

8-13-2020

Modeling and Simulation of BLDCM Fuzzy Control System with Real-time Modification Function

Yuanwang Deng

School of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

Zeng Jun

School of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of BLDCM Fuzzy Control System with Real-time Modification Function

Abstract

Abstract: Based on the analysis of the mathematical model of brushless direct current motor (BLDCM), a novel method for modeling of BLDCM was proposed. In MATLAB, the model of BLDCM was established by C MEX S-function, and the simulation results showed that the proposed method can enhance the simulation efficiency. Based on the modeling and simulation of BLDCM, a modification function was introduced and a self-turning fuzzy controller was built. According to the error and error rate of speed, the proposed modification function performed real-time regulation of fuzzy rules. There were six regulation parameters in the self-turning fuzzy controller, and these parameters could be optimized off-line by the genetic algorithm toolbox of MATLAB. Besides, a contrast simulation was performed among digital PI controller, basic fuzzy controller and the self-turning fuzzy controller with the optimized parameters, and simulation results indicated that the last controller can provide the best control effect.

Keywords

BLDCM, modification function, fuzzy control rule, S-function, contrast simulation

Recommended Citation

Deng Yuanwang, Zeng Jun. Modeling and Simulation of BLDCM Fuzzy Control System with Real-time Modification Function[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(11): 2663-2669.

基于实时修正函数模糊控制的 BLDCM 建模及仿真

邓元望, 曾俊

(湖南大学机械与运载工程学院, 长沙 410082)

摘要: 在分析无刷直流电机(BLDCM, Brushless Direct Current Motor)数学模型的基础上, 提出了一种 BLDCM 仿真模型建立的新方法。在 MATLAB 中利用 C MEX S-函数搭建无刷直流电机模型, 仿真结果表明建模方法提高了仿真效率。基于所建立的 BLDCM 仿真模型引进一个修正函数并建立了自调整模糊控制器, 修正函数能根据动态误差和误差变化率实时调整模糊控制规则。自调整模糊控制器有 6 个调节参数, 利用 MATLAB 自带的遗传算法工具箱离线组合优化这些参数, 并将优化后的自调整模糊控制器和数字 PI 控制器以及基本模糊控制器对比仿真, 结果表明带有修正函数的自调整模糊控制器具有最优的控制效果。

关键词: 无刷直流电机; 修正函数; 模糊控制规则; S-函数; 对比仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 11-2663-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201611003

Modeling and Simulation of BLDCM Fuzzy Control System
with Real-time Modification Function

Deng Yuanwang, Zeng Jun

(School of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the analysis of the mathematical model of brushless direct current motor (BLDCM), a novel method for modeling of BLDCM was proposed. In MATLAB, the model of BLDCM was established by C MEX S-function, and the simulation results showed that the proposed method can enhance the simulation efficiency. Based on the modeling and simulation of BLDCM, a modification function was introduced and a self-turning fuzzy controller was built. According to the error and error rate of speed, the proposed modification function performed real-time regulation of fuzzy rules. There were six regulation parameters in the self-turning fuzzy controller, and these parameters could be optimized off-line by the genetic algorithm toolbox of MATLAB. Besides, a contrast simulation was performed among digital PI controller, basic fuzzy controller and the self-turning fuzzy controller with the optimized parameters, and simulation results indicated that the last controller can provide the best control effect.

Keywords: BLDCM; modification function; fuzzy control rule; S-function; contrast simulation

引言

由于价格便宜、结构简单、出力大和良好的调

速性能, 无刷直流电机(BLDCM, brushless direct current motor)广泛应用于航空航天、电动汽车、机器人、家用电器、医疗设备等领域^[1-2]。随着 BLDCM 应用领域的不断拓宽, 对电机控制系统的设计要求越来越高, 如何建立有效的 BLDCM 控制系统仿真模型成为电机控制算法设计人员迫切需要解决的关键问题^[3]。无刷直流电机模型可采用 SIMULINK 自带的模块建立, 也可采用 S-函数编程实现。S-



