

电感式位移传感器输出特性仿真分析

宋黎明, 杨前明*, 谢计业, 李 微

(山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 电感式位移传感器因其结构及电磁感应特点, 不可避免地出现输出非线性与温度漂移的问题, 影响其测试精度。针对这一问题, 在分析电感式位移传感器结构特性与工作原理的基础上, 建立了其输入/输出关系数学模型, 并运用 Matlab 软件进行了仿真分析; 探讨了输入/输出参数之间的变化规律。研究表明: 电感式位移传感器存在一个近似线性工作区域 $\pm \delta_{\max}$, 其线性度误差受线圈匝数与半径的影响; 在其他参数一定的情况下, 线圈半径与线圈匝数分别为定值、依次改变线圈匝数与线圈半径时, 存在铁芯位移 x , 且当 $x \leq |\delta_{\max}|$ 时, 传感器输出特性近似成线性关系, 线性度好; 当 $x \geq |\delta_{\max}|$ 时, 传感器输出特性为非线性关系, 线性度差。

关键词: 电感式位移传感器; 数学模型; Matlab 仿真; 线性误差

中图分类号: TP212; TH73

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)07-0795-04

Simulation analysis of output characteristic of inductive displacement transducer

SONG Li-ming, YANG Qian-ming, XIE Ji-ye, LI Wei

(School of Mechanical & Electronic Engineering, Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Aiming at structure and electromagnetic induction characteristics of inductive displacement transducers, it is inevitable to appear the problem between nonlinearity output and temperature drift, by which its testing accuracy is affected, on the basis of analysis of structural characteristics and working principle of the inductive displacement sensor, mathematical model of the relationship between input and output was constructed, and the model was simulated and analyzed by Matlab software. The change regulation of input and output parameters was investigated. The results indicate that the inductive displacement transducer has an proximately linear extent ($\pm \delta_{\max}$) and the linearity errors are influenced by the coils number and the semidiameter. In the case of relatively constant of other parameters, when the coil of radius and the number of coil turns are fixed, or the coil radius and the number of turns are changed in proper sequence. There is the core displacement x and when $x \leq |\delta_{\max}|$, the sensor output characteristic has an favorable linearity. When $x \geq |\delta_{\max}|$, the output property of the sensor appears worse linearity.

Key words: inductive displacement transducer; mathematical model; Matlab simulation; linear error

0 引 言

基于电磁感应原理制作而成的电感式位移传感器, 具有结构简单可靠、制造工艺性好等特点, 在工作过程中表现出良好的测量精度及线性度、高分辨率与良好的抗干扰能力等优点; 另一方面, 电感式位移传感器由于频率响应比较低, 又不宜用于快速动态信号的

测量^[1]; 分辨率和示值误差与测量范围有关, 测量范围越大, 分辨率和示值精度相应降低; 存在交流零位信号^[2]。在工程实际中, 受到各方面因素的影响, 实际输出电压和理论值之间存在一定偏差^[3]。针对上述问题, 国内外主要采用的解决方式为: 在分析电感式传感器测量原理基础上, 应用两个以“双贯锥式”方法排布绕制而成的次级线圈, 可在不改变结构尺寸的情况

收稿日期: 2012-01-09

作者简介: 宋黎明(1984-), 女, 山东泰安人, 主要从事检测技术自动化方面的研究。E-mail: songliming001@163.com

通信联系人: 杨前明, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: yqm8396@sdust.edu.cn

下,获得传感器更大的线性测量范围^[4]。但是,按“双贯锥式”排布绕制法得到两个次级线圈,存在内部磁场出现阶跃式变化的问题,从而影响测量准确度^[5]。

本研究以电感式位移传感器为研究对象,在介绍传感器的基本工作原理及分析螺管线圈的内部磁场分布情况的基础上,建立其输入/输出量之间的数学模型,在运用数值分析方法进行分析的基础上运用 Matlab 软件进行仿真,探讨输入/输出参数之间的变化规律,为这类传感器合理设计与应用提供理论依据。

