

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107388

基于脉冲磁化的阵列磁桥式位移传感器*

邓永乐, 王荣彪, 唐 健, 汪圣涵, 康宜华

(华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘 要: 针对热轧钢管和在役油井管等铁磁性工件的表面无损检测的应用需求, 提出一种阵列磁桥式位移传感方法和传感器, 实现在一定空间分辨率下针对表面形貌缺陷的磁成像检测。其中传感器与被测工件共同组成磁回路, 并采用特定的紧凑型阵列磁化结构, 而具体参数设置较灵活可以获得较好性能。首先通过分时激励减小相邻测点间的互扰, 并对阵列中单个位移测量磁路施加脉冲磁化; 再间隔采样各个测量磁路中的磁场, 计算得到对应位置的位移值。通过理论计算和仿真, 本文还研究了传感器在不同基础提离下分辨出方槽状表面形变的分辨力性能, 分析了在系统的扫描和采样参数影响下对被测表面成像的空间分辨率性能。相较于已有的 H 形磁桥式位移传感器位移测量量程为 1~5 mm, 线性度约 2%; 实验验证了该阵列传感器的量程为 0.2~7.0 mm, B - y 位移传感特性曲线拟合的线性度约为 1%。

关键词: 阵列; 位移传感器; 磁桥; 漏磁检测; 分时激励; 分辨力; 空间分辨率

中图分类号: TP212 TH711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Magnetic bridge type displacement sensor array in square pulse magnetization

Deng Yongle, Wang Rongbiao, Tang Jian, Wang Shenghan, Kang Yihua

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In view of the application requirement of surface nondestructive testing of ferromagnetic workpiece such as hot rolled steel pipe and oil well pipe in service, a magnetic bridge displacement sensing method and a sensor array are proposed to realize magnetic imaging detection of surface morphology defects with certain spatial resolution. In this method, the sensor and the workpiece form the magnetic circuit together. The sensor uses a special compact array structure of magnetization, which could obtain better performance due to varied specifications. Firstly, with a time-sharing method, it reduces the interference between adjacent measuring points, and pulse magnetizes each single displacement measuring magnetic circuit in the array. Secondly, the magnetic field in each measuring magnetic circuit is sampled at intervals. The displacement value of corresponding positions is calculated. Through theoretical calculation and simulation, this study analyzes the resolving power under different basic lift-off, in the array sensor testing morphology distortions like grooves. The spatial resolution of imaging the measured surface is analyzed under the influence of the system's scanning and sampling parameters. By experiment evaluation, the measuring range of this sensor array is 0.2~7.0 mm, and the B - y sensing characteristics fitting curve's linearity is about 1%. In comparison, the pre-existing H-shaped magnetic bridge displacement sensor is in the range of 1~5 mm, and the linearity is about 2%.

Keywords: array; displacement sensor; magnetic bridge; magnetic flux leakage detection; time-sharing excitation; resolving power; spatial resolution

0 引 言

钢材在工业中广泛应用, 是重要的工业产品和生产

原料。为避免各种表面缺陷造成钢材的失效, 提升品质和保证使用寿命, 在出厂时及在役期间需要对钢材进行表面检测。漏磁检测方法由于其高灵敏度低成本等优势, 是目前主要的自动化钢材检测方法^[1-2]。以检测热轧

收稿日期: 2021-01-15 Received Date: 2021-01-15

* 基金项目: 2018 年国家重点研发计划新能源汽车重点专项(2018YFB0106000) 资助

钢管为例,钢管的表面漏磁或涡流检测,通常以检测作为标准伤的人工槽或孔来评价探伤性能;但在检测钢管凹坑、辊印、壁厚减薄等深宽比较小的缺陷时,由于漏磁场变化平缓,易造成漏检^[2-3];而对于这种大面积的形貌畸变,采用位移传感器对铁磁体表面法向尺寸变化进行测量,可以得到较好的效果^[3-4]。

常规非接触位移传感器有电容式位移传感器^[5-6]、光学位移传感器^[7-8]和涡流位移传感器^[9-11]等。其中,电容式位移传感器和光学位移传感器,测量结果会受到工件表面的铁屑、油污、氧化皮等介质严重影响^[6-7]。如激光测距仪、光栅尺、干涉仪等的光学位移传感器结构复杂、价格昂贵^[10-11]。涡流位移传感器测量线性度较差,被测的多种电磁参数及外部环境因素、激励因素都会对传感器产生干扰,软硬件抗干扰措施较复杂^[12-13]。

磁性位移传感器更适用于铁磁性材料检测,且对表面有粉尘、水、油、油污、结垢等非磁性覆盖层不敏感,相对而言拥有高灵敏度、宽量程、高分辨率等优点^[4]。近年来测磁传感器发展迅猛,如 Hall 传感器^[14]、GMR、AMR 以及 TMR 等。本文选择广泛应用的 Hall 传感器作为测磁元件。本文的单个磁性位移传感器采用抗磁场干扰能力较强的桥式磁路结构,传感器与被测工件共同组成磁回路,参考磁通测量检测技术测量距离铁磁体被测表面的法向位移^[4-5,15-17]。在此基础上,提出了一种结构紧凑的磁桥式阵列传感器,减小了测头尺寸,提高了表面检测的效率。

1 原 理

如图 1 所示的结构是文献 [4-5] 中的单点磁桥式磁化结构。该方法构建出一种 H 形的磁桥式磁路,对 4 个磁桥臂上线圈对称激励。当 H 形磁桥单边靠近铁磁材料时,桥路上测得的磁感应强度 B 不再为 0,而是随测头下端面到被测表面的位移值 y 的增大而减小。根据文献中的结论及相关前期研究和计算,磁桥式传感器的结构参数决定了 $B-y$ 传感特性的拟合线性度和量程。其中,传感器 $B-y$ 拟合关系的线性度与 H 桥磁极的跨距正相关,但两磁极跨距的增大使得测头尺寸增大,限制了该型

