

# 应用磁通量传感器监测体内预应力研究

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

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005 2 同济大学土木工程学院 上海 200092)

**摘要:**体内预应力筋位于预应力混凝土结构的内部,无论是施工还是服役阶段,往往很难对其隐蔽曲线进行检查。由于管道摩擦、锚具回缩、混凝土的瞬时压缩和长期收缩与徐变以及预应力筋松弛等原因,体内预应力不可避免发生预应力损失。预应力损失后,对预应力进行监测,确定永存预应力极其重要。磁通量传感器是基于铁磁性材料的磁弹效应原理制成的,该种测量方法直接监测构件状态,属于无损与非接触性测量方法,传感器安装方便且长期稳定性好。本文研究将磁通量传感器应用于体内预应力筋监测,对传感器的测量原理、传感性能、温度补偿、预应力筋松弛和疲劳影响、测试环境影响以及工程案例等进行了详细的研究,研究结果表明磁通量传感器是监测体内预应力的一种有效方法。

**关键词:**体内预应力 监测 磁弹效应 磁通量传感器

## 1 引言

预应力混凝土结构是在荷载作用之前对构件施加压力,使荷载作用时截面受拉区预先存在压应力的混凝土结构。其中的预应力是用张拉高强度钢筋或钢丝的方法产生。与普通混凝土结构相比,预应力能提高混凝土承受荷载时的抗拉能力,防止或延迟裂缝的出现,并增加结构的刚度,节省钢材和水泥,保证结构良好的耐久性,被广泛地应用于土木工程各种结构中。由于结构特点、材料特性等原因,施加预应力后的预应力混凝土结构,会产生预应力损失。预应力损失的大小影响到已建立的预应力,当然也影响到结构的工作性能,因此,如何确定有效预应力或永存预应力,是预应力混凝土结构设计和使用中的一个重要内容。预应力损失包括瞬时损失和长期损失,引起损失的因素较多,要做到准确计算是比较困难的。比较理想的方法是,采用长效性比较好的传感器对预应力筋的状况直接进行施工监控和长期监测。体内预应力结构的预应力筋位于混凝土结构的内部,属于隐蔽构件,采用常规的方法进行检测和张力测量比较困难,本文研究采用磁通量传感器对体内预应力筋进行监测。

## 2 磁通量传感器测量原理

磁通量传感器是基于铁磁性材料的磁弹效应

原理制成的,即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,相应地磁导率发生改变,通过测定磁导率变化来反映应力变化。它由两个铜线圈组成,即初级线圈和次级线圈,见图1。初级线圈通入脉冲电流,通电瞬时,由于有铁芯试件存在,会在次级线圈中产生瞬时电流,得到一个瞬时电压。电磁感应产生的电压的大小依赖于铁芯材料的磁导率,铁芯材料的磁导率又与铁芯的应力状态相关,根据感应电压与应力的关系实现测量。传感器内内置温度传感器用于测量传感器及试件的温度,修正温度影响。假设传感器内不含铁芯试件的情况下,次级线圈的输出电压积分为 $V_0$ ,传感器内放置铁芯试件时的输出电压积分为 $V_{out}$ ,则测量构件的相对磁导率为<sup>[1-2]</sup>

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

其中, $S_0$ 是次级线圈包围的截面面积, $S_f$ 是试件的截面面积。

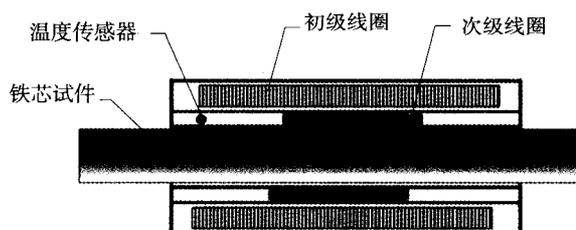


图1 磁通量传感器结构简图

用三次方程表示试件的相对磁导率增量 $\mu$ 与内张力 $f$ 的关系, 则

$$f = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 \quad (2)$$

式中,  $C_0, C_1, C_2, C_3$ 为标定拟合系数, 在标定试验中确定。公式(1)和(2)即为测量公式。

假定传感器测试时, 保持足够的稳定时间, 则传感器内的温度与试件的温度相等。构件因受温度影响而引起的磁导率变化, 可用数值方法进行修正

$$\mu(f, T_0) = \mu(f, T) - \alpha(f - T_0) \quad (3)$$

式中 $T$ 为测量时温度,  $T_0$ 为计算力值时采用的标准温度(20℃),  $\mu(f, T_0)$ 为标准温度(20℃)下的磁导率增量,  $\mu(f, T)$ 测量温度下的磁导率增量,  $\alpha$ 为温度补偿系数。测量力值的计算, 可在标准温度下进行。

