

## 三塔自锚式悬索桥经济性能研究

逯东洋,肖汝诚,孙斌,陈辉  
(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**在统计国内外部分已建成的自锚式悬索桥材料用量的基础上,基于银川滨河黄河大桥,研究三塔自锚式悬索桥的经济性能,建立各构件材料用量与结构参数、受力的关系,并以此为基础分析加劲梁材料、矢跨比和边中跨比等参数对造价的影响。研究得出:改变加劲梁的材料,对三塔自锚式悬索桥造价的影响较大;矢跨比的增加可以大幅减少主缆的造价;当桥梁总长一定时,边中跨比合理的范围内应选取较大值。

**关键词:**银川;滨河黄河大桥;三塔自锚式悬索桥;经济性能;参数分析

**中图分类号:**U448.25

**文献标识码:**A

### Economic performance study of three - tower self - anchored Suspension bridge

LU Dongyang, XIAO Rucheng, SUN Bin, CHEN Hui  
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Taking a three - tower self - anchored suspension bridge as the research object, based on the data of Three - tower Self - anchored Suspension Bridges built at home and abroad, the Economic performance of the Three - tower Self - anchored Suspension Bridge is studied, the conception of materials consumption with structural parameters and mechanical property is established. And the effects of the material of girder, rise - span ratio, side to center span ratio for the total cost are studied. Come to the conclusion that changing the material of girder has much impact on the cost of three - tower self - anchored suspension bridge; Increasing the rise - span ratio can reduce the cost of main cable significantly; The side to center span ratio should be the largest value in the reasonable scope when the total length of a bridge has been defined.

**Key words:** Yinchuan; riverfront Yellow River bridge; three - tower self - anchored suspension bridge; economic performance; parametric study

在满足通航要求的前提下,良好的经济性能比大跨径更为重要,因此,准确判断桥梁的整体造价十分重要<sup>[1-4]</sup>。目前,一些研究通过使用高级的数值算法来计算桥梁总材料或总造价的最优解,例如遗传算法<sup>[5-7]</sup>。然而,这些方法不能通过解析的方法研究结构参数对桥梁造价的影响,他们仍需要大量的计算结果进行线性回归。为了更好地了解桥梁的成本及其影响规律,学者提出了许多计算总材料和相关成本的分析方法及模型<sup>[8]</sup>,然而这些都没有计算桥梁的造价。此外,锚碇和基础的造价都没有考虑,即使它们在缆索承

重桥的造价中占了很大的比例。Zhang 在 2013 年通过推导方程估算多跨悬索桥的材料用量和成本<sup>[9]</sup>。本文借鉴目前的研究成果,根据三塔自锚式悬索桥传力特点,推导出各个构件的造价,对今后预测三塔自锚式悬索桥的造价、选择经济合理的桥梁方案有重要的意义。

### 1 自锚式悬索桥经济分析

#### 1.1 计算模型

本文以三塔自锚式悬索桥为研究对象,对其

主跨和边跨进行简化分析研究,得到简化计算模型,如图1、图2所示。

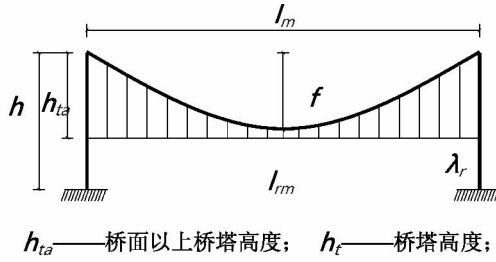


图1 主跨缆索系统示意

Fig.1 Schematic of main cable system

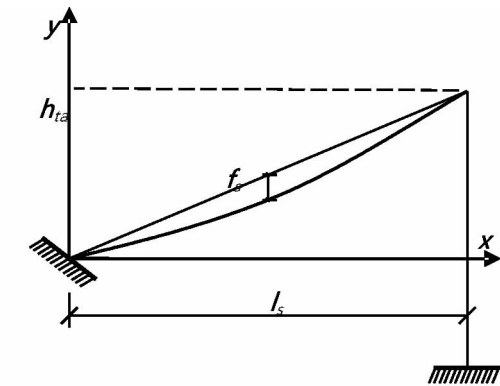


图2 边跨主缆坐标

Fig.2 Coordinate system for main cable of side span

## 1.2 吊杆

对于主跨吊杆,假设吊杆自重沿跨径方向均匀分布,大小为 $g_r$ ,那么,对于每根吊杆可建立平衡方程:

$$\sigma_r A_r = (g_r + g_b + p) \lambda_r \quad (1)$$

式中, $\sigma_r$ 是吊杆轴向拉应力; $A_r$ 是吊杆横截面积。

$\sigma_r$ 最大为吊杆容许应力 $[\sigma_r]$ ;可以得到一根吊杆的材料用量 $q_r$ :

$$q_r = A_r l_r \gamma_r = \frac{(g_r + g_b + p) \lambda_r l_r \gamma_r}{[\sigma_r]} \quad (2)$$

