

文章编号:1674-2869(2017)05-0477-05

大跨径钢箱梁斜拉桥合理成桥索力的优化

祁超,李元松*,杨恒,周小龙

武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074

摘要:依据影响矩阵调值原理,提出以结构整体弯矩最小为目标,关键节点的位移为约束条件的斜拉桥索力优化方法.首先应用Midas/Civil中“未知荷载系数”功能计算满足特定约束条件的最佳荷载系数,并求出拉索初拉力.然后将系数矩阵与弯矩信息导入Excel中,定义目标函数与约束条件,求出初步优化索力,最后将所得初步索力重新代入Midas/Civil模型中,进行局部微调得最终优化索力.将此方法用于某斜拉桥方案分析,结果表明,优化前后,主梁弯矩减小36%,主塔弯矩减小70%,主梁竖向最大位移减小51%,主塔水平最大位移减小74%,且索力分布均匀,线形更为平顺.

关键词:斜拉桥;索力优化;未知荷载系数;影响矩阵

中图分类号:U448.27 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2017.05.013

Optimization of Bridge-Completing Cable Force in Cable-Stayed Bridge with Long-Span Steel Box Girder

QI Chao, LI Yuansong*, YANG Heng, ZHOU Xiaolong

School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: To optimize the cable forces in the cable-stayed bridges, we adopted the key nodal displacement as constraint conditions to minimize the bending moment of overall structure. Firstly, the optimized load factor and the initial force of the cable were calculated in Midas/Civil model. Secondly, the coefficient matrix and bending moment data were imported into Excel to define a target function and constraint conditions for the initial cable force. Finally, the optimized cable force was obtained by locally adjusting the initial cable force in Midas/Civil model. The results from analyzing a case of cable-stayed bridge show that the bending moment and maximum vertical displacement of the girder, bending moment and maximum horizontal displacement of the main tower decrease by 36%, 51%, 70% and 74% respectively. The cable force evenly distributes, and the alignment of cable-stayed bridge becomes smoother after optimization.

Keywords: cable-stayed bridge; cable force optimization; unknown load factor; influence matrix

斜拉桥是一种由桥塔、加劲梁、斜拉索三种基本构件组成的组合桥梁结构体系,其工作原理是利用桥塔引出的斜拉索作为主梁的弹性中间支承,借以降低主梁的截面弯矩,减轻梁的自重,提高跨越能力^[1-2].斜拉桥属于高次超静定结构,其

重要特征是索力可以调整,而索力的大小与分布决定了斜拉桥的内力和线形,因此如何通过索力调整使结构的受力处于一个相对较为合理的状态是斜拉桥设计时一个非常重要的问题.成桥状态的恒载索力也往往成为评价斜拉桥结构优劣的重

收稿日期:2017-01-16

基金项目:武汉工程大学研究生创新基金(CX2016037)

作者简介:祁超,硕士研究生. E-mail:971620940@qq.com

*通讯作者:李元松,博士,教授. E-mail:li_yuan_song@126.com

引文格式:祁超,李元松,杨恒,等.大跨径钢箱梁斜拉桥合理成桥索力的优化[J].武汉工程大学学报,2017,39(5):477-481.

QI C, LI Y S, YANG H, et al. Optimization of bridge-completing cable force in cable-stayed bridge with long-span steel box girder[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(5): 477-481.

要指标,因此斜拉桥索力优化方法的研究具有重要的工程意义。

确定斜拉桥合理成桥索力的理论计算方法有很多,主要有指定状态法、无约束索力优化法、有约束索力优化法和影响矩阵法^[3-6]。这些方法各有其优缺点与相应的适用条件,同时都有成功应用的案例^[7-10],然而针对具体的桥梁,是选用其中一种方法或多种方法的组合,仍然有待进一步深入研究确定。本文结合某大跨径钢箱梁斜拉桥,提出一种基于Midas/Civil,综合利用影响矩阵调值原理,以结构整体弯矩最小为目标、部分关键节点的位移为约束条件的斜拉桥索力优化方法。

