

# 单根调索技术在卢浦大桥 合龙前钢拱肋轴线调整中的应用

韦福堂 孙长军

(柳州欧维姆机械股份有限公司 545005)

**摘要:**上海卢浦大桥是一座主桥跨度550米的全钢结构的中承式拱桥。桥面以上钢拱肋采用悬臂吊装,斜拉扣索承重的施工方法,本文针对该桥的安装特点介绍钢拱肋合龙之前其轴线调整方案及钢绞线平行拉索扣索单根调索技术。

**关键词:**扣索 钢拱肋 轴线调整 单根调索 标高

## 1. 概述

卢浦大桥是上海鲁班路越江工程一座特大中承式全钢结构系杆拱桥,主桥跨径为100m+550m+100m。主桥中跨桥面以上拱肋采用拱上吊机分段垂直提升、现场焊接、斜拉扣挂承重悬臂施工方法。桥面以上拱肋半桥共分14个吊装节段,每节段由设有永久风撑和临时风撑的上下游拱肋构成。拱肋从8#拱肋开始每节段设一

层临时扣索,考虑到拱肋上受力要求和拱肋的安装要求,在每个拱肋顶部两侧布置2个临时扣点,则上下游共设4束临时扣索。扣索采用OVM钢绞线拉索体系,分OVM250-7、OVM250-12和OVM250-27三种型号规格,拱肋顶面扣点横向距离为5米,塔上锚点横向距离为0.4米,合龙前主桥立面如图1所示。

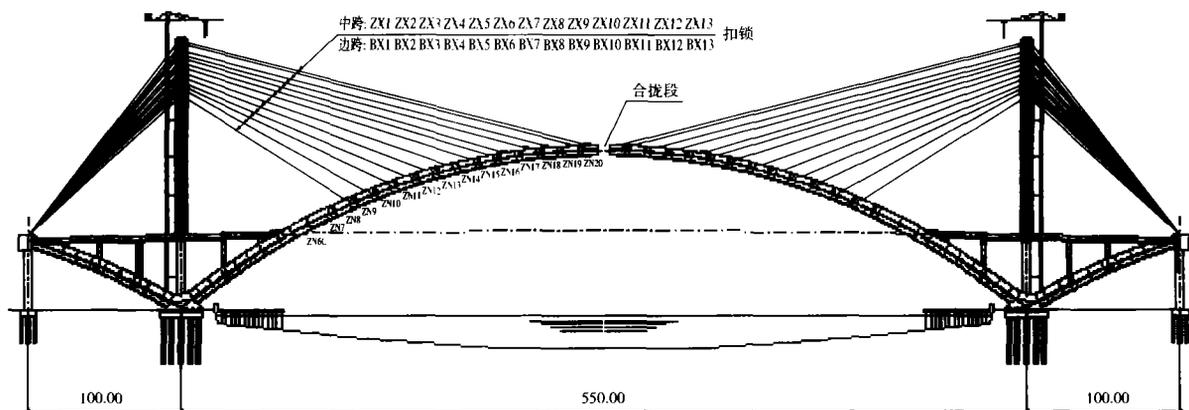


图1 主桥合龙前立面图

在扣索施工中,按临时扣索安装各个阶段理论计算的索力施工时,发现在保证扣索的安全系数的前提下,各个阶段的设计索力所对应的拱肋的挠度、位移值与实际值有所偏差,这是由于结构材料、施工临时荷载等与设计不完全一致所引起的,为了安全起见,施工时以扣索索力控制为主,拱肋标高控制为辅。随着偏差值的累计,待拱肋安装到Z20节段时,控制端口标高较拱肋理

论轴线低2.8米。由于合龙段的长度必须待Z20节段焊接安装后通过调整扣索索力达到理想线型后才能最终确定,因此合龙前必须进行大规模的调索施工。

## 2. 合龙前拱肋标高调整方案

针对卢浦大桥拱肋安装过程中的监控数据及环境状况,在综合分析卢浦大桥安装条件的基础上及现有扣索张拉工艺的前提下,经过设计单位

的结构计算,重点考虑在桥梁结构和扣索安全的情况下,采用多次张拉法<sup>[1]</sup>,即在整个标高调整过程中,对所有中跨扣索进行分批、分步骤张拉,形成了“三轮二十四步”的调索方案。由于合龙拱肋处于最大悬臂状态,工况环境复杂,标高调整过程中拱肋、索塔变形与受力状况比一般单纯拱桥和单纯斜拉桥变形和受力复杂得多,因此对以张拉扣索应力来实现标高调整的施工工艺提出了非常严格的技术要求。在增加扣索应力的前提下,刚性拱肋的变形能力和拉索的相应承受能力必须重点考虑,尤其是扣索在调整过程中的安全性。由此形成以下特点:

