

基于加权影响矩阵的提篮拱二次调索方法研究

刘世建

(广西交通科学研究院有限公司 广西 南宁 530007)

摘要: 为避免大跨提篮拱吊杆索力二次调索过程中, 结构内力、位移出现顾此失彼的情况。以一450m 特大跨钢箱提篮拱为工程背景, 二次调索过程中对影响矩阵增加加权系数, 通过 MATLAB 求解加权后方程的最小二乘解, 经过少量的迭代运算, 索力差值即趋于稳定。结果表明: 实测索力与设计成桥索力的相对误差可控制在5%以内, 完全满足规范限值的要求; 在有限元计算过程中考虑几何非线性效应的方式, 减小了几何非线性效应对结构的影响; 作为一种加速收敛的方法, 加权影响矩阵具有收敛速度较为均匀的特点。

关键词: 加权影响矩阵; 提篮拱; 二次调索; 迭代运算

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

Research of Secondary Cable Adjusting Method of Basket Handle Arch Based on Weighted Influence Matrix

LIU Shijian

(Guangxi Transportation Research & Consulting Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530007, China)

Abstract: In order to avoid the inconsiderateness of force and displacement of the structure in the process of secondary cable adjustment of the suspender force of long-span basket handle arch. Use a 450m long-span basket handle arch as engineering background, the process of the cable the influence matrix increase the weighting coefficient, using MATLAB to solve the weighted least-squares solution of equation, after a small amount of iterative computation, the cable force difference is stable. Research shows that: The relative error of the measured cable force with completion cable forces can be controlled within 5%, fully meet the specification limit requirements. The way of considering the geometric nonlinear effect during finite element calculation reduced the influence of the effect on structure. As a way of accelerate convergence, the weighted influence matrix has uniform convergence speed.

Key words: Weighted influence matrix, Basket handle arch, Secondary cable adjusting, Iterative computation

提篮拱桥架设过程中, 结构受力体系多次变换, 受施工过程中各种因素的影响, 吊杆索力初次成桥时与设计成桥索力有一定差别。目前, 国内外针对索力调整的研究主要以斜拉桥的索力研究为基础, 且成果比较丰富, 主要有最小二乘法、弯曲能量最小法、弯矩能量最小法、影响矩阵法^[1-4]。影响矩阵法将优化的目标函数统一用索力变量与广义影响矩阵表示, 可同时对多种目标函数进行优化, 实现程序化计算非常方便^[5-6]。本文以影响矩阵为理论基础,

对影响矩阵增加加权系数, 通过 MATLAB 求解加权后方程的最小二乘解, 经过少量的迭代运算, 来获得需要的目标索力, 并以 450 m 提篮拱桥为工程背景, 在综合考虑结构受力安全和索力控制满足规范要求的前提下, 验证了这种方法的可行性。

1 二次调索的加权影响矩阵

以吊杆索力的受调向量来说明影响矩阵的构成^[7-8]。

收稿日期: 2018-12-13

基金项目: 广西重点研发计划资助项目(桂科 2018AB66014)

作者简介: 刘世建(1975-), 男, 湖南洞口人, 工学硕士, 高级工程师, 从事桥梁检测评估、健康监测和加固设计方面的研究。

假定拱桥受力处于线弹性状态,则可建立如下方程组:

$$[C]\{\Delta x\}=\{b\} \quad (1)$$

其中: $\{\Delta x\}$ 需要求解的二次调索调整量,表示需要达到的成桥状态期望目标值; $[C]$ 为吊杆索力调整对控制目标的影响矩阵。

如果按某种方法确定合理成桥状态的控制参数目标值为 $\{F_0\}_{m \times 1}$, 则可得

$$\{b\}=\{F_0\}-\{F\} \quad (2)$$

张拉索力的调整量为 $\{\Delta x\}$, 式(1)中通常控制参数个数多于需要张拉的吊杆索力次数, 式(2)则变成一超静定方程组, 可用最小二乘法及极值原理可得

$$[C]^T[\rho]^2[C]\{\Delta x\}=[C]^T[\rho]^2\{b\} \quad (3)$$

式(3)中加权系数 $[\rho]$ 可由两部分组成: $\rho=\rho_1 \cdot \rho_2$ 。其中, 以索力为物理基准量取值为1, 物理量位移取为 R_0/R_t , R_0 、 R_t 分别为索力和位移的目标值的平均值, 且该平均值均以设计成桥状态为目标值^[9-10]。

