

电磁环境对电液比例变量泵性能的影响

张凯^{1,2}, 李万莉¹, 薛红梅¹, 游张平¹

1. 同济大学机械工程学院, 上海 201804

2. 常熟理工学院机械工程学院, 江苏常熟 215500

摘要 工程机械处于电磁环境中时,机电液控制系统中的电磁敏感元件容易受到电磁场的干扰,使机电液控制系统的输入输出发生变化,导致工程机械无法正常工作。根据某工程机械液压系统控制原理,针对电液比例变量泵的负荷传感控制和电比例调解的运行方式,分析液压系统的特点及影响系统性能的因素。比例电磁铁的非线性磁特性壳体材料在磁场环境下,材料内的磁场强度会发生变化。根据比例电磁铁的结构,左右输出端空气隙磁通量发生变化使出力特性发生变化。通过对比例电磁铁磁路分析,确立了电磁环境下比例电磁铁的力学模型。比例电磁铁输出力的变化对负荷传感控制元件的作用将改变系统的输出性能。利用天线发射电磁波产生电磁场环境,通过测试某工程机械液压系统在电磁环境下的输出特性,来分析电磁场对比例电磁铁的影响变化。试验结果显示,在电磁场作用下比例电磁铁推力的变化与输入的电流不成比例,出现了偏差;机电液控制系统的控制性能变得不稳定,表明应提高机电液控制系统中电磁敏感元件的抗电磁干扰能力。

关键词 工程机械; 液压系统; 比例电磁铁; 电液比例变量泵

中图分类号 TM30, TH21

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)05-0091-05

Effect of Electromagnetic Environment on the Performance of Electric Proportional Variable-capacity Pump

ZHANG Kai^{1,2}, LI Wanli¹, XUE Hongmei¹, YOU Zhangping¹

1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China

2. College of Mechanical Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, Jiangsu Province, China

Abstract In the electromagnetic environments, the mechanical electrical hydraulic control system of engineering machinery's electromagnetic sense organs is susceptible to electromagnetic interference, which will in turn cause failures due to the change of the mechanical electrical hydraulic control system's input and output. According to engineering machinery hydraulic system control principle, based on the study of the structural features and the non-linear magnetic properties of shell materials, this paper analyzes the change of electromagnetism in the proportional solenoid around the output air gap in the electromagnetic environments, the electro-hydraulic proportional variable displacement pump's load sensing control system, the electric-hydraulic proportional control mediation, with respect to the hydraulic system property and affecting factors on the system performance, and proposes a mechanical model of proportional solenoid in the electromagnetic environments. System output performance will be changed by the action of the output force change in the proportional solenoid for the load sensing control component. Using antennas to emit electromagnetic wave to generate the electromagnetic environments, we analyze the proportional solenoid changes on the impact of the variable pump performance in the electromagnetic environments, by testing the electric proportional variable pump's output pressure. Experimental results show that the electric proportional variable pump's output pressure is elevated and the mechanical electrical hydraulic control system's control performance will become unstable. One should improve the anti-jamming capability of electromagnetic sense organs.

Keywords engineer machinery; hydraulic system; proportional solenoid; electric proportional variable-capacity pump

收稿日期: 2010-01-08

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ12B01)

作者简介: 张凯, 博士研究生, 研究方向为工程机械 EMC 检测系统设计理论及应用, 电子信箱: zkhit@126.com; 李万莉 (通信作者), 教授, 研究方向为智能交通控制装备研制, 电子信箱: cnlwl@tongji.edu.cn

0 引言

工程机械装备具有高速、大功率、高效率、高可靠等性能,被广泛应用于各行业建设之中。工程机械的机电液控制系统中广泛采用电液伺服控制技术^[1]。通过操作控制装置控制电磁阀的开或关,控制执行元件的动作,使机械装置完成所需的动作。科技发展使得周围空间电磁环境更为复杂,在这种环境中工作的工程机械,应具备抗电磁干扰能力,保证其机电液控制装置及元器件的可靠运行。工程机械机电液系统中有多种传感器、电磁阀、控制元器件等,这些元器件易受到电磁干扰^[2-4]。元器件受到电磁干扰后,输入、输出的信号可能发生改变,使工程车辆稳定性和可靠性下降,易产生误动作、无法作业等现象,甚至会造成重大事故发生。

