

文章编号 1004-924X(2009)03-0563-07

旁路励磁的钢缆索索力传感器

姜建山^{1,2}, 黄尚廉¹, 陈伟民¹, 唐德东³

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆交通大学 信息科学与工程学院, 重庆 400074;

3. 重庆科技学院 电子信息工程学院, 重庆 401331)

摘要:基于钢缆索逆磁致伸缩索力测量原理, 讨论了一种旁路励磁的索力传感器。用磁导分析法对磁路做了详细的推导, 结果表明可通过检测感应线圈的感应电压反映材料所受的外力, 传感器输出与外力信号本身的变化、感应线圈的匝数、材料截面积、外激励磁化场及该磁场下的材料磁导率有关。在外力缓慢变化的情况下, 可通过求感应积分电压得到外力。从激励磁化方式、参考工作点的选取、传感器的尺寸设计原则等 3 个方面做了讨论, 确定了传感器的参数。最后, 利用万能拉力机对该种结构的传感器做了拉力模拟实验, 实验结果表明, 旁路励磁的传感器测量灵敏度达到 1.6 mV/kN, 磁路分析与参数设计比较合理, 可用于钢缆索的索力测量。

关键词:索力传感器; 钢缆索索力; 逆磁致伸缩效应; 磁路; 参数设计

中图分类号: TP212.12 **文献标识码:** A

Cable tension sensor with bypass excitation

JIANG Jian-shan^{1,2}, HUANG Shang-lian¹, CHEN Wei-min¹, TANG De-dong³

(1. Key Laboratory for Opto-electronic Technology & System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Information Science and Engineering College of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of Electronic & Information Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: A cable tension sensor with bypass excitation structure is proposed based on Villari effect principle of cable. Magnetic circuit is deeply analyzed by calculating magnetic conductance, the cable tension stress can be obtained by measuring inductive voltage in inductive loops. The sensor output may be determined by stress changing, inductive loop denseness, magnetic field and magnetic permeability. In addition, magnetization method, magnetic field intensity and sensor structure sizes are analyzed to determine the parameters of the cable sensors. Finally, a experimental system is developed, and the pulling tension experiment is carried out. The experimental result indicates that sensor sensitivity is up to 1.6 mV/kN, which shows that the magnetic circuit structure and parameter design of proposed sensor are feasible and suitable for cable tension measurement.

Key words: tension sensor; cable tension; Villari effect; magnetic circuit; parameter design

收稿日期: 2008-05-29; 修订日期: 2008-07-10.

基金项目: 重庆市科技攻关项目 (No. 2008AC2009); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA04Z433)

1 引言

基于逆磁致伸缩效应的电磁测量方法是将钢缆索材料本身作为传感器的铁芯,在外部穿套线圈并利用钢缆索自身的磁特性与其所受张力之间的内在关系,通过检测感应线圈电压来实现钢缆索索力测量的一种方法。目前国内外对基于逆磁致伸缩的索力传感器的研究还是以套筒式磁路结构和感应测量线圈的铁芯,这给它在实际推广应用中带来很多不便。主要是作为信号拾取元件的线圈必须套在信号敏感元件的“铁芯”外边,安装时要么将线圈在缆索生产过程中直接穿套进去,要么在已经制作好的钢缆索上直接进行线圈的现场绕制,使用很不方便。

唐德东等人^[4-5]提出的旁路励磁的索力传感器思路,是采用外旁通的线圈组合方式构成传感器,用以解决传感器的安装问题。但该思路中对逆磁致伸缩效应及索力传感的理论没有深入研究,并且假定外激励磁场大小不变的前提条件与实际设计的传感器结构中采用单一线圈的激励方式不能完全匹配。旁路励磁的索力传感器结构本身比较复杂,磁路分析与参数设计非常关键,因此,有必要从钢缆索的逆磁致伸缩及索力测量原理入手,对旁路励磁的钢缆索索力传感器进行更深入的研究。

