

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.068

引用格式:柴生波,张瑞琳,王秀兰,等.多塔斜拉桥主跨交叉索设置方式研究[J].重庆大学学报,2025,48(3):
121-132.



多塔斜拉桥主跨交叉索设置方式研究

柴生波¹,张瑞琳¹,王秀兰¹,郭 昆²

(1. 西安科技大学 土木工程学院,西安 710054; 2. 中建三局集团有限公司,西安 710000)

摘要:为了提高多塔斜拉桥的结构刚度,提出了一种新型的主跨交叉索布置方式。通过分析交叉索对中塔的约束刚度公式,研究了约束刚度最大时,交叉索的设置位置,提出了主跨交叉索的非对称布置方式。建立三塔、四塔斜拉桥有限元模型,考虑拉索的垂度效应及结构大位移效应,分析了交叉索非对称布置对塔、梁变形及桥塔受力的影响。结果表明,当多塔斜拉桥的高跨比位于0.2~0.3之间,主跨交叉索距中塔的距离为0.7~0.76倍的跨长时,对中塔的约束刚度最大;在均布荷载作用下,与对称布置相比,三塔、四塔斜拉桥采用交叉索非对称布置时,中塔的塔顶水平位移分别减小10.8%、11.9%,加载跨的最大下挠减小3.3%、0.2%,主梁的一阶竖弯频率增大3.5%、6.4%,中塔的塔底弯矩减小14.1%、8.1%。非对称布置可明显提高交叉索对中塔的约束,增大结构刚度、改善中塔受力。

关键词:斜拉桥;多塔;交叉索;布置方式;约束刚度

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)03-121-12

Research on the arrangement of crossed cables for the main span of multi-tower cable-stayed bridges

CHAI Shengbo¹, ZHANG Ruilin¹, WANG Xiulan¹, GUO Kun²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P. R. China; 2. China Construction Third Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 710000, P. R. China)

Abstract: To improve the structural rigidity of multi-tower cable-stayed bridges, a novel crossed cable arrangement is proposed. By deriving and analyzing the restraint stiffness formula of the middle tower's crossed cables, the optimal position for maximum restraining stiffness was investigated, leading to the proposal of an asymmetrical cable arrangement. Finite element models of three-tower and four-tower cable-stayed bridges were established, accounting for cable sag effects and large structural displacements. The influence of the asymmetrical cable arrangement on tower-beam deformation and tower forces was analyzed. Results show that when the height-to-span ratio of the multi-tower cable-stayed bridge ranges from 0.2 to 0.3, the optimal position for the crossed cables is approximately 0.7 to 0.76 times the span length from the middle tower. Compared to the traditional

收稿日期:2022-01-21 网络出版日期:2022-06-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178166);青海省自然科学基金资助项目(2019-ZJ-7056)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52178166), and Natural Science Foundation of Qinghai Province (2019-ZJ-7056).

作者简介:柴生波(1983—),男,副教授,博士,主要从事大跨度桥梁结构研究,(E-mail) csbtc@163.com。

通信作者:王秀兰,女,(E-mail) wxl2011wzl@163.com。

symmetrical arrangement, the asymmetrical configuration reduces the horizontal displacement at the top of the middle tower by 10.8% and 11.9%, and decreases the mid-span deflection under uniform load by 3.3% and 0.2% for the three-tower and four-tower cable-stayed bridges, respectively. Additionally, the first-order vertical bending frequency of the main girder increases by 3.5% and 6.4%, while the bottom bending moment of the middle tower decreases by 14.1% and 8.1%. These findings demonstrate that the asymmetrical arrangement significantly improves the restraining effect of crossed cables on the middle tower, increases overall structural rigidity, and improves the load-bearing performance of the middle tower.

Keywords: cable-stayed bridge; multi-tower; crossed cable; arrangement; restraint stiffness

近年来,大跨度桥梁的建设日新月异,桥梁跨越能力不断提高,多塔斜拉桥在大跨度桥梁中是一种竞争力较强的结构方案^[1]。但多塔斜拉桥的中塔缺少锚索的有效约束,结构刚度远小于两塔斜拉桥,汽车荷载作用下的塔梁变形较大。主跨设置交叉索能有效提高多塔斜拉桥的刚度,昆斯费里大桥首次采用了这一技术方案^[2]。交叉索方案与增大塔梁刚度等传统方案相比,避免了建造大型基础^[3],且具有良好的抗震性能^[4]。现有的交叉索方案将交叉索对称设置于主跨的跨中位置^[5-6],该设置方式未经过严格的理论验证,其合理性尚待研究。

多塔斜拉桥设置交叉索后,当中塔顶部受到顺桥向的不平衡力作用时,梁重在交叉索中重新分配,为中塔提供了有效的纵向约束^[7]。在交叉索多塔斜拉桥的理论研究方面,柴生波等^[8]推导了交叉索对中塔的纵向约束刚度公式,提出了结构变形的简化计算方法。邬晓光等^[9]考虑桥塔及主梁刚度的影响,基于变形协调原理,推导了交叉索多塔斜拉桥的中塔抗推刚度公式。研究表明,交叉索的设置位置、角度及交叉区域等布置参数影响交叉索对中塔的约束作用。通过对塔梁刚度进行参数分析,昆斯费里大桥在主跨设置了6对交叉索^[10],在建的安九铁路长江大桥在主跨设置了7对交叉索^[11],交叉索均采用跨中对称布置。Arellano等^[12]基于交叉索的作用机理,在交叉拉索承担相同梁重的条件下,通过遗传算法优化了对称布置的交叉索区域长度。为了优化昆斯费里大桥的拉索用钢量,Baldomir^[13]和 Clid等^[14]都对交叉索进行了参数优化,但研究均是针对特定的桥梁进行优化分析,其优化结论对其他桥梁的适用性尚不明确。

综上所述,设置交叉索可提高结构刚度、改善结构性能。但已有研究均采用交叉索的跨中对称布置,且无法证明此种布置为最优布置。文中通过分析交叉索对中塔的约束刚度公式,研究了交叉索设置位置对其约束刚度的影响;以提高交叉索约束刚度、改善结构受力为目标,提出了新的交叉索布置方式,通过数值分析证明了新型交叉索布置方式的有效性。