工程机械应具备一定抗电磁干扰的性能,这已引起国内外科技人员及工程技术人员的高度重视。面对工程机械易受电磁干扰的现象,国外制定了工程机械电磁兼容(EMC)^[2-4]相关法规,建设了与之配套的相应实验装置,目的是要求工程机械具备抗电磁干扰能力,而且要求一些特定的工程装备具备抗高强度电磁干扰的能力。国内对汽车电磁兼容的研究较多,并已取得一定成绩,目前能够用时域有限差分法等算法描绘电磁波的传播和与目标的相互作用过程,得到复杂物理过程的清晰仿真图像^[5];能够对压力传感器等进行电磁兼容性设计^[6],可以应用电磁兼容性设计方法对电动汽车的几个重要模块的电路和系统进行设计^[7]。但工程机械领域电磁兼容方面的研究尚处起步阶段,还没有工程机械电磁兼容(EMC)的相关法规。本研究通过某工程装备的机电液控制系统,分析其液压回路的原理,将辐射电磁场作用在系统的电磁敏感元件(比例电磁铁)上,研究电磁环境对电磁敏感元件的性能影响,分析液压回路的变化。

1 液压系统

图1显示了某工程机械液压控制系统中的负荷传感控制——电液比例调节变量泵液压原理,其具有以下特点。

1) 进入液压系统的流量为

$$Q = C A_T (P_1 - P_2)^\varphi = C A_T \Delta P^\varphi \quad (1)$$

其中, C 为与节流口结构、液体性质及流态有关的系数; φ 为节流阀指数, $\varphi=0.5$; A_T 为节流口的流通截面积; P_2 为系统的负载压力; P_1 为泵出口的压力。

2) 作用在负荷传感阀上的力为

$$F_{P_1} + F_i = F_s + F_{P_2} \quad (2)$$

其中, F_{P_1} 为泵出口压力作用在负荷传感阀芯左端的力, F_P 为电液比例减压阀出口压力作用在负荷传感阀芯左端的力, F_s 为负荷传感阀芯右端弹簧作用力, F_{P_2} 为节流阀的出口压力作用在负荷传感阀芯右端的力。

3) 通过调节输入比例电磁铁的电流来调节电液比例减压阀的输出压力,其输出压力作用在负荷传感阀的左端,作用方向与弹簧相反,通过改变负荷传感阀最初设定的 ΔP_0 ,调

整变量泵的排量,使节流口两端的压力保持在需要的 ΔP 值。在电液比例减压阀的出口压力为

$$P = \frac{F}{A - 2C_d W x_R \cos \phi} \quad (3)$$

其中, F 为比例电磁铁输出的推力, C_d 为流量系数, W 为孔口宽度, x_R 为阀芯位移量, ϕ 为液流速度方向角, A 为阀芯承压面积。

从电液比例调节变量泵液压原理可知,流经节流阀进入系统的液体流量与比例电磁铁输出的推力有关,在没有受到外界电磁场对比例电磁铁的干扰时,比例电磁铁推力的变化与输入的电流成比例。如果受到外界电磁场的影响,情况将会发生变化。

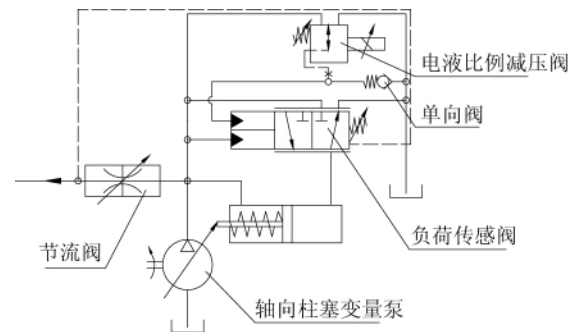


图1 电液比例调节变量泵液压原理

Fig. 1 Hydraulic system's schematic diagram of electronic proportional variable displacement pump

