

# 悬索桥主缆线形计算与施工控制

吴伟胜, 王仁贵

(中交公路规划设计院 北京市 100010)

**摘 要:** 主缆是悬索桥的重要受力构件, 精确计算其空缆线形、成桥线形、施工过程控制和各索股无应力长度是悬索桥上部结构成败的关键。

**关键词:** 悬索桥; 主缆线形; 施工控制; 索股长度

## 1 概述

根据悬索桥的特点和施工方法, 主缆是通过架设索股(预制索股法 PWS)或空中纺丝法(AS 法)而逐渐形成的, 架设完成后, 经过紧缆形成主缆。大跨径悬索桥的主缆一旦形成后, 从吊装加劲梁, 到加劲梁段刚接到成桥状态, 不可能靠施工阶段的跟踪调整来实现设计的主缆线形, 即无法对主缆线形进行调整(除在可能的条件下通过索鞍预偏外), 必须靠提供可靠的计算参数, 采用精确的分析程序计算出施工状态线形, 再通过严格的制造和施工质量的控制(特别是基准丝股的架设), 使架设的主缆线形与设计相符, 并严格控制吊索的制作长度和加劲梁的制造尺寸, 才能实现主缆设计线形。因此, 大跨径悬索桥施工控制实际上是事前控制, 即通过对索股等的精确下料与控制及空缆线形进行控制。所谓事前控制就是根据设计条件、荷载工况由成桥参数推算出成桥线形, 再由成桥线形推算出空缆状态下的理论线形, 即对主缆各索股的无应力下料长度、主缆在吊索间的无应力长度(即索夹在空缆线形时的具体安装位置)、主缆初始垂度与线形、主索鞍和散索鞍的初始预偏位置、吊索的无应力下料长度等的精确计算, 得出初始状态的各有关参数。具体为由成桥主缆几何线形可计算出主缆各索股的几何长度, 再算出恒载所产生的主缆弹性伸长, 两者之差, 即为主缆各索股的无应力长度, 然后根据索鞍曲率和散索鞍的三维扩散长度, 套筒锚固长度及考虑调整长度(如采用拉杆丝扣进行调整)等, 分别按各索股的具体情况对理论长度予以修正, 即可得主缆各索股的无应

力下料长度; 同样可得主缆在吊索间的无应力下料长度及吊索无应力下料长度。至于索鞍的初始预偏量计算, 是根据假设索鞍和主缆拥有共同的永不脱离点, 即主缆在任何状态下各跨的主缆无应力长度保持不变, 同时为了尽可能减小主缆对塔产生的不平衡水平力, 使索塔在缆力的作用下保持自身平衡。厦门海沧大桥的散索鞍为安放在倾角为  $28.432^\circ$  的斜面上的滚轴式散索鞍, 单个散索鞍重达 43 t, 必须考虑散索鞍的下滑分力, 使散索鞍在倾斜面保持平衡, 就可以通过对索鞍位置的不断改变来寻找自然平衡时的索鞍位置, 并保证主缆与索鞍几何协调, 从而可确定索鞍的初始预偏量及主缆初始垂度与线形, 即得空缆状态下的理论线形。根据空缆线形严格控制主索鞍、散索鞍的标高、鞍座挂索初始偏移量、索夹在主缆上的初始位置、主缆挂索初始的水平拉力和垂度等施工初始状态下的参数。因为在理想的施工条件下, 只要这些参数确定以后, 就可以根据各跨的主缆无应力长度保持不变, 并满足平衡方程和有关协调条件(变形协调、几何协调等), 即可计算出各阶段下主缆几何线形。所以, 根据缆长计算对索股进行精确下料和空缆状态时的线形控制是悬索桥施工控制的关键之所在, 并可使成桥状态时的结构几何形状(包括主缆线形、桥面设计线形、吊索的倾斜度、索鞍到位程度等)和结构受力(包括各构件的内力分配等)满足设计要求。

在具体施工控制过程中, 主缆架设完成后, 要实现加劲梁成桥线形, 唯一可调整的措施是控制吊索下料长度。

## 2 成桥线形计算理论分析

### 2.1 基本假定

(1) 主缆为完全柔性的, 既不受压也不承受弯矩, 因而其截面抗弯刚度对缆形的影响可忽略;

(2) 主缆的全部应力在比例极限以内, 符合虎克定律;

(3) 考虑主缆受拉会伸长, 截面面积会缩小, 受力前后的单位体积重量会发生变化等因素;

(4) 考虑主缆的几何非线性等。

### 2.2 加载方式

悬索桥成桥状态时, 主缆除沿主缆方向的均布主缆自重(包括缠丝及防护)外, 还承受由吊索传递的索夹、吊索(包括锚头自重)和加劲梁自重及桥面二期恒载的集中力(二期恒载是由主缆和钢箱梁共同承受), 即主缆的成桥几何线形既不是抛物线, 也不是悬链线, 而索夹间线形为悬链线。因此悬索桥的主缆受力图示可简化为承受沿主缆方向的均布荷载及索夹处的集中荷载作用下的柔性索。

