

一种无刷直流电机模糊自适应控制方法

宋丽君 王 燕

(洛阳理工学院电气工程与自动化学院, 河南洛阳 471023)

摘要:针对传统 PID 控制参数固定、不易改动的不足,提出了利用遗传算法自动构建模糊逻辑控制器方法,并应用于无刷直流电机模糊自适应控制,提高了电机的控制性能。通过对无刷直流电机模糊自适应 PID 控制和传统 PID 控制进行对比研究,结果表明,该模糊自适应控制方法具有更好的动态性能和鲁棒性。

关键词:遗传算法;无刷直流电机;模糊逻辑控制;PID 控制

中图分类号:TP273.4 **文献标识码:**A

DOI:10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.04.023

A fuzzy adaptive control method for brushless DC motor

SONG Lijun, WANG Yan

(Department of Electrical Engineering and Automation, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, CHN)

Abstract: Aiming at the difficulty of changing the control parameters of traditional PID controllers, a fuzzy logic controller automatically constructed by the genetic algorithm is proposed, which is applied to the fuzzy adaptive control for brushless DC motors to improve the control performance. A comparative study is carried out between the adaptive fuzzy PID control and traditional PID control, which were used to separately drive the brushless DC motor. Simulation results show that the fuzzy PID control system has better dynamic performance and robustness than the traditional PID control system.

Keywords: genetic algorithm; brushless DC motor; fuzzy logic control; PID control

无刷直流电机 (brushless direct current motor, BLDCM) 具有功率大、效率高、体积小和调速性能良好等特点, 因而在航空、航天、兵器、工业和伺服系统等领域得到了广泛应用。然而, BLDCM 是一个复杂系统, 其内部变量众多、非线性特性明显, 很难对其建立高精度的动态数学模型^[1]。

模糊控制因模拟人类经验、知识、判断和推理过程, 可用于难以建立数学模型的控制对象, 故在 BLDCM 控制中得到了广泛应用^[2-5]。然而, 模糊逻辑控制器 (fuzzy logic controller, FLC) 的性能是由隶属度函数和模糊规则决定, 但隶属度函数和模糊规则的建立、调试需要由该领域的专家根据经验知识手动完成, 主观性较强; 且控制对象不同, FLC 的隶属度函数和模糊规则也不相同。为此, 研究如何自动生成 FLC 便成为 BLDCM 中的研究热点。

自动设计 FLC 主要分为 3 种类型^[6], 第一类是 FLC 的隶属度函数已知, 对模糊规则进行自动生成

和优化^[7]; 第二类则是 FLC 的模糊规则已知, 对隶属度函数进行自动生成和优化^[8]; 第三类是同时对 FLC 的隶属度函数和模糊规则进行自动生成和优化。目前, 随着遗传算法 (genetic algorithms, GA)、粒子群算法等进化算法的快速发展, 同时生成 FLC 的隶属度函数和模糊规则已普遍应用^[9-11]。

然而, 在上述工作中, 为自动生成 FLC 多采用等腰三角形作为隶属度函数, 导致 FLC 论域的覆盖程度不足。FLC 的隶属度函数、模糊规则个数也多为固定值, 不能更好地体现 FLC 的自适应性。且由于同时需要对隶属度函数的模糊规则进行优化, 导致染色体长度较长, 造成运算的复杂性增加。

为解决上述问题, 本研究提出一种基于 GA 自动生成 FLC 的方法, 可自主选择隶属度函数、模糊规则的数量, 减少染色体长度, 快速自动生成 FLC。

1 BLDCM 工作原理

为了简化分析, 对无刷直流电机作以下假设:



制造技术与机床[®]

- (1) 忽略磁路饱和，不计涡流和磁滞损耗。
- (2) 不考虑电驱反应，气隙磁场分布为梯形波，平顶宽为 120°。
- (3) 忽略齿槽形状效应，三相绕组完全均匀分布。
- (4) 驱动器中逆变电路的开关功能器件均具有理想开关特性。

