

文章编号: 1671-7848(2009)05-0643-04

## 一种实时自适应步进电机 PID 控制器设计

郑雪钦<sup>1,2</sup>, 郭东辉<sup>1</sup>

(1. 厦门大学 电子工程系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门理工学院 电子与电气工程系, 福建 厦门 361024)



**摘 要:** 传统 PD 控制器通常难以满足多变量、非线性、强耦合的步进电机动态响应和精确调速要求, 结合传统 PD 控制和模糊控制及遗传算法 (GA) 整定 PD 参数的优点, 设计基于模糊遗传算法的实时自适应步进电动机 PD 控制器, 充分发挥传统和智能控制策略各自的优势。仿真结果表明, 该实时自适应步进电动机 PD 控制器, 具有很好的自适应能力和抗负载扰动能力。在稳定性、动态速度响应诸方面均优于传统的 PD 控制器和模糊控制器, 系统达到了较高调速性能和控制精度。

**关键词:** 步进电机; 模糊控制; 遗传算法; PD 控制

**中图分类号:** TP 27 **文献标识码:** A

## Design of PID Controller for Real-time Adaptive Stepping Motor

ZHENG Xue-qin<sup>1,2</sup>, GUO Dong-hui<sup>1</sup>

(1. Electronic Department, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Electronic and Electrical Engineering Department, Xiamen University of Technology, Ximen 361024, China)

**Abstract:** To the problem that the traditional PD controller can not satisfy the requirement of the dynamic response and accurate speed regulation for nonlinear multi-variable stepping motor with strong coupling, the real-time adaptive PD controller, based on fuzzy genetic algorithm is designed, combining with the advantages of PD control, fuzzy control and genetic algorithm tuning PD parameters. This control strategy can develop the advantage of the traditional and intelligent control methods. The simulation results show that the real-time adaptive stepping motor PD controller has the strong adaptive ability and the ability of resisting load disturbance. The steady ability and dynamic response are better than PD controller and fuzzy controller.

**Key words:** stepping motor; fuzzy control; genetic algorithm; PD control

### 1 引言

步进电机是机械传动或机器人应用的主要电动控制设备之一, 具有控制简单、定位精度高、无累积误差等优点<sup>[1]</sup>。然而, 目前用于实现高精度步进电机控制的通常是采用适于线性控制系统<sup>[2]</sup>的传统 PD 控制方法<sup>[3]</sup>, 且实现简单、性能稳定, 但对于环境多变、非线性动态系统, 就难以实现对步进电机的在线实时高精度控制<sup>[4]</sup>。

为了实现对步进电机的在线实时自适应控制, 在传统 PD 控制方法的基础上, 人们引入了一些智能算法, 如神经网络<sup>[5-6]</sup>、模糊控制<sup>[7]</sup>、遗传算法<sup>[8]</sup>等来改变 PD 控制参数, 以提高步进电机控制的鲁棒性 (Robustness)。

其中, 模糊控制作为一种模糊比例-微分作用的智能控制, 无需被控对象的数学模型, 对系统参数的变化不敏感, 动态响应速度快, 且具有较强的

鲁棒性。但常规的模糊控制方式缺少积分环节, 系统消除稳态误差的性能较差<sup>[9]</sup>。因此, PD 控制参数的初始值确定是 PD 控制器设计的关键, 通常是采用 Ziegler-Nichols 方法<sup>[3]</sup>来确定, 但该方法往往会引起系统超调, 而造成系统不稳定; 而遗传算法具有全局优化能力, 能够始终保持整个“种群”的进化, 只要知道目标函数, 通过优选 PD 参数, 就能实现全局自适应搜索<sup>[10-11]</sup>。

### 2 实时自适应 PD 控制原理

对于传统 PD 控制器<sup>[2]</sup>, PD 的控制方程可以表示为

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中, 控制偏差  $e(t) = r_{in}(t) - y_{out}(t)$ ,  $r_{in}(t)$  为给定值,  $y_{out}(t)$  为实际输出值;  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  分别为比例、积分、微分增益。

收稿日期: 2009-01-29; 收修定稿日期: 2009-02-25

基金项目: 福建省教育厅科技基金资助项目 (JB06171)

作者简介: 郑雪钦 (1975-), 女, 福建莆田人, 讲师, 博士, 主要从事电机控制、人工智能与集成电路设计等方面的教学与科研工作; 郭东辉 (1967-), 男, 教授, 博士生导师。

