适应于微型直流电机的模糊 PID 控制器 FPGA 实现

翁 红, 王邦继, 杨 喆, 刘庆想 (西南交通大学,物理科学与技术学院, 四川 成都 610031)

摘要:微型直流电机因其体积尺寸小、响应速度快的特点,在紧凑空间领域被广泛研究。针对经典比例积分微 分(PID)控制器采用单一固定参数对同一位置和不同位置进行控制时,存在因微型直流电机非线性参数时变 特性导致控制性能差异的问题,设计了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的微型直流电机模糊 PID 控制器。 采用单位置闭环控制,应用模糊控制对 PID 参数进行在线实时整定。首先,搭建了微型直流电机控制系统仿真 模型进行仿真验证;其次,利用 Verilog HDL 硬件语言设计了模糊 PID 控制器 IP 核,并对其核心模块进行功能 验证;最后,基于 FPGA 构建了实验平台并进行实验验证。仿真和实验结果均表明,此方案可实时在线整定 PID 参数,在单一位置下,超调量减小了 8.33%,响应时间缩短了 30 ms,具有响应速度快、超调小和鲁棒性强的特 点,验证了此方案的可行性与有效性。

关键词:微型直流电机;现场可编程门阵列;参数自整定

中图分类号:TM381 文献标识码:A 文章编号:1000-100X(2022)09-0050-04

Implementation of Fuzzy PID Controller Based on FPGA for Micro DC Motor

WENG Hong, WANG Bang-ji, YANG Zhe, LIU Qing-xiang

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The micro direct current(DC) motor is studied in tight space extensively for its small size and fast response. However, there is different performance caused by the time-varying nonlinear parameters of the micro DC motor, when traditional proportion integral differential(PID) controllers use a fixed parameter in the same position control and different. A fuzzy adaptive PID controller of micro DC motor is presented based on field programmable gate array(FPGA). The system adopts single position closed loop using fuzzy control to modulate PID parameters constantly.Firstly, a simulation model of micro DC motor is established and approached.Secondly, a fuzzy adaptive PID controller IP core described in Verilog HDL is designed and the kernel module has been verified.Finally, a platform based on FPGA is built and verified by experiments.Both simulation and experimental results show that this scheme can modulate PID parameters in real time.The overshoot is reduced by 8.33% and the response time is reduced by 30 ms at the same position.This scheme has the characteristics of fast response, small overshoot and good robustness, which verifies the feasibility and effectiveness of this scheme.

Keywords: micro direct current motor; field programmable gate array; adaptive parameter

Foundation Project: Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 19-H863-02-ZT-002-021-05)

1 引 言

采用空心杯结构的微型直流电机具有响应速 度快、运行平稳性好等特点,在空间紧凑、响应速 度和控制精度要求高的场合具有广大的应用前 景。近年,模糊控制也广泛应用到电机控制领域 中。国内外学者在应用模糊控制整定 PID 参数方 面进行了广泛研究,结果表明模糊 PID 控制具有

基金项目:国家高技术研究发展 863 计划(19-H863-02-ZT-002-021-05) 定稿日期:2022-03-14 作者简介:翁 红(2000-),女,硕士研究生,研究方向为 电机驱动与控制。 50 超调小、参数自适应调整以及鲁棒性强等优点,可 用于各类电机的转速伺服控制^[1]、飞控系统^[2]以及 电液控制系统等。目前,电机控制算法的实现方式 大多以单片机或数字信号处理器(DSP)为核心进 行软件实现,存在运算速度较慢、抗干扰性不强和 灵活度不高的问题。近年,国内外学者基于 FPCA 进行多轴电机控制器研究,取得了较好效果^[3-4]。

这里采用单位置闭环控制,应用模糊控制对 PID 参数进行实时整定。首先,基于 Matlab 搭建了 控制系统模型进行仿真验证;接着采用模块化思 想,设计了模糊 PID 控制器 IP 核,并进行功能仿 真验证;最后,基于 FPGA 搭建了微型直流电机控 制系统进行实验验证。