对任一种铁磁性材料构件, 在进行几组标准荷载和温度下的标定, 建立磁导率增量与构件内力和温度的关系后, 即可用来测定内力。

### 3 传感器性能研究

磁通量传感器是一种最可能实现预应力筋的真实应力测量的传感器。它与常规传感器的主要不同点在于试件是传感器的一部分, 它直接感应试件的磁特性变化来测量应力, 属于非接触测量, 安装位置也比较灵活。但是试件的几何尺寸和材料性能的离散性将影响测量结果, 包括材料的化学成分、组织结构、杂质、缺陷、材料的非均匀性等, 因此应用磁通量传感器应考虑消除这些因素的影响。

#### 3.1 应力测量曲线

为了研究磁通量传感器重复加载和卸载的性能, 在柳州欧维姆机械股份有限公司试验室的1200T静载试验台座上, 对1个内穿31根15.24mm钢绞线的CCT135磁通量传感器进行了多次重复加载测试。试验装置包括液压油泵, 1200T千斤顶, 1200T应变片压力传感器。标准力传感器的不确定度为0.5%。试验在恒温下进行, 进行了三次循环加载卸载, 最大荷载为5580kN(0.69倍极限力), 加载级步为930kN。试验装置见图2, 三

次重复加载卸载曲线见图3。测量结果表明, 本次测试的重复性误差为1%, 同次加载三次连续测量的平均值的不确定度为2%。

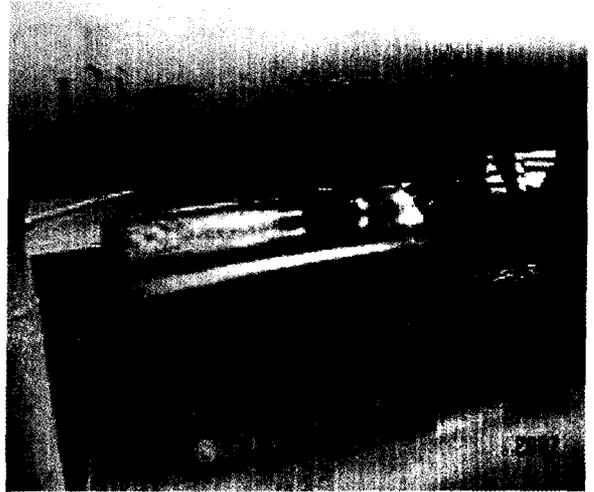


图2 传感器张拉装置

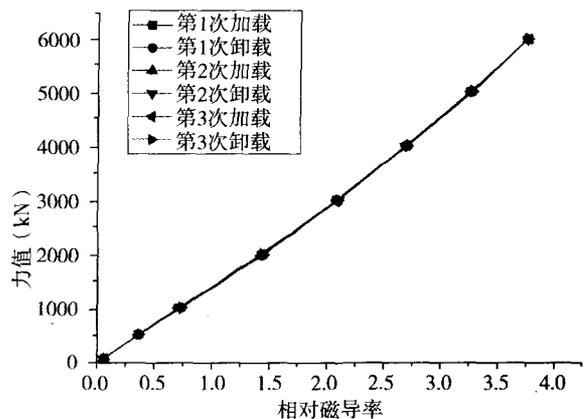


图3 传感器多次加载卸载曲线

#### 3.2 温度标定

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>[3-4]</sup>。这样在零应力下做好温度标定, 然后通过温度系数推广到其它温度下使用。为了得出温度修正系数, 将1个CCT135磁通量传感器放入由保温塑料管制成的自动恒温装置内, 并在传感器内部插入31根无应力钢绞线, 见图4。温度加载从25℃开始, 每级温度5℃, 逐渐升至50℃, 每级加载恒温2个小时后读数, 得到的温度与磁导率的变化曲线见图5, 曲线的斜率为0.013。此为温度修正系数。

