

车用无刷直流电机转速控制系统设计及仿真

刘仲恕

(福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要:以新型4相24极车用无刷直流电动机为研究对象,采用改进遗传算法对其转速控制系统进行了优化设计。该遗传算法在相当程度上解决了标准遗传算法搜索效率低和早熟收敛的问题。仿真结果表明:相对于传统的3相6拍无刷直流电动机,采用改进遗传算法转速控制系统的4相24极无刷直流电动机具有转矩脉动较低、输出相应快速、稳态性能好以及抗干扰能力强等优点。

关键词:无刷电机;改进遗传算法;系统设计

中图分类号:TM35

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2014)03-0211-05

Design and simulation of vehicle brushless DC motor speed-control system

Liu Zhongshu

(College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: An optimum design of 4-phase 24-pole vehicle brushless DC motor speed control system was performed with improved genetic algorithm(IGA), which is a solution to low search efficiency and premature convergence. Simulation results show that compared to the traditional 3-phase 6-beat brushless DC motor, the speed control system of 4-phase 24-pole brushless DC motor with the improved genetic algorithm(IGA) has the advantages of low torque ripple, fast output, good steady-state performance and strong anti-interference ability.

Keywords: brushless motor; improved genetic algorithm(IGA); system design

无刷直流电动机与有刷直流电动机的不同之处在于采用电子换向装置替代机械换向装置,保留了有刷直流电动机宽广和平滑的优良调速性能,克服了有刷直流电动机机械换向带来的一系列缺点,是最理想的调速电动机,在电动汽车上有着广泛的应用前景^[1]。其主要特点有:高转矩,过载能力较强,可满足电动汽车的负载突变的需要;调速范围宽,反馈制动效果好,在汽车下坡或刹车时可完全进入发电机状态,给电池充电;效率高,尤其在平坦路面轻载车况下,仍能保持较高的效率;同时具有体积小、重量轻,控制系统简单等特点。

本文研究的车用无刷直流电机,其转子结构为永磁式4相24极,即24块永久磁钢固定在转子铁芯外圆表面,定子绕组为对称的4相交流绕组。由于4相定子绕组电流换相时各相绕组存在的电感,电流不能突变,这将使定子绕组中的输入电流是梯形波而非理想的方波,从而产生纹波转矩,造成转矩脉动。这种电机虽然比传统3相6拍无刷直流电动机的转矩脉动减小很多,但低速时转矩脉动仍然十分严重。因此,针对此种电机,研究采用改进遗传算法设计其转速控制系统,可进一步有效改善转矩脉动现象,实现电动机转速和转矩的快速响应特性。

收稿日期:2014-04-30

基金项目:福建省科技厅自然科学基金资助项目(2009J01227)

作者简介:刘仲恕(1969-),女(汉),福建南平人,副教授,硕士,研究方向:新型电机及控制技术。

1 4相永磁无刷直流电动机工作原理

4相24极无刷直流电动机定子共有24槽,转子外圆表面固定24块永久磁钢,根据电机数学模型,4相解耦后的永磁无刷直流电机可以看成4台并联的直流电动机,电机的每一相都可以与普通直流电机一样独立控制^[2]。

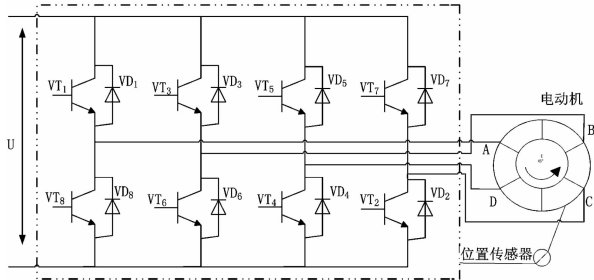


图1 4相24极无刷直流电动机原理

Fig.1 Principle of 4-phase 24-pole brushless DC motor

给定直流电压 U_D 经 150° 导通型单相逆变器,形成交流方波,通过电动机的定子绕组后形成回路,如图1所示^[3]。测量转子磁钢与定子绕组的相对位置,使电动机的定子绕组无论任何时候都有3相绕组通电,1相绕组断电,即每相通电 150° 后,断电 30° ,再反向导通 150° ,然后再断电 30° ,如此循环。每相工作电压之间的相位差为 30° 。转子每转一周,定子绕组每相电流换流8次。

2 4相永磁无刷直流电动机数学模型的建立

由于永磁无刷直流电动机磁路饱和和非线性等因素影响,致使其电磁关系复杂,难以建立精确的数学模型。为简化分析,建立达到工程上要求的数学模型,假设以下条件成立:

