

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209845

# 拱桥圆钢吊杆拉力监测的磁弹传感技术研究\*

王晓琳<sup>1,2</sup>, 朱茂华<sup>2</sup>, 章鹏<sup>1</sup>, 杨圣洁<sup>3</sup>, 陈伟民<sup>1</sup>

(1. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400030; 2. 广西科学院 南宁 530007;  
3. 北京公科固桥技术有限公司 北京 100088)

**摘要:**磁弹传感技术在柔性钢缆索的拉力测量中体现出诸多优势,但在面对刚性的实心圆钢吊杆时,却面临励磁线圈难以充分磁化圆钢吊杆的难题。针对圆钢吊杆的结构与力学特性,通过建模与仿真,对圆钢吊杆的磁化过程进行了深入分析,并优化设计励磁线圈,对直径 $\Phi 85$  mm/ $\Phi 120$  mm的常规/超大直径圆钢吊杆研制了传感器样件,进行了静载加载实验,并与常规的振弦应变计对比。试验结果表明,优化的励磁线圈能够充分磁化 $\Phi 85$  mm的圆钢吊杆;且传感器测量结果的线性度与重复性好,满量程误差均值小于2% (均值-0.15%),明显优于振弦应变计结果(均值-1.95%),满足拉力监测的应用需求;但是对于 $\Phi 120$  mm的超大直径圆钢吊杆,则需进一步优化励磁线圈,以获得更好的效果。

**关键词:**圆钢吊杆;拉力监测;磁弹效应传感器;励磁线圈;静载实验

中图分类号: TP212.13 TH823

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.4030

## Study on magneto-elastic tensile monitoring of round steel suspender in arch bridge

Wang Xiaolin<sup>1,2</sup>, Zhu Maohua<sup>2</sup>, Zhang Peng<sup>1</sup>, Yang Shengjie<sup>3</sup>, Chen Weimin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems, Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Guangxi Academy of Science, Nanning 530007, China; 3. Beijing Gongke Bridge Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** Elasto-magnetic (EM) tension sensing technology has many advantages in the tensile monitoring of flexible cable. However, the problem exists that the component under test cannot be fully magnetized by the excitation coils when this method is used to the solid round steel suspender. Herein, we analyze the magnetization process of the round steel hanger, according to its structure and mechanical characteristics. Then, the excitation coils of the sensors are optimized by modeling and simulation. Two kinds of sensors are developed for the conventional round steel suspender with a diameter of  $\Phi 85$  mm, and a larger one with a diameter of  $\Phi 120$  mm. The performance of two sensors are tested through the static loading experiments. And the conventional strain gauges are used for comparison. Experimental results show that the optimized excitation coil can fully magnetize the  $\Phi 85$  mm round steel suspender. The full-scale error of EM-sensors is less than 2% (average value -0.15%), which is significantly better than the result of the strain gauge (average value -1.95%). Experimental results demonstrate the superiority of EM sensors in linearity and repeatability, which meets requirements of the tension measurement of the conventional diameter solid round steel. The excitation coil for  $\Phi 120$  mm round steel suspender should be further optimized for the guarantee of the accuracy and robustness of the sensor.

**Keywords:** round steel suspender; tensile force monitoring; magneto-elastic effect sensor; excitation coils; static load testing

## 0 引言

拱桥是在竖直平面内以拱作为主要承重构件的桥梁。吊杆作为将桥面的荷载传递给拱肋的关键构件,其受力特性对拱桥的结构安全性和使用寿命至关重要。吊杆可根据刚度将其可分为刚性吊杆和柔性吊杆,而刚性吊杆主要有工字钢和实心圆钢两种结构。与柔性吊杆相比,刚性吊杆具有能降低梁端转角、减小挠跨比值、增大结构刚度和使用寿命长等诸多优点。因此,实心圆钢吊杆在高速铁路与公路等中承与下承式拱桥中应用广泛<sup>[1-3]</sup>。但圆钢吊杆工作于野外露天环境,长期遭受环境交替腐蚀作用,存在性能退化;同时,在高速列车的长期动静荷载交替作用下,易发生圆钢吊杆的疲劳损伤;这种性能退化与疲劳损伤的叠加,必然影响圆钢吊杆的受力特性,进而危害桥梁整体的结构安全与服役寿命<sup>[4]</sup>。因此,对服役中圆钢吊杆的受力特性进行长期在线监测极为必要。

用于柔性钢缆索的拉力测量技术较为成熟,如测量索身振动的振频法<sup>[5-8]</sup>、利用应变敏感元件测量索身或索锚处的应变法<sup>[9-11]</sup>和励磁/感应线圈的磁弹效应法。其中磁弹效应传感器(elasto-magnetic sensor, EM sensor)具有非接触测量、不改变缆索锚固结构与防护层、可靠性与长期稳定性好等优势,已经成功应用于柔性钢缆索的拉力在线监测。

磁弹效应法由美国伊利诺伊大学的Wang<sup>[12]</sup>团队率先开展了工程化应用。而国内重庆大学的陈伟民等<sup>[4]</sup>和章鹏等<sup>[13]</sup>、重庆交通大学的周建庭等<sup>[14]</sup>则开展了磁弹效应传感方法理论与技术研究。柳州欧维姆公司与美国伊利诺伊州立大学合作,不仅开展了吊杆拉力的磁弹效应传感器的产业化研究,同时还进行了大量的实际工程应用探索<sup>[15]</sup>。但因柔性钢缆索与实心圆钢吊杆的材料与结构有较大差异,鲜见圆钢吊杆的拉力传感技术及相关研究的报道。

