

文章编号: 0451—0712(2006)06—0129—04

中图分类号: U448.27

文献标识码: B

ANSYS 在结合梁斜拉桥索力优化中的应用

张晓翹¹, 何 畏², 朱 浩²

(1. 北京奥运会组委会 北京市 100083; 2. 西南交通大学土木工程学院 成都市 610031)

摘 要: 利用有限元程序 ANSYS 对一座结合梁斜拉桥进行了索力优化设计。以斜拉索的张拉索力为设计变量, 斜拉索和结合梁的应力以及支座反力为控制变量, 将成桥后主梁的最小弯曲应变能作为目标函数, 通过一阶优化算法, 确定最优索力, 即施工时的合理张拉索力。计算结果表明该方法简单、有效。

关键词: 结合梁; 斜拉桥; 索力优化; 一阶优化算法

近年来国内修建了大量结合梁斜拉桥, 从设计角度来看, 成桥恒载内力分布好坏是确保桥梁结构长期运营质量的根本内因。合理的成桥状态是斜拉桥的塔、梁、索等构件在恒载、活载作用下应力水平最小的受力状态。斜拉桥是一种超静定次数很高的结构, 其内力状态可以通过斜拉索的不同张拉力来调整, 因此总能通过一定的优化工作找到使得斜拉桥的特定受力性能达到最优的一组索力。

1 索力优化的常用方法

国内外许多学者对斜拉桥的索力优化问题进行了研究, 目前索力优化的方法可归结为三类: 指定受力状态的索力优化, 无约束的索力优化和有约束的索力优化^[1]。

指定受力状态优化方法的代表是刚性支承连续梁法。这种方法将斜拉桥主梁在恒载作用下弯矩呈刚性支承连续梁状态作为优化目标。利用斜拉索索力的竖向分力与刚性支点反力相等的条件确定最优索力。这种方法力学概念明确、计算简单, 且成桥索力接近“稳定张拉力”, 有利于减小徐变对成桥内力的影响。但是, 通过施工来实施这种内力状态是困难的。成桥后必须设法消除由中间合拢段及二期恒载引起的正弯矩效应。这就要通过反复调索来实现, 对密索体系较难控制。

索力无约束优化法有弯曲能量最小法和内力平衡法。弯曲能量最小法是用结构的弯曲应变能作为

目标函数。内力平衡法是以结构内力为研究对象, 按照“内力平衡”的原则得到合理的斜拉索索力。基本原理是设计恰当或合理的斜拉索张拉力, 以使结构各控制截面在恒载和活载的共同作用下, 上翼缘的最大应力和材料允许应力之比等于下翼缘的最大应力和材料允许应力之比, 从而达到截面上下缘材料均被充分利用, 截面受力均匀。

典型的索力有约束优化法为用索量最小法。这种方法用斜拉桥索的用量(张拉力乘以索长)作为目标函数, 用关心截面内力、位移期望值范围作为约束条件。运用这种方法, 必须确定合理的约束方程, 否则容易引出错误结果。

在斜拉桥索力优化的算法中, 国内外学者应用了如最小二乘法^[2]、影响矩阵法^[3]、凝聚函数法^[4]等多种方法求解实际问题。为考虑大跨径斜拉桥中非线性因素的影响, 有学者应用一阶分析方法进行大跨径斜拉桥的索力优化, 来克服上述方法中仅能进行线性叠加的缺点^[5]。

本文研究在结合梁斜拉桥中索力优化适用方法, 根据大跨径结合梁斜拉桥的受力特点, 选用以弯曲能量最小为优化目标, 利用有限元程序 ANSYS 的一阶优化算法进行索力优化的实现方法。

2 索力优化方法在 ANSYS 中的实现

ANSYS 优化分析中, 用户可以定义三种参数: 设计变量、控制变量、目标函数。

设计变量(DV):设计变量即自变量,优化结果的取得就是通过改变设计变量的数值来实现的。在斜拉桥索力优化问题中,采用斜拉索索力为设计变量。

控制变量(SV):控制变量是约束设计的数值。用来体现优化的边界条件,它们相当于“因变量”,是设计变量的函数。

目标函数(OBJ):最终的优化目的。它必须是设计变量的函数,也就是说,改变设计变量的数值将改变目标函数的数值,而且在每次优化过程中,只能设定一个目标函数。目标函数的选取对于优化结果的优劣是至关重要的,对于不同的问题,目标函数都不一样,它的选取主要依靠设计者的经验。

一个合理的设计是指满足所有给定的约束条件(设计变量的约束和状态变量的约束)的设计。如果其中任何一个约束条件不被满足,设计就被认为是不合理的。而最优设计是既满足所有的约束条件又能得到最小目标函数值的设计。

