

YAN XUE

研
学





三塔悬索桥体系转换施工工法研究与应用

文_王小勇 (广西生态工程职业技术学院, 教师, 高级工程师)

刘安金 (柳州欧维姆工程有限公司, 项目经理, 高级工程师)

张玲玲 (广西桂林捷邦建筑工程有限公司, 项目技术负责人, 工程师)

卢智玲 (广西生态工程职业技术学院, 教师, 工程师)

朱丽 (广西生态工程职业技术学院, 讲师, 硕士)

悬索桥, 因其卓越的跨越能力、优美的线型得到广泛应用。早在19世纪, 国外就开始研究建造自锚式悬索桥。国内悬索桥发展远晚于国外, 直到2001年我国才建造了第一座柔性悬索桥。

自锚式悬索桥施工通常采用“先梁后缆”的工艺, 这其中必然存在一个体系转换的过程。由于主缆的空缆线型与成桥线型差异很大, 特别是中跨跨中位置标高变化较明显, 这就导致吊索长度在空缆状态下偏短, 需要接长杆进行接长才能实现张拉。由于吊索承载力、张拉设备的数量和能力、主梁和主塔的承载力等各种因素的限制, 全桥的吊索大部分必须逐步多次分级张拉, 才能达到设计理论值。

体系转换方案的优劣对施工安全和施工质量影响较大, 所以, 在实际现场施工工况下, 如何准确地张拉使全桥的吊索拉力达到设计状态, 是吊索体系转换过程中必须高度重视的一个问题。

一、工程概况

山西省临汾市尧都区涝洳河生态建设工程尧贤街北延跨洳河桥主桥, 采用三塔四跨双索面自锚式悬索桥, 两主跨均为168m, 跨径布置为496m (80m+168m+168m+80m), 见图1。



图1 主桥效果图

主桥共设2根主缆, 用PPWS法 (预制平行钢丝索股法) 编制。每根主缆由37股127丝 Φ 5.25mm抗拉强度1670MPa高强镀锌钢丝组成, 主缆紧缆后其直径为397.40mm (索夹处空隙率18%) 和402.40mm (索夹间空隙率20%)。

吊索均由 Φ 7mm的高强镀锌钢丝成品索组成, 吊索顺桥向间距6.40m。中跨25个吊点, 边跨9个吊点, 每个吊点设置2根吊索, 2根吊索中心间距0.70m, 全桥共284根吊索。按锚固结构分类, 吊索分两类: 普通吊索及特殊吊索。按锚具规格及钢丝数量分类, 分为三类: 73丝, 248根; 109丝, 24根; 163丝, 12根。

3个索塔采用外形一致的混凝土结构, 全高60m, 桥面以上塔高45m。自锚式悬索桥的主缆直接锚固于主梁梁体内, 为满足主缆索股分散锚固和平衡主缆的竖向力, 对锚固区主梁进行局部加高至6.70m。

主梁为钢组合梁, 采用箱型结构的双主梁截面形式, 全宽50.50m, 梁高3.35m。钢梁安装完成后先进行预制桥面板的安装与湿接缝浇筑, 再在体系转换完成后进行桥面调平层混凝土施工, 之后进行桥面沥青铺装层施工, 最后完成护栏等附属设施施工。

二、吊索安装

以主塔为中心, 中跨、边跨同步安装, 边跨从塔端往散索鞍方向安装, 中跨由塔端向跨中方向安装, 总体方向由低往高。

一是将吊索运到桥面相应编号的安装位置下方。在吊索待安装位置对应的猫道层面上剪出长1m、宽0.50m左右的长方形开口, 便于为吊索安装和在体系转换过程中吊索随主缆线型的变化而变化提供足够的活动空间, 同时吊索安装完毕后做相应安全防护措施。

二是吊索安装需卷扬机配合，将卷扬机钢丝绳从索夹导向，预留长方口放下，与上端锚头连接，并将吊索吊起，用插销将其上端与索夹耳板连接。对于不需要接长的吊索，可直接将下端锚头放入索导管内，而对于需要接长的吊索，则需提前将张拉杆与吊索的下端锚头连接，再将下端锚头放入对应的索导管内。

三、体系转换

(一) 猫道改吊

在张拉吊索过程中，主缆的线型随着施工进度不断变化，为了使猫道随主缆的线型变化而变化，需要把猫道悬挂于主缆之上，使其保持与主缆线型基本一致，并根据计算放松猫道锚固系统调整装置的调节螺母，控制猫道与主缆间距离相对不变。