1 交叉索的约束刚度分析

交叉索可为桥塔提供有效约束,其约束效果受交叉索布置参数的影响。以下从提高交叉索约束刚度的角度出发,分析设置位置对交叉索约束刚度的影响规律。研究基于以下基本假定:1)在主梁上同一位置锚固的两根交叉索,其横截面积相等;2)主梁与桥塔之间设置有效的纵向约束,塔梁之间无相对纵向位移;3)荷载引起的结构变形较小,不考虑结构大位移效应。

为研究交叉索对中塔的约束刚度,文献[15]建立了单对交叉索的简化力学模型图,推导了交叉索的约束刚度公式。如图1所示,当中塔顶部受到不平衡力 F 作用时,设有交叉索的斜拉桥主跨将发生变形。图1中 L 、 H 分别为主跨的长度、主梁以上的桥塔高度; l_1 、 l_r 分别为来自左侧桥塔和右侧桥塔的拉索长度; A_1 、 A_r 为左、右索的横截面积; a_1 、 a_r 为交叉索锚固位置距左、右桥塔的距离。

单对交叉索对桥塔的约束刚度为^[15]:

$$k = \frac{Ea_r^2}{l_1^3/A_1 + l_r^3/A_r} \quad (1)$$

当左、右两侧交叉拉索的横截面积相同时(即 $A_1=A_r=A$),式(1)可简化为

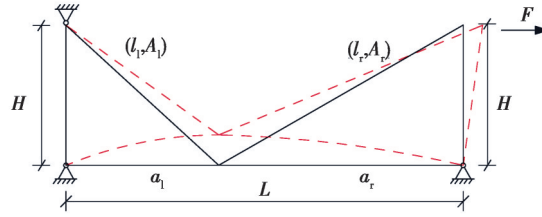


图1 交叉索变形示意

Fig. 1 Deformation of crossed cables

$$k = \frac{EAa_r^2}{l_1^3 + l_r^3} \quad (2)$$

根据几何关系,交叉拉索的长度 l_1 、 l_r 可表示为

$$l_1 = \sqrt{H^2 + (L - a_r)^2} \quad (3)$$

$$l_r = \sqrt{H^2 + a_r^2} \quad (4)$$

将式(3)(4)代入到式(2)中,得到 k 关于 a_r 的数学表达式:

$$k = \frac{EAa_r^2}{[H^2 + (L - a_r)^2]^{3/2} + [H^2 + a_r^2]^{3/2}} \quad (5)$$

求解 k 关于 a_r 的导数 k' :

$$k'(a_r) = \frac{EAa_r \{ [2(H^2 + L^2) - a_r(L + a_r)] [H^2 + (L - a_r)^2]^{1/2} + (2H^2 - a_r^2)(H^2 + a_r^2)^{1/2} \}}{\{ [H^2 + (L - a_r)^2]^{3/2} + [H^2 + a_r^2]^{3/2} \}^2} \quad (6)$$

由于 $0 < a_r < L$,式(6)中:

$$E \frac{EAa_r}{\{ [H^2 + (L - a_r)^2]^{3/2} + [H^2 + a_r^2]^{3/2} \}^2} > 0, a_r \in (0, L); \quad (7)$$

令式(6)中:

$$F(a_r) = [2(H^2 + L^2) - a_r(L + a_r)] [H^2 + (L - a_r)^2]^{1/2} + (2H^2 - a_r^2)(H^2 + a_r^2)^{1/2} \quad (8)$$

联合式(6)(7)(8),可得到以下关系:

$$\begin{cases} F(a_r) > 0 \Leftrightarrow k'(a_r) > 0, \\ F(a_r) = 0 \Leftrightarrow k'(a_r) = 0, \\ F(a_r) < 0 \Leftrightarrow k'(a_r) < 0, \end{cases} a_r \in (0, L) \quad (9)$$

再通过求解 $F(a_r)$ 的正负及零点来判断 k' 的取值。

已建成的多塔斜拉桥的高跨比位于0.2~0.35之间,如表1所示,即 $L \in (2.9H, 5H)$ 。当 $a_r \in (0, \sqrt{2}H)$ 时,式(8)中各项存在以下不等式关系:

$$a_r \in (0, \sqrt{2}H), \text{恒成立} \begin{cases} (2(H^2 + L^2) - a_r(L + a_r)) > 0 \\ [H^2 + (L - a_r)^2]^{1/2} > 0 \\ (2H^2 - a_r^2) > 0 \\ (H^2 + a_r^2)^{1/2} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知, $a_r \in (0, \sqrt{2}H)$ 时, $F(a_r) > 0$ 恒成立。

当 $a_r \in [\sqrt{2}H, L)$ 时,且 $L \in (2.9H, 5H)$ 时, $F(a_r)$ 存在以下关系:

$$\text{恒成立} \begin{cases} F(\sqrt{2}H) = L(2L - \sqrt{2}H) [H^2 + (L - \sqrt{2}H)^2]^{1/2} > 0, \\ F(L) = EAL [2H^3 - (L^2 - 2H^2)(H^2 + L^2)^{1/2}] < EAH L(4H^2 - L^2) < 0. \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知, $F(a_r)$ 在 $[\sqrt{2}H, L)$ 上存在零点。当 $a_r \in [\sqrt{2}H, L)$ 时, $F(a_r)$ 的导数满足:

$$F'(a_r) = \left\{ \begin{array}{l} -(2a_r + L)[H^2 + (L - a_r)^2]^{1/2} - \frac{(L - a_r)[2(H^2 + L^2) - a_r(L + a_r)]}{[H^2 + (L - a_r)^2]^{1/2}} \\ -2a_r(H^2 + a_r^2)^{1/2} - \frac{a_r(a_r^2 - 2H^2)}{(H^2 + a_r^2)^{1/2}} \end{array} \right\} < 0. \quad (12)$$