2 模糊 PID 控制器 IP 核

针对有位置传感器的微型直流电机进行单位 置闭环控制,设计了如图1所示的模糊 PID 控制 器 IP 核。该 IP 核包含4个主要功能模块:①Avalon 总线接口:使 IP 核可与其他 IP 核模块进行互联, Nios II 软核可通过 Avalon 总线对 IP 核数据参数 进行读写;②QEP 电路:与霍尔传感器连接,通过 对 A,B,Z 信号进行数字滤波、倍频和解码等过程 获取转子位置信息;③脉宽调制(PWM)电路:根 据占空比、方向信号及使能信号产生两路 PWM 波至驱动电路驱动电机运行;④控制算法:实现状 态转换,选择工作模式(固定占空比、经典 PID 和 模糊 PID)以及 PWM 电路使能的功能。



微型直流电机控制器 IP 核中所有模块均采 用 Verilog HDL 硬件语言编写,实现模糊 PID 控制 算法的纯硬件化,可在线实时整定 PID 参数并提 高运算速度和控制精度,有效避免软件实现方式 存在的运算缓慢、易受干扰的问题。

3 核心算法设计

传统控制器常采用经典 PID 算法,具有算法 简单、可靠性高和易于实现的优点。但微型直流电 机系统自身具有多变量非线性的特点,固定不变 的一套 PID 参数难以获得期望的控制性能。因此, 系统采用模糊 PID 控制方法对电机位置进行调 节。根据电机位置误差及误差变化实时在线调整 PID 参数以达到期望的控制效果。

3.1 算法结构

经典 PID 算法的数学表达式为:

 $u(k) = k_{p}e(k) + k_{i} \sum_{j=0} e(j) + k_{d}[e(k) - e(k-1)]$ (1) 式中:u(k)为控制器输出;e(k)为位置误差; k_{p}, k_{i}, k_{d} 分别

为比例、积分和微分系数;k 为采样序列。 模糊控制不依赖于控制对象模型,具有良好 的非线性特性,其根据 e(k)和误差变化率 ec(k), 通过模糊化、模糊推理和解模糊 3 个模块可以自 适应调整 k_p,k_i,k_d 3 个参数。模糊 PID 算法结构如 图 2 所示。



图 2 模糊 PID 控制器结构

Fig. 2 Diagram of fuzzy-PID controller

3.2 模糊 PID 控制器设计

模糊系统采用二维结构,输入变量为位置误 差 e 和位置误差变化 ec,输出变量为 k_p, k_i, k_d 的 增量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_{do}$ 输入输出变量的模糊论域均为 [-6,6],量化等级均为 13 级{-6,-5,-4,-3,-2, -1,0,1,2,3,4,5,6};模糊子集为 7 个,分别为负 大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、 正中(PM)和正大(PB);隶属函数均选取三角函 数。图 3 为模糊量 E 的隶属函数,其余变量的隶 属函数与其相同。



Fig. 3 Membership function of the input variable E

经模糊化后依据经验制定模糊规则,在模糊 控制中,模糊规则的制定从根本上影响了控制性 能。根据现场调试和专家经验,可得出 $\Delta K_P, \Delta K_I$, ΔK_D 的模糊控制规则表如表 1 所示。

表 1 $\Delta K_{\rm P}$, $\Delta K_{\rm I}$, $\Delta K_{\rm D}$ 的模糊控制规则表 Table 1 Table of fuzzy control rule for $\Delta K_{\rm P}$, $\Delta K_{\rm I}$, $\Delta K_{\rm D}$

$\Delta K_{\rm P}$					EC			
$\Delta K_{\rm I}/\Delta K_{\rm D}$		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	PB/	PB/	PM/	PM/	PS/	ZO/	ZO/
		NB/PS	NB/NS	NM/NB	NM/NB	NS/NB	ZO/NM	ZO/PS
	NM	PB/	PB/	PM/	PS/	PS/	ZO/	NS/
		NB/PS	NB/NS	NM/NB	NS/NM	NS/NM	ZO/NS	NS/ZO
	NS	PM/	PM/	PM/	PS/	ZO/	NS/	NS/
		NB/ZO	NM/NS	NS/NM	NS/NM	ZO/NS	PS/NS	PS/ZO
	Z0	PM/	PM/	PS/	ZO/	NS/	NM/	NM/
		NM/ZO	NM/NS	NS/NS	ZO/NS	PS/NS	PM/NS	PM/ZO
	PS	PS/	PS/	ZO/	NS/	NS/	NM/	NM/
		NM/ZO	NS/ZO	Z0/Z0	PS/ZO	PS/ZO	PM/ZO	PB/ZO
	РМ	PS/	Z0/	NS/	NM/	NM/	NM/	NB/
		ZO/PB	ZO/NS	PS/PS	PS/PS	PM/PS	PB/PS	PB/PB
	PB	Z0/	ZO/	NM/	NM/	NM/	NB/	NB/
		Z0/Z0	ZO/PM	PS/PM	PM/PM	PM/PS	PB/PS	PB/PB