- (1) 定子绕组为4相Y接法,且4相绕组对称,反电势波形为梯形波,幅值一致;
- (2) 转子磁钢的性能一致,导电率为零;
- (3) 忽略涡铁损耗,不考虑磁路饱和,不计定子斜槽的影响和电枢反应影响^[4];
- (4) 定子绕组的阻抗相同,且不受电流变化的影响。

2.1 永磁无刷直流电动机4相定子电压平衡方程

当4相绕组为Y形连接,且没有中线,则有

如下约束条件

$$i_a + i_b + i_c + i_d = 0 \quad (1)$$

由此得到电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ e_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, u_a, u_b, u_c, u_d 为定子相绕组电压; i_a, i_b, i_c, i_d 为定子相电阻电流; e_a, e_b, e_c, e_d 为定子相绕组电动势; r 为每相绕组的电阻; L 为每相绕组的自感; M 为每两相绕组间的互感; P 为微分算子。

2.2 电磁转矩方程

无刷直流电动机的电磁转矩是转子磁钢产生的磁场和电动机定子绕组输入电流相互作用产生的,其电磁转矩大小正比于定子电流幅值与气隙主磁通。

$$T_e = \frac{1}{\Omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d) \quad (3)$$

为了产生恒定的电磁转矩,定子方波电流的持续时间在每个周期内与转子梯形波的反电动势的平顶部分同时保持为 120° 电角度,这样两者才能同步。此时,电动机所产生的电磁转矩为^[5]:

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{2Pe_s i_s}{\omega} \quad (4)$$

上式中, i_s 为定子每相电流的幅值; e_s 为定子每相电动势的幅值。

2.3 转子运动方程

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (5)$$

式中, T_e 为电动机的额定电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为电动机轴上总的转动惯量。^[6]

3 基于改进遗传算法的永磁无刷直流电动机转速控制系统的优化设计

3.1 转速控制系统的构成及工作原理

传统的永磁无刷直流电动机转速控制系统是

由转速和电流这两个环节构成,如图2所示。转速基值与速度反馈量形成偏差,经过速度调节器调节后产生电流参考量,与电流基值得偏差经过电流调节器调节后形成 PWM 占空比的控制量去控制四相逆变器的工作,从而实现电动机的转速控制^[7]。对无刷直流电动机的转速控制系统进行优化设计的关键在于对转速调节器的积分与比例参数(PI 参数)进行优化设计,使转速控制系统的性能指标达到最优。标准遗传算法是一种只使用基本遗传算子的群体性操作算法^[8]。该算法虽然操作简单,但存在重要参数选择困难和收敛速度较慢的问题。因此,本文采用改进遗传算法对速度调节器的 PI 参数进行优化设计^[9]。

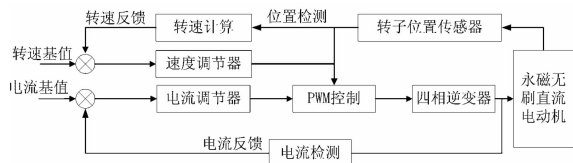


图2 无刷直流电动机转速控制系统框图

Fig.2 Block diagram of brushless DC motor rotation speed control system

3.2 采用改进遗传算法的转速控制系统

采用改进遗传算法进行优化设计的转速控制系统如图3所示。系统采用经典的双闭环调速系统,内环电流环采用基本的 PI 控制算法设计,外环转速环则采用改进的遗传算法设计^[10]。

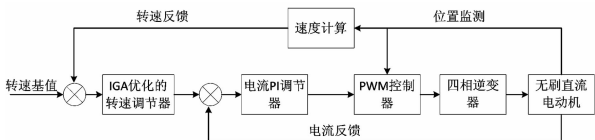


图3 改进遗传算法的转速控制系统框图

Fig.3 Block diagram of rotation speed control system with IGA

4 改进遗传算法

4.1 算法设计

针对标准遗传算法的缺陷,同时使遗传算法应用于无刷直流电机转速控制系统时具有最优性能,本文将单纯形法和自适应遗传算法相结合。该算法使用局部搜索能力很强的单纯形法可以解决标准遗传算法局部搜索能力较弱的问题;使用自适应算法可以使遗传算法在搜索过程中实现自

