

包络式磁弹索力传感器设计及钢缆索应力试验研究

郭 涛

(国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241000)

[摘 要] 基于磁弹法的磁弹传感器因其结构简单、输出功率大、使用寿命长、动态响应好以及过载保护能力强等优点, 广泛应用于在役桥梁索的索力测量与监测, 可有效预防循环应力产生疲劳失效。为了解决现有的套筒式和旁路式磁弹传感器存在的一致性差、标定难度大、磁化不完全以及存在耦合效应的问题, 提出一种新型包络式磁弹传感器, 采用基于柔性印刷电路板的检测线圈, 贴合效果更好。开展钢缆索应力测量试验, 结果表明: 全包络式磁弹传感器索力线性度、灵敏度得到极大提高, 且磁化效果更好。柔性印刷电路板的检测线圈设计, 较好地实现了磁弹传感器的可重构设计, 便于安装拆卸。

[关键词] 钢缆索; 磁弹索力传感器; 应力; 柔性印刷电路板

[中图分类号] TG115.284

[文献标志码] A

doi: 10.3969/j.issn.1673-6214.2019.06.004

[文章编号] 1673-6214(2019)06-0372-06

Design of Enveloping Magneto-elastic Cable Force Sensor and Stress Test of Steel Cable

GUO Tao

(State Owned Wuhu Machinery Factory, Anhui Wuhu 241000, China)

Abstract: The magneto-elastic force sensor based on magneto-elastic effect is widely used in cable force measurement and monitoring of in-service bridge cables due to its simple structure, large output power, long service life, good dynamic response and strong overload protection. In order to solve the problems of poor consistency, difficult calibration, incomplete magnetization and coupling effect of the existing sleeve type and bypass type magneto-elastic sensors, a novel envelope type magnetic elastic sensor is proposed, which is based on flexibility. The detection coil of the printed circuit board has a better bonding effect. The steel cable stress measurement test is carried out. The results show that the cable linearity and sensitivity of the full-envelope magneto-elastic sensor are greatly improved and the magnetization effect is better. Further, the detection coil design of the flexible printed circuit board better realizes the reconfigurable design of the magnetic elastic sensor, which is convenient for installation and disassembly.

Key words: steel cable; magneto-elastic cable force sensor; stress; flexible printed circuit board

0 引言

近年来, 钢缆索作为一种柔性的承力构件, 具有抗拉性能好、抗疲劳强度高以及抗冲击性能强等特点, 已是桥梁建设、起重机和缆车等各大工程设备及领域的主要受力和传力部件。基于磁弹法的磁弹传感器因其结构简单、输出功率大、使用寿命长、动态响应好以及过载保护能力强等优点, 已广泛应用于在役桥梁索的索力测量与监测^[1-3]。套筒式磁弹传感器最初是由 Wang M L 等基于增

量磁导率测量索力的原理将钢缆索作为线圈的铁芯, 而提出了一种嵌套式双线圈磁弹传感器^[4]。该传感器应用于索力测量时, 具有精度高、实时响应快、制造维护成本低的优点^[5]。针对 Wang M L 等提出的经典索力测量模型, 唐德东等^[6-7]进一步开展了大量的研究工作, 设计及并提出了旁路式励磁结构的磁弹传感器以及差动式温度补偿技术, 减小了温度对测量结果的影响。

套筒式磁弹传感器的双线圈结构, 导致其在工程应用时只适用于在建桥梁索的索力测量与监测^[8-9]。对于已建桥梁索只能采取现场绕制线圈的

方式,且这种绕制方式一致性差,准确标定难度大,易导致测量结果产生较大误差^[10-11]。单旁路式励磁磁弹传感器受限于其结构,在工程应用中不适用于非圆形钢缆索,存在对钢缆索不完全磁化的问题。而双旁路式励磁线圈和检测线圈共用骨架,两者间存在耦合效应,影响检测精度^[12]。

为此,本研究针对现有的套筒式和旁路式磁弹传感器的不足,提出一种新型的全包络式磁弹传感器。并以直径 17 mm 的镀锌钢缆索为试验对象,开展钢缆索应力测量试验,从试验的角度验证磁弹传感器进行索力测量的可行性,为可重构式磁弹传感器的研制提供研究基础。

