索力主要位于0~1 500 kN,由于桥墩的竖向支承,桥墩附近索力值较小,同时,锚固与主梁最远端的吊杆索力较大。具体状态:(1)刚性支承连续梁法得到的成桥恒载索力中,中间索力分布较为均匀,多数索力位于500~1 000 kN,同时主梁

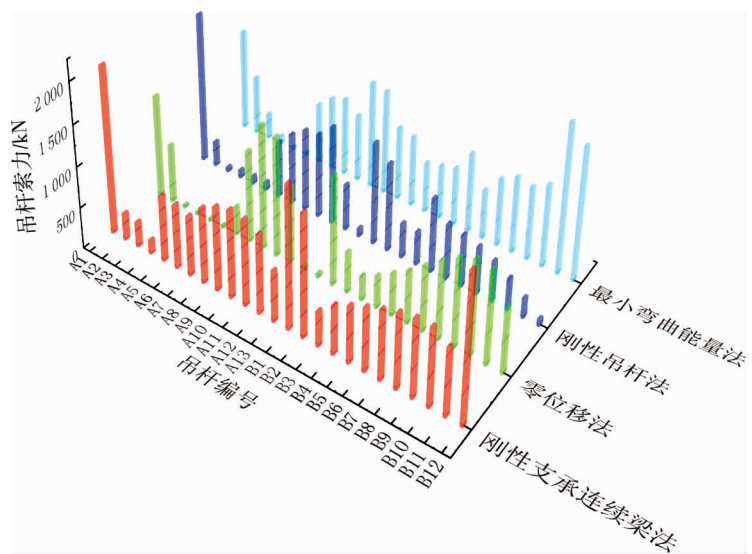


图4 成桥恒载索力

梁两侧端部吊杆索力发生突变,数值超过1 500 kN,原因是端部附近刚性支承所承担的结构跨度较大,且吊杆竖向倾斜角度最小,需要更大的索力来提供竖向支撑;(2)零位移法得到的成桥恒载索力,索力值与吊杆需承担结构自重密切相关,桥墩附近索力在50 kN左右,原因是桥墩限制了主梁位移,并分担了大部分主梁荷载;为了实现吊杆在主梁锚固点附近位移接近于零,上游侧端锚杆A1与主跨中间锚杆A8~A10承担荷载较大,索力超过1 000 kN;(3)刚性吊杆法得出的成桥恒载索力分布不均匀,吊杆索力发生多次突变,端部A1吊杆索力达到1 858 kN,A2吊杆索力骤降至314 kN,同时中间索力也多次出现大幅跳跃,其原因为主梁与主拱圈受力的不均匀性,直接反映到刚性吊杆上;(4)最小弯曲能量法得出的成桥恒载索力最为均匀,中间索力均匀位于600~1 000 kN,端部吊杆索力有一定的突变量,其原因是端部附近刚性支承所承担的主梁结构节段自重较大,且吊杆竖向倾斜角度最小,需要更大的索力来提供竖向支撑。

## 3.2 恒载状况内力分析

### 3.2.1 主梁中间纵梁弯矩状况

将4种不同调索方法得出成桥恒载索力放到Midas模型中,选取主梁中间纵梁进行分析,其成桥恒载状况下弯矩情况如图5所示,因为吊杆锚固于主梁两侧,且主梁宽度达到42.5 m,所以不同索力状况下的主梁中间纵梁整体弯矩线型一致;左侧边跨在不同索力状况下变化量较小,因为左侧边跨只有上游侧吊杆索力变化,下游侧副拱设计为刚性吊杆且不能进行索力调整;采用刚性吊杆法调索,主梁受力较为不合理,桥墩处纵梁负弯矩与主跨跨中纵梁正弯矩均超出其他

