doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.052

比例电磁阀开环-闭环复合控制算法*

郝允志[1]　薛荣生[1]　陈　建[2]　周　黔[1]

(1.西南大学智能传动与控制工程实验室，重庆 400715；2.西南大学工程技术学院，重庆 400715)

摘要：以比例电磁阀为研究对象，以快速建立具有良好性能的通用控制算法为目标，以充分利用电磁阀的响应特性为途径，提出了将开环控制和闭环控制相结合的开环-闭环复合控制算法，论述了控制算法的模型结构和设计过程。不同于将误差作为唯一输入的常规控制算法，复合控制算法同时将目标值和误差作为控制器的输入。以电磁阀响应特性实验为基础，根据电磁阀的稳态特性建立开环控制表，消除系统的稳态非线性；根据电磁阀的瞬态特性设计了闭环控制器和滞后特性预估修正模块，降低了模型误差和滞后特性的影响，提高了动态响应性能。实验结果验证了复合控制算法的控制精度、响应速度和鲁棒性。

关键词：电磁阀　压力　复合控制　开环控制

中图分类号：TH137.52　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2014)02-0314-06

引言

在施肥、灌溉、喷药、驱动、变速器等设备中广泛应用比例电磁阀对压力或流量进行控制[1-5]。由于比例阀在主要工作区间内具有良好的线性，当控制性能要求不高时，采用简单的 PID 控制算法即能基本满足要求。随着精准农业对控制精度、动态性能、全工况调节性能和稳定性的要求逐渐提高，则需要设计性能更加优越的控制器。

提高控制性能的措施主要包括优化电磁阀结构[6-10]和改进控制算法[11-14]。在控制算法方面，许多文献针对具体应用场合设计了不同的控制算法[15-16]。为了在提高控制算法性能的同时，促进控制算法的模块化和通用化，本文提出一种针对比例电磁阀控制算法的设计流程，按照该流程即可获得具有良好控制性能的控制算法，以某反比例溢流阀为例，论述控制算法的设计过程和控制效果。

1　电磁阀特性实验与建模

1.1　电磁阀特性实验

以某反比例溢流阀作为控制对象，油泵由发动机驱动，通过调节占空比控制液压缸的压力。电磁阀特性实验包括稳态特性实验和瞬态特性实验[17-18]。稳态压力主要影响因素为占空比和油泵转速，部分实验结果如图 1a 所示。稳态压力在主要压力范围内线性度良好，具有明显的饱和特性和回滞特性。占空比一定时，油泵转速越高，压力越大，当转速超过 3 000 r/min 时，其对压力的影响已不明显。将相互对应的两条回滞曲线进行平均，并做平滑处理，得到平均稳态压力特性，如图 1b 所示。

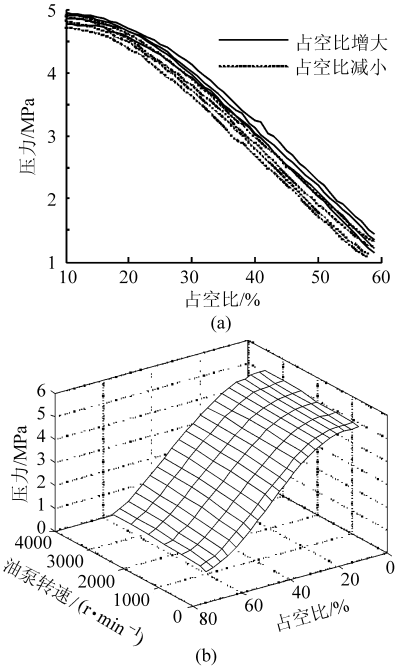

图 1　电磁阀稳态特性实验

Fig.1　Experiment result of solenoid valve steady characteristic

(a) 部分稳态压力实验结果　(b) 平均稳态压力特性

收稿日期：2013-03-13　修回日期：2013-04-15

*国家自然科学基金资助项目(31271610)、重庆市科委重点攻关项目(2011GGB60011)和西南大学科技基金资助项目(2012041707)

作者简介：郝允志，博士生，主要从事动力装置自动化与测试研究，E-mail：hlirc@163.com

通讯作者：薛荣生，教授，主要从事机电传动与控制研究，E-mail：xrs6661@163.com

瞬态特性实验是测试不同转速下占空比阶跃变化时的压力响应过程，包括阶跃上升和阶跃下降两个过程，结果如图 2 所示。可以看出，瞬态压力变化过程有 3 个特点：①压力响应延迟时间约为 0.03 s，并且与转速无关。②响应过程中存在压力波动，可近似为二阶系统。③不同转速下的压力上升过程略有差别，转速越高，响应速度越快，但不同转速下的压力下降过程则基本重合。