### 2.3 计算理论分析

为了便于计算, 取跨中的一半主缆作为计算对象。

(1) 先假设成桥状态时主缆线形为抛物线, 并取跨中为原点, 见图 1 所示。

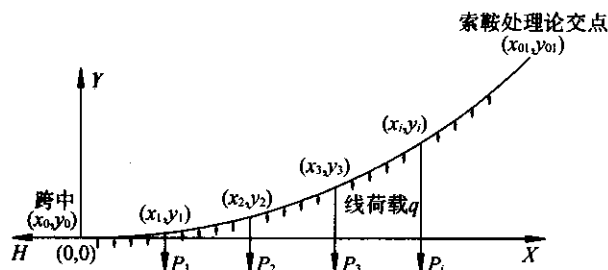


图 1 成桥状态主缆几何线形计算离散图

抛物线方程:  $y = 4 \times F \times x^2 / L^2$

主缆跨中水平力:  $H = qL^2 / 8F$

再根据吊索  $x_i$  坐标求得:  $y_i = 4 \times F \times x_i^2 / L^2$

式中:  $F$  为中跨的矢高;  $L$  为中跨的跨径;  $q$  为粗略估计沿水平方向的荷载集度(不必精确)。

(2) 根据以上求得的主缆水平力  $H$ , 及各吊索间的悬链线  $i$  两端的坐标  $(x_{i-1}, y_{i-1})$ 、 $(x_i, y_i)$ , 则:

$i$  段悬链线方程为  $y - B_i = N \times \text{ch}((x - A_i) / N)$

其中:  $A_i = (x_{i-1} + x_i) / 2 - N \times \text{arsh}((y_{i-1} - y_i) / (2N \times \text{sh}((x_{i-1} - x_i) / (2N))))$

$B_i = y_{i-1} - N \times \text{ch}((x_{i-1} - A_i) / N)$

$N = H / q$

式中:  $q$  为中跨主缆自重沿主缆方向每延米的荷载集度。

考虑主缆受拉会伸长, 截面面积会缩小, 受力前后的单位体积重量会发生变化等因素。为了便于研究, 先设定一些参量: 索在受力前的单位体积重量(密度)为  $\rho_0$ , 受力后的单位体积重量为  $\rho$ ; 未受力前的索长为  $S_0$ , 微段为  $dS_0$ , 受力后的索长为  $S$ , 微段为  $dS$ ; 未受力前的索截面面积为  $A_0$ , 受力后的索截面面积为  $A$ ; 索的拉力为  $T$ , 弹性模量为  $E$ , 弹性伸长为  $\Delta S$ , 见图 2 所示。

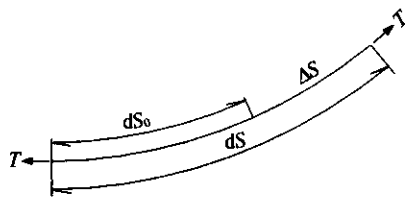


图 2

$$\text{即: } dS = dS_0 + \Delta S \quad (1)$$

$$\text{其中: } \Delta S = T \times dS_0 / (EA_0) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$dS = dS_0 + T \times dS_0 / (EA_0) = dS_0 (1 + T / (EA_0))$$

$$dS / dS_0 = 1 + T / (EA_0) \quad (3)$$

根据质量守恒定律得:

$$\rho_0 \times A_0 \times dS_0 = \rho \times A \times dS \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得:

$$dS / dS_0 = (\rho_0 \times A_0) / (\rho \times A) = 1 + T / (EA_0)$$

设受力前微段  $dS_0$  的重量为  $dG_0 = \rho_0 \times A_0 \times dS_0$ , 受力后微段  $dS$  的重量为  $dG = \rho \times A \times dS$ ; 对应的单位长度重量为  $q_0 = dG_0 / dS_0 = \rho_0 \times A_0$ , 称为受力前的荷载集度; 以及  $q = dG / dS = \rho \times A$ , 称为受力后的荷载集度。即可得主缆受力前后的荷载集度关系:  $q_0 / q = 1 + T / (EA_0)$ , 也就充分说明了主缆的截面面积和线荷载在各阶段不再为常数。

(3) 求  $x_0 \sim x_1$  段悬链线中(第 1 段)线荷载对  $x_i$  点的力矩  $M_{1i}$ :

$$\begin{aligned} M_{1i} &= \int_{x_0}^{x_1} (x_i - x) \times q dL \\ &= \int_{x_0}^{x_1} (x_i - x) \times q \times (1 + y'^2)^{1/2} dx \end{aligned}$$

式中:  $y' = \text{sh}((x - A_1) / N)$

积分可得:

$$M_{1i} = (q \times ((x_i - x) \times N \times \text{sh}((x - A_1) / N) +$$

$$N^2 \times \text{ch}((x - A_1)/N)) \big|_{x_0}^{x_1}$$

(4) 各力对  $x_i$  点力矩  $\sum M = 0$ 。

$$H \times (y_i - y_0) = M_{1i} + P_1 \times (x_i - x_1) + M_{2i} + P_2 \times (x_i - x_2) + \dots + M_{ii}$$

$$y_i = (M_{1i} + P_1 \times (x_i - x_1) + M_{2i} + P_2 \times (x_i - x_2) + \dots + M_{ii}) / H + y_0$$