收稿日期: 2015-04-13 修回日期: 2015-06-09;
基金项目: 湖南省工业支撑项目(2013gk2005), 湖南省新型工业化专项(2012gk4009);
作者简介: 邓元望(1967-), 男, 湖南安化, 博士, 研究方向为混合动力电动汽车; 曾俊(1989-), 男, 河南信阳, 硕士, 研究方向为无刷直流电机控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 2663 •

函数是 System function 系统函数的简称, 非常适合复杂动态系统的数学描述, 且可以在仿真过程中对仿真进行精确的控制。在 MATLAB 中, 用户可使用 MATLAB 代码、C、C++ 等语言编写 S-函数, 而使用 C 语言编写的 S 函数具有编程灵活, 删改方便和高速仿真的特性^[4]。

BLDCM 是一种多变量和非线性的控制系统, 传统的 PID 控制器因难以满足系统对优良的动、静态性能的需求, 正逐渐被智能控制所取代^[5-6]。模糊逻辑控制和神经网络控制均能有效地解决系统的非线性和系统对参数变化的敏感性等问题, 被认为是解决无刷直流电机控制问题的最成熟和最具吸引力的人工智能方法^[5]。对于 BLDCM 这种非线性系统, 虽然神经网络技术能获得较好的控制效果, 但其控制算法相对复杂^[7], 相比之下, 模糊控制在电机控制领域得到了更广泛的应用^[6]。与传统的 PID 控制相比, 模糊控制器能适应对象的非线性和时变性, 而且鲁棒性较好。常规模糊控制器的模糊控制规则通常表现为一个查询表, 是一个由偏差及偏差变化率组成的二维表格。查询表中控制量的值是事先计算好后以文件的形式存储在计算机中供在线控制使用, 即控制表确定后, 控制器的控制规则就不再改变, 因此, 查询表没有自适应和自组织能力; 而且基本模糊控制器中因缺少积分作用, 从而使它消除系统误差的性能欠佳, 难以达到较高的控制精度。为了克服这些缺点, 促使人们考虑设计一种可以在线自动地对本身的参数或控制规则进行调整的模糊控制器。文献[8]通过引入修正因子 α 提出了一种解析描述的模糊控制器:

$$U = \langle \alpha E + (1 - \alpha)C \rangle \quad (1)$$

式中: $\langle x \rangle$ 为取与 x 最接近的整数; α 为修正因子, $\alpha \in [0, 1]$, 通过调整 α 可以改变误差 E 和误差变化率 C 对控制输出量 U 的加权程度, 从而调整模糊控制规则。对于一个常规的二维控制系统, 带有一个加权因子 α 的模糊控制器, 虽然可通过改变 α 调整控制规则, 但 α 一旦选定, 在整个控制过程中就不再改变, 而控制系统对控制规则中误差 E 与

误差变化 C 的加权程度一般说来有不同的要求。文献[9]表明带有多个调整因子的控制规则能取得比单个调整因子更好的控制效果, 但是随着加权因子的增多, 一方面寻优过程变得相对复杂, 另一方面模糊控制规则的覆盖面积仍然有限。文献[10]采用在线递推调整控制规则的解析描述规则法取得了较好的控制效果, 但文献[11]证明出上述方法所得的控制量 U 为离散量, 受量化等级的影响使其控制精度不高。

本文采用 C 语言编写的 S-函数来完成 BLDCM 各个模块的建模, 建立了无刷直流电机本体模块和滞环电流控制模块, 并将之与电压逆变、参考电流等模块进行整合搭建 BLDCM 仿真模型。采用本文所建立的电机模型进行仿真, 可明显提高仿真效率, 特别在使用复杂的优化算法进行控制器的优化设计时, 采用本文建立的模型可大大缩短控制系统的开发周期。为了实时改变调整因子 α , 本文提出一种时变修正函数, 能根据误差 E 和误差变化率 C 有效改变调整因子 α , 从而改变模糊控制规则。将本文建立的带有上述修正函数的自调整模糊控制器(下文统称自调整控制器)应用于无刷直流电机, 能取得比 PI 控制和基本模糊控制更好的控制效果。

