

文章编号:0451-0712(2006)05-0026-05

中图分类号:U448.27

文献标识码:B

# 预应力混凝土斜拉桥施工 索力优化的影响线法

姜竹生<sup>1</sup>, 谭红梅<sup>2</sup>, 许瑞红<sup>3</sup>, 肖汝诚<sup>2</sup>

(1. 江苏省高速公路建设指挥部 南京市 210004; 2. 同济大学桥梁工程系 上海市 200092; 3. 上海市市政工程设计院)

**摘要:**影响线法是一种优化预应力混凝土斜拉桥施工索力的新方法。它以成桥受力的“可行域”为约束,通过确定并调整相对薄弱的主梁截面所对应的最敏感斜拉索,最有效地实现预应力混凝土斜拉桥施工、成桥受力状态的优化。该法可以考虑各项非线性因素以及具体的施工过程。具体实施过程通过一实桥算例详细地说明。

**关键词:**预应力混凝土斜拉桥; 施工索力优化; 可行域; 影响线法

## 1 斜拉桥索力优化概况

斜拉桥的索力优化可以分为两大类:成桥索力的优化和施工索力的优化。而根据研究对象所处阶段的不同,成桥索力的优化可以分为设计阶段的成桥索力优化、已设计好未施工的成桥索力优化和已营运的成桥索力优化。我们经常说的索力优化一般是指处于设计阶段的索力优化,由于该阶段的设计参数均未定,优化可通过对索力和其他设计参数的调节同时进行,针对这方面的研究,国内外已有许多的讨论<sup>[5~6]</sup>;针对已营运的成桥索力优化需建立在当前结构参数精确识别的基础上,这部分已有学者开展研究<sup>[4]</sup>;而对于设计好的、尚未施工的预应力混凝土斜拉桥,由于其结构构造和尺寸、预应力、施工步骤等都已确定,处于该阶段的索力优化就只能通过调节施工阶段的斜拉索索力,从而优化成桥状态的受力,国内外针对这个阶段的索力优化的研究很少。根据研究目的的不同,斜拉桥施工索力的优化可以分为:为达到合理成桥索力而进行的施工索力优化和为纠正施工误差的施工索力优化。为达到合理成桥索力而优化施工索力的方法有:倒退分析法、前进倒退交互迭代法、无应力状态法以及影响矩阵法。文献[9]中详细介绍了为纠正施工误差的施工索力优化的具体理论。

本文给出的预应力混凝土斜拉桥施工索力优化的影响线法,是针对已设计好但尚未施工的预应力

混凝土斜拉桥,以合理的成桥受力的“可行域”为约束,通过调节施工索力来实现斜拉桥成桥受力的优化,同时可以兼顾施工阶段的受力安全。下面结合江苏省五河口斜拉桥的索力优化,详细介绍其具体理论及实施过程。

## 2 工程概况

五河口斜拉桥位于江苏省宿淮高速公路上,是一座主跨为370 m(152 m+370 m+152 m=674 m)的双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,采用全漂浮体系。该桥主桥各塔均布置为31对索,采用悬臂浇注法施工,斜拉索的张拉采用一次张拉法。五河口斜拉桥总体布置见图1所示。

五河口斜拉桥的索力优化就是在施工图设计已完成的基础上进行的。

## 3 施工索力优化的影响线法

### 3.1 优化目标的确定——可行域的提出

斜拉桥的优化,最终还是为了使其成桥时达到合理的成桥恒载状态,就是说成桥恒载状态时,斜拉桥的受力需满足:索力要分布均匀,又有较大的灵活性,主梁弯矩大小适中,主梁上下缘应力大小适中且分布均匀,主塔弯矩不能太大,而且边墩和辅助墩支座反力在恒载下要有足够的压力储备,等等。

