

文章编号:1671-6833(2013)06-0020-04

自适应差分进化算法在 PMSM 电机控制器中的应用

王 杰, 胡玉纯, 毕浩洋

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 提出一种自适应差分进化算法, 通过进化参数的自适应调整, 实现了算法的快速收敛性和鲁棒性. 采用本算法设计了永磁同步电机的 PID 控制器, 其中 PID 参数由本文的自适应差分进化算法进行优化. 实验结果表明, 经过自适应差分进化算法优化的永磁同步电机转速控制系统的动态特性和静态特性都有明显的改善.

关键词: 自适应差分进化; 永磁同步电机; PID

中图分类号: TM301

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.06.005

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有体积小、效率高、功率因数高、起动转矩大、温升低等特点, 能够实现装置的转速和位置的精确控制, 广泛应用于机械加工、电力拖动等装置^[1].

由于 PMSM 电机的非线性、多耦合等特性以及工作环境的变化, 常规的矢量控制方式不能够保证转速调节的快速性和准确性. 为了改善 PMSM 转速控制系统的动态性能, 许多智能控制算法相继被引入到 PMSM 电机转速控制领域^[2]. 这些算法在一定程度上改善了系统的性能, 但各自都存在着一定的局限性, 神经网络隐含层数以及各层节点数没有系统的确定方法, 遗传算法收敛速度慢且操作复杂^[3]. 差分进化 (Differential Evolution, DE) 算法收敛速度快、进化参数少、结构简单且泛化能力强, 在各个领域获得广泛应用^[4]. 但标准差分进化中难以确定合适的变异率, 变异率过大会导致搜索速度慢, 不易收敛到最优解, 变异率过小则容易出现“早熟”现象^[5]. 因此笔者将自适应差分进化算法 (Self-Adaptive Differential Evolution, SADE) 应用到 PMSM 电机控制当中, 改善了 PMSM 转速调节的动态性能和静态性能, 并通过 Matlab/simulink 仿真验证了方案的可行性.

1 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机结构复杂并且高度非线性. 采用 PMSM 的 $d-q$ 轴数学模型^[6], 不仅能够同时分析 PMSM 的稳态特性和暂态特性, 而且能够简化分析过程^[7]. 通过如下假设: 忽略空间谐波, 磁路不饱和, 不计铁心损耗, 忽略涡流和磁滞损耗, 可以得到 PMSM 的 $d-q$ 轴数学模型. 此时, 我们可得 PMSM 的 $d-q$ 轴磁链方程为

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_r; \\ \Psi_q = L_q i_q. \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ψ_r 为转子在定子上的磁链耦合; L_d, L_q 分别为 PMSM 的 d 轴和 q 轴电感; i_d 为定子电流矢量的 d 轴分量; i_q 为定子电流矢量的 q 轴分量.

在 PMSM 的 $d-q$ 轴坐标系下, 定子电压方程可以表示为

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L_q p i_d - \omega L_q i_q; \\ u_q = R i_q + L_q p i_q + \omega L_d i_d + \omega \Psi_r. \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d 为定子电压矢量 u_s 的 d 轴分量; u_q 为定子电压矢量 u_s 的 q 轴分量; ω 为转子的角频率; p 为微分算子.

PMSM 电机的电磁转矩方程为

$$\begin{aligned} T_e &= n_p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \\ &= n_p [\Psi_r i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]. \end{aligned} \quad (3)$$

式中: n_p 为电机极对数; $(L_d - L_q) i_d i_q$ 为磁阻转矩.

收稿日期: 2013-06-02; 修订日期: 2013-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60905039)

作者简介: 王杰 (1959-), 男, 河南周口人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事智能控制研究, E-mail: wj@zzu.edu.cn.

当PMSM运行在恒转矩区域时,通过将定子电流矢量全部控制到交轴上($i_q = i_s$),可以使定子电流全部用于产生电磁转矩.此时,可得PMSM电机的磁链方程:

$$\begin{cases} \Psi_d = \Psi_r; \\ \Psi_q = L_d i_s. \end{cases} \quad (4)$$

电压方程:

$$\begin{cases} u_d = -\omega L_q i_s = -\omega \Psi_q; \\ u_q = R i_s + L_q p i_s + \omega \Psi_r. \end{cases} \quad (5)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = n_p \Psi_r i_s. \quad (6)$$

由于永磁同步电机的转子为永磁体,即 Ψ_r 为固定值,从上述公式可以看出:电磁转矩为定子电流的 $n_p \Psi_r$ 倍.因此,调节定子电流就能够准确地输出期望的电磁转矩,从而获得优良的调速特性.