由式(12)可知, $F(a_r)$ 在 $[\sqrt{2}H, L)$ 上单调递减, 因此, $F(a_r)$ 在 $[\sqrt{2}H, L)$ 上仅存在1个零点。假设, 零点为 a_0 , 联合式(11)(12)可得:

$$F(a_r) \begin{cases} > 0, & a_r \in [\sqrt{2}H, a_0); \\ = 0, & a_r = a_0; \\ < 0, & a_r \in (a_0, L)。 \end{cases} \quad (13)$$

因为 $F(a_r)$ 、 $k'(a_r)$ 在 $(0, L)$ 上为连续函数, 联合式(9)(10)和(13)可得:

$$k'(a_r) \begin{cases} > 0, & a_r \in (0, a_0); \\ = 0, & a_r = a_0; \\ < 0, & a_r \in (a_0, L)。 \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可知, k 在 $(0, L)$ 上仅存在1个极值点 a_0 , 且 $k(a_0)$ 为极大值。以下对 a_0 的值进行求解:

当 k 取得极大值时, k 的导数 k' 为0, 即 $F(a_r)$ 为0。令 $H/L=\alpha$, $a_r/L=\beta$, 当式(8)等于0时, 可得:

$$[2(\alpha^2 + 1) - \beta(1 + \beta)][\alpha^2 + (1 - \beta)^2]^{1/2} = (\beta^2 - 2\alpha^2)(\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}, \quad (15)$$

由式(15)可得:

$$\alpha = \pm \sqrt{\frac{2\beta^3 + 3\beta^2 - 8\beta + 4}{8(\beta - 1)}} \pm \sqrt{\frac{12\beta^6 - 60\beta^5 + 91\beta^4 - 16\beta^3 - 72\beta^2 + 64\beta - 16}{192(1 - \beta)^2}}, \quad (16)$$

由 $\alpha > 0$ 、 $0 < \beta < 1$, 且式(16)根式内部大于0, 可判断 α 与 β 的函数关系为

$$\alpha = \left\{ \frac{2\beta^3 + 3\beta^2 - 8\beta + 4}{8(\beta - 1)} + \left[\frac{12\beta^6 - 60\beta^5 + 91\beta^4 - 16\beta^3 - 72\beta^2 + 64\beta - 16}{192(1 - \beta)^2} \right]^{1/2} \right\}^{1/2}. \quad (17)$$

由式(17)可知, 交叉索的约束刚度取得极大值时, 其设置位置到中塔的距离 a_0 可由高跨比 α 确定。依据式(17), 将 a_0/L 与高跨比 α 的对应关系如图2所示。由图2可知, 当斜拉桥的高跨比确定时, a_0/L 的值可以唯一确定。表2列出高跨比在0.2~0.3之间时, a_0/L 的取值。

表1 多塔斜拉桥高跨比

Table 1 Height-span ratio of multi-tower cable-stayed bridges at home and abroad

桥名	国家	塔数	桥面以上塔高/m	主跨长度/m	高跨比
米约高架桥	法国	7	90	342	0.26
嘉绍大桥	中国	6	132	428	0.31
郑州黄河公铁两用大桥	中国	6	37	168	0.22
赤石大桥	中国	4	104	380	0.27
里翁-安提利翁大桥	希腊	4	113	560	0.20
马拉开波大桥	委内瑞拉	3	46	235	0.20
波尔维拉高架桥	意大利	3	55.2	210	0.26
梅斯卡拉大桥	墨西哥	3	67	312	0.21
香港汀九大桥	中国	3	130	448	0.29
洞庭湖大桥	中国	3	73	310	0.24
夷陵长江大桥	中国	3	93	348	0.27
滨州黄河大桥	中国	3	101	300	0.34
武汉二七长江大桥	中国	3	163	616	0.27

表 2 a_0/L 取值
Table 2 The value of maximum point a_0

高跨比 H/L	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3
a_0/L	0.707	0.712	0.716	0.721	0.726	0.731	0.736	0.742	0.747	0.753	0.760

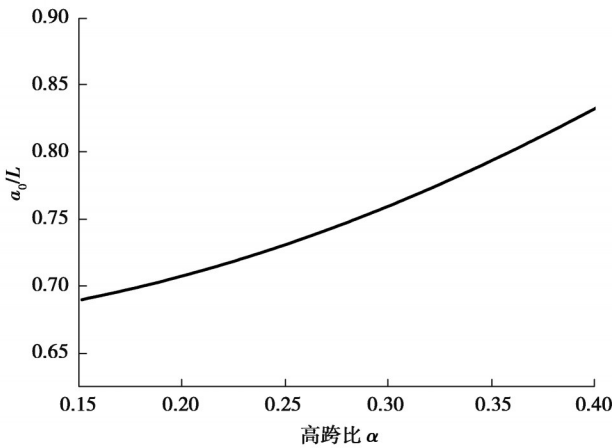


图 2 a_0/L 与高跨比 α 的函数关系

Fig. 2 Function relationship between a_0/L and height-span ratio α

由分析可知,当相互交叉的拉索面积相等时,交叉索对中塔的约束刚度 k 存在 1 个极大值。当交叉索距中塔的距离 $a_i \in (0, a_0)$ 时, k 随 a_i 的增大而增大;当 $a_i \in (a_0, L)$ 时, k 随 a_i 的增大而减小,且在 a_0 处取得最大值。 a_0 的取值与斜拉桥的高跨比有关。由表 2 可知,斜拉桥的高跨比在 0.2~0.3 之间时,主跨交叉索设置在距中塔 0.7~0.76 倍的跨长之间,对中塔的约束刚度最大。

2 交叉索布置优化

根据交叉索的约束刚度分析,主跨交叉索距中塔的距离为 a_0 时,其对中塔的约束刚度最大。如图 3 所示,交叉索设置在 x_0 处约束刚度最大。但现有的交叉索布置将交叉索对称设置于主跨中央,靠近中塔的交叉索距 x_0 较远,对中塔的约束效果较差。如图 4 所示,为提高交叉索对中塔的约束刚度,提出将交叉索设置于 x_0 附近的非对称布置。以某交叉索三塔斜拉桥的单个边跨、主跨为例,简述交叉索的对称布置及非对称布置。

