

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.006

基于 FPGA 的无刷直流电机模糊 PI 控制系统设计

周东升, 许高斌, 马渊明

(合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:针对传统软件控制器存在响应速度慢、精度低和抗干扰能力差的问题,文章基于现场可编程门阵列(field programmable gate array,FPGA)实现无刷直流电机(brushless direct current motor,BLDC)模糊 PI 控制系统的设计。该控制系统内部采用全硬件实现方式,提高了系统的运算效率,增强了抗干扰能力;系统采用转速、电流双闭环控制,转速环采用模糊 PI 控制算法,相较于传统 PI 控制算法,提高了响应速度和控制精度。实验结果表明,文章设计的控制系统响应速度快、超调小、抗干扰能力强。

关键词:无刷直流电机(BLDC);矢量控制;模糊控制器;现场可编程门阵列(FPGA)

中图分类号:TP302

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)07-0898-07

Design of fuzzy PI control system for brushless direct current motor based on FPGA

ZHOU Dongsheng, XU Gaobin, MA Yuanming

(School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming at the problems of slow response, low accuracy and poor anti-interference ability when the traditional software controller implements the brushless direct current motor(BLDC) vector control system, this paper presents a design of fuzzy PI control system for BLDC based on field programmable gate array(FPGA). The full hardware implementation method inside the control system improves the computing efficiency of the control system and enhances the anti-interference ability. The control system adopts double closed-loop control of speed and current, and the speed loop adopts fuzzy PI control algorithm, which improves the response speed and control accuracy compared with the traditional PI control algorithm. The experimental results show that the system has fast response, small overshoot and high anti-interference ability.

Key words: brushless direct current motor(BLDC); vector control; fuzzy controller; field programmable gate array(FPGA)

无刷直流电机(brushless direct current motor,BLDC)以电子换向器取代机械换向器,克服了有刷直流电机的先天性缺陷。它既具有直流电机良好的调速性能,又具有交流电机结构简单、无换向火花、运行可靠和易于维护等优点,因此广泛应用于汽车、工业工控、自动化以及航空航天等领域^[1]。理想情况下,BLDC 的反电动势接近梯形波,但由于制造工艺的误差影响,实际很难获得理

想的梯形波波形,尤其是很多中小功率的 BLDC,其反电动势波形更接近于正弦波,因此采用矢量控制这种正弦波控制方法控制 BLDC 能够提高系统的控制性能。

传统控制器使用单片机或数字信号处理(digital signal processing,DSP)芯片作为电机控制芯片,然而软件特性会导致控制器出现运行速度慢、精度低且抗干扰性差的问题^[2]。随着电子

收稿日期:2023-06-07;修回日期:2023-07-11

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB3205903);安徽省发改委研发创新资助项目(JZ2021AFKJ0050)

作者简介:周东升(1996—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

许高斌(1970—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:gbxu@hfut.edu.cn.

设计自动化 (electronic design automation, EDA) 技术的发展,现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 在电机控制领域中得到了越来越广泛的应用^[3]。FPGA 具有内部集成度高、资源丰富、运行速度快、体积小、功耗低等特点,其硬件执行方式能够增强电机控制系统的抗干扰能力,并行处理数据的方式能够提高系统的运算效率。文献^[4-6]将 FPGA 应用于电机控制领域,提高了控制系统的响应速度,但仍存在抗干扰能力不足的问题,这是由 BLDC 非线性、强耦合的特性所导致,控制器内部采用传统的比例积分 (proportion integral, PI) 控制算法难以达到理想的控制效果,而近年来提出的一些高级控制算法如模糊控制^[7-9]、神经网络控制^[10-11]、遗传算法控制^[12-13] 等可以有效改善这个问题。其中模糊控制算法具有自适应性强、实时性高和易于实现等优点,是目前应用最广泛的方法之一。文献^[14-17]设计了基于 FPGA 的 BLDC 电机模糊 PI 控制器;文献^[14]实现了一种高精度 BLDC 电机模糊控制系统,但采用的是方波控制方式,效率不高;文献^[15-17]采用重心法解模糊,重心法忽略了模糊集合的局部信息,并且对异常值敏感,导致

结果偏离实际值。相较于重心法,加权平均法考虑了每个模糊集合的贡献,通过权重进行加权,能够提供较为准确的解模糊结果。

本文基于 FPGA 平台设计 BLDC 电机模糊 PI 控制系统,采用矢量控制方式提高系统的控制性能,对电机转速环采用模糊 PI 控制算法进行优化调节,其中解模糊采用加权平均法以获得精确的输出结果,提高该控制系统的控制精度和响应速度。

