

建筑索结构索力测量新方法与应用

张慎伟¹, 陈鲁², 张其林²

(1. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:索作为建筑索结构中的重要构件, 索的预张力大小是索结构设计中的重要参数, 也是索结构施工过程中进行控制的重要环节。开发新型的索力传感器是索结构施工监测和控制中面临的新课题。基于铁磁材料的磁弹性能阐述磁弹法测量索力的基本原理, 开发了一种新型的磁通量传感器, 并将其应用在双曲面索网模型张拉试验中进行索力监测控制。试验结果表明, 该方法可以非常方便快捷、准确地测定索在张拉过程中的索力, 可为工程参考使用。

关键词:磁弹法; 索力; 双曲面索网; 模型试验

中图分类号: TU394; TU317+1 文献标志码: A 文章编号: 1006-7329(2008)06-0072-04

A New Method to Measure Cable Force and Its Application in Cable Structures

ZHANG Shen-wei¹, CHEN Lu², ZHANG Qi-lin²

(1. College of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China; 2. Department of Building Structures, Tongji University, Shanghai, 200092, P. R. China)

Abstract: In cable structures cables are very important components. The magnitude of cable pretensioning is a vital parameter in the design of cable structures and a crucial component in controlling the construction of such structures. Developing a new sensor type is an innovative theme in the monitoring and control of cable structures construction. Based on the elastic magnetic characteristics of ferromagnetic material, we introduce a theory of an elastic magnetic method to measure cable force and developed a new flux sensor. Applying this method in the model test of an hyperbolic cable net demonstrates that it can acquire the accurate cable force value conveniently. This study can provide scientific references for structural engineering.

Key words: Elastic Magnetic (EM) method; cable force; hyperbolic cable net; model test

随着索结构在建筑结构中的广泛应用, 索结构的设计计算理论也得到了很大的完善和发展。索作为结构中的重要构件, 索力是索结构的一个重要参数, 施工过程中索力控制是关系到施工过程中结构内力和结构状态等的重要环节。同时使用过程中结构材质的恶化、缺陷或意外事故引起的结构损伤等因素都会引起索力的损失和变化。如何确定施工过程中和使用过程中结构索力的大小已成为工程设计人员面前的一个重大问题, 也是当前结构无损检测中的一个重要课题。

目前, 在施工过程中普遍采用的方法有压力表测定千斤顶液压法、压力传感器直接测定法、拉索频率测定法、振动法、三点弯曲法等方法^[1-5]。传统的测量方法已经比较成熟且应用广泛, 但由于其使用条件和环境的影响, 测量精度可靠性很难得到保证。如何选择

正确的测量方法, 甚至如何开发研究更新更适合更便捷的索力测量方法已经成为制约拉索结构发展的瓶颈问题。磁弹(Elastic Magnetic, 简称EM)法是近年来在发达国家兴起的一项新的索力无损检测技术, 简要介绍了其基本原理, 并采用该方法对索网模型试验进行张拉监测, 试验结果表明, 该方法可以非常方便、快捷、准确地测定索在张拉过程中的索力, 可为工程参考使用。

1 EM法测量索力的基本原理

1.1 铁磁性物质的磁化性质

已磁化物质的磁性来源于物质内部有规则排列的分子电流, 用 $\sum m_{\text{分子}}$ 表示体积元 ΔV 中所有分子磁矩

* 收稿日期: 2008-04-20

基金项目: 上海市科委科研项目(05DZ05812)

作者简介: 张慎伟(1979-), 男, 博士, 主要从事钢结构检测与监测等方面的研究。(E-mail): sduzsw@sdu.edu.cn

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

的矢量和,则磁化强度 M 可表示为^[1]:

$$M = \frac{\sum m_{\text{分子}}}{\Delta V} \quad (1)$$

1.2 外加作用力时的磁弹性能

基于材料本身,磁化性质会由于外加应力而产生改变,其变化的程度取决于材料本身的特性。如果是铁磁性材料发生形变,该物质将发生磁化现象。外加作用力时,磁弹性能 E_σ 和同其他方向有关的能量之和的极小值条件出现的方向就是磁化强度所处的方向。张力与磁化强度方向之间的夹角设为 θ ,可以得到磁应变能^[1-2]:

$$E_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \theta \quad (2)$$

式中: E_σ 为磁弹性能, λ_s 为磁致伸缩系数,是材料从非磁化状态磁化到磁饱和状态时的总磁弹应变, σ 为外加应力, θ 为外加应力方向与磁化方向的夹角。

材料的磁化过程一般通过磁场强度 H 和磁感应强度 B 间的关系来描述:

$$B = \mu H \quad (3)$$

式中 μ 为介质的磁导率,它依赖于 H 。可以根据电磁感应原理来分析材料的磁化性能。

1.3 基本原理

基于磁弹效应,利用钢索是导磁材料,将索置于一定强度的磁场环境中,索将被磁化,磁化后的磁导率随钢索的受力状态变化而变化,根据 Joule 效应^[6],可推出在某一温度条件下,钢索应力 σ 力与其磁导率变化 $\Delta\mu$ 的关系为^[7-9]:

$$\sigma = E \frac{3\lambda_s M}{2K_\mu} \Delta\mu H \sin^2 \theta \cos \theta \quad (4)$$

则索的拉力可表示为

$$N = EA \frac{3\lambda_s M}{2K_\mu} \Delta\mu H \sin^2 \theta \cos \theta \quad (5)$$

或

$$N = EA \frac{3\lambda_s M}{2K_\mu} \Delta B \sin^2 \theta \cos \theta \quad (6)$$

其中: ΔB 为磁场强度变化,且

$$\Delta B = \Delta\mu H \quad (7)$$

式中: E 为材料的弹性模量; A 为索的有效截面积; K_μ 为单轴磁各向异性常数; θ 为磁场与易磁化轴间的角度; H 为磁化磁场强度。所以,铁磁性材料的磁化性质可以仅通过材料的磁导率 μ 就充分反映出来,因此,若能得到材料磁导率 μ ,就可得到材料的应力状态 σ 。应用法拉第电磁感应定律即可得到材料的磁导率,如图 1 所示。

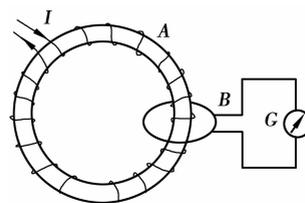


图 1 电磁感应现象示意图

在线圈 A 中通电流 I ,另一接有检流计 G 的闭合回路线圈 B 从螺环孔中穿过,通电瞬时,会在回路 B 中产生感应电流。在无铁芯情况下,由于电流相同,磁场强度也是相同的,则感应电流很小。在电磁感应系统中加入铁芯后,磁导率出现阶跃,该强度是没有铁芯时磁导率的 μ_0 倍,如图 2 所示,有铁芯时的磁感应强度为^[1]:

$$B = \mu_0 \mu H \quad (8)$$

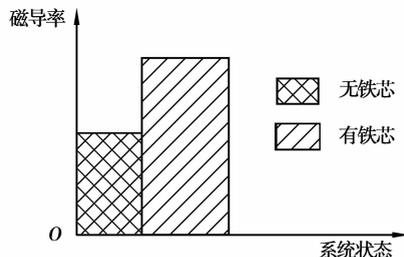


图 2 有无铁芯的磁导率对比

由此,可以利用这一现象测量铁芯的磁导率 μ 。另外,如果铁芯受外力作用而产生不同的应力状态,该铁磁性材料的磁弹性能将会产生变化。因此,铁芯材料在受外力作用时的磁导率 μ 也会产生变化,通过这样一个电磁感应系统,同样可以测量铁芯材料在受外力作用时已经发生变化的材料磁导率 μ 。基于上述理论开发了一种测量索力的磁通量传感器 EM^[1],试验表明该传感器的测量精度在 10% 以内,而且在标定过程中考虑温度的影响对标定参数进行修正可以避免在现场测量中环境温度对测量结果的影响,实践证明该传感器操作方便、精度可靠、适用性强,完全可以满足工程使用的要求。

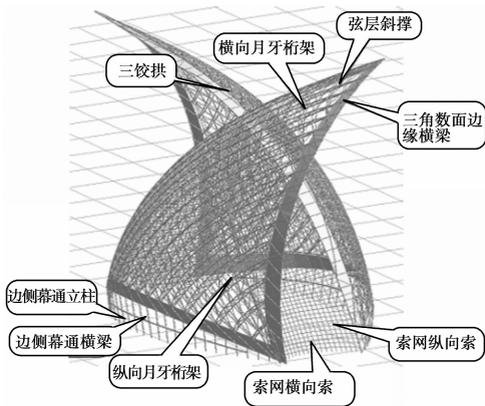
2 工程应用

2.1 工程概况

中国航海博物馆位于临港新城申港大道环湖西二路口南侧,该建筑的中央帆体的建筑外形犹如两片风帆,新颖而富有视觉冲击。风帆的基本体系由风帆屋面、单层索网玻璃幕墙以及边侧玻璃幕墙等 3 部分构成,如图 3 所示。