本文选择主梁的上下缘应力作为控制目标。为

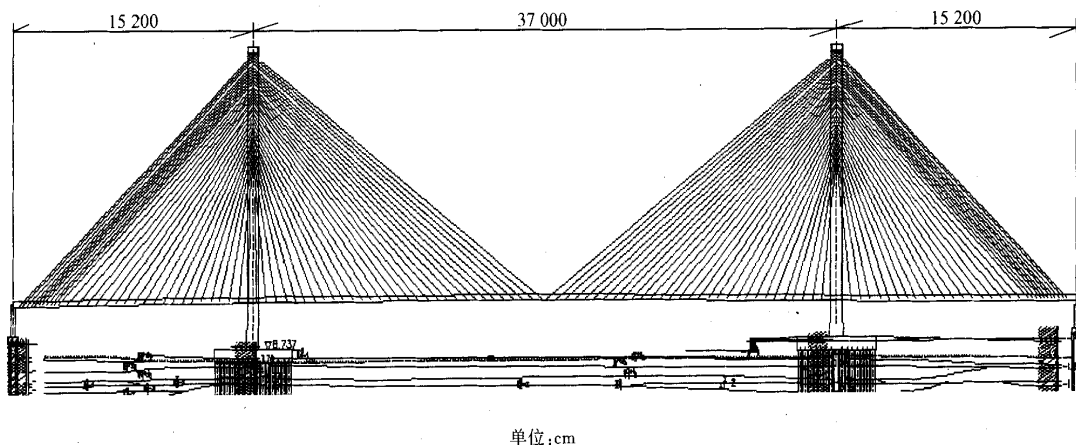


图1 五河口斜拉桥总体布置

保证在最不利状况下主梁上下缘应力都不超过规范规定的允许值,主梁的恒载应力应控制在一定的范围内(我们不妨称这个范围为“可行域”)。

根据规范规定,构件的法向压应力(扣除全部预应力损失)应符合:

$$\text{持久状况 } \sigma_a \leq 0.5f_{ck};$$

$$\text{短暂状况 } \sigma_a \leq 0.70f'_{ck}。$$

影响主梁正应力的荷载因素一般为永久作用和可变作用两大部分,根据规范可得:

$$0 \leq \sigma = \sum_{i=1}^m \gamma_i \sigma_{di} + \sum_{i=1}^m \gamma_i \sigma_{li} \leq [\sigma_a] \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为成桥状态主梁截面应力;  $\sum_{i=1}^m \gamma_i \sigma_{di}$  (以下用  $\sigma_d$  代替) 为成桥状态主梁截面各项永久作用产生的应力总和(以下简称恒载应力);  $\sum_{i=1}^m \gamma_i \sigma_{li}$  (以下用  $\sigma_l$  代替) 为成桥状态主梁截面各项可变作用产生的应力总和;  $[\sigma_a]$  为主梁容许压应力。

由式(1)可得:

$$-\sigma_l \leq \sigma_d \leq [\sigma_a] - \sigma_l \quad (2)$$

而成桥状态主梁截面可变作用应力也在一定的范围内,即:  $\sigma_l \in [\sigma_{lmin}, \sigma_{lmax}]$ 。

$$\text{故: } -\sigma_{lmin} \leq \sigma_d \leq [\sigma_a] - \sigma_{lmax} \quad (3)$$

式(3)的左右分别是主梁恒载应力的上下限。上下限之间的区域就是成桥状态主梁截面恒载应力的可行域。

### 3.2 主梁各控制截面最敏感索的确定

#### 3.2.1 确定各斜拉索施工索力对主梁恒载应力的影响线

首先确定各施工索力在其对应的施工阶段增大

单位值后,对成桥阶段主梁恒载应力的影响或影响幅度。以五河口斜拉桥为例,现在我们将中跨第28号斜拉索(即Z28)的施工索力增大单位值(综合衡量本桥各施工索力的大小,单位值取500 kN),保持其他计算参数不变,然后计算该索施工索力增大单位值后对成桥阶段主梁恒载应力的影响,影响幅度见图2、图3所示。