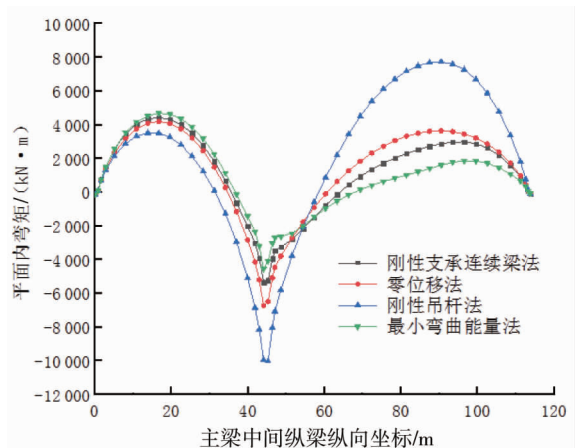


图5 成桥恒载主梁中间纵梁弯矩

3种方法,数值分别达到 $-10\ 016.32$ 和 $7\ 749.47\ \text{kN}\cdot\text{m}$ ;采用最小弯曲能量法调索,桥墩处纵梁负弯矩与主跨跨中纵梁正弯矩均小于其他3种方法,边跨正弯矩较大达到 $4\ 694.42\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 。

### 3.2.2 主拱圈受力状况

将4种不同调索方法得出成桥恒载索力放到Midas模型中,成桥状况下主拱圈扭矩、平面内弯矩及平面外弯矩值如图6~图8所示。

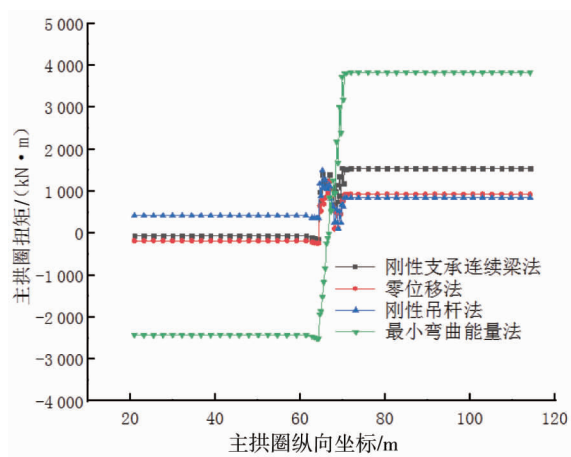


图6 成桥恒载主拱圈扭矩

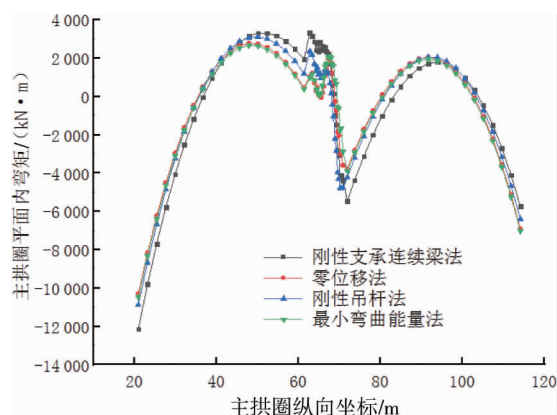


图7 成桥恒载主拱圈平面内弯矩

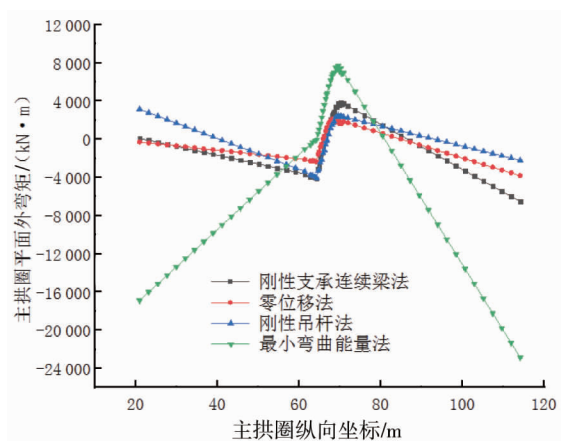


图8 成桥恒载主拱圈平面外弯矩

从图6可以看出:主拱圈扭矩主要由吊杆锚固区不平衡索力引起,吊杆锚固区以外区域扭矩不再变化,其中最小弯曲能量法扭矩极值最大达到 $3\ 835.4\ \text{kN}\cdot\text{m}$ ,原因是此方法计算成桥索力时,将主拱圈刚度进行大幅缩小,允许主拱圈产生较大变形,所得到的索力放入设计模型中时,结构抵抗变形而产生较大的扭矩;其他3种方法成桥恒载状况主拱圈扭矩极值较为接近,均在 $1\ 200\ \text{kN}$ 附近,较为合理。