在猫道上每间隔8m有猫道横梁型钢的位置，用一根 $\phi 16$ 钢丝绳交替将猫道悬挂于主缆上，猫道的稳定和线型通过主缆来实现。

(二) 体系转换监控指令说明

体系转换指令计算采用的基础数据源于《临汾市尧都区滂汜河生态建设工程—跨河桥梁及道路工程（尧贤街北延跨汜河桥）施工图设计》《临汾市尧都区滂汜河生态建设工程—尧贤街北延跨汜河桥施工组织设计》。

吊索张拉应以吊索张拉力为主控因素，吊索无应力长度参考。

吊索张拉方案采用24台千斤顶同步张拉方案，因本桥吊索为双吊索，最多可同时张拉12对吊索，张拉过程需保证同步对称张拉。

施工单位应根据吊索张拉方案计算、制造接长杆，并考虑不同索径对应接长杆直径差异的影响。

吊索张拉过程需结合索鞍顶推逐步进行，索鞍顶推需逐步分次顶推，并监测桥塔应力及塔顶偏位，保证混凝土索塔不开裂。

为保证张拉过程索夹不出现滑动，吊索张拉过程需进行索夹紧固螺栓的分次紧固，至少保证70%螺栓紧固力，确保摩擦力储备充足。

体系转换完成后，在进行支架拆除时，应对称同步拆除支架，拆架方案需经过建设单位、设计单位及监理单位同意。

施工单位在体系转换前应对各数据进行复核、确认，确保无误，为体系转换及成桥线形控制奠定良好基础。

因给予吊索加工的周期较短，吊索生产厂家和安装单位应根据体系转换对吊索张拉顺序进行合理安排。

(三) 吊索张拉工艺工法

由于在主缆空缆状态和成桥状态的变化过程属于大变形范畴，各节点的间距变化量是个动态的过程。为了方便吊索安装张拉，必须对部分吊索设置临时加长杆。根据监控指令提供的各阶段吊索张拉力，以吊索的位移来确定使用加长杆和千斤顶的类型和数量。

第一，按监控方案要求采用足够数量的千斤顶从边跨跨中、中跨1/4跨和3/4跨开始张拉，遵循中跨、边跨基本对称加载的原则对其施加拉力，使主缆从空缆状态逐渐转换为成桥状态。

第二，在吊索锚点下方双主梁箱体作为操作平台，对吊索进行张拉。

第三，体系转换方案按监控指令进行，吊索张拉方案如下：分24个步骤张拉，D1~D18、D28~D36吊索均是一次张拉到位。D19~D27分两次张拉到位，第一次因伸长量较长，需将2根1.20m张拉杆通过连接器对

接，张拉完第一轮后拆除接长的一根，留端头一根通过临时锁紧螺母临时锚固。吊索张拉控制力及索鞍顶推方案根据施工监控单位提供数据执行，见表1。

第四，张拉准备。先安装吊索，并将需张拉的吊索的下端锚头与张拉杆连接，且吊索安装的进度必须要满足体系转换的需要。选用24台YCW200B千斤顶能满足张拉需求，最大张拉力1860kN，张拉力大于1200kN选用Tr90×8，40Cr材料张拉杆，张拉力小于1200kN，选用930MPa， $\phi 50$ 精轧螺纹钢，见表2。

第五，吊索张拉工艺技术要求。在此张拉过程中，将严格按照监控方案按序、分次进行张拉及索鞍顶推。在张拉过程中，需实行张拉力与锚杯外露量双控。以张拉力控制为主，锚杯外露量控制为辅。具体张拉方法有如下七个步骤。

