

“成品索”悬索及吊索施工工艺

李东平 梁炜 彭春阳 甘科

【摘要】本文简要地介绍了国内第一座自锚式柔性悬索桥——丽君桥“成品索”悬索及吊索的施工工艺，对该种悬索的线型、索夹紧固力的加载情况进行了初步探讨。

【关键词】自锚式 悬索 索夹 紧固力

一、工程概况

丽君桥位于广西桂林市丽君路、三多路交叉口至环卫处附近，跨越丽泽湖，桥长120米，桥中心线为直线。桥面宽25.5米，其中机动车道按四车道设计为14米，分隔带 2×1.25 米，非机动车 2×2.5 米，人行道 2×2 米。本桥为三跨（25M+70M+25M）自锚式悬索桥。索塔为“门”式变截面钢筋砼结构，加劲梁为纵横向钢桁梁。桥面板为200mm厚现浇钢筋砼板，以刚性剪力键与桁梁结合形成迭合梁。主缆与吊杆分别采用由451根和61根 $\phi 7$ mm镀锌高强钢丝组成的成品索。其活载主要由桁架迭合梁承受，恒载主要由主缆和吊杆承受。

二、本工程的特点

桂林丽君桥形式独特，是国内第一座柔性索自锚式悬索桥。它在结构上和施工上主要有以下特点：

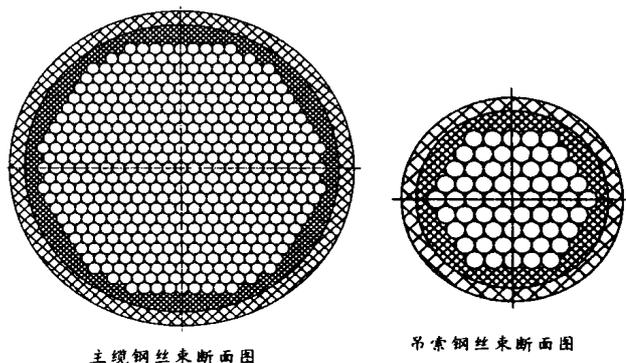
1. 主缆锚在锚固梁上，加劲梁梁端头亦埋入锚固梁上，锚固梁通过板式橡胶支座放置在桥台上，加劲梁水平力与主缆水平力平衡。如主缆张力过大则容易引起加劲梁内力超限。造成加劲梁纵向失稳，甚至全桥垮塌。因此主缆和加劲梁内力计算和施工控制相当重要。

2. 加劲梁（钢桁梁）采用满布膺架拼装，在

加劲梁合拢后方进行主缆、吊杆架设。这样，在施工过程中尤其在拆除加劲梁胎架（满布膺架时）吊索索力调整工艺较复杂。

3. 主缆采用451丝 $\phi 7$ 镀锌钢丝（外包双层PE）组成的成品索，沿索的方向扭角为 2° ，吊索采用PES7-61镀锌钢丝成品索，结构形式见图1，技术参数见表1。采用此索型无需庞大的紧缆设备，降低了成本并有效地保证了整根主缆在施工过程中免受雨水侵蚀。

4. 桥矢跨比为1/5.49，相对来说较大。为了



主缆钢丝束断面图

吊索钢丝束断面图

图1 主缆及吊索断面图

表1 主缆及吊索技术参数

规格型号	钢丝束面积 (mm ²)	钢丝束直径 (mm)	双护层索直径 (mm)	钢丝束理论重量 (kg/m)	破断荷载 (kN)	配用锚具规格
PES7-61	2348	63	81	18.4	3920	LZM7-61L
PES7-451	17348	163	189	136.2	28985	LZM7-451L