从图7和图8可以看出:由于吊杆均位于主拱圈顶部截面,主拱圈平面内弯矩在吊杆锚固区外域整体结果基本接近,吊杆锚固区内,刚性支承连续梁法得到的主拱圈正弯矩与负弯矩均大于其他3种方法对应值,其中零位移法与最小弯曲能量法对应弯矩值较为接近。由于主拱圈空间采用V型拱,成桥恒载状况主拱圈平面外弯矩在吊杆锚固区外成线性变化,其中零位移法中主拱圈平面外弯矩极值为 $3\ 804.0\ \text{kN}\cdot\text{m}$ ,均小于其他3种方法结果,最小弯曲能力法中,由于主拱圈两侧索力的不均匀性,主拱圈整体向上游倾斜,主拱圈平面外弯矩极值达到 $-22\ 849.8\ \text{kN}\cdot\text{m}$ ,结构稳定性存在风险。

### 3.3 成桥索力计算方法对比分析

多角度对比以上4种成桥恒载索力计算方法所得出的拱桥成桥恒载状况可以发现:刚性吊杆法得到的成桥索力沿桥跨方向分布不均匀,不符合该桥受力特点;最小弯曲能力法得到的成桥索力较为均匀,但

对应成桥恒载状况下结构内力分布不合理,因此,也不符合该桥设计要求;刚性支承连续梁法和零位移法得到的成桥恒载状况下吊杆索力与结构内力较为合理,但得到的吊杆索力在桥墩处均发生大幅波动,且两侧端部吊杆索力均出现极值,主拱圈平面外弯矩较大,仍有较大的优化空间。

### 4 成桥索力优化

针对上述4种方法调索方法均得出恒载成桥吊杆索力值及结构内力特点,采用影响矩阵法对零位移法得到的索力加以优化.考虑到主梁横向宽度较大,索力微调对主梁中间纵梁受力影响有限,本次调索重点优化主拱圈扭矩、平面外位移和平面外弯矩.参考现有异型拱桥及斜拉桥调索优化方法<sup>[15-17]</sup>,考虑各索对结构变形、受力的影响矩阵,将零位移法得到的索力乘以相应系数,多次迭代调索,得出优化后与优化前吊杆索力对比如图9所示,主拱圈弯矩及扭矩对比如图10所示,主拱圈平面外位移如图11所示。

