

确定复杂斜拉桥合理成桥索力的实用方法

孙旭霞

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要:针对复杂拉索景观斜拉桥调索困难的难题,以某座空间扭曲桥塔斜拉桥为例,提出一种实用的索力优化方法。该方法可实现直观、可调的多目标索力优化,不受程序限制,快速进行合理索力的确定;亦可实现设计人员的主观可控性,帮助设计人员在调索的同时,快速掌握结构的关联特性。

关键词:扭索面斜拉桥;多目标索力优化;合理成桥索力;计算方法

中图分类号: U443.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)12-0034-04

0 引 言

随着人们日益增长的审美需求,景观斜拉桥进入一个崭新发展的时代。斜拉桥的设计自由度越来越大,桥塔的空间造型越来越多样性,拉索的布置也从传统的平行拉索、扇形拉索形式突破为扭索面布置(即高近低远)。针对这些新兴的斜拉桥,如何确定最优成桥索力以得到成桥合理状态,往往成为设计的关键点。

纵观现有索力优化理论和方法,往往主要以梁为研究对象,而很难控制住桥塔等其他方面的相关指标,且在设计实践中不便于应用。为此,本文以某座空间扭曲桥塔斜拉桥为例,提出一种实用索力优化方法,以便快速进行合理索力的确定。

1 现有成桥索力优化理论概述

斜拉桥发展历史久远,国内外许多学者对斜拉桥成桥索力的优化问题进行了研究,将其归纳成了单一目标法和多目标法两类理论。

1.1 单一目标法^[1-3]

该类优化方法设定某一目标,寻求 1 组索力满足已设定的目标。此类优化索力的方法主要包括:刚性支承连续梁法、应力平衡法、弯曲能量最小法。

刚性支承连续梁法以主梁位移为控制目标,将主梁、索梁交点处模拟刚性支承进行结构分析;利用斜拉索索力的竖向分力与刚性支点反力相等的条件来确定最优索力。

应力平衡法以主梁控制截面在恒、活载作用下,上下缘应力安全储备相当(即 $\frac{\sigma_{上}}{f_{备}} \approx \frac{\sigma_{下}}{f_{备}}$)为控制目标,通过有限元或者解方程迭代计算,得出对应的成桥索力。

弯曲能量最小法以结构的弯曲能最小即 $\frac{\partial U}{\partial T_i}=0$ 为目标,求得 1 组最优成桥索力。

单一目标法的优点是目标明确,操作简单;缺点是仅关心设定的目标最优,忽略了其他要素,往往出现索力大小分布不均,主塔受力超限等问题。

1.2 多目标法^[4-5]

鉴于单一目标法的缺陷,衍生出多目标法或者称为有约束索力优化方法。多目标法是指在确定了总体优化目标的同时,对关心的其他截面的内力、位移以及索力也加以控制的方法。该类方法主要包括:限定索力法、用索量最小法、最大偏差最小法和条件极值法。

限定索力法是指使结构的某个目标函数取得较优解的同时,又考虑到索力分布应均匀而限定索力的大小范围。

用索量最小法是以索的用量(索力×索长)作为目标函数,再增加控制截面内力和位移期望值范围等约束条件。

最大偏差最小法是将多个目标参量与期望值的偏差作为目标函数,使最大偏差达到最小。

条件极值法是指在优化整体内力的同时,还需指定某些关心截面上的内力为定值,则索力优化问题即为条件极值问题。

以上多目标索力优化方法均可用影响矩阵的形

收稿日期: 2021-03-23

作者简介:孙旭霞(1981—),女,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

式来表示并求解。这也是目前最为完备的一种斜拉桥索力优化理论。但它对设计者的理论水平要求较高,需要大量计算。目前,实现起来均依靠相应计算软件,这将导致设计者的主观判断性缺失,无法判断每根索力变化对复杂结构各构件的响应,从而真正理解索力的合理分布规律。

2 实用索力优化方法的操作步骤

- (1)根据斜拉桥结构布置、荷载条件等建立杆系模型。
- (2)按一次落架刚度分配,进行初步计算。
- (3)根据初步计算结果找出控制目标,即选择合适的多目标控制因素。
- (4)将杆系模型中斜拉索单元去除,在对应拉索两端,沿拉索方向各加 1 对单位力(如 1 000 kN),并将每 1 对单位力均设置为 1 个单独工况。
- (5)采用修改过的模型,分别计算出无拉索荷载下桥梁结构的响应和每对拉索单位力对结构产生的响应。
- (6)根据前面设定的目标,建立索力系数的目标矩阵;得出成桥合理索力。

