

文章编号: 1674-9057(2019)02-0369-07

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2019.02.014

索道桥施工控制参数的精细数值解析算法

景天虎, 王鑫, 刘均利, 莫时旭

(桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了提高索道桥施工控制参数的计算精度, 在分析既有近似解析算法原理的基础上, 基于全桥主索无应力索长不变量, 统筹考虑锚跨和主跨缆索架设过程中索段的相互转换影响, 提出了精细数值解析算法。通过算例对比分析了近似算法和精细算法的计算精度差异, 结果表明: 施工过程中钢索无应力索段长度在主、锚跨之间相互转换和温度变化的影响不容忽视。锚索倾角对主索受力、线型的影响相对较小。忽略锚索垂度, 对于无应力索长计算精度的影响甚微; 而忽略锚索倾角, 则影响很大。近似解析法得到的主跨钢索垂度值的误差较大, 而索力值和索长值的误差较小。精细数值解析算法的计算结果高精度地满足了构件变形协调条件, 计算效率高。

关键词: 索道桥; 精细解析算法; 施工控制; 锚索垂度; 锚索倾角

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

0 引言

索道桥作为独具我国西南地方特色的桥梁, 虽有学者称其为上承式悬索桥^[1], 但它与常规公路悬索桥在结构方面存在显著差异。例如, 索道桥主跨两端采用滑轮鞍座, 在施工过程中锚跨和中(主)跨的钢索是一个自由连通的自适应平衡系统。空缆架设之后随着主跨桥面系的安装, 锚跨缆索会因索力增加伸长后引起小部分索段进入主跨。常规公路悬索桥则是在主索丝股架设完成、调准参数后, 不允许其在塔顶主鞍座承揽槽内滑动。对于混凝土索塔, 在安装主索鞍时一般要设置向边跨侧的预偏量, 随着主跨架设进度, 逐渐将其顶回成桥状态主塔中心的设计位置^[2-6]。

目前, 常规公路悬索桥的施工控制理论比较成熟, 关于主索架设参数计算方面的研究成果众多^[4-8]。鉴于上述结构差异, 索道桥施工控制参数计算时不能直接引用这些成果, 而专门针对索道桥的研究成果较少。文献[2, 9]分别提出的

索道桥主索架设参数的算法是基于主跨缆索线形为抛物线的近似解析法, 未见公开文献对其计算误差作深入研究。文献[10]将索道桥初态索形假定为悬链线, 并认为只建立中跨缆索的模型便能够较好地模拟, 对于168 m跨径的中跨缆索就用了336个悬链线单元离散模拟, 通过反复迭代试算来寻找符合满足各种要求的缆索线形, 计算工作量较大。同时, 文献[2, 9-10]都未对锚跨缆索线形和倾角对于索道桥施工控制参数的影响进行详尽分析。尽管目前有限元方法比较成熟, 以电算软件为其实现工具, 大量应用于土木工程结构分析中, 但以解析法为基础的各种实用方法仍然具有重要的意义, 它们不仅使用方便, 而且往往能提供更为清晰的受力概念^[11], 故本文以黄河白浪索道桥为背景, 基于全桥主索无应力索长不变量, 按照无应力状态控制法的基本原理^[12], 统筹考虑锚跨和主跨缆索架设过程中索段的相互转换影响, 研究了用于索道桥架设参数计算的精细数值解析算法。

收稿日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51468012)

作者简介: 景天虎(1972—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 索桥设计与施工理论及应用, jth197208@qq.com。

引文格式: 景天虎, 王鑫, 刘均利, 等. 索道桥施工控制参数的精细数值解析算法[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(2): 369-375.

1 解析算法原理

1.1 近似解析法——抛物线法简析

近似解析算法假定索道桥的多根主索受载和变形均匀一致，将其等效为单根索平面模型(图1)；假定主跨钢索线形为抛物线，两端铰支在鞍座处主索轴线理论交点*A*、*B*处。锚跨主索的水平倾角和垂度影响被忽略；全桥用一个水平索力代替锚、主跨的钢索所有截面的轴向索力；再综合力学平衡和材料物理特性方面的关系，根据同一座索道桥全桥钢索在任意两种荷载状态下的悬索驰度(即各跨无应力索长之和减去水平跨径之和)相等的几何条件，得到一个在所求荷载状态下水平索力的3次代数方程(即悬索的转换方程)；最后由已求得的水平索力和力矩平衡条件得到主索线形^[2, 9]。

实际上，悬索驰度相等的几何条件就等价于“全桥无应力索长(*S*₀)不变量”的变形协调条件，即近似解析法统筹考虑了主、锚跨索段变形的协调条件。但是该算法在公式推导过程中的多项近似处理，必然会对索道桥主索架设参数的计算精度产生一定程度的影响，值得进一步研究。

