

基于正交试验的高铁混合梁部分斜拉桥设计参数优化研究

王宇心, 袁帅华

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年3月23日; 录用日期: 2025年4月14日; 发布日期: 2025年4月25日

摘 要

依托实际的工程背景并结合Midas Civil有限元软件, 选取4组不同的设计参数(主塔无索区高度、塔旁无索区长度、中跨及边跨无索区长度、主梁截面刚度)进行模拟计算, 再依据参数分析结果确定正交试验因素和水平, 设计正交试验方案并制定试验表, 最后找出各指标的主次因素并选取最合理方案。研究结果表明: 中跨及边跨无索区长度为主梁中跨最大挠度 f_1 、最大弯矩 W_1 、边跨最大正弯矩 W_2 及次边跨最大挠度 f_2 的主要因素; 塔旁无索区长度为主梁墩顶中跨侧 W_3 及边跨侧 W_4 弯矩的主要因素; 主梁刚度比为 f_1 、 f_2 、 W_3 及 W_4 的次要因素。最终选取最优的因素水平方案为主塔无索区高度36 m、塔旁无索区长度38 m、中跨无索区长度与中跨比0.106、主梁截面刚度比1.2。本研究基于正交试验对高铁混合梁部分斜拉桥进行设计参数优化, 为同类型桥梁提供参考依据。

关键词

高铁, 部分斜拉桥, 正交试验, 参数分析

Research on the Optimization of Design Parameters of Partially Cable-Stayed Bridges with Hybrid Girders for High-Speed Railways Based on Orthogonal Test

Yuxin Wang, Shuaihua Yuan

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Mar. 23rd, 2025; accepted: Apr. 14th, 2025; published: Apr. 25th, 2025

文章引用: 王宇心, 袁帅华. 基于正交试验的高铁混合梁部分斜拉桥设计参数优化研究[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 842-849. DOI: 10.12677/hjce.2025.144091

Abstract

Relying on the actual engineering background and combining with the Midas Civil finite element software, four groups of different design parameters (the height of the cable-free zone of the main tower, the length of the cable-free zone beside the tower, the length of the cable-free zone in the middle span and the side span, and the stiffness of the main girder section) are selected for simulation calculations. Then, according to the results of the parameter analysis, the factors and levels of the orthogonal test are determined, an orthogonal test scheme is designed, and a test table is formulated. Finally, the primary and secondary factors of each index are identified, and the most reasonable scheme is selected. The research results show that the length of the cable-free zone in the middle span and the side span is the main factor for the maximum deflection of the middle span of the main girder (f_1), the maximum bending moment (W_1), the maximum positive bending moment of the side span (W_2), and the maximum deflection of the secondary side span (f_2). The length of the cable-free zone beside the tower is the main factor for the bending moments on the middle span side (W_3) and the side span side (W_4) at the pier top of the main girder. The stiffness ratio of the main girder is a secondary factor of $f_1 \setminus f_2 \setminus W_3 \setminus W_4$. Finally, the optimal factor level scheme is selected as follows: the height of the cable-free zone of the main tower is 36 m, the length of the cable-free zone beside the tower is 38 m, the ratio of the length of the cable-free zone in the middle span to the middle span is 0.106, and the stiffness ratio of the main girder section is 1.2. This study optimizes the design parameters of the partially cable-stayed bridge with hybrid girders for high-speed railways based on the orthogonal test, providing a reference for bridges of the same type.

Keywords

High-Speed Railway, Partially Cable-Stayed Bridge, Orthogonal Test, Parameter Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混合梁部分斜拉桥是一种采用了混合梁构造形式并结合了连续梁桥和传统斜拉桥特点的组合体系桥梁[1]。针对此类桥梁,混凝土自重较大的结构在设计时通常会将其设置在边跨部位,如此一来,能够极为有效地提升桥梁整体的抗压性能,既能满足全桥的受力情况还能降低施工成本。在全桥的主梁部分一般中跨位置会采用混合梁作为首选,从而提升桥梁的跨越能力,这也是混合梁斜拉桥建设发展起来的主要原因之一。混合梁的参与不仅提升了桥梁的整体跨越能力,还结合了其自身的优势大大提升结构的力学性能[2]。

