

文章编号: 1002-0268 (2009) 06-0098-06

# 天津永和大桥合龙段拆除后的主梁线形调整

李宏江<sup>1</sup>, 李万恒<sup>1</sup>, 张劲泉<sup>1</sup>, 王江<sup>2</sup>, 王荣石<sup>2</sup>

(1. 交通部公路科学研究院, 北京 100088; 2 天津市政公路管理局, 天津 300170)

**摘要:** 天津永和大桥为5孔一联、主孔跨径260 m、双塔双索面、塔墩固结、连续呈漂浮体系的PC斜拉桥。与中跨合龙段置换相匹配, 利用拆除合龙段后形成两半桥的时机, 通过调索来改善主梁线形是国内既有PC斜拉桥维修的一个先例。通过对比分析合龙段拆除后状态与原桥竣工状态在桥面线形、索力等结构性能上的差异, 并依据中跨合龙段拆除前已然存在的中跨局部下挠量, 确立了主梁线形调整的目标和调索幅度, 利用平面杆系有限元计算分析拟定并优选了调索方案, 提出了主梁线形调整的施工控制原则。施工监测结果表明, 所有调索步骤完成后, 主梁线形调整最终达到了预期目标, 调整后的索力更趋于均匀, 调整过程兼顾了主梁混凝土应力、塔位以及劲性骨架轴力的变化, 保证了结构的安全。

**关键词:** 桥梁工程; 线形调整; 调索; PC斜拉桥; 拆除合龙段

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

## Adjustment of Alignment of Main Girder after Removal of Closure Segment in Tianjin Yonghe Bridge

LI Hongjiang<sup>1</sup>, LI Wanheng<sup>1</sup>, ZHANG Jinquan<sup>1</sup>, WANG Jiang<sup>2</sup>, WANG Rongshi<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Communications, Beijing 100088, China;

2 Tianjin Municipal Highway Administration Bureau, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** Tianjin Yonghe Bridge is a prestressed concrete cable-stayed bridge which has one continuous and floatable structural system with 5 spans, double pylons, double cable planes and fixed with the piers. The length of its main span is 260 meters. Accompanied with replacement of the closure segment in the midspan, after removing the closure segment and thus forming two half bridges, the alignment of main girder was improved by means of adjusting cable forces, which is a precedent in maintenance of existing prestressed concrete cable-stayed bridges. The structural differences in the deck alignment and cable force between after removal of the closure segment and original completion were comparatively analyzed. According to the deflection value at the midspan of the middle span before removing the closure segment, the alignment adjustment target value, adjustment range and increment of cables were established. An adjustment scheme of cable forces was studied and optimized. Then some construction control guidelines were provided. Construction monitoring results showed, after adjustment of cable forces, the target value of alignment of the main girder was achieved, and cable forces of the whole bridge became well-proportioned. During adjusting, concrete stress of the main girder, position of the top of tower, and axial force of the stiffening frames were considered synchronously. This practice may provide some valuable experience for other cable-stayed bridge in need of adjusting the alignment of main girder in the finished state.

**Key words:** bridge engineering; alignment adjustment; cable force adjustment; prestressed concrete cable-stayed bridge; removing the closure segment

收稿日期: 2008-09-24

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目 (200731822340)

作者简介: 李宏江 (1973-), 男, 河北迁安人, 博士, 副研究员, 研究方向为大跨桥梁结构理论与设计方法. (hj.li@rioh.cn)

## 0 引言

PC斜拉桥运营过程中有可能会出主梁线形偏离原设计状态的情况,如桥面局部下挠。为改善主梁线形,使之处于合理的受力状态,通常采用调索<sup>[1-9]</sup>的方法来解决。索力可调性既是斜拉桥的特点,也是其优点。然而,受到拉索最小安全系数的限制<sup>[10-11]</sup>,不仅调索幅度不能过大,而且线形调整的实际效果与主梁整体刚度有关<sup>[12]</sup>。成桥后主梁处于连梁状态,桥跨整体刚度大,少数几根索的索力变化或较小的调索幅度对主梁线形影响很小,必须增加调索数量或提高调索幅度,甚至有些主梁刚度较大的PC斜拉桥即使全桥拉索都进行了调整也未必效果明显。而当主梁处于悬臂施工或合龙前状态时,主梁整体刚度较小,小幅度的索力变化就会引起悬臂部分标