2 钢缆索逆磁致伸缩索力测量原理

若钢缆索为铁磁材料,在磁场与外力共同作用下,发生磁致伸缩^[6]和逆磁致伸缩过程中主要涉及电磁能和机械能之间的相互转化。在假设钢缆索为单根均匀钢丝,且其索长远大于其截面直径,并且只考虑一维磁场和一维外力情况下,可将钢缆索简化为如图 1 所示的等效模型。若索处于磁场 $H(t)$ 中,同时沿轴向受到外力作用,则其磁致伸缩和逆磁致伸缩效应可分别用下述方程表示^[7]:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_y} + qH(t), \quad (1)$$

$$B(t) = q^1 \sigma(t) + u^\sigma(t)H(t), \quad (2)$$

式中 $\epsilon(t)$ 和 $\sigma(t)$ 分别为材料的轴向应变和材料轴

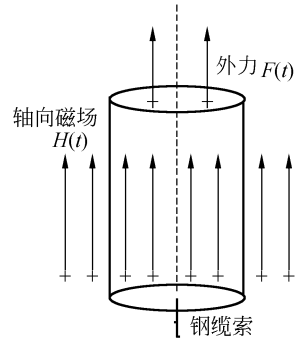


图 1 均匀单根钢丝单元等效受力图

Fig. 1 Equivalent element of single string

向所受外力, E_y 为材料的轴向弹性模量, $B(t)$ 为穿过材料轴向的磁感应强度, $u^\sigma(t)$ 为某一个外力 $\sigma(t)$ 下材料的磁导率, q 称为磁致伸缩应变系数,可用式(3)表示:

$$q = \left. \frac{d\epsilon(t)}{dH(t)} \right|_{\sigma}. \quad (3)$$

q^1 称为压磁系数,可用式(4)表示:

$$q^1 = \left. \frac{dB(t)}{d\sigma(t)} \right|_H. \quad (4)$$

假定二者相等,则:

$$q = \left. \frac{d\epsilon(t)}{dH(t)} \right|_{\sigma} = \left. \frac{dB(t)}{d\sigma(t)} \right|_H = \frac{2\mu_0 M_s \lambda_s}{3K_u}, \quad (5)$$

这里 λ_s 为饱和磁致伸缩系数, M_s 为饱和磁极化强度, K_u 为单轴磁各向异性常数。式(1)表明,材料内部应变 $\epsilon(t)$ 除受外力 $\sigma(t)$ 影响外,还有一部分是因为外磁场强度 $H(t)$ 对材料进行磁化所引起。式(2)表明,磁感应强度 $B(t)$ 除了受外磁场强度 $H(t)$ 影响外,还有一部分是因为外力 $\sigma(t)$ 所引起。将(1)式代入(2)式有:

$$B(t) = \sigma(t) \left(q - \frac{u^\sigma(t)}{qE_y} \right) + qu^\sigma(t)\epsilon(t), \quad (6)$$

对时间求导,并整理有:

$$\frac{dB(t)}{dt} = \left(q - \frac{u^\sigma(t)E_y}{q^2} + \frac{u^\sigma(t)}{qE_y} \right) \frac{d\sigma(t)}{dt} + \left(\frac{\sigma(t)}{E_y q} - \frac{\sigma(t)E_y}{q^2} \right) \frac{du^\sigma(t)}{dt} + u^\sigma(t) \frac{dH(t)}{dt}. \quad (7)$$

由式(7)可知,力学参量 $\sigma(t)$ 、 $\epsilon(t)$ 和磁参量 $H(t)$ 、 $B(t)$ 、 $u^\sigma(t)$ 相互影响。第 1 部分描述由外力所引起的磁感应强度变化,第 2 部分描述在外力为某个常数时,材料内部自身磁状态参量 $u^\sigma(t)$ 的变化所引起的磁感应强度变化,第 3 部分描述由激励磁场 $H(t)$ 变化所引起的磁感应强度变化。

要感知钢缆索材料所受外力,必须通过合适

的方式测量出磁感应强度 $B(t)$ 的变化。为简化研究,可按如下假设:

(1) $H(t)$ 为常数,即采用恒定大小的外部磁场对材料进行磁化,则 $\frac{dH(t)}{dt} = 0$;

(2) $u^\sigma(t)$ 为材料自身磁特性参数——磁导率,与材料本身及材料温度有关,可暂时忽略温度对磁导率的影响。

式(7)可简化成:

$$\frac{dB(t)}{dt} = \left(q - \frac{u^\sigma(t)E_y}{q^2} + \frac{u^\sigma(t)}{qE_y} \right) \frac{d\sigma(t)}{dt} + \left(\frac{\sigma(t)}{E_y q} - \frac{\sigma(t)E_y}{q^2} \right) \frac{du^\sigma(t)}{dt}. \quad (8)$$

在磁测量的各种方法中,一种常用思路是采用合适方式对材料进行磁化,通过缠绕激励和感应线圈,检测感应电压来反映磁感应强度的变化。当然,这里磁感应强度 $B(t)$ 的变化主要是由材料所受外力的变化所引起的。因此,有必要从传感器的磁路结构及激励线圈、感应线圈入手进行分析。

3 旁路励磁索力传感器总体结构

3.1 旁路励磁的索力传感器结构

旁路励磁的索力传感器结构如图2所示。钢缆索作为磁路的一部分,用来传导磁场和感应磁通量的变化。左右两边分别用匝数和截面积都相等的激励线圈1和激励线圈2,二者电流大小相等,方向相反,在磁势上可形成串联结构,有利于提取通过钢缆索的磁通量的变化。匝数为 N_{excit} 的励磁线圈1,2分别产生的磁场经过轭铁和磁极作用在钢缆索上,如图2中的箭头所示。匝数为 N_{induc1} 的感应检测线圈1绕在旁路由导磁材料所

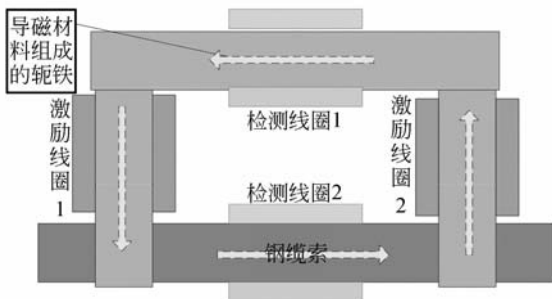


图2 旁路励磁索力传感器

Fig.2 Bypass excitation structure of cable tension sensor

组成的轭铁上,同时,为进一步验证通过钢缆索的磁通量变化,以钢缆索为芯,绕上匝数为 N_{induc2} 的检测线圈2。图中轭铁和磁极均选用恒磁导率的合金材料,这种材料在一定宽的磁场、温度和频率范围内,磁导率基本不变化。

3.2 感应电压与加载外力关系推导

设穿过钢缆索的磁通量为 Φ_1 , 截面积为 S_{cable} , 根据电磁感应定律有:

$$V_{\text{induc2}}(t) = N_{\text{induc2}} \frac{d\Phi_1}{dt} = N_{\text{induc2}} S_{\text{cable}} \frac{dB(t)_{\text{cable}}}{dt}, \quad (9)$$

结合式(8)有:

$$V_{\text{induc2}}(t) = N_{\text{induc2}} S_{\text{cable}} \left[\left(q - \frac{u^\sigma(t)E_y}{q^2} + \frac{u^\sigma(t)}{qE_y} \right) \frac{d\sigma(t)}{dt} + \left(\frac{\sigma(t)}{E_y q} - \frac{\sigma(t)E_y}{q^2} \right) \frac{du^\sigma(t)}{dt} \right]. \quad (10)$$

