

doi:10.11835/j.jssn.1000-582X.2013.08.018

在役拉索索力识别的静力平衡法

王 龙^{1,2}, 吴 波¹, 高俊岳², 王 帆¹

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640; 2. 广州市建筑集团有限公司, 广州 510030)

摘 要: 为了实现操作性强、精度高的在役拉索索力识别, 考虑拉索的预应力刚化效应和静力平衡原理, 提出了一种基于静态测试手段的在役拉索索力识别方法。通过对索力识别过程及其关键技术分析, 提出了内衬采用软金属的复合索夹型式, 并采用显式非线性动态分析法分析了索夹与拉索之间的接触变形演化规律, 研究了摩擦力随夹紧力的变化规律, 从理论上阐明了该方法的科学性和可行性。因索力的获得只与施力点位移和施力大小有关。避免了常用索力测定方法测量精度受拉索边界条件及材料参数取值影响较大的问题, 为柔性拉索的索力识别提供了一种新的思路。

关键词: 在役拉索; 索力; 识别; 静力测试

中图分类号: TU392.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)08-118-09

A static equilibrium method for tension identification of in-service cable

WANG Long^{1,2}, WU Bo¹, GAO Junyue², WANG Fan¹

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangzhou Municipal Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 510030, China)

Abstract: To identify the tension of in-service cable expediently and accurately, a cable tension identification method based on static testing measures is proposed by taking cable stress stiffening effect and principle of static equilibrium into account. According to the analysis on the process of cable tension identification and the key technique, a new compound clamp type with the soft metal lining is proposed. The rule of the contact distortion evolution between the clamp and the cable is analyzed by dynamic nonlinear explicit analysis method, and the law of the friction change following the clamping force is studied. Thus, the reasonability and feasibility of this method is theoretically illuminated. The identified tension only depends on the displacement of load application point and the load force. The proposed method avoids the drawback of normal cable measuring methods where the measuring accuracy is greatly affected by cable boundary conditions and values of material parameters. The tension measured in the method is only related to the displacement of force point and the value of force. Therefore, it provides a new idea for cable tension identification of flexible cable.

Key words: in-service cable; tension; identification; static measuring

在役拉索的索力确定是各种张力结构健康诊断和安全评估的先决条件。要准确地了解在役拉索的索力, 需要选择适当的测量方法和仪器, 以避免现场

量测中各种干扰因素的不利影响。

现有的索力测试方法很多, 如压力表法^[1]、压力传感器法、光纤光栅传感器法^[2]、频率法^[3-8]、磁通量

收稿日期: 2013-01-26

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51025829); 国家“十二五”科技支撑计划子课题(2011BAJ09B03-04)

作者简介: 王龙(1975-), 男, 教授级高工, 博士后, 主要从事钢结构工程研究, (E-mail) wloooo@163.com。

法^[9]。其中,压力表法只能用于正在张拉拉索的索力测定。采用压力传感器法和光纤光栅传感器法时,传感器只能在拉索张拉之前布设,而且只能测得传感器布设之后的索力增量。磁通量法虽然可用于在役拉索的索力测试,但其传感器也需在拉索张拉锚固之前布设。

国内学者对在役拉索索力测定进行了新的探索。魏建东、刘山洪^[10]提出了基于拉索静态线形的索力测定方法,测得索上 3 点的相对位置后,即可通过求解非线性方程组得到索力值。这种方法测点多,测点在拉索轴线方向上的同心共线性较难保证,在实际的索力测量中有一定困难。张宇鑫等^[11-12]根据预应力静定结构受力的力学特征,结合现代测试技术及张弦梁结构的静力平衡关系,提出了一种适用于张弦梁结构的索力识别方法。但该方法是基于使用荷载已知的前提下提出的,而当结构投入使用后,精确确定使用荷载比较困难。

目前,对在役拉索进行索力测量时,频率法几乎还是唯一的选择。对于较柔的长索,频率法是一种成熟的索力测量方法。而对于基本频率较高的短索,或边界复杂的建筑拉索而言,频率法的应用则受到限制,需要开发新的索力测定方法。

笔者基于静态测试手段及拉索的应力刚化效应和静力平衡原理,提出了一种既可以适用于长索又可以适用于短索的索力识别方法,给出了施力点在特定位置的索力识别计算公式,见文献[13]。在此基础上,针对施力点位置的一般情况,从更普遍意义上进行了推导。该索力识别方法的关键是索夹能否将待测拉索某段锁死,否则需修正识别结果。为此,文中进行了索力识别过程分析,探索了索夹固定索段索力增量随顶起位移的变化规律,研究提出了矢跨比 δ/L 的合理建议值。同时,为增大索夹与拉索之间的摩擦力,提出了一种内衬采用软金属的复合索夹型式。并采用 ABSQUS 的显式非线性动态法分析了索夹与拉索之间的接触变形演化规律,研究了摩擦力随夹紧力的变化规律。