目前，索道桥成桥后调整桥面线形是要在拆下桥面系构件的条件下才能进行。显然，主索架设经济且理想的施工工艺是：空索初挂、线形实测精度满足要求后，钢索端部就被永久锚固于锚碇上，全桥钢索的*S*₀随即被固定下来，在后续的施工过程中保持不变，就等于成桥满活载状态下的*S*₀(下文称为“索长不变量”)^[12]，亦即得到钢索的理论下料长度为*S*₀，再考虑一定的操作长度，即可得到实际的下料长度*S*_c。

1.2 数值解析算法——分段悬链线法

该算法是在主索线形参数计算时把数值迭代与索段的悬链线解析公式结合起来的分析方法，原本被用于常规公路悬索桥主缆线形计算。悬链线被认为是最接近真实反映实际悬挂钢索的线形。该算法假定主跨钢索线形由分段悬链线组成，两个相邻集中力之间区段的索形为悬链线^[6]。

悬链线参数方法又可分为两大类^[7]：①主缆索自重集度按其有应力长度计算作为已知条件的线形公式(式(1))；②主缆索自重集度按其无应力长度计算作为已知条件的线形公式(式(2))。

$$l_i = \frac{H}{q_i} \left[\operatorname{arcsch} \left(\frac{V_i}{H} \right) - \operatorname{arcsch} \left(\frac{V_i - q_i \cdot S_i}{H} \right) \right]; \tag{1a}$$

$$h_i = \frac{H}{q_i} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{V_i}{H} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{V_i - q_i \cdot S_i}{H} \right)^2} \right]; \tag{1b}$$

$$l_i = \frac{H \cdot S_{i0}}{E \cdot A} + \frac{H}{q_{i0}} \left[\operatorname{arcsch} \left(\frac{V_i}{H} \right) - \operatorname{arcsch} \left(\frac{V_i - q_{i0} \cdot S_{i0}}{H} \right) \right]; \tag{2a}$$

$$h_i = \frac{S_{i0}}{E \cdot A} \left(V_i - \frac{q_{i0} \cdot S_{i0}}{2} \right) + \frac{H}{q_{i0}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{V_i}{H} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{V_i - q_{i0} \cdot S_{i0}}{H} \right)^2} \right]. \tag{2b}$$

假定钢索为忽略截面泊松比效应的理想柔性索，对图2无集中力作用的索段悬链线形状满足：

$$S_i = \frac{2H}{q_i} \operatorname{sh} \beta_i \operatorname{ch}(\beta_i - \alpha_i); \tag{3a}$$

$$\Delta S_i = \frac{H}{2E \cdot A} \left[l_i + \frac{H}{q_i} \cdot \operatorname{sh}(2\beta_i) \cdot \operatorname{sh}(2\beta_i - 2\alpha_i) \right]; \tag{3b}$$

$$\beta_i = \frac{q_i \cdot l_i}{2 \cdot H}; \tag{3c}$$

$$\alpha_i = \operatorname{arcsch} \left(\frac{\beta_i \cdot h_i}{l_i \cdot \operatorname{sh} \beta_i} \right) + \beta_i. \tag{3d}$$

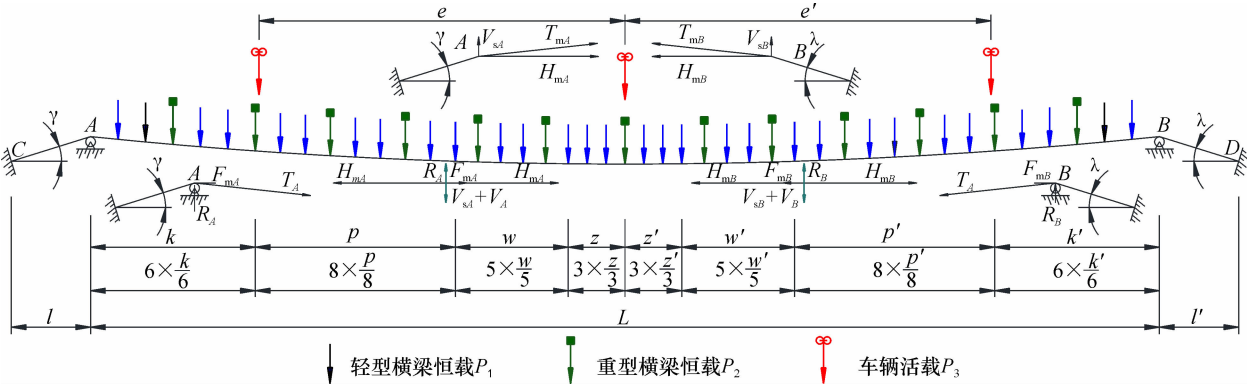


图1 索道桥主索计算图式^[2, 13]
Fig. 1 Calculation chart for main cables of cableway bridges