2 自适应差分进化算法

标准差分进化是一种类似于遗传算法但性能更优越的算法,它采用实数编码,通过贪婪准则不断选择群内个体^[8];它在变异步骤上采用差分策略,算法的优化速度和全局优化能力有了较大提高.但标准差分进化算法的进化参数为固定值,不能随着优化过程的发展而自适应调整.为提高算法的快速性和鲁棒性,笔者提出了一种进化参数能够动态调整的自适应差分进化算法.

2.1 初始化

自适应差分进化算法开始前需要将种群初始化为可行域内的随机量: $\mathbf{X}^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_{N_p}^0]$, N_p 为种群规模.种群中每个个体表示为: $\mathbf{x}_{i,c}$ ($i = 1, 2, \dots, N_p$),其中: i 为个体在群体中的位置; G 为进化的代数.在寻找最优解之前,要对种群进行初始化.即从参数变量的界限 $\mathbf{x}_j^{(L)} < \mathbf{x}_j < \mathbf{x}_j^{(U)}$ 中随机获取一个值:

$$\mathbf{x}_{i,0} = \text{rand}[0,1] \cdot (\mathbf{x}_j^{(U)} - \mathbf{x}_j^{(L)}) + \mathbf{x}_j^{(L)}; \quad i = 1, 2, \dots, N_p; j = 1, 2, \dots, D. \quad (7)$$

2.2 变异

对 t 时刻生成的个体 \mathbf{x}_i^t 进行变异操作,产生相应的变异个体 \mathbf{v}_i^{t+1} ,即

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \mathbf{x}_{r_1}^t + K(\mathbf{x}_{r_2}^t - \mathbf{x}_{r_3}^t). \quad (8)$$

式中: $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, N_p\}$ 两两之间不相等并且不等于 i ; $\mathbf{x}_{r_1}^t$ 为第 t 代基向量; $(\mathbf{x}_{r_2}^t - \mathbf{x}_{r_3}^t)$ 为第 t 代的差分向量; $K \in [0, 1]$ 为变异因子.

2.3 交叉

为增加种群的多样性,通过对 \mathbf{x}_i^t 和变异得到的新个体 \mathbf{v}_i^{t+1} 进行交叉运算,得到实验个体 \mathbf{u}_i^{t+1} ,即

$$\mathbf{u}_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{v}_{i,j}^{t+1}, \text{rand}(j) \leq CR \text{ or } j = \text{rnbr}(i); \\ \mathbf{x}_{i,j}^t, \text{其他}. \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\text{rand}(j)$ 为取值范围是 $[0, 1]$ 的均匀随机数; CR 为取值在 $[0, 1]$ 范围内的交叉因子; $\text{rnbr}(i)$ 为一个随机量,且 $\text{rnbr}(i) \in \{1, 2, \dots, D\}$.

2.4 选择

自适应差分进化采用贪婪算法对实验个体 \mathbf{u}_i^{t+1} 进行选择操作,以决定 \mathbf{u}_i^{t+1} 是否能够成为下一代种群中的一员.如果要得到目标函数的最小值,则需要比较 \mathbf{u}_i^{t+1} 和 \mathbf{x}_i^t 的目标函数值,其中目标函数值小的个体会被选择成为下一代种群的成员,即

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^{t+1}, f(\mathbf{u}_i^{t+1}) < f(\mathbf{x}_i^t); \\ \mathbf{x}_i^t, f(\mathbf{u}_i^{t+1}) \geq f(\mathbf{x}_i^t). \end{cases} \quad (10)$$

2.5 进化参数的自适应调整

在标准差分进化算法进化寻优过程当中,种群规模 N_p 、变异因子 K 以及交叉因子 CR 共3个参数都为固定值,参数值选择的合适与否对计算的过程和结果有很大影响^[9].其中,变异因子 K 的最优值难以确定,如果 K 的值选取过大,搜索步长太大,容易形成振荡,不易收敛到全局最优解;如果 K 的值选取过小,搜索步长太小,搜索过程缓慢并且易于收敛到局部最优解^[10].仿真实验表明,采用能根据搜索阶段作自适应调整的变异因子 K ,即在开始阶段选取较大的 K 值,在搜索后期选取较小的 K 值,既能保证算法的快速性,又能避免陷入局部最优解.自适应的变异因子如下:

$$K = a(e^b - 1); \quad (11)$$

$$b = \frac{G_{\max}}{G_{\max} + G}. \quad (12)$$

式中: G_{\max} 为最大进化次数; G 为当前进化次数;参数 a 取值范围为 $[0.2, 0.6]$.