1 磁弹法测量原理

将钢缆索置于一定强度的磁场环境中,钢缆索将被磁化,磁化后的磁导率随钢缆的受力状态变化而变化。根据 Joule 效应,可以推导出在某一温度条件下,钢缆索所受拉力 F 与其磁导率变化 $\Delta\mu$ 的关系为:

$$F = AE \frac{3\lambda_s M_s}{2K_u} \Delta\mu H \sin^2 \theta_0 \cos \theta_0 \quad (1)$$

式中: A 为钢缆索的截面积; E 为材料的弹性模量; 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 为磁场与易磁化轴间的角度; H 为磁化磁场强度。

如图 1 所示的铁磁性材料的磁滞回线,增量磁导率 $\Delta\mu$ 定义为:

$$\Delta\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (2)$$

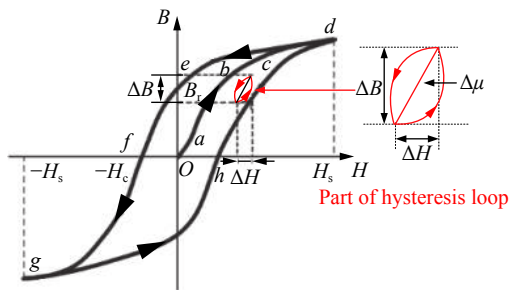


图 1 铁磁性材料的磁滞回线

Fig.1 Hysteresis loop of ferromagnetic material

则由式(1)可知,当外部磁场强度 H 确定时,索力 F 与增量磁导率 $\Delta\mu$ 之间呈线性关系。

为了测量缆索的增量磁导率 $\Delta\mu$, 依据 Wang

ML 提出的磁弹索力测量经典模型(图 2),将感应线圈安装于钢缆索的轴线上,匝数为 N ,通过感应线圈的激励磁场为 $H(t)$ 。根据法拉第电磁感应定律,感应线圈中的感应电压为:

$$V_{in}(t) = - \frac{d\phi(t)}{dt} = - \left[N A_f \frac{dB(t)}{dt} + N (A_0 - A_f) \mu_0 \frac{dH(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

经过时间 Δt_1 , 通过感应线圈的磁通量变化为:

$$\Delta\phi_1 = N [A_f \Delta B + (A_0 - A_f) \mu_0 \Delta H] \quad (4)$$

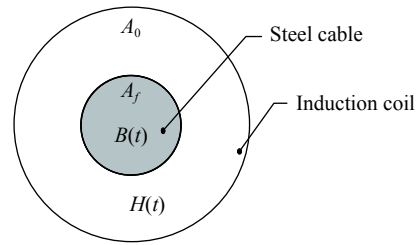


图 2 索力测量经典模型

Fig.2 Classic model of cable force measurement

当感应线圈中无钢缆索存在,其他条件均不变时,经过时间 Δt_2 , 通过感应线圈的磁通量变化为:

$$\Delta\phi_2 = N [A_0 \mu_0 \Delta H] \quad (5)$$

用 $\Delta\phi_1$ 除以 $\Delta\phi_2$, 可得

$$\frac{\Delta\phi_1}{\Delta\phi_2} = \frac{1}{\mu} \frac{A_f}{A_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} + 1 - \frac{A_f}{A_0} \quad (6)$$

由式(6)整理可得增量磁导率 $\Delta\mu$:

$$\Delta\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \mu_0 \left[1 + \frac{A_f}{A_0} \left(\frac{\Delta\phi_1}{\Delta\phi_2} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

式中: $\Delta\phi_1 = \int_{\Delta t_1} V_{in}(t) dt$; $\Delta\phi_2 = \int_{\Delta t_2} V_{in}(t) dt$ 。

将式(6)、(7)代入(1)式,可得

$$F = EA \frac{3\lambda_s M_s}{2K_u} \mu_0 H_0 \sin^2 \theta \cos \theta \left[1 + \frac{A_f}{A_0} \left(\frac{\Delta\phi_1}{\Delta\phi_2} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

