

直流无刷电机的 DSP 模糊控制系统^①

任志玲¹, 薛书飞¹, 徐丽霞²

¹(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

²(大连宝原核设备有限公司 质保部, 大连 116600)

摘要: 基于 DSP 设计了直流无刷电机的模糊控制系统, 阐述了系统硬件主电路设计, 以及软件实现的设计方法, 为解决直流无刷电机控制中难题, 进一步提高系统控制性能, 采用了无刷直流电机电流、转速双闭环控制及模糊自整定 PI 算法的控制策略, 较好实现了直流无刷电机控制系统的智能控制. 应用了 PWM 控制的重叠换相法抑制转矩脉动. 实验结果及仿真结果表明, 该系统控制效果良好, 转矩脉动抑制明显, 运行可靠的特点, 验证了该设计的快速稳定和鲁棒性.

关键词: 直流无刷电机; 数字信号处理器; 模糊自整定控制; 转矩脉动

BLDCM Fuzzy Control System Based on DSP

REN Zhi-Ling¹, XUE Shu-Fei¹, XU Li-Xia²

¹(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

²(Quality Assurance Department, Dalian Baoyuan Nuclear Equipment Co.Ltd, Dalian 116600, China)

Abstract: The design of BLDCM fuzzy control system for electric vehicle which bases on TMS320F2812 Digital Signal Processor(DSP) was given. The design methods of hardware and software of the control system were described in details. For better results, Brushless DC motor current and speed double closed loop control was used here, meanwhile, the fuzzy self-tuning PI algorithm was applied in the control system, and achieve the intelligent control of brushless DC motor control system. The PWM control of the overlapping commutation method was applied to suppress torque ripple. The experimental results showed that the system had well control effect, torque ripple was greatly inhibited and the operation was reliable.

Key words: brushless DC Motor; DSP; fuzzy self-tuning control; torque ripple

永磁直流无刷电动机的优点有很多, 相对于交流电动机来说它同样结构简单, 又有其维护方便以及运行可靠的优点, 同时兼有直流电动机的起动转矩大、调速范围宽、控制电路简单以及优秀的线性机械特性等优点, 被广泛应用在航空航天、军事、汽车、工业和家用电器等领域. 永磁直流无刷电机近年来的广泛应用, 直接促使了研究人员对直流无刷电机控制系统性能的进一步研究, 针对直流无刷电机的日常应用, 提出了文中的驱动电机系统设计, 以增强直流无刷电机控制的快速稳定和鲁棒性^[1].

由于越来越多的智能算法的研究应用到实际, 直

流无刷电机的性能控制研究方向由硬件控制转向软件控制, 未来电机的控制系统将更趋向于智能化. 智能控制和精确的效果对控制芯片要求较高, 采用数字信号处理器能做到运算速度更快, 处理功能更强, 而且能够实现复杂的智能控制算法, 同时可以与系统其它模块更好的建立通讯, 实现多机控制系统^[2].

为通过控制系统的实验和仿真, 提高直流无刷电机控制性能, 切实解决其在实际应用中的难题, 文中设计了基于 DSPTMS320F2812 芯片的电流与模糊参数自整定 PI 转速双闭环智能控制系统. 并给出了系统实验及仿真结果.

① 基金项目:国家自然科学基金(51277090);辽宁省教育厅优秀科技人才支持计划(LR2013014)

收稿时间:2013-11-05;收到修改稿时间:2013-12-11

1 控制系统的硬件设计

该控制系统中硬件设计部分如图 1 硬件系统原理框图。主要由逆变、转子位置检测、电流检测、功率驱动和芯片控制等电路组成^[3]。

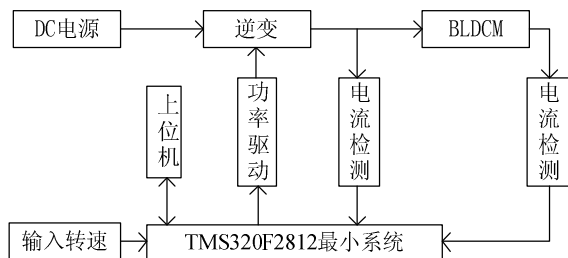


图 1 系统总体框图

1.1 系统主电路

以 TMS320F2812 构成的最小系统作为平台搭建控制电路, 控制系统采用三相桥式逆变电路作为功率主电路, 以 MOSFET 作为开关器件, 对直流无刷电机进行三相六状态两两导通的控制。电路如图 2 所示。驱动电路采用 IR2130 芯片对开关管进行驱动。

