

# 磁通量传感器及其在桥梁监测中的应用

龙跃 邓年春 朱万旭 李居泽

(柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005)

**摘要:**磁通量传感器是利用铁磁材料的磁弹性效应,建立导磁性能变化与应力、温度的关系,通过测量磁导率变化,测定铁磁材料构件的张力。该种测量方法为无损、非接触性测量法,适用于斜拉索、吊杆、系杆、体外索及预应力筋的内力测定,可用于预应力筋的施工监控,也可用于长期安全监测。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的描述。

**关键词:**磁弹性效应 磁通量传感器 预应力筋 索力

## 1. 引言

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、预应力结构的体外索和预应力筋等是工程结构的关键受力构件之一,对其施工阶段及运营阶段的张力大小监控具有重要的意义。传统的索力或应力测量方法,如振动频率法、压力传感器测定法和应变片测定法等,都存在明显的缺陷,限制了它们在工程中的应用范围。利用磁通量法测索力,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,测定磁导率变化,根据索力、温度与磁导率变化的关系推算索力。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的描述。

## 2. 磁通量传感器测量原理

铁磁性材料的主要特征之一就是在外磁场作用下能被强烈磁化,磁导率很高,也就是说在不很强的磁场作用下,就可得到很大的磁化强度。当铁磁性材料受到外力作用时,其内部产生机械应力或应变,相应地引起磁化强度发生改变,即产生磁弹性效应,相应公式如下:

$$E_s = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \theta \quad (1)$$

其中 $E_s$ 是磁应变能, $\lambda_s$ 是材料从非磁化状态磁化到磁饱和状态时的总的磁弹应变, $\sigma$ 是所施加的应力, $\theta$ 是应力方向与磁化矢量方向的夹角。从方程(1)可以看出,通过找出磁化强度与应力之间的关系,能实现对铁磁材料中的应力进行检测。

材料的磁化过程一般由磁场强度 $H$ 和磁通量密度 $B$ 之间的关系来描述:

$$B = \mu \cdot H \quad (2)$$

式中 $\mu$ 为介质的磁导率,它依赖于 $H$ 。根据磁感应原理可研究材料的磁化性能,一般采用两个线圈,一个初级线圈,一个次级线圈,将被测材料作为线圈的铁心。如果在初级线圈上加一个直流电流,它就会产生一个强度为 $H$ 的磁场,此时被测材料中产生的磁通量密度为 $B$ 。如果我们能够确定线圈中 $B$ 和 $H$ 的比值 $B/H$ ,则该种偏压条件下的磁导率就可以求出来。

直接测量磁通量或磁通量密度是比较困难的,可采用变通的方法。一种较简便的方法是测量缠绕在试件上的线圈两端的感应电压。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:

$$V_{ind(t)} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

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:

$$V_{ind(t)} = -N \frac{d}{dt} \left[ \mu_0 \int_{S_{\mu_0}} H(\rho, \varphi, t) ds + \int_{S_{\mu}} B(\rho, \varphi, t) ds \right] \quad (4)$$

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表面积。 $\mu_0$ 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

$$V_{out} = -\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt = \frac{N}{T} \left[ \mu_0 \int_{S_{\mu_0}} \Delta H(\rho, \varphi, t) ds + \int_{S_{\mu}} \Delta B(\rho, \varphi, t) ds \right] \quad (5)$$

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 $I_0$ 。与 $I_0$ 相应的磁场强度是 $H_0$ , 应测得磁场强度为 $H_0$ 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(4)可以简化为:

$$V_{out} = \frac{N}{T} \left[ \mu_0 (S_0 - S_f) \Delta H + S_f \Delta B \right] \quad (6)$$

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:

$$V_0 = \frac{N}{T} \mu_0 S_0 \Delta H \quad (7)$$

由方程(6)和方程(7)可得

$$\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \mu_0 \left[ 1 + \frac{S_0}{S_f} \left( \frac{V_{out}}{V_0} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

则相对磁导率

$$\mu_r = 1 + \frac{S_0}{S_f} \left( \frac{V_{out}}{V_0} - 1 \right) \quad (9)$$

在某一温度下, 铁磁材料内应力与磁导率变化为一线性关系, 利用铁磁材料的磁导率-应力关系曲线, 可以直接测量出铁磁材料内力。磁通量传感器就是利用上述原理制成的, 其结构简图如图1所示, 它由激励(初级)和测量(次级)两层线圈组成。当在激励线圈通入脉冲电流时, 铁磁材料被磁化, 会在钢芯试件纵向产生脉冲磁场。由于相互感应, 在测量线圈中产生感应电压, 感应电压同施加的磁通量成正比关系。对任一种铁磁材料, 在试验室进行几组应力、温度下的试验, 建立磁导率变化与结构应力、温度的关系后, 即可用来测定用该种材料制造的构件的内力。