高的改变,此时调索效果更易得到保证,本文结合天津永和桥合龙段置换加固工程,介绍天津永和大桥在拆除合龙段条件下通过调索来改善主梁线形的基本方法。

## 1 工程概况

天津永和桥为5孔一联、主孔跨径260 m、双塔双索面、塔墩固结、连续呈漂浮体系的PC斜拉桥。如图1所示,主梁全长512.4 m,梁高2.0 m,包括风嘴总宽14.5 m。塔高55.5 m,主墩为沉井基础,其余墩台为管桩基础,边墩设拉力摆索支座。桥面净宽(9+2×1.0) m,设计荷载为汽-20级,挂-100,人群荷载为2.5 kN/m<sup>2</sup>。大桥于1987年12月通车,运营至今已近20年。

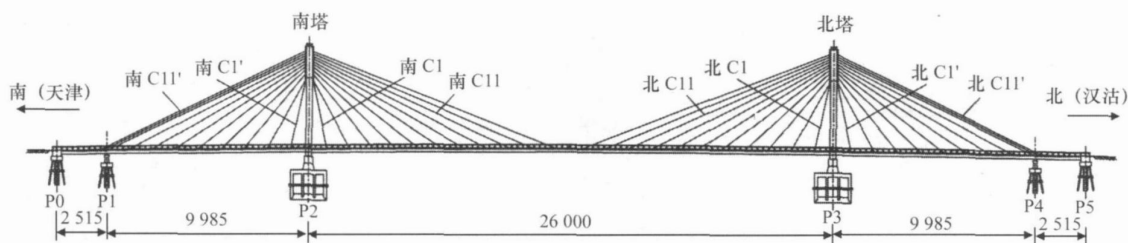


图1 天津永和桥立面布置(单位: m)

Fig. 1 Sectional elevation of Tianjin Yonghe Bridge (unit: m)

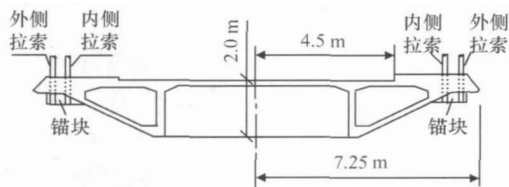


图2 拉索在主梁横断面上的布置

Fig. 2 Arrangement of stayed cables in transverse section of box girder

全桥拉索呈扇型布置,共44对,每对索有4根索束(上、下游各2根),拉索在主梁横断面上的布置如图2所示。为叙述方便,拉索编号规则如图1示意,其中带“'”的索号为岸侧索,不带“'”的索号为河侧索,南、北半桥拉索分别以南、北标识,索号由短至长依次为1~11号,拉索以字母C标识。

2005年该桥检测时发现,主跨1/4~3/4跨区段的主梁局部下挠,跨中最为严重,与原竣工线形相比,主跨跨中下挠量达18.8 cm。与此同时,主跨合龙段与相邻预制块件之间的拼接接缝开裂明显,截面下缘开裂宽度达10 cm,车辆通过时存在明显的活动

性,穿过接缝的部分预应力筋和普通钢筋已断裂,接缝近乎铰接状态,合龙段对桥跨的连接作用明显减弱,这已成为结构安全的隐患。为全面整治合龙段病害,彻底消除安全隐患,决定对该桥主跨合龙段进行置换,即拆除原合龙段,重新浇注新合龙段并加强其与相邻预制节段的连接。鉴于主梁局部下挠明显,决定利用合龙段拆除后形成两半桥的时机通过调索对主跨局部区段的主梁标高进行预调整,使主跨下挠的趋势在新合龙段恢复后得以改善或缓解。本文着重阐述主梁线形调整的分析过程,对合龙段拆除、置换等另有著述。

## 2 主梁线形调整前的结构状态

图3示出了原竣工及合龙段拆除前后的桥面线形。由图3可看出,与原竣工线形相比,合龙段拆除前主跨桥面已然存在局部下挠,跨中下挠量最大,而合龙段拆除前后桥面线形总体变化不大,这是由于合龙段拆除施工采用了浮箱换重方式,拆除前后桥面恒载变化不大,据施工监测结果,合龙段拆除后半桥悬臂端上抬了5.3 cm(南半桥)和4.4 cm(北半桥),