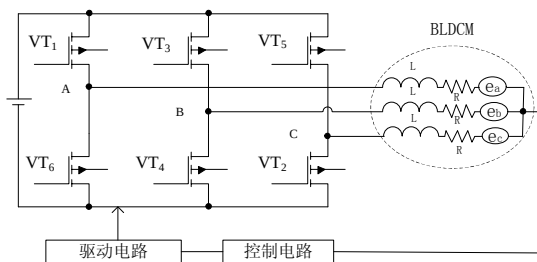


图 2 三相全桥驱动电路

1.2 检测电路

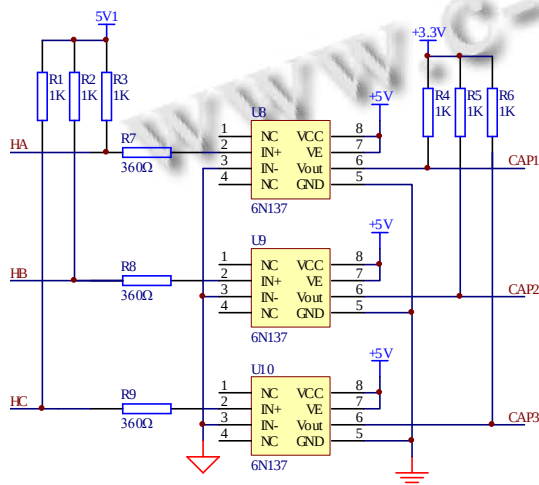


图 3 转子位置检测电路

图 3 所示为直流无刷电机控制系统转子位置检测电路。无刷电机上已经安装了 3 个霍尔位置传感器, 其输出的转子位置信号经过高速光耦 6N137 实现电路的隔离最后送往 TMS320F2812 片上捕获单元进行处理。

直流电流的检测, 采用电阻采样法, 电路母线电流经采样小电阻转换成电压, 最后由 RC 滤波送入 DSP 处理器的 A/D 端口作为电流反馈值; 另一路也经 RC 滤波后送电压比较器。

2 控制策略及软件实现

2.1 控制策略

为加强抗扰动性, 系统采用双闭环控制, 即电流、转速双闭环控制。速度环采用模糊自整定 PI 控制算法, 以增强负载变化时的抗干扰能力, 达到智能控制。控制系统框图如图 4 所示。

TMS320F2812 事件管理器模块 EVA 和 EVB 根据捕获的霍尔位置传感器脉冲信号的宽度计算出电机的当前速度^[4], 与电机的设定速度比较后, 产生转速偏差信号, 该偏差信号经模糊自整定 PI 调节产生电流参考给定; 将该给定参考电流与实际电流再作比较, 产生电流偏差信号, 经 PI 调节产生适当的 PWM 信号, 再通过驱动电路驱动 MOSFET 的逆变电路, 改变 PWM 信号波动占空比, 就能改变电机绕组的电枢电压, 实现调速控制。

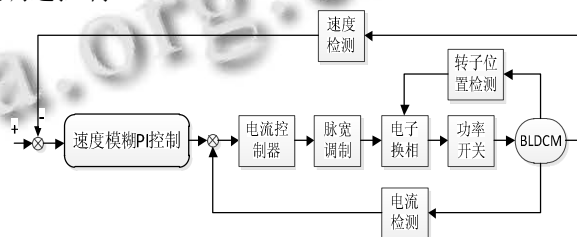


图 4 BLDCM 双闭环控制框图

2.2 模糊 PI 控制器设计

为了实现对直流无刷电动机的智能控制, 将传统 PI 和模糊控制相结合, 利用模糊推理原则的控制策略, 对 PI 参数 K_p 、 K_i 和进行在线自调整, 满足不断变化的误差对控制参数的要求。系统运行中以速度误差 e 和误差变化率 e_c 作为输入, 以 ΔK_p 、 ΔK_i 作为模糊推理的结果, K_p 、 K_i 为模糊控制器自整定出的参数。PI 参数可以由初始值与修正量作和得到, 公式为:

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i$$

根据电动机的额定转速 3000r/min, 可确定误差 e 的实际论域范围为[-3000,3000], 误差变化率 de/dt 的实际论域范围为[-250000,250000]. 对论域进行模糊化, 将输入和输出量都量化到[-3,-2,-1,0,1,2,3]这样的区间, 对应的模糊子集为{负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 零(ZE), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)}, 隶属度函数均采用灵敏度较强的三角函数, 如图 5 所示.

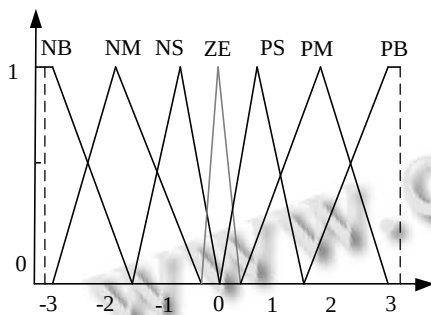


图 5 隶属度函数

精确值的量化就是将输入量乘以一个量化因子 K_e , 使其落在模糊论域的范围. 以偏差 e 为例, 即: $a_i = K_e \cdot e_i$.

对于模糊推理目前最为常用的是 Mamdani 算法, 该算法是基于 min-max 关系的推理算法, 该推理规则对于不同的模糊控制器的结构有不同的算法, 本文针对多输入单输出的 Mamdani 算法进行分析.

设 A_j 和 A_j' 是论域 X_j 上模糊集, B_i 和 B_i' 是论域 Y 上的模糊集. 则算法为:

$$u_B(y) = \bigvee_{i=1}^n q(A_i, A_i') \wedge u_{B_i}(y)$$

式中的 $q(A_i, A_i')$ 为 A_i 和 A_i' 的重叠程度, 即

$$q(A_i, A_i') = \bigvee_{x \in X_i} \left[\left(\bigwedge_{j=1}^n u_{A_{ij}}(x_j) \wedge u_{A_{ij}'}(x_j) \right) \right]$$

$$= \bigwedge_{j=1}^n \left[\left(\bigvee_{x \in X_i} u_{A_{ij}}(x_j) \wedge u_{A_{ij}'}(x_j) \right) \right]$$

考虑到不同时刻 K_p 和 K_i 的作用以及它们之间的关系. PI 参数的调整过程中根据 K_p 和 K_i 对系统输出的影响程度以及不同的 e 和 ec 的值, 设计的模糊 PI 参数自整定基本原则如下:

1) 当系统偏差 $|e|$ 较大时, 为了使系统尽快消除偏差, 取较大的 K_p 和 K_i , 以达到快速缩小偏差的目的. 同时为了防止积分饱和, 避免出现较大的超调, 对积分作用加以限制或者去掉积分作用.

2) 当 $|e|$ 和 $|ec|$ 适中时, 为防止系统超调量过大, 取较小的 K_p 和 K_i .

3) 当 $|e|$ 较小时, 为使系统具有较好的稳定性, K_p 和 K_i 的值取大.

根据参数的整定基本原则和专家知识库, 建立合适的模糊规则库, 见表 1. 可用以下模糊条件语句来描述:

if e is A and ec is B then ΔK_p is C , ΔK_i is D .

