

自锚式双塔斜拉桥的力学参数研究

吴万忠, 张杨永, 孙 斌, 肖汝诚

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于近似计算解析公式,建立了自锚式双塔斜拉桥的静力行为力学评价体系,总结了自锚式双塔斜拉桥的力学评价指标和力学参数.针对双塔斜拉桥各种结构体系力学评价指标,分析其各个影响因素的敏感性;针对各种力学参数,研究了其变化时对双塔斜拉桥结构体系力学性能的影响.研究成果为自锚式双塔斜拉桥方案阶段的概念设计提供了参考依据.

关键词: 双塔斜拉桥; 力学参数; 评价指标; 力学性能; 近似计算

中图分类号: U448.35

文献标志码: A

Study on Mechanical Parameters of Self-anchored Double-tower Cable-stayed Bridges

WU Wanzhong, ZHANG Yangyong, SUN Bin, XIAO Rucheng
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the approximate analytic formulas, an evaluation system for the static behavior of self-anchored double-tower cable-stayed bridge was established. Mechanical evaluation indexes and corresponding parameters were summarized. The sensitivity of various factors was analyzed for the structural mechanics indexes. Then, the effects of mechanic properties of structure system were studied in detail for the mechanical parameters. The research achievement can provide a reference for the conceptual design of self-anchored double-tower cable-stayed bridge.

Key words: double-tower cable-stayed bridge; mechanic parameters; evaluation index; mechanic property; approximate calculation

斜拉桥的静力行为是多个参数综合作用的结果.参数研究的目的在于分析设计参数变化对斜拉桥结构体系受力性能的影响,揭示结构体系受力性

能与设计参数的内在联系和一般规律,为结构体系设计优化提供依据.由于斜拉桥的力学性能一般很难用显式的函数关系式表达,以往的参数研究^[1-8]多借助于有限元软件采用数值计算的方法得到结构关心截面、关心位置处的位移或者内力结果,从中总结得到设计参数对结构体系受力的影响规律.本文则根据作者推导的一些近似计算公式^[9-10],基于解析方法来研究斜拉桥的力学参数对结构体系静力性能的影响.

1 评价体系的建立

在进行参数研究之前,要建立起自锚式双塔斜拉桥的力学评价体系.首先要确立能够表征斜拉桥结构体系力学性能的评价指标,形成一个较为完善的指标系统;其次还要遴选出影响斜拉桥结构体系力学性能的参数,并尽可能地按其与其评价指标的关联度进行分类、排序,形成一个较为完备的参数系统.

为了尽可能全面地反映斜拉桥结构体系的力学性能,本文选择的评价指标包括:主梁的轴力、弯矩和跨中挠度;索塔的塔顶位移和最大弯矩;主梁的一阶弹性稳定系数等.为了较为完备地涵盖影响斜拉桥结构体系力学性能的基本参数,本文选择的结构设计参数包括:主梁竖向刚度、主梁侧向刚度、索塔纵向刚度、斜拉索抗拉刚度、索塔的高度、拉索的梁塔索距比、主梁高度、主梁宽度等.

根据作者的推导^[9-10],评价指标与力学参数之间的简化计算公式如下:

1.1 主梁轴力

将拉索近似看成一个竖直平面内的索膜,当作连续体进行分析,主梁任意点处的轴力表达为

$$N(x) = wk \left[L_c/2 - x - (L_c/2 - hk) \right] \cdot$$

$$\ln \frac{hk - L_c/2 + x}{hk} \quad (1)$$

式中: x 为轴力计算位置距梁塔交接处的距离; h 为主塔的有效高度; L_c 为主梁中跨跨径; w 为主梁上的均布荷载集度; k 为拉索的梁塔索距比, $k = \lambda_c / \lambda_b$, 其中, λ_c 为主梁中跨的平均索距, λ_b 为拉索在主塔上的索距。