在结构上,柔性钢缆索除多根钢丝外,内部钢丝之间还存在空气间隙,且外部存在PE护套;而圆钢吊杆是单一实心杆件,内部几乎都是铁磁材料。因此,将磁弹效应法直接用于实心圆钢吊杆时,就必然面临实心圆钢吊杆难以被充分磁化的难题。为此,需结合圆钢吊杆的结构及材料的磁学特性,深入研究实心圆钢吊杆的磁化特性,从而对传感器的励磁/感应线圈进行优化设计,以确保实心圆钢吊杆的充分磁化,为实现圆钢吊杆拉力在线监测奠定基础。

## 1 磁弹效应法基本原理及特点

为研究实心圆钢吊杆的磁化特性,从钢缆索的磁弹效应法基本原理出发,进行分析。钢缆索主要由铁磁性

材料构成,将励磁线圈套在钢缆索外时,励磁线圈产生的外加磁场会导致钢缆索在一定程度上被磁化,其磁化过程一般由励磁线圈产生的磁场强度 $H$ 和磁感应强度 $B$ (亦可称为磁通量密度)之间的关系来描述:

$$B = \mu H \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为材料的磁导率,主要取决于铁磁材料的特性,但也与钢缆索所受拉力相关,利用感应线圈获取磁感应强度 $B$ ,即可间接获知钢缆索的拉力。

常规的磁弹效应传感器原理示意如图1所示,主要由励磁线圈、感应线圈等构成。当励磁线圈被通入激励电流后,产生激励磁场磁化被测构件,在激励电流变化时,被测构件内通过的磁通量发生改变。此时,感应线圈中将产生感应电压,由于被测构件的磁弹特性,在不同拉力下,感应电压的幅值亦不同。

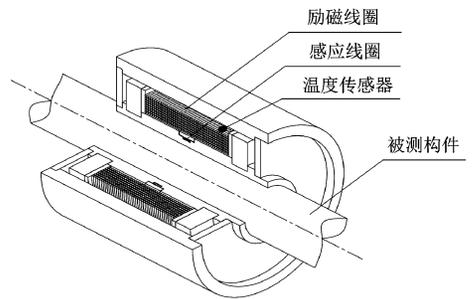


图1 磁弹效应传感器结构示意图

Fig. 1 Diagram of the magneto-elastic sensor

由法拉第电磁感应定律可知,感应线圈的输出电压的大小与磁通量的变化率正相关。当有被测构件存在时,磁导率 $\mu(F, T, H)$ 与拉力 $F$ 、温度 $T$ 和磁场强度 $H$ 相关,可表示为:

$$\mu(F, T, H) = 1 + A_0/A_f [V_{\text{out}}(F, T, H)/V_0 - 1] \quad (2)$$

式中: $V_{\text{out}}(F, T, H)$ 为放置被测构件时,磁弹效应传感器的感应电压; $V_0$ 为无被测构件时,磁弹效应传感器的感应电压; $A_0$ 为传感器感应线圈的截面面积; $A_f$ 为被测构件的截面面积。

但由于钢缆索的铁磁材料是一种典型的非线性磁性材料,因而磁场强度 $H$ 和磁感应强度 $B$ 之间存在如图2所示的磁滞现象。因此可通过标定试验,建立变化磁感应强度 $\Delta B$ 、钢缆索结构应力 $\sigma$ 、环境温度 $T$ 的关系,最终得到圆钢吊杆的拉力<sup>[15]</sup>。一般而言,磁导率差值 $\Delta\mu$ (即荷载时磁导率与零荷载时磁导率的差值)与拉力值 $F$ 的关系为如下三次函数<sup>[16]</sup>:

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

式中: $C_3$ 、 $C_2$ 、 $C_1$ 、 $C_0$ 为系数,可通过标定试验确定,从而实现通过磁导率差值 $\Delta\mu$ 求出圆钢吊杆的拉力值 $F$ 。

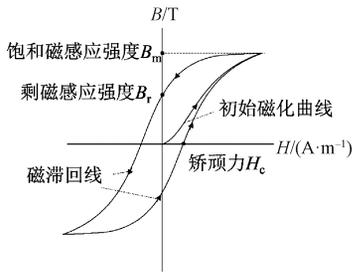


图2 铁磁材料的磁滞回线

Fig. 2 Hysteresis curve of ferromagnetic material

## 2 实心圆钢吊杆的磁化特性研究

### 2.1 钢缆索与实心圆钢吊杆的对比

柔性钢缆索与刚性圆钢吊杆虽然都主要承受轴向拉力,但两者的结构特点与受力特性存在差异。如图3所示,柔性钢缆索是由多根柔性钢丝缠绕、扭绞而成,这使其具有很大的韧性,此外,柔性钢缆索内还存在PE护套及空气间隙,所以钢缆索内铁磁材料占缆索截面积的60%~70%;而圆钢吊杆是单一实心杆件,内部几乎都是铁磁材料,具有很大的刚度。

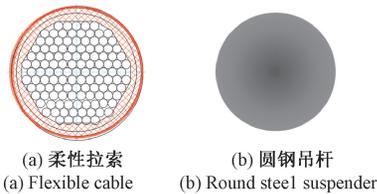


图3 柔性拉索与圆钢吊杆的横断面结构示意图

Fig. 3 The comparison of cross-section between flexible cable and round steel suspender

