

# Study on Tensioning Sequence of Cable for Abnormal Single Pylon Cable Stayed Bridge

Xiangdong Liao<sup>1</sup>, Jun Hu<sup>2\*</sup>, Yi Luo<sup>2</sup>, Fuyuan Guo<sup>1</sup>, Jie Zhang<sup>1</sup>, Biru Wang<sup>1</sup>, Qunying Tao<sup>1</sup>, Chuan Zeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>China Construction Third Engineering Bureau Steel Structure Company, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Email: \*hujun@hust.edu.cn

Received: Sep. 8<sup>th</sup>, 2016; accepted: Sep. 25<sup>th</sup>, 2016; published: Sep. 28<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## Abstract

The tension sequence problem of the abnormal cable stayed bridge is very complicated. As cable stayed bridges are highly statically redundant structures, the structure systems are constantly changing with the construction process and the tension of the cable will affect the stress state of the structure. And it is important to determine the tension time of the back cable in the cable stayed bridge. In this paper, we make a construction stages analysis of different tension schemes, and compare various solutions by the parameters of the stress state of the bridge, like the stress of the cable, main girder and the main tower stress and deformation and so on. At last, we get the optimal cable tension schemes, which will provide guidance for the construction process and be time saving.

## Keywords

Abnormal Single Pylon Cable-Stayed Bridge, Tensioning Sequence, Initial Tension

# 异形独塔斜拉桥张拉顺序研究

廖向东<sup>1</sup>, 胡 隽<sup>2\*</sup>, 罗 宜<sup>2</sup>, 郭福元<sup>1</sup>, 张 杰<sup>1</sup>, 王碧如<sup>1</sup>, 陶群英<sup>1</sup>, 曾 川<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中建三局一公司钢结构公司, 湖北 武汉

<sup>2</sup>华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉

Email: \*hujun@hust.edu.cn

\*通讯作者。

文章引用: 廖向东, 胡隽, 罗宜, 郭福元, 张杰, 王碧如, 陶群英, 曾川. 异形独塔斜拉桥张拉顺序研究[J]. 土木工程, 2016, 5(5): 222-232. <http://dx.doi.org/10.12677/hjce.2016.55030>

收稿日期：2016年9月8日；录用日期：2016年9月25日；发布日期：2016年9月28日

## 摘要

非对称的异形斜拉桥，拉索的张拉顺序问题十分复杂。斜拉桥是高次超静定结构，结构随施工不断变化，后续拉索的张拉会影响已施工结构的受力状态。对于有背索的斜拉桥，确定背索的张拉时机很关键。通过对各种拉索张拉方案的施工阶段分析，比较各种方案下的拉索应力、主梁及主塔应力、变形等表征桥梁受力状态的参数，获得最优的拉索张拉方案，为施工过程提供指导，节省了施工时间。

## 关键词

异形独塔斜拉桥，张拉顺序，初始张拉力

## 1. 引言

对称的常规斜拉桥在施工时对称施工主梁、对称张拉斜拉索即可；而对于异形独塔斜拉桥，确定斜拉索的张拉顺序是一个重要的问题。斜拉桥是高次超静定结构，主梁和主塔的内力、应力和变形与斜拉索的索力密切相关，每张拉一根或者多根斜拉索，都会引起主梁和主塔的内力、应力和挠度的变化并发生重分配。在施工过程中，这种重分配使结构的受力状态更加复杂，如果变化幅度较大，可能使处于施工阶段的斜拉桥的受力状态变得更危险。同时，背索的张拉对已张拉斜拉索的内力、主塔偏位和主塔内力影响较大。所以，找出合理的、科学的异形斜拉桥的斜拉索张拉顺序显得极为关键。

本文依托武汉市东西湖区径河大桥项目，对异形独塔斜拉桥拉索张拉顺序问题进行分析，利用有限元分析软件 Midas/Civil，对其拉索张拉顺序进行研究。

径河大桥为钢箱梁独塔斜拉桥，主梁采用满堂支架分节段焊接施工，钢塔柱分段制造，通过吊装焊接拼接。待所有钢箱梁现场连接完成后，逐根张拉斜拉索，最后安装永久支座。

由于该桥的施工图设计图纸中只给出了斜拉索的设计成桥索力，并没给出斜拉索的施工张拉顺序和初始张拉力等详细情况，因此施工单位在施工时遇到张拉顺序的困难。为了解决本桥的斜拉索张拉问题，进行异形独塔斜拉桥拉索张拉顺序研究，具有较好的现实意义。

