

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.002

基于磁致伸缩的大功率拖拉机阻力传感器设计*

李明生 迟瑞娟 毛恩荣 张婧瀛 刘宇
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 基于磁致伸缩原理,设计了一种大功率拖拉机电-液提升器用销轴式阻力传感器。根据铁磁学理论、安培环路定理以及磁路欧姆定律建立了传感器励磁电路的数学模型,并在 Matlab/Simulink 中对传感器的电压信号输出随负载的变化情况进行了仿真分析。采用 45 调质钢和 40Cr 调质钢两种材料作为传感器外壳进行对比。传感器剪切力静态加载试验结果表明:45 调质钢静态特性曲线线性度决定系数 R^2 为 0.996 5,加载 70 kN 剪切力时输出电压为 0.55 V,性能优于 40Cr 调质钢。
关键词: 大功率拖拉机 阻力传感器 磁致伸缩 设计 仿真
中图分类号: TH823; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0008-05

Design of Draft Sensor in Big-power Tractor Raiser
Based on Magnetostriction

Li Mingsheng Chi Ruijuan Mao Enrong Zhang Jingying Liu Yu
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A kind of axial draft sensor was designed based on magnetostriction theory to improve the measuring accuracy of soil resistance. A mathematical model of sensor's exciting circuit was established based on ferromagnetics theory, Ampere's circulation and Ohm's law for magnetic path. Then the performances of sensor's output signal along with load were simulated by using Matlab/Simulink. 45-quenching steel and 40Cr-quenching steel were used as sensor's shell separately. Load experiment showed that the performance of the sensor, of which shell was 45-quenching steel, was better than the other. The better sensor's linearity determination coefficient of static characteristic curves was 0.996 5. The output voltage was 0.55 V when the shearing force was 70 kN.
Key words: Big-power tractor Draft sensor Magnetostriction Design Simulation

引言

提升器是拖拉机上用于农具提升和耕深控制的专用部件,其控制性能直接影响着拖拉机的作业质量以及作业效率^[1]。目前国内外大功率拖拉机逐步采用电-液提升器来实现对拖拉机农机具的自动控制,以提高控制精度,降低驾驶员劳动强度^[2~3]。阻力传感器作为电-液提升器阻力调节的重要组成部分,对其性能起着重要作用。

目前,大功率拖拉机电-液提升器控制系统的阻力传感器主要有压电式和电阻应变片式。磁致伸缩式传感器相对于普通应变片式传感器,具有输出功率大、抗干扰能力强、适应恶劣工作环境、适于静态、动态力测量等优点,在工业领域的自动化控制系统中有着良好的应用前景^[4]。
本文首先阐述磁致伸缩基本原理及特点,然后设计磁致伸缩式阻力传感器,并进行性能仿真与试验验证。

收稿日期: 2012-06-26 修回日期: 2012-07-27
*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B02)
作者简介: 李明生,博士生,主要从事车辆智能控制与液压研究,E-mail: li-ming.2004@163.com
通讯作者: 迟瑞娟,副教授,主要从事车辆机电控制及智能化研究,E-mail: chiruijuan@vip.sina.com

1 磁致伸缩式阻力传感器设计

1.1 磁致伸缩效应与磁致逆伸缩效应

磁致伸缩效应是指磁致伸缩材料在磁场作用下具有伸缩的能力。此外,磁致伸缩材料还具有另一个重要效应特性——磁致逆伸缩效应,即被磁化的铁磁体发生形变或受到应力作用时,会引起材料磁导率的变化,从而引起磁场的变化^[5~6]。利用磁性材料的这两种效应可以制作检测磁场、应变、位移、扭矩、压力和电流等的各种元器件^[7]。磁致伸缩式阻力传感器的本质是在力的作用下,材料内部磁畴发生转动,材料的磁导率发生变化,导致材料内部及其周围的磁通密度发生变化,从而引起传感器的输出电压发生相应变化^[8]。