2 外加磁场对比例电磁铁输出力的影响

比例电磁铁是一种直流电磁铁,吸力或位移与输入电流呈比例。比例电磁铁作为电液比例控制元件的电-机械转换器件,将比例控制放大器输给的电流信号转换成力或者位移,应用于电液比例控制技术中。比例电磁铁的特性及工作可靠性,对电液比例控制系统和元件影响比较大,是液压系统电液比例控制技术的关键部件^[1,8-10]。

2.1 比例电磁铁的力特性

双向比例电磁铁由控制线圈、励磁线圈、导套、壳体、衔铁等组成(图2)。导向套由3段焊接成1个整体。中间段的两端面是平直面,两端的2个端面分别是锥形结构端面和平直面。每段之间用非导磁材料进行焊接。两端焊接位置采用锥形结构,使轭铁与导套构成盆形极靴。左右线圈中各有一励磁线圈和控制线圈。励磁线圈通恒定直流电流产生比例电磁铁所需的磁通量。它们极性相反,可以采用串联或并联形式,在磁路内形成初始磁通 Φ_1 、 Φ_1' (图3)。在仅有励磁电流时,左右两端的电磁吸力大小相等、方向相反,衔铁处于平衡状态,输出力为零。控制线圈极性相同,采用串联形式。有控制电流时,两控制线圈分别在左右两半环形磁路内产生极性相同、大小相等的控制磁通是 Φ_2 、 Φ_2' (图3)。它们与原有初始磁通叠加,在左右工作气隙内产生差动效应,形成了与控制电流

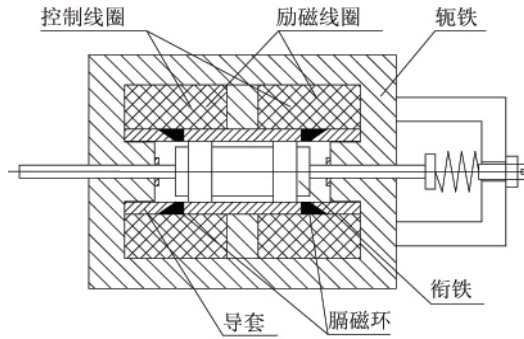


图 2 双向比例电磁铁结构

Fig. 2 Two-way proportional solenoid's structure

方向和大小相对应的输出力。

比例电磁铁的输出力由通过衔铁端面空气隙的磁通产生。由于磁感应强度 B 在衔铁端面空气隙中不相等,故有

$$F = \int_s \frac{1}{2\mu_0} B_s^2 ds \quad (4)$$

从式(4)可看出,欲求轴向力,须知空气隙中的 B_s 。根据

$$B = \mu_0 \frac{V}{\delta} \quad (5)$$

其中, V 为气隙的磁压降, δ 为气隙长度。

由励磁线圈产生的磁场强度为

$$H = \frac{NI}{d} a_z \quad (6)$$

其中, N 为导线密绕匝数, I 为通过导线电流, d 为线圈长度。

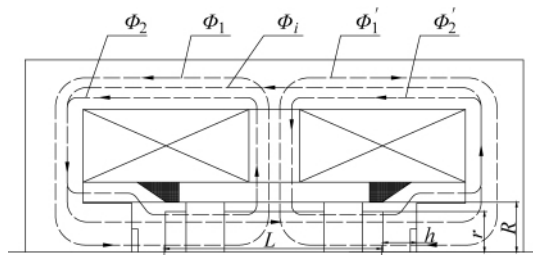


图 3 双向比例电磁铁磁通示意

Fig. 3 Two-way proportional solenoid's flux

下面进行定性分析。衔铁的受力有径向力和轴向力。由于结构的对称性,衔铁只有轴向力表现对外输出力。设衔铁长为 L 、半径为 r ,导套的内半径为 R ,自由状态下衔铁左右端面的空气隙为 h 。如果衔铁向右移动 λ 距离,则左端面和右端面的空气隙为 $h+\lambda$ 和 $h-\lambda$ 。

