

# 磁通量传感器及其在桥梁工程中的应用

邓年春<sup>1,2</sup> 龙跃<sup>1</sup> 孙利民<sup>2</sup> 夏丹丹<sup>1</sup>

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005 2 同济大学桥梁工程系 上海 200092)

**摘要:** 缆索和预应力筋是桥梁结构中的重要组件, 及时监控监测它们在施工和运营期间的受力状态极其重要。基于磁弹效应测量原理的磁通量传感器, 可有效地测量缆索和预应力筋的应力, 是一种新的无损检测技术。文中对磁通量传感器的原理和性能进行了详细的研究, 包括测量公式、温度影响、缆索构件自身影响和密封防水性能等。磁通量传感器使用时, 不需要了解构件的加载历史和使用情况, 通过感应构件的磁特性变化测量应力, 可用于新制的桥梁缆索、既有桥梁缆索和预应力筋, 对既有桥梁缆索需要现场绕制传感器。文中对磁通量传感器应用于实际工程如湛江海湾桥斜拉索监测、南宁葫芦顶桥体内预应力监测和宜宾长江大桥斜拉索施工和运营监控监测等进行了介绍。

**关键词:** 缆索 预应力筋 磁通量传感器 监测

## 1 引言

近年来, 国内外多座桥梁的突然破坏与倒塌, 已使工程界对结构安全倍加关注, 特别是大跨桥梁。作为大跨桥梁生命线的斜拉桥的斜拉索、系杆拱桥的吊杆和系杆、悬索桥的缆索体系、预应力梁的体内预应力筋和体外索等, 其施工阶段和运营阶段的索力监控和使用状态监测是极其重要的。基于钢缆索的磁弹效应的应力测量法, 是一种新的无损检测技术。它是利用套在索上的磁通量传感器, 来实现索力测量和状态监测, 即置于一定磁场环境中的钢缆索将被磁化, 当钢缆索的受力发生变化时, 其内的磁化强度发生变化, 通过测量磁导率变化, 测定钢缆索的索力和状态变化。文中对磁通量传感器的原理、性能及其在工程中的应用进行了详细地描述。

## 2 磁通量传感器测量原理

当铁磁材料受到机械力的作用时, 在它的内部产生应变, 从而产生应力 $\sigma$ , 使得磁导率发生变化。铁磁材料磁导率变化 $\Delta\mu$ 与应力关系 $\sigma$ 的数学模型为<sup>[1]</sup>

$$\Delta\mu = -2\lambda_m \left( \frac{\mu_1}{B_m} \right)^2 \sigma \quad (1)$$

其中 $\lambda_m$ 为磁化饱和状态铁磁材料磁致伸系数,  $\mu_1$ 为没有外力作用下铁磁材料的磁导率,  $B_m$ 为磁化饱和状态的磁感应强度。由上式可知, 当铁磁材料的 $\lambda_m$ 和 $B_m$ 对应力不太敏感时,  $\Delta\mu$ 与应

力 $\sigma$ 有很好的线性关系。上述说明了磁弹效应应力检测法的可行性。

磁通量传感器的结构简图如图1所示, 它由初级和次级两层线圈组成。如果在初级线圈的两端加一个交流激励信号, 就会产生一个随时间而变化的交变磁场, 并且根据法拉第电磁感应定律, 在次级线圈中就会产生一个感生电动势<sup>[2,3]</sup>

$$V_{ind(t)} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

通过线圈的磁通量是沿着被测试件的方向。测试过程中, 被测试件可能并未完全充满线圈, 因此总的磁通量是由通过空气的磁通量和通过试件的磁通量两部分组成。感应电压为:

$$V_{ind(t)} = -N \frac{d}{dt} \left[ \mu_0 \int_{S_{\mu_0}} H(\rho, \varphi, t) ds + \int_{S_{\mu}} B(\rho, \varphi, t) ds \right] \quad (3)$$

其中,  $S_{\mu_0}$ 和 $S_{\mu}$ 分别为线圈中被空气和试件所占部分的截面积。 $\mu_0$ 是空气的磁导率。如果将感应电压对时间进行积分, 所得到的对时间进行平均的输出电压是

$$V_{out} = -\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} V(t)_{ind} dt = \frac{N}{T} \left[ \mu_0 \int_{S_{\mu_0}} \Delta H(\rho, \varphi, t) ds + \int_{S_{\mu}} \Delta B(\rho, \varphi, t) ds \right] \quad (4)$$