2 工程算例

2.1 工程概况

如图1所示, 某桥为中承式钢箱提篮拱桥, 计算跨径为457.183 m, 计算矢跨比为1/4.5, 净跨径为450 m, 净矢高为100 m, 拱轴线平面与水平面夹

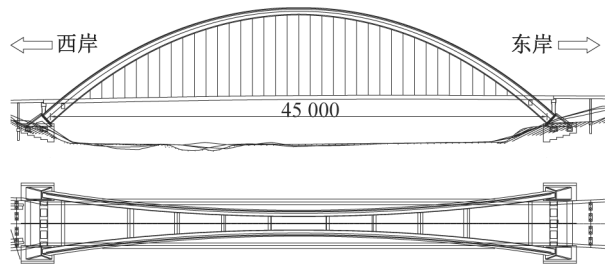


图1 提篮拱桥立面平面图(单位: cm)

Fig.1 Elevation and floor plan of basket handle arch (unit: cm)

角为 80° , 拱平面与竖直平面的夹角为 10° 全桥吊杆采用 $\phi S15.2$ mm、270 级环氧涂层钢绞线, 单根直径 15.22 mm, 标准强度 1 860 MPa, 吊索采用整束挤压式锚具, 材料选用 40 Cr; 吊杆纵向布置间距为 10.5 m, 全桥共设 37 对吊杆, 每根吊杆由内、外侧吊杆组成, 共 148 根吊杆。

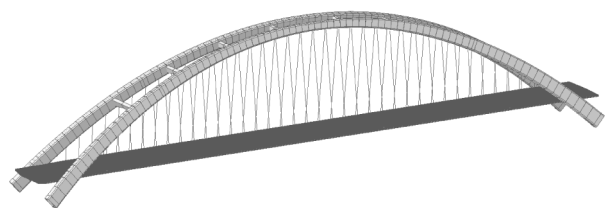


图2 有限元计算模型图

Fig.2 Finite element calculation model diagram

2.2 加权影响矩阵二次调索求解过程

(1) 有限元计算模型的建立

采用 Midas civil 建立有限元空间三维杆系模型, 内、外侧吊杆按单个桁架单元模拟, 计算过程中考虑结构的几何非线性效应, 全桥共划分为 453 个单元, 520 个节点, 有限元计算模型见图2。

(2) 影响矩阵 $[C]$ 求解

与施工阶段或成桥索力的调整有一定的差异, 本文研究的是二期成桥索力之后的二次调索。按照指定调索顺序进行张拉后, 不计入当前阶段对后续待张拉吊杆的索力(或其它控制量)的影响。因此, 影响矩阵左下角元素为0。在1#~37#吊杆上施加单位索力后, 可以获得其余36根吊杆的索力单位力影响量大小, 获得矩阵 $[C]_{\text{索力}}$, 本文选取了1~8#吊杆索力影响矩阵。

由此, 构造新矩阵, 求得影响矩阵

$$[C]=\begin{bmatrix} [C]_{\text{索力}} & \vdots \\ \vdots & [C]_{\text{位移}} \end{bmatrix}.$$

(3) 确定成桥状态期望目标值 $\{b\}$

第一次计算 $\{b\}=\{T_1\}$, $\{T_1\}$ 为设计成桥索力

$$[C]_{\text{索力}} = \begin{bmatrix} 1 & -0.584\ 07 & -0.375\ 24 & -0.216\ 77 & -0.106\ 85 & -0.037\ 61 & 0.005\ 024 & 0.027\ 34 \\ 0 & 1 & -0.270\ 51 & -0.205\ 98 & -0.136\ 23 & -0.083\ 4 & -0.042\ 7 & -0.014\ 56 \\ 0 & 0 & 1 & -0.239\ 05 & -0.187\ 14 & -0.136\ 68 & -0.089\ 29 & -0.050\ 8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -0.226\ 01 & -0.188\ 31 & -0.140\ 01 & -0.093\ 69 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0.182\ 16 & -0.151\ 78 & -0.113\ 43 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0.181\ 79 & -0.151\ 03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0.179\ 79 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

与二期恒载后的实测索力之差。后续迭代过程为 $\{T_2\}=\{T_1\}+\{\Delta x\}$, $\dots$, $\{T_i\}=\{T_{i-1}\}+\{\Delta x\}$, 其中 $\{\Delta x\}$ 随着迭代不断更新。