1.2 磁致伸缩式阻力传感器外壳设计及强度校核

拖拉机作业时,农机具所受土壤阻力通过下拉杆作用于阻力传感器上,阻力传感器在下拉杆与支承座的分离面区域内承受最大剪切力,输出与剪切力相关的电压信号,大功率拖拉机中阻力传感器安装形式如图1所示^[9]。因此设计磁致伸缩式阻力传感器的外壳结构为销轴式,其受力区为一整体空心截面圆轴,结构紧凑,几何形状简单,容易加工出要求很高的尺寸和形位精度,空心截面具有很强的抗扭转、抗弯曲能力,销轴中心的应力最大,而且与相关承力部件组装容易,使用方便^[10]。

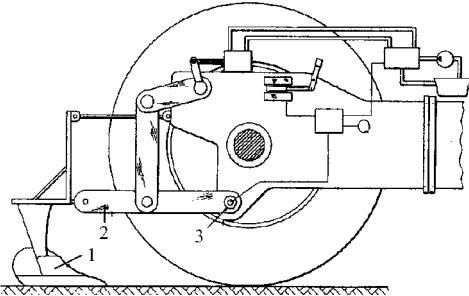


图1 力传感器在电液悬挂系统中的安装位置

Fig.1 Mounting position of force transducer in electronic-controlled hitch system

1.犁 2.下拉杆 3.阻力传感器

阻力传感器支撑部位最大承受剪切力 P 为 60 kN,因此要求传感器直接受力的销轴外壳必须有足够的强度。本文对两种销轴常用的材料 45 调质钢和 40Cr 调质钢进行强度分析。45 调质钢和 40Cr 调质钢基本参数如表 1 所示。

销轴剪切式力传感器可简化为两端简支中间受集中载荷 P 作用的空心截面梁,其空心截面如图 2 所示。

剪应力集中区为凹槽中心的空心截面,中性层处的剪切力最大,其计算公式为^[9]

表 1 45 调质钢和 40Cr 调质钢基本参数
Tab.1 Parameters of hardened and tempered steel
No.45 and No.40Cr

材料	许用拉伸 应力 $[\sigma]$ /MPa	许用弯曲 应力 $[\sigma_{\max}]$ /MPa	许用剪切 应力 $[\tau]$ /MPa	弹性模量 E/GPa	屈服强度 σ_s/MPa
45 调质钢	180	100	126	2.1×10^4	360
40Cr 调质钢	275	120	192	2.1×10^4	550

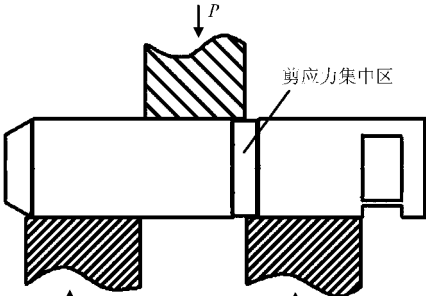


图2 阻力传感器受力示意图

Fig.2 Force schematic of draft sensor

$$\tau = \frac{8P}{3\pi} \frac{D^2 + Dd + d^2}{D^4 - d^4} \approx 53.56 \text{ MPa} \quad (1)$$

式中 τ ——空心截面中性层处的剪切应力,MPa

P ——施加在传感器上的作用力,N

D ——销轴最小外径,取 36 mm

d ——中心孔直径,取 18 mm

销轴中心层与轴线呈 45°方向的主应力 σ 、主应变 ε 为

$$\sigma = \pm \tau = \pm 53.56 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \pm \frac{\tau}{2G} = \pm 3.316 \times 10^{-4}$$

式中 G ——弹性剪切模量,取 $8.08 \times 10^4 \text{ MPa}$

空心截面中心层的最大弯曲应力

$$\sigma_{\max} = \frac{8PL}{\pi D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]} \approx 34.93 \text{ MPa}$$

