

doi: 10.7690/bgzdh.2016.02.012

两相混合式步进电机建模与仿真

余 驰, 李健仁, 张刚峰

(庆安集团有限公司航空设备研究所, 西安 710077)

摘要: 为提升两相混合式步进电机的控制性能, 建立一种基于模糊控制在线参数调节控制策略的两相混合式步进电机数学模型。在合理简化和线性化处理的基础上, 采用先进的模糊控制理论和 PID 控制结合的控制策略, 将模糊控制对环境的适应性强, 可在线调整控制参数应用于对 PID 参数的实时调节。在 Matlab 仿真环境下进行建模与仿真, 对比分析了常规 PID 与模糊 PID 控制的仿真特性。仿真结果表明: 在不同响应和精度要求的两相混合式步进电机控制系统中, 通过模糊参数在线调节控制比常规参数 PID 控制可以达到更优的技术指标, 实现了对两相混合式步进电机的快速精确控制。

关键词: 混合式步进电机; PID 控制; 模糊控制; 建模与仿真

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Modeling and Simulation of Two-phase Hybrid Stepping Motor

Yu Chi, Li Jianren, Zhang Gangfeng

(Aviation Equipment Institute, Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to improving control performance of two-phase hybrid stepping motor, its modeling was set up by one of fuzzy control parameter on-line adjusting control tactic. It was based on logical predigesting and linear disposing, combine advanced fuzzy control theory and PID control tactic were adopted, fuzzy control has better adaptability on-line adjusting control parameter was applied to PID parameter real-time adjusting. Modeling and simulation under Matlab environment was set up, simulation characteristic of general PID and fuzzy PID was analyzed. Simulation of result show, with different response an precision in two-phase hybrid stepping motor control system, fuzzy parameter on-line adjusting could be realized better technical index, it was realized fast precision control in two-phase hybrid stepping motor.

Keywords: hybrid stepping motor; PID control; fuzzy control; modeling and simulation

0 引言

步进电机又称脉冲电机或阶跃电机。接收脉冲信号通过励磁状态的改变, 实现对应角度执行的机电元件。具有易于实现数字控制、步距角误差不累积、在相当宽的范围内调速平滑、自锁能力好等优点^[1]。步进电机在机器人、液压数字阀、多维伺服转台、航空自适应机翼驱动系统、数控机床等方面已有广泛的应用^[2-5]。可根据具体的使用需求进行开环或闭环控制工程应用。步进电机按照结构形式可分为永磁式步进电机(PM型)、混合式步进电机(HB型)和反应式步进电机(VR型)。永磁式步进电机的转矩和体积较小、成本较低、分辨率较低、步距角较大一般在 $7.5^\circ \sim 15^\circ$, 适合应用在负载较小、精度较低的控制系统中。反应式步进电机转矩较大, 但噪声和振动过大; 因此, 在 20 世纪 80 年代就已经被一些发达国家淘汰。混合式步进电机综合了永磁式和反应式电机的优点, 具有分辨率高、转矩较大和调速平滑的特点, 适合应用在高精度的机电伺服

控制系统中, 是目前应用最广泛的步进电机。

基于此, 笔者以广泛应用的混合式步进电机为对象, 在建立数学模型的基础上, 为了适应快速响应和高精度的跟踪使用要求和发展需求, 将步进电机伺服控制与调试的经验, 通过运用模糊控制在线参数调节的控制策略施加于两相混合式步进电机的控制, 以提升两相混合式步进电机的控制性能。

1 两相混合式步进电机数学模型

对于两相混合式步进电机, 为使分析简化, 笔者作如下假设: 饱和效应忽略不计, 磁滞及涡流损耗不计, 定子极间和端部的漏磁不计, 永磁体回路的漏磁不计, 忽略定子线圈自感的谐波分量时, 则两相混合式步进电机的电压平衡方程^[1,6]可表示为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ba} & L_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_r \omega & 0 \\ 0 & -k_r \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(N_r \theta) \\ \sin[N_r(\theta - \lambda)] \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期: 2015-09-29; 修回日期: 2015-11-07

