

# 景观悬索桥装饰缆索的找形与内力计算

黄雯<sup>1</sup>, 郑明万<sup>2</sup>, 徐丰<sup>3</sup>, 周军杰<sup>4</sup>

(1. 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 济南市市政工程设计研究院, 山东 济南 250101;  
3. 武汉工程大学资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430073; 4. 中冶南方工程技术有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 景观悬索桥的装饰缆索不参与主结构受力, 但却是桥梁不可分割的一部分. 为保证其成桥后主缆及吊杆线形, 必须有一定的内力与主桥相匹配. 提出了一种针对悬索桥装饰缆索的找形及内力计算方法, 首先建立主缆模型, 并将各吊杆作用简化为竖向约束, 计算各区段缆索拉力及吊杆的张力, 进而通过主缆及吊杆的适宜张力计算其下料长度. 结合新疆某景观悬索桥实例, 利用 MIDAS/Civil 建立主缆局部有限元模型, 计算主缆、吊杆张力及理论下料长度, 并对其进行风振激励下的动力特性验算. 按该方法计算的下料长度及拉力进行施工, 成桥后各方面均可满足要求.

**关键词:** 景观悬索桥; 装饰性结构; 主缆; 吊杆; 吊杆张拉力

中图分类号: U 441.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)01-0143-05

## Form Finding and Internal Force Calculation of the Cable in Ornamental Suspension Bridge

HUANG Wen<sup>1</sup>, ZHENG Ming-wan<sup>2</sup>, XU Feng<sup>3</sup>, ZHOU Jun-jie<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Jinan Municipal Engineering Design & Research Institute, Jinan 250101, China; 3. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China; 4. WISDRI Engineering & Research Incorporation Limited, Wuhan 430074, China. Corresponding author: XU Feng, E-mail: bridge113@163.com)

**Abstract:** As an inseparable component, the decorative cable of ornamental suspension bridge does not carry loads with the main structure. The main cable and hanger rods should have certain internal force that matches with the main bridge so as to keep their line-shapes. An approach was proposed for such bridge to calculate the blanking length and tensile force of the cable and rods. Firstly, a model for the main cable was built with hanger rods simplified as vertical constraints. Secondly, the tensile force of main cable in each section and the constraining force of rods were calculated. Finally, the blanking length of each member can be obtained. With a project in Xinjiang, a partial FE(finite element) model of main cable is established by the MIDAS/Civil to calculate the theoretical tensile forces and blanking lengths of the cable and rods, and check its dynamic characteristics. The as-built bridge meets all requirements.

**Key words:** ornamental suspension bridge; decorative structure; main cable; hanger rod; rod tensile force

为突出城市桥梁在城市形象构成中的重要作用<sup>[1-2]</sup>, 全国各地出现了许多以梁式桥为基本受力体系, 增加装饰性结构而形成的景观斜拉桥、景观悬索桥、景观拱桥等. 其中, 悬索与梁式桥的组合既可满足结构受力又兼具优美的造型, 是比较

常见的形式之一<sup>[3]</sup>. 但是目前国内关于这类桥梁形式的设计及研究很少, 往往都是参考悬索桥的计算及设计经验. 一般悬索桥所承受的荷载主要来自主梁, 属于匀布荷载, 荷载的分布与计算很明显<sup>[4]</sup>. 然而, 景观悬索桥装饰性缆索的设计既不

同于一般悬索桥的主缆找形,又不能单纯地按装饰物考虑.它需要一定的拉力维持其应有的刚度,还要保持所期望的某种理想线形.同时如此长、大的装饰索又必须考虑在风、雨等不良气候条件下发生大幅振动的现象,即满足一定的拉力限制以增大其纵向刚度<sup>[5]</sup>.综合考虑各方面的因素,找到一个比较理想的线形与张拉力,使其与主结构协调是非常重要的.

## 1 装饰缆索设计及施工的基本思路

### 1.1 装饰缆索的设计

装饰缆索的线形主要由主缆的矢跨比决定.矢跨比越大主缆及吊杆的内力越小,用钢量越小;但矢跨比的加大又会导致桥塔高度和主缆长度的增加,也会增加竖向变形.因此装饰缆索的设计应综合考虑受力、美观、经济及施工等各方面因素,从而得到合理的线形.在保证理想线形的同时,还要考虑以下几方面的因素:一是要有一定的张拉力以提升悬索的刚度,并紧固吊杆在缆索和主梁间的合理位置;二是考虑吊杆拉力对主梁的反作用,不使主梁受力受到过大干扰;三是避免装饰缆索在风振激励下产生过大幅度的振动,并保证其振动与主梁振动不会相互干扰.要同时满足这几个方面的要求,就要在理想线形的基础上设计适当的张拉力,并根据这一张拉力算出缆索在零应力状态下的理论下料长和各吊杆在零应力状态下的长度,以使其在张拉后正好达到缆索和吊杆的理想位置.如何计算各吊杆的理想拉力并由此计算出它们在零应力状态下的下料长是问题的关键<sup>[6-7]</sup>.为解决此问题,提出一种针对该桥型的缆索找形及内力计算方法,具体如下:

1) 利用有限元软件建立主缆的理想线形和预计的钢绞线截面模型,在各吊杆处施加竖向约束,但允许主缆在该约束处滑动.然后,在主缆下端施加拉力,该拉力达到理想拉力后,根据主缆各区段拉力的大小  $\Delta N_i$ , 计算各区段主缆伸长量  $\Delta L_i = N_i L_i / EA$ , 反算主缆长度  $L' = L - \sum \Delta L_i$  ( $L$  为主缆图纸设计长度).  $L'$  即为所需要的零应力状态的下料长度.

2) 根据第  $i$  根吊杆处的竖向约束力  $F_i$  的大小(即第  $i$  根吊杆所受的拉力),求得在该拉力  $F_i$  作用下吊杆伸长量  $\Delta l_i = F_i l_i / EA$ , 则每根吊杆的理论下料长度  $l'_i = l_i - \Delta l_i$  ( $l_i$  为成桥后第  $i$  根吊杆的设计长度).

3) 将各吊杆的拉力  $F_i$  作用于主梁上,计算

主梁在该组反力作用下的内力,确保主梁受力的合理性.经过不断地修正和试算,得到满足设计要求的主缆、吊杆下料长度及张拉力值.

4) 计算悬索结构的自振频率使其满足刚度要求,且避免在风振激励下产生过大幅度的振动,并保证悬索结构的振动与主梁振动不会相互干扰.最终得到满足主缆线形、主缆及吊杆刚度,以及主梁受力的下料长度及张拉力.

### 1.2 装饰缆索的施工

与一般悬索桥的主塔及锚碇、主缆、主梁的施工顺序不同,景观悬索桥的这些装饰构件都是在主梁建成后后期才开始施工的.即在主梁建成的基础上修建装饰主塔;按下料长装配好缆索和吊杆,并通过索夹紧固牢靠;利用升降设备将缆索固定在桥塔和主梁的设计位置;然后张拉吊杆并将其固定到主梁的设计锚固位置.张拉时应按从短的到长的方向间隔张拉,最后再将剩余吊杆张拉到位,进而完成景观悬索桥施工的全过程.

## 2 工程实例

乌鲁木齐经济技术开发区北一路桥梁为预应力混凝土四跨刚架与连续梁组合梁桥,全长 292.31 m,跨度为 55 m + 2 × 83 m + 55 m.为形成自锚式悬索桥的景观效果,双幅桥中每幅箱梁与主墩固结处设置一座高 25 m 的钢结构塔柱.装饰性悬索主缆锚固于塔柱 24 m 高处,两侧锚固于主梁两端;吊杆布置间距为 5 m,全桥共布置吊杆 100 根,形成装饰性自锚式悬索桥.主缆采用 PES5-109 成品索,截面积  $A = 2\ 139.13\ \text{mm}^2$ ;吊杆采用 19- $\varphi 5$  镀锌平行钢丝,截面积  $A' = 490.6\ \text{mm}^2$ ,主缆及吊杆弹性模量  $E = 2.05 \times 10^5\ \text{MPa}$ .桥型景观如图 1 所示.



图 1 北一路桥梁结构全景图

Fig. 1 General view of the Beiyi road bridge

### 2.1 有限元建模

由于该桥的装饰缆索以塔柱为轴对称布置,在采用 MIDAS/Civil 软件建模计算时,可只建立

主缆的 1/2 模型进行分析,在主缆、吊杆各相应端点设置相应约束<sup>[8-10]</sup>.建模的基本条件为:(1)缆索刚度较主梁刚度小得多;主梁线形由本身受力特点形成,而非受缆索来调整的.(2)采用施加初拉力只受拉的索单元来模拟主缆,共划分为 25 个单元,26 个节点.(3)边界条件:最右端与塔柱连

接处采用固定约束,约束全部自由度;与吊杆连接处(即索夹处)设置竖向固定的滑动支座.(4)主缆线形与设计图纸保持一致.(5)主缆初拉力取 100 kN.主缆及吊杆布置见图 2,简化后的计算简图见图 3.