若外力 $\sigma(t)$ 不是突变信号和交变信号,而是缓变信号,则可通过积分电压反映出来。两边对时间从 t_0 到 t 积分,并整理有:

$$\int_{t_0}^t V_{\text{induc2}} dt = N_{\text{induc2}} S_{\text{cable}} \left(q - \frac{u^\sigma(t)E_y}{q^2} + \frac{u^\sigma(t)}{qE_y} \right) \cdot [\sigma(t) - \sigma(t_0)] + N_{\text{induc2}} S_{\text{cable}} \left(\frac{\sigma(t)}{E_y q} - \frac{\sigma(t)E_y}{q^2} \right) \cdot (\mu_{\text{cable}}(t) - \mu_{\text{cable}}(t_0)), \quad (11)$$

其中, $\sigma(t_0)$ 为加在材料上的预应力,这里为常数,可考虑为0, $\mu_{\text{cable}}(t_0)$ 为初使时刻,某一个预应力 $\sigma(t_0)$ 下的材料磁导率; $\mu_{\text{cable}}(t)$ 为 t 时刻,外力为 $\sigma(t)$ 时的材料磁导率,和式(10)中的 $u^\sigma(t)$ 相等。令

$$V_{\text{integr2}} = \int_{t_0}^t V_{\text{induc2}} dt, \quad (12)$$

则

$$V_{\text{integr2}}(t) = N_{\text{induc2}} S_{\text{cable}} \left(q + \frac{2u^\sigma(t)}{qE_y} - \frac{2E_y u^\sigma(t)}{q^2} \right) \sigma(t) + N_{\text{induc2}} S_{\text{cable}} \left(\frac{E_y}{q^2} - \frac{1}{E_y q} \right) u_{\text{cable}}(t_0) \sigma(t). \quad (13)$$

由上式可知,积分电压 $V_{\text{integr2}}(t)$ 与 $\sigma(t)$ 联系紧密,同时也与材料的磁导率 $\mu_{\text{cable}}(t_0)$ 、 $u^\sigma(t)$ 、感应线圈匝数 N_{induc2} 有关。传感器灵敏度为:

$$S_{\text{sensit}} = N_{\text{induc2}} S_{\text{cable}} \left(q + \frac{2u^\sigma(t)}{qE_y} - \frac{2E_y u^\sigma(t)}{q^2} \right) + N_{\text{induc2}} S_{\text{cable}} \left(\frac{E_y}{q^2} - \frac{1}{E_y q} \right) u_{\text{cable}}(t_0), \quad (14)$$

由式(13)可知,只要求出钢缆索材料的磁导率

$u^\sigma(t)$ 和感应线圈 2 的积分电压 $V_{\text{integr}2}(t)$ 以后,就可得到加载的外力 $\sigma(t)$ 。

4 磁路分析与参数确定

4.1 磁导分析法进行磁路计算

为求磁导率 $u^\sigma(t)$, 对图 2 的磁路进行分析。

图 2 简化后的等效磁路模型如图 3 所示。

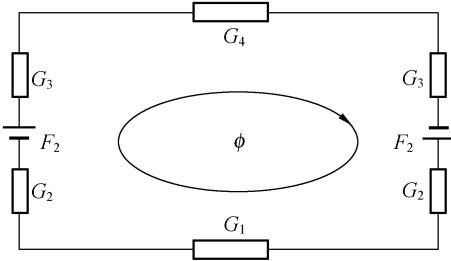


图 3 旁路励磁索力传感器磁路模型

Fig. 3 Magnetic circuit model of bypass excitation cable tension sensor

根据磁路的欧姆定律:

$$2N_{\text{excit}}I = \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i}{G_i}, \quad (15)$$

其中, N_{excit} 为激励线圈的匝数, I 为激励电流, Φ_i 和 G_i 分别为磁路中各个分段的磁通和磁导, G_1 为钢缆索的磁导, G_2 为励磁线圈的铁芯磁导(即磁极磁导), G_3 为气隙磁导, G_4 为轭铁磁导, 下面分别计算它们的磁导:

① 钢缆索的磁导: 设钢缆索的直径为 D_0 , 则:

$$G_1 = \frac{\mu_{\text{cable}} S}{L} = \frac{\pi \mu_{\text{cable}} D_0^2}{4L_6}. \quad (16)$$