(4) 权矩阵 $[\rho]$ 的确定

本文中的工程实例为一 450 m 钢箱提篮拱桥, 计算中主要以索力控制为核心, 关键截面位移控制为辅。因此, 索力的权重系数较位移大。根据吊杆索力及钢箱梁位移经过试算后, 加权矩阵由索力加权矩阵 $[C]_{\text{索力}[\rho]}$ 和位移加权矩阵 $[C]_{\text{位移}[\rho]}$ 组成的 $[\rho]$ 加权矩阵如下:

$$[\rho]_{74 \times 74} = \begin{bmatrix} [C]_{\text{索力}[\rho]} & \vdots \\ \vdots & [C]_{\text{位移}[\rho]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ & \ddots & & & & & & \\ & & \ddots & & & & & \\ & & & \ddots & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 0.8 & & \\ & & & & & & \ddots & \\ & & & & & & & 0.8 \end{bmatrix}$$

(5) 通过 MATLAB 求解 $\{\Delta x\}$

应用 MATLAB 对公式 (3) 进行计算, 求解出 $\{\Delta x_1\}$, 代入有限元模型进行第一轮迭代, 迭代后新的张拉索力 $\{T_2\}=\{T_1\}+\{\Delta x\}$ 。考虑到特大跨桥梁几何非线性因素影响, 将 $\{T_2\}$ 再进行正装计算得到 $\{T_3\}$, $\dots$, $\{T_i\}=\{T_{i-1}\}+\{\Delta x_{i-1}\}$, 多次迭代, 直至收敛。

3 计算结果及分析

为验证本文方法在大跨拱桥索力二次调整过程中的适用性, 在上述 2.2 节非线性有限元模型的基础上, 采用加权影响矩阵方法对文中工程算例进行

索力二次调整进行优化。本文不讨论吊杆二次调索调整顺序对结构的影响, 以 1# ~ 8# 吊杆的计算结果为例进行阐述, 设定吊杆索力调整的顺序依次为 1# → 2# → $\dots$ → 7# → 8#, 对索力迭代运算结果及二次调索后的计算结果进行分析。

3.1 索力迭代运算结果分析

为了避免索力调整过程中的繁琐试算, 引入加权影响矩阵作为一种加速收敛的方法, 收敛情况作为评价该方法是否具有可操作性比较客观的条件之

一。由表 1 及图 3 可见:

(1) 1# ~ 8# 吊杆在二期完成后 (未进行索力二次调整), 以实测索力为初始索力, 进行 5 次迭代后, 索力差值趋于稳定;

(2) 实测索力与设计成桥索力差值最大 -364 kN 的 1# 吊杆, 图 3 中 1# 吊杆索力各迭代位置的斜率 (迭代速率) 为 0.56、0.62、0.64、0.59、0.42, 可见吊杆收敛速度较为均匀;

(3) 采用的加权影响矩阵方法应用于工程中的 450 m 提篮拱桥, 虽然该方法需要以结构满足线弹性假定为前提, 但在有限元计算模型中已考虑了结构的几何非线性效应, 有效避免了特大跨拱桥几何非线性对计算结果准确性的影响。

表 1 加权影响矩阵索力迭代变化表

Tab.1 Iterative change table of cable force of weighted influence matrix

吊杆号	设计成桥索力 /kN	二期完成后索力 /kN	迭代 1 次 /kN	迭代 2 次 /kN	迭代 3 次 /kN	迭代 4 次 /kN	迭代 5 次 /kN
1#	2 190	2 554	2 350	2 251	2 212	2 199	2 195
2#	1 800	2 006	1 885	1 836	1 815	1 807	1 803
3#	1 638	1 751	1 682	1 658	1 646	1 641	1 639
4#	1 572	1 780	1 655	1 606	1 588	1 577	1 574
5#	1 560	1 684	1 613	1 580	1 568	1 564	1 562
6#	1 540	1 495	1 520	1 533	1 537	1 539	1 539
7#	1 538	1 831	1 658	1 585	1 557	1 546	1 541
8#	1 538	1 616	1 571	1 551	1 543	1 540	1 539

