DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.013

确定钢桁梁斜拉桥合理施工阶段索力的索长迭代法

王晟[1,2]，颜东煌[3*]，宁平华[1]，潘权[3]

（1.广州市市政工程设计研究总院有限公司，广东 广州 410114；2.华南理工大学 土木与交通学院；3.长沙理工大学）

摘要：为解决斜拉索无应力长度缺失带来的施工控制精度问题，实现大跨度钢桁梁斜拉桥施工控制的精细化、高效化，丰富合理施工阶段索力的计算方法，基于斜拉索的无应力长度表达式，根据张拉前的结构实际状态与斜拉索目标无应力长度，提出了求解钢桁梁斜拉桥合理施工阶段索力的索长迭代法，给出了迭代计算流程。基于北盘江大桥设计施工流程，分别采用正装迭代法和索长迭代法进行了正装分析。结果表明：在设计施工流程的计算中，当目标成桥状态及杆件无应力构形相同时，索长迭代与正装迭代得出的二张力基本相同，其最大差值仅为该索索力的0.14%，且两者得到的成桥状态十分接近，均能达到预定的目标成桥状态，其中索长迭代得到的标高、索力与目标状态的最大差值分别为3 mm、8.9 kN，验证了索长迭代法的可行性。

关键词：桥梁工程；钢桁梁斜拉桥；合理施工阶段；施工控制；索长迭代

在斜拉桥的设计和施工控制中，当合理成桥状态确定后，需确定各合理施工状态，旨在按拟定的施工流程施工完成后，桥跨状态达到目标状态。为便捷、有效地达到合理成桥状态，中国学者开展了众多研究，提出了正装迭代法、无应力状况控制法、几何控制法等多项控制方法，并在实际工程中取得了良好的控制效果。其中，正装迭代法以施工阶段索力与主梁标高为控制手段，适用范围最为广泛；无应力控制法和几何控制法则以构件无应力长度和曲率为控制手段，在保证精度的同时极大地简化了计算分析，但是斜拉索的无应力索长概念仅存在于平行钢丝成品索，对于钢绞线斜拉索，钢绞线的无应力长度标记极其繁琐，且施工不便，造成了中国已建成钢绞线斜拉桥基本都采用索力进行施工控制的局面，张拉力的合理与否直接决定了施工控制的精度。

为方便钢绞线斜拉桥的施工控制，提高施工控制精度、丰富施工控制方法，该文在确定了构件无应力制造线形的基础上，建立斜拉桥施工阶段模型，并基于斜拉索的悬链线无应力长度，通过迭代计算得出各阶段的合理施工状态，以确保斜拉桥施工控制精度。

1 钢桁梁斜拉桥施工阶段关键分析问题

1.1 合理成桥状态的确定

钢桁梁由多个构件组成，主梁结构形式的不同导致适用于等截面主梁斜拉桥的合理成桥状态的确定方法难以应用。文献[6]利用最小能量法，综合考虑构件轴力、弯矩进而得到了一组成桥索力，并根据主梁变形约束进行了索力修正，最终得到该状态下的合理成桥状态索力；文献[7]根据影响矩阵原理分别对钢桁梁斜拉桥的“塔直梁平”、“塔梁弯曲能量最小”、“塔直中跨梁平”3种成桥状态对应的成桥索力进行计算，得出了“塔直中跨梁平”状态能更好地在保证索力分布均匀的基础上使塔梁变形最小。在桥梁实际运营过程中，主塔的边跨预偏可抵消部分活载对塔偏的效应，对结构更有利，因此较为合理的成桥状态应为“塔预偏中跨梁平”状态。若活载作用下主塔最大偏位为$\Delta\delta$（车道荷载作用下主塔最大偏位），则通常可按正常使用极限状态下塔偏的一半，即$0.35\Delta\delta$设置预偏。

收稿日期：2018－12－03

基金项目：国家973计划项目（编号：2015CB057706）；国家自然科学基金资助项目（编号：51178059，51678068）；广州市政总院科研项目（编号：KY－2017－023）