从图2、图3可知,索力Z28增大单位值对先于它施工的并最靠近它的4个梁段(每个梁段上4个计算单元)的影响较小。随着远离梁索交点影响逐步增大,到了先于它施工的并靠近它的第5~第10个梁段影响达到最大,然后再逐渐减少。到先于它施工的并靠近它的第15个以后的梁段成桥状态恒载应力的影响几乎为零。对其他斜拉索做同样的计算分析,可以得出类似的结论。

#### 3.2.2 确定各截面恒载应力对应的最敏感斜拉索

设主梁有  $n$  个关心点,施工索力变化的斜拉索有  $m$  个,定义  $a_{ij}$  (其中  $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$ ) 为第  $j$  根斜拉索施工索力增大单位值对主梁第  $i$  个关心点成桥状态上缘恒载应力的影响幅度(或影响值)。则:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

即为斜拉索施工索力的改变对主梁各关心点的影响幅度矩阵(或影响值矩阵),当然该矩阵中有很多元素为零或近似为零。

对于  $a_{ij}$ , 当  $i$  为一固定值  $s$  时,  $a_{sj}$  (其中:  $1 \leq j \leq m$ ) 表示的实际意义是对于主梁上固定的关心点  $s$ ,

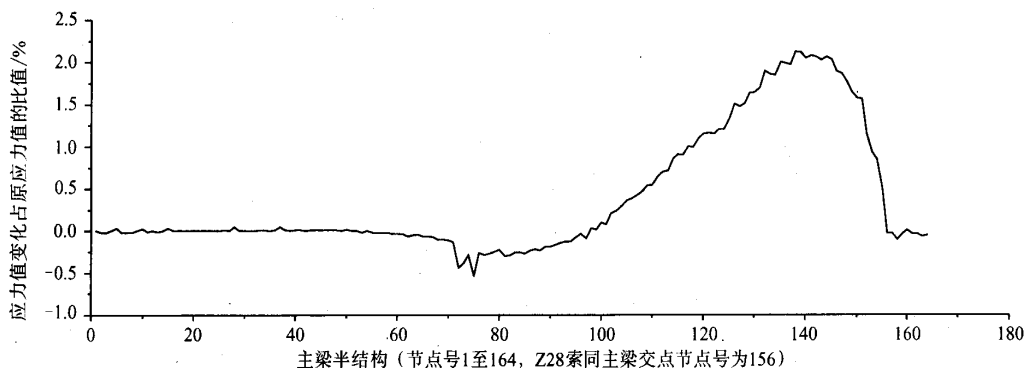


图2 施工索力Z28增大单位值对成桥状态主梁上缘恒载应力影响幅度

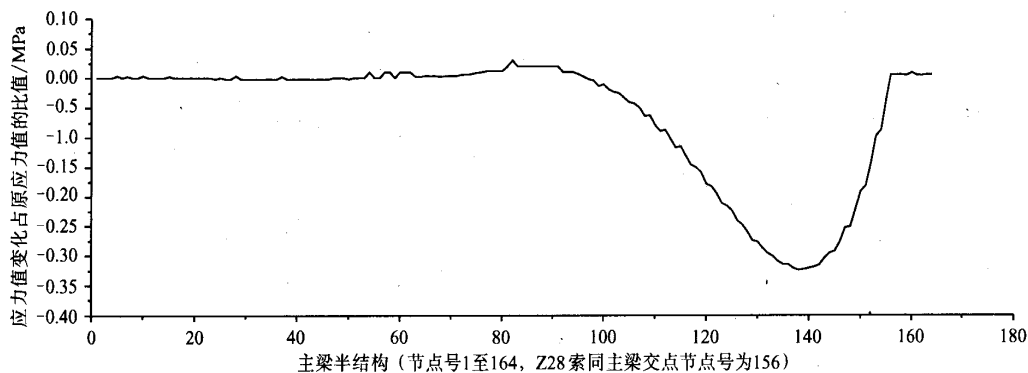


图3 施工索力Z28增大单位值对成桥状态主梁下缘恒载应力影响

第  $j$  根斜拉索施工索力增大单位值,对成桥状态上缘恒载应力的影响幅度。

设  $A_s = |a_{sr}| = \max(|a_{s1}|, |a_{s2}|, |a_{s3}|, \dots, |a_s|, \dots, |a_{sm}|)$