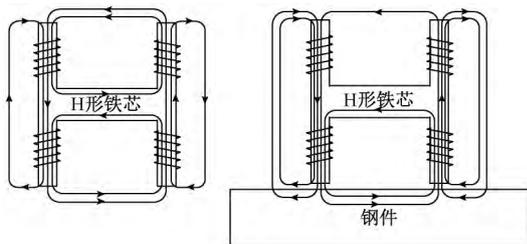


图 1 H 形磁桥路磁化结构

Fig. 1 H-shaped magnetic bridge magnetization structure

传感器的分辨力和空间分辨率。

针对这一问题,本文提出一种磁桥式位移传感器的阵列化新结构,如图 2 所示。采用类似于在 H 形磁桥的跨距之间插入另一个 H 形磁桥的方案,可以实现在保证磁桥路等效的跨距足够大的同时,减小传感器的间隔。并进一步采用分时激励的控制方法避免相邻通道间的磁场互扰。在图 2 构建的桥式磁路结构的阵列位移传感器模型中,在桥路铁芯上开槽放置 Hall 传感器以测量桥路内的磁感应强度。在本文采用空间插补后构成的阵列传感器中,H 形桥式的铁芯被解构变为单体十字形的铁芯;传感器单体体积缩小,单体为可阵列化、可拓展结构。相对于文献 [4-5] 中 H 形磁桥式位移传感器只能检测尺寸范围大于磁桥跨距的平缓缺陷,可以检测和分辨与单个铁芯底面尺寸相当的形貌缺陷。

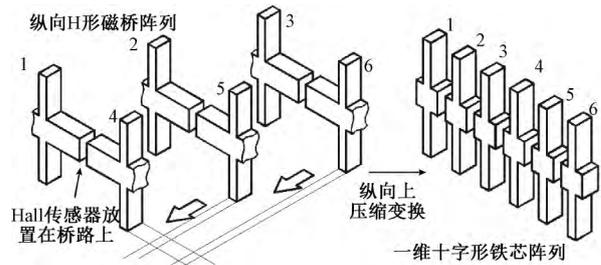
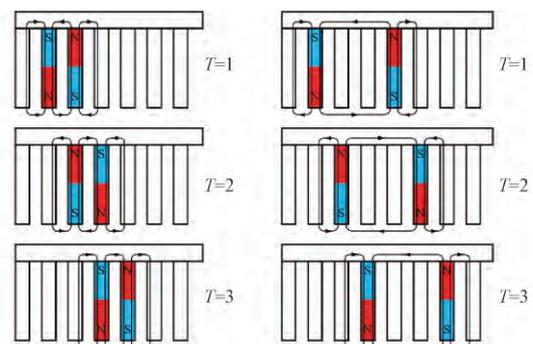


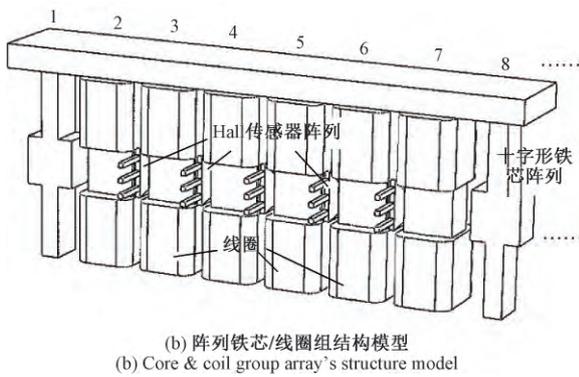
图 2 桥式磁化位移传感器的阵列化结构

Fig. 2 Array structure of the magnetic bridge displacement sensor

阵列中各铁芯和激励线圈的规格相同,同一个铁芯上两线圈通电磁化方向相同,相邻两个铁芯的磁化方向相反。在分时激励控制方案中,在同一时间段对两个的铁芯上的线圈进行通电激励,两个铁芯上两组线圈绕向相反。如图 3 (a) 所示,同时只有两个铁芯上的 4 个线圈串联,通直流电产生相等大小但反向的磁势,而在铁芯之间形成桥式磁路。如图 3 (b) 所示,一维阵列两末端的铁芯上未缠绕线圈,因为两端的铁芯激励磁化时形成的磁路左右不对称。



(a) 阵列铁芯/线圈组的时间激励示意图
(a) Schematic diagram of time-sharing excitation of core & coil group array



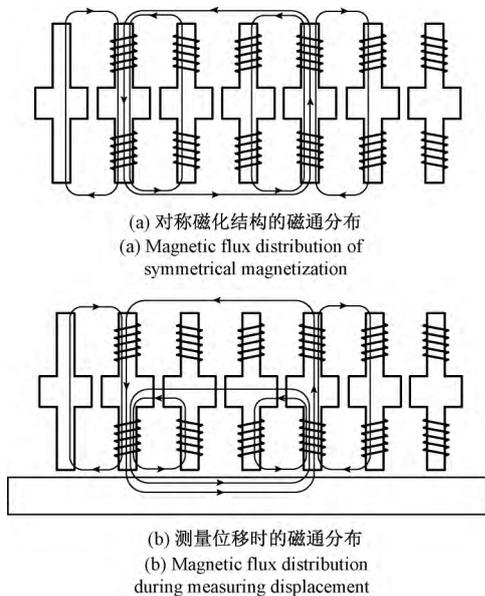
(b) 阵列铁芯/线圈组结构模型
(b) Core & coil group array's structure model

图3 阵列化的磁桥式位移传感器

Fig. 3 The magnetic bridge displacement sensor array

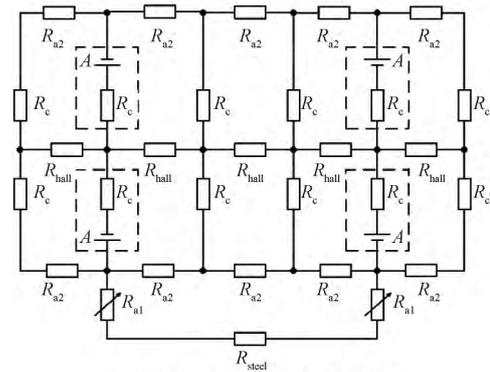
在阵列化传感器中两个同时激励的电磁铁中间间隔若干个铁芯的各个方案中,具体分析下述的这种激励磁化铁芯中间间隔两个铁芯的方案。该方案中有6个铁芯通磁降低了磁路中的磁阻非线性及漏磁,且两主磁极跨距较大、空气磁阻线性较好。如图4(a)、(b)中的磁路,把磁路中磁通的分布区域进行划分,得到各个磁介质区域的等效磁阻,并忽略等效磁阻以及磁路结构中部分不规则漏磁场的影响,整体的等效磁路模型如图4(c)的形式,该等效磁路中只有一个支路中的磁阻 R_{a1} 和被测位移值 y 有关。

根据磁路定律计算得到图4(c)中有源磁阻网络桥路上接收传感器处的磁通 ϕ_{hall} 如式(1)所示,式中参数含义如表1所示。磁路网络中只有 R_{a1} 正比于被测位移值,而计算结果显示分子分母只含一次 R_{a1} 项。把其余各等效磁阻设为常数,进行理想化地化简可得到如式(6)中一种近似双曲线函数的形式,即 $B-y$ 传感特性可由 $B=k/(y+a)+b$ 关系式描述,式中 a, b, k 为常数。



