

单塔空间缆索结构自锚式悬索桥 缆索系统安装

彭春阳 石 伟 罗志恭 李东平
韦壮科 李文献 张日亮 黄家珍

(柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005)

摘 要:天津富民桥是我国第一座单塔空间缆索结构的自锚式悬索桥,在施工中应用了空间缆索结构的自锚式悬索桥相关的一些新的施工技术。本文主要介绍了猫道的架设及调整、主缆的架设、索夹与吊索的安装等上部悬吊结构关键施工技术,为今后空间缆索结构自锚式悬索桥的施工提供参考。

关键词:缆索结构 自锚式悬索桥 安装

1 概述

天津富民桥主桥为单塔空间缆索结构自锚式悬索桥,主桥由两跨组成。其跨径组成为157.081米+86.4米,垂跨比约为1:5.376。富民桥索塔为采用钢筋混凝土结构、矩形截面的独塔,塔横桥向宽4.6米,顺桥向塔底宽13.0米,塔顶宽4.5米,桥面采用钢箱梁。主跨主缆锚于主梁上,边跨主缆锚于地锚,形成一个稳定的结构体系。成桥后,主缆在立面及平面皆呈抛物线,边跨主缆无竖向吊索(见图1缆索系统立面及平面布置图)。

2 缆索系统安装探讨

天津富民桥是国内第一座单塔空间缆索结构的悬索桥,由于其结构的特殊性,在国内尚未有可供参考的相关资料,因此在设计中开发了一些新型的结构以满足现场的施工要求。富民桥缆索系统安装可分猫道的架设及调整、主缆的架设、索夹与吊索的安装、体系转换几部分并逐项说明安装过程:

2.1 猫道的架设及调整

对于空间缆索结构悬索桥猫道除考虑一般悬

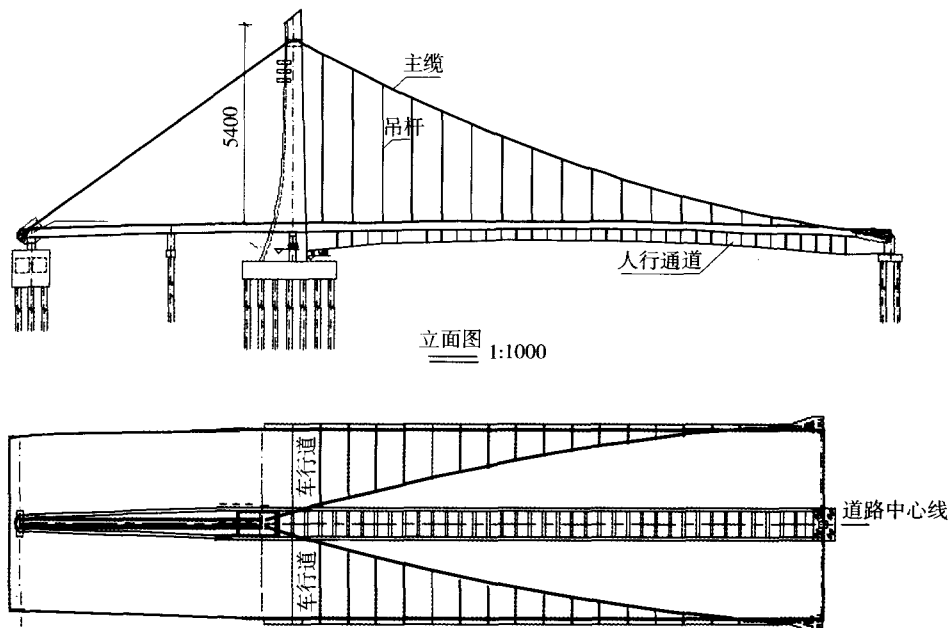


图1 缆索系统立面及平面布置图

索桥要求外,还要考虑猫道的调整可行性和调整后的工作空间。

富民桥主跨每幅猫道选用4根 $\phi 28\text{mm}$ 作承重索,边跨猫道由6根 $\phi 28\text{mm}$ 的钢丝绳作承重索,承重索分别锚固于塔端、桥面的预埋件上,承重索分两跨断开布置。从工作空间上考虑最终确定主跨猫道面宽为2.2m,边跨猫道面宽为3.2m。通过强度验算,选用 $\phi 28\text{mm}$ 的钢丝绳是安全的。^[1, 2]