② 磁极磁导 G_2 : 它由 2 部分组成, 一部分为与钢缆索连接的磁靴部分, 一部分为激励线圈的铁芯部分。由于它们的形状不同, 分别计算。设磁极的磁靴部分磁导率为 μ_{21} , 形状如图 4 所示:

$$G_{21} = \int \frac{\mu_{21}}{L} ds = \frac{\mu_{21} D_1 L_3}{2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{2}{2L_2 - D_1 \cos \theta} d\theta, \quad (17)$$

设磁极铁芯部分磁导为 μ_{22} , 则磁导 G_{22} 如下:

$$G_{22} = \frac{\pi \mu_{22} D_2^2}{4L_1}, \quad (18)$$

故磁极磁导 G_2 可按下式计算:

$$G_2 = \frac{G_{21} G_{22}}{G_{21} + G_{22}}. \quad (19)$$

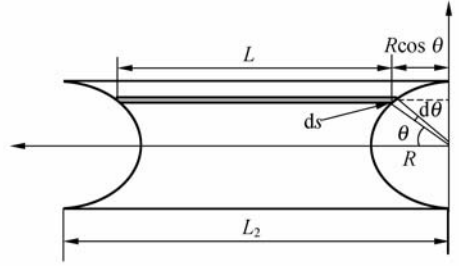


图 4 磁极磁靴的磁导积分示意图

Fig. 4 Magnetic permeability figure of magnetic shoe on magnetic pole

③ 气隙的磁导: 气隙的磁导由两部分组成, 一部分为磁极和钢缆索之间气隙的磁导 G_{31} , 另一部分为磁极与轭铁之间气隙的磁导 G_{32} 。设磁极与索之间的气隙厚度为 δ_1 , 与轭铁之间气隙厚度为 δ_2 , 则:

$$G_3 = 0.077 \mu_0 \delta_1 + \frac{\pi \mu_0 L_3 (D_1 + 2\delta_1)}{2\delta_1} + \frac{\pi \mu_0 L_4 (D_2 + 2\delta_2)}{2\delta_2}, \quad (20)$$

轭铁的磁导:

$$G_4 = \frac{\mu_4 S}{L} = \frac{\mu_4 L_8 L_9}{L_6}, \quad (21)$$

根据图 4, 可假定穿过整个磁回路的各部分磁通相等, 均为 Φ , 即:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_4 = \Phi, \quad (22)$$

则式(15)变为:

$$2N_{\text{excit}}I = \Phi \sum_{i=1}^4 \frac{1}{G_i}, \quad (23)$$

根据电磁感应定律:

$$V_{\text{induct}}(t) = N_{\text{induct}} \frac{d\Phi_4}{dt}, \quad (24)$$

式(24)对时间积分有:

$$\int_{t_0}^t V_{\text{induct}} dt = N_{\text{induct}} (\Phi - \Phi_0), \quad (25)$$

其中, Φ_0 为初始时刻激励电流的磁场穿过感应线圈 1 的磁通, 这里可定为 0, Φ 为 t 时刻穿过感应线圈 1 的磁通。把(16)、(19)、(20)、(21)代入式(24), 并结合式(25)有:

$$\mu_{\text{cable}}(t) = \frac{k_2 \int_{t_0}^t V_{\text{induct}} dt}{2IN_{\text{excit}}N_{\text{induct}} - k_1 \int_{t_0}^t V_{\text{induct}} dt}, \quad (26)$$

这里 k_1, k_2 分别为与构成轭铁和磁极的合金材料磁导率及轭铁、磁极尺寸有关的常数,而与钢缆索无关, N_{excit}, N_{induct} 分别为激励线圈 1 的匝数(也等于激励线圈 2 的匝数)和感应线圈 1 的匝数。所以由检测感应线圈 1 的感应积分电压可求得索的磁导率 $\mu_{cable}(t)$, 从而代入式(13)获得索力。