当前,桥梁工程领域的参数分析研究主要集中在连续梁桥或传统斜拉桥结构,且研究对象多为公路桥梁体系;高铁混合梁部分斜拉桥作为一种新型桥梁结构形式,由于结构所承受的荷载工况复杂,且对结构的变形和线形控制要求极为严格,因此其设计参数的合理选取对桥梁的整体性能具有显著影响。本文以国内修建完的实际工程案例作为研究背景,建立有限元模型,通过对不同设计参数模型的计算分析,再基于正交试验找出影响主梁结构的主次因素,最后选取较为合理的方案。

2. 工程概况

国内某高铁混合梁部分斜拉桥为(40.75 + 109 + 320 + 109 + 40.75) m 双塔双索面钢-混凝土部分斜拉桥

(图 1), 大里程与小里程两侧衔接简支梁。斜拉桥采用半漂浮体系, 固定支座设置在 3 号塔。主梁混凝土箱梁采用悬臂灌注的施工方法, 钢箱梁采用吊装拼接安装; 桥塔为 118 m H 型钢筋混凝土塔, 实体采用矩形截面; 斜拉索采用单丝涂覆环氧涂层钢绞线, 其拉索的布置为双索面扇形, 全桥设置 13 对 52 组拉索。

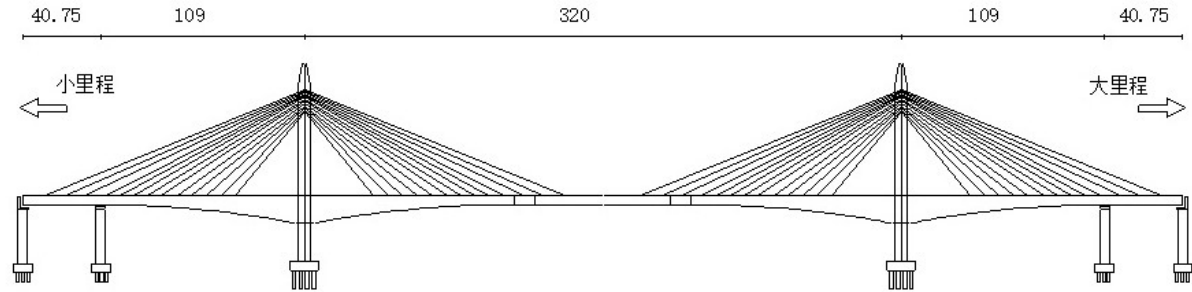


Figure 1. General arrangement of high-speed railway hybrid beam extradosed bridge (unit: m)
图 1. 高铁混合梁部分斜拉桥总体布置图(单位: m)