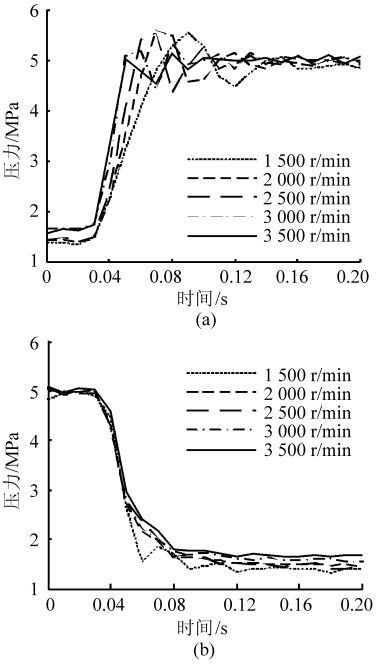

图 2　电磁阀瞬态特性实验

Fig. 2　Experiment result of solenoid valve transient characteristic

（a）占空比阶跃上升　（b）占空比阶跃下降

1.2　电磁阀传递函数模型

根据稳态特性和瞬态特性，可将电磁阀传递函数模型简化表示为

$$p_s(s) = p_{ss}(u_s, n_p)\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}e^{-st} \qquad (1)$$

式中　$p_s(s)$——输出压力

$p_{ss}(u_s, n_p)$——稳态压力

n_p——油泵转速　　u_s——占空比

t——滞后时间　　ω_n——固有频率

ζ——阻尼系数

根据瞬态特性响应曲线，经拟合处理，分别取 $t = 0.03$ s，$\omega_n = 125$ rad/s，$\zeta = 0.3$，即能保证简化模型与实验曲线基本吻合，可以满足控制算法设计对模型精度的要求。

2　电磁阀复合控制算法设计

2.1　开环-闭环复合控制算法

根据具体对象和控制算法的不同，复合控制的形式有主从式[19]、整体局部分工式[20]、并联式[12]、串联式[21]和混联式[22]等。根据系统特性选择两种或多种控制算法，以及确定控制算法之间的结合形式是正确设计复合控制算法的两个基本条件。

目标值和误差是系统的两个状态值，常规的闭环控制器仅以误差作为输入，忽略了目标值，常规的开环控制以目标值为输入，忽略了误差，两者都未能有效利用状态信息。结合以目标值为输入的开环控制和以误差为输入的闭环控制，形成开环-闭环复合控制，能更好地利用状态信息和提高控制性能。

图 3 为开环-闭环复合控制的两种结构，控制部分包括开环控制器和闭环控制器。图 3a 中，控制量由开环控制器输出的基本控制量和闭环控制器输出的修正控制量组成，闭环控制器的作用是实时根据误差来修正基本控制量，提高系统的鲁棒性和动态响应性能。图 3b 中，以目标值作为基本目标，闭环控制器实时根据误差来修正基本目标值，修正后的目标值输入开环控制器得到最终控制量。

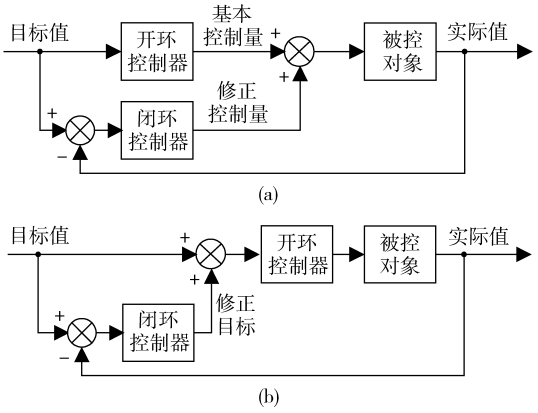

图 3　开环-闭环复合控制框图

Fig. 3　Structure of compound control models

设开环控制器为 $G_{cs}(s)$，闭环控制器为 $G_{cd}(s)$，被控对象为 $G_p(s)$，输出量为 $Y(s)$，目标值为 $R(s)$，推导出图 3 中两种复合控制模型对应的传递函数分别为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_{cs}(s)G_p(s) + G_{cd}(s)G_p(s)}{1 + G_{cd}(s)G_p(s)} \qquad (2)$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_{cs}(s)G_p(s) + G_{cs}(s)G_{cd}(s)G_p(s)}{1 + G_{cs}(s)G_{cd}(s)G_p(s)} \qquad (3)$$