目前国内外对异形独塔斜拉桥拉索张拉顺序研究还较少，同类文献中，文献[1]提出了以主梁应力为控制目标的斜拉桥合理成桥状态确定的分步算法和确定斜拉桥的合理施工状态的正装迭代法，通过最小二乘法原理将不闭合原因造成的影响减小到最低。文献[2]以斜拉索用量最小为目标，任一受力阶段的塔、梁内力或位移满足容许值为约束条件来确定最优初始张拉力。文献[3]以弯曲能量代价最少原理来确定斜拉桥合理成桥索力并通过倒拆法确定斜拉索施工张拉力。文献[4][5]通过对各种斜拉索更换、旧索拆除方案、不同张拉方案进行施工阶段分析计算，比较各种方案下的斜拉索索力增量、桥面线形等代表桥梁受力状态的指标，得到最优的斜拉索更换方案。文献[6]以实际工程为例，介绍了钢箱梁吊装阶段，通过分析影响拉索拉力的因素和计算拉索张拉力来控制施工的方法，确定了合理的拉索张拉方案。文献[7]以每根索在分批张拉时所在的批次作为变量，各索施加的张拉力总值最小为优化目标，采用改进的遗传算法进行索张拉顺序优化，确定合理的索张拉顺序。文献[8]从多座斜拉桥的施工控制结果分析了存在各种误差的原因和减少误差的方法。文献[9]通过对斜拉索单根张拉的两种不同施工方法的比较，对单根张拉的施工控制技术进行了初步的探讨和研究。文献[10]以实际桥梁为例，对其拉索一次张拉和分级三次张拉的施

工方案进行了研究。通过有限元建模计算,研究了拉索一次张拉和分级三次张拉对结构力学行为的影响,探讨了斜拉索分级张拉施工的合理性。

本文分别建立了有限元计算模型进行施工阶段分析,比较不同斜拉索张拉方案对桥梁施工过程中,各主要构件受力状态的影响程度,并选定几组能代表桥梁受力状态的参数考察各方案的合理性,最终选出最佳的张拉方案,用于指导现场施工。

## 2. 斜拉索张拉方案及有限元模型

对于斜拉索数量不多的斜拉桥,斜拉索可以一次张拉或者分批张拉。但一次张拉不仅对施工条件要求较高,而且同时控制每根索的受力状态较为困难。为了确定最优的斜拉索张拉方案,指导径河大桥的施工,根据其异形非对称的结构特点,本文按以下两种思路考虑斜拉索的张拉顺序:一是由近塔端逐根向远塔端张拉,背索依次在某一根索的前或者后张拉;二是由远塔端逐根向近塔端张拉,背索依次在某一根索的前或者后张拉。主跨侧一共有 9 根斜拉索(编号 S1~S9),背索 2 根(编号为 R1、L1,张拉时背索同时张拉),一共有 20 种张拉方案。斜拉索布置及编号如图 1 所示。

由远塔端逐根向近塔端张拉的所有张拉方案列于表 1,由近塔端逐根向远塔端张拉的所有张拉方案列于表 2。

其中部分方案,在确定其初始张拉力的时候,其初始张拉力会出现负值,故这些方案考虑背索二次张拉。然后对这些方案分别建立有限元分析模型进行施工阶段分析,初步选出其中可行的方案,然后再对初步筛选的方案进行进一步的比较、筛选,从而确定最优方案。按照上述各种方案,建立有限元模型如图 2 所示。其中,主梁和主塔用梁单元模拟,斜拉索用桁架单元模拟。全桥有限元计算模型中,梁单元共 193 个,桁架单元共 11 个,结点共 228 个。

## 3. 斜拉索张拉参数确定

### 3.1. 施工过程中斜拉索最小应力

将施工过程中拉索最小应力结果列于表 3 和表 4,查看所有方案的斜拉索施工过程应力包络结果,可以看出按由远塔端到近塔端逐根张拉的部分方案:Y5~Y10,和按由近塔端到远塔端逐根张拉的部分方案:J1~J3,其拉索应力会出现负值或者极小值(应力值被加粗),这说明按照这些方案张拉,部分斜拉索会随着施工过程的进行出现松弛(张拉力很小或者完全没有张拉力)的情况,这些方案予以排除,对剩下的方案 Y1~Y4 和 J4~J7 进行进一步的考察。