4.2 传感器的参数设计

传感器相关参数的选取直接影响着传感器的性能。具体而言主要有激励磁化方式、参考工作点的选取和传感器的尺寸设计原则等。

4.2.1 磁化方式的选择

要将一个材料磁化,其方式有永磁磁化、交流磁化和直流磁化。由于钢缆索的特殊性以及应用普遍性,采用永磁磁化的方式不可取。交流磁化不但容易产生集肤效应和涡流,并且磁化深度会随电流频率的增加而减小,考虑到目前工程中常用的钢缆索的直径一般达到数十毫米左右,因此不宜选择交流磁化。直流磁化可分为直流脉动磁化和直流恒定电流磁化。前者在电气实现上比后者简单,一般用于剩余磁场检测法中构件的磁化。根据前面假设,本设计选择直流脉动磁化比较合适。

4.2.2 参考工作点的选取

参考工作点的选取影响到传感器的灵敏度,涉及磁化强度的选择与 $\mu(t_0)$ 的大小。而磁化强度的大小取决于激励线圈产生的电流,一般要求励磁磁化强度的大小要保证磁敏元件能够获取被测特征信号的磁场信息,又要保证有足够的信噪比,基本依据是根据铁磁材料的磁化特性进行。图 5 为某一铁磁材料的磁化特性曲线和磁导率随磁场强度变化的曲线^[8], P_m 为最大磁导率点,

H_{pm} 为对应的磁场强度。磁场强度的选择应在最大磁导率 P_m 附近,大小取决于激励电流的大小和线圈的匝数比。同时,根据铁磁材料的磁化特性,外加励磁磁化强度最好不大于材料的饱和磁化强度,否则,材料的形变就主要体现在体积的伸缩,而不是线性长度的变化上。

4.2.3 传感器的尺寸设计原则

传感器结构如图 2 所示,轭铁和磁极结构在设计时重点考虑以下 3 点:

(1) 磁极夹具的内孔直径 D_1

由于磁极的钢缆索夹具存在加工误差,造成左、右磁极分别和钢缆索接口地方有部分空气间隙,形成一部分磁阻,导致整个磁回路磁通量有部分泄漏,从而减低传感器的灵敏度,因此必须根据索力测量精度所要求的空气隙间距 δ_0 来设计磁极夹具的内孔直径 D_1 。设索的公称直径为 D_0 , 则 D_1 必须满足下式:

$$D_1 = D_0 - 2\delta_0. \quad (27)$$

(2) 轭铁孔的中心距 L_6

由于在线圈的端头处存在磁化过渡区,在此过渡区内磁场是非均匀的,若要对钢缆索的磁参量进行测量,就必须使钢缆索内的磁场是均匀磁场。但非均匀磁场总是存在的,因此必须使均匀磁场的长度 L_{mm} 远大于非均匀磁场的长度 L_{ms} 。这样在满足线圈骨架内置要求条件下,轭铁孔的中心距 L_6 必须满足下式:

$$L_6 \geq 2L_{ms} + L_{mm}. \quad (28)$$

(3) 轭铁和磁极的横截面积 A_2, A_3

为了使钢缆索达到足够的磁化强度,且保证整个磁路的漏磁场尽量小,其尺寸设计保守原则是磁路中任何部件的横截面积不能小于钢缆索横截面积。

5 传感器原理性实验

5.1 实验方案

实验方案如图 6 所示。通过可调变压器和直流整流模块,将 220 V 的交流电转换为 38 V 的电压,作为功率放大器的工作电压。而信号发生器产生一定频率的脉冲信号经功率放大器后驱动绝缘栅双极晶体管,从而产生可控的近视恒流源,分正反两个方向分别作用在索力传感器的激励线圈 1 和激励线圈 2 上,通过电磁感应,在感应线圈 1