1 控制系统结构

本文所设计的 BLDC 电机控制系统结构如图 1 所示,其中虚线框内为通过 FPGA 实现的各个功能模块。控制系统根据所要实现的功能划分为:对 BLDC 电机内置的编码器信息进行解码的解码器模块;对电机电流采样的模拟数字转换器 (analog to digital converter, ADC) 模块;对采样的三相电流进行解耦的坐标变换 (Clark 变换和 Park 变换) 模块;用于转速控制的模糊 PI 控制模块;用于电流控制的传统 PI 控制模块;控制外部逆变器的空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM) 模块。

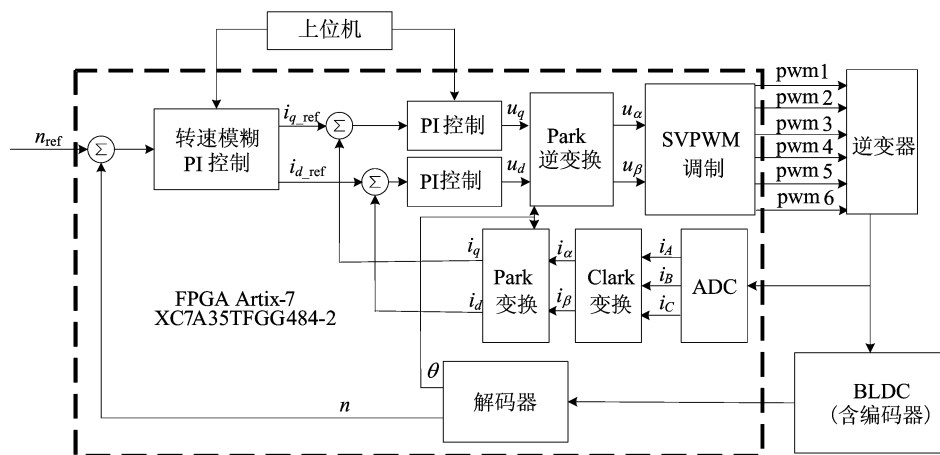


图 1 BLDC 电机控制系统结构图

解码器模块用于获取电机的转速反馈值,反馈值的准确性影响整个系统的动态特性和稳态精度。本文采用 T 测速法计算电机的转速,即测量编码器 2 个脉冲之间的时间间隔来计算转速,通过高频时钟脉冲的个数 M 计算时间间隔,有

$$n = \frac{60}{ZT} = \frac{60f}{ZM} \quad (1)$$

其中: n 为电机转速; Z 为电机每转 1 圈输出的脉冲个数; T 为计数器周期; f 为高频脉冲的频率。

ADC 模块用于采样电机的三相电流,通过串联 2 个采样电阻采样其中的两相电流,另一相电流由基尔霍夫电流定律计算得到。由坐标变换 (Clark 变换和 Park 变换) 模块将三相静止电流转换为两相旋转电流,将这两相电流输入到传统 PI 控制中实现对电流的控制,进而通过 Park 逆变换输出两相电压用以合成空间矢量电压,最后通过 SVPWM 模块控制三相逆变器 3 个 MOS 管的开启和关断,实现对 BLDC 电机的控制。

2 模糊 PI 控制算法设计

本文设计的电机控制系统采用转速、电流双闭环控制,系统的调速性能由速度外环决定,而设计一个高性能的速度控制器既能抑制外环的干扰,又能弥补内环的扰动。传统的 PI 控制方法基于精确的数学模型和准确的系统参数设计,而实际 BLDC 电机存在非线性、参数变化和扰动问题,导致传统 PI 控制器对电机转速的控制难以达到预期效果。

针对该问题,本文采用模糊 PI 控制算法进行电机转速控制优化。模糊控制是将技术人员丰富的控制经验总结成一系列语言控制规则,通过模糊逻辑推理得到控制作用集并作用于被控对象,其核心思想是将误差和误差变化率模糊化,并根据模糊规则进行模糊逻辑推理得到相应的模糊输出,最后将模糊输出进行解模糊,得到具体的控制信号用于调整 PI 控制器的输出。

2.1 模糊 PI 控制器的结构

PI 控制器的性能决定整个系统的动静态性能,传统的 PI 控制公式为:

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) \quad (2)$$

其中: $u(k)$ 为控制器的输出; $e(k)$ 为误差; K_P 、 K_I 分别为比例参数和积分参数; k 为采样序列。

本文设计的 BLDC 电机转速控制结构如图 2 所示。图 2 中,虚线框内为模糊 PI 控制部分,由模糊化、模糊规则库、模糊逻辑推理和解模糊 4 个部分组成。

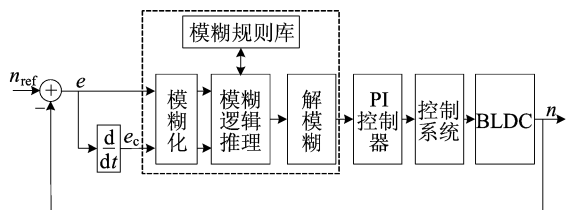


图 2 BLDC 电机转速控制结构

首先,采集电机的实际转速 n ,计算 n 与设定目标转速 n_{ref} 之间的误差 e 和误差变化率 e_c ,作为输入变量输入到模糊控制器中,同时确定模糊输入论域将输入变量模糊化;其次,通过建立模糊规则库并进行模糊逻辑推理得到比例参数 ΔK_P 和积分参数 ΔK_I 的模糊值,再利用确定好的模糊输出论域将模糊值解模糊,得到精确的 ΔK_P 和 ΔK_I ;最后,对 PI 参数 K_P 和 K_I 进行在线实时修

正,从而实现对电机转速控制的优化。

2.2 模糊 PI 控制器的设计

2.2.1 模糊化

模糊化是将输入和输出的连续性变量转化为模糊的隶属度函数以适应非线性的控制环境,该过程包括模糊论域的选择、模糊子集个数的确定和隶属函数的选取。将电机转速的实际值 n 与目标值 n_{ref} 比较得到转速的误差 e 和转速误差变化率 e_c ,并将 e 和 e_c 与量化因子相乘得到模糊 PI 控制的输入变量 E 和 E_C ,量化因子用于调节模糊规则的模糊度和控制输出的速度,具体的数值由控制系统的性能指标决定。选定 E 和 E_C 的模糊论域为 $[-6, 6]$,模糊集合分别为 $\{A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6\}$ 和 $\{B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6\}$,并选取三角形隶属度函数,如图 3 所示。

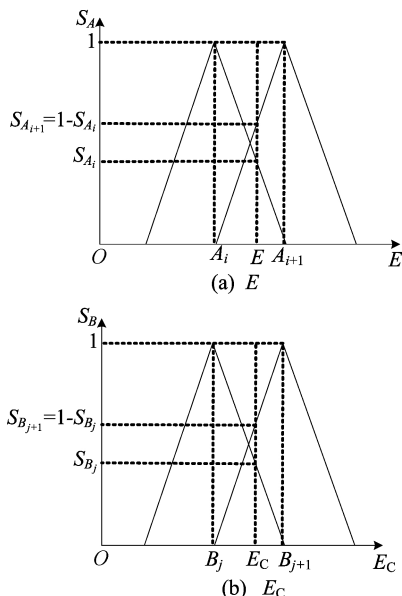


图 3 E 和 E_C 的隶属度

图 3 中,当误差 E 处于 A_i 与 A_{i+1} 之间,误差变化率 E_C 处于 B_j 与 B_{j+1} 之间时,分别计算其隶属度为:

$$\begin{cases} S_{A_i} = \frac{E_{i+1} - E}{2}, & i = 0, 1, 2, 3, 4, 5; \\ S_{A_{i+1}} = 1 - S_{A_i}, & i = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} S_{B_j} = \frac{E_{Cj+1} - E_C}{2}, & j = 0, 1, 2, 3, 4, 5; \\ S_{B_{j+1}} = 1 - S_{B_j}, & j = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (4)$$

2.2.2 模糊规则库

设计合适的模糊控制规则能够使控制系统达到预期的动静态特性,模糊规则库提供基于模糊逻辑的决策和控制机制。当输入变量的模糊集合

确定时,模糊规则库根据条件部分的匹配程度,确定所要采取的控制动作。通过模糊化和模糊推理的计算,并根据规则库中的规则生成模糊的输出结果。

具体的模糊控制规则由专家知识或经验来决定,主要依据为:

1) 当转速误差 E 较大时,需要提高响应速度,选择较小的 K_I 值和较大的 K_P 值以尽快减小误差;当误差 E 较小时, K_P 和 K_I 都应该减小以防止超调过大;而当误差 E 很小时,系统趋于稳定,此时 K_P 应该继续减小而 K_I 应适当增大以消除静差。

2) 当转速误差 E 与误差变化率 E_C 同号时,转速反馈值向偏离目标值方向变化,此时应减小 K_I 使误差朝目标值方向变化;当 E 与 E_C 异号时,转速反馈值向接近目标值方向变化,此时应减小 K_P 以加快控制的动态过程。

根据以上原则制定 ΔK_P 和 ΔK_I 的模糊规则表,见表 1 所列。

表 1 ΔK_P 和 ΔK_I 的模糊规则表

ΔK_P	E_C							
	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	
A_0	6	6	4	4	4	2	0	
A_1	6	4	4	2	2	0	-2	
A_2	4	4	4	2	0	-2	-2	
E	A_3	4	4	2	0	-2	-4	-4
A_4	2	2	0	-2	-2	-4	-4	
A_5	2	0	-2	-4	-4	-4	-4	
A_6	0	-2	-4	-4	-4	-6	-6	

ΔK_I	E_C							
	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	
A_0	-6	-6	-4	-4	-4	-2	0	
A_1	-6	-4	-4	-2	-2	0	2	
A_2	-4	-4	-4	-2	0	2	2	
E	A_3	-4	-4	-2	0	2	4	4
A_4	-2	-2	0	2	2	4	4	
A_5	0	0	2	4	4	4	4	
A_6	0	2	4	4	4	6	6	

模糊化和模糊规则库的硬件设计如图 4 所示。 e 和 e_c 与量化因子 k_1 相乘后得到 E 和 E_C , 如图 5 所示。

根据 E 和 E_C 所处的不同范围,通过有限状态机(finite state machine, FSM)输出不同的 i, j 值和不同的 E_{i+1} 和 E_{Cj+1} 值。由式(3)和式(4)可得,将 E_{i+1} 与 E 相减后右移一位得到 E 的隶属

度,将 E_{Cj+1} 与 E_C 相减后右移一位得到 E_C 的隶属度。同时,FSM 输出的不同 i, j 值对应不同的 A_i 和 B_j ,当 A_i 和 B_j 确定时,由模糊规则库即查找表(look-up table, LUT)根据条件部分的匹配程度以及规则库中的规则,生成模糊的输出结果。