图 3 建筑效果图



2.2 试验概况

索网中拉索张拉完成后的内力是决定索网结构是否达到设计要求以及是否能够安全工作的重要指标之一,而索网张拉完成以后的形态也是能否满足建筑效果的重要评价指标。基于本工程中双曲面索网幕墙设计和施工的复杂性,为了验证索网施工张拉方案的可行性,比较张拉方案的优劣性,选择合理的施工方案,同时发现施工张拉中可能出现的问题并提出解决方案,有必要对索网结构进行张拉模型试验以确定索网的力与形能否满足设计要求。

本试验模型源于中国航海博物馆中央帆体结构索网幕墙,根据“几何相似”的原则对原型结构进行缩尺。由原型结构尺寸,考虑到试验现场条件、试验操作的可行性,对原型结构进行 1:4 缩尺,实际模型与缩尺模型中索的规格及设计内力如表 1 所示。模型试验如图 4 所示^[10]。

表 1 模型中索的参数

模型	索	直径 /mm	有效面积 /mm ²	索力 /kN
实际模型	横索	24	339	80
	竖索	32	603	160
缩尺模型	横索	6.6	26.6	5
	竖索	8.4	43.1	10



图 4 试验场景

2.3 测试方法

本试验中索力采用自行开发的 EM 索力传感器进行测量,索力测点布置如图 5 所示,其中竖索测点从左到右依次为 VS1~VS17,横索右边测点从下到上依次为 HS1~HS54,共布置 80 个索力测点。为了验证 EM 索力传感器测量结果的准确性和可靠性,本文试验中还采用压力传感器进行了对比性标定试验,两者的对比试验结果如图 6 所示,从图 6 中可以看出两种方法得到的索力结果基本一致,两者相差较小,可以满足工程精度要求。充分验证了 EM 传感器测量结果的准确性和有效性。

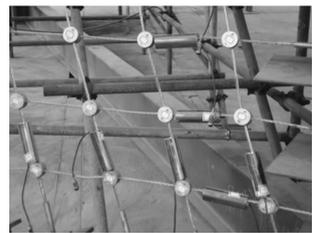


图 5 测点布置图

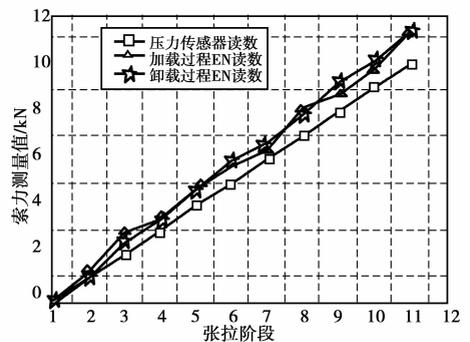


图 6 EM 传感器标定结果

2.4 测试结果

本文采用横索定长张拉竖索的方案^[10],在竖索从 5 kN 张拉到 8 kN 的过程中,采用分批张拉的方式来考察相邻竖索之间索力的影响,整个张拉过程共分 3 个阶段,第 1 阶段张拉左边 VS1~VS5 和右边 VS13~VS17 到 8 kN,第 2 阶段张拉中间 VS6~VS12 到 8 kN,第 3 阶段对所有竖索微调至 8 kN,上述 3 个不同张拉阶段竖索索力实测结果与数值计算结果如图 7 所示,竖索张拉到设计值时,横索索力测量结果与数值计算结果如图 8 所示。