空间缆索结构悬索桥施工的关键技术之一就是猫道线形调整。空间缆索结构的主缆的线形为空间曲线,要将猫道线形调整与主缆线形一致,作用于猫道的外力只能由主缆提供,同时要尽可能的减少猫道所产生的作用力对主缆线形的影响。

为了降低影响,①保证猫道的调整与主缆的线形变化同步,过快会使主缆线形的变化使猫道的钢丝绳产生张力而又影响主缆线形的变化,而过慢不仅会使钢丝绳会直接作用于吊杆上而影响吊杆力的大小,还因主缆的变化使钢丝绳产生张力直接影响主缆线形的变化。②采用一种刚性支架结构与柔性钢丝绳固定相结合的方式调整猫道的线形,安装时刚性支架结构与柔性钢丝绳固定两种相互错开,同时每段之间的猫道钢丝绳须处于自由悬吊状态。钢性支架是由数根槽钢焊接而成,其上端与索夹高强螺栓连接,下端与猫道钢丝绳相连接(见图2猫道的前后调整视图)。



图2 猫道的调整前、后视图

由于有钢性支架的存在用这种猫道调整的方式使猫道更平稳、更安全,结合用钢丝绳来固定猫道,既节约了施工成本,又提高了工作效率。

2.2 主缆的架设

主缆的架设分为主缆索股的架设、紧缆两项。

2.2.1 主缆索股的架设

主缆索股的架设又分为索股牵引、索股整形、索股横移、索股入鞍、索股垂度调整及锚跨张力调整几个工序^[2]。

天津富民桥的空间缆索结构主缆的架设与平面的缆索结构主缆的架设工序基本相同,主要区别是空间缆索结构的主缆在索鞍出、入口的角度及散索套出、入口处的角度在体系转换前后存在横向力,致使在索鞍出、入口及主跨散索套出、入口处施工困难。对于索鞍出、入口处采取了多种措施,其中包括调整索股安装顺序的方法。对主跨及边跨散索套入口处增加一个临时支架,同时采用一些辅助性工具将索股定位,阻止主缆的初始形状的改变,使主缆在散索套中排列较规则。

2.2.2 紧缆作业

紧缆分为初紧缆与正式紧缆两步。初紧缆就是将主缆截面整成圆形,同时将外层索股的缠包带拆除。初紧缆空隙率要求达到28%~30%。每次紧缆的相距1m~1.5m为宜。正式紧缆可以在白天用JLJ60紧缆机紧缆。紧缆要求空隙率为18%~20%。每间隔1.5m打上一道钢带。

2.3 索夹与吊索的安装

针对空间缆索结构悬索桥的要求,富民桥主跨索夹采用了新型可转动式索夹,而边跨索夹采用传统索夹。

新型可转动式索夹由索夹体、转动件及配套高强螺栓副组成(见图3新型可转动式索夹结构图)。该结构能适合空间缆索结构的悬索桥在施工过程中转动的要求。由于结构改进,改变了索夹的受力结构形式,合理地将吊索的拉力进行了转化,满足了空间缆索结构的悬索桥对索夹的需要,使施工变得简单、可行。