由此得到无刷直流电机的相电压方程为式(1):

$$\begin{cases} U_a = Ri_a + (L - M) \frac{di_a}{dt} + e_a \\ U_b = Ri_b + (L - M) \frac{di_b}{dt} + e_b \\ U_c = Ri_c + (L - M) \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (1)$$

其中: U 表示该相电压, V; R 为相电阻, Ω; L 为相电感, H; M 为与其他相的互感, M; e 为该相的反电动势; i 为该相电流。

电机的电磁转矩如式(2)所示:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (2)$$

其中: T_e 为电机电磁转矩, ω 为电机机械角速度。

电机的运动方程如式(3)所示。

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3)$$

其中: T_L 为外部负载, J 为电机转动惯量, B 为电机粘滞系数。

2 模糊自适应 PID 控制器设计

2.1 模糊自适应 PID 控制

PID 控制由于其原理简单, 算法易于实现, 可靠性高、鲁棒性好等优点, 得到了广泛应用。然而 PID 控制需要获得被控对象的精确数学模型, 对于非线性系统控制效果不好, PID 参数确定后无法更改。同时 BLDCM 是一个非线性、强耦合系统, 自身参数、负载及被控对象等时变性强、使得 PID 控制在 BLDCM 控制中的效果并不是十分理想。为此将 FLC 引入 BLDCM 的 PID 控制(称为模糊自适应 PID 控制), 利用 FLC 来对 PID 的输出进行实时在线调整, 可有效提高对 BLDCM 的控制性能^[12]。

模糊自适应 PID 控制的基本思想是根据 BLDCM 的误差 E 和误差变化率 E_c 作为 FLC 的输入量。在运行过程中, 对 E 和 E_c 的变化进行实时检测, 依照模糊控制原理对 PID 进行实时调整。此时 PID 的输出 k_p 、 k_i 和 k_d 应为:

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \quad (4)$$

其中: k_{p0} 、 k_{i0} 和 k_{d0} 为 PID 控制器的原始数值; Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 为 FLC 的输出调整数值。图 1 所示为模糊自适应 PID 控制示意图。

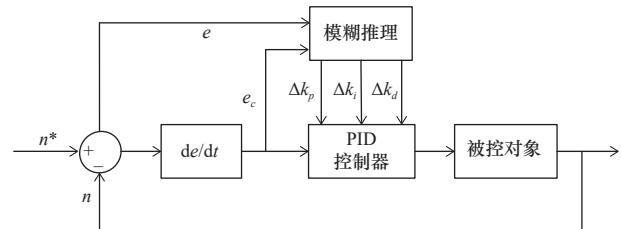


图 1 模糊自适应 PID 控制示意图

2.2 隶属度函数的设计

隶属度函数是模糊化过程中将精确量映射到各个模糊集合论域的重要环节。隶属度函数的种类很多, 其中三角型隶属度函数表达式最为简单, 所需优化变量少而在自动生成 FLC 中得到广泛应用。但以往工作多将隶属度函数数量固定为 7 个, 二输入三输出的 FLC 中所有隶属度函数的优化位数需要 25 个。

隶属度函数数量固定后, 模糊规则的数量也随之固定, 不利于更好地体现 FLC 的优越性。且每个隶属度函数需要优化位数较多, 给优化造成一定困难。

为此, 本研究采用文献 [13] 的隶属度函数优化方法。可大大减少需要优化变量个数。以一个输入为例, 仅需对 2 个变量个数进行优化, 分别用于确定隶属度函数的个数和各隶属度函数的分布情况。如此, 对于二输入三输出的 FLC, 其隶属度函数需要优化的个数仅需要 $5 \times 2 = 10$ 。