1)交叉索对称布置

现有的交叉索对称布置如图 3 所示,交叉索由边塔拉索 $l_1 \sim l_6$ 与中塔拉索 $r_6 \sim r_1$ 交叉形成,关于主跨中心对称。在对称布置的交叉索中,编号为 (l_1, r_6) 、 (l_2, r_5) 、 (l_3, r_4) 的交叉索距离 x_0 较远,对中塔的约束刚度较小。

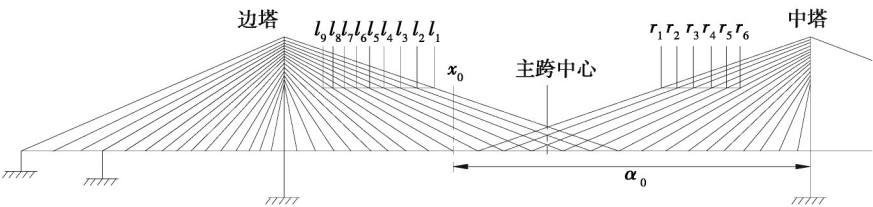


图 3 交叉索对称布置

Fig. 3 The symmetrical arrangement of crossed cables on main span

2)交叉索非对称布置

交叉索的非对称布置如图 4 所示,交叉索由边塔拉索 $i_1 \sim i_6$ 与中塔拉索 $j_6 \sim j_1$ 交叉形成,分布在约束刚度最大的位置 x_0 附近,交叉区域位于主跨靠近边塔的一侧。

与对称布置相比,非对称布置将交叉索设置在约束刚度最大的位置附近,提高了交叉索对中塔的约束刚度。

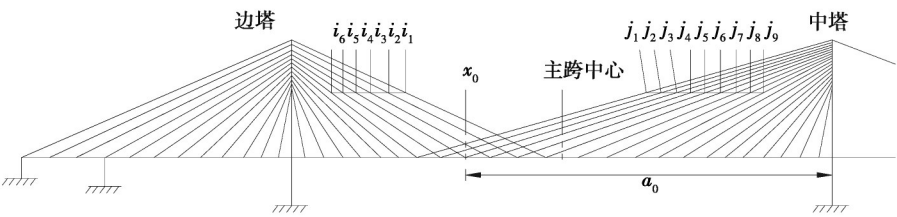


图 4 交叉索非对称布置

Fig. 4 The asymmetrical arrangement of crossed cables on main span

3 有限元分析

为证明文中提出的非对称布置方式可提高交叉索对中塔的约束刚度,研究交叉索布置方式对多塔斜拉桥力学性能的影响,建立三塔、四塔斜拉桥有限元模型,与对称布置对比,分析交叉索非对称布置对塔梁变形、动力特性和桥塔内力的影响。

3.1 模型参数

3.1.1 无交叉索方案

参照昆斯费里大桥的设计,拟定不设交叉索的三塔、四塔斜拉桥结构参数。三塔斜拉桥的跨径布置采用 325 m+2×650 m+325 m,四塔斜拉桥的跨径布置为 325 m+3×650 m+325 m,立面布置细节如图 5 所示。主梁为钢箱梁,横断面布置如图 6 所示,其顶板、斜腹板及底板的 U 型加劲肋厚度分别为 8 mm、6 mm、6 mm。桥塔为变截面独塔形式,塔高为 200 m,塔底、塔顶的截面尺寸如图 7 所示。主梁、桥塔和辅助墩的截面及材料特性如表 3 所示。每个主跨设置 21 对斜拉索,采用双索面,主梁及桥塔的索距如表 4 所示。单根斜拉索的面积为 0.011 m²,抗拉强度为 1 860 MPa,弹性模量为 195 GPa。塔梁约束方式采用(漂浮+中塔纵向约束索)体系,梁端及辅助墩仅约束竖向。中塔处设置 2 根关于中塔对称的塔梁纵向约束索,其横截面积为 0.011 m²、长度为 8 m。

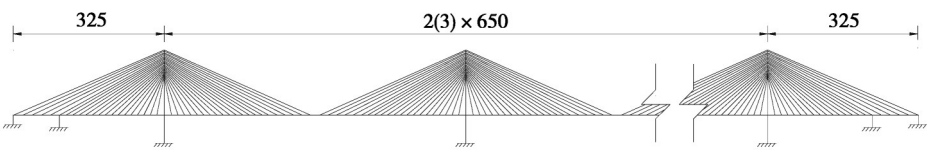


图 5 不设交叉索的三塔、四塔斜拉桥立面布置(m)

Fig. 5 Side view of cable-stayed bridge with three or four towers(m)

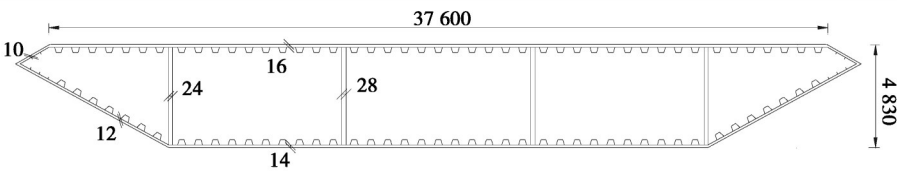


图 6 主梁横断面(mm)

Fig. 6 Cross-section of girder(mm)

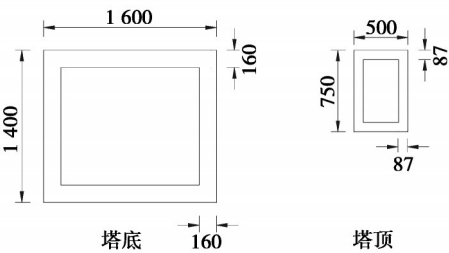


图 7 桥塔塔顶、塔底截面(cm)

Fig. 7 Cross-section of the top and bottom of the tower(cm)