那么  $A_s$  就是对于  $s$  点的上缘恒载应力影响幅度绝对值的最大值。对应的第  $r$  根斜拉索就是对  $s$  点成桥状态上缘恒载应力影响最大的斜拉索,即  $s$  点上缘应力对  $r$  索索力值的变化最敏感。

使用该方法,计算得五河口斜拉桥的主梁中跨半结构各截面(计算模型各节点对应的截面)上、下缘应力所对应的最敏感斜拉索,见图4所示。

从图4中我们也可以看出,所有的施工索力增加后,对跨中合拢段截面恒载应力的影响都比较小,这些截面也没有对应的最敏感斜拉索。

### 3.2.3 对施工索力进行优化

得到主梁中跨各截面上、下缘恒载应力对应的最敏感斜拉索后,对照成桥状态主梁恒载应力可行域和索力优化前恒载应力图。通过调节那些成桥状态恒载应力不在可行域中的截面(即恒载应力的薄

弱截面)索对应的最敏感索的施工索力,来最有效地改变成桥状态恒载应力,使其落在可行域内,进一步的还可通过调整主梁某些截面的最敏感索施工索力,而使成桥状态恒载应力分布均匀,达到合理成桥状态。索力调整流程见图5所示,索力优化流程见图6所示。

当然,优化的时候也得考虑主塔的受力,为了避免索力调节后边跨索力和中跨索力相差太大而使主塔承受过大的恒载弯矩,所以,在中跨斜拉索施工索力大小改变的同时,应使边跨对应的斜拉索的施工索力做相应调整。

对于不同的优化状态,我们可以利用最小二乘法来比较。分别计算各自的恒载应力相对于可行域上下限均值的偏差  $DD_d$ :

$$DD_d = \sum_{i=1}^N (\sigma_{di} - \bar{\sigma}_i)^2, \bar{\sigma}_i \text{ 为第 } i \text{ 号节点对应截面上(下)缘恒载应力可行域上下限均值}$$