一旦控制偏差产生，比例环节开始作用，从而减小偏差；积分环节主要是用来消除静态误差，以提高系统的无差度；微分环节主要用来反映偏差信号的变化趋势，在信号超偏之前，系统引入修正信号，加快系统的响应速度，缩短调节时间。只要  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  这 3 个增益参数调整恰当<sup>[3]</sup>，就可以避免调节过程过分振荡，实现无差控制。

模糊实时自适应 PD 控制器，是由 PD 控制器和模糊控制器构成，即在 PD 算法的基础上，通过计算当前系统控制误差  $e$  及其变化率  $\dot{e}$ ，利用模糊规则推理，查询模糊矩阵表，实现对增益参数的调整<sup>[3,9]</sup>，其控制原理结构，如图 1 所示。

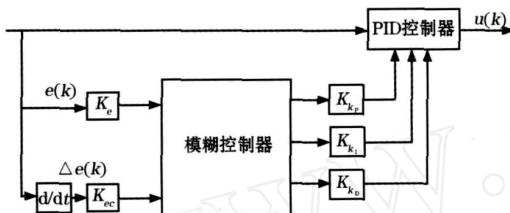


图 1 模糊实时自适应 PD 控制器框图

Fig. 1 Fuzzy real-time adaptive PD controller

即由输入变量  $e$ ,  $\dot{e}$  来修正 PD 控制器的参数  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ，其修正的公式为

$K_p = K_{p0} + K_{pe}$ ,  $K_i = K_{i0} + K_{ie}$ ,  $K_d = K_{d0} + K_{de}$  (2)  
 式中， $K_{p0}$ ,  $K_{i0}$ ,  $K_{d0}$  为步进电机额定运行时 PD 控制器参数值。

对于自适应 PD 控制器，通常要做到：当  $e$  较大时，为提高系统的响应速度， $K_p$  应取较大值；当  $e$  不明显时，为了避免系统的过度响应，可以减小  $K_p$  值，且适当调整  $K_i$ ；当系统接近稳定时，为减小系统稳态误差，抑制过度响应，应增大  $K_i$ 。同样，偏差变化率  $\dot{e}$  越大，表明  $K_p$  越大， $K_i$  越小，可以调整  $K_d$  来抑制过度变化，以缩短调节时间。因此，式 (1) 模糊控制器的具体实现，是自适应 PD 控制系统的设计关键。

### 3 基于模糊遗传算法的系统设计

图 1 的模糊实时自适应 PD 控制器设计中，输入变量的模糊化因子  $K_e$ ,  $K_{de}$  把测得的误差和误差变化率，从物理论域变换到模糊论域集，而输出变量的比例因子  $K_{kp}$ ,  $K_{ki}$ ,  $K_{kd}$  把模糊控制器输出的模糊量，由模糊论域变换到物理论域。在模糊控制过程中，定义输入变量  $e$ ,  $\dot{e}$  的语言变量为  $E$ ,  $EC$ ，输出变量  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  的语言变量为  $KP$ ,  $KI$ ,  $KD$  并分别定义这些语言变量的模糊子集为  $E$ ,  $EC$ ,  $KP$ ,  $KI$ ,  $KD = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ，其中，NB 定义为负大，NM 为负中，NS 为负小，ZO 为零，PS 为正小，PM 为正中，PB 为正大。

则可以用相同的隶属函数来表示这些输入和输出语言变量，如图 2 所示。

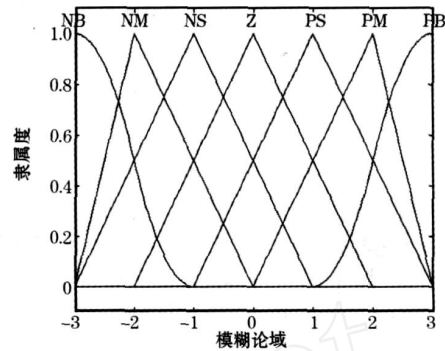


图 2 输入、输出语言变量的隶属函数

Fig. 2 Membership functions of input and output

因此，根据步进电机的速度控制过程，归纳出 49 条控制规则，见表 1~表 3。

表 1 实时自适应控制规则表 (KP)

Table 1 Real-time adaptive control rule (KP)

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NS	NM	NB	NB

表 2 实时自适应控制规则表 (KI)

Table 2 Real-time adaptive control rule (KI)

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 实时自适应控制规则表 (KD)

Table 3 Real-time adaptive control rule (KD)

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PM	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PM	PB