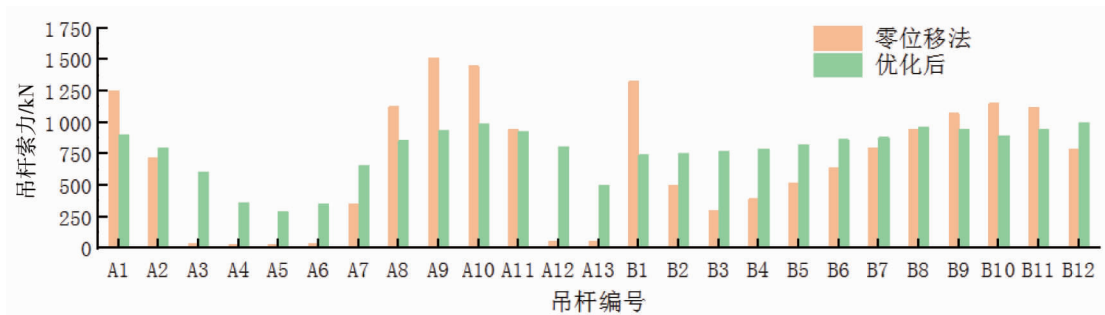


图9 优化后与优化前吊杆索力分布

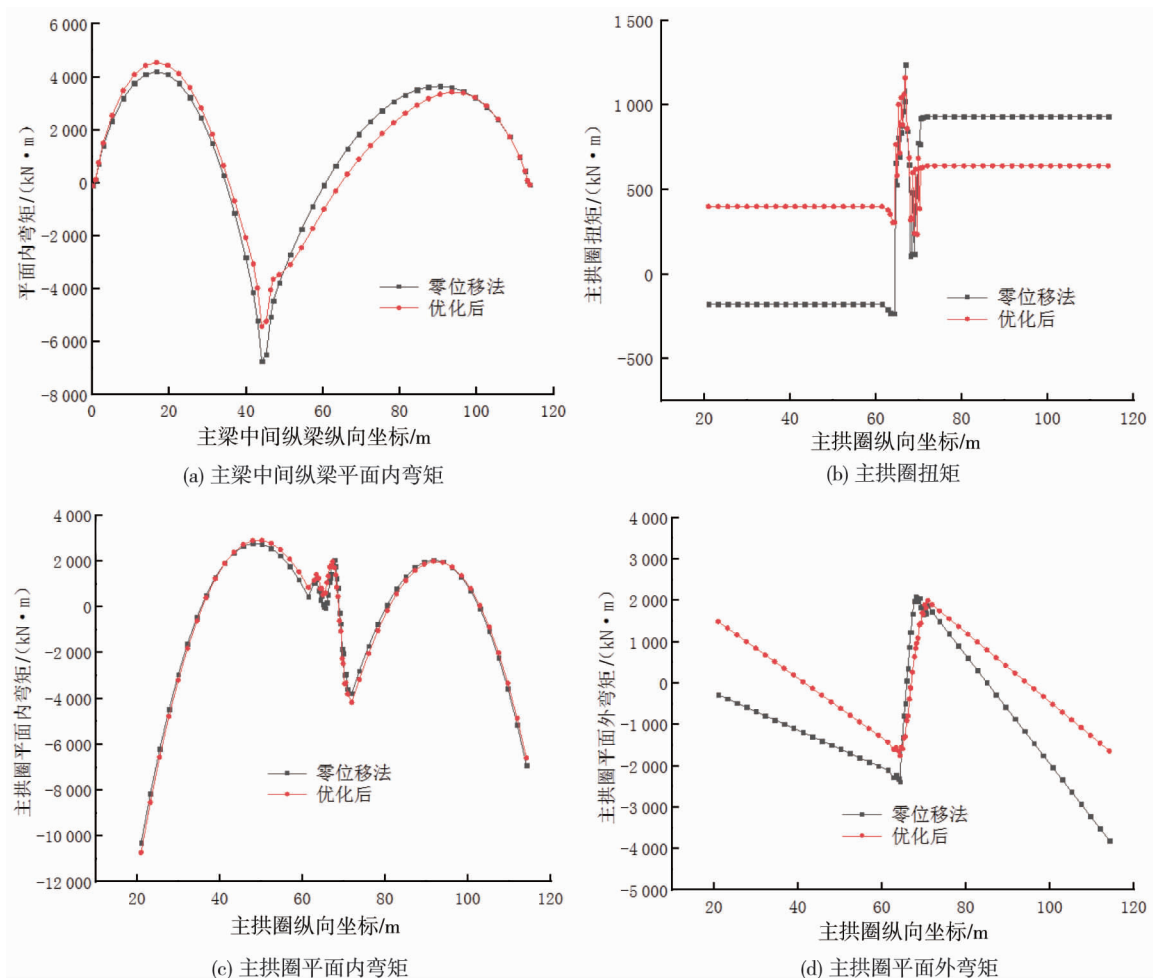


图10 索力优化前后结构内力分布

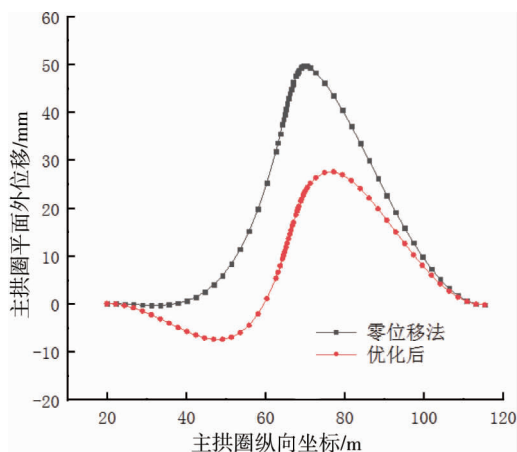


图11 主拱圈平面外位移

如图10所示,优化后,吊杆索力分布较为均匀,优化了相邻吊杆间索力值的波动,同时,索力极值有大幅改善,吊杆索力最大值由1450.0 kN降至994.2 kN,索力峰值降幅达到31.4%。优化后,主梁正弯矩峰值基本不变,桥墩处负弯矩峰值有所改善,由 $-6730.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 减少到 $-5419.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,且优化后主梁正负弯矩极值更加接近,主梁结构受力更为合理,优化后主梁应力极值为 $-24.9 \text{ MPa}$ ,远小于钢材容许应力。优化后,主拱圈平面内弯矩没有明显变化,原因是吊杆集中锚固于主拱圈顶部区域,吊杆总索力值未进行大幅调整,平面内主拱圈受力基本保持不变;优化后,主拱圈扭矩极值有一定程度改善,且分布更加均匀;优化后,主拱圈平面外位移有明显好转,优化前主拱圈整体向一侧倾斜,倾斜位移量达到49.8 mm,优化后主拱圈倾斜位移明显好转,倾斜位移量极值为27.4 mm,且优化后主拱圈平面外弯矩极值明显减小,由优化前 $-3804.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 减少到 $-1754.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

从以上数据可以看出:采用影响矩阵对常规方法得到的成桥恒载索力进行优化,能够较好地使吊杆索力分布更加均匀,能有效改善主拱圈变形及受力,并一定程度缓解主梁中间纵梁负弯矩,较好地实现异型拱桥的合理成桥状况调索设计。