该上抬位移主要是由于体系转换、结构刚度变化所致。合龙段拆除后,南北两半桥之间通过劲性骨架(由工字钢拼焊而成的外部锁定装置)相连,每半桥悬臂 17.4 m 梁长范围内桥面临时压重为 675 kN。主梁线形调整拟在合龙段拆除后、两半桥合龙口保持锁定状态、悬臂保持压重条件下通过调索来实现。

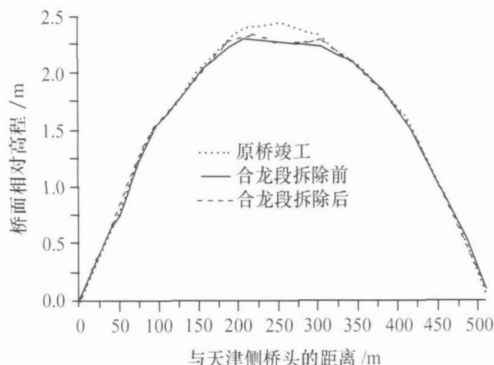


图3 天津永和桥的桥面线形比较

Fig 3 Comparison of deck deflections of Tianjin Yonghe Bridge

### 3 主梁线形调整目标及索力调整幅度

拆除合龙段引起的桥面线形变化(即悬臂端上抬)只是暂时的,待新合龙段恢复后,这些变化将有可能消失,主梁线形调整暂不考虑合龙段拆除引起的桥面线形变化,因此,此处的线形调整目标系指相对于合龙段拆除后的桥面高程的净增加量。根据原桥主跨跨中下挠量(18.8 cm),确定线形调整目标为主跨跨中预上抬量至少为该下挠量的50%,并使局部下挠的线形均不同程度地得以改善。

与桥面线形变化相对应,合龙段拆除引起的索力变化也只是暂时的,线形调整不考虑合龙段拆除这一中间过程,仅考虑合龙段拆除前全桥索力与原竣工索力之间已然存在的差异。图4示出了全桥索力增量(即合龙段拆除前的实测索力与原竣工索力之差)的

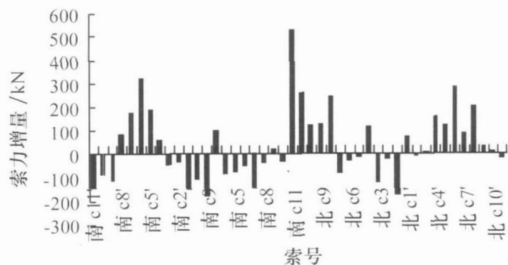


图4 合龙段拆除前全桥索力增量分布

Fig 4 Cable force increment distribution before removal of the closure segment

分布,此处的索力系指同断面的4根索束的总索力。由图4可看到,与原竣工索力相比,合龙段拆除前的索力有增有减,变化量约为原竣工索力的-6.7%~6.9%。据此确定调索幅度应使调索前后的索力增加量和减小量均控制在原竣工索力的10%范围内,调索既要保证结构安全的前提下达到主梁线形调整的目标,又要使索力趋于均匀,与原竣工索力的误差不宜超过±10%。另外,考虑到南北两半桥索力的不完全一致,两半桥的调幅度应适当有所不同。

### 4 调索方案

调索计算采用平面杆系有限元程序,主梁、索塔分别采用梁单元模拟,同一主梁断面的4根索束合并按一根拉索等效,用索单元模拟<sup>[13]</sup>。首先对原桥结构进行施工阶段模拟至成桥状态,然后对合龙段拆除进行模拟,最终获得合龙段拆除后的结构状态<sup>[14]</sup>。调索计算采用增量法,即当前调索步骤引起的结构状态变化量(位移、应力、索力等)为该步调索前后2个施工阶段累计计算值之差。