1.2 主梁挠度

一般情况下, 桥塔缩短量很小, 相对拉索伸长和索塔挠曲两种影响因素而言, 其引起的主梁挠度可忽略不计, 从而中跨主梁的跨中挠度可表达为

$$\delta v \approx \delta v_{n1} + \delta v_{n2} = \frac{P_n l_n}{E_n A_n \sin^2 \alpha_n} + \frac{P_n \cot^2 \alpha_n}{\frac{3E_t I_t}{h^3} + \frac{E_0 A_0 \cos^2 \alpha_0}{l_0}} \quad (2)$$

$$\begin{cases} M_{\max} = 0.322 \cdot 4p \sqrt{\frac{EI}{K}} + 0.25P \sqrt{\frac{4EI}{K}} \\ K = \frac{P_n}{\delta v} \frac{1}{\lambda} = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{l_n}{E_n A_n \sin^2 \alpha_n} + \frac{\cot^2 \alpha_n}{\frac{3E_t I_t}{h^3} + \frac{E_0 A_0 \cos^2 \alpha_0}{l_0}}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: E 、 I 为主梁的弹性模量与平均抗弯惯性矩; K 为比拟主梁的弹性地基梁的刚度系数; λ 为主梁的平均索距。

1.4 索塔塔顶位移

在外部荷载作用下, 索塔相当于塔底固定的悬臂梁, 索塔塔顶水平位移可表达为

$$\delta h = \frac{P_n \cot \alpha_n}{\frac{3E_t I_t}{h^3} + \frac{E_0 A_0 \cos^2 \alpha_0}{l_0}} \quad (4)$$

式中: δh 为索塔塔顶水平位移。

1.5 索塔纵向弯矩

活载作用下, 索塔将产生纵向位移, 此时索塔可简化为塔顶有弹性支承、塔底固定的悬臂梁。在塔顶竖向力 V 作用下, 索塔纵向弯矩可表达为:

$$\begin{cases} M_{\max} = -\frac{1}{\sin(\alpha h) - \alpha h \cos(\alpha h)} V \cdot \delta h, \frac{\pi}{2\alpha} < h \\ M_{\max} = -\frac{\sin(\alpha h)}{\sin(\alpha h) - \alpha h \cos(\alpha h)} V \cdot \delta h, \frac{\pi}{2\alpha} \geq h \\ \alpha^2 = \frac{V}{E_t I_t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: V 为索塔塔顶竖向力, 由拉索的索力计算而得。

1.6 主梁横向弯矩和位移

在横向静阵风作用下, 斜拉桥的主梁可以简化为承受均布荷载的三跨连续梁。在侧向静阵风荷载 P_w 作用下, 中跨主梁最大侧向弯矩和最大侧向位移

式中: δv 、 δv_{n1} 、 δv_{n2} 分别为中跨主梁的跨中挠度、斜拉索伸长引起的跨中挠度、索塔挠曲引起的跨中挠度; E_t 、 I_t 分别为主塔的弹性模量、抗弯惯性矩; P_n 为中跨尾索的索力的竖向分量; l_n 、 α_n 、 E_n 、 A_n 分别为中跨尾索的长度、倾角、等效弹性模量和横截面面积; l_0 、 α_0 、 E_0 、 A_0 分别为边跨锚索的长度、倾角、等效弹性模量和横截面面积。

1.3 主梁活载弯矩

根据斜拉桥的主梁相当于弹性支承连续梁的受力特点, 把斜拉桥主梁比拟成符合文克尔假设的弹性地基梁, 在均布荷载 p 和集中荷载 P 作用下, 中跨主梁的最大弯矩可表达为

出现在跨中位置, 可表达为

$$\begin{cases} M_{\max} = \frac{p_w L_c^2}{4} \left(\frac{1}{2} - \frac{1 + \xi^3}{3 + 2\xi} \right) \\ v_{hc} = \frac{p_w L_c^4}{384EI_z} \cdot \frac{3 + 10\xi - 12\xi^3}{3 + 2\xi} \end{cases} \quad (6)$$