重新求出主缆在吊索处的各点坐标  $(x_i, y_i)$ , 即同时求得塔上主索鞍处的理论交点坐标, 此时求得塔上主索鞍处的理论交点坐标是在假定的水平力  $H$  下, 因此会与实际的理论交点坐标不吻合, 必须重新修正  $H$  值。

(5) 由第 (4) 步计算所得  $(x_i, y_i)$ , 以及线荷载  $q$ , 吊索的集中力作用下, 对实际理论交点  $(x_{01}, y_{01})$  求出力矩  $M$ , 则:

$$H_1 = M / (y_{01} - y_0)$$

(6) 用 (5) 求得  $H_1$  代替 (1) 中的  $H$ , 重复 (2)、(3)、(4)、(5) 步骤, 得出  $H_2, H_3, \dots, H_K$ , 当  $|H_K - H_{K-1}|$  小于给定的迭代精度且塔上主索鞍处的理论交点坐标差值  $\Delta x, \Delta y$  满足精度要求时, 停止迭代, 将  $H_K$  作为最终值。同时相应求得主缆在各吊索处的坐标  $(x_i, y_i)$ , 即已确定了成桥状态时中跨主缆几何线形。

(7) 同理, 可以求得边跨的主缆几何线形, 再通过移动主索鞍、散索鞍的位置直至跟主缆相切, 即满足几何协调条件, 求出主缆与主索鞍、散索鞍之间的切点, 具体处理方法本文不再赘述。

(8) 根据主缆的成桥线形, 求出主缆在吊索之间各段的几何长度, 再算出在恒载作用下所产生的主缆弹性伸长, 两者之差, 就可计算出各吊索之间的主缆无应力长度。

(9) 根据各段主缆的无应力长度相等和平衡条件, 可推出空缆线形及各标志点位置, 据此进行下料和施工控制。

### 3 主缆各索股长度计算

主缆无应力长度的精确计算, 是主缆线形控制的最基本要求。主缆无应力长度具体计算为: 由成桥主缆几何线形推算出主缆各索股的几何长度, 再算出恒载所产生的各索股弹性伸长, 两者之差, 即为主缆各索股的无应力长度, 然后根据索鞍曲率和散索鞍的三维扩散长度、套筒锚固长度及考虑调整长度 (如采用拉杆丝扣进行调整) 等, 分别按各索股的具

体情况对理论长度予以修正, 即可得主缆各索股的无应力下料长度; 同样可得主缆在索夹间的无应力长度及吊索无应力下料长度, 为安装索夹放样提供数据。

## 4 施工控制计算

### 4.1 空缆状态

#### 4.1.1 基本假定

(1) 两锚碇锚固点间的距离保持不变;

(2) 主缆仅承受线荷载, 主缆的空缆线形视为悬链线;

(3) 主缆在自重作用下, 中跨与边跨的索力水平分量相等, 由于散索鞍放置在斜面上, 则索力沿此斜面的分量相同 (未考虑滚动摩擦);

(4) 锚固点与散索鞍、散索鞍与主鞍, 塔顶上的 2 个主鞍之间的无应力长度应等于成桥状态时的无应力长度 (主缆与主鞍、散索鞍之间存在永不脱离点)。

#### 4.1.2 加载方式

悬索桥空缆状态下, 主缆仅承受沿主缆方向的均布自重荷载, 此时主缆的几何线形可视为悬链线。

#### 4.1.3 理论分析

空缆线形计算基于上述的基本假定, 根据成桥的理论设计线形, 建立变形协调和力的平衡方程, 经过多次迭代, 即可精确计算出主缆的空缆线形和主鞍 (散索鞍) 的预偏量。

### 4.2 施工状态

#### 4.2.1 基本假定

(1) 两锚碇锚固点间的距离保持不变;

(2) 主缆除承受线荷载外, 还承受通过吊索传递的集中荷载, 集中荷载包括由于施工引起的各项荷载, 这必将会出现竖直分力及水平分力等, 主缆的线形既不是抛物线, 也不是悬链线;

(3) 主缆在施工状态时, 在主塔能承受足够水平力的条件, 主鞍在主塔上为临时固定, 即中跨与边跨的索力水平分量并不相等, 由于散索鞍放置在斜面上, 则索力沿此斜面的分量相同 (未考虑滚动摩擦);

(4) 锚固点与散索鞍、散索鞍与主鞍, 塔顶上的 2 个主鞍之间的无应力长度应等于实际架设空缆状态时的无应力长度 (应考虑温度的修正)。

#### 4.2.2 加载方式

悬索桥施工过程中, 除悬索桥成桥状态时各项受力外, 还承受预偏箱梁或顶推箱梁时, 吊索出现倾

斜对主缆所产生的水平分力,主鞍(散索鞍)临时固定所引起主缆在各跨的水平分力不相等及承受各工况的施工荷载等。

#### 4.2.3 理论分析

根据以上基本假定进行施工线形计算。由于实际架设的空缆线形与理论计算的空缆线形难免出现误差及各种因素的影响,所以在计算施工阶段的主缆线形时,应根据实际架设的空缆线形、相应的温度、索塔的纵向刚度及由于索塔在荷载作用下产生的弹性压缩和混凝土收缩进行预抬高综合因素的影响,建立力学模型、变形协调和力的平衡方程,经过多次迭代,即可精确计算出各施工工况状态下的线形,及此时主塔承受的不平衡的水平力,并可判断出需不需要顶推主鞍及相应的顶推量。