2.3 模糊规则的设计

模糊规则与隶属度函数的数量息息相关, 以往自动生成 FLC 中对于模糊规则多采用字符串编码, 用不同数字代表不同的模糊规则, 交由优化算法进行优化。如两个输入中隶属度函数个数均为 7, 则模糊规则有 49 条, 需要 147 位编码。

同理选用文献 [13] 的模糊规则优化方法, 模糊规则中仅需对模糊规则的分布情况进行优化。则二输入三输出的 FLC 中模糊规则的优化位数仅需 5 位。

3 利用 GA 自动生成 FLC

3.1 基于 GA 生成的模糊自适应 PID 控制器

在利用 GA 自动生成 FLC 时, 除前面所述的 FLC 外, 还需要对输入的比例因子 G_c 、 G_{ec} 和输出的量化因子 G_p 、 G_i 和 G_d 进行优化, 以确保精确数值能

够通过比例因子准确落在 FLC 的隶属度函数工作范围内。量化因子则是相反，需要将输出的隶属度函数转化为精确数值，以实现对 PID 的自适应调整。图 2 所示为利用 GA 自动生成的模糊自适应 PID 控制器示意图。

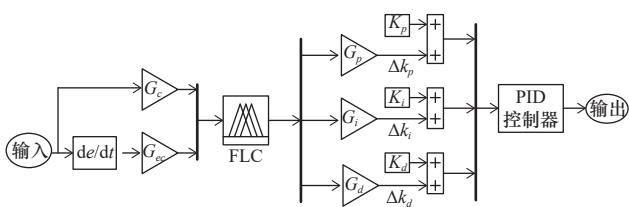


图 2 利用 GA 自动生成的模糊自适应 PID 控制示意图

3.2 GA 编码规则

依据前述可知，对于模糊自适应 PID 控制器这个二输入、三输出的 FLC，需要对输入和输出中隶属度函数的数量、隶属度函数的分布情况和模糊规则的构成情况，还有 2 个比例因子和 3 个量化因子进行优化。采用实数编码的情况下，则对应 FLC 所需要的染色体的个数为 $5+5+5+5=20$ 。

3.3 适应度函数

采用误差绝对值时间积分性能指标作为 GA 生成 FLC 参数选择的适应度函数。GA 算法中目标函数的选取非常重要，决定了算法能否达到预期控制目标，这里选取式(5)作为目标函数，在式(5)中加入 $u(t)$ 的平方项，可以有效防止控制量过大。选用下式作为参数选取的最优指标函数。

$$J = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) dt + w_3 \cdot t_u \quad (5)$$

式中： $e(t)$ 为无刷直流电机被控量的误差； $u(t)$ 为无刷直流电机的输入量； t_u 为上升时间； w_1 、 w_2 和 w_3 为权值，分别取 0.999、0.001 和 2.0。

无刷直流电机速度控制中一般不希望出现超调量，把超调量引入目标函数中，可以有效控制电机速度超调量，目标函数(5)就转化为新的目标函数(6)，如下式所示：

$$\text{if } ey(t) < 0 \\ J = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_4 |ey(t)|) dt + w_3 \cdot t_u \quad (6)$$

式中： $ey(t) = y(t) - y(t-1)$ ， $y(t)$ 为被控对象输出。 w_4 为权值，且 $w_4 \gg w_1$ ， w_4 取值为 100。

3.4 选择机制

为避免 GA 进化时相同染色体过多导致早熟，采用无回放余数随机选择和最优保存策略相结合的

选择机制。可确保每一代种群中比平均适应度大的染色体能够遗传到下一代种群中，同时每一代适应度最高的染色体也可以遗传到下一代种群中。

3.5 交叉和变异运算

交叉和变异运算是 GA 的重要环节，但由于以往交叉因子 p_c 和变异因子 p_m 多为固定值，不能自适应进行调整。为此，采用自适应交叉因子和变异因子(如式(7)、(8)所示)，提高 GA 运行效率。