表 3 结构特性说明
Table 3 Structural characteristics

构件名称	材料名称	弹性模量/GPa	抗弯惯性矩/m ⁴	高度/m
主梁	Q345 钢材	206.0	9.25	4.83
桥塔	C50 混凝土	34.5	2314(底部)	上塔柱 140,下塔柱 60
辅助墩	C50 混凝土	34.5	388	30

表 4 主梁及桥塔索距
Table 4 Cable spacing parameters of girder and tower m

方案名称	边跨	主跨	边塔	中塔
无交叉索	16+14×15+19.8×5	16+14×15+18×11+14×15+16	2.875×20	2.875×20
交叉索对称布置	16+13×18+15×5	16+14×15+18×11+14×15+16	2.5×23	2.5×23
交叉索非对称布置	16+14×15+19.8×5	16+14×15+18×11+14×15+16	2.875×20	2.5×11+2×15

3.1.2 交叉索方案

基于不设交叉索的三塔、四塔斜拉桥方案,不改变桥塔的高度,通过在主跨上增设斜拉索,形成交叉索的对称布置及非对称布置方案。

1)对称布置方案

如图 8 所示,桥塔两侧的索面各增加 3 根面积为 0.007 m²的斜拉索,主跨设置 6 对关于跨中对称的交叉索。同时,调整主跨上与新增拉索形成交叉的原拉索的面积,由 0.011 m²减小至 0.007 m²,确保交叉索方案与不设交叉索方案的主跨拉索用钢量基本一致。在图 8 中, A_c 代表交叉索的横截面积, A_s 代表边跨增加的单根拉索横截面积。由于交叉索方案与非交叉索方案的跨长及桥塔高度相同,交叉索方案拉索数量的增加导致边跨及桥塔上的拉索锚点增加,对边跨主梁及桥塔的索距进行调整,索距的调整结果如表 4 所示。

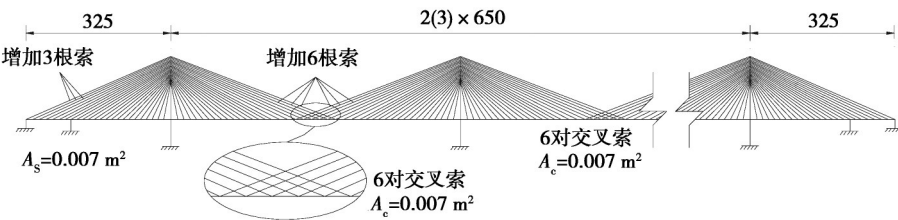


图 8 三塔、四塔斜拉桥的交叉索跨中对称布置(m)

Fig. 8 Symmetrical arrangement of crossed cables about the middle of the main span

2)非对称布置方案

首先,由式(17)确定交叉索约束刚度最大时的设置位置。当主跨长度为 650 m、桥面以上塔高为 140 m 时,斜拉桥的高跨比为 0.215,由式(17)求得 a_0 为 464 m。因此,交叉索的约束刚度最大时,其主跨上的设置位置距中塔的距离为 464 m。其次,为了避免交叉索设置位置之外的因素对结构性能造成影响,与交叉索的对称布置方案相比,非对称布置方案的斜拉索设置遵循以下几个原则:一是主跨的索距、桥塔的高度及锚索区域长度不变;二是主跨的拉索数量、用钢量及交叉索的数量不变;三是交叉索的横截面积相等;四是交叉索分布在约束刚度最大的位置附近。非对称布置的具体设置方案如下:

三塔斜拉桥:中塔两侧各增加 6 根面积为 0.007 m²的斜拉索,增加的拉索与约束刚度最大位置附近的拉索形成 6 对交叉索。同时,调整主跨上与新增拉索形成交叉的原拉索的面积,由 0.011 m²减小至 0.007 m²。如图 9 所示,为使交叉索布置在约束刚度最大的位置附近,交叉索间隔 1 根斜拉索设置。拉索数量的增加导致中塔的拉索锚点增加,需微调中塔索距,索距的调整结果如表 4 所示。

四塔斜拉桥:中塔两侧各增加 6 根斜拉索,次中跨形成 6 对非对称布置的交叉索,中跨形成了 12 对关于跨中对称的交叉索,如图 10 所示。为使主跨的拉索用钢量与对称布置方案基本一致,次中跨交叉索的横截面积为 0.007 m^2 ,中跨交叉索的横截面积 A_c 减小至 0.006 m^2 ,其余斜拉索的横截面积仍为 0.011 m^2 。

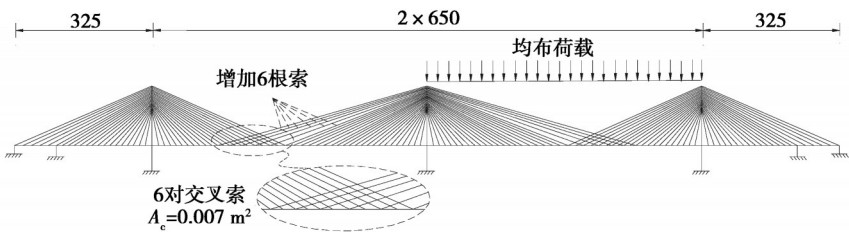


图 9 三塔斜拉桥的交叉索非对称布置 (m)
Fig. 9 The asymmetrical arrangement of the crossed cables of cable-stayed bridge with three towers

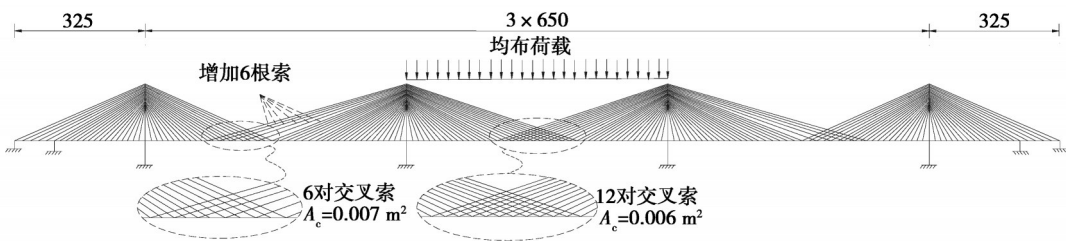


图 10 四塔斜拉桥的交叉索非对称布置 (m)
Fig. 10 The asymmetrical arrangement of the crossed cables of cable-stayed bridge with four towers