适应动态交叉和变异;将以上两种方法结合起来,可以使遗传算法的计算效率提高,从而加快了遗传算法的收敛速度。改进遗传算法执行过程如图4所示^[11]。

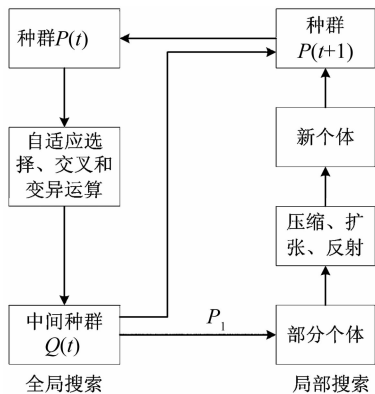


图4 改进遗传算法执行过程框图

Fig.4 Block diagram of IGA implementation process

4.2 算子设计

4.2.1 编码

为了克服二进制编码方法存在的缺点,从而提高算法的运行效率,本文对 K_p 、 T_i 两个待寻优的参数分别用十进制浮点数表示并将其级联起来的编码方法。 K_p 、 T_i 是按照常规工程设计法设计所的速度调节器参数值。

4.2.2 适应度函数

要使无刷直流电机速度调节过程的动态性能达到最优,使性能指标 J 最小。而遗传算法是寻找适应度最高的解,因而要将目标函数进行改造,将极小值问题转换成极大值问题。定义适应度函数为:

$$F = \frac{1}{J} \tag{6}$$

4.2.3 遗传算子(选择、交叉、变异)

为克服常规排序选择方法的缺点,采用在交叉前进行排序的选择方法,其选择算子的大小为:

$$P'_s(n) = P_s(n)(1 - \alpha) + \frac{f_i}{\sum_{i=1}^m f_i} \alpha \tag{7}$$

其中, $\alpha = \frac{f_{\max} - f_i}{f_{\max} - f_{\min}}$ 为选择适应值参数^[12]。

本文采用了自适应的交叉和变异的算法来进行遗传操作,使得交叉算子 P_c 和变异算子 P_m 能随遗传代数的增加而不断自动调整。其改进后的交叉算子 P_c 和变异算子 P_m 的计算表达式为:

$$P_c = \begin{cases} 0.9 - \frac{0.3(f - f_{\text{avg}})}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ 0.9, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_m = \begin{cases} k - \frac{0.099(f_{\text{max}} - f)}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ K, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: f_{max} 为种群中最大的适应度值; f_{avg} 为每代种群的平均适应度值; f 为要交叉的两个个体中较大的适应度值; k 为变异常数。

4.2.4 单纯形法的局部搜索优化设计

与标准遗传算法不同,改进遗传算法加入了局部搜索能力很强的单纯形法,如图 4 所示。根据局部搜索概率 P_l 在中间种群中选取部分个体,执行单纯形操作形成新个体代替部分个体,然后将中间种群中未被选取的个体保留下来与新个体一起构成下一代种群。

4.2.5 迭代终止条件

在实现遗传优化时,若发现解群体中大多数个体的适应度值位于某一值附近时,可认为遗传搜索已经收敛,可以终止算法迭代。

5 新型 4 相 24 极无刷直流电动机转速控制系统仿真

为验证改进遗传算法对提高永磁无刷直流电动机转速控制性能的作用,对无刷直流电动机的转速控制器进行了仿真。仿真系统建立在 Matlab 软件上,由 Simulink 库模块组成。永磁无刷直流电机感应电势 e_a, e_b, e_c, e_d 为互差 120° 电角度的梯形波,逆变器提供与感应电势严格同相的方波电流。由于各相绕组存在电感,阻碍了电流的瞬时变化,使得换相时电流不可能突变,所以尽管定子各相电流从理论上来说都是方波,但其实际波形只能是近似方波的梯形波,因而通过气隙传送到转子的电磁功率也是梯形波,电枢绕组中的电流从某一相切换到另一相时平均电磁转矩都会降低一些,同时将会产生脉动现象。若电动机采用传统的 3 相 6 拍导通方式,电动机工作时每隔 60° 左右换相一次,产生的转矩脉动严重干扰了电机的正常运行,这种转矩脉动对于车用无刷直流电动机来说更是会造成电动汽车在路面行驶时车况不佳^[12]。

本次仿真所用的新型 4 相 24 极解耦的永磁

无刷直流电动机,根据数学模型 4 相解耦后的永磁无刷直流电机可以看成 4 台并联的直流电动机。通过解耦设计,电机的每一相都可以独立控制。每相产生的电磁转矩大小相等,均有明显的脉动现象存在,但因为相互叠加的转矩脉动位置不同,所以合成转矩趋较为平滑。与传统的 3 相无刷电机相比,转矩的脉动性更小,转速更加平稳^[13]。仿真试验电机参数如下:额定直流电压 $U_N = 400 \text{ V}$;定子绕组电阻 $R = 0.323 \ \Omega$;电感 $L = 3.524 \text{ mH}$;额定转速 $n = 2000 \text{ r/min}$;气隙磁密 $B_m = 0.5106 \text{ T}$;转动惯量 $J = 0.2178 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, P_l 参数 $K_p^* = 97.68, T_i^* = 0.047$,基于标准遗传算法时的种群数 $M = 30$,交叉概率 $P_c = 0.6$,变异概率 $P_m = 0.01$,进化代数 $G_{\text{en}} = 100$,其转速响应曲线如图 6 所示。结果显示标准遗传算法所得到的超调量 $\sigma\% = 31.28\%$,调节时间 $t_s(\text{s}) = 0.563 \text{ s}$ 。