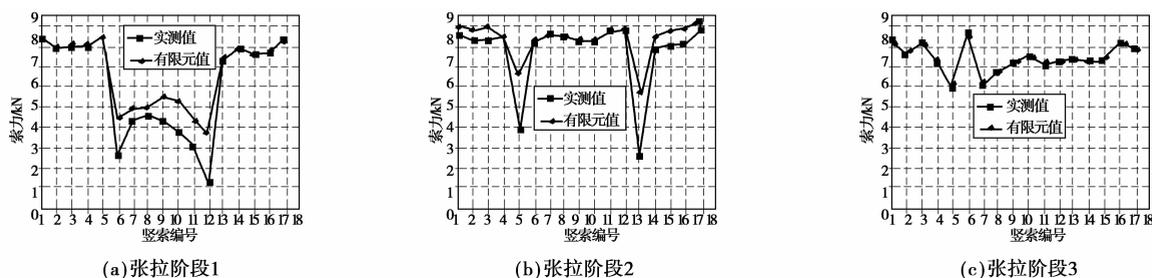


图 7 竖索索力测量结果与数值计算结果比较

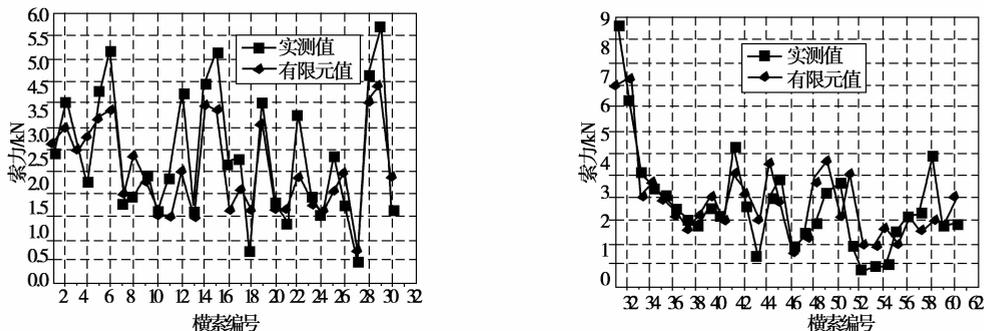


图 8 竖索索力张拉完毕横索测量结果与数值计算结果比较

从图 7 和图 8 中可以看出实测结果和数值计算结果基本一致,这也说明了 EM 传感器完全可以准确地监测到不同张拉阶段索力的大小。

3 结 语

该文基于铁磁材料的磁弹性能阐述磁弹法测量索力的基本原理,开发了一种新型的磁通量传感器,并将其应用在双曲面索网模型张拉试验中进行索力监测控制。试验结果表明,该方法可以非常方便快捷、准确地测定索在张拉过程中的索力,满足施工过程监测和使用过程监测的要求,可为工程参考使用。

参考文献:

[1] 陈鲁. 空间结构中拉力测试的弹性工程磁学法理论与实践研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.

[2] 龙跃, 邓年春, 朱万旭, 等. 磁通量传感器及其在桥梁监测中的应用[J]. 预应力技术, 2007, (2): 3-6.
LONG Yue, DENG Nian-chun, ZHU Wan-xu, et al. Application of elastomagnetic sensors in the monitoring for bridges[J]. Pretension Technology, 2007, (2): 3-6.

[3] 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 (1): 660-676.

[4] J C RUSSELL, T J LARDNER. Experimental determination of frequencies and tension for elastic cables, Journal of Engineering Mechanics[J]. ASCE 1998, 124

(10): 1 067-1 072.

[5] H ZUI, T SHINKE, Y H NAMITA. Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method, Journal of Structural Engineering[J]. ASCE, 1996, 122 (6): 651-656.

[6] 田民波. 磁性材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

[7] 唐德东, 黄尚廉, 陈伟民, 等. 基于磁弹效应的钢缆索力测量中励磁磁路研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1 695-1 699.
TANG De-dong, HUANG Shang-lian, CHEN Wei-min, et al. Study on the magnetic excitation circuit for measuring the cable tension based on magneto-elastic effect in steel cable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1695-1699.

[8] 唐德东, 黄尚廉, 陈伟民. 基于磁弹效应的斜拉桥索力传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(10): 28-30.
TANG De-dong, HUANG Shang-lian, CHEN Wei-min. Research of cable tension sensor based on magneto-elastic effect in cable-stayed bridge [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(10): 28-30.

[9] 唐德东. 新型在线索力传感器研制[J]. 仪表技术与传感器, 2006, (8): 1-3.
TANG De-dong. Development of new in situ cable tension sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2006, (8): 1-3.

[10] 张慎伟. 大型钢结构施工过程计算理论与监测技术[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.

(编辑 胡 玲)