#### 5 程序流程与框图

程序计算分析流程与框图见图 3~图 5。

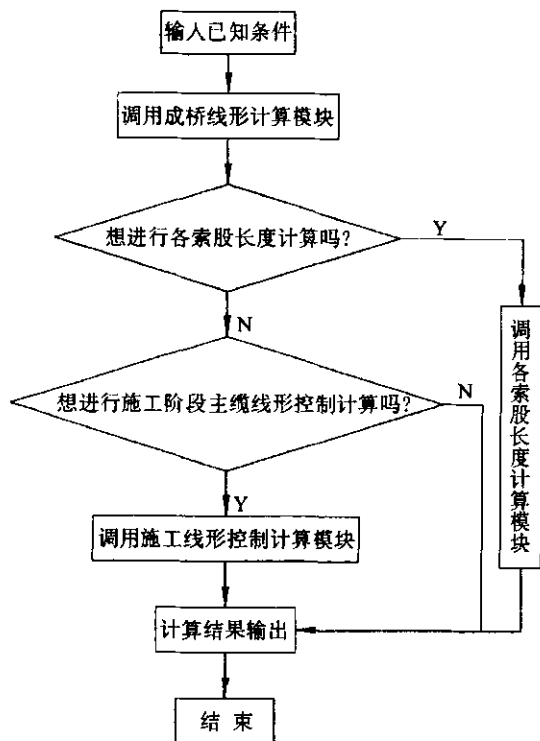


图 3 线形计算模块流程

#### 6 算例与工程实例应用情况(精度分析)

例 1: 厦门海沧大桥。

厦门海沧大桥施工图设计本程序设计值与西南交通大学复核值、实测结果比较见表 1。

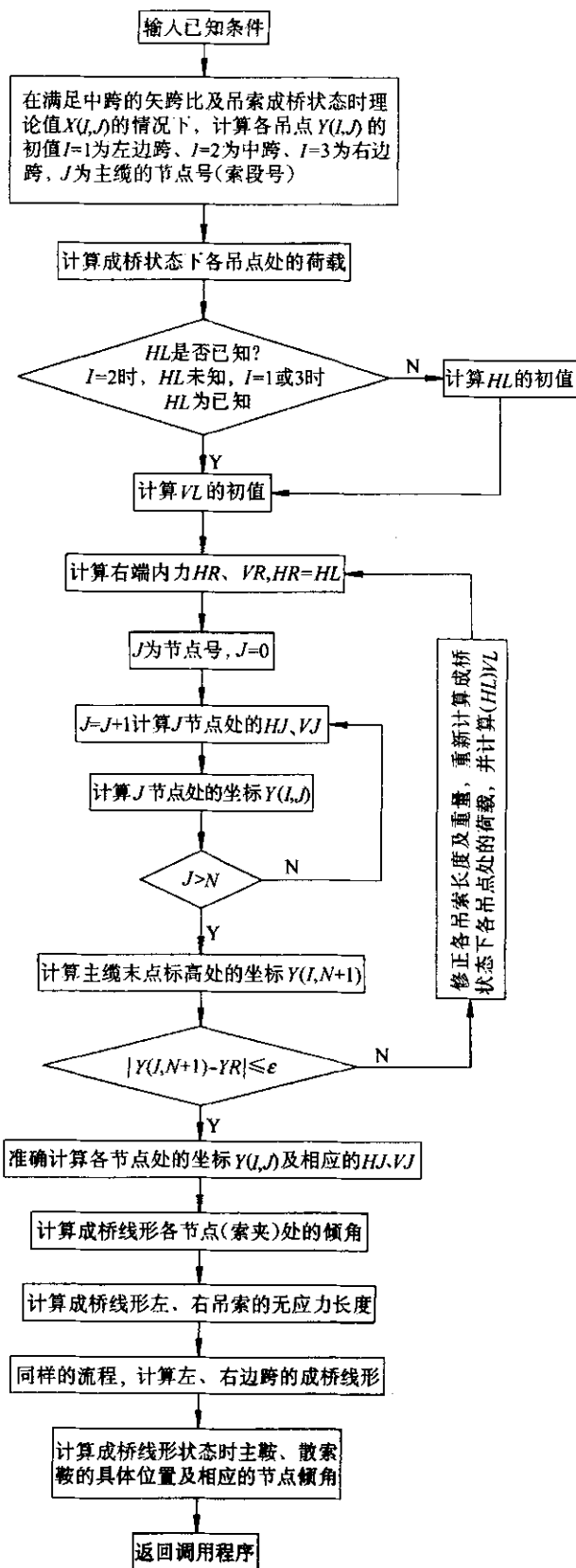


图 4 成桥线形计算模块流程

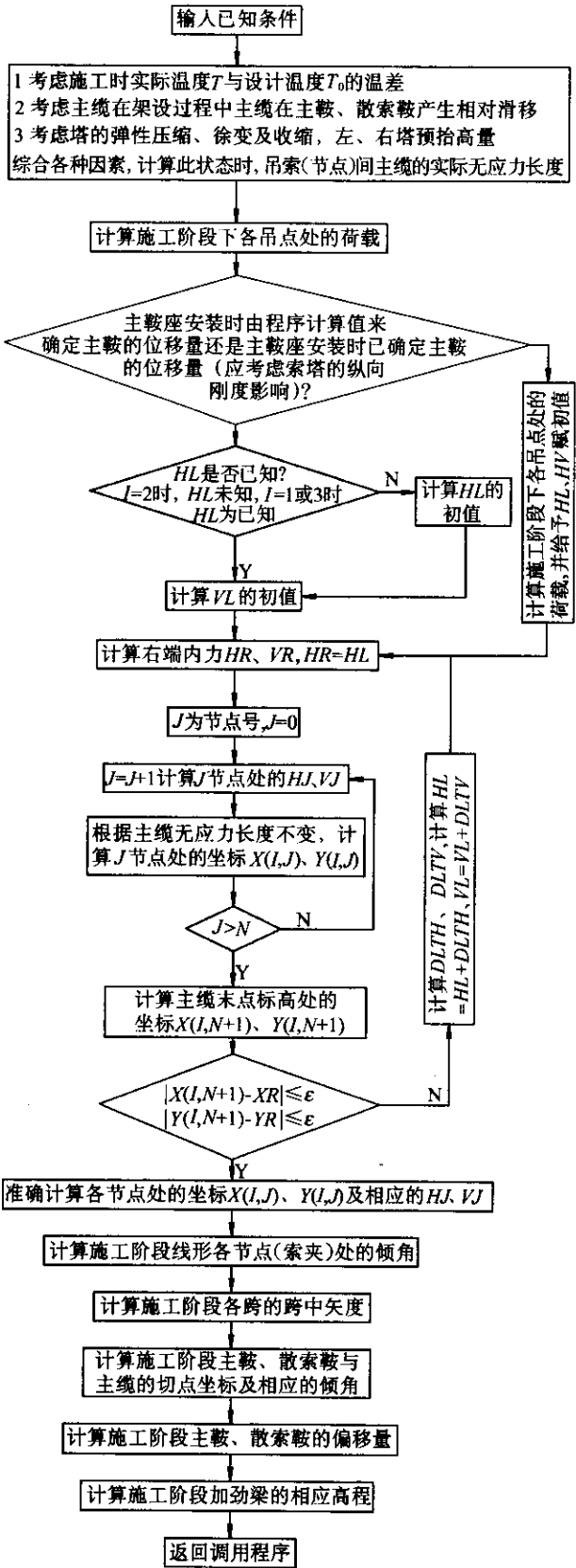


图 5 施工线形控制计算模块流程

表 1 厦门海沧大桥主缆线形

项 目	成桥状态	空缆状态		
	设计值	实测值	设计值	复核值
中跨矢高/m	61.714	56.727	56.578	56.733
左边跨矢高/m	7.928	7.402	7.152	7.440
右边跨矢高/m	7.928	7.402	7.152	7.488
主鞍处边跨侧主缆倾角/(°)	25.540 2	24.974 0	24.961 3	
主鞍处中跨侧主缆倾角/(°)	21.118 2	19.319 1	19.250 9	
散索鞍处边跨侧主缆倾角/(°)	12.480 3	11.934 1	11.980 2	
散索鞍处锚跨侧主缆倾角/(°)	45.135 1	45.877 0	45.000 0	
主鞍偏移量/m		0.519	0.555	
散索鞍转角/(°)		0.076	0.071	

从表 1 中可以得出,在空缆架设中各跨设计矢高与实测矢高差值分别为:中跨矢高差值为 6 mm,左边跨差值为 38 mm,右边跨差值为 86 mm,计算误差足以满足施工控制的要求。主缆及吊杆的无应力长度设计值与西南交大的复核值差值在 30 mm 以内,满足设计的要求。