3.2 有限元结果

按照斜拉桥的布置方案,采用 Midas/Civil 有限元软件,建立三塔、四塔斜拉桥有限元模型。拉索采用索单元模拟,主梁、桥塔和辅助墩采用梁单元模拟。斜拉桥中跨施加 20 kN/m 、 30 kN/m 、 40 kN/m 的均布荷载,如图 9~图 10 所示。考虑索的垂度效应及结构大位移效应进行非线性计算,求解中塔的塔顶位移、加载跨的最大挠度、主梁竖弯频率及中塔塔底弯矩。

3.2.1 桥塔变形

在均布荷载作用下,三塔斜拉桥中塔的塔顶水平位移如图 11 所示,四塔斜拉桥中塔的塔顶水平位移如图 12 所示。

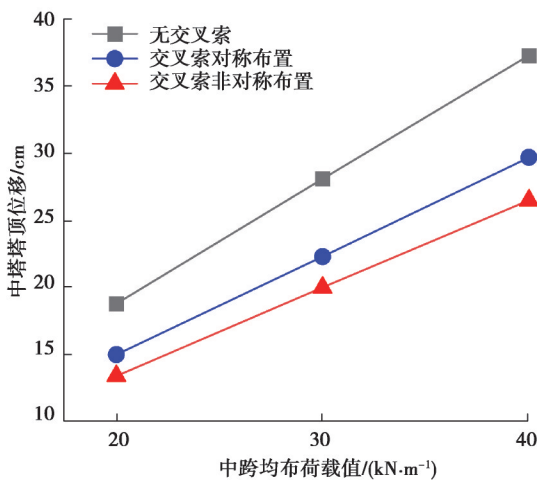


图 11 三塔斜拉桥中塔塔顶位移
Fig. 11 Deformation on the top of middle tower in the cable-stayed bridge with three towers

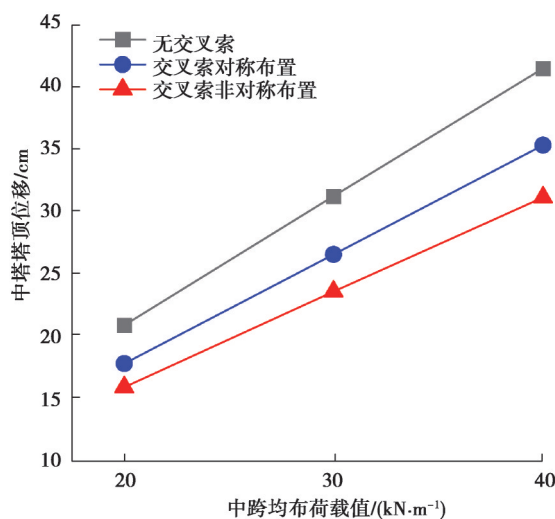


图12 四塔斜拉桥中塔塔顶位移

Fig. 12 Deformation on the top of middle tower in the cable-stayed bridge with four towers

由图可知,多塔斜拉桥主跨设置交叉索后,中塔的塔顶水平位移明显减小,荷载集度与中塔位移呈线性关系。在主跨作用40 kN/m的均布荷载,三塔、四塔斜拉桥未设置交叉索时,中塔的塔顶位移为37.3 cm、41.5 cm;主跨对称布置交叉索时,中塔的塔顶位移为29.7 cm、35.3 cm,相对于不设交叉索时减小了25.6%、14.9%;主跨非对称布置交叉索时,中塔的塔顶位移为26.5 cm、31.1 cm,相对于对称布置又减小了10.8%、11.9%。由此可见,与交叉索的对称布置相比,采用非对称布置可使中塔塔顶的水平位移进一步减小,非对称布置可显著提高交叉索对中塔的约束刚度。

3.2.2 主梁变形

在图9~图10所示的均布荷载作用下,斜拉桥加载跨的最大挠度如图13~图14所示。

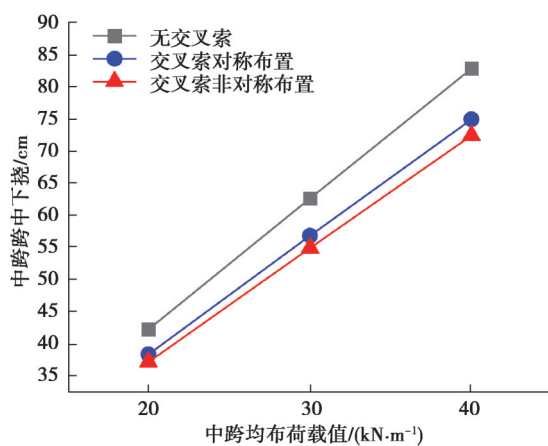


图13 三塔斜拉桥加载跨挠度

Fig. 13 The deflection of the loaded span of the cable-stayed bridge with three towers

由图可知,在均布荷载作用下,多塔斜拉桥主跨设置交叉索,加载跨的最大下挠量显著减小,下挠量与荷载集度基本呈正比。在40 kN/m的均布荷载作用下,不设交叉索的三塔、四塔斜拉桥主跨下挠为82.8、103.1 cm;主跨对称设置交叉索后,下挠量分别为74.9、94.4 cm,下挠量分别减小9.5%、8.4%;当主跨交叉索采用非对称布置时,下挠量相对于对称布置分别减小了3.3%、0.2%。因此,多塔斜拉桥采用交叉索的非对称布置时,主梁的竖向抗弯刚度略大于对称布置。