式中: M_{\max} 、 v_{hc} 分别为中跨主梁的跨中侧向弯矩和侧向位移; p_w 为主梁上承受的横风荷载; I_z 为主梁的侧向抗弯惯性矩; ξ 为主梁的边主跨跨径比。

$$p_w = p_b + \frac{1}{2} p_c = \frac{1}{2} \rho V_g^2 C_{Hb} H + \frac{1}{4} \rho V_g^2 C_{Hc} \frac{A_n}{L} \quad (7)$$

式中: p_b 、 p_c 分别为作用在主梁和拉索上的风荷载; ρ 为空气密度; V_g 为静阵风风速; C_{Hb} 、 C_{Hc} 分别为主梁和拉索的阻力系数; H 为梁高; A_n 为拉索阻风面积; L 为主梁长度。

1.7 主梁屈曲稳定系数

在外部荷载作用下, 主梁的平面内屈曲可以简化为一根两端铰支的弹性地基梁, 主梁的一阶线性屈曲稳定系数可表达为

$$\begin{cases} N_{cr}(x) = 2 \sqrt{k(x)EI} \\ \gamma_b = \min N_{cr}(x) / N(x) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $N_{cr}(x)$ 、 $N(x)$ 分别为 x 处的临界压力和实际轴力; $k(x)$ 为 x 处的弹性地基梁的刚度系数; γ_b 为主梁的一阶弹性屈曲稳定系数。

根据式(1)~(8), 自锚式双塔斜拉桥的力学参

数与力学性能评价指标之间的关系描述如图1所示.进行力学参数研究时,可在其他参数保持不变时,变动某一个参数,得到评价指标与该参数之间的变化规律.

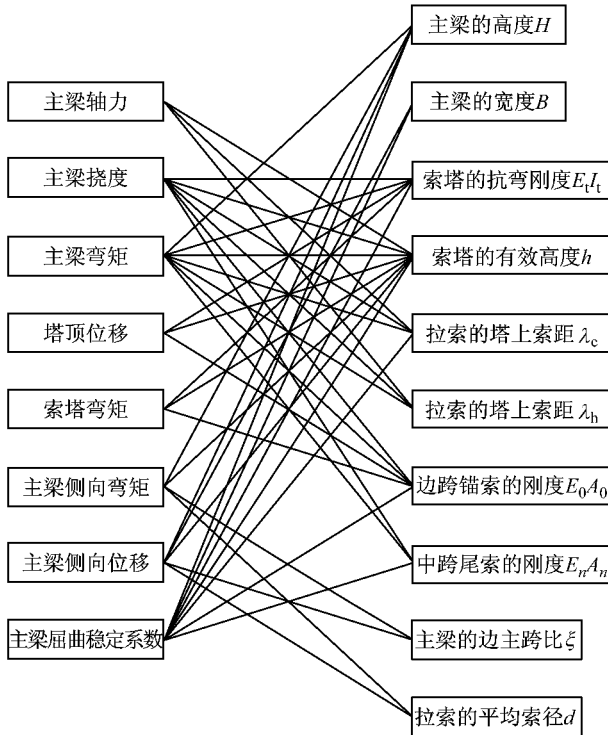


图1 力学参数和力学性能评价指标之间的关系

Fig.1 Relationship between mechanic parameters and mechanic property evaluation index

2 力学评价指标的影响因素

根据上面给出的近似计算公式(1)~(8),以斜拉桥结构体系力学性能的评价指标为序,讨论各种参数变化对评价指标的影响.

