

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905487

基于逆磁致伸缩的无励磁钢绞线应力量测研究*

陈静雯^{1,2}, 张洪^{1,2}, 张森华^{1,2}, 廖棱³, 周建庭^{1,2}

(1. 省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室 重庆 400074; 2. 重庆交通大学土木工程学院 重庆 400074;
3. 重庆交通大学材料科学与工程学院 重庆 400074)

摘要: 钢绞线作为预应力结构的关键受力构件,为实现对其应力信息的准确测量,提出一种基于逆磁致伸缩的无励磁钢绞线现存应力测量方法。首先,通过建立磁电力耦合理论模型,探析外加荷载、铁磁材料的磁导率与线圈系统自感系数之间的内在联系。其次,基于 COMSOL 有限元软件,量化模拟了钢绞线应力变化时自感线圈系统的电感变化。最后,搭建试验测量平台展开试验验证。结果表明,基于该测量方法获取的电感值具有较高的可重复性,在激励电流不变情况下,15 组试验数据的电感与荷载之间均显著呈一定函数关系,拟合优度 R^2 均大于 0.99,且检测灵敏度随自感线圈有效磁路长度增加而增加,拟合值与实测值之间误差微小,满足工程需要,进一步验证了该方法的合理性。

关键词: 逆磁致伸缩效应; 现存应力; 自感; 电感

中图分类号: TH82 TM15 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on stress measurement of non-excited steel strand based on inverse magnetostriction

Chen Jingwen^{1,2}, Zhang Hong^{1,2}, Zhang Senhua^{1,2}, Liao Leng³, Zhou Jianting^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing 400074, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to achieve accurate measurement of stress information, a new method of existing stress measurement based on inverse magnetostriction for non-excited steel strand, which is the key loaded component of the prestressed structure, is proposed. Firstly, through establishing the theoretical model of magnetoelectric coupling, the internal relationship of the external load and the permeability of ferromagnetic materials versus the self-inductance coefficient of the coil system is analyzed. Secondly, based on the COMSOL finite element software, the inductance variation of the self-inductance coil system is simulated quantitatively when the stress of the steel strand changes. Finally, the test and measurement platform was built to carry out the test and verification. The results show that the inductance value obtained based on the proposed measurement method has high repeatability; under the condition that the excitation current is constant, the relationships of the inductance versus load for 15 groups of test data all exhibit a significant functional relationship and the goodness of fit R^2 is greater than 0.99. The detection sensitivity increases with the increasing of the effective magnetic circuit length of the self-inductance coil. The error between the fitting value and the measured value is quite small, which meets the engineering requirement and further verifies the rationality of the proposed method.

Keywords: inverse magnetostrictive effect; existing stress; self-inductance; inductance

收稿日期: 2019-08-16 Received Date: 2019-08-16

* 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806007)、国家杰出青年科学基金(51425801)、国家自然科学基金(51808081)、特大跨轨道连续刚构桥建设关键技术与应用(cstc2018jsex-mszdX0084)、重庆交通大学研究生教育创新基金项目(2019S0154, 2019S0156)项目资助

0 引言

钢绞线应力状态决定着预应力结构的整体性能,是影响预应力结构安全的最主要因素之一。然而,由于施工工艺、环境侵蚀以及长期荷载等多种因素的耦合作用,使得预应力结构中会产生不可预见的预应力损失,继而造成预应力水平降低和预应力分布不均匀,导致结构下挠,裂缝加剧,刚度变小,由此形成恶性循环,严重影响结构的正常使用,甚至导致结构的毁坏^[1]。据相关资料统计,预应力桥梁服役期间,其预应力损失可达 30% 左右,预应力箱梁腹板竖向的预应力损失能达到 45% 甚至更高^[2]。因此,监测预应力结构的钢绞线现存应力是评价结构工作性能的关键,对保障结构安全、降低后期维护成本具有重要的科学研究意义与工程应用价值。

近年来,国内外学者针对钢绞线现存应力的测量开展了大量研究,研究成果主要分为有损法和无损法。Schajer 等^[3-4]提出应力释放无损检测法,通过人工切割构件使约束释放采集结构现存应力。但实施这种应力释放法要对钢绞线造成损伤,将在一定程度影响预应力结构的正常使用。付丹等^[5]提出通过对预应力筋二次张拉获取的拉力-位移曲线推算锚下实际应力,但仅实现了锚下预应力的数据采集。Bartoli 等^[6-8]基于施加超声波激励后钢绞线的频率变化值演算预应力筋的应力大小,但由于导波传递过程中受到过多因素影响,该方法的可靠性有待提高。Benjamin 等^[9-10]提出光纤光栅传感器检测法,具体利用光纤内光波波长的变化推算预应力筋的实际张力,但光栅传感器材质易损坏、成本高,且受温度影响大,修正困难。卜建清等^[11]基于结构模态频率和动力响应的计算结果,成功识别出简支梁桥的有效预应力,该方法操作简便、成本较低,但检测结果对构件的边界条件却极为敏感。可见,钢绞线现存应力的测量仍处于研究阶段。

