

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.002

电感位移传感器结构特性研究*

刘吕亮, 石照耀*, 张 敏, 汤 洁

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要: 在电感位移传感器设计中, 电感传感器内线圈与磁芯的结构特性是影响传感器性能的关键因素。为提高传感器检测性能, 根据毕奥-沙伐尔定律建立了传感器内线圈与磁芯模型, 利用有限元分析软件建立了相应结构模型。通过分析线圈与磁芯各项参数变化以及线圈与磁芯存在安装与加工误差的情况, 得到了各参数变化以及安装与加工误差对传感器测量性能的影响, 以此对线圈和磁芯进行了优化。研究表明, 当线圈长度与磁芯长度的比值在 1.45~1.6 之间时, 传感器能获得较大的电感相对变化量; 线圈长度、磁芯长度与磁芯半径的变化对线性度的影响不明显, 线性度在 0.5% 附近, 磁芯安装偏心与倾斜对传感器性能影响较小, 可忽略不计; 电感相对变化量会随着磁芯锥度的增大而减小。

关键词: 电感传感器; 结构特性; 电感相对变化量; 线性度

中图分类号: TH711; TP391.9 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)06-0684-05

Characteristic optimization of structural for inductive displacement sensors

LIU Lv-liang, SHI Zhao-yao, ZHANG Min, TANG Jie

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aim at the design of inductive displacement sensor, structural characteristic of coil and core is the key factor affecting the sensor performance. In order to improve the detection performance of the sensor, a model of the sensor coil and core was established based on Biot-Savart Law, corresponding model was constructed by finite element software. And then, by analyzing the situation of the changing parameters of the coil and core or the installation and processing errors, the relationship information between measurement performance with varying parameters and installation and processing errors was obtained. The relationship can be used to optimize the sensor. The results indicate that when the ratio of the coil length and the length of the core between 1.45 to 1.6, sensor can get a better relative change of inductance. Linearity is insensitive to the varying of the coil length and core length and radius. It is around at 0.5%, installation eccentric and inclined of the core has little effect on the sensor performance. Relative change of inductance will decrease with increasing of the core taper.

Key words: inductive sensor; structural characteristic; relative change of inductance; linearity

0 引 言

电感位移传感器是利用电磁感应原理测量位移的一种装置, 因其结构简单可靠、测量精度高等优

点而在微位移测量领域得到了广泛应用^[1]。电感传感器按线圈的结构排布分为单线圈形式与差动线圈形式。差动线圈形式的传感器相对于单线圈式传感器来说灵敏度提高了一倍, 因而差动电感式传感器在计量领域应用更为广泛^[2-4]。电感传感器中磁芯与线圈

收稿日期: 2014-01-08

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2013ZX04011-071); 国家自然科学基金资助项目(51305006)

作者简介: 刘吕亮(1988-), 男, 湖南常德人, 主要从事精密测试技术与仪器方面的研究. E-mail: liliang324@126.com

通信联系人: 石照耀, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: shizhaoyao@126.com

的尺寸参数对传感器性能有着重要影响,因此磁芯与线圈是传感器设计过程中的重点及难点^[5]。

传统传感器设计采用理论经验来确定初始尺寸,然后不断通过制作物理样机与测试实验的方法进行修正,直至传感器满足要求。20世纪80年代起计算机辅助技术被引入到传感器的设计中来,并以其花费时间短、计算准确等特点得到了广泛应用。文献[6]提出使用有限元的方法求解电磁成形用线圈的电感,取得了较好的结果。文献[7]提出一种基于脚本模板的电磁仿真参数化建模方法,极大地提高了LVDT传感器的设计效率。但是目前电感传感器的研究主要集中于传感器抽象的设计方面,忽略了电磁元件结构参数变化对传感器性能的影响。

为此,本研究重点分析电感传感器结构特性对传感器性能的影响,通过改变传感器内线圈与磁芯参数获得传感器线性度和电感相对变化量变化趋势,以此对传感器中线圈和磁芯各项参数进行优化设计,使得传感器性能达到最优。

1 传感器线圈磁芯模型

稳定的电流产生恒定磁场,在无限大的真空中,当电流分布已知时,磁场中任意一点 P 处的磁感应强度可用毕奥-沙伐尔定律计算:

$$B(P) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{J(Q) \times R^0}{R^2} dV(Q) \quad (1)$$

