

自锚式悬索桥正装分析空缆线形计算

贺耀北, 石雪飞, 耿少波

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要:自锚式悬索桥空缆线形是保证桥梁成桥状态的关键因素,以上海市浦东新区运河大桥为工程背景,提出了结合有限元施工控制模型与悬链线数值算法的空缆线形计算方法,对空缆线形以及施工过程进行精确分析,解决自锚式悬索桥施工控制残余误差的问题。最后通过对浦东运河大桥的分析,验证了应用此方法进行正装分析的精度以及效率。

关键词:自锚式悬索桥;施工控制;空缆线形;残余倾斜度;预偏量;正装分析

中图分类号:U448.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-0300(2009)03-0025-06

1 引言

自锚式悬索桥由于其造型美观、不需设置庞大的锚碇以及主缆对加劲梁产生巨大的轴向预压应力等诸多优点^[1],已经成为中小跨径内颇具竞争力的桥型。尤其是在软土地区和城市景观桥梁中,越来越受到青睐。上海市浦东新区运河大桥,跨径组合为112 m + 72 m,为独塔双跨自锚式悬索桥,桥型布置如图1所示;主跨矢高11.2 m,矢跨比为1:10;边跨矢高4.629 m,矢跨比为1:15.554。吊索采用垂直布置,间距7.0 m,每个吊点设一根吊索,全桥共有24对,48根吊索。索塔为钢筋混凝土桥塔,总高度57.06 m(不计塔顶索鞍高度),上塔柱高39.060 m,下塔柱高18.0 m。全桥共有2根主缆,间距为25.5 m。加劲梁采用钢箱梁、纵横梁、正交异性桥面板结构。

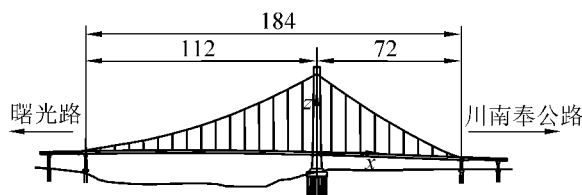


图1 浦东运河大桥桥型布置图(单位:m)

自锚式悬索桥施工控制计算分析必须从空缆状态出发,按照施工顺序,采用几何非线性有限元方法,逐阶段进行,直到最终成桥状态。在施工过程中,自锚式悬索桥在结构大位移、主缆自重垂度、加劲梁轴向压缩等诸多方面都表现出强烈的非线性,因此精确计算空缆线形及无应力长度,是自锚式悬索桥合理成桥状态的关键。

李小珍,强士中^[2]以主缆力的平衡条件及变形相容条件为基础,根据缆索无应力长度保持不变的原则,对成桥状态与空缆状态建立缆索状态方程,提出了悬索桥主缆空缆状态线形分析的数值方法。杨孟刚,陈政清^[3]以佛山平胜大桥为工程背景,根据加劲梁自重以及二期恒载不同的等效形式,提出了“等效集中力法”以及“均布荷载法”,并就两种简化模式施工控制的效果进行了比较。从成桥主缆线形推导空缆线形的思路,本质上是一种倒拆分析,由于非线性作用的存在,倒拆分析与实际正装施工过程并不能完全闭合,表现为成桥状态吊杆存在较大的残余倾斜度,鞍座也不能完全归位。

目前商用有限元软件广泛用于桥梁施工控制分析,但是有限元软件本身并不能解决空缆线形计算的问题,满足施工控制要求的正装分析空缆线形的需求尤为迫切。针对自锚式悬索桥施工控制过程的特点,提出了以分段悬链线法为数值计算手段,结合有限元施工控制模型的空缆线形迭代计算方法,并且编写了相应的计算程序。