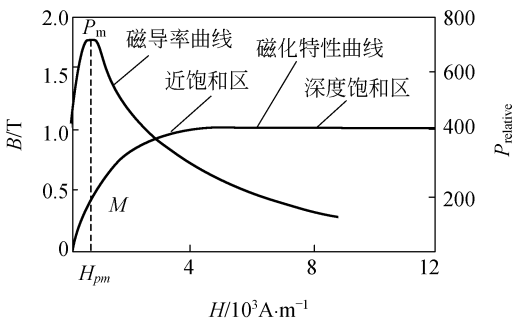


图 5 铁磁材料典型磁化特性曲线

Fig. 5 Magnetization curve of typical ferromagnetic material

和感应线圈 2 上将分别能检测到相应的感应电压。结合式(26)求出钢缆索的磁导率 $\mu_{\text{cable}}(t)$, 代入(13)式, 结合感应线圈 1 的积分电压, 从而求得索力。

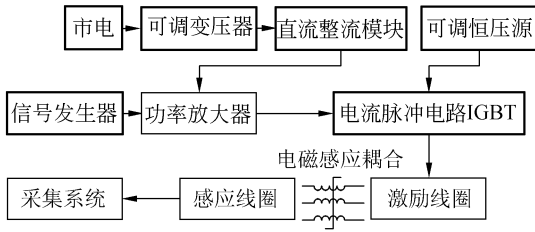


图 6 实现方案框图

Fig. 6 System scheme figure

5.2 实验过程

以直径为 12 mm 的钢缆索作为测量对象, 在 20 kN(精度为 0.05 kN)的拉力试验机上做拉力模拟实验, 拉力选择范围为 0~19 kN, 工作电压

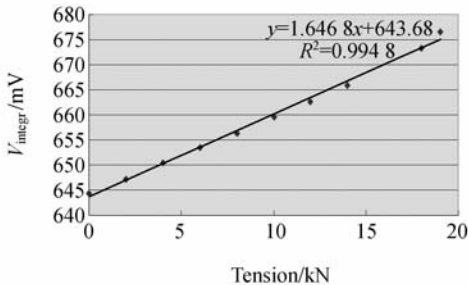


图 7 感应线圈 2 感应积分电压与拉力关系曲线

Fig. 7 Curve between inductive integral voltage and cable tension stress

参考文献:

- [1] WANG M L, CHEN Z. Magneto-elastic permeability measurement for stress monitoring in steel tendons and cables[C]. *Proc. of the SPIE 7th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, Health Monitoring of the Highway Transportation Infrastructure*, 2000, 3995: 492-500.
- [2] SUMITRO S, JAROSEVIC A, WANG M L. Elasto-Magnetic Sensor Utilization on Steel Cable Stress Measurement[C]. *The First fib Congress, Concrete Structures in the 21th Century, Osaka*, 2002, Session 15: 79-86.

为 8 V, 环境温度为 23 °C。用 Agilent 公司的函数信号发生器产生一定幅度和占空比的脉冲信号, 频率为 500 Hz。数据采集与处理设备为北京京南航数据技术有限公司生产的动态信号处理系统。按图 7 的实验方案对旁路励磁索力传感器进行了拉力试验。把测量得到的感应积分电压与加载在传感器上的外力对应关系做了线性拟合, 如图 7 所示。结果表明: 感应线圈的积分电压与拉力基本呈线性关系, 传感器测量灵敏度达到 1.6 mV/kN。因此, 基于逆磁致伸缩的旁路励磁索力传感器用于索力测量是可行的。

6 结 论

基于钢缆索逆磁致伸缩索力传感基本原理, 针对一种旁路励磁的索力传感器磁路, 用磁导分析法做了详细的推导与磁路分析, 确定了传感器的参数, 完成了拉力模拟试验, 结果表明:

(1) 可通过检测感应线圈的感应电压反映出材料所受的拉力, 左右对称激励的旁路式索力传感器磁路, 在满足磁损耗比较小的情况下, 可以通过测量感应积分电压来反映缓变的拉力信号。