在有效预应力监测中,磁测应力法通过获取结构中随应力变化的磁参量实现钢绞线现存应力的测量,并以其非接触、动态响应好、受振动影响小等优点逐渐成为现存应力无损测量的热点。石延平等^[12]通过研制差动压磁式扭矩传感器,实现了对设备不同工况的监测和故障识别,测试准确度和灵敏度均能够满足一般工程应用的要求。陈伟民等^[13]提出基于逆磁致伸缩效应的钢绞线应力测量理论模型,并成功开发了由激励线圈和感应线圈构成的环式索力传感器,继而探讨索力材料受力与外加磁信号之间的关系。为进一步优化传感器,唐德东等^[14-15]设计了新型双回路双励磁结构索力传感器,通过实验模拟验证了传感器具有较好的动态响应,但仍继承了原有双线圈传感器的构造。可见,既有研究中关于磁

参量的获取,往往需要双线圈磁场激励或交流磁场激励,考虑到复杂的实际工程环境和大型预应力结构,在一定程度上限制了磁测应力法诸多优点的实际发挥。

针对现存应力测量的复杂性与实际工程应用需求,本文在既有研究基础上,提出了基于逆磁致伸缩的无励磁钢绞线现存应力测量方法。通过剖析钢绞线的应力状态与自感线圈系统的电感之间的内在联系,提出基于无励磁自感线圈系统的涵盖荷载信息的电感测量方法,并通过有限元仿真和试验研究验证该方法的有效性。

1 磁电力传感器理论模型

1.1 逆磁致伸缩效应的基本原理

铁磁材料在外力作用下,其磁化强度随之变化的现象称为材料的逆磁致伸缩效应,即当铁磁材料的应力状态变化时,其自身磁导率或磁阻也将随之改变,继而导致通过材料的磁通发生变化,而传感器上的感应线圈,恰好可以捕捉到材料感应出的感生电动势的变化量,通过将非电量的应力转换成可以测量的电学量,达到应力监测的目的^[16],如图 1 所示。故本文基于逆磁致伸缩效应原理开展钢绞线现存应力测量方法的研究。

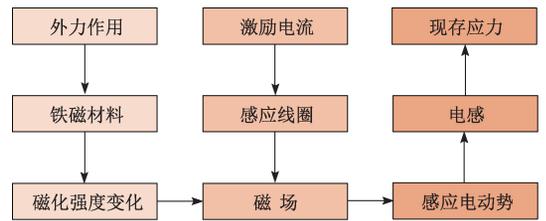


图 1 逆磁致伸缩效应检测原理

Fig. 1 Schematic diagram of the detection principle with inverse magnetostrictive effect

1.2 磁、电、力之间的内在联系

根据 Joule 效应,置于磁场中的钢绞线受外力作用发生变化时,轴向形变将导致钢绞线磁化强度发生改变,二者间的具体关系如下:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{3\lambda_s M_s}{2K_u} \Delta M \sin^2 \theta_0 \cos \theta_0 \quad (1)$$

式中: ε 为轴向应变; λ_s 为轴向变形常数; M_s 为饱和磁化强度; K_u 为单轴磁各向异性常数; θ_0 为磁场与易磁化轴之间的角度; ΔM 为磁化强度的变化量。

根据铁磁性材料的磁化理论,有:

$$\Delta M = \Delta[(\mu - \mu_0)H] \quad (2)$$

式中: H 为磁场强度; μ 为铁磁材料的磁导率; μ_0 为真空磁导率。

当感应线圈中有激励电流通过时,感应线圈的周围

就会产生磁场。此条件下,磁场可使感应线圈自身产生感应电动势,而感应线圈内的钢绞线就相当于感应线圈的铁芯,其磁导率的改变会使测得电感发生改变,具体关系可表达为:

$$H = \frac{NI}{l_m} \quad (3)$$

式中: N 为传感器电感线圈的匝数; I 为激励电流强度; l_m 为有效磁路长度。

$$\begin{cases} L = N \frac{d\Phi}{dI} = f(\mu) \\ f(\mu) = Nd \left(\int_S \vec{\mu} \vec{H} \cdot d\vec{S} \right) / dI \end{cases} \quad (4)$$

将式中磁导率 μ 表示成电感 L 的函数,即为:

$$\mu = h(L) \quad (5)$$

当线圈内的激励电流强度 I 不变,将式(3)和(5)带入式(2),可得:

$$\Delta M = \Delta \left[h(L) - \mu_0 \right] \frac{NI}{l_m} \quad (6)$$

引入材料的本构关系 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{EA_f}$, 可得:

$$F = EA_f \frac{3\lambda_s M_s}{2K_u} \Delta \left[h(L) - \mu_0 \right] \frac{NI}{l_m} \sin^2 \theta_0 \cos \theta_0 = g(L) \quad (7)$$

式中: F 为钢绞线的外加力; E 为材料的弹性模量; A_f 为钢绞线的横截面积; $g(L)$ 为电感 L 表示钢绞线外加力 F 的函数。

对式(7)进行泰勒展开,并忽略三阶之后的高阶项,可得:

$$F \approx g(0) + g'(0)(L) + \frac{g''(0)}{2!}(L)^2 + \frac{g'''(0)}{3!}(L)^3 \quad (8)$$

该式即为钢绞线应力与其电感之间的定量关系式。

通过上述各式的推导可以发现,钢绞线的应力状态与磁导率、电感紧密联系,通过融合应力与磁导率、磁导率与电感之间的函数关系,可建立铁磁材料应力与电感的理论模型,即可通过获取电感的变化量去实现对钢绞线现存应力状态的有效监测。