文中索力的获得只与施力点位移和施力 N 大小有关,避免了常用索力测定方法测量精度受拉索边界条件及索长等影响较大的问题,为柔性拉索的索力识别提供了一种新的思路。

1 理论分析

如图 1 所示,采用索夹等设备将待测拉索某段锁死,使得索夹固定之中间索段被顶起而索力增加时,拉索与索夹之间不产生相对滑动,待测索段之索

力增量不向外侧索段传递。设索夹之间的距离为 L ,拉索索力为 T ,假定在距离左端索夹 L_1 处施加一侧向集中力 N ,将索段顶起,顶起高度为 δ 。考虑到顶起过程中的索段与顶点之间的滑移,设距离集中力 Δ 的一点 O 顶起后达到平衡态顶点的位置 O_1 ,并设索段 AO_1 的原长为 L_{01} ,索段 BO_1 的原长为 L_{02} ,设顶起后左侧索段的索力增量为 ΔT_1 、右侧索段的索力增量为 ΔT_2 ,顶起前后左侧索段转角为 θ_1 、右侧索段转角为 θ_2 。

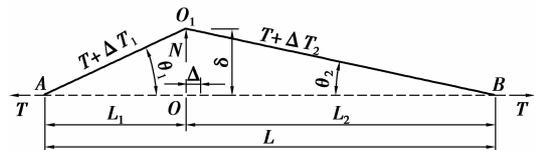


图 1 在役拉索索力识别测量原理

于是,顶升前的索段 AO 、 BO 的索力分别为

$$T = EA \left(\frac{L_1 + \Delta}{L_{01}} - 1 \right), \quad (1)$$

$$T = EA \left(\frac{L_2 - \Delta}{L_{02}} - 1 \right). \quad (2)$$

假定顶起后 AO 、 BO 的索力分别为 T_1 、 T_2 ,那么

$$T_1 = EA \left(\frac{L_1}{L_{01} \cos \theta_1} - 1 \right), \quad (3)$$

$$T_2 = EA \left(\frac{L_2}{L_{02} \cos \theta_2} - 1 \right). \quad (4)$$

根据 O 点的内力平衡条件,可得

$$T_1 \cos \theta_1 - T_2 \cos \theta_2 = 0, \quad (5)$$

$$N - T_1 \sin \theta_1 - T_2 \sin \theta_2 = 0. \quad (6)$$

式(5)、式(6)联立求解,可得

$$T_1 = \frac{N \cos \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (7)$$

$$T_2 = \frac{N \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}. \quad (8)$$

式(3)、式(4)可化为

$$L_{01} = \frac{L_1 EA}{(T_1 + EA) \cos \theta_1}, \quad (9)$$

$$L_{02} = \frac{L_2 EA}{(T_2 + EA) \cos \theta_2}. \quad (10)$$

将式(1)、式(2)、式(7)、式(8)以及式(9)、式(10)联立可得:

$$T = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 (L_1 + L_2) [N \cos \theta_1 + \frac{EA \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}] [N \cos \theta_2 + \frac{EA \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}]}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \{ L_1 \cos \theta_2 [N \cos \theta_1 + \frac{EA \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}] + L_2 \cos \theta_1 [N \cos \theta_2 + \frac{EA \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}] \}}$$

$$\frac{EA \sin(\theta_1 + \theta_2)}{EA \sin(\theta_1 + \theta_2)} - EA。 \quad (11)$$

特别地,当 $L_1=L_2$ 时,有

$$T = \frac{N}{2 \tan \theta} + (\cos \theta - 1)EA, \quad (12)$$

其中, $\theta = \theta_1 = \theta_2 = \arctan(2\delta/L)$ 。

一般与固定索段长度相比,拉索加载点的顶起高度 δ 很小,故有

$$\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta = \arctan(2\delta/L) \approx 2\delta/L$$

此时,式(12)可以写作

$$T = \frac{NL}{4\delta} - 2\left(\frac{\delta}{L}\right)^2 EA。 \quad (13)$$

顶起前后两侧索段的索力增量为

$$\Delta T = \frac{(1 - \cos \theta)(EA + T)}{\cos \theta}, \quad (14)$$

式中: E 为拉索弹性模量; A 为拉索断面面积。 N 、 δ 由压力传感器和位移传感器等方便地测得。

2 索力识别过程分析

在设计阶段,目前国内外均采用容许应力方法对于钢索进行强度校核。国内所建悬索屋盖,在恒载、活载、预应力和温度作用的最不利组合下,所采用的单一安全系数大致为 2.5~3.0,一般采用容许应力方法对钢索按下式进行校核。

$$\frac{N_{kmax}}{A} \leq \frac{f_{tpk}}{K}, \quad (15)$$

式中, N_{kmax} 为按恒载、活载、预应力、地震荷载、温度作用等各种组合工况下计算所得的钢索最大拉力标准值; A 为钢索的有效截面面积; f_{tpk} 为钢索的抗拉强度标准值; K 为安全系数,宜为 2.5~3.0。

如前所述,当 N 、 δ 已知时,由式(12)可求得待测索段的索力。反之,当索力 T 已知时,可以根据索段中点位移 δ 求得顶升力为 N 和顶起后待测索段的索力增量 ΔT

$$\Delta T = \frac{(1 - \cos \theta)(EA + T)}{\cos \theta}, \quad (16)$$

$$N = 2 \tan \theta T + 2(\tan \theta - \sin \theta)EA。 \quad (17)$$

由上式可见,索力增量 ΔT 和顶升力 N 与拉索抗拉刚度 EA 、矢跨比 (δ/L) 以及拉索张力 T 有关。在其它参数相同的情况下,拉索初始张力 T 越大,需要的顶升力 N 越大,顶升后索段的索力增量 ΔT 越大;同样,顶升高度 δ 越大,需要的顶升力 N 越大,顶升后索段的索力增量 ΔT 越大。

