

# 大直径高吨位斜拉索索力测试与分析

孔祥杰<sup>1</sup> 崔来军<sup>1</sup> 张宾<sup>1</sup> 陈强<sup>2</sup>

(1. 北京市首都公路发展集团有限公司 北京 100078; 2. 铁道科学研究院铁建所 北京 100081)

**摘要** 介绍了频率法测量索力的基本原理,分析了斜拉索的抗弯刚度、索力测试仪的标定、斜拉索锚固回缩损失、温度影响等因素对斜拉索索力测试的影响,并依托北京市五环路石景山南站高架斜拉桥为工程背景,对大直径高吨位斜拉索索力进行了测试及分析,具有一定的工程指导意义。

**关键词** 斜拉索 抗弯刚度 索力 测试

中图分类号 U448.27 文献标识码 A 文章编号 1009-4539(2008)02-0023-04

## Cable Tension Measurement and Analysis of Heavy-load Larger-diameter Cables

Kong Xiangjie<sup>1</sup>, Cui Laijun<sup>1</sup>, Zhang Bin<sup>1</sup>, Chen Qiang<sup>2</sup>

(1. Beijing Capital Highway Development Group Co. Ltd., Beijing 100078, China;

2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** The principle of cable tension measuring with the frequency method is introduced in this paper, many factors, such as cable flexural rigidity, calibration of cable tension measuring instrument, tension retraction losses during cable's stretching and anchoring, temperature effect, which can affect the precision of cable measurements are expounded. The cable tension of heavy-load larger-diameter cables of Shijingshan cable-stayed bridge is measured, the test results are analyzed, and some conclusions are drawn for reference of future projects.

**Key words** cable; flexural rigidity; cable tension; measure

## 1 引言

斜拉索是斜拉桥结构重要的组成部分,对结构的受力状态及主梁的线形有着重要的影响。斜拉桥索力测试的准确与否直接关系到斜拉桥施工控制的顺利实施,是斜拉桥能否成功修建的关键问题之一。在工程实际中,常用的索力测定方法有压力表测定法,压力传感器测定法以及频率法<sup>[1]</sup>。由于前两种方法一般仅适用于在张拉斜拉索时的索力测定,当需要对已施工完毕的斜拉索进行索力复核时,频率法几乎是唯一的选择。由于频率的测试精度可以达到1/10 000,所以频率法所确定的索力精度在很大程度取决于索本身参数的可靠性,诸如索的刚度、索的计算长度、索的线密度、索的边界条件、索的物理环境等。本文依托北京市五环路石景山南站高架斜拉桥为

工程背景,对施工过程、成桥验收、运营过程中的大直径高吨位斜拉索索力进行了测试,并对影响斜拉索索力的诸多因素进行了探讨。为了了解桥梁使用状况下斜拉索的真实索力,在不中断运营荷载的状况下对斜拉索索力进行了测试与分析,以期对大直径高吨位斜拉索的索力测试以及斜拉索运营过程中的实际索力评估提供一定的借鉴意义。

北京市五环路斜拉桥为45 m+65 m+95 m+40 m四跨连续独塔单索面预应力混凝土斜拉桥,塔、梁、墩固结体系,桥面宽度29 m,按6车道设计。全桥位于平曲线半径为1 900 m、竖曲线半径为16 000 m的曲线上。本斜拉桥共设6组斜拉索,每组2根,每根斜拉索由451丝Φ7钢丝组成,单根设计初张力为10 100 kN。如此大吨位的斜拉索在国内较为少见,索力是否符合设计要求,将直接影响到主梁的线形、截面内力的分布以及塔身的弯曲和扭转。

收稿日期:2007-12-02

铁道建筑技术 RAILWAY CONSTRUCTION TECHNOLOGY 2008(2)

23

## 2 频率法测试索力的原理及拉索张拉控制 测试影响因素分析

### 2.1 频率法测试索力的原理<sup>[2]</sup>

索的微分振动方程

$$E \cdot I \cdot \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} - T \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \Delta T \cdot \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} + m \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中,  $E \cdot I$  为拉索的抗弯刚度;  $\eta(x, t)$  为拉索在  $y$  方向的振动位移;  $T$  为方向的拉索索力;  $\Delta T$  为拉索振动所产生的索力增量;  $m$  为拉索单位长度的质量。

