

doi:10.16652/j.issn.1004-373x.2017.07.037

改进粒子群算法的永磁同步电机 PID 控制器

谢治军, 郑丽娟, 屈召贵

(四川工商学院 实验中心, 四川 成都 611745)

摘要:采用粒子优化算法进行PID模糊控制训练能提高永磁同步电机的控制精度,提出一种基于改进粒子群算法的永磁同步电机PID控制方法,构建永磁同步电机PID模糊控制目标函数,选择电压、转矩、速度和电磁损耗等参数进行控制约束参量分析。采用改进的粒子群算法进行PID控制的加权训练,实现控制目标函数最优化求解,进行永磁同步电机PID控制律优化。实验结果表明,采用该控制方法进行永磁同步电机控制的调制性能较好,具有较好的输出增益,振荡较小,抗干扰能力较强。

关键词:粒子群算法; 永磁同步电机; PID 控制; 加权训练

中图分类号: TN876-34; TM351

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2017)07-0139-04

Improved PSO algorithm based PID controller of permanent magnet synchronous motor

XIE Zhijun, ZHENG Lijuan, QU Zhaogui

(Experimental Center, Sichuan Technology and Business University, Chengdu 611745, China)

Abstract: Since the particle swarm optimization (PSO) algorithm used to train the PID fuzzy control can improve the control precision of the permanent magnet synchronous motor, an improved PSO algorithm based PID control method of the permanent magnet synchronous motor is proposed. The PID fuzzy control objective function of the permanent magnet synchronous motor was constructed. The voltage, torque, speed, electromagnetic loss and other parameters are selected to analyze the control constraint parameters. The improved PSO algorithm is used to perform the weighted training of the PID control, solve the optimal control objective function, and optimize the PID control law of the permanent magnet synchronous motor. The experimental results show that the control method has high modulation performance of the permanent magnet synchronous motor, good output gain, small vibration, and strong anti-interference ability.

Keywords: particle swarm optimization algorithm; permanent magnet synchronous motor; PID control; weighted training

0 引言

永磁同步电机在现代电力控制系统中得到广泛的应用,其具有可靠性和稳定性好,发电输出增益较大和抗干扰能力较强的优点。永磁同步电机通过超导电子进行同步控制发电,电机输出的功率较大,需要进行可靠性控制设计^[1]。永磁同步电机的控制和设计包含多变量约束和多模控制的目标优化问题,永磁同步电机控制模型是一种多变量、非线性的时滞控制系统,文献[2-3]提出具有确定性分叉性边界优化的控制方法,采用梯度优化算法进行模糊PID控制,控制目标的约束参量取决于永磁体的特性、电机性能,增加电动势的平均值,但忽

略了电机的速度要求。本文在电机PID控制的基础上进行优化设计,采用改进的粒子群算法进行训练优化,以及控制方法优化设计。

1 永磁同步电机的控制参量模型

本文研究的永磁同步电机的结构模型如图1所示。通过对电机的损耗、电机体积/重量等方面的优化设计,减少漏磁和漏磁电感对电机在动态工况下的影响,提高电磁的输出转矩和功率^[4]。

永磁同步电机系统主要由电磁耦合器的偶极子进行线圈序列的定位和电磁耦合实现交流振荡控制,建立无槽无刷直流电机控制的几何参数模型,本文中,优化控制的参数包括:最大电磁转矩数 P , 耦合器的极弧系数 β , 磁场有效电流值 I_m , 电机的永磁体转子/定子轭厚度 l_y , 绕组厚度 l_w , 气真空磁导率 l_g , 漏磁系数 k_1 , 转子半径 r_r , 气隙的磁阻密度 J_{ca} , 永磁体磁场 l_s , 定/转子轴向长

收稿日期:2016-08-10

基金项目:四川省教育厅重点项目(自然科学):存储式随钻测斜仪研制(16ZA0424)