### 3.2. 主梁、主塔施工过程最大压、拉应力

由图 3 可知,按各方案进行结构施工阶段计算得到的施工阶段主梁最大压应力值都在 121.9 MPa 附近;得到的最大拉应力值都在 119.6 MPa 附近。说明按 2.1 筛选出的张拉方案进行施工阶段分析,主梁施工阶段的应力极值很接近。

由图 4 可知,按各方案进行结构施工阶段计算得到的施工阶段主塔最大压应力值都在 106 MPa 附近;而最大拉应力则有 26.9 MPa 的差别。

根据施工阶段主塔最大拉应力的大小,将以上方案进行排序。可以认为,拉应力越小的方案越优。方案的优劣顺序见表 5。

### 3.3. 主梁、主塔施工过程位移变化

现将施工过程中主梁和主塔最大位移值列于表 5 和表 6。

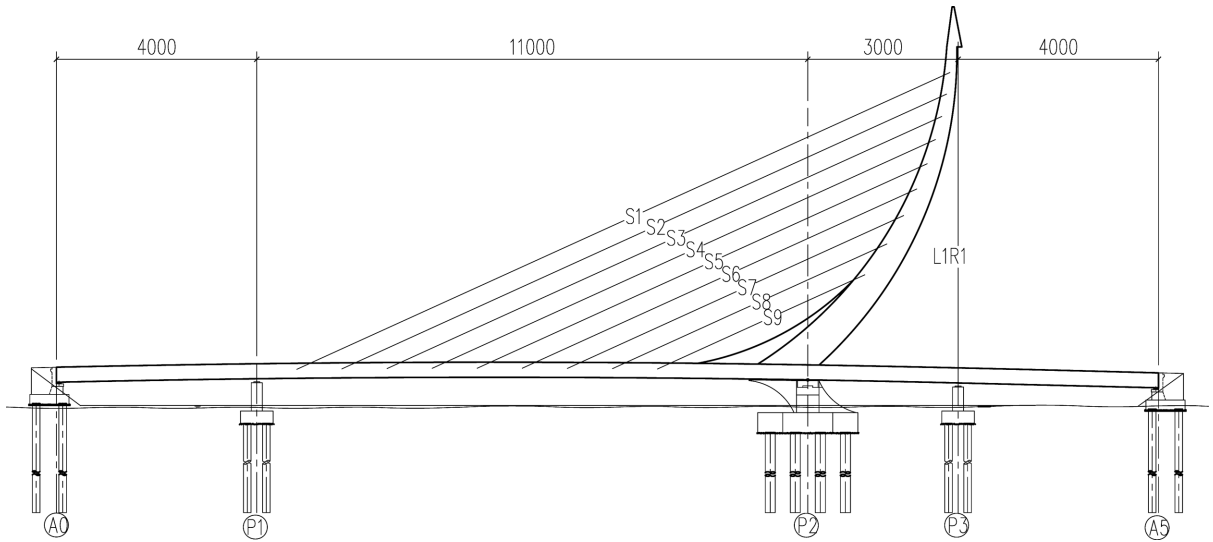


Figure 1. Diagram of stay cable arrangement & number  
图 1. 斜拉索布置及编号示意图

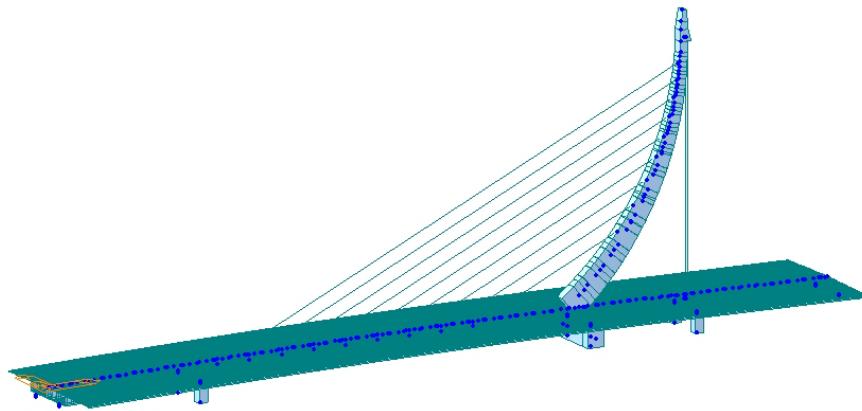


Figure 2. Finite element model for JING river bridge  
图 2. 径河大桥有限元模型

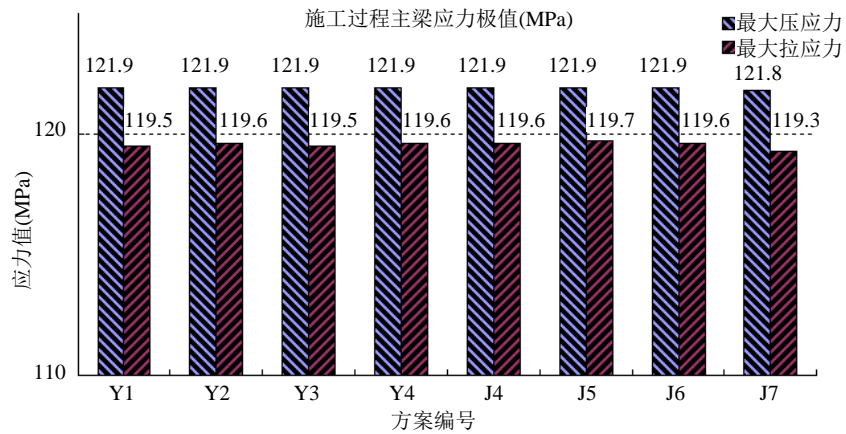


Figure 3. The extreme value of the main beam's tension-compression stress in the construction stage (MPa)

图 3. 施工阶段主梁拉、压应力极值(MPa)

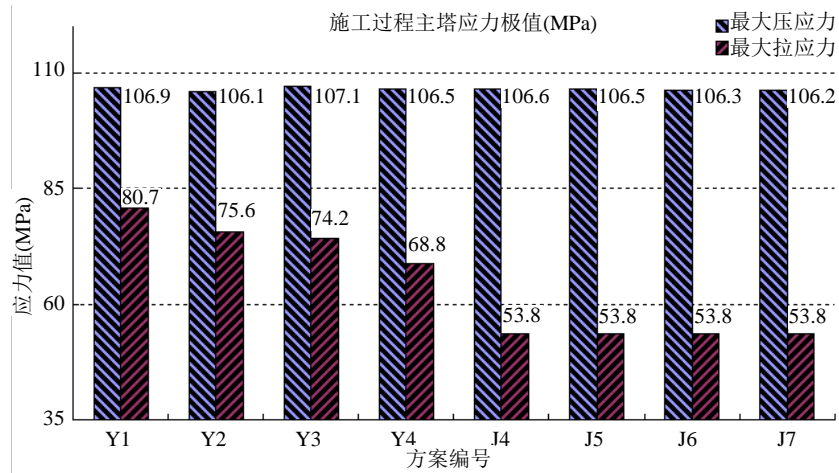


Figure 4. The extreme value of the main tower’s tension-compression stress in the construction stage (MPa)

图 4. 施工阶段主塔拉、压应力极值(MPa)

Table 1. Summary of tension schemes from the far tower side to the near tower side

表 1. 由远塔端向近塔端的张拉方案汇总

张拉方案	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
张拉顺序	R1L1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1
	S1	R1L1	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2
	S2	S2	R1L1	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3
	S3	S3	S3	R1L1	S4	S4	S4	S4	S4	S4
	S4	S4	S4	S4	R1L1	S5	S5	S5	S5	S5
	S5	S5	S5	S5	S5	R1L1	S6	S6	S6	S6
	S6	S6	S6	S6	S6	S6	R1L1	S7	S7	S7
	S7	S7	S7	S7	S7	S7	S7	R1L1	S8	S8
	S8	S8	S8	S8	S8	S8	S8	S8	R1L1	S9
	S9	S9	S9	S9	S9	S9	S9	S9	S9	R1L1

Table 2. Summary of tension schemes from the near tower side to the far tower side