改进遗传算法的种群数 $M = 30$,选择适应值参数,交叉概率 $P_c = 0.6$,变异概率 $P_m = 0.01$,进化代数 $G_{\text{en}} = 100$ 。取 $w_1 = 0.999, w_2 = 0.01, w_3 = 2.0, w_4 = 100$,单纯形法的参数设置:搜索迭代的次数 $N = 20$,搜索概率 $P_l = 0.5$,反射系数 $\gamma = 1$,扩张系数 $\alpha = 2$,最后得到其转速响应曲线如图 6 所示。结果显示改进遗传算法超调量 $\sigma\% = 0$,调节时间 $t_s(\text{s}) = 0.197 \text{ s}$ 。

仿真结果如图 6 显示,改进遗传算法所得到

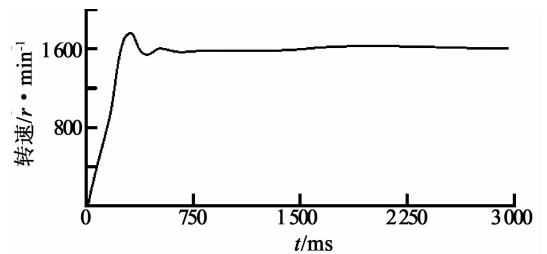


图 5 基于标准遗传算法时的转速响应仿真曲线
Fig. 5 Rotation speed response simulation curve with SGA

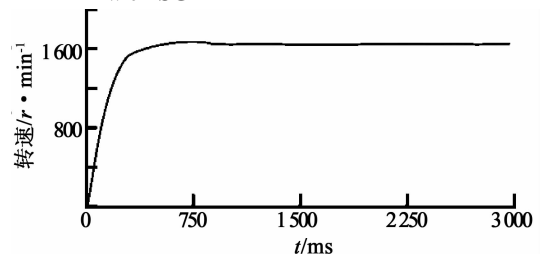


图 6 基于改进遗传算法时的转速响应仿真曲线
Fig. 6 Rotation speed response simulation curve with IGA

的超调量 $\sigma\%$ = 和调节时间 t_s (s) 这两个指标较之标准遗传算法得到大大的改进,说明转速控制系统有着较好的快速性和较大的稳定性。

6 结论

本文根据车用无刷直流电动机的特点,在建立基于坐标系统的数学模型之后,利用改进遗传算法对车用无刷直流电动机的转速控制系统进行优化设计,最后对一种新型的4相无刷直流电

机进行计算机仿真,仿真结果显示:相较于传统的3相无刷直流电机而言,新型4相无刷直流电机,具有空载起动快,转速上升时间短,电磁转矩及稳态转速较为平稳,抗干扰能力强等特点。为了进一步改善转矩脉动对其采用的改进遗传算法较之标准遗传算法大大缩短了超调量 $\sigma\%$ 和调节时间 t_s (s),整个系统快速性和稳定性得到更大的提高。

参考文献:

- [1] 崔胜民. 新能源汽车技术[M]. 北京:北京大学出版社,2009.
- [2] 郭庆鼎,赵希梅. 直流无刷电动机原理与技术应用[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [3] 龙驹. 永磁无刷直流电动机转速控制系统的优化设计[M]. 成都:西南交通大学出版社,2006.
- [4] 王小平. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- [5] 韩炜. 一种全局优化算法:遗传算法-单纯形法[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(2):6-12.
- [6] 金传伟. 基于遗传算法的PID参数优化与仿真[J]. 微计算机信息,2002,18(7):72-73.
- [7] 欧阳森,王建华,耿英三,等. 一种新的改进遗传算法[J]. 计算机工程与应用,2003(11):13-15.
- [8] 周凯汀,郑力新. 基于遗传算法的PID参数优化设计[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2000,21(2):200-204.
- [9] 王京,赵媛媛. 一种改进的遗传算法用于PI控制器的参数寻优[J]. 北京科技大学学报,2000,22(1):93-96.
- [10] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [11] 牛志华. 一类混合遗传算法的研究[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002:35-47.
- [12] 李钟明. 稀土永磁电机[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [13] 姜忠山,宋超,王昉,等. 基于遗传算法的无刷直流电机转速控制系统优化设计[J]. 自动测量与控制,2008,27(11):70-72.

(责任编辑:肖锡湘)