(2) 该传感器能有效地克服套筒式传感器针对已建结构安装和维护比较困难的难题, 可满足索力的在线监测要求。

由于整个拉力实验是在恒定温度条件和缓变拉力信号下完成的, 没有分析温度对传感器性能的影响, 以及冲击力或突变力情况下的实验结果, 因此, 温度影响和冲击力或突变力情况下的传感器拉力实验是今后要解决的两个关键问题。

- [3] 唐德东, 黄尚廉, 陈伟民, 等. 基于磁弹效应的钢缆索索力测量中励磁磁路研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(12): 1695-1699.
TANG D D, HUANG SH L, CHEN W M, 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. (in Chinese)
- [4] 唐德东, 黄尚廉, 姜建山, 等. 基于磁弹效应的温度补偿型单旁路励磁索力传感器研究[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(6): 1240-1244.
TANG D D, HUANG SH L, JIANG J SH, et al. Study on cable tension sensor with temperature

compensation by single bypass excitation based on magneto-elastic effect [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20 (6): 1240-1244. (in Chinese)

- [5] 唐德东,黄尚廉,陈伟民,等.旁路励磁的磁弹性传感器研究[J].仪器仪表学报,2007,28(7):1159-1161.

TANG D D, HUANG SH L, CHEN W M, *et al.*. Research on cable tension sensor based on magneto-elastic effect with bypass excitation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28 (7): 1159-1161. (in Chinese)

- [6] 钟文定,铁磁学(中册)[M].北京:科学出版社,1987. ZHONG W D. *Ferromagnetic Subject* [M]. Beijing;

Press of Science 1987. (in Chinese)

- [7] 杨大智.智能材料与智能系统[M].天津:天津大学出版社,2001.

YANG D ZH. *Smart Materials and Smart System* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001. (in Chinese)

- [8] 姜建山,黄尚廉,陈伟民,等.基于磁弹效应的索力传感器原理与实验研究[J].现代科学仪器,2008,4(2):10-13.

JIANG J SH, HUANG SH L, CHEN W M, *et al.*. Principle and experiment research of magnetic-elastic stress sensor based on magneto-elastic effect [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2008, 4 (2): 10-13. (in Chinese)

作者简介:



姜建山(1977—),男,湖北人,博士,主要从事光纤传感、信号处理及智能结构健康监测等方面的研究。E-mail: jiangjianshan@163.com

陈伟民(1955—),男,云南人,重庆大学教授,博士生导师,主要从事传感技术、信号处理、结构状态监测等方面的研究。E-mail:wmchen@cqu.edu.cn

唐德东(1970—),男,博士,1998年于四川大学获硕士学位,2007年于重庆大学获博士学位,现为重庆科技学院教师,主要从事智能传感技术、现代测试技术及仪器、石油装备健康监测等方面的研究。E-mail: tddsohu@sohu.com

导师简介:

黄尚廉(1936—2008),男,四川人,中国工程院院士,重庆大学教授,博士生导师,主要从事光学工程、仪器科学与技术等方面的研究。E-mail: slhuang@cqu.edu.cn

● 下期预告

基于继承与优化算法的无序点云拼接技术

孟凡文^{1,2}, 吴禄慎¹

(1. 南昌大学机电工程学院, 江西南昌 330031;

2. 济宁职业技术学院机电工程系, 山东济宁 272037)

点云拼接技术的核心是建立两个待拼接点云之间的对应关系。提出继承与优化算法进行点云的精确拼接,阐述了算法原理,通过建模获取拼接过程中的旋转和平移参数,提出并分析了拼接的实现过程。采用光栅投射式三维扫描仪获取某型号汽车防雨板的6组点云数据,用提出的算法进行点云拼接,利用多分辨率层次精度分析法对拼接结果进行误差分析,与最临近点迭代法在拼接精度、收敛速度和耗时上进行了比较。实验结果表明:继承与优化算法可实现海量无序点云的精确拼接,拼接的标准偏差小于0.10 mm,两点云对接时间小于2 s,所需迭代次数比ICP方法减少5次以上。