

文章编号: 2095-4980(2015)02-0347-05

一种屏蔽式电涡流传感器的研制

王 毅, 汤紫峰, 曾永菊

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 某构件为多层窄间隙结构的容器装置, 为测试在具有一定压力的高速流场中流体诱发的内层板振动情况, 基于电涡流原理设计了一种屏蔽式电涡流传感器, 完成了屏蔽式电涡流传感器的探头线圈参数和探头壳体结构参数的优化设计、装配调试和第三方校准。试验结果表明: 研制的屏蔽式电涡流传感器, 在不干扰“流场”, 对装置结构不构成影响的前提下, 实现了板间窄间隙振动的测试, 传感器可靠有效。

关键词: 屏蔽式; 电涡流传感器; 窄间隙

中图分类号: TN98; TP212.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201502.0347

Design of a shielded eddy current sensor

WANG Yi, TANG Zifeng, ZENG Yongju

(Institute of Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A certain component is a kind of multilayer narrow gap container. To test the vibration of slab induced by flowing water at high speed in this component, a shielded eddy current sensor is designed based on the eddy current principle. The coil parameters of the probe and the structure parameters of probe's shell are optimized for the proposed shielded eddy current sensor. The assembly and debugging, as well as the calibration of the third party, are performed. The test results show that: the proposed shielded eddy current sensor, which has no interference to the flow field and no breakage to the structure of the device, can realize the vibration test of slabs with narrow gap reliably and efficiently.

Key words: shielded; eddy current sensor; narrow gap

为了研究核电反应堆某构件在复杂环境中的预期使用寿命, 常用流致试验进行模拟分析, 并进行相应的评估。核反应堆中某构件为多层窄间隙结构的容器装置, 需测试该装置的多层间隙在流水作用下引起的内层板振动情况。由于间隙内有流水, 且有一定水压力, 该测试要求不能影响间隙内水流场, 同时避免对装置的内外壁结构进行破坏。采用电涡流传感器^[1-3]解决振动位移测试问题是很好的方式之一, 但现有的电涡流传感器无法满足该环境条件下的间隙检测^[4-5]要求。因此, 笔者设计了一种屏蔽式电涡流传感器, 以不干扰流场, 对装置结构不构成影响的方式, 实现板间窄间隙振动的测试。

1 屏蔽式电涡流传感器

1.1 电涡流传感器

电涡流传感器是利用涡流效应原理的一种电感式传感器。能够以静动态、非接触、高线性度、高分辨力的方式测量被测金属导体距探头表面的距离。电涡流传感器以其长期工作可靠性好、测量范围宽、灵敏度高、分辨率高、响应速度快、抗干扰能力强、不受油污等介质的影响、结构简单等优点, 在大型旋转机械状态的在线监测与故障诊断中得到广泛应用。电涡流传感器由探头(含延伸电缆)、前置器以及被测体构成基本工作系统, 如图 1 所示。但是, 由电涡流产生的原理可知, 标准电涡流传感器探头的敏感元件——线圈由骨架支撑突出于安装杆, 测试时必须保证电涡流传感器的探头在其周边一定空间内无金属材料, 或在探头处开倒角孔或平底孔, 孔径为探头直径的 3 倍, 如图 2 所示; 另外被测导体材料以及形状等也会对测试产生影响, 这就是应用标准电涡流传感器所需注意的因素, 也可以说是其局限性。