其中, h_i 和 l_i 分别为第 i 索段两端点间的高差和水平投影距离; q_i 和 q_{i0} 分别为第 i 段按钢索有、无应力长度计算的自重集度; E 和 A 分别为主索材料弹性模量和横截面积; H_i 和 H_j 分别为第 i 索段左、右端横截面的水平索力; 索道桥的同一跨钢索中所有索段的水平索力相等, 因此记为 $H_i = H_j = H$; V_i 和 V_j 分别为第 i 段悬链线左、右端横截面的剪力; S_i 和 S_0 分别为第 i 段索段的有、无应力长度; ΔS_i 为第 i 索段的弹性伸长量; α_i 和 β_i 为计算参数。

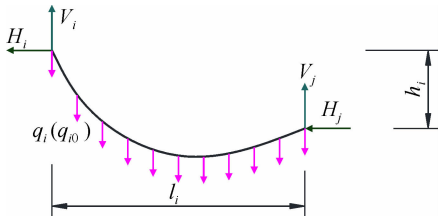


图2 主索在自重作用下受力分析^[4, 7]

Fig. 2 Mechanical analysis of main cables under dead load

鉴于前述的结构差异, 必须对该数值解析算法加以改造, 才能用于索道桥的施工控制参数计算。以下将改造后的算法简称为“精细解析法”。

索道桥主跨为其线形控制跨。单个索段的线形参数计算问题解决后, 接着分析由分段悬链线索段组成的整个主跨线形参数计算问题。

首先, 从主索轴线理论交点 A 、 B (图1) 出发, 假定该点处的主索水平索力 H_A 、 H_B 和剪力 V_A 、 V_B (其初值可取近似解析法的计算值), 累加各相关索段的 h_i , 推求跨中垂度和 A 、 B 两点高差, 并与这两个参数的已知值比较, 经迭代得到最终的 H_A 、 H_B 和剪力 V_A 、 V_B 。同理, 若在图1中把主跨钢索水平索力记作 H_m , 则有 $H_A = H_B = H_m$ 。

其次, 在图1中假设在点 A 和点 B 截面处截断主索, 取出锚索分析。从空索状态开始施加桥面系恒载过程中, 由水平力的平衡条件可得: 左、右锚跨的钢索水平索力分别为 $H_{mA} = H_m + F_{mA}$ 和 $H_{mB} = H_m + F_{mB}$, 其中 F_{mA} 和 F_{mB} 分别为钢索在左、右鞍座处的摩阻力。滑轮鞍座的摩擦系数可通过试验或《机械技术手册》确定, 结合已求得的 R_A 和 R_B 、 F_{mA} 、 F_{mB} 便可得到, 进而 H_{mA} 和 H_{mB} 变为已知量。通常架设阶段的滑轮鞍座处于充分润滑状态, 滚动摩阻力 F_{mA} 和 F_{mB} 相对于 H_m 很小, 可略去, 则近似的有 $H_{mA} = H_{mB} = H_m$ 。

最后, 把 l_i 和 h_i 分别用锚跨的水平跨径和高差代替, 再把 H_{mA} 、 H_{mB} 、 l_i 和 h_i 代入式(1a)、(1b) (q_i 已知时) 或者式(2a)、(2b) (q_{i0} 已知时), 联立求解即可得到 V_{sA} 、 V_{sB} 、 S_{sA} 、 S_{sB} (当 q_i 已知时), S_{0sA} 、 S_{0sB} (当 q_{i0} 已知时)。这里 S_{sA} 、 S_{sB} 和 S_{0sA} 、 S_{0sB} 分别为左、右端整个锚跨索段的有应力长度和无应力长度; V_{sA} 、 V_{sB} 则为对应的索端剪力。通过式(1a) ~ (3d), 进而得到锚索其他截面处的架设参数。

2 索道桥施工控制参数计算

2.1 成桥满活载状态下主索安装参数

该荷载状态为设计规定的索道桥运营目标状态。按照桥梁的使用功能要求, 主跨钢索跨中垂度值 f_{m0} 和支点高差 h_{m0} , 桥面系恒、活载加载参数等由设计者首先拟定, 成为图1中所示结构的已知参数。这样就可采用1.2节算法得到主跨和左、右锚跨的无应力索长, 这里分别记作 S_2 和 S_1 、 S_3 , 进而得到全桥无应力索长不变量 $S_0 = S_1 + S_2 + S_3$ 。