2 磁、电、力之间关系的数学模型

2.1 电感参数采集

根据自由轴测量法原理^[17],即相敏检波器的参考向量坐标轴的方向可以任意选取,因此可以大大简化电路结构,同时可以极大地消除由于相位造成的误差,故电感参数的采集,可灵活地应用在常规测量当中。

设待测阻抗与已知电阻两端的矢量电压分别为

$U_x = c + jd$ 、 $U_s = a + jb$,其中 a 、 b 、 c 和 d 分别为矢量电压信号 U_s 与 U_x 在相敏检波器所提供的坐标轴上的投影,如图2所示,利用上述投影的参数,可将待测阻抗 Z_x 的值示为:

$$Z_x = R_s \frac{U_x}{U_s} = R_s \left(\frac{ac + bd}{a^2 + b^2} + j \frac{ad - bc}{a^2 + b^2} \right) = R + j\omega L \quad (9)$$

式中: R_s 为与待测阻抗串联的已知电阻, R 和 ωL 即为需要测量出的待测阻抗的电阻值和电抗值。其中 ω 是激励的角频率, L 是电感。

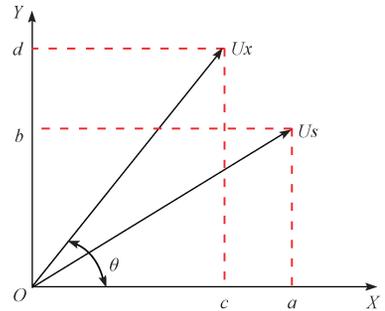


图2 自由轴测量法原理

Fig.2 The principle diagram of free axis measurement method

由式(9)可知,角频率恒定不变的情况下,通过待测阻抗 Z_x 可以推算出电感 L 。

2.2 信号处理电路设计

试验过程中采用的电桥电路原理应用自动平衡电桥法,如图3所示。

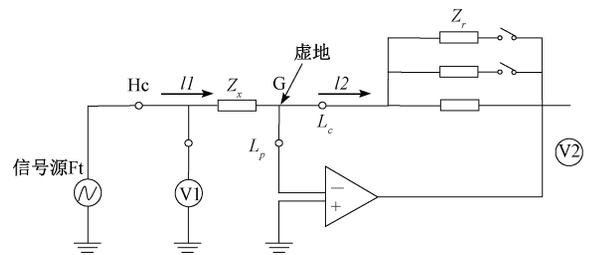


图3 电桥电路原理

Fig.3 Principle schematic diagram of the bridge circuit

图3中 Z_x 为待测阻抗, Z_r 为不同量程的已知电阻,将两者的连接点接到运算放大器的负输入端,正输入端接地。故待测阻抗与已知电阻的连接点便变成虚地,即电压近乎为0V,所以连接点的对地分布电容便不会造成分流;如若不采用电桥电路,待测阻抗与已知电阻中点对地是浮动的,造成对后级的差动运放的共模抑制能力要求非常高,增加了电路实现的难度。而采用这种电桥电路,对差动放大的共模抑制要求就低了很多,简化了电路结构。

此外,在试验过程中,检测信号会受到外界因素的干扰。实际设计时,就要应用到带屏蔽线的开尔文夹具,其导线外壁有一层与内部铜线绝缘的同轴屏蔽线,两者分别连接夹子的两个钳口,钳口的连接点也是绝缘的,其内部结构如图 4 所示。

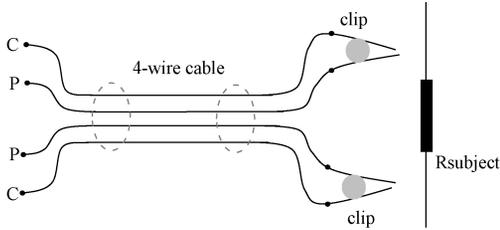


图 4 开尔文夹具结构原理

Fig.4 Principle diagram of Kelvin fixture structure

因此,实际应用过程中,只需将图 4 中两个 C 点连接电桥电路引出端口,两个 P 点连接三运放电路的引出端口。由于三运放电路的输入级采用电压跟随器,基于运算放大器虚断的特性,可认为内部几乎没有电流存在,由此便可以消除引线电阻的干扰,提高电桥的测量准确度。

2.3 磁电力关系的数学模型

根据法拉第电磁感应定律,自感线圈与钢绞线构成一个带铁芯线圈,统称为“自感线圈系统”,其电感均是该线圈系统所产生,是由外部线圈的特征(如长度、匝数等)和内部钢绞线铁芯共同决定的。当自感线圈保持不变时,测得的电感变化只与钢绞线的磁导率变化有关,具体关系如下:

$$L = \left(\frac{f(\mu)A_f + \mu_0 A_{\text{air}}}{l_m} \right) N^2 \quad (10)$$