作者简介：王晟，男，博士.E－mail：wshleon@163.com

*通信作者：颜东煌，男，博士，教授，博士生导师.E－mail：yandonghuang@126.com

1.2　无应力构形的求解

目前关于桥梁无应力构形计算方法主要有单元解体法、结构解体法、切线拼装迭代法、单元 CR 位移法。上述 4 种求解方法只要合理地使用，均能达到较为理想的精度，该文主塔、主梁的无应力状态均采用切线拼装迭代法计算得到。设节间 Z_k 的上弦杆前后节点为 i、j，已知 i 节点累计位移为(u_i，v_i，θ_i)，根据几何关系可推算出 j 节点按切线拼装时的初始位移为(u_j，v_j，θ_j)，其中 u_j、v_j、θ_j 可表示为：

$$\begin{cases} u_j = u_i + L_k[\cos(\alpha+\theta_i) - \cos\alpha] \\ v_j = v_i + L_k[\sin(\alpha+\theta_i) - \sin\alpha] \\ \theta_j = \theta_i \end{cases} \tag{1}$$

式中：L_k 为节间 Z_k 上弦杆的无应力长度；α 为无应力状态下节间 Z_k 上弦杆与水平线的夹角。

节间 Z_k 的下弦杆仍然可利用式(1)求得其后节点的初始位移，当节间 Z_k 上、下弦杆节点的累计位移确定后，该节间的竖腹杆和斜腹杆位置也得以确定。经正装计算可得出成桥各节点累计位移，将其反号修正结构初始计算线形并进行新一轮迭代，直至收敛，最后采用修正杆件间接缝宽度的方式调整主桁架杆件无应力长度。

1.3　斜拉索垂度的模拟

索的垂度效应是几何非线性分析的重点，在众多模拟方法中属悬链线索单元的计算精度最高，该文采用悬链线索单元法。

1.4　线形调整原则

钢桁梁斜拉桥的主梁安装线形可调性远小于混凝土或钢箱梁斜拉桥，当构件无应力制造长度与接缝宽度确定后，虽能通过调整螺栓在螺孔中心的偏心量进行相对角度微调，但调整量十分有限，可认为此时相对角度也随之确定。因此钢桁梁斜拉桥主梁架设施工中不存在混凝土斜拉桥立模标高的计算、测量和钢箱梁斜拉桥初匹配、精匹配的过程，此时合理地调整斜拉索张拉力是调整钢桁梁斜拉桥主梁线形的最有效方式。

2　斜拉索无应力索长计算与索长迭代法

2.1　斜拉索悬链线计算

斜拉索的悬链线见图 1。图中斜拉索线重量为 q，水平投影长度为 L，上下锚点连线与水平方向的夹角为 θ，斜拉索上锚点拉力为 T_1，下锚点拉力为 T_2，T_1、T_2 均为弦线方向。

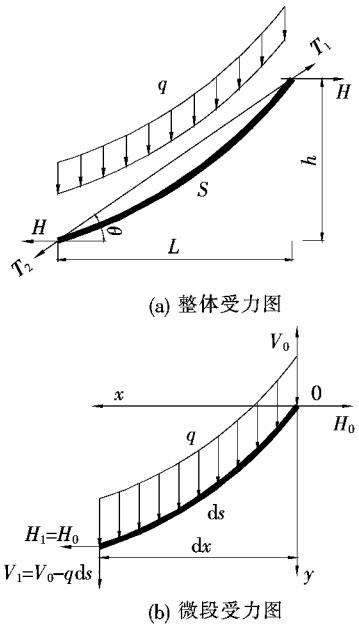


图 1　斜拉索受力示意图

对于图 1(b)，有：

$$\frac{\mathrm{d}H_0}{\mathrm{d}x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}x} = -\frac{q \cdot \mathrm{d}s}{\mathrm{d}x} \tag{3}$$

$$V = \frac{H_0 \cdot \mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} \tag{4}$$

式中：$\mathrm{d}s$ 为斜拉索微段长度；V 为索轴力的竖向分力；H 为索轴力的水平分力；q 为索的单元长度重量。

由于 $H^2+V^2=T^2$，并根据式(4)可得：

$$T = H_0\sqrt{1+\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right)^2} \tag{5}$$