两相比较,在相同直径下,钢缆索中铁磁材料的横截面积低于圆钢吊杆面积的30%~40%。这将可能导致在相同的磁通量下,圆钢吊杆的磁感应强度远低于钢缆索的磁感应强度。因此,需要针对圆钢吊杆的情况,分析圆钢吊杆的磁化特性。

为此,利用套筒式结构的磁弹效应传感器(其励磁线圈结构是有限长螺线管线圈模型),采用多物理场分析软件COMSOL,对同样规格的钢缆索与圆钢吊杆的内部励磁场进行仿真分析。设定钢缆索模型的PE护套及空气间隙部分的相对磁导率为 $\mu_0$ 。设定钢缆索与圆钢吊杆的铁磁材料为合金结构钢35CrMo,该材质的非线性磁学参数参考文献[17]。其中,矫顽力 $H_c$ 为 $1\ 376\ \text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ ,剩余磁感应强度 $B_r$ 为1.11 T,最大磁导率 $\mu_m$ 为 $407\ \mu_0$ ,最大磁导率对应的磁场强度 $H_{\mu_m}$ 为 $2\ 200\ \text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ 。将35CrMo钢材的初始磁化曲线、第一象限磁滞回线及磁导率曲线绘制成图4。而钢缆索、圆钢吊杆的相关模型参数如表1所示。

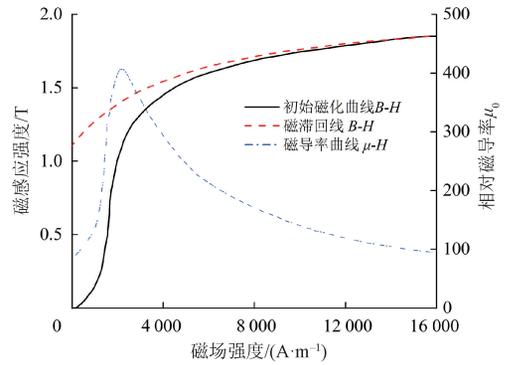


图4 35CrMo合金钢材的磁学特性曲线

Fig. 4 Curves of magnetic properties of 35CrMo steel

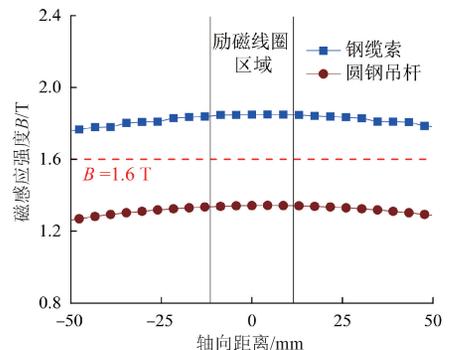
表1 不同模型的仿真分析计算参数对比

Table 1 Comparisons of parameters for simulation

模型	直径/mm	长度/mm	铁磁材料横截面积/mm <sup>2</sup>	构件内非铁磁材料横截面积/mm <sup>2</sup>
钢缆索	90	850	3 817	2 545
圆钢吊杆	90	850	6 362	0

励磁电压的幅值与施加方式是影响圆钢吊杆的磁化效果的重要参数。实际测量中,是通过电容放电的方式实现对励磁线圈施加激励电流,但在仿真中,为判断放电起始时刻的励磁电压能否对圆钢吊杆进行磁化,励磁电压设定为稳定值350 V。

对用于钢缆索拉力监测的磁弹效应传感器进行仿真计算,以评估其是否能用于圆钢吊杆的拉力监测。根据图4中铁磁材料的磁特性曲线所示,当被测构件被磁饱和和达到深度饱和区时,其磁感应强度可达1.6 T以上。基于参考文献[18]的励磁线圈设计参数,对用于钢缆索的磁弹效应传感器建模(线圈长度为230 mm,线圈匝数为1 200匝),得出被测构件中心处磁感应强度的轴向分布,如图5所示。

图5 钢缆索用磁弹效应传感器磁化能力的仿真结果  
Fig. 5 Simulation results of the magnetized capability of the EM sensor for cable

在励磁线圈的区域内,钢缆索的磁感应强度大于1.6 T,表明其已被深度磁化,但圆钢吊杆的最大磁感应强度为1.34 T,低于1.6 T,表明其未能被该结构的励磁线圈深度磁化。

由此可知,将钢缆索的励磁线圈直接用于圆钢吊杆上,圆钢吊杆难以充分磁化,难以满足拉力测量的需求。由此,需针对圆钢吊杆的实际参数,对传感器的线圈结构进行优化设计。

2.2 实心圆钢吊杆磁弹传感器的线圈优化设计

首先对磁化圆钢吊杆材料需要多少磁动势进行估算,计算公式为:

$$F_m = NI = \frac{\phi}{G} = \frac{BS}{\mu S/L} = \frac{BL}{\mu} \quad (4)$$

根据图4中铁磁材料的磁特性曲线可知,当圆钢吊杆被磁饱和达到深度饱和区时,磁感应强度为1.6 T,相对磁导率约为 $150\mu_0$ ,考虑励磁线圈的长度直径比约为3,则两种新设计的磁通量传感器至少需要2 292和3 055 AN才可以使得被测构件被充分磁化。据此,设计了两只传感器的励磁线圈设计参数如表2所示,与钢缆索用的磁弹效应传感器相比,设计的传感器在匝数及层数上进行了优化。