下面以常用的拉索截面 $7\Phi 5$ 为例分析拉索在不同初始张力 T 下顶起不同位移 δ 时所需的顶升

力 N 和索力增量 ΔT ,见表 1,并将顶升力 N 和索力增量 ΔT 随矢跨比 (δ/L) 的变化规律绘于图 2、图 3。

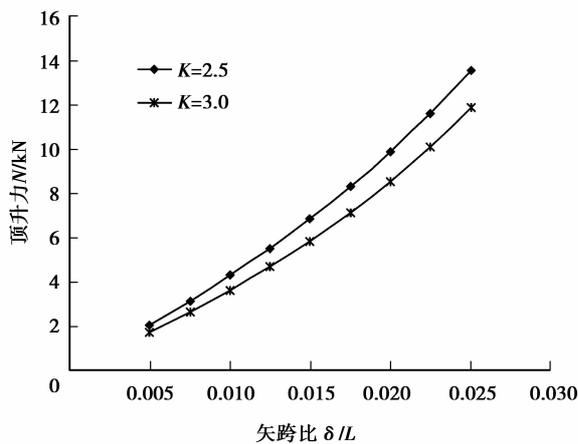
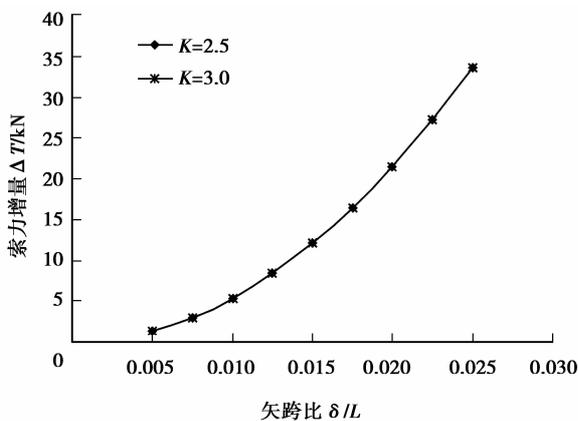
表 1 不同索力和顶起位移下的顶升力和索力增量

K	T/kN	L/mm	δ/L	N/kN	$\Delta T/\text{kN}$
2.5	102.26	1 000	0.005 0	2.07	1.35
2.5	102.26	1 000	0.007 5	3.16	3.03
2.5	102.26	1 000	0.010 0	4.30	5.38
2.5	102.26	1 000	0.012 5	5.53	8.41
2.5	102.26	1 000	0.015 0	6.86	12.10
2.5	102.26	1 000	0.017 5	8.31	16.47
2.5	102.26	1 000	0.020 0	9.89	21.51
2.5	102.26	1 000	0.022 5	11.64	27.23
2.5	102.26	1 000	0.025 0	13.57	33.61
3.0	85.22	1 000	0.005 0	1.73	1.34
3.0	85.22	1 000	0.007 5	2.65	3.02
3.0	85.22	1 000	0.010 0	3.62	5.38
3.0	85.22	1 000	0.012 5	4.68	8.40
3.0	85.22	1 000	0.015 0	5.84	12.10
3.0	85.22	1 000	0.017 5	7.11	16.46
3.0	85.22	1 000	0.020 0	8.53	21.50
3.0	85.22	1 000	0.022 5	10.11	27.21
3.0	85.22	1 000	0.025 0	11.87	33.59

注:截面规格为 $7\Phi 5$, A 为 137.44 mm^2 , f_{tpk} 为 $1 860 \text{ N/mm}^2$, E 为 $195 000 \text{ N/mm}^2$ 。

图 2 给出了安全系数 $K=2.5, 3.0$ 时顶升力 N 随矢跨比 δ/L 的变化关系曲线。顶升力 N 与拉索索力 T 有关, T 越大(即 K 越小),需要的顶升力 N 越大。拉索索力 T 不变时,顶升力 N 随 δ/L 的增加而增加,且 δ/L 越大,增加的速度越快。

图 3 给出了索力增量 ΔT 随矢跨比 (δ/L) 变化的关系曲线。索力增量 ΔT 只与矢跨比 (δ/L) 有关,而不受拉索索力 T 的影响。 ΔT 随 δ/L 的增加而迅速增加,且 δ/L 越大,增速越快。当 $\delta/L=0.02$ 时,索力变化已达初始索力的 20.98%~25.18%。实际索力识别时,如索跨 L 太大则不便操作,顶起位移 δ 太小又易受测量噪声污染。因此,建议矢跨比 δ/L 取 0.010~0.015。

图 2 不同索力 T 时 N 随 δ/L 的变化关系曲线图 3 索力增量 ΔT 随 δ/L 的变化关系曲线

3 索力识别的关键问题

3.1 索力识别的关键技术问题

识别方法的关键在于测量装置通过索夹将待测索段锁死,与之形成“弓弦”,并使得索夹固定的中间索段被顶起而索力增加时,拉索与索夹之间不产生相对滑动,待测索段之索力增量 ΔT 不向外侧索段传递。

索力识别过程中,将固定索段顶起所需要的顶升力 N 和顶起后索段中产生的索力增量 ΔT 相当可观。其中,顶升力 N 的提供可在市面上各种型号的油压千斤顶或其它动力输出装置中选择。而索力增量 ΔT 则仅能靠索夹与拉索之间的摩擦来平衡,一方面,使拉索与索夹之间不产生相对滑动,待测索段之索力增量 ΔT 不向外侧索段传递;另一方面,使拉索与索夹之间加紧力不致太大以使拉索屈服而导致损伤。