其一,标高调整过程中、扣索在服役过程中、轴线调整完成后、合龙段吊装过程中以及今后桥面吊装、系杆安装、体系转换过程中原则上保证扣索安全系数必须达2.0以上。但由于调整过程中,拱肋标高的抬起量改变和索塔的位移都会引起扣索应力变化,所以正在调整的扣索其单根钢绞线的临时受力可以达到 $0.58\sigma_b$ 。

其二,由于合龙前扣索数量比较多,每半桥有13层52束扣索,受设备条件限制,每次同时调整两层,即存在4个工作点同时张拉,在这种情况下,中边跨必须保证钢索塔水平受力差小于500kN,对于中跨上下游4个工作点的调整要求同步进行。

其三,根据实际情况,采用整体调索法已经失去意义,考虑到OVM250钢绞线拉索的调索可行性,采用单根调索法进行。要求每一束拉索调整后整束拉索的实际应力与该工况下的设计应力差保证在5%之内。三轮中若需要对边跨扣索进行调整(张拉或放松),则采用整体法进行。

其四,调索过程中加强配合,将施工参数如拱肋标高、拱肋位移、扣索应力以及钢索塔位移、应力等及时反馈给设计方,以调整下一步的扣索调索施工,主要是索力和施工步骤。

### 3. 单根张拉调索工艺

单根张拉调索是针对钢绞线群锚而言,对群锚中预锚固的钢绞线采用穿心式千斤顶对单根钢绞线进行预张拉,达到对该根钢绞线施加预紧力的

方法。对普通群锚的张拉而言,采用反复张拉自锚法,放张时,依靠限位板的作用,使夹片随钢绞线回缩跟进,达到自锚的效果,此时的工作夹片不可避免要反复夹持钢绞线。而卢浦大桥钢绞线拉索扣索的张拉方法与普通锚具的张拉有所区别,就是针对扣索的特殊情况,主拱肋处于大悬臂状态时,拱肋和扣索已形成振动激励系统,扣索振动极为复杂,为了保证扣索锚固的可靠,单根调索时不能采用限位板的“自锚”<sup>[2]</sup>形式进行,而要采用增加辅助张拉支座的方法,如图2所示,此法可以避免工作夹片因反复、循环夹持而影响锚具锚固性能的可能性。

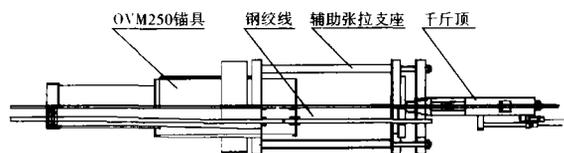


图2 单根调索工艺

#### 3.1 单根张拉控制力

单根调索的关键和难点就是单根张拉力的确定。施工中不是单纯根据整束扣索设计索力按钢绞线根数离散平均后的索力值,而是充分考虑了拱肋与钢索塔的变形、位移及垂度而导致钢绞线弹性模量折减等非线性影响。在卢浦大桥的扣索施工中,经过大量的结构、受力计算,结合实测结果,较准确地确定了不同拉索束上单根调索张拉力的具体数值。

#### 3.2 钢绞线索力均匀性控制

扣索虽然作为临时施工措施,但根据卢浦大桥主桥扣索施工规定:临时扣索在可靠性、安全性方面按正式工程中斜拉索索具所具有的重要性来控制。因此,不管是初始安装,还是索力调整,钢绞线单根索力的均匀性都是必须保证的。拱肋轴线(标高)调整过程中可采用如下两种控制方法。