1 成桥索力优化理论

1.1 影响矩阵法

影响矩阵法^[11]不仅能解决线性调值计算问题,还能通过广义影响矩阵解决非线性的调值计算问题,因此该方法是在诸多斜拉桥索力调整方法基础上发展起来的一种理论完备的索力优化方法。影响矩阵是由施调向量、影响向量和受调向量所组成的线性方程。其计算原理为,当结构满足线性叠加原理,则

$$[C]\{X\}=\{D\}, \quad (1)$$

式中: $[C]$ 为影响矩阵, $\{X\}$ 为施调向量, $\{D\}$ 为受调向量。

利用有限元软件,在单位荷载或者单位变形作用下,取斜拉桥关心截面的内力、应力、位移为受调向量 $\{D\}$,斜拉索索力为施调向量 $\{X\}$,通过影响矩阵 $[C]$ 建立受调向量与施调向量的关系,将索力优化问题转化为式(1)。

1.2 最小弯矩法

最小弯矩法^[12]是以结构的弯矩平方和最小为目标函数,对斜拉桥合理索力进行求解和优化,其计算原理与最小弯曲应变能法相似。而最小弯曲应变能法^[13]是以结构的弯曲应变能作为目标函数,使结构弯曲应变能最小。

对于离散的杆系结构,弯曲应变能可写成:

$$U=\sum_{i=1}^m \frac{L_i}{2E_i I_i} M_i^2, \quad (2)$$

式中: m 为结构单元总数; L_i 、 E_i 、 I_i 分别为第 i 号单元的杆件长度、材料弹性模量、截面惯性矩。

将式(2)改写成矩阵形式:

$$U=\{M\}^T[B]\{M\}, \quad (3)$$

式中: $\{M\}$ 是弯矩向量; $[B]$ 为对角系数矩阵,

$$b_{ii}=L_i/2E_i I_i (i=1, 2, 3, \dots, m). \quad (4)$$

令调索前弯矩向量为 $\{M_0\}$,施调向量为 $\{T\}$,结合式(1)和式(3)得:

$$U=C_0+\{M_0\}^T[B][C]\{T\}+\{T\}^T[C]^T[B]\{M_0\}+\{T\}^T[C]^T[B][C]\{T\}, \quad (5)$$

式中: $[C]$ 为影响矩阵, C_0 是与 $\{T\}$ 无关的常数。

要使索力调整后结构弯曲应变能最小,则:

$$\partial U/\partial T_i=0 \quad (i=1, 2, 3, \dots, l). \quad (6)$$

将式(5)代入式(6),写成矩阵形式:

$$[C]^T[B][C]\{T\}+[C]^T[B]\{M_0\}=0. \quad (7)$$

仅当 $EI=1$ 和式(7)中的 $[B]$ 为单位矩阵时,求解式(7)线性方程组即可得到结构弯矩平方和最小下的成桥索力^[14]。

1.3 未知荷载系数法

未知荷载系数法是计算满足某种约束条件和目标函数的优化的变量值,将每个要计算的索力定义为一个荷载工况,力的大小为单位荷载;在其它荷载工况(均布荷载)和单位力作用下进行结构分析;使用约束条件建立不平衡方程,计算满足不平衡方程的解就是所求的未知荷载系数。Midas/Civil中提供的解是使目标函数最小的解,目标函数的类型有变量的绝对值之和($\sum_{i=1}^n |X_i|$)、变量的平方之和($\sum_{i=1}^n |X_i|^2$)、变量的绝对值中最大值($\text{Max}(|X_1|, |X_2|, \dots, |X_n|)$)等类型;约束条件可以是主塔和主梁位移、弯矩和索力的上下限,变量值为斜拉索索力。

平方之和($\sum_{i=1}^n |X_i|^2$)、变量的绝对值中最大值($\text{Max}(|X_1|, |X_2|, \dots, |X_n|)$)等类型;约束条件可以是主塔和主梁位移、弯矩和索力的上下限,变量值为斜拉索索力。