采用试算法对影响主跨跨中竖向位移的拉索索号进行了敏感性分析<sup>[15]</sup>,即对每个索号的拉索索力分别试张拉100 kN,分别计算中跨跨中竖向位移,分析各个索号对位移的影响程度。敏感性分析结果表明,张拉一个索号,其影响范围大致为前后各3对索,岸侧索与河侧索相互影响程度较低,即调整河侧索并不会影响到岸侧索的索力,因此岸侧拉索调整量与河侧拉索调整量可以独立考虑。河侧的C8~C11索对悬臂端竖向位移影响最大,然而张拉这些索号会使主梁悬臂端附近的一定区段的主梁混凝土下缘产生拉应力,而张拉河侧的C5~C7号索可增加该区段主梁的下缘压应力,由此确定调索索号为河侧和岸侧的5~11号索,河侧索与岸侧索同时张拉,以避免索塔塔顶纵向水平位移过大。张拉总体方案为先张拉C5(C5')~C7(C7')索,使悬臂端附近的一定区段主梁的下缘先增加一定的压应力,以消除后继张拉C8(C8')~C11(C11')索所造成的拉应力,然后再拉C8(C8')~C11(C11')索,来抬高跨中区段的桥面标高,这样,既能使主跨跨中附近区段发生上抬,同时又能保证主梁混凝土的安全,确定调索方案如表1所列。

调索方案按照先后顺序共分8步,该方案具有如下特点:(1)考虑了调索前已然存在的索力不均匀性,岸侧索与河侧索、南半桥与北半桥的索力增量有所不同。(2)经计算,表1中的索力增量均在原竣工

索力的 0.9%~7.8% 范围内, 未超出既定的索力调整幅度范围限制 (10%)。

表 1 通过调索来调整主梁线形方案

Tab 1 Schemes of main girder alignment through adjusting cable force					
步骤	调索索号	索力增量/kN	步骤	调索索号	索力增量/kN
第 1 步	南塔 C5	364	第 5 步	南塔 C9'	195
	南塔 C5	291		南塔 C9	378
	北塔 C5	340		北塔 C9	257
	北塔 C5	249		北塔 C9'	72
第 2 步	南塔 C6	不张拉	第 6 步	南塔 C10	456
	南塔 C6	229		南塔 C10	423
	北塔 C6	206		北塔 C10	398
	北塔 C6	不张拉		北塔 C10	170
第 3 步	南塔 C7	289	第 7 步	南塔 C1f	489
	南塔 C7	285		南塔 C11	248
	北塔 C7	186		北塔 C11	169
	北塔 C7	143		北塔 C1f	236
第 4 步	南塔 C8	109	第 8 步	南塔 C1f	—
	南塔 C8	479		南塔 C11	124
	北塔 C8	352		北塔 C11	84
	北塔 C8	172		北塔 C1f	—

5 主梁线形调整的施工控制原则

为保证结构安全, 主梁线形调整的施工控制应遵循以下原则: (1) 该桥使用已将近 20 年, 其结构内力状态非常不明确, 为防止主梁内力状态发生突变, 危及主梁混凝土的安全, 线形调整前后主梁混凝土应力变化量应限定在较小的范围内, 截面上、下缘应力增减应适度, 特别应避免产生过大的拉应力。(2) 调索过程尽可能保证河侧索和岸侧索同时张拉, 避免塔位发生过大的改变。(3) 调索应兼顾合龙段劲性骨架的受力安全。

6 主梁线形调整的效果分析

6.1 桥面线形

图 5 示出了第 4 次至第 8 次调索过程中桥面线形的变化。由图 5 可看出, 主梁线形调整后, 岸跨桥面线形变化较小, 一般均在 ±2 cm 以内, 而河跨桥面线形变化较为明显, 主梁悬臂部分一般均发生上抬位

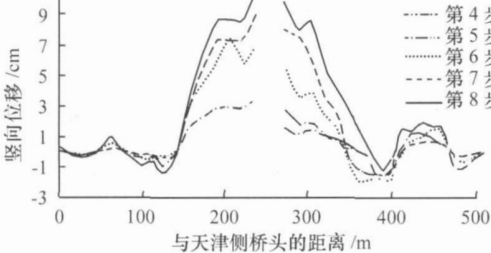


图 5 调索过程中主梁竖向位移变化

Fig 5 Vertical deflection of main girder during adjustment of cable force

移, 仅在靠近塔根附近区段发生轻微的下挠, 最大下挠量值未超过 2 cm (北半桥), 主梁悬臂端上抬量分别为 10.6 cm (南半桥) 和 9.8 cm (北半桥)。

