

自锚式悬索—斜拉协作体系上部结构 施工方法

王晓山¹ 梁振有² 石伟¹

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005 2 中交公路规划设计院有限公司 北京 100088)

摘要:自锚式悬索-斜拉协作体系的新型桥型具有施工工艺复杂、施工技术难度大等特点。即要从理论上保证悬索体系与斜拉体系两边的受力平衡,同时要在施工中要同步监控、动态调整施工方案;另一难题就是悬索部分的空间无约束散索套在空缆状态下安装位置与成桥状态下偏移位置的控制。文章通过南平跨江大桥施工方案的选择以及上部结构的具体施工方法加以介绍,为以后类似的自锚式悬索-斜拉协作体系的施工提供参考。

关键词:自锚式悬索-斜拉协作体系 空间无约束散索套 控制 施工

1 工程概况

1.1 总体布置

该工程位于南平市区闽江上游西溪九峰山段三江汇流口附近,起点位于滨江路—鼓楼街交叉口,终点位于九峰路山麓,轴线距现有的九峰桥轴线约180m。该工程的建设,符合南平市“东扩西拓”公路主骨架与城市路网规划,有利于进一步完善城市道路交通体系及城市中心区的综合功能;有利于加快江南新区的开发,促进南平的经济的发展,推动海峡西岸经济区的建设进程。

跨江大桥起点桩号为K0+27.5,终点桩号为K0+399.5,主线桥梁全长372m。根据桥位地形特点及航道条件,本桥总体布设由西至东可大致划分三个区段:市区侧引桥、主桥及九峰立交。市区侧引桥(K0+027.5~K0+066)布置一联2×19m预应力混凝土连续箱梁,全长38.5m。主桥

(K0+066~K0+306)布置一联38+126+76m自锚式独塔悬索-斜拉协作体系桥,全长240m(见图1)。

1.2 结构体系

(1)主桥钢主塔采用变截面拱形结构,桥面以上垂直高度为50.96m,顺桥向向边跨倾斜22°,塔墩梁固结。桥面以上30.42m处设置一道横系梁。

(2)主桥边跨斜拉索采用双层HDPE防护的低应力防腐拉索,每根斜拉索由121丝直径7mm的平行钢丝组成,主梁上索距为8.0m,全桥共10根。

(3)主桥主跨主缆采用高强镀锌平行钢丝索股(PPWS)组成,每束股由127根高强钢丝($\phi 5.3\text{mm}$)组成规格的正六边形截面,每根主缆共19股,全桥共设16对柔性吊杆。主缆为空间双索面,其主缆在体系转化前后需经过由平面向空间的转化过程。