2 优化方法与步骤

优化是在满足所有约束条件的情况下,求出一组设计变量的值,使目标函数的值达到最优,其主要包括以下几方面:设计变量、约束条件和目标函数^[15]。其中目标函数可表达为:

$$\min[f(x)], \quad (8)$$

式中:目标函数 $f(x)$ 为结构弯矩平方和,设计变量 $x=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ 为斜拉索初张拉力。

约束条件的表现形式可写成

$$gu(x) \leq 0 \text{ 或 } gu(x) \geq 0, \quad (9)$$

式中: $u=1, 2, 3, \dots, m, m$ 为约束条件个数,约束条件可以是主塔和主梁位移、弯矩和索力的上下限等。

具体优化步骤如下:

步骤1: 根据设计参数,采用Midas/Civil建立

全桥有限元模型;

步骤2:定义主梁的恒载和斜拉索单位荷载的荷载工况及边界约束条件,然后输入恒载和单位荷载,进行计算;

步骤3:将斜拉索单位拉力和恒载进行组合,生成荷载组合工况;

步骤4:利用Midas/Civil中“未知荷载系数”功能,约束条件设置为:索塔塔顶水平位移、主梁位移小于某一限值,索塔与主梁弯矩小于某一限值,求解未知荷载系数,计算初始索力;

步骤5:根据步骤4计算所得未知荷载系数,将生成的系数矩阵导入Excel中,应用Excel的规划求解功能,建立以主梁和主塔最小弯矩为目标函数,主梁和主塔位移和弯矩为约束条件的优化函数方程求解最优索力;

步骤6:根据步骤5计算索力在Midas/Civil建立荷载组合,重新计算,在结果中查看各限制条件是否满足设定目标,如果不满足,还可以使用Midas/Civil中自带调索功能进行微调,使主梁弯矩、主梁位移、主塔位移以及索力控制在合理的范围内.

3 工程应用

3.1 工程概况

某三跨双索面钢箱梁斜拉桥,顺桥向沿中跨跨中对称,横桥向对称,斜拉索每塔16对,全桥共64对,箱梁每截断长15 m,立面布置如图1所示.桥梁基本参数:中跨跨径600 m,边跨跨径213 m,塔高107.35 m;单根斜拉索截面面积 $6.02\times 10^{-5}\text{ m}^2$,弹性模量 $1.95\times 10^5\text{ MPa}$,加劲梁截面面积 3.062 6 m^2 ,弹性模量 $2.05\times 10^5\text{ MPa}$.

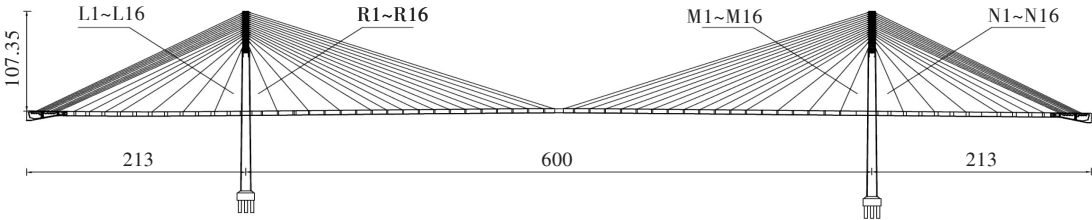


图1 斜拉桥结构体系简图(单位:m)
Fig. 1 Diagram of structural system of cable-stayed bridge (unit:m)

3.2 计算模型

利用Midas/Civil软件建立成桥有限元模型,主塔和主梁采用空间梁单元模拟,斜拉索采用等效的桁架单元模拟. 约束条件为塔墩固结,主梁和主塔采用弹性连接中的一般连接,顺桥方向和垂直

方向固定,边墩处垂直方向固定,顺桥向释放,斜拉索与主梁采用弹性连接中的刚性连接进行连接,斜拉索与主塔上的节点直接连接. 全桥计算模型由552个单元和550个节点组成. 全桥有限元模型如图2所示.