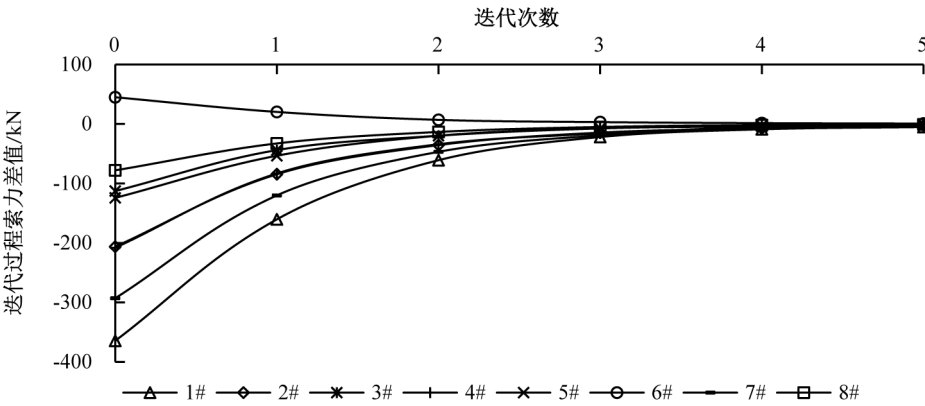


图3 迭代过程索力差值变化图
Fig.3 Variation diagram of cable force difference in iterative process

表 2 索力调整前后吊杆索力分析表
Tab.2 Analysis of cable force of derrick before and after adjusting cable force

吊杆号	二期完成后索力 /kN	设计成桥索力 /kN	相对误差 /%	二次调索后索力 /kN	相对误差 /%	实测索力 /kN	相对误差 /%
1#	2 554	2 190	16.62	2 195	0.23	2 271	3.57
2#	2 006	1 800	11.44	1 803	0.17	1 841	2.23
3#	1 751	1 638	6.90	1 639	0.06	1 703	3.82
4#	1 780	1 572	13.23	1 574	0.13	1 538	-2.21
5#	1 684	1 560	7.95	1 562	0.13	1 587	1.70
6#	1 495	1 540	-2.92	1 539	-0.06	1 542	0.13
7#	1 831	1 538	19.05	1 541	0.19	1 559	1.35
8#	1 616	1 538	5.07	1 539	0.06	1 575	2.35

注：表中相对误差均为相对于设计成桥索力的相对误差。

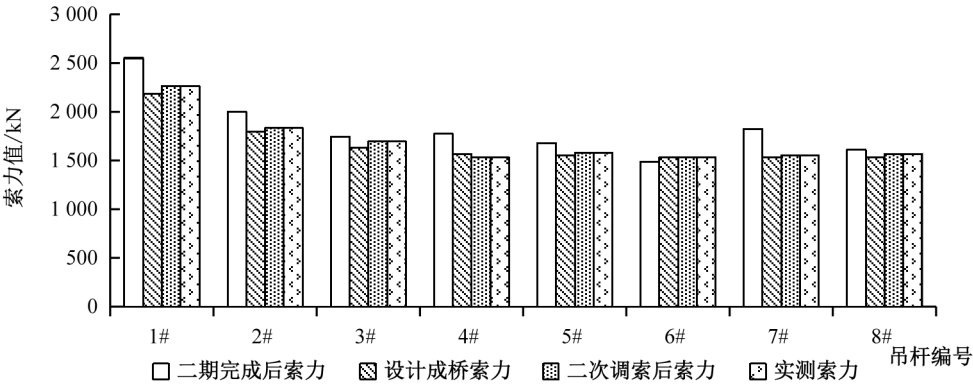


图 4 二次调索后索力对比分析图
Fig4 Comparative analysis diagram of cable force after secondary cable adjustment

3.2 二次调索后计算结果分析

采用加权影响矩阵对二期完成后的索力进行了调整，调整前后吊杆索力的计算结果和索力实测值见表 2 以及图 4，从中可见：

(1) 经过少量的迭代运算，即可使二次调索后的吊杆索力与设计成桥索力理论相对误差减小到 -0.06% ~ 0.23%；

(2) 诸多现场施工因素的影响，使得实测索力与设计成桥索力的相对误差在 -2.21% ~ 3.82% 之间，但仍然满足规范要求；

(3) 二次调索后，索力相对误差减小、索力分布均匀，结合工程实例有力的说明了本方法的可行性和可靠性。

(下转第 55 页)