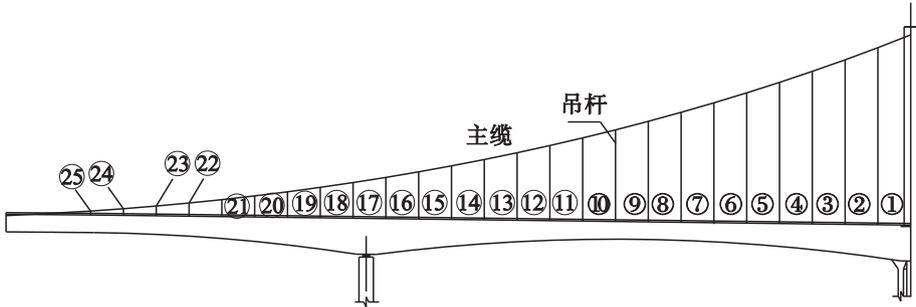


图 2 缆索及吊杆布置图

Fig. 2 Layout drawing of the cable and hanger rods

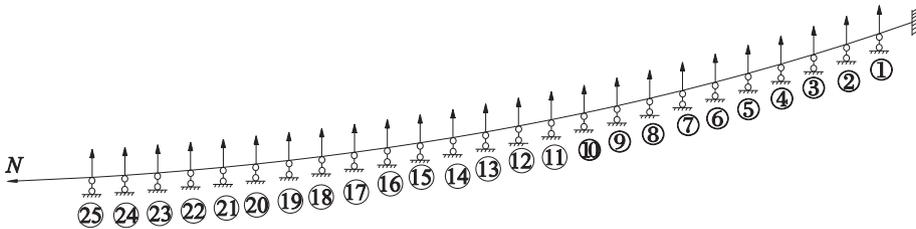


图 3 简化后的计算简图

Fig. 3 Simplified calculation diagram

## 2.2 初张力及下料长度

### 2.2.1 吊杆初张力

在计算模型中,逐步增大主缆拉力.每增大一次主缆拉力,都要把各竖向约束的竖向反力,即各吊杆的拉力提取出来,分析它们是否合理.合理的条件是各个拉力应达到各吊杆容许拉力的 10% ( $N = A \times 1\ 860 \times 0.75 \times 0.1 = 52\ \text{kN}$ ) 以上,以保证各吊杆能拉紧,位置固定,并具有一定的抗风雨能力,同时对主梁所受吊杆拉力不断修正.经反复试算终确定当主缆拉力为 1 000 kN 时吊杆和主梁达到最优状态.此时,各吊杆初张力计算结果见表 1,在此初张力条件下,可保证缆索线形与设计线形基本重合.

由表 1 可知:除 1 号,25 号吊杆外,其他吊杆初张力大小较为均衡,大小在 55 ~ 60 kN 之间,其中离桥塔近的长吊杆张力略大一些,靠近梁端的短吊杆张力略小一些;1 号,25 号吊杆初张力略大(分别为 102,78 kN).1 号,25 号吊杆初张力偏大的原因在于:1 号吊杆靠近塔柱,线形变化较剧烈;而 25 号吊杆靠近梁端,其距梁端距离比其他吊杆间距要大.

表 1 各吊杆初张力计算结果

Table 1 Initial tension of each hanger rod kN

吊杆编号	计算初张力	实际初张力	吊杆编号	计算初张力	实际初张力
1	96.38	102	14	53.59	55.5
2	58.17	60	15	53.6	55.5
3	58.19	60	16	53.61	55.5
4	56.31	60	17	53.62	55.5
5	58.24	60	18	51.73	55
6	56.36	58.5	19	53.64	55
7	58.28	58.5	20	51.75	55
8	54.49	58.5	21	53.66	55
9	56.41	58.5	22	51.77	55
10	54.53	58.5	23	51.77	55
11	56.45	58.5	24	53.68	55
12	53.56	55.5	25	72.36	78
13	53.57	55.5			

注:表中吊杆编号为从主塔向梁端从小到大按顺序(1→25)编号.

为抵抗主缆的非弹性变形,需要有足够的张拉力以使其保持拉紧状态.一般情况下,主缆张力约占主缆承载的 30% 左右,各吊杆拉力达到容许

拉力的 10%, 以保持其刚度.