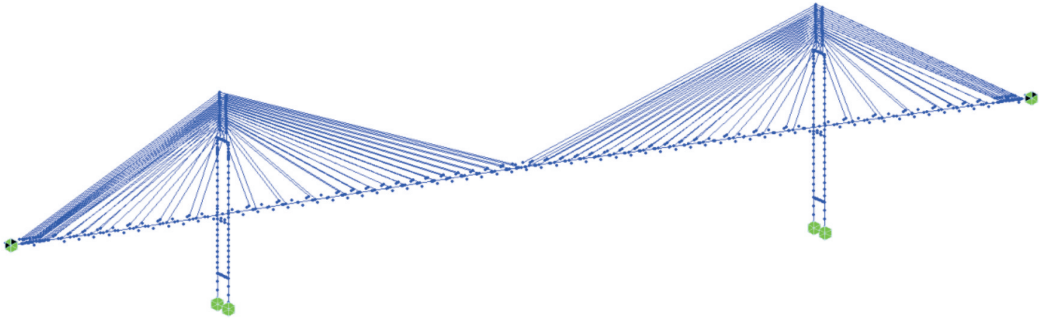


图2 斜拉桥有限元模型
Fig. 2 Finite element model of cable-stayed bridge

3.3 初始成桥索力

采用Midas/Civil中的未知荷载系数功能,建立约束条件:加劲梁弯矩 $\leq 1\times 10^5\text{ kN}\cdot\text{m}$,主梁竖向位移 $\leq 0.1\text{ m}$,主塔弯矩 $\leq 5\text{ 000 kN}\cdot\text{m}$,主塔水平位移 $\leq 0.03\text{ m}$;求解能满足约束条件的荷载系数. 根据未知荷载系数计算斜拉索的初拉力,如表1所示

(由于结构对称,表1中仅列出左岸主塔两侧斜拉索初拉力). 从表1可知,主塔侧R1号索力远小于R2号索力值,其结果将导致塔梁交接处主梁绝大部分重力都分配到支座上,主梁负弯矩偏大,相应地梁、塔弯矩和位移都偏大. 因此,需对计算成桥索力进行优化.

表 1 优化前的索力
Tab. 1 Cable force before optimization

编号	索力	编号	索力
No.	cable force / kN	No.	cable force / kN
L1	935	R1	306
L2	3 889	R2	2 288
L3	4 450	R3	4 029
L4	4 937	R4	4 719
L5	5 458	R5	4 758
L6	5 997	R6	4 703
L7	6 349	R7	4 621
L8	6 207	R8	4 593
L9	5 833	R9	4 644
L10	5 650	R10	4 563
L11	5 471	R11	4 461
L12	5 260	R12	4 338
L13	5 052	R13	4 126
L14	4 854	R14	3 956
L15	4 672	R15	3 783
L16	4 474	R16	3 836

3.4 成桥索力优化

将计算初始索力形成的系数矩阵导入 Excel 中,利用 Excel 中规划求解功能,设定目标函数为主梁和主塔弯矩平方和最小,限值条件:索力 2 000 kN~6 500 kN,主梁位移±0.06 m、部分主梁弯矩:±8×10⁴ kN·m,主塔弯矩±3 000 kN·m. 执行规划求解,不断改变约束条件,得出较为合理的索力分布,然后转入 Midas/Civil 环境,进行索力微调,计算结果如表 2 所示.

表 2 优化后的索力
Tab. 2 Cable force after optimization

编号	索力	编号	索力
No.	cable force / kN	No.	cable force / kN
L1	2 423	R1	2 324
L2	4 162	R2	2 892
L3	5 556	R3	4 537
L4	5 733	R4	5 061
L5	5 579	R5	5 171
L6	6 075	R6	5 186
L7	5 949	R7	5 136
L8	5 991	R8	5 066
L9	5 579	R9	5 100
L10	5 432	R10	4 949
L11	5 288	R11	4 794
L12	5 139	R12	4 606
L13	4 996	R13	4 272
L14	4 874	R14	4 110
L15	4 783	R15	3 874
L16	4 318	R16	3 852

利用优化后的索力计算斜拉桥主梁、主塔弯矩和位移,如表 3 所示. 由表 3 可知,优化后,主梁弯矩减小了 36%,主塔弯矩减小了 70%;主梁竖向最大位移减小了 51%;主塔水平最大位移减小了 74%.