其中,  $\Delta H$ 和 $\Delta B$ 分别是磁场强度和磁通量密度在时间间隔 $(t_2 - t_1)$ 中所发生的变化, 与此

同时电流从0增大到 $I_a$ ，与 $I_a$ 相应的磁场强度是 $H_a$ ，要测的磁导率就是磁场强度为 $H_a$ 时的磁导率。如果线圈的匝数较多并且排列紧密，则其内的磁场几乎是均匀的，有铁心存在时也是如此。

因此方程(3)可以简化为：

$$V_{out} = \frac{N}{T} \left[ \mu_0 (S_0 - S_f) \Delta H + S_f \Delta B \right] \quad (5)$$

其中， $S_0$ 是线圈的总的截面面积， $S_f$ 是试件的截面面积， $T$ 是RC电路的时间常数。在线圈中未放试件的情况下，随时间变化的输出电压的积分为：

$$V_0 = \frac{N}{T} \mu_0 S_0 \Delta H \quad (6)$$

由方程(5)和方程(6)可得

$$\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \mu_0 \left[ 1 + \frac{S_0}{S_f} \left( \frac{V_{out}}{V_0} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

则相对磁导率

$$\mu_r = 1 + \frac{S_0}{S_f} \left( \frac{V_{out}}{V_0} - 1 \right) \quad (8)$$

对铁磁材料缆索结构，在试验室进行几组应力、温度下的试验，建立相对磁导率变化与结构应力、温度的关系后，即可用来测定用缆索构件的内力。

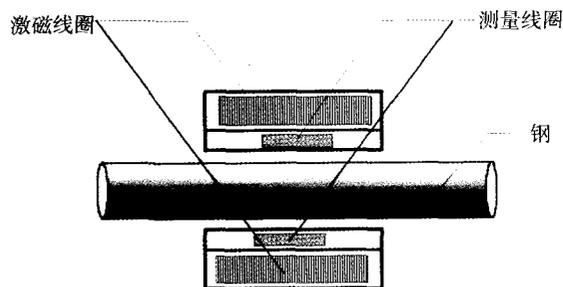


图1 磁通量传感器结构简图

### 3 磁通量传感器特点与性能

磁通量传感器与常规传感器的主要不同点在于构件是传感器的一部分，它直接感应构件的磁特性变化来测量应力。铁磁性材料的磁特性受化学成分、组织结构、杂质、缺陷、材料的非均匀性、温度等影响，因此应用磁通量传感器应考虑消除这些因素的影响。

#### 3.1 测量位置影响

理论上缆索构件在自由段是均匀的，但是由于构件中化学成分、组织结构及构件截面大小和钢丝扭绞的影响，自由构件不同位置的测量积分值是不同的，即测量曲线一样，测量零点不均一。对张拉已部分完成或已存在的服役构件，测量零点难以获得，取某点的测量作为参考点来测量会带来较大的误差，可以统计零点作为测量计算零点，降低测量误差。

#### 3.2 温度影响

钢材的磁导率随温度变化而变化，从而影响测量结果，测量时需要消除温度影响。常温下（-30℃~60℃），构件磁导率与应力关系曲线本身的斜率却并不变化<sup>[2,3]</sup>。这样在零应力下做好温度标定，然后通过温度补偿推广到其它温度下使用。为了得出温度修正系数，将3个CCT20J磁通量传感器内套无应力钢绞线，放入101A-1型恒温箱内进行升降温试验。零应力下，温度与磁导率的变化曲线，见图2，由图2可知，曲线斜率为0.012。此时温度修正系数为0.012。将不同尺寸的构件和相应型号的传感器，采用同样的方法进行试验，得到类似的结论。

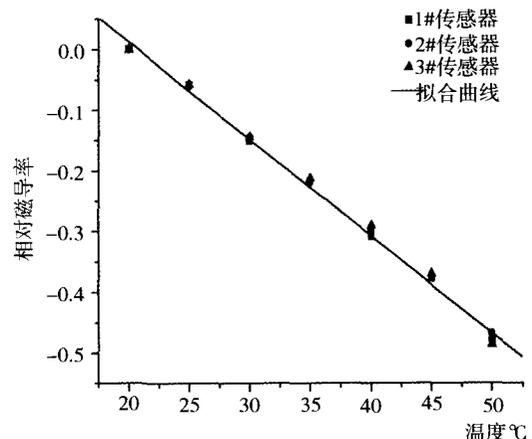


图2 温度与磁导率关系曲线

#### 3.3 传感器密封性及水中测量

为了检验磁通量传感器的防水性能，并测试磁通量传感器在空气中与浸没在水中使用时其环境介质对测量结果的影响。选取3个CCT20磁通量传感器，考虑空载和零点两种情况，在空气中和水中进行对比测量。测量结果表明，磁通量传感器的防水密封性能比较好，水对测量结果无影响，与空气中的测量结果基本一样。