1 BLDCM 仿真模型的建立

1.1 本体模块

本文以两相导通星形三相六状态为例, 分析 BLDCM 数学模型及其电磁转矩等特性。为了便于分析, 假设不计磁路饱和, 不计涡流和磁滞, 则三相绕组的电压平衡方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} u_u \\ u_v \\ u_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{i}_u \\ \dot{i}_v \\ \dot{i}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} + u_n \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: u_u, u_v 和 u_w 分别为三相电枢绕组的端头的对地电压; i_u, i_v 和 i_w 分别为三相电枢绕组内的电流; e_u, e_v 和 e_w 分别为三相绕组内的感应电动势; u_n 为三相电枢绕组星行联结点的对地电压; R 为每相绕组中的电阻; L 为每相绕组中的自感; M 为两相绕组之间的互感; p 为微分算子。

公式(2)可以转化成:

$$p \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_u - u_n - Ri_u - e_u \\ u_v - u_n - Ri_v - e_v \\ u_w - u_n - Ri_w - e_w \end{bmatrix} / (L - M) \quad (3)$$

由电磁转矩公式得:

$$T_e = \frac{e_u i_u + e_v i_v + e_w i_w}{\omega} \quad (4)$$

转子运动方程为:

$$\frac{d\omega}{dt} = (T_e - T_l - B\omega) / J \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = P\omega / 2 \quad (6)$$

式中: T_e 为电磁转矩; T_l 为负载转矩; B 为阻尼系数; ω 为电动机转速; J 为电动机的转动惯量; P 为磁极数; θ 为电角度。

基于 MATLAB 中提供的 C MEX S-函数模板文献[3]提出了 C MEX 文件的 A、B、C 三种简化结构。根据公式(3)、(5)和(6)可得五个微分方程, 它们共含有五个变量, 分别为 i_u, i_v, i_w, ω 和 θ 。微分方程中的 e_u, e_v, e_w 和 T_e 可看成是 ω 和 θ 的函数, 因此可在结构 B 形式的 C MEX 文件的 mdlDerivatives 子函数中写入含有五个变量的五个微分方程, 以求出这五个变量的状态值, 然后利用这些状态值在 mdlOutputs 子函数中得到如图 1 所示的九个输出量。文献[3]中输入到电机本体模块的反电动势来自于前面的参考电流模块, 而本文的获得方式为 S-函数内部产生, 这是建立电机本体模块的独特之处。由于各相反电动势根据转子电角度周期性的变化, 因此可在 S-函数的 mdlDerivatives 子函数中根据电角度的状态值得求不同电角度对应的反电动势 e_u, e_v 和 e_w , 进而求得电磁转矩 T_e , 再将这些量代入该子函数中的微分

方程即可。BLDCM 本体结构框图如图 1 所示, 图中 S-Function1 的作用是求得联结点对地电压和各相对联结点的电压。

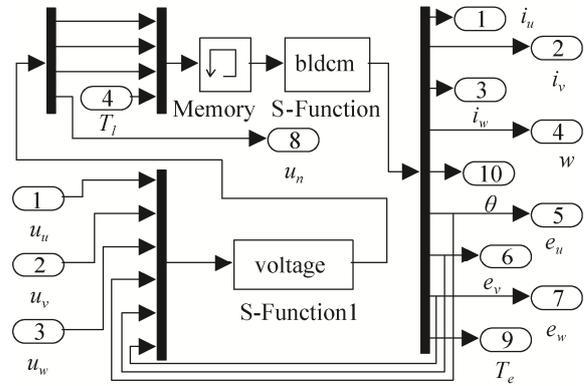


图 1 BLDCM 本体模块

1.2 电流滞环控制模块

电流滞环控制模块根据三相参考电流、三相实际电流以及所设置的滞环比较器的环宽来确定逆变器 6 个功率管的通断, 选择适当的环宽, 可以使实际电流不断跟踪参考电流的变化, 实现较好的电流闭环控制。本文建立的电流滞环控制模块由两个 S-函数分工实现, 如图 2 所示: 利用一个单独的 S-函数 delay 代替 3 个延迟单元模块来完成上一时刻开关状态的采样值, 并将之输入到滞环比较模块, 9 个输入信号经该模块处理后得到不同采样时刻的 6 个开关信号。