式中, H_0 为激励磁场强度,也即磁弹传感器的工作点,一旦选定即为定值。故除了 $\Delta\phi_1$ 为变量外,其余参数均为常数。由此可见,钢缆索的应力与磁通量变化即感应信号的积分值成线性关系,如能获得该积分值,即可换算成索力大小。

2 磁弹传感器设计

本研究所提出的包络式磁弹传感器分为全包络式和半包络式磁弹传感器,是针对套筒式和旁路式磁弹传感器而设计的,以解决传感器安装困

难和磁化不均匀的问题。其设计主要包括励磁结构和检测线圈 2 个部分。

2.1 励磁结构设计

图 3 为半包络式磁弹传感器励磁结构设计图和示意图。其整体呈现半圆柱体,内部为空心腔体,励磁线圈绕制在空心腔体上,将其安装在钢缆索上后会将钢缆索半包裹在传感器内部。导磁轭铁内磁场的分布与磁轭的形状相关。从结构上分析可知,励磁线圈产生的磁化场在半圆柱体型导磁轭铁内呈现半圆周分布,并通过磁极进入钢缆索对其进行半圆周上的磁化。相较于单旁路式磁弹传感器垂直方式的磁化方式,半圆周分布的磁化场在进入钢缆索后分布更为均匀,磁化更为完整,如图 4 所示。

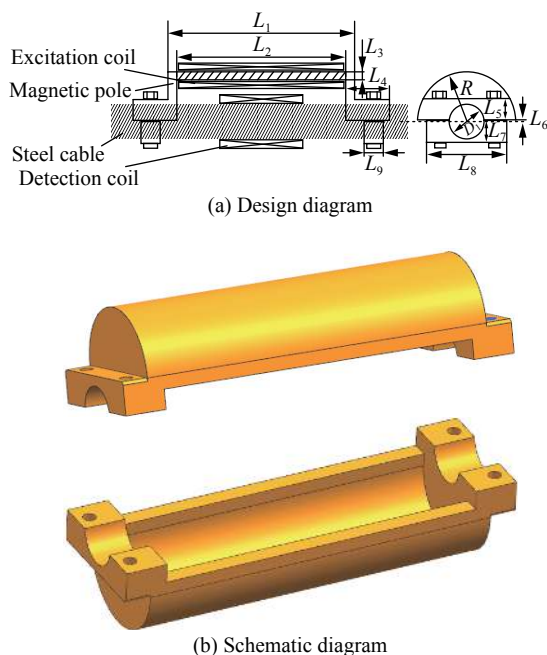


图 3 半包络式磁弹传感器

Fig.3 Semi-envelope magnetoelastic sensor

将 2 个完全相同的半包络式磁弹传感器对称放置,相互连接安装在钢缆索上,即可组成全包络式磁弹传感器,如图 5 所示。其特点在于,安装后的传感器将钢缆索完全包裹在内,使得进入钢缆索的磁通量为 2 个对称放置磁轭中磁通量的叠加,磁化场更强,并且轴向分布的磁化场对钢缆索实现整个圆周上的磁化,实现类似套筒式磁弹传感器的磁化效果,如图 6 所示。同时传感器将钢缆索和检测线圈包裹在空心腔体内,能起到减少磁回路的漏磁场以及屏蔽外部环境磁场干扰的作用。

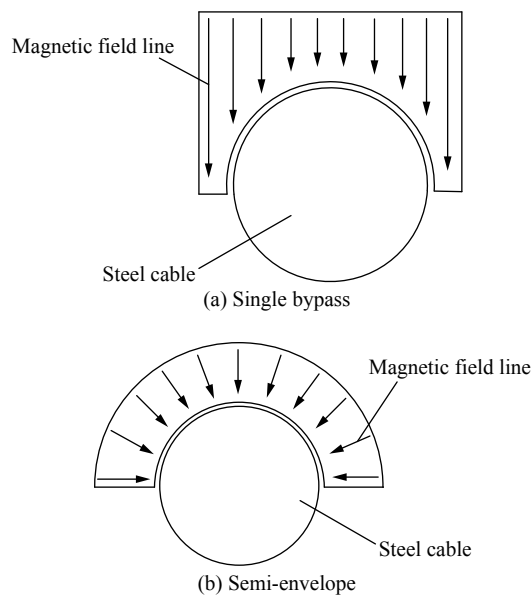


图 4 传感器轴面磁力线分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of the magnetic field line distribution of the sensor shaft