度(通常用细长比 $\lambda = d_b/l_s$ 表示,其中 $d_b = 2(r_r + l_g)$)。

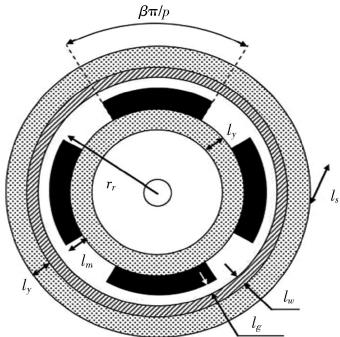


图1 永磁同步电机控制参量分布示意图

选择电压、转矩和电磁损耗作为控制约束参量,依据洛伦兹法则得到无槽无刷直流电机磁极厚度为 l ,在磁场密度为 B 的磁场通过功率反馈自适应调制,得到输出电流 I 时,漏磁系数为 $f=Il \times B$ 。在扰动误差干扰下,电机的传输效率为:

$$\eta = \frac{P_o}{I_p^2(Z_{ps}+R_p)} \cdot \frac{\omega_0^4 M_{ps}^2 M_{sr}^2 M_{rl}^2 L_l^2 I_p^2 R_o}{h_1(\omega_0^2 M_{sr}^2 L_l^2 R_r + \omega_0^2 M_{ps}^2 M_{rl}^2 R_o + h_1 R_p)} \quad (1)$$

其中: $h_1 = \omega_0^2 M_{sr}^2 L_l^2 + R_s R_r L_l^2 + R_s R_o M_{rl}^2$ 。

通过对电磁耦合增益的调整,在距离电机电磁绕组旋转中心为 r 处的转矩为 $T=NI\bar{B}_r$ 。令 $l=l_s, r=r_r+l_g$, $NI=A_w J_{cu} k_f$,再计算直流电机的电磁耦合增益,得到 B ,就可以得到图1中永磁同步电机的电磁转矩。其中 k_f 是补偿电容常数, A_w 为电容输出终端绕组截面积,定义为 $A_w=\pi l_w(2r_r+2l_g+l_w)$ 。线圈的电压增益为:

$$NI=\pi l_w(2r_r+2l_g+l_w)J_{cu}k_fk_c \quad (2)$$

式中: k_c 是电机的线圈转动惯量,转矩输出为 $10 \text{ N}\cdot\text{m}$,那么线圈与总线圈之比为 $k_c=2/3$ 。

忽略目标电流特征和定/转子铁芯磁阻的扰动性约束因素,得到永磁同步电机的磁通密度为:

$$B_g = \frac{F_m}{A_g \Re} \quad (3)$$

式中: F_m 为永磁体形成的非正弦磁密; A_g 为绕组气隙动势; \Re 为电流输出放大增益。根据上述参量分析,得到无槽无刷直流电机的控制参量模型为:

$$F_m = \frac{B_g l_m}{\mu_0 \mu_{r1}} \quad (4)$$

$$A_g = l_s \frac{\beta \pi}{p} (r_r + l_g) \quad (5)$$

$$\Re = \frac{1}{\mu_0 l_s \beta \pi / p} \left(\frac{1}{\mu_{r1}} \int_{r_r - l_m}^{r_r} \frac{dr}{r} + \int_{r_r}^{r_r + l_g} \frac{dr}{r} + \frac{1}{\mu_{r2}} \int_{r_r + l_g}^{r_r + l_g + l_w} \frac{dr}{r} \right) \quad (6)$$

式中: 真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; μ_{r1} 和 μ_{r2} 为每极

下气隙的磁阻及磁导率。

2 电机控制目标函数的构建

在进行控制约束参量模型构建的基础上,采用模糊 PID 控制模型进行控制器设计,PID 控制器是一个三层神经网络结构^[5-6],如图 2 所示。分别为电机控制参量的输入层、电机控制整流处理的中间层和电机控制功率输出的输出层。

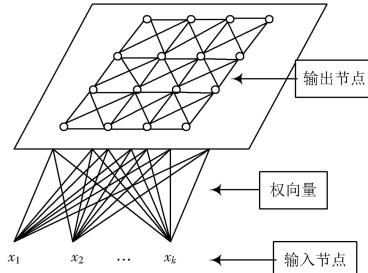


图2 PID 控制结构

PID 神经网络控制器的输入节点的控制训练向量模式为:

$$\mathbf{x}(t)=(x_0(t), x_1(t), \dots, x_{k-1}(t))^T \quad (7)$$

基于模糊神经网络控制设计方法,得到永磁同步电机 PID 控制中隐含层 $\sigma_j(\varphi_a, \dot{\varphi}_a)$ 表示前向神经元电机的电磁耦合模值,采用适当的训练方法进行加权训练,对电机控制的输出向量 $\mathbf{x}(t)$ 与连接权向量 $\boldsymbol{\omega}_j$ 进行自适应跟踪训练,得到加权训练后的隐含层输出为:

$$d_j = \sum_{i=0}^{k-1} (x_i(t) - \omega_{ij}(t))^2, \quad j=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (8)$$