由论域  $E$ ,  $EC$  分别映射到  $KP$ ,  $KI$ ,  $KD$  的模糊关

系  $R_{K_P}, R_{K_I}, R_{K_D}$  可以表示:

$$R_{K_P} = \begin{matrix} n=7, m=7 \\ R_{K_{Pmn}} = [(E_n \times EC_m) \times K_{P_{mn}}] \\ n=1, m=1 \\ n=7, m=7 \end{matrix}$$

$$R_{K_I} = \begin{matrix} n=1, m=1 \\ R_{K_{Imn}} = [(E_n \times EC_m) \times K_{I_{mn}}] \\ n=7, m=7 \\ n=1, m=1 \\ n=7, m=7 \end{matrix}$$

$$R_{K_D} = \begin{matrix} n=1, m=1 \\ R_{K_{Dmn}} = [(E_n \times EC_m) \times K_{D_{mn}}] \\ n=1, m=1 \end{matrix}$$

式中,  $m, n$  为模糊子集个数。

根据上式模糊关系  $R_{K_P}, R_{K_I}, R_{K_D}$ , 由某一固定时刻的偏差  $E$  和偏差变化率  $EC$  的模糊值, 可推理运算获得模糊控制器的模糊量  $K_P, K_I, K_D$ 。模糊推理运算可采用基于最大最小值的 Mamdani 方法<sup>[12]</sup>, 实现 PD 参数的在线实时自适应, 即:

$$K_P = [E \times EC] R_{K_P} \quad K_I = [E \times EC] R_{K_I}$$

$$K_D = [E \times EC] R_{K_D}$$

在实时自适应 PD 控制器的初始参数选定 (即  $K_P, K_I, K_D$  设计) 过程中, 通常是采用 Ziegler-Nichols 方法, 但该方法可能引起系统常数设定超调或过量设置。本文采用标准的遗传算法来实现控制器初始参数设定。根据遗传算法原理, 选用算法搜索的目标函数为<sup>[13]</sup>

$$function = \int_0^{t_u} (K_1 |e(t)| + K_2 u^2(t) + K_4 |ey(t)|) dt + K_3 \cdot t_u \quad (3)$$

式中,  $u(t)$  为控制器输出;  $e(t)$  为系统误差;  $t_u$  为上升时间;  $K_1, K_2, K_3, K_4$  为权值, 且满足  $K_4 \gg K_1$ ;  $ey(t) = y(t) - y(t-1)$ ,  $y(t)$  为控制器的输出。

在遗传算法的目标函数搜索设计中, 采用 30 个实数编码的样本, 对  $K_P, K_I, K_D$  这 3 个参数进行最优整定。设置遗传算法中的交叉概率  $P_c = 0.9$ , 变异概率  $P_m = 0.033$ ,  $K_1 = 0.999$ ,  $K_2 = 0.001$ ,  $K_3 = 2.0$ ,  $K_4 = 100$ ; 令  $K_P$  的取值范围为  $[0, 20]$ ,  $K_I$  的取值范围为  $[0, 3]$ ,  $K_D$  的取值范围为  $[0, 7]$ <sup>[14-15]</sup>; 经过 100 代的优化运算, 获得步进电机额定运行时 PD 控制器参数值  $K_P = 19.77, K_I = 2.55, K_D = 6.72$ 。其中, 目标函数  $Function$  优化过程如图 3 所示。

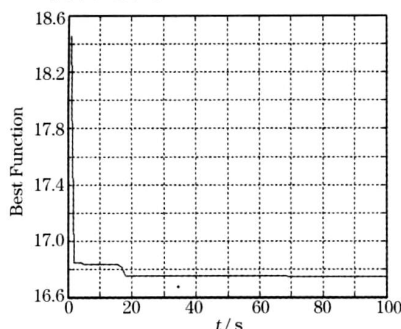


图 3 目标函数  $Function$  的优化过程  
Fig. 3 Optimization process of function

最后的性能指标  $Function = 16.7474$ 。

### 4 仿真分析

根据系统设计的模糊遗传算法实时自适应步进电机 PD 控制器, 利用 Matlab 中的 Fuzzy-Logic 工具箱, 在 FIS 编辑器内进行输入和输出变量、隶属函数及模糊控制规则等的编辑, 构建模糊控制器的 FIS 结构文件。把 FIS 结构文件嵌入到 Fuzzy-Logic 工具箱“Fuzzy Logic Controller 模块中, 模糊化因子  $K_e, K_{ec}$  加在该模块的输入端, 比例因子  $K_P, K_I, K_D$  加在该模块的输出端, 这样, 就实现了模糊控制器模块与 PD 模块关联。