式中: $dV(Q)$ —源点 Q 周围的体积元,该源点的电流密度是 $J(Q)$; R —源点 Q 到场点 P 之间的距离; R^0 —由源点 Q 指向场点 P 的单位矢量; μ_0 —真空磁导率; V —电流密度的分布区域。

差动电感式传感器磁芯线圈结构示意图如图1所示。差动线圈可以看成是有限个载流圆环线圈的叠加,对毕奥-沙伐尔定律进行积分,可以得到螺线管线圈内部的磁场:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l} \quad (2)$$

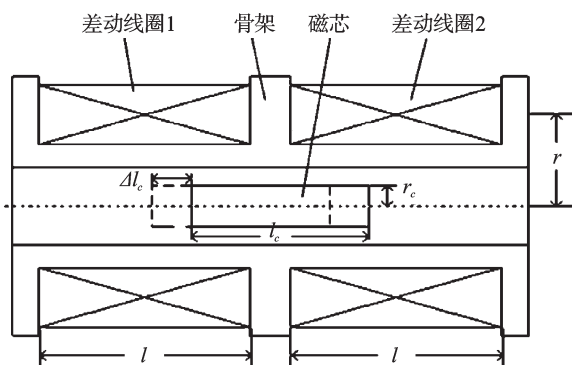


图1 差动电感式传感器内磁芯线圈结构示意图

式中: N —线圈的匝数, I —线圈内电流的大小, l —螺线管的长度。

若螺线管的半径是 r ,则螺线管电感为:

$$L_0 = \mu_0 \frac{\pi N^2 r^2}{l} \quad (3)$$

若在螺线管内部插入一长度为 l_c ,半径为 r_c ,磁导率为 μ_m 的磁芯,则螺线管电感为:

$$L = \frac{\mu_0 \pi N^2}{l^2} [r^2 l + \mu_m r_c^2 l_c] \quad (4)$$

当磁芯在轴线方向上移动 Δl_c ,则线圈电感的变化量为:

$$\Delta L = \frac{\mu \pi N^2 r_c^2}{l^2} (\mu_m - 1) \Delta l_c \quad (5)$$

由于 N 、 r_c 、 μ_m 、 l 等参数在线圈结构确定后都是常数,那么电感变化量 ΔL 与磁芯的位移 Δl_c 是一种线性的关系。由此可以得到电感相对变化量:

$$S = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta l_c}{l} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{l}{l_c}\right) \left(\frac{r}{r_c}\right)^2 \left[\frac{1}{(\mu_m - 1)}\right]} = k \cdot \frac{\Delta l_c}{l} \quad (6)$$

由式(6)可知,如果要提高电感相对变化量就要增大比例因子 k ,即 l/l_c 及 r/r_c 的比值要尽可能的小,磁芯的磁导率 μ_m 尽可能的大^[8]。

2 软件分析流程及结果

本研究使用 Ansoft 有限元分析软件来计算螺线管线圈的电感值。基于 Ansoft 软件对螺线管线圈进行建模的流程图如图2所示。

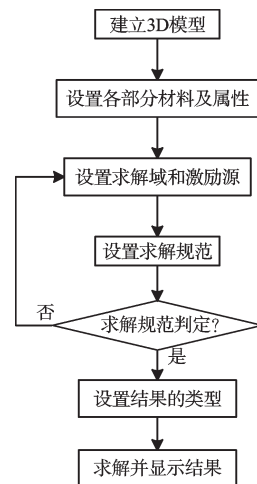


图2 Ansoft 软件建模流程图

为符合传感器的实际情况,建立仿真模型时设定两个约束条件:

$$r > r_c > 0 \quad (7)$$

$$2l > l_c > 0 \quad (8)$$

在建立的模型中线圈材料是铜;磁芯的材料是铁

氧体,磁导率为1 000。在差动线圈的横截面上给定激励为100 A,为了提高计算的精度设定仿真的求解域为100。

构建的线圈及磁芯仿真模型如图3所示。

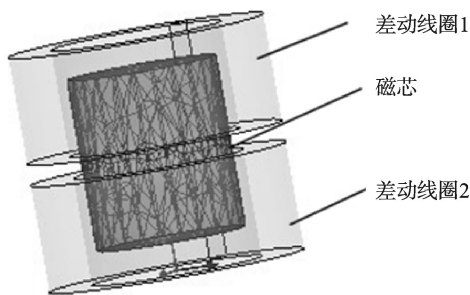


图3 线圈及磁芯仿真模型

选定市面上某型电感传感器为基础进行分析,传感器具体参数如下:线圈长度5 mm,磁芯长度8 mm,磁芯半径为3.5 mm,测量范围是 $\pm 600 \mu\text{m}$ 。

通过分析软件得到移动磁芯时线圈电感值的仿真结果。为了提高仿真计算的效率,设定磁芯从初始位置沿骨架轴线方向移动 $500 \mu\text{m}$,其中每隔 $100 \mu\text{m}$ 计算出该点的电感值,这样就能得到对应于磁芯移动0、100 μm 、200 μm 、300 μm 、400 μm 、500 μm 差动线圈的电感值,线圈电感值随磁芯位移变化情况如表1所示。

表1 线圈电感值随磁芯位移变化

位移 $\Delta l_c / \mu\text{m}$	L_1 / mH	L_2 / mH	$(L_2 - L_1) / \text{mH}$
0	6.340 1	6.343 7	0.003 6
100	6.242 8	6.443 5	0.200 7
200	6.145 8	6.542 8	0.397 0
300	6.053 5	6.639 4	0.585 9
400	5.957 6	6.739 0	0.781 4
500	5.858 9	6.830 8	0.971 9

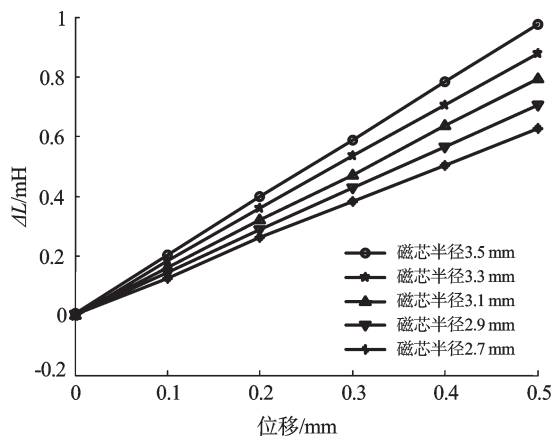
如表1所示,分析软件分别计算出两个差动线圈的电感值。从表1中可以看出,当磁芯从初始位置沿轴线移动时,差动线圈2的电感值 L_2 会增加,差动线圈1的电感值 L_1 减小,同时电感的变化量与磁芯的位移量是一种近似的线性关系,这与公式(5)所得的结论是一致的。差动式电感传感器在进行数据处理会对两差动线圈数据进行相减处理。从表1可以看出将差动线圈2的电感值 L_2 减去差动线圈1的电感值 L_1 ,所得的差值与磁芯的位移仍然是线性的关系。

3 多参数仿真分析

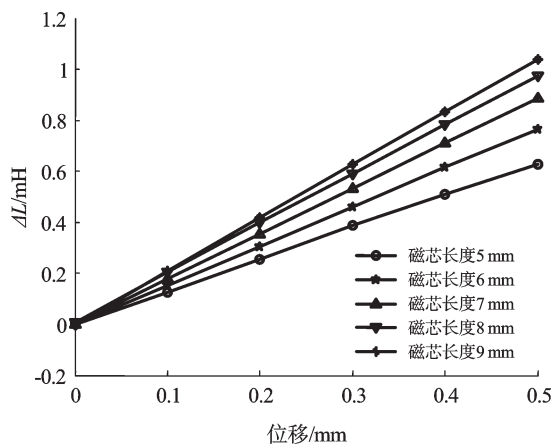
本研究分析线圈、磁芯的各项参数变化对传感器性能的影响。通过改变线圈长度 l 、磁芯长度 l_c 和半径 r_c 建立相应的模型,计算各种情况下差动线圈的电感值。

