

文章编号:1673-2049(2007)02-0019-05

钢箱梁斜拉桥成桥索力优化分析

周绪红^{1,2}, 戴 鹏¹, 狄 谨¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:基于最优化理论,建立了斜拉桥索力约束优化数学模型。以斜拉桥空间有限元模型为基础,以成桥线形为目标函数,通过转化次要目标函数为约束条件等措施,采用无约束的共轭梯度法,对成桥索力进行了优化计算,并应用该法对红岛航道桥这一独塔双索面钢箱梁斜拉桥进行了索力调整计算。通过设置不同的目标函数,比较了索力调整方法的差异和适用性。计算结果表明:不同类型的斜拉桥,其索力调整的主要目标也不尽相同,钢箱梁斜拉桥的索力调整主要以成桥线形为首要目标;该优化计算方法简便有效,计算精度高,成桥线形拟合好,具有较高的实用价值。

关键词:桥梁工程;钢箱梁斜拉桥;索力优化;成桥线形;有限元分析

中图分类号:U448.28

文献标志码:A

Optimization Analysis of Cable Tensions of Dead Load State for Cable-stayed Bridge with Steel Box Girder

ZHOU Xu-hong^{1,2}, DAI Peng¹, DI Jin¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Based on optimization theory, a mathematical model for constrained optimization of cable tensions was established. Based on spatial finite element model of cable-stayed bridge, the shape of dead load state was the objective function in this method. Unconstrained conjugate gradient optimization algorithms were applied. Through means such as modifying the minor objective function to constraint conditions, authors solved the optimization calculation of cable tensions of dead load state. The method was applied to optimization calculation of cable tensions of Hongdao Waterway Bridge which is a single pylon cable-stayed bridge with steel box girder and two cable planes. The difference and practicability of some methods about adjustment of cable tensions were compared by setting various objectives function. The results show that the primary objectives in adjustment of cable tensions are different for various types of cable-stayed bridge. The shape of dead load state is the primary objective in adjustment of cable tensions for cable-stayed bridge with steel box girder. The optimization calculation method is simple, effective and precise for computing shape of dead load state and it has high practical values.

Key words: bridge engineering; cable-stayed bridge with steel box girder; optimization of cable tension; shape of dead load state; finite element analysis

收稿日期:2007-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50608005);山东省交通科技基金项目(2006X015)

作者简介:周绪红(1956-),男,湖南南县人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:zxh@lzu.edu.cn。

0 引言

随着中国交通建设的大发展,斜拉桥以其跨越能力大、施工方便、外形美观等优点,在工程中得到了广泛的应用。在斜拉桥设计中,缩短设计周期是一个非常突出的问题,而成桥索力的确定往往是控制设计的一个重要环节。斜拉桥属于自锚体系,其成桥恒载作用下的线形和内力是衡量设计优劣的重要标准之一^[1]。通过调整斜拉桥的索力,可以获得合理的成桥线形。

各国学者针对斜拉桥的索力调整进行了大量研究,提出了多种调整索力的方法^[2-8]。常用的方法有刚性支承连续梁法、指定位移法等。这些方法多利用力的平衡关系求解,力学概念清楚,计算简便,但随着斜拉桥密索体系的出现,有的方法已不能很好地得到合理成桥状态下的索力;有的方法则效率较低,计算费用较高。

本文中通过假设→分析→搜索→最优计算的设计流程,将最优化技术的数学理论应用于索力调整。对钢箱梁斜拉桥模型,选取成桥线形为目标函数,采用惩罚函数法(SUMT法)^[9],通过把次要目标函数转换为约束条件,建立了斜拉桥索力优化数学模型。基于有限元分析程序 ANSYS,建立了斜拉桥全桥三维有限元分析模型,并结合其优化工具,采用无约束最优化的共轭梯度法,简便有效地得到了拟合理想线形的钢箱梁斜拉桥成桥索力。

1 优化模型的建立

1.1 目标函数

斜拉桥的合理成桥状态往往包含很多设计期望,如满足最终成桥合龙线形的精度;主梁等构件合理受力,内力及应力值较小;在保证结构安全适用的条件下,尽量减小材料用量,减轻结构自重等。仅通过调整索力,要同时使得各项目标都达到最优,是很难实现的。不仅目标函数的构造十分复杂,在有约束的设计空间上,数学求解也将很难得到收敛的结果。对于不同的工程项目及不同类型的斜拉桥,可根据实际情况选择最主要的设计期望作为目标函数,次要目标函数可以通过转化为约束条件对结构设计进行限制。