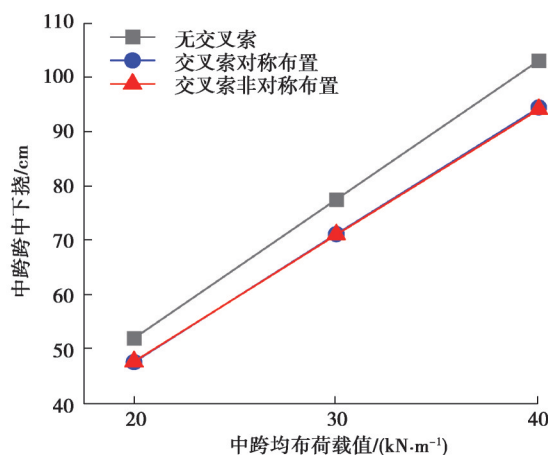


图14 四塔斜拉桥加载跨挠度

Fig. 14 The deflection of the loaded span of the cable-stayed bridge with four towers

3.2.3 动力特性

三塔斜拉桥前三阶振型如图15(a)~(c)所示,四塔斜拉桥前三阶振型如图15(d)~(f)所示,主梁竖弯及桥塔纵弯首次出现在第三阶振型。三塔、四塔斜拉桥第三阶频率如图16所示。

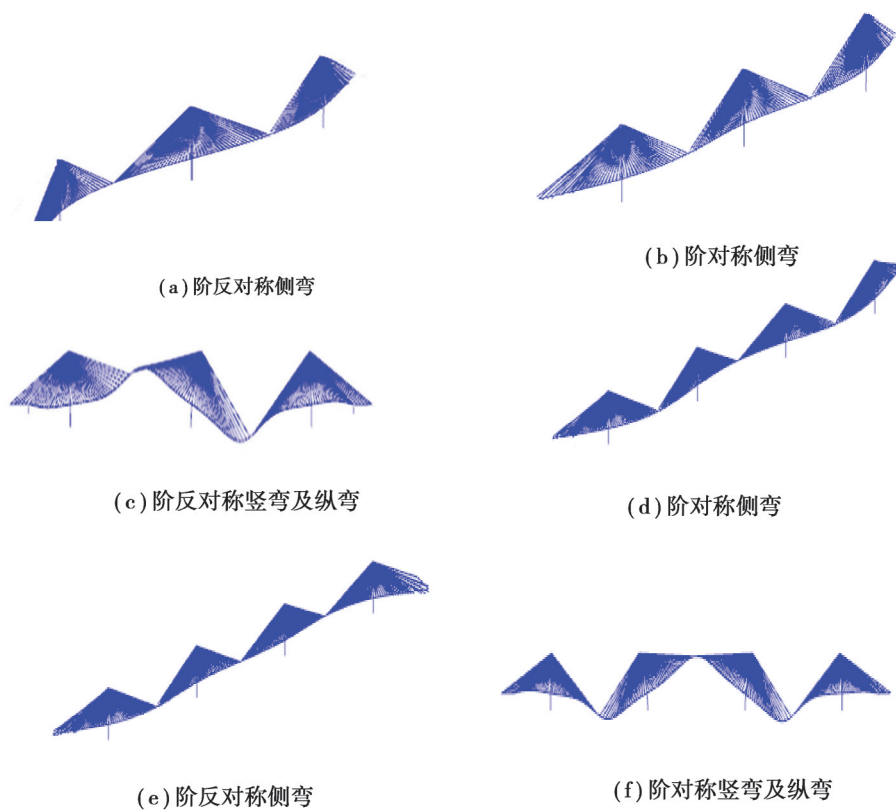


图15 三塔及四塔斜拉桥前三阶振型

Fig. 15 The first three modes of three-tower cable-stayed bridge

由图16可知,主跨设交叉索可增大多塔斜拉桥的主梁竖弯及桥塔纵弯频率,提高结构竖向及纵向刚度。三塔、四塔斜拉桥采用交叉索的对称布置时,第三阶频率为0.284、0.202 Hz,采用非对称布置时其为0.294、0.215 Hz,相对于对称布置增大了3.5%、6.4%。由此可见,与交叉索的对称布置相比,采用非对称布置时,多塔斜拉桥的纵向及竖向刚度将进一步增大。

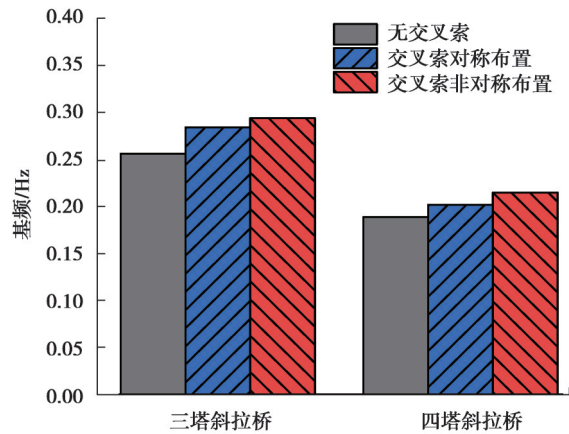


图 16 斜拉桥第三阶频率(Hz)

Fig. 16 Third-order fundamental frequency of cable-stayed bridge

3.2.4 塔底弯矩

在图 9~图 10 所示的均布荷载作用下,斜拉桥中塔的塔底弯矩如图 17~图 18 所示。

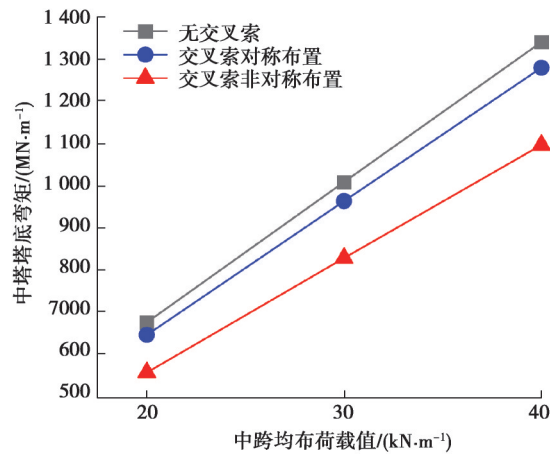


图 17 三塔斜拉桥中塔塔底弯矩

Fig. 17 Bending moment at the bottom of the middle tower of the cable-stayed bridge with three towers