选择  $DD_d$  最小(即居中性最好)的优化状态,作为最优的优化状态。

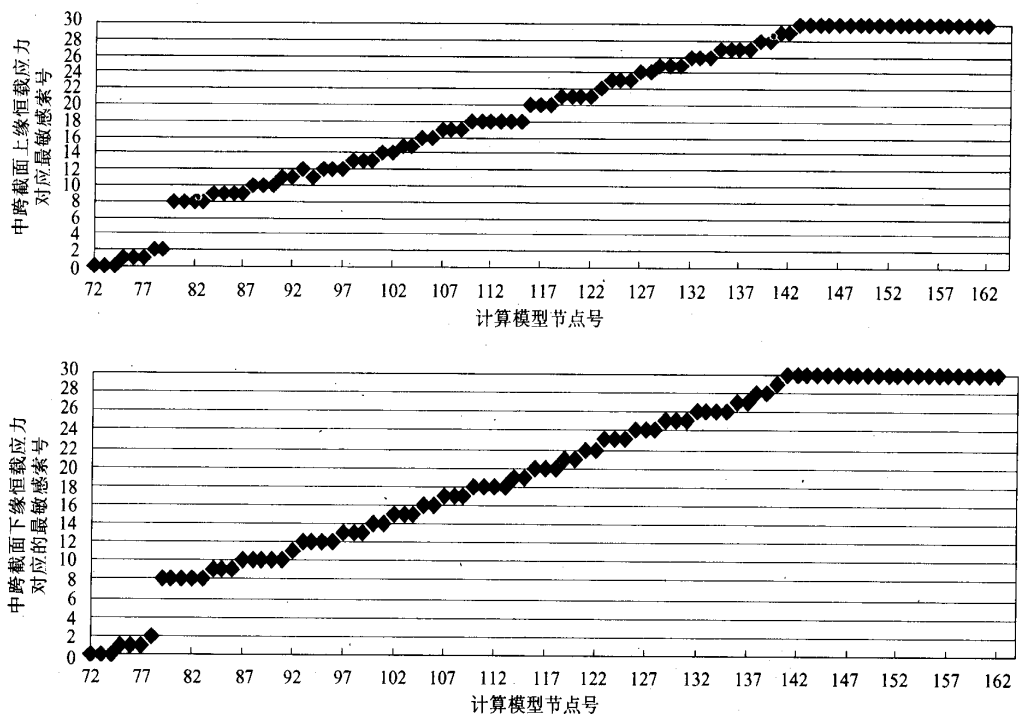


图4 中跨各截面上、下缘恒载应力对应的最敏感索号

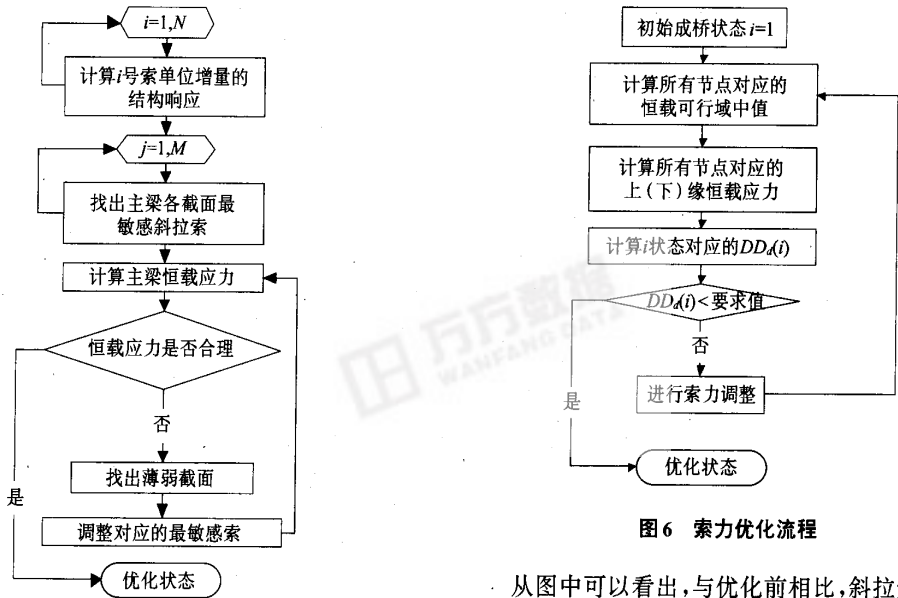


图5 索力调整流程

图6 索力优化流程

3 算例分析

计算五河口斜拉桥的恒载应力可行域,初步设计时确定的施工索力对应下的成桥恒载应力和优化后的施工索力对应下的成桥恒载应力,两者对比见图7、图8所示。

从图中可以看出,与优化前相比,斜拉索施工索力优化后对应的主梁上缘恒载应力仍然分布均匀,大小居中。主梁下缘恒载应力得到了很大的改善,尤其是在跨中位置。下缘恒载应力低于或接近可行域下限的区域有大幅度的缩小,合拢段以外的区域下缘应力值有明显的增加。