3 实用计算

3.1 模型建立^[6]

本例为某座景观斜拉桥,结构形式为空间非对称弯扭塔斜拉桥,跨径布置:45 m+185 m+238 m+45 m=513 m;标准桥宽 64 m,两侧设置慢行系统。计算模型采用空间梁格。塔、腿、梁固结,墩梁支座连接。

景观斜拉桥计算模型见图 1。图中:MB、MA、SB、SA 中的 M 表示拉索分区主跨;S 表示拉索分区边跨;A 表示前侧;B 表示后侧;如 MA 即表示拉索分区主跨前侧,以此类推。

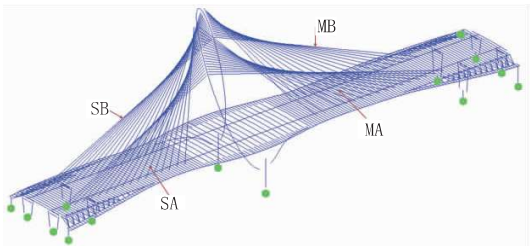


图 1 景观斜拉桥计算模型简图

3.2 初步计算

按一次落架刚度分配,进行初步计算。得到成桥刚度分配拉索索力分布图(见图 2)、主梁成桥应力分布图(见图 3)、主梁成桥变形图(见图 4)、主塔成桥

弯矩图(见图 5)、主塔成桥变形图(见图 6);塔底反力见表 1。



图 2 成桥刚度分配拉索索力分布图

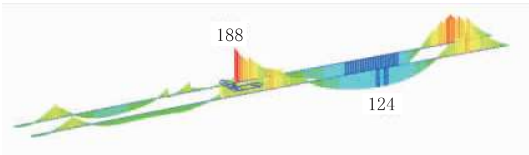


图 3 主梁成桥应力分布图(单位:MPa)



图 4 主梁成桥变形图(单位:mm)

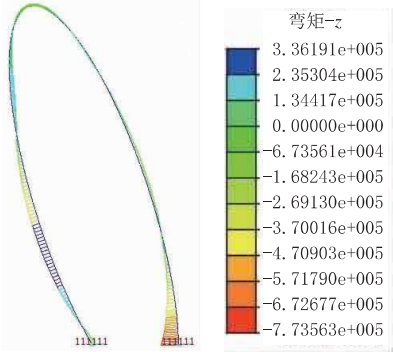


图 5 主塔成桥弯矩图(单位:kN·m)

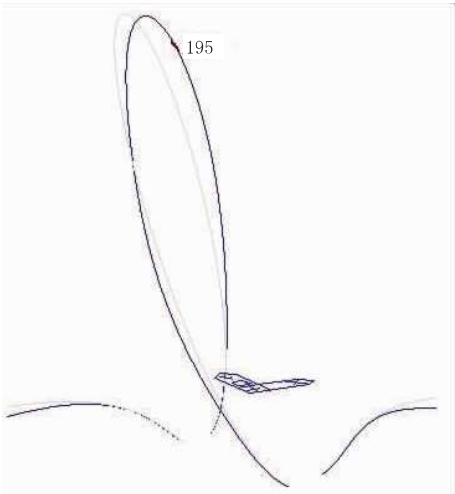


图 6 主塔成桥变形图(单位:mm)

表1 初步计算塔底反力汇总表

模型	桥塔塔底反力(成桥)		
	竖向力/kN	弯矩(顺)/(kN·m)	水平力(顺)/kN
未调索	299 323	1 455 796	380

3.3 确定控制目标

(1)桥塔塔底反力:顺桥向弯矩小于 $140 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、水平力小于 $10\,000 \text{ kN}$,以减小基础及锚固架的受力及规模。

(2)桥塔受力均衡(桥面以上);塔身弯矩尽量小,两塔柱受力均匀。

(3)主梁及主塔变形:控制主梁及主塔变形,间接控制主梁及主塔受力情况以及预拱预偏。

(4)索力分布的均匀性:考虑垂度效应,最小索力大于 $1\,000 \text{ kN}$;考虑局部锚固构造,最大索力控制小于 $8\,000 \text{ kN}$ 。

3.4 模型修改

将杆系模型中斜拉索单元去除或切断,在对应拉索两端,沿拉索方向各加1对单位力(如 $1\,000 \text{ kN}$),并将每1对单位力均设置为1个单独工况,如图7所示。然后得出各工况下,控制目标的对应响应。