李东平：柳州欧维姆工程有限公司 工程师

确保给索夹施加的紧固力满足设计要求,采用了同步施力和多次复拧的施工方法。

5. 由于主缆是利用斜拉索的制造工艺在工厂制造的成品索,刚度较大,在卷盘、运输过程中会产生弯曲和扭曲现象。如处理不当,会给主缆线型调整和索夹定位带来极大的困难。在施工中我们通过倒拆数值计算和非线性计算算出无应力状态下主缆上的索夹位置,采取在工厂制造时预先在主缆上标注出索鞍索夹位置的方法成功地解决了这个施工难题。

6. 塔顶最大偏移量仅为 11mm,这就要求严格控制主桥脱架工艺。

由于上述特点,本桥的施工控制和工艺过程也较为复杂,下面就简要的介绍一下施工的有关情况。

三、施工工艺及控制

1. 施工控制目标值

a. 计算理论

(1) 对竖向载荷和温度采用平面有限元分析法。即建立平面杆系计算模型,主缆、吊杆为索单元,其它划分为梁单元,主缆与吊杆的刚度不计,进行非线性结构分析。

(2) 成桥状态加劲梁假定为只承受轴向力作用,由恒载产生的纵向弯矩比较小,忽略不计。在架设过程中,恒载作用在主缆上。本桥根据设计单位提供的跨度 L、垂度 T、荷载 W,利用抛物线方程 $Y=X\tan\alpha-(L-X)/2H$ 并参考设计部门确定的设计成桥线形来确定状态。

(3) 成桥坐标的计算,假定主缆自重沿索长方向均匀分布,而其他静荷载为沿水平方向均匀分布,用数值求解法求解坐标。

b. 索夹摩擦系数试验

索夹抗滑力的大小直接关系到桥梁的安全,为了弄清索夹实际摩擦系数设计部门委托柳州建筑机械总厂技术中心进行了索夹摩擦系数试验,

试验装配图如图 2。

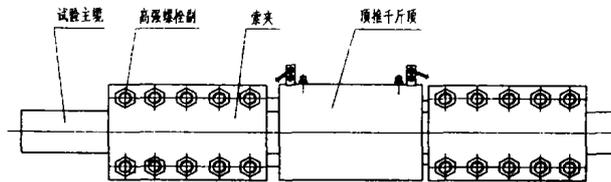


图 2 索夹抗滑试验图

根据设计要求,采用最小的一组索夹来进行试验,螺栓的紧固轴力与成桥后的螺栓紧固力相同为 180KN,根据多次试验,测得结果如下,螺栓副紧固轴力 $N=180KN$,索夹抗滑力 $F=900KN$,由索夹抗滑力经验计算公式: $F=M \cdot \mu \cdot Z$ 得:

$$\mu = 900 / (2.8 \times 180 \times 10) = 0.178;$$

其中 M 取 2.8

考虑到索夹长期使用的安全性,我们还做了索夹螺栓紧固轴力随时间损失的试验,试验时间持续了 10 天,试验结果表明,索夹的抗滑力在测量时间内没有明显损失。

c. 施工控制目标值

(1) 成桥状态主缆各索长值见表 2。

(2) 成桥状态主缆各跨弹性伸长值见表 3。

表 2

位置	索长计算值 (m)
边跨	30.631
中跨	75.766

表 3

位置	弹性伸长值 (m)
边跨	2×66.4
中跨	134.7

(3) 索夹吊点位置

索夹位置以主缆无应力长度形式给出,各单元无应力长度见表 4,单元号示意图及索夹编号如图 3:

(4) 索夹紧固力

根据实际试验得出的摩擦系数,本桥各个索夹的螺栓紧固力如表 5,各索夹编号示意图见图 3。

(5) 索鞍预偏量

根据成桥状态进行倒拆计算, 每个施工步骤索鞍预偏计算结果见表 6。

表 4 主缆各单元无应力长度

单元号	1	2	3	4	5	6	7
长度	3609.2	3204.9	3342.6	3508.8	3699.8	3912.0	4142.0
单元号	8	9	10	11	12	13	14
长度	5139.5	4247.2	3530.3	3435.0	3347.4	3268.2	3198.0
单元号	15	16	17	18	19	20	
长度	3137.4	3087.0	3047.1	3018.4	3001.0	2995.2	