(a) 对称磁化结构的磁通分布
(a) Magnetic flux distribution of symmetrical magnetization

(b) 测量位移时的磁通分布
(b) Magnetic flux distribution during measuring displacement



(c) 阵列结构简化的等效磁路模型
(c) A simplified equivalent magnetic circuit model of the array structure

图4 阵列化桥式磁化结构磁化和等效磁路图

Fig. 4 Schematic diagram of magnetization of bridge array structure and equivalent magnetic circuit

表1 等效磁路模型和计算结果的参数

Table 1 The parameters of the equivalent magnetic circuit model and the calculated results

参数	参数含义
V_{hall}	Hall 传感器输出的表征磁感应强度大小的电压信息
B_{hall}	Hall 传感器敏感区域内的磁感应强度的模
ϕ_{hall}	等效磁路计算得到的桥路上的磁通大小
$A=N \cdot I$	单个线圈产生的磁势,等于线圈匝数乘以线圈电流
R_{steel}	铁磁性被测件中等效磁阻,近似常量
R_c	铁芯内部上/下半部分等效磁阻,近似常量
$R_{a1} \propto y$	激励铁芯和被测表面间介质等效磁阻,包含被测量 y
R_{a2}	相邻两铁芯之间介质等效磁阻,近似常量
R_{hall}	桥路上放 Hall 传感器空气隙的等效磁阻,近似常量
a_1, a_2, a_3, \dots	磁阻网络计算得到的各磁阻乘积多项式各项的常数
$n=10$	磁阻乘积项的总次数最大值
X_1	包含各磁阻乘积的 $n-1$ 次齐次项的和
X_2	包含各磁阻乘积的 $n-2$ 次齐次项的和
X_3	包含各磁阻乘积的 n 次齐次项的和
X_4	包含各磁阻乘积的 $n-1$ 次齐次项的和
$C_1 \propto A$	包含激励大小和磁阻大小关系的系数,近似常量
C_2, C_3	包含磁阻大小关系的系数,近似常量
$\mu = \mu_0 \mu_r$	R_{a1} 对应的空气隙磁导率,其中 $\mu_r = 1$
S	R_{a1} 对应的空气隙等效截面积
y	R_{a1} 对应的被测位移值

$$V_{hall} \propto B_{hall} \propto \phi_{hall} = \frac{A \times [X_1 + R_{a1} X_2]}{X_3 + R_{a1} X_4} \quad (1)$$

$$X_1 = \sum_{j+k+\dots=n-1} (a_1 R_{a2}^j R_c^k \dots) \quad [j, k, \dots \in N] \quad (2)$$

$$X_2 = \sum_{j+k+\dots=n-2} (a_2 R_{a2}^j R_c^k \dots) \quad [j, k, \dots \in N] \quad (3)$$

$$X_3 = \sum_{j+k+\dots=n} (a_3 R_{a2}^j R_c^k \dots) \quad [j, k, \dots \in N] \quad (4)$$

$$X_4 = \sum_{j+k+\dots=n-1} (a_4 R_{a2}^j R_c^k \dots) \quad [j, k, \dots \in N] \quad (5)$$

$$R_{a1} = \mu \frac{y}{S} \rightarrow \phi_{\text{hall}} = \frac{C_1}{C_2 + \mu \frac{y}{S}} + C_3 \quad (6)$$

2 仿 真

结合实验条件下现有的 Hall 元件 A1324 芯片尺寸为 3 mm×4 mm×1.5 mm, 最小矩形线圈内轮廓尺寸为 2 mm×4 mm×3 mm, 则对应磁桥路结构中的各个截面积和铁芯分别设为 3.0 mm×4.0 mm 和 1.5 mm×3.0 mm。按图 5 所示的铁芯阵列模型参数, 取一组具体数值进行仿真, 并分析说明该参数下的传感性能。

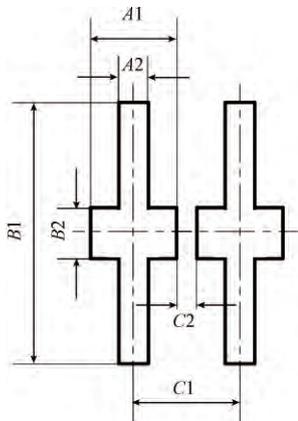


图 5 阵列铁芯尺寸参数

Fig. 5 Size parameters of core array

2.1 B-y 位移传感特性

传感器仿真模型的参数如表 2 所示, 按此参数用 COMSOL[®] 软件仿真分析忽略厚度因素的二维磁化模型中的稳定磁化状态, 对其中 3 号和 6 号铁芯上线圈通电, 得到如图 6 的磁感应强度分布图。

在图 6 中, 测点选择在被磁化的 3 号、6 号铁芯对称中心处, 即 4 号、5 号铁芯间。根据上述原理和仿真结果分析, 式(6)得到位移传感器的 B-y 传感特性可以用 $B=k/(y+a)+b$ 的形式进行拟合。进行拟合的结果如图 7 所示, 其中 a 取为 1.51 mm, y 的量为 0.40 ~ 6.00 mm, 对应 B 的范围为 2.61 ~ 19.98 mT, 用 $B-1/(y+1.51(\text{mm}))$ 关系拟合曲线得到拟合线性度约为 0.36% 相关系数 $R^2=0.999\ 920$, 即该传感器传感特性经过拟合有较好的线性度。

表 2 仿真分析的参数说明

Table 2 Description of simulation parameters

参数	大小	参数含义
A1	4.0	铁芯宽度/mm
A2	1.5	铁芯上磁桥臂宽度/mm
B1	19.0	铁芯高度/mm
B2	4.0	铁芯上桥路高度/mm
C1	5.5	铁芯中心距/mm
C2	1.5	铁芯间磁桥路空气隙/Hall 传感器厚度/mm
μ_r	4 000	铁芯相对磁导率
D1×E1	1.5×3.0	单个线圈内轮廓尺寸/mm ²
D2×E2	4.0×5.5	单个线圈外轮廓尺寸/mm ²
F	5.6	单个线圈高度/mm
N	100	单个线圈匝数
I	0.3	单个线圈激励电流/A

