

一种新型桥梁索力测试系统及方法

陈得民¹ 储伟伟² 王亚涛³

(1 北京必创科技有限公司 北京 100085 2 浙江省杭州市城市建设科学研究院 杭州 310006

3 北京东方振动和噪声技术研究所 北京 100085)

摘要:索力测试是桥梁健康监测的重要测试项目,通过相关索力测试技术的研究,本文设计开发一种基于频率法测索力的无线桥梁索力测试系统。设计开发的无线MEMS电容式加速度传感器,阐述了系统设计原理,论述了索力测试中,测点的布置及新型频计算法,并根据实际工程,对系统的使用进行了详尽的描述。通过相关索力计算法的论证,本文得出动测法索力精确计算比较准确,并通过实验进行了验证。本文为桥梁测量工程提供了一种高效、可靠和便捷的索力测试系统及方法,对工程人员具有重要的参考价值。

关键词:无线加速度传感器 索力测试 频率法

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.02.001

引言

随着材料科学及桥梁工程技术的发展,桥梁跨度不断增大,索结构在大跨度桥梁工程中得到了广泛的应用,包括:钢管混凝土拱桥中的吊杆、斜拉桥的斜拉索、悬索桥的主缆和吊索、斜拉—悬索组合体系桥梁的吊杆索等。特大跨桥梁中采用以斜缆为主的空间网状承重体系或采用悬索加斜拉的混合体系。

索作为柔性构件,有索参与的结构都存在找形和找力的问题,拉索的最终外形和内力很大程度上取决于对索的张拉过程。另一方面,在工程结构使用过程中,拉索往往由于腐蚀和振动等原因受到损害,导致拉索的索力松弛。作为张拉结构的重要构件,拉索的损害将会给结构带来灾难性的后果。受到损坏的拉索,索力将发生变化,而变化的索力会影响结构内力分布和结构线型,因此索力可以作为结构健康状态评估的重要指标。所以,在整个工程施工和使用期限内,都必须准确地了解索力的状况。

为此,本文开发了一套无线测索系统,并应用了综合频差算法对索力进行了计算,相比传统的索力测试系统及方法,本文开发的无线索力测试系统比较优越。

1 索力测试技术

1.1 索力测试技术比较

目前,索力测试大概有压力表测试法,压力

传感器测试法,频率法,振动波法,三点弯曲法,磁通量法。除此之外,测试索力的方法还有电阻应变片测试法、吊杆索伸长量测试法、索拉力垂度测试法,这三种方法仅在理论上可行,实际操作中存在困难,一般不予采用。

上述方法中,目前只有前三种在现场测试中得到广泛应用。其中压力表测试法仅适用于正在张拉的吊杆索索力测试,很难对已经张拉到位的吊杆索索力进行复测。压力表测试法测试精度较高,很适合对正在张拉的吊杆索索力测试。虽然该法也可用于对已经张拉到位的吊杆索索力测试,但考虑到经济原因,一般不予采用(若用此法测量张拉到位的吊杆索索力,须在每根吊杆索的锚固端安装一个压力传感器,费用较高)。频率法不仅具有测试仪器同趋小型化、携带方便、容易安装、可以重复使用的优点而且其测试精度高,因此频率法成为目前索力测试的最佳选择[1-4]。

1.2 频率法测试原理

拉索频率测定法是根据斜拉索自由振动时拉力与振动频率关系进行间接测量,先测定拉索的固有频率,然后根据索力与固有频率的关系换算得到张力。拉索自由振动微分方程为:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

其中： x 为沿索向的坐标； $y(x,t)$ 为斜拉索在 t 时刻垂直于索向的挠度； EI 为索的抗弯刚度； t 为时间， F 为索内拉力，假定沿索均匀分布，并不随时间而变化； m 为索单位长度的质量。

假定拉索两端为铰支边界条件，对上述微分方程采用分离变量法求解，得到拉索的轴向拉力 F 与振动基频 f_v 的关系为：

$$F = 4ml^2(f_v)^2 - \frac{n^2 EI \pi^2}{l^2} \quad (2)$$

其中： n 为索自振频率的阶数（即拉索长度内的半波个数）； f_n 为索的第 n 阶自振频率（ s^{-1} ）； l 为拉索的自由或挠曲长度。如果忽略拉索抗弯刚度的影响，假定索的两端固定，由式(1)可求出索力为：

$$F = 4ml^2(f_v)^2 \quad (3)$$

2 无线索力测试系统

2.1 系统结构

无线索力测试系统可以分为三层，第一层为振动频率信号采集层，主要有布置在桥梁索上面的加速度传感器组成，用来采集被测点的加速度值，第二层为数据传输层，主要有无线转发网关组成，将无线传感器发送的数据进行汇总并传输到计算机，第三层为数据显示层，由安装有数据采集控制的BeeData软件组成，对接受到的数据进行采集、存储与处理，并对加速度节点进行实时控制。整个网络系统结构如图1。