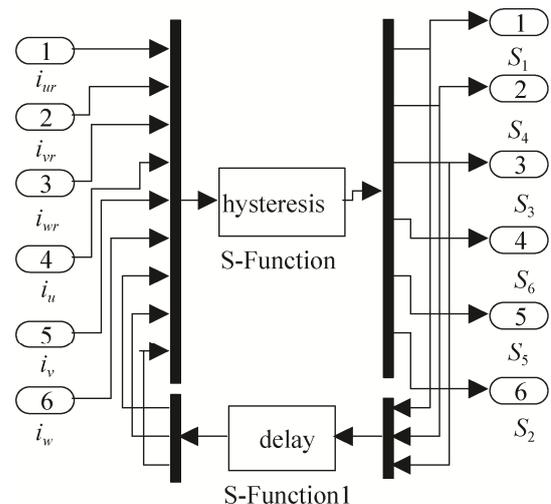


图 2 电流滞环控制模块

1.3 电压逆变器模块

电压逆变器模块根据电流滞环控制模块输出的控制信号来确定各相绕组电压,可用下列公式表示^[12]:

$$u_u = S_1 u_d / 2 - S_4 u_d / 2 \quad (7)$$

$$u_v = S_3 u_d / 2 - S_6 u_d / 2 \quad (8)$$

$$u_w = S_5 u_d / 2 - S_2 u_d / 2 \quad (9)$$

式中: $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ 表示 6 个功率管的通断,若导通,则其值为 1,若关断,其值为 0。由电流滞环控制模块可知,同一相所对应的上、下侧功率管在同一时刻不会同时导通,若其中一个功率管导通,另一个功率管必定关断。采用这种建模方法,并不需要考虑转子位置,只需要给出开关信号就能得到三相绕组的对地电压,这种实现方法十

分简单。

1.4 BLDCM 仿真模型

若速度控制模块采用数字 PI 控制,则控制系统仿真模型如图 3 所示。在图 3 中,本体模块使用 B 结构形式的 C MEX 文件建立,限流模块 S-Function1 为 MATLAB 中提供的过零区间饱和的范例,电流滞环控制模块的子模块即图 2 中 S-Function1 采用 C 结构形式的 C MEX 文件建立,其余 S 函数均使用 A 结构形式的 C MEX 文件来实现。同样的参数设定下,在同一台计算机上对本文以及文献[13]所建立的电机模型进行对比仿真实验,仿真实验结果如表 1 所示。由表 1 可知,与文献[13]相比,本文模型仿真时所花费的时间明显缩短,大大提高了仿真效率。

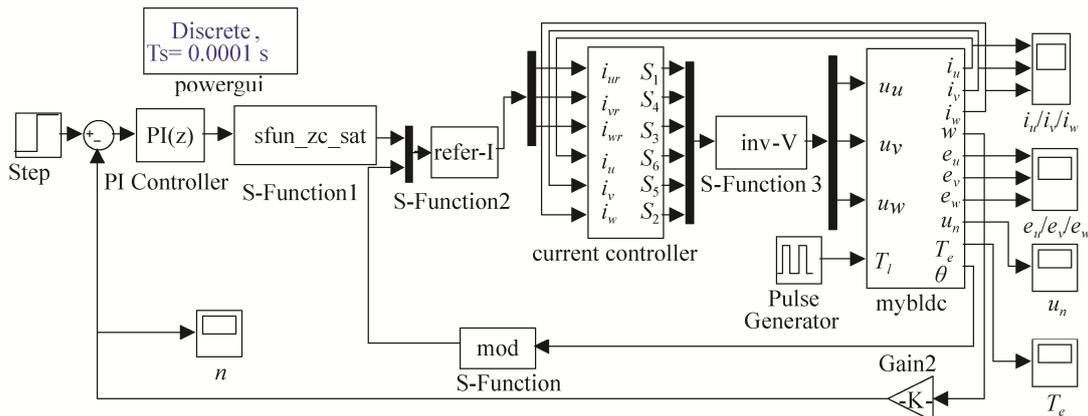


图 3 基于 C MEX S-函数的 BLDCM 仿真模型

表 1 不同模型下的对比仿真实验

对比模型	Simulink 解法	仿真终止时间/s	采样时间/ms	仿真次数/次	平均每次花费时间/s
本文模型	固定步长的 ode45	10	1	10	14.332
文献[13]模型	固定步长的 ode45	10	1	10	63.582