ANSYS 程序提供了一系列的分析—评估—修正的循环过程。就是对于初始设计进行分析,对分析结果就设计要求进行评估,然后修正设计。这一循环过程重复进行,直到所有的设计要求都满足为止。ANSYS 程序优化分析的流程见图 1 所示。

3 工程算例

3.1 桥梁概况

本文的研究对象是一座双塔双索面钢—混结合

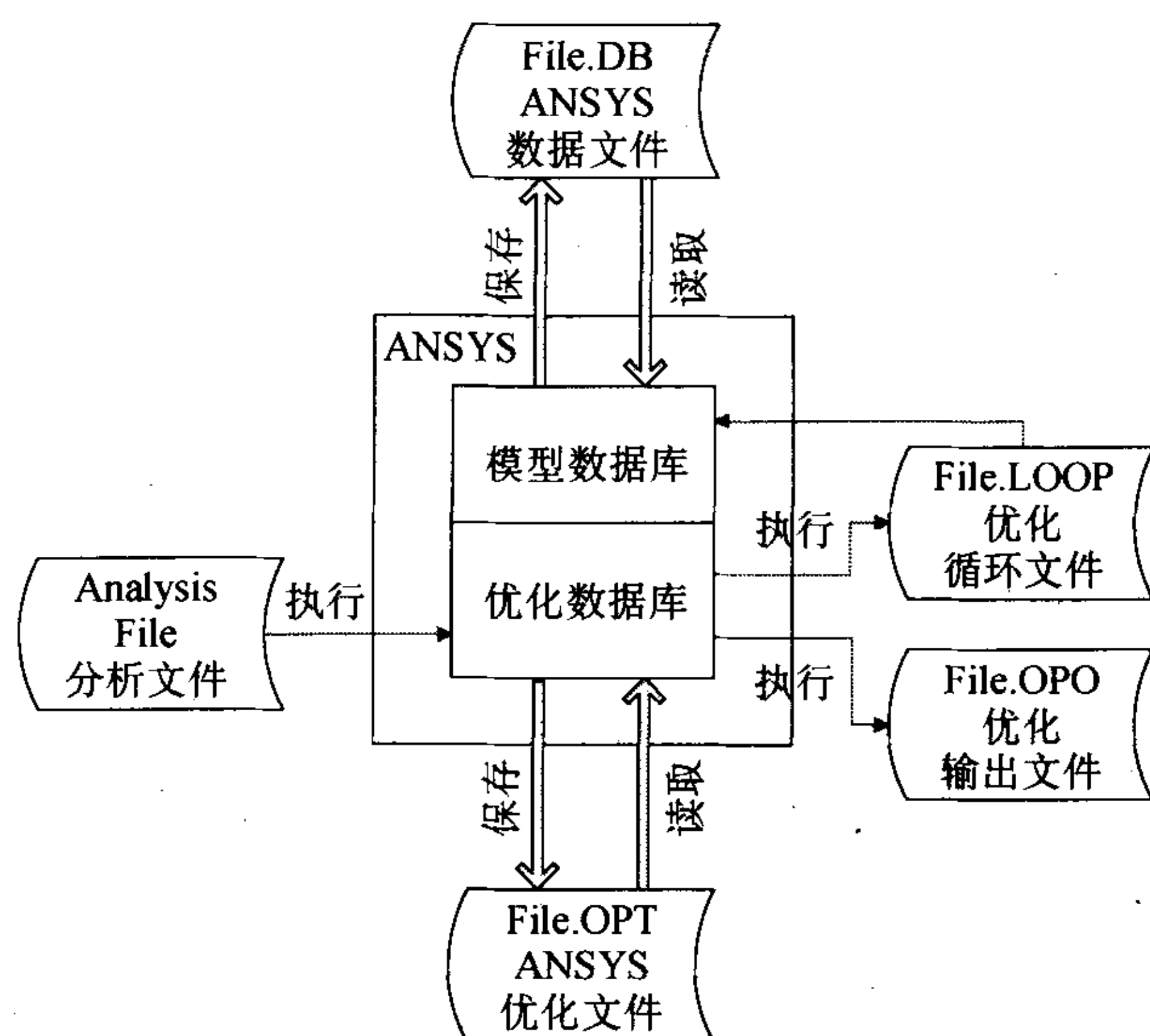
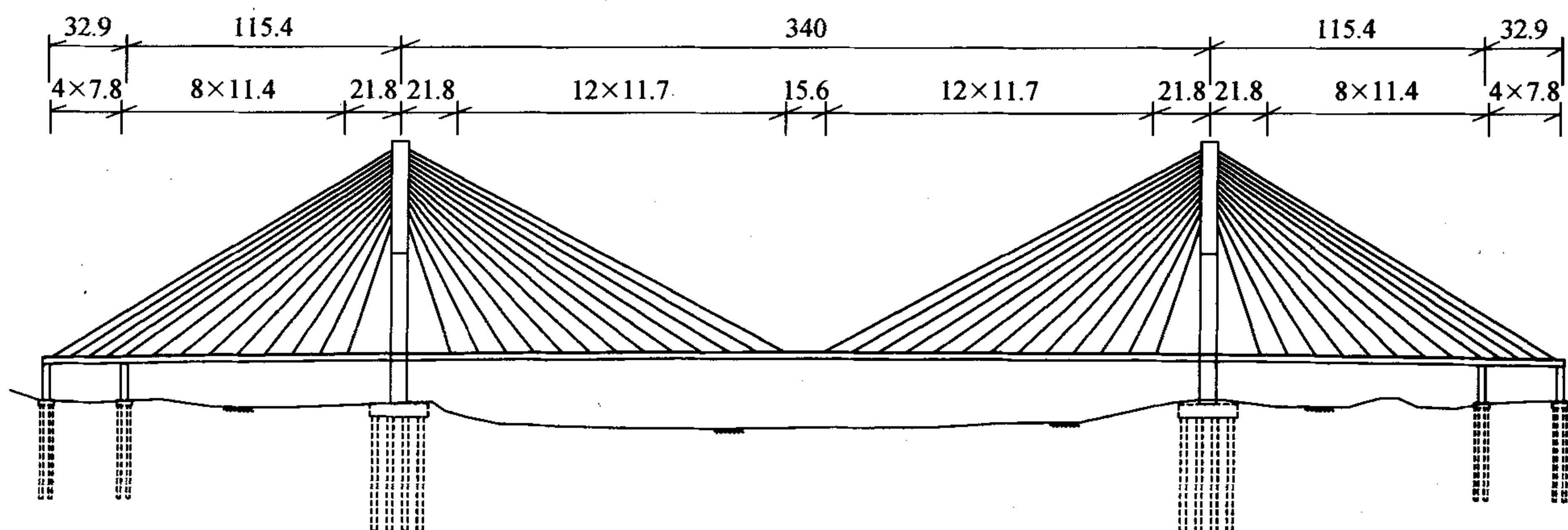