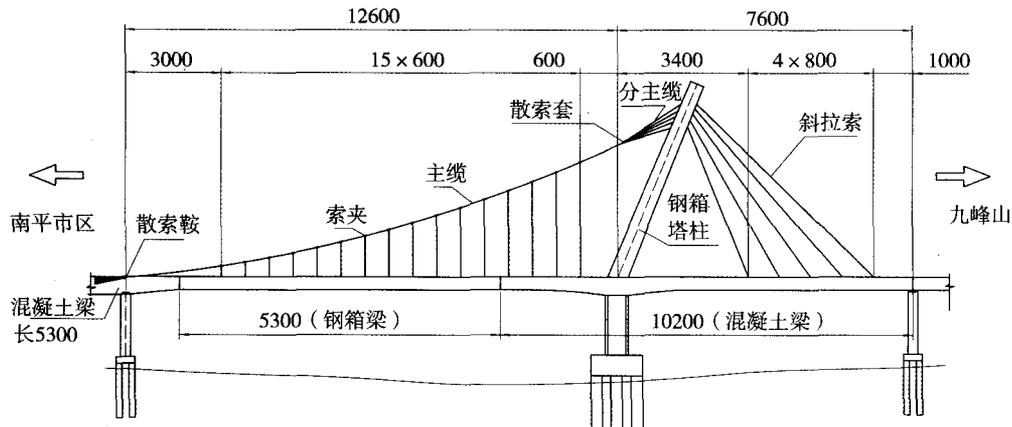


图1 南平跨江大桥桥型布置

2 自锚式悬索-斜拉协作体系施工技术

2.1 施工流程

钢塔竖转：本桥钢塔在桥面上拼装、焊接完成。在塔为水平状态下安装三角拔杆和张拉横梁，通过油缸同步张拉横梁上钢绞线索将钢塔沿水平面转到预定位置安装就位（见图2）→主缆安装：在钢塔安装就位牢固后，进行悬索部分38根主缆的挂设及线形调整→斜拉索安装：安装边跨10根斜拉索，并保持主缆与斜拉索受力平衡以及钢塔位置、角度的偏差在设计允许范围内→体系转化：吊杆与斜拉索按监控施工指令进行同步张拉。直至全桥及钢塔的受力情况、位置标高、偏转角度等技术数据达到设计标准和规范要求。



图2 钢塔转体图

2.2 工程的主要特点、难点

(1) 工程特点：

- ①桥梁结构型式较为新颖，造型美观，技术先进，为南平市标志建筑之一；
- ②工艺复杂，施工难度大；
- ③对悬索-斜拉协作体系，安装精度要求高；
- ④施工地段为南平市市中心，无法使用大型施工设备。

(2) 工程难点：

①钢塔竖转完成以后，顺桥向向边跨有一个斜 22° 的倾角。为保证其钢塔的独特造型，先用支撑预先撑着主钢塔，待体系转换完毕再将支撑拆除，并将支撑所受到的力完全的转移到悬索-斜拉协作体系。

②悬索部分：南平剑州大桥的空间散索套为空间无约束。本桥的悬索主缆为空间双索面，其主缆在体系转化前后需经过由平面向空间的转化过程。竖直方向桥面以上约35m，水平方向距离钢塔约7m处为主缆散索点。主缆索股在此发散，并分别锚固于钢塔上。而索股为空间线性，空间无约束散索套如何定位安装。

③当地每年4-5月份将出现洪涝灾害，梁下面的支撑架面临被洪水冲走的危险（之前已出现过支撑架被洪水冲走的案例），其后果是不言而喻的。因此必须提出一种迅速有效的施工方法。

2.3 自锚式悬索-斜拉协作体系施工

由于工期紧、工艺复杂，现场施工难度较大，因此选择一种正确合理的施工方法显得格外重要。在综合国内外相类似桥梁，全面考虑到施工现场的安全、质量、成本和工期后，在预定的几种方案中，最终确立以下两种施工方案：

(1) 满堂支架法（见图3）

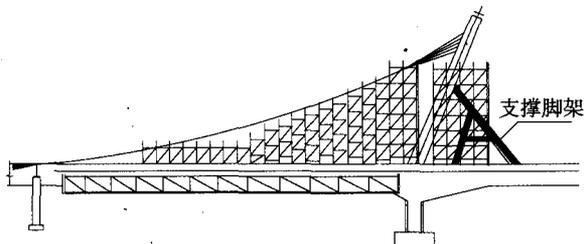


图3 满堂支架法

待钢塔竖转结束后，在钢塔倾斜的边跨侧搭设一支撑架，用来承受钢塔倾斜所造成的压力。然后全桥主跨及边跨两侧铺设钢管支架，用来作为自锚式悬索-斜拉协作体系施工的通道平台。此方法需先在钢塔背面斜拉侧制作钢支架顶住主塔，然后拆除原钢塔竖转三角支架及竖转张拉钢绞线，再搭设全桥满堂支架，用于自锚式悬索-斜拉协作体系的挂设安装。

通过对现场施工和安装工艺的仔细研究讨论后，此方法可行性不是很理想。其一，时间过长。需先拆除临时钢绞线，然后在钢塔背侧搭建钢塔倾角的支撑管架，对工期影响较大；其二，全桥满堂支架从施工角度考虑，除了施工时间长，栈桥施工难度大以外成本较高。此外，全桥满堂支架对桥面的同步施工及悬索段空间体系转化影响较大。