表2 磁弹效应传感器励磁线圈设计参数

Table 2 Design parameters of excitation coils of EM sensors

传感器型号	每层圈数	线圈层数	绕线长度/mm
CCT90J	170	16	230
CCT120J	200	16	280

励磁磁场及磁化效果的仿真结果如图6所示。图6(a)和(b)分别为传感器空载时,励磁线圈在径向与轴向上的磁场强度分布仿真结果。CCT90J和CCT120J在中心点产生的磁场强度分别为 $2.11 \times 10^5$ 和 $9.83 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ,是钢材最大磁导率对应磁场的96倍及44倍,均大于钢材磁化达到饱和区域所需的磁场强度,径向磁场分布的均匀度分别为 $32\ 200 \times 10^{-6}$ 和 $23\ 000 \times 10^{-6}$ 。

图6(c)和(d)分别为传感器负载时,圆钢吊杆的径向和轴向上的磁感应强度分布的仿真结果。直径 $\Phi 85$ 和直径 $\Phi 120$  mm圆钢吊杆在中心点处的磁感应强度分别为2.15和1.61 T。参考钢材的磁学特性参数曲线(图4),此时圆钢吊杆已被深度磁化至近饱和区以上。

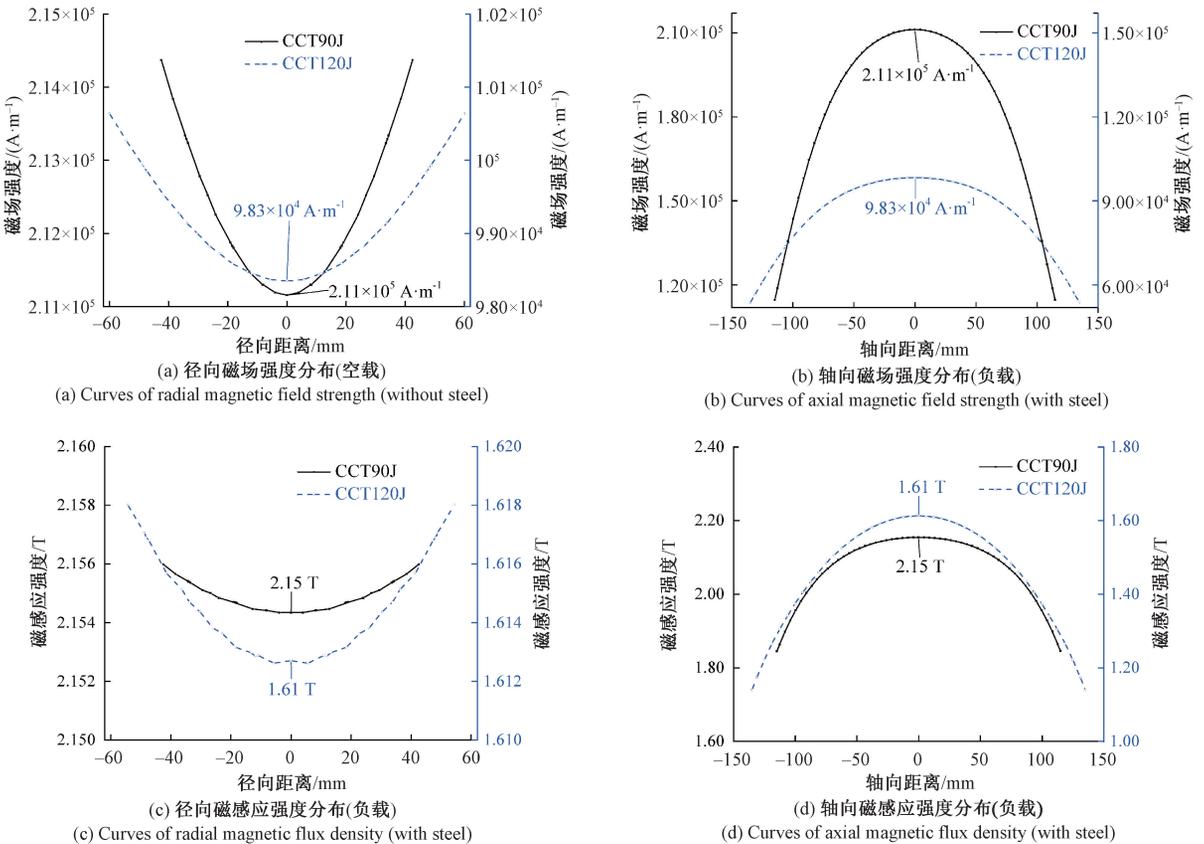


图6 磁弹效应传感器仿真结果

Fig. 6 Simulation results of EM sensors

仿真分析的结果表明,经过优化设计的磁弹效应传感器能实现对大型圆钢吊杆构件的磁化,适合圆钢吊杆的拉力测量。

此外,对包裹 CCT90J 传感器的轭铁套筒的磁导率进行了仿真计算,如图 7 所示。由图 7(a)可知,无轭铁包裹时,磁力线穿过空气间隙形成磁回路,而有轭铁包裹结构时,大多数磁力线通过轭铁结构与圆钢吊杆构成的磁回路。这将励磁线圈对圆钢吊杆的磁化效果从 2.07 提升至 2.28 T,提升了约 10.1%(图 7(b))。从图 7(b)可知,当轭铁的相对磁导率达  $300\mu_0$  以后,相对磁导率的增加对聚磁效果已无明显增益,表明轭铁套筒的材质不必选择像坡莫合金那样磁导率高(相对磁导率约  $10^6\mu_0$ )但饱和磁场强度低且价格高的导磁材料,选择磁导率与被测构件相近,且饱和磁场强度高的导磁材料,如工业纯铁或低碳钢等制成轭铁套筒的性价比更高。