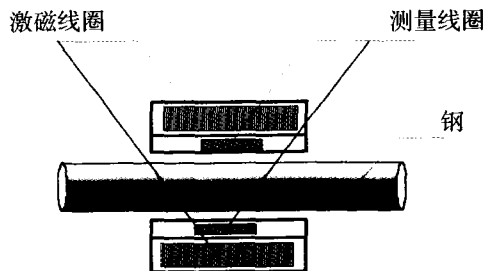


图1 磁通量传感器结构简图

### 3. 磁通量传感器性能

柳州欧维姆机械股份有限公司与美国芝加哥伊利诺斯州立大学合作研制的磁通量传感器, 如图2所示。该类传感器的磁导率变化依赖于试件的应力和温度, 测试过程中的温度影响可以修正。随机取3个CCT20JB型磁通量传感器, 安装在同一根15.24钢绞线上, 在拉索试验台座上进行张拉试验, 试验装置见图3。试验台座张拉端千斤顶与张拉台座之间装有锚固力传感器。在不同的张拉力下, 荷载与磁导率的变化拟合曲线见图4。从图4中可以看出, 同种型号的磁通量传感器, 测试曲线基本一致。磁通量传感器测量系统的一个重要问题是温度对系统敏感性的影响。根据文献表明, 尽管导磁率随温度变化, 导磁率与应力关系曲线本身的斜率却并不变化。这样, 可以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的情况。将3个CCT20JB磁通量传感器分别在空载和内含无应力钢绞线的情况下, 放入恒温箱进行升降温试验。零应力下, 温度与磁导率的变化曲线见图6, 由图中可知, 曲线斜率为0.016。

为了研究磁通量传感器的测试精度, 对1个CCT20JB磁通量传感器标定后, 另取3个同型号传感器, 用原来传感器的标定方程, 进行测量。3个传感器的测量结果见表1。从表1中可以看出, 磁通量传感器的测试相对误差在3%以内。



图2 (a) 磁通量传感器

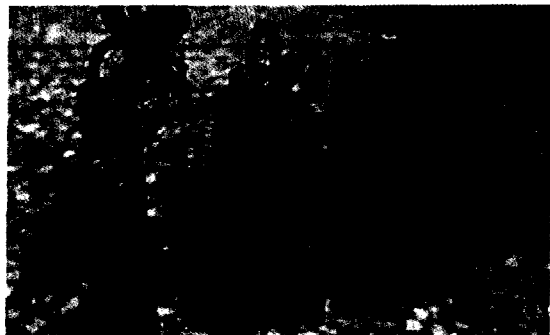


图2(b) 磁通量传感器



图3 传感器张拉试验

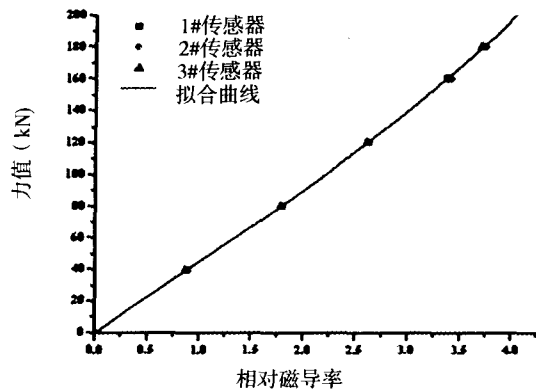


图4 传感器的磁导率与力值曲线

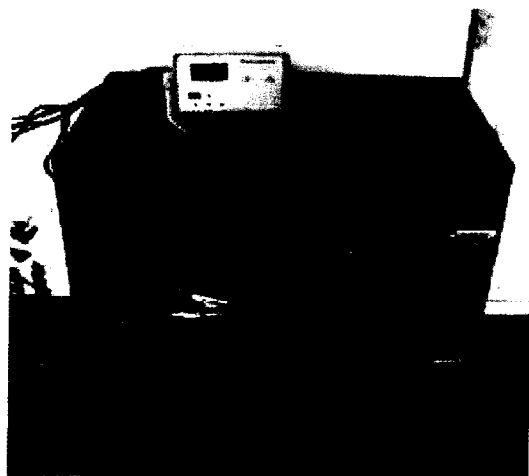


图5 传感器的加温试验

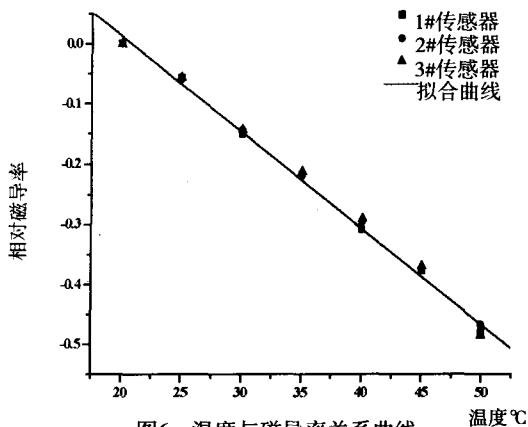


图6 温度与磁导率关系曲线

表1 磁通量传感器测试结果

力值 (kN)	1#传感器		2#传感器		3#传感器	
	测量值 (kN)	误差 %	测量值 (kN)	误差 %	测量值 (kN)	误差 %
30	29.2	-2.6	29.1	-3.0	29.7	-1.0
60	60.1	0.2	59.7	-0.5	59.5	-0.8
120	120.6	0.5	119.5	-0.4	121.7	1.4
180	181.9	1.0	180.7	0.4	181.4	0.8