表 2. 由近塔端向远塔端的张拉方案汇总

张拉方案	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
张拉顺序	R1L1	S9	S9	S9	S9	S9	S9	S9	S9	S9
	S9	R1L1	S8	S8	S8	S8	S8	S8	S8	S8
	S8	S8	R1L1	S7	S7	S7	S7	S7	S7	S7
	S7	S7	S7	R1L1	S6	S6	S6	S6	S6	S6
	S6	S6	S6	S6	R1L1	S5	S5	S5	S5	S5
	S5	S5	S5	S5	S5	R1L1	S4	S4	S4	S4
	S4	S4	S4	S4	S4	S4	R1L1	S3	S3	S3
	S3	S3	S3	S3	S3	S3	S3	R1L1	S2	S2
	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	R1L1	S1
	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	R1L1

**Table 3.** The minimum stress of tension schemes from the near tower side to the far tower side  
**表 3.** 由近塔端向远塔端的张拉方案应力最小值

拉索 编号	各方案施工阶段拉索最小应力(MPa)						
	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
S9	200.90	200.80	200.60	200.50	199.2	186.90	181.10
S8	193.90	195.15	193.65	193.65	189.7	170.45	159.45
S7	194.25	195.45	195.45	194.20	188.3	161.80	144.75
S6	201.45	202.45	202.45	202.45	193.1	159.70	136.20
S5	214.35	215.15	215.10	215.10	215.15	162.45	132.55
S4	231.70	232.20	232.20	232.20	232.2	232.40	132.30
S3	104.15	104.55	104.50	104.50	104.55	104.70	104.90
S2	116.45	116.60	116.60	116.60	116.65	116.65	116.75
S1	123.75	123.75	123.75	123.75	123.8	123.80	123.80
L1	<b>33.73</b>	<b>37.98</b>	<b>51.71</b>	71.78	98.27	130.90	168.90
R1	<b>33.73</b>	<b>37.98</b>	<b>51.71</b>	71.78	98.27	130.90	168.90

**Table 4.** The minimum stress of tension schemes from the far tower side to the near tower side  
**表 4.** 由远塔端向近塔端的张拉方案应力最小值

拉索 编号	各方案施工阶段拉索最小应力(MPa)									
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
S9	202.30	202.60	202.40	202.50	202.70	202.70	202.60	202.60	202.60	179.60
S8	195.30	195.60	195.30	195.50	195.65	195.65	195.60	195.65	167.55	158.80
S7	195.55	195.90	195.55	195.75	195.95	195.95	195.90	164.30	152.55	145.25
S6	202.45	202.85	202.50	202.70	203.00	202.95	168.45	153.75	143.65	137.95
S5	215.00	215.50	215.10	215.30	215.70	180.85	161.10	148.20	139.80	135.55
S4	232.00	232.50	232.10	232.30	205.10	175.60	157.50	146.55	139.70	136.70
S3	104.20	104.80	104.40	99.33	<b>52.71</b>	<b>25.64</b>	<b>9.17</b>	<b>-0.10</b>	<b>-5.80</b>	<b>-7.69</b>
S2	116.25	116.75	111.95	95.22	<b>48.22</b>	<b>23.15</b>	<b>8.03</b>	<b>0.10</b>	<b>-4.72</b>	<b>-5.74</b>
S1	123.35	124.90	108.20	92.00	<b>45.55</b>	<b>21.58</b>	<b>7.22</b>	<b>0.28</b>	<b>-4.14</b>	<b>-4.32</b>
L1	30.95	74.35	103.75	121.45	159.00	183.20	197.90	206.40	211.20	213.15
R1	30.95	74.35	103.75	121.45	159.00	183.20	197.90	206.40	211.20	213.15

**Table 5.** The quality evaluation of the scheme obtained by the main beam & the main tower  
**表 5.** 由主梁主塔应力得出的方案优劣顺序

优劣顺序	1	2	3	4	5
张拉方案	J4、J5、J6、J7	Y4	Y3	Y2	Y1

注：优劣顺序对应的数字越小代表方案越优



**Table 6.** The maximum displacement of the main beam in the construction process (mm)**表 6.** 施工过程中主梁最大位移值(mm)

张拉方案	主梁最大竖向位移(mm)	
	正位移	负位移
J4	21.3	251.5
J5	21.3	251.6
J6	21.3	251.5
J7	21.2	251.3
Y4	21.3	251.4
Y3	21.3	251.3
Y2	21.3	251.6
Y1	21.4	251.2