1 电感式位移传感器工作原理

电感式位移传感器是基于差动变压器原理制作而成,根据电磁感应原理,可以将机械位移量转换为电压信号进行输出^[6-7]。差动变压器传感器的结构原理图如图 1 所示。它由两个线圈、铁芯及线圈骨架组成。传感器的触头端检测到被测物体的位移变化,通过连杆带动铁芯产生位移量,从而使线圈的互感系数发生变化,互感信号通过导线接入测量电路进行测量。

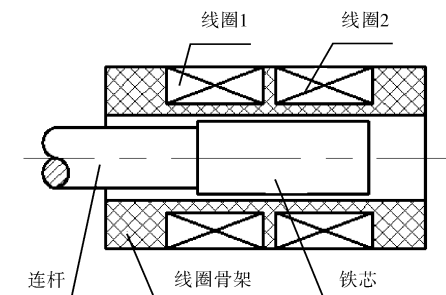


图 1 差动变压器结构图

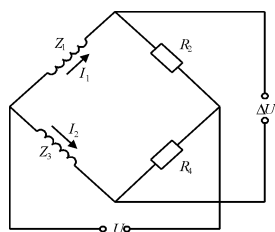


图 2 电桥电路图

差动式电感位移传感器常用的实际测量电路如图 2 所示,其原理是利用惠斯登交流电桥原理对电感变化量进行检测,即等臂电桥电路。图中,线圈 1 和线圈 2 对称均匀密绕在同轴骨架上,匝数分布为 N_1 和 N_2 ,且 $N_1 = N_2$,单个线圈的长度为 L 。图 2 中, U 为电桥的激励电压, I_1, I_2 分别为流经线圈的电流; R_2, R_4 分别为交流电桥桥臂电阻值,且 $R_2 = R_4 = R$; r_1, r_3 分别为电感线圈的电阻值,且 $r_1 = r_3 = r$ 。

设:

$$\begin{cases} Z_1 = r_1 + j\omega L_1 \\ Z_3 = r_3 + j\omega L_2 \end{cases} \quad (1)$$

则测量电桥输出电压 ΔU 为:

$$\Delta U = I_1 \times Z_1 - I_2 \times Z_3 = \frac{U \times Z_1}{R + Z_1} - \frac{U \times Z_3}{R + Z_3} \quad (2)$$

$$\Delta U = U \cdot$$

$$\frac{(r_1 + j\omega L_1)(R + r_3 + j\omega L_2) - (r_3 + j\omega L_2)(R + r_1 + j\omega L_1)}{(R + r_1 + j\omega L_1)(R + r_3 + j\omega L_2)} \quad (3)$$

式中: L_1, L_2 —两个线圈电感,单位为 H,且 $L_1 = L_{10} + L_{11}, L_2 = L_{20} + L_{21}$; L_{10}, L_{20} —线圈自感,且 $L_{10} = L_{20} = L_0$; L_{11}, L_{21} —线圈互感。

分析式(3)可知,在测量过程中,当通电螺管线圈内的铁芯改变轴向位置 x 时,两个螺管线圈的电感量 L 发生改变,使其测量电路的输出电压 ΔU 也发生改变。因此, ΔU 测量值可以反映出被测量位置的变化情况。

2 螺管线圈数学模型

本研究通过对电感式位移传感器螺管线圈的内部磁场变化进行分析,得到了线圈内部磁感应强度变化呈非线性状态的结论。传感器工作时,铁芯在线圈中插入长度的变化引起螺管线圈内部电感值的变化,当用恒流源激励时,则线圈的输出电压与铁芯的位移量有关。

对于一个有限长的单螺管线圈,螺管线圈磁场分布图如图 3 所示。线圈长度为 l ,单位为 m,线圈平均半径为 r ,单位为 m,线圈匝数为 N ,线圈的平均激励电流为 I ,单位为 A。