表 5 索夹紧固力表

索夹编号	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	A1	A2
紧固力(KN)	3960	4320	5280	6160	6440	7360	7360	1800	1800
索夹编号	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11
紧固力(KN)	1800	2160	2520	2940	2940	3840	4320	4800	4800

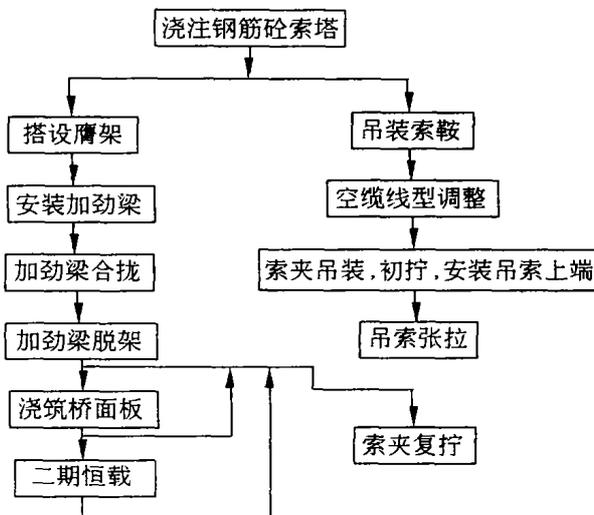
表 6 索鞍预偏量表

工况	状态	索鞍预偏量(mm)
1	空缆状态	+297.9
2	安装吊杆后	+247
3	安装钢梁后	-91.5
4	浇注配重横梁后	-56
5	浇注砼桥面板后	-96
6	安装二恒后	-20
7	成桥状态	0