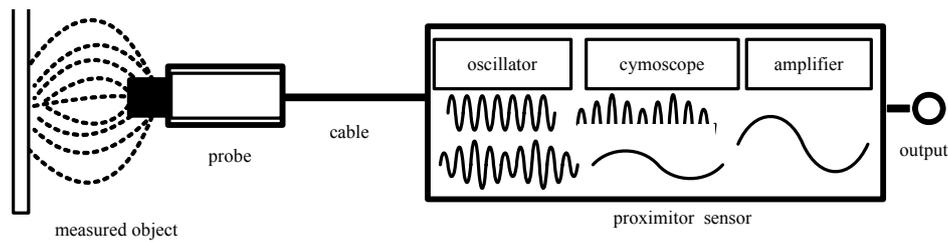


Fig.1 Principle and structure of eddy current sensor
图 1 电涡流传感器原理及构成示意图

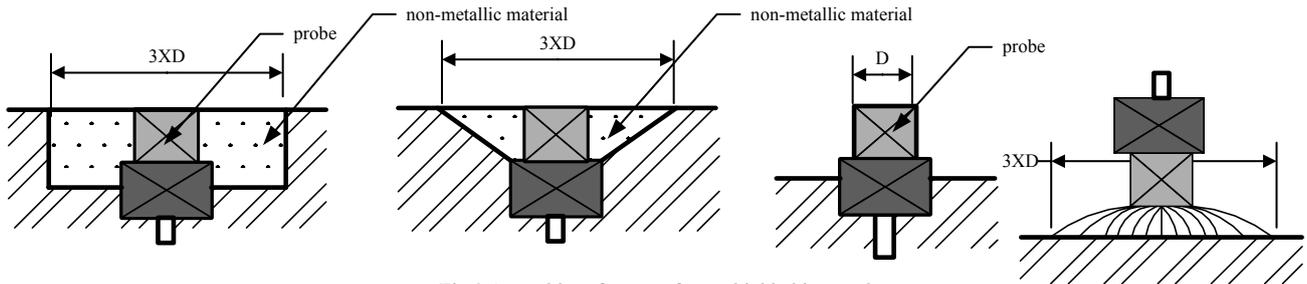


Fig.2 Assembly references for unshielded in metal
图 2 标准电涡流传感器的安装测试要求

1.2 屏蔽式电涡流传感器

基于上述标准电涡流传感器检测的局限性, 针对窄间隙或不宜在传感器安装表面产生较大破坏的测试需求, 设计了一种屏蔽式电涡流传感器, 该传感器把线圈置于探头壳体内, 与探头壳体端面平齐, 使传感器的安装环境条件更加灵活, 探头测试空间尺寸要求很低, 被测体表面尺寸是标准传感器要求的 $1/4$, 不必在探头处开倒角孔或平底孔, 特别适合窄间隙等特殊环境条件下的测试问题。屏蔽式电涡流传感器安装要求如图 3 所示。

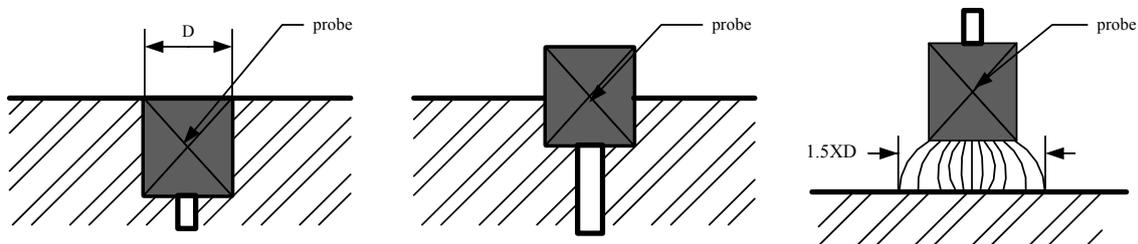


Fig.3 Assembly references for shielded in metal
图 3 屏蔽式电涡流传感器的安装测试要求

根据电涡流原理可知, 这种结构形式的电涡流传感器, 探头壳体将对线圈形成一定的屏蔽, 即传感器的线性范围以及灵敏度等都会受到一定影响。因此根据屏蔽式电涡流传感器实际结构, 必须合理优化线圈参数^[6-9]、骨架以及安装杆壳体的结构尺寸参数, 才能使传感器的线性范围及灵敏度达到最优, 满足测试要求。

2 屏蔽式电涡流传感器设计

屏蔽式电涡流传感器由屏蔽式电涡流传感器探头和前置器 2 部分组成, 屏蔽式电涡流传感器探头与标准电涡流传感器探头结构类似, 均由线圈、骨架、护套、绝缘套、探头壳体、安装螺母以及同轴电缆等几部分组成, 不同之处在于屏蔽式电涡流传感器探头的线圈和探头壳体需要进行单独的设计, 同时根据结构的特点, 对各部分参数进行优化设计, 使屏蔽式电涡流传感器的线性范围和灵敏度达到最优, 从而满足测试指标的要求。

2.1 屏蔽式电涡流传感器探头线圈设计

屏蔽式电涡流传感器探头线圈的设计主要考虑两方面: 第一, 探头线圈的形状和结构尺寸; 第二, 还要考虑在屏蔽条件下, 探头壳体对线圈的影响。这两方面都关系到传感器的输出灵敏度和线性测试范围。