收稿日期:2009-07-03

作者简介:贺耀北 男 1983年出生 硕士研究生

2 自锚式悬索桥空缆线形计算

主缆的成桥线形已经根据使用要求或者设计者经验确定,作为施工控制重要参数的空缆线形却是未知的,只能通过假设—计算—比较—修正假设的迭代方法得到^[4,5]。

2.1 悬链线基本方程

悬索桥主缆线形计算有传统的抛物线方法以及分段悬链线方法^[6]。抛物线计算方法假设^[7]在主缆自重与加劲梁等其他荷载相比较小,所有恒载可简化为沿跨度均布,不考虑主缆伸长对均布荷载影响等,各跨主缆曲线的几何形状为抛物线。实际上主缆承受两部分的荷载:一是吊索间沿弧长均布的主缆自重(缠丝及防护、主缆检修道重力);二是由吊索所传递的集中荷载(索夹、吊索及锚具等自重力和通过吊索传递的加劲梁恒载)及施工临时荷载,因此主缆是以吊点以及鞍座分离的分段悬链线。

悬链线段受力见图 2,悬链线方程的推导,前人已经做过大量工作,现直接引用,索段悬链线解^[6]为

$$y = H[\operatorname{ch} \alpha - \operatorname{ch}(2\beta x/l - \alpha)]/q \quad (1)$$

式中, $\alpha = \operatorname{arsh}(c\beta/\operatorname{lsh} \beta) + \beta$, $\beta = ql/2H$ 。通过对公式(1)进行积分,即可得到索段有应力索长

$$S = -H[\operatorname{sh}(-ql/H + qt/H) - \operatorname{sh}(qt/H)]/q \quad (2)$$

$$t = [\operatorname{arsh}(c\beta/\operatorname{lsh} \beta) + \beta]l/2\beta \quad (3)$$

索段弹性伸长量

$$\Delta S = \frac{H^2}{4EAq}[\operatorname{sh}(-2ql/H + 2qt/H) - \operatorname{sh}(2qt/H)] - Hl/2EA \quad (4)$$

索段无应力索长等于索段有应力索长与索段弹性伸长量之差

$$L_{us} = S - \Delta S \quad (5)$$

2.2 空缆线形迭代算法

主塔承受主缆传来的压力,并传递到基础,主塔将发生压缩变形;由于主缆锚固在主梁端部,因而主梁也将发生压缩变形,散索鞍的位置以及吊索的锚固点将发生变化;主缆在吊索力的作用下,主索鞍会往主跨方向发生位移,空缆状态下需要预先设定一个主索鞍预偏量;成桥状态下主缆承受恒载作用,在吊索力作用下,空缆矢高要小于成桥矢高。以上变形量决定了空缆线形的几何边界以及形状参数。

通过空缆主跨的几何边界以及矢跨参数,可以确定主跨的线形以及各吊点的位置;由于主缆与边跨水平力相等,因此根据边跨的几何边界可以确定边跨的线形以及各吊点的位置。针对独塔两跨的自锚式悬索桥,推导空缆线形的迭代计算公式,并且可将公式类推到双塔三跨的桥型。

(1)主跨空缆线形计算。主塔压缩变形假设为 Δc_0 ;主索鞍预偏量假设为 Δl_0 ;空缆主跨矢高与成桥状态矢高之差为 Δc_m 。吊索吊点纵向偏移量假设为 $\Delta l_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 、吊索锚固点纵向偏移量 Δb_i ,散索鞍预偏量为 Δb_n ,如图 3 所示。空缆跨度

$$L_m' = L_m + \Delta l_0 + \Delta b_n \quad (6)$$

空缆矢高

$$C_m' = C_m - \Delta c_m + \Delta c_0 \quad (7)$$

在空缆状态下,主塔到跨中之间的主缆可以理解

为一段悬链线,因此此段主缆可以用悬链线基本方程进行求解。由公式(1)可得

$$C_m' = H'[\operatorname{ch} \alpha_m' - \operatorname{ch}(2\beta_m' - \alpha_m')]/q \quad (8)$$