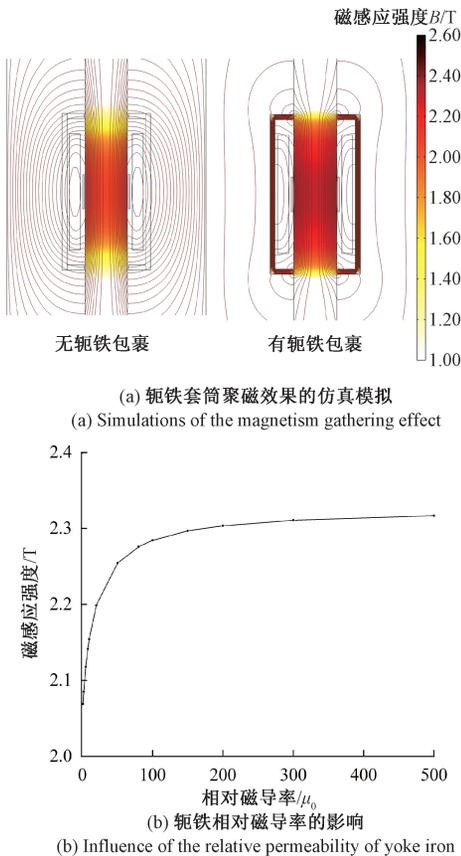


图 7 轭铁套筒结构的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the yoke iron sleeve

### 3 静载试验验证

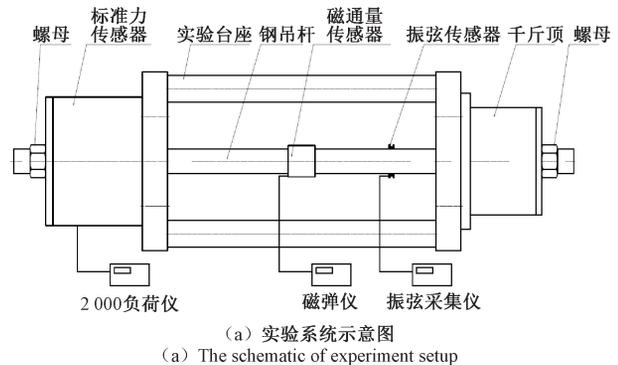
#### 3.1 实验概况

虽然仿真实验结果表明设计的磁弹效应传感器能实现大型圆钢吊杆构件的磁化,适合圆钢吊杆的拉力测量,

但还需实验验证。为此采用拱桥实际应用的圆钢吊杆进行静载实验,对磁弹效应传感器进行测试,以定量评估其灵敏度、线性度、重复性、精度等指标。由于在实验室中温度几乎恒定,因此在静载实验中未考虑温度起伏的影响。实验选取两根材质相同、尺寸不同的圆钢吊杆,分两组进行试验。具体选用 35CrMo、强度等级 460 MPa 的两根合金圆钢吊杆,其中常规直径圆钢吊杆  $\Phi 85$  mm、长度 3.2 m,设计抗拉强度值为 5 000 kN;超大直径圆钢吊杆  $\Phi 120$  mm、长度 6 m,抗拉强度设计值为 5 200 kN。利用欧维姆公司 5 000 kN 张拉台架,按照《合金钢结构》(GB/T 3077)标准,对圆钢吊杆进行张拉试验。在两根圆钢吊杆的 1/2 长度处,分别安装 CCT90J、CCT120J 传感器;另在圆钢吊杆 1/4 长度处,布置 BGK-4000 型振弦应变计,以进行对比实验。

由于振弦应变计是焊接在圆钢吊杆的表面,极易因圆钢吊杆的偏载产生测量误差,为此沿圆钢吊杆环向对称布置 4 只振弦应变计,通过计算多个振弦应变计输出的平均值,降低偏载的影响。

测试平台的传感器布置如图 8 所示。将圆钢吊杆安装在 5 000 kN 张拉台架上,圆钢吊杆两端安装工具锚、千斤顶,标准力传感器(CL-YB-M4MN,精度等级 0.1 级、准确度  $\pm 0.05$  F. S.)以及 2000 型标准负荷测量读数仪,最后将锚固力传感器作为标准传感器进行张拉读数并记录。首先,在不同的加载力下,利用标准传感器对振弦应变计和磁弹效应传感器进行标定;之后,振弦应变计和磁弹效应传感器测量不同荷载,并与标准传感器数值进行对比,获得差值百分比,差值百分比 = (拉力 - 荷载) / 荷载  $\times 100$ ;将差值百分比进行统计分析,通过其均值与标准差评估这两种方法的指标。



(b) 实验系统实物  
(b) Experimental setup



(c) 振弦应变计现场图及安装截面图  
 (c) Strain gauge and the sectional view of installation diagram



(d) 磁弹效应传感器现场图及安装截面图  
 (d) EM-sensor and the sectional view of installation diagram

图8 试验系统及传感器

Fig. 8 Experimental setup and sensors

### 3.2 常规 Φ85 mm 圆钢吊杆张拉试验

先对 Φ85 mm 圆钢吊杆进行超张拉,之后,圆钢吊杆张拉等级按照 6 级加载,依次为 400、800、1200、1 600、2 000、2 500 kN。振弦磁弹效应传感器与振弦应变计的具体实验结果分别如图 9 与 10 所示,而两种传感器的相对误差如图 11 所示。