电涡流传感器的探头线圈可以看作是由若干个单匝线圈组成, 当施加交变电流激励时, 其激励磁场可以认为是由若干单匝载流线圈产生磁场的叠加, 因此, 分析探头轴向磁场强度分布情况可以从分析单匝载流线圈的

轴向磁场强度分布规律着手。

图 4(a)所示是一个单匝载流线圈，线圈受到交变电流激励，在任意时刻，设线圈电流为 I ，其轴线上任意点 P 的磁感应强度 B_p 可由毕奥-萨伐定律推导：

$$B_p = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{r^2}{\sqrt{(x^2 + r^2)^3}} \quad (1)$$

式中： μ_0 为真空磁导率； r 为线圈半径； x 为线圈轴线上点 P 与线圈平面间的距离。

图 4(b)所示是在某特定激励电流 I 时，取不同的线圈半径 r 按式(1)所绘制的 B_p-x 曲线簇。从图 4(b)可以看出：在相同激励电流的情况下，半径小的载流线圈，其近端磁感应强度大，轴向衰减快，表现出测试线性范围小；半径大的载流线圈，其近端磁感应强度小，轴向衰减慢，表现出测试线性范围较半径小的载流线圈大。

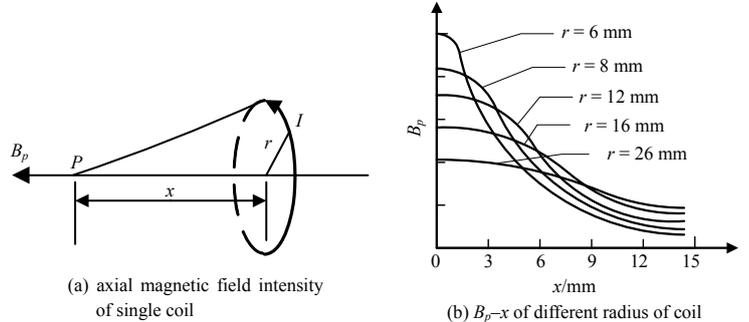


Fig.4 Single coil
图 4 单匝线圈

由多匝载流线圈组成的电涡流位移传感器的探头线圈如图 5(a)所示，线圈由 N 匝组成，激励电流为 I 时，则其轴线上任意点 P 的磁感应强度 B_p 为：

$$B_p = \frac{\mu_0 NI}{2(r_b - r_a)c} \left((x+c) \ln \frac{r_b + \sqrt{r_b^2 + (x+c)^2}}{r_a + \sqrt{r_a^2 + (x+c)^2}} - x \ln \frac{r_b + \sqrt{r_b^2 + x^2}}{r_a + \sqrt{r_a^2 + x^2}} \right) \quad (2)$$

式中： r_a 为探头线圈内径； r_b 为探头线圈外径； c 为探头线圈厚度； x 为线圈轴线上点 P 与线圈平面间的距离。

将不同参数的线圈，在某特定激励电流、线圈匝数时，用式(2)进行计算，并绘制出 B_p-x 对比曲线，如图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)所示。

通过对比可知：线圈薄时，其灵敏度高，即为了使一定大小线圈内、外径的传感器具有较大的线性测量范围和尽可能高的输出灵敏度，需要将线圈设计得厚度尽可能小；线圈外径大时，其线性测试范围大，但灵敏度降低，线圈外径小时，线性范围虽然小，但其输出灵敏度会增大；线圈内径只在靠近传感器的近端时有一定变化，基于测试线性范围的考虑，应适当加大线圈内径。但为了使探头线圈具有足够的电感量，一般不宜使线圈内径过大，也不宜使线圈厚度太小。通常传感器的测量线性范围为探头线圈直径的 1/3~1/5。