### 2.2.2 主缆及吊杆下料长度

根据上文提到的主缆及吊杆下料长度计算公式, 主缆理论下料长度为 139.48 m, 各吊杆的理论下料长度见表 2. 真实的施工下料长度, 应在文中的理论下料长度(表 2)的基础上考虑设备使用和人工操作等因素稍有增加.

表 2 各吊杆理论下料长度

Table 2 Theoretical cutting length of each hanger rod m

编号	设计长度	伸长量	理论下料长度
1	221.8	0.22	221.58
2	206.1	0.12	205.98
3	191.1	0.11	190.99
4	176.8	0.11	176.69
5	163.1	0.1	163.0
6	150.1	0.09	150.01
7	137.7	0.08	137.62
8	126	0.07	125.93
9	114.8	0.07	114.73
10	104.2	0.06	104.14
11	94.1	0.05	94.05
12	84.6	0.05	84.55
13	75.6	0.04	75.56
14	67.1	0.04	67.06
15	59.1	0.03	59.07
16	51.6	0.03	51.57
17	44.6	0.02	44.58
18	38.1	0.02	38.08
19	32	0.02	31.98
20	26.4	0.01	26.39
21	21.2	0.01	21.19
22	16.5	0.01	16.49
23	12.2	0.01	12.19
24	8.3	0.005	8.3
25	4.9	0.004	4.9

### 2.3 风振验算

悬索桥的主缆和竖向吊杆易出现风振当中的两种振动——抖振和涡振. 抖振是脉动风引起的强迫振动, 脉动风激励的卓越频率一般低于 0.1 Hz. 风流经过桥梁构件时会发生流动分离和漩涡脱落, 当漩涡脱落的频率与结构自振频率一致时会出现涡振, 涡振是一个复杂的现象, 需进行专门的风洞实验或数值模拟加以分析, 本文不做详细讨论.

通过 MIDAS/Civil 分别建立上部悬索装饰结构、下部梁桥体系及全桥有限元模型, 全桥模型如图 4 所示. 计算出各部分的前 10 阶自振频率见表 3.

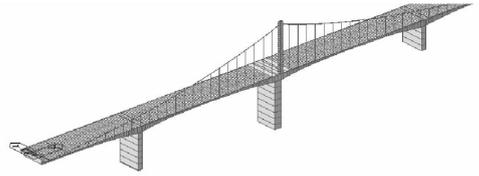


图 4 全桥有限元模型

Fig. 4 FE model of the full bridge

表 3 景观悬索桥各部分自振频率对比

Table 3 Natural frequencies of each part Hz

部位	装饰结构 $\omega_1$	梁桥体系 $\omega_2$	全桥 $\omega_3$
1 阶	0.146	0.658	0.643
2 阶	0.173	0.894	0.889
3 阶	0.210	0.903	0.897
4 阶	0.235	1.164	1.086
5 阶	0.283	1.182	1.151
6 阶	0.288	1.455	1.411
7 阶	0.330	1.676	1.652
8 阶	0.373	1.698	1.675
9 阶	0.400	1.721	1.710
10 阶	0.455	1.743	1.723

通过表 3 分析可知: (1) 本桥装饰悬索结构的频率高于脉动风激励的卓越频率(0.1 Hz), 因此不会发生抖振. 但是, 与真实悬索桥相比, 装饰性悬索结构的柔度较大, 自振频率较低, 更易发生风振. 因此应该对主缆及吊杆采取相应的减振构造措施. (2) 与下部梁桥体系相比, 装饰悬索结构的自振频率区间相差较远, 相互干扰发生共振的可能性不大. (3) 成桥后的全桥自振频率  $\omega_3$  与未加上部装饰悬索的梁桥体系自振频率  $\omega_2$  相差不大, 说明上部装饰悬索结构对该桥主梁的刚度影响较小, 也验证了本文所介绍方法的前提: “主梁刚度足够大”这一假设是合理的.

## 3 结 语

结合某景观悬索桥实例, 提出了一种针对悬索桥装饰缆索找形及内力计算的方法. 该方法将装饰缆索体系简化为在吊杆处施加竖向约束的悬索模型, 进而分别计算其下料长度及吊杆张力. 在施工过程中, 其装饰缆索严格按本文方法确定的下料长度及吊杆张力施工, 成桥后缆索线形及受力均与设计吻合, 达到了预计的理想状态. 目前该桥已经建成并投入运营, 获得了良好的社会效应与经济效应, 说明该方法切实可行, 可供今后同类装饰悬索桥梁的设计与计算借鉴和参考.