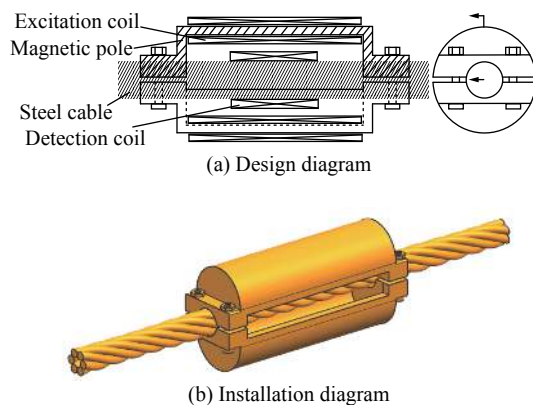


图 5 全包络式磁弹传感器

Fig.5 Full-envelope magnetoelastic sensor

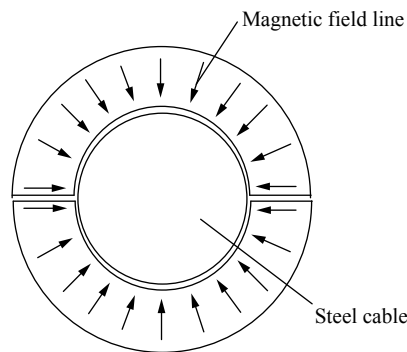


图 6 全包络式磁弹传感器轴面磁力线分布示意图

Fig.6 Schematic diagram of the magnetic field line distribution of the full-envelope magnetoelastic sensor

为保证整个励磁回路的漏磁场最小,且使得磁化场能够有效作用于钢缆索上,对励磁结构关键部位应当特别设计。选用切削性能好、高磁导率、低矫顽力、剩磁很小的工业纯铁制作导磁轭铁,以保证磁路最佳的磁化效果。为极大地减少磁极与钢缆索连接处的漏磁场,励磁结构尺寸的设计原则是导磁轭铁任一部位的横截面积均不小于钢缆索的横截面积。并将磁轭各拐角处加工成倒角,以减少各拐角处磁极的漏磁场。由于钢缆索在受力过程中产生形变,轴向直径会有所减小,为保证磁极与钢缆索之间始终紧密连接,直径 D_1 应稍小于钢缆索直径 D_0 。

以直径为 17 mm 的镀锌钢缆索为研究对象,基于励磁结构的尺寸设计规则,所设计的包络式磁弹传感器励磁结构(图 3a)各部分尺寸见表 1,实物图如图 7 所示。

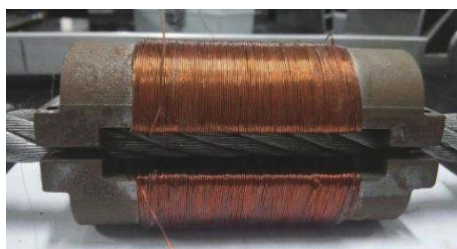
表 1 励磁结构各部分尺寸

Table 1 Dimensional dimensions of the excitation structure

Parameters	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	R
Size/mm	110	90	5	20	10	2	12	38	8	30



(a) Semi-envelope



(b) Full-envelope

图 7 励磁结构实物图

Fig.7 Physical map of excitation structure

2.2 检测线圈设计

传统套筒式和旁路式磁弹传感器的检测线圈都是将漆包线绕制在支撑骨架或者磁极上,人工绕制存在难以标定、影响测量精度的问题。本研究使用柔性印刷电路板(Flexible Printed Circuit, FPC)设计制作了一种柔性线圈,其设计思路是将原本平行排列的导线卷曲形成通电螺线管形状,