主跨索夹的安装:先安装内索夹并拧紧到设计值,然后在内索夹与转动件的接触面上抹上硅润滑脂,以减小磨擦力,再安装转动件。

空间缆索结构自锚式悬索桥施工时主缆存在竖、横、纵三维方向变位,因而要求空间缆索结构的悬索桥吊索,能适应主缆的变化,使

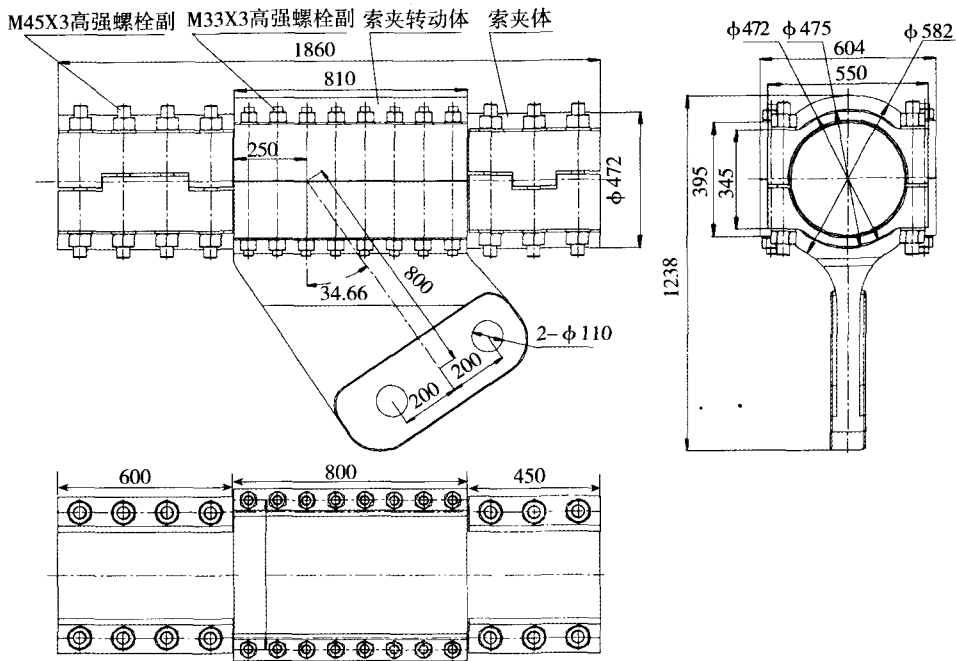


图3 新型可转动式索夹结构图

吊索能够移动、伸缩一定长度同时可转动较大的角度。

富民桥的又一新型结构为可大角度调节吊索（见图4吊索的张拉结构），其特点如下：

（1）是采用底座的连接方式。底座通过高强度螺栓直接锚固于钢箱梁上表面。底座安装时预先将球面支座与球头连杆安装于底座内腔中，球面支座与球头连杆采用球面的连接方式，这样球头连杆在底座内腔内可以偏转较大角度，在吊索调索过程中吊索的角度随张拉力自动调整。

（2）是通过连接套筒的方式来调节吊索的长度及索力。这种连接方式结构简单、调节量较大较适合空间缆索结构的吊索安装。同时富民桥在吊索设计上采用双吊索的结构使吊索安装调节更容易。

在体系转换前先将吊索从连接套筒到叉耳段安装好，并与索夹耳板连接。在体系转换时通过千斤顶张拉一根吊索到一定位置后连接另一根吊索的连接套筒与球头连杆的连接，待螺栓旋合至一定程度后卸掉原张拉吊索再通过手动葫芦连接

原张拉的吊索。在施工过程中有以下几点建议：

- ①在连接套筒与球头连杆对接前要求对螺牙进行仔细的检查，以免造成返工操作；
- ②在连接套筒上制作一个辅助张拉工具卡环，卡环可以在旋转连接套筒时，放大施加的扭矩，提高施工效率；
- ③不应野蛮操作，一旦螺牙破坏将可能造成产品零件报废而增加施工成本。