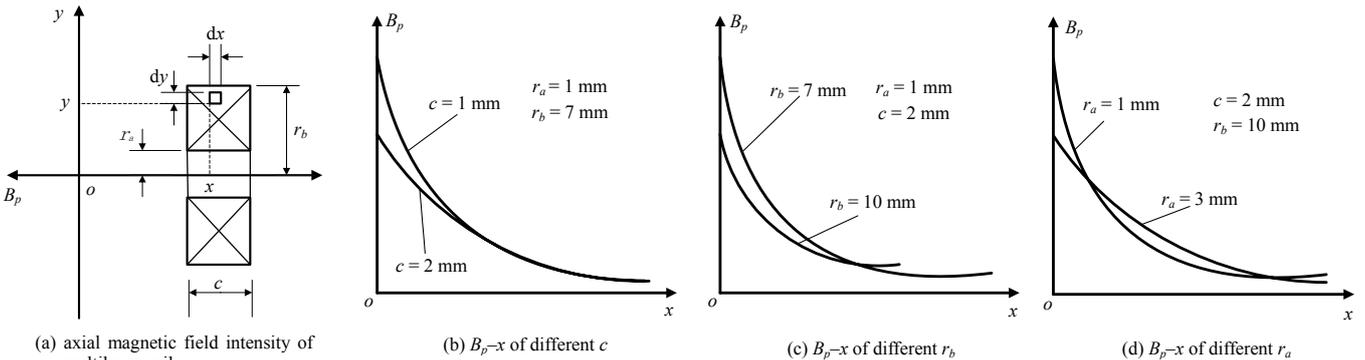


Fig.5 Multilayer coil
图 5 多匝载流线圈

上述讨论结果只是一个定性的关系。在设计探头线圈结构时，一般依据上述定性关系，根据测试量程要求，参考图 4(b)初步确定线圈外径，再通过模型试验进行修正后确定。为了使电涡流传感器具有良好的输出特性，除探头线圈结构优化外，还应采用损耗小(体积电阻率大)的线圈骨架材料和探头填充材料，同时需对线圈的导线直径进行优选。经计算分析，并根据测试要求，采用矩形线圈，其线圈参数为： $r_a=1$ mm， $r_b=3.5$ mm， $c=1$ mm，保证有足够的测量线性范围和灵敏度。

2.2 探头壳体设计

探头壳体是整个探头的支撑连接主体，是探头各组件相互连接配合的关键部件，同时探头壳体的设计关系到探头及传感器性能。根据电涡流传感器原理及结构特点，工程上把它简化为激励线圈—涡流计算环的数学模

型。设导体为面积足够大的平面导体，以电涡流传感器的轴线为中心，当传感器工作时，在导体表面将形成环状电涡流，可以推出如下公式：

$$J_{0r} = \begin{cases} J_{0b}\lambda^4 e^{-4(1-\lambda)} & r \in [0, r_b] \\ J_{0b}\lambda^{14} e^{14(1-\lambda)} & r_b < r \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\lambda=r/r_b$ ； r 表示离线圈中心轴的距离； r_b 表示线圈外半径； J_{0b} 表示被测导体表面上， $r=r_b$ 处电流密度； J_{0r} 表示被测导体表面上， r 处的电流密度。由公式(3)所做的电涡流电流密度的径向分布曲线见图 6。

其径向电流密度遵循如下规律：当半径 $r=0$ 时，电流密度为零；随着半径 r 的增大，电流密度也增大，且在半径 r 等于探头线圈外径时达到最大值；半径 r 继续增大时，电流密度又趋于零。当导体的外径为线圈外径的 1.83 倍时，电涡流径向密度已衰减到最大值的 5%；当被测导体的外径为线圈外径的 2.14 倍时，电涡流径向密度已衰减到最大值的千分之五。在实际应用中，一般要求被测导体外径为探头直径的 2.5 倍以上。

线圈在探头壳体产生的电涡流可以按被测导体来看待，但是由于壳体的内外半径差很小，产生涡流的表面很小，且一般情况下，探头壳体距线圈约为 1 倍线圈直径的距离，这时探头壳体对线圈的影响几乎可以忽略。然而屏蔽式电涡流传感器其线圈在探头壳体内，探头壳体对线圈起到一定屏蔽作用，对传感器线性范围和灵敏度产生一定影响。为了减小探头壳体对线圈的影响，应该把壳体内径增大到线圈直径的 2.5 倍以上，然而随着壳体内径的增大，探头壳体的直径也将随之增加很大，实际使用中反而受到限制。根据理论分析以及实际测试，在相同探头线圈半径 r_b ，不同探头壳体内径 R 的情况下，传感器的线性范围之间的关系如图 7(a)所示；在相同探头壳体内径 R ，不同探头线圈半径 r_b 的情况下，传感器的线性范围之间的关系如图 7(b)所示。通过 2 个变化关系之间的比较分析可知，探头壳体内径和线圈半径存在一个最佳比值，即探头壳体内径约为探头线圈半径的 2 倍。由此探头壳体的内径采用 $\Phi 14$ mm，安装采用 M16×1 结构形式。这样减小了探头壳体的外径，又达到较大的线性范围和灵敏度。