2.1 主梁轴力

从式(1)可以看出,在外部荷载、主跨跨径一定的情况下,影响主梁轴力的主要参数有:拉索的梁塔索距比 k 、索塔有效高度 h .各主要参数与主梁轴力之间的关系如图2所示,图中的横坐标和纵坐标均作了适当的数学处理,表示为除以初值后的相对值(量纲一).图中,若用 y 表示主梁轴力, x_1 、 x_2 分别表示索塔的有效高度和拉索的梁塔索距比,则有函数关系 $y=f(x_1, x_2)$,并且满足初值条件 $y_0=f(x_{10}, x_{20})$,图中纵坐标即为 y/y_0 ,横坐标即为 x/x_0 .譬如图2中的横坐标表示设计参数相对其初始值的变化范围为 $\pm 30\%$,后文各图的处理与此处相同.从图中可以看出,索塔有效高度对主梁轴力的影响最大,而

拉索的梁塔索距比对主梁轴力的影响较小.

2.2 主梁挠度

从式(2)可以看出,在外部荷载、主跨跨径一定的情况下,影响主梁跨中挠度的主要参数有:拉索的索长、刚度以及拉索的倾角、索塔刚度、索塔高度等.而拉索的索长和倾角也主要取决于索塔的有效高度,因此,主梁跨中挠度的主要影响因素可以归结为:边跨尾索的刚度、中跨尾索的刚度以及索塔的刚度和高度.

各主要参数与主梁挠度之间的关系如图3所示.从图中可以看出:索塔有效高度对主梁竖向挠度(量纲一)的影响最大;边跨尾索和中跨尾索对主梁挠度也有较大影响,且两者影响程度接近;而索塔刚度的变化对主梁挠度影响很小.

2.3 主梁活载弯矩

从式(3)可以看出,在外部荷载一定的情况下,影响主梁最大弯矩的主要参数有:主梁的抗弯刚度、地基系数.而地基系数主要取决于主梁挠度和索距,主梁挠度的影响因素同前.因此,主梁最大弯矩的主要影响因素可以归结为:主梁竖向刚度、边跨尾索的刚度、中跨尾索的刚度、主梁拉索的索距以及索塔的刚度和高度.

各主要参数与主梁弯矩之间的关系如图4所示.从中可以看出:索塔有效高度对主梁弯矩(量纲一)的影响最大;主梁的竖向刚度和拉索在梁上的索距对主梁弯矩的影响次之;拉索的尾索刚度对主梁弯矩的影响较小;而索塔的抗弯刚度对主梁弯矩的影响最小.

2.4 索塔塔顶位移

从式(4)可以看出,在外部荷载一定的情况下,影响索塔塔顶水平位移的主要参数有:索塔的抗弯刚度、索塔的有效高度、边跨尾索的刚度.

各主要参数与索塔塔顶水平位移之间的关系如图5所示.从图中可以看出,边跨尾索的刚度对索塔塔顶水平位移(量纲一)的影响最大,索塔的抗弯刚度和高度对塔顶水平位移的影响较小.

2.5 索塔纵向弯矩

从式(5)可以看出,在外部荷载一定的情况下,影响索塔最大弯矩的主要参数有:索塔的抗弯刚度、索塔的高度、塔顶水平位移.而塔顶水平位移与边跨尾索的刚度有关.因此,影响索塔最大弯矩的主要参数有:边跨尾索的刚度、索塔的抗弯刚度、索塔的有效高度.