磁路中磁阻以式(7)^[11]计算

$$\mathcal{R}_m = \oint_l \frac{dl}{\mu S} \quad (7)$$

式中, μ 为磁导率, S 为磁路的面积, l 为磁路长度。则衔铁周边侧隙与两端隙的磁阻为

$$\mathcal{R}_0 = \frac{2(R-r)}{\mu_0 \pi (R+r)L}$$

$$\mathcal{R}_1 = \frac{4(h+\lambda)}{\mu_0 \pi (R+r)^2} \quad (8)$$

$$\mathcal{R}_1' = \frac{4(h-\lambda)}{\mu_0 \pi (R+r)^2}$$

这样就简化为 1 个最简单的磁路(图 4)。

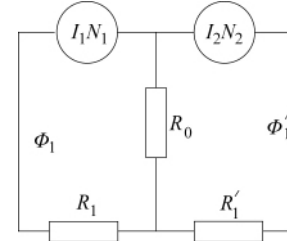


图 4 双向比例电磁铁简化磁路

Fig. 4 Two-way proportional solenoid's simplified magnetic circuit

因而,先求出衔铁端面工作气隙的磁压降,由磁路的环路定律可得

$$\begin{aligned} V_1 + (\Phi_1 + \Phi_1') \mathcal{R}_0 &= I_1 N_1 + I_2 N_2 \\ V_1' + (\Phi_1 + \Phi_1') \mathcal{R}_0 &= I_1 N_1 - I_2 N_2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $V_1 = \Phi_1 \mathcal{R}_1$, $V_1' = \Phi_1' \mathcal{R}_1'$, V_1 为左端工作气隙的磁压降, V_1' 为右端工作气隙的磁压降, I_1 为励磁电流, I_2 为控制电流, N_1 为励磁绕组匝数, N_2 为控制绕组匝数。

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{(I_1 N_1 + I_2 N_2) \mathcal{R}_1 \mathcal{R}_0}{\mathcal{R}_0 \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0 \mathcal{R}_1' + \mathcal{R}_1 \mathcal{R}_1'} \\ V_1' &= \frac{(I_1 N_1 - I_2 N_2) \mathcal{R}_1 \mathcal{R}_0}{\mathcal{R}_0 \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_0 \mathcal{R}_1' + \mathcal{R}_1 \mathcal{R}_1'} \end{aligned} \quad (10)$$

则在衔铁左右端面工作气隙中的电磁感应强度为

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{\mu_0 V_1}{h+\lambda} \\ B_1' &= \frac{\mu_0 V_1'}{h-\lambda} \end{aligned} \quad (11)$$

求出左右工作气隙的平均磁感应强度后,根据式(4)求工作气隙产生的轴向电磁力

$$\begin{aligned} F_1 &= \int_s \frac{1}{2\mu_0} B_1^2 ds = \frac{2B_1^2 \pi (R+r)^2}{2\mu_0} \\ F_1' &= \int_s \frac{1}{2\mu_0} B_1'^2 ds = \frac{2B_1'^2 \pi (R+r)^2}{2\mu_0} \\ F &= F_1 + F_1' \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 电磁骚扰对软磁材料的影响