式(2)中，若闭环控制器 $G_{cd}(s) = 0$，则成为开环控制系统

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = G_{cs}(s)G_p(s) \qquad (4)$$

若开环控制器 $G_{cs}(s) = 0$，则成为常规闭环控制系统

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_{cd}(s)G_p(s)}{1 + G_{cd}(s)G_p(s)} \qquad (5)$$

为便于独立分析稳态特性和瞬态特性，设 $G_{ps}(s)$ 为被控对象的稳态特性传递函数，阶数为零，$G_{pd}(s)$ 为被控对象的瞬态特性传递函数，则被控对象的特性可表示为

$$G_p(s) = G_{ps}(s)G_{pd}(s) \tag{6}$$

开环控制器 $G_{cs}(s)$ 的阶数也为 0，与被控对象的稳态特性 $G_{ps}(s)$ 之间满足

$$G_{cs}(s) = \frac{1}{G_{ps}(s)} \tag{7}$$

将式(6)和式(7)代入式(2)和式(3)，两种复合控制模型的传递函数改写为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_{pd}(s) + G_{ps}(s)G_{cd}(s)G_{pd}(s)}{1 + G_{ps}(s)G_{cd}(s)G_{pd}(s)} \tag{8}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_{pd}(s) + G_{cd}(s)G_{pd}(s)}{1 + G_{cd}(s)G_{pd}(s)} \tag{9}$$

式(9)中没有被控对象稳态特性 $G_{ps}(s)$，理论上，闭环控制器只需针对被控对象瞬态特性 $G_{pd}(s)$ 进行设计，而且图 3b 比图 3a 中的控制模型具有更好的控制性能。该复合控制算法具有以下特点：①复合控制器同时将目标值和误差值作为输入，不同于将误差值作为唯一输入的常规控制器。②开环控制器不改变系统的阶数。③将稳态特性和瞬态特性分别进行考虑和设计控制器，补偿了系统的稳态非线性，降低了对闭环控制器的设计要求。

为了表达该复合控制方法的本质，可通过与 PID 控制对比来进行说明。大致可以这样认为，PID 控制中的积分(I)代表过去，比例(P)代表现在，微分(D)代表将来，从而构成对信号较为完整的描述。在复合控制算法中，开环控制器大致相当于 PID 控制中的积分量(I)，由于开环控制器不需要经历积分过程，因此具有更好的动态响应性能。由于微分对干扰信号比较敏感，在干扰工况下的 PI 控制器更为稳定，因此复合控制中的闭环控制器只需采用 P 控制即可构成完整的控制算法。

2.2 电磁阀压力控制算法设计

根据比例电磁阀的稳态特性、动态响应特性和滞后特性分别设计控制模块，通过组合方式建立复合控制模型。以图 3 中的两种复合控制模型为基础，增加滞后特性预估修正模块，建立电磁阀复合控制模型，如图 4 所示。