各主要参数与索塔弯矩之间的关系如图6所

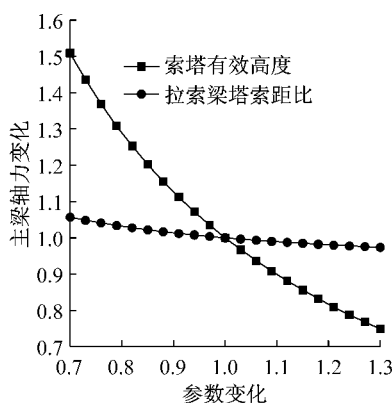


图 2 主梁轴力的参数研究

Fig. 2 Parametric study of beam force

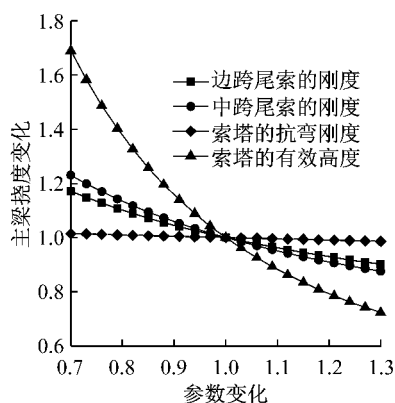


图 3 主梁跨中挠度的参数研究

Fig. 3 Parametric study of the deflection of the mid-span

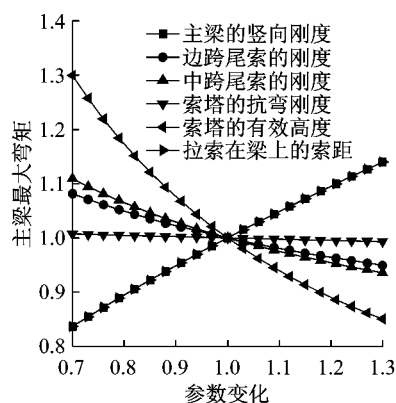


图 4 主梁弯矩的参数研究

Fig. 4 Parametric study of bending moment of the girder

示. 从中可以看出, 索塔有效高度对索塔弯矩(量纲一)的影响最大, 索塔的抗弯刚度和边跨尾索的刚度对索塔弯矩也有较大影响.

2.6 主梁横向弯矩和位移

从式(6)可以看出, 在外部荷载、中跨跨径一定的情况下, 影响主梁侧向弯矩的主要参数有: 主梁的边主跨比; 影响主梁侧向位移的主要参数有: 主梁的

边主跨比、主梁的侧向刚度. 而横风荷载随着梁高以及拉索的阻风面积的增大而增大.

各主要参数与主梁侧向弯矩之间的关系如图 7 所示. 从图中可以看出, 主梁的高度对主梁侧向弯矩(量纲一)的影响最大, 拉索的阻风面积对主梁侧向弯矩的影响次之, 而边主跨比对主梁侧向弯矩的影响较小.

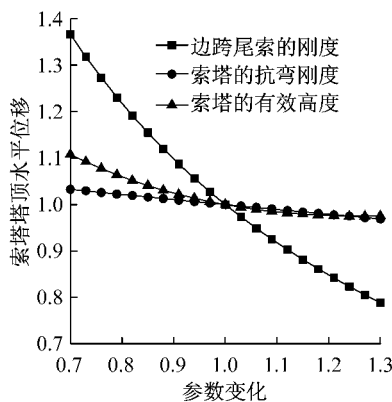


图 5 索塔塔顶水平位移的参数研究

Fig. 5 Parametric study of the horizontal displacement on the top of the tower

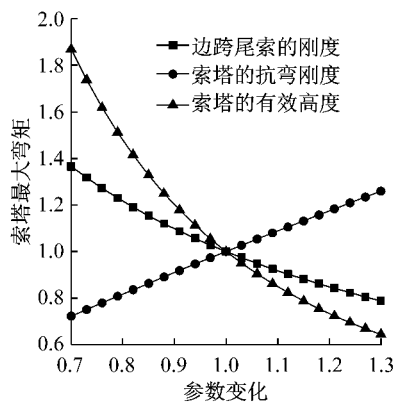


图 6 索塔弯矩的参数研究

Fig. 6 Parametric study of the bending moment of the tower

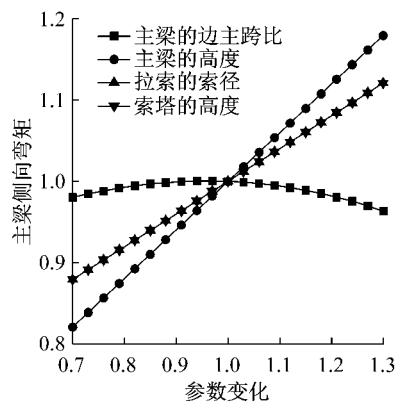


图 7 主梁侧向弯矩的参数研究

Fig. 7 Parametric study of lateral bending moment of the girder

各主要参数与主梁侧向位移之间的关系如图 8 所示. 从中可以看出, 主梁的侧向刚度对主梁侧向位移(量纲一)的影响最大, 主梁的高度对主梁侧向位移的影响次之, 拉索的阻风面积对主梁侧向位移也有较大影响, 而边主跨比对主梁侧向位移的影响较小.