式中,

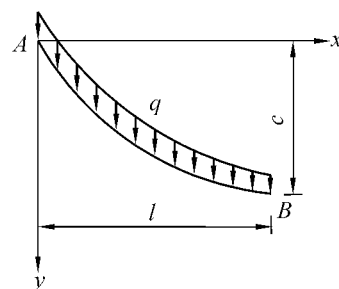


图 2 索段受力图示

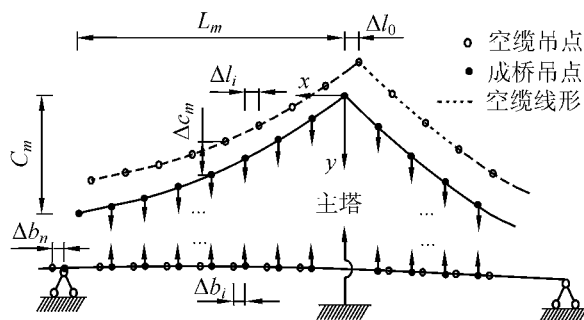


图 3 主跨空缆线形计算简图

$$\alpha_m' = \operatorname{arsinh}(C_m'\beta_m'/L_m'\sin\beta_m') + \beta_m' \quad (9)$$

$$\beta_m' = qL_m'/2H' \quad (10)$$

由于公式(8)、公式(9)、公式(10)是一组超越方程,难以找到水平力 H' 的解析解,但可以通过影响矩阵法^[8]得到水平力 H' 的数值解,计算过程如下:①假定水平力 H' ;②通过公式(8)、公式(9)、公式(10)计算 C_m'' ;③判断 C_m'' 与 C_m' 的误差,如果满足要求则跳至⑦;④水平力增加单位量: $H' = H' + 1$;⑤计算 C_m' 的增量 $\Delta C_m'$;⑥修正水平力 $H' = H' + (C_m'' - C_m')/\Delta C_m'$,返回②;⑦保存水平力 H' 。计算得到空缆水平力 H' ,代入公式(1)可确定主跨的线形。为保证吊索的垂直度,必须同时考虑吊索吊点与锚固点的偏移量。假设第 i 根吊索吊点在成桥状态的坐标为 (x_i, y_i) ,空缆状态的坐标为 (x_i', y_i') (坐标原点:空缆 IP 点),则有

$$x_i' = x_i + \Delta l_0 - \Delta l_i + \Delta b_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

从公式(1)可得吊点对应的竖向坐标

$$y_i' = H'[\operatorname{ch}\alpha_m' - \operatorname{ch}(2\beta_m'x_i'/L_m' - \alpha_m')]/q \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

(2)边跨空缆线形计算。边跨空缆线形的计算与主跨类似,但也有不同之处。边跨与主跨主缆水平力相等,因此边跨不需要再进行水平力的迭代计算,可以直接通过悬链线基本方程,确定线形以及吊点坐标。两塔三跨的自锚式悬索桥关于跨中对称,可以取半结构进行分析。因为跨中吊点没有发生水平位移,因此有

$$\Delta b_n = 0 \quad (13)$$

公式(6)可以改写为

$$L_m' = L_m + \Delta l_0 + \Delta b_n = L_m + \Delta l_0 \quad (14)$$

根据以上理论,开发了自锚式悬索桥施工控制正装分析空缆线形计算专用程序,通过界面输入必要参数,即可通过迭代得到对应的空缆线形。

(3)与有限元迭代计算。在数值计算空缆线形时,需要事先确定主缆拉伸变形量、几何形状变化、主梁以及以及主塔压缩变形量等参数。以设计成桥线形作为主缆的空缆线形,建立合理的施工控制模型,进行有限元几何非线性施工仿真分析,可以得到一个成桥状态。将此正装分析得到的缆、梁、塔变形量作为空缆线形计算参数,可以迭代计算得到一个空缆线形,并以此修改有限元模型,再次运算。经过多次迭代后,可以比较实际成桥状态与设计成桥状态之间的误差,当索鞍预偏量均能完全归位、吊索垂直度可以接受,同时主跨矢跨比亦能得到满足时,可以终止迭代过程。计算流程见图4,计算过程分为两个迭代模块:主迭代模块,通过不断修改空缆线形来,减少实际成桥状态与设计成桥状态之间的误差;数值迭代模块,从有限元结果提取参数,通过迭代计算精确的空缆线形以及吊点坐标,作为主迭代模块下一次迭代的起点。