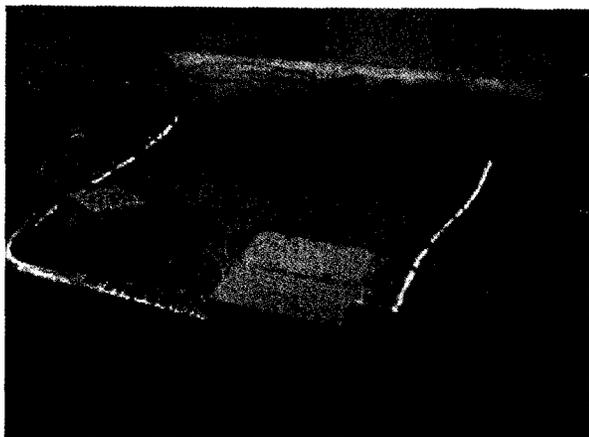


图4 自动恒温装置

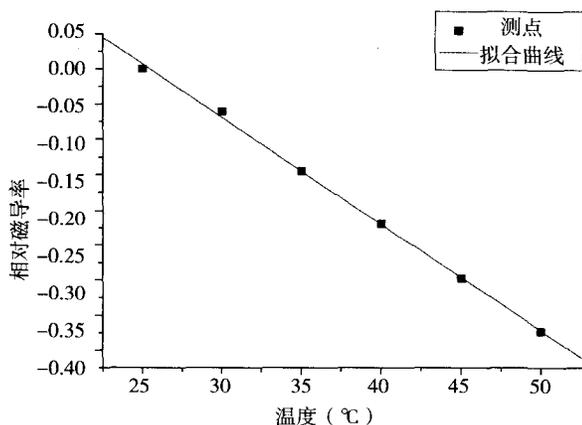


图5 温度加载曲线

### 3.3 空载值测量

采用1个CCT135型磁通量传感器,不穿插试件即保持空载,从25℃到50℃在多个不同温度点进行测试,另外一种工况是将传感器完全浸泡于水中进行测试。测试结果表明,在不同温度下或浸泡于水中,磁通量传感器的空载值变化可忽略不计,即认为保持不变。

### 3.4 测量位置影响

理论上钢绞线试件是均匀的,但是由于试件中化学成分、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。在3.1节的试验过程中,将传感器移动到3个不同位置,分别进行分级加载卸载试验。试验结果表明,用某位置的某次张拉结果拟合曲线和零点,然后计算所有位置的测量结果,此时所有结果的误差都在1% $F_s$ 以内,并且是测量曲线一

样,只是测量零点不同。对张拉已部分完成的构件,当测量零点难以获得时,取某点的测量结果作为参考点会带来较大的误差,可将统计零点作为测量计算零点,能降低测量误差。

### 3.5 水泥砂浆和塑料波纹管影响

在1个CCT135的磁通量传感器内直接灌注水泥砂浆或直接插入塑料波纹管,或在波纹管内再灌入水泥浆,都不影响测量结果,即与空载值大小相等。但传感器内如有钢试件,再在钢试件的外面包裹水泥砂浆或外套塑料波纹管,则积分电压值会降低。CCT135的磁通量传感器内穿31根钢绞线,在有无塑料波纹管的情况下,进行分级加载。试验结果表明,有无塑料波纹管两种情况下,测量曲线形状一样,只是零点不同。据有关文献<sup>[5]</sup>研究表明,发生这种现象的可能原因是电磁波穿过不同的介质时,会发生弥散效应。

### 3.6 屏蔽环境影响

传感器外罩导磁结构物,并距离比较近时,影响传感器的积分电压值。对1个CCT135的磁通量传感器内穿31根钢绞线,在传感器有无金属罩的情况下进行测试。测试结果表明,该种情况下,测量曲线不变,零点会发生移动。

### 3.7 传感器水密性及水中测量

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。抽取1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。

### 3.8 构件相对于传感器偏心影响

磁通量传感器属于非接触测量,传感器与试件之间存在空隙,有时甚至可能是大内孔径传感器测量小构件。测量过程,试件很难做到完全处于中心,可能会斜偏或平偏或兼而有之。抽取1个CCT20传感器,测量直径15.24mm的光面钢绞线,在居中、最大平偏、最大斜偏三种情况下分