控制算法包括：开环控制表、闭环控制算法和滞后特性预估修正模块，分别对应于电磁阀的 3 个主要特性：稳态特性、动态响应特性和滞后特性。

(1) 开环控制表。将图 1b 中的电磁阀平均稳态压力特性表进行坐标转换，得到开环控制表，通过查表即可得到占空比，如图 5 所示。

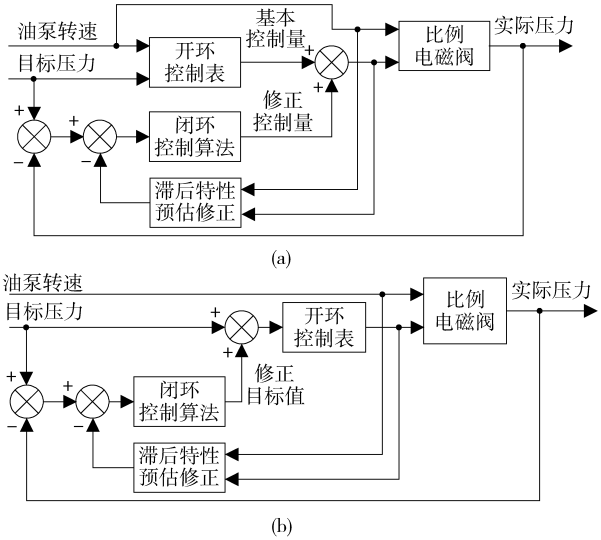

图 4 电磁阀复合控制模型

Fig. 4 Compound control model of solenoid valve pressure

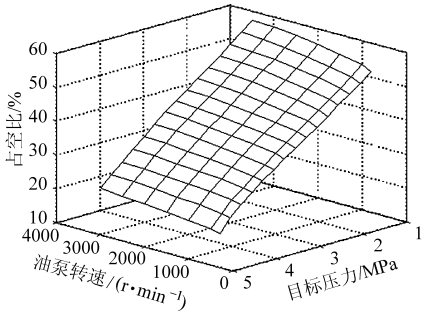

图 5 电磁阀开环控制表

Fig. 5 Open loop control table of solenoid valve

(2) 闭环控制算法。由于基本控制量和基本控制目标由开环控制决定，降低了闭环控制算法的设计难度，闭环控制器的作用是补偿电磁阀的回滞特性以及式(1)中简化模型的误差，提高响应速度和控制精度。根据实验结果确定 t、ω_n 和 ζ 的取值，其误差是满足控制算法设计要求的。由于电磁阀的响应特性近似为二阶线性系统，闭环控制只需采取简单的 P 控制，若要采取 PI 控制，则 I 分量应该取非常小的值，用于消除静差，控制参数需通过实验进行验证和调整。

(3) 滞后特性预估修正。采用 Smith 预估控制法，根据式(1)中的电磁阀简化模型对电磁阀压力进行预测，补偿滞后特性的影响，为闭环控制算法提供更准确的误差，提高系统的稳定性，如图 6 所示。由于预估控制模型比较成熟，这里不再赘述。

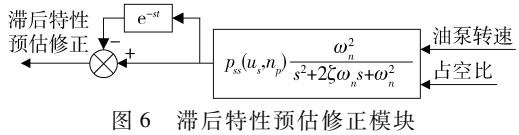

图 6 滞后特性预估修正模块

Fig. 6 Delay characteristics estimates and correction module

综上，电磁阀开环-闭环复合控制算法的设计流

程，如图 7 所示。整个流程中，只有闭环控制算法的参数需要通过实验进行调整，因为通常采用 P 控制或 PI 控制，因此参数调整的工作量很少。

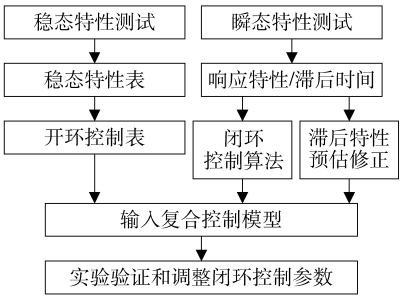

图 7　电磁阀控制算法设计流程

Fig. 7　Design process of solenoid valve control algorithm

3　实验

以阶跃响应作为控制性能的评价指标，将开环控制、PID 控制和两种复合控制进行比较，其中，复合控制中的闭环控制算法采用简单的 P 控制。实验结果表明，图 4 中的两种复合控制算法的控制效果基本相同，并且在各转速下的控制性能比较接近，随着转速升高，控制性能略有提升。以油泵转速 1 500 r/min为例，目标压力阶跃变化时，各控制算法的实验结果如图 8 所示，复合控制采用图 4b 中的结构。目标压力阶跃上升时的控制结果如图 8a 所示，复合控制的上升时间和稳定时间最短，动态响应性能最好。在 PID 控制中，调整 PID 控制参数并使其稳定时间和复合控制相近，但此时其上升时间延长，超调量也更大。开环控制也能保证稳定性，但上升时间和稳定时间最长，超调量最大。目标压力阶跃下降过程的控制结果如图 8b 所示，各控制算法的效果比较接近，这主要是因为电磁阀压力在下降和上升时的响应特性不同。