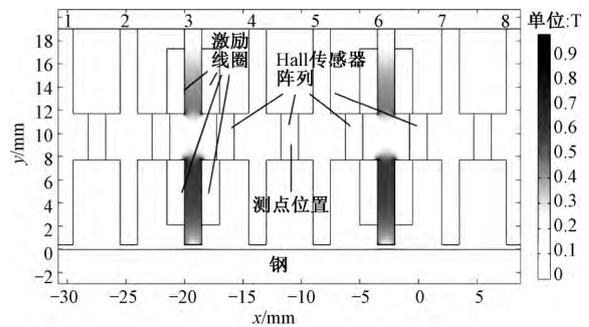


图 6 间隔两个铁芯的双铁芯同时激励时磁通密度 B 分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of magnetic flux density B distribution when two excited simultaneously cores separated by two cores

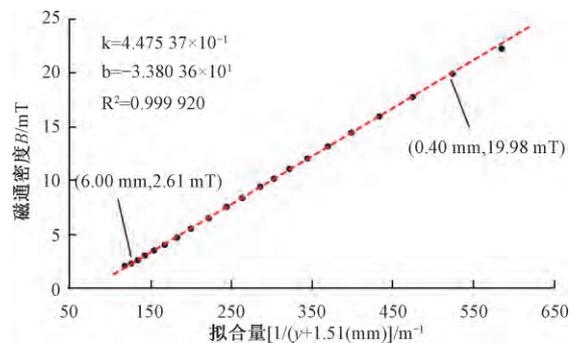


图 7 测点处磁感应强度 B 与位移值 y 关系曲线拟合
Fig. 7 The fitting curve of relation between displacement y and magnetic flux density B measured at the measuring point

用同样结构、不同参数的仿真模型,可以分析阵列的传感特性的变化。如磁桥路桥臂之间影响越小、特性曲线拟合的线性性能越好,主要影响参数为铁芯中心距 $C1$ 。讨论在铁芯的其他尺寸不变时,量程 0.40 ~ 6.00 mm 下探头的拟合位移传感特性,仿真结果如图 8 和表 3 所示。铁芯间隔越宽,拟合线性度先增后减小,均小于 1%。

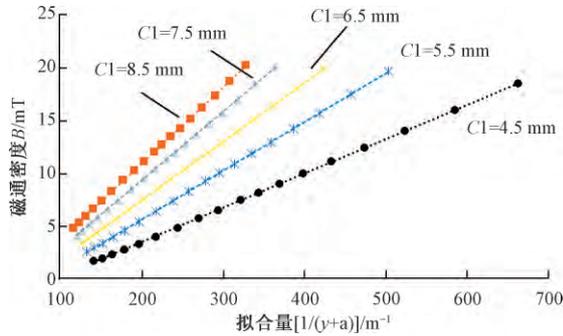


图 8 尺寸 $C1$ 改变时传感器测得 B 与位移值 y 关系曲线拟合

Fig. 8 The fitting curve of relation between the displacement, y , and the measured B with $C1$ change

表 3 不同尺寸下传感特性仿真分析

Table 3 Simulation analysis of sensing characteristics under different sizes

中心距 $C1/\text{mm}$	传感特性拟合 参数 a/mm	传感特性 拟合线性度/%
4.5	1.08	0.66
5.5	1.51	0.36
6.5	1.92	0.26
7.5	2.30	0.32
8.5	2.62	0.72

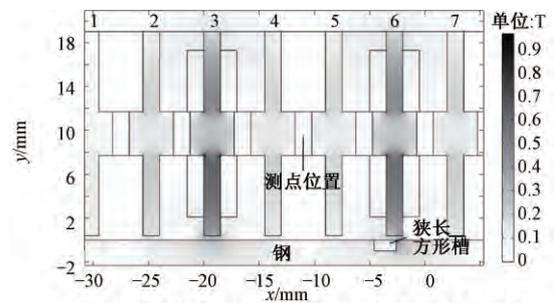
2.2 形貌分辨力

传感器检测的大面积表面畸变总有一定的面积限制,进一步研究考虑阵列传感器能够分辨的表面上最小尺寸的形貌变化的大小作为传感分辨力性能指标。

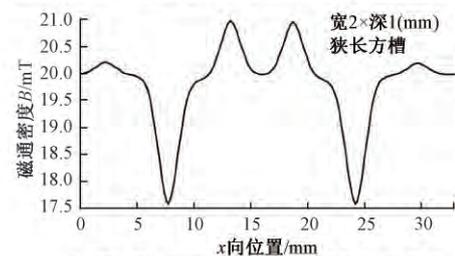
根据上述原理,传感器测距的灵敏区在被激励铁芯的正下方,区域大小与分辨力性能密切相关。如图 9(a) 中有狭长方截面槽的钢板的表面扫查的二维模型中,方槽的宽度分别设为 2.0 mm 和 0.5 mm,槽深为 1.0 mm,仿真阵列测头沿 x 轴横向扫查得到如图 9(b)、(c) 中的 $B-x$ 曲线。2.0 mm 宽方槽的扫查信号幅值远高于 0.5 mm 的信号;并根据 $B-1/(y+1.51(\text{mm}))$ 关系特性计算得到图 9(d) 和 (e) 中的 $y-x$ 曲线。

由于理论上阵列中未激励的铁芯下方仍存在扫查敏感区域,当方槽位于励磁铁芯的相邻铁芯下方时,测点处

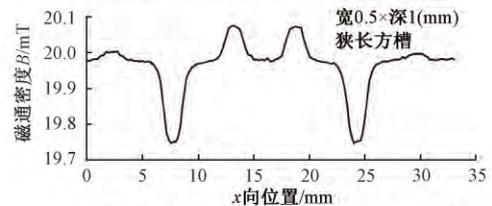
Hall 元件接收到一个反向的单峰信号。并且因为位移传感器的铁芯磁极有一定宽度,使得阵列测头测得的是对铁芯下空气隙的等效磁阻对应的平均距离 y' ,把方槽形突变的形貌等效为倒梯形,结果如图 9(d) 和 (e) 所示。仿真结果显示,该传感器对凹槽能大致进行还原,但是形貌突变使磁路及磁阻中存在非线性部分,通过测量信号还原方槽形貌的能力存在一定极限。



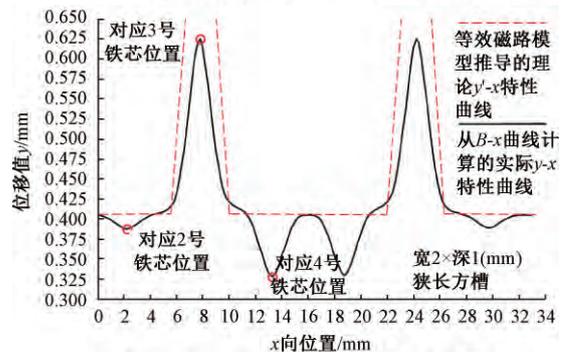
(a) 有狭长方槽的钢板表面扫查 2D 仿真模型及磁场分布
(a) 2D simulation model of steel plate surface scanning with a square groove & distribution of magnetic field