式中 $\boldsymbol{\omega}_j = (\omega_{0j}, \omega_{1j}, \dots, \omega_{k-1,j})^T$ 表示训练权重。本文采用粒子群算法进行控制器训练,表示 PID 控制器神经元 j 对最大风能的利用权重:

$$w_{j^*}(t+1) = w_{j^*}(t) + \alpha(c_{j^*})[x(t) - w_{j^*}(t)] \quad (9)$$

式中: $j \in (j^*, \text{NE}_{j^*}(t))$, 采用 PID 神经网络控制,调节永磁同步电机谐振角 ω_0 ,输出功率为:

$$P_o = \frac{\omega_0^4 M_{ps}^2 M_{sr}^2 M_{rl}^2 L_l^2 I_p^2 R_o}{(\omega_0^2 M_{sr}^2 L_l^2 + R_s R_r L_l^2 + R_s R_o M_{rl}^2)^2} \quad (10)$$

得到永磁同步电机转速调节 PID 控制的目标函数为:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_0(s)} \quad (11)$$

式中: $Y(s)$ 为永磁同步电机前向 PID 神经元输出控制参数; $R(s)$ 为输入 PID 控制器积分神经元的控制参数; $e^{-\tau s}$ 为模糊修正补偿参数。

3 基于改进粒子群算法的PID控制优化

3.1 永磁同步电机转矩计算

在选择电压、转矩、速度和电磁损耗等参数进行控制约束参量构建的基础上,进行控制目标函数设计,然后采用改进的粒子群算法进行PID控制的加权训练,实现控制目标函数的最优化求解^[7],结合电机的漏感和工作频率,得到永磁无刷直流电机的电磁耦合器的定/转子铁芯磁阻的关系式为:

$$\omega L_{lp} - \frac{1}{\omega C_p} = 0 \Rightarrow C_p = \frac{1}{\omega^2 L_{lp}} \quad (12)$$

$$\omega L_{ls} - \frac{1}{\omega C_s} = 0 \Rightarrow C_s = \frac{1}{\omega^2 L_{ls}} \quad (13)$$

采用粒子群算法进行神经网络PID训练,考虑全局优化问题 $\min\{f(x)\}$,得到蚂蚁进行PID隐含层加权训练的更新公式如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}^t) \\ x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \end{cases} \quad (14)$$

在迭代搜索过程中,蚂蚁个体根据个体最优和全局最优来更新自己的速度和位置^[8],考虑到漏磁系数 k_1 和粒子优化下的跨距系数 k_β ,得到永磁同步电机转矩:

$$T_{em} = \frac{\pi k_f k_e k_1 B_r l_m l_s l_w (2l_r + 2l_g + l_w) J_{cu}}{\ln\left(\frac{r_r + l_g + l_w}{r_r - l_m}\right)} \quad (15)$$

$$k_1 = 1 - \frac{1}{0.9 \left[r_r / (\beta p(l_g + l_w)) \right]^2 + 1} \quad (16)$$

$$k_\beta = \frac{\alpha(\beta, k_e)}{k_e} \quad (17)$$

其中 α 为粒子个体之间的瞬间跨距,近似为:

$$\alpha = \min(\beta, k_e) [k_s + (1 - k_s) \tanh(\delta |\beta - k_e|)] \quad (18)$$

式中: $k_s < 1$; δ 为经验值。

3.2 PID控制律设计

根据计算的永磁同步电机转矩,在电磁损耗长度为 l 的磁场 B 中以粒子速度 v 移动,使用一组蚂蚁个体集合在 D 维空间中搜索最优值,得到永磁同步电机PID控制的变异适应度值为:

$$Mdist F_g = \sum_{i=1}^N dist(i, F_g) / N \quad (19)$$

在粒子进化优化控制下,蚂蚁个体自身找到的最优解则为电机的最优电磁损耗抑制点,此时产生的电压 $E = vl \times B$ 。令 $v = r\omega_r$, $r = r_r + l_g$, $B = k_\beta k_1 B_g$, $l = l_s k_f k_e A_w / A_c$, 则电机能量损耗的均方误差为:

$$E = \frac{(r_r + l_g) k_\beta k_1 B_g \omega_r l_s k_f k_e A_w}{A_c} \quad (20)$$