图1 ANSYS 的一阶优化分析流程示意

梁斜拉桥,跨径布置为 32.9 m+115.4 m+340 m+115.4 m+32.9 m,桥面总宽为 36.6 m,桥型布置见图 2 所示。设计荷载为汽车—超 20 级,挂车—120,按双向八车道布置。索塔采用 H 形混凝土桥塔,索塔总高为 119.629 m。主梁采用结合梁形式,由“工”字形钢纵梁、横梁、小纵梁通过节点板及高强螺栓连接形成钢构架,构架上架设预制桥面板,现浇膨胀混凝土湿接缝,与钢梁上的抗剪栓钉形成整体,组成组合梁体系。主梁全宽 36.6 m,梁高 3.08~3.41 m,两“工”字钢纵梁肋间距 34 m。全桥有 4×26 对钢绞线斜拉索。



单位:m

图2 某结合梁斜拉桥型布置

3.2 索力优化分析

(1)设计变量。

本桥索力优化计算中,设计变量取为每根拉索的二次张拉索力,由于南塔和北塔的对拉索的索

力相同,共有 28 个设计变量。

(2)控制变量。

由于斜拉桥组合结构体系受力的复杂性,设计中必须综合考虑梁、塔、索及辅助墩。所以在确定理

想成桥状态过程中,控制变量要从以下几个方面来考虑。

①斜拉索应力。

对于斜拉索来讲,成桥后恒载与活载共同作用下的组合应力 σ_c 为(负值为拉应力): $\sigma_c=\sigma_D+\sigma_L$,且 $0.4R^b\leq\sigma_c\leq0$ 。式中应力下标 D 代表恒载, L 代表活载。

那么,索力优化中每根斜拉索的恒载作用下应力的上、下限制条件分别为:

$$\sigma_{Dmax}=\sigma_{Cmax}-\sigma_{Lmax}$$

$$\sigma_{Dmin}=\sigma_{Cmin}-\sigma_{Lmin}$$

②结合梁的应力。

成桥后恒载与活载共同作用下,钢主梁和混凝土桥面板的组合应力 σ_{c1} 和 σ_{c2} 不应超过其容许应力,即:

$$\sigma_{c1}=\sigma_{D1}+\sigma_{L1} \quad \text{且} \quad -1.5\leq\sigma_{c1}\leq15$$

$$\sigma_{c2}=\sigma_{D2}+\sigma_{L2} \quad \text{且} \quad -200\leq\sigma_{c2}\leq200$$