例 2:江阴大桥。

江阴大桥施工图设计,本程序复核值与原设计值结果比较见表 2。

表 2 江阴大桥主缆线形

项 目	成桥状态		空缆状态	
	原设计值	复核值	原设计值	复核值
中跨矢高/m	131.905	131.905	121.873	121.204 9
左边跨矢高/m	2.696	2.578	8.199	8.153 7
右边跨矢高/m	2.279	2.181	6.930	6.898 3
左主鞍处边跨侧主缆倾角/(°)	27.072	27.056 3	29.974	30.085 8
左主鞍处中跨侧主缆倾角/(°)	20.701	20.638 1	19.262	19.375 7
右主鞍处边跨侧主缆倾角/(°)	27.072	27.059 6	29.705	29.850 9
右主鞍处中跨侧主缆倾角/(°)	20.701	20.639 2	19.262	19.375 7
左散索鞍处边跨侧主缆倾角/(°)	24.240	24.241 4	21.328	21.177 6
左散索鞍处锚跨侧主缆倾角/(°)	42.500	42.572 5	42.516	42.783 7
右散索鞍处边跨侧主缆倾角/(°)	24.494	24.477 9	21.863	21.676 7
右散索鞍处锚跨侧主缆倾角/(°)	42.500	42.572 5	42.516	42.782 6
左主鞍偏移量/m			1.218	1.223 1
右主鞍偏移量/m			1.064	1.077 8
左散索鞍转角/(°)			0.577	0.580
右散索鞍转角/(°)			0.577	0.580