(2) 猫道施工法（见图4）

此方法大致为：不拆除三角架，利用钢塔竖转张拉钢绞线，继续拉住倾斜的钢塔，并保持住钢塔倾角。在此基础上搭设猫道，进行主缆安装操作。

大致施工步骤为：

- ①利用钢塔竖转体系继续保持住钢塔倾角的

独特造型；

②搭设主缆架设空间工作通道—猫道；

③在靠近塔脚约5m×3m的范围内（三角架的正下方），搭设钢管脚手架，用来作为空间散索套的临时固定平台；

④测量空间散索套预定坐标，安装空间散索套；

⑤逐一挂设主缆索股，调整索股线性，特别是在空间散索套散索段部分；

⑥安装边跨斜拉索，并微调索力，保持主边跨受力平衡；

⑦按照监控指令调整索力，体系装换施工，完成全部上部结构施工。



图4 猫道施工法

同满堂支架施工方案相比，不拆除临时钢绞线，挂设猫道施工具有以下优点：

①猫道可在桥面拼装完成，再利用大型起吊设备安装，避免了高空挂设斜拉索、悬索，操作更简单和更能确保安全；

②不需要强大的塔后支撑体系；

③同其它方案相比，自锚式悬索-斜拉协作体系安装需要时间最短。斜拉索可先行在钢塔上挂好，大大缩短了钢塔安装和挂索时间，加快了施工工期。

所以通过现场大量的施工分析、综合比较，结合本桥钢塔设计特点，决定采用猫道施工方案。

2.4 对主缆架设及散索套受力、定位的分析

在方案确定以后，考虑到自锚式悬索-斜拉协作体系安装施工中的难点、重点；以及空间散索套的临时固定受力以及成桥线形对散索套位移的影响，我们做了如下计算分析：

①主缆分索股张力计算与散索套受力平衡分析

由于主缆架设过程中，主缆上的索夹及其它荷载均未施加，可以将主缆在散索鞍至散索套之间视为只承受主缆自重作用下的柔性索结构，因此完全适用于传统的抛物线理论进行线形计算。

如图5所示为柔性索结构的计算示意图，在传统抛物线理论假设中，认为主缆在跨内承受的荷载沿跨度分布是均匀的，设此均布荷载为 W ，通过索的基本平衡微分方程，可以得到主缆张力的水平分量表达式为： $H=WL^2/8f$ ，由此得到另外一个重要结论：主缆的水平分力为常量，即主缆中的水平分力处处相等。

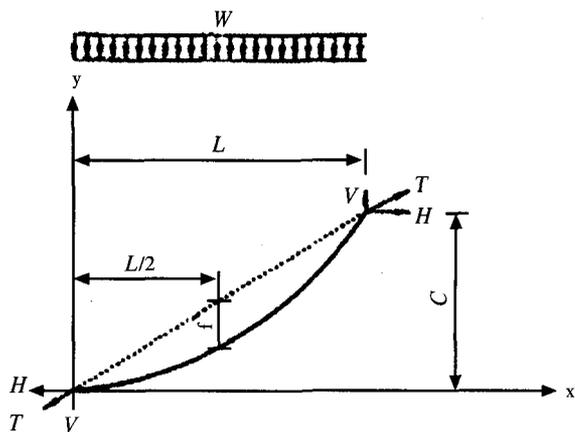


图5 柔性索结构计算示意图

根据南平跨江大桥主缆索股的相关参数，可以得到索股的水平分力 H 的数值，再根据散索套处各个索股的空间角度，可以得到散索套处各个索股的体内张力，具体张拉数值见表1。

②通过理论分析，由主缆受力情况对散索套左右两侧列平衡方程，见表2、表3。

表1 主缆索股体内张拉力数值表

索股编号	体内张拉力(kN)	索股编号	体内张拉力(kN)
1	58.56	11	64.31
2	58.53	12	67.29
3	58.63	13	64.25
4	61.27	14	67.32
5	61.26	16	67.35
6	61.40	16	67.31
7	64.21	17	70.34
8	61.32	18	70.33
9	64.24	19	70.32
10	64.22		

