第 35 卷 第 1 期石家庄铁道大学学报(自然科学版)Vol. 35 No. 12022 年 3 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)Mar. 2022

最优磁化模型的磁通量传感器仿真实验与应用

秦志勇¹, 邓年春^{1,2}

(1.广西大学土木建筑工程学院,广西南宁 530004;2.广西防灾减灾与工程安全重点实验室,广西南宁 530004) 摘要:为了优化磁通量传感器测量的精度与稳定性,以更好地满足桥梁拉索应力测量需求, 根据钢绞线的磁特性曲线与 Biot-savar 定律,设计了最优激励模型的 CCT20 穿入式磁通量索力 传感器,对其进行拉力试验,并采用有限元软件模拟了张拉试验中传感器测钢绞线的全过程,还 提出了相关性系数来增强试验与仿真间的可对比性,模拟结果与试验结果基本吻合,证明了有 限元模型的有效性,进一步分析了传感器对钢绞线的磁化效果。试验及仿真结果表明,穿入式 传感器测量结果与钢绞线张力呈线性关系,多次重复测量性能优于 0.3%;传感器设计励磁源 下,钢绞线被测区域磁感应强度为 0.77 T,位于钢绞线最大磁导率附近,获得最佳测量效果,励 磁模型达到最优。并对汕头新津河特大桥拉索进行了应力状态检测,最终得出结论,CCT20 穿 入式磁通量索力传感器测量结果准确,最大测量偏差为 0.8%。

关键词:磁弹效应;磁通量传感器;索力测量;张拉试验;汕头新津河特大桥 中图分类号:U446;U448.22 文献标志码:A 文章编号:2095-0373(2022)01-0070-06

拉索索体内的应力变化是衡量拉索服役过程中是否安全工作的一个重要指标^[1-2]。磁弹效应法是利 用套在索上的磁通量传感器测量索力。最早的磁通量传感器自 Kvasnica B et al^[3]提出以来,国内外学者 在提高其性能以满足工程测量方面做了大量研究。Wang M L et al^[4]发展并将其运用到钢缆索的应力测 量中。Tse P W et al^[5]利用柔性扁平排线替代套筒式线圈结构来解决穿入式传感器的安装问题。Duan Y F et al^[6]、邵磊等^[7]使用 Terfenol-D 合金与 PMN-PT 压电晶体设计制备了多层磁电复合材料的磁通量 索力传感器。Liu Z et al^[8]提出了最大感应电压来代替电压积分法作为测量指标以提高传感器信号的降 噪水平。尽管磁通量传感器具有使用寿命长、非接触式测量的优点,但是由于设计分析方法存在缺陷,传 感器的测量精度和稳定性差、动态响应慢,制约了磁通量传感器的实际应用。

本文基于钢绞线最佳磁化模型的传感器设计原则,建立了最优的穿入式传感器激励模型,制备了测 量 Φ15.24 mm 的 1 860 MPa 预应力钢绞线的 CCT20 磁通量索力传感器。从有限元仿真和模拟试验的 角度,结合汕头新津河特大桥的工程应用,研究了传感器的测量精度和实测准确度。

1 磁通量传感器测量原理与设计

磁弹效应是指当铁磁材料受到机械力的作用而产生应变时,相应产生的内部应力会导致铁磁材料的 磁性发生变化的现象^[9]。根据磁致伸缩效应,铁磁材料所受外力与自身磁导率变化量的关系可用公式定 量表达如下^[10]

$$F = EA \frac{3\lambda_s B_s}{2K_u} \Delta \mu \sin^2 \theta_0 \cos \theta_0 \tag{1}$$

式中,F为铁磁材料所受轴向力;E为材料的弹性模量;A为铁磁材料的横截面积; λ 。为铁磁材料的磁致轴 向变形常数;B。为材料饱和磁化强度;K。为单轴磁各向异性常数; $\Delta \mu$ 为材料的磁导率变化量;H为外部

收稿日期:2022-01-27 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j. cnki. sjztddxxbzrb. 20220011

基金项目:国家自然科学基金(51868006)

作者简介:秦志勇(1996—),男,硕士研究生,研究方向为桥梁拉索检测。E-mail:749833053@qq.com

秦志勇,邓年春.最优磁化模型的磁通量传感器仿真实验与应用[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(1);70-75.