因此,索力识别装置的关键在于夹紧后索夹与拉索之间的摩擦力是否足够大,能够平衡待测索段顶起后的索力增量 ΔT 。

3.2 摩擦问题的有限元分析

索夹与拉索之间的摩擦力是由索夹与拉索接触面上的接触压力产生的。对实体摩擦体,摩擦系数与材料的粗糙度相对应,通常情况下,摩擦面上的法向压力尚不致于影响到摩擦面的咬合程度,因此,可假定接触面上的摩擦系数 μ 不随压力而改变^[14-16]。这样,索夹与拉索之间的摩擦分析,实质上就转化为接触分析,只需考察不同夹紧力时,索夹与拉索之间接触面及接触压力的变化规律。

理论上讲,增大索夹与拉索之间的摩擦可以有 2 个途径,一是索夹选用粗糙度高、与拉索之间摩擦系数大的材料,一是夹紧力一定时尽量选取索夹与拉索之间法向接触力大的材料。因此,提出了一种复合索夹,该索夹由内外 2 层材料组成,外层采用特种高强工具钢,与拉索接触的内层采用与钢索之间摩擦系数较大的软金属,以使索夹夹紧时内层金属进入塑性状态增加与拉索之间的接触面积。

假定索夹与拉索之间的夹紧力 F 和摩擦力 f 沿索夹长度方向均匀分布,则只需考虑索夹与拉索在断面上的变形与接触问题,使分析在个人机上成为可能并可大大减少计算机时。图 4 显示了工作时索夹与拉索各部件之间的相对位置关系,则只需了解断面上 1 号钢丝(Strand1)、2 号钢丝(Strand2)与索夹内层金属(Clad metal)之间的接触长度和沿接触长度上的法向压力集度,就可以得到索夹与拉索接触面之间总的法向压力,求出二者之间的摩擦力。

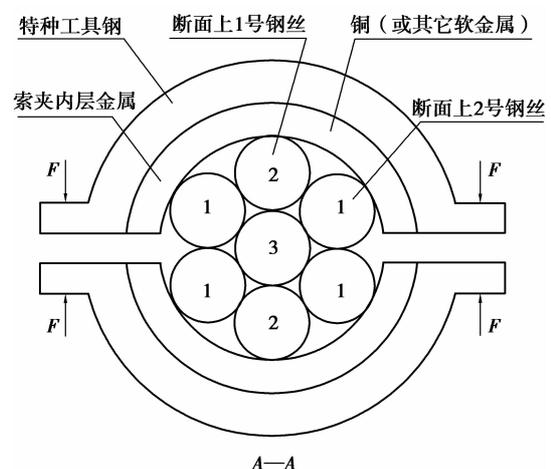


图 4 索夹与拉索布置大样

采用显式非线性动态分析程序 ABAQUS/Explicit 对上述复合索夹与拉索之间的接触变形演化规律进行了分析,得到了采用不同索夹时摩擦力随夹紧力 F 的变化规律。

采用 ABAQUS/Explicit 程序分析了索夹内衬采用工具钢(即普通索夹)、软钢和黄铜时索夹与拉索的接触问题,计算模型见图 5。按夹紧力 F 分别为 143、286、429、572、715 N 5 种荷载进行分析,为避免加载点处的应力集中,将夹紧力转化成线荷载进行加载。其中,考虑到实际工作要求,采用普通索夹时,仅考虑线性材料分析;采用复合索夹时,索夹外层以及拉索为线性材料,软金属则采用理想塑性模型,其应力应变关系曲线见图 6。材料参数取值见表 2。夹紧力在 $F=143$ N、429 N、715 N 等 3 种荷载下的分析结果,如图 7~图 9 所示。

表 2 计算模型的材料参数取值

材料	$\rho \times 10^6 /$ ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$)	$E /$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	ν	$f_y /$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
钢绞线	7.80	195 000	0.30	—
工具钢	7.80	206 000	0.30	—
软 钢	7.80	206 000	0.30	380
黄 铜	8.96	110 000	0.32	110