研究表明, 当索力很小、垂度变得相对大时, 由于拉索振动而导致的索力增量  $\Delta T$  影响不能忽略。但是对于二阶阵型或更高阶阵型, 即使索力很小,  $\Delta T$  的影响也很小。因此式(1)可以近似的改写为

$$E \cdot I \cdot \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} - T \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + m \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

对于式(2)采取分离变量法, 令

$$\eta(x, t) = \phi(x) \cdot q(t) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 \phi(x)}{dx^4} - T \cdot \frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} + m \cdot \omega^2 \cdot \phi(x) = 0$$

$$\frac{d^2 q(t)}{dt^2} + \omega \cdot q(t) = 0 \quad (4)$$

式中,  $\omega$  为引入的参数, 其含义为拉索的固有振动圆频率, 式(4)的一般通解为

$$\begin{aligned} \phi(x) &= A_1 \sin h(\beta x) + A_2 \cos h(\beta x) + \\ &A_3 \sin (\alpha x) + A_4 \cos (\alpha x) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\alpha^2 = \sqrt{\xi^4 + \gamma^4} - \xi^2$ ,  $\beta^2 = \sqrt{\xi^4 + \gamma^4} + \xi^2$ ,  $\xi^2 = T/2 \cdot E \cdot I$ ,  $\gamma^4 = m\omega^2/E \cdot I$ 。

为了方便起见, 工程上往往把拉索看作两端铰接, 此时由式(5)可得索力

$$T = \frac{4ml^2f_n^2}{n^2} - \frac{n^2\pi^2EI}{l^2} \quad (6)$$

式中,  $n$  为拉索自振频率的阶数;  $f_n$  为拉索第  $n$

阶自振频率,  $l$  为拉索的计算长度。

在公式(6)的使用过程中, 常考虑到斜拉索较长、索的直径较小而忽略索的抗弯刚度的影响, 并乘以一修正系数  $k$  综合考虑各种因素的影响, 此时式(6)简化为

$$T = k \cdot \frac{4ml^2f_n^2}{n^2} \quad (7)$$

### 2.2 斜拉索张拉控制过程中的影响因素

#### 2.2.1 斜拉索的抗弯刚度影响

斜拉索的刚度由钢丝弹性模量、钢丝截面面积和钢丝截面惯性矩决定<sup>[3]</sup>, 由式(6)可以看出, 抗弯刚度的影响使得测试的索力值偏大, 产生的误差为:  $\Delta T = n^2 \pi^2 EI / l^2$ 。由于短索的刚度较大, 采用近似法计算所得的结果也大, 并且随着频率阶次的提高, 误差显著增大。

本桥斜拉索采用 451 丝  $\Phi 7$  钢丝组成, 外包聚脂增强带及热挤聚乙烯层, 直径为 0.189 m, 抗弯刚度  $EI = 1.284$  MPa。根据设计图纸资料, 斜拉索 S1、S2、S3 的等效计算长度分别取 72.814 m、55.103 m、39.194 m。经计算, 抗弯刚度引起的索力增量分别为 23.8 kN、41.7 kN、82.4 kN ( $n = 1$ ), 相对误差约为 0.24%、0.42%、0.82%。可以看出, 索的计算长度越小, 抗弯刚度引起的索力误差越大。另外由于本桥斜拉索张拉力较大, 因此索力的相对误差较小。

#### 2.2.2 索力动测仪标定

本桥斜拉索的长度在 42.9 ~ 77.65 m 之间, 按设计初拉力, 索的理论基频在 1.726 ~ 3.13 Hz 之间, 动测仪的采样频率按 10 倍最高信号频率设为 40 Hz。为保证索力测试的准确, 在外侧 6 根斜拉索分级张拉的同时, 对索力动测仪进行了标定, 并与理论计算值比较(表 1), 其基频比值在 1.000 ~ 1.015 之间, 索力比例系数在 0.994 ~ 1.018 之间, 索力比值在 1.008 ~ 1.021 之间, 表明设定的采样频率合理, 标定后的索力仪相对误差在 3% 以内, 可满足测试精度的要求。

表 1 基频实测值与理论计算值比较

索号	位置	实测基频 $A/\text{Hz}$	理论基频 $B/\text{Hz}$	实测比例系数 $C$	理论比例系数 $D$	$A/B$	$C/D$	$A^2 C / B^2 D$
S3'		3.143	3.120	1.012	1.018	1.007	0.994	1.009
S3		3.137	3.130	1.017	1.011	1.002	1.006	1.010
S2'	曲线	2.233	2.230	1.985	1.950	1.001	1.018	1.021
S2	外侧	2.260	2.227	1.918	1.938	1.015	0.990	1.019
S1'		1.743	1.726	3.289	3.328	1.010	0.988	1.008
S1		1.730	1.730	3.343	3.310	1.000	1.010	1.010