将一软磁材料放入磁场 H 中。软磁材料可认为由磁偶极子排列组成,磁偶极子在外磁场的作用下,其内部的磁畴结构发生变化^[12]。沿外磁场强度 H 方向的磁化强度为

$$M_H = \frac{\sum_i M_s V_i \cos \varphi_i}{V_0} \quad (13)$$

其中, V_i 为材料内第 i 个磁畴的体积, M_s 为第 i 个磁畴自发磁化强度, φ_i 为第 i 个磁畴自发磁化强度与外磁场强度方向间

的夹角, V_0 为材料的体积。根据

$$B = \mu_0(H + M_{II}) \quad (14)$$

稳定状态后软磁材料内部的磁场将为 B 。由于外加磁场 H 的影响, 使软磁材料内的磁场强度发生变化。

3 外加磁场对系统性能的影响

如果将一定强度磁场 H 作用于比例电磁铁上, 在磁路中将出现 Φ_i 磁通量的变化 (图 3), 会增加或减少通过衔铁两端面的磁通量。根据 H 作用方向的不同, 会使其经过左右工作气隙的总磁通变化, 使工作气隙的平均磁感应强度变化, 最终使比例电磁铁的轴输出力发生变化, 双向比例电磁铁的输出特性将不能按照图 5 中的 I 特性曲线输出。根据磁场 H 的强弱及其磁化方向的不一致, 使极化磁通与线圈产生的磁通方向也不一致, 衔铁的作用力将得到不确定的变化, 比例电磁铁的输出将会在 II 和 III 区域内任意位置输出, 表现出不确定的输出特性。这可能造成控制失调或完全失灵。

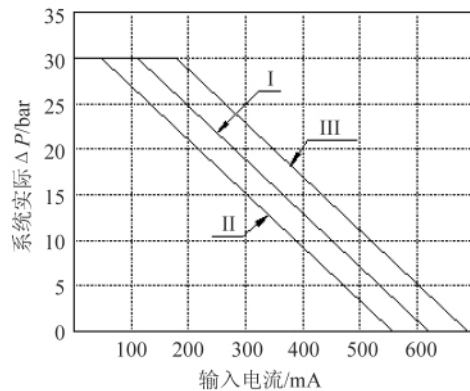


图 5 双向比例电磁铁输出特性曲线

Fig. 5 Two-way proportional solenoid's output characteristic curve

4 试验环境与结果分析

4.1 试验环境

进行某工程机械电液控制系统电磁干扰测试。将一定强度磁场作用于电比例调节变量泵上, 测试电比例变量泵在负荷率发生变化时的输出压力变化。试验用电磁环境由发射功率为 20W、发射频率为 600MHz 的天线产生。产生的电场强度和磁场强度为^[13]

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \oint_c \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} I(z) \left[\frac{\partial^2 \Psi(z, z')}{\partial z^2} + \beta^2 \Psi(z, z') \right] dz dz' \quad (15)$$

$$H = \frac{1}{\eta} \hat{r} \times E \quad (16)$$

此工程机械电液控制系统采用 CAN 总线、VB、SQL 数据库技术实时对系统运行参数进行监测和采集^[14]。

4.2 结果分析

在没有进行电磁干扰时, 对液压系统的负荷、泵出口压

力等进行数据分析, 可以看出泵的出口压力的变化趋势与负荷百分比的变化趋势基本上一致 (图 6), 这符合液压系统的实际运行情况, 泵的出口压力由负载决定。

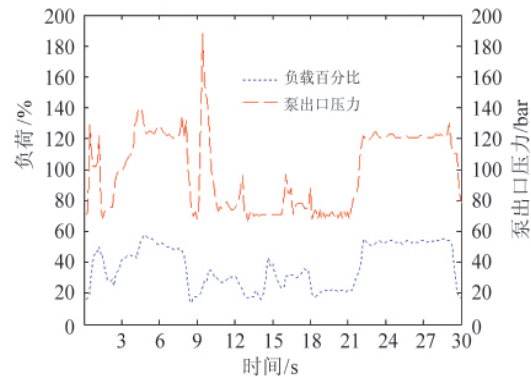


图 6 无电磁干扰时液压系统的负荷和泵的出口压力变化

Fig. 6 Change of hydraulic system's load and the pump's output pressure without the EMI