作者简介: 余 驰(1982—), 男, 陕西人, 硕士, 高级工程师, 从事机载武器系统及其发射控制研究。

其中： u_a 、 u_b 、 i_a 、 i_b 分别为两相混合式步进电机 A、B 相电压和相电流； R_a 、 R_b 为两相混合式步进电机 A、B 相绕组电阻； L_{aa} 、 L_{ab} 、 L_{bb} 、 L_{ba} 分别为两相混合式步进电机 A、B 相的自电感和互电感； N_r 为两相混合式步进电机转子齿数； λ 为极距角； K_T 为转矩系数。

两相混合式步进电机运动平衡方程^[1]：

$$J \left[\frac{d^2\theta}{dt^2} \right] = T_c - B \frac{d\theta}{dt} - T_L; \quad (2)$$

$$T_c = -\frac{1}{2} K_T i_a \sin(N_r \theta) - \frac{1}{2} K_T i_b \sin(N_r \theta - \lambda). \quad (3)$$

其中： J 是转动惯量； T_c 是电磁转矩； B 为黏滞摩擦系数； T_L 为负载转矩。

步进电机的工作与其他直流伺服电机相比较为复杂，即使现有以上的线性化微分方程，对其特性分析还需进行线性化处理。如图 1，当 $\Delta\theta=0$ 时，转子达到平衡位置，流过 A、B 两相的电流为 I_0 ，即二相极中心 $\lambda/2$ 处，图中 λ 为极距角。当转子偏移平衡位置一个微小位移 $\Delta\theta$ 量值时，则 A、B 两相的电流 i_a 和 i_b 产生 Δi_a 和 Δi_b 的变化，则有：

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{\lambda}{2} + \Delta\theta \\ i_a &= I_0 + \Delta i_a \\ i_b &= I_0 + \Delta i_b \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

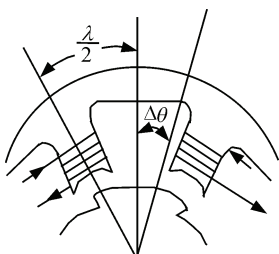


图 1 混合式步进电机转子平衡位置

联立式 (2)~(4)，可得出：

$$J \frac{d^2(\Delta\theta)}{dt^2} + B \frac{d(\Delta\theta)}{dt} + T_L + K_T I_0 \Delta\theta \cos \frac{N_r \lambda}{2} + \frac{1}{2} K_T I_0 \Delta\theta \cos \frac{N_r \lambda}{2} (\Delta i_a + \Delta i_b) = 0. \quad (5)$$

在单相励磁情况下推导传递函数，设 $T_L=0$ ， $\lambda=0$ ， $\Delta\theta=\theta_1-\theta_0$ ，其中 θ_1 为控制量、 θ_0 为目标值，则式 (5) 变化为

$$J \frac{d^2\theta_1(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta_1(t)}{dt} + K_T I_0 N_r \theta_1(t) = K_T I_0 N_r \theta_0(t). \quad (6)$$

在初始条件为零的条件下进行拉斯变换则有：

$$(s^2 J + s B + K_T I_0 N_r) \theta_1(s) = K_T I_0 N_r \theta_0(s); \quad (7)$$

$$G(S) = \frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{K_T I_0 N_r}{s^2 + \frac{B}{J} s + K_T I_0 N_r}. \quad (8)$$