## 参考文献:

- [1] 盛洪飞. 桥梁建筑美学[M]. 北京:人民交通出版社,2009:14-20.  
(Sheng Hong-fei. Bridge building aesthetics [M]. Beijing: China Communication Press,2009;14-20.)
- [2] 严国敏. 现代悬索桥[M]. 北京:人民交通出版社,2002:35-39.  
(Yan Guo-min. Modern suspension bridges [M]. Beijing: China Communication Press,2002;35-39.)
- [3] De Bouw M, Wouters I. Investigation of the restoration of the iron suspension bridge at the castle of Wissekerke [J]. *Advances in Architecture Series*,2005,20:611-620.
- [4] Da Fonseca A. Designing bridge structure, architectural concept and aesthetics [C]// Structures and Architecture—Proceedings of the 1st International Conference on Structures and Architecture. Guimaraes Portugal,2010;1167-1174.
- [5] 王玉田, 马宗志, 姜福香. 空间缆索自锚式悬索桥动力特性及刚度影响规律[J]. 公路,2012(3):51-55.  
(Wang Yu-tian, Ma Zong-zhi, Jiang Fu-xiang. Dynamic

performance and influence laws of structural stiffness variation of self-anchored suspension bridge with spatial cable [J]. *Highway*,2012(3):51-55.)

- [6] Arzoumenidis S G, Bieniek M P. Finite element analysis of suspension bridge [J]. *Computer & Structure*,1985,21(6):45-49.
- [7] Kim H, Lee M J, Chang S P. Non-linear shape-finding analysis of a self-anchored suspension bridge [J]. *Engineering Structures*,2002,24(12):1547-1559.
- [8] Xing B S, Du C L, Wang X F. The dynamic analysis of self-anchored suspension bridge based on ANSYS [J]. *Applied Mechanics and Materials*,2011,43:594-598.
- [9] Li Z Q, Fan Y Y. Analysis the unstressed length of self-anchored suspension bridge's main cable [C]// Proceedings of 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. Changsha,2010:318-322.
- [10] Di J, Wu J. Calculation methods for cable curve of self-anchored suspension bridge [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*,2004,4(3):38-43.

(上接第 118 页)

## 4 结 语

本文提出了基于动态无限博弈的多 agent 合作机制. 以多阶段邀请、考核模式形成无限次重复博弈,以协作优先级主动选取协作智能体,并提出信任基准控制 agent 博弈选取的自私性,使其理性计划阶段决策,通过博弈结果反馈调整收益函数,控制协作优先级,实现闭环调控. 最后以九宫格博弈实验,测试以 4 个 agent 作为基本单元采用动态无限次重复博弈时,信任基准对合作完成任务的影响程度. 实验表明,信任基准可有效调整 agent 间的信任等级,促进系统中 agent 合作频率的提高,有利于提升 MAS 完成客户请求任务的效率与系统的稳定性.

## 参考文献:

- [1] Bellifemine F, Calre G, Greenwood D. Developing multi-agent systems with JADE [M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd,2007.
- [2] Sichman J, Demazeau Y. Exploiting social reasoning to deal with agency level inconsistency [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Multi-agent Systems (ICMAS-95). San Francisco,1995:352-359.

- [3] 王冠群,张雪敏,刘锋,等. 船舶电力系统重构的博弈算法 [J]. 中国电机工程学报. 2012,32(13):69-76.  
(Wang Guan-qun, Zhang Xue-min, Liu Feng, et al. Game theory algorithm of reconfiguration for shipboard power system [J]. *Proceedings of the CSEE*. 2012,32(13):69-76.)
- [4] Pendharkar P C. Game theoretical applications for multi-agent systems [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39: 273-279.
- [5] Feldman M, Tamir T. Approximate strong equilibrium in job scheduling games [J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*,2009,36:387-414.
- [6] 宋梅萍,顾国昌,张国印,等. 一般和博弈中的合作多 agent 学习 [J]. 控制理论与应用,2007,24(2):315-321.  
(Song Mei-ping, Gu Guo-chang, Zhang Guo-yin, et al. Multi-agent learning in cooperative general-sum games [J]. *Control Theory & Applications*,2007,24(2):315-321.)
- [7] Khosravifar B, Bentahar J, Mizouni R. Agent-based game-theoretic model for collaborative web services: decision making analysis [J]. *Expert Systems with Applications*,2013, 40:3207-3219.
- [8] Chakraborty S, Pal A K. A cooperative game for multi-agent collaborative planning [C]// Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists. Hongkong,2010:1-8.
- [9] Myerson R B. Game theory [M]. Boston: Harvard University Press,1997.