例 3:润扬大桥

润扬大桥施工图设计,本程序复核计算与原设计计算结果比较见表 3。

主缆成桥状态及空缆状态下的线形比较见表3。索股长度复核比较见表 4。吊索总成长度复核比较见表 5。

经计算比较,吊索长度存在一定的差值,可在主缆架设完毕后,根据主缆的实际线形修正各吊索下料长度,确保加劲梁的成桥线形。

项 目	成桥状态		空缆状态	
	原设计值	复核值	原设计值	复核值
中跨矢高/m	149.605	149.605	135.362	135.232
边跨矢高/m	4.418	4.419	14.070	14.068
主鞍处边跨侧主缆倾角/(°)	22.579	22.5762	26.563	26.5791
主鞍处中跨侧主缆倾角/(°)	21.625	21.7567	20.001	20.0210
散索鞍处边跨侧主缆倾角/(°)	18.842	18.8430	14.726	14.7287
散索鞍处锚跨侧主缆倾角/(°)	39.000	39.0777	39.000	39.2975
主鞍偏移量/m			2.033	2.006
散索鞍转角/(°)			0.693	0.709

表 4 润扬大桥索股长度复核比较								m
索股号	1	2 3	4 6	5	7 10	8 9	11 15	12 14
索股长度设计值	2 580.501 4	2 580.521 8	2 580.390 6	2 580.3558	2 580.299 0	2 580.210 0	2 580.386 2	2 580.277 4
索股长度复核值	2 580.599 8	2 580.408 9	2 580.470 2	2 580.442 2	2 580.401 2	2 580.286 6	2 580.455 8	2 580.346 5
差 值	0.098 4	－0.112 9	0.079 6	0.086 4	0.102 2	0.076 6	0.069 6	0.069 1
索股号	13	16 21	17 20	18 19	22 28	23 27	24 26	25
索股长度设计值	2 580.242 6	2 580.584 2	2 580.220 6	2 580.131 4	2 580.489 6	2 580.306 2	2 580.197 2	2 580.162 2
索股长度复核值	2 580.318 8	2 580.513 4	2 580.313 8	2 580.199 0	2 580.561 2	2 580.366 9	2 580.257 5	2 580.229 9
差 值	0.076 2	－0.070 8	0.093 2	0.067 6	0.071 6	0.060 7	0.060 3	0.067 7
索股号	29 36	30 35	31 34	32 33	37 43	38 42	39 41	40
索股长度设计值	2 580.571 6	2 580.339 2	2 580.175 2	2 580.085 8	2 580.443 4	2 580.259 6	2 580.150 4	2 580.115 4
索股长度复核值	2 580.687 1	2 580.461 0	2 580.261 3	2 580.146 5	2 580.507 3	2 580.313 0	2 580.203 4	2 580.175 9
差 值	0.115 5	0.121 8	0.086 1	0.060 7	0.063 9	0.053 4	0.053 0	0.060 5
索股号	44 51	45 50	46 49	47 48	52 58	53 57	54 56	55
索股长度设计值	2 580.560 2	2 580.327 4	2 580.163 2	2 580.073 6	2 580.430 4	2 580.246 2	2 580.136 8	2 580.101 8
索股长度复核值	2 580.669 7	2 580.443 6	2 580.243 9	2 580.129 1	2 580.488 5	2 580.294 1	2 580.184 6	2 580.157 1
差 值	0.109 5	0.116 2	0.080 7	0.055 5	0.058 1	0.047 9	0.047 8	0.055 3
索股号	59 66	60 65	61 64	62 63	67 73	68 72	69 71	70
索股长度设计值	2 580.582 2	2 580.349 2	2 580.184 8	2 580.095 2	2 580.450 8	2 580.266 6	2 580.157 0	2 580.122 0
索股长度复核值	2 580.687 3	2 580.461 4	2 580.261 8	2 580.147 0	2 580.504 7	2 580.310 5	2 580.201 0	2 580.173 5
差 值	0.105 1	0.112 2	0.077 0	0.051 8	0.053 9	0.043 9	0.044 0	0.051 5
索股号	74 81	75 80	76 79	77 78	82 88	83 87	84 86	85
索股长度设计值	2 580.637 6	2 580.404 6	2 580.240 2	2 580.150 6	2 580.504 8	2 580.320 4	2 580.211 0	2 580.175 8
索股长度复核值	2 580.739 5	2 580.514 2	2 580.315 1	2 580.200 4	2 580.556 1	2 580.362 2	2 580.252 9	2 580.225 4
差 值	0.101 9	0.109 6	0.074 9	0.049 8	0.051 3	0.041 8	0.041 9	0.049 6
索股号	89 96	90 95	91 94	92 93	97 103	98 102	99 101	100
索股长度设计值	2 580.726 4	2 580.493 4	2 580.329 0	2 580.239 4	2 580.592 0	2 580.407 8	2 580.298 4	2 580.263 2
索股长度复核值	2 580.826 6	2 580.602 0	2 580.403 5	2 580.289 1	2 580.642 4	2 580.449 2	2 580.340 0	2 580.312 6
差 值	0.100 2	0.108 6	0.074 5	0.049 7	0.050 4	0.041 4	0.041 6	0.049 4