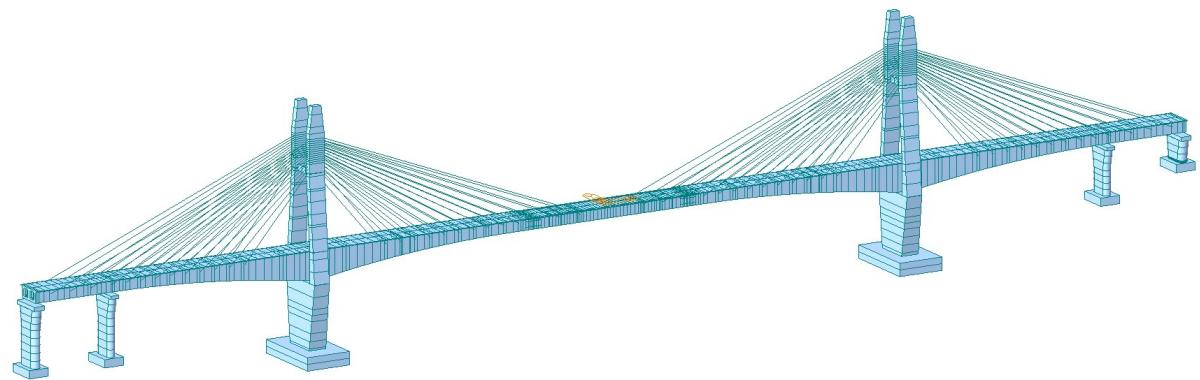


Figure 2. Finite element model
图 2. 有限元模型

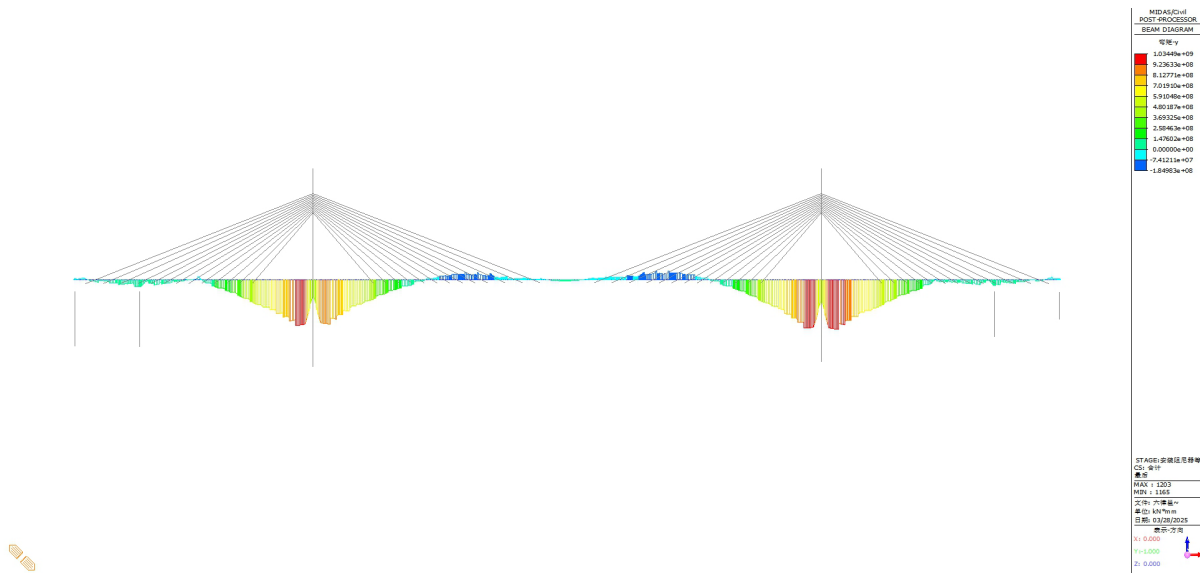


Figure 3. Bending moment diagram of the main beam (unit: kN-m)
图 3. 主梁弯矩图(单位: kN-m)

全桥杆系模型建立: 有限元的模型建立中采用的是梁单元模拟两种不同材料和截面的主梁、桥塔和墩, 对于斜拉索的模拟则采用只考虑受拉作用的桁架单元。对主梁、主塔和墩采用的是一般梁单元和变截面梁单元来进行模拟; 针对混合梁中的钢锚箱和钢锚梁等部位, 采用的是刚度及重量等效换算的方法进行简化模拟, 从而使得计算模型的受力分析与实际尽可能符合。全桥整体划分为 692 个节点、705 个单元(图 2), 计算结果受力分析如图 3~4 所示。边界条件模拟: 此斜拉桥的结构体系为塔墩固结体系。左墩为固定支座、右墩为活动支座; 主梁与斜拉索采用弹性连接中的刚性连接, 主塔与斜拉索的连接方式亦是如此; 0#块的节点和墩顶设置分别为主节点和从属节点; 主墩、辅助墩、边墩底部采用约束 6 个自由度的一般支撑。