从表 6 和表 7 可以看出, 各方案施工过程中主梁最大位移基本相等, 施工过程中主塔的最大正负位移也基本相等; 将正负位移绝对值相加得“位移幅值”, 然后按位移幅值大小排序, 可以认为, 施工过程中主塔位移幅值越小越好。由此可以得到各方案的优劣顺序, 如表 8。

### 3.4. 成桥状态主梁、主塔位移值

成桥主塔偏位值见图 5。由图 5 可知, 成桥阶段主塔最大偏位基本相等, 而塔顶偏位有较大差别。可以认为塔顶偏位越小越好。而从图 6 可以看出, 各方案得到的成桥阶段主梁跨中挠度基本相等, 由此得到各方案的优劣顺序, 如表 9。

## 4. 最优张拉方案比选

### 4.1. 各张拉方案排序

为了更直观地反映前文筛选的几种方案的优劣比较, 将前面得到优劣序号相加, 得到各种方案的综合排序, 综合排序越低代表方案越好。将各方案的比较结果列于下表中, 如表 10 所示。

由上表可以看出, 方案 Y3、Y4、J4、J5 的排序总和最低(表中加粗部分)且这四种方案的排序总和接近, 故认为这四种方案为较优方案。

再将由各评价参数得到的排序前四名的方案出现的次数做一个统计, 如下表 11。

综合表 10 和表 11 中的比较, 可以得到最终的方案优劣顺序:

**最优的方案为 Y3、J5, 较优为 J4, 次优为 Y4。**

将这四种方案的张拉顺序和初始张拉力列于表 12。

在研究斜拉索的合理张拉顺序时, 先分别确定各个方案的初始张拉力, 对于不能确定合理初始张拉力的方案予以舍弃; 然后分别建立各个方案的施工阶段计算模型, 对所得施工过程中斜拉索应力值、施工过程中主梁、主塔拉压应力极值和位移极值以及成桥阶段主梁跨中挠度和主塔偏位等参数进行比较, 评价各种方案的优劣程度。

通过建立有限元模型进行分析计算, 比较桥梁结构施工过程和成桥阶段的结构状态参数, 包括斜拉索施工过程中应力极值、主梁主塔施工过程中最大拉压应力值、施工过程中主梁竖向位移极值、施工过程中桥塔水平偏位极值以及成桥阶段主梁和主塔的位移值, 得到径河大桥最优的斜拉索张拉方案: Y3、J5。成桥状态时, Y3 的塔顶偏位比 J5 小。

**Table 7.** The maximum displacement of the main tower in the construction process (mm)  
**表 7.** 施工过程中主塔最大位移值(mm)

张拉方案	最大竖向位移(mm)		总位移
	正位移	负位移	
Y4	40.9	30.7	71.6
J5	40.6	34.6	75.2
Y3	39.9	37.7	77.6
J6	48.8	29.6	78.4
J4	40.4	43.3	83.7
Y2	41.8	43	84.8
J7	66.2	29.6	95.8
Y1	39.9	57.7	97.6

**Table 8.** The quality evaluation of the scheme obtained by the displacement of the main beam & the main tower  
**表 8.** 由主梁主塔位移得出的方案优劣顺序

优劣顺序	1	2	3	4	5	6	7	8
张拉方案	Y4	J5	Y3	J6	J4	Y2	J7	Y1

注：优劣顺序对应的数字越小代表方案越优

**Table 9.** The quality evaluation of the scheme obtained by the displacement of the bridge main beam & the bridge main tower

**表 9.** 由成桥主梁、主塔位移得出的方案优劣顺序

优劣顺序	1	2	3	4	5	6	7	8
张拉方案	J4	Y3	Y1	J5	Y4	J6	Y2	J7

注：优劣顺序对应的数字越小代表方案越优

**Table 10.** Comprehensive ranking of each scheme

**表 10.** 各方案综合排序

备选方案	优劣排序			排序总和
	主梁主塔拉压应力	主梁主塔施工过程中位移	主梁主塔成桥状态位移	
Y1	5	8	3	16
Y2	4	6	7	17
Y3	3	3	2	8
Y4	2	1	5	8
J4	1	5	1	7
J5	1	2	4	7
J6	1	4	6	11
J7	1	7	8	16