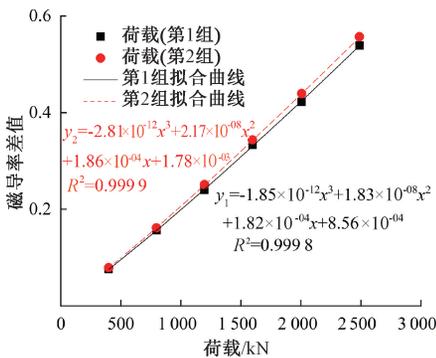


图9 磁弹效应传感器的静载实验结果  
 Fig. 9 Fitting curves of the EM sensor

对比图 9 与 10 可知,磁弹效应传感器的平均线性度高于 99.85%,而振弦应变计的平均线性度 99.55%;磁弹效应传感器的线性度与重复性皆明显优于振弦应变计。

由图 11 可知,磁弹效应传感器的差值百分比的均值在 -0.65% ~ 1.17%,满量程误差在 ±2% 以内,标准差的均值为 0.76%;但振弦应变计的差值百分比的均值在 -2% ~ 7%,离散度(精度,用百分比差值的标准差表示)平

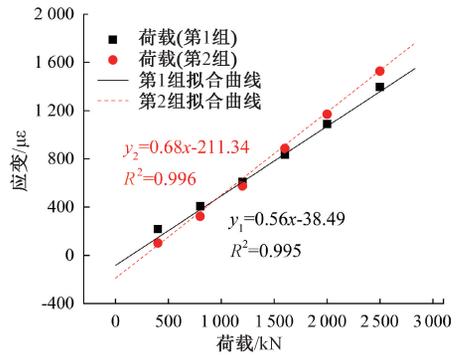


图10 振弦应变计的静载实验结果  
 Fig. 10 Fitting curves of strain gauge

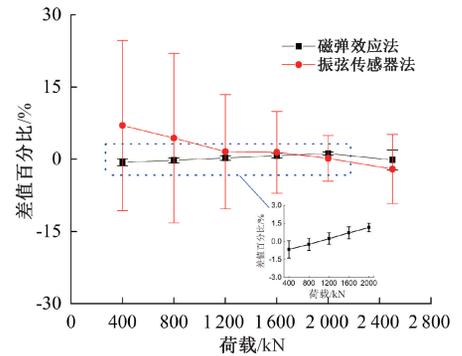


图11 两种方法的荷载-拉力差值百分比  
 Fig. 11 Difference percentage of two methods

均值为 11.26%。两相比较,振弦应变计的差值百分比远大于磁弹效应传感器的差值百分比,是其 10 倍以上。说明在同等条件下磁弹效应传感器的测试精度几乎比振弦应变计高了一个数量级,由此验证了磁弹效应传感器在常规圆钢吊杆拉力测量的优异效果。

### 3.3 大尺寸 Φ120 mm 圆钢吊杆张拉试验

对 Φ120 mm 超大直径圆钢吊杆也进行静载实验。其中,振弦应变计的静载实验首先按照 50 kN 级差逐级张拉到 1 300 kN,再以 500 kN 的级差逐级张拉到 2 800 kN,共加载 28 级。磁弹效应传感器选用的张拉等级按照 5 级加载,依次为 500、1 000、1 500、2 000、2 500 kN。振弦应变计与磁弹效应传感器的具体实验结果分别如图 12 与 13 所示,而两种传感器的相对误差如图 14 所示。

对比图 9 与 12 可知,磁弹效应传感器的拟合优度由常规尺寸的 99.98% 降到了大尺寸条件下的 99.81%;从图 13 可知,其测量结果的差值百分比也由均值在 -0.65% ~ 1.17% 之间,扩大到 -12.9% ~ 1.57%;显然在大尺寸条件下,磁弹效应传感器的线性度与稳定度都下降明显。将大尺寸与常规尺寸两种情况下的励磁磁场仿

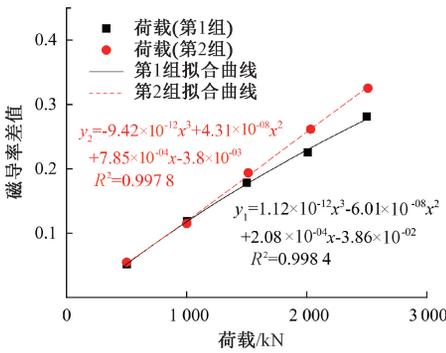


图 12 磁弹效应传感器实验结果

Fig. 12 Fitting curves of the EM sensor

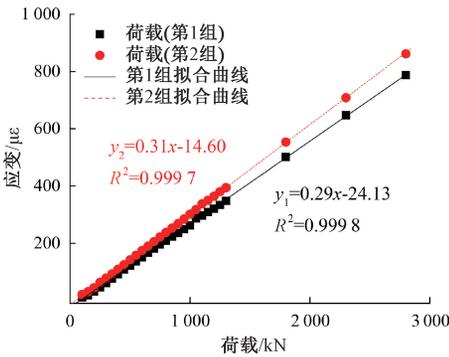


图 13 振弦应变计实验结果

Fig. 13 Fitting curves of strain gauge

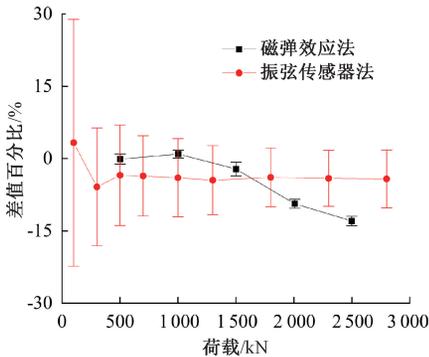


图 14 两种方法的荷载-拉力差值百分比

Fig. 14 Difference percentage of two methods

真结果对比(图 6(a)和(b)),CCT90J 传感器产生的励磁磁场强度比 CCT120J 产生的励磁磁场强度大 114.6%,同时,圆钢吊杆直径越大,圆钢吊杆内平均的磁感应强度越小。这两个原因综合作用,极有可能造成大尺寸圆钢吊杆实际上未被充分磁化,无法满足式(3)。