注: 理论计算中索力值为 10 100 kN

### 2.2.3 斜拉索锚固后回缩量的确定

斜拉索的锚具采用的是冷铸锚，在张拉后需拧紧承压螺母，通过锚下垫板将索力传递到主梁，受施工条件的影响，承压螺母拧紧的程度与理想状况总会存在差别，锚固作用施加过程中螺纹亦有一定的压密量，因而存在索力的回缩损失现象。为准确测定斜拉索的回缩量，在S1'、S1两根索张拉到控制荷载及回油锚固后，跟踪测试了索力变化情况，根据实测结果，在回油锚固后平均回缩损失力为150 kN，经计算斜拉索的回缩量为3.3 mm。在随后的斜拉索张拉时相应增加了张拉控制荷载。

### 2.2.4 索力测试的温度影响及索力测试时间的选择

受温度的影响，斜拉索的索力在一天中是不断变化的，尤其日照充足时索的温差变化很大，经测试一天中索力最大变化值可达800 kN，为了对施工各阶段测量的索力进行准确评估对比，本桥每次索力测量均选定在早晨5:00。

## 3 成桥及运营阶段索力测试结果及分析

斜拉索的张拉顺序为先张拉曲线外侧6根索，后张拉曲线内侧6根索，从靠近塔端开始，每侧同时对称张拉2根斜拉索。在初张拉阶段，单索实测索力在9 233 ~ 10 303 kN之间，与设计值差值在2.73% ~ -12.07%范围内，曲线外侧索力合计值比设计值小5.34%，曲线内侧索力合计值比设计值小0.61%，全桥12根索力合计值比设计值小2.98%。由于受曲线内侧斜拉索张拉后的影响，外侧索力有所下降，实测单根平均下降约300 kN。

二次调整中，依据初张拉阶段的各索间的相互影响规律调整了索力控制措施，使得成桥后内外侧索力比较均匀，单索实测索力在10 693 ~ 11 578 kN之间，与设计值差值在3.29% ~ -3.33%范围内，曲线外侧索力合计值比设计值大0.83%，曲线内侧索力合计值比设计值大0.99%，全桥12根索力合计值比设计值大0.91%，索力控制良好，符合设计要求。斜拉索施工初张阶段、成桥状态及运营4年后的实测索力值见表2。

表2 实测全桥12根斜拉索的索力

kN

索号	位置	张拉阶段索力			成桥状态索力			运营期间索力(4年后)		
		实测	设计	相差/%	实测	设计	相差/%	实测	试验*	相差1/%
S3'		9 813	9 709	1.07	11 496	11 174	2.88	14 352	11 909	20.51
S3	曲线外侧	9 541	9 662	-1.26	11 308	11 097	1.90	13 852	11 580	19.62
S2'		9 409	10 419	-9.69	11 231	11 093	1.25	13 882	11 516	20.54
S2	曲线外侧	9 233	9 931	-7.03	10 709	11 078	-3.33	12 116	10 908	11.07
S1'		9 684	11 013	-12.07	10 825	10 624	1.89	11 354	10 841	4.73
S1		9 757	9 946	-1.90	10 669	10 626	0.41	11 871	11 000	7.92
S3'	曲线内侧	9 593	9 804	-2.16	11 271	11 174	0.86	14 093	11 669	20.77
S3		9 888	9 734	1.58	11 217	11 097	1.08	13 432	11 535	16.45
S2'		10 303	10 397	-0.90	10 999	11 093	-0.84	13 540	11 213	20.75
S2	曲线内侧	10 246	9 974	2.73	10 943	11 078	-1.22	12 610	11 484	9.80
S1'		10 199	10 864	-6.12	10 973	10 624	3.29	11 770	11 100	6.04
S1		10 194	10 022	1.72	10 941	10 626	2.97	12 050	11 471	5.05

注：“\*”表示桥梁验收荷载试验主跨跨中正弯矩加载工况下的索力测试结果；相差1和相差2分别为实测与试验、实测与设计之间的相对误差

运营4年后，为了解当前斜拉索的受力状态，对斜拉索索力进行了测试。需要说明的是，运营期间的索力测试是在不中断交通的情况下进行的，反映的是实际车流荷载作用下斜拉索的真实索力。从表2中可见，实测索力普遍大于桥梁验收荷载试验主