2 自调整模糊控制器的设计和优化

2.1 自调整模糊控制器设计

对于一个常规的二维控制系统而言,在控制过程的初始阶段,系统的误差往往很大,控制系统的主要目的是消除误差,这时希望误差值在控制规则中的加权系数应大一些;当控制系统达到

稳定阶段,系统误差已经很小,控制系统的主要任务是减小超调量,使系统尽快稳定,这时需要误差变化值的加权系数增大。在实际控制中,当输出接近稳态时,为了不产生超调应该很小心地给出控制量。因此,当偏差和偏差变化率较小时,即系统处于稳态时应该使调整因子在较大范围内基本不发生变化,以保证控制规则不发生频繁变

化。为了使 α 能够平滑变化, 文献[12]提出采用指数函数 e^{-x} 来表示 α 随误差的变化, 文献[14]提出用钟形函数来表示这种关系, 均取得不错的控制效果, 但未考虑误差变化对控制性能的影响。文献[15]提出了一种 S 型函数的方法和一种双曲正切函数的方法, 并且考虑了误差变化 C 对可调整因子 α 的影响, 但由于其未对控制器进行优化处理, 其所得的控制效果并不理想。文献[16]指出绝对值 $|E|$ 在较大的区间 (E_{mid}, E_n) , 应使调整因子 α 相对大些, 对 E 的作用相对加强, 以使系统更快响应; 在 $|E|$ 较小的区间 $(0, E_{mid})$ 内, 使调整因子 α 相对小些, 对 C 的作用相对加强, 抑制 $|E|$ 在较大的区间由于加快响应而导致的较大惯性冲力。基于上述分析, 且考虑到反正切函数的图像特征, 本文提出了一种对反正切三角函数进行平滑变换的修正函数:

$$\alpha = \arctan(\beta \times (|E| / (|E| + |C|) - \gamma)) / \pi + 1/2 \quad (10)$$

式中的函数同时考虑了误差和误差变化率对量化因子的影响作用, 所提出的修正函数的图像如图 4 所示, 可知通过改变 β 和 γ 可以产生不同的调整因子 α , 调整因子 α 在定义域范围内具有连续性, 能较好的反应系统响应过程的变化特征。利用提出的修正函数建立自调整模糊控制器如图 5 所示, 其中的积分模块是为了消除稳态误差。