施加的激励磁场; θ_0 为外部磁场与铁磁材料易磁化轴间的夹角。式中的 $E_{\Lambda}A_{\lambda_s}$ 、 K_u 、 B_s 均由铁磁材料的 类型所决定,当选定了铁磁材料与确定的外加磁场 $H_1\theta_0$ 亦被确定,只需求出 Δ_μ即可求得外力 F_0

1.1 测量原理

通过测定磁导率变化量,便可间接求出样品所受的 外力大小。而变化的磁导率可以通过变化的磁通求出, 根据法拉第电磁感应定律,闭合电路中变化的磁通量产 生感应电动势。对于钢绞线,采用穿入式传感器进行励 磁和感应电压采集,穿入式传感器结构如图1所示。

激励线圈为钢绞线提供变化磁场,通过感应线圈分 别测量空载电压积分 V₀ 和有试件时的电压积分 V_{out},传 感器的相对磁导率可以表示为





(2)

式中,A。为次级线圈的横截面积;A。为钢绞线的横截面积,二者以及空载积分值V。均为常数。因此,式 (2)表明次级线圈感应电压的积分值与磁导率之间存在线性关系。通过测量积分值以及结合相关公式即 可实现索力的推导。

 $\mu_r = 1 + \frac{A_0}{A_s} \left(\frac{V_{\text{out}}}{V_0} - 1 \right)$

1.2 传感器设计

原则上穿入式传感器内径应该与钢绞线外径紧密贴 合以减少漏磁,考虑到钢绞线的公差以及降低安装的难 度,结合图 2^[11],为了使钢绞线磁感应强度随外力的响应 灵敏,选择将钢绞线至磁导率较高的近饱和磁化区中,其 中,在磁场强度为 *H_μ*=1 150 kA/m 时,钢绞线磁导率达 到最大值 μ_m。

拟定测量 $\Phi_{15.24}$ mm 预应力钢绞线的穿入式传感器的内径为 20 mm,设计参数如表 1 所示,考虑到漏磁现象, 拟定通入直流脉冲电流 I=2 A。



图 2 钢绞线磁化特性曲线和磁导率曲线

表 1 CCT20 传感器设计参数

类型	线圈匝数	漆包线径/mm	绕组长度/mm
激励线圈	600	0.50	60.0
感应线圈	80	0.23	8.0

1.3 内部磁场理论分析

为了分析传感器设计的合理性,本研究采用 Biot-savar 定律分析传感器提供的磁场。假定漆包线均匀密绕,每一圈导线看成圆形载流导线,螺线管长度为 L,导线层数为 i;每层螺线管的直径为 d_i;导线中电流为 I;

(3)

单位长度线圈数为 N 匝; θ 为电流元 Idl 所在处到 P 点的位置矢量和电流元 Idl 之间的夹角。在励磁区间内对 Biot-savar 定律积分,得到多层圆形载流导线激励下沿 x 轴线分布 的内部磁场强度公式^[12]

$$H = \sum_{i=1}^{layer \#} NI \left[\frac{L/2 - x}{\sqrt{d_i^2 + (L - 2x)^2}} + \frac{L/2 + x}{\sqrt{d_i^2 + (L + 2x)^2}} \right]$$

通入直流脉冲电流 I=2 A 的传感器, harrow 轴的轴向激励磁场 H_x 分布如图 3 所示。

由图 3 可见,轴向磁场强度由中心向两端递减,螺线管 中心区域磁场最大,达到 1.1 kA/m,且传感器内部磁场强



图 3 激励磁场沿轴向分布曲线

度分布均匀,结合图 2,钢绞线磁导率在峰值附近,测量灵敏度最佳,证实传感器设计合理,激励磁场达到 最优。

2 传感器性能试验研究

2.1 传感器张拉试验

在常温下(35 °C)采用预应力锚固试验台对一根 $\Phi 15.24 \text{ mm}$ 钢绞线进行模拟张拉测试。预先按照设计参数制备好传感器如图 4 所示,采用柳州生产的 Power Stress 磁弹仪作为提供传感器相应磁动势和积分采集的设备,张拉平台如图 5 所示。



图 4 传感器成品图





试验开始前,测量好 CCT20 的空载积分值。然后将已穿入安装好 CCT20 传感器的钢绞线在试验台 固定好,进行 0~180 kN(0.69 倍公称破断力)3 次预张拉,目的是为了检查仪器设备是否正常工作。

正式加载时,采用7点逐级加载的方案对钢绞线施加张力,加载等级依次为5、30、60、90、120、150、 180 kN 共7级加载,每级加载记录当前标准力值和当前电压积分值1次,3次加载测量结果和钢绞线磁 导率-拉力间拟合结果分别如图6和图7所示。结果证明,磁弹仪输出结果随拉力线性增大,3次加载测 量的积分电压值的离散性小,最大偏差值小于0.3% F.S,线性决定系数 $R^2 = 0.999$,重复多次的数据采 集线性相关度和稳定性高,传感器最大零点漂移为0.2个积分值,3次测量后零点值趋于稳定,故可对传 感器多次测量后选择稳定的数值。此外,还对传感器相同测试条件的正反行程测量结果分析,表明传感 器的最大磁滞差值 ΔV_{max} 为0.5个积分值。总之,所设计的 CCT20 传感器能够满足工程测量需求。