如图 8 所示,使用专用的 FPC 接口将 FFC 首尾相连,就可达到套筒式磁弹传感器检测线圈的安装效果。

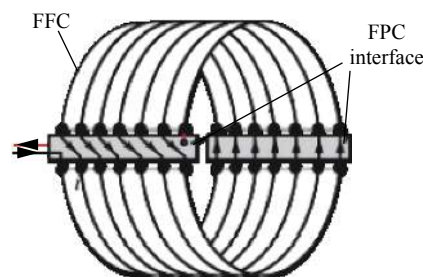


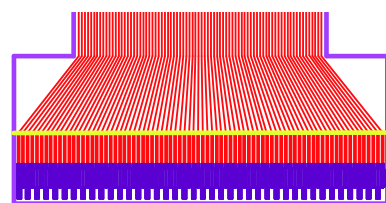
图 8 柔性线圈结构设计示意图

Fig.8 Schematic diagram of flexible coil

柔性线圈的 PCB 设计图如图 9 所示。传感器整体呈 U 型,中间宽度为 12 mm,内部分布多达 59 匝线距为 0.1 mm 的线圈,将电路板两端设计成线距为 0.5 mm 的接头,用以匹配通用 FFC 连接器(图 10)。



(a) PCB layout



(b) PCB pin diagram

图 9 柔性线圈 PCB 设计图

Fig.9 PCB design of flexible coil

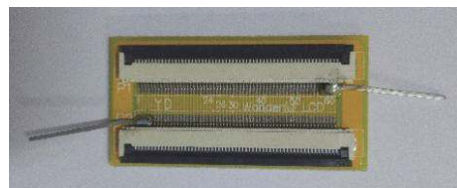
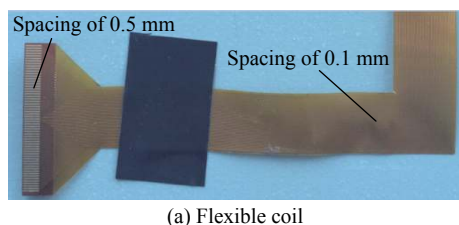


图 10 通用 FFC 连接器

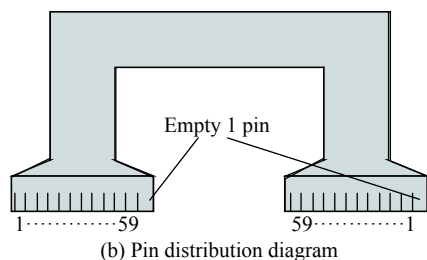
Fig.10 Universal FFC connector

柔性线圈如图 11 所示,在传感器实物图中,其两端接头垂直中段线圈可以通过多层绕制感应线圈以提高线圈匝数。将 FPC 双侧端口空出 1PIN,采用 60PIN 脚 FFC 延长板,即可在不专门设计错位连接的 FFC 接口基础上,使用平行的连接电路板实现螺线管式错位相连。测量时,将传感

器缠绕于线圈骨架上,扣合连接器即可,如图 12 所示。



(a) Flexible coil



(b) Pin distribution diagram

图 11 柔性线圈实物图

Fig.11 Physical map of flexible coil

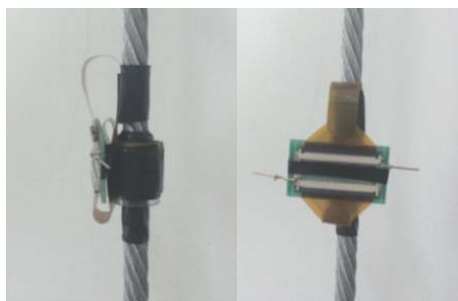


图 12 柔性线圈安装图

Fig.12 Installation diagram of flexible coil

3 钢缆索应力测量试验

3.1 试验方案

基于磁弹效应测量钢缆索应力的检测原理可知,钢缆索的索力测量需要将钢缆索内磁通量的变化转化为感应线圈的电信号。磁弹索力测量系统如图 13 所示,信号发生器产生正负双向激励的方波,经功率放大器放大后加载在励磁结构上,以驱动励磁线圈产生足够强的磁化场磁化钢缆索。检测线圈通过拾取钢缆索内磁通量的变化而产生感应电压,经信号调理电路初步放大滤波后传输到计算机中,再由相关的数据采集软件和信号处理程序将所得的信号根据公式转换为索力信息。