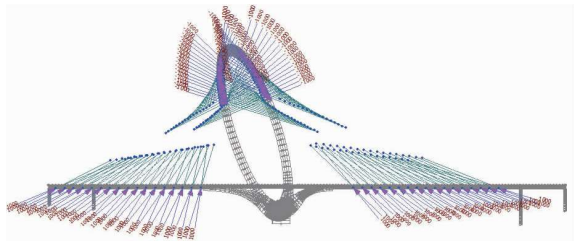


图7 模型修改示意图

3.5 响应汇总

以单根索力增加 $1\,000 \text{ kN}$ 为基数,进行控制目标的响应汇总分析(见图8~图12),以建立影响矩阵。

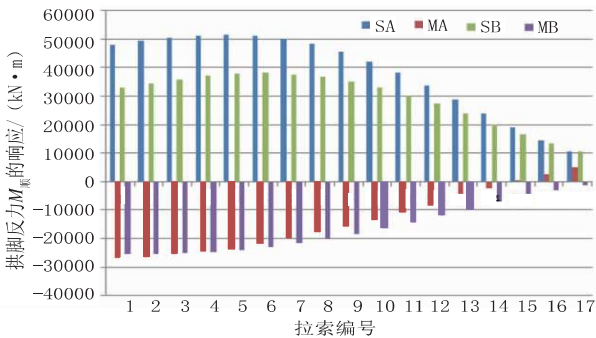


图8 单根索力增加 $1\,000 \text{ kN}$ 对拱脚反力 $M_{\text{顺}}$ 的响应

3.6 建立索力系数的目标矩阵

求解索力系数的目标矩阵见表2。

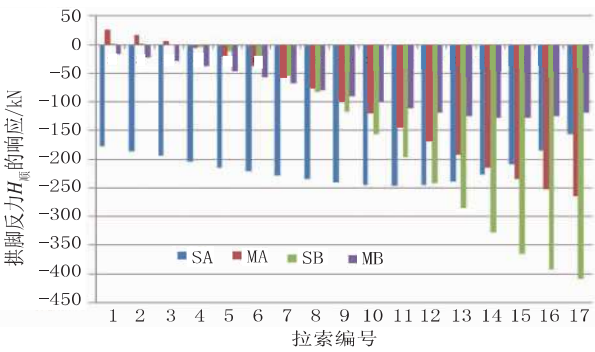


图9 单根索力增加 $1\,000 \text{ kN}$ 对拱脚反力 $H_{\text{顺}}$ 的响应

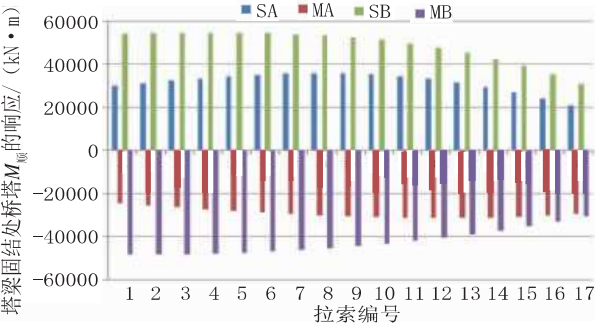


图10 单根索力增加 $1\,000 \text{ kN}$ 对塔梁固结处桥塔 $M_{\text{顺}}$ 的响应

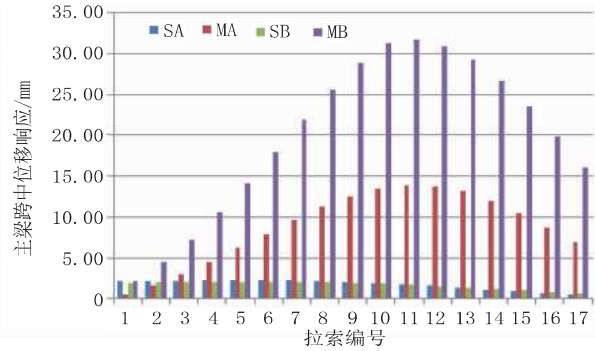


图11 单根索力增加 $1\,000 \text{ kN}$ 对主梁跨中位移的响应

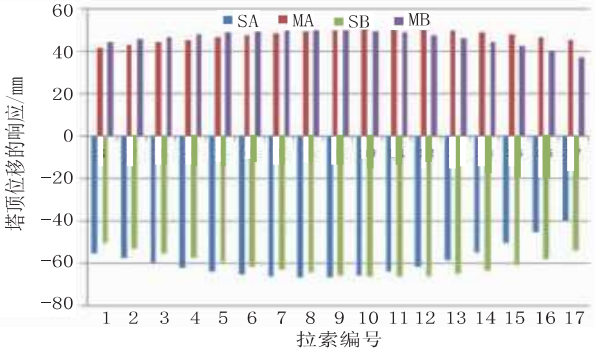


图12 单根索力增加 $1\,000 \text{ kN}$ 对桥塔水平位移的响应

3.7 调索后目标验证

按照3.3节确定的控制目标,调整SA1~MB17的索力系数,得到符合目标要求的合理成桥索力系数,从而得到成桥索力。调索后拉索成桥索力分布图见图13。

3.7.1 目标一:索力优化后塔底反力

索力优化后成桥塔底反力汇总表见表3。

表 2 索力系数的目标矩阵

拉索编号	塔底弯矩 M_{td}	塔底水平力 H_{td}	前塔塔梁固结弯矩 M_{qgj}	后塔塔梁固结弯矩 M_{hgj}	主梁跨中位移 δ_v	主塔塔顶位移 δ_h
SA1	M_{td} -SA1	H_{td} -SA1	M_{qgj} -SA1	M_{hgj} -SA1	δ_v -SA1	δ_h -SA1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
SA17	M_{td} -SA17	H_{td} -SA17	M_{qgj} -SA17	M_{hgj} -SA17	δ_v -SA17	δ_h -SA17
