

铁磁材料单向应力无损检测实验研究¹⁾

刘开绪^{*,†,2)} 段玉波^{*}

^{*}(东北石油大学电气信息工程学院, 黑龙江大庆 163318)

[†](大庆师范学院机电工程学院, 黑龙江大庆 163712)

摘要 传统的四磁极磁测应力传感器不仅存在结构对称性差异, 而且其难以保障检测输出信号零点值为零. 引入标准补偿试件平衡待测试件的工况误差, 实现环境变量的自动补偿; 采取检测线圈同相串联接法, 以线圈连接中间接点与电位器滑动点间的电压信号作输出, 使零点值可调. 实验结果表明, 该方法实现了对电路零点值的准确调节, 而且传感器的输出特性与理论推导结果呈线性吻合. 因此, 该传感器可以实现铁磁材料单向应力测试.

关键词 铁磁材料, 逆磁致伸缩效应, 应力, 传感器, 无损检测

中图分类号: O348.9 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-14-191

EXPERIMENTAL STUDY OF NONDESTRUCTIVE DETECTION FOR UNIAXIAL STRESS IN FERROMAGNETIC MATERIALS¹⁾

LIU Kaixu^{*,†,2)} DUAN Yubo^{*}

^{*}(Faculty of Electricity and Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China)

[†](Physical and Electrical Information Engineering Institute, Daqing Normal University, Daqing 163712, Heilongjiang, China)

Abstract The traditional four-pole stress sensors suffer some major drawbacks. The structural symmetry varies in different sensors, and their zero value at the zero point is difficult to be guaranteed. In this paper, a self-compensation structure and a zeroing circuit are designed to solve these problems. With the self-compensation structure, the environmental variables are automatically compensated. By adopting in-phase series and using the voltage output between the middle contact point of the coils and the potentiometer sliding key, the value of the zero point is easily adjustable. The experimental results indicate that the zeroing circuit makes the adjustment of the zero point value easy. Moreover, the output of the sensor is linearly consistent with the theoretical simulation. Therefore, the uniaxial stress in the ferromagnetic materials can be determined accurately by the self-compensation structure sensor with the zero-value adjusting circuit.

Key words ferromagnetic material, counter-magnetostrictive effect, stress, sensor, nondestructive testing

利用铁磁材料的逆磁致伸缩效应, 可以设计制作磁测应力传感器对铁磁试件进行应力检测^[1-2]. 基于逆磁致伸缩效应的磁测应力检测装置具有成本

低、结构简便、使用方便等优点, 可较广泛地应用于大型工件和压力容器的残余应力检测、传动轴扭矩检测, 及进行钻井平台立柱、油水井套管、钢结构桁

2014-05-19 收到第 1 稿, 2014-07-16 收到修改稿.

1) 大庆师范学院自然科学基金资助项目 (11ZR14).

2) 刘开绪, 教授, 从事测井方法与仪器研究、信号与信息处理应用研究. E-mail: dqsysys@126.com

引用格式: 刘开绪, 段玉波. 铁磁材料单向应力无损检测实验研究. 力学与实践, 2015, 37(2): 227-231

Liu Kaixu, Duan Yubo. Experimental study of nondestructive detection for uniaxial stress in ferromagnetic materials. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(2): 227-231

架等工作应力的非接触式无损检测,国内外相关研究工作已在多领域展开,并且已经取得了多项应用成果^[3-7].由于逆磁致伸缩效应的机理尚需要完善,致使应用该技术还要进一步探究理论依据与应用方法,还需要实验研究成果为理论研究提供支撑.结合逆磁致伸缩效应研制的应力测试传感器,还需要解决信号的自平衡问题和抗干扰问题,以提高检测灵敏度.基于上述问题,本文设计了四磁极差动式磁测应力装置,实验测试了铁磁板材试件单向受力,并且设计串联电桥式取样电路,便于调正测试装置的零点值.

1 传感器的结构与原理

1.1 传感器的结构及基本参数^[8-11]

传感器由1个“工”字形检测铁芯和5个线圈构成的四磁极装置,其结构示意图如图1所示.利用脉冲变压器的EI硅钢片加工形成T字形和一字形硅钢片,采取T字形、一字形和一字形、T字形交错穿插装配,使结构对称.传感器的铁芯材料选用脉冲变压器高导磁率、损耗小的硅钢片,片厚0.5mm,52片叠厚26mm.励磁线圈N-I绕在交错穿插的T字形中间柱上,采用0.2mm漆包线在骨架上绕制200T;4个磁极上分别缠绕参数一致的检测线圈N-1、N-2、N-3和N-4,每个检测线圈均使用0.05mm漆包线在骨架上绕制600T.