4　结论

（1）对比例电磁阀的稳态和瞬态响应特性进行实验，将电磁阀的响应特性分为稳态饱和特性、二阶动态响应特性和滞后特性，建立电磁阀的简化传递函数模型。

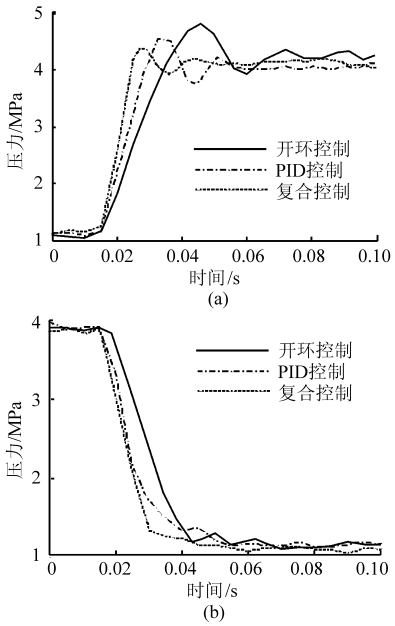

图 8　电磁阀控制实验

Fig. 8　Experiment result of solenoid valve control

（a）占空比阶跃上升　（b）占空比阶跃下降

（2）结合以目标值为输入的开环控制和以误差为输入的闭环控制，形成开环-闭环复合控制，可更有效地利用系统信息。根据稳态特性建立开环控制表，闭环控制器根据误差对控制量或控制目标进行修正，不同于以误差作为唯一输入的常规控制方法，复合控制同时将目标值和误差作为控制器的输入。

（3）将复合控制算法应用于电磁阀压力控制，根据电磁阀的 3 个特性分别设计了开环控制表、闭环控制器和滞后特性预估修正模块，制定了控制算法的设计流程。实验和应用结果验证了开环-闭环复合控制算法的控制精度、响应速度和鲁棒性。

参　考　文　献

1　郎春玲，王金武，王金峰，等. 深施型液态肥变量施肥控制系统[J]. 农业机械学报，2013，44(2)：43－47,62.
Lang Chunling，Wang Jinwu，Wang Jinfeng，et al. Variable fertilizer control system for deep-fertilization liquid fertilizer applicator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(2)：43－47，62.（in Chinese）

2　Wrachien D D，Lorenzini G. Modelling jet flow and losses in sprinkler irrigation：overview and perspective of a new approach[J]. Biosystems Engineering，2006，94(2)：297－309.

3　Sourell H，Faci J M，Playan E. Performance of rotating spray plate sprinklers in indoor experiments[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering，2003，129(5)：376－380.

4　魏新华，蒋杉，张进敏，等. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制[J]. 农业机械学报，2013，44(2)：87－92，86.
Wei Xinhua，Jiang Shan，Zhang Jinmin，et al. Application rate control characteristics of blended pulse variable rate application system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(2)：87－92，86.（in Chinese）

5　刘俊萍，袁寿其，李红，等. 变量喷洒全射流喷头水力性能试验[J]. 农业机械学报，2013，44(2)：75－79.

Liu Junping, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Experiments of hydraulic performance for variable complete fluidic sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 75 - 79. (in Chinese)

6 李明生, 宋正河, 迟瑞娟, 等. 大功率拖拉机电液提升器比例下降阀仿真与优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 1 - 5.
Li Mingsheng, Song Zhenghe, Chi Ruijuan, et al. Simulation analysis on proportional lowering valve for high-power tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 1 - 5. (in Chinese)

7 徐志鹏, 王宣银, 罗语溪. 高压气动比例减压阀设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 209 - 212,222.
Xu Zhipeng, Wang Xuanyin, Luo Yuxi. Design and simulation of a high pressure proportional pneumatic pressure reducing valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 209 - 212,222. (in Chinese)

8 金毅, 项昌乐, 马越. 液力变矩减速装置进口调压阀动态性能优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 12 - 16.
Jin Yi, Xiang Changle, Ma Yue. Optimization on dynamic performance of pressure-regulating valve of tractor-brake hydraulic torque converter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 12 - 16. (in Chinese)

9 刘金刚, 谭援强, 徐惠余, 等. 无级变速器速比控制阀动态性能仿真与优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 6 - 10.
Liu Jingang, Tan Yuanqiang, Xu Huiyu, et al. Dynamic performance simulation and optimization of speed ratio control valve in continuously variable transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 6 - 10. (in Chinese)

10 王裕鹏,刘福水,刘兴华.高压双电磁阀控制燃油系统控制策略研究[J]. 农业机械学报,2012,43(1):28 - 32.
Wang Yupeng, Liu Fushui, Liu Xinghua. Control strategy of high-pressure two-actuator fuel injection system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(1):28 - 32. (in Chinese)