式中: L 为电感值; $f(\mu)$ 为钢绞线的磁导率函数; A_{air} 为钢绞线与传感器之间空气环的横截面积。

结合电磁效应和自感现象,可以由式(7)推导出钢绞线应力 F 与自感线圈系统电感 L 的关系。在一定的激励电流下,钢绞线应力和自感线圈系统电感的函数可以用式(11)来描述。

$$F = E \frac{3\lambda_s M_s}{2K_u} \sin^2 \theta_0 \cos \theta_0 I \left(\frac{L}{N} - \frac{N}{l_m} A \mu_0 \right) \quad (11)$$

$$F = kL + b \quad (12)$$

式中: A 为传感器的横截面积。

根据式(10)可知,自感线圈系统的电感与钢绞线的磁导率存在函数关系,而对于特定的钢绞线和自感线圈, E 、 λ_s 、 M_s 、 K_u 、 θ_0 、 I 、 N 、 l_m 、 A 和 μ_0 是常数。因此,式(11)可以描述为式(12),其中 k 、 b 是常数。根据式(12)可知,自感线圈系统的电感增量 L 与钢绞线应力之间存在函数关系,这意味着可以通过上述采集电感值的方式,测量自感线圈系统的电感来确定钢绞线应力。

3 试验仿真分析

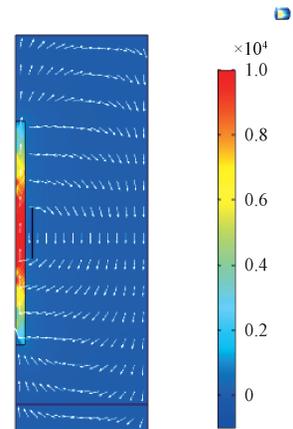
利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件针对无励磁线圈和钢绞线受力进行有限元仿真分析,验证相关理论模型的可行性。考虑到线圈为多匝且由导电材料构成,故模型中使用单层螺线管模型模拟实际线圈。由于模型计算域被无限区域包围,且无限元域的厚度是有限的,但仍可将其视为无限延伸的域。为了提高模型迭代求解的稳定性,线圈周围空气域的电导率采用非零的低值建模(本文参数设置为 1),与线圈导体的电导率相比小得多,对模型求解结果的影响可以忽略不计,模型部分仿真参数设定如表 1 所示。

表 1 模型部分仿真参数

Table 1 Partial model simulation parameters

参数	数值
钢绞线最大拉力/kN	200
相对磁导率	1
相对介电常数	1
初始磁化率	200
饱和磁致伸缩系数/ppm	200
饱和磁化强度/(A/m)	1.5×10^6

COMSOL 有限元仿真如图 5 所示,线圈缠绕钢绞线,张拉受力均匀,提取有限元仿真中的钢绞线受力荷载及其对应的电感变化量,结果汇总如图 6 所示。可以发现,钢绞线的受力状态与电感之间密切关联,且显著呈现为一元三次函数关系,二者之间的拟合优度达 0.998 2,这就验证了磁、电、力三者之间理论模型的有效性及准确性,并准确地给出了荷载与相应电感之间的函数关系。



(a) 2D 模式
(a) 2D mode

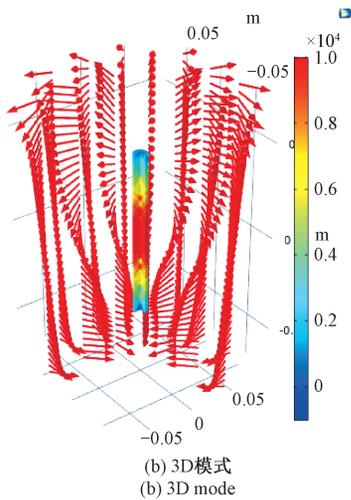


图5 磁、电、力之间关系模型的有限元仿真

Fig.5 The finite element simulation of the relationship model among magnetism, electricity and force

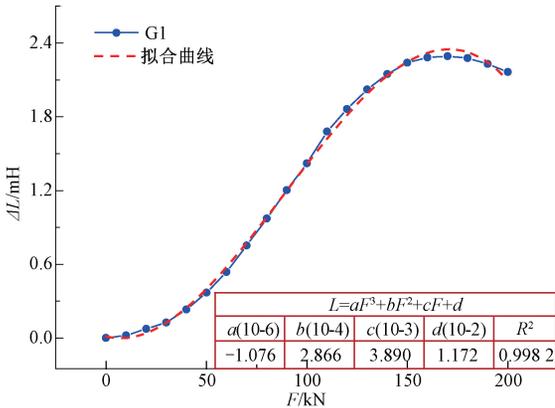


图6 仿真模拟电感变量与荷载之间的关系

Fig.6 Simulating the relationship between inductance variable and load

4 试验研究

4.1 试验装置

试验采用拉伸试验机作为试验加卸载装置,取工程中常用的7芯钢绞线作为研究对象,长度 L 取80 cm,材料参数如表2所示。

表2 钢绞线的几何及材料参数

Table 2 Steel strand geometry and material parameters

材料参数	数值
弹性模量/(E/GPa)	196
泊松比/(ν)	0.29
密度/($\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 850
屈服荷载(F/kN)	203
极限拉应力(P/MPa)	1 860