2.3 屏蔽式电涡流传感器的制作及测试

探头线圈参数和壳体内外尺寸确定后，探头部分其他组件对应配套设计即可。其设计的屏蔽式电涡流传感器探头结构示意图如图 8 所示。

按照屏蔽式电涡流传感器探头制作工艺制作其探头，并按电涡流传感器调试工艺进行调试，该批次调试屏蔽式电涡流传感器 8 套，经过第三方校准，线性范围达到 1.6 mm 以上，灵敏度在 5 V/mm 以上，静态和动态性能也完全满足测试要求。部分传感器校准数据见表 1。

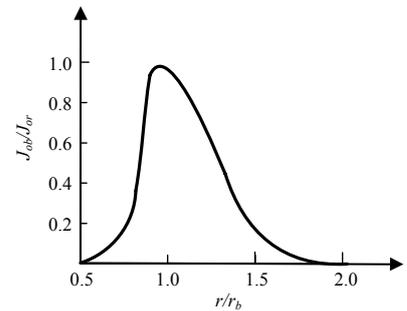
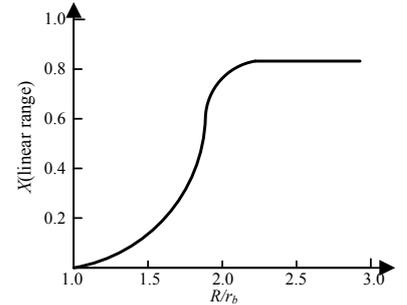
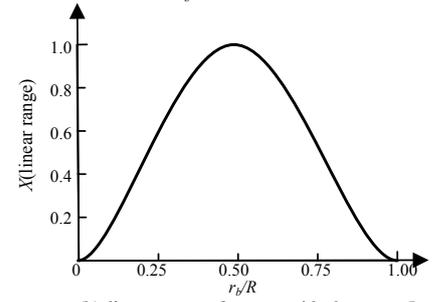


Fig.6 Distribution of radial eddy current
图 6 电涡流的径向分布



(a) linear range of sensor with the same r_b and different R



(b) linear range of sensor with the same R and different r_b

Fig.7 Linear range of sensor VS. the ratio of r_b and R

图 7 探头线圈半径 r_b 和壳体内径 R 之比与传感器的线性范围 X 变化关系

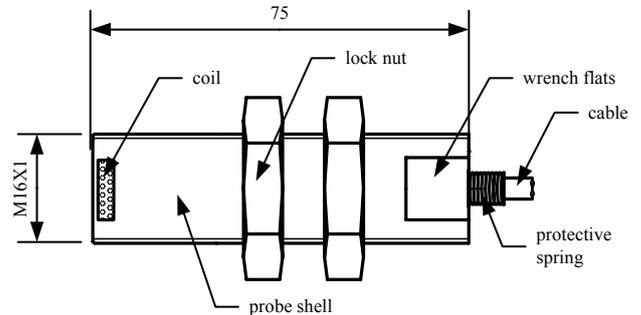


Fig.8 Probe of shielded eddy current sensor
图 8 屏蔽式电涡流传感器探头示意图

表 1 校准数据/结果

Table1 Data/results of calibration

displacement/mm	data									results	
	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	linearity/(%)	sensitivity/(V·mm ⁻¹)
H1 output voltage/V	-4.085	-3.122	-2.114	-1.066	0	1.072	2.128	3.158	4.126	0.88	5.209
H2 output voltage/V	-3.955	-3.020	-2.040	-1.030	0	1.029	2.058	3.029	3.964	0.74	5.021

3 试验结果及结论

该流致振动试验是对某构件的多层间隙振动进行测试,其安装示意图如图 9 所示,共布置 6 个测试点,用户提供的某测试点在某状态下的实时振动如图 10 所示,测试数据和理论分析计算基本吻合。

本文中设计的用于某构件的窄间隙振动位移检测的屏蔽式电涡流传感器,各项性能指标满足要求,且不影响间隙的水流场,对产品的壳体结构也不构成影响,实现了窄间隙振动测试,获得了可靠有效的数据,研制的屏蔽式电涡流传感器可靠有效。