式中, $l_r$ 是吊杆长度; $\gamma_r$ 是吊杆容重。

将吊杆等效为连续薄膜,假设主缆线形为二次抛物线,可得到主跨吊杆材料用量:

$$Q_{rm} = 2 \int_0^{l_m/2} q_r dx = \frac{r_r (g_b + p + g_r) (l_m + \frac{f_m}{3}) l_m}{[\sigma_r]} \quad (3)$$

假设吊杆平均长度为 $l_{ra}$ ,则有:

$$\begin{cases} g_r = A_r \gamma_r l_{ra} / \lambda_r \\ l_{ra} = \frac{f_m}{3} + l_{rm} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)中,可求出吊杆等效均布恒载 $g_r$ 为:

$$g_r = \frac{\gamma_r (g_b + p) (\frac{1}{3} f_m + l_{rm})}{[\sigma_r] - (\frac{1}{3} f_m + l_{rm}) \gamma_r} \quad (5)$$

对于边跨吊杆,假设边跨主缆线形为抛物线,由于边跨、中跨吊杆均布恒载差,边中跨主缆面积差相对于加劲梁均布荷载都是极小的值,边跨主缆垂度 $f_s$ 由主缆塔顶恒载水平力相等近似求得:

$$f_s \approx (\frac{l_s}{l_m})^2 f_m \quad (6)$$

类似于中跨计算,得到边跨吊杆材料用量、吊杆等效均布恒载:

$$Q_{rs} = \frac{(g_{sr} + g_{sb} + p)}{2[\sigma_r]} \gamma_r l_s (h_{ra} - \frac{4}{3} f_s) \quad (7)$$

其中 $g_{sr}$ 为边跨吊杆等效均布恒载; $g_{sb}$ 为边跨主梁恒载集度;吊杆等效均布恒载为:

$$g_{sr} = \frac{\gamma_r}{[\sigma_r] - (\frac{h_{ta}}{2} - \frac{2f_s}{3}) \gamma_r} (g_{sb} + p) l_{sra} \quad (8)$$

## 1.3 主缆

对于中跨,假设主缆自重沿跨径均匀分布,对主跨主缆,可以得到其水平力:

$$H_m = \frac{(p + g_r + g_b + A_{mc} \gamma_c) l_m^2}{8f_m} \quad (9)$$

可得到主缆缆力 $T_m$ :

$$T_m = H_m / \cos \alpha = H_m \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} \quad (10)$$

式中, $\alpha$ 是主缆倾角,当 $\alpha$ 最大时, $T_m$ 有最大值。

通过计算主缆线形可知, $\alpha$ 在塔顶处取最大值,因此主缆最大索力发生在塔顶,其大小为:

$$\begin{aligned} T_{\max} &= H_m \sqrt{1 + \frac{16f_m^2}{l_m^2}} \\ &= \frac{(p + g_r + g_b + A_{mc} \gamma_c) l_m^2}{8f_m} \sqrt{1 + \frac{16f_m^2}{l_m^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

根据主缆索力 $T_{\max} = A_{mc} [\sigma_c]$ ,可求出主缆面积 $A_{mc}$ :

$$A_{mc} = \frac{(p + g_r + g_b) l_m \sqrt{l_m^2 + 16f_m^2}}{8[\sigma_c] f_m - \gamma_c l_m \sqrt{l_m^2 + 16f_m^2}} \quad (12)$$

可以得到主跨主缆用量:

$$Q_{mc} = A_{mc} \gamma_c S_{mc} \quad (13)$$

式中, $\gamma_c$ 是主缆的容重; $[\sigma_c]$ 为主缆容许应力; $S_{mc}$ 是主跨主缆曲线长度,通过积分得:

$$S_{mc} = \frac{l_m}{2} \left\{ \left[ 1 + r_m^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{\ln \left[ n_m + \left[ 1 + r_m^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right]}{n_m} \right\} \quad (14)$$

其中  $n_m = \frac{4f_m}{l_m}$ 。

同理对于边跨,得到边跨主缆横截面积  $A_{sc}$ :

$$A_{sc} = H_m \sqrt{1 + \left( \frac{h_{ta} + 4f_s}{l_s} \right)^2} / [\sigma_c] \quad (15)$$