2.7 主梁屈曲稳定系数

从式(8)可以看出, 在外部荷载一定的情况下, 影响主梁线性屈曲稳定系数的主要参数有: 索塔的有效高度、边跨尾索的刚度、中跨尾索的刚度、主梁

拉索的索距、索塔的抗弯刚度、主梁的抗弯刚度.

各主要参数与主梁轴力之间的关系如图 9 所示. 从中可以看出, 索塔有效高度对主梁一阶线性屈曲稳定系数的影响最大, 主梁的竖向刚度和拉索在梁上的索距的影响次之, 而拉索的刚度和索塔的抗弯刚度对主梁一阶线性屈曲稳定系数的影响较小.

3 参数变化对力学性能的影响

上面详细讨论了自锚式双塔斜拉桥结构体系力

学性能评价指标的各种影响因素.反过来,若以影响斜拉桥结构体系力学性能的参数为序,则可以得到各参数变化对斜拉桥结构体系力学性能的影响.

3.1 主梁高度

主梁高度的变化改变了主梁竖向刚度,从而影响主梁的活载弯矩以及面内的弹性屈曲稳定性.横

向静阵风作用下,主梁高度的变化改变了主梁的阻风面积,从而影响主梁的侧向弯矩和侧向位移.

主梁高度变化对结构力学性能的影响如图10所示.从中可以看出:降低梁高可以有效地减小主梁在横向静阵风作用下的结构响应.

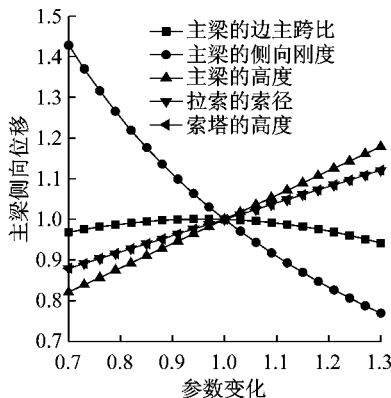


图8 主梁侧向位移的参数研究

Fig.8 Parametric study of lateral displacement of the girder

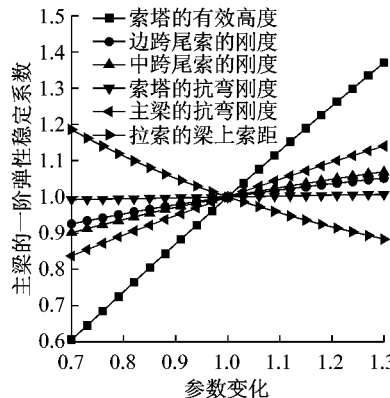


图9 主梁屈曲稳定系数的参数研究

Fig.9 Parametric study of the buckling stability coefficients of the girder

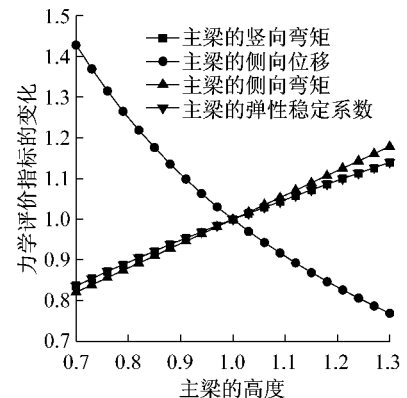


图10 主梁高度变化对结构力学性能的影响

Fig.10 Effects of beam height on structure mechanic property

3.2 主梁宽度

主梁宽度的变化改变了主梁侧向刚度,从而影响主梁的横向静阵风作用下的结构响应以及面外的屈曲稳定性.增加主梁宽度,还可以提高斜拉桥结构的颤振稳定性,改善结构抗风性能.主梁宽度变化对结构力学性能的影响如图11所示.从中可以看出:增加梁宽可以有效地减小主梁在横向静阵风作用下的侧向位移,提高面外屈曲稳定性和抗风颤振稳定性.