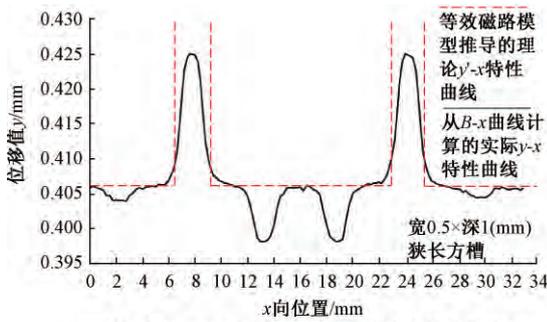
(b) 宽 2×深 1(mm) 方槽扫查下测点处的 $B-x$ 曲线
(b) The $B-x$ curve at the measuring point of scanning for a square groove with width 2×depth 1(mm)



(c) 宽 0.5×深 1(mm) 方槽扫查下测点处的 $B-x$ 曲线
(c) The $B-x$ curve at the measuring point of scanning for a square groove with width 0.5×depth 1(mm)



(d) 宽 2×深 1(mm) 方槽由等效磁阻磁路分析法推导 $y'-x$ 曲线以及 $B-x$ 曲线推算得到的等效位移值 $y'-x$ 曲线
(d) Equivalent reluctance magnetic circuit analysis to derive theoretical $y'-x$ curve and the equivalent displacement value of the $y'-x$ curve deduced from practical $B-x$ curve of square groove with width 2×depth 1(mm)

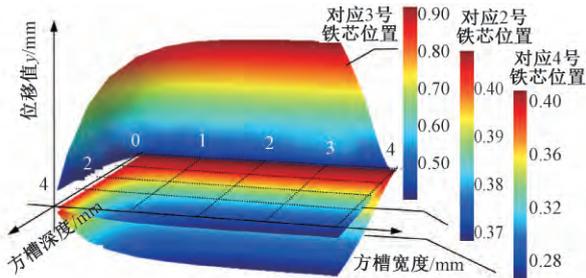


(e) 宽0.5×深1(mm)方槽由等效磁阻磁路分析法推导y-x曲线以及B-x曲线推算得到的等效位移值y-x曲线
 (e) Equivalent reluctance magnetic circuit analysis to derive theoretical y-x curve and the equivalent displacement value of the y-x curve deduced from practical B-x curve of square groove with width 0.5 × depth 1(mm)

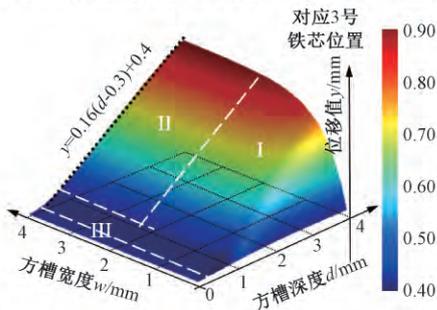
图 9 方槽扫描模型仿真结果分析

Fig. 9 Analysis of simulation results of square groove scanning model

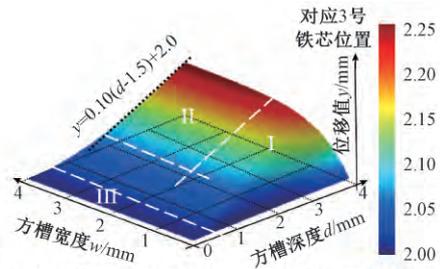
考虑不同尺寸方槽的扫查信号峰值大小,以方槽的宽度和深度为变量。如图 10(a)所示,得到方槽在第 2、3、4 号铁芯正下方时 y-x 曲线的各极值的大小,三者的比例近似保持不变,其中方槽在激励线圈/铁芯正下方时接收的信号明显强于在另两个铁芯下的信号,故以下主要考虑在激励线圈/铁芯正下方时的信号。



(a) 基础位移0.4 mm, 不同方槽尺寸参数下y-x曲线3个峰值变化
 (a) The basic displacement 0.4 mm, and three peak values of y-x curve change with variable size parameters of square groove



(b) 基础位移0.4 mm, 不同方槽尺寸参数下y-x曲线最大值变化
 (I区: 非线性区; II区: 线性区; III区: 截止区)
 (b) The basic displacement 0.4 mm, and the maximum value of y-x curve changes with variable size parameters of square groove (Zone I: nonlinear zone; Zone II: linear zone; Zone III: cut-off zone)



(c) 基础位移2.0 mm, 不同方槽尺寸参数下y-x曲线最大值变化
 (I区: 非线性区; II区: 线性区; III区: 截止区)
 (c) The basic displacement 2.0 mm, and the maximum value of y-x curve changes with variable size parameters of square groove (Zone I: nonlinear zone; Zone II: linear zone; Zone III: cut-off zone)

图 10 不同方槽尺寸参数下各峰值大小及变化

Fig. 10 Magnitude and variation of peak values under variable size parameters of square groove

测头在有狭长方槽的钢板表面扫查,由接收信号计算得到的位移 y 的峰值受到以下因素影响:当方槽的深度和宽度均增大超过一定的阈值后,槽宽度和铁芯底面宽度大小相当或比铁芯底面更大, y 峰值大小与方槽深度 d 可认为呈线性关系,为线性区如图中 II 区域;当槽宽度约小于铁芯该方向宽度时,测得位移值 y 与深度 d 非线性,为非线性区如图中 I 区域;而当槽深度较小时,测得 y 仍会发生较小变化但始终较小,为截止区如图中 III 区域。

当传感器到被测钢板的基础距离变化,对比图 10(b)和(c)的结果,在该尺寸参数下基础提离值分别为 0.4、2.0 mm 时,可以认为位移传感器能够精确测得的最小方槽形貌其参数至少满足深度分别大于 0.2、0.7 mm 左右;而需要辨识和还原被测方槽信息,还需要方槽参数满足宽度约大于 2 mm;在 II 区域内用测得位移值 y 还原实际深度信息 d 的线性关系的斜率分别近似为 0.16、0.10。