通常选择最小应变能作为目标函数,该目标函数能较全面地表征结构的整体状态,无论是位移还是构件的受力都可以得到较好的结果。在这种单目标函数优化设计中,结构位移仅通过给定的限制条

件来约束,并不能保证斜拉桥成桥线形的最优。对于主梁采用钢箱梁的斜拉桥,由于钢材容许应力值较大,主梁能承受较大的荷载,钢箱梁斜拉桥成桥线形的精度往往是合理成桥状态控制的首要目标,其关键指标是跨中、四分点、八分点等各个控制截面的标高。以主梁各控制点的成桥竖向位移偏差及桥塔的纵向位移偏差为目标函数时,使各点的位移偏差尽可能的小(趋于0),将能保证成桥线形与设计期望相符。其中主梁和桥塔的位移可以根据控制要求,通过权重系数来进行调整。

设全桥主梁共有 n 个标高控制点,桥塔有 m 个偏位控制点,根据各点与理想线形点的偏差平方和最小,可构造如下目标函数

$$\min f(X) = \min(\sum_{i=1}^n \mu_i^2 + \beta \sum_{j=1}^m \omega_j^2) \quad (1)$$

式中: $f(X)$ 为联合目标函数; n 、 m 为主梁、桥塔的控制点总数; μ_i 为第 i 点的竖向位移偏差; ω_j 为桥塔第 j 点的纵向位移偏差; β 为权重系数; μ_i 、 ω_j 为设计变量 X 的函数。

1.2 设计变量

成桥拉索的张拉应力是优化计算所求的未知量,通过进行索力调整,使得目标函数最优。设斜拉桥全桥共有完全独立的索 s 对,以各拉索张拉应力为设计变量

$$\mathbf{X} = (t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_s)^T \quad (2)$$

式中: t_i 为第 i 对索的成桥张拉应力。

1.3 约束条件

斜拉桥的成桥状态,存在较多的约束限制,其中包括斜拉索的应力(设计变量的约束)、主梁的内力与位移、主塔的内力与位移等。将斜拉桥作为整体结构来分析时,所选择的约束条件应尽可能较完整地描述结构系统。过少的约束条件,将无法进行完整的约束设计,过多的约束条件又会加大优化分析的难度,合理的方法是定义几个关键位置和截面的控制变量。

设主梁有 q 个关键截面,定义钢构件的 Mises 应力 σ 及位移 ξ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_q)^T \\ \xi &= (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots, \xi_q)^T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: σ_i 为第 i 截面的控制影响应力; ξ_i 为第 i 截面的影响位移。同理,可以构造斜拉桥主塔等其他构件的影响向量,通过限制这些变量的数值范围,排除应力、变形过大等不合理的状态。

1.4 优化模型

钢箱梁斜拉桥索力调整的优化模型为

$$\min f(X) = \min \sum_{i=1}^n \Delta_i^2$$

s. t.

$$\left. \begin{aligned} \alpha[T] &\leq t_i \leq \beta[T] \\ g[\sigma] &\leq \sigma_i \leq h[\sigma] \\ |\xi_i| &\leq [\xi] \\ |\Delta_i| &\leq [\Delta] \\ &\vdots \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:[*T*]为拉索的设计抗拉强度;[*σ*]为钢构件容许应力;[*ξ*]、[*Δ*]为位移限值;α、β、*g*、*h*为约束调整系数。

2 优化算法

工程结构优化问题基本上都是多目标函数非线性规划问题。索力调整的优化计算总是要尽可能地抓住设计所追求的主要目标,同时又将控制要求较为充分地反映在目标函数和约束条件之中。第1.4节中的优化模型把主梁内力控制转化为约束条件,将多目标问题弱化或简化为单目标问题,使求解变得简单,求解费用也将大大降低。

2.1 约束优化问题的转化

约束优化问题通过数学变换,转化为一个无约束优化问题后,就可以利用无约束优化算法来实现优化计算。本文中单目标函数的优化计算,采用惩罚函数法将有约束优化问题转换为无约束优化问题,即将各约束项通过添加惩罚函数的方法,加到目标函数中去,将原目标函数 *f*(*X*) 增广为一个新的辅助函数

$$f(X, \eta) = f(X) + \sum_{j=1}^n p_x[X] + \eta(\sum_{j=1}^q p_T \cdot$$

$$[T] + \sum_{j=1}^q p_{\xi}[\xi] + \sum_{j=1}^m p_{\Delta}[\Delta] + \dots) \quad (5)$$