将式(5)代入式(4)可得：

$$\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}x^2} + \frac{q}{H_0}\sqrt{1+\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right)^2} = 0 \tag{6}$$

对上式积分，并引入边界条件 $y|_{x=0}=0$、$y|_{x=L}=L\cdot\tan\theta$，可得：

$$y = \frac{H_0}{q}\left[\mathrm{ch}\alpha - \mathrm{ch}\left(\frac{2\beta x}{L} - \alpha\right)\right] \tag{7}$$

式中：$\beta = \dfrac{qL}{2H_0}$，$\alpha = \mathrm{sh}^{-1}\left(\dfrac{\tan\theta\cdot\beta}{\mathrm{sh}\beta}\right) + \beta$。

对 $\Delta\mathrm{d}s$ 积分并引入边界条件 $S|_{x=0}=0$、$S|_{x=L}=S_0$，可得：

$$S = \frac{H_0}{q}[\mathrm{sh}(2\beta-\alpha) + \mathrm{sh}\alpha] \tag{8}$$

索微段 $\mathrm{d}s$ 的伸长量可表示为：

$$\Delta \mathrm{d}s=\frac{T\mathrm{d}s}{EA} \tag{9}$$

对 ds 积分并引入边界条件，可得：

$$\Delta S=\frac{HL}{2EA}+\frac{H^2}{4EAq}[\mathrm{sh}(4\beta-2\alpha)+\mathrm{sh}(2\alpha)] \tag{10}$$

将式(8)减去式(10)可得索的无应力长度 S_0：

$$S_0=\frac{2H}{q}\mathrm{sh}\beta-\frac{HL}{2EA}-\frac{H^2}{4EAq}\mathrm{sh}(2\beta) \tag{11}$$

2.2 斜拉索张拉力计算的索长迭代法

由式(11)可知：采用索长控制时，斜拉索的无应力长度是索力的函数，同时索力又是索长的函数，因此式(11)是索力的隐式表达，将其显式化难度大，故采用迭代方法进行处理，索长迭代法的计算流程见图 2。

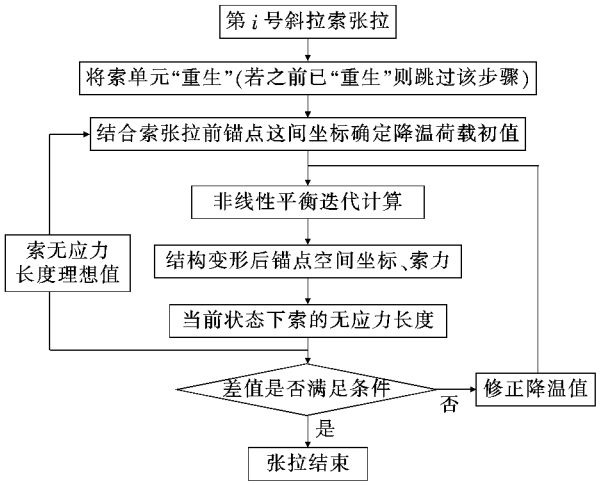


图 2 索长迭代法的计算流程

在迭代开始时，通过无应力长度初步确定斜拉索的初始降温值，该初值可通过当前阶段斜拉索锚固点之间的距离和目标无应力长度求得，待初次计算结束后，提取斜拉索索力及锚固点位移量，结合式(11)求得该几何状态与内力状态下对应的无应力索长，并将该无应力索长与目标无应力索长进行对比，利用索长差值修正降温值以进行新一轮迭代，直至索长差值满足要求后跳出循环。

3 算例

北盘江大桥为双塔双索面钢桁梁斜拉桥，跨径布置为(80＋2×88＋720＋2×88＋80) m，全桥共 93 个节段，其中两侧边跨共 34 个节段(B0～B16)，节间长 12、8 m；中跨含 58 个悬臂拼装节段(Z0～Z28)和 1 个合龙段(ZHL)，节间长 12 m。该桥主梁形式为板桁结合钢桁梁，桁高 8 m，两侧主桁架中心间距 27 m，采用正交异性钢桥面板。大桥采用钢绞线斜拉索，索面按平面扇形布置，每一索面由 28 对斜拉索组成，全桥共计 112 对斜拉索。大桥立面布置见图 3。