2.3 扫查成像空间分辨率

针对形貌畸变轮廓尺度比传感器铁芯底面积大的情况,需要考虑用等效位移信息重构被测表面。以分时控制下阵列传感器的“像素”采样间隔来表述位移传感器的空间分辨率特性。

根据等效磁阻的原理,和图 9 对测值 y 与等效距离 y'的分析,测量的等效位移受到铁芯磁极面积大小的影响,磁极的面积限制了阵列传感器的分辨率性能。对如图 11(a)所示,由于 x 方向上排布的相邻两个磁桥式传感单元有检测步距 Δx,等于铁芯间距 C1,传感器系统容易在铁芯之间的区域存在扫查盲区。而且,传感器在沿运动方向的扫查过程中,在时间上的间隔采样也会带来步距 vΔt。即阵列位移传感器的基础空间分辨率可表示为 C1 × v/f × cosβ,其中 v 为扫查速度, f 为采样频率, β 为

两者方向夹角。

在如图 11(b) 所示的对于例如钢管一类零件的圆柱面的扫查检测方案中,测头扫查检测中的覆盖率指标还与旋进扫查的螺距有关。传感器尺寸参数一定,合理设置螺旋角,以及减小旋进速度 v 、改变分时激励频率、增大采样的频率 f 缩小采样点的间距,可以提高测头扫查的覆盖率,可使得传感器在圆柱面上扫查两圈的平行间距小于 $C1$ 相邻测点的在二维平面内的间距小于 v/f ,提高传感器扫查检测的空间分辨率。

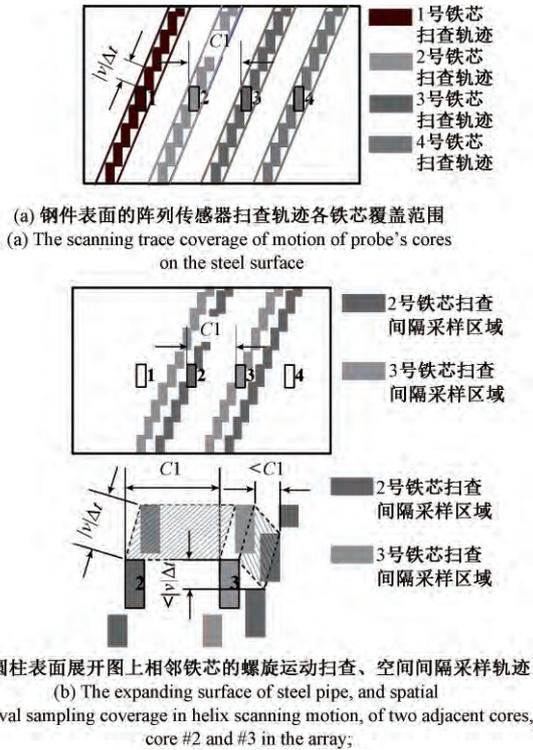


图 11 钢管表面展开表面及相邻铁芯(2号和3号铁芯)的螺旋扫查的间隔采样区域

Fig. 11 Schematic diagram of scanning trace coverage and spatial resolution of displacement sensor array

进一步还可以通过灵活设置合理的传感器尺寸参数如尝试更小的线圈和铁芯尺寸,或用多个一维阵列传感器构建二维阵列等方法 提高扫查覆盖率和空间分辨率。

3 实 验

针对上述理论计算和对传感特性的分析进行实验验证。实验主要搭建了实验平台,对阵列传感器的 $B-y$ 位移传感特性进行了验证和标定。如图 12 所示,测头安装在微动滑台上进行精确的位移测量。为了避免磁性材料影响阵列铁芯的磁路,整个阵列传感器除了铁芯均为非铁磁性的不锈钢加工,测头连接架保持阵列铁芯的结构

稳定性和下端对齐。阵列传感器的实际制作中调整的阵列位移传感器的参数,如表 4 所示。



图 12 阵列传感器测头安装到微动平台构成位移测量实验装置

Fig. 12 Sensor array probe installed into the displacement measurement experiment device with a micro-positioning platform

表 4 实际实验中参数变动说明

Table 4 Illustration of parameters changed in actual experiments

参数含义	实际参数	对应仿真参数
铁芯相对磁导率	$\approx 2\ 000$	4 000
单个线圈内轮廓尺寸/mm ²	2.0×4.0	1.5×3.0
单个线圈外轮廓尺寸/mm ²	2.5×4.5	4.0×5.5
单个线圈高度/mm	3.0	5.6
单个线圈匝数	100	100
单个线圈激励电流/A	0.25	0.30
线圈导线直径/mm	$\phi 0.13$	$\phi 0.10$

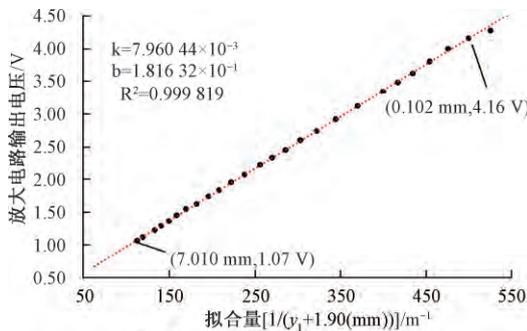
其次实验考虑阵列位移传感器的测量精准度。并把 Hall 元件的输出电压进行偏置和放大。实验中 输出电压值 V_{out} 由示波器测得 测量的精度约 $\pm 0.02\ V$; 运用微动滑台测传感器距被测面的相对位移 y_1 , 测量的精度约为 $\pm 5\ \mu m$ 。测量电压 5 次取平均值、测量位移 1 次, 实验结果数据如表 5 所示。得到的数据按 B 和 $1/(y_1 + 1.90\ mm)$ 关系 拟合得到的曲线, 在 $0.20\sim 7.00\ mm$ 量程范围内的线性

度约为 1.06%, 拟合的标准差 σ 约 13 mV, 相关系数 $R^2=0.999\ 819$ 如图 13(a) 和(b) 所示。

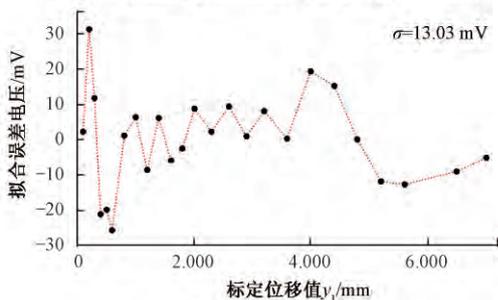
表 5 实验得到的放大后电压与相对位移(V_{out} , y_1)

Table 5 Amplified output voltage and relative displacement (V_{out} , y_1) obtained by experiments

y_1 /mm	V_{out} /V	y_1 /mm	V_{out} /V	y_1 /mm	V_{out} /V
0.005	4.28	1.201	2.74	3.597	1.63
0.102	4.16	1.400	2.60	4.001	1.54
0.202	4.00	1.600	2.45	4.402	1.44
0.301	3.82	1.801	2.33	4.799	1.37
0.401	3.66	2.003	2.22	5.206	1.29
0.499	3.50	2.298	2.08	5.602	1.23
0.600	3.38	2.600	1.96	6.503	1.12
0.801	3.15	2.903	1.84	7.010	1.07
1.003	2.93	3.202	1.75		