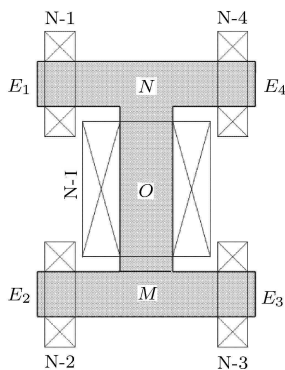


图1 传感器结构

线圈N-1和N-2正向串接,N-3和N-4正向串接,然后将2个串接后的绕组再反向串接,形成反相差动连接,其电路接线图如图2所示,利用该电路对应力信号进行提取.实验试件板尺寸为 $380\text{mm}\times 50\text{mm}\times 2\text{mm}$,所用的标准补偿试件尺寸为 $136\text{mm}\times 50\text{mm}\times 2\text{mm}$.

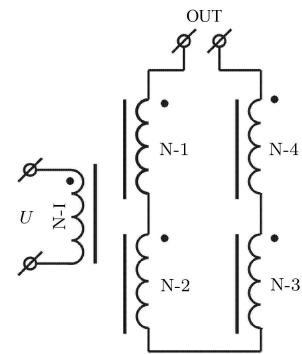


图2 反相差动连接电路

1.2 传感器的工作原理

传感器用于检测平面应力时,利用磁极 E_1 和 E_2 接触或接近被测试件,使磁极 E_3 和 E_4 接触或接近标准补偿试件.励磁线圈N-I产生的总磁通量为 Φ ,通过检测线圈N-1、N-2和N-3、N-4的磁通分别为 Φ_{1-2} 和 Φ_{3-4} .图3给出了传感器的等效磁路.

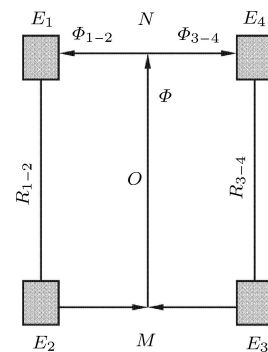


图3 传感器的等效磁路

当没有应力作用在待测试件上时,由于标准补偿试件的作用,可保证 $\Phi_{1-2} = \Phi_{3-4}$.由于4组线圈的接线方式,在磁通相等的情况下,传感器输出电压信号为0;当待测试件受应力时,试件内部磁导率发生变化, $\Phi_{1-2} \neq \Phi_{3-4}$,由于沿应力方向为易磁化方向,磁导率高,而沿垂直于应力方向为难磁化方向,磁导率低,磁通不相等,所以在检测线圈输出端上将感生出不相等的信号电压,该电压信号包含应力信息.

2 传感器的输出特性

根据压磁效应的结果,在激励线圈作用下,每个检测线圈两端将分别产生感应电动势^[12].检测线圈N-1、N-2、N-3和N-4具有相同的匝数N,令N-1和N-2两线圈同相串联后得到的叠加感应电动势为

E_{1-2} , N-3 和 N-4 两线圈同相串联后得到的叠加感应电动势为 E_{3-4} , 则

$$E_{1-2} = E_1 + E_2 = 2\pi f(N_1 + N_2)\Phi_{1-2} = 4\pi f N \Phi_{1-2} \quad (1)$$

$$E_{3-4} = E_3 + E_4 = 2\pi f(N_3 + N_4)\Phi_{3-4} = 4\pi f N \Phi_{3-4} \quad (2)$$

式中, f 为激励信号频率; $N_1 \sim N_4$ 为检测线圈匝数, 设为 N ; Φ_{1-2} 和 Φ_{3-4} 为支路磁通量. 则

$$\Delta E = E_{1-2} - E_{3-4} = 4\pi f N (\Phi_{1-2} - \Phi_{3-4}) = 4\pi f N \Delta \Phi \quad (3)$$

而磁通量

$$\Phi_m = \Phi_{1-2} = \Phi_{3-4} = \mu_c S_c H_c \quad (4)$$

式中, μ_c 为材料中的磁导率, S_c 为磁路的截面积, H_c 为磁路的磁场强度.