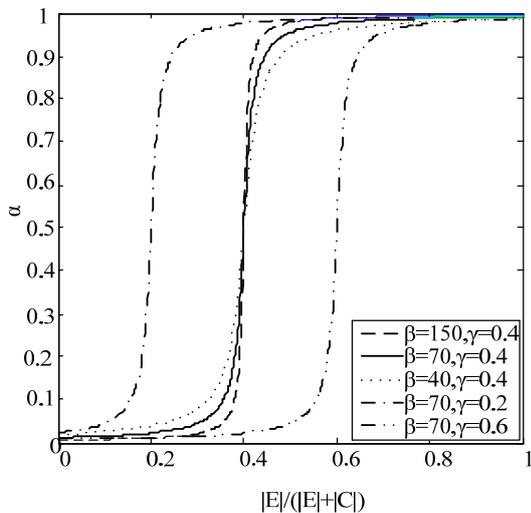


图 4 反正切函数

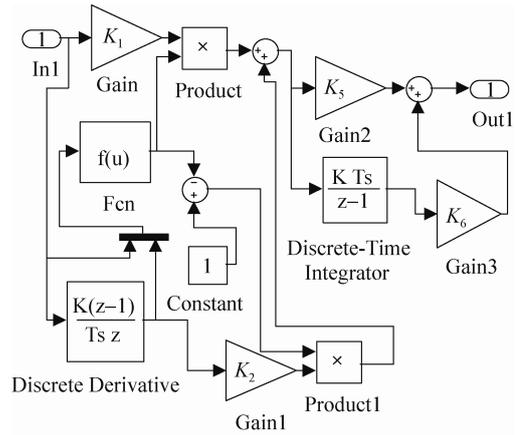


图 5 自调整模糊控制器

2.2 参数优化

自调整控制器中具有 6 个可调整参数, 其中 K_1 和 K_2 分别为误差和误差变化的量化因子; K_5 和 K_6 分别为模糊控制器输出的比例因子和积分系数; β 和 γ 为参变量, 利用 β 和 γ 取不同的值可以改变 α , 从而获得不同的控制规则。可知, $K_1, K_2, K_5, K_6, \beta$ 和 γ 的取值均会影响系统的性能。自调整模糊控制器的参数设计应作为优化组合问题来处理, 本文通过使用 MATLAB 自带的遗传算法工具箱对上述 6 个参数同时进行优化, 以期得到较好的控制效果。给定其目标函数为 $ITAE$ 积分性能指标:

$$J(ITAE) = \int_0^{\infty} t |E(t)| dt \quad (11)$$

式(10)可以综合评价控制系统的响应时间、超调量等动态和静态性能, $ITAE$ 的值越小, 所得控制系统的性能越好。目前, 遗传算法工具箱主要有 3 个: 英国谢菲尔德大学开发的遗传算法工具箱、美国北卡罗来纳州立大学的遗传算法最优化工具箱和 MATLAB 自带的遗传算法与直接搜索工具箱 (GADST)。GADST 为用户提供了友好的 GUI 使用界面及清晰的命令行调用语句, 使用极为简单方便, 因此本文使用 MATLAB 自带的遗传算法与直接搜索工具箱对所建立的 SIMULINK 模型进行优化。GADST 的使用有两种方式: 使用 GUI 界面或使用命令行。两种方式本质是一样的, 但使用命令行方式只需编写一个 M 文件, 较为简洁, 因此本文使用命令行方式。在该 M 文件中, 需要设置遗传算法的

相关参数, 采用如下语句进行设定: `Options=gaoptimset('Param1', value1, 'Param2', value2, ...);`

其中, Param1, Param2 等是需要设定的参数, 包括适应度句柄、变量个数、约束、精英数目、交叉后代比例、终止条件等; value1, value2 等是 Param 的具体值。设置完 options 之后, 需要调用函数 ga 来运行遗传算法, 其格式为:

```
[x_best, fval]=ga(fitnessfcn, nvars, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon, options);
```

其中 x_best 为遗传算法得到的最优个体; $fval$ 为最优个体 x_best 对应的适应度函数值; fitnessfcn 为适应度函数句柄; nvars 为变量数目; lb, ub 为上下限约束。本文需要优化的变量数目 $nvars=6$; 五个参数上限分别设置为 20, 20, 620, 1, 1, 20; 下限均设置为 0; 种群大小 PopulationSize=300; 精英数目 EliteCount=10; 交叉后代比 CrossoverFraction=0.6; 终止代数 Generations=100。

使用命令行方式运行遗传算法的代码如下:

```
clear
fitnessfcn = @bldcmmodel;
nvars=6; lb=[0 0 0 0 0 0]; ub=[20 20 620 0.98 1 20];
options=gaoptimset('PopulationSize',300,'PopInitRange',
[lb;ub],'EliteCount',10,'CrossoverFraction',0.6,'Generations',10
0,'StallGenLimit',100,'TolFun',1e-100,'PlotFcns',{'@gplotbest
f','@gplotbestindiv'});
```

```
[x_best, fval]=ga(fitnessfcn, nvars, [], [], [], [], lb, ub, [],
options);
```

被遗传算法调用的适应度函数的程序为:

```
function z = bldcmmodel(x)
assignin('base','K1',x(1)); assignin('base','K2',x(2));
assignin('base','K3',x(3)); assignin('base','K4',x(4));
assignin('base','K5',x(5)); assignin('base','K6',x(6));
[t_time, x_state, y_out]=sim('bldcm', [0, 0.12]);
z=y_out(end, 1);
```