表 1 模糊控制规则

	e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ec								
NB		PB/	PB/	PM/	PM/	PS/	ZO/	ZO/
		NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM		PB/	PB/	PM/	PS/	PS/	ZO/	NS/
		NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS		PM/	PM/	PM/	PS/	ZO/	NS/	NS/
		NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO		PM/	PM/	PS/	ZO/	NS/	NM/	ZM/
		NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PN
PS		PS/	PS/	ZO/	NS/	NS/	NM/	NM/
		NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM		PS/	ZO/	NS/	NM/	NM/	NM/	NB/
		ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB		ZO/	ZO/	NM/	NM/	NM/	NB/	NB/
		ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

2.3 程序设计

该系统的软件部分由 DSP 的 C 语言程序实现, 主要包括主程序和子程序两部分. 主程序主要完成程序变量的初始化、I/O 端口初始化、捕获当前位置、设置中断, AD 模块的初始化、EV 模块的初始化以及时钟频率的设置等. 中断子程序包括: 位置调节子程序、速度调节子程序和电流调节子程序, 流程图如图 6 所示.

2.4 换相转矩脉动分析及抑制

转矩脉动是直流无刷电机致命的弱点, 这就限制了电机在精密场合的应用, 抑制转矩脉动是电机控制中一个难点. 换相转矩脉动形成原因比较复杂, 影响

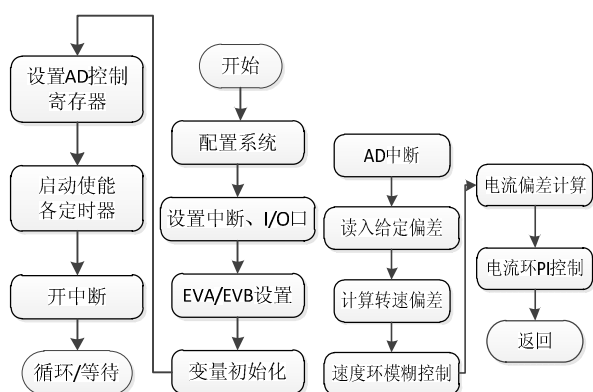


图 6 主程序流程图与中断子程序流程图

因素较多, 也是在电机控制研究最多的一种转矩脉动. 根据反电动势和电流与电磁转矩的关系有:

$$T_e = -2E_m i_c / \omega$$

定义转矩脉动率为:

$$T_r = [(T_{\max} - T_{\min}) / T_N] \times 100\%$$

式中 $T_{\max}$ 为最大电磁转矩, $T_{\min}$ 为最小电磁转矩, T_N 为额定电磁转矩, T_r 为转矩脉动率, 分析得到如下结论:

当 $U_d = 4E_m$ 换相时转矩平稳, 无转矩脉动.

当 $U_d > 4E_m$ 换相转矩脉动率引起转矩增加, 即 $T_r = (U_d - 4E_m) / [2(U_d - E_m)]$.

当 $U_d < 4E_m$ 换相转矩脉动率引起转矩减小, 即 $T_r = (U_d - 4E_m) / (U_d + 2E_m)$.

由以上分析可知, 转矩脉动与反电动势有关, 与稳态电流无关, 而反电动势与电机转速有关, 因此, 在电机低速时, $E_m \approx 0$, 转矩脉动率 $T_r = 50\%$, 当转速很高时, $U_d \approx 2E_m$, 转矩脉动率 $T_r = -50\%$, 当转速继续增高, 在 $U_d = 4E_m$ 时, 转矩脉动为零, 可以得出转矩脉动与转速有关.

现今, 抑制换相转矩脉动较成熟的方法是重叠换相法, 即滞后换相或者超前换相, 超前换相适用于电机高速运行范围内, 即 $U_d < 4E_m$; 滞后换相的适用于电机低速运行范围内, 即 $U_d > 4E_m$. 但该方法选取合适的重叠时间较为困难, 且不能从最大程度上减小转矩脉动. 为此引入定频采样电流调节技术, 形成了采用 PWM 控制的重叠换相法. 在该方法中, 重叠时间无需事先确定, 可由电流调节过程自动调节, 重叠区的大小与逆变器输入电压和电机参数有关^[5].