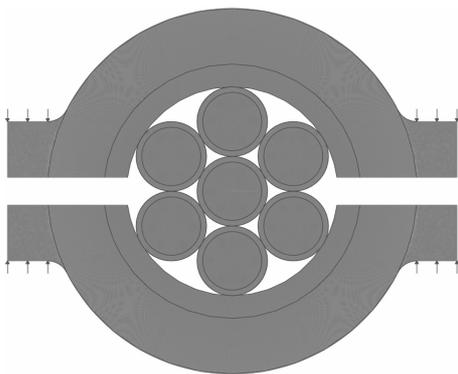


图 5 计算模型简图

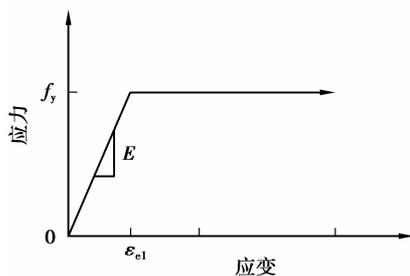
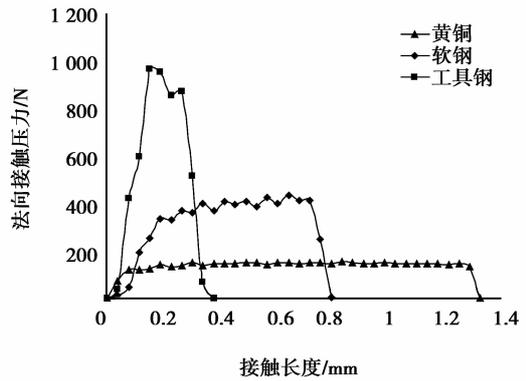
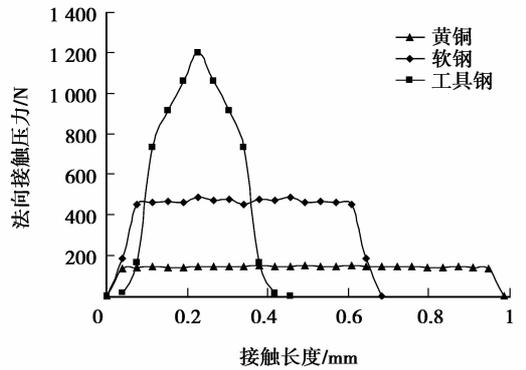


图 6 软金属的应力—应变行为

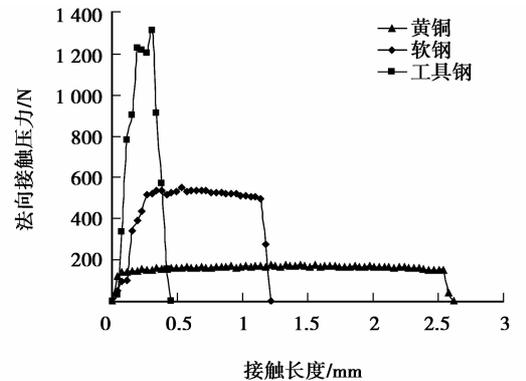


(a) 断面层1号钢丝

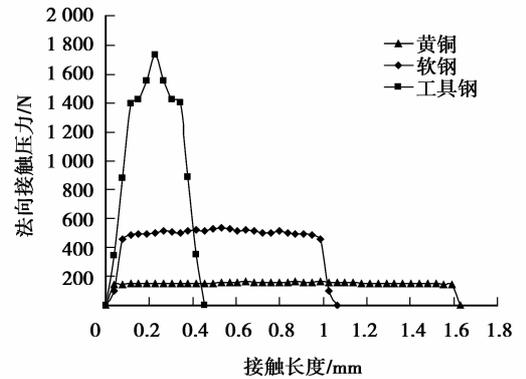


(b) 断面层2号钢丝

图 7 $F=143$ N 时索夹与拉索之间 CPRESS 的分布

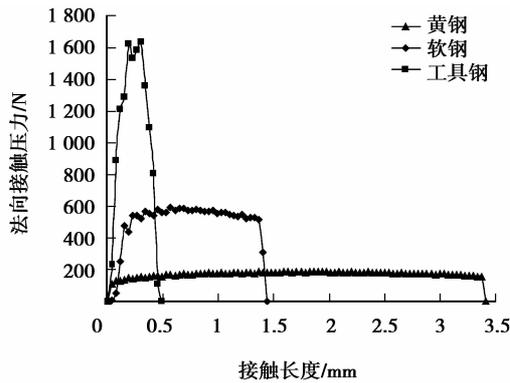


(a) 断面层1号钢丝

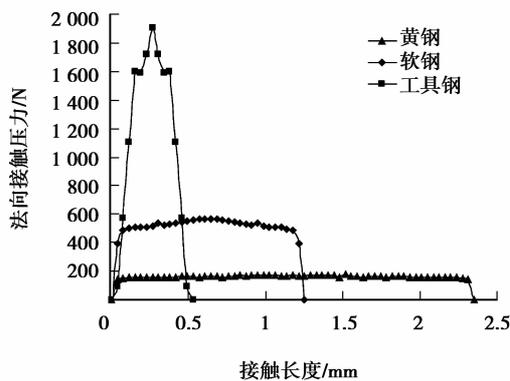


(b) 断面层2号钢丝

图 8 $F=429$ N 时索夹与拉索之间 CPRESS 的分布



(a) 断面层1号钢丝



(a) 断面层2号钢丝

图 9 $F=715\text{ N}$ 时索夹与拉索之间 CPRESS 的分布

图 7 ~ 图 9 中, (a)、(b) 分别为 Strand1、Strand2 与 Clad metal 之间 CPRESS 分布。接触长度随着荷载的增加不断增大, 当索夹内衬采用黄铜、软钢等软金属时, 由于塑性发展, 索夹与拉索之间接触线上的法向接触压力集度基本不变, 接触长度迅速增大; 当索夹内衬采用工具钢等硬金属时, 索夹与拉索之间的接触长度增幅不大, 法向接触压力集度则有较大增加。荷载一定时, 内衬金属越软, 索夹与拉索之间的接触长度越大, 法向接触压力集度越小。