钢绞线两端各留20 cm安装夹片,并采用具有绝缘性和防潮抗震性及优良粘接性能的有机硅橡胶将传感器粘接在被测钢绞线中间段,其安装效果图如图7所示。

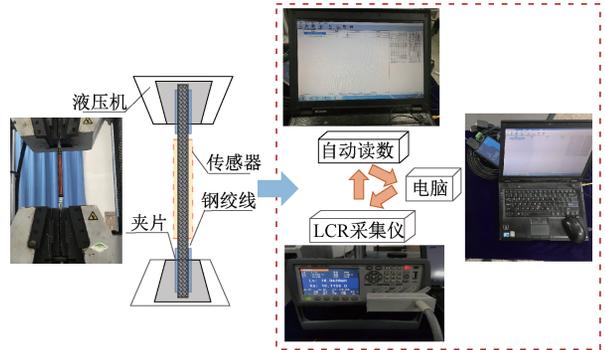


图7 传感器的安装效果图

Fig.7 Rendering of the sensor installation

实际工程结构中,根据规范可知钢绞线的受力范围为 $0.75\sigma_{con}$,故确定钢绞线加卸载区间为0~200 kN,将试验加载过程划分为每10 kN一个荷载步,每个荷载步静置1 min,单个荷载步加载到位之后的静置时间内,采集设备工作,每个荷载步中重复测量20次,多次测量的数据取平均值以减少测量误差。试验中从0~200 kN为加载阶段,随后,再按相同荷载步卸载到0 kN为卸载阶段,由此形成一个加卸载循环。钢绞线张拉的试验参数内容如表3所示。

表3 钢绞线张拉的试验参数

Table 3 The test parameters of steel strand tension

项目	传感器分组		
	G1	G2	G3
钢绞线尺寸	1 * 7Φ15.2	1 * 7Φ15.2	1 * 7Φ15.2
线圈匝数/匝	330	165	110
有效磁路长度/mm	210	105	70
阻抗值/ Ω	1.108	1.869	2.363
施加拉应力范围 步长/kN	0~200(10)	0~200(10)	0~200(10)
室内温度/ $^{\circ}\text{C}$	22~24	22~24	22~24

当通过自感线圈的电流为66.67 mA时,G1-5#钢绞线加载时测量获得的部分加载点的20次电感值的散点图如图8所示,其中纵轴表示电感值,横轴表示采集次序。由图8可以看出,20次测量值都在均值附近。通过统计分析得到,标准差均小于0.001%,因而具有较高的测量重复性。

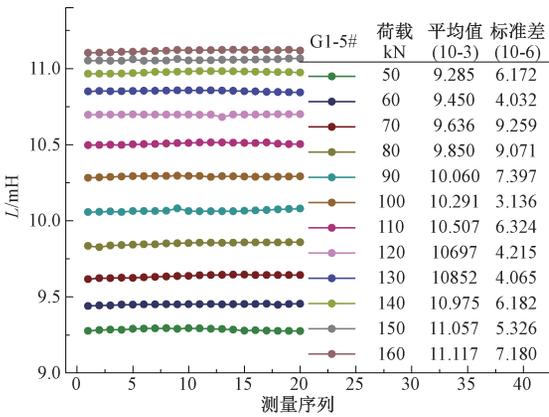


图 8 G1-5#加载测试的电感值分布图

Fig.8 The inductance value distribution diagram in G1-5# loading test

4.2 试验与分析

1) 电感值与荷载之间的关系

分别对 G1、G2、G3 3 组不同有效磁路的自感线圈进

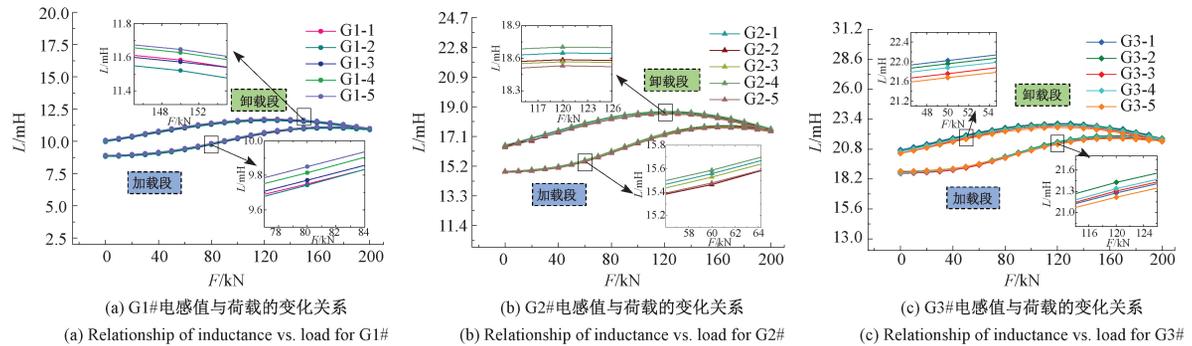


图 9 加载状态下各自感线圈系统下电感值与荷载关系

Fig.9 The relationships of inductance vs. load for different self-induction coil systems under loading state

表 4 G1#自感线圈系统的电感值 L 同荷载 F 变化关系的拟合结果

Table 4 The fitting result of the relationship of inductance L vs. load F for G1# self-induction coil system

受力状态	G1-1		G1-2		G1-3		G1-4		G1-5	
	加载	卸载								
a(10-7)	-10.07	-2.839	-10.38	-2.841	-9.933	-3.01	-10.31	-2.918	-9.892	-2.836
b(10-5)	27.45	-2.453	27.72	-2.394	27.09	-1.589	27.81	-2.194	26.33	-2.512
c(10-2)	-46.86	2.081	-39.8	2.066	-44.32	1.981	-44.08	2.062	-29.05	2.096
d	8.901	9.986	8.834	9.933	8.919	10	8.935	10.02	8.919	10.04
R ²	0.999 1	0.997 6	0.998 5	0.997 8	0.998 9	0.996 4	0.998 8	0.998 1	0.998 9	0.997 4
η/%	2.208 8	1.820 6	2.349 4	1.711 8	2.295 3	1.797 1	2.295 5	1.786 9	2.224 2	1.845 9