令 $\omega_n = \sqrt{K_T I_0 N_r}$ ，其中 ω_n 为固有角频率。

2 两相混合式步进电机建模与仿真

2.1 模糊控制结构与整定原则

在两相混合式步进电机数学模型的建模过程中，为了推导传递函数对其进行了线性化处理和适当的简化。而两相混合式步进电机在高精度位置伺服中应用时，因电机本体特性、机电系统的构成、使用环境特性的变化等因素影响，存在非线性、时变和不确定性的外部扰动等特性。为了达到较快的随动跟踪响应特性和高精度的位置跟随性能，采用常规的 PID 很难达到理想的控制效果。模糊控制将实际工作中步进电机伺服控制与调试得来的经验，通过模糊控制算法作用于被控系统，能够使被控系统具有更宽的负载适应能力，提升被控制系统的跟踪响应特性和稳定精度。

模糊控制器的输入变量是角位移的误差 e 和误差的变化率 e_c ；输出变量为 PID 控制器的 3 个参数 K_P 、 K_I 、 K_D 。为了满足不同时刻误差和误差变化率对 PID 参数自整定要求，利用模糊控制规则在线对 PID 控制器的 3 个参数 K_P 、 K_I 、 K_D 进行修改，便构成参数模糊自整定 PID 控制器，其控制原理图见 2。

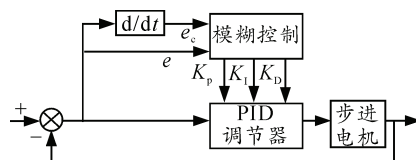


图 2 步进电机模糊控制原理

其实现思想是找出 PID 控制器 3 个参数与误差和误差变化率之间的模糊关系，形成控制规则。在动态运行中通过不断在线的检测误差和误差变化率，再根据模糊控制原理对 3 个参数在线调节，以满足在不同时刻误差和误差变化率对控制参数的不同要求，使被控制对象具有良好的动态和静态性能。

从系统的稳定性、响应速度、超调量、稳态精度和 PID 3 个参数不同时刻相互间的作用考虑。在不同的 $|e|$ 和 $|e_c|$ 时，被控过程对参数 K_P 、 K_I 、 K_D 的自整定要求可总结^[7]为：

1) 当 $|e|$ 较大时，为使系统具有较好的快速跟踪性能，应取较大的 K_P ，较小的 K_D ，同时为了避免系统响应出现较大的超调，应对积分作用加以限制。

2) 当 $|e|$ 中等较大小时, 为使系统响应具有较小的超调, K_P 应取较小些, K_I 和 K_D 要取得适中, 以保证系统的响应速度。

3) 当 $|e|$ 较小时, 为使系统具有较好的稳态性能, K_P 和 K_I 均应取较大些, 同时为避免系统在设定值附近振荡, 并考虑系统的抗干扰性能, 当 $|e_c|$ 较小时, K_D 值取大些; 当 $|e_c|$ 较大时, K_D 值可取小些。

2.2 隶属函数与模糊规则的建立

角位移误差为 $e = \theta^* - \theta'$, θ^* 是实际的输入量, θ' 是实际输出量; e_c 为角位移的变化率, 即 $e_c = \dot{e}$ 。则模糊控制的输入为 e 和 e_c , 输出为 K_P 、 K_I 、 K_D 。输入变量模糊化的语言值均采用 7 级表示为 {NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)}; 输出变量的模糊化的语言值均采用 4 级表示为 {Z(零)、S(小)、M(中)、B(大)}。输入输出变量的隶属函数均采用灵敏度较高的三角型隶属函数, 误差 e 和 e_c 的隶属函数见图 3 和图 4。误差 e 的论域为 $[-1, 1]$, 误差的变化率 e_c 的论域为 $[-5, 5]$, K_P 、 K_I 、 K_D 的论域分别为 $[40, 50]$, $[0.5, 1]$, $[0.1, 0.2]$ 。根据 2.1 中的整定原则, 并结合对两相混合式步进电机的调试和实际控制经验, 笔者建立模糊控制规则见表 1。