式 (4) 中, 材料中的磁导率 μ_c 是随着试件所受应力而变化的.

$$\Delta \Phi = \Phi_{1-2} - \Phi_{3-4} = \Delta \mu_c S_c H_c \quad (5)$$

则

$$\Delta E = 4\pi f N S_c H_c \Delta \mu_c = k_c \Delta \mu_c \quad (6)$$

根据压磁效应^[13], $\Delta \mu_c = k_\mu \sigma$, k_μ 为试件材料的压磁灵敏度, 可通过试验测定, 故

$$\Delta E = k_c k_\mu \sigma \quad (7)$$

令 $k = k_c k_\mu$, 则

$$\Delta E = k \sigma \quad (8)$$

材料试件所受应力的变化导致其磁导率 (磁阻) 的变化, 磁导率的变化导致感应电动势的变化. 从式 (8) 可见, 应力与电动势呈线性关系, 系数 k 为材料试件的应力感应电动势灵敏度, 可通过实验数据测定. 所以, 依据感应电动势与试件所受应力的关系, 可通过测量感应电动势的变化来测量试件所受应力.

3 测试实验

利用磁测应力原理设计制作了传感器, 在完善了零点值调正电路的基础上, 对长方形试件进行了单向拉伸应力的对比测试试验.

3.1 输出信号幅值频率特性

选定某铁磁试件及补偿试件, 补偿试件的宽度与测试试件相等, 传感器与试件间的间隙利用绝缘非导磁垫板调整. 在 40 mA 励磁电流作用下, 调节励磁信号频率, 测量线圈 3 和 4 同相串联输出电压, 改变磁间隙, 利用所得的数据绘出一组不同间隙时的频率特性曲线如图 4 所示.

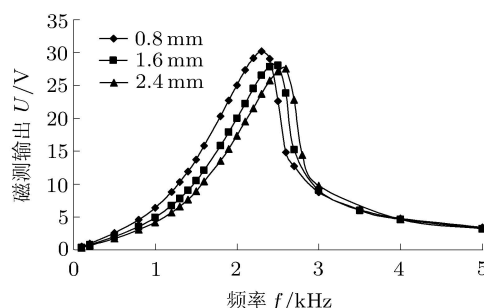


图 4 40 mA 励磁电流时不同间隙的频率特性曲线

从图 4 中可以看出, 当传感器与试件间的间隙在 0.8 mm 时, 最大灵敏度频率在 2 200 Hz 左右. 随着间隙的增加, 最大灵敏度响应频率也略有增加. 固定传感器与试件间的间隙, 改变励磁电流值, 可以得到一组输出电压随频率变化的曲线, 如图 5 所示. 从图中可以看出, 磁间隙固定后, 励磁信号电流从 20 mA 增加至 40 mA 的过程中, 检测灵敏度随之增大, 对应最大灵敏度的频率随着励磁电流增加而略有增加. 考虑到铁芯的工作频率、杂散分布电容的影响, 传感器的工作频率宜选定略小于最大灵敏度频率, 以保证在最佳灵敏度频点附近可以得到比较理想的测试效果.

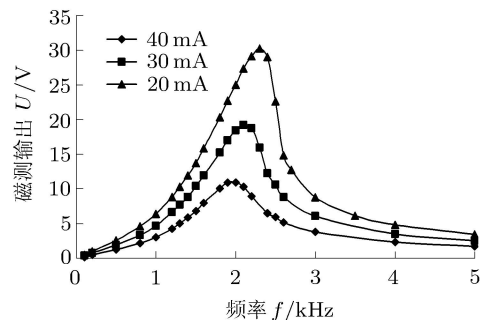


图 5 0.8 mm 间隙下不同励磁电流的频率特性曲线

3.2 不同励磁电流的应力特性

不同励磁电流会影响测试的灵敏度, 这一点可以从频率响应曲线上得出. 但励磁电流亦不能太

大,避免磁通饱和.在磁间隙 0.8 mm,励磁信号频率 2 kHz,不同励磁电流情况下,测得传感器的输出电压值列于表 1,绘制的一组应力曲线如图 6 所示.

表 1 磁间隙 0.8 mm,励磁信号频率 2 kHz,磁测输出电压数据表

测试点	20mA		30mA		40mA	
	σ/kN	U/mV	σ/kN	U/mV	σ/kN	U/mV
1	0.048	10.40	0.002	25.20	0.027	30.00
2	0.133	11.20	0.144	37.60	0.132	51.60
3	0.227	16.00	0.244	57.60	0.257	90.80
4	0.422	44.00	0.439	107.00	0.435	172.00
5	0.642	78.80	0.650	164.00	0.653	264.00
6	0.865	116.00	0.867	216.00	0.894	327.00
7	1.070	141.00	1.100	260.00	1.131	404.00
8	1.305	167.00	1.313	298.00	1.325	444.00
9	1.518	188.00	1.528	326.00	1.561	484.00

由表 1 的数据计算出传感器对应 20 mA, 30 mA 和 40 mA 励磁电流的非线性误差依次为 7.45%, 6.44% 和 12.19%, 对应的灵敏度依次为 98.59 mV/kN, 130.23 mV/kN 和 169.49 mV/kN.