得到边跨主缆总材料用量  $Q_{sc}$ :

$$\begin{cases} Q_{sc} = 2\gamma_c A_{sc} S_{sc} \\ S_{sc} = \frac{l_s}{4r_s} \left\{ a\sqrt{a^2+1} - b\sqrt{b^2+1} + \ln \frac{a+\sqrt{a^2+1}}{b+\sqrt{b^2+1}} \right\} \\ n_s = 4f_s/l_s, a = (h_a + 4f_s)/l_s, b = (h_a - 4f_s)/l_s \end{cases} \quad (16)$$

### 1.4 桥塔经济性分析

为了便于比较混凝土的用量,这里仅对主塔采用混凝土形式进行研究。主塔以受压为主,弯矩的影响一般限制在小偏心范围内。这里主塔按偏心受压构件计算,但由于是长细构件<sup>[10]</sup>,这里还要考虑失稳对承载力的折减。因此得到单个主塔混凝土用量:

$$Q_t = N_b - N_t = N_t \left[ \exp\left(\frac{\gamma_t h_t}{k[\sigma_t]}\right) - 1 \right] \quad (17)$$

式中,  $\gamma_t$  为主塔材料容重;  $[\sigma_t]$  为主塔容许应力;  $N_t$  为塔顶竖向轴力,大小为:

$$N_t \approx \frac{8f_m H_m}{l_m} \quad (18)$$

其中水平力为:

$$H_m = \frac{(p + g_r + g_b + A_{mc} \gamma_c) l_m^2}{8f_m} \quad (19)$$

### 1.5 加劲梁经济性分析

对于自锚式悬索桥,加劲梁需要承担主缆作用的轴向压力,考虑到加劲梁受压稳定性、恒载及车辆等荷载对其产生的弯曲应力、抗风稳定性等因素,根据实际工程经验,取加劲梁中轴心所占内力系数的比例为  $\chi$ 。根据主缆水平力与主梁轴向抗力平衡,得到主梁截面面积为:

$$\begin{cases} A_b = \frac{p[\sigma_c][\sigma_t]l_m^2}{\chi(B_b C_b [\sigma_b] - \gamma_b [\sigma_c][\sigma_t]l_m^2)} \\ B_b = 8[\sigma_c]f_m - \gamma_c l_m \sqrt{l_m^2 + 16f_m^2} \\ C_b = [\sigma_r] - \left(\frac{1}{3}f_m + l_{rm}\right)\gamma_r \end{cases} \quad (20)$$

加劲梁材料用量为:

$$Q_b = A_b (2l_m + 2l_s) \quad (21)$$

## 2 经济性的参数研究

在实际的工程设计中,结构参数的选取要考虑很多因素,本文结合前面的理论公式,研究三塔自锚式悬索桥各参数对经济性的影响。参数选取如表1:

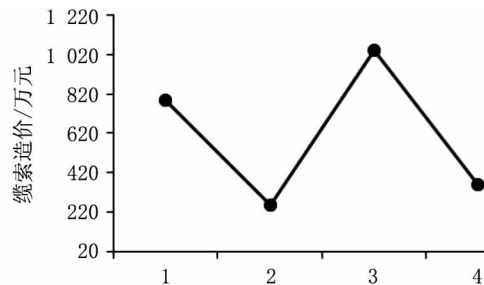
表1 计算参数表

Tab.1 Parameters for calculation

计算参数	数值
桥面以上桥塔高度/m	45.754
桥塔高度/m	73.627
主跨跨径/m	218
主跨主缆垂度/m	43.6
吊杆间距/m	8
跨中吊杆高度/m	3
边跨跨径/m	88
钢材单价/元·吨 <sup>-1</sup>	12 800
钢丝单价/元·吨 <sup>-1</sup>	15 000
混凝土单价/元·吨 <sup>-1</sup>	400
UHPC 单价/元·吨 <sup>-1</sup>	30 000

### 2.1 主梁材料

图3为缆索造价与主缆材料关系图,可见主梁的自重会直接影响缆索系统的造价。



注: 1-混凝土-钢组合梁; 2-钢梁; 3-混凝土梁; 4-UHPC-钢组合梁。

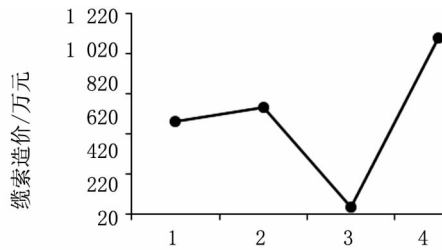
图3 缆索造价与主梁材料关系图

Fig 3 Cost of cables to material of main girder

图4为主梁造价与主梁材料关系图,可见加劲梁材料对其造价影响很大,目前由于混凝土材料相对价格较低,混凝土梁造价最低,而UHPC价格相对较高,UHPC-钢组合梁造价最高,钢梁、砼-钢组合梁造价居中。