MA1	M_{td} -MA1	H_{td} -MA1	M_{qgj} -MA1	M_{hgj} -MA1	δ_v -MA1	δ_h -MA1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
MA17	M_{td} -MA17	H_{td} -MA17	M_{qgj} -MA17	M_{hgj} -MA17	δ_v -MA17	δ_h -MA17
SB1	M_{td} -SB1	H_{td} -SB1	M_{qgj} -SB1	M_{hgj} -SB1	δ_v -SB1	δ_h -SB1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
SB17	M_{td} -SB17	H_{td} -SB17	M_{qgj} -SB17	M_{hgj} -SB17	δ_v -SB17	δ_h -SB17
MB1	M_{td} -MB1	H_{td} -MB1	M_{qgj} -MB1	M_{hgj} -MB1	δ_v -MB1	δ_h -MB1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
MB17	M_{td} -MB17	H_{td} -MB17	M_{qgj} -MB17	M_{hgj} -MB17	δ_v -MB17	δ_h -MB17
总响应	M_{td} -SA1+⋯+ M_{td} -MB17	H_{td} -SA1+⋯+ H_{td} -MB17	M_{qgj} -SA1+⋯+ M_{qgj} -MB17	M_{hgj} -SA1+⋯+ M_{hgj} -MB17	δ_v -SA1+⋯+ δ_v -MB17	δ_h -SA1+⋯+ δ_h -MB17

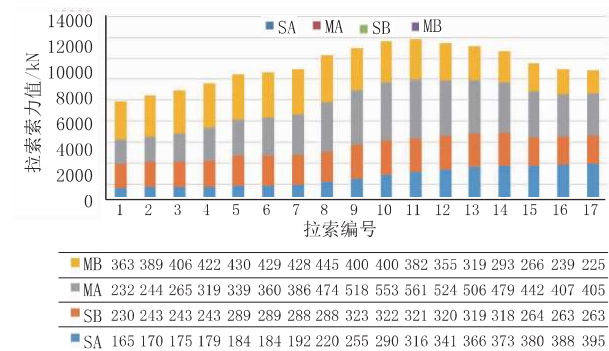


图 13 调索后拉索成桥索力分布图

表 3 索力优化后成桥塔底反力汇总表

模型	桥塔塔底反力(恒载)		
	竖向力 /kN	弯矩(顺)/(kN·m)	水平力(顺)/(kN)
双主梁	300 990	1 240 939	7 609

3.7.2 目标二:索力优化后桥塔内力及变形

调索后桥塔顺桥向弯矩分布图、调索后桥塔变形图见图 14、图 15。

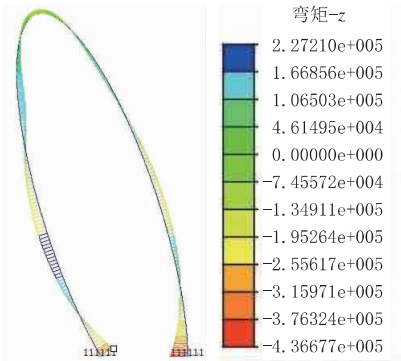


图 14 调索后桥塔顺桥向弯矩分布图(单位:kN·m)