3.3 索夹内衬采用不同材料时的等效摩擦系数

图 7 ~ 图 9 分别显示了索夹内衬采用工具钢、软钢和铜时索夹与拉索之间的接触变形规律, 给出了不同荷载、不同索夹型式下沿断面的接触长度和法向接触压力的集度 (CPRESS)。设索夹与拉索之间的接触长度为 l_c , 沿接触线上的法向接触压力集度为 \bar{N}_p , 那么, 将法向接触压力集度沿断面的接触长度积分, 就可以得到索夹与拉索断面接触线上的法向压力 N_p , 即

$$N_p = \int_0^{l_c} \bar{N}_p ds. \quad (18)$$

假定索夹与拉索接触面上的摩擦系数为 μ , 则可得沿索夹长度方向单位长度上的摩擦力 f_e 。

$$f_e = \mu N_p. \quad (19)$$

为了能够更加直观地反映摩擦力与索夹夹紧力 F 之间的关系, 令

$$f_e = \bar{\mu} F,$$

于是

$$\bar{\mu} = \frac{f_e}{F}. \quad (20)$$

采用式 (18)、(19)、(20) 分别计算出索夹内衬采用工具钢、软钢和铜时索夹与拉索之间的摩擦力和等效摩擦系数, 并将摩擦力、等效摩擦系数随夹紧力的变化绘于图 10、图 11。摩擦力随夹紧力的增加而增加, 等效摩擦系数则随夹紧力的增加而减小, 这是因为索夹与拉索之间的接触面积、法向接触压力的增速小于夹紧力的增速, 并不随夹紧力的增加而线性增加的缘故。当索夹内衬采用黄铜时, 摩擦力和等效摩擦系数最大, 软钢次之, 工具钢最差。这是由于软金属的屈服点较低, 弹模较小 (铜和软钢的屈服点和弹模分别为 110 MPa、380 MPa; 110 GPa、206 GPa), 接触点处较早发生塑性变形, 接触面增大。

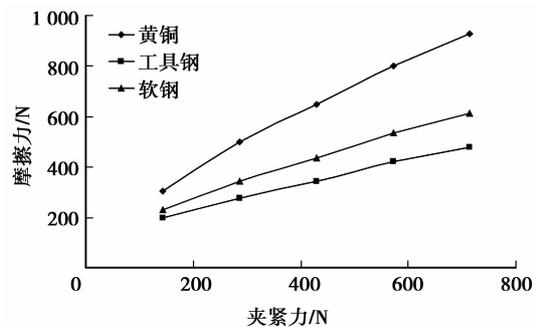


图 10 摩擦力与夹紧力的关系曲线

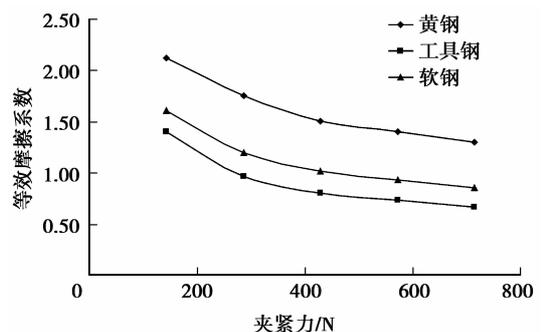


图 11 等效摩擦系数与夹紧力的关系曲线

假定索夹长度为 $l=20\text{ mm}$, 索夹夹紧力 $F=429\times 20=8.58\text{ (kN)}$, 则当复合索夹内衬采用工具钢、软钢和黄铜时, 索夹与拉索之间摩擦力分别为 6.91 、 8.71 、 12.95 kN 。由表 1 可知, 当拉索被顶起后的矢跨比为 0.010 和 0.015 时, 索力增量分别为 8.38 kN 和 12.07 kN 。

采用文中方法进行在役拉索索力测量时, 只要索夹型式、材料选用合适, 待测索段被顶起时, 索夹与拉索之间摩擦力完全能够平衡由此产生的索力增量, 满足实际测试要求。

4 试验研究

试验旨在探讨文中提索力识别方法的可行性。大量的工程实践及经验表明, 预应力锚具锚固效果好。因此, 为简化试验, 试验中待测索段采用锚具来固定, 这也和理论分析假定的边界条件相符合。然而, 对于在役拉索的索力识别, 预应力锚具无法运用。因此, 第 3 节提出了一种内衬采用软金属的索力识别专用索夹, 该索夹的相关试验将在后续研究中开展。采用常用的钢绞线拉索截面 $7\Phi 5$ ($E=1.95\times 10^5\text{ N/mm}^2$; $f_{pk}=1\ 860\text{ N/mm}^2$; $A=139.5\text{ mm}^2$) 开展了索力为 $T_0=0.3Af_{pk}=77.841\text{ kN}$, $T_0=0.4Af_{pk}=103.788\text{ kN}$, $T_0=0.5Af_{pk}=129.735\text{ kN}$ 3 种水平下的索力识别试验。试验在自平衡反力架上进行, 如图 12 所示, 固定索段长度为 $3\ 900\text{ mm}$, 在固定索段的中点施加侧向集中荷载(顶升力)。试验过程中, 拉索两端采用 VLM15-1 锚具的中孔锚固, 拉索张拉采用预应力千斤顶, 并采用应变测力传感器监测索力。拉索侧向力的施加采用专门开发的 60 kN 小量程液压千斤顶, 施力点侧向位移的测量采用 30 mm 大量程百分表。



图 12 索力识别过程加载图

根据试验结果绘制了拉索在 3 种索力水平下顶升力 N 与顶起位移的关系曲线, 如图 13~图 15 所示。显然, 试验曲线绝大部分位于理论计算曲线的下面, 即顶起位移的测试值比理论值小, 这是由于向张紧的钢绞线施加侧向集中荷载时, 组成钢绞线的各束钢丝之间的空隙被挤密, 施力点处钢绞线断面挤压变形的缘故。