图 6 拉力和积分值线型图

图 7 相对磁导率-拉力拟合曲线

2.2 温度试验

温度变化会通过影响铁磁材料的磁化强度,使构件的相对磁导率-应力关系曲线发生平移^[13]。可以 采用温度系数补偿法,在不同温度下对钢绞线零载状态做好测量,拟合相应的温度-积分值曲线,求出温度 补偿系数,实现跨温度积分值修正。 将 CCT20 磁通量套入一根无应力的 Φ 15.24 mm 钢 绞线,放入 RHPW-24CT 步入式恒温恒湿试验箱中进行 0~40 ℃的温度升降试验,从 0 ℃开始测量,每级升温步 长为 10 ℃。如图 8 所示,零点积分值随温度线性变化, 温度每升高 1 ℃,积分值下降 0.49。因此,CCT20 对于 Φ 15.24 mm 钢绞线的测量来说温度修正系数为 0.49。

3 传感器内部磁场分析与仿真

为了研究张拉试验中传感器测钢绞线的全过程,采 用有限元软件 COMSOL 对 CCT20 测钢绞线进行相关模 拟仿真。基于传感器的对称性,在 2D 平面上建立了传感



图 8 温度-积分值关系曲线

器模型,同时为各部件赋予相应材料参数。其中为了减少运算量,将钢绞线适当地简化成长度为 100 mm 的圆柱。以模型周围的空气域作为无限远处磁场为零的边界。

3.1 计算结果对比

为了便于同试验值进行比较,由传感器的检测原理,积分值作为仪器输出的特征量与零点差值 ΔV 同 钢绞线磁感应强度增量 ΔB 呈正比,引入相关系数 k,有

$$\Delta V = k \Delta B \tag{4}$$

提取有限元分析不同拉力下的较零应力的磁感应强度增量同试验积分值平均增量对比如表 2 所示。 从表 2 可以看到模拟量同试验积分值成正比,修正系数 k 偏差不大,表明相关变量随拉力变化线型基本保 持一致,吻合度高。试验值稍有偏移的原因是建模偏差以及加载过程中传感器与钢绞线相对位置存在偏 移。总的来说,有限元模拟分析具有较高可靠度。

拉力/kN	磁感应强度增量/mT(模拟)	积分值平均增量(试验)	相关系数 k
30	6.74	21.37	3.17
60	13.71	45.10	3.29
90	20.78	68.07	3.28
120	27.87	90.53	3.25
150	34.93	111.70	3.20
180	41.92	129.93	3.10

表 2 模拟值与试验值对比

3.2 拓展分析

在验证了有限元分析的可靠性后,采用有限元软件对传感器进一步拓展分析,探究目标磁动势下钢 绞线的磁化效果是否最优。通过后处理,得到钢绞线磁感应强度云图和中心轴线磁感应强度分布情况如 图 9 所示。



图 9(a)表明通入 I=2 A 后,钢绞线测量段轴向磁化相对均匀,磁化率高。图 9(b)展示了沿钢绞线中 心轴线的磁感应强度变化规律。与 Biot-savar 定律所推导出的传感器内部磁场分布图对应,所设计的次 级线圈长度范围(46~54 mm)内,磁感应强度变化小,可近似地认为该区域内磁感应强度与峰值等值。此 时对应于外界激励 H=1 100 A/m,被测试件的磁感应强度 B 达到最高的 0.77 T,与图 2 相对应,钢绞线 磁导率达到最大值,佐证了 CCT20 为最优励磁模型。

4 工程应用

为了验证实验室得到的标定公式和温度补偿系数的准确性及测量精度,对汕头在建的矮塔斜拉桥——新津河特大桥的斜拉索进行了索力测量¹¹⁴。

选取桥梁 31^{*} 塔 S1^{/*} 索索体内 3 根钢绞线安装 CCT20 传感器,在不影响施工进度的前提下,对其张 拉后应力进行测量。将现场测量数据代入实验室标定公式中,得到的测量值与现场根据国家有关计量标 准标定过的压力传感器示数进行对比。现场测量值与参照值对比及温度修正前后误差对比如图 10 所 示。图 10(a)中 CCT20 传感器测量结果接近标准对照值;从图 10(b)可以看出,温度系数修正后较未修正 测量准确度分别提高了 2.1%、0.6%、2.3%,证明传感器的温度系数补偿有效减小温度引起的测量偏差。 CCT20 对 3 个目标的最大测量偏差为 0.8%,能够满足实际工程测量的要求。