3 算例分析

为进一步验证此方法,以浦东运河大桥为例,采用有限元与数值计算交互迭代的方法,对空缆线形进行精确分析。

3.1 主要计算参数

主跨: $l_m = 112.0$ m, $c_m = 40.0$ m。边跨: $l_s = 72.0$ m, $c_s = 43.0$ m。主要材料特性见表1。

表1 材料特性

参数名	容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	面积/ m^2	弹性模量/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)
主缆	78.5	3.40×10^{-2}	1.95×10^8
吊索	78.5	2.14×10^{-3}	1.95×10^8
主梁(标准段)	103.5	1.14	2.06×10^8
主塔	26	6.42	2.06×10^7

本例有限元模型采用 Midas/Civil 建立,主梁与主塔采用梁单元模拟,主缆与吊索采用索单元模拟,全

桥共有 230 个单元,共计 242 个节点;吊索分三批张拉,共计用 79 个计算工况模拟施工过程,有限元模型如图 5 所示。

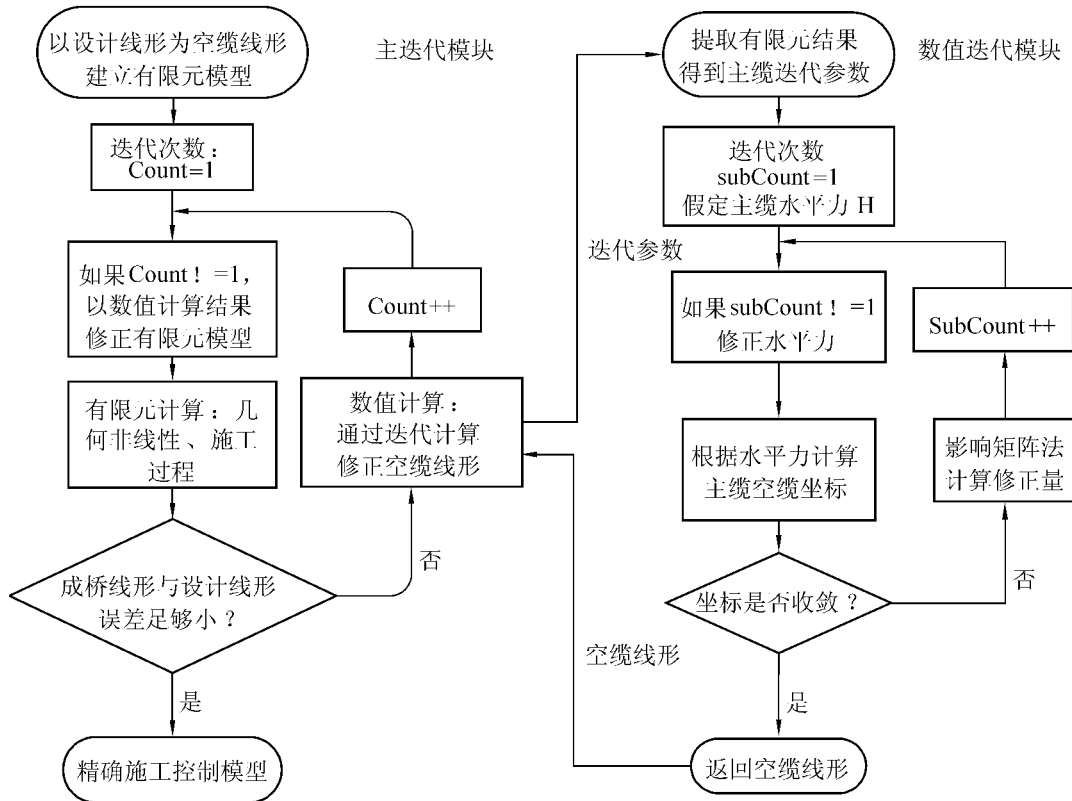


图 4 迭代算法流程图

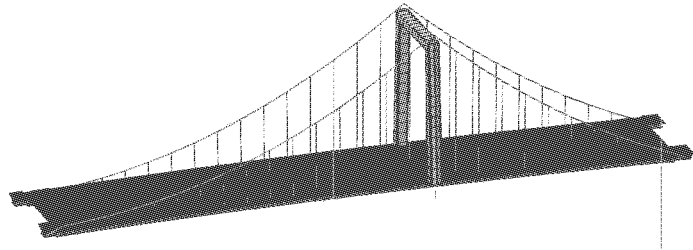


图 5 有限元模型

3.2 计算结果

主迭代过程运行到第 5 次时,实际成桥状态与设计成桥状态的误差已经在可以接受的范围之内,主索鞍预偏量为 228.5 mm,散索鞍预偏量为 36.1 mm,在成桥状态主索鞍以及散索鞍均能达到设计位置;主跨无应力长度为 122.726 m,边跨无应力长度为 85.703 m;空缆水平力为 458.80 kN,空缆矢高 10.062 m;成桥状态吊索最大残余倾斜度为 0.012°,由于边跨短吊杆长度较小,因而误差相对其他吊索为大;成桥状态主缆主跨矢高为 11.200 m,满足设计要求。迭代过程主要参数以及计算结果如表 2、表 3 所示。

表 2 迭代过程空缆主要参数

迭代 次数	无应力长度/m		预偏量/mm		空缆/kN	主跨空缆 矢高/m
	主跨	边跨	主索鞍	散索鞍		
1	122.990	86.002	0.0	0.0	405.17	11.200
2	122.774	85.725	215.5	31.9	450.97	10.215
3	122.732	85.705	226.7	35.5	457.64	10.083
4	122.727	85.703	228.2	36.1	458.60	10.064
5	122.726	85.703	228.5	36.1	458.80	10.062

表3 空缆线形与成桥线形

位置	空缆		成桥		无应力	吊索残余
	x 坐标	z 坐标	x 坐标	z 坐标	长度	倾斜度/(°)