一是选择合适的千斤顶、撑脚、配套张拉杆、张拉螺母、锁紧螺母、哈佛垫板，并对张拉杆、张拉螺母、锁紧螺母和哈佛板进行强度校核，确保张拉安全。

二是将上述设备按图2所示安装到位。

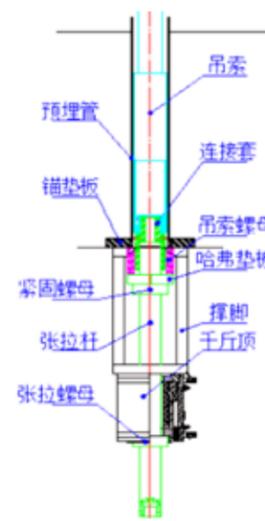


图2 吊索张拉示意图

表1 吊索张拉工艺技术要求

张拉步骤	张拉过程描述	张拉力 (kN)	备注
1	清空桥面无用荷载		—
2	安装D5吊索	2	D5、D16、D30张拉到位
	安装D16吊索	71	
	安装D30吊索	64	
3	安装D6吊索	2	D6、D15、D31张拉到位
	安装D15吊索	10	
	安装D31吊索	8	
4	第一次索鞍顶推，顶推230mm		—
5	安装D7吊索	34	D7、D14、D32张拉到位
	安装D14吊索	2	
	安装D32吊索	2	
6—22	此处省略步骤		—
23	安装D9吊索	1155	D9、D11、D35张拉到位
	安装D11吊索	1107	
	安装D35吊索	1042	
24	安装D10吊索	1150	D10、D36张拉到位
	安装D36吊索	1173	
25	9cm抗渗混凝土铺装		沿桥纵向对称铺装
26	第七次索鞍顶推，顶推40mm		索鞍成桥位置
27	10cm沥青铺装		注沿桥纵向对称铺
28	复测复调索力		二期铺装后调索

表2 吊索张拉组件参数表

序号	规格及名称	数量	备注
1	YCW250B千斤顶	8	索鞍顶推
2	YCW200B千斤顶	24	吊索张拉
3	张拉撑脚1	24	除0#吊索
4	张拉撑脚2	4	0#吊索
5	张拉杆Tr90×8，1.20m	24	—
6	螺母Tr90×8-D172-L80	24	—
7	$\phi 50$ 精轧螺纹钢，1.20m	56	—
8	$\phi 50$ 精轧螺纹钢螺母	80	—
9	内衬套Tr140×8- $\phi 50$	56	除0#吊索
10	内衬套Tr165×10-Tr90×8	24	D9、D11、D35
11	内衬套Tr195×12-Tr90×8	12	0#吊索

三是扭紧张拉螺母，开始张拉。在张拉过程中，如果有某个点千斤顶活塞不足需要回程时，所有工作点要全部停止，应统一回程。

四是泄压回程，准备再次张拉。

五是重复以上三、四步骤，直至吊索自带螺母扭上锚具至少8牙。

六是自带螺母扭上锚具后，泄压回程，扭紧张拉螺母，继续张拉，并严密监视主塔偏位，张拉至监控设计张拉力停止张拉。

七是扭紧吊索永久螺母，张拉完毕。

第六，张拉控制要点，有如下六个步骤。

一是所有张拉人员统一使用频道，信号清晰明确，严禁在张拉过程中聊张拉工作外的事情。

二是张拉前，各点要先检查油泵与油表的对应情况，进油管与回油管是否接对，试运行油泵检查是否能够正常运行。

三是指令统一由指挥员发出，各个工作点就位后随时报告各个点的情况，以便指挥员随时做出调整。

四是在张拉前各个油泵手要确认自己已经拿到油压的操控指令，对指令上的内容要了解清楚，如有疑问应及时反馈。

五是张拉时严格按照监控要求，各点必须同步张拉，指挥员必须明确各点已经准备完毕后方可发出张拉指令。

六是在张拉过程中，当有某个点出现状况需要停止张拉时，立即告知指挥员，且桥面所有工作点应停止张拉等待。待问题处理完毕后，通知指挥员，在明确各点都具备张拉条件后，由指挥员发出指令同步张拉。

（四）索鞍偏移量调整

吊索张拉过程需结合索鞍顶推逐步进行，索鞍顶推需逐步分次顶推，并监测桥塔应力及塔顶偏位，保证混凝土索塔不开裂：利用主索鞍格栅反力架，边塔单个主索鞍采用2台250t千斤顶将鞍座顶推到设计位置，拉杆及调距锁定板将鞍体临时锁定。中塔主索鞍无预偏，不需顶推。顶推次数、各次的顶推量及参考的顶推力按照施工监控指令实施。

顶推前应确认滑动面的摩擦系数，严格掌握顶推量，确保施工安全。

完成二期恒载后，再次调整主索鞍位置，使主索鞍回到无偏移状态，然后固定主索鞍。

（五）吊索张拉过程监控测量

吊索张拉全过程采用动测仪测量吊索的吊索力，每天吊索张拉完成后在夜间进行测量。

测点布置：每根吊索。测量方法：基频法。测量仪器：JM268动测仪。测量要求：为消除日照温差引起的塔柱变化，位移测量应选择在温度变化小、气候稳定的时间段进行，测量工作持续的时间越短越好。一般应在0时至日出前完成测量。测量工况：吊索张拉全过程观测。