表2 散索套几何分析表

部位	只受拉单元	I端	X	Y	Z	J端	X	Y	Z
散索套 处上游 第一排	212	204	165037	-8507.3	35589.6	297	182098	-7770	48698.6
	210	204	165037	-8507.3	35589.6	295	182081	-7413	48657.6
	208	204	165037	-8507.3	35589.6	293	182064	-7056	48616.6
散索套 处上游 第二排	204	204	165037	-8507.3	35589.6	280	181264	-8416	46595.6
	202	204	165037	-8507.3	35589.6	278	181247	-8059	46553.6
	200	204	165037	-8507.3	35589.6	276	181213	-7344	46471.6
	198	204	165037	-8507.3	35589.6	274	181197	-6987	46429.6
散索套 处上游 第三排	196	204	165037	-8507.3	35589.6	264	180414	-8706	44439.6
	194	204	165037	-8507.3	35589.6	262	180398	-8348	44398.6
	192	204	165037	-8507.3	35589.6	260	180381	-7991	44356.6
	190	204	165037	-8507.3	35589.6	258	180364	-7634	44315.6
	188	204	165037	-8507.3	35589.6	256	180347	-7277	44274.6
散索套 处上游 第四排	186	204	165037	-8507.3	35589.6	246	179571	-8994	42291.6
	184	204	165037	-8507.3	35589.6	244	179555	-8637	42249.6
	182	204	165037	-8507.3	35589.6	242	179521	-7922	42167.6
	180	204	165037	-8507.3	35589.6	240	179504	-7565	42125.6
散索套 处上游 第五排	178	204	165037	-8507.3	35589.6	234	178675	-8936	40022.6
	176	204	165037	-8507.3	35589.6	232	178658	-8579	39981.6
	174	204	165037	-8507.3	35589.6	230	178641	-8222	39939.6
散索套左 侧主缆		204	165037	-8507.3	35589.6		157899.6	-8750.7	32013.8

表3 主缆索股对散索套的受力分析表

索股编号	单元长度	与x余弦	与y余弦	与z余弦	水平分力	体内张力	横向分力	竖向分力
18	21528.3	0.8	0.0	0.6	55.7	70.3	1.9	33.9
19	21505.1	0.8	0.1	0.6	55.7	70.3	2.8	33.9
17	21487.9	0.8	0.1	0.6	55.7	70.3	3.8	33.8
16	19607.5	0.8	0.0	0.6	55.7	67.3	0.3	31.3
16	19574.8	0.8	0.0	0.6	55.7	67.3	1.3	31.2
12	19530.3	0.8	0.1	0.6	55.7	67.3	3.3	31.1
14	19518.3	0.8	0.1	0.6	55.7	67.3	4.3	31.0
11	17743.0	0.9	-0.0	0.5	55.7	64.3	-0.6	27.8
13	17708.3	0.9	0.0	0.5	55.7	64.3	0.5	27.7
10	17679.5	0.9	0.0	0.5	55.7	64.2	1.6	27.6
7	17658.5	0.9	0.0	0.5	55.7	64.2	2.8	27.5
9	17644.8	0.9	0.1	0.5	55.7	64.2	3.9	27.4
6	16012.2	0.9	-0.0	0.4	55.7	61.4	-1.7	23.3
8	15973.3	0.9	-0.0	0.4	55.7	61.3	-0.5	23.2
5	15918.5	0.9	0.0	0.4	55.7	61.3	2.0	23.0
4	15902.9	0.9	0.1	0.4	55.7	61.3	3.3	22.9
3	14346.8	1.0	-0.0	0.3	55.7	58.6	-1.7	17.2
1	14311.8	1.0	-0.0	0.3	55.7	58.6	-0.3	17.1
2	14285.4	1.0	0.0	0.3	55.7	58.5	1.1	17.0
	7986.7	-0.9	-0.0	-0.4	1059.0	-1185.0	-32.3	-474.1
					合力	37.5	-4.0	33.9