散索鞍	-112.036	13.869	-112.000	13.869	6.988 0	—
吊索	-105.069	14.405	-105.000	14.032	7.005 1	0.012
吊索	-98.112	15.223	-98.000	14.550	7.040 2	0.010
吊索	-91.158	16.325	-91.000	15.423	7.094 7	0.007
吊索	-84.200	17.712	-84.000	16.664	7.161 3	0.004
吊索	-77.238	19.389	-77.000	18.243	7.245 5	0.003
吊索	-70.266	21.360	-70.000	20.170	7.345 1	0.003
吊索	-63.280	23.631	-63.000	22.446	7.459 6	0.001
矢高点	-56.280	26.207	-56.000	25.069	7.589 1	0.001
吊索	-49.262	29.097	-49.000	28.043	7.731 1	0.001
吊索	-42.228	32.306	-42.000	31.365	7.888 2	0.001
吊索	-35.177	35.843	-35.000	35.039	8.058 2	0.001
吊索	-28.110	39.716	-28.000	39.068	8.235 2	0.001
吊索	-21.034	43.928	-21.000	43.443	8.426 3	0.001
吊索	-13.948	48.489	-14.000	48.170	8.623 4	0.001
吊索	-6.860	53.402	-7.000	53.242	8.834 9	0.001
主索鞍	0.228	58.675	0.000	58.669	9.254 0	—
吊索	7.204	52.593	7.000	52.579	9.034 3	0.001
吊索	14.194	46.869	14.000	46.831	8.821 7	0.002
吊索	21.194	41.500	21.000	41.426	8.608 0	0.002
吊索	28.192	36.487	28.000	36.380	8.407 0	0.003
吊索	35.186	31.822	35.000	31.688	8.218 8	0.003
吊索	42.176	27.498	42.000	27.344	8.039 8	0.004
吊索	49.157	23.509	49.000	23.352	7.871 9	0.004
吊索	56.126	19.848	56.000	19.713	7.714 2	0.004
吊索	63.081	16.510	63.000	16.431	9.732 9	0.004
散索套	72.024	12.671	72.000	12.669	—	—