## 5 张拉方案比选

### 5.1 张拉方案

中承式V型钢箱拱桥主梁采用预制拼装,其主要施工工况:在贝雷梁支架上进行钢主梁焊接→搭设支架施工主拱圈→将吊杆与主拱圈、主梁连接→拆除主塔支架→施加吊杆初拉力→拆除主梁支架→施加二期恒载→恒载成桥状况。由于该桥主拱圈斜跨主梁,主梁与墩台之间有较大的斜交角,吊杆索力对主梁、主塔作用力均无对称性,结构受力缺少常规拱桥结构受力的对称性,因此,吊杆索力初张拉顺序对结构在施工过程中受力具有较大影响,并容易引发安全事故。针对以上情况,对吊杆初张拉顺序进行探讨分析,根据以往实桥吊杆张拉方案,拟定中间至两端、两端至中间、左端至右端、右端至左端这4种吊杆张拉顺序方案,如表2所示。

### 5.2 施工过程中结构受力状况

构建有限元分析模型,将吊杆用索单元模拟,以精调吊杆索力作为成桥恒载索力,分析不同施工工序过程中,主梁、主拱圈结构内力、位移响应的极限值,以此判断施工过程中结构受力状况。由于吊杆初张拉时,主梁贝雷梁支架未拆除,且主梁宽度较大,因此,不同的施工工序中,主梁中纵梁均未全部脱离贝雷梁支架,中纵梁内力基本相同,不作为施工工序优化参考依据。

按上述4种不同的吊杆初拉力张拉工序,各施工工序下吊杆索力极值如图12所示,各吊杆索力极值与成桥吊杆索力值的比值如图13所示,判断出由方案1与方案4张拉过程中,吊杆索力极值与成桥吊杆索力值较为接近,比值均在1.3以内,而方案2与方案3张拉过程中,吊杆索力极值与成桥吊杆索力值比

值超过2倍.张拉过程中,方案4吊杆索力最大值为1 196 kN,超过其他方案.

不同施工工序中,主拱圈不同位置扭矩极值如图14a所示,方案2扭矩极值最大,达到1 676.1 kN·m,其余方案极值均在1 200 kN·m以内.主拱圈不同位置在平面内弯矩极值较为接近,如图14b所示,方案3在主拱圈吊杆锚固区附近正负极值大于其他方案.主拱圈不同位置在平面外弯矩及位移如图14c~图14d所示,主拱圈平面外弯矩与位移正相关,4种不同施工工序中,方案2中由于异形拱桥空间不具有对称性,吊杆对主拱圈的水平力也不具有对称性,该方案施工中出现上游吊杆水平力大范围超出下游吊杆水平力,主拱圈平面外偏位最大,达到177.8 mm,主拱圈平面外弯矩极值达到9 564.7 kN·m,方案3与方案4主拱圈平面外偏位也超过100 mm,平面外弯矩极值均超过6 000 kN·m,其中,方案1主拱圈平面外偏位最小,极值为60.6 mm,对应平面外弯矩为4 683.8 kN·m.