图1 无线索力测试系统

2.2 无线加速度传感器

桥梁拉索固有频率都比较低，在自然环境激励下，发振频率多为1到3HZ，基频大多在1HZ以下，一般公路桥和铁路桥跨度在30~60之间，其固有频率在2HZ左右或稍高。电容式加速度计与其它类型的加速度传感器相比具有灵敏度高、零频响应、环境适应性好等特点，非常适合桥梁拉索频率测试。

本传感器采用模块化设计[5~7]，图2是无线

加速度传感器的集成框图。该无线加速度传感器模块包括：MEMS电容加速度计、数据调理采集处理模块、无线通信模块及电源模块。

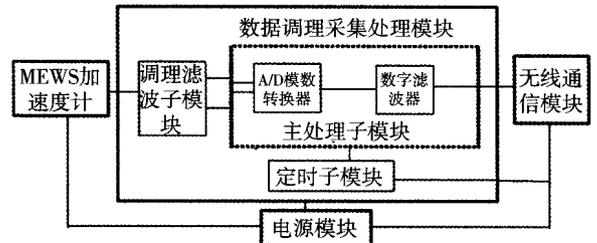


图2 无线加速度传感器的集成框图

(1) MEMS加速度计，根据数据调理采集处理模块输出的触发信号，采集监测点信息，并将采集信号输出至数据调理采集处理模块。

(2) 数据调理采集处理模块，用于按预先设定的周期进行自身的触发，并向传感器输出触发信号，触发传感器采集信号；接收传感器输出的采集信号，对采集信号进行调理滤波、过采样模数转换、数字信号处理、以及数值计算，并将数值计算得到的结果与预先设定的报警值进行比较，如果不大于设定的报警值，将数值计算得到的结果进行存储后将自身置于休眠状态；如果数值计算得到的结果大于预先设定的报警值，或所述输出给传感器的触发信号次数达到预先设定值，输出触发信号触发无线通信模块并将数值计算得到的结果输出至无线通信模块。

(3) 无线通信模块，采用IEEE802.15.4标准进行传输，根据数据调理采集处理模块输出的触发信号，接收数据调理采集处理模块输出的数值计算得到的结果，发送至外部的中心网关或路由器，接收中心网关或路由器发送的控制参数，输出至数据调理采集处理模块，对所述数据调理采集处理模块预先设定的周期和预先设定值进行更新，当完成接收和发送任务后，转入休眠状态。

(4) 电源模块，用于提供传感器、数据调理采集处理模块及无线通信模块的工作电压。

3 测试应用

本系统已经在国内许多大桥索力测试中使用，本文结合在杭州文汇大桥索力测试中的实际情况，对系统的使用及基频算法进行详尽的论证。

3.1 测点布置

桥梁索力的振动测试，就是通过环境或人工激励，直接从索的振动响应数据中分析出桥梁基

频信息。理论上将传感器放置在索中间,以便准确识别索的低阶自振频率,但实际工程中,在索的中间布置传感器比较困难。研究表明,传感器布置在拉索四分之一和八分之一处,对传感器的布置难度和采集的振动信号的效果来说较好,可行性较高。在实际工程中,传感器不能安装到索端部,端部是所有阶振型的不动点部位,同时也要避开心振型的其他不动点。因此在实际工程中尽量把传感器布置在索的四分之一和八分之一处,并且容易操作。

3.2 基频计算

目前,在现场快速的索力测试中,最常用的处理方法为频差法、平均频差法、新基频法等,文献[8]中提出一种综合频差法,并且对该算法进行了工程实际验证,论证出该算法获得基频比其它算法更准确,推算的索力误差较小。本文结合实测数据,对该算法进行分析,过程如下:

第一步:在桥索上放置加速度传感器测得的某测点加速度信号,使用东方振动和噪声技术研究所DASP软件对该信号进行自谱分析,如图3。

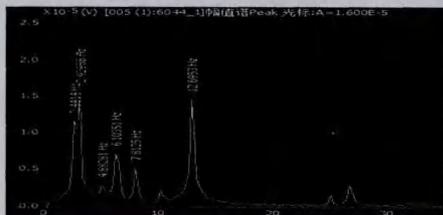


图3 自谱FFT分析

第二步:确定被测索加速度的自功率谱上的各谐峰峰值,从中找出最高峰、次高峰与第三高峰对应的三个频率值,分别为 $f_a=2.92969$, $f_b=6.10352$, $f_c=12.6953$ 。

第三步:按照频率值从小到大的顺序排列,计算相邻频率之间的差值 $\Delta f_1=3.17383$, $\Delta f_2=6.59178$;

第四步:判断三个峰值是否为连续三阶或有跳阶情况,从而确定基频初值 f 。

计算两个频率差的比值并取整,结果为 N , $N = \text{int}[\max(\Delta f_2, \Delta f_1) / \min(\Delta f_2, \Delta f_1) + 0.05]$, 如果 $N=1$,则三个峰值为连续三阶频率, $f = (\Delta f_2, \Delta f_1) / 2$; 如果 $N > 1$,则表示有跳阶情况, $f = [\max(\Delta f_2, \Delta f_1) / N + \min(\Delta f_2, \Delta f_1)] / 2$ 。通过计算本组数据, $N=2$ 初始基频为 $f=3.23486$ 。

第五步:分别计算 f_a, f_b, f_k 与 f 的比值并

取整,结果为 a, b, c 。

$$a = \text{int}(f_a / f + 0.05) = 1, \quad b = \text{int}(f_b / f + 0.05) = 2, \\ c = \text{int}(f_k / f + 0.05) = 4。$$

第六步:计算平均基频 $f_v, f_v = (f_a/a + f_b/b + f_c/c) / 3 = 3.153482 \text{HZ}$ 。

结果显示,通过综合频差法算得的基频不符合理论值,基频应在1HZ以下,分析原因发现,该基频的计算方法有问题,哪一个峰值高、或者低,和测量位置、敲击位置都有关系,都不是随机的。 f_a, f_b, f_c 可能也是随机的。如果收取的前三个最高峰值,不存在基频,如是3、6、8倍频,则无疑基频肯定会计算错误。

为此,东方噪声技术研究所开发了一套基于动测法的高精度索力计算软件,很好的解决了目前常见的基于频率计算索力方法的不足。软件自动收多阶频率,然后点击索力解析计算模块即可,如图4。

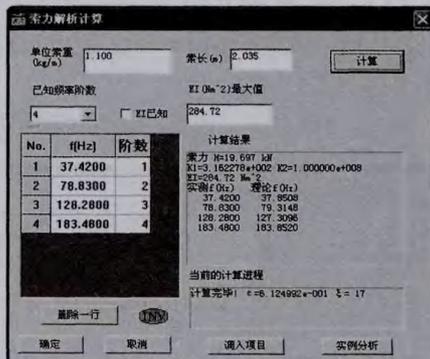


图4 高精度索力计算界面

动测法索力精确计算的原理如下:

(1) 已知索重索长,如EI已知,根据多个共振频率识别出两端边界条件,得到精确的索力。

(2) 已知索重索长,如EI未知,根据多个共振频率识别出两端边界条件和EI,得到精确的索力。

(3) 如索由多个细绳拧成,无法得到精确的EI。将多个细绳看成一体,可得到EI的最大值,将多个细绳看成完全分开,可得到EI的最小值。

使用动测法索力精确计算工具,对实际钢索进行测试,测试环境如下:

规格 $F \phi 15.24$ 的镀锌钢绞线,钢绞线由7根 $\phi 5$ 高强钢丝拧成,材料特性为:弹性模量, $E=190 \text{kN/mm}^2$; 单位长度质量 1.1kg/m ; 索两端夹具间距离为 2765mm ; 破断荷载大于 230kN ;

两端用钢绞线的配套夹具固定, EI 小于 320.15 大于 $40.85N/m$ 。

计算结果如下表1:

表1 索的自振频率测试结果和实测索力识别结果

	$H(kN)$	误差	f_1	f_2	f_3	f_4	$EI(Nm^2)$	ζ
实测	124.4	-0.05%	62.03	124.80	190.66	254.88		
识别	124.34		62.47	125.48	189.57	255.25	282.48	58

4 总结

索是桥梁最重要的构件, 在桥梁修建或使用中, 索承受着相当的力, 索力的监测是桥梁健康监测是必不可少的测量项。目前有很多索力测试系统及方法, 相比较, 本文开发的索力测试系统及方法比较优越。通过本文的论述, 主要解决了以下几个问题:

(1) 无线技术的使用, 方便了系统的使用, 省去了传统有线测频系统布线的麻烦, 同时, 减小了环境对系统的影响;

(2) 高精度便携式无线智能电容式传感器的开发及使用, 满足了桥梁低频信号测试及高频率分辨率的要求;

(3) 综合频差法比传统的基频算法更加优

越, 但该算法仍然存在问题, 所选择的最高峰、次高峰与第三高峰和测量位置、敲击位置有关, 对此, 东方噪声研究所开发了一套高精度索力计算软件, 利用动测得到的索的多阶谐振频率, 可自动识别索的抗弯刚度和索两端的边界条件, 得到精确的索力。高精度索力计算法提高了索力计算结果的准确性, 减低了数据处理时, 人为经验的影响。

(4) 测点布置的分析, 为工程人员布置传感器提供了重要的经验。

参考文献

- [1] 周先雁, 王智丰, 冯新. 基于频率法的斜拉索索力测试研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2009年4第29卷第2期102-106.
- [2] 陈鲁, 张其林, 吴明儿. 索结构中拉索张力测量的原理与方法[J]. 工业建筑, 2006. 36: 368-371.
- [3] 吴康雄, 刘克明, 杨金喜. 基于频率法的索力测量系统[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 62-66.
- [4] Verwiebe C, Ruscheweyh H. Research results concerning the exciting mechanism of rain-wind-induced vibration[J]. EACWE Genova, 1997, 2: 1783-1787.
- [5] 程佩青. 数字信号处理教程第二版[M]. 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [6] 刘晓明, 王录涛. MEMS加速度传感器的引信数据采集系统设计[J]. 电子科技大学学报 2008 第37卷第2期309-312.
- [7] 温淑慧. 一种电容式加速度传感器设计的研究[J]. 传感技术学报, 2005 第18卷第2期329-332.
- [8] 赵作周, 孙江波. 一种振动方法测试斜拉桥索力时确定拉索基本频率的方法[P]. CN 102519651 A.

信息视窗

《预应力技术》约稿函

《预应力技术》前身为《OVM通讯》和《海威姆预应力技术》。《OVM通讯》创刊于1997年, 《海威姆预应力技术》创刊于2000年。2004年, 两刊合并为《预应力技术》。由中国科学技术发展基金会欧维姆预应力技术发展基金和柳州欧维姆机械股份有限公司联合主办, 双月发行, 截止至2014年12月已发行107期。刊名由我国著名桥梁专家、两院资深院士李国豪题写。目前, 《预应力技术》在业内已具有较大的影响, 被CNKI中国期刊全文数据库、SWIC中文科技期刊数据库和Airiti Library (台湾华艺线上图书馆) 等数据库全文收录。

一、办刊宗旨: 为预应力技术行业提供一个学术讨论的园地, 以便利于交流预应力技术经验, 活跃预应力学术气氛, 推广预应力技术的应用, 促进预应力技术的发展。

二、栏目设置: 《预应力技术》开辟预应力技术工程设计与施工、预应力产品开发与应用、预应力技术研讨与交流, 新技术、新材料、新结构、新产品的介绍与信息等栏目, 刊登国内外有关预应力方面的技术文章与报道。它的发送对象为我国高等院校、科研部门、设计施工单位及有关专家、学者、工程技术人员。

三、征稿对象: 凡工作或研究方向涉及预应力技术, 包括桥梁、建筑、水利水电、岩土锚固等领域的

广大专家、学者及工程技术人员。

四、来稿须知:

1、为了提高办刊质量, 本刊长期向国内外的专家、学者、工程技术人员等征集稿件。来稿一经发表, 编辑部按规定支付稿酬, 并赠送样刊, 欢迎您投稿并来函来电。

2、来稿不涉及保密、署名无争议等, 文责自负。本刊有权对文稿进行删改, 如不同意删改, 请投稿时注明, 本刊因工作量大, 请作者自留底稿, 恕不退稿。

3、来稿请附作者简介, 内容包括出生年月、性别、职称、职务、学历、主要荣誉及联系方式(通讯地址/邮编/电话/电子邮箱)。投稿2个月如未接到采用通知, 可另行处理。

《预应力技术》编辑部

稿件寄送及联系地址: 广西柳州市阳和工业园阳惠路1号《预应力技术》编辑部

邮编: 545006

电话: 0772-3116594

传真: 0772-3116594

电子信箱: yyljs@ovm.cn

联系人: 王英 陆劭红