### 2.2 矢跨比

图5为吊杆、主缆、桥塔、主梁造价与矢跨比关



注: 1-混凝土-钢组合梁; 2-钢梁; 3-混凝土梁; 4-UHPC-钢组合梁。

图4 主梁造价与主梁材料关系图

Fig. 4 Cost of main girder to material of main girder

系图,可以看出吊杆造价随矢跨比增大而增加,增幅在4%左右,主缆造价随矢跨比增大而减少,幅度在10%左右,对桥梁总造价影响较大,而桥塔与主梁造价受矢跨比影响不大。

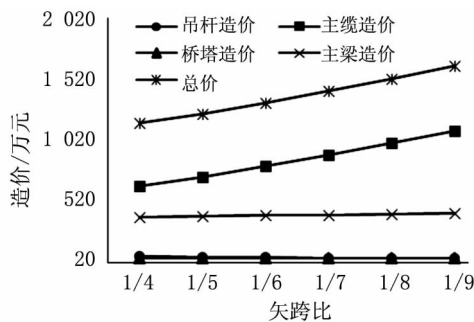


图5 造价与矢跨比关系图

Fig. 5 Total cost to rise-span ratio

### 2.3 边中跨比

图6为吊杆、主缆、桥塔、主梁造价与边中跨比关系图,可以看出吊杆、桥塔、主梁造价随边中跨比变化较小,主缆造价随边中跨比增大而减少,变化幅度大约为15%。

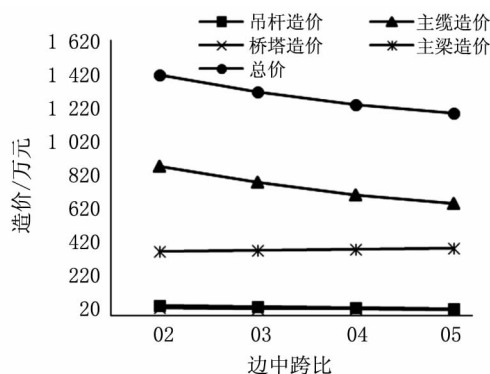


图6 造价与边中跨比关系图

Fig. 6 Total cost to side to center span ratio

## 3 结论

1) 改变加劲梁的材料,对三塔自锚式悬索桥

造价的影响较大。随着钢材价格的降低,钢梁和UHPC-钢组合梁可以大幅减少主缆、吊杆及主塔的造价。

2) 矢跨比的增加可以大幅减少主缆的造价。吊杆造价随矢跨比的增大而增加,但是幅度相对较小,而主塔造价随矢跨比的变化不明显,因此,较大的矢跨比可以减少三塔自锚式悬索桥的造价。

3) 当桥梁总长一定时,在一定范围内,增大边中跨比,主缆造价随之降低,吊杆、主塔造价相对不变,因此在边中跨比合理的范围内应选取较大值。

### 参考文献:

- [1] GIMSING N J, GEORGAKIS C T. Cable Supported bridge: Concept and design[M]. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2012.
- [2] HASSAN M M, NASSEF A O, AND DAMATTY E A. Optimal design of semi-fan cable-stayed bridges[J]. Can. J. Civ. Eng., 2013(40): 285-297.
- [3] HASSAN M M, DAMATTY E A, NASSEF A O. Database for the optimum design of semi-fan composite cable-stayed bridges based on genetic algorithms[J]. Structure and Infrastructure Eng: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, 2014, 931-976.
- [4] LUTE V, UPADHYAY A, SINGH K K. Computationally-efficient analysis of cable-stayed bridge for GA-based optimization[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009(22): 750-758.
- [5] 肖汝诚. 桥梁结构体系[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [6] 张元凯, 肖汝诚, 金成棣. 自锚式悬索桥的概念设计[J]. 公路, 2002(11): 46-49.
- [7] 张力文. 多跨一联缆索承重桥梁最优跨径组合研究多跨一联缆索承重桥梁最优跨径组合研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- [8] 杨进. 大桥深水基础方案设计与施工及经济性研究[J]. 桥梁建设, 2011(2): 46-49.
- [9] 王天英, 王晓阳. 公路桥梁经济跨径浅析与选用[J]. 青海科技, 1998(4): 35-38.
- [10] 史帅帅, 张云发, 高鲁超, 等. 考虑初始缺陷影响的混凝土受压特性试验研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(4): 15-18.

(责任编辑 王利君)