式中 L ——中心销长度,mm

综上所述, $[\sigma] < [\sigma]_{45} < [\sigma]_{40\text{Cr}}; [\tau] < [\tau]_{45} < [\tau]_{40\text{Cr}}; [\sigma_{\max}] < [\sigma_{\max}]_{45} < [\sigma_{\max}]_{40\text{Cr}}$ 。因此两种材料均满足强度要求。

1.3 磁致伸缩式阻力传感器内部磁路设计

由于传感器的输出信号与磁路中磁通量的变化有关,所以磁路直接影响着传感器输出信号的大小。磁路设计要尽量减少磁泄漏,提高电-磁转换效率,尽量避免器件工作过程中产生寄生磁场如电涡流产生的涡流磁场等,并改善磁性材料所处磁场的均匀性。销轴式阻力传感器最大壁厚小于 10 mm,因此线圈的激励电流采用直流脉动电流,通过改变输入

电流的大小就可以改变磁场的大小^[11]。设计的励磁电路如图 3 所示。当用直流电励磁时,采用片层式磁芯,两层之间的适当空隙可以减少线圈的电感,避免直流电令磁芯饱和。设计传感器磁路如图 4 所示。

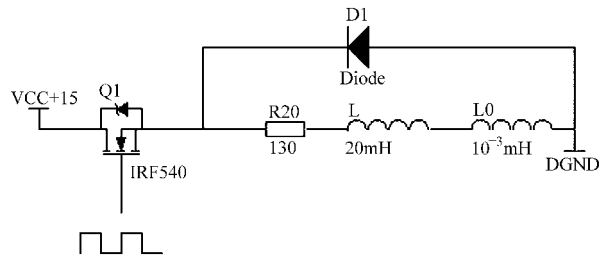


图 3 励磁电路原理图
Fig. 3 Schematic diagram of excitation circuit

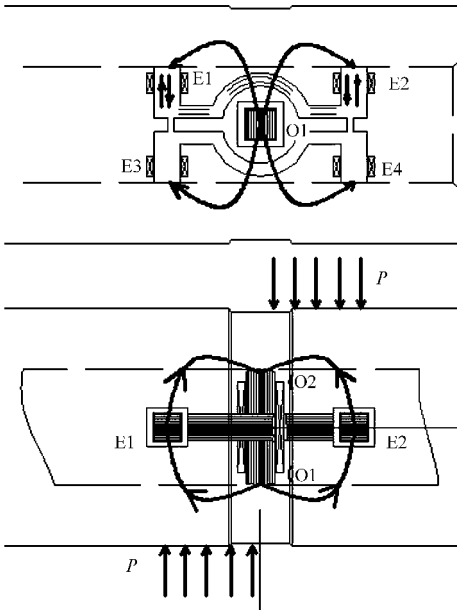


图 4 阻力传感器磁路
Fig. 4 Magnetic circuit of draft sensor

图 4 中,阻力传感器未受力时,初级线圈两极之间形成一个对称磁场,传感器表面各段磁阻相等,通过感应线圈的磁通相等,由于线圈 E1、E2 反向串接,E3、E4 反向串接,两组再正向串接,形成差动连接,所以磁通相互抵消,传感器输出为零;当传感器受剪切力作用时,固有各向同性磁性材料的磁性就会发生变化,于是磁场就变成不对称,在其表面 45° 和 135° 方向产生拉应力和压应力,如图 4 所示。根据铁磁学,当钢铁材料的饱和磁致伸缩系数 $\lambda_s > 0$,则在拉应力方向的磁弹性能最低,是易磁化方向,即磁导率增加,磁阻降低;而在压应力方向,磁导率减小,磁阻增大。因此,E1、E2、E3、E4 处的磁通 Φ 变化,则传感器有对应的感应电压输出。