表2 吊索初张拉方案细化工序

吊索初张拉 工况中工序	方案一 中间至两端	方案二 两端至中间	方案三 左端至右端	方案四 右端至左端
工序1	A8, B5	A1, A2, B1	A1, A2, B1	A13, B10, B11, B12
工序2	A9, B6	B3, B11, B12	A3, A4, A5, B2	A12, B9
工序3	A7, B4	A3, A4, A5	A6, B3	A11, B8
工序4	A10, B7	A13, B10	A7, B4	A10, B7
工序5	A6, B3	A12, B9	A8, B5	A9, B6
工序6	A11, B8	A11, B8	A9, B6	A8, B5
工序7	A12, B9	A6, B3	A10, B7	A7, B4
工序8	A13, B10	A10, B7	A11, B8	A6, B3
工序9	A3, A4, A5	A7, B4	A12, B9	A3, A4, A5, B2
工序10	B2, B11, B12	A9, B6	A13, B10, B11, B12	A1, A2, B1
工序11	A1, A2, B1	A8, B5	/	/

注:左端、右端、两端均以图1中主梁相对位置示意,中间为全桥主梁中间位置

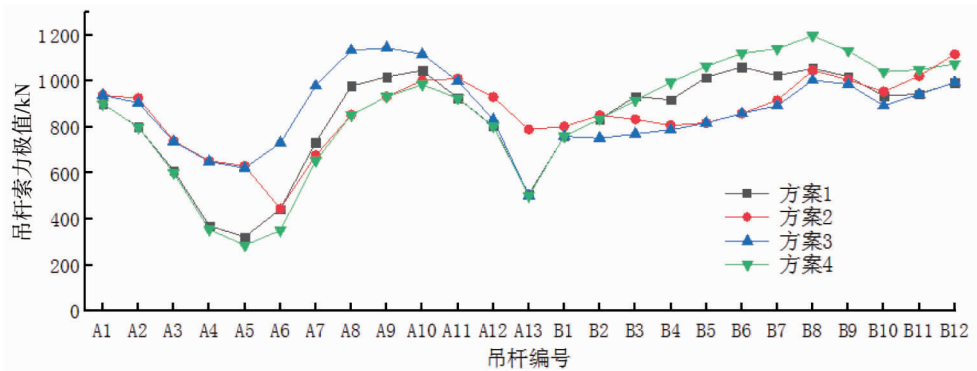


图12 施工过程中各吊杆索力极限值

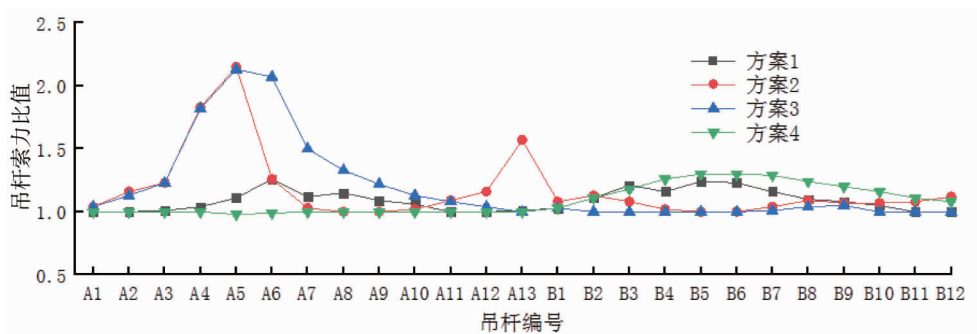


图13 各吊杆索力极值与成桥吊杆索力值的比值



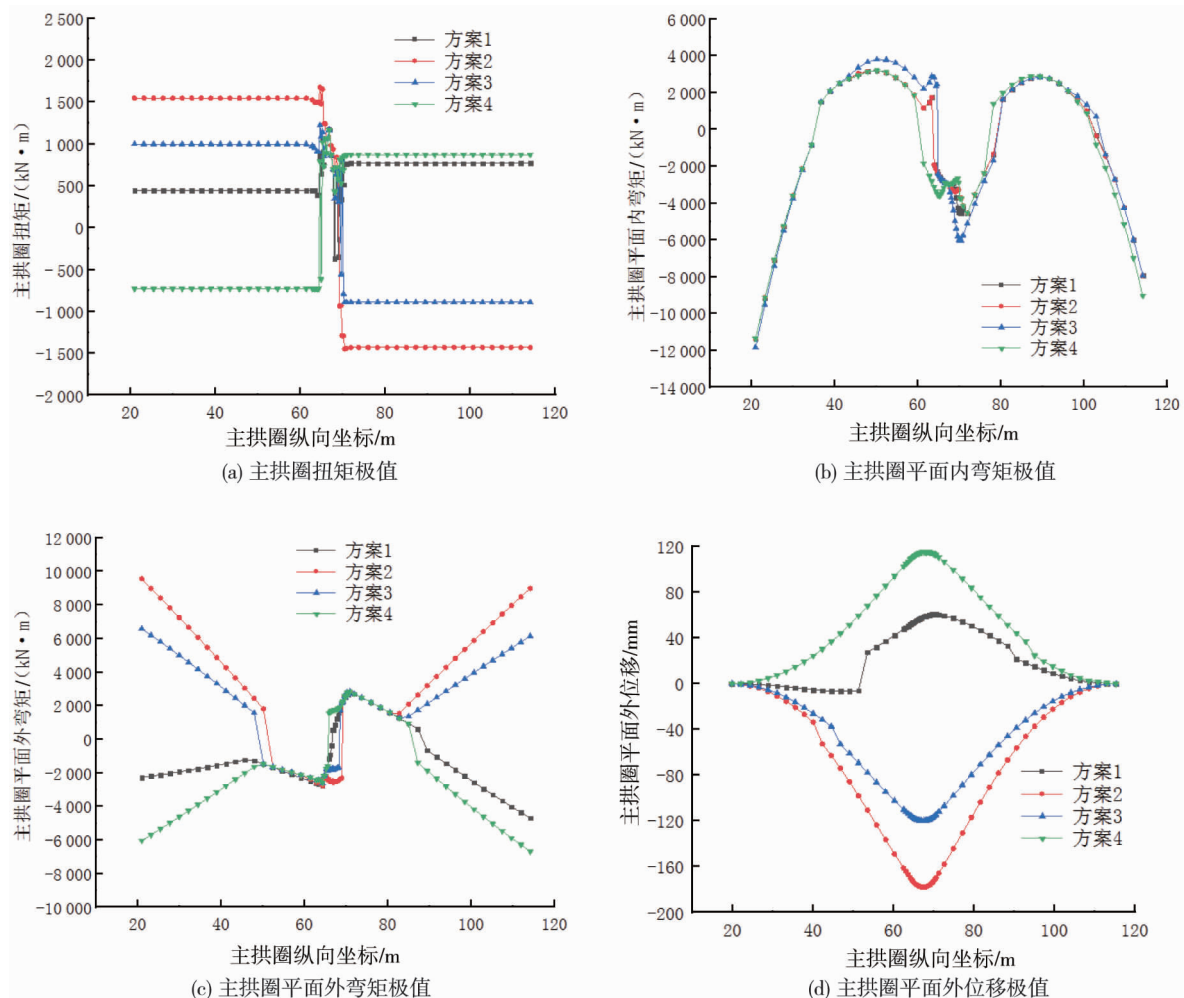


图 14 施工过程中主拱圈内力极值、位移极值

### 5.3 施工工序比选分析

从上述数据可以看出:采用方案1从中间至两端张拉吊杆初拉力,施工过程中结构受力最为合理,施工过程中各索力极值与成桥索力值较为接近,最大偏位与内力均在合理范围内,可以作为此桥吊杆张拉工序方案;采用方案2从两端向中间拉索,主拱圈发生严重侧倾,有一定的安全风险;方案3与方案4主拱圈侧向倾斜位移也较大,同样具有一定安全隐患。