##### 3.2.1 等张拉力控制法

由于每束扣索固定端在初始安装时就预埋了单根振弦式压力传感器,传感器的响应索力值实际是拱肋、钢索塔的变形和位移的直接反映,调

索可以根据该传感器即时变化值确定该时刻下的钢绞线的张拉控制值, 保证已调整的钢绞线索力相等。

### 3.2.2 等伸长值控制法

由于扣索在初始安装时采用了传感器辅助控制的等张拉力法安装, 各根钢绞线的均匀性已经得到了良好的控制, 调索时采用等伸长值法控制, 归纳起来可用下面公式表示:

$$\Delta L = \Delta L_e + \Delta L_f + \Delta L_u + \Delta L_v + \Delta L_y \quad (1)$$

$$\Delta L_e = (\sigma - \sigma_0) \frac{L}{E} \quad (2)$$

$$\Delta L_f = \frac{w^2 L^2 \lambda L}{24 A^2} \left( \frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

式中:

$\Delta L$  --- 单根张拉时控制延伸量;

$\Delta L_e$  --- 弹性伸长, 即扣索应力由  $\sigma_0$  增加到  $\sigma$  时弹性伸长;

$\Delta L_f$  --- 垂度影像修正长度;

$\Delta L_u$  --- 拱肋竖向位移和变形量, 根据设计院理论计算确定;

$\Delta L_v$  --- 所调整扣索在钢索塔对应锚点的沿桥方向位移量;

$\Delta L_y$  --- 夹片锚固时夹片的回缩量, 根据 OVM250 拉索群锚取 5mm。

## 4. 单根调索的实施

### 4.1 调索顺序和控制索力

施工到 Z20 节段临时扣索时, 安装索力还是按 11.4t/根进行控制, 目的就是在该工况下对所有扣索索力、拱肋轴线控制点的标高、钢索塔的位移及应力等进行一次彻底的测量, 把数据汇总到设计方, 以确定第一轮调索的步骤和控制索力。而且每轮调索完成之后, 都进行一次数据测量、收集、反馈、比较、优化, 然后确定下一轮的调索顺序和索力。原设计调整到理想轴线必须进行三轮二十四步, 实际工作中浦西只用了三轮一十八步, 浦东只用了三轮二十一步就达到了标高调整的要求。浦西拱肋轴线调整的步骤和索力控制值如表 1 所示。