2.2 平衡状态下主索的变形协调函数

在某施工工况的荷载平衡状态下, 假设主跨钢索的无应力索长为 S_{0x} 和跨中垂度为 f_{mx} , 两个锚跨的无应力索长之和为 l_{0s} , 全桥钢索总的无应力索长等于运营目标状态的索长不变量, 即

$$S_{0x} + l_{0s} = S_0, \tag{4a}$$

对式(4a)取全微分, 可得

$$dS_{0x} = -dl_{0s} \tag{4b}$$

可见, 索道桥钢索的无应力索长会在锚跨和主跨之间出现此消彼长的转换状态, 以适应不同的荷载工况, 同时满足各跨之间钢索的变形协调条件。由式(4a)知, 锚索的无应力索长 l_{0s} 是 S_{0x} 的函数; 而 S_{0x} 又是 f_{mx} 的函数, 故记作 $l_{0s} = l_{0s}(S_{0x})$; $S_{0x} = S_{0x}(f_{mx})$; 进而 $l_{0s} = l_{0s}(f_{mx})$ 。再定义变形协调函数

$$\begin{aligned} g(S_{0x}) &= S_{0x} + l_{0s}(S_{0x}) - S_0 \\ &= S_{0x}(f_{mx}) + l_{0s}(f_{mx}) - S_0 \\ &= g(f_{mx}) = 0. \end{aligned} \tag{4c}$$

如果主索的某个平衡状态位形存在, 必然有与其对应的 S_{0x} 和 f_{mx} 满足式(4c), 即该方程有解。式(4c)是关于 f_{mx} 的隐函数方程, 可用牛顿求根法迭代计算得到数值解。迭代收敛准则可根据主索制作下料精度确定。迭代格式为

$$f_{mx}^{k+1} = f_{mx}^k - g(f_{mx}^k) / g'(f_{mx}^k), \quad (5)$$
式中: f_{mx}^k 和 f_{mx}^{k+1} 为所求根的第 k 和 $k+1$ 次假定值, $k=1, 2, 3, \dots$ 。一阶导数 $g'(f_{mx}^k)$ 可用其差分表达式代替。为了加快迭代收敛, 求解式(4c) 时执行如下流程: ① 当 $k=0$ 时, 初值 f_{mx}^0 可取近似解析法的计算值, 通常得到 $|g^0(f_{mx}^0)| \geq g_0$ (g_0 为全桥无应力索长误差限值, 取值见下文); ② $f_{mx}^1 = f_{mx}^0 + \Delta f$, 垂度增量 Δf 取值见下文。通常得到 $|g^1(f_{mx}^1)| \geq g_0$; ③ $g^0'(f_{mx}^0) = (g^1(f_{mx}^1) - g^0(f_{mx}^0)) / (f_{mx}^1 - f_{mx}^0)$; ④ $f_{mx}^2 = f_{mx}^1 + \Delta f$ 。若得到 $|g^2(f_{mx}^2)| \leq g_0$, 迭代终止; 否则, 令 $k=2$, 重复上述步骤 ① ~ ④。

在《公路工程质量检验评定标准》(土建工程)(JTG F80/1—2004) 表 8.11.8 关于悬索桥索股制作的实测项目中, “成品索股长度” 项目允许的偏差是 “索股长/10 000”; 迭代收敛准则 g_0 可参考此规定取值。在该规范表 8.11.9 关于悬索桥主索架设的实测项目中, “中跨跨中基准索股高程” 项目允许的偏差限值是 “中跨跨径/20 000”; 垂度增量 Δf 可参考此规定取值。若把执行 1 次上述 ① ~ ④ 步骤的计算称作 1 轮次迭代计算, 则经试算知, 通常执行 1 轮次迭代计算所得到的 f_{mx}^2 就可满足规范关于索长误差限值的要求。

2.3 空索和成桥恒载工况的主索架设参数

空索工况的全桥主索无应力索长等于索长不变量 S_0 。由无应力状态控制原理可知^[12], 分阶段成形结构的 4 个条件(外荷载、结构体系、支承边界条件、构件单元的无应力状态量)唯一地确定一个施工阶段的平衡状态; 通过求解式(4c) 的未知数 f_{mx} 即可确定该工况的主跨钢索跨中垂度值, 进而得到主、锚跨的全部线形参数。同理, 可得到成桥恒载工况的主、锚跨的全部线形参数。