③支座反力。

对于过渡墩、辅助墩以及塔梁支座,根据前面活

载支座反力的计算结果,因活载对支座会产生拉、压效果,因此应确保优化后的支座反力;荷载组合下支座不出现拉力,并有一定的压力储备。

(3)目标函数。

优化分析中采用三种不同的目标函数对拉索的张拉力进行优化,然后比较几组索力,从中选出最理想的索力。各个目标函数的具体构成如下:

①以主梁弯矩平方和作为目标函数;

②以塔梁弯曲应变能作为目标函数;

③以塔梁弯曲应变能作为目标函数,考虑到塔在恒载作用下受弯的不利因素,对塔的弯曲能量乘上大于1的加权系数进行优化。

3.3 优化前后的设计变量对比

本研究以斜拉索的第二次张拉索力为 ANSYS 一阶优化的设计变量(DV),采用斜拉索设计的二次张拉力作为优化前的初值,通过 ANSYS 的迭代计算优化分析,确定了实现优化目标的设计变量的终值。优化前后设计变量对比见图 3 所示。

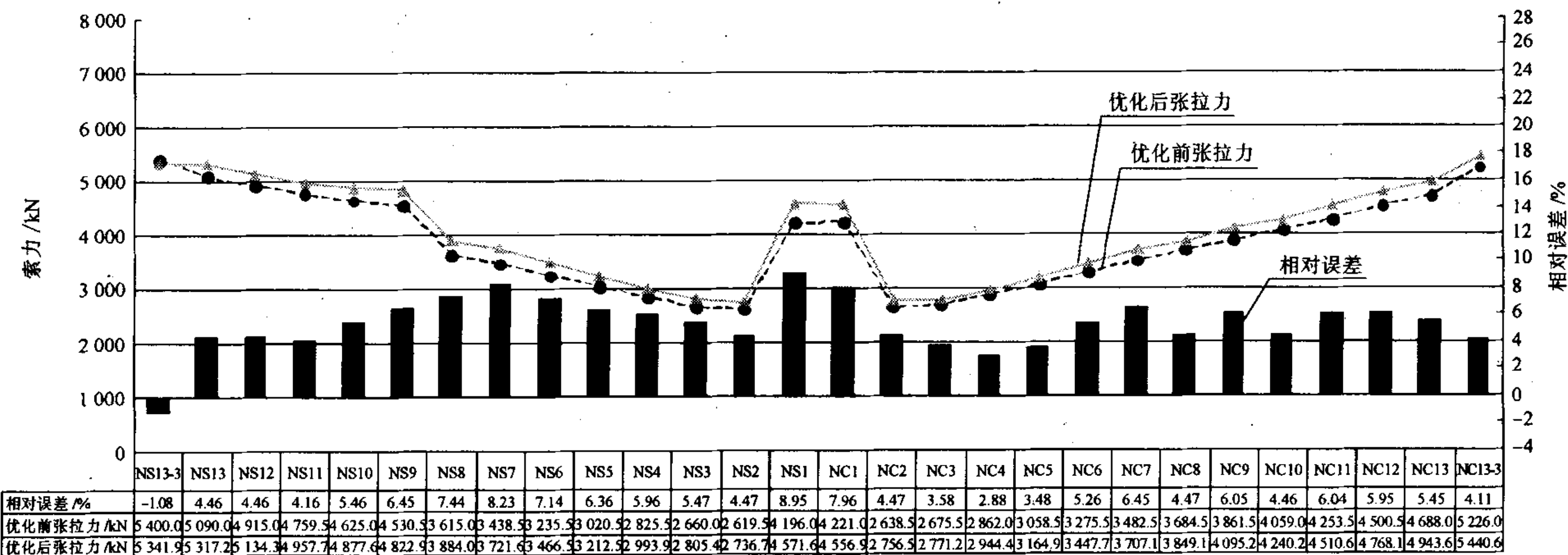


图 3 斜拉索张拉力对比

从图 3 可见,通过 ANSYS 的一阶优化,对斜拉索的初始张拉力做出了一定的调整,斜拉索二张索力普遍提高约4%,最大的索力优化量约为9%,整个优化过程的调整较明显。