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f_{\max} - f_1)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f_1 \geq f_{\text{avg}} \\ p_{c1}, & f_1 < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (7)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})(f_{\max} - f_2)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f_2 \geq f_{\text{avg}} \\ p_{m1}, & f_2 < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： f_{\max} 、 f_{avg} 是当前种群的最大适应度和平均适应度值； f_1 为两个交叉染色体中适应度较大数值； f_2 为变异染色体的适应度数值； p_{c1} 和 p_{c2} 为事先设定的交叉因子，分别取 0.85 和 0.6； p_{m1} 和 p_{m2} 为事先设定的变异因子，分别取 0.1 和 0.001。

4 仿真与验证

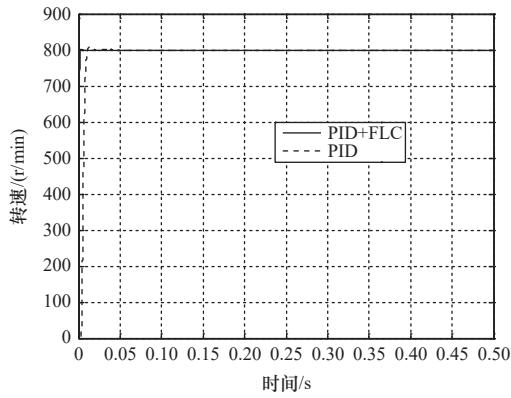
通过 MATLAB 构建 BLDCM 仿真模型，其参数为线电阻 1.8Ω ，线电感为 0.54 mH ，额定工作电压为 24 V ，额定转速为 800 r/min ，电机反电动势系数为 $0.066 \text{ V}/(\text{rad/s})$ ，转矩系数为 $0.0432 \text{ N}\cdot\text{m/A}$ ，阻尼系数为 $0.05 \text{ N}/(\text{m/s})$ 。

分别采用 PID 和模糊自适应 PID 两种控制方法对 BLDCM 的空载阶跃进行控制，得到的结果如图 3 所示。

由图 3 可知，模糊自适应 PID 控制算法要比传统的 PID 控制算法更早达到稳定，前者约为 0.003 s ，后者则约为 0.025 s ，并且模糊自适应 PID 控制算法没有产生超调，而传统 PID 算法则产生了约 1% 的超调。

为测试模糊自适应 PID 控制算法和传统 PID 控制算法对外部负载扰动的控制效果，在 0.3 s 时对电机施加了 $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的外部负载，得到的仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可知，模糊自适应 PID 控制算法虽然在外部负载突变的情况下，产生了稍许的超调，但很快就达到稳定控制，耗时约为 0.004 s 。传统 PID 控制算法虽然未能产生超调，但达到稳定的时间较模糊自适应 PID 算法大大增加，约耗时 0.035 s 。