由表 1 可制定模糊规则:"if E is NB and EC

is NB, then ΔK_P is PB and ΔK_1 is NB and ΔK_D is 51

PS",即第一条模糊规则,由表 1 共可制定 49 条模 糊规则。模糊推理系统采用 Mamdani 类型,通过确 立的模糊关系结合对应的模糊量 *E*,*EC* 经解模糊 后可以得到输出模糊量。解模糊方式有重心法、最 大隶属度法和加权平均法等。其中,重心法具有较 高的精度且利用了模糊集合的全部信息。即为:

$$X = \sum_{k=1}^{m} u_k \mu_{u}(u_k) \bigg/ \sum_{k=1}^{m} \mu_{u}(u_k)$$
(2)

式中:m 为模糊规则编号;X 为重心法得到的 ΔK_{P} , ΔK_{L} , ΔK_{D} ; u_{k} 为输出模糊集元素; $\mu_{u}(u_{k})$ 为输出模糊集元素对应 的隶属度。

即可通过式(3)得到 PID 参数的实际增量为:

 $\Delta k_{p} = \Delta K_{p} l_{p}, \quad \Delta k_{i} = \Delta K_{l} l_{i}, \quad \Delta k_{d} = \Delta K_{p} l_{d} \quad (3)$ $\exists \mathbf{p} : l_{p}, l_{i} \exists \mathbf{h} \ l_{d} \exists \mathbf{b} \mathsf{U} \mathsf{M} \mathsf{D} \mathsf{F}_{o}.$

最终模糊 PID 算法的数学表达式为:

$$u(k) = (k_{p0} + \Delta k_{p})e(k) + (k_{i0} + \Delta k_{i}) \sum_{j=0}^{n} e(j) + (k_{i0} + \Delta k_{d})[e(k) - e(k-1)]$$
(4)

式中:k_p, k_w, k_w为 Ziegler-Nichols(Z-N)法整定的 PID 系数。

3.3 算法的 FPGA 实现

模糊 PID 算法在图 1 所示的控制算法模块中 实现。控制算法模块的整个流程如图 4 所示。



图 4 控制算法模块流程

Fig. 4 The flowchart of control algorithm

Nios II 软核通过 Avalon 总线对使能寄存器 进行赋值,可实现固定占空比运行、经典 PID 控制 和模糊 PID 控制 3 种模式。在模糊 PID 模式中, $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 的模糊规则通过寄存器存储。一个 完整的模糊 PID 模式运行所需的状态转换流程如 下:读取控制所需的各使能信号、预设位置以及实 际位置等;进行工作模式判断,模糊使能后,计算 e 和 ec; 进入时序控制调度整个模糊控制组成模 块的使能下发和数据交互:e 和 ec 经模糊化后得 到模糊量 E 和 EC,进行隶属度计算;模糊推理求 小和求大两个子模块共同完成对 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 模 糊量赋值和获取解模糊编号功能;采用加权平均 法或最大隶属度法进行解模糊获得 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$, 再叠加 k_{p0}, k_{s0}, k_{s0} ,返回主时序进行控制量计算及 限幅、方向判断、占空比计算和 PWM 使能,完成 后转至空闲状态等待下一个控制周期到来。

模糊控制各模块由时序控制模块进行调度, 共同完成模糊整定功能,其控制流程如图5所示。



图 5 时序控制模块流程

Fig. 5 The flowchart of time-orde

4 仿真及实验分析

4.1 仿真验证

基于 Matlab/Simulink 搭建了微型直流电机单 位置闭环控制系统的仿真模型,位置环分别采用 经典 PID 算法和模糊 PID 算法进行控制。图 6a 为 设定位置为 π rad 时, 经典 PID 控制和模糊 PID 控制的仿真位置曲线。由图可得:模糊 PID 控制相 比于经典 PID 控制, 位置超调从 11.11%减少到 2.78%,响应时间从 60 ms 缩短到 30 ms。图 6b 为 设定位置为 π rad 时, 电机电阻增大 10% 和减小 10%的情况下,两种控制方法的仿真位置对比曲 线。电阻增大 10%的情况下,经典 PID 控制超调增 加了 1.67%, 响应时间增大了 10 ms; 电阻减小 10% 的情况下, 经典 PID 控制超调增加了 11.11%, 响 应时间增大了 15 ms。同样情况下,模糊 PID 控制的 超调量与时间基本不变。图 6c 为设定位置以 1 rad 为梯度突变的位置仿真曲线,设定位置在 0.1 s 和 0.2 s 分别增大 1 rad。通过曲线可以看出:模糊 PID 控制相比经典 PID 控制到达稳态的时间整体缩短 了约10ms,且超调量没有明显增加。