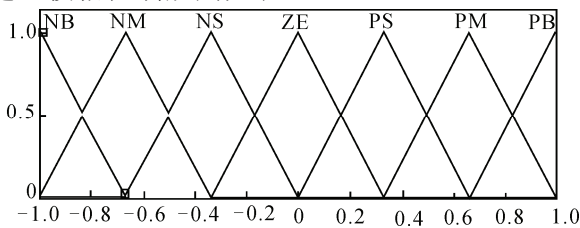


图 3 输入变量 e 的隶属函数图

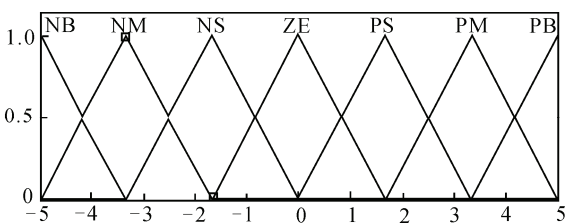


图 4 输入变量 e_c 的隶属函数图

表 1 模糊控制规则

e_c	e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	BZS	BSM	MMZ	MBS	SMZ	SSM	ZZS
NM	BZM	MSM	MBS	SBZ	SBS	ZSM	ZZM
NS	BZM	MZB	SMS	ZBS	SMS	SZB	BZB
ZE	BZB	SZB	ZBS	ZBZ	ZBS	SZB	BZB
PS	BZB	SZB	SBS	ZBS	SBM	MZB	BZM
PM	ZZM	ZSM	SMS	SBZ	MMS	MSM	BZM
PB	ZZS	ZSM	SMZ	MBZ	MMZ	BSM	BZS

第一条规则解释为: 当 e 为 NB, 且 e_c 为 NB 时, 则 K_P 为 B、 K_I 为 Z、 K_D 为 S, 其他规则以此类

推。而实际应用时, 可根据被控步进电机的参数特性, 通过实际控制与仿真进行优化、改进和完善控制规则与算法, 以达到更优的性能和适用性。

2.3 控制器设计与实现

在 Matlab 工作区进入模糊推理系统编辑器, 可以对输入、输出变量的论域范围及其隶属函数, 模糊规则、推理算法、解模糊化方法进行编辑^[8]。输出曲面观察器中模糊 PID 控制器 K_P 、 K_I 、 K_D 的控制曲面如图 5~图 7。模糊推理为 Mamdani 型, 反模糊化采用中位法, 在 Matlab/Simulink 环境下建立两相混合式步进电机的模型, 将设计的参数模糊自整定 PID 控制器用于 Simulink 仿真环境下。设定 Simulink 仿真环境中控制系统的各级参数, 按照仿真流程对两相混合式步进电机进行仿真研究, 并可通过图像化的监控观测分析控制系统的特性。