从图中也可以看出,跨中合拢段是较为薄弱的环节,要改善合拢段的受力状态,需要采用其他的措

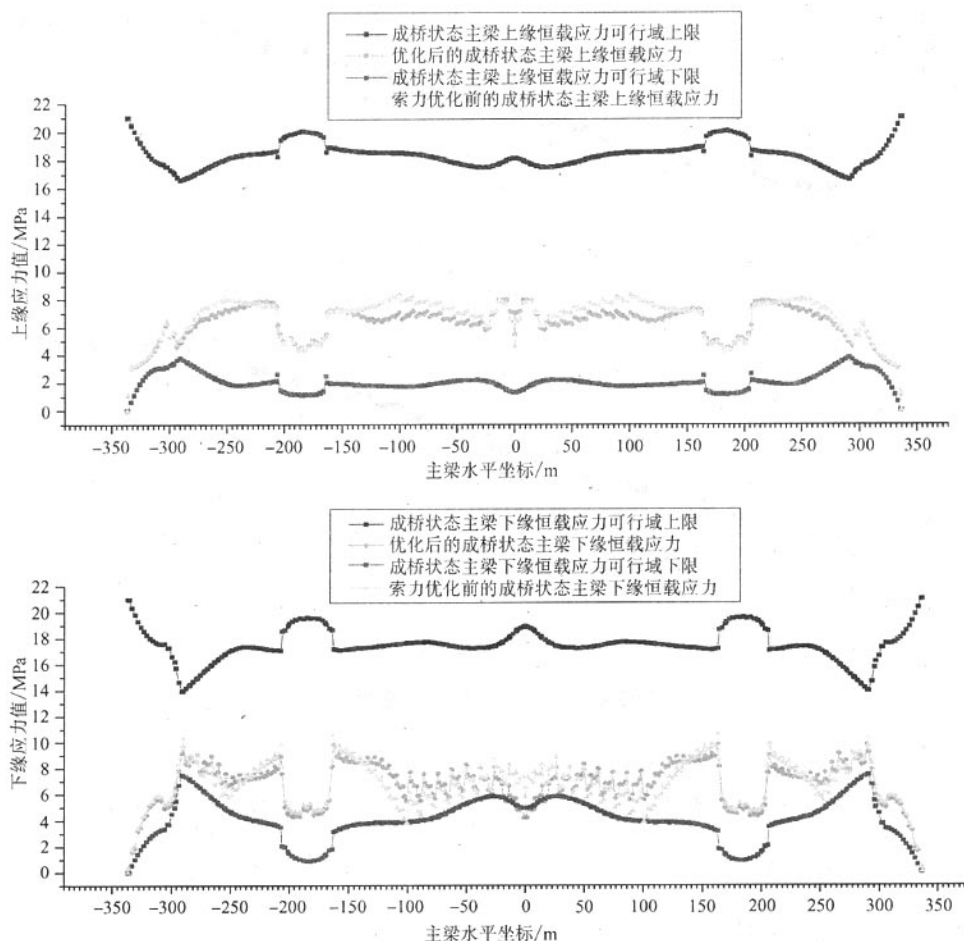


图7 索力优化前和优化后成桥状态主梁上、下缘恒载应力比较

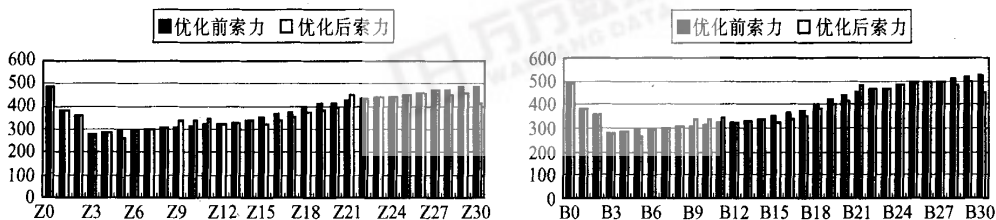


图8 施工索力优化前后索力值比较

施,如通过增加中跨合拢压重来使成桥后合拢段的应力状况得到改善。

#### 4 小结

本文介绍的施工索力优化的影响线法,针对已设计好但尚未施工的预应力混凝土斜拉桥,在不改变设计参数的条件下,通过调整施工阶段的索力,使

得成桥状态的受力状态得到改善。通过算例的证明,该方法能有效改善成桥后主梁除合拢段区域的应力状况,优化后的主梁上、下缘应力大小居中,分布均匀,材料的性能得到了最大程度地发挥。

#### 参考文献:

- [1] 肖汝诚,项海帆.斜拉桥索力优化的影响矩阵法[J].