## 4. 磁通量传感器在工程中应用

### 4.1 在葫芦顶桥预应力监测中应用

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1930米，其主桥采用三跨式连续刚构桥型，主跨均为采用230米。大桥的竖向预应力筋采用32mm精轧螺纹钢，纵向预应力筋采用27 $\phi$ 15.24钢绞线。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监测。磁通量传感器安装在塑料波纹管外，见图7。竖向预应力筋监测采用了24个CCT54G磁通量传感器，纵向预应力筋束采用了48个CCT135J磁通量传感器。CCT135J传感器的磁导率和力关系曲线，见图8。

### 4.2 在天津永和大桥中应用

永和大桥是津汉公路跨永定新河的一座斜拉桥，全桥长510.0m，主跨为260m双塔双索面预应力混凝土斜拉桥。拉索为扇型布置，采用 $\phi$ 5平行高强钢丝束，拉索端部采用冷铸镦头锚，主梁预应力筋采用高强钢丝和IV级粗钢筋。原桥1987年12月建成通车，2006年7月开始对该桥进行维修加固和更换斜拉索。为了尽早获知桥梁结构的健康状态，以便保障桥梁在运营过程的安全，并

为及时进行恰当养护与维修提供直接依据,该桥设计了桥梁健康监测系统。斜拉索是该桥的生命线,为了监测拉索的索力变化,在3根拉索和2根预应力体外索上,安装了5个磁通量传感器。拉索出厂前安装了磁通量传感器,并在张拉台座上进行张拉和传感器标定,见图9。标定过程中,磁导率与力值的关系曲线见图10。

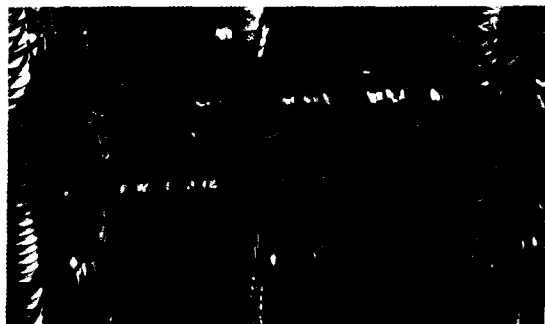


图7 磁通量传感器在葫芦顶桥的安装

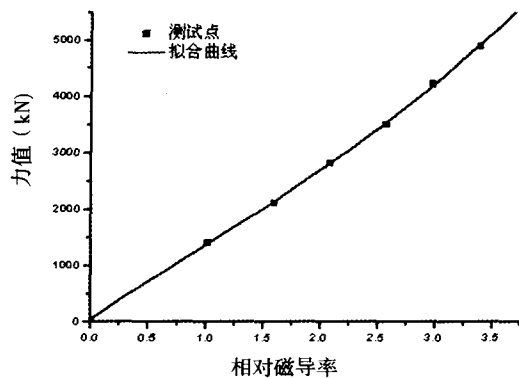


图8 磁导率与力关系曲线



图9 拉索张拉传感器标定

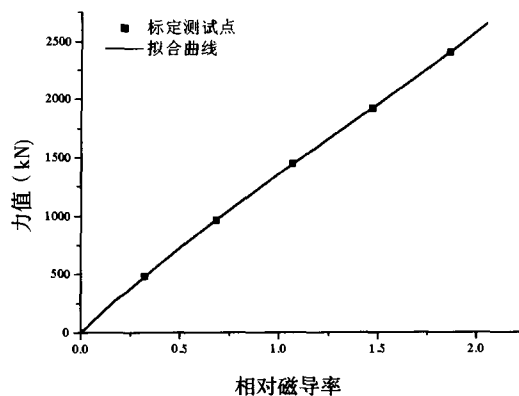


图10 磁导率与力关系曲线

## 5. 结论

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。经过大量试验和应用可得出如下结论:

(1) 磁通量传感器是由初级线圈和次级线圈组成,但拉索自身是传感器的一部分,它的磁导率对应力比较敏感。

(2) 温度对拉索的磁导率有影响,传感器应用过程中需要对温度进行修正。

(3) 磁通量传感器不受磁化饱和状态的影响,但对材料的初始状态敏感,使用时应测量零应力下的磁导率。

(4) 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. Wang M L, Chen Z L, Koontz S S. Magnetoelastic Method of Stress Monitoring in Steel Tendons and Cables. SPIE proceedings series International Society for Optical Engineering proceedings series. 2000, 3995:492-500
2. 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, 4337:122-128.
- 3 杨从晶,曲国阳,杨守成.套式磁弹性扭矩传感器及测量仪的研究.振动、测试与诊断. 2001,21(4):267-270
- 4 王歧山.磁弹性扭矩传感器原理与设计.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1994
- 5 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):30-31