式中: ω_r 为电磁耦合器的偶极子旋转角速度; A_c 为磁场强度随电磁耦合器分布的衰减系数。

电机输出的电流可以表示为: $I = A_c J_{cu}$, PID控制器的反射阻抗为: $V = E + RI$, 其中 R 为电机的励磁绕组,通过粒子优化控制,得到永磁同步电机的电压增益输出为:

$$V = \frac{l_s k_f k_e A_w}{A_c} \left[\rho k_{et} J_{cu} + \frac{k_\beta k_1 B_r \omega_r}{\ln\left(\frac{r_r + l_g + l_w}{r_r - l_m}\right)} \right] \quad (21)$$

式中: ρ 为绕组的电感和电阻的传输比特率; $k_{et} = 1 + \pi\gamma(r_r + l_g + l_w)/(pl_s)$ 。可以计算出永磁同步电机的附加涡流损耗状态控制方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{RM} \\ \dot{V}_{RM} \\ \dot{\delta}_p \\ \dot{\omega}_p \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & A_{43} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{RM} \\ V_{RM} \\ \theta_p \\ \omega_p \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_2 & B_2 \\ 0 & 0 \\ B_4 & B_4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_L \\ C_R \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中:

$$A_{23} = \frac{-M_p^2 L^2 g}{M_p J_{p\theta} + 2(J_{p\theta} + M_p L^2)(M_R + J_R/R^2)} \quad (23)$$

$$A_{43} = \frac{M_p^2 g L + 2M_p g L (M_R + J_R/R^2)}{M_p J_{p\theta} + 2(J_{p\theta} + M_p L^2)(M_R + J_R/R^2)} \quad (24)$$

$$B_2 = \frac{(J_{p\theta} + M_p L^2)/R + M_p L}{M_p J_{p\theta} + 2(J_{p\theta} + M_p L^2)(M_R + J_R/R^2)} \quad (25)$$

$$B_4 = \frac{-\frac{R+L}{R} M_p - 2(M_R + J_R/R^2)}{M_p J_{p\theta} + 2(J_{p\theta} + M_p L^2)(M_R + J_R/R^2)} \quad (26)$$

$$B_6 = \frac{D/2R}{J_{p\theta} + \frac{D^2}{2R}(M_R R + J_R/R)} \quad (27)$$

在粒子优化下进行PID控制的自适应加权,通过Steinmetz常数可以建立永磁同步电机转矩 C 和控制电压 U 的关系为:

$$C = K_m (U - K_e \dot{\theta}_p) \quad (28)$$

式中: K_m , K_e 为最大电磁转矩、转速。计算各蚂蚁个体权值为:

$$\tilde{w}_k^i = \tilde{w}_{k-1}^i \frac{p(z_k/\tilde{x}_k^i)p(\tilde{x}_k^i/x_{k-1}^i)}{q(\tilde{x}_k^i/x_{k-1}^i)} \quad (29)$$

将式(29)代入永磁同步电机控制目标函数方程,得到优化的PID控制律为:

$$B_{sy} = \frac{\pi k_1 \beta B_r l_m}{2p l_y \ln\left(\frac{r_r + l_g + l_w}{r_r - l_m}\right)} \quad (30)$$

加上计算得到的转矩和速度等参量信息 k'_h, n, k'_e , 以

及定子饱和磁密 ρ_y , 可以得到电机控制的优化解为:

$$P_h = k'_h \rho_y V_{sy} B_{sy}^n f \quad (31)$$

$$P_e = k'_e \rho_y V_{sy} B_{sy}^n f^2 \quad (32)$$

由此实现了永磁同步电机 PID 控制律优化设计, 提高了电机的输出功率增益。

4 电机控制测试实验分析

在进行永磁同步电机的 PID 控制仿真实验中, 给出永磁同步电机的磁密在 1.3~2.5 之间取值, 转矩输出为 12 N·m, 电磁总损耗为 45.73 W, p 取值为 8, $l_m(m)=0.002$, $J_{cu}(Am^{-2})=3 \times 10^6$, 转子的转动惯量为 0.235 kg·m², 其他电磁耦合参数取值见表 1。