注:表中“+”号表示向跨中侧,“-”号反之。

2. 施工工艺

2.1 主桥上部结构施工工艺流程图



2.2 索鞍、主缆及吊索主要施工步骤

本桥主缆、吊杆分别为柳州建筑机械总厂生产的 PES7-451 和 PES7-61 镀锌钢丝成品索, 成品索总成图及断面图见图 4。

2.2.1 起吊设备选择

由于桂林市及附近无大吨位吊车, 经过经济分析和验算, 采用搭设一简易支架作为吊装反力架, 利用卷扬机系统安装主缆和索鞍。

2.2.2 索夹安装工作平台

根据本桥跨度不大, 索塔高度亦较小(总高

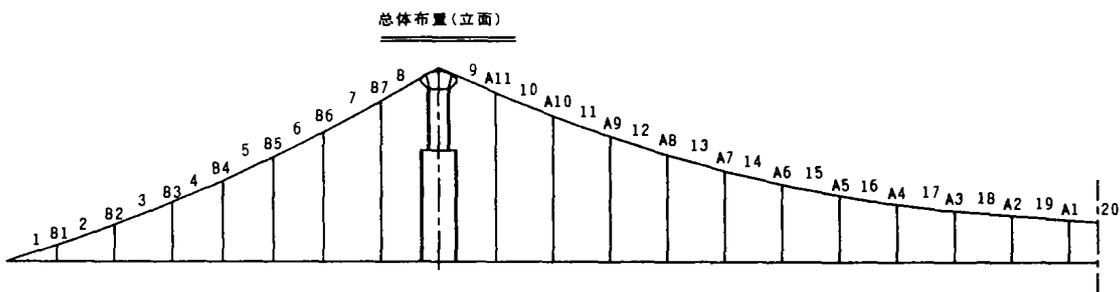


图 3 全桥总体布局及索夹、吊杆图

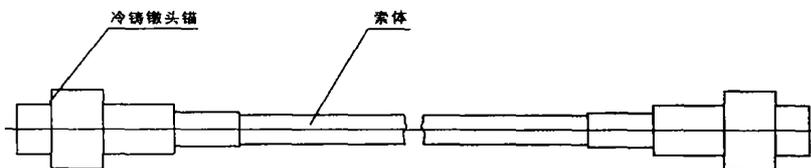


图 4 主缆及吊索总成示意图

仅 16.35m) 的特点, 用脚手管设计制作了一活动工作平台。索夹、吊杆安装, 索夹复拧均在活动工作平台上完成。

2.2.3 索鞍安装

索鞍如图 5。在索塔反力架上安装了索鞍临时固定装置, 通过调节临时固定装置的螺杆来调整索鞍的位置。利用 2.2.1 中起吊装置安装索鞍。安装时用全站仪对其位置进行测量, 使其符合设计要求。定位后锁紧临时固定装置的螺杆, 待脱架时旋松临时固定装置的螺杆以控制索鞍偏移及塔柱偏移。

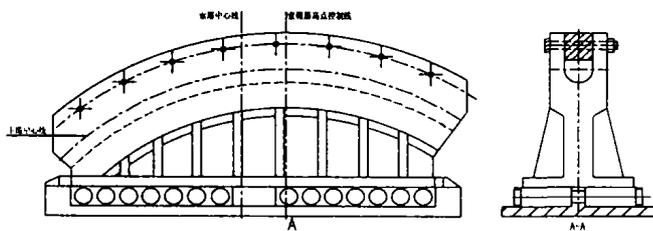


图 5 索鞍示意图

2.2.4 主缆安装

在已架好的钢桁梁上沿桥纵向在桥两侧铺两条 4 米宽的便道, 在便桥上沿桥纵向每隔 2 米设一个导向滚轮支架, 待主缆运到工地后, 用吊车将主缆索盘放到特制放索架上, 用卷扬机牵引主缆沿桥纵向直线铺开, 并将主缆两冷铸锚穿入锚碇横梁, 旋上螺帽。在主缆上选择合理的吊点, 用卷扬机起吊并放入索鞍槽内。

2.2.5 空缆线型的调整

a. 按照表 3 中所示数值在工厂制索时标志出主缆锚头锚固点位置以及索鞍索夹在主缆上的位置, 同时用与主缆不同的颜色沿主缆纵向标出基准线以控制主缆纵向扭角。

b. 现场实测东西锚碇横梁、索塔顶部、索鞍的位置坐标。并对工厂所做标记进行修正。

c. 调整锚头位置, 固定锚头。

d. 纵向移动使主缆上索鞍位置标记和索鞍重合。

通过以上步骤调整好空缆线型。

2.2.6 索夹安装及螺栓复拧

根据主缆上已做好的标记点, 剥除装索夹位置处的聚乙烯护套, 并在主缆裸露处用 $\phi 1.0\text{mm}$ 软钢丝缠绕, 以增大索夹与钢丝间的摩擦力。用卷扬机将索夹起吊并按设计位置精确定位安装到主缆上, 用 YDCLLJ500-100A 型螺栓紧固千斤顶按设计要求给索夹螺栓施加预应力。为了保证索夹螺栓轴力, 每个索夹螺栓安装一台 YDCLL500-100A 型螺栓紧固千斤顶, 以并联方式连结, 以确保同一索夹上所有螺栓同步加载。本桥共分四次复拧索夹螺栓, 其工况为: a. 钢梁脱架后、b. 桥面砼浇注完后、c. 桥面二期恒载完成后、d. 通车一年后。