3.2 索力测量试验

为验证包络式磁弹传感器进行索力测量的可行性和准确性,开展钢缆索应力测量试验。试验

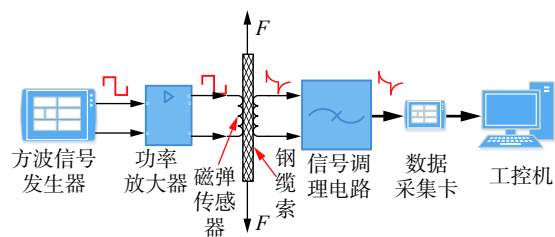


图 13 磁弹索力测量系统整体结构图

Fig.13 Measurement system for magnetoelastic cable force

使用直径为 17 mm 的镀锌钢缆索,励磁线圈匝数 N 为 340,采用峰峰值 V_{P-P} 为 10 V、频率为 2.5 Hz 正负双向激励的方波信号作为激励信号,在电子万能拉伸试验机上进行钢缆索拉伸试验。应力测试范围为 18~45 kN,采样间隔为 3 kN。测量系统采样时拉伸机低速保载,每次采样时间为 30 s,采样频率为 10 kHz,每组试验重复 3 次。试验环境温度为 25 ℃。测量前对缆索进行预应力拉伸试验,以消除应力所致的剩磁对测量结果的影响。2 种传感器试验测量结果见表 2,分别对试验结果的均值做一次线性拟合,绘制成曲线如图 14 所示。

分别计算半包络式和全包络式磁弹传感器测量结果线性拟合曲线的灵敏度和线性度。分析可知:半包络式磁弹传感器索力测量的灵敏度为 1.390 mV/kN,线性度为 0.987,说明所设计的半包络式励磁结构和柔性线圈适用于钢缆索应力测量,且检测性能优越,精度较高;全包络式磁弹传感器索力测量灵敏度为 3.349 mV/kN,线性度达到了 0.985,也适用于索力测量,且相较于前者,线性度相差无几,但灵敏度提高了 1.4 倍,磁化效果更好,说明要达到同样的检测精度,后者只需较小的激励信号即可实现。

上述 2 种新型可重构式磁弹传感器性能的对比分析,表明包络式磁弹传感器性能最优、精度最高,且有效解决了现有磁弹传感器安装拆卸困难的问题。

4 结论

1)半包络式磁弹传感器索力测量灵敏度达到了 1.390 mV/kN,线性相关系数达到了 0.987,说明该类型传感器适用于钢缆索的应力测量,且性能优越。

2)全包络式磁弹传感器索力测试结果线性度

表2 半包络式与全包络式磁弹传感器索力试验测量结果
Table 2 Test results of semi-envelope and full-envelope magnetoelastic sensor cable force

Cable force /kN	Integral voltage /mV							
	Semi-envelope				Full-envelope			
	1	2	3	Average	1	2	3	Average
18	769.4	768.8	770.7	769.6	1 237.5	1 240.8	1 240.7	1 239.7
21	767.9	766.9	769.3	768.0	1 232.1	1 234.8	1 234.9	1 233.9
24	765.6	764.8	767.3	765.9	1 225.1	1 227.1	1 227.6	1 226.6
27	762.5	761.5	764.6	762.9	1 217.1	1 219.6	1 219.6	1 218.9
30	758.6	757.8	760.3	758.9	1 208.6	1 210.6	1 210.2	1 209.8
33	754.3	752.9	756.3	754.5	1 197.9	1 199.6	1 199.4	1 199.0
36	749.1	747.8	751.3	749.4	1 186.4	1 188.2	1 187.7	1 187.4
39	743.6	742.6	745.9	744.0	1 173.4	1 175.2	1 174.5	1 174.4
42	737.6	736.2	740.0	737.9	1 160.7	1 161.0	1 160.1	1 160.6
45	733.1	732.3	735.8	733.8	1 152.6	1 153.5	1 153.6	1 153.2