**Table 11.** Frequency statistics of program appear in each top four

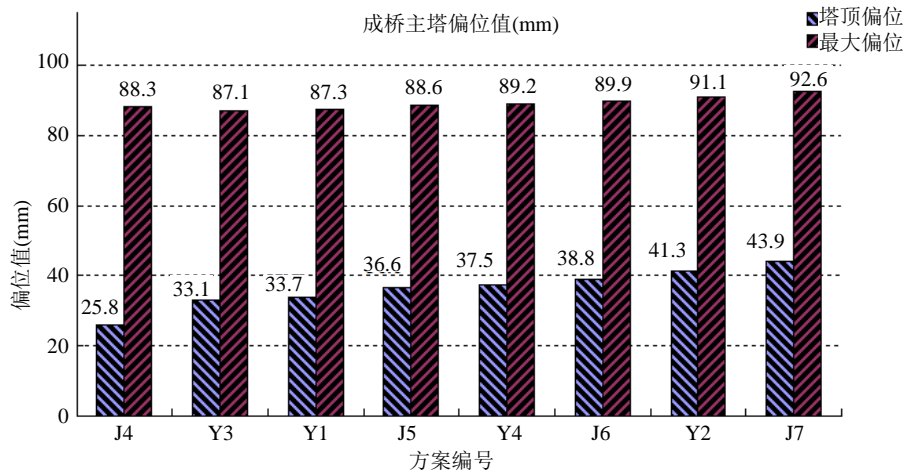
**表 11.** 各排序前四名中方案出现的次数统计

张拉方案	Y1	Y2	Y3	Y4	J4	J5	J6	J7
出现次数	1	1	3	1	2	3	2	1

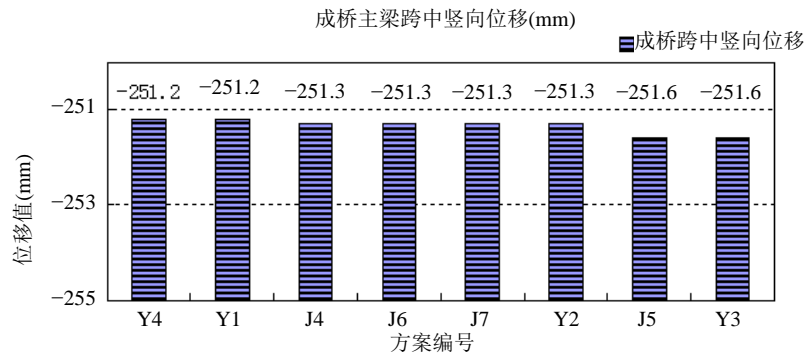


**Table 12.** Tension sequence and initial tension of each scheme (kN)  
**表 12.** 各方案张拉顺序及初始张拉力(kN)

Y3		J5		J4		Y4	
张拉顺序	初始张拉力	张拉顺序	初始张拉力	张拉顺序	初始张拉力	张拉顺序	初始张拉力
S1	584.67	S9	1981.76	S9	1977.74	S1	601.07
S2	455.79	S8	1839.35	S8	1835.33	S2	464.39
R1L1	1529.34	S7	1648.52	S7	1644.60	S3	404.50
S3	801.82	S6	1427.1	R1L1	1058.01	R1L1	1790.14
S4	2196.83	R1L1	2011.06	S6	2049.90	S4	2198.98
S5	1940.59	S5	1448.3	S5	2010.51	S5	1942.58
S6	1743.89	S4	1951.33	S4	1950.95	S6	1745.64
S7	1600.48	S3	539.72	S3	539.57	S7	1601.98
S8	1515.08	S2	575.65	S2	575.56	S8	1516.33
S9	1495.43	S1	577.78	S1	577.76	S9	1496.50



**Figure 5.** The offset value of the main tower in the completed bridge stage (mm)  
**图 5.** 成桥阶段主塔偏位值(mm)



**Figure 6.** The mid-span deflection value of the main beam in the completed bridge stage (mm)  
**图 6.** 成桥阶段主梁跨中挠度值(mm)