磁芯材料可以影响磁场的磁感应强度,选择材料时要求导磁率高、损耗小、磁化曲线线性段较宽、磁性能稳定的材料^[12]。常用磁芯材料坡莫合金

1J85 和硅钢片 B30P110 参数对照如表 2 所示,对比可知,相比硅钢片 B30P110,坡莫合金 1J85 具有极低的矫顽力和较高的初始磁导率及最大磁导率,对微弱信号反应灵敏,饱和磁感应强度低,因此选择坡莫合金 1J85 作为磁芯材料。

表 2 磁芯材料参数				
Tab. 2 Parameters of magnetic core materials				
材料 (0.03 mm)	初始相对 磁导率 (Gs/Oe)	最大相对 磁导率 (Gs/Oe)	饱和磁致 伸缩系数	矫顽力 /MPa
坡莫合金 1J85	4×10^4	1.8×10^5	$< 2 \times 10^{-6}$	≤ 1.2
硅钢片 B30P110	1×10^3	4×10^4	1×10^{-5}	> 8

2 磁致伸缩式阻力传感器建模及仿真

根据铁磁学理论^[13~14],压磁材料的相对磁导率变化与应力 σ 之间关系为

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = 2 \frac{\lambda_s}{B_s} \sigma \mu \tag{2}$$

式中 λ_s ——铁磁材料的饱和磁致伸缩系数
 B_s ——坡莫合金铁芯的饱和磁感应强度,为 0.75 T

将式(5)代入式(6)可得

$$\Delta\mu = 2 \frac{\lambda_s}{B_s} \mu^2 \frac{8P}{3\pi} \frac{D^2 + Dd + D^2}{D^4 - d^4} \tag{3}$$

根据阻力传感器工作原理,可将传感器的磁路等效为如图 5 所示的等效磁路。R0 为磁通流经励磁磁极的电阻,R1、R2、R3、R4 分别为磁通流经 4 个感应磁极的磁阻(包括感应磁芯磁阻、感应磁极与被测表面气隙磁阻及相应被测表面段磁阻),R5 为材料表面未经过感应磁极的部分磁通的磁阻,因流经 R5 的磁通 Φ_5 相对很小,所以忽略不计。

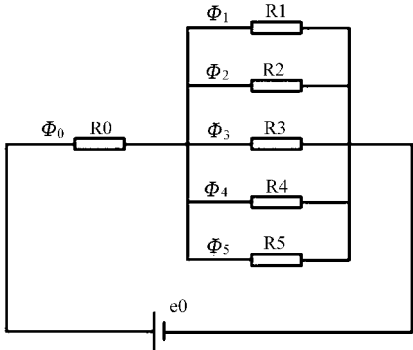


图 5 阻力传感器的等效磁路
Fig. 5 Equivalent magnetic circuit of draft sensor

未对中心销施加力或静止时,由磁路对称可知 $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_4$,根据磁通连续性原理有 $\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4$ 。

根据安培环路定理和磁路欧姆定律^[15],有

$$\Phi_1 = \frac{N_0 I_0}{\frac{4l_0}{\mu_M S_0} + \frac{l_1}{\mu_M S_1} + \frac{l_{c10}}{\mu_C S_{c10}} + \frac{l_{c01}}{\mu_C S_{c01}} + \frac{2\delta_0}{\mu_0 S_0} + \frac{2\delta_1}{\mu_0 S_1}} \quad (4)$$