Fig. 6 Simulation position curves

4.2 实验验证

基于 Altera 开发软件(Quartus II)和 Modelsim 软件进行了对图 1 所示的模糊 PID 控制器 IP 核 的设计与验证,以纯硬件的方式实现了模糊 PID 算法。并基于 FPGA 搭建了微型有刷直流电机控 制系统,分别采用经典 PID 控制和模糊 PID 控制 两种控制模式,进行不同设定位置转动的对比实 验。FPGA 芯片采用 Cycolne IV系列产品,芯片型 号为 EP4CE22FI7C6,包含 23K 逻辑资源。实验所 用电机参数如下:额定功率为 1.1 W,额定电压为 6 V,额定电阻为 21.1 Ω,额定电感为 40.1 mH,转 子惯量为 0.12 g·cm²。位置反馈采用 256 线霍尔传 感器,驱动电路电压为 5 V,电流为 0.3 A,驱动芯 片为 DRV8848,PWM 斩波频率为 250 kHz,FPGA 时钟频率为 50 MHz,位置环控制频率为 5 kHz。

图 7a 为设定位置编码为 512 时,经典 PID 控制和模糊 PID 控制的实测位置曲线。由图可知:模糊 PID 控制的超调量从 15.29%降低到 0.96%,减 少了 14.33%;响应时间从 60 ms 缩短到 30 ms,减 少了 30 ms。图 7b 为位置突变时,经典 PID 控制和 模糊 PID 控制的实测位置曲线。通过曲线可以看出,模糊 PID 控制相比经典 PID 控制响应时间缩 短了约 7 ms,基本没有超调量且稳态精度更高。

图 7c 为设定位置以梯度为 170 增加时,经典 PID 控制和模糊 PID 控制的实测位置曲线。从曲 线可以得到:相比于经典 PID 控制,模糊 PID 控制 实现了参数在线实时整定功能,对不同角度的控 制效果更好,在超调量与到达稳态时间方面均有 不同程度的改善。通过仿真和实验结果可知:设定 位置为π rad 时,模糊 PID 控制比经典 PID 控制, 超调量减小约 8.33%,响应时间缩短了约 30 ms; 电机电阻参数变化时,模糊 PID 控制在响应时间 和超调方面具有更好的控制性能,鲁棒性更强;设 定位置突变时,模糊 PID 控制的响应速度快,响应 时间缩短约 7 ms,基本没有超调且稳态精度高;不 同设定位置下,相比于经典 PID 控制,模糊 PID 控 制在不同位置的适应能力更好,能够维持较好的 响应性能。



图 7 实测位置曲线 Fig. 7 Measured position curves

5 结 论

针对机械相控阵列天线中, 微型直流电机采 用经典 PID 控制算法难以实时整定参数以满足其 不同工况下需求快速响应和高定位精度的问题, 采用了模糊 PID 算法, 并基于 FPGA 设计了模糊 PID 控制器 IP 核, 对控制算法进行了纯硬件化实 现。通过仿真和实验分析,基于 FPGA 的微型直流 电机模糊 PID 控制系统在不同设定位置下均具有 良好的动静态性能, 调节时间和超调量均有不同 程度的改善。与经典 PID 控制相比,模糊 PID 控制 能实时在线整定 PID 参数,执行速度快、鲁棒性强 且控制精度高。

参考文献

- [1] 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,
 42(11):129-133.
- [2] Y Zhang, T Yang, C Li, et al. Fuzzy-PID Control for the Position Loop of Aerial Inertially Stabilized Platform [J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 36(3):21-26.
- [3] 于凯平,郭 宏,吴海洋.采用 DSP 和 FPGA 多电机速 度伺服驱动控制平台[J].电机与控制学报,2011,15(9): 39-43.
- [4] 王邦继,刘庆想,周 磊,等.FPGA 在多轴步进电机控制器中的应用[J].电机与控制学报,2012,16(3):78-82,89.