2.2.7 安装吊杆

先将吊杆下锚头穿过钢桁梁锚孔处, 拧上螺母, 再将上锚头通过栓销与索夹连接。在梁下安装 YCW150-200 型千斤顶, 调整吊杆索力, 直至符合设计要求。

2.2.8 钢桁梁脱架

反复调整吊杆索力, 以便主缆线型符合设计要求, 拆除钢桁梁下的膺架, 使钢梁重量全部由吊杆和主缆承受, 再次调整吊杆索力并复拧索夹螺栓。

2.2.9 调整索鞍预偏量

用千斤顶调整索鞍位置, 同时用仪器测量索塔顶偏移量, 防止超过设计允许值。

2.2.10 浇注桥面砼板

分段浇注桥面砼, 同时调整吊杆索力及索鞍偏移量, 保证索塔的安全。等桥面砼浇注完后, 再次复拧索夹螺栓。

2.2.11 固定索鞍

待二期恒载完成后, 第三次复拧索夹螺栓, 并

将索鞍顶推至使塔偏最小的位置，然后与索塔焊接固定。

2.2.12 防腐

主缆上钢丝裸露处用北京航空材料研究院生产的 HM105 阻蚀防腐密封剂防腐。主缆、吊杆安装防水罩，并在锚头外露部分安装保护罩，内注防腐润滑脂。

2.3 各工况吊杆实测吊索力值，索夹紧固力值及主缆线型

2.3.1 吊杆索力调整情况

工况一. 钢梁脱架前第一次张拉顺序：中跨 A5-A1, A6-A11 同时边跨 B4-B1, B5-B7

工况二. 钢梁脱架前第二次张拉顺序：中跨

A5-A1, A6-A11 同时边跨 B4-B1, B5-B7

工况三. 桥面第一阶段砼浇注过程中. 为控制塔偏, 部分索力调整 (西塔 B2、B4)。顺序：先 B2 后 B4

工况四. 桥面第一阶段砼浇注完后, 部分索力调整 (A1、A2、A3)。顺序：A3 → A1

工况五. 桥面砼浇注完后, 顺序：中跨 A5-A1, A6-A11；同时边跨 B4-B1, B5-B7。

各工况吊索力值见表 7

2.3.2 索夹紧固过程及每次索夹复拧前紧固力损失情况

第一次：钢梁脱架前；

第二次：钢梁脱架后, 索夹紧固力损失值: 约

表 7 各次吊杆调索索力表

次数	吊杆编号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
第一次	张 拉 力 (KN)	84.4	84.4	84.4	84.4	84.3	84.1	84.8	83.7	83.3
第二次		126.6	126.6	126.5	126.5	126.3	126.1	125.7	125.4	125.0
第三次										
第四次		220	220	220						
第五次		300	300	300	300	300	300	300	300	300
	吊杆编号	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
第一次	张 拉 力 (KN)	83.1	90.2	176.9	162.5	162.3	161.9	161.5	160.9	174.4
第二次		124.6	135.3	265.3	243.8	243.4	242.8	242.2	241.4	261.5
第三次					450		450			
第四次										
第五次		300	350	650	650	650	650	650	650	650

表 8

	跨中	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
设计高程 (m)	156.822	156.844	157.020	157.374	157.906	158.620	159.518	160.603	161.890	163.351
	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	
设计高程 (m)	165.021	166.890	153.608	154.772	156.243	158.038	160.174	162.665	165.522	

表 9

	跨中	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
南主缆东 (m)	156.935	156.950	157.079	157.434	157.958	158.681	159.563	160.680	161.892	163.358
南主缆西 (m)	156.935	156.950	157.099	157.441	157.970	158.709	159.579	160.644	161.893	163.361
北主缆东 (m)	156.890	156.900	157.080	157.473	158.006	158.677	159.593	160.682	161.903	163.290
北主缆西 (m)	156.890	156.907	157.122	157.480	158.044	158.787	159.585	160.602	161.905	163.397
	A10	A11		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
南主缆东 (m)	165.041	166.982		153.684	154.961	156.441	158.193	160.322	162.802	165.704
南主缆西 (m)	165.106	167.014		153.680	154.883	156.476	158.304	160.465	162.903	165.766
北主缆东 (m)	165.042	167.078		153.746	154.961	156.515	158.182	160.214	162.696	165.703
北主缆西 (m)	165.106	167.012		153.845	155.036	156.483	158.274	160.339	162.813	165.756