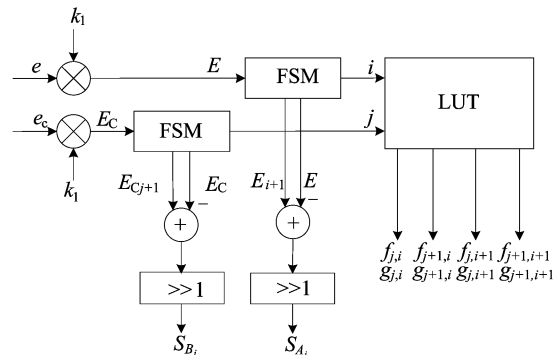


图 4 模糊化和模糊规则库的硬件设计

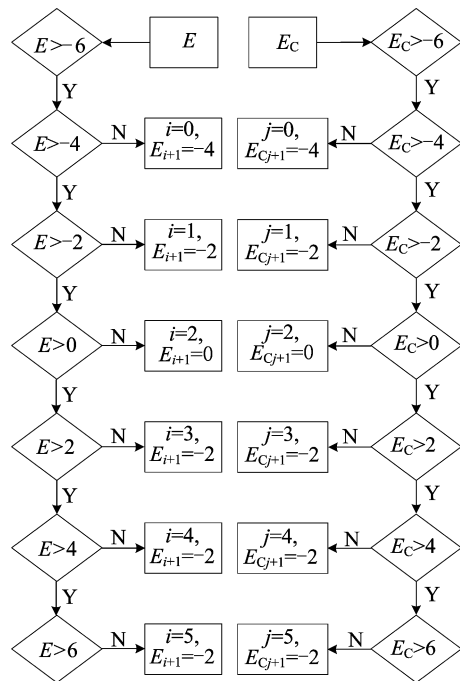


图 5 E 和 E_C 的隶属度选择

2.2.3 模糊逻辑推理和解模糊

模糊逻辑推理是技术人员在控制过程中的经验总结,本文采用乘积推理规则,所使用的语言为 if A and B then C ,其中模糊集 A 为 E 的模糊化, B 为 E_C 的模糊化, C 反映了控制量 ΔK_P 和 ΔK_I 的变化。当 $E=A_i$ 且 $E_C=B_j$ 时, ΔK_P 和 ΔK_I 分别为 $f_{m,n}$ 和 $g_{m,n}$,其中 A_i 和 B_j 是输入模糊量, $f_{m,n}$ 和 $g_{m,n}$ 是通过 LUT 查表所得的值,即表 1 所列,最后通过加权平均法解模糊化。加权平均法将模糊集合的隶属度函数与权重函数相乘,对乘

积进行求和并将结果除以总的隶属度函数面积,得到最终的输出准确值。

根据乘积推理规则和加权平均法解模糊化,当 E 处于 E_i 和 E_{i+1} 之间, E_C 处于 E_{Cj} 和 E_{Cj+1} 之间时有:

$$\Delta K_P = \frac{\sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} f_{m,n}(S_{A_n} S_{B_m})}{\sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} (S_{A_n} S_{B_m})} = \frac{\sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} f_{m,n}(S_{A_n} S_{B_m})}{\sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} (S_{A_n} S_{B_m})} \quad (5)$$

$$\Delta K_I = \frac{\sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} g_{m,n}(S_{A_n} S_{B_m})}{\sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} (S_{A_n} S_{B_m})} = \frac{\sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} g_{m,n}(S_{A_n} S_{B_m})}{\sum_{n=i}^{i+1} \sum_{m=j}^{j+1} (S_{A_n} S_{B_m})} \quad (6)$$

解模糊的硬件设计如图 6 所示。

由式(5)和式(6)可知,首先需要计算 E 和 E_C 的隶属度的乘积,将得到的结果分别与查找表查询到的结果相乘后,再对乘积进行求和,即可得到 ΔK_P 和 ΔK_I 的准确值。

通过解模糊得到 ΔK_P 和 ΔK_I 的准确值后,根据下式得到最终的 K_P 和 K_I :

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + \Delta K_P, \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I \end{cases} \quad (7)$$

其中, K_{P0} 和 K_{I0} 是由传统 PI 算法采用 Ziegler-Nichols 法得到的初始比例系数和积分系数。

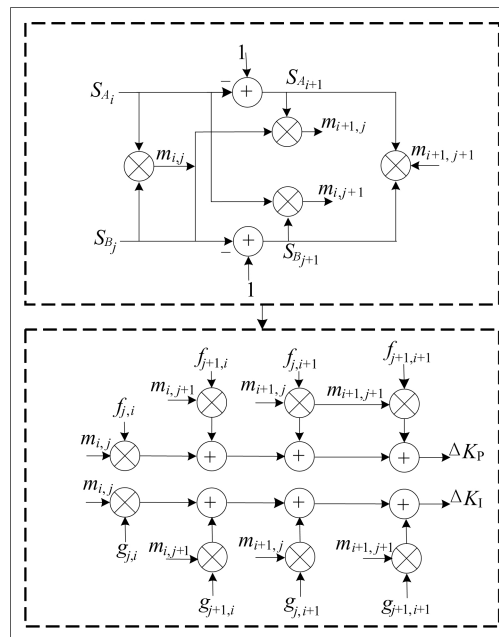


图 6 解模糊的硬件设计

3 仿真和实验分析

3.1 仿真分析

分别对传统 PI 控制和模糊 PI 控制编写设计和仿真代码,仿真结果如图 7 所示。图 7 中: speed_ref 是转速目标值; speed_fdb_fu_pi 是模糊 PI 控制的转速值; speed_fdb1_td_pi 是传统 PI 控制的转速值。仿真结果表明,与传统的 PI 控制相比,模糊 PI 控制能够更快达到目标转速值并且超调量更小。