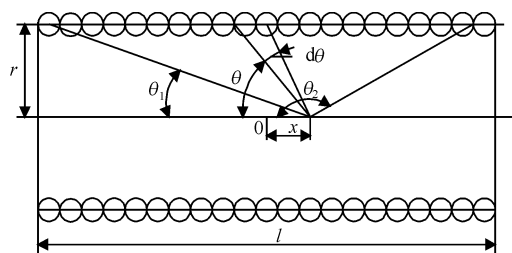


图 3 螺管线圈轴向磁场分布

则沿线圈轴向的磁场强度为^[8]:

$$H = \frac{NI}{L_e} \quad (4)$$

式中: H —磁场强度, A/m; N —励磁线圈的匝数; I —励磁电流, A; L_e —测试样品的有效磁路长度, m。

沿线圈轴向的磁场强度为:

$$H = \frac{NI}{L_e} = \frac{NI}{2l} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \cos\theta_1 = \frac{\frac{1}{2}l+x}{\sqrt{r^2 + (\frac{1}{2}l+x)^2}} \\ \cos\theta_2 = \frac{-(\frac{1}{2}l-x)}{\sqrt{r^2 + (\frac{1}{2}l-x)^2}} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中进行化简,得到下式:

$$H = \frac{NI}{L_e} = \frac{NI}{2l}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (7)$$

$$H = \frac{NI}{2l} \left[\frac{l+2x}{\sqrt{4r^2 + (l+2x)^2}} + \frac{l-2x}{\sqrt{4r^2 + (l-2x)^2}} \right] \quad (8)$$

轴向的磁感应强度为:

$$B = \mu_0 H \quad (9)$$

式中: μ_0 —磁导率, H/m。

将式(8)代入式(9)中,得出磁感应强度为:

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 NI}{2l} \left[\frac{l+2x}{\sqrt{4r^2 + (l+2x)^2}} + \frac{l-2x}{\sqrt{4r^2 + (l-2x)^2}} \right] \quad (10)$$

则通电螺管线圈中的磁通量为:

$$\Phi = BS = \mu_0 HS \quad (11)$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 NI \pi r^2}{2l} \left[\frac{l+2x}{\sqrt{4r^2 + (l+2x)^2}} + \frac{l-2x}{\sqrt{4r^2 + (l-2x)^2}} \right] \quad (12)$$

上述单螺管线圈的传感器,由于线圈电流的存在、它们的衔铁单向电磁力的作用,以及易受到电源电压和频率及温度变化等因素的影响,测量精度低。在不少场合下,它们的非线性限制了使用。为了提高灵敏度与线性度,常采用差动螺管式电感位移传感器,其沿轴向的磁场强度为:

$$H = \frac{IN}{2l} \left[\frac{l-2x}{\sqrt{4r^2 + (l-2x)^2}} - \frac{l+2x}{\sqrt{4r^2 + (l+2x)^2}} + \frac{2x}{\sqrt{r^2 + x^2}} \right] \quad (13)$$

通电螺管线圈中的磁通量为:

$$\Phi = BS = \mu_0 HS \quad (14)$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 NI \pi r^2}{2l} \left[\frac{l-2x}{\sqrt{4r^2 + (l-2x)^2}} - \frac{l+2x}{\sqrt{4r^2 + (l+2x)^2}} + \frac{2x}{\sqrt{r^2 + x^2}} \right] \quad (15)$$

由式(15)导出输出电压与轴向位移量关系式表

示为:

$$E = \frac{e}{\sqrt{2}} = -\frac{wN\Phi}{\sqrt{2}} = -\frac{2\pi fN\Phi}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

$$E = -\frac{\mu_0 f I \pi^2 N^2 r^2}{\sqrt{2} l} \left[\frac{l-2x}{\sqrt{4r^2 + (l-2x)^2}} - \frac{l+2x}{\sqrt{4r^2 + (l+2x)^2}} + \frac{2x}{\sqrt{r^2 + x^2}} \right] \quad (17)$$

式中: μ_0 —磁导率, H/m; f —交流电频率, Hz; I —励磁电流强度, A; N —线圈匝数; L —线圈长度, m; r —线圈半径, m。

由式(17)分析可知:输出电压与各个参变量之间的变化关系,以上参数均为已知量。由此可以看出,输出电压的大小只与铁芯的轴向位移量 x 有关系。因此,电压信号的变化反映出轴向位移量的变化规律。