建筑信息模型一起导入 Navisworks 中, 在 TimeLiner 下即可进行施工进度模拟, 通过比较实际项目进度, 及时调整施工进度, 有效避免进度延误。将成本信息录入 Navisworks 中还可完成对项目的 5D 管理。

3 结论

BIM 技术可以提高装配式建筑的设计, 生产和施工水平, 使生产链从设计阶段到运营维护阶段更加紧凑。通过合理应用 BIM 技术, 我们的工程质量管理可以在设计阶段通过 3D 模型得到保证, 从一开始就减少质量危害。

参考文献:

- [1] 曹江红, 纪凡荣, 解本政, 等. 基于 BIM 的装配式建筑质量管理 [J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(3): 106-109
- [2] 齐宝库, 李长福. 基于 BIM 的装配式建筑全生命周期管理问题研究 [J]. 施工技术, 2014(15): 25-29.
- [3] 任志涛, 郭林林, 郝文静. 基于 BIM 的装配式建筑项目集成管理模型研究 [J]. 建筑经济, 2018, 39(9): 27-30.
- [4] 张爱琳, 闫泽文, 惠之瑶. 我国建筑业 BIM 技术研究文献综述 [J]. 基建管理优化, 2018, 30(3): 2-8.

- [5] 俞英娜. 基于 BIM 技术在装配式建筑施工中的应用 [J]. 建筑设计管理, 2018, 35(7): 85-88.
- [6] 高 崧, 李卫东. 建筑信息模型标准在我国的发展现状及思考 [J]. 工业建筑, 2018, 48(2): 1-5.
- [7] 刘丹丹, 赵永生, 岳莹莹, 等. BIM 技术在装配式建筑设计与建造中的应用 [J]. 建筑结构, 2017, 47(15): 36-39.
- [8] 肖 阳, 刘 为. BIM 技术在装配式建筑施工质量管理中的应用研究 [J]. 价值工程, 2018, 37(6): 104-107.
- [9] 王淑婧, 周启慧, 田东方. 工程总承包背景下 BIM 技术在装配式建筑工程中的应用研究 [J]. 工程管理学报, 2017, 31(6): 39-44.
- [10] PEZESHKI Z, IVARI S A S. Applications of BIM: a brief review and future outline [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2018, 25(2): 273-312.
- [11] SALEHI S A, YITMEN. Modeling and analysis of the impact of BIM-based field data capturing technologies on automated construction progress monitoring [J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 10(5): 1-17.
- [12] MARCHINI A, PATZLAFF J O. Building information modeling (BIM) application in civil constructions intending the increase of service life [J]. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2016, 1(1): 12-13.

(责任编辑 李新)

(上接第 46 页)

4 结论

1) 经过少量的迭代运算, 索力差值即趋于稳定, 实测索力与设计成桥索力的相对误差可控制在 5% 以内, 完全满足规范要求。

2) 通过有限元计算模型中对结构几何非线性效应的考虑, 有效避免了大跨拱桥几何非线性对计算结果准确性的影响。

3) 加权影响矩阵作为一种加速收敛的方法, 吊杆索力收敛速度较为均匀。

参考文献:

- [1] 刘迎春, 薛素铎, 李雄彦. 上承式拉索拱桥成桥索力优化研究 [J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(9): 1343-1347.
- [2] 杨 俊, 基于影响矩阵的大跨桥梁合理成桥状态与施工控制研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学交通学院, 2008.

- [3] 任 亮, 方 志, 上官兴. 钢管混凝土拉索组合拱桥索力优化研究 [J]. 工程力学, 2010, 27(5): 153-158.
- [4] 张建民, 肖汝诚. 千米级斜拉桥空间非线性两阶段索力优化 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 34-40.
- [5] 颜东煌. 斜拉桥合理设计状态确定与施工控制 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2001.
- [6] 杨 兴, 张 敏, 周水兴. 影响矩阵法在斜拉桥二次调索中的应用 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(3): 508-511.
- [7] 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.
- [8] SUNG Y C, CHANG D W, TEO E H. Optimum post-tensioning cable forces of Mau-Lo His cable-stayed bridge [J]. Engineering Structures, 2006, 28(10): 1407-1417.
- [9] 冯 翔, 赵占锋等. 基于矩阵加权多模型融合的认知跟踪波形设计 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(5): 30-33.
- [10] 孙永河, 李春好. 模糊 WINGS 视角下的 ANP 加权矩阵新构造方法 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(12): 27-31.

(责任编辑 李新)