3.3 索塔高度

索塔的高度或者说索塔高跨比是影响斜拉桥结构体系力学性能的一个重要参数.索塔高度的变化直接改变了拉索的水平倾角,从而改变结构的竖向支承刚度,影响塔、梁、索的内力状态和变形状况.

索塔高度变化对结构力学性能的影响如图12所示,索塔高度的变化几乎影响了斜拉桥结构力学性能的所有评价指标.从中可以看出:增加索塔高度可以减小主梁的轴力和活载响应,减小索塔的纵向位移和弯矩,但同时也降低了主梁的屈曲稳定性.此外,索塔高度的变化对横向静阵风作用的主梁侧向弯矩和侧向位移的影响较小.

3.4 索塔刚度

索塔刚度的变化对水平方向刚度影响较大,而

对结构竖向刚度的影响很小,索塔刚度变化对结构力学性能的影响如图13所示.从中可以看出:增加索塔刚度将导致索塔纵向弯矩进一步增大;索塔刚度的变化对主梁的活载效应以及塔顶水平位移的影响均不是很大.

3.5 锚索刚度

锚索刚度的变化对结构体系水平方向刚度影响较大,对结构竖向刚度也有较大影响.锚索刚度变化对结构力学性能的影响如图14所示.从中可以看出:增加锚索刚度可以有效地减小索塔的塔顶水平位移和纵向弯矩,对主梁的活载挠度和竖向弯矩也有较大程度的改善,同时由于体系刚度的增加使得主梁的屈曲稳定性也得以提高.

除了上面这些重要的结构参数外,拉索的索距布置、拉索直径、主梁边主跨比等结构参数对结构体系的力学性能也有一定程度的影响,但影响程度不大,这里不再展开讨论.有时这些参数不是独立变化的,相互之间存在较大的耦合性.譬如,横向静阵风作用下,拉索在梁上索距的增加,将减小拉索的阻风面积,但索距增加又必然导致拉索直径的增加,拉索直径增加又会增加阻风面积.索距和索径两个参数之间存在一定的耦合性.