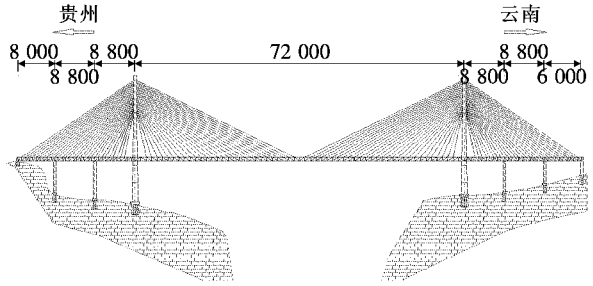


图 3 北盘江大桥立面布置(单位：cm)

北盘江大桥主梁为钢桁梁结构，基于文献[7]，采用“塔预偏中跨梁平”原则对其进行了成桥索力优化，其中塔顶预偏按 0.35Δδ 设置，得到的成桥索力布置见图 4。其中中跨斜拉索由短至长编号依次为 1～28，对应的中跨主梁节段编号依次为 Z1～Z28。

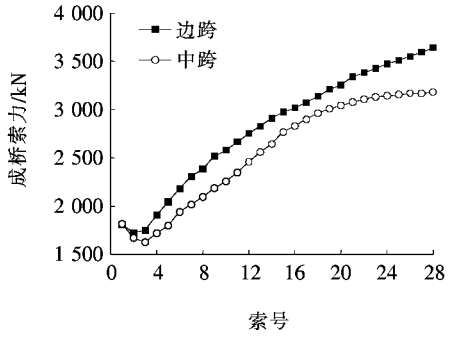


图 4 优化后的成桥索力

在北盘江大桥原设计施工流程中，贵州、云南两侧的边跨主梁均采用顶推法施工，中跨主梁均采用全回转桥面吊机进行桁片拼装，中跨原设计施工流程如表 1 所示。

表 1 中跨原设计施工流程

编号	工序
1	拼装 Z_n 节段桁架、桥面板
2	安装并一张 Z_n 节段斜拉索
3	桥面吊机前移
4	二张 Z_n 节段斜拉索

选取相同成桥状态下的索力和线形作为基本控制参数，建立了正装迭代模型作为对比。将索长迭代法得到的二张力减去正装迭代法得到的二张力，可得到两种控制方法实际二张力差值如图 5 所示。

由图 5 可知：在合理成桥状态及杆件无应力构形

相同的基础上，基于索长迭代法推算出的斜拉索二张力与正装迭代法得出的二张力差值很小，最大差值为 4.3 kN(边跨 28# 索)，约为该索索力的 0.14%。利用索长迭代和正装迭代得到的成桥状态对比图见图 6。

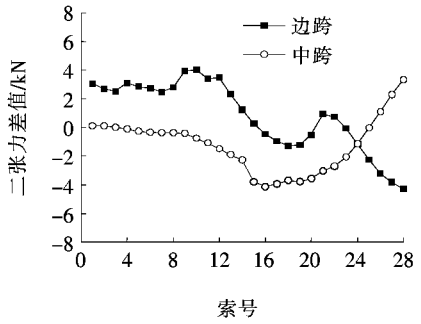
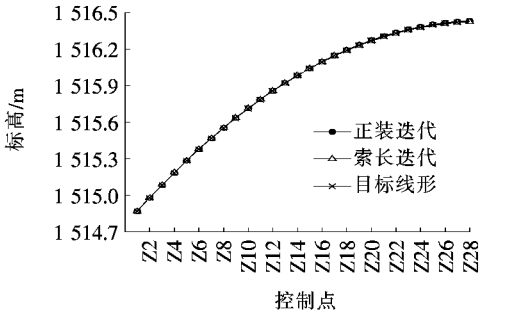
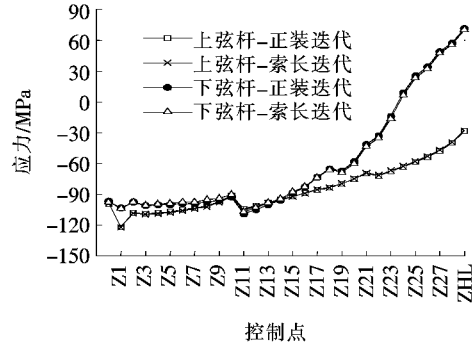