式中:*f*(*X*,*η*)为无约束的目标函数;*f*(*X*)为原约束的目标函数;*η*为约束控制参数;*p_x*为设计变量的惩罚函数;*p_T*、*p_ξ*、*p_Δ*为约束条件的惩罚函数。

2.2 最优算法

无约束优化的计算方法有很多,其中共轭梯度法^[7]通过求因变量对设计变量的一阶偏导数,按照二次函数共轭方向构造梯度,能有效地确定搜索方向,所以本文中采用 P-R-P(Polak-ribiere-polyar)共轭梯度法确定搜索方向的梯度,其计算因子 β_{*k*} 为

$$\beta_k = \frac{\nabla^T f(X_{k+1})[\nabla f(X_{k+1}) - \nabla f(X_k)]}{\nabla^T f(X_k) \nabla f(X_k)} \quad (6)$$

对一维线性搜索算法采用黄金分割法,在设计空间内进行反复试算寻优。寻找到设计空间内的可行解后,与目标函数的容许值进行比较,如果容许值大于规定值,则确定一个新的梯度,进入下一轮迭代,直至收敛。索力优化计算流程如图 1 所示。

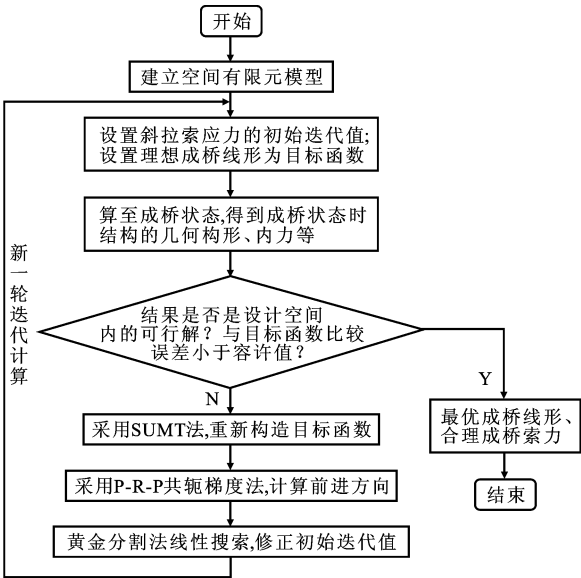


图 1 索力调整优化计算流程

Fig. 1 Calculation Flow of Cable Tension Adjustment Optimization

3 算 例

3.1 工程概况

本文中笔者以青岛海湾大桥的红岛航道桥为研究对象。青岛海湾大桥是青岛市道路交通网络布局中胶州湾东西岸跨海通道的重要组成部分,红岛航道桥为红岛连接线上的一个重点工程,该桥总体布置如图 2 所示。

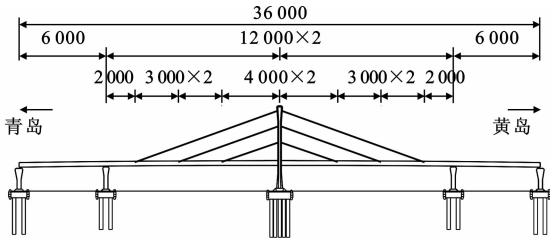


图 2 红岛航道桥总体布置(单位:cm)

Fig. 2 Total Arrangement of Hongdao Waterway Bridge(Unit:cm)

红岛航道桥为独塔双索面钢箱梁斜拉桥,该桥全长 360 m,采用四跨连续半漂浮体系,桥跨布置为 60 m+120 m+120 m+60 m;斜拉索采用平行钢丝束,索面为竖琴型,双幅桥分离设置。该桥主梁采用

流线型扁平封闭钢箱梁,标准梁段宽 18.5 m,梁高 3.2 m,采用 Q345D 钢。主塔为 H 型塔,主梁下设置一道横梁,承台顶以上塔高 60 m。塔梁连接处设置纵向限位约束装置、竖向支承及横向抗风支座。

3.2 有限元模型

在优化计算分析中,如何建立合理的有限元计算模型是一个十分重要的环节。与一般静力分析相比,优化分析需要反复迭代计算,且用于优化分析的计算模型既要能真实反映结构的力学特点及精确模拟结构的材料和几何特性,又要尽可能降低有限元分析模型的复杂性,减少结构的自由度。在保证一定计算精度的同时,加快优化迭代计算的速度,降低计算分析的费用。