表 3 优化前后数据对比
Tab. 3 Comparison of data before and after optimization

数值 类型 data type	主梁弯矩	主塔弯矩	主梁竖向 位移	主塔水平 位移
	bending	bending		
	moment	moment of	vertical	horizontal
	of main girder / (kN·m)	main tower / (kN·m)	displacement of main girder / m	displacement of main tower / mm
优化前	-220 496	-5 323	-0.115	8.1
优化后	-141 531	-1 579	-0.056	2.2

为进一步说明优化效果,提取主梁、主塔的弯矩、位移值等关键参数优化前后的值,绘制分布曲线,如图 3~图 5 所示. 从图 3~图 5 中可以看出,优化后索力比初始索力分布更为均匀,主梁位移较之前更接近目标线型;主塔弯矩明显减小 70%,主塔顶水平位移减小 74%.

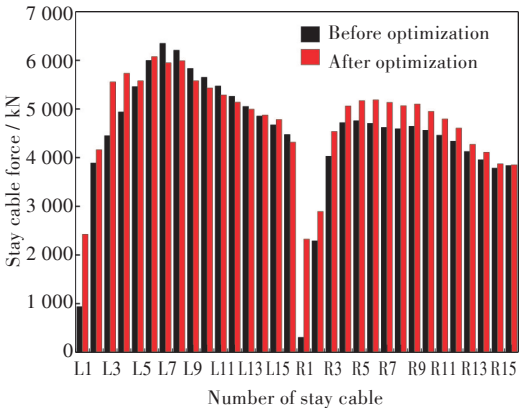


图 3 索力优化前后对比

Fig. 3 Comparison of stay-cable force before and after optimization

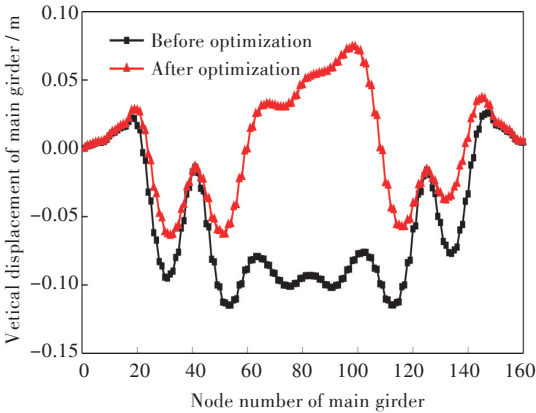


图 4 主梁线型优化前后对比

Fig. 4 Comparison of main girder linear before and after optimization

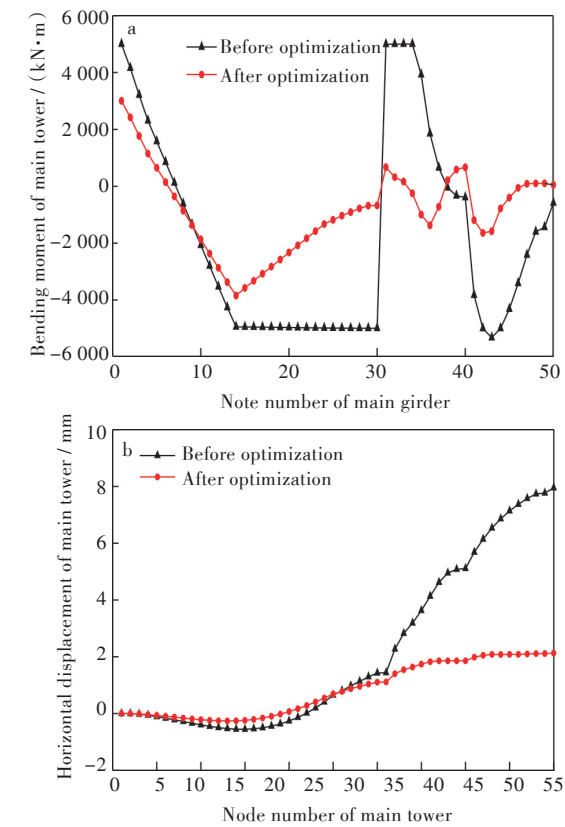


图5 主塔弯矩和位移优化前后对比:(a)弯矩,(b)位移
Fig. 5 Comparison of main tower (a)bending moment and (b)displacement before and after optimization