在适应度函数中将待优化模型的运行时间取为 0.12 s, 是为了在满足优化条件的基础上尽可能的降低优化时间, 同时采用 C 语言编程的 S 函数建立的电机模型本身可大大提高优化效率。运行上述遗传算法可得适应度函数的最小值为 $J(ITAE)=0.67848$, 其所对应的 6 个参数的最佳值分别为 $K_1=7.042$,

$K_2=16.662$, $K_3=\beta=599.764$, $K_4=\gamma=0.939$, $K_5=0.049$, $K_6=19.879$, 将这 6 个参数代入自调整模糊控制器即完成对控制系统的设计。

3 仿真结果

BLDCM 参数设置为: 定子相绕组电阻 $R=0.2 \Omega$, 定子相绕组自感 $L=0.015 \text{ H}$, 互感 $M=-0.0045 \text{ H}$, 转子转动惯量 $J=0.002 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 额定转速 $n_e=1000 \text{ r/min}$, 极对数 $P=1$, 直流电源电压 $u_d=220 \text{ V}$ 。转动惯量 $J=0.002 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时, 令目标转速为 1000 r/min , 且在 0.5 s 施加 2.5 Nm 的转矩, 可得 PI 控制器、基本模糊控制器和自调整控制器的转速响应曲线如图 6 所示。当把转动惯量减小一半时, 可得图 7 所示的转速响应曲线。

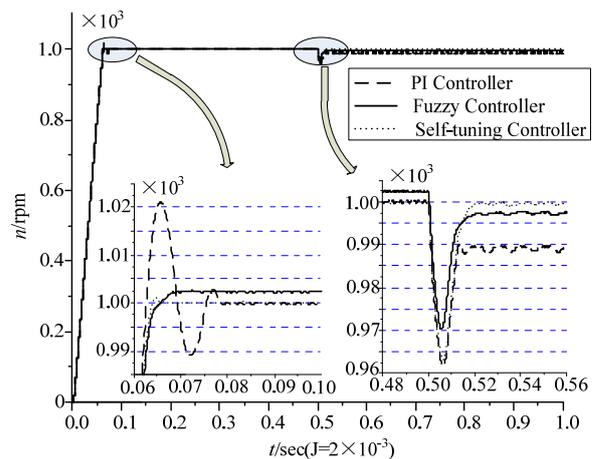


图 6 电机转速响应曲线($J=0.002$)

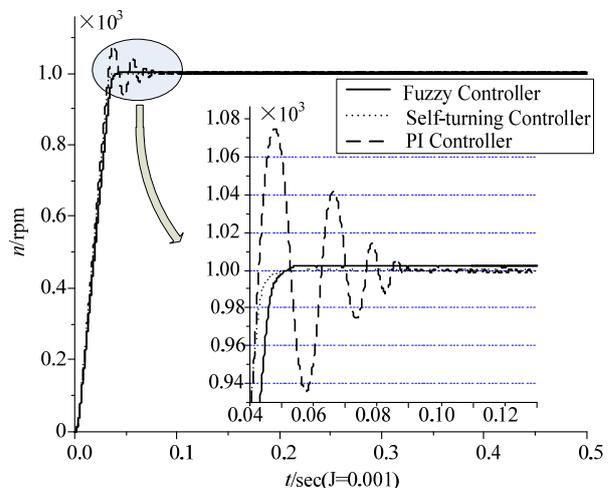


图 7 电机转速响应曲线($J=0.001$)

由图 6~7 的仿真结果可知转动惯量减小时, PI 控制的超调量约增大为原来的 3 倍, 转速波形出现多次振荡后才进入稳态, 而其他两种控制方法转速波形变化不大。当施加转矩后, PI 控制器、基本模糊控制器和自调整控制器产生的稳态误差分别约为 11 rpm, 2.5 rpm, 0.5 rpm, 与其他两种控制器相比, 自调整控制器产生的稳态误差可以忽略不计。综合 3 种控制方法可知: 数字 PI 控制与其他控制方法相比虽然响应速度快, 但却因存在较大超调量而使过渡过程过长, 而且对参数变化的适应能力最差; 基本模糊控制器虽能满足无超调, 而且对电机参数的变化具有很好的适应能力, 但该控制器因不含积分环节而使系统存在稳态误差; 本文设计的自调整模糊控制器上升时间快, 超调量和稳态误差可忽略不计, 而且对参数变化具有较好的适应能力。因此, 自调整控制器的控制效果优于其他两种控制器。