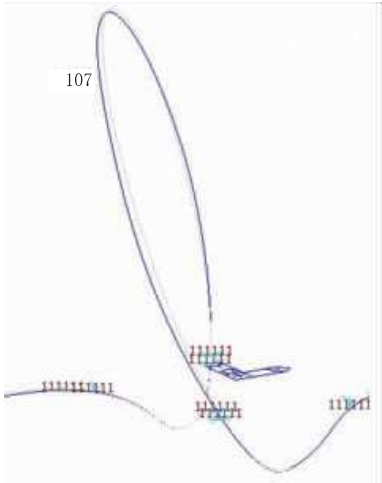


图 15 调索后桥塔变形图(单位:mm)

3.7.3 目标三:索力优化后主梁应力及变形

调索后主梁应力分布图、变形图见图 16、图 17。

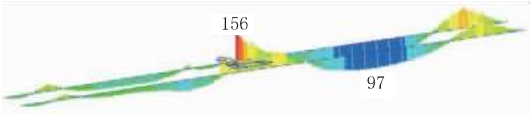


图 16 调索后主梁应力分布图(单位:MPa)



图 17 调索后主梁变形图(单位:mm)

4 结 语

本文提出的斜拉桥成桥索力优化方法是基于索力优化的影响矩阵法原理，借助杆系结构线性分析程序，施加拉索体外力的方式来实现直观、可调的多目标索力优化。该方法可以实现设计人员的主观可

(下转第 60 页)

4 结 语

本文基于铁路刚架桥的实际应用,拟定相应的结构尺寸,通过建模分析结构的受力特性和配筋计算,主要得出以下结论:

(1)刚架桥因其独特的结构特点在不中断交通的情况下跨越既有道路等方面有广泛的应用。

(2)单孔、双孔刚架桥在运营荷载作用下表现出类似的受力特点。当跨径较大采用单孔刚架桥不能满足设计要求时,可考虑采用双孔刚架桥以减小跨中的弯矩。

(3)对于不同孔径、净高、斜交角度的刚架桥,采用本文的结构尺寸均可满足配筋计算的要求,且结构设计较为经济合理,可为类似项目提供参考。

参考文献:

- [1] 孙树礼.高速铁路桥梁设计与实践[M].北京:中国铁道出版社,2010.
- [2] 杨严华.刚架桥的构造特点及类型[J].黑龙江交通科技,2012(3): 83-83.
- [3] 吴海波.钢筋混凝土整体现浇连续板桥、连续刚架桥、箱形框架桥桥型方案比较分析[J].交通世界,2008(23):159-162.
- [4] 林清,刘自楷,刘则宇,等.无桥台斜腿刚架桥的特性研究[C]//全国城市公路学会学术年会,2005.
- [5] 吴萍.无桥台斜腿刚架桥在高速公路跨天桥上的应用[J].交通标准化,2004(6):68-71.
- [6] 赵海粟.基于 MIDAS 的下穿铁路斜交框架桥的有限元分析[J].四川建筑,2017(2):89-90,93.
- [7] 曹志刚.跨管廊刚架桥施工研究[J].四川水泥,2019,270(2):86.
- [8] 杨利卫.小夹角空间刚架桥设计研究[J].交通科技,2008(S1):6-8.
- [9] 康俊涛.无桥台斜腿刚架桥的研究与应用[D].武汉:华中科技大学,2005.

(上接第 37 页)

控性,帮助设计人员在调索的同时,快速掌握结构的关联特性,而非仅依赖分析程序。

参考文献:

- [1] 辛明奇.某拱形独塔不等跨斜拉桥力学性能分析[D].大连:大连理工大学,2019.
- [2] STRAUPE V, PAEGLITIS A. Analysis of interaction between the elements in cable-stayed bridge [J]. The Baltic Journal of Road and

Bridge Engineering, 2012, 7(2): 84-91.

- [3] 李大勇.独塔斜拉桥的合理成桥索力研究[D].西安:长安大学,2014.
- [4] 韩威.独斜塔斜拉桥合理成桥索力及参数敏感性研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [5] 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(2):235-240.
- [6] JT/T 3365-01—2020:公路斜拉桥设计规范[S].