笔者选取磁芯长度为变量,设定线圈长度是5 mm,磁芯半径是3.5 mm,磁芯长度从5 mm增加到9 mm,步长为1 mm。选取线圈的长度为变量,设定磁芯长度是8 mm,磁芯半径是3.5 mm,线圈长度从4 mm增加到7 mm,步长为0.5 mm。选取磁芯半径为变量,设定线圈长度是5 mm,磁芯长度是8 mm,磁芯半径从2.7 mm增加到3.5 mm,步长为0.2 mm。

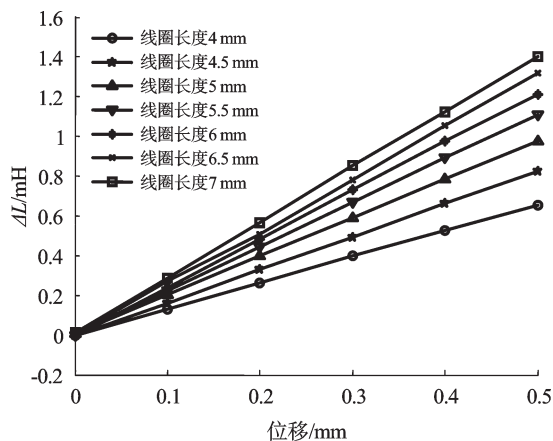
磁芯长度、磁芯半径、线圈长度变化时的电感-位移曲线图如图4所示。



(a) 磁芯半径变化



(b) 磁芯长度变化



(c) 线圈长度变化

图4 磁芯半径、磁芯长度、线圈长度变化时的曲线图

3.1 电感相对变化量

从图4中可以看到,随着磁芯半径、线圈长度和半径的增大,传感器的灵敏度也会随着增大。这是因为当各项参数增大时,所能产生的电感也会相应增加,这样当磁芯移动相同距离时,电感的变化量也会增大。所以,使用电感相对变化量来评价当磁芯移动时电感变化的剧烈程度较合适,其表达式是 $S = \Delta L / L$, 为了便于保持分析的一致性,设定 ΔL 表示当磁芯移动 500 μm 时该组合的线圈电感值变化量, L 为磁芯为初始位置时该组合的线圈电感值^[9]。

磁芯半径 r_c 变化时各线圈与磁芯组合的电感值变化量如表2所示。

表2 磁芯半径变化时的电感相对变化量

磁芯半径 r_c /mm	L /mH	ΔL /mH	$\Delta L / L$
2.7	1.348 3	0.157	11.63%
2.9	1.402 8	0.176	12.57%
3.1	1.459 7	0.198	13.57%
3.3	1.521 4	0.219	14.40%
3.5	1.585 0	0.244	15.38%

在磁芯半径 r_c 从 2.7 mm 增加到 3.5 mm 的过程中,电感值变化量随着磁芯半径的增大而增大。磁芯长度 l_c 变化时各组合的电感值变化量如表3所示。

表3 磁芯长度变化时的电感相对变化量

磁芯长度 l_c /mm	L /mH	ΔL /mH	$\Delta L / L$
5	1.156 5	0.157	13.60%
6	1.280 3	0.191	14.93%
7	1.425 0	0.222	15.57%
8	1.585 0	0.244	15.38%
9	1.760 0	0.259	14.73%

随着磁芯长度的增加,电感值变化量有一个先增大然后变小的趋势,当磁芯长度 l_c 为 7 mm 时最大。线圈长度 l 变化时各组合的电感值变化量如表4所示。

表4 线圈长度变化时的电感相对变化量

线圈长度 l /mm	L /mH	ΔL /mH	$\Delta L / L$
4.0	1.173 3	0.164	13.95%
4.5	1.383 0	0.206	14.89%
5.0	1.585 0	0.244	15.38%
5.5	1.783 8	0.278	15.56%
6.0	1.976 4	0.303	15.34%
6.5	2.168 0	0.330	15.23%
7.0	2.353 6	0.350	14.87%