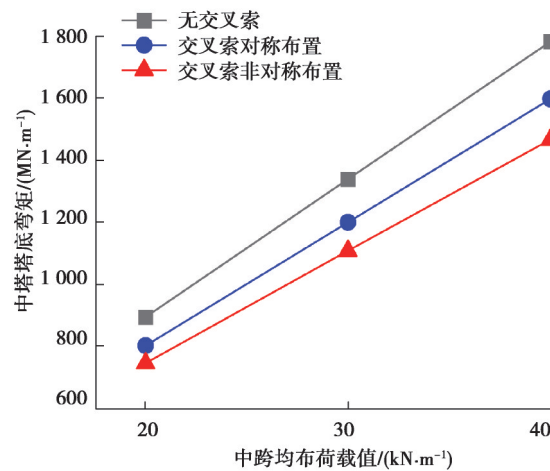


图 18 四塔斜拉桥中塔塔底弯矩

Fig. 18 Bending moment at the bottom of the middle tower of the cable-stayed bridge with four towers

如图 17~图 18 所示,在 40 kN/m 的均布荷载作用下,未设交叉索的三塔、四塔斜拉桥中塔塔底弯矩为 1 340 MN·m、1 785 MN·m;采用交叉索的对称布置时,三塔、四塔斜拉桥中塔的塔底弯矩为 1 280 MN·m、

1 600 MN·m,采用非对称布置时其为1 100 MN·m、1 470 MN·m,相对于对称布置减小了14.1%、8.1%。多塔斜拉桥主跨设置交叉索,可显著减小中塔的塔底弯矩,采用交叉索的非对称布置时,中塔的塔底弯矩最小。

4 结 论

文中基于交叉拉索横截面积相等的条件,推导了交叉索约束刚度最大时在主跨上的锚固位置,得出以下结论:

- 1) 主跨交叉索约束刚度最大的锚固位置与斜拉桥的高跨比有关。斜拉桥主跨的长度一定时,该位置距中塔的距离随着塔高的增大而增大。
- 2) 当斜拉桥的高跨比位于0.2~0.3之间,主跨交叉索对中塔的约束刚度达到最大时,其锚点距中塔的距离为跨长的0.7~0.76倍。据此,提出了交叉索的非对称布置方式。
- 3) 与交叉索的对称布置相比,文中提出的非对称布置方式可明显减小三塔、四塔斜拉桥中塔的塔顶位移及塔底弯矩,增大结构的抗弯频率,提升结构刚度。

参考文献

- [1] 肖汝诚,姜洋,项海帆. 缆索承重桥的体系比选[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 179-185, 207.
Xiao R C, Jiang Y, Xiang H F. Comparison between structural systems of cable supported bridges[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(2): 179-185, 207. (in Chinese)
- [2] Carter M, Kite S, Hussain N, et al. Design of the forth replacement crossing, Scotland[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 2010, 163(2): 91-99.
- [3] Kite S, Hussain N, Carter M. Forth replacement crossing - Scotland, UK[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 1480-1484.
- [4] Samim F, Nakamura S. Static and seismic characteristics of cable-stayed bridges with new stay systems[C]//IABSE Reports. September 23-25, 2015. Geneva, Switzerland. International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2015: 1805-1812.
- [5] 宁伯伟. 新建安九铁路鳊鱼洲长江大桥主航道桥设计方案研究[J]. 世界桥梁, 2018, 46(5): 1-6.
Ning B W. Study of design schemes for main navigational channel bridge of bianyouzhou Changjiang River bridge on newly-built Anqing-Jiujiang railway[J]. World Bridges, 2018, 46(5): 1-6. (in Chinese)
- [6] Hussain N, Hornby R, Minto B, et al. Queensferry Crossing, UK: scheme, specimen and definition designs[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 2019, 172(2): 92-112.
- [7] Gimsing N J, Georgakis C T. Cable supported bridges concept and design [M]. 3td ed. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [8] Chai S B, Wang X L. Simplified calculation method for deformation of multi-tower cable-stayed bridges with crossed cables [J]. Engineering Structures, 2019, 181: 354-361.
- [9] 邬晓光,姚思思,陈恒大,等. 考虑塔梁影响的交叉索多塔斜拉桥中塔抗推刚度估算公式[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(4): 577-584.
Wu X G, Yao S S, Chen H D, et al. Estimation formula for longitudinal restraint stiffness of the middle tower of multi-tower cable-stayed bridge with crossed cables by considering the effect of tower and beam[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(4): 577-584. (in Chinese)
- [10] Curran P, Platt A, Vazquez A, et al. Queensferry crossing, UK: cable-stayed bridge deck and cables - design and construction [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 2019, 172(2): 135-144.
- [11] 张巨生,宁伯伟. 新建安九铁路长江大桥主航道桥设计[J]. 桥梁建设, 2018, 48(2): 77-82.
Zhang J S, Ning B W. Design of main ship channel bridge of Changjiang River bridge on newly built Anqing-Jiujiang railway [J]. Bridge Construction, 2018, 48(2): 77-82. (in Chinese)
- [12] Arellano H, Tolentino D, Gómez R. Optimum criss crossing cables in multi-span cable-stayed bridges using genetic algorithms [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(2): 719-728.
- [13] Baldomir A, Tembrás E, Hernández S. Optimization of cable weight in multi-span cable-stayed bridges. Application to the Forth Replacement Crossing[M]//Multi-Span Large Bridges. Los Angeles: CRC Press, 2015: 511-518.
- [14] Cid C, Baldomir A, Hernández S. Optimum crossing cable system in multi-span cable-stayed bridges[J]. Engineering Structures, 2018, 160: 342-355.
- [15] 柴生波,肖汝诚,王秀兰. 多塔斜拉桥交叉索的纵向约束刚度[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 119-124.
Chai S B, Xiao R C, Wang X L. Longitudinal restraint stiffness of crossed cables in multi-tower cable-stayed bridge[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 119-124. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)