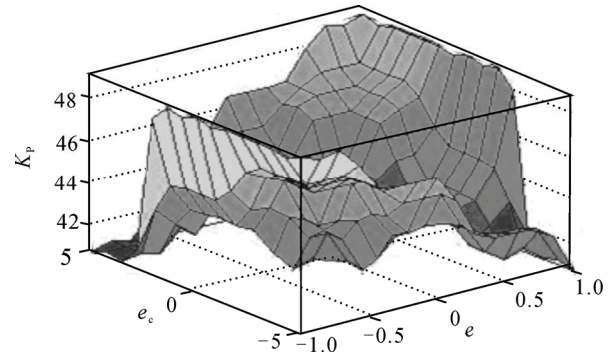


图 5 模糊 PID 中 K_P 的控制曲面

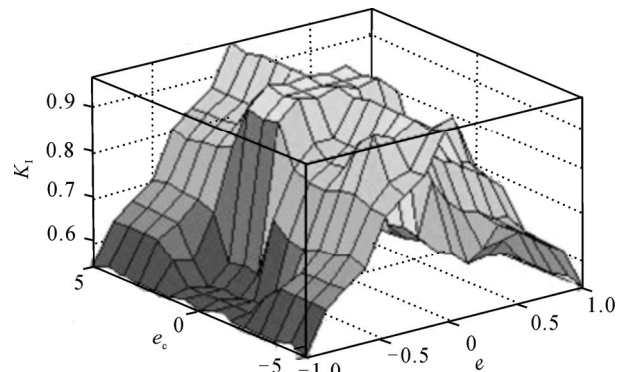


图 6 模糊 PID 中 K_I 的控制曲面

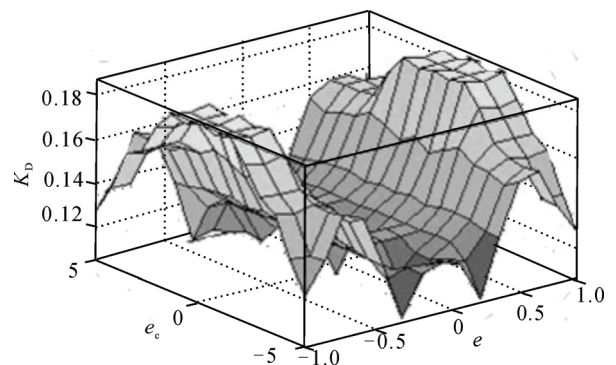


图 7 模糊 PID 中 K_D 的控制曲面

3 仿真结果分析

用设计的具有参数模糊自整定的 PID 控制器在 Matlab/Simulink 环境中对两相混合式步进电机进行仿真研究。在输入 15° 阶跃信号，即 0.2618 rad 时，模糊 PID 控制的响应曲线分别为图 8~图 10。同等条件下为了对比，给出了常规 PID 控制下的响应曲线分别为图 11~图 13。对比分析 2 种控制情况下的结果如下：