随着线圈长度 l 的增加,电感值变化量也有一个先增大然后变小的趋势,当线圈长度 l 为 5.5 mm 时达到最大。

综合分析表3~4可以得到:当磁芯长度与线圈长度的比值在 1.45~1.6 范围内时,电感值变化量能达到最大。

3.2 线性度

线性度也称非线性误差,是指在全量程范围内实际特性曲线与拟合特性曲线之间的最大偏差值与满量程输出值之比。其值越小,表明线性特性越好。从上述结果可以看到:数据点与拟合的直线非常接近,说明仿真数据的线性度很好。为了精确求解各线圈与磁芯组合的线性度,笔者使用 Matlab 软件找到仿真值与拟合值之间最大的差值,通过最大差值求解得到各线圈与磁芯组合的线性度。当线圈长度 l 、磁芯长度 l_c 、磁芯半径 r_c 变化时的线性度如图5所示^[10]。

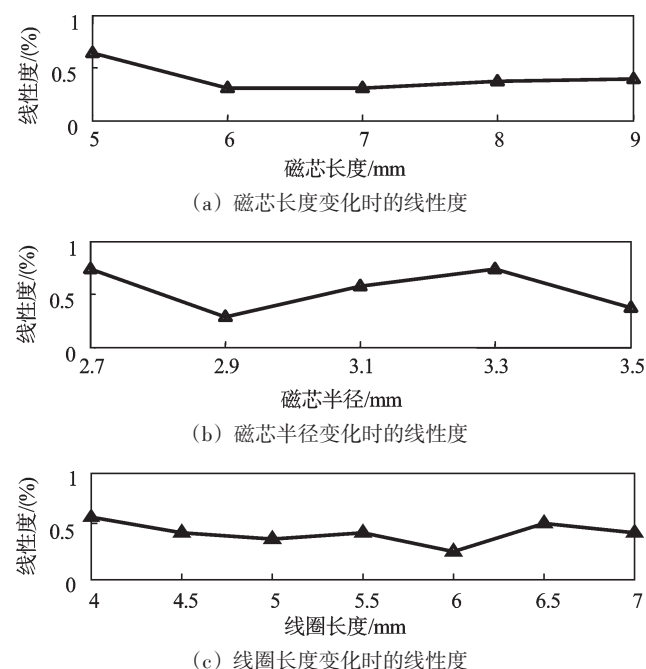


图5 磁芯长度、磁芯半径、线圈长度变化时线性度曲线

从图5可以看出:当线圈长度 l 、磁芯长度 l_c 、磁芯半径 r_c 变化时,传感器的线性度变化并不大,线性度在 0.5% 左右。

4 安装及加工误差影响

在传感器制作过程中,磁芯的安装可能会偏离理想位置,同时磁芯在加工时可能为非理想的圆柱体,这些安装及加工误差可能会给电感传感器的性能造成影响。所以,需要分析这方面的误差影响。在研究中,笔者主要分析磁芯在安装偏心或者倾斜以及磁芯加工成圆锥体时的影响。