续表

索股号	104111	105110	106109	107108	112118	113117	114116	115
索股长度设计值	2 580.848 2	2 580.615 4	2 580.451 2	2 580.361 8	2 580.712 4	2 580.528 4	2 580.419 2	2 580.384 0
索股长度复核值	2 580.948 4	2 580.724 8	2 580.527 0	2 580.412 9	2 580.763 8	2 580.571 2	2 580.462 3	2 580.434 9
差 值	0.100 2	0.109 4	0.075 8	0.051 1	0.051 4	0.042 8	0.043 1	0.050 9
索股号	119126	120125	121124	122123	127133	128132	129131	130
索股长度设计值	2 581.003 0	2 580.770 6	2 580.606 6	2 580.517 4	2 580.866 2	2 580.682 4	2 580.573 2	2 580.538 2
索股长度复核值	2 581.104 8	2 580.882 3	2 580.685 3	2 580.571 6	2 580.919 8	2 580.728 0	2 580.619 4	2 580.592 1
差 值	0.101 8	0.111 7	0.078 7	0.054 2	0.053 6	0.045 6	0.046 2	0.053 9
索股号	134141	135140	136139	137138	142148	143147	144146	145
索股长度设计值	2 581.190 2	2 580.958 2	2 580.794 8	2 580.705 6	2 581.052 6	2 580.869 2	2 580.760 2	2 580.725 2
索股长度复核值	2 581.295 0	2 581.073 9	2 580.878 2	2 580.765 0	2 581.110 1	2 580.919 4	2 580.811 3	2 580.784 0
差 值	0.104 8	0.115 7	0.083 4	0.059 4	0.057 5	0.050 2	0.051 1	0.058 8
索股号	149154	150153	151152	155159	156158	157	160163	161162
索股长度设计值	2 581.178 4	2 581.015 4	2 580.926 4	2 581.088 2	2 580.979 6	2 580.944 8	2 581.268 2	2 581.179 6
索股长度复核值	2 581.299 6	2 581.105 3	2 580.992 7	2 581.145 1	2 581.037 6	2 581.010 1	2 581.366 2	2 581.254 4
差 值	0.121 2	0.089 9	0.066 3	0.056 9	0.058 0	0.065 3	0.098 0	0.074 8
索股号	164166	165	167168	169	170171	172173	174175	176177
索股长度设计值	2 581.231 4	2 581.196 6	2 581.464 0	2 581.480 0	2 581.409 6	2 581.271 2	2 581.464 4	2 581.339 6
索股长度复核值	2 581.297 9	2 581.269 9	2 581.549 7	2 581.562 7	2 581.518 9	2 581.334 4	2 581.558 8	2 581.404 7
差 值	0.066 5	0.073 3	0.085 7	0.082 7	0.109 3	0.063 2	0.094 4	0.065 1
索股号	178179	180181	182183	184				
索股长度设计值	2 581.573 6	2 581.514 6	2 581.789 2	2 581.794 2				
索股长度复核值	2 581.660 5	2 581.591 8	2 581.874 3	2 581.888 1				
差 值	0.086 9	0.077 2	0.085 1	0.093 9				

表 5 润扬大桥吊索总成长度复核比较mm

吊索编号	47 N	47 S	48 N	48 S	49 N	49 S	50 N	50 S	51 N	51 S
设计值	2 448.7	2 449.7	2 670.5	2 670.5	3 036.4	3 037.4	3 547.3	3 548.3	4 203.3	4 205.3
复核值	2 434.8	2 435.0	2 654.9	2 655.3	3 019.9	3 020.5	3 530.9	3 531.8	4 185.9	4 187.0
差 值	−13.9	−14.7	−15.6	−15.2	−16.5	−16.9	−16.4	−16.5	−17.4	−18.3
吊索编号	52 N	52 S	53 N	53 S	54 N	54 S	55 N	55 S	56 N	56 S
设计值	5 005.3	5 006.3	5 951.5	5 952.5	7 042.9	7 044.9	8 279.5	8 281.5	9 661.5	9 663.3
复核值	4 987.0	4 988.3	5 932.2	5 933.7	7 023.5	7 025.3	8 260.0	8 262.0	9 640.7	9 642.8
差 值	−18.3	−18.0	−19.3	−18.8	−19.4	−19.6	−19.5	−19.5	−20.8	−20.5
吊索编号	57 N	57 S	58 N	58 S	59 N	59 S	60 N	60 S	61 N	61 S
设计值	11 188.4	11 190.4	12 860.9	12 862.9	14 678.9	14 680.9	16 641.3	16 644.3	18 750.5	18 753.5
复核值	11 167.6	11 170.0	12 839.9	12 842.5	14 657.6	14 660.4	16 620.6	16 623.7	18 729.4	18 732.6
差 值	−20.8	−20.4	−21.0	−20.4	−21.3	−20.5	−20.7	−20.6	−21.1	−20.9
吊索编号	62 N	62 S	63 N	63 S	64 N	64 S	65 N	65 S	66 N	66 S
设计值	21 005.4	21 008.4	23 406.3	23 409.3	25 952.1	25 956.1	28 645.0	28 649.0	31 484.1	31 488.0
复核值	20 983.9	20 987.3	23 384.2	23 387.9	25 931.4	25 935.3	28 623.6	28 627.7	31 462.0	31 466.3
差 值	−21.5	−21.1	−22.1	−21.4	−20.7	−20.8	−21.4	−21.3	−22.1	−21.7