4 结 语

1)针对索桥结构索力可调的特点,结合某钢箱梁斜拉桥,提出了以结构整体弯矩平方和最小为目标,关键节点位移为约束条件的索力优化方法.

2)借助Midas/Civil的调索功能与Excel的优化求解工具,能够方便、快捷地实现上述索力优化方法.

3)实际应用结果表明,本文所述的索力优化方法,能有效改善斜拉桥主梁和主塔的受力和变形,使成桥状态达到设计目标.

参考文献:

[1] 陈明宪. 斜拉桥建造技术[M]. 北京:人民交通出版社,2003.

[2] 苗永慧. 基于影响矩阵法的斜拉桥合理成桥状态研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.

[3] KIM K S, LEE H S. Analysis of target configurations under dead loads for cable-supported bridges [J]. Computers & Structures, 2001, 79(29/30):2681-2692.

[4] KIM J H, CHANG S P. Dynamic stiffness matrix of an inclined cable [J]. Engineering Structures, 2001, 23 (12): 1614-1621.

[5] WANG P H, TSENG T C, YANG C G. Initial shape of cable-stayed bridges [J]. Computers & Structures,

1993, 46(6): 1095-1106.

[6] 贾丽君,肖汝诚,孙斌,等. 确定斜拉桥施工张拉力的影响矩阵法[J]. 苏州城建环保学院学报, 2000, 13 (4):21-27.

JIA L J, XIAO R C, SUN B, et al. Influence matrix method determining construction cable tensions for cable-stayed bridges [J]. Journal of Suzhou Institute of Urban Construction and Environmental Protection, 2000, 13(4):21-27.

[7] 吴霄,肖汝诚. 基于遗传算法的大跨度混合梁斜拉桥索力优化[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35 (6):722-726.

WU X, XIAO R C. Optimization of cable force for cable-stayed bridges with mixed stiffening girders based on genetic algorithm [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2014, 35(6):722-726.

[8] 余海辉. 龙湾大桥成桥索力优化与合理施工状态研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014.

[9] 于永生,胡展飞. 基于未知荷载系数法的斜拉桥索力计算与优化[J]. 山东交通科技, 2016(4):83-86.

YU Y S, HU Z F. Computational analysis and optimization for cable force of cable-stayed bridges with unknown load coefficient method [J]. Shandong Jiaotong Keji, 2016(4):83-86.

[10] 郭中荣. 斜拉桥合理成桥状态确定及施工控制仿真分析[D]. 重庆:重庆大学, 2014.

[11] 肖汝诚. 确定大跨径桥梁合理设计状态理论与方法研究[D]. 上海:同济大学, 1996.

[12] 范立础,杜国华,马健中. 斜拉桥索力优化及非线性理想倒退分析[J]. 重庆交通学院学报, 1992, 11(1): 1-12.

FAN L C, DU G H, MA J Z. Optimum cable tensions for cable-stayed bridges and idealize nonlinear back-running analysis [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1992, 11(1):1-12.

[13] 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, 26 (3): 235-240.

XIAO R C, XIANG H F. Influence matrix method of cable tension optimization for cable-stayed bridge [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1998, 26(3):235-240.

[14] 梁鹏,肖汝诚,张雪松. 斜拉桥索力优化实用方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(11): 1270-1274.

LIANG P, XIAO R C, ZHANG X S. Practical method of optimization of cable tensions for cable-stayed bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, 31(11):1270-1274.

[15] 谢小辉. 多塔斜拉桥成桥索力优化及合理施工状态的确定[D]. 成都:西南交通大学, 2013.