磁芯存在安装及加工误差的示意图如图6所示。

本研究通过分析软件来分析上述误差对电感传感器性能的影响,存在各类型安装及加工误差时,传

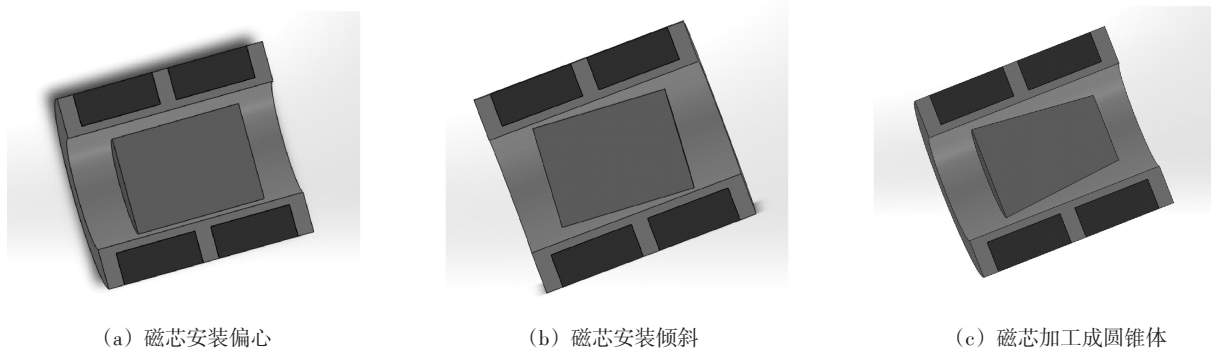


图6 磁芯存在安装及加工误差的示意图

感器线性度与电感相对变化量的变化如表5所示。

表5 安装及加工误差对传感器性能影响

磁芯状态	线性度/(%)	电感相对变化量/(%)
正常情况	0.37	15.38
安装偏心(偏心误差0.1 mm)	0.42	15.44
安装偏心(偏心误差0.2 mm)	0.41	15.48
安装倾斜(倾角1.5°)	0.39	15.36
安装倾斜(倾角2.9°)	0.32	15.41
截顶圆锥体(锥度1°)	0.26	14.95
截顶圆锥体(锥度3°)	0.43	14.21
截顶圆锥体(锥度5°)	0.47	13.45

从表5中的数据可以看出:安装及加工误差不会对传感器的线性度产生影响,其线性度均优于0.5%。当磁芯安装偏心与倾斜时,电感相对变化量不受影响,但是随着加工磁芯锥度的增大,电感相对变化量会随着减小,从正常情况下的15.38%减小到13.45%(锥度5°)。这是因为随着锥度增大,磁芯的体积变小,所能产生的电感值减小,进而导致电感相对变化量变小。

5 结束语

根据毕奥-沙伐定律,本研究建立了传感器内线圈与磁芯的模型,得到了线圈电感值与传感器结构参数的变化关系;通过改变线圈长度 l 、磁芯长度 l_c 、磁芯半径 r_c 的尺寸参数,利用有限元分析软件分析了参数变化对电感传感器性能的影响。

本研究得到如下结论:

(1) 磁芯的半径增大,电感值变化量随着增大。但是磁芯半径并不能无限增加,为了保证磁芯能在骨架内部自由移动,其尺寸受到骨架的尺寸的限制;

(2) 磁芯长度与线圈长度增大时电感值变化量并不是无限增大,当磁芯长度与线圈长度的比值在1.45~1.6范围内时,电感相对变化量能达到最大;

(3) 线圈长度 l 、磁芯长度 l_c 、磁芯半径 r_c 的尺寸变化对传感器线性度的影响不大,传感器的线性度在0.5%左右;

(4) 磁芯安装偏心与倾斜对传感器性能影响很小,可忽略不计。当磁芯有加工误差时,传感器线性度受到影响不明显,但是随着加工磁芯锥度的增大,电感相对变化量会随着减小。

参考文献(References):

- [1] DAVID S. Linear Position Sensors[M]. John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- [2] GOLBY J. Advances in inductive position sensortechology [J]. *Sensor Review*, 2010, 30(2): 142-147.
- [3] 王 敏,王笑一. 光栅传感器动态特性试验台的设计[J]. *机电工程*, 2013, 30(5): 549-551.
- [4] 裘祖荣,石照耀,李 岩. 机械制造领域测量技术的发展研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(14): 1-10.
- [5] 王丽杰,周 真. 电感式铁精矿品位传感器设计[J]. *金属矿山*, 2009, 39(1): 121-123.
- [6] 赵志衡,李春峰,李建辉,等. 电磁成形用螺线管线圈电感的研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2000, 32(5): 64-66.
- [7] 孔宪光,刘 萍,殷 磊,等. 差动变压器式位移传感器参数化仿真技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(12): 2562-2566.
- [8] 宋黎明,杨前明,谢计业,等. 电感式位移传感器输出特性仿真分析[J]. *机电工程*, 2012, 29(7): 795-798.
- [9] 徐一鸣,左洪福,詹志娟,等. 基于灵敏度分析的静电传感器优化设计[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(5): 1084-1089.
- [10] 于 源,丁美莹,张连凯. 位移传感器特性区域直线拟合算法分析[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(6): 840-843.

[编辑:罗向阳]

本文引用格式:

刘吕亮,石照耀,张 敏,等. 电感位移传感器结构特性研究[J]. *机电工程*, 2014, 31(6): 684-688.

LIU Lv-liang, SHI Zhao-yao, ZHANG Min, et al. Characteristic optimization of structural for inductive displacement sensors[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(6): 684-688.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>