(a) 测值 V_{out} 与 $1/(y_1+1.90(\text{mm}))$ 拟合曲线
(a) Curve fitting of measured V_{out} and $1/(y_1+1.90(\text{mm}))$



(b) V_{out} 与 $1/(y_1+1.90(\text{mm}))$ 拟合误差
(b) Fitting error of V_{out} and $1/(y_1+1.90(\text{mm}))$

图 13 实验标定得到的 V_{out} 与 y_1 的曲线线性拟合及误差曲线

Fig. 13 Fitting curve and error curve of V_{out} and y_1 obtained in calibration experiment

如表 6 所示, 对比分析了该传感器与文献 [5] 的“表 4.6”中的 H 形磁桥式位移传感器阵列的传感特性。其中, 1~5 mm 量程下磁极跨距分别为 15 mm 和 8 mm 的、交流激励/永磁磁化 H 形磁桥传感器在阵列中间隔

10 mm 达到的位移传感拟合线性度, 与 0.20~7.00 mm 量程下中心距 5.5 mm 的十字铁芯阵列位移传感器的拟合线性度相当。即十字铁芯阵列传感器的位移传感特性更好且结构更为紧凑。

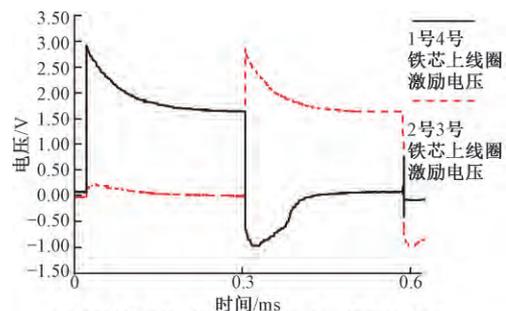
表 6 与 H 形磁桥式传感器的位移测量实验结果对比

Table 6 The displacement measurement experiment results compared with the H-shaped magnetic bridge sensor

传感器类型	相邻传感	传感特性	传感特性
	器中心距	拟合线性	拟合相关
	/mm	度/%	系数
交流激励 H 形磁桥式位移传感器阵列 ^[5]	10+15	1.08	0.999 4
永磁体 H 形磁桥式位移传感器阵列 ^[5]	10+8	1.05	0.999 5
十字铁芯阵列桥式位移传感器	5.5	1.06	0.999 819

实际测量前标定传感器的位移传感特性时, 需要调整和确定测头架、扫描运动机构, 及分时控制电路、激励电源电路及输出信号放大处理电路等的工作参数, 测得标定下的阵列位移传感器的 V_{out} - y 传感特性。再保持测头结构和电路参数不变, 把标定好的测头放到被测钢件表面形貌和位移测量的工作状态下, 根据在被测钢件表面实际测得的 V_{out} 值, 按标定的 V_{out} - y 传感特性对应得到唯一确定的 y 值。

实验选用的分时激励控制电路由方波信号发生器和多路复用模拟开关组成。实验测定相邻通道的阶跃响应的时域和频域特性, 并考虑到线圈的阻抗、钢件的磁化曲线、磁滞、Hall 元件和放大电路的频率响应等影响因素。实验测得在分时恒流激励下线圈两端电压的阶跃响应波形, 如图 14(a) 所示。激励的脉宽至少约 0.3 ms 时, 线圈两端电压可达到稳定电压 $1\pm 1\%$ 的范围。对应的 Hall 元件输出电压 V_{out} 的阶跃响应波形如图 14(b) 所示, 输出电压 V_{out} 达到稳定电压 $1\pm 1\%$ 的范围, 至少需要控制信号脉宽约 2.5 ms。



(a) 激励线圈电压稳定至少需要 0.3 ms 的脉冲宽度
(a) A pulse width of at least 0.3 ms required for stable excitation coil voltage

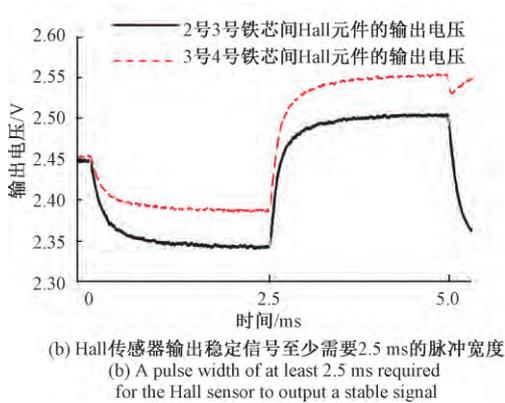


图 14 在分时激励下传感器通道的电压信号和时间响应特性

Fig. 14 Voltage signal and time response characteristics of channels under time-sharing excitation

4 结 论

本文设计了一种磁桥式的阵列位移传感器,提高了检测覆盖率、检测效率。根据检测的磁场磁感应强度 B 与被测量位移值 y 满足的近似双曲函数关系按 $B = k/(y+a) + b$ 关系进行拟合,并从等效磁路原理和仿真分析、实验验证了拟合成直线的线性性能。对比 H 形铁芯阵列十字形铁芯的磁路中非线性漏磁较小、拟合较好。相较于其 1.0~5.0 mm 时线性度为 2%、拟合相关系数 $R^2 = 0.9961$ ^[5]; 实验得到该传感器在提高 0.2~7.0 mm 量程范围内,实验结果的拟合曲线线性度在 1% 左右、拟合相关系数 $R^2 = 0.9998$,验证了由等效磁路推导的传感器原理和把传感特性拟合成双曲函数的正确性,证明了该阵列传感器作为位移传感器的线性性能较好。

进一步,本文对阵列传感器的分辨力和空间分辨率等性能做了分析。当单个铁芯端面的磁极面积越大时,接收敏感范围越大、分辨力越弱;面积越小时,磁阻、磁桥路磁通在经过小的表面突变时变化明显,检测形貌突变的能力较强,但会增大等效磁阻的非线性。以方形槽的形貌畸变为例,分析了在表面形貌畸变的范围小于相邻铁芯间距时,测量得到的位移值与实际深度在深度足够时呈现线性关系、并受方形槽宽度的限制;在 0.40 mm 基础提高下,该阵列位移传感器分辨力性能上能达到分辨出 0.20 mm 深度的表面形貌的突变。从扫查表面缓变形貌特征的应用出发,分析了阵列位移传感器的空间分辨率性能,改变尺寸参数和扫