4 结语

自锚式悬索桥是一种非线性行为很强的柔索结构体系,线性迭加原理不再适用,从成桥状态出发推导空缆线形的倒拆分析,存在一定的误差。现提出了结合施工控制过程的空缆线形迭代计算方法。施工控制过程采用有限元模型进行完全模拟,以多段悬链线理论迭代计算空缆线形。此方法应用于上海浦东新区运河大桥施工监控正装分析,在主程序迭代4、5次之后,即可得到精确的空缆线形,最后按预定施工顺序正装得到的成桥状态与设计成桥状态相比误差较小,主跨矢高与设计矢高完全一致,吊索残余倾斜度接近于0,索鞍预偏量亦完全归位,达到了施工控制的预定目标。因此此法在精度上是有保证的,同时效率较高,适于工程实践运用,可以为自锚式悬索桥施工控制服务。

参 考 文 献

- [1]程斌,孙海涛,肖汝诚. 自锚式悬索桥的主缆线形计算与误差分析[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2008,36(3): 7-24.
- [2]李小珍,强士中. 悬索桥主缆空缆状态的线形分析[J]. 重庆交通学院学报,1999,18(3):7-13.
- [3]杨孟刚,陈政清. 自锚式悬索桥施工过程模拟分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2006,33(2):26-30.
- [4]范立础,潘永仁,杜国华. 大跨度悬索桥结构架设参数精细算法研究[J]. 土木工程学报,1999,32(6):20-25.
- [5]潘永仁,杜国华,范立础. 悬索桥恒载结构几何形状及内力的精细计算[J]. 中国公路学报,2000,13(4):33-36.
- [6]狄谨,武隽. 自锚式悬索桥主缆线形计算方法[J]. 交通运输工程学报,2004,4(3):38-43.
- [7]项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2000:305-308.
- [8]王鹏. 悬索桥空缆线形分析[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2005.

(下转第33页)

加快。

在路堤荷载不变的条件下,随着时间的增长,桩顶应力有所增加但变化不大,桩间土应力基本上保持恒定,桩土应力比随之增大。

桩土应力比随填土高度的增加而增大,两者基本上呈线性增长关系;其数值并非无限增加,逐渐呈现出平缓的趋势。在路基填筑期间,桩土应力比不是一个常数,基本上在1.0~2.0之间变化。

实测路基横断面中心位置桩土应力比大于路肩位置的桩土应力比。

参 考 文 献

- [1]沈伟,池跃君,宋二祥.考虑桩、土、垫层协同作用刚性桩复合地基沉降计算方法[J].工程力学,2003,20(2):36-42.
- [2]徐洋,谢康和,卢廷浩.二灰土桩复合地基三维固结有限元分析[J].岩土工程学报,2002,24(2):249-253.
- [3]池跃君,宋二祥.刚性桩复合地基应力场分布试验研究[J].岩土力学,2003,24(3):339-343.
- [4]张杰,张可能.柔性基础下群桩复合地基荷载传递规律及计算[J].岩土力学,2003,24(2):178-182.

Test Study on Pile-soil Stress Ratio of Compacted Cement-treated Soil Pile Composite Foundation for Highway

Liu Yanji

(The 5th Company of the 13th Railway Engineering Bureau Group Corporation, Changchun 130033, China)

Abstract: The rule of the pile-soil stress ratio of highway compacted cement-treated soil pile composite foundation with the embankment height and time going is studied in this paper based on the test on site. During construction of the embankment, the number of pile-soil stress ratio is about 1.0~2.0. When the embankment loading keeps constant, the number of pile-soil stress ratio will increase slowly with time going. This conclusion can be useful for other similar engineering design.

Key words: highway; compacted cement-treated soil pile; pile-soil stress ratio

~~~~~  
(上接第29页)

## Calculation of Unloaded Cable Shape of Self-anchored Suspension Bridge

He Yaobei, Shi Xuefei, Geng Shaobo

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Unloaded cable shape of self-anchored suspension bridge is an important factor to ensure the completion state. With Pudong canal bridge as the engineering background, a method to calculate unloaded cable shape considering construction control is proposed. In combination with finite element model and segmental catenary theory, residual error is avoided during construction control of self-anchored suspension bridge. The results of the project shows that the proposed method is accurate and fast convergent.

**Key words:** self-anchored suspension bridge; construction control; unloaded cable shape; residual inclination; pre-offsetting; forward analysis