(a) 阶跃响应控制结果

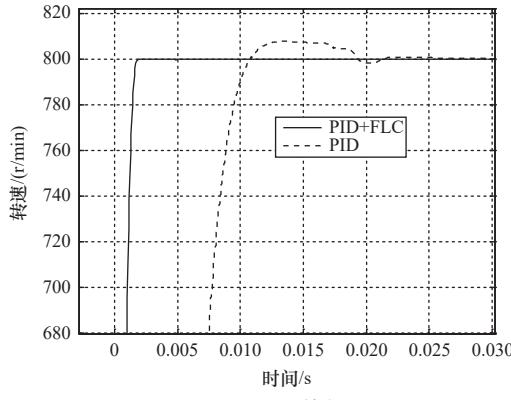


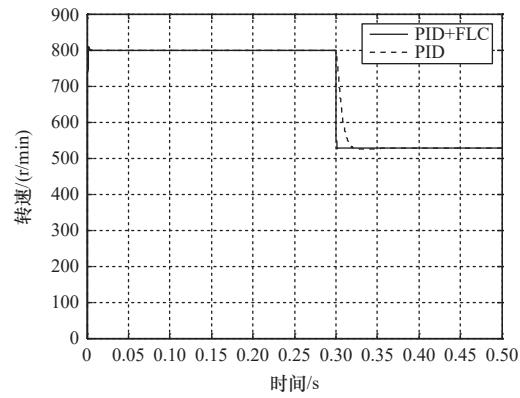
图3 阶跃控制图

5 结语

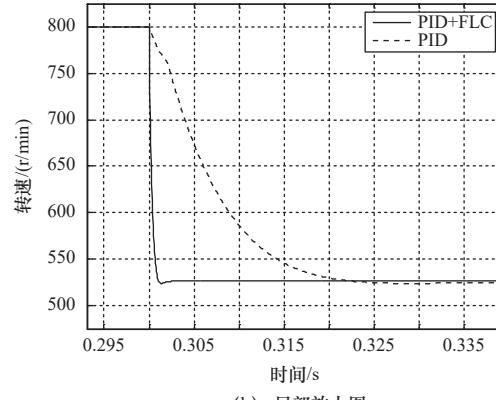
在传统 PID 控制算法的基础上，通过遗传算法自动寻优和设计模糊逻辑控制器，来对 PID 的控制参数进行微调，以便实现模糊自适应 PID 控制。较人工设计模糊逻辑器的过程，具有速度快、精度高以及不依赖人的经验等优点，并且模糊自适应 PID 控制的效果要比传统的 PID 控制效果更好。

参 考 文 献

- [1] 潘晓磊,赵川,吕海立.无刷直流电机模糊自适应PID控制的研究[J].机电工程技术,2016(3): 85-89.
- [2] 田亮,于海生,于金鹏,等.基于负载转矩观测器的无刷直流电机SVPWM矢量控制[J].制造业自动化,2018,40(10): 135-140.
- [3] 孙顺顺,艾红.基于DSP的模糊PI无刷直流电动机控制系统[J].微特电机,2013,41(6): 68-71.
- [4] 张竟飞,何颐,周亚军,等.基于DSP和模糊PID控制应用在电动舵机系统中的研究[J].工业控制计算机,2017,30(9): 61-62,65.
- [5] 任志玲,薛书飞,徐丽霞.直流无刷电机的DSP模糊控制系统[J].计算机系统应用,2014,23(7): 42-46.
- [6] 侯春杰.基于遗传算法的无刷直流电机自适应模糊控制[D].洛阳:河南科技大学,2013.



(a) 外部负载扰动



(b) 局部放大图

图4 外部负载扰动控制结果

- [7] 邵克勇,张鸿雁,李飞,等.一种基于GA的模糊控制规则优化新方法[J].化工自动化及仪表,2011,38(3): 261-264,306.
- [8] 王峰,张国煊,张怀相.模糊隶属度函数的遗传优化[J].杭州电子科技大学学报,2009,29(4): 34-37.
- [9] 张禹,刘群,刘慧芳,等.改进粒子群优化的无刷直流电机模糊控制[J].组合机床与自动化加工技术,2017(10): 101-104.
- [10] 金鹏,李晶.基于改进遗传算法的BLDC模糊PID控制系统[J].自动化与仪器仪表,2015(5): 14-15,17.
- [11] 侯春杰,张雷,孟令瑞.基于遗传算法的无刷直流电动机自适应模糊控制[J].微特电机,2014,42(10): 63-66.
- [12] 邵博,王宝超,尚静,等.模糊PID控制在BLDC系统中的应用[J].微电机,2016,49(8): 31-34.
- [13] 林歆悠,王召瑞.应用粒子群算法优化模糊规则的自适应多目标控制策略[J].控制理论与应用,2021,38(6): 842-850.

第一作者/通信作者:宋丽君,女,1983年生,博士研究生,讲师,研究方向为信息与信号处理、智能控制与优化,已发表论文12篇。E-mail: songlijunj@126.com

(编辑 高 扬)

(收稿日期: 2021-11-08)

文章编号:20220425

如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。