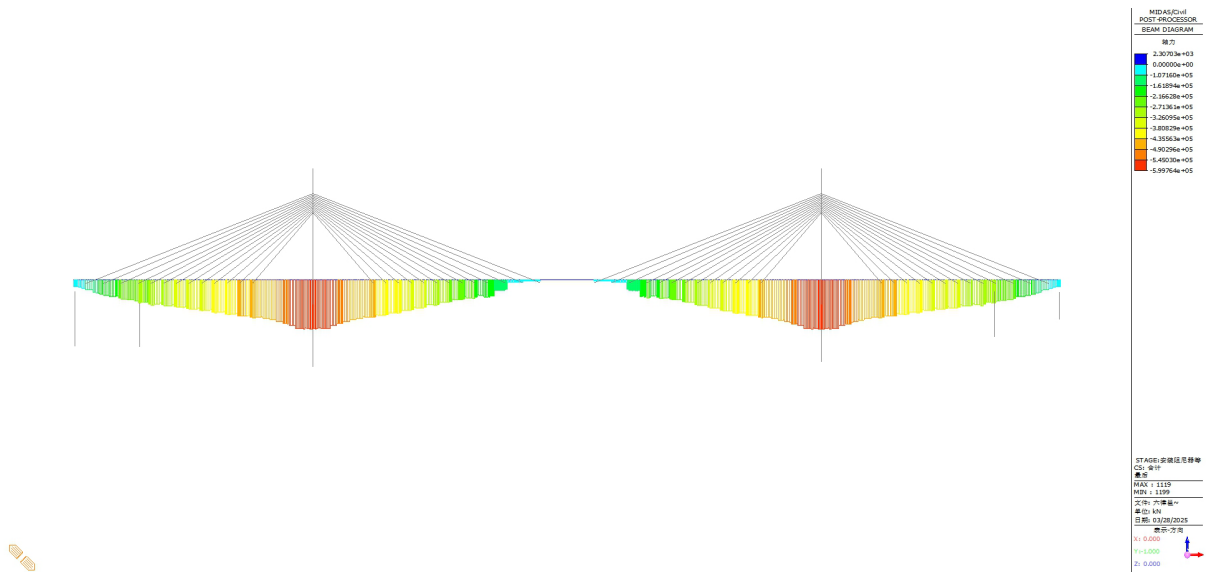


Figure 4. Main beam axial force diagram (unit: kN)
图 4. 主梁轴力图(单位: kN)

3. 设计参数分析

部分斜拉桥的整体受力分析主要从塔、主梁、斜拉索等主要结构进行了力的分析, 而目前的国内桥梁结构有关此类型的桥梁结构分析较为稀缺[3]; 基于工程背景建造的 Midas 有限元模型, 改变其主塔的高度、塔旁及中跨与边跨无索区长度、主梁截面刚度等设计参数进行研究, 分析桥梁结构的受力特性与变化规律。

3.1. 主塔无索区高度

不同塔高情况下的斜拉桥主梁最大挠度与弯矩计算结果如表 1 所示。

Table 1. Calculation table of maximum deflection and bending moment of the main beam with different tower heights
表 1. 不同塔高下主梁的最大挠度和弯矩计算表

无索区塔高度(h)	42 m	40 m	38 m	36 m	34 m
中跨最大挠度(m)	0.196	0.213	0.243	0.269	0.278
次边跨最大挠度(m)	-0.037	-0.033	-0.028	-0.024	-0.022
中跨最大正弯矩(kN·m)	22233.1	25647.3	27383.6	28948.1	29582.3
边跨最大正弯矩(kN·m)	102157.2	103631.2	108546.5	109832.4	110384.8

续表

中跨侧墩顶最大弯矩(kN·m)	1055685.1	958323.1	891822.8	835104.6	799363.1
边跨侧墩顶最大弯矩(kN·m)	1034494.4	941482.5	878698.1	824071.8	786952.7

3.2. 塔旁无索区长度

不同塔旁无索区长度的斜拉桥主梁最大挠度与弯矩计算结果如表 2 所示。

Table 2. Calculation table of the maximum deflection and bending moment of the main beam under the length of the cable-free zone next to the tower

表 2. 不同塔旁无索区长度下主梁的最大挠度和弯矩计算表

塔旁无索区长度(h)	38 m	46 m	54 m	62 m
中跨最大挠度(m)	0.196	0.212	0.221	0.239
次边跨最大挠度(m)	-0.037	-0.026	-0.021	-0.018
中跨最大正弯矩(kN·m)	22233.1	23105.2	24523.6	26424.4
边跨最大正弯矩(kN·m)	102157.2	103550.6	104935.4	107354.7
中跨侧墩顶最大弯矩(kN·m)	1055685.1	967839.6	890732.8	840471.6
边跨侧墩顶最大弯矩(kN·m)	1034494.4	942512.6	864867.3	815127.9

3.3. 边跨及中跨无索区长度

不同边跨及中跨无索区长度的斜拉桥主梁最大挠度与弯矩计算结果如表 3 所示。

Table 3. Calculation table of the maximum deflection and bending moment of the main beam under different side span and mid-span cable-free zone lengths

表 3. 不同边跨及中跨无索区长度下主梁的最大挠度和弯矩计算表

中跨无索区长度与中跨比值	0.106	0.144	0.169	0.194
中跨最大挠度(m)	0.196	0.353	0.552	0.867
次边跨最大挠度(m)	-0.037	-0.023	-0.017	-0.014
中跨最大正弯矩(kN·m)	22233.1	49287.2	82068.4	114136.3
边跨最大正弯矩(kN·m)	102157.2	109691.8	114941.5	117825.7
中跨侧墩顶最大弯矩(kN·m)	1055685.1	1019358.3	988642.9	986561.2
边跨侧墩顶最大弯矩(kN·m)	1034494.4	1003481.6	987346.5	976951.4

3.4. 主梁刚度比

不同主梁刚度比的斜拉桥成桥索力的计算结果如表 4 所示。

Table 4. Calculation table of maximum deflection and bending moment for different stiffness ratios of main beams