分析表 4~6 可知,同一自感线圈系统测得的 5 组电感与荷载关系函数间存在较高的重复性,电感与荷载之间存在函数关系,且曲线拟合度较好,拟合优度均大于 0.99;此外,15 组数据的电感灵敏度均大于 1,表明当钢

绞线外加荷载发生变化时,自感线圈系统可准确捕捉到电感的变化量,进而有效反应钢绞线的应力状态。

对比图 9(a)~(c)可以发现,采用相同的自感线圈系统测量时,钢绞线受力荷载与电感之间的变化趋势基本相同,表明电感平均值同荷载之间的函数关系显著,结合磁、电、力理论模型和有限元仿真结果,将二者函数关系一般化为下式:

$$L = aF^3 + bF^2 + cF + d \quad (13)$$

对 3 种不同的自感线圈系统获取的 15 组数据进行定量分析以明确各电感值随荷载变化关系,采用拟合优度 R² 表征各电感值随荷载变化的密切相关性,采用各荷载区间内电感值的相对变化率绝对值 η,以表征各电感值对荷载的灵敏度。则不同编号的自感线圈系统的电感值与荷载变化关系的结果分别如表 4~6 所示。

对比 G1、G2、G3 3 种不同有效磁路的自感线圈时发现,当自感线圈的有效磁路长度增加时,检测灵敏度也

表5 G2#自感线圈系统的电感值 L 同荷载 F 变化关系的拟合结果

Table 5 The fitting result of the relationship of inductance L vs. load F for G2# self-induction coil system

受力状态	G2-1		G2-2		G2-3		G2-4		G2-5	
	加载	卸载								
a(10-7)	-14.23	-3.84	-15.03	-4.836	-14.28	-4.004	-14.18	-3.84	-14.42	-3.69
b(10-5)	37.3	-4.017	39.97	-0.608	37.31	-3.627	37.28	-4.017	38.07	-4.408
c(10-2)	-48.89	2.86	-69.23	2.565	-49.79	2.842	-47.99	2.86	-60.92	2.862
d	14.87	16.43	14.83	16.4	14.84	16.34	14.89	16.49	14.84	16.34
R^2	0.998 2	0.997 1	0.998 3	0.993 7	0.998 2	0.996 9	0.998 3	0.997 1	0.998 1	0.997 2
$\eta/\%$	1.874 5	1.441 6	1.963 7	1.648 5	1.877 7	1.456 7	1.902 0	1.436 9	1.936 6	1.445 0

表6 G3#自感线圈系统的电感值 L 同荷载 F 变化关系的拟合结果

Table 6 The fitting result of the relationship of inductance L vs. load F for G3# self-induction coil system

受力状态	G3-1		G3-2		G3-3		G3-4		G3-5	
	加载	卸载								
a(10-7)	-15.22	-5.072	-15.62	-3.811	-16.2	-4.067	-15.19	-3.887	-14.6	-4.16
b(10-5)	40.25	-2.318	40.88	-5.817	42.49	-5.301	39.94	-5.161	38.93	-4.261
c(10-2)	-65.61	2.939	-49.27	3.236	-66.46	3.231	-51.65	3.121	-69.36	3.018
d	18.84	20.69	18.75	20.56	18.7	20.37	18.76	20.52	18.9	20.36
R^2	0.998 2	0.997 3	0.998 1	0.997 8	0.997 6	0.997 2	0.998 3	0.997 9	0.986 9	0.997 1
$\eta/\%$	1.623 0	1.250 3	1.667 3	1.299 6	1.767 6	1.36	1.643 1	1.267 9	1.602 8	1.241 3

随之增加,并且通过试验发现,随有效磁路长度的减小,电感值增大。这是由于有效磁路长度越小,作用在线圈上的磁场越大,检测线圈中通过的磁通量随之增加,从而导致检测电感值的信号强度增加,可以通过适当增加有效磁路长度来增加检测灵敏度。