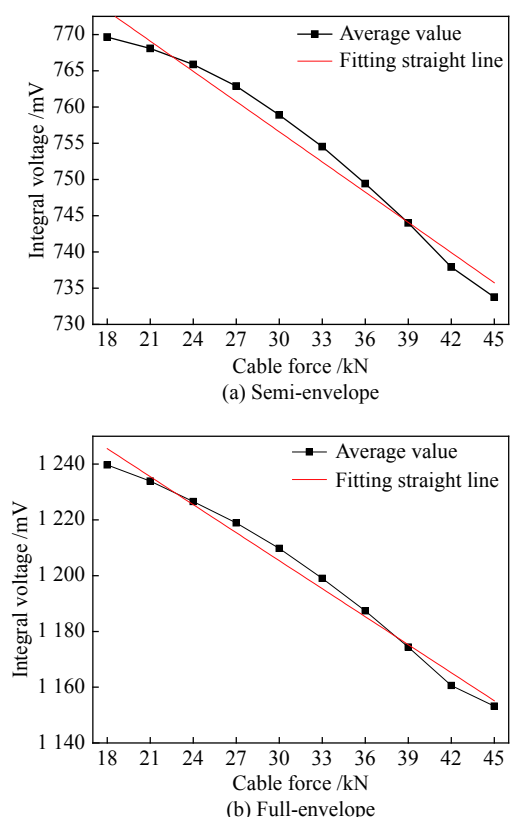


图14 磁弹传感器索力测量结果

Fig.14 Measurement result of magnetoelastic sensor for cable force

与半包络式磁弹传感器相同,但灵敏度是后者的2.4倍,表明其只需较小的激励信号即可得到同样的检测精度,且磁化效果更好,适用于索力测量。

3) 柔性线圈的设计既解决了原有检测线圈需

人工绕制且不易标定的难题,又与2种励磁结构相组合,较好地实现磁弹传感器的可重构设计,便于安装拆卸。

参 考 文 献

- [1] 唐德东,黄尚廉,陈伟民,等. 基于磁弹效应的钢缆索力测量中励磁磁路研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(12):1695-1699.
- [2] 邵磊,冯志敏,胡海刚. 基于旁路结构的磁弹效应索力传感器研究[J]. 传感技术学报,2015,28(7):997-1002.
- [3] 陈伟民,姜建山,唐德东,等. 基于磁弹效应的单旁路激励钢缆索索力传感器[J]. 计量学报,2008,29(4):353-357.
- [4] Wang M L,Chen Z L,Koontz S S. Magnetoelastic permeability measurement for stress monitoring in steel tendons and cables[J]. Proceedings of the SPIE—Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines IV,2000:492-500.
- [5] 柳权. 基于磁弹效应的钢缆索应力测量方法研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2015:28-33.
- [6] 唐德东,黄尚廉,陈伟民. 磁弹效应索力传感器的温度影响机理及补偿技术研究[J]. 仪器仪表学报,2007,28(8):1353-1357.
- [7] 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.
- [8] 逯彦秋,安关锋,程进. 基于磁弹效应的索力测试系统在斜拉桥上的应用[J]. 建筑技术,2014,45(12):1119-1122.
- [9] 张海东,田章华,段元锋,等. 基于磁弹效应的拱桥吊杆索力监测[J]. 结构工程师,2016,32(4):80-84.
- [10] 徐赤,陈建荣,卜琰,等. 磁弹索力传感器在混凝土系杆拱桥健康监测系统中的应用[J]. 工业控制计算机,2013,26(10):23-24.
- [11] 孙志远,杨学山,石文勇,等. 基于磁弹效应的索力传感器研究[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(1):182-186.
- [12] 宋凯,柳权,刘国勇,等. 闭合磁路的磁弹索力传感器优化及实验研究[J]. 传感技术学报,2015(2):188-192.