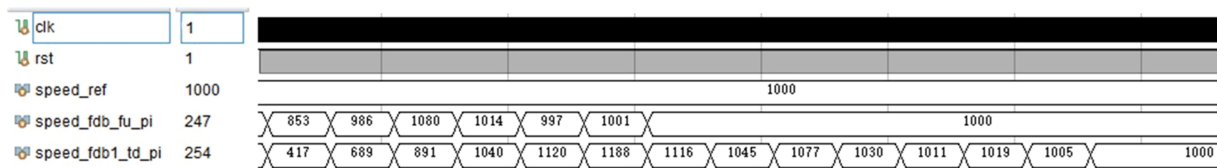


图 7 模糊 PI 控制和传统 PI 控制的电机转速仿真结果

3.2 实验分析

本文基于 FPGA 搭建 BLDC 电机控制系统实验平台,如图 8 所示。实验平台包含 BLDC 电机、FPGA 开发板、电机驱动板、AD 采样卡和开关电源。

实验所选用的电机参数为:额定功率 16 W,额定电压 24 V,额定转速 2 000 r/min,额定扭矩 0.1 N·m,相电阻 14 Ω,相电感 10 mH。

实验所选用的 FPGA 开发板型号为 xc7a35tfgg484-2。

分别采用传统 PI 和模糊 PI 算法对电机在不

同的转速情况下进行对比实验,通过上位机获取电机的实际转速曲线如图 9 所示。

图 9a 所示为电机空载下在给定转速 500~1 000 r/min 时转速突变的实测曲线。从图 9a 可以看出:传统 PI 控制和模糊 PI 控制分别在 1.04 s 和 0.37 s 时达到 500 r/min 的稳定状态;2.50 s 时转速突变到 1 000 r/min,并在 5.68 s 时,转速突变到 500 r/min;传统 PI 控制的调节时间为 1.14 s 和 0.94 s,超调量为 8.9% 和 8.1%;模糊 PI 控制的调节时间为 0.68 s 和 0.76 s,超调量为 4.2% 和 4.0%。

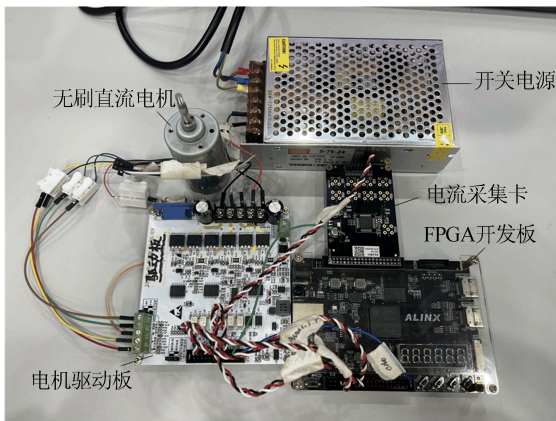
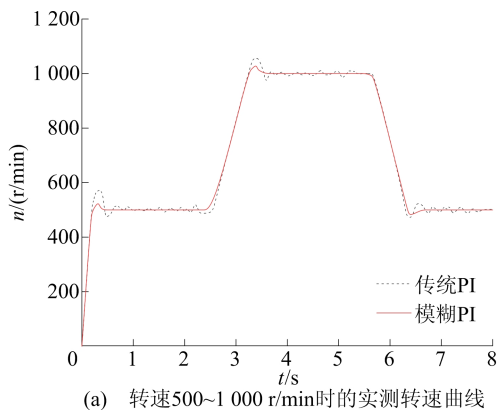
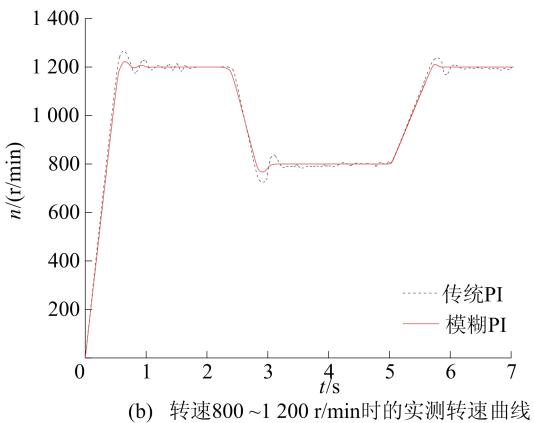