续表

吊索编号	67 <i>N</i>	67 <i>S</i>	68 <i>N</i>	68 <i>S</i>	69 <i>N</i>	69 <i>S</i>	70 <i>N</i>	70 <i>S</i>	71 <i>N</i>	71 <i>S</i>
设计值	34 468.4	34 473.4	37 600.6	37 604.6	40 878.7	40 883.7	44 303.8	44 309.8	47 877.1	47 882.0
复核值	34 447.4	34 451.9	37 578.6	37 583.4	40 856.7	40 861.6	44 282.7	44 287.9	47 855.9	47 861.3
差 值	−21.0	−21.5	−22.0	−21.2	−22.0	−22.1	−21.1	−21.9	−21.2	−20.7
吊索编号	72 <i>N</i>	72 <i>S</i>	73 <i>N</i>	73 <i>S</i>	74 <i>N</i>	74 <i>S</i>	75 <i>N</i>	75 <i>S</i>	76 <i>N</i>	76 <i>S</i>
设计值	51 596.6	51 602.6	55 463.7	55 469.7	59 479.4	59 485.4	63 642.1	63 648.1	67 953.0	67 959.0
复核值	51 575.3	51 580.9	55 443.0	55 448.8	59 457.9	59 464.0	63 621.0	63 627.3	67 931.2	67 937.6
差 值	−21.3	−21.7	−20.7	−20.9	−21.5	−21.4	−21.1	−20.8	−21.8	−21.4
吊索编号	77 <i>N</i>	77 <i>S</i>	78 <i>N</i>	78 <i>S</i>	79 <i>N</i>	79 <i>S</i>	80 <i>N</i>	80 <i>S</i>	81 <i>N</i>	81 <i>S</i>
设计值	72 412.2	72 419.2	77 020.0	77 027.0	81 776.6	81 783.5	86 682.0	86 689.0	91 736.5	91 744.5
复核值	72 390.6	72 397.3	76 998.3	77 005.2	81 754.8	81 761.9	86 659.9	86 667.2	91 713.6	91 721.1
差 值	−21.6	−21.9	−21.7	−21.8	−21.8	−21.6	−22.1	−21.8	−22.9	−23.4
吊索编号	82 <i>N</i>	82 <i>S</i>	83 <i>N</i>	83 <i>S</i>	84 <i>N</i>	84 <i>S</i>	85 <i>N</i>	85 <i>S</i>	86 <i>N</i>	86 <i>S</i>
设计值	96 940.6	96 948.6	102 311.2	102 319.2	107 814.1	107 823.1	113 468.2	113 477.2	119 272.7	119 281.7
复核值	96 917.0	96 924.7	102 270.1	102 278.1	107 774.2	107 782.4	113 427.9	113 436.3	119 232.7	119 241.3
差 值	−23.6	−23.9	−41.1	−41.1	−39.9	−40.7	−40.3	−40.9	−40.0	−40.4
吊索编号	87 <i>N</i>	87 <i>S</i>	88 <i>N</i>	88 <i>S</i>	89 <i>N</i>	89 <i>S</i>	90 <i>N</i>	90 <i>S</i>	91 <i>N</i>	91 <i>S</i>
设计值	125 227.8	125 235.8	131 332.8	131 341.8	137 594.7	137 603.6	144 003.3	144 013.3	150 565.8	150 575.8
复核值	125 189.9	125 198.8	131 302.0	131 311.1	137 568.8	137 578.0	143 993.1	144 002.6	150 547.7	150 557.4
差 值	−37.9	−37.0	−30.8	−30.7	−25.9	−25.6	−10.2	−10.7	−18.1	−18.4

7 体 会

大跨径悬索桥主缆线形设计计算与施工线形控制程序的开发,将悬索桥主缆的几何非线性和其材料的变形特性与全桥实际结构有机地结合起来,从工程的角度解决了悬索桥理论分析问题。1997 年~1999 年开发组结合厦门海沧大桥主缆设计与施工控制,研发了适用于悬索桥主缆线形计算分析和施工控制的计算分析软件,经厦门海沧大桥工程实践,证明该软件的技术水平和计算精度已达到国际先进水平,厦门海沧大桥缆形计算结果经与日本长大公司计算结果对比,误差在 3 mm 以内。海沧大桥最终缆形控制是以该程序计算结果控制的,结果表明,程序计算结果可靠无误。目前,正为武汉阳逻长江大桥、舟山西堠门大桥、广东东二环珠江大桥、贵州坝

陵河大桥服务。实践证明,只有将理论与实践紧密结合起来,才能为工程所用。

由于时间仓促,加上经验不足,疏漏之处在所难免,敬请同行专家们指正。

参考文献:

[1] 吴伟胜,王仁贵. 厦门海沧大桥悬索桥主缆线形设计[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会一九九七年桥梁学术讨论会论文集[C].

[2] 吴伟胜,王仁贵. 厦门海沧大桥悬索桥主缆设计[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会一九九九年桥梁学术讨论会论文集[C].

[3] 李强兴. 斜拉索静力解[J]. 桥梁建设,1996,(3).

[4] 虎门大桥工程第二册悬索桥[M]. 北京:人民交通出版社.