4 结论

1) 基于 C 语言编程的 S-函数本文提出了一种建立 BLDCM 仿真模型的新方法, 为本体模块和滞环电流控制模块的建模提供了新思路。将本文和其他文献中所建立的模型进行对比仿真实验, 实验结果证明了本文所建模型可大大缩短仿真时间。

2) 本文提出了一种自调整因子的修正函数, 同时考虑了误差和误差变化对自调整因子的影响, 利用该修正函数建立的自调整模糊控制器经优化后应用于无刷直流电机, 对比仿真表明自调整模糊控制器能取得比 PI 控制和基本模糊控制器更优的控制效果。可知, 本文提出的修正函数能根据需要实时改变自调整因子, 从而有效地调整模糊控制规则。

3) 利用 MATLAB 自带的遗传算法工具箱对 BLDCM 模糊控制系统的参数进行组合优化, 仿真结果表明优化的可行性和有效性, 这和本文所建立的无刷直流电机模型具有高效仿真的特点是分不开的。同时也表明, 本文所建立的电机模型为分析和设计无刷直流电机控制系统、验证复杂电机控制算法提供了有力的工具。

参考文献:

- [1] Shanmugasundram R, Zakariah K M, Yadaiah N. Implementation and Performance Analysis of Digital Controllers for Brushless DC Motor Drives [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (S1083-4435), 2014, 19(1): 213-224.
- [2] Premkumar K, Manikandan B V. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based speed controller for brushless DC motor [J]. Neurocomputing (S0925-2312), 2014, 138: 260-270.
- [3] 沈艳霞, 薛花, 纪志成. 基于 C MEX S-函数永磁同步电机控制系统仿真建模研究 [J]. 中小型电机, 2004, 31(6): 10-14.
- [4] 侯浩亮, 姚新宇, 冯晓梅, 等. C MEX S 函数在 Simulink 中的应用 [J]. 微计算机信息, 2010, 26(19): 140-141.
- [5] Gupta R A, Kumar R, Bansal A K. Artificial intelligence applications in Permanent Magnet Brushless DC motor drives [J]. Artif Intell Rev (S0269-2821), 2010, 33: 175-186.
- [6] 王向臣, 杨向宇. 智能控制在无刷直流电机控制中的应用 [J]. 微电机, 2008, 41(1): 62-65.
- [7] 夏长亮, 郭培健, 史婷娜, 等. 基于模糊遗传算法的无刷直流电机自适应控制 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 129-133.
- [8] 龙升照, 汪培庄. Fuzzy 控制规则的自调整问题 [J]. 模糊数学, 1982 (8): 105-112.
- [9] 李士勇. 模糊控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [10] ShiZhong He, Shaohua Tan, ChangChieh Hang. Control of Dynamical Process Using an on-line Rule-adaptive Fuzzy Control System. Fuzzy Sets and System (S0165-0114), 1993 (54): 11-22.
- [11] 张筱磊, 李士勇. 实时修正函数模糊控制器组合优化设计 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(1): 8-12.
- [12] Tibor B, Fedak V, Durovsky F. Modeling and simulation of the BLDC motor in MATLAB GUI [C]// 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Gdansk, Poland. USA: IEEE, 2011: 1403-1407.
- [13] 殷云华, 郑宾, 郑浩鑫. 一种基于 MATLAB 的无刷直流电机控制建模仿真方法 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 293-298.
- [14] 张大斌, 李云香, 夏学文. 模糊规则在线自调整算法及仿真研究 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(4): 1025-1027.
- [15] 武立军. 带调整因子的模糊控制器的仿真研究 [D]. 辽宁阜新: 辽宁工程技术大学, 2004.
- [16] 黄艳, 李昇平. 一种新的规则在线自调整模糊控制算法 [J]. 2002, 24(6): 3-5.