2.4 主索架设参数的温度修正

设钢索端部锚固时的温度为 t_0 , 则可由 2.1 ~ 2.3 节所述方法确定在 t_0 温度下钢索无应力长度 S_{0t_0} , 以及相对应的成桥恒载、空索或活载工况的其他架设参数(包括主跨跨中垂度 f_{mx,t_0})。在若某一工况的某时刻温度为 t , 相应的钢索无应力长度为 S_{0t} , 则有^[10]

$$S_{0t} = S_{0t_0} + \alpha \cdot (t - t_0) \cdot S_{0t_0}, \quad (6)$$

式中: α 为钢索材料的热线性膨胀系数。那么, 以

S_{0t} 为温度 t 时的全桥主索无应力索长不变量, 以温度 t_0 时的 f_{mx,t_0} 作为初值 f_{mx}^0 , 按本文方法即可得到考虑温度修正的架设参数值。

3 工程背景

白浪索道桥是一座主跨径 438 m 单车道桥梁(图 3)^[2,14]。设计采用的满载跨中矢度为 1/39; 主要活载图式为 3 × 40 t、纵桥向车距 150 m 的履带车队。桥梁上部结构的主要参数为: 沿顺桥向布置 43 道钢横梁, 质量 1.1 t(30 道)和 1.2 t(13 道)两种梁相间布置, 间距为 7.75 ~ 11.25 m。主索采用 76 根钢丝绳(直径 38 mm, 绳股结构 6 × 37 + FC, 标准强度 1 770 MPa); 4 根抗风索。桥面板为东北松木板(长 × 宽 × 高为 4.4 m × 0.5 m × 0.085 m), 约 876 根。

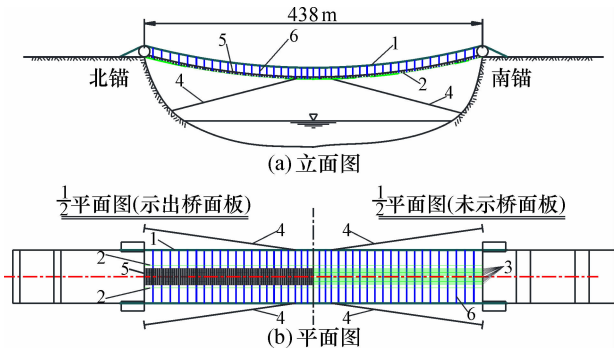


图 3 白浪索道桥平、立面示意图
Fig. 3 Schematic diagram of plan and elevation of the Bailang cableway bridge

1—外稳定索; 2—内稳定索; 3—桥面索; 4—抗风索; 5—桥面板; 6—横梁

4 施工控制参数计算结果的精度对比

本文第 3 节的案例摘自文献[2] 的实例 II。现取其中 1 根钢索建立计算简图(图 1)。材料参数: 钢索弹性模量 $E = 1.079\ 1 \times 10^8$ kN/m²; 每根钢索截面面积 $A = 5.891\ 3$ cm²; 主跨桥面系自重为 2.491 74 kN/m, 76 根钢索总自重为 4.090 77 kN/m(文献[2] 按纵桥向沿水平跨径给出该参数; 本文计算时随着线形迭代进程将其化为沿有应力曲线索长的集度 q_i)。几何参数 k, p, w, z, e, l, L 分别为 67.5、82、46.25、23.25、150、32.5、438 m; k', p', w', z', e', l' 分别等于 k, p, w, z, e, l ; 锚索水平倾角参数 $\gamma = \lambda$, 分别取 0°、30°(文献[2])

未给出该参数；其采用近似解析法计算，不需要这些值)。荷载参数 P_1 、 P_2 、 P_3 分别等于 10.791、11.772、392.4 kN。不计滑轮鞍座滚动摩阻力；以主索端部锚固时刻为基准，分别考虑温度变化 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况。使用 Matlab 软件编程执行 2.2 节所述 1~2 轮次迭代计算，得到的施工控制参数结果见表 1、2。

需说明的是，文献 [2] 只给出了钢索的水平索力和主跨跨中垂度值，未计算温度变化工况。本文“近似解析法”的主跨索长值则是把文献 [2] 的相关参数值代入抛物线索形长度的精确解析公式求得的。表 1 中的“有限元法”结果是采用 ANSYS 软件实现的“模型更补法”的计算结果。文献 [15] 已深入比较了“分段悬链线法”和有限元法对于理想柔性索的索形模拟精度。考虑本分析的结构严谨性、又限于篇幅，在表 1 中有限元法的结果仅列出了荷载工况Ⅲ在锚索水平倾角 0° 时的计算结果，以验证算法精度。