图 6 示出了主梁线形调整后与新合龙段恢复后的桥面线形。由图 6 可看出, 由于新合龙段的恢复同样采用了浮箱换重法, 新合龙段恢复后, 桥面线形变化并不明显, 与合龙段拆除前相比, 仍存在 9.6 cm 的上抬量, 说明合龙段拆除后的主梁线形调整量基本保持住了, 并未因后面的新合龙段恢复而受到明显削减, 其最终的上抬量约为原桥主跨跨中下挠量 (18.8 cm) 的 51%, 达到了主梁线形调整的既定目标。

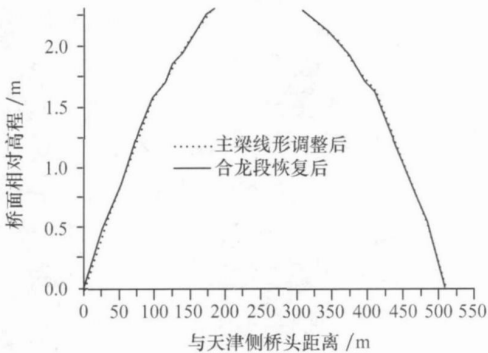


图 6 线形调整后与合龙段恢复后桥面线形比较

Fig 6 Deck alignment comparison between after deck alignment adjustment and after reconstruction of the closure segment

6.2 索力

主梁线形调整后的全桥索力与原竣工值的比较如图 7 和图 8 所示。主梁线形调整后, 全桥索力与原竣工索力的比值介于 0.94~1.09 之间, 与原竣工索力基本接近, 误差不超过 ±10%, 根据原设计的拉索破断力推算, 主梁线形调整后的拉索索力的安全系数在 2.73~3.60 之间, 大于原设计的拉索最低安全系数 2.5, 也接近于根据原竣工实测索力推算的竣工时的拉索恒载安全系数 2.71~3.62, 这说明主梁线形调整充分利用了斜拉桥拉索的可调性, 在不降低拉索本身

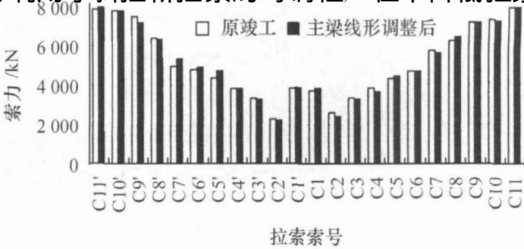


图 7 南半桥实测索力与原竣工索力比较

Fig 7 Comparison of measured value with originally completed value of cable force of southern half bridge

安全系数的前提下达到了主梁线形调整的目标。

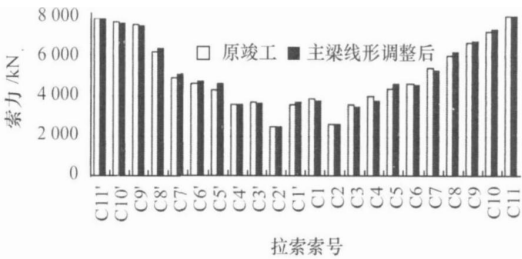


图 8 北半桥实测索力与原竣工索力比较

Fig 8 Comparison of measured value with originally completed value of cable force of northern half bridge

6 3 塔顶纵向水平位移

与主梁线形调整前（即合龙段拆除后）相比，主梁线形调整后，南塔塔顶纵向水平位移变化不明显，北塔塔顶变位 0.6 cm（向岸侧方向），一方面是由于该桥索塔刚度较大，其与主梁刚度比为 6 :1，小幅度地调整拉索索力时，主梁竖向位移并不会引起索塔塔顶纵向水平位移过大变化，另一方面系由于调索施工中采用了岸侧拉索与河侧拉索同时、同步张拉，索塔的变位得到了控制。

6 4 劲性骨架的轴力

主梁线形调整过程劲性骨架的轴向应力变化介于 -16.38（压应力）~11.76 MPa（拉应力）之间，由应力变化推算其轴力变化发现，主梁线形调整前后劲性骨架轴力最大变化了 72.0 kN，数值较小，调索过程中未发现劲性骨架与主梁发生脱开的情况，劲性骨架本身也未产生明显的变形，这表明主梁线形调整过程中劲性骨架是安全的。