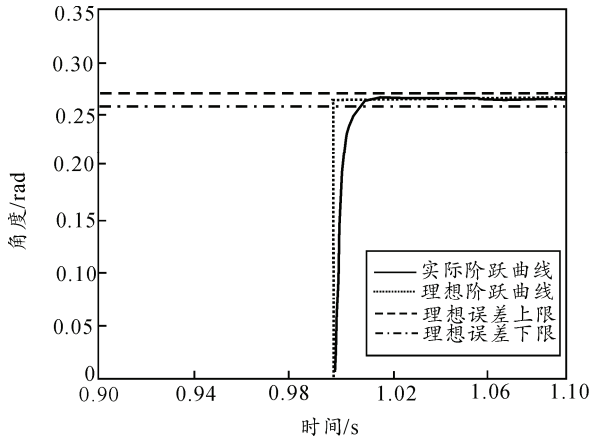


图 8 模糊 PID 控制阶跃响应曲线

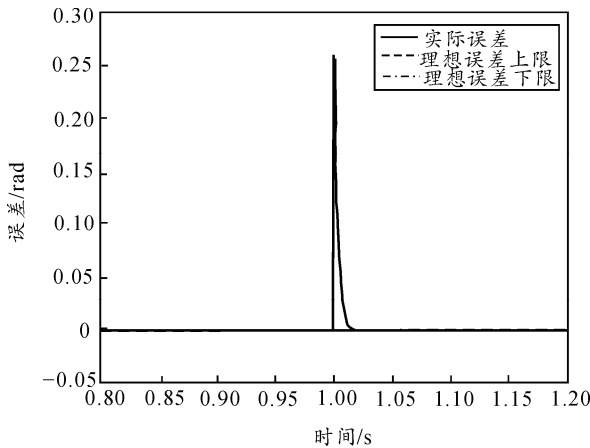


图 9 模糊 PID 控制误差曲线

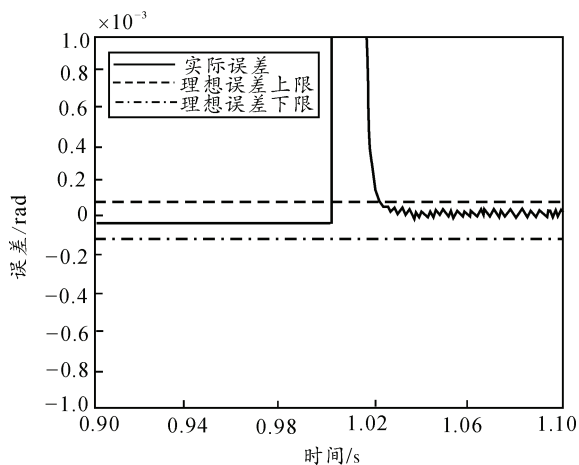


图 10 模糊 PID 控制误差曲线局部放大图

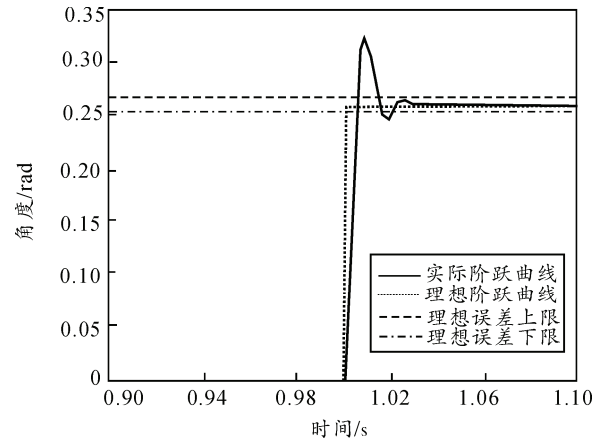


图 11 PID 控制阶跃响应曲线

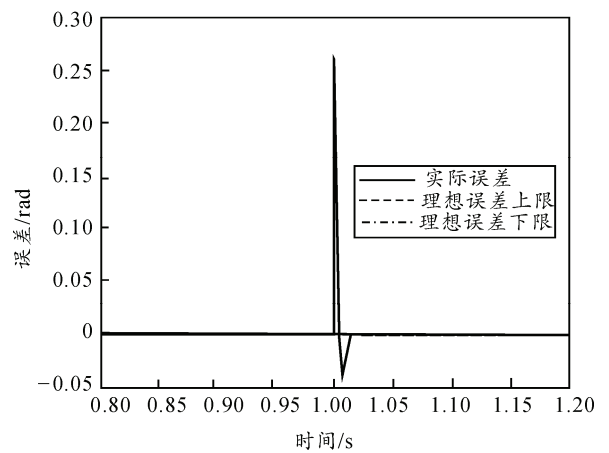


图 12 PID 控制误差曲线

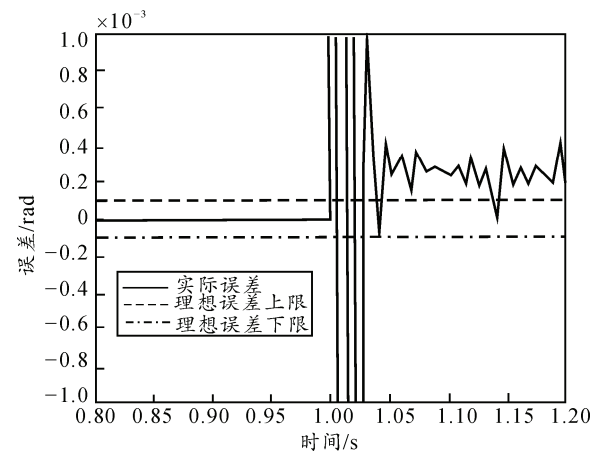


图 13 PID 控制误差曲线局部放大图

1) 在时间 1 s 时，阶跃 0.2618 rad ，由图 8 和图 11 中可以看出：模糊 PID 和常规 PID 的调整时间在 2% 的误差带时，基本为 20 ms 。在同样的输入和调整时间内，模糊 PID 控制没有超调，而常规 PID 控制的超调在 21% 左右；因此，分析可知在需要获得同样灵敏性的条件下，模糊 PID 的相对稳定性明显优于常规 PID 控制。