别进行测试。试验结果表明,三种情况下的结果基本相等,可忽略偏心影响。

### 3.9 钢绞线松弛影响

抽取1个CCT18传感器在柳州欧维姆机械股份有限公司的25T松弛试验机上,测量直径15.24mm的环氧钢绞线。松弛试验前后直接在松弛试验机上,进行分级加载测量。在20℃环境和0.6倍极限荷载作用下,经过100个小时的松弛试验之后,松弛试验前后的测量误差在0.5% F.S范围内。

### 3.10 钢绞线疲劳试验

虽然传感器与钢绞线没接触,传感器自身不产生力学疲劳问题。但钢绞线是传感器的一部分,经常承受动荷载作用。为了研究钢绞线疲劳对测量结果的影响,在平行钢绞线索进行疲劳试验的过程中,安装了CCT18磁通量传感器。疲劳试验在武汉大桥局的桥梁梁科学研究所的试验机上进行。疲劳应力上限为0.45极限应力,应力幅值为200MPa。疲劳试验前后在同一温度环境下,同一个传感器测量同一位置,测量结果表明,疲劳试验后的最大偏差为0.83%F.S。

## 4 工程应用

### 4.1 南宁葫芦鼎桥体内预应力监测

葫芦鼎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,对关键位置处的预应力筋采用磁通量传感器进行长期监测。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6。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,并与油压表的测量结果进行对比,其偏差在4%范围内。这是中国大陆首次采用磁通量传感器对预应力筋进行有效监测。

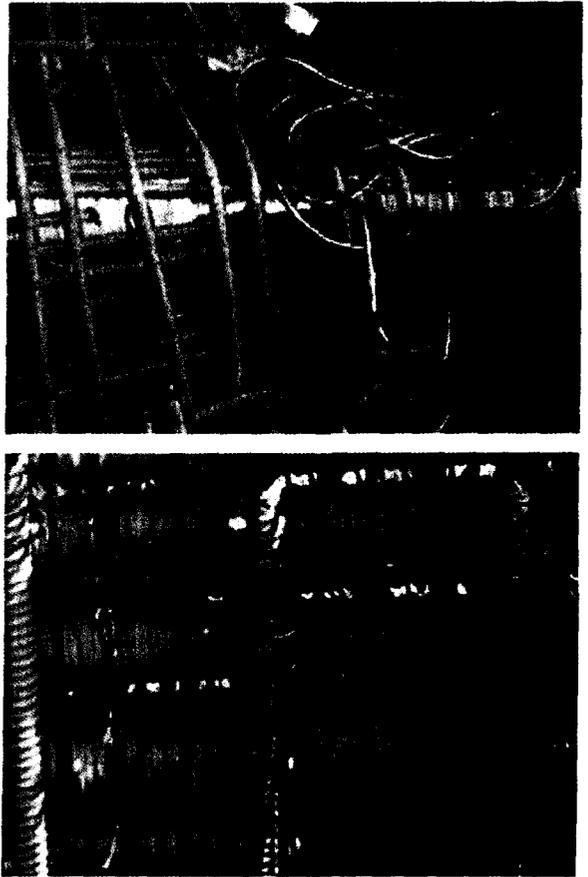


图6 磁通量传感器的安装

### 4.2 成都双流机场滑道桥体内预应力监测

成都双流国际机场扩建工程中,飞机滑行道桥的中幅桥中布置的是通长预应力钢束,中间没有设置连接器。为检验施工张拉后通长束的有效预应力,保证施工质量和结构安全。采用预埋磁通量传感器的方案,对永存预应力进行监测。每座桥选取2束腹板束进行测试,共布设20台CCT120J磁通量传感器。在钢束张拉至设计张拉力的15%、50%、100%、锚固完成共四个阶段进行测量,预应力筋型号为16根15.24钢绞线,传感器直接套装在波纹管的外面,见图7。全桥钢束张拉完成后,进行波纹管灌浆,灌浆十天后等浆体完全凝结,检测钢束各截面预应力。两座桥中的一座的预应力筋张拉放张后实测结果与理论计算值对比,见表1。从表中可知,磁通传感器能有效地对预应力筋进行监测。