同一自感线圈系统测得的加载段和卸载段电感与荷

载关系曲线并不重合,这是由于钢绞线属于铁磁性材料,加载拉伸后材料本身存在磁滞现象^[18-19]。

2) 误差分析

基于 MATLAB 编程将所测得的电感值代入拟合的公式中,所得的结果与实际测得的荷载进行对比,结果如图 10 所示。

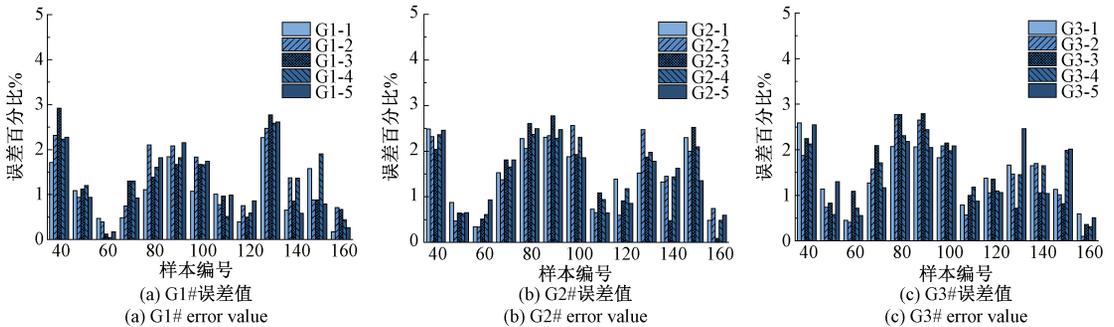


图 10 加载状态下拟合值与实测值之间的误差

Fig.10 The errors between the fitted and measured values in loading state

由加卸载循环中的拟合值与实测值的误差分析中可以发现,无论是加卸载阶段,还是不同有效磁路长度的自感线圈系统,其误差值均不超过5%。其中,加载状态下,不同自感线圈系统测得的电感值代入相应拟合的加载公

式中所测得的拟合值与实测值间最大误差为 3.7 kN,误差百分比最大为 3%;卸载状态下,不同自感线圈系统测得的电感值代入相应拟合的卸载公式中所得的拟合值与实测值间最大误差为 4.2 kN,误差百分比最大为 4%,试验

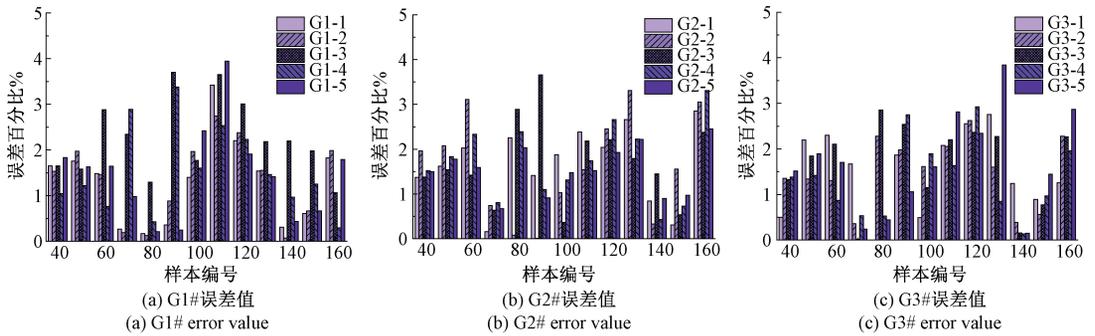


图 11 卸载状态下拟合值与实测值之间的误差

Fig.11 The errors between the fitted and measured values in unloading state

误差值较小,能够满足实际工程需要。

考虑到预应力混凝土结构密实度高、整体性好,且同型号钢绞线参数一致性高,可将线圈直接缠绕在套管上形成智能套筒并在结构建设过程中进行预埋,通过预先标定获取实际结构钢绞线应力与电感的关系曲线,利用运营阶段中自感线圈系统的实时电感变化值,继而反演得到钢绞线现存应力,实现应力施加阶段和应力损失阶段的钢绞线实时应力监测。相较于目前普遍使用激励线圈和感应线圈构成的双线圈环式传感器而言,该传感器具有传统环式传感器的优点外,还具有价格低廉、快速响应和易于安装等特点。

5 结 论

1) 针对钢绞线现存应力测量的复杂性,对现有研究中双线圈传感器进行优化,将其简化为单线圈传感器,并通过理论推导建立了磁、电、力理论模型,提出了基于逆磁致伸缩效应的无励磁钢绞线现存应力检测方法。

2) 通过有限元仿真分析,建立了单层螺旋管模型模拟实际线圈,在一定的激励电流下,收集并分析了不同钢绞线应力的仿真结果,验证了电感变化表征钢绞线现存应力状态方法的可行性。

3) 针对试验研究采集的钢绞线加载卸载循环中电感的变化值进行分析,表明统一荷载状态下的电感值具有较高的测量重复性,电感值随荷载变化显著呈函数关系,且函数拟合优度 R^2 均大于 0.99,且当自感线圈的有效磁路长度增加时,检测灵敏度也随之增加,可以通过适当增加有效磁路长度来增加检测灵敏度。

4) 用标定公式进行钢绞线现存应力测试,加载过程中与实际加载值的相对最大偏差为 3%,卸载过程中与实际卸载值的相对最大偏差为 4%,试验误差较小,均满足工程需要。