6 5 主梁混凝土应力

主梁各监测断面的混凝土应力变化如表 2 所列。从表 2 可看出，主梁线形的调整主要引起了各监测断面产生了压应力增量，其中最大平均压应力增量为 1.35 MPa，各测点的应力变化相对较小，且未出现拉应力增量。

6 6 辅助墩支反力

线形调整前，即合龙段拆除后，南北辅助墩支反力分别为 605、572 kN，反力向上；主梁线形调整后，南北辅助墩支反力分别为 670、525 kN，反力亦向上，即南辅助墩支反力增加了 65 kN，北辅助墩支反力减小了 47 kN，支反力变化百分比分别为 +10.7%（南）和 -8.2%，由此看出，主梁线形调整并未改变支反力的方向，数值上略有变化，但很小。因此，主梁线形调整方案兼顾了辅助墩支反力的变化，使其未发生明显变化。

表 2 主梁线形调整引起的主梁各监测断面的  
实测应力增量（单位：MPa）

Tab. 2 Measured stress increments of monitoring sections caused by alignment adjustment of main girder (unit: MPa)

主梁监测断面	测点位置	主梁线形调整前 (合龙段拆除后)	主梁线形 调整后	实测应力增量	
				测点值	平均值
南边跨中	顶板下缘	-0.53	-1.65	-1.12	-0.83
		0.11	-0.42	-0.53	
	截面下缘	-1.05	-2.07	-1.02	-1.07
		-0.53	-1.65	-1.12	
南塔根	顶板下缘	-1.68	-3.4	-1.72	-1.35
		-1.89	-2.87	-0.98	
	截面下缘	-1.68	-2.42	-0.74	-0.69
		-0.81	-1.44	-0.63	
南中跨 C9~C10	顶板下缘	0.28	-0.32	-0.60	-1.14
		0.77	-0.91	-1.68	
	截面下缘	-0.04	/	/	-0.60
		0.53	-0.07	-0.60	
北中跨 L/4 顶板下缘	顶板下缘	-1.09	-2.28	-1.19	-1.31
		-0.67	-2.1	-1.43	
	截面下缘	-0.7	-2.38	-1.68	-1.23
		-0.04	-0.81	-0.77	
北塔根	顶板下缘	-2.07	-3.71	-1.64	-1.10
		-1.4	-1.96	-0.56	
	截面下缘	-1.79	-3.68	-1.89	-1.12
		-1.16	-1.51	-0.35	
北边跨中	顶板下缘	-0.39	-1.37	-0.98	-1.35
		-1.23	-2.94	-1.71	
	截面下缘	-0.63	-1.68	-1.05	-0.79
		-0.63	-1.16	-0.53	

注：应力拉+压-；/为测点损坏。

7 结论

- (1) 永和大桥拆除主跨合龙段后通过调索来改善主梁线形，是国内既有 PC 斜拉桥维修的一个先例。主跨合龙段拆除后形成两个半桥，两半桥仅通过劲性骨架相连，相比于成桥状态而言，结构体系发生了变化，整体刚度有所降低，此时使得主梁线形调整变得较为容易，相比于国内其他斜拉桥连梁状态下通过调索来改善主梁线形而言，其线形调整的效果更容易得到保证。工程实践表明，永和大桥主梁线形调整达到了预期目标。
- (2) 主线形调整是在索力增减适度的前提下针对桥面局部下挠所进行的改善，线形调整过程兼顾了主梁混凝土应力、塔位、劲性骨架内力等结构性能的变化，是在保证结构安全的前提下进行的，主梁线形调整方案是合理可行的。
- (3) 永和大桥的主梁线形调整实践为国内既有 PC 斜拉桥的维修开辟了一条新的途径，也为国内既有 PC 斜拉桥的综合维修整治提供了重要参考。本文