3 仿真分析

电感式位移传感器中螺管线圈的输出电压与轴向位移量变化关系式由输入输出特性数学模型得出,从式(17)中无法直接分析出输出电压与轴向位移量之间究竟存在何种变化关系。因此,需要运用仿真软件 Matlab 进行仿真运算,通过图像直观地判定二者之间的关系。本研究通过式(17),得到输出电压与轴向位移量 x 之间的关系,采用数值分析中的多项式拟合函数进行拟合运算。

3.1 线圈匝数 N 的影响规律

在线圈半径 $r = 6.25 \text{ mm}$, 线圈匝数 N 变化的情况下,输出电压 E 与轴向位移 x 之间的关系如图4所示。

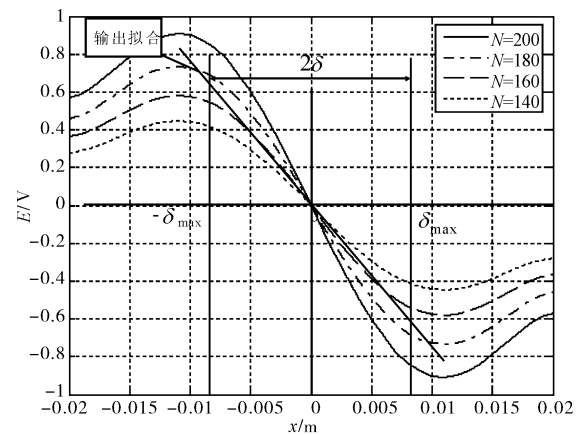


图4 线圈匝数变化情况下输出电压与轴向位移之间的关系

由图4可知,当线圈半径 r 等参数不变时,对于一定铁芯位移量 δ_0 而言,线圈输出电压随线圈匝数增加而增大。电感式位移传感器的最大线性输出范围随线

圈匝数增加而增大。

3.2 线圈半径 r 的影响规律

在线圈匝数 $N = 200$, 线圈半径 r 变化的情况下, 输出电压 E 与轴向位移 x 之间的关系如图 5 所示。

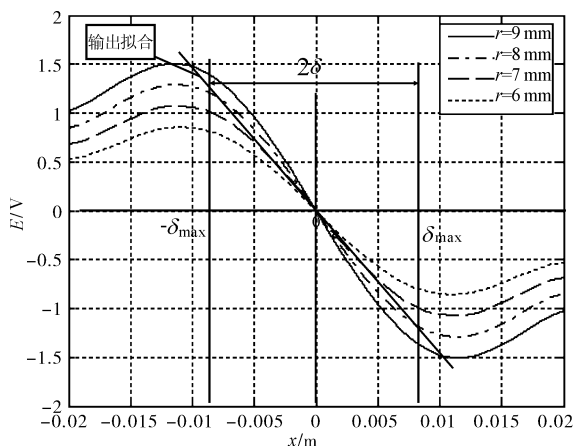


图 5 线圈半径变化下输出电压与位移之间的关系

由图 5 可知, 当线圈匝数等参数不变时, 对于一定铁芯位移量 δ_0 而言, 线圈输出电压随线圈半径增大而增大。电感式位移传感器的最大线性输出范围随线圈半径增大而增大。

3.3 误差分析

由于密绕螺管线圈的线性输出范围通常小于 25%, 本研究分析了在线圈半径等参数不变情况下, 线圈匝数对其线性输出范围的影响。在图 4 中, 当铁芯轴向位移量由 5.0 mm 变化至 8.0 mm 时, 对不同线圈匝数 N 得到实验输出值与拟合理想标准输出值之间的误差变化规律如图 6 所示。

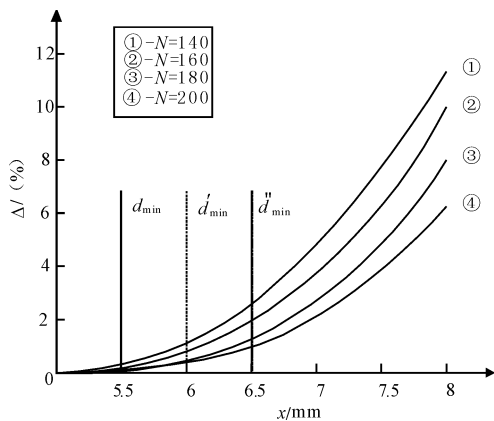


图 6 实际测量值与拟合值误差关系

由图 6 分析可知, 当位移量在 $\delta \leq |\delta_{\min}|$ 范围以内时, 输出电压 E 与线圈匝数 N 具有良好的线性关系。位移量 $\delta > |\delta_{\min}|$ 时, 输出电压 E 与线圈匝数 N 线性度差。