11 郭北涛, 柳洪义, 曹阳, 等. 基于虚拟仪器技术的电磁阀综合特性测控系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 293 - 297.
Guo Beitao, Liu Hongyi,Cao Yang, et al. Measurement and control system for comprehensive performance of solenoid valve based on virtual instrument technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 293 - 297. (in Chinese)

12 姚建勇, 焦宗夏, 黄澄. 基于动态逆模型的电液位置伺服系统复合控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 145 - 151.
Yao Jianyong, Jiao Zongxia, Huang Cheng. Compound control for electro-hydraulic positioning servo system based on dynamic inverse model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 145 - 151. (in Chinese)

13 刘志壮, 洪添胜, 张文昭, 等. 机电式流量阀的模糊控制实现与测试[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1): 22 - 26.
Liu Zhizhuang, Hong Tiansheng, Zhang Wenzhao, et al. Fuzzy control implementing and testing on electromechanical flow valve [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1): 22 - 26. (in Chinese)

14 李胜, 阮健, 孟彬. 2D 数字阀滞环颤振补偿技术研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 208 - 212, 218.
Li Sheng, Ruan Jian, Meng Bin. Dither compensation technology for hysteresis of 2D digital valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 208 - 212, 218. (in Chinese)

15 宋乐鹏, 董志明, 向李娟, 等. 变量喷雾流量阀的变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 114 - 118.
Song Lepeng, Dong Zhiming, Xiang Lijuan, et al. Variable universe adaptive fuzzy PID control of spray flow valve [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 114 - 118. (in Chinese)

16 刘伟, 汪小昱, 丁为民, 等. 背负式喷雾器变量喷雾控制系统设计与特性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 16 - 21.
Liu Wei, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Design and characteristics analysis of variable spraying control system for knapsack sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 16 - 21. (in Chinese)

17 Peiman N, Nataraj C. Nonlinear mathematical modeling of butterfly valves driven by solenoid actuators [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(5): 2 324 - 2 335.

18 叶子波, 屈盛官, 张宜华. 可变喷嘴涡轮增压器电液控制阀仿真与实验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 21 - 25.
Ye Zibo, Qu Shengguan, Zhang Yihua. Control model of electrohydraulic proportional cartridge valve for variable nozzle turbocharger[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 21 - 25. (in Chinese)

19 程国扬, 彭可茂, 王惠. 离散伺服定位系统的复合非线性控制[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(1): 95 - 101.
Cheng Guoyang, Peng Kemao, Wang Hui. Composite nonlinear control for discrete-time positioning servo systems[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(1): 95 - 101. (in Chinese)

20 孙汉旭, 褚明, 贾庆轩. 柔性关节摩擦和不确定补偿的小波神经-鲁棒复合控制[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 68 - 75.
Sun Hanxu, Chu Ming, Jia Qingxuan. Hybrid control using wavelet neural networks and robust method for flexible joint with friction and uncertainties compensation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 68 - 75. (in Chinese)

21 Cetin E, Oguz U. A hybrid controller for the speed of a permanent magnet synchronous motor drive[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(3): 260 - 270.

22 张国柱, 陈杰, 李志平. 基于复合自适应律的直线电机自适应鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(8): 833 - 837.
Zhang Guozhu, Chen Jie, Li Zhiping. An adaptive robust control for linear motors based on composite adaptation [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(8): 833 - 837. (in Chinese)

Open Loop - Closed Loop Compound Control Algorithm of Proportional Solenoid Valve

Hao Yunzhi[1]　Xue Rongsheng[1]　Chen Jian[2]　Zhou Qian[1]

(1. *Intelligent Transmission and Control Laboratory*, *Southwest University*, *Chongqing* 400715, *China*

2. *College of Engineering*, *Southwest University*, *Chongqing* 400715, *China*)

Abstract: In order to quickly establish a pressure control algorithm with good performance for proportional solenoid valve, a compound control algorithm with the combination of open loop control and closed loop control was presented. The algorithm improved the control performance by making full use of the valve response characteristics. Control algorithm design process and control models were established. Unlike the conventional control methods which took the error as the only input, the input of compound control algorithm consisted of both the goal value and the error value. Valve respond characteristics were tested. The open loop control table was established based on the steady-state characteristics of the valve and the saturation in steady-state was eliminated by the open loop control table. The closed loop control value and delay effect compensate value were calculated according to the transient characteristics and the closed loop controller was used to revise the model error and improve the dynamic response. Experiment results showed that the performance of compound control algorithm was accurate, fast response and robust.

Key words: Solenoid valve　Pressure　Compound control　Open loop control