对采用可转动索夹及吊索下端锚固系统提出了新方案，但从总体的施工来看，吊索下端所采用的新型结构宜用于双吊索结构。

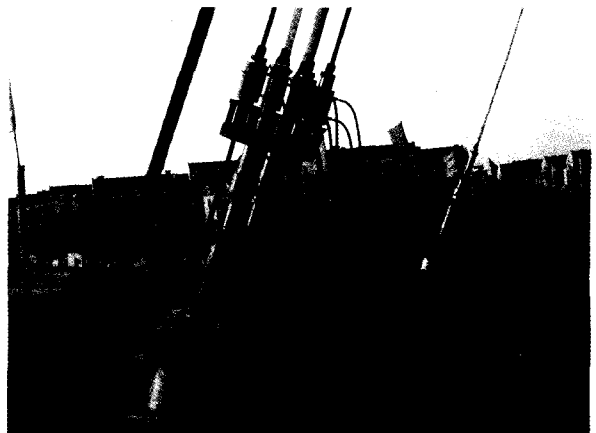


图4 吊索的张拉结构

2.4 体系转换及监控

悬索桥的体系转换就是将钢箱梁的重量转换成由主缆承受,其过程都是通过调节吊索的索力及主缆的线形控制使每根吊索受力均匀达到设计要求。空间缆索结构悬索桥的主缆的变化为空间变化,比平面缆索结构悬索桥的主缆的变化多出一个自由度,其设计计算更为复杂,施工难度更大。其具体表现为:

(1) 两者在体系转换过程中吊索的索力变化不同。空间缆索结构悬索桥的吊索索力是随下一根吊索的张拉而减少,随下一根之后的吊索的张拉而增大。在设计上空间缆索结构的吊索之间的索力相互影响较大些,对于计算机数据计算要求更精确。在施工中加强监控力度及数据分析,要求做到每张拉完一根吊索需测量已张拉过的吊索的索夹坐标及抽检吊索的索力大小,从所得到的数据中再分析计算得出下一根吊索的索夹坐标及吊索的索力大小,以避免由于施工误差而带来的影响。

(2) 由于空间缆索结构悬索桥在体系转换时主缆存在横向移动,在外力的作用下对主缆线形产生影响。其一是主缆在横向移动时本身会产生一定的扭转,用常规索夹来安装其安装,角度就不精确,而造成吊索对主缆产生扭矩直接影响主缆的线形。富民桥所采用的新型转动体索夹,内外索夹可以自动转动而避免吊索对主缆产生扭矩。其二是猫道在线形调整过程中钢丝绳的内力对主缆线形产生影响。猫道的线形调整是空间缆索结构悬索桥施工的特有工序,为后续施工提供了保证,猫道的线形调整具体施工见上述的猫道调整。最后通过调索时实际吊索力的大小及索夹坐标进行监测,以确保施工的可靠性。

(3) 在体系转换前后空间缆索结构的索夹的位移量比平面缆索结构的索夹的位移量要大(见表1 主缆销接点与主梁吊杆交汇点距离),所需的拉张空间也就要大些。如果采用常规的锚

固方法,张拉设备过于笨重,给施工操作带来很大困难。富民桥采用新型吊索结构使吊索连接张拉更方便、简单。

富民桥从零件的结构设计上降低了一定程度的施工难度,但与平面缆索结构的施工相比,监控上工序更多、要求更高。在体系转换过程中要求两侧的吊索调整同步进行,以减轻吊索索力产生的横向水平分力对塔柱产生的弯矩。整个体系转换过程分三轮调索完成,在监控上第一轮的吊索调索采用以索夹坐标控制为主,张拉力控制为辅;第二轮及后序的吊索调索采用以张拉力控制为主,索夹坐标控制为主,具体数据如下(表2每根吊索的索力及索夹坐标控制)。

在实际的施工过程中其吊索力实测值与索夹坐标的测量基本符合设计要求,成桥后的最终主缆线形符合设计要求。

表1 主缆销接点与主梁吊杆交汇点距离(m)

吊索号	空缆时	挂吊索时	第一轮张拉吊索时	体系转换后	总距离变化
DS1	47.100	47.100	46.352	46.364	0.736
DS2	41.456	40.751	40.394	40.352	1.104
DS3	36.190	35.265	34.827	34.732	1.458
DS4	31.389	30.279	29.754	29.613	1.776
DS5	26.859	25.587	24.973	24.795	2.064
DS6	22.715	21.322	20.632	20.423	2.292
DS7	18.975	17.502	16.718	16.488	2.487
DS8	15.696	14.165	13.353	13.109	2.587
DS9	12.701	11.153	10.321	10.072	2.629
DS10	10.046	8.505	7.718	7.477	2.569
DS11	7.713	6.220	5.538	5.318	2.395
DS12	5.724	4.369	3.824	3.635	2.089
DS13	3.956	2.867	2.481	2.337	1.619
DS14	2.527	1.861	1.648	1.558	0.969

(下转第19页)