式中 N_0 ——励磁线圈匝数, 240 匝

I_0 ——励磁电流, A

l_0 ——励磁磁芯磁路长度, 为 0.018 m

l_1 ——感应磁芯磁路长度, 为 0.06 m

l_{c10} ——磁通从感应磁极到励磁磁极 O2 端
在被测表面流经的磁路长度, 为
0.02 m

l_{c01} ——磁通从励磁磁极 O1 端到感应磁极
在被测表面流经的磁路长度, 为
0.02 m

δ_0 ——励磁磁极下气隙, 为 1×10^{-6} m

$\mu_0 \mu_M \mu_C$ ——空气、磁芯、销轴外壳材料的绝对磁导率

S_0 ——励磁磁极端面投影和磁通在励磁磁极
各截面面积, 为 2.025×10^{-5} m²

S_1 ——感应磁极端面投影和磁通在感应磁极
各截面面积, 为 1.6×10^{-5} m²

S_{c10} ——磁通从感应磁极到励磁磁极 O2 端
在被测表面流经的截面面积, 为
 1×10^{-6} m²

S_{c01} ——磁通从励磁磁极 O1 端到感应磁极
在被测表面流经的截面面积, 为
 1×10^{-6} m²

根据磁路的对称性, $l_{c10} \approx l_{c01}$, $S_{c10} \approx S_{c01}$, $\delta_0 \approx \delta_1$, 则

$$K_M = \frac{1}{A + B + \frac{C}{\mu_C}} \quad (5)$$

$$\Phi_1 = K_M N_0 I_0 \quad (6)$$

$$\text{其中 } A = \frac{4l_0}{\mu_M S_0} + \frac{l_1}{\mu_M S_1} \quad B = \frac{145}{32\mu_0 S_0} \delta_0 \quad C = \frac{2l_{c10}}{S_{c10}}$$

当传感器承受剪切力时, 其表面 45° 和 135° 方向产生拉压应力, 对应表面的磁导率分别增加或减少 $\Delta\mu_C$, 则四感应线圈输出感应电压分别为 ΔU 和 $-\Delta U$ 。

根据感应磁芯的对称性, E1 线圈处流过 Φ_1 和 Φ_2 , Φ_1 、 Φ_2 方向相反, 且作用力如图 4 中所示时, 可得

$$\mu_{c1} = \mu_C - \Delta\mu \quad (7)$$

$$\mu_{c2} = \mu_C + \Delta\mu \quad (8)$$

减少 Φ_1 , 增加 Φ_2 , 则

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\Phi_1 - \Phi_2)}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_2}{dt} \quad (9)$$

由于拉压应力绝对值相等, $\frac{d\mu_{c1}}{dt} = -\frac{d\mu_{c2}}{dt}$, 且磁芯与轴为过度配合, 磁隙变化影响相对很小, 可以将 δ_0 看作常数, 则线圈 E1 产生的感应电动势为

$$e_1 = N_0 N_1 (K_{M2} - K_{M1}) \frac{dI_0}{dt} + N_1 K \frac{d\mu_{c1}}{dt} \quad (10)$$

同理, E2、E3、E4 产生的感应电动势为

$$e_2 = N_0 N_2 (K_{M1} - K_{M2}) \frac{dI_0}{dt} + N_2 K \frac{d\mu_{c1}}{dt} \quad (11)$$

$$e_3 = N_0 N_3 (K_{M2} - K_{M1}) \frac{dI_0}{dt} + N_3 K \frac{d\mu_{c1}}{dt} \quad (12)$$

$$e_4 = N_0 N_4 (K_{M1} - K_{M2}) \frac{dI_0}{dt} + N_4 K \frac{d\mu_{c1}}{dt} \quad (13)$$

$$\text{其中 } K = CN_0 I_0 \left(\frac{K_{M1}}{\mu_{c1}^2} + \frac{K_{M2}}{\mu_{c2}^2} \right)$$

$$K_{M1} = \frac{1}{A + B + \frac{C}{\mu_{c1}}} \quad K_{M2} = \frac{1}{A + B + \frac{C}{\mu_{c2}}}$$

式中 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 ——励磁线圈匝数, 为 90 匝
感应线圈为差动连接, 所以传感器的输出电压为

$$\begin{aligned} e_{\text{OUT}} &= e_1 - e_2 + e_3 - e_4 = \\ &N_0 (N_1 + N_2 + N_3 + N_4) (K_{M2} - K_{M1}) \frac{dI_0}{dt} + \\ &K (N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \frac{d\mu_{c1}}{dt} \end{aligned} \quad (14)$$