## 4 磁通量传感器的工程应用

### 4.1 湛江海湾桥斜拉索监测

湛江海湾大桥是一座双塔双索面混合梁斜拉桥,主跨为480m,总长为3981m。为了测量索的实时内力变化,在设计受力最关键的拉索中,安装了16个磁通量传感器<sup>[4]</sup>,并组集在线监测系统。从桥梁拉索最不利位置和美观考虑,将磁通量传感器安装在拉索的下预埋管内。经过一年多的在线运行,磁通量拉索监测系统,能较好地测量出拉索索力和使用状态。

### 4.2 南宁葫芦顶桥体内预应力监测

葫芦顶大桥是南宁市快速环道的组成部分,西接白沙大道,东接竹溪大道延长线,主线设计长1930m,其主桥采用三跨式连续刚构桥型,跨度均为采用230m。为了监测桥梁安全,对关键处的预应力筋采用磁通量传感器进行长期应力监测。全桥安装了48个CCT135传感器监测27 $\phi$ 15.24钢绞线的纵向预应力筋,安装了24个CCT54G传感器监测直径32mm的竖向精轧螺纹钢预应力筋。磁通量传感器直接套装在波纹管的外面,见图3。在预应力筋张拉施工过程中,利用安装的磁通量传感器,进行测量,磁通量传感器与油压表的测量偏差在4%范围内。这是国内首次采用磁通量传感器对预应力筋进行有效监测。

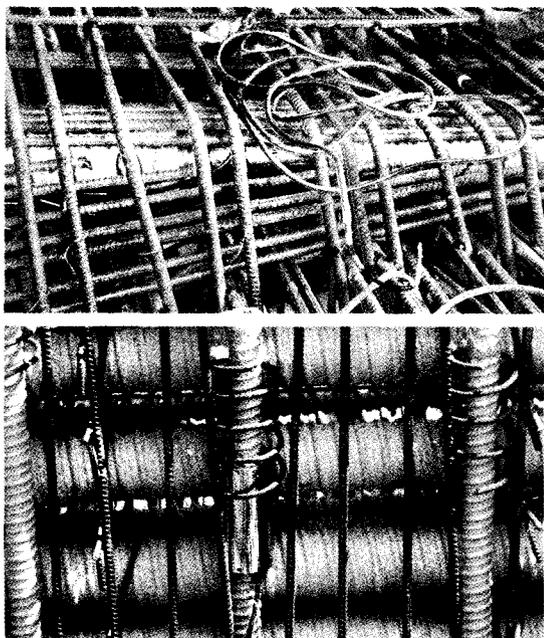


图3 磁通量传感器的安装

### 4.3 宜宾长江大桥斜拉索施工和运营监控监测

宜宾长江大桥全长850m,主桥采用(184+460+184m)双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,桥面净宽22.5m,主梁为半漂浮体系结构。斜拉索采用OVM250型钢绞线拉索体系,其索体为 $\phi$ 15.24环氧喷涂防腐钢绞线,标准强度为1860MPa,全桥共设152对斜拉索,按扇形布置。该桥于2007年12月竣工。桥梁施工过程中安装了钢绞线单孔传感器进行钢绞线受力均匀性监测,桥梁运营过程中安装整束传感器,建成在线监测系统。

#### 4.3.1 钢绞线受力均匀性施工监测

该桥的斜拉索施工采用等张法张拉<sup>[5]</sup>。为了监测施工过程中钢绞线受力的均匀性,随机选取4根拉索,每根索随机选取3根钢绞线安装CCT18A型磁通量传感器进行测量。磁通量传感器安装在拉索锚杯内,靠近锚板位置。2006年12月16日,南岸中跨下游及岸跨上游共安装6个传感器。2006年12月19日,北岸中跨下游及岸跨上游共安装6个传感器。拉索单根挂索张拉完成和整体张拉完成后,对传感器进行了测量,测量结果与油压表张拉值吻合,偏差在3%以内。受力均匀性分析,取3倍均方差为最大偏差极限,则4根索中钢绞线的最大不均匀性偏差极限分别为1.17kN, 1.05kN, 1.05kN, 3.51kN,它们分别为为钢绞线极限强度的0.5%, 0.4%, 0.4%, 1.4%。由上述可知,该桥采用等张法张拉钢绞线受力的最大不均匀性在钢绞线强度极限的2%以内,可以认为拉索的各根钢绞线受力均匀。