在有电磁干扰时, 对液压系统的负荷、泵出口压力等进行数据分析, 可以看出泵的出口压力的变化趋势与负荷百分比的变化趋势出现了不一致的现象, 泵的出口压力出现高低快速波动 (图 7)。

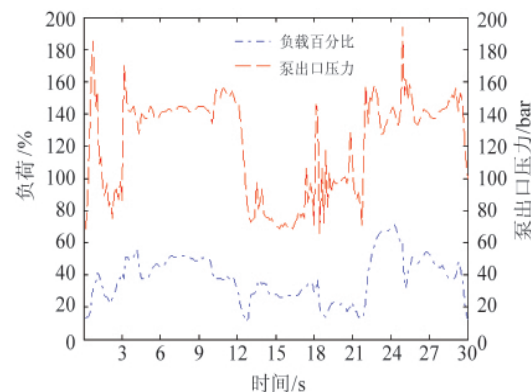


图 7 有电磁干扰时液压系统的负荷和泵的出口压力变化

Fig. 7 Change of hydraulic system's load and the pump's output pressure with the EMI

在图 8 中, 负荷百分比 1 与主泵 1 压力是一组, 是没有受到电磁干扰时的对应曲线; 负荷百分比 2 与主泵 2 压力是一组, 是受到电磁干扰时的对应曲线。在负荷百分比正常变化情况下, 泵的两种状态出口压力的变化趋势、幅值完全不一致。在同样负荷的作用下, 受到电磁干扰的泵的出口压力大于没有受到电磁干扰的泵的出口压力; 泵的出口压力出现快速波动的频率也高于没有受到电磁干扰的泵的出口压力波动。这说明已经受到电磁的干扰, 泵的出口压力由于受到比例电磁铁输出的改变, 使泵的流量出现变化, 在溢流压力极限范围内出现了压力的不规则的变化。

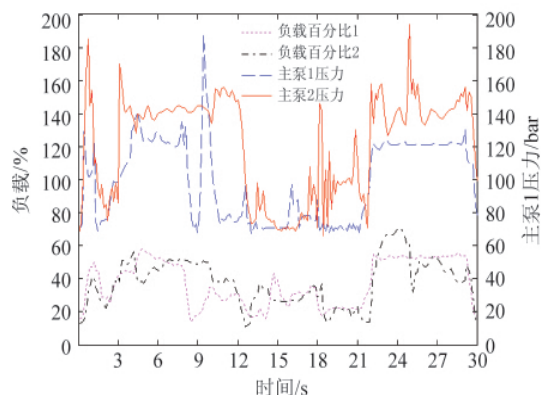


图8 液压系统在有、无电磁干扰情况下负荷及泵的出口压力对比

Fig. 8 Comparison of the change of hydraulic system's load and the pump's output pressure without and with the EMI

5 结论

工程机械在外界电磁场的影响下,其机电液控制系统将受到电磁能量的干扰,控制系统的控制性能将降低。外界电磁场对工程机械性能的影响较为复杂,通过对电液比例变量泵的液压回路分析可知:①在外界磁场的作用下,比例电磁铁输出力不确定现象是由于通过衔铁端面空气隙的磁通量发生不确定变化所产生的;②比例电磁铁的输入电流和输出力的对应关系被破坏;③进入液压系统的流量受通流截面积、电液比例调节变量泵出口压力变化2个因素影响。研究表明,在一定强度的电磁环境下,工程机械的机电液控制系统的电磁敏感元件会受到干扰,产生失真的信号,这为控制系统设计提供了依据。每个电磁敏感元件都具备抗电磁干扰的能力是控制系统具备电磁兼容性的必要条件,最终可使系统具备抗电磁干扰的性能。

参考文献 (References)