**Table 13.** Comparison of measured & theoretical cable force values in finished bridge (kN)  
**表 13.** 成桥实测索力与理论值比较(kN)

序号	斜拉索张拉顺序	实测索力(kN)	理论索力(kN)	差值(kN)	误差(%)
1	张拉 S9	1943.7	2003.9	-60.20	-3.00
2	张拉 S8	1926.7	1985.33	-58.63	-2.95
3	张拉 S7	1913.9	1960.97	-47.07	-2.40
4	张拉 S6	1922.5	1937.16	-14.66	-0.76
5	张拉 R1	4570.8	4503.39	67.41	1.50
6	张拉 L1	4639		82.01	1.82
7	张拉 S5	1849.3	1920.35	-71.05	-3.70
8	张拉 S4	1834.1	1916.57	-82.47	-4.30
9	张拉 S3	453.75	463.07	-9.32	-2.01
10	张拉 S2	462.63	475.79	-13.16	-2.77
11	张拉 S1	494.57	504.86	-10.29	-2.04

J5 方案即从近塔端开始张拉, 张拉 4 根斜拉索后张拉背索, 然后依次张拉剩余斜拉索; Y3 方案即从远塔端开始张拉, 张拉 2 根斜拉索后张拉背索, 然后依次张拉剩余斜拉索。

从近塔端开始张拉时, 背索越早张拉斜拉索越容易出现极小应力的问题; 而从远塔端开始张拉时, 背索越晚张拉斜拉索越容易出现应力极小的问题;

各方案中主塔施工过程中的最大拉应力, 从近塔端开始张拉方案的比从远塔端开始张拉的小; 而各方案中的主梁施工过程最大拉、压应力和主塔施工过程最大压应力基本相等。

## 4.2. 工程实施效果

最终推荐施工单位使用 J5 方案, 按此方案指导现场斜拉索张拉施工, 成桥时实测索力与理论值的比较结果如表 13 所示。

索力误差均在 5% 以内, 满足相关规范的要求。

利用本文的研究成果, 径河大桥成桥后能自动达到设计索力, 避免了多次调索的麻烦, 缩短了施工时间, 从而带来了显著的经济效益。

## 5. 结论

- 1) 对于有背索非对称的异形斜拉桥, 其斜拉索的张拉顺序比较复杂, 应结合具体项目进行优化分析。
- 2) 通过斜拉索应力、桥面线形、主梁及主塔应力等参数, 比选得到四种较优的斜拉索张拉方案。
- 3) 本文研究的径河大桥为非对称独塔钢斜拉桥, 其斜拉索的张拉顺序及背索的张拉时机研究结果, 有效地指导了大桥的斜拉索张拉施工。

## 参考文献 (References)

- [1] 颜东煌. 斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [2] 陆揪, 徐有光. 斜拉桥最优索力的探讨[J]. 中国公路学报, 1990(1): 38-48.
- [3] 杜国华, 姜林. 斜拉桥的合理索力及其施工张拉力[J]. 桥梁建设, 1989(3): 11-17.
- [4] 杨起, 普毅, 曹正, 等. 独塔斜拉桥拉索更换顺序研究[J]. 公路交通科技, 2014, 114(6): 333-336.

- 
- [5] 曲晓宁, 罗尧治, 郑君华. 基于改进遗传算法的预应力钢结构索张拉优化分析[J]. 工程力学, 2009, 26(9): 131-137.
- [6] 张雪松, 李涛, 李海南. 之江大桥钢绞线斜拉索张拉及线形控制[J]. 公路, 2013(4): 31-35.
- [7] 李胜. 异形斜拉桥结构仿真分析与施工控制[D]: [硕士学位论文]. 长安: 长安大学, 2009.
- [8] 许俊, 郑信光, 陈云峰. 影响 P.C.斜拉桥施工控制目标的因素[J]. 结构工程师, 2000(1): 9-12.
- [9] 王鹏, 王根会. 斜拉索单根张拉施工控制技术研究[C]//第 14 届全国结构工程学术会议论文集(第三册). 北京: 中国力学学会工程力学编辑部, 2005: 294-298.
- [10] 李杰, 陈淮. 无背索部分斜拉桥斜拉索张拉施工方案分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(5): 103-108.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)