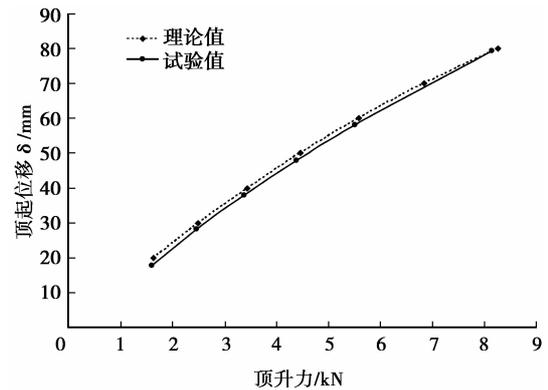


图 13 $T_0=77.80\text{ kN}$ 时 N 与 δ 的关系曲线

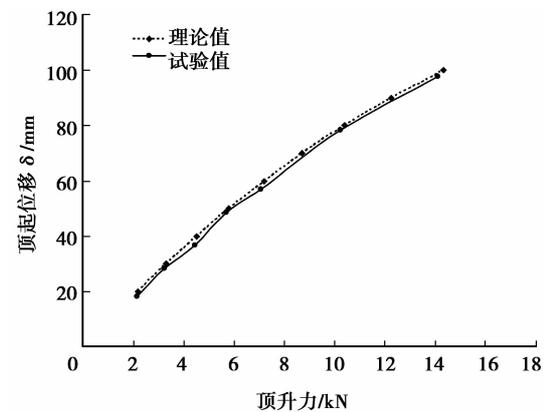


图 14 $T_0=103.78\text{ kN}$ 时 N 与 δ 的关系曲线

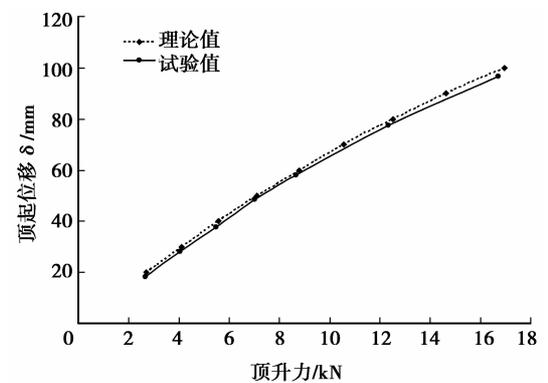


图 15 $T_0=129.74\text{ kN}$ 时 N 与 δ 的关系曲线

根据试验结果绘制了不同顶起位移时的索力识别误差直方图,如图 16 所示。随着矢跨比 δ/L 的增大(0.005~0.025),识别精度逐步提高。另外,识别误差基本上为正误差,即与实测索力相比计算索力偏大。如前所述,这也是由于钢绞线的各束钢丝之间的空隙被挤密,施力点处钢绞线断面挤压变形的缘故。因此,对不同截面型式预应力拉索的索力识别应进行标定试验以剔除施力点处拉索断面空隙挤密、挤压变形等的影响,以进一步的提高识别精度。

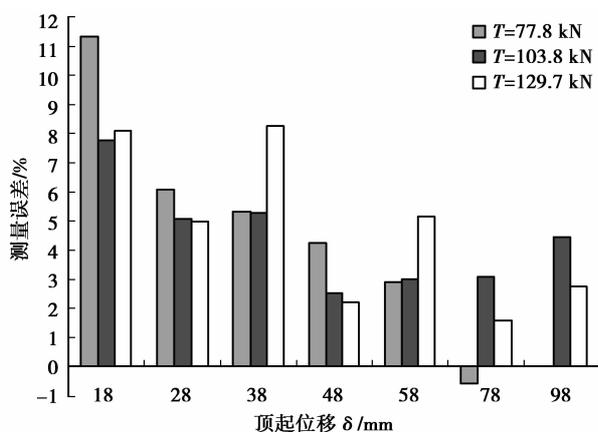


图 16 不同顶起位移 δ 时的索力识别误差

5 结 论

基于静态测试手段及拉索的应力刚化效应和静力平衡原理,提出了一种在役拉索索力识别方法。内衬采用软金属的复合索夹型式,利用 ABSQUS 的显式非线性动态分析方法分析了索夹与拉索之间的接触变形演化规律及摩擦力随夹紧力的变化规律。

1) 采用文中方法进行在役拉索索力测量是可行的,只要索夹型式、材料选用合适,待测索段被顶起时,索夹与拉索之间摩擦力完全能够平衡由此产生的索力增量,满足实际测试要求。

2) 识别方法是建立在基本的静力检测手段和静力平衡原理基础上的,索力只与锁定索段长度 L 、施力点位移和施力 N 大小有关。

3) 索力增量 ΔT 只与矢跨比(δ/L)有关,而不受拉索索力 T 的影响。索力增量 ΔT 随 δ/L 的增加而迅速增加,且 δ/L 越大,增速越快。实际索力识别时,如索跨 L 太大则不便操作,顶起位移 δ 太小又易受测量噪声污染。因此,建议矢跨比 δ/L 取 0.010~0.015。

4) 顶升力 N 与拉索索力 T 有关, T 越大(即 K 越小),需要的顶升力 N 越大。拉索索力 T 不变时,顶升力 N 随 δ/L 的增加而增加,且 δ/L 越大,增加的速度越快。