## 6 结论

1)采用4种成桥恒载索力计算方法所得出的拱桥成桥恒载状况中,刚性吊杆法与最小弯曲能力法得到的合理成桥状况结构受力不合理,不符合该桥设计要求;刚性支承连续梁法和零位移法得到的成桥恒载状况下吊杆索力与结构内力较为合理,但索力分布仍然有突变情况,仍有较大的优化空间。

2)采用影响矩阵对常规方法得到的成桥恒载索力进行优化,吊杆索力分布较为均匀,并能有效改善主拱圈变形及受力,主拱圈倾斜位移极值由49.8 mm减少至27.4 mm,能较大的达到异型拱桥的合理成桥状况。

3)该桥由于主拱圈斜跨主梁、主梁与桥墩台斜交布置,施工过程中吊杆水平力的不对称性容易引起主拱圈侧向偏移,采用由中间向两端错位分步张拉吊杆能有效减少主拱圈侧向位移,改善施工过程中主拱圈的受力,此张拉方案中主拱圈平面外偏位极值为60.6 mm,其余方案偏位极值均大于100.0 mm。

4)对一座异型拱桥从合理成桥状况吊杆索力的初步计算,到采用特定方法进行索力优化,再到探究不同吊杆张拉工序对结构在施工过程中内力、位移响应的影响,最后提出合适的合理恒载索力初调方法、

索力优化方法、合适的吊杆张拉施工工序,对异型拱桥设计、施工均有应用价值.

### 参考文献:

- [1] Wang Q, Shi L, Zhang Z. Model Test Study on a Single Diagonal-Span Arch Bridge with Curved Beam[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 44-47: 2031-2035.
- [2] 陈淮,朱倩,李静斌,等.结构参数变化对斜靠式拱桥动力特性的影响[J].中国公路学报,2009,22(1):47-52.
- [3] 肖雄杰.某异型系杆拱桥空间力学特性分析[J].桥梁建设,2012,42(1):60-66.
- [4] 王会利,秦泗凤,张哲,等.斜跨异型拱桥的设计与分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012,36(6):1157-1160.
- [5] 霍学晋,韩立中.异型拱桥的几何非线性分析[J].公路交通科技,2013,30(7):46-53.
- [6] 李传习,曾革助,刘扬.支架现浇的异型系杆拱桥合理施工状态的确定[J].公路交通科技,2008(3):93-98.
- [7] 王银刚,李玉美.上承式异型拱桥的设计[J].结构工程师,2020,36(5):197-202.
- [8] 朱利明,申昆,濮卫,等.空间三索面斜吊杆非对称系杆钢拱桥合理成桥索力优化[J].世界桥梁,2020,48(6):54-59.
- [9] 李斐然,石磊,张哲.弯梁斜跨拱桥合理恒载状态研究[J].计算力学学报,2010,27(5):919-924.
- [10] 杜闯,丁红岩,张浦阳,等.斜跨曲线异形拱桥施工过程应力和挠度分析[J].铁道科学与工程学报,2015,12(5):1130-1135.
- [11] 杜闯,张彩利,蔡韦华.考虑荷载工况组合的异型拱桥受力分析[J].中外公路,2015,35(1):108-111.
- [12] 白金超.反对称钢筋混凝土拱肋异型系杆拱桥施工控制技术[J].桥梁建设,2018,48(3):116-120.
- [13] Yang H. Optimization of Suspender Tension Scheme of Cast-in-Situ Tied Arch Bridge with Support[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, 787(1): 012117.
- [14] Xie K Z, Yu M S, Yao X Y, et al. Optimization of Suspender Cable Force of Long-Span Concrete Arch Bridges Based on Embedded Matrix Method[J]. Advances in Civil Engineering, 2022:2943806
- [15] 傅金龙,黄天立.刚性系杆拱桥成桥吊杆索力优化方法的适用性研究[J].铁道科学与工程学报,2014,11(4):6-13.
- [16] 颜东煌,李学文,刘光栋,等.混凝土斜拉桥合理成桥状态确定的分步算法[J].中国公路学报,2003,16(1):43-46.
- [17] 肖汝诚,项海帆.斜拉桥索力优化的影响矩阵法[J].同济大学学报(自然科学版),1998(3):235-240.