跨跨中正弯矩加载工况下的实测索力，除了S1、S1'增幅较小外(4.73% ~ 7.92%)，其他各索索力增幅均大于10%，且短索索力增幅大于长索索力增幅。实测索力最大增幅为20.77%，因此斜拉桥的斜拉索索力恒载设计值应充分考虑运营荷载的综合作用，

进一步研究成桥状态索力的合理确定方法,保证斜拉桥体系的正常工作。另外从表2中还可以看出,通车状态下的索力与成桥状态的静态索力相对差值最大达28.44%,分析其原因,主要与汽车荷载及冲击效应、混凝土的收缩徐变影响、测试温度差别及主梁振动对索的频率影响等因素有关。根据实测结果,总体上本桥斜拉索仍处于安全的工作状态,有效地发挥着斜拉索构件对斜拉桥体系应有的作用。

#### 4 结论

(1)采用频率法测量斜拉索的索力,操作简单,节省费用,频率测量的精度完全可满足设计及施工要求,但对于大直径高吨位斜拉索,应综合考虑索的抗弯刚度、回缩损失、测试温度等因素进行相应的索力修正。

(上接第10页)

理并传至计算机进行数据分析计算。

#### 6 结语

在课题组的努力下,圆满完成了精调机的研制任务。该设备用全站仪定位,通过全站仪自动目标照准功能,以及全站仪与小车专用电脑控制的持续无线通讯功能,利用沿线布置的精测基桩(CPⅢ),配合全站仪和数据处理系统,可实时提供精确的三维轨道几何参数绝对坐标,能连续检测出精调机所在位置的轨道里程和断面几何尺寸,并将计算出的轨道中线、轨距、水平、高程以及超高偏差通过界面显示,以便高效调整该里程点的轨道断面几何尺寸,达到轨道精调所需要的精度。该设备的主要特点是:

(1)该机独创轨道“内部+外部”几何状态两位一体的全能测量系统构架,使工程单位可以在进行轨道精调作业、调整精度复核、轨道验收时一机多用,提高设备使用效益。

(2)该机将相对测量方式与绝对测量方式完美结合在一起,在保留相对测量方式具有轨道局部细节(如焊接接头平直度、轨道轧制不平顺、波纹磨耗等)信息丰富、可按正常步行速度进行不停顿的连

(2)为保证索力测试结果的准确,动测仪应结合原型索的张拉过程进行标定。

(3)在实际汽车移动荷载作用下,实测索力值会大于成桥试验相应最大索力工况时的索力值,斜拉桥的斜拉索索力设计值的确定应充分考虑运营荷载等各种因素的综合作用,保证斜拉桥体系的正常工作。

#### 参考文献

- 1 郑罡,匿一清,高赞明,等.斜拉索张力测试和参数评估的理论和应用[J].土木工程学报,2005(3)
- 2 段波,曾得荣,卢江.关于斜拉桥索力测定的分析[J].重庆交通学院院报,2005(8)
- 3 刘文峰,应怀樵,柳春图.考虑刚度及边界条件的索力精确求解[J].振动与冲击,2003(4)

续测量、技术成熟、操作方便等优点的同时,吸收了绝对测量方式具有的绝对位置与高程测量能力,使小车具备了精确定位的能力,因此小车不但可直接用于指导客运专线无碴轨道调整作业,而且克服了国外GRP及iGW系列轨检设备均缺乏相对测量能力或能力不足的缺陷,在轨道精调后,大大减少了完全依靠全站仪进行轨道复核的巨大测量工作量。

(3)该机采用开放式全站仪配套设计,配套使用的全站仪可以在满足性能和功能的条件下进行多种选择,以降低设备购置成本。

(4)该机软件系统完全按照我国无碴轨道施工工艺流程和操作习惯进行设计,数据表达方式、管理规范、报表等与我国应用中的GJY系列轨检仪保持兼容,符合国情。

(5)所测参数齐全,测量准确度高。高准确度传感器和先进处理技术大大提高了系统的准确度,操作准确度不受操作人员影响。

(6)机构可拆分组合,体积小,重量轻,上下道快捷,运载方便,储藏、携带、连接、使用方便。多重绝缘设计,对轨道电路无任何不良影响。人机界面友好,操作维护方便。

(7)数据采集、存储装置具有安全自锁和断电数据保护功能,可有效防止误操作。