（六）索力调整

吊索张拉完成后，主桥进行二期恒载加载，包括混凝土铺装层、沥青铺装层、钢护栏安装等。完成后全桥进行索力测量，对存在索力偏差的吊索进行二次调整。

经过为期4天的全桥多次测量，全桥索力测量均已全部完成，其中D19~D27号短吊索使用千斤顶拉拔测得，其余吊索均使用索力动测仪测得。测量时，7次索鞍顶推已全部完成，桥面混凝土铺装完成，沥青铺装及人行道铺装、护栏安装等尚未开始。根据索力测量结果及反复计算，最终仅需调整10对吊索，详见表3。2次调索率为13.8%，相对于284根吊索，调索数量较少。调索完成后全桥吊索索力均满足设计、监控单位及规范要求。

四、问题与解决方法

（一）主索鞍易前后滑动

主索鞍摩擦系数较小，在边跨、中跨吊索张拉过程中，因主塔不平衡力原因，主索鞍有滑移的趋势。采取在主跨方向设计限位拉杆、在边跨侧布置临时限位垫板的预防措施，防止主索鞍往边跨侧移动。在不需要顶推的时候，保证主索鞍无滑移现象。

（二）同一个索夹两根吊索索力不均匀

该项目为双吊索结构体系，监控出具的吊索索力为单根索力，为保证同一个索夹两根吊索索力均匀一致，千斤顶的油压控制必须按计算油压张拉到位后再同步旋紧吊索螺母，过程中监视并补足油压，保证吊索索力。

（三）实际吊索索力与伸长量偏差

吊索张拉虽以索力控制为主，伸长量控制为辅，但张拉过程中张拉力和伸长量控制均不超理论的3%，以张拉力或者伸长量先到达理论数据的103%为准，可视为完成本次张拉。

（四）体系转换过程中索夹易滑移

为保证张拉过程索夹不出现滑动，吊索张拉过程需进行索夹紧固螺栓的分次紧固，确保摩擦力储备充足。

表3 吊索索力调整表

调整组号	吊索编号	现实测力值 (kN)	调整目标值 (kN)
1	LD11-1	1360	1500
	LD11-2	1371	1500
2	RD11-1	1355	1500
	RD11-2	1366	1500
3	LD36-1	1106	1000
	LD36-2	1113	1000
4	RD36-1	1223	1000
	RD36-2	1277	1000
5	LD29P-1	1339	1100
	LD29P-2	1289	1100
6	RD29P-1	981	1100
	RD29P-2	948	1100
7	RD13P-1	1243	1100
	RD13P-2	1293	1100
8	LD10P-1	1169	1000
	LD10P-2	1106	1000
9	RD10P-1	1242	1000
	RD10P-2	1131	1000
10	RD5P-1	996	1180
	RD5P-2	958	1180

五、结语

汨河桥为三塔四跨自锚式悬索桥，吊索数量多，同步张拉控制点多。该张拉工艺工法的研究与工艺装备的设计本着安全、质量、高效的原则进行，最终取得良好社会效益和经济效益，主缆线型、吊索索力、桥面线型、主塔偏位等指标均符合设计及规范要求，研究应用成果如下。

第一，主索鞍顶推分7次，最大顶推力2200kN，最小顶推力-1233kN。因存在反推力，须设置合理限位装置，防止主索鞍往边跨方向“反跑”。主索鞍与底板之间采取四氟板加润滑脂模式，摩擦系数仅0.034，主塔顶推完成主塔偏位在合理范围内，保证了主塔的安全，提高了结构的耐久性。

第二，吊索成桥索力与设计索力偏差全部在±3%以内，且同一个索夹两根吊索索力均匀一致，确保吊索受力安全，提高了主缆系统的使用寿命。

第三，吊索倾斜角度在吊索锚固索导管的转角范围内，吊索相对索导管居中，避免吊索水平受力，提高了吊索的使用寿命。

第四，桥面线型达到设计的预拱度，钢护栏线型美观，更提高行车舒适性。

该研究设计的工艺工法和工装设备成功地解决了体系转换过程中的主索鞍和索夹容易滑动、同索夹不同吊索索力的不均匀性、索力与伸长量的偏差等问题，取得了较好的社会、经济和环境效益，为同类型项目提供了较好的借鉴方法。C