在线圈匝数等参数不变情况下, 线圈半径对线性输出范围存在一定影响。在图 5 中, 当铁芯轴向位移量由 5.0 mm 变化至 8.0 mm 时, 对不同线圈半径 r 得到实际输出值与拟合理想标准输出值之间的误差变化规律如图 7 所示。

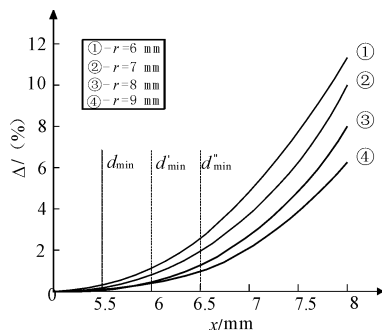


图 7 实际测量值与拟合值误差关系

由图 7 分析可知, 当位移量在 $\delta \leq |\delta_{\min}|$ 范围以内时, 输出电压 E 与线圈半径 r 具有良好的线性关系。位移量 $\delta > |\delta_{\min}|$ 时, 输出电压 E 与线圈半径 r 线性度差。

3.4 输入/输出关系特性

以上本研究主要分析了当线圈匝数或线圈半径单独变化时, 输出电压 E 与轴向位移 x 之间的关系。当线圈匝数与线圈半径在一定范围内取值变化时, 即线圈匝数 $N \in [140, 220]$, 步长变化为 10, $r \in [6, 8]$, 步长变化为 0.25 mm 时, 输出电压 E 与轴向位移 x 之间的关系如图 8 所示。

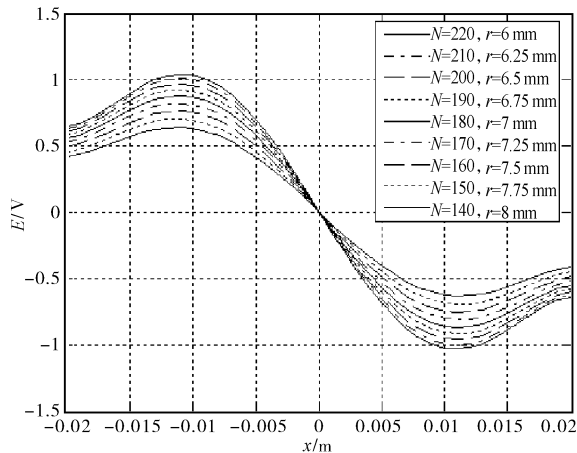


图 8 传感器输出电压与轴向位移仿真结果

图 8 反映了当线圈匝数 N 与线圈半径 r 同时变化时, 其输出电压 E 与轴向位移 x 之间变化规律。图 4 与图 5 是图 8 的两个特例, 它们反映了螺管式位移传感器线圈匝数与螺管半径之间变化的一般规律。

(下转第 802 页)

3.3 系统误差分析

光纤触发测头系统产生误差的原因主要有两方面:粘接工艺和接收光纤束的结构。图 1 中使用的粘结剂特性的好坏不仅影响光线的传播路径、发射光纤的中心轴与测球中心轴的重合性,同时也影响测头性能;另外光纤测头的测端由中心的发射光纤和周围的接收光纤束构成,如果外围接收光纤未均匀分布,则不能较好地接收光束,会给检测结果带来较大的误差。

4 结束语

本研究提出的光纤测头将光电技术与数字信号处理技术相结合,利用光纤进行光的传输,不易受外界干扰。该系统采用硅 PIN 光电二极管作为光电转换元件,TMS320F2812 为数据处理芯片,具有结构简单、反应灵敏、运算能力强等优点。

对测头预行程变动量和单向重复性精度的测试结果表明,该光纤触发式测头的设计原理正确,所提出的实施方案可行。但由于该光纤测头制作和粘接工艺上的原因,精度还有待于进一步提高。

参考文献 (References):

- [1] 石照耀,韦志会.精密测头技术的演变与发展趋势[J].工具技术,2007,41(2):3-8.
- [2] WECKENMANN A,PEGGS G,HOFFMANN J. Probing sys-

tems for dimensional micro-and nano-metrology[J]. **Measurement science and Technology**, 2006,17(3):504-509.