分析表明：散索套受力基本平衡，也为散索套的安装施工过程提供了有效的依据。通过现场施工，拆除散索套约束后，散索套的位移量很小，达到了空缆状态要求，也为后续的缆索施工提供了可靠的保证。

2.5 空间散索套及主缆发散段的施工方法

①在钢塔脚手架顶端布置施工平台，在平台上搭设空间散索套临时固定支座。根据监控测量空缆状态时的空间散索套坐标，调整散索套位置并固定，并随时复测。

②从1#至19#依次开始架设主缆。此时，因为主缆在通过空间散索套后为发散段，发散的主缆索股分别锚固于钢塔。由于索股的发散，最下一排的1#~3#索股有一个向下的倾角，现场施工中，我们利用手拉葫芦将最下一排索股与施工平台的临时支座固定。



索股入鞍空间散索套

③第二排的索股固定则利用柔性吊带与1#~3#分别牵制连接，将第二排索股按照倾角定位。就这样利用索股之间相互的牵制力，将散索套发散段的索股定位固定，既减少了临时固定支座的承载受力，又很好的将19根主缆索股集合安装。依次类推，直至全部主缆索股架设安装完成。

④主缆安装完成以后拆除钢塔竖转体系的临时钢绞线及三角架，此时主塔倾角独特造型的拽拉力，由主缆的锚固力承担。拆除完毕以后，同时对主塔倾斜角度进行观测记录。

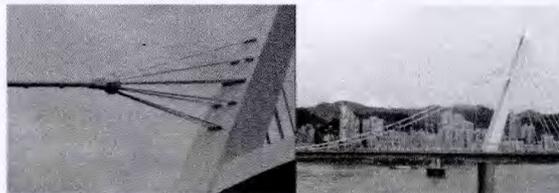


主缆索股发散段

⑤在主缆吊杆安装完毕，体系装换前。需将空间散索套临时支座的限位解除。根据上述计算分析，散索套向外位移的所产生的内力不大。于是在施工中，我们利用了两个10t手拉葫芦，将两根主缆利用吊带相互牵制住，同时拆除临时限位，慢慢放松手拉葫芦，直至空间散索套约束解除，呈无约束状态，悬浮于空中。

⑥在主缆架设完毕、空间散索套接触约束后，安装钢塔背侧斜拉索，并考虑到此时钢塔倾角、平衡受力情况等方面因素，对斜拉索进行张拉施工，同时随时观测钢塔偏位情况以及对主跨悬索与边跨斜拉之间的平衡受力进行仔细的监测。

⑦体系转换：根据监控指令，对主跨悬索部分的吊杆和边跨斜拉索进行分部分项张拉；张拉时严格按照监控指令及设计要求进行。张拉时严格按照到同步同时的操作要求，直至体系装换全部结束。



体系转换完毕

3 结语

自锚式悬索-斜拉协作体系桥除了造型美观独特以外，作为一种高次超静定结构体系，具有一般缆索承重桥梁的力学特性的几何非线性特点。同时，自锚式悬索-斜拉协作体系桥在各种荷载工况作用下静、动力特性也比悬索桥和斜拉桥更为复杂。因此，与普通的悬索体系桥梁相比，此类桥型在主缆的架设、空间散索套的安装、主缆发散段的线形控制以及体系转换的施工中增加了不小的难度。针对这些难题提出了多种解决方案，并最终采用了“不拆除钢塔竖转体系，利用猫道平台”的方案解决困难。该方案既降低了成本又缩短了施工时间，是一个可行的方案。但在实际施工中要严格控制钢塔两边的受力平衡以及对空间散索套的监测。本桥自锚式悬索-斜拉体系的成功安装可为以后同类型的桥梁施工积累经验 and 提供参考。

参考文献

- [1] 谢小飞, 谢官模等. 南平跨江大桥成桥状态与施工关键技术研究[D]. 武汉理工大学, 2009
- [2] 中华人民共和国行业标准. JTJ041-2000 公路桥涵施工技术规范[S]. 人民交通出版社, 2000