3 自适应差分进化PID控制器

3.1 控制系统结构

SADE-PID控制系统的结构如图1所示.整个系统采用闭环控制的方式连接,将采样得到的参数 $u(k)$ 、 $e(k)$ 、 $n(k)$ 作为自适应差分进化算法的输入,输出为经过优化的PID参数.PID控制器输出SVPWM的参考电压,通过SVPWM调制方法

产生驱动电机运转的电压,最终实现 PMSM 电机转速的高效控制.

3.2 适应度函数选取

准确的适应度函数是自适应差分进化算法应用于控制系统的基础,它是进化过程中个体优劣程度的评价标准,保证了种群不断向最优的方向进化,最终实现系统动态特性和静态特性的最优化.为综合全面地评价控制器的动态性能指标,应建立包含多个系统参数的目标函数.因此,可将系统的各个参数加权后列入目标函数表达式当中.最终选取的目标函数为

$$J = \int_0^{\infty} (\omega_1 t |e(t)| + \omega_2 u^2(t)) dt + \omega_3 t_u. \quad (13)$$

式中: $e(t)$ 为转速误差; t_u 为上升时间; $u(t)$ 为控制器输出; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为权值.

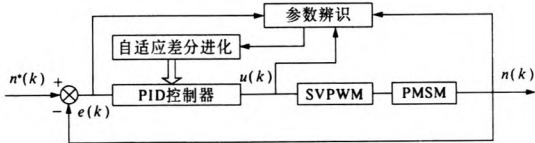


图1 SADE-PID 控制系统结构图
Fig.1 SADE-PID control system diagram

良好的控制效果应当是超调量尽量小且调节时间尽量短,即适应度函数与目标函数 J 成反比,故在实际应用中选择适应度函数为

$$F = \frac{1}{J + 10^{-10}}. \quad (14)$$

式中: 10^{-10} 用于防止分母为零.

3.3 SADE - PID 参数优化步骤

(1)参数选择.选择自适应差分进化算法需要确定的各个参数,种群规模 N_p 、变异因子 K 、交叉因子 CR 、最大进化次数 G_{max} 、参数 a 和算法终止条件.

(2)根据种群规模 N_p 和最大进化次数 G_{max} ,随机初始化种群.

(3)评估随机初始化的种群,得到种群内部各个个体的适应度函数值.

(4)初次判断是否符合终止条件.若符合,则算法结束,将此时的最优解输出;若不符合,进行第(5)步.

(5)按照相应的变异因子和交叉因子,执行变异和交叉操作,产生试验向量.

(6)比较目标向量 $x_{i,c}$ 和试验向量,按照贪婪准则进行选择,产生新种群.

(7)重新评价新种群.若达到最大进化次数 G_{max} 或适应度函数值小于阈值 $\lambda = 10^{-6}$,则终止进

化;否则,进化代数加 1 并转到第(4)步继续运行.

4 仿真研究

利用 Matlab/simulink 构建系统模型,验证控制算法的性能.根据需要选取 PMSM 电机,其参数如表 1 所示.

表 1 PMSM 电机参数
Tab.1 PMSM motor parameters

参数	数值
d 轴电感 L_d/mH	6.50
q 轴电感 L_q/mH	6.50
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	6.4×10^{-4}
定子电阻 R/Ω	2.75
转子磁链 Ψ_r/Wb	0.15
额定转速 $n^*/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 500

根据永磁同步电机的结构特性,在 Matlab/simulink 中建立系统的控制模型,设置自适应差分进化的相关参数,然后进行仿真分析.设定种群规模为 $N_p = 30$,种群中每个成员含有 3 个参数变量: K_p 、 K_i 和 K_d .取变异因子 $K = 0.08$,交叉因子 $CR = 0.90$,参数 $a = 0.35$.借鉴 Ziegler-Nichols 整定方法得到的结果,将种群中各成员参数变量的边界条件设定为: $K_p \in [0 \ 20]$ 、 $K_i \in [0 \ 1]$ 和 $K_d \in [0 \ 1]$;适应度函数中的 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 取随机值.

设置适当的参数后,进行仿真分析,得到 PMSM 在不同情况下的响应曲线.经过自适应 DE 算法优化 PID 参数的 PMSM 转速响应曲线与标准 DE 优化 PID 参数转速响应曲线的对比如图 2 所示;两种控制方式下对转矩扰动的响应曲线对比如图 3 所示.