- [3] OIWA T, TANAKA T. Miniaturized three-dimensional touch trigger probe using optical fibre bundle[J]. **Measurement Science and Technology**, 2005,16(8):1574-1580.
- [4] EOM S I, TAKAYA Y, HAYASHI T. Novel contact probing method using single fiber optical trapping probe[J]. **Precision Engineering**, 2009,33(2):235-242.
- [5] JI H, HSU H Y, KONG L X, et al. Development of a contact probe incorporating a Bragg grating strain sensor for nano coordinate measuring machines[J]. **Measurement Science and Technology**, 2009,20(9):1-7.
- [6] 蔡铁珩,向大超,石照耀,等.接触式光纤测头装置:中国,201413124[P]. 2010-02-24.
- [7] 胡涛,司汉英.光电探测器前置放大电路设计与研究[J].光电技术应用,2010,25(1):52-55.
- [8] 周满平,林家春,张斌,等.基于 DSP 的光纤测头信号采集与处理系统设计[J].机电工程,2011,28(4):265-266.
- [9] RONGEN H, HADAMSCHEK V, SCHIEK M. Real time data acquisition and online signal processing for magnetoencephalography[J]. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, 2006,53(3):704-708.
- [10] 海克斯康测量技术公司.实用坐标测量技术[M].北京:化学工业出版社,2007:70-71.

[编辑:张翔]

(上接第 798 页)

4 结束语

本研究在分析电感式位移传感器工作原理的基础上,建立了其输出电压与铁芯轴向位移量数学模型,运用 Matlab 仿真软件进行了仿真与分析。结果表明:在其他参数一定的情况下,线圈半径 r 与线圈匝数 N 分别为定值、依次改变线圈匝数 N 与线圈半径 r 时,存在一个铁芯位移 x 线性工作极限范围,即 $x \leq |\delta_{\max}|$ 时,传感器输出特性近似成线性关系,线性度好。当铁芯位移大于某一区间范围,即 $x \geq |\delta_{\max}|$ 时,传感器输出特性为非线性关系,线性度差;铁芯位移存在一个最佳工作范围 $x \leq |\delta_{\max}|$,当 x 增大时,传感器输出线性度相对误差 $\Delta(\%)$ 也呈增大趋势。因此传感器工作量程应选择 $x \leq |\delta_{\max}|$ 良好的线性范围以内。

参考文献 (References):

- [1] POPA P D, REZLESCU N, ANGHELACHE R. Inductive sensor for slow varying magnetic fields[J]. **Sensors and**

Actuators:Physical, 1997,59(1-3):219-221.

- [2] SYDENHAM P H, TAING V, MOUNSEY D J, et al. Low-cost, precision, flat inductive sensor[J]. **Measurement**, 1995,15(3):179-188.
- [3] 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):2562-2567.
- [4] VOLDER M D, COOSEMANS J, PUERS R, et al. Characterization and control of a pneumatic microactuator with an integrated inductive position sensor[J]. **Sensors and Actuators A**, 2008(141):192-200.
- [5] 谭六喜,杨曙年.螺管线圈传感器线性范围研究[J].传感器技术,2004,23(8):15-17.
- [6] 李永清,李振波,申安安,等.高可靠直线位移传感器[J].仪表技术与传感器,2007(12):12-13.
- [7] 林优礼.电桥电路传感器线性化指示电路的设计[J].机电工程技术,2010,39(1):54-56.
- [8] 单成祥.传感器的理论与设计基础及其应用[M].北京:国防工业出版社,1999:192-193.

[编辑:张翔]