- [1] 吴根茂,邱敏秀,王庆丰,等. 新编实用电液比例技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
Wu Genmao, Qiu Minxiu, Wang Qingfeng, et al. Electrohydraulic proportional technique in theory and application [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [2] 徐立. 我国汽车电磁兼容技术发展状况 [J]. 安全与电磁兼容, 2003(1): 35-37.
Xu Li. Safety & Emc, 2003(1): 35-37.
- [3] Loockx J, Gielen G. Efficient identification of major contributions to EMI-induced rectification effects in analog automotive circuits [C]//17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Singapore, 2006: 148-151.
- [4] Zitzmann M L, Grillmair R, Clees T, et al. Hybrid solver strategies in automotive EMC simulation [C]//17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Singapore, 2006: 340-343.
- [5] 高印寒,樊宽刚,杨开宇,等. 时域有限差分法在汽车 EMC 分析中的应用 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009(3): 210-214.
Gao Yinhan, Fan Kuangang, Yang Kaiyu, et al. Journal of Jilin

University: Engineering and Technology Edition, 2009(3): 210-214.

- [6] 潘凯,张俊智,甘海云,等. 基于 MPC555 的混合动力电动汽车整车控制器硬件系统设计 [J]. 汽车工程, 2005(1): 20-23.
Pan Kai, Zhang Junzhi, Gan Haiyun, et al. Automotive Engineering, 2005 (1): 20-23.
- [7] 崔宏敏,陈关君,董加国,等. 压力传感器的电磁兼容设计 [J]. 传感器技术, 2004(6): 27-29.
Cui Hongmin, Chen Guanjun, Dong Jiaguo, et al. Journal of Transducer Technology, 2004(6): 27-29.
- [8] 张光琼,唱一丹,周训义. 双向极化式比例电磁铁及其静、动特性研究 [J]. 防爆电器, 1989(4): 28-32.
Zhang Guangqiong, Chang Yidan, Zhou Xuyi. Explosion-proof Electrical, 1989(4): 28-32.
- [9] 崔剑,丁凡,李其朋. 耐高压双向旋转比例电磁铁的静态力矩特性 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007(9): 1578-1581.
Cui Jian, Ding Fan, Li Qipeng. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2007(9): 1578-1581.
- [10] 李其朋,丁凡,王传礼. 耐高压双向比例电磁铁的研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006(2): 322-325.
Li Qipeng, Ding Fan, Wang Chuanli. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2006(2): 322-325.
- [11] 邹继斌,刘宝延,崔淑梅,等. 磁路与磁场 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
Zou Jibin, Liu Baoyan, Cui Shumei, et al. Magnetic circuit and magnetic field [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998.
- [12] 严密,彭晓领. 磁学基础与磁性材料 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
Yan Mi, Peng Xiaoling. Magnetic base and magnetic materials [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [13] Zhang Kai, Li Wanli, Chen Xiwei. Study on the biconical antenna in the EMC test suitable for engineering machinery [C]//Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility'99. IEEE, 1999: 274-279.
- [14] 游张平,来磊,李万莉. 基于 CAN 总线的连续墙抓斗起重机安全报警系统设计 [J]. 中国工程机械学报, 2009(6): 171-174.
You Zhangping, Lai Lei, Li Wanli. Chinese Journal of Construction Machinery, 2009(6): 171-174.

(责任编辑 陈广仁)

“九宫填数”参考答案

九宫 难度系数 ◆◆◆◆◆								
9	7	3	4	5	1	6	8	2
1	5	6	2	8	3	7	4	9
2	8	4	7	9	6	3	1	5
8	6	1	9	3	4	5	2	7
5	9	2	1	6	7	8	3	4
4	3	7	5	2	8	9	6	1
6	1	9	8	7	2	4	5	3
3	4	5	6	1	9	2	7	8
7	2	8	3	4	5	1	9	6
9	2	1	6	3	4	7	8	5
8	4	5	9	7	2	1	6	3
6	3	7	1	8	5	2	4	9
3	1	9	7	2	6	4	5	8
5	6	4	3	1	8	9	7	2
7	8	2	5	4	9	6	3	1