#### 4.3.2 运营期拉索健康监测

为了监测桥梁运营过程中,拉索的使用状态,为桥梁养护决策提供依据,安装整束磁通量传感器进行长期监测。由于斜拉索施工已基本完成,只能采用现场绕制法制作磁通量传感器。由于此桥斜拉索的根数比较多,在关键位置80根索上布设传感器。为了确保传感器的质量稳定性,采用机械绕线装置,制作主线圈和次线圈,见图4。为了研究传感器的测量精度和

一致性,在现场采用与其它传感器相同的制作工艺,制作磁通量传感器,运回柳州欧维姆技术中心实验室,采用与施工现场一样材质和数量的钢绞线试样,根据国家有关计量标准进行标定和试验。根据多组试验结果表明,由于零点位置和传感器自身的影响,现场绕制传感器的综合偏差为3%,且传感器的一致性还是比较好,测量曲线能完全重叠。

斜拉索运营期在线监测系统如图5所示。每8个传感器接线引入开关箱,多个开关箱串接入磁弹仪,磁弹仪将采集的数据通过GPRS无线传输至Internet网。设置有固定IP的监控中心将采集的数据进行存储和显示。监控中心接收到实时数据后根据三级预警阈值进行分级报警监测。预警阈值包括正常工作范围临界值、轻度危险临界值、中度危险临界值。



图4 宜宾桥现场绕线

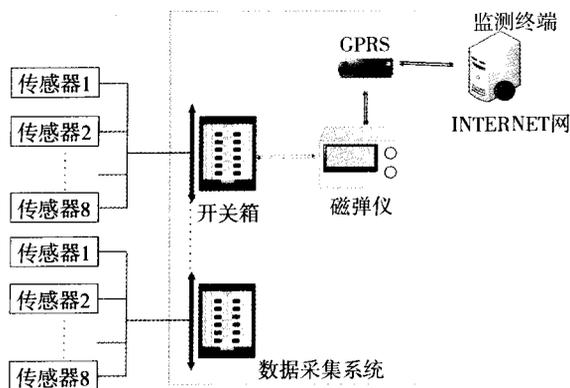


图5 拉索在线监测系统

## 5 结论

(1) 基于磁弹效应测量的磁通量传感器是一种无损、非接触测量方法,可用于斜拉索、吊杆、系杆、体外索及预应力筋的内力测定和健康监测,测试时不需要了解构件的加载历史和使用情况,而是通过感应构件的磁特性变化测量应力。

(2) 由于构件中化学成分、组织结构及构件截面大小和钢丝扭绞的影响,尽管测量曲线一样,但测量零点不均一,测试时最好获取测试零点,难以得到时,最好以统计零点作为力值计算零点。

(3) 温度对缆索的磁导率有影响,传感器应用过程中需要对温度进行修正。

(4) 磁通量传感器的防水耐压性能较好,传感器内充水或非导磁介质对测量结果无影响。

(5) 磁通量传感器为绝对测量,修正温度影响后,测量精确度一般为3%以内。

## 参考文献

- [1] 王社良,王威,苏三庆,等. 铁磁材料相对磁导率变化与应力关系的磁力学模型. 西安科技大学学报. 2005, 25(3)
- [2] Wang M L, Chen Z L, Koontz S S. Magnetoelastic method of stress monitoring in Steel Tendons and Cables. Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines IV. Proceedings of SPIE, 2000
- [3] Wang M L, Lloyd G, Hovorka O. Development of a remote coil magneto-elastic stress sensor for steel cables, SPIE 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Material, Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems; Newport Beach CA, 2001
- [4] 曹映泓, Ming L.Wang, 朱利明. 湛江海湾大桥分布式健康监测系统开发研究. 公路, 2007, (01)
- [5] 王文涛. 斜拉桥换索工程. 第二版. 北京: 人民交通出版社, 2006
- [6] 郝超, 裴岷山, 强士中. 斜拉桥索力测试新方法-磁通量法. 公路, 2000, (11)