查差参数可以提高空间分辨率。如传感器在钢件圆柱面上进行螺旋扫描检测时,采样时间间隔和旋进扫查进给量制约了空间分辨率。设置合适的扫描参数、采样参数和分时激励参数,可以减小被测表面上二维采样点的间距提高空间分辨率。实验进一步测定了该阵列位移传感器的时间响应性能,研究了分时激励控制参数的阈值问题。除此之外的阵列位移传感器的其他特性及影响因素还需深入分析研究。

参考文献

- [1] 康宜华,邵双方,伍剑波,等. 基于钢管旋转的纵向伤高速漏磁检测方法[J]. 石油机械, 2012(7): 63-66.
KANG Y H, SHAO SH F, WU J B, et al. Steel pipe rotation-based high speed magnetic leakage detection system [J]. China Petroleum Machinery, 2012(7): 63-66.
- [2] 康宜华,陈承曦,涂君,等. 一种基于钢管旋转的高速漏磁 $\varphi 180$ 检测系统[J]. 无损检测, 2014, 36(2): 67-70.
KANG Y H, CHEN CH X, TU J, et al. A high-speed magnetic flux leakage $\varphi 180$ detecting system based on steel pipe [J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(2): 67-70.
- [3] ZHANG J, WANG R, DENG Z, et al. A displacement sensing method based on alternating current magnetic flux measurement [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(8): 085010.
- [4] 张继楷. 磁通测量位移传感方法及在钢管形貌畸变检测中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
ZHANG J K. A magnetic-flux-measurement displacement sensing method and its application in the surface distortion inspection of steel pipe [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [5] BOBY G, TAN Z, STOYAN N. Advances in capacitive, eddy current and magnetic displacement sensors and corresponding interfaces [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9595-9607.
- [6] YE Y, ZHANG C, HE C, et al. A review on applications of capacitive displacement sensing for capacitive proximity sensor [J]. IEEE Access, 2020, 8: 45325-45342.

- [7] DING D, ZHAO Z, LI Y, et al. Calibration and capability assessment of on-machine measurement by integrating a laser displacement sensor [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021(113) : 2301–2313.
- [8] 聂晨晨, 张海波, 陶卫, 等. 基于 FPGA 与 DSP 的一体化激光三角位移传感器系统 [J]. *计算机测量与控制*, 2012(6) : 1725–1728.
- NIE CH CH, ZHANG H B, TAO W, et al. Integrative laser triangulation displacement sensor system based on FPGA and DSP [J]. *Computer Measurement & Control*, 2012(6) : 1725–1728.
- [9] YU Y, LI H, XUE K, et al. Temperature invariant phenomenon in dual coil eddy current displacement sensor: Investigation, verification and application [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(21) : 9680–9687.
- [10] 宋士兰, 卢文科, 左锋, 等. 工业控制中电涡流传感器位移测量精度研究 [J]. *信息技术与网络安全*, 2018, 37(2) : 85–89.
- SONG SH L, LU W K, ZUO F. Research on the displacement measurement accuracy of eddy current sensor in industrial control [J]. *Information Technology and Network Security*, 2018, 37(2) : 85–89.
- [11] BERTACCHINI A, LASAGNI M, SERENI G. Effects of the target on the performance of an ultra-low power eddy current displacement sensor for industrial applications [J]. *Electronics*, 2020, 9(8) : 1287.
- [12] LEE S W, SON S H. A study on the design of hall-sensor interface instrumentation amplifier to improve frequency operating range and noise characteristic using current feedback [J]. *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, 2020, 18(8) : 41–50.
- [13] SCHRAMM M, HOFMANN W. Novel magnetic displacement sensor for mechatronical systems [C]. In: *IECON 2007–33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 2007: 2219–2224.
- [14] 曾涛, 王大伟, 谭久彬, 等. 差分式自阻尼位移传感器传感特性研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(2) : 18–24.
- ZENG T, WANG D W, TAN J B, et al. Research on the sensing characteristics of differential self-damping displacement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(2) : 18–24.
- [15] 袁鑫, 荆根强, 彭璐, 等. 激光投射式位移计在线校准方法与系统设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(6) : 23–30.
- YUAN X, JING G Q, PENG L, et al. On-line calibration method and system design for laser-projection displacement meter [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(6) : 23–30.
- [16] 史尧臣, 周宏, 唐武生, 等. 基于激光三角法的汽车同步带齿形轮廓参数测量 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(6) : 138–145.
- SHI Y CH, ZHOU H, TANG W SH, et al. Profile parameters measurement of automotive synchronous belt based on laser triangulation method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(6) : 138–145.
- [17] 钟志贤, 祁雁英, 蔡忠侯, 等. 磁轴承用位移传感器差动安装的误差补偿方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(10) : 17–23.
- ZHONG ZH X, QI Y Y, CAI ZH H, et al. Research on the error compensation method for differential installation of displacement sensor for magnetic bearing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(10) : 17–23.

作者简介



邓永乐, 2018 年于华中科技大学获得学士学位, 现为华中科技大学硕士研究生, 主要研究方向为传感器技术和无损检测。

E-mail: m201870572@hust.edu.cn

Deng Yongle received his B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2018. He is currently a master student at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include sensor technology and non-destructive testing.



王荣彪(通信作者), 2016 年于四川大学获得学士学位, 现为华中科技大学博士研究生, 主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: rongbiaowang@hust.edu.cn

Wang Rongbiao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Sichuan University in 2016. He

is currently a Ph. D. candidate at Huazhong University of Science & Technology. His research interest is electromagnetic non-destructive testing.



唐健 2016 年于四川大学获得学士学位, 现为华中科技大学博士研究生, 主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: tangj@hust.edu.cn

Tang Jian received his B. Sc. degree from Sichuan University in 2016. He is currently a Ph. D. candidate at Huazhong University of Science & Technology. His research interest is electromagnetic non-destructive testing.



汪圣涵 2012 年于合肥工业大学获得学士学位, 2016 年于东北大学获得硕士学位, 现为华中科技大学博士研究生, 主要研究方向为传感器技术和信号处理技术。

E-mail: d202080229@hust.edu.cn

Wang Shenghan received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2012, and received his M. Sc. degree from Northeastern University in 2016. He is currently a Ph. D. candidate at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include sensor technology and signal processing technique.



康宜华 现为华中科技大学教授、博士研究生导师, 主要研究方向为无损检测新技术和数字化无损检测装备。

E-mail: yihuakang@hust.edu.cn

Kang Yihua is currently a professor and a Ph. D. advisor at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include non-destructive testing and digital nondestructive testing equipment.