本文中采用有限元程序 ANSYS 提供的参数设计语言 APDL。针对斜拉桥主要构件都是杆系结构的特点,全桥空间有限元计算模型采用“鱼骨形”模型,其中主梁、主塔及横梁均采用空间梁单元模拟,斜拉索采用三维杆单元模拟,拉索与主梁之间由刚臂连接,在桥墩处直接设置约束,空间有限元模型如图 3 所示。

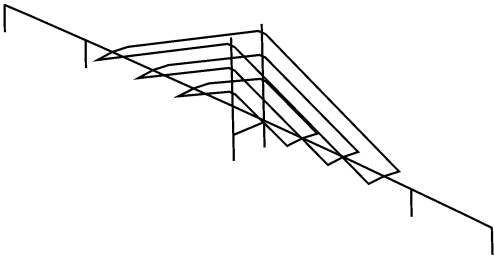


图 3 空间有限元模型
Fig. 3 Spatial Finite Element Model

3.3 优化计算结果

进行红岛航道桥初步设计时,计算了一组拟合自重及二期恒载作用下成桥线形的斜拉索索力。在初步设计的基础上,采用第 2 节中最优线形的优化计算方法,对索力进行进一步的优化调整。

红岛航道桥全桥恒载作用分为 2 种工况:工况 1 仅包含结构自重;工况 2 为结构自重和二期恒载共同作用。将初步设计的斜拉索索力设为优化设计的初始迭代值,以二期恒载作用后的成桥线形为目标函数,对该桥进行索力调整优化计算。工况 1、工况 2 原设计及优化计算后的斜拉索索力值见表 1。

以主梁最小应变能为目标函数,对红岛航道桥的索力进行了优化计算。原设计、最小应变能法及本文中的最优线形优化计算后的主梁弯矩与成桥线形如图 4 所示。

表 1 斜拉索索力优化
Tab. 1 Optimization of Stay Cable Tension MPa

工 况		第 1 对索力	第 2 对索力	第 3 对索力
原设计	工况 1	471.52	476.82	570.80
	工况 2	500.03	503.59	580.14
优化后	工况 1	619.27	422.33	399.64
	工况 2	647.79	449.10	408.98

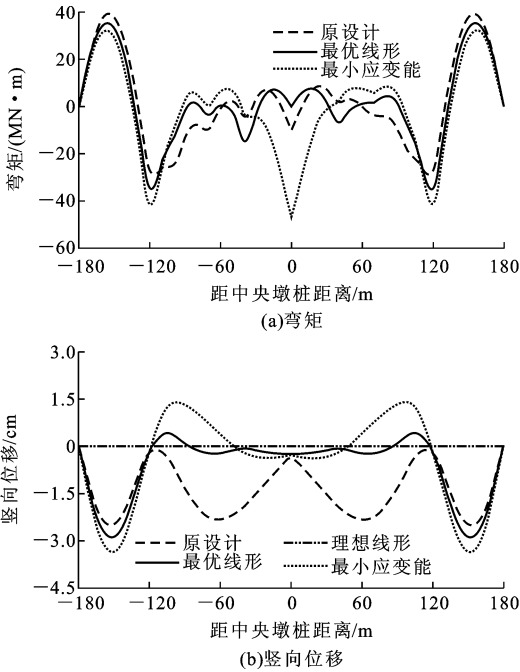


图 4 主梁成桥弯矩与线形
Fig. 4 Moment and Line Shape of Main Girder
in Dead Load State

由斜拉桥索力及成桥线形的优化结果可以看出:采用本文优化计算方法,能简便有效地得到拟合线形合理的成桥索力。采用以成桥线形为目标函数的优化方法求出的索力不仅精度高,而且控制线形的效果也很好。斜拉索索力优化调整后,全桥主梁成桥线形与理想线形的偏差更小:原设计主跨最大线形偏差为 15 mm,优化后主跨最大线形偏差为 5.6 mm;原设计边跨最大线形偏差为 37.7 mm,优化后边跨最大线形偏差为 32.5 mm。

在最优线形的索力优化计算时,主梁的内力控制通过约束条件来限制。虽然没有以目标函数的方式做最优计算,但是由于成桥线形拟合得较好,主梁节点的位移偏差更小,主梁的内力在约束条件范围内,也有不同程度的减小。其中主梁弯矩绝对值的最大值减小了 33.1%。