主索鞍、主跨边跨散索套的结构和主要部位的加工情况。通过现场实际使用和检验,主索鞍、主跨边跨散索套使用性能良好。

天津富民桥主索鞍的设计与制造为今后空间缆索悬索桥的建设提供了有益的探索,积累了不少经验。

参考文献

- [1] 江苏省长江公路大桥建设指挥部. 江阴长江公路大桥工程建设论文集[C]. 北京: 人民交通出版社. 2000
- [2] 雷俊卿, 郑明珠, 徐恭义. 悬索桥设计[M]. 北京: 人民交通出版社. 2002
- [3] 潘世建, 杨盛福主编. 东航道悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社. 2002

(上接第14页)

表2 每根吊索的索力及索夹坐标控制

吊索号	第1轮每根吊索的索力及索夹坐标控制					第2轮每根吊索的索力及索夹坐标控制					最终索力
	调索力(kN)	X坐标(m)	y坐标(m)	z坐标(m)	该轮调索后索力(kN)	调索力(kN)	X坐标(m)	y坐标(m)	z坐标(m)	该轮调索后索力(kN)	
DS1	181.4	2.249	-8.675	54.910	585.6	781.3	2.791	-8.96	55.107	797.2	864.2
DS2	193.7	3.636	-17.669	49.183	587.5	846.8	4.699	-17.958	49.538	805.8	892.9
DS3	241.7	5.107	-26.678	43.902	591.5	929	6.498	-26.96	44.351	812.7	913.3
DS4	304.1	6.667	35.7	39.073	590.5	1006.8	8.186	-35.961	39.544	811.5	917.2
DS5	384.3	8.314	-44.741	34.695	597.6	1091.2	9.762	-44.967	35.11	822.5	931.6
DS6	514.7	9.911	-53.771	30.730	594.6	1157.6	11.22	-53.958	31.06	821.1	929.3
DS7	663.5	11.633	-62.847	27.231	595.8	1214.4	12.559	-62.973	27.371	822.9	934.2
DS8	937.1	13.198	-71.902	24.093	586.8	1245.6	13.771	-71.972	24.06	812.2	920.9
DS9	1236.3	14.531	-80.959	21.256	588.2	1267.8	14.86	-80.981	21.108	816.4	923.8
DS10	1403.5	15.614	-89.996	18.720	589.8	1263.1	15.818	-89.984	18.523	820.9	926.4
DS11	1389.5	16.504	-99.022	16.504	579.5	1208.3	16.644	-98.992	16.301	808.5	910.4
DS12	1237.5	17.235	-108.039	14.619	582.6	1132.1	17.341	-108.003	14.437	815.0	913.2
DS13	972	17.821	-117.041	13.079	575.9	1001.6	17.903	-117.008	12.94	805.4	898.9
DS14	578.5	18.286	-126.023	11.885	578.5	768.2	18.341	-126	11.805	768.2	978.4

3 结语

空间缆索结构悬索桥因其独有的外观受到各大城市建设者的青睐,空间缆索结构悬索桥的设计也越来越多。随着国内第一座独塔空间缆索结构悬索桥-富民桥的顺利完工,对以后桥梁的发展具有重要意义。

(1) 富民桥的上部悬吊结构施工达到了设计质量要求,本文从空间缆索结构悬索桥的关键工序上介绍了施工工艺及施工方法,对其后兴建的空间缆索结构悬索桥的施工提供参考。

(2) 富民桥采用了一些新的结构体系解决了部份施工难题,为今后的桥梁设计提供了新的

思路,为桥梁施工提供了参考经验。

(3) 由于富民桥的主缆线形是空间结构的,在吊索调节前后主缆所处的平面发生了变化。其体系转换前后经计算机仿真的精确计算,同时要求在施工过程中加强施工过程的监测及数据分析,使施工工艺规范化,并保证主缆线形符合设计要求。

参考文献

- [1] JTJ041-2000. 公路桥涵施工技术规范. 人民交通出版社. 2000. [S]
- [2] 雷俊卿, 郑明珠, 徐恭义等. 悬索桥设计[M]. 北京人民交通出版社. 2002