表 1 浦西钢拱肋合龙前轴线(标高)调整步骤和索力控制值

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	16a	16b	17	18	19	20
ZX1	2592	2552	4517	4340	4068	4037	4009	3840	3668	3644	3473	3446	3359	3206	<b>4585</b>	3646	3639	3493	3472	3383	3204	
BX1	3842	3807	3941	3989	4019	4103	4078	4012	4061	4121	4102	4132	4083	4101	4127	4203	4146	4158	4184	4152	4178	4235
ZX2	2494	2431	3506	3333	3096	3049	2983	2549	<b>3628</b>	3592	3424	3369	3290	3142	2993	2999	2994	2851	2812	<b>3691</b>	3536	
BX2	<b>4090</b>	<b>4061</b>	4181	4225	4255	4333	4313	4257	4320	4375	4359	4389	4347	4364	4390	4459	4429	4441	4466	4439	4464	4517
ZX3	2833	2736	2524	2376	2169	<b>3616</b>	3544	3427	3174	3033	2977	2777	2683	<b>3623</b>	3447	3307	3396	3393	3223	3156	3081	2918
BX3	<b>4065</b>	<b>4039</b>	4159	4204	4237	4316	4298	4247	4292	4347	4334	4366	4328	4346	4374	4444	4400	4413	4441	4416	4442	4495
ZX4	3155	3022	2841	2689	2452	2199	2100	1930	<b>3637</b>	3501	3425	3198	3062	2971	2772	2644	2706	2703	2509	2415	2341	
BX4	4084	4064	4174	4217	4252	4327	4313	4271	4321	4373	4362	4390	4365	4382	4412	4476	4466	4480	4509	4489	4513	4564
ZX5	2706	2538	2388	<b>3415</b>	3356	3107	2983	2757	<b>3618</b>	3492	3396	3145	2967	2874	2657	<b>3554</b>	3645	3643	3430	3307	3235	3078
BX5	4487	4472	4578	4621	4658	4732	4722	4689	4719	4770	4762	4798	4774	4792	4823	4886	4822	4838	4868	4853	4877	4926
ZX6	2853	2649	2528	<b>3415</b>	3361	3124	2974	2693	2445	<b>3628</b>	3512	3245	3025	2929	2700	2602	2895	2893	2666	2515	2445	<b>3642</b>
BX6	4346	4338	4434	4473	4510	4578	4573	4552	4605	4651	4647	4683	4668	4686	4717	4773	4740	4756	4787	4777	4800	4845
ZX7	4814	4405	4242	4024	3529	<b>6201</b>	5900	5326	5234	5063	4831	4356	3908	3740	<b>6249</b>	6109	6194	6192	5789	5481	5364	5144
BX7	6308	6308	6429	6478	6529	6616	6617	6606	6586	6644	6644	6694	6687	6713	6756	6827	6786	6810	6852	6849	6878	6935
ZX8	4607	4144	4019	3826	<b>6022</b>	5680	5340	4675	4247	4099	3837	<b>6129</b>	5612	5439	5035	4921	4274	4272	<b>6152</b>	5908	5793	5602
BX8	5990	6002	6107	6149	6198	6274	6283	6292	6287	6337	6344	6392	6400	6425	6467	6528	6455	6480	6521	6527	6555	6603
ZX9	4534	4020	3928	3761	<b>6102</b>	5800	5422	4673	4589	4464	4174	<b>6231</b>	5649	5472	5074	4982	4544	4542	<b>6249</b>	5853	5740	5577
BX9	6271	6295	6386	6421	6466	6530	6548	6578	6612	6654	6668	6711	6736	6761	6800	6852	6786	6812	6850	6866	6892	6932
ZX10	4394	<b>6115</b>	6175	6032	5555	5289	4880	<b>6178</b>	5779	5675	5361	4906	<b>6114</b>	5932	5543	5472	5678	5676	5290	<b>6242</b>	6131	5993
BX10	8806	8855	8961	8998	9053	9124	9159	9231	9347	9395	9422	9475	9530	9565	9614	9674	9650	<b>9290</b>	9334	9372	9404	9448
ZX11	<b>6199</b>	5605	5565	5443	4987	4754	<b>6234</b>	5340	5104	5019	<b>6217</b>	5782	5092	4906	<b>6251</b>	6197	6334	6332	5963	5497	<b>6249</b>	6133
BX11	8558	8623	8712	8739	8786	8840	8886	8987	8898	8936	8971	9015	9093	9128	9172	9221	9200	9238	9275	9327	9357	9390
ZX12	<b>6230</b>	5626	5607	5503	5068	4865	<b>6257</b>	5304	5265	5196	<b>6208</b>	5793	5060	<b>6231</b>	5865	5827	6230	6229	5877	5382	5276	5181
BX12	9975	10062	10140	10159	10200	10243	10302	10443	10287	10317	10363	10402	10508	10547	10589	10631	<b>9820</b>	9861	9894	9965	9994	10019
ZX13	9835	<b>11115</b>	11106	10908	9973	9574	8519	<b>11536</b>	12018	11893	11084	10194	<b>12368</b>	11937	11141	11083	10763	10760	10005	<b>11377</b>	11144	10965
BX13	14876	15065	15179	15198	15255	15305	15433	15747	17099	17138	17236	17290	17529	17601	17668	17726	17774	17851	17897	18056	18105	18131

表 1 说明: a. 灰底字表示调索步骤和张拉控制力(kN);

b. 16a 和 16b 表示放松边跨索索力, 单位(kN);

c. 第一横栏表示步骤, 第一竖栏表示索号。

## 4.2 张拉力确定

由于中跨扣索每一层共四根拉索,而且同一节段的两根扣索的锚点距离比较小,相对于整个拉索来说可以看作是一束扣索。实际施工时,随着拱肋标高不断被抬高,索力也将会不断随着变化,前面已张拉钢绞线的索力会逐渐降低。为了使该束扣索张拉完成后,降低了的总索力与设计索力偏差不大,第一根钢绞线应超张拉,超张拉系数用公式(4)表示:

$$k = \frac{f \left[ \frac{\Delta L(n-1)}{n} \right]}{\frac{F_c}{n}} \quad (4)$$

式中:

K --- 第一根钢绞线超张拉系数;

n --- 扣索钢绞线根数;

$F_c$  --- 扣索控制应力。

但是,若张拉达到该延伸量时应力大于 $0.58\sigma_b$ ,则将 $0.58\sigma_b$ 应力下的油压值对应的延伸量作为其它钢绞线的张拉延伸量。实际施工过程中,除ZX13外,所计算出的延伸量及钢绞线过程控制值均在 $0.55\sigma_b$ 左右。

## 5. 单根调索索力控制结果

通过采取上述各方面的控制措施,卢浦大桥钢拱肋合龙前通过单根调索以调整钢拱肋轴线(标高)的施工是成功的,轴线、索力都得到了有效控制,标高调整到了预期的控制值。每一步骤中,调整后各扣索的索力值与设计理论计算值基本上是吻合的。以浦西第一轮第六步调索后对应索力值为例,其结果如表2示。从表2数据可以看出拱肋线型调整在施工中得到了很好的控制,而且索力值控制在规定范围内。另一方面,从表3中的各根扣索索力比较可以看出,单根调索的工艺也是可行的。该表中,同一级扣索中各根扣索的实际应力值基本上控制在3%的误差范围之内。

表2 浦西第一轮第六步调索索力比较

索号	ZX1	BX1	ZX2	BX2	ZX3	BX3	ZX4	BX4	ZX5	BX5	ZX6	BX6	ZX7	BX7
设计值(kN)	4068	4103	3096	4333	3616	4316	2199	4327	3107	4732	3124	4578		6616
实测值(kN)	4012	4062	2842	4273	3533	4292	2045	4334	3107	4653	3038	4569		6523
差值(kN)	-56	-41	-254	-60	-83	-24	-154	7	0	-79	-86	-9		-93
比较(%)	1.4	1.0	8.2	1.4	2.3	0.6	7.0	0.2	0.0	1.7	2.8	0.2		1.4
索号	ZX8	BX8	ZX9	BX9	ZX10	BX10	ZX11	BX11	ZX12	BX12	ZX13	BX13		
设计值(kN)	5680	6274	5800	6530	5289	9124	4754	8840	4865	10243	9574	15305		
实测值(kN)	5649	6191	6184	6461	5208	7777	4794	8872	4813	10008	9223	16613		
差值(kN)	-31	-83	384	-69	-81	1347	40	32	-52	-235	-351	1308		
比较(%)	0.5	1.3	6.6	1.1	1.5	14.8	0.8	0.4	1.1	2.3	3.7	8.5		

注:灰底一栏表示该步调整的扣索。

表3 浦西第一轮第六步调索各根扣索索力比较

索号	部位	传感器显示值(kN)	根数	合计(kN)	平均设计值(kN)	比较(%)
ZX3	上游	外	7	884.8	904	-2.12
		内	7	882.2	904	-2.41
	下游	外	7	880.0	904	-2.65
		内	7	886.0	904	-1.99
ZX7	上游	外	12	1549.2	1550.3	-0.07
		内	12	1580.0	1550.3	1.92
	下游	外	12	1587.0	1550.3	2.37
		内	12	1590.0	1550.3	2.56

## 6. 结束语

好点子解决大问题,卢浦大桥主桥钢拱肋轴线(标高)通过单根调索工艺实现预期调整的目标,主拱按照预计目标成功合龙,这是应用了OVM250钢绞线拉索体系可实现安全、可靠地进行单根调索这个突出的优点。在调索思路的指导下,OVM公司在施工中得到上海市工程设计研究院、上海基础工程公司等单位的大力支持与配合,使OVM250钢绞线拉索扣索在卢浦大桥施工中得以成功应用,在此深表感谢。同时,OVM钢绞线拉索体系可靠、安全的特点再一次得到了验证,这些优势必将会把钢绞线拉索推向更为广阔的应用领域。

### 参考文献

- [1] 林元培.《斜拉桥》.人民交通出版社.1994年4月
- [2] 交通部第一公路工程总公司.《公路桥涵施工技术规范》.人民交通出版社.2000年10月
- [3] 徐君兰.《大跨度桥梁施工控制》.人民交通出版社.2000年8月