所述方法仅用来与合龙段置换相配合使用, 如果仅仅为了调整线形而拆除合龙段通常是非常不经济的, 因此, 本文的方法是有其适用范围的, 但可供大跨混凝土斜拉桥主梁线形调整参考。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 官万轶, 韩大建. 斜拉桥的索力调整[J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25 (1): 125—128  
GUAN Wanyi, HAN Dajian Adjustment of Cable Force for Cable-stayed Bridges[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2000, 25 (1): 125—128
- [2] 王美. 红枫湖大桥成桥后索力调整及调索顺序的优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.  
WANG Mei Cable Force Adjustment and Optimization of Adjusting Sequence of Hongfenghu Long Span Bridge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [3] 贾丽君, 肖汝诚, 孙斌, 等. 确定斜拉桥施工张拉力的影响矩阵法[J]. 苏州城建环保学院学报, 2000, 13 (4): 21—27.  
JIA Lijun, XIAO Rucheng, SUN Bin, et al Influence Matrix Method Determining Construction Cable Tensions for Cable-stayed Bridges [J]. Journal of Suzhou Institute of Urban Construction and Environmental Protection, 2000, 13 (4): 21—27.
- [4] 朱战良. 广东九江大桥换索工程研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.  
ZHU Zhanliang. Research on the Cable-replacement of the Guangdong Jiujiang Major Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003
- [5] 刘永刚. 键为岷江大桥换索工程计算与分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.  
LIU Yonggang Calculation and Analysis for Cable Replacement Work of Qianwei Minjiang Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002
- [6] 李古暄, 邓尚瑛, 肖文, 等. 九江大桥斜拉桥调索计算方法[J]. 广东公路交通, 2000 (增刊): 176—178.  
LI Guxuan, DENG Shangying, XIAO Wen, et al Calculation Method for Cable Force Adjustment in Jiujiang Bridge [J]. Guangdong Highway Communications 2000 (sup): 176—178
- [7] 杜蓬娟, 张哲, 谭素杰. 斜拉桥合理成桥状态索力确定的优化方法[J]. 公路交通科技, 2005, 22 (7): 82—84.  
DU Pengjuan, ZHANG Zhe, TAN Sujie. Optimization of Cable Tension in Reasonably Finished State of Cable-stayed Bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (7): 82—84
- [8] 杜蓬娟, 张哲, 刘春城, 等. 斜拉桥索力张拉过程的最优控制[J]. 计算力学学报, 2005, 22(3): 326—329.  
DU Pengjuan, ZHANG Zhe, LIU Chuncheng, et al Optimization Control Method of Cable Tension during the Construction for Cable-stayed Bridges [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22 (3): 326—329.
- [9] 杜蓬娟, 张哲, 黄才良. 斜拉桥成桥后误差调整的优化方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (7): 1016—1018.  
DU Pengjuan, ZHANG Zhe, HUANG Cailiang. Optimization Method of Error Adjustment of Cable Stayed Bridge in Finished State [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37 (7): 1016—1018
- [10] 中华人民共和国交通部. JTJ 027-96 公路斜拉桥设计规范 (试行) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.  
P. R. China Ministry of Communications JTJ 027-96 Design Specifications of Highway Cable-stayed Bridge (on trial) [S]. Beijing: China Communications Press, 1996.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG/T D65-01-2007 公路斜拉桥设计细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
P. R. China Ministry of Communications JTG/T D65-01-2007 Guidelines for Design of Highway Cable-stayed Bridge [S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [12] 王文涛. 斜拉桥换索工程 [M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2006.  
WANG Wentao Cable Replacement of Cable-stayed Bridge [M]. 2nd ed Beijing: China Communications Press 2006
- [13] 魏建军, 刘忠玉. 拉索的悬链线解答在斜拉桥调索中的应用[J]. 公路交通科技, 2005, 22 (12): 78—81.  
WEI Jiandong, LIU Zhongyu. Cable Tension Adjustment in Cable-Stayed Bridge by Using Catenary Solution [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (12): 78—81.
- [14] 李宏江, 李万恒, 张劲泉, 等. 既有 PC 斜拉桥合龙段拆除的施工控制 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (8): 61—66.  
LI Hongjiang, LI Wanheng, ZHANG Jinquan, et al Construction Control for Removal of the Closure Segment in an Existing Prestressed Concrete Cable-stayed Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (8): 61—66
- [15] 李宏江, 王江, 张永明, 等. 天津永和斜拉桥换索后的索力调整 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (10): 79—83.  
LI Hongjiang, WANG Jiang, ZHANG Yongming, et al Cable Force Adjustment after Cable Replacement for Tianjin Yonghe Cable-stayed Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (10): 79—83.