当加载静态力时, 传感器的输出电压为

$$\begin{aligned} e_{\text{OUT}} &= e_1 - e_2 + e_3 - e_4 = \\ &N_0 (N_1 + N_2 + N_3 + N_4) (K_{M2} - K_{M1}) \frac{dI_0}{dt} \end{aligned} \quad (15)$$

应用 Matlab 对励磁电路进行建模, 对阻力传感器进行仿真。图 6 为 Matlab 仿真模型。仿真结果如图 7 所示, 由图 7 可知随着剪切力的增加, 传感器输出电压也呈上升趋势, 并且趋近于线性变化关系; 当剪切力趋于稳定时, 传感器输出电压也趋于稳定。

3 磁致伸缩式阻力传感器性能试验

为测试磁致伸缩式阻力传感器的静态特性, 用材料试验机对 45 调质钢外壳和 40Cr 调质钢外壳传感器进行剪切力试验, 如图 8 所示。设计传感器最高受力 60 kN, 试验机最高加载力为 70 kN。

45 调质钢和 40Cr 调质钢外壳阻力传感器的静态特性曲线如图 9 所示。由图可知, 45 调质钢阻力传感器线性度决定系数 R^2 为 0.996 5, 加载 70 kN 剪

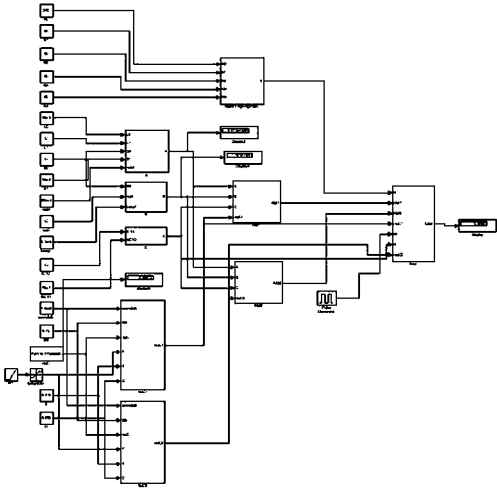


图 6 阻力传感器的 Matlab 仿真模型

Fig. 6 Simulation model of draft sensor in Matlab

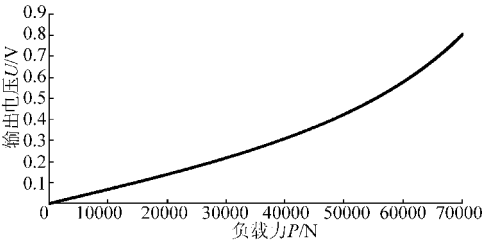


图 7 阻力传感器性能仿真曲线

Fig. 7 Simulation curve of draft sensor

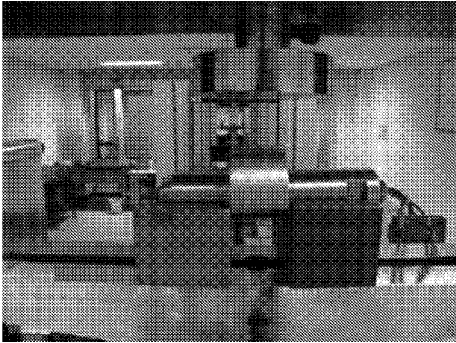


图 8 阻力传感器特性试验平台

Fig. 8 Draft sensor test

切力时输出电压为 0.55 V;40Cr 调质钢外壳阻力传感器线性度决定系数 R^2 为 0.982 7,加载 70 kN 剪切力时输出电压为 0.39 V,因此 45 调质钢性能要优于 40Cr 调质钢。

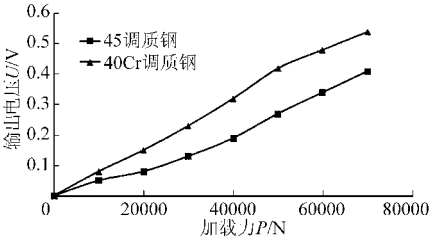


图 9 阻力传感器特性曲线

Fig. 9 Draft sensor characteristic curves

试验中阻力传感器的电压输出信号与加载剪切力基本呈线性关系,非线性影响因素主要由于传感器线圈是手动缠绕,缠绕紧密度、排列方式和线圈转折点对其性能都有可能产生影响。当线圈标准化机械制作时可以减小线圈的不稳定影响,同时,在销轴内孔有限空间限制下,标准化机械缠绕线圈可以增多,磁化强度增大。