后续的研究工作将以自感线圈系统的温度稳定性和抗干扰能力为重点,进一步提高该钢绞线现存应力测量

方法的准确性与工程适用性。

参考文献

- [1] 方志,汪剑. 预应力混凝土箱梁桥竖向预应力损失的实测与分析[J]. 土木工程学报, 2006(5):78-84.
FANG ZH, WANG J. Measure and analysis of vertical prestress loss of prestressed concrete box girder bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2006(5): 78-84.
- [2] BYMASTER J C, DANG C N, FLOYD R W, et al. Prestress losses in pretensioned concrete beams cast with lightweight self-consolidating concrete [J]. Structures, 2015, 2:50-57.
- [3] SCHAJER G S. Advances in hole-drilling residual stress measurements [J]. Experimental Mechanics, 2010, 50(2):159-168.
- [4] 刘杰,王海龙,张志国,等. 预应力混凝土梁精细化仿真分析关键问题研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(5):34-40.
LIU J, WANG H L, ZHANG ZH G, et al. Research on key problems of refined simulation analysis of prestressed concrete beams [J]. China Railway Science, 2016, 37(5): 34-40
- [5] 付丹,郭红仙,程晓辉,等. 预应力锚索工作应力的检测方法——拉脱法的检测机制和试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8):2247-2252.
FU D, GUO H X, CHENG X H, et al. Detection method of working stress of prestressed anchor cable——Detection mechanism and experimental study of pull-off method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2247-2252.
- [6] BARTOLI I, SALAMONE S, PHILLIPS R, et al. Monitoring prestress level in seven wire prestressing tendons by inter wire ultrasonic wave propagation [J]. Advances in Science and Technology, 2008, 56: 200-205.

- [7] 张闯, 刘成立, 刘素贞, 等. 基于电磁加载的铝板应力超声检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 169-177.
ZHANG CH, LIU CH L, LIU S ZH, et al. Ultrasonic stress detection of aluminum plate based on Electromagnetic Loading [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 169-177.
- [8] 孙朝明, 王增勇, 李建文, 等. 声弹效应测量螺栓轴向应力的有限元计算分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 164-171.
SUN CH M, WANG Z Y, LI J W, et al. Finite element analysis of the measurement of bolt axial stress by acoustic elastic effect [J]. Vibration and Impact, 2019, 38(13): 164-171
- [9] BENJAMIN V P, DINESH K R, RAJU M, et al. Implementation of interrogation systems for fiber Bragg grating sensors [J]. Photonic Sensors, 2013, 3(3): 283-288.
- [10] 王珍珍, 周智, 王佳钰. 预应力碳纤维复材板加固桥梁短期预应力损失监测[J]. 工业建筑, 2019, 49(4): 180-186.
WANG ZH ZH, ZHOU ZH, WANG J Y. Monitoring of short-term prestress loss of bridge strengthened by prestressed carbon fiber composite board [J]. Industrial Building, 2019, 49(4): 180-186.
- [11] 卜建清, 王海云. PRC 简支梁桥有效预应力识别的 BP 神经网络方法[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12): 154-159.
BU J Q, WANG H Y. BP neural network method for effective prestress identification of PRC simply supported beam bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12): 154-159.
- [12] 石延平, 刘成文, 张永忠. 一种差动压磁式扭矩传感器的研究与设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(5): 508-511, 519.
SHI Y P, LIU CH W, ZHANG Y ZH. Research and design of a differential pressure magnetic torque sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(5): 508-511, 519.
- [13] 陈伟民, 姜建山, 章鹏, 等. 钢缆索力磁性传感理论模型与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 794-799.
CHEN W M, JIANG J SH, ZHANG P, et al. Theoretical model and experimental study of cable cable magnetic sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 794-799.
- [14] 唐德东, 黄尚廉, 陈伟民, 等. 旁路励磁的磁弹性索力传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(7): 1159-1163.

TANG D D, HUANG SH L, CHEN W M, et al. Research on magnetoelastic cable force sensor with bypass excitation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(7): 1159-1163.

- [15] TANG D D, HUANG SH L, CHEN W M, et al. Study of a steel strand tension sensor with difference single bypass excitation structure based on the magneto-elastic effect [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17: 501-505.
- [16] 章鹏, 刘琳, 陈伟民. 磁性应力监测中力磁耦合特征及关键影响因素分析[J]. 物理学报, 2013, 62(17): 454-462.
ZHANG P, LIU L, CHEN W M. Analysis of the coupling characteristics and key influencing factors in magnetic stress monitoring [J]. Journal of physics, 2013, 62(17): 454-462.
- [17] KWAKYE S, BAEUMNER A. An embedded system for portable electrochemical detection [J]. Sensors and Actuators B (Chemical), 2007, 123(1): 336-343.
- [18] LIU G F, FAN R H, ZHANG Z D, et al. Magnetic properties and special morphology of barium ferrite via electrospinning [J]. Rare Metals, 2017, 36(2): 113-117.
- [19] LIU S, YU G H, YANG M Y, et al. Co/Pt multilayer-based pseudo spin valves with perpendicular magnetic anisotropy [J]. Rare Metals, 2014, 33(6): 646-651.

作者简介



陈静雯, 2017年于重庆交通大学获得学士学位, 现为重庆交通大学在读硕士, 主要研究方向为桥梁健康监测与检测。

E-mail: jwchen@mails.cqjtu.edu.cn

Chen Jingwen received her B.Sc. degree from Chongqing Jiaotong University in 2017. Now, she is a M.Sc. candidate in Chongqing Jiaotong University. Her main research interests include bridge health monitoring and detection.



周建庭(通信作者), 1993年和1996年分别于重庆交通大学获得学士和硕士学位, 2005年于重庆大学获得博士学位。现为重庆交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为结构安全监测、评价与加固。

E-mail: jtzhou@cqjtu.edu.cn

Zhou Jianting (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degree both from Chongqing Jiaotong University in 1993 and 1996, respectively, and received his Ph.D. degree from Chongqing University in 2005. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Chongqing Jiaotong University. His main research interests include structure safety monitoring, evaluation and reinforcement.