表 1 永磁同步电机电磁耦合参数设计

约束变量	参数值
N_p, N_s	3
f / kHz	31
$C_p, C_s / \mu F$	0.223 54
V_i / V	42
V_o / V	60
$R_p, R_s / \Omega$	11 267

根据上述仿真设定进行永磁同步电机的输出增益控制, 为了对比性能, 采用本文方法和传统的控制方法对比电机的功率输出振荡曲线, 得到结果如图 3 所示。

分析上述仿真结果得知, 采用本文方法进行电机控制, 功率输出的振荡幅度较小, 确保了电机的稳定输出, 降低了传输损耗和衰减损失, 保障了对电机的稳定性控制。

5 结语

本文提出一种基于改进粒子群算法的永磁同步电机 PID 控制方法, 构建永磁同步电机 PID 模糊控制目标函数, 选择电压、转矩、速度和电磁损耗等参数进行控制约束参量分析, 采用改进的粒子群算法进行 PID 控制的加权训练, 实现控制目标函数最优化求解, 进行永磁同步电机 PID 控制律优化。研究表明, 该控制方法进行永磁同步电机控制的调制性能较好, 具有较好的输出增益, 振荡较小, 控制可靠性较高。

作者简介: 谢治军(1986—), 男, 重庆人, 硕士, 讲师。主要研究方向为控制工程。

郑丽娟(1986—), 女, 陕西人, 硕士, 讲师。主要研究方向为电子技术及微型计算机应用。

屈召贵(1980—), 男, 成都人, 硕士, 讲师。主要研究方向为嵌入式计算机系统。

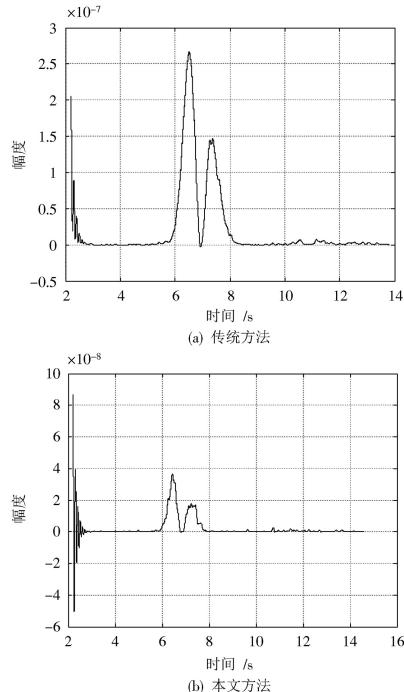


图 3 永磁同步电机控制输出功率振荡曲线

参考文献

- [1] 郭长欢, 黄建. 基于 RT-LAB 的无刷直流电动机伺服系统半实物仿真[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(10): 22-27.
- [2] MARKOVIC M, PERRIARD Y. Simplified design methodology for a slotless brushless DC motor [J]. IEEE transactions on magnetics, 2006, 42(12): 3842-3846.
- [3] JANG S M, CHO H W, CHOI S K. Design and analysis of a high-speed brushless DC motor for centrifugal compressor [J]. IEEE transactions on magnetics, 2007, 43(6): 2573-2575.
- [4] 程时兵, 王炜. 基于 DSP 的无刷直流电机位置伺服系统设计[J]. 电子设计工程, 2016(5): 110-112.
- [5] 刘恒, 李生刚, 孙业国, 等. 带有未知非对称控制增益的不确定分数阶混沌系统自适应模糊同步控制[J]. 物理学报, 2015, 64(7): 120-128.
- [6] HWANG C C, CHANG J J. Design and analysis of a high power density and high efficiency permanent magnet DC motor [J]. Journal of magnetism and magnetic materials, 2000, 209(1/3): 234-236.
- [7] 连军强, 谢顺依, 王鼎. 基于有限元的永磁同步电机转矩优化设计[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(12): 7-12.
- [8] ZHU Z Q, HOWE D, BOLTE E, et al. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors, part I: open-circuit field [J]. IEEE transactions on magnetics, 1993, 29(1): 124-135.