表 4. 不同主梁刚度比的最大挠度和弯矩计算表

主梁刚度比值	0.6	0.8	1	1.2
中跨最大挠度(m)	0.216	0.203	0.196	0.191
次边跨最大挠度(m)	-0.029	-0.033	-0.037	-0.04
中跨最大正弯矩(kN·m)	42274.7	31173.5	22233.1	15429.3

续表

边跨最大正弯矩(kN·m)	108651.1	104886.3	102157.2	99947.8
中跨侧墩顶最大弯矩(kN·m)	1066745.4	1062138.6	1055685.1	1045198.6
边跨侧墩顶最大弯矩(kN·m)	1052365.1	1046847.6	1034494.4	1021189.3

对于此类桥梁结构模型分析主塔无索区高度和塔旁无索区长度这两组设计参数,可以得知前者对中跨及次边跨的最大挠度影响较大,变化幅度达到了 40%以上,并在高度为 36 m 时变化幅度开始变小,对主梁的弯矩影响较小,影响的变化幅度最大的是对主梁中跨弯矩达到了 33%;后者对中跨及次边跨的挠度影响也较大,尤其是对次边跨的影响变化幅度达到了 50%以上,而对主梁弯矩则变化幅度较主塔无索区高度的影响小一些,最大的变幅为 21.2%。边跨及中跨无索区长度及主梁截面刚度,前者对主梁的中跨最大挠度和中跨最大正弯矩影响最大,分别为增大了 3.5 倍与 4 倍;后者在四组参数分析中影响变化幅度最小,尤其是对墩顶的弯矩,下降幅度才达 3.1%。

4. 正交试验

在优化方案的试验方法中,试验设计就是以数学统计学和概率论为基础,运用正确的科学方法和手段,并研究如何提高效率来获得可靠试验结果的数据[4]。正交试验是一种较为高效的试验设计方法,通过合理的试验安排用较少的试验次数得到一个较为全面的试验结果分析,不仅试验结果较有针对性和可行性,让各个因素得到一个最优的确定水平,同时也分析出每个因素的影响,能够很好的发现在复杂的一个研究试验体系中,直观地发现因素的互相影响程度和因素间的影响[5]。

4.1. 选取因素与合适正交表

正交试验的模型分析也选取上述四组作为因素来进行分析;即主塔无索区高度、塔旁无索区长度、中跨及边跨无索区长度和主梁截面刚度。本试验采取选择 4 个因素(设计参数),每个因素的对应水平选 3 个,正交表为 $L_9(3^4)$,进行 9 组试验即可。试验正交表如表 5 所示。

Table 5. Orthogonal tables

表 5. 正交试验表

次数	试验因素	主塔无索区高度	塔旁无索区长度	中跨无索区长度与中跨比	主梁刚度比
1		40	38	0.106	0.8
2		40	46	0.144	1.0
3		40	54	0.169	1.2
4		38	38	0.144	1.2
5		38	46	0.169	0.8
6		38	54	0.106	1.0
7		36	38	0.169	1.0
8		36	46	0.106	1.2
9		36	54	0.144	0.8

4.2. 选择试验指标

成桥状态下混合梁部分斜拉桥的中跨最大挠度 f_1 与最大弯矩 W_1 、边跨最大正弯矩 W_2 、次边跨最大

挠度 f_2 、墩顶中跨侧弯矩 W_3 与边跨侧弯矩 W_4 。采用极差分析法计算得到试验指标的各项极差值(表 6), 再结合对极差的影响程度从大到小进行排序(表 7)。

Table 6. Table of the extreme difference of the level indicators of each factor
表 6. 各因素水平指标极差表

试验因素 指标	主塔无索区高度	塔旁无索区长度	中跨无索区长度与中跨比	主梁刚度比
f_1	0.158	0.080	1.072	0.039
f_2	0.037	0.054	0.060	0.030
W_1	9988.0	6799.2	179435.5	47364.1
W_2	18534.8	8443.9	38318.7	14919.4
W_3	369527.8	494708.8	201276.3	50946.8
W_4	352362.4	508901.8	141401.8	77077.0

Table 7. The difference in the range of factors affects the ranking table
表 7. 各因素极差影响排序表