本文所建立的模糊遗传算法实时自适应步进电机 PD 控制器的仿真模型, 如图 4 所示。

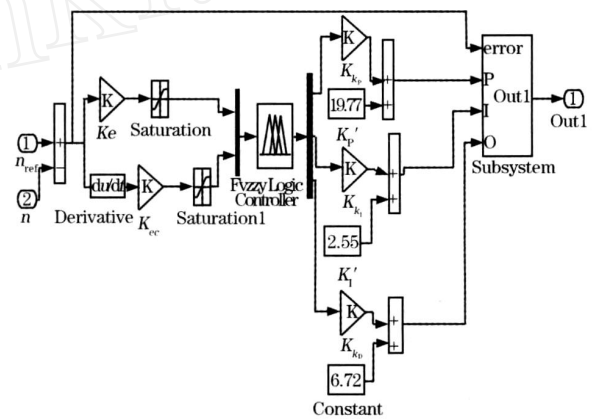


图 4 模糊遗传算法实时自适应步进电机 PD 控制器仿真模型

Fig. 4 Simulation model of fuzzy-GA real-time adaptive stepping motor PD controller

将建立的模糊遗传算法实时自适应步进电机 PD 控制器仿真模型, 直接与步进电机 simulink 仿真模型相连接<sup>[16]</sup>。

本文所采用步进电机的参数分别为: 定子电阻  $R = 35$ , 定子电感  $L = 35$  mH, 转子齿数  $Z_r = 80$ , 转动惯量  $J_m = 0.025$  kg · m<sup>2</sup>, 阻尼系数  $B_m = 0.0025$ , 负载  $m_r = 0 \sim 2.5$  N · m, 步进电机功率范围为  $0 \sim 1$  W。

对步进电机调速分别采用传统 PD 控制、模糊控制、模糊遗传算法实时自适应 PD 控制。通过这 3 种控制方法比较。系统在起始阶段加负载  $m_r = 1$  N · m, 步进电机转速达到  $n = 100$  r/min 的响应过程; 在  $t = 0.5$  s 时刻卸掉负载量, 即  $m_r = 0.5$  N · m 及  $t = 1.2$  s 时刻突加的负载量, 即  $m_r = 1$  N · m, 测试步进电机抗负载突变的能力。

仿真结果, 即步进电机系统在  $t = 0 \sim 2$  s 间的转速稳定情况, 如图 5 ~ 图 7 所示。步进电机系统分别采用这 3 种控制方法在  $t = 1.2$  时刻突加不同负载量, 即  $m_r = 1.2 \sim 2.5$  N · m 与系统转速超调量

之间的关系曲线, 如图 8 所示。

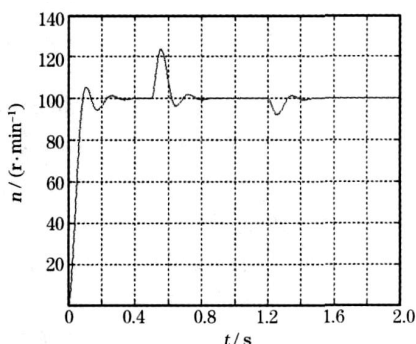


图 5 传统 PID 控制器速度响应曲线

Fig. 5 Speed response with traditional PID

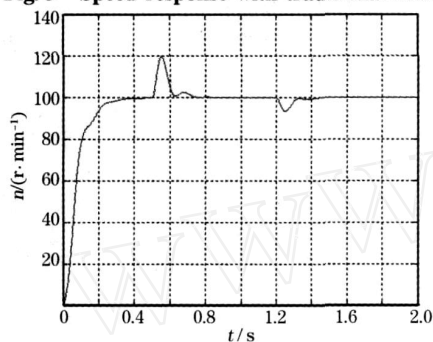


图 6 模糊控制器速度响应曲线

Fig. 6 Speed response with fuzzy controller

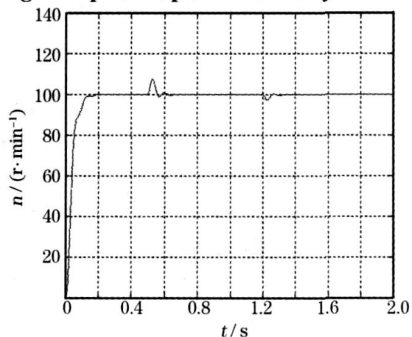


图 7 实时自适应 PID 控制器速度响应曲线

Fig. 7 Speed response with real-time adaptive PID

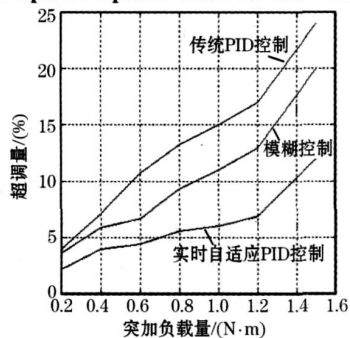


图 8 突加负载量与系统超调量关系

Fig. 8 relationship between over-load and n

图 5~图 7 仿真结果表明, 在步进电机速度控制过程中, 传统 PD 控制系统在响应初始阶段产生较大的超调, 受负载扰动时会产生抖动现象, 响应曲线不理想; 常规模糊控制系统速度响应曲线产生了较大的超调量, 启动速度慢, 受负载扰动时, 系