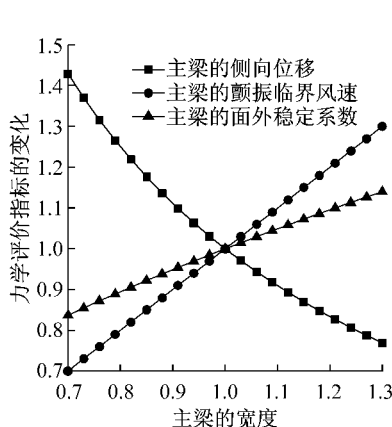


图 11 主梁宽度变化对结构力学性能的影响

Fig.11 Effects of beam width on structure mechanic property

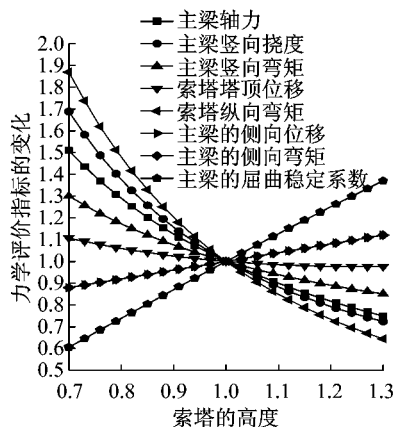


图 12 索塔高度变化对结构力学性能的影响

Fig.12 Effects of tower height on structure mechanic property

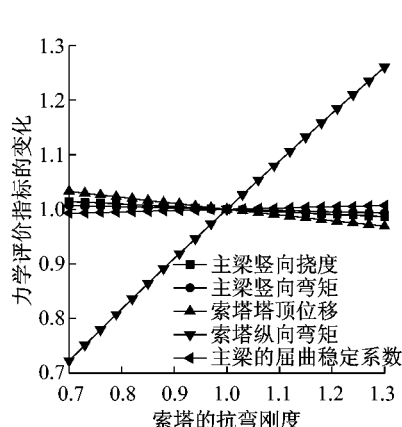


图 13 索塔刚度变化对结构力学性能的影响

Fig.13 Effects of tower stiffness on structure mechanic property

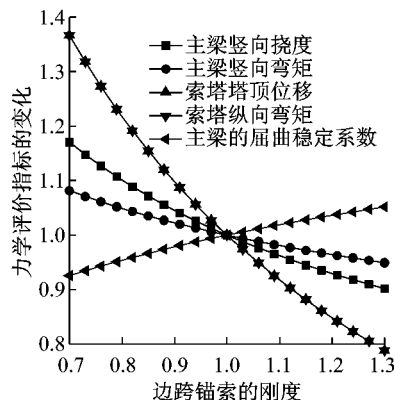


图 14 锚索刚度变化对结构力学性能的影响

Fig.14 Effects of anchorage cable stiffness on structure mechanic property

4 结论

斜拉桥的静力行为可用主梁轴力、弯矩和跨中挠度,索塔的塔顶位移和最大弯矩,主梁的一阶弹性稳定系数等力学特性来描述.正如前文所述,斜拉桥的静力行为是多个参数综合作用的结果.本文的力学参数研究基于近似计算的解析公式,能反映自锚式双塔斜拉桥的力学特性的一般规律性.通过参数分析,可以获得每项力学评价指标的相关影响因素,也可以获得各力学参数变化时结构体系力学性能的变化,可作为自锚式斜拉桥概念设计的依据.

参考文献:

[1] 梁鹏. 超大跨度斜拉桥几何非线性及随机模拟分析[D]. 上

海:同济大学土木工程学院, 2004.

LIANG Peng. Geometric nonlinearity and random simulation analysis of super long span cable-stayed bridges[D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2004.

[2] 苗家武. 超大跨度斜拉桥设计理论研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院, 2006.

MIAO Jiawu. Study for design theories of super long span cable-stayed bridges[D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2006.

[3] 孙斌. 超千米级斜拉桥结构体系研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院, 2008.

SUN Bin. Study on structural systems in super-kilometer cable supported bridge[D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2008.

[4] Xie X, Yamaguchi H, Nagai M. Static behaviors of self-anchored and partially earth-anchored long-span cable-stayed bridges[J]. Structural Engineering and Mechanics, 1997, 5 (6): 767.

[5] 山田善一, 饶德宏. 斜张桥的最优参数设计(上)——方法及其应用[J]. 中外公路, 1980(1): 48.

Yoshikazu Yamada, Rao Dehong. The optimal parametric design of cable-stayed bridge—approach and application (Part 1) [J]. Journal of China & Foreign Highway, 1980(1): 48.

[6] 山田善一, 饶德宏. 斜张桥的最优参数设计(续)——方法及其应用[J]. 中外公路, 1980(2): 26.

Yoshikazu Yamada, Rao Dehong. The optimal parametric design of cable-stayed bridge—approach and application (Part 2) [J]. Journal of China & Foreign Highway, 1980(2): 26.

[7] 苏成, 范学明. 斜拉桥施工控制参数灵敏度与可靠度分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 81.

SU Cheng, FAN Xueming. Parameter sensitivity and reliability analysis for construction control of cable-stayed bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10): 81.

[8] 李忠三, 雷俊卿, 颜东煌, 等. 大跨度混合梁斜拉桥参数敏感性分析[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(1): 6.