试验指标	因素排序(按极差从大到小)			
f_1	中跨无索区长度与中跨比	主塔无索区高度	塔旁无索区长度	主梁刚度比
f_2	中跨无索区长度与中跨比	塔旁无索区长度	主塔无索区高度	主梁刚度比
W_1	中跨无索区长度与中跨比	主梁刚度比	主塔无索区高度	塔旁无索区长度
W_2	中跨无索区长度与中跨比	主塔无索区高度	主梁刚度比	塔旁无索区长度
W_3	塔旁无索区长度	主塔无索区高度	中跨无索区长度与中跨比	主梁刚度比
W_4	塔旁无索区长度	主塔无索区高度	中跨无索区长度与中跨比	主梁刚度比

根据上述表中结果, 得到如下影响结论:

1、中跨无索区长度与中跨比作为因素对中跨最大挠度 f_1 、中跨最大弯矩 W_1 、边跨最大正弯矩 W_2 及次边跨最大挠度 f_2 的影响最大, 是 f_1 、 f_2 、 W_1 和 W_2 的主要影响因子; 随着比值不断增加 f_1 、 f_2 、 W_1 和 W_2 的水平数值也不断增加。而此因素对在墩顶中跨侧弯矩 W_3 和边跨侧弯矩 W_4 的极差排序影响中较为靠后。

2、主塔无索区高度作为因素对中跨最大挠度 f_1 、边跨最大正弯矩 W_2 和墩顶中跨侧弯矩 W_3 和边跨侧弯矩 W_4 影响较大, 对比中跨无索区长度与中跨比以及塔旁无索区长度, 其影响较小, 但也是较为主要的因素之一。

3、塔旁无索区长度作为因素对墩顶中跨侧弯矩 W_3 和边跨侧弯矩 W_4 影响最大, 是其他因素的主要影响因素, 随着塔旁无索区长度的增加 W_3 和 W_4 的水平数值的变化幅度呈逐渐变缓的下降趋势。其次对次边跨最大挠度 f_2 的影响也较大; 是中跨最大弯矩 W_1 、边跨最大正弯矩 W_2 的次要影响因素。最后, 主梁刚度比从表中能明显看出是 f_1 、 f_2 、 W_3 和 W_4 的次要影响因子。

现以主塔无索区高度为例, 通过因素对受力结果分析的方式, 得到最优的因素水平。由上述结论已经得到主塔无索区高度是 f_1 、 W_2 、 W_3 和 W_4 的主要影响因素, 并从上一章关于主塔无索区高度的结果分析, 随着高度的不断减小 f_1 、 W_2 、 W_3 和 W_4 都呈递增的趋势, 而在 36 m 高度时变化幅度明显减低。从满足结构的受力要求以及施工便捷等多方面考虑, 36 m 的主塔无索区高度可以选为较为合适的设计参数。另外, 从成桥索力的变化情况来看, 随着主塔的高度降低, 索力值明显增大, 但变化幅度偏小。因此, 综合考虑选取 36 m 的无索区高度作为较优的因素水平。

5. 结论

结合正交试验设计对原有的高铁混合梁部分斜拉桥模型进行设计参数对比分析, 选取正交表 $L_9(3^4)$, 进行 9 组试验, 最终得到每个试验指标的主次影响因素以及最优方案。中跨无索区长度与中跨比是影响中跨最大挠度 f_1 、中跨最大弯矩 W_1 、边跨最大正弯矩 W_2 及次边跨最大挠度 f_2 的主要因素, 塔旁无索区长度是影响墩顶弯矩 W_3 和 W_4 的主要因素, 主梁刚度比则是中跨最大挠度 f_1 、次边跨最大挠度 f_2 最次要的因素、墩顶中跨侧弯矩 W_3 和边跨侧弯矩 W_4 的最次要因素。最后, 综合比较分析得出最优设计方案为: 主塔无索区高度 36m、塔旁无索区长度 38m、中跨无索区长度与中跨比 0.106、主梁截面刚度比 1.2。

参考文献

- [1] 郑亮亮. 混合梁矮塔斜拉桥设计与施工若干关键问题研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [2] 杜文斌. 混凝土收缩徐变对高、低塔混合梁斜拉桥成桥状态的影响分析[J]. 世界桥梁, 2014, 42(1): 27-30.
- [3] 宋子威, 王德志, 薛兆钧, 等. 铁路混凝土部分斜拉桥设计综述及发展方向[J]. 交通科技, 2015(6): 28-31.
- [4] 师义民, 徐伟, 秦超英, 等. 数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [5] 谷振. 高低塔 PC 斜拉桥设计参数分析与优化[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.