(1) 从索长计算结果可见：有限元法与精细

解析法的索形参数结果非常接近，水平索力值的相对偏差在 0.121% 以内，这说明精细解析法的分析结果是可靠的。

(2) 从空索初挂到成桥满活载工况，随着主跨荷载的增加，锚索无应力长度逐渐减小，而主跨钢索的无应力长度逐渐增大；钢索无应力索段长度在主、锚跨之间进行此消彼长的相互转换，其幅度大于 71mm，超过了规范 (JTG F80/1—2004) 关于“成品索股长度”项目允许偏差 (索股长/10 000；本例限值为 43.8 mm)，故不同施工阶段索长控制参数计算时应该予以考虑。

(3) 锚索水平倾角从 0° 增加到 30° ，引起水平索力的相对变化量小于 1.04%；而全桥主索无应力索长变化量大于 9.953 m，远远超过限值 43.8 mm，故锚跨倾角的影响不容忽视。在考虑和忽略锚索的自重垂度效应的两种情况下，精细解析法得到的全桥主索无应力索长差值都在 3 mm 以内。锚索跨中垂跨比非常小 (本例不超过 1/1 038)，而索道桥主索的拉力在空索状态就接近了容许拉力

表 1 锚固时刻主索施工控制参数

Table 1 Construction control parameters of main cables at the moment of anchorage											
计算方法	工况	锚索 倾角 /($^{\circ}$)	钢索有应力索长/m		钢索无应力索长/m			钢索跨中垂度/m		变形协调 函数 g_0 值/mm	水平索 力/kN
			主跨	锚跨	主跨	锚跨	全桥	主跨	锚跨		
近似 解析法	I	0	438.766 7	65.000 0	436.691 1	64.694 5	501.385 6	11.230 8	—	—	300.205 6
	II	0	438.507 1	65.000 0	436.654 3	64.726 8	501.381 1	9.131 4	—	−4.5	268.303 5
	III	0	438.191 3	65.000 0	436.606 2	64.765 8	501.372 0	5.607 2	—	13.6	229.867 9
	I	30	438.766 7	75.055 5	436.691 1	74.648 5	511.339 6	11.230 8	—	—	300.205 6
	II	30	438.507 1	75.055 5	436.654 3	74.691 5	511.345 8	9.131 4	—	6.2	268.303 5
	III	30	438.191 3	75.055 5	436.606 2	74.743 5	511.349 7	5.607 2	—	10.1	229.867 9
精细 解析法	I	0	438.747 7	65.000 0 (65.000 1)	436.673 4	64.694 7 (64.693 3)	501.368 1 (501.366 7)	11.230 4	0.023 6	—	300.053 0
	II	0	438.500 6	65.000 0 (65.000 1)	436.641 8	64.725 9 (64.724 9)	501.367 7 (501.366 7)	9.097 2	0.026 4	(0.000 0)	269.183 4
	III	0	438.190 9	65.000 0 (65.000 2)	436.602 1	64.765 3 (64.764 6)	501.367 4 (501.366 7)	5.600 9	0.030 8	(0.000 0)	230.407 4
	I	30	438.747 7	75.055 5 (75.055 6)	436.673 4	74.648 7 (74.646 6)	511.322 1 (511.320 0)	11.230 4	0.027 3	—	300.053 0
	II	30	438.497 4	75.055 5 (75.055 6)	436.632 5	74.689 2 (74.687 5)	511.321 7 (511.320 0)	9.067 6	0.0304	(0.000 0)	270.061 2
	III	30	438.187 0	75.055 5 (75.055 7)	436.581 7	74.739 5 (74.738 3)	511.321 2 (511.320 0)	5.543 2	0.035 2	(0.000 0)	232.806 2
有限 元法	III	0	438.190 9	65.000 0	436.604 0	64.765 6	501.369 6	5.600 9	—	0.001 5	230.128 3

注：(1)工况 I、II、III 分别代表成桥满活载状态、成桥恒载状态、空索状态；(2)在“数值解析算法”结果中，“65.000 0 (65.000 1)”分别表示不计和计入锚索跨中垂度的计算值，其他类似表示均为此意义；(3)求解工况 II、III 的参数值时使用的全桥索长不变量是在工况 I 条件下计入锚索跨中垂度的数值；(4)锚跨的“钢索有(无)应力索长”为左、右锚跨的合计值。