4 结论

(1)基于磁致伸缩原理设计的销轴式传感器,采用坡莫合金 1J85 作为磁芯材料,外壳选用 45 调质钢与 45Cr 调质钢两种材料。传感器励磁电路为直流脉动激励。对传感器仿真,结果显示,传感器具有良好的力-电压转换特性。

(2)对传感器进行加载试验结果表明:45 调质钢外壳静态特性曲线线性度决定系数 R^2 为 0.996,最高输出电压为 0.55 V;40Cr 调质钢外壳静态特性曲线线性度决定系数 R^2 为 0.982 7,最高输出电压为 0.39 V。

参 考 文 献

1 李明生,朱忠祥,毛恩荣,等. 大功率拖拉机电液提升器比例提升阀设计[J]. 农业机械学报,2012,43(10):31~35.
Li Mingsheng, Zhu Zhongxiang, Mao Enrong, et al. Design of proportional raise valve in electro-hydraulic lifting mechanism of big-power tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 31~35. (in Chinese)

2 Weatherly E T, Bowers Jr C G. Automatic depth control of a seed planter based on soil drying front sensing [J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(2): 295~305.

3 尹修杰,宋正河,朱忠祥,等. 新型拖拉机电液控制系统[J]. 吉林大学学报:工学版,2008,38(3):580~585.
Yin Xiujie, Song Zhenghe, Zhu Zhongxiang, et al. New electro-hydraulic control system for tractor [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(3): 580~585. (in Chinese)

4 Yan Rongge, Yang Qingxin, Yang Wenrong, et al. Giant magnetostrictive acceleration sensors [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(24): 104~109.

5 李松涛,孟凡斌,刘何燕,等. 超磁致伸缩材料及其应用研究[J]. 物理,2004,33(10):748~752.
Li Songtao, Meng Fanbin, Liu Heyan, et al. Giant magnetostrictive materials and their application [J]. Physics, 2004, 33(10): 748~752. (in Chinese)

- 6 王丽梅. 基于高频信号注入的永磁同步电动机无位置传感器控制[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2005.
Wang Limei. Position sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on high-frequency signal injection[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology,2005. (in Chinese)
- 7 贾洪平,贺益康. 基于高频注入法的永磁同步电动机转子初始位置检测研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(15):15~20.
Jia Hongping, He Yikang. Study on inspection of the initial rotor position of a PMSM based on high-frequency signal injection[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(15):15~20. (in Chinese)
- 8 张立红. 基于高频注入法的永磁同步电机无传感器控制系统研究[D]. 天津:天津大学,2008.
Zhang Lihong. Investigation of sensorless control system for permanent magnet synchronous motor based on high frequency signal injection method[D]. Tianjin:Tianjin University,2008. (in Chinese)
- 9 曾祥云. 永磁同步电机无位置传感器控制技术研究[D]. 上海:同济大学,2009.
Zeng Xiangyun. Research on sensorless control method of PMSM[D]. Shanghai:Tongji University,2009. (in Chinese)
- 10 程树康,于艳君,柴凤,等. 内置式永磁同步电机电感参数的研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(18):94~99.
Cheng Shukang, Yu Yanjun, Chai Feng, et al. Analysis of the inductances of interior permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(18):94~99. (in Chinese)
- 11 任雷,崔芮华,王宗培,等. 永磁同步电机绕组电感的饱和效应[J]. 电工技术学报,2000,15(1):21~25.
Ren Lei, Cui Ruihua, Wang Zongpei, et al. Saturation effect of PMSM windings inductance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2000,15(1):21~25. (in Chinese)
- 12 吴志红,武四辈,朱元,等. 车用内置式永磁电动机转矩多参数统一控制方法[J]. 农业机械学报,2012,43(6):30~34.
Wu Zhihong, Wu Sabei, Zhu Yuan, et al. Torque control method of multi-parameter integrated for IPMSM in vehicle[J]. Transactions of the Chinese Socitey for Agricultural Machinery,2012,43(6):30~34. (in Chinese)
- 13 Seung-Hee Chai, Byeong-Hwa Lee, Jung-Pyo Hong, et al. Design of IPMSM having high power density for position sensorless operation with high-frequency signal injection and the method of calculating inductance profile [C] // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, China,2011.
- 14 Ide K, Iura H, Inazumi M. Hybird sensorless control of IPMSM combining high frequency injection method and back EMF method [C] // IECON 2010-36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Glendale, AZ, USA,2010:2 236~2 241.
- 15 王少杰,罗安. 谐波域死区效应分析及补充方法的研究[J]. 电工技术学报,2009,24(8):111~119.
Wang Shaojie, Luo An. Study of dead-time effect and its compensation strategies [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(8):111~119. (in Chinese)