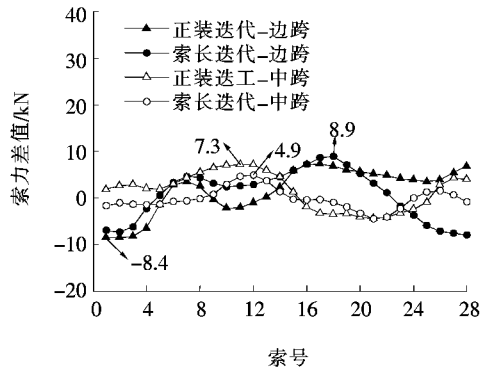
图 5　实际二张力差值



(a) 中跨成桥线形



(b) 中跨成桥弦杆应力差值



(c) 成桥索力与目标索力差值

图 6　成桥状态对比

由图 6(a)可知：两者得到的成桥线形与目标线形吻合良好，其中正装迭代与索长迭代得到的成桥线形与目标线形的最大差值分别为 4、3 mm(Z28 控制点)；由图 6(b)可知：两者得出的成桥弦杆应力基本一致，最大差值均出现在 Z10 节段，其中上、下弦杆差值分别为 1.09、2.52 MPa；由图 6(c)可知：两者得到的成桥索力与目标索力的差值均很小，正装迭代和索长迭代得出的最大索力差值分别出现在边跨 1# 索、边跨 18# 索，其差值分别为 8.4、8.9 kN。

根据正装迭代与索长迭代所得到的二张力与成桥状态的对比分析可知，在合理成桥状态相同的情况下，两者得出的各状态量相差很小，且均能达到预定的目标成桥状态。

4　结论

(1) 基于斜拉索的悬链线方程，推导了索的无应力长度表达式，提出了施工阶段的索长迭代法，给出了迭代计算流程，可便捷地根据目标索长计算出斜拉索张拉力，方便了斜拉桥的施工控制。

(2) 分别采用正装迭代法和索长迭代法得出的斜拉索二张力大小基本一致，且均能达到预定的目标成桥状态，验证了索长迭代的可行性。

(3) 索长迭代法计算过程无需贯穿施工全过程，整个过程只需一次正装分析，计算效率高，非常适用于斜拉桥施工控制。

(4) 北盘江大桥于 2016 年 9 月成功合龙，并于同年 12 月通车，索长迭代法在实际施工控制中取得了良好效果。

参考文献：

[1] 向中富.桥梁工程控制[M].北京：人民交通出版社，2011.

[2] 颜东煌，刘光栋.确定斜拉桥合理施工状态的正装迭代法[J].中国公路学报，1999(2).

[3] 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).

[4] 李乔，卜一之，张清华.基于几何控制的全过程自适应施工控制系统研究[J].土木工程学报，2009(7).

[5] 黄灿.基于几何控制法的大跨度斜拉桥自适应施工控制体系研究[D].西南交通大学博士学位论文，2011.

[6] 刘小刚.无应力状态法在钢桁梁拉桥施工控制中的应用[D].华南理工大学硕士学位论文，2012.

[7] 何旭辉，杨贤康，朱伟.钢桁梁斜拉桥成桥索力优化的实用算法[J].铁道学报，2014(6).

DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.014

武穴长江公路大桥总体设计

彭晓彬[1]，詹建辉[1]，常英[1]，冯云成[2]

（1.湖北省交通规划设计院股份有限公司，湖北 武汉 430051；2.中交第一公路勘察设计研究院有限公司）

摘要：武穴长江公路大桥全长30.993 km，跨江主桥采用主跨808 m单侧混合梁斜拉桥，跨堤孔桥采用主跨100 mPC连续箱梁，引桥采用30 m预制T梁。跨江主桥桥跨布置为(80＋290＋808＋75＋75＋75) m，主梁采用分离式双边箱钢箱梁和同外形预应力混凝土箱梁，钢箱梁U肋与顶板焊接设计要求全熔透，斜拉索采用抗拉强度1 770 MPa高强锌铝合金镀层钢丝，索塔采用无下横梁钻石形混凝土塔，桩基采用3 m直径钻孔灌注桩。

关键词：公路桥；斜拉桥；混合梁；锌铝合金镀层钢丝；全熔透焊接；无下横梁索塔

1 工程概况

武穴长江公路大桥是湖北省“953”高速公路网纵一线(麻城至阳新高速公路)和国道220线(东营至深圳公路)跨越长江的关键性控制工程，桥位上距棋盘洲长江公路大桥约40 km，下距九江长江公路二桥约45 km。

路线全长30 993 m，其中跨江主桥全长1 403 m，两岸接线长29 590 m；设互通式立交5处(武穴西枢纽互通、四望互通、武穴互通、富池互通、枫林东枢纽互通)，分离式立交6处；设匝道收费站3处、服务区1处、监控管理分中心1处、养护工区1处、超限超载检测站3处，改移杭瑞高速公路鄂东南省界收费站1处。

全线采用设计速度100 km/h的高速公路标准建设，其中武穴互通至富池互通段3 722 m(含跨长江主桥)采用双向六车道标准，桥梁宽度(不含布索区)采用33.5 m，其余路段27 271 m采用双向四车道标准，路基宽度26 m。

大桥位于长江中下游田家镇河段，其下游为龙坪河段。桥位河道狭窄，江中靠右岸有鲤鱼洲，河床纵向下切很深；由于大地构造断裂和基岩节点等控制，总体河势较为稳定。河段航道技术等级为Ⅰ级，代表船队船型分别为Ⅰ－(1)级航道四排四列船队(406.0 m×64.8 m×3.5 m)和5 000 t级船舶。主通航孔桥墩按代表船型、船队船撞力进行设计，同时按5 000 t级海轮、10 000 t级内河船舶进行防撞校核；其余水中桥墩按3 000 t级船舶考虑防撞标准。

大桥设计基本风速为30.1 m/s。桥址区长江左岸地势平缓，右岸为丘陵地貌。场地构造较稳定，发生滑坡、泥石流、崩塌、塌陷等地质灾害的可能性较小，可不考虑断裂错动对地面建筑的影响。大桥抗震设计采用两水平设防、两阶段设计的设计思想，E1作用下(50年超越概率5%)地震动峰值加速度为72.0 cm/s^2，E2

[8] JTG D60－2015 公路桥涵设计通用规范[S].

[9] 梁鹏.超大跨度斜拉桥几何非线性及随机模拟分析[D].同济大学博士学位论文，2004.

[10] 董道福，陈常松，颜东煌，等.单元解体法精确求解梁元无应力构形[J].湖南大学学报：自然科学版，2016(11).

[11] 王晟.钢桁梁斜拉桥节段纵移悬拼足尺模型试验及状态偏差预测与控制技术研究[D].长沙理工大学博士学位论文，2017.

[12] Madenci E，Guven I.The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS (2nd Edition)[M]. USA：Springer，2015.

[13] 陈常松.超大跨度斜拉桥施工全过程几何非线性精细分析理论及应用研究[D].中南大学博士学位论文，2007.

[14] 颜东煌，王晟，母进伟，等.节段纵移悬拼法足尺模型试验动载效应研究[J].中国公路学报，2016(11).

[15] Alberto M. B. Martins，Luís M. C. Simões，João H. J. O. Negrão.Cable Stretching Force Optimization of Concrete Cable－Stayed Bridges Including Construction Stages and Time－Dependent Effects[J].Structural and Multidisciplinary Optimization，2015，51(3)：757－772.

收稿日期：2018－10－11

作者简介：彭晓彬，男，硕士，教授级高工.E－mail：67393541@qq.com