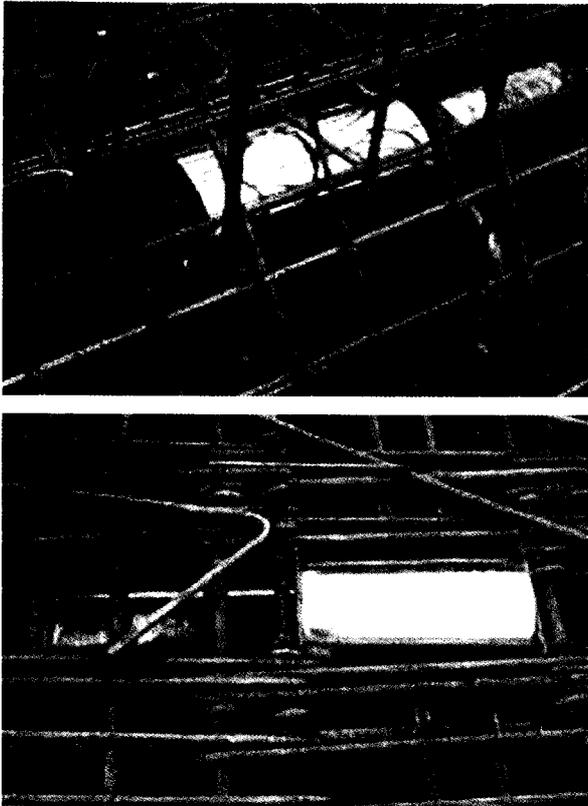


图7 成都双流机场滑道桥传感器安装

表1 预应力筋张拉放张后实测结果与理论计算值对比

监测部位	0# 腹板N3钢束被测钢束				
测点位置	B截面	C截面	D截面	E截面	F截面
张拉后理论计算值	2720	2420	2150	2420	2730
实际测量值 (kN)	2752	2501	2184	2546	2637
相对偏差(%)	1.17	3.34	1.58	5.20	-3.40
监测部位	5# 腹板N5钢束				
测点位置	B截面	C截面	D截面	E截面	F截面
张拉后理论计算值	2500	2100	1775	2100	2490
实际测量值 (kN)	2434	2317	2028	2273	2488
相对偏差(%)	-2.64	10.33	14.25	8.23	-0.08

## 5 结论

(1) 磁通量传感器通过直接感应试件的磁性变化来测量应力,属于非接触测量,安装位置比较灵活,用于体内预应力监测可直接放置在不导磁的塑料波纹管的外面或直接与波纹管相连,并可安装于锚具内沿筋向任意位置。

(2) 磁通量传感器直接从试件中提取信息,试件是传感器的一部分,因此试件的几何尺寸和材料性能的离散性都将影响测量结果,包括

材料的化学成分、组织结构、杂质、缺陷、材料的非均匀性等。测量过程应消除这些因素的影响。

(3) 温度对预应力筋的磁导率有影响,传感器的温度修正可采用数值系数法。

(4) 预应力筋的松弛和疲劳对测量结果有影响,一般在1%以内。

(5) 外界环境包括屏蔽包围、水泥砂浆和塑料波纹管等,只影响零点不影响测量曲线形状。

(6) 传感器与构件之间的偏心影响可以忽略不计。

(7) 磁通量传感器的防水耐压性能较好,传感器内充水对测量结果无影响。

综上所述,磁通量传感器安装方便,测量较准确,长效性好,比较适合用于体内预应力的长期监测。

鸣谢: 特别感谢柳州欧维姆结构检测技术有限公司李居泽等同事,为本文的试验和现场数据采集提供的帮助。

## 参考文献

- [1] 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
- [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
- [3] Wang G., M. Wang and Y. Zhao: "Application of EM Stress Sensors in Large Steel Cables". Journal of Smart Structures and Systems, 2006,2(2)
- [4] Wang, M., Chandoga and A. Jarosevic: "New Applications on Magneto-Elastic Method, Civil Engineering". A monthly review of Engineering Construction. Published by Inziniersky stavby. Bratislava, Slovakia, 1999,8(9)
- [5] 虞昊. 现代防雷技术基础(第二版). 北京:清华大学出版社, 2005