对比图 14 与 11 亦可知,振弦应变计的测量结果的差值百分比均值由-2%~7%,变为-7.12%~3.29%,离

散度平均值从为 11.26% 提升到 9.96%,并没有像磁弹效应传感器那样恶化。

从图 14 可知,在差值百分比方面,虽然磁弹效应传感器单次荷载测量的差值百分比很小,但总体的差值百分比变动并不显著优越于振弦应变计。

### 3.4 两种方法测试数据结果对比

振弦应变计与磁弹效应传感器对同种材质、不同尺寸的圆钢吊杆静载实验结果对比如表 3 所示,其中满量程误差是在最大荷载下测量得到。由表 3 可知,磁弹效应传感器的综合精度优于振弦应变计,特别是在中小直径的常规圆钢吊杆场合。

表 3 两种方法测试圆钢吊杆拉力的满量程误差统计

Table 3 Comparison on full-scale error of two methods

方法	圆钢吊杆直径/mm	测量次数	满量程误差/%	满量程误差均值/%
振弦应变计	85	1	2.39	-1.95
		2	-6.29	
	120	1	-14.3	-10.4
		2	-6.5	
磁弹效应传感器	85	1	1.3	-0.15
		2	-1.6	
	120	1	-12.92	-4.39
		2	4.14	

由表 3 还可知,对于磁弹效应传感器而言,圆钢吊杆直径越小,越能被磁化,因而拉力测量的准确度就越高;但随着钢吊杆直径增大,其准确度降低。但对振弦应变计而言,其性能表现刚好相反,其测量精度随着圆钢吊杆直径增加而提升,但因其需要在圆钢吊杆圆周上均匀布置 4 只振弦应变计,且对性能参数与安装工艺的一致性有极为苛刻要求,因此磁弹效应传感器在圆钢吊杆的拉力测量上的性价比与总体精度都更高。

### 3.5 与其他磁弹效应传感器的准确度对比

表 4 总结了本文的研究结果与其他方法磁弹效应传感器的准确度结果对比。序号 1 中,被测构件钢缆索的直径为 12 mm,由于铁磁材料的横截面积小,易被磁化,因此,磁弹效应传感器的满量程误差可达 1% 以内。对比已用于桥梁钢缆索拉力监测的文献[17,19-20]磁弹效应传感器,本文提出的应用于圆钢吊杆拉力监测的磁弹效应传感器的满量程误差优于 2%,达到相同的水平,表明了本文设计的磁弹效应传感器可满足圆钢吊杆拉力监测的需求。

表 4 与其它磁弹效应传感器的准确度对比  
Table 4 Accuracy comparison with other EM-sensors

方法	被测构件 直径/mm	准确度	备注
文献[4]	12	最大满量程误差 0.286%	钢缆索,横截面积小
文献[17]	116/128	满量程误差约 2.2%	钢缆索,最大量程 9 000 kN,分辨率 200 kN,应用于意大利特伦托的阿迪杰桥
文献[19]	160	精准度优于 2%	钢缆索,应用于香港昂船洲大桥
文献[20]	99	最大满量程误差 5.31%	钢缆索,最大量程 866 kN,提高力分辨率至 46 kN
本文	85	满量程误差优于 2%	圆钢吊杆,本文结果

## 4 结 论

通过对实心圆钢吊杆拉力测量的磁弹效应传感器的理论分析与实验验证,并与振弦应变计对比,得出如下结论。对于常规直径的圆钢吊杆,磁弹效应传感器的满量程误差均值是 -0.15% 比振弦应变计的结果(均值 -1.95%) 提高约一个数量级,具有更加优异的线性度与稳定度。磁弹效应传感器安装方便,不损伤圆钢吊杆结构、不影响圆钢吊杆的防腐性、使用寿命,也不存在振弦应变计面临的安装一致性、焊接点长期蠕动及脱落等安装工艺性难题。因而磁弹效应传感器安装工艺性好。磁弹效应传感器在超大直径的圆钢吊杆的拉力测量的应用上,存在平均磁感应强度越低和磁化越不充分等影响,需进一步针对超大直径圆钢吊杆优化励磁线圈结构与励磁电压,以保证传感器的精准度。

### 参考文献

[ 1 ] 陈列. 高速铁路下承式钢系杆拱桥结构行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.  
CHEN L. Research on structural behavior of through steel tied arch bridge on high-speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[ 2 ] 赵金钢,占玉林,赵人达,等. 高速铁路桥梁实体圆钢吊杆疲劳性能和承载能力试验研究[J]. 建筑结构, 2013,43(10):26-30.  
ZHAO J G, ZHAN Y L, ZHAO R D, et al. Experimental study on fatigue performance and bearing capacity of solid round steel suspenders of high-speed railway bridges[J]. Building Structure, 2013, 43(10): 26-30.

[ 3 ] 杨建国,叶建国,祁海坤,等. 高强度建筑钢拉杆的应用与研究[J]. 钢结构,2005(5):31-33.  
YANG J G, YE J G, QI H SH, et al. Application and research of high strength construction Steel tie Rod [J]. Steel Structure,2005(5):31-33.