4 仿真及实验分析

根据所设计控制系统建立仿真实验模型, 仿真参数为: BLDCM(相电阻 0.5Ω , 相电感 0.5mH , 转动惯量 $0.001\text{Kg}\cdot\text{m}^2$, 额定转速 3000r/min , 极对数为 4, 阻尼系数 $0.001\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$), 直流电压 48V , 斩波频率 20KHz . 仿真时空载启动, 在仿真时间到达 0.05s 时, 突加负载, 负载转矩 $4.5\text{N}\cdot\text{m}$; 仿真结果如图 7-图 10 所示.

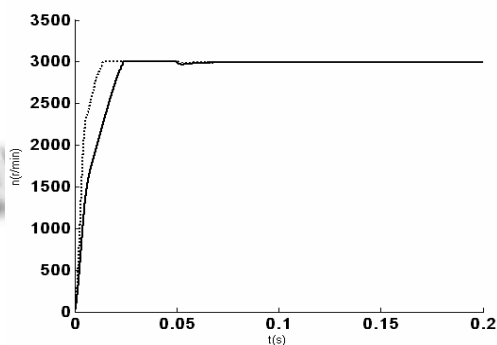


图 7 系统转速仿真曲线

图 7 中实线为传统 PI 控制仿真曲线, 虚线为模糊自整定 PI 控制仿真曲线, 明显可以看出模糊自整定 PI 控制比传统 PI 控制有更小的调节时间. 当在 0.05s 时, 系统突加 4.5 的负载转矩, 模糊自整定 PI 控制下转速下调量要比传统 PI 控制器的转速下调量小, 抗干扰能力强, 这是因为模糊自整定 PI 控制系统能根据系统的状况随时更改调节参数, 以满足系统达到最佳运行状态.

如图 8-图 10 为电机负载运行时转矩脉动曲线图, 从对比中可以看出, 在电机负载运行时, 模糊自整定 PI 控制比传统 PI 控制的转矩脉动幅度小, 转矩波动较平稳, 抗负载干扰能力明显增强, 而在模糊自整定 PI 控制系统加入了 PWM 控制的重叠换相法抑制转矩脉动后, 系统的转矩脉动更小, 运行更加平稳, 这是因为加入转矩脉动抑制措施后, 系统在换相时刻根据电流采样自动调节重叠区的大小, 由此来抑制转矩脉动.

如图 11-13 为电机实际运行中 A 相绕组的电流波形. 电机的参数和仿真时相同, 由于设备的限制, 只能采集到绕组的电流波形, 定性的说明. 可以看到, 电机负载运行过程中, 电流都基本保持方波状态, 传统 PI 控制的在换相时刻有较大的电流脉动, 也会导致转矩的脉动; 模糊自整定 PI 控制的在换相时刻仍有电流脉动, 但脉动的幅度要比传统 PI 控制的小得多; 模糊参数自整定 PI 带转矩脉动抑制的在换相时刻基本消