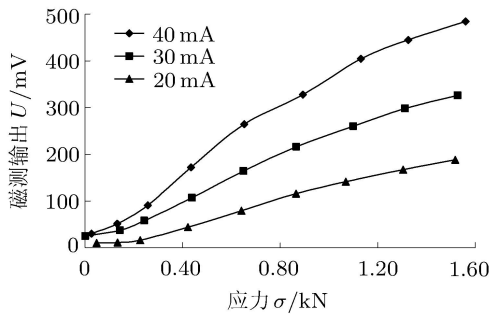


图 6 励磁电流-应力响应曲线

传感器磁测输出电压与试件所受应力值之间呈现较好的线性关系,与式 (8) 的结论相一致.

观察零点值附近区域,当被拉伸的试件两端没有被施加拉伸应力时,磁测输出端的电压并不为 0.原因之一是由于传感器的结构不对称所致.要想做到结构上较好的对称是相当难的,甚至是办不到的.为了实现零点值对应为 0,需要采取适当的电路形式来完成这项任务;原因之二是试件的表面平整度会影响零点值的测量,这可以通过在试件两侧同时检测,差动输出的方法来消除.

通过实验分析可知,在保证 4 个检测线圈 N-1, N-2, N-3 和 N-4 具有相同的匝数 N 的情况下,也难以保证传感器结构的一致性,4 个检测线圈上的感

应电压值会存在差异.即应力 $\sigma = 0$ 时,感应电动势 $\Delta E \neq 0$.为了尽量不削减磁测信息,又便于调正测试装置的零点值,同时提高抗干扰性能,对反相串联电路进行改进,设计了检测线圈串联电桥式取样电路如图 7 所示.零点值的调节是通过调节电位器 RP1 实现.实验时,电阻 R1 和 R2 和电位器 RP1 均取 10 k Ω .在 0.8 mm 磁间隙,2 kHz 励磁信号频率下,测得传感器的输出电压值列于表 2,绘制的一组应力曲线如图 8 所示.

表 2 磁间隙 0.8 mm,励磁信号频率 2 kHz,磁测输出电压数据表

测试点	20 mA		30 mA		40 mA	
	σ/kN	U/mV	σ/kN	U/mV	σ/kN	U/mV
1	0.062	2.80	0.068	2.80	0.068	2.00
2	0.137	3.40	0.142	4.20	0.160	6.20
3	0.242	4.60	0.238	6.60	0.281	12.10
4	0.448	7.10	0.452	11.60	0.484	20.80
5	0.662	11.80	0.677	17.20	0.692	28.60
6	0.890	14.60	0.910	23.60	0.913	38.60
7	1.128	19.40	1.122	30.40	1.127	48.10
8	1.346	23.00	1.317	36.40	1.258	52.40

由表 2 的数据计算出传感器对应 20 mA, 30 mA 和 40 mA 励磁电流的非线性误差依次为 2.60%, 3.57% 和 1.91%, 对应的灵敏度依次为 13.37 mV/kN, 29.37 mV/kN 和 42.05 mV/kN.

对比表 1 和表 2 的数据处理结果,可以得出如下结论:图 7 电路的非线性误差普遍小于图 3 电路.虽然灵敏度相应降低了些,但换来了更好的传感器稳定性.

从实验数据上可以看出,磁间隙的存在也会降低检测装置的灵敏度,而取消间隙又会由于试件表面平整度、粗糙度等原因带来过大的测量误差.在某些应用场合,如测量油水井套管的应力,沿着内壁进

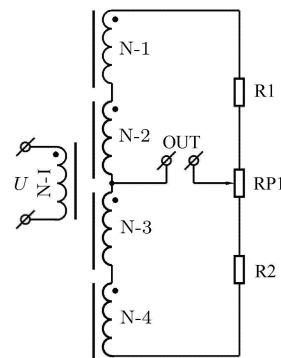


图 7 检测线圈串联电桥式取样电路

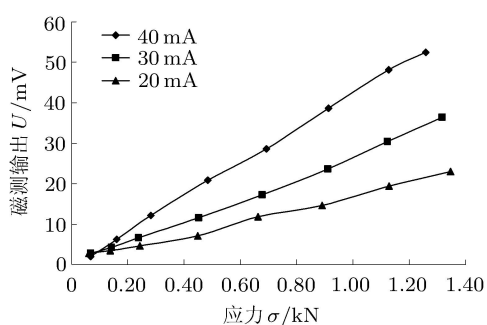


图 8 线圈串联电桥式电路应力响应曲线

行动态测量时, 必须保留有足够的间隙. 因为, 管内壁沾附着油污、岩屑、沙石等杂物, 设计时必须加以考虑. 同样, 通过测得对应不同间隙的应力响应曲线, 依据测试数据可设计特定工况、特定量程的磁测应力检测装置. 对应不同参数的传感器, 在使用前, 必须重新调校零点值.