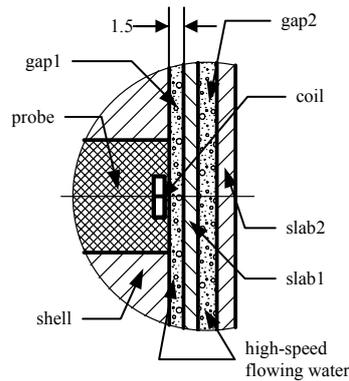


Fig.9 Assembly references for shielded in field test
图 9 屏蔽式传感器探头现场测试安装示意图

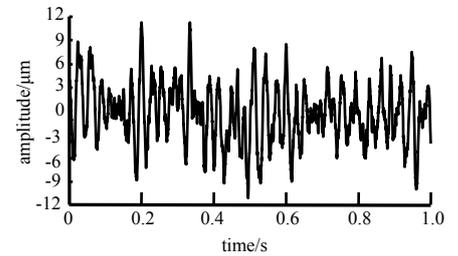


Fig.10 Curve of flow-induced vibration
图 10 流致振动实时曲线

参考文献:

- [1] 谭祖根,汪乐宇. 电涡流检测技术[M]. 北京:原子能出版社, 1986. (TAN Zugen,WANG Leyu. Eddy Current Inspection Technology[M]. Beijing:Atomic Energy Press, 1986.)
- [2] 田新启,陈虎勋. 振动涡流传感器关键技术研究[J]. 振动与冲击, 2010,29(1):157-161. (TIAN Xinqi,CHEN Huxun. Study on the key technology of eddy current vibration sensors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(1):157-161.)
- [3] 焦志强. 涡流传感器位移检测关键技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012. (JIAO Zhiqiang. Study on the key technology of eddy current displacement sensor test[D]. Dalian,China:Dalian University of Technology, 2012.)
- [4] 张刘泽,吴峻. 中低速磁悬浮列车电涡流间隙传感器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2010(1):1-3. (ZHANG Liuze,WU Jun. Design of eddy current gap sensor for low speed Maglev vehicle[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(1):1-3.)
- [5] 李红伟,刘淑琴,于文涛,等. 电涡流传感器检测磁悬浮转子轴向位移的方法[J]. 仪器仪表学报, 2011,32(7):1441-1448. (LI Hongwei,LIU Shuqin,YU Wentao,et al. Maglev rotor axial displacement detection method using eddy current sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011,32(7):1441-1448.)
- [6] 孟得东,刘凯,梁树甜,等. 空芯电涡流传感器探头线圈特性的研究[J]. 船电技术, 2011,31(1):17-20. (MENG Dedong,LIU Kai,LIANG Shutian,et al. Characteristics of hollow eddy current sensor probe coil[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2011,31(1):17-20.)
- [7] 于亚婷,杜平安,廖雅琴. 线圈形状及几何参数对电涡流传感器性能的影响[J]. 仪器仪表学报, 2007,28(6):1045-1050. (YU Yating,DU Pingan,LIAO Yaqin. Study on effect of coil shape and geometric parameters on the performance of eddy current sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007,28(6):1045-1050.)
- [8] 丁天怀,陈祥林. 用于测量曲面间隙的电涡流传感器线圈[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2006,46(2):180-183. (DING Tianhuai,CHEN Xianglin. Eddy current sensor coil for measuring gaps between curved surfaces[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006,46 (2):180-183.)
- [9] 黄小秋,丁天怀,付志斌. 简化目标函数的电涡流传感器线圈参数优化设计法[J]. 仪表技术与传感器, 2000(11):3-5. (HUANG Xiaoqiu,DING Tianhuai,FU Zhibin. Optimization design of eddy current sensor coil's parameters by simplifying destination function[J]. Instrument Technique and Sensor, 2000(11):3-5.)

作者简介:



王 毅(1969-),男,重庆市人,学士,高级工程师,主要研究方向为传感技术和测试技术.email:wangyi@caep.ac.cn.

汤紫峰(1978-),男,江西省景德镇市人,学士,高级工程师,主要研究方向为传感技术和测试技术。

曾永菊(1974-),女,重庆市人,主要研究方向为传感器的装配调试。