除了脉动,这就使系统在整个运行过程中更加平稳。

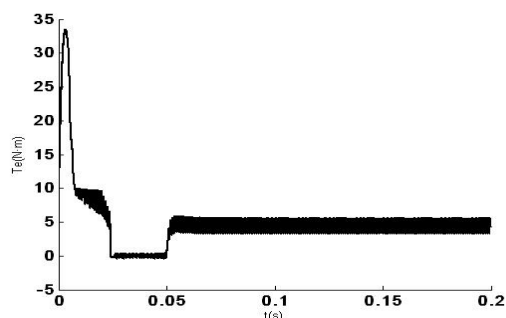


图8 传统PI控制转矩曲线

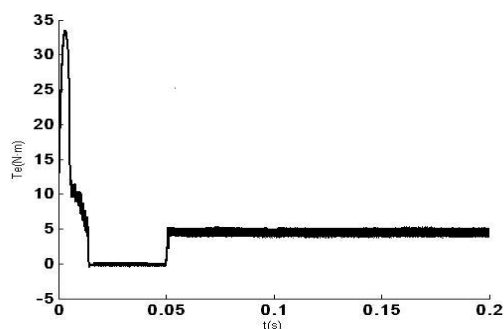


图9 模糊自整定PI控制转矩曲线

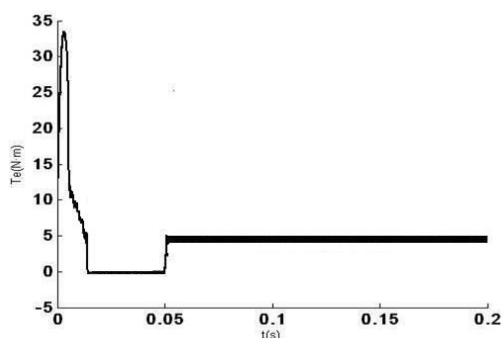


图10 模糊自整定PI带转矩脉动抑制的转矩曲线

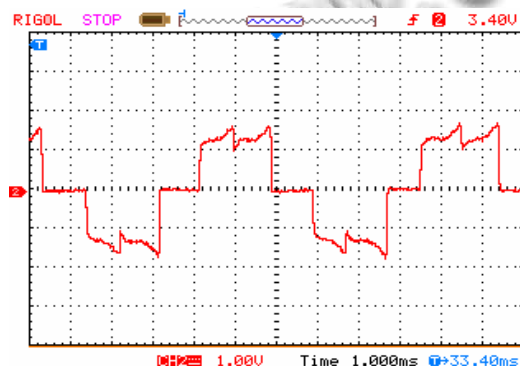


图11 传统PI的A相绕组的电流波形

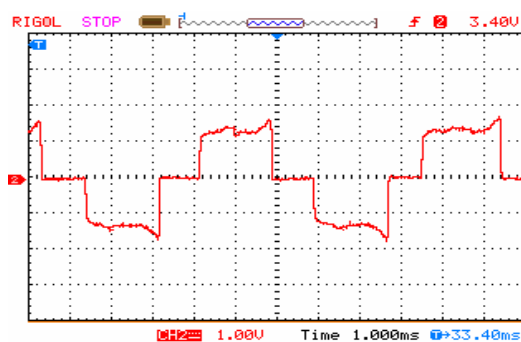


图12 模糊参数自整定PI A相绕组的电流波形

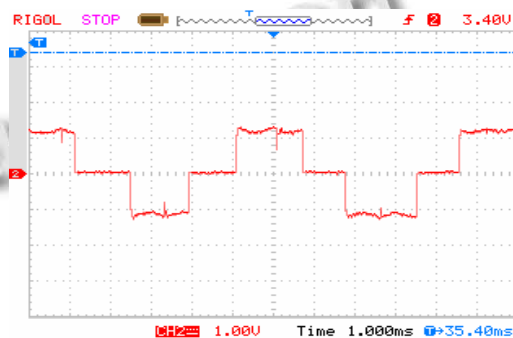


图13 模糊参数自整定PI带转矩脉动抑制的A相绕组的电流波形

5 结论

为使永磁直流无刷电动机的优越性能得到最大体现,解决直流无刷电机的智能控制问题,本文基于TMS320F2812 DSP控制芯片,采用模糊自整定PI算法,完成了永磁直流无刷电动机电流与转速双闭环的智能控制系统设计。仿真结果表明,模糊自整定PI控制比传统PI控制有更小的转速超调量,更小的转矩脉动,抗干扰能力更强。实验结果表明,模糊参数自整定带转矩脉动抑制的控制比传统PI控制具有更优的动、静态性能,控制效果更理想,具有较高应用价值。

参考文献

- 1 邓冠丰.电动车用无刷直流电机控制器的研究.重庆:西南大学,2010.
- 2 厉虹,陈昊.基于TMS320F2812 DSP的无刷直流电机调速系统设计.机床与液压,2009,37(8):382.
- 3 刘刚,王志强,房建成.永磁无刷直流电机控制技术与应用.北京:机械工业出版社,2008.
- 4 夏长亮.无刷直流电机控制系统.北京:科学出版社,2009.
- 5 Bi SY, Zhou ML, Gao ZM. Research on torque ripple modulation for permanent brushless DC motor based on DSP. 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. 2012. 2516-2521.