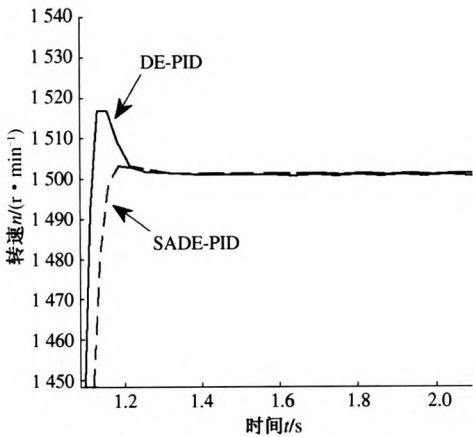


图 2 阶跃输入的转速响应
Fig.2 Speed response to a step input

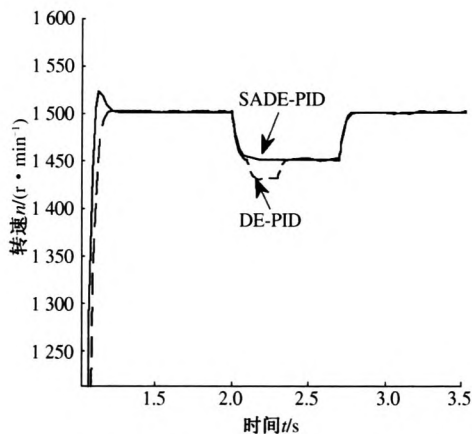


图3 转矩扰动时的转速响应

Fig. 3 The torque disturbances speed response

通过对比分析图2和图3可知:PMSM转速控制系统的PID参数经过自适应差分进化算法优化以后,不仅超调量大幅减小,响应时间明显缩短,控制精度提高,而且能够实现转速的平稳控制,抗干扰能力也大大增强.系统的动态特性和静态特性与标准差分进化算法PID整定方法相比,都有显著的改善,体现了利用自适应差分进化算法优化PMSM转速控制系统参数的可行性和有效性.

5 结束语

提出了一种利用自适应差分进化算法优化PID参数的永磁同步电机转速控制系统,并且详细描述了算法的实现步骤.仿真实验表明,由于自适应差分进化算法的快速收敛性和强大的全局寻优能力,PMSM电机转速控制系统的动态特性和静态特性都得到了显著改善.这体现了将自适应

差分进化算法引入到PMSM转速控制领域的实际意义.

参考文献:

- [1] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京:中国电力出版社, 2011:5-8.
- [2] 杨华芬,杨有,尚晋. 一种改进的进化神经网络优化设计方法[J]. 郑州大学学报:工学版, 2010, 31(5): 116-120.
- [3] DAVID B F. Evolutionary computation: Toward a new philosophy of machine intelligence[M]. New York: IEEE Press, 2000:185-200.
- [4] 雷小宇,楼朴根. 基于差分进化的多机器人路径规划[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1):10-13.
- [5] 王艳宜. 改进差分进化算法及其应用[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(5):13-16.
- [6] 张永春. 高性能PMSM矢量控制系统设计与实现[J]. 制造业自动化, 2012, 34(11):122-125.
- [7] ZHANG Ying-cai, ZHU Jia-gang. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor with reduced torque ripple and commutation frequency[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1):235-248.
- [8] STORN R, PRICE K. Differential evolution-A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[R]. Berkeley: University of California, 2006.
- [9] DAS S, SUGANTHAN P N. Differential evolution: A survey of the state-of-art[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2011, 15(1):4-31.
- [10] 熊伟丽,许文强,徐保国. 基于差分进化算法的Wiener模型辨识[J]. 控制工程, 2012, 19(5): 900-904.

Application of Self-adaptive Differential Evolution Algorithm in PMSM Controller

WANG Jie, HU Yu-chun, BI Hao-yang

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper presents a self-adaptive differential evolution algorithm, the fast convergence and robustness of this algorithm can be achieved by the self-adaptive adjustment of evolutionary parameters. This algorithm is used to design a PID controller for permanent magnet synchronous motor, whose PID parameters are optimized by the self-adaptive differential evolution algorithm. The experimental results show that dynamic and static characteristics of the PMSM speed control system, which is optimized by self-adaptive differential evolution algorithm, have been improved significantly.

Key words: self-adaptive differential evolution; PMSM; PID