4 结 论

本文依据逆磁致伸缩效应基本理论, 设计的四磁极差动式磁测应力装置, 能够有效检测铁磁板材试件单向受力. 通过频率响应测试, 给出了确定传感器最佳工作频率的方法, 并确定了对应参数的最佳频率; 通过板材试件单向拉伸试验, 验证了励磁电流、磁测气隙对测量灵敏度的影响; 为了解决结构对称性存在差异对零点值带来的影响, 设计了相关电

路. 利用电路调节, 使得零点值接近检测装置零值. 实验结果验证了所引用磁测理论的正确性^[14].

参 考 文 献

- 1 《美国无损检测手册》译审委员会译. 电磁卷美国无损检测手册: 电磁卷. 上海: 上海世界图书出版社, 1999
- 2 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测. 北京: 科学出版社, 1988
- 3 冯升波. 磁测残余应力法的基本理论和实验研究. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997
- 4 邱选兵. 基于脉冲涡流连铸钢坯无损检测理论与实验研究. [博士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2013
- 5 刘海顺. 基于磁各向异性特性应力测试的理论与方法研究. [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2008
- 6 邓瑞. 海洋立管系统的应力磁测技术研究. [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2011
- 7 王斌杰. 高速列车结构热点应力疲劳评定方法及应用研究. [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2009
- 8 常福清, 刘东旭, 刘峰. 平面状态下的力磁关系及实验分析. 燕山大学学报, 2009, 47(7): 352-356
- 9 王瑞宝. 一种基于物质磁性变化测量铁磁性材料应力的方法. [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2005
- 10 文西芹, 刘成文. 基于逆磁致伸缩效应的残余应力检测方法. 传感器技术, 2002, 21(3): 42
- 11 陈娟. 磁桥式应力传感器的设计. 传感器技术, 1997, 16(2): 30-35
- 12 石延平, 臧勇, 周庆贵. 基于铁基非晶态合金的非接触半套环式扭矩传感器的研究. 机械工程学报, 2012, 12(48): 13-17
- 13 罗健豪. 无损残余应力测量及其新技术. 力学与实践, 2003, 25(4): 7-12
- 14 王海斗. 表面残余应力检测技术. 北京: 机械工业出版社, 2013

(责任编辑: 刘希国)

(上接第 222 页)

在 13.26° 达 10% 的偏差. 本文作者取 EXP(C_{ES}) 方式下 1% 的偏差所对应的 5.455° 作为本文探讨的缓变流的临界角.

(4) 流动的数值模拟结果是合理的. 计算采用的网格数可以保证计算是可靠的. 对数值误差进行了初步分析, 得到平行板间出口最大的速度相对偏差小于 0.586%, 同时误差不受网格和斜面倾角的影响. 数值误差小且稳定, 估计为软件采用的数值方法引起.

致谢 感谢陈鑫老师、祁洋老师、方雷硕士、秦楠博士、向新桃博士等在 Fluent 使用上给予的帮助.

参 考 文 献

- 1 孔珑. 流体力学 (I). 北京: 高等教育出版社, 2003
- 2 陈卓如, 金朝铭, 王洪杰等. 工程流体力学 (第 2 版). 北京: 高等教育出版社, 2004
- 3 丁祖荣. 流体力学 (上册). 北京: 高等教育出版社, 2003
- 4 莫乃榕. 工程流体力学. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000
- 5 韩占忠, 王敬, 兰小平. Fluent——流体工程仿真计算实例与应用. 北京: 北京理工大学出版社, 2004
- 6 Streeter VL, Wylie EB, Bedford KW. Fluid Mechanics (9th edn). New York: Mcgraw-Hill, 1998
- 7 Munson BR, Young DF, Okiishi TH. Fundamentals of Fluid Mechanics. New York: John Wiley & Sons Inc, 2002
- 8 Fox RW, McDonald AT. Introduction to Fluid Mechanics (4th edn). New York: John Wiley & Sons Inc, 1992

(责任编辑: 胡 漫)