图 10 现场测量数据对比

5 结论

结合钢绞线磁特性曲线以及 Biot-savar 定律设计了高精度的穿入式磁通量传感器,通过相关试验、仿 真模拟以及工程应用,得出了如下结论:

(1)CCT20 穿入式传感器测量特征量与钢绞线张力存在线性关系,多次测量重复性高,正反行程测量 最大磁滞偏差为 0.5 个积分值,零点漂移小,性能优异。

(2)利用 COMSOL 对传感器测量效果进行有限元分析,有限元计算结果与试验结果基本吻合。对钢 绞线内部的磁化情况进行拓展分析,验证了 CCT20 穿入式传感器能为钢绞线提供最优磁化场。

(3)结合钢绞线磁特性设计的穿入式传感器在工程应用中测量结果较为准确,最大测量偏差为 0.8%。该传感器能够满足工程中拉索索力的精确可靠检测,具有工程测量价值。

参考文献

[1]李延强,刘得运.基于小波包分析与支持向量机的斜拉索损伤识别[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2020,33 (2):118-123.

[2]杜明阳,闫啸坤. 斜拉索人行天桥承载力研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(3):22-27.

[3]Kvasnica B, Fabo P. Highly precise non-contact instrumentation for magnetic measurement of mechanical stress in lowcarbon steel wires[J]. Measurement Science & Technology, 1996, 7(5): 763.

- [4] Wang M L, Chen Z L, Koontz S S, et al. Magnetoelastic permeability measurement for stress monitoring in steel tendons and cables[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3995: 492-500.
- [5] Tse P W, Liu X C, Liu Z H, et al. An innovative design for using flexible printed coils for magnetostrictive-based longitudinal guided wave sensors in steel strand inspection[J]. Smart Materials and Structures. 2011, 20(5):055001.
- [6]Duan Y F, Ru Z, Zhao Y, et al. Steel stress monitoring sensor based on elasto-magnetic effect and using magneto-electric laminated composite[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(7):68.

[7] 邵磊, 冯志敏, 胡海刚. 基于磁电复合材料的索力传感器制备及性能试验[J]. 船舶工程, 2015(5), 101-105.

[8] Liu Z, Liua S, Xie C, et al. Non-invasive force measurement based on magneto-elastic effect for steel wire ropes[J]. IEEE Sensors Journal, 2021,22(7);8979-8987.

[9]邓年春,龙跃,孙利民,等.磁通量传感器及其在桥梁工程中的应用[J].预应力技术,2008(2):17-20.

- [10] 田明波. 磁性材料[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.
- [11] 兵器工业无损检测人员技术资格鉴定考核委员会.常用钢材磁特性曲线速查手册[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [12] Wang G D. The application of magnetoelasticity in stress monitoring [D]. Chicago: University of Illinois at Chicago, 2006.
- [13]Chen Z L. Characterization and constitutive modeling of ferromagnetic materials for measurement of stress[D]. Chicago: University of Illinois at Chicago, 2000.
- [14]陈伟,胡大新.基于全寿命设计理论的斜拉桥拉索体系选择研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2012,25(2): 11-14.

Simulation Experiment and Application of Magneto-Elastic Sensor for Optimal Magnetization Model

Qin Zhiyong¹, Deng Nianchun^{1,2}

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation and Engineering Safety, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to optimize the measurement accuracy and stability of magneto-elastic sensor, and meet requirements of bettering bridge cable stress measurement, a CCT20 penetrating magneto-elastic cable force sensor with optimal excitation model was designed according to the magnetic characteristic curve of steel strand and Biot-Savar law, and conducted tensile test on it. The whole process of measuring the steel strand by the sensor was simulated with the finite element software. The simulation results were basically consistent with the test results, which proved the validity of the finite element model. Furthermore, the magnetization effect of the sensor on the steel strand was analyzed. The results show that there is a linear relationship between the measurement results of the sensor and the tension of the steel strand and the repeated measurement performance is better than 0.3% F. S; In the condition of setting excitation, the magnetic induction intensity of the measured area of the steel strand is 0.77 T, which is located near the maximum permeability of the steel strand. There is a best measurement effect, and the excitation model is optimal. Later, the stress state of the cable of Xinjin River Bridge in Shantou city is tested, and then come to the conclusion that the measurement result of CCT20 penetrating magneto-elastic cable force sensor is accurate; the maximum measurement deviation is 0.8%.

Key words: magneto-elastic effect; magneto-elastic sensor; cable force measurement; tensile test; Xinjin River Bridge in Shantou