5) 摩擦力随夹紧力的增加而增加,等效摩擦系数则随夹紧力的增加而减小。总体上看,当索夹内衬采用黄铜时,摩擦力和等效摩擦系数最大,软钢次之,工具钢最差。

参考文献:

- [1] 刘志勇. 斜拉桥斜拉索索力测试方法综述[J]. 铁道建筑,2007(4):18-20.
LIU Zhiyong. A review on measuring method of cable force of cable-stayed bridge[J]. Railway Engineering, 2007(4):18-20.
- [2] 肖德宝,王帆,吴波. 光纤光栅传感器在索力测量中的应用[C]//刘锡良. 第七届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京:工业建筑杂志社,2007:897-901.
- [3] Lardies J, Minhngi T. Modal parameter identification of stay cables from output-only measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 25 (1):133-150.
- [4] Rebelo C, Julio E, Varum H, et al. Cable tensioning control and modal identification of a circular cable-stayed footbridge[J]. Experimental Techniques, 2010, 34(4):62-68.
- [5] Amabili M, Carra S, Collini L, et al. Estimation of tensile force in tie-rods using a frequency-based identification method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 329(11):2057-2067.
- [6] Kim B H, Park T. Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304 (3/4/5):660-676.
- [7] Byeong Hwa Kim, Taehyo Park. Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007,304:660-676.
- [8] Tabatabai H, Mehrabi A B, Yen W H P. Bridge stay cable condition assessment using vibration measurement techniques [J]. Proceedings of SPIE: Structural Materials Technology III; an NDT Conference, March 31, 1998, San Antonio, TX. [S. l.]: SPIE, 1998, 3400 :194-204.
- [9] Wang M L, Lloyd G M, Hovorka O. Development of a remote coil magnetoelastic stress sensor for steel cables [C]// Proceedings of SPIE's 8th Annual International

- Symposium on Smart Structures and Material, Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems, March 4-8, 2001, Newport Beach California. [S. I.]: SPIE, 2001, 4337:122-128.
- [10] 魏建东, 刘山洪. 基于拉索静态线形的索力测定[J]. 工程力学, 2003, 20(3):104-107.
WEI Jiandong, LIU Shanong. Tension calculation of cable by its static profile[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3):104-107.
- [11] 张宇鑫, 李国强, 刘海成. 静定张弦梁结构索力识别的静力平衡法[J]. 空间结构, 2007, 13(1):26-28.
ZHANG Yuxin, LI Guoqiang, LIU Haicheng. Cable tension identification of beam string structures by static equilibrium method [J]. Spatial Structures, 2007, 13(1):26-28.
- [12] 张宇鑫, 李国强, 刘海成. 基于静力检测方法的张弦梁结构索力识别[J]. 特种结构, 2006, 23(4):54-55.
ZHANG Yuxin, LI Guoqiang, LIU Haicheng. Cable tension identification of beam string structures based on static measuring methods [J]. Special Structures, 2006, 23(4):54-55.
- [13] 王龙, 吴波. 一种基于静力检测手段的在役预应力拉索索力识别方法[J]. 建筑技术, 2009, 40(9):812-814.
WANG Long, WU Bo. Tension identification method of in-service cable based on static measuring [J]. Architecture Technology, 2009, 40(9):812-814.
- [14] 高建勋. 斜拉桥索力测试方法及误差研究[J]. 公路与汽运, 2004, 103(4):80-81.
GAO Jianxun. Study on measuring method of cable force and the error in cable-stayed bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2004, 103(4):80-81.
- [15] 贾毅朝. 摩擦与摩擦系数的分析[J]. 运城学院学报, 2006, 24(2):60-61.
JIA Yicao. Analysis of friction and friction coefficient[J]. Journal of Yuncheng University, 2006, 24(2):60-61.
- [16] 陈策, 吉林, 冯兆祥. 悬索桥主缆与鞍座间摩擦系数的测定[J]. 中外公路, 2008, 28(1):120-123.
CHEN Ce, JI Lin, FENG Zhaoxiang. Determination of friction coefficient between suspension bridge cable and saddle [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(1):120-123.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 110 页)

- [7] Marple S L. Digital spectral analysis: with applications[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1987.
- [8] Box G E P, Jenkins G M, Reinsel G. Time series analysis: forecasting and control [M]. 3rd ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994.
- [9] Akaike H. A new look at the statistical model identification [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [10] Boore D M, Bommer J J. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(2):93-115.
- [11] Akkar S, Boore D M. On baseline corrections and uncertainty in response spectra for baseline variations commonly encountered in digital accelerograph records[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(3):1671-1690.
- [12] Harichandran R S. Local spatial variation of earthquake ground motion [M]// Thun J L V. Earthquake engineering and soil dynamics II: recent advances in ground-motion evaluation. New York: ASCE, 1988: 203-217.
- [13] 屈铁军, 王前信. 空间相关的多点地震动合成(II)合成实例[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(2): 25-32.  
QU Tiejun, WANG Qianxin. Simulation of spatial correlative time histories of multi-point ground motion, part II: application of fundamental formulas [J]. Journal of Earthquake and Engineering Vibration, 1998, 18(2):25-32.
- [14] Boissières H P, Vanmarcke E H. Estimation of lags for a seismograph array: wave propagation and composite correlation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1994, 14(1):5-22.

(编辑 陈移峰)