表 2 温度变化后的主索施工参数

Table 2 Construction parameters of main cables in temperature variation

温度变化/℃	工况	锚索倾角/(°)	钢索有应力索长/m		钢索无应力索长/m			钢索跨中垂度/m		变形协调函数 g_0 值/mm	水平索力/kN
			主跨	锚跨	主跨	锚跨	全桥	主跨	锚跨		
-5	I	30	438.736 2	75.055 5 (75.055 6)	436.645 9	74.645 6 (74.643 4)	511.291 5 (511.289 3)	11.144 1	0.027 1	(0.000 9)	302.385 1
+5	I	30	438.759 3	75.055 5 (75.055 6)	436.700 8	74.651 8 (74.649 7)	511.352 6 (511.350 5)	11.317 8	0.027 5	(-0.087 6)	297.747 7
-5	Ⅱ	30	438.488 0	75.055 5 (75.055 6)	436.605 3	74.685 7 (74.683 9)	511.291 0 (511.289 2)	8.981 5	0.030 1	(0.002 7)	272.648 7
+5	Ⅱ	30	438.506 9	75.055 5 (75.055 6)	436.659 7	74.692 6 (74.691 0)	511.352 3 (511.350 7)	9.154 4	0.030 6	(0.004 2)	267.502 0
-5	Ⅲ	30	438.182 1	75.055 5 (75.055 7)	436.555 2	74.735 3 (74.734 0)	511.290 5 (511.289 2)	5.469 7	0.034 8	(0.008 4)	235.931 4
+5	Ⅲ	30	438.192 1	75.055 5 (75.055 7)	436.608 1	74.743 7 (74.742 5)	511.351 8 (511.350 6)	5.618 0	0.035 7	(-0.006 7)	229.728 0
-5	I	0	438.736 2	65.000 0 (65.000 1)	436.645 7	64.692 3 (64.690 9)	501.338 0 (501.336 6)	11.143 5	0.023 5	(0.000 8)	302.400 6
+5	I	0	438.759 4	65.000 0 (65.000 1)	436.701 0	64.697 0 (64.695 7)	501.398 0 (501.396 7)	11.318 4	0.023 8	(-0.082 7)	297.732 9
-5	Ⅱ	0	438.491 1	65.000 0 (65.000 1)	436.614 4	64.723 3 (64.722 2)	501.3337 7 (501.336 6)	9.010 0	0.026 1	(0.000 7)	271.784 6
+5	Ⅱ	0	438.510 4	65.000 0 (65.000 1)	436.669 2	64.728 5 (64.727 5)	501.397 7 (501.396 7)	9.184 8	0.026 6	(-0.000 8)	266.606 1
-5	Ⅲ	0	438.185 8	65.000 0 (65.000 2)	436.575 3	64.762 1 (64.761 3)	501.337 4 (501.336 6)	5.525 2	0.030 4	(0.003 2)	233.563 2
+5	Ⅲ	0	438.196 2	65.000 0 (65.000 2)	436.629 0	64.768 5 (64.767 8)	501.397 5 (501.396 8)	5.678 2	0.031 3	(-0.003 0)	227.274 2

的70%，再结合钢索的修正弹性模量 Ernst 公式，这从理论上也证明：忽略锚跨钢索的垂度对问题求解精度影响很小。

(4) 从计算结果表 1 看，锚索倾角对主索受力、线型的影响相对值较小，对桥梁的设计、使用几乎无影响。这是由于在成桥状态悬索桥主缆线形确定时，对线形跨控制跨(一般为中跨)的主缆垂度可根据设计条件事先确定下来；而对于非线性控制跨(一般为边跨)，主缆水平张力可根据线形控制跨成桥状态线形已经确定，边、中跨主缆的水平分力相等求出来^[15]。索道桥桥型可以归入悬索桥结构大类中^[1]，前者的锚跨相当于一般公路悬索桥的边跨，因此索道桥主索遵从悬索桥主缆线形确定的一般规律。

(5) 温度变化±5℃引起的水平索力相对变化量小于1.37%，全桥无应力索长变化量也小于31 mm，但主跨跨中垂度的变化量超过73 mm，超过了规范(JTG F80/1—2004)关于“中跨跨中基准索股高程”项目允许的偏差限值(中跨跨径/20 000；本例限

值为21.9 mm)。(6) 比较近似解析法和精细解析法的计算精度。后者的变形协调函数值不超过0.087 6 mm，远远低于前者的结果(其最大值为13.6 mm)，即精细解析法的参数计算结果高精度地满足了一般材料力学解答关于构件变形协调条件的要求，其计算结果较近似解析法更符合结构的实际状态，并且迭代计算量也不大，算法效率较高。以精细解析法的参数计算结果为基准来评价近似解析法施工控制参数的计算精度。从表 1 结果可以推算出，近似解析法的全桥无应力索长最大误差值(28.5 mm)未超过限值43.8 mm；而在工况Ⅱ的锚索倾角0°、工况Ⅲ的锚索倾角0°和30°情况下，主索跨中垂度误差值，都超过了限值21.9 mm。主索水平索力的计算值相对误差不超过1.26%，满足一般工程精度(误差限值5%)的要求。当温度变化5℃时,由文献[2]27 页公式可得主索水平索力变化量的近似值为3.814 4 kN，而精细结果显示该值在2.305 3~3.155 8 kN 变化。由此可