统恢复稳定时间较长; 采用模糊遗传算法实时自适应整定 PD 控制时, 速度响应曲线具有较小的超调量, 启动速度快, 受负载扰动时, 系统恢复稳定时间短。图 8 曲线表明, 在突加不同负载情况下, 模糊遗传算法实时自适应 PD 控制, 系统超调量明显小于其他两种控制方法。

### 5 结 语

本文将遗传算法、模糊逻辑控制与 PD 控制相结合, 设计模糊遗传算法实时自适应 PD 控制器。仿真结果表明, 步进电机系统的稳定性、动态速度响应、抗负载能力等方面均优于传统的 PD 控制和常规模糊控制。这一新颖的复合智能控制策略为步进电机精确速度控制的研究和发展提供了新的思路。

### 参考文献 (References):

- [1] 陈士进, 朱学忠. 步进电机系统驱动与控制策略综述 [J]. 电机技术, 2007, (6): 14-17. (Chen Shijin, Zhu Xuezhong Overview of drive and control strategies for stepping motor system [J]. Motor Techniques, 2007 (6): 14-17)
- [2] 陶永华. 新型 PD 控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. (Tao Yonghua New PD control and its application [M]. Beijing: Mechanical Press, 2002.)
- [3] 史敬灼. 步进电机伺服控制技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. (Shi Jingzhuo Stepping motor servo control techniques [M]. Beijing: Science Press, 2006.)
- [4] Wale J D, Pollock C. Hybrid stepping motors and drives [J]. Power Engineering Journal, 2001, 15 (1): 5-12.
- [5] Betin F, Pinchon D, Jaafari A. Robust speed control of a stepping motor drive using fuzzy logic [C]. Italy: Proceeding of the IEEE, 1998.
- [6] 王洋海, 徐殿国, 史敬灼. 基于模糊神经网络控制的混合式步进电机伺服系统研究 [J]. 高技术通讯, 2004, 10 (5): 60-63. (Wang Panhai, Xu Dianguo, Shi Jingzhuo Study on the hybrid stepping motor position servo system with on-line trained fuzzy neural network controller [J]. High Techniques Communication, 2004, 10 (5): 60-63.)
- [7] Pinchon B F, Capolino G D A. Fuzzy logic applied to speed control of a stepping motor drive [J]. IEEE Trans Industry Electron, 2000, 47 (3): 610-622.
- [8] Miura T, Taniguchi T. Open-loop control of a stepping motor using oscillation-suppressive exciting sequence tuned by genetic algorithm [J]. IEEE Trans Industry Electron, 1999, 46 (6): 1192-1198.
- [9] Rubaai A, Castro-Sitiriche M J, Ofoli A R. Design and implementation of parallel fuzzy PD controller for high-performance brushless motor drives: An integrated environment for rapid control prototyping [J]. IEEE Trans Industry Application, 2008, 44 (4): 1090-1098.
- [10] Rubaai A, Castro-Sitiriche M J, Ofoli A R. DSP-based laboratory implementation of hybrid fuzzy-PD controller using genetic optimization for high-performance motor drives [J]. IEEE Trans Industry Application, 2008, 44 (6): 1977-1986.
- [11] Visioli A. Fuzzy logic based set-point weight tuning of PD controllers [J]. IEEE Trans Systems, Man and Cybernetics, Part A, 1999, 29 (6): 587-592.
- [12] 曾光奇, 胡均安. 模糊控制理论与工程应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006. (Zeng Guangqi, Hu Junan Fuzzy control theory and engineering application [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006.)
- [13] 雷英杰. Matlab 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. (Lei Yingjie Matlab genetic algorithms fuzzy-box and application [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005.)
- [14] Wang P, Kwok D P. Optimal fuzzy PD control based on genetic algorithm [C]. Industrial Electronics, Control, Hongkong: Instrumentation, and Automation, 1992.
- [15] Tang K S, Man K F, Chen G R, et al. An optimal fuzzy PD controller [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2001, 48 (4): 757 - 765.
- [16] Csaba S Z. Fuzzy strategy-based position control of field-oriented PM-hybrid stepping motor [C]. North American: IEEE Conference on Fuzzy system, 2007.