[ 4 ] 陈伟民,姜建山,章鹏,等. 钢缆索索力磁性传感理论

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 force magnetic sensing in steel cables [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4):794-799.

[ 5 ] 任伟新,陈刚. 由基频计算拉索拉力的实用公式[J]. 土木工程学报,2005,38(11):26-31.  
REN W X, CHEN G. Practical formulas for calculating cable forces from fundamental frequencies [J]. China Civil Engineering Journal, 2005,38(11):26-31.

[ 6 ] 刘琳,陈伟民,章鹏,等. 振频法索力监测中自振频率的频谱倍增方法[J]. 仪器仪表学报,2011,32(11): 2443-2448.  
LIU L, CHEN W M, ZHANG P, et al. Spectrum-multiplication of fundamental frequency for cable force monitoring using frequency method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011,32(11):2443-2448.

[ 7 ] 徐文城,李娜,谢旭,等. 考虑边界影响的在役短钢索张力测试研究[J]. 公路,2021,66(5):136-141.  
XU W CH, LI N, XIE X, et al. Study on tension test of in-service short cable considering boundary effect [J]. Highway, 2021,66(5):136-141.

[ 8 ] 张开银,赵一凡,许灿. 基于振动频率法的吊杆内力识别研究[J]. 武汉理工大学学报,2021,43(9):26-32.  
ZHANG K Y, ZHAO Y F, XU C. Research on internal force identification of boom based on vibration frequency method [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 201,43(9):26-32.

[ 9 ] 李冬生,周智,欧进萍. 光纤光栅智能复合筋传感特性及其工程应用[J]. 光电子. 激光,2009,20(10): 1294-1297.  
LI D SH, ZHOU ZH, OU J P. Sensing properties study and engineering applications for GFRP-OFBG intelligent sensors [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2009, 20(10):1294-1297.

[ 10 ] 张东生,姚开方,罗裴,等. 一种新型的光纤光栅高频

- 加速度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1400-1403.
- ZHANG D SH, YAO K F, LUO P, et al. Novel fiber Bragg grating accelerometer with high resonant frequency[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(7): 1400-1403.
- [11] 吴俊, 陈伟民, 章鹏, 等. 金属直接连接的布拉格光纤光栅应变测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2709-2713.
- WU J, CHEN W M, ZHANG P, et al. Stain sensing method based on directly metallized bonding FBG to substrate[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(12): 2709-2713.
- [12] WANG M L, CHEN Z L, KOONTZ S S. Magneto-elastic permeability measurement for stress monitoring in steel tendons and cables[C]. 7th Annual Symposium on Smart Structures and Materials, Health Monitoring of the Highway Transportation Infrastructure. Newport Beach: SPIE, 2000.
- [13] 章鹏, 刘小亮, 陈伟民, 等. 磁弹索力传感器设计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(11): 2467-2473.
- ZHANG P, LIU X L, CHEN W M, et al. Design method of magneto-elastic cable tension sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(11): 2467-2473.
- [14] 周建庭, 刘惠玲, 张森华, 等. 预应力钢绞线磁谐振应力监测试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 42(2): 108-116.
- ZHOU J T, LIU H L, ZHANG S H, et al. Experimental research on monitoring magnetic stress resonance of the prestressed steel stranded wire [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 42(2): 108-116.
- [15] WANG M L, WANG G, ZHAO Y. Application of EM stress sensors in large steel cables[C]. Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring. Dordrecht: Springer, 2005: 145-154.
- [16] ZONTA D, ESPOSITO P, MOLIGNONI M, et al. Calibration of elasto-magnetic sensors for bridge-stay cable monitoring [C]. 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2012.
- [17] 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[S]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- The Nondestructive Testing Technical Qualification Committee of Ordnance Industry. Quick reference handbook for curves of magnetic properties of common steels[S]. China Machine Press, Peaking, 2003.
- [18] 黄捷. 外装式高压励磁索力传感器设计与系统开发[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- HUANG J. Design of externally mounted cable force sensor and system development by high voltage excitation[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [19] ZHAO Y, WANG M L. Fast EM stress sensors for large steel cables [C]. Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security, SPIE, 2008: 209-216.
- [20] FENG H, LIU X, WU B, et al. Temperature-insensitive cable tension monitoring during the construction of a cable-stayed bridge with a custom-developed pulse elastomagnetic instrument [J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(5-6): 1982-1994.

## 作者简介



王晓琳, 分别在 2014 年和 2016 年获美国中央华盛顿大学理学硕士学位和华中科技大学工程硕士学位, 现为重庆大学博士研究生, 广西科学院正高级工程师、硕士生导师, 主要研究方向为智能传感器、结构健康监测。

E-mail: wangxiaolin@gxas.cn

Wang Xiaolin received his M. Sc. and M. Eng. degrees from Central Washington University and Huazhong University of Science and Technology in 2014 and 2016. He is currently a Ph. D. candidate at Chongqing University, a senior engineer and a master student at Guangxi Academy of Sciences. His main research interests include smart sensor technology and structure health monitoring.



章鹏 (通信作者), 分别在 2002 年和 2005 年于重庆大学获得硕士学位和博士学位, 现为重庆大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为传感器技术、信号处理、智能结构健康状态监测等。

E-mail: zhangpeng@cqu.edu.cn

Zhang Peng (Corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Chongqing University in 2002 and 2005, respectively. He is currently an associate professor and a master advisor at Chongqing University. His main research interests include sensor technology, signal processing, smart structure health monitoring and etc.