见, 近似值偏大, 相对误差超过 20.87%。

5 结 论

(1) 施工过程中钢索无应力索段长度在主、锚跨之间呈现此消彼长的转换现象, 其幅度超过了索长误差限值。

(2) 锚索倾角对主索受力、线型的影响, 其相对值较小, 对桥梁的设计、使用几乎无影响。锚索的自重垂度效应对全桥无应力索长求解精度影响很小, 可以忽略; 锚跨倾角和温度变化的影响, 则不容忽视。

(3) 近似解析算法得到的水平索力值能满足一般工程精度的要求, 但其他架设参数的计算误差超限, 不满足大跨度桥梁施工监控的精度要求。

(4) 精细解析算法的计算结果高精度地满足了构件变形协调条件, 算法效率较高。

参考文献:

- [1] 楼庄鸿, 刘陌生. 上承式悬索桥 [C] //中国公路学会桥梁和结构工程学会. 2003 年全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2003: 194-202.
- [2] 黄绍金, 刘陌生. 现代索道桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] JTG/T D65-05—2015, 公路悬索桥设计规范 [S].
- [4] 卢春玲, 王强, 邓康成. 龙胜岩门索桥悬索计算 [J]. 桂林工学院学报, 2004, 24 (1): 48-51.
- [5] 景天虎, 刘均利, 莫时旭, 等. 基于响应面法的车行索道桥非线性随机静力分析 [J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34 (2): 266-271.
- [6] 唐茂林, 强士中, 沈锐利. 悬索桥成桥主缆线形计算的分段悬链线法 [J]. 铁道学报, 2003, 25 (1): 87-91.
- [7] 景天虎, 李桅, 李青宁, 等. 悬索桥主缆线形确定的常用精确解析算法比较及电算高效实现方法研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(6): 821-830.
- [8] 罗喜恒, 肖汝诚, 项海帆. 悬索桥理想恒载状态的计算方法研究 [J]. 桥梁建设, 2008 (4): 31-35.
- [9] 周勇军, 张岗, 赵小星. 索道桥耐荷分析与试验 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11 (6): 647-651.
- [10] 田仲初, 卜铭, 黄宏辉, 等. 临时索道桥的成桥状态确定与荷载试验研究 [J]. 长沙交通学院学报, 2005, 21 (2): 21-25.
- [11] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣, 等. 悬索结构设计 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [12] 秦顺全. 分阶段施工桥梁的无应力状态控制法 [J]. 桥梁建设, 2008 (1): 8-14.
- [13] 景天虎, 刘均利, 莫时旭, 等. 一种索道桥主索架设参数计算方法 [J]. 中国科技论文, 2017, 12 (7): 817-822.
- [14] 景天虎, 马小龙, 刘均利, 等. 整体式断面双车道索道桥上部结构研究 [J]. 世界桥梁, 2016, 44 (4): 50-54.
- [15] 景天虎, 李青宁. 悬索桥主缆成桥线形确定的有限元新算法 [J]. 世界桥梁, 2012, 40 (1): 42-46.

Fine numerical analysis calculation for construction control parameters in cableway bridges

JING Tian-hu, WANG Xin, LIU Jun-li, MO Shi-xu

(Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to improve the calculation for construction control parameters of cableway bridges, the principle of the existing approximate analytic algorithm was firstly analyzed. A fine numerical analysis method for calculating erection parameters was put forward, based on the quantity of total unstressed length of a cableway bridge and the influence of the transformation of cable sections between the anchor spans and the main span in erecting cables. Calculating precisions of the two methods were compared by an engineering example. The results demonstrate that the effects of temperature variation and mutual shift of unstressed length of cables between the anchor spans and the main span should not be ignored. Angles of cables in anchor spans produce relatively little effects on the axial forces and line shape of main cables. Neglection of cable sags in anchor spans exerts slight influences on computing precision for unstress length of steel cables, but dip angles of cables in anchor spans causes unacceptable errors. The computation by the approximate analytic algorithm results in great errors for cable sags in the main span, but it results in negligible errors for parameters of cable forces and length. The calculating results of this method satisfy the deformation compatibility condition of structural elements in very high precision, and its calculating efficiency is high.

Key words: cableway bridges; fine numerical analysis method; construction control; cable sags in anchor spans; dip angles of cables in anchor spans