(上接第 12 页)

- 6 张雷,郭义杰,刘孝亮,等. 嵌入式超磁致伸缩构件多场耦合优化[J]. 农业机械学报,2012,43(5):190~196.
Zhang Lei, Wu Yijie, Liu Xiaoliang, et al. Multi-field coupling model of embedded giant magnetostrictive components optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 190~196. (in Chinese)
- 7 Kwun H, Bartels K A. Magnetostrictive sensor technology and its applications[J]. Ultrasonics, 1998, 36(1~5): 171~178.
- 8 刘慧芳,贾振元,王福吉,等. 超磁致伸缩力传感器及其实验研究[J]. 大连理工大学学报,2011,51(6):832~836.
Liu Huifang, Jia Zhenyuan, Wang Fuji, et al. Giant magnetostrictive force sensor and its experimental study [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(6): 832~836. (in Chinese)
- 9 Roman Romes. Electrohydraulic control device for use in agricultural machines: US, 4-427-075[P]. 1984-01-24.
- 10 刘九卿. 销轴式称重传感器及其应用[J]. 衡器,2008,37(2):6~8.
Liu Jiuqing. Shaft pin type load cell and its application [J]. Weighing Instrument, 2008,37(2): 6~8. (in Chinese)
- 11 姜建山,陈伟民,黄尚廉,等. 基于逆磁致伸缩的索力传感器磁路分析与参数设计[J]. 仪器仪表学报,2009,30(4):739~743.
Jiang Jianshan, Chen Weimin, Huang Shanglian, et al. Magnetic circuit and parameters of cable tension sensor based on magneto-elastic effect [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(4): 739~743. (in Chinese)
- 12 王军,王伟. 差动变压器式压力传感器的磁路设计[J]. 传感器技术,2001,20(11):30~32.
Wang Jun, Wang Wei. Design of magnetic circuit in the differential transformer type pressure sensor [J]. Journal of Transducer Technology, 2001, 20(11): 30~32. (in Chinese)
- 13 王社良,熊二刚. 钢结构磁性无损检测理论与应用研究[J]. 中国科技论文在线,2008,3(7):492~496.
Wang Sheliang, Xiong Ergang. A theoretical research on magnetic nondestructive testing of steel structures [J]. Sciencepaper Online, 2008, 3(7): 492~496. (in Chinese)
- 14 高孝裕,周勇,陈吉安,等. 不同磁芯材料在微电感中的应用[J]. 半导体技术,2005,30(10):58~61.
Gao Xiaoyu, Zhou Yong, Chen Ji'an, et al. Application of different magnetic core materials in microinductor [J]. Semiconductor Technology, 2005, 30(10): 58~61. (in Chinese)
- 15 赵韩,田杰. 磁力机械学[M]. 北京:高等教育出版社,2009.