3.4 优化前后目标函数对比

采用不同目标函数的优化结果对比见表1。以设计张拉索力计算的结果为目标函数的对比初值(OBJs),通过 ANSYS 的迭代计算优化分析,得到了目标函数的优化终值(OBJe)。

在优化方案1中,由于只考虑了主梁的弯矩,减少了目标限制条件,得到的优化比率最高,主梁的恒载弯矩较小,但索塔的弯矩因未列入优化目标而较

表 1 不同目标函数优化前后数据对比

方案	目标函数	优化前函数值	优化后函数值	优化比率
优化方案1	主梁弯矩平方和	1.150×10^7	3.999×10^{16}	65.23%
优化方案2	塔梁弯曲应变能	2.759×10^5	1.137×10^5	58.81%
优化方案3	考虑加权系数的塔梁弯曲应变能	5.951×10^5	3.915×10^5	34.22%

大。优化方案2考虑了索塔的弯曲应变能。优化方案3进一步将索塔弯曲应变能加权考虑,这样得到的

主梁弯矩略有增加,但索塔的受力状态实现了较好的优化。根据对比,在该桥索力优化中的最终目标函数选取为考虑加权系数的弯曲应变能。

3.5 优化前后主梁及桥面板应力对比

通过索力优化,主梁的钢纵梁部分应力水平出现显著降低。钢纵梁的组合应力为下缘压应力控制,优化后钢纵梁的压应力水平控制在 195 MPa 以下(优化前为 220 MPa),满足了钢纵梁应力 200 MPa 的控制条件。由于按应变能目标进行了索力优化,同时引入了活载应力水平修正桥面板的应力控制条件,桥面板优化后的上、下缘压应力储备得到了增强。桥面板上缘优化后最小压应力为 1.61 MPa(优化前为 1.15 MPa),考虑第二、三体系后实际的上缘最小压应力为 0.73 MPa。上缘优化后最大压应力为 7.75 MPa,叠加二、三体系后为 11.63 MPa,最大、最小压应力均满足要求。

4 结论

针对结合梁斜拉桥的受力特点,进行了索力优化方法的研究,并利用有限元程序 ANSYS 对一座实桥进行了优化分析。通过上述研究和分析可以得到以下结论。

(1)本文通过 ANSYS 的一阶优化方法,通过目标函数最小化,找出能够满足主梁应力、拉索应力和支座反力等一系列控制条件的斜拉索的张拉力,并且使得该结合梁斜拉桥的受力更为合理。

(2)ANSYS 的优化分析允许用户自定义不同的优化目标,然后对不同的优化结果进行对比,选出满足设计需要的一组最优索力。

(3)本文优化过程模拟了斜拉索施工的正装计算模型,可以将施工阶段和成桥阶段的结构内力状态同时控制在合理的水平,有很高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 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(2).
- [2] Fujisawa N, tomoH. Computer-Aided Cable Adjustment of Cable Stayed Bridges[J]. IABSE,1985,(4).
- [3] 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,1998,26(3).
- [4] 杜蓬娟,张哲,等.斜拉桥合理成桥状态索力确定的优化方法[J].公路交通科技,2005,22(7).
- [5] 张建民,肖汝诚.斜拉桥合理成桥状态确定的一阶分析方法[J].力学季刊,2004,25(2).

中 荷 将 加 强 交 通 合 作

2006 年 5 月 16 日,交通部副部长徐祖远会见了来访的荷兰运输、公共工程和水管理部副部长舒尔茨·范·海根一行。双方就内河水运、港口、公路、疏浚及人才培养等方面的合作交换了意见。

徐祖远积极评价了中荷两国在公路、内河水运及物流方面富有成效的合作。他称赞荷兰的内河运输发展、建设、管理水平是世界一流的,很多经验值得中国学习,并对荷兰为中国政府部门、企业和研究机构培训人员所做的大量工作表示感谢。就下一步具体的合作与交流事宜,徐祖远表示,中方已经制定新的交通人才交流与培训计划;两国有关部门在内河信息系统方面的合作应分阶段稳步推进;进一步加强水上危险品运输方面的经验交流;欢迎荷兰投资者投资中国港口。

舒尔茨·范·海根说,中荷两国在交通领域的合作历史悠久,去年 11 月,两国签署了部际间的《道路运输内河航运港口及相关基础设施事宜合作谅解备忘录》,在此备忘录框架下,两国交通部门开展了许多实质性的工作,在公路、水运方面的合作交流取得了良好的成果。她希望双方拓展在智能交通、内河危险品运输、港口建设及疏浚等领域的合作空间,同时热情邀请中方继续派员到荷兰交流学习。