# 斜拉桥索力优化理论研究

王永安<sup>1</sup>, 刘世同<sup>1</sup>, 谭红梅<sup>2</sup>, 肖汝诚<sup>2</sup>

(1. 江苏省高速公路建设指挥部 南京市 210004; 2. 同济大学桥梁工程系 上海市 200092)

**摘要:**斜拉桥的索力优化可分为成桥索力的优化和施工索力的优化。而根据所要研究对象所处的不同状态,两者又可细分成不同的类型,不同类型的索力优化有各自的特点,运用的思路和方法也有差别。本文简要介绍各种类型索力优化的特点和方法。

**关键词:**斜拉桥; 索力优化; 成桥索力; 施工索力

对于高次超静定结构体系的斜拉桥来说,拉索在整个受力体系中占有重要的地位,它起着传递外荷载的作用。分析时一般将拉索的索力视作“外力”作用在结构上,其大小可在一定的范围内人为调整。此时的斜拉桥就是一个静定或者低次超静定结构。通过主动改变索力来调整结构的内力分配,使其趋于优化合理。

对于斜拉桥来说,我们一般关心的是它的施工索力(有时候也叫做施工张力)和成桥索力。根据所要研究的不同内容,斜拉桥的索力优化可分为两大类:成桥索力的优化和施工索力的优化。根据研究对象所处于的不同状态,成桥索力的优化可分为设计阶段的成桥索力优化、已设计好未施工成桥索力优化和已营运的成桥索力优化。同样,根据研究内容的不同,斜拉桥施工索力的优化可以分为为达到合理成桥索力而进行的施工索力优化和为纠正施工误差的施工索力优化。

本文简要地介绍各种类型的索力优化的研究内容及研究方法。

## 1 成桥索力的优化

在结构体系明确的情况下,成桥索力的取值会极大地影响斜拉桥的成桥受力状态的合理性。为使斜拉桥的成桥受力状态最为合理,可以在方案设计阶段、初步设计甚至施工图设计以后进行索力优化。斜拉桥尤其是预应力混凝土斜拉桥经过多年的运营以后,由于结构参数发生了变化,体系的受力状态不同于理想的成桥状态,同样可以通过索力的优化,改善其受力状态。

### 1.1 设计阶段的成桥索力优化

处于该阶段的斜拉桥,结构构造及结构尺寸、预应力和斜拉索索力均有待确定。在初拟了结构构造和尺寸后,斜拉桥成桥状态的恒载内力主要同主梁预应力和斜拉索索力有关,此时的优化问题实质上是主梁预应力和斜拉索索力共同优化的问题。

针对此阶段斜拉桥的索力优化,国内外已有很多学者进行研究,方法可分为三大类:指定受力状态的索力优化研究、无约束的索力优化、有约束的索力优化以及影响矩阵法<sup>[1,2]</sup>。

收稿日期:2006-03-10

同济大学学报,1998,(6).

- [2] 颜东煌. 斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D]. 湖南大学博士学位论文,2001.
- [3] 许瑞红. 五河口斜拉桥施工索力优化的研究[D]. 同济大学硕士学位论文,2004.
- [4] 唐祖宁. 既有预应力混凝土斜拉桥内力优化与调整的研究[D]. 同济大学硕士学位论文,2004.
- [5] 陆椒,徐有光. 斜拉桥最优索力的探讨[J]. 中国公路学报,1990.
- [6] 王勋文,辛学忠,潘家英,等. 确定PC斜拉桥合理恒载索力方法的探索[J]. 桥梁建设,1996.
- [7] 汪劲丰,施笃铮,徐兴. 确定斜拉桥最优恒载索力方法的探索[J]. 浙江大学学报(工学版),2002.
- [8] M Z Cohn, Z Lounis. Optimal Design of Structural Concrete Bridge Systems[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE,9(120), 1994.
- [9] 项海帆,等. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2001.