以最小应变能为目标函数时,由于约束条件的限制,整个迭代过程较慢,如果放宽线形约束的限值,线形的偏差将较大。与原设计相比,在本例中全

桥主梁单元总应变能减小了26.3%,边跨的线形偏差相应减小,最大线形偏差值为27.4 mm,但是主跨的线形偏差增大,最大线形偏差值为23.8 mm。以最优线形为目标函数时,结构总应变能没有减小,但是线形吻合得较好,而对于钢构件而言,其内力值并不大。

红岛航道桥的边跨没有布置斜拉索,主跨斜拉索索力的调整对边跨的成桥线形影响很小。在斜拉索索力的调整过程中以全桥主梁的线形为目标函数时,由于边跨的位移值较固定,将影响整个寻优的过程。对于这种少索的部分斜拉桥体系,把边跨主梁线形转化为约束条件,设主跨主梁线形为目标函数,将可以得到更优的成桥线形。采用不同目标函数的主跨主梁成桥线形的计算结果如图5所示。

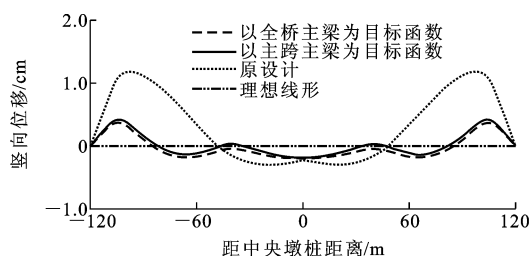


图5 主跨主梁成桥线形

Fig. 5 Line Shape of Main Girder of Main Span in Dead Load State

对于钢箱梁斜拉桥,采用成桥线形控制作为目标函数,通过最优化计算,能简便有效地得到最优的成桥线形,还能保证有较好的计算精度,减小了计算的难度,也大大降低了求解费用。

4 结语

(1)本文中的优化分析方法简便有效,共轭梯度法收敛速度快,计算精度和计算效率较高,构件受力分布合理,成桥线形拟合较好,因此具有较高的实用价值。

(2)对于钢箱梁斜拉桥的索力调整,以最优成桥线形为目标函数能更好地控制成桥线形。以最小应变能为目标函数,能较全面地表征斜拉桥结构的整体状态,但并不适用于斜拉索较少的部分斜拉桥体系,其引起的线形误差可能较大。

(3)灵活的设置目标函数,通过把次要目标函数转化为约束条件,往往能取得更好的计算结果,并降低优化计算的难度。

参考文献:

References:

[1] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,1997.

LIN Yuan-pei. Cable-stayed Bridges[M]. Beijing:China Communications Press,1997.

[2] 陆 楸,徐有光. 斜拉桥最优化索力的探讨[J]. 中国公路学报,1990,3(1):38-48.

LU Qiu, XU You-guang. Optimum Tensioning of Cable-stays[J]. China Journal of Highway and Transport,1990,3(1):38-48.

[3] 肖汝诚,项海帆. 斜拉桥索力优化及其工程应用[J]. 计算力学学报,1998,15(1):118-126.

XIAO Ru-cheng, XIANG Hai-fan. Optimization Method of Cable Prestresses of Cable-stayed Bridges and Its Engineering Applications[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,1998,15(1):118-126.

[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.

ZHANG Jian-min, XIAO Ru-cheng. Spatial Nonlinear Cable Force Optimum in Two Stages for Thousand-Meter Scale Cable-stayed Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(3):34-40.

[5] 梁 鹏,徐 岳,刘永健. 斜拉索分析统一理论及其应用[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(1):68-77.

LIANG Peng, XU Yue, LIU Yong-jian. Unified Analysis Theory of Cable Stay and Its Applications[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(1):68-77.

[6] 杨霞林,李 乔,冉琦山. 斜拉桥双箱单室箱形主梁的空间应力分析[J]. 中国公路学报,2006,19(1):71-74.

YANG Xia-lin, LI Qiao, RAN Qi-shan. Three Dimensional Stress Analysis of Main Box Girder with Twin-box Single Cross Section Used in Cable-stayed Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(1):71-74.

[7] SCOTT A B. Recent Advances in Optimal Structural Design[R]. New York:American Society of Civil Engineers,2002.

[8] 徐 岳,郝宪武,张丽芳. 连续刚构桥双薄壁墩参数设计方法研究[J]. 中国公路学报,2002,15(2):79-82.

XU Yue, HAO Xian-wu, ZHANG Li-fang. Study of the Parameter Design Method of the Continuous Rigid Frame Bridges with Double Thin-wall Pier[J]. China Journal of Highway and Transport,2002,15(2):79-82.

[9] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社,1989.

CHEN Bao-lin. Optimization Theory and Its Algorithm[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1989.