10% ; (B7 : 11~12% ; B6 : 11~12% ; A11 : 10% ; A6 : 7~8% ; A1、A2 : 5~6%) ;

第三次 : 桥面砼浇注完后, 因工期原因, 未紧固 ;

第四次 : 二恒完成后, 索夹紧固力损失值 : 约 5% ; (B6~B7 : 5~6% ; A11 : 5% ; A10 : 3~4%) ;

索夹紧固力损失情况 : 索夹倾斜角度越大, 紧固力损失越大 ; 索夹紧固力越大, 紧固力损失也越大。

2.3.3 各工况控制点主缆线形

1. 空缆设计高程 (见表 8)

2. 空缆实测高程

因主缆本身有弯曲和扭曲现象, 故空缆实测坐标与设计坐标有较大差别, 见表 9。

3. 钢梁脱架前, 第一次张拉吊杆后。

因主缆本身有弯曲和扭曲现象, 导致少数吊杆无法张拉, 故主缆实测坐标与设计坐标仍有较大差别, 跨中坐标比设计值高约 20mm。

4. 脱架前, 第二次张拉吊杆后。

因主缆内力已较大, 主缆实测线型与设计值已相差很小, 跨中坐标比设计值高约 6mm。

5. 钢梁脱架, 跨中坐标比设计值相差约 2mm。

(上接第 38 页)

随着我国钢材的日益发展, 必将会有进一步发展, 部分国内钢梁桥见表 9。

随着碳纤维的发展和应用在桥梁中, 大跨度桥梁必将在现有基础上向更大方向发展。世界上超越 3600m 的大跨度、实现跨洲际大桥已在不远。我国随国民经济的飞跃发展, 正在筹建中的 21 世纪初海湾内修建大桥中, 如广东省通往海南省的琼州海峡大桥, 该桥总长 19.5 公里, 广东省做的预可行性方案中, 曾列出以悬索桥和斜拉桥为主的两种方案, 其中悬索桥以 1000+2000+1000

六、结论

1. 实测值证明, 通过吊杆的初张拉和脱架前的第一次和第二次张拉, 主缆的线型也越来越接近计算值, 第二次张拉完成后线型计算值和实测值只差 6mm, 随着吊杆拉力和荷载的增大, 主缆的线型越来越接近计算值, 线型得到了控制。因此用数值法求解空缆坐标和主缆长度是能满足精度要求和可靠的。

2. 选择合适的吊杆张拉顺序和严格的索力控制程序可较好控制塔偏。整个施工过程中, 最大塔偏量为 6mm, 此次控制截面应力为 1.8Mpa, 未出现拉应力。

3. 多次复拧有效地消除了索夹紧固力损失, 确保了桥梁安全运营。

4. 结束语

丽君桥为国内第一座柔性自锚式悬索桥, 它成功地将斜拉索制索工艺应用到悬索桥中, 在城市桥梁发展的探索中迈出了重要一步。

由于笔者水平有限, 文中纰漏, 敬请指正。

参考文献

1. 桂林市市政综合设计院《桂林市丽君桥新建工程》
2. 《桂林市丽君桥施工监控报告》
3. 《桂林市丽君桥索夹试验报告》

为一个单元, 二个单元为 12 公里, 剩下部分用 900+1800+900 的悬索桥连接方案。再如规划中的零仃洋大桥, 西起珠海市金鼎镇, 东达香港屯门烂再嘴, 全线共长 27 公里。零仃洋大桥设计规划宏伟壮观, 在所横跨的零仃洋海面上, 共有特大通航主桥三座 (悬索桥或斜拉桥), 该桥建成后, 将成为我国桥梁史上的一项标志性工程。

再有如勃海湾、黄海区域等, 大型跨海大桥都在等待去开发建造, 一个大跨度桥梁的春天正在向我们招手, 而钢桥必将灿烂辉煌。