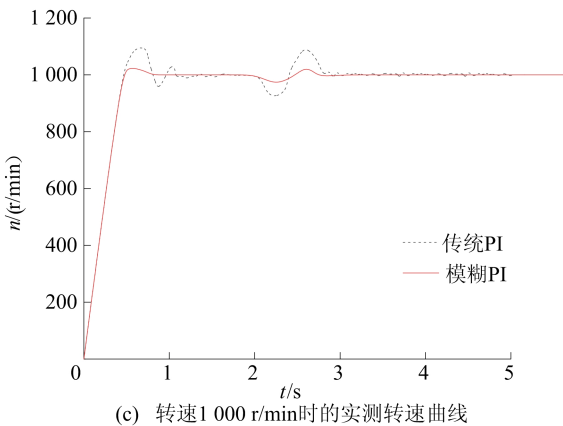
图 8 基于 FPGA 的 BLDC 电机实验平台



(a) 转速 500~1 000 r/min 时的实测转速曲线



(b) 转速 800~1 200 r/min 时的实测转速曲线



(c) 转速 1 000 r/min 时的实测转速曲线

图 9 电机空载下传统 PI 和模糊 PI 实测转速曲线对比

图 9b 所示为电机空载下在给定转速 800~1 200 r/min 时转速突变的实测曲线。从图 9b 可以看出:传统 PI 控制和模糊 PI 控制分别在 1.66 s 和 0.83 s 时达到 1 200 r/min 的稳定状态;2.50 s 时,转速突变到 800 r/min,并在 5.00 s 时,转速突变到 1 200 r/min;传统 PI 控制的调节时间为 1.20 s 和 0.97 s,超调量为 6.9%和 5.1%;模糊 PI 控制的调节时间为 0.73 s 和 0.66 s,超调量为 2.9%和 1.8%。

图 9c 所示为电机在给定转速 1 000 r/min 时电机突加负载的实测转速曲线。从图 9c 可以看出:传统 PI 控制和模糊 PI 控制分别在 1.32 s 和 0.70 s 时达到 1 000 r/min 的稳定状态;在 2.00 s 时电机突加 0.05 N·m 的负载扭矩;传统 PI 控制在 2.83 s 时达到稳态,超调量为 9.4%;模糊 PI 控制在 2.67 s 时达到稳态,超调量为 3.6%。

仿真和实验结果表明:电机转速在不同的区间内突变时,模糊 PI 控制都比传统 PI 控制的调节时间更短、超调更小;电机转速在突加负载时,模糊 PI 控制也具有更好的抗干扰能力,转速波动更小、响应时间更快。

4 结 论

本文基于 FPGA 设计了 BLDC 电机模糊 PI 控制系统,实现了控制器内部的全硬件化,转速环采用了模糊控制与传统 PI 算法相结合的方式,解模糊时采用加权平均法获得精确的解模糊结果。实验结果表明,与传统控制系统相比,基于 FPGA 的 BLDC 电机模糊 PI 控制系统具有更好的动静态特性,在各转速区间都具有更短的调节时间和更小的超调量,应对负载突变时也具有更好的抗干扰能力。

[参 考 文 献]

- [1] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 夏长亮,方红伟. 永磁无刷直流电机及其控制[J]. 电工技术学报,2012,27(3):25-34.
- [3] 朱劲涛. 基于 FPGA 的无刷直流电机控制系统探讨[J]. 通信电源技术,2021,38(4):170-172.
- [4] 周粉利,陈薇,张洪倩,等. 基于 FPGA 的直流无刷电机控制[J]. 电子世界,2018(24):133-134.
- [5] PINDORIYA R M, MISHRA A K, RAJPUROHIT B S, et al. FPGA based digital control technique for bldc motor drive[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). [S. l.]: IEEE,2018:1-5.

(下转第 909 页)

文献[10]加速器采用二维脉动流水串行的方式完成卷积运算,而本文 CNN 加速器采用三维并行的方式完成卷积运算,相较之下性能提升了 9 倍以上;本文 CNN 加速器与文献[7]加速器均采用并行流水架构,不同之处在于本文以加法器代替了全部乘法器来执行卷积运算,相较之下速度提高了 1 倍,使性能提高了 63%;与文献[8]加速器相比,本文 CNN 加速器在没有使用 DSP 资源的前提下达到了与之相近的性能;与文献[9]加速器相比,本文加速器在 DSP 资源的使用量与性能两方面均占优。

3 结 论

本文针对卷积运算优化问题,对卷积计算单元和阵列进行优化,计算单元使用类似 8 选 1 数据选择器和 CSA 加法器代替乘累加完成卷积运算,计算阵列采用了三维并行的方式提高运算速度。在 Zynq 平台上对本文设计的 CNN 加速器整体性能进行了测试,结果表明,在未使用 DSP 资源的情况下,该加速器可以快速的进行卷积运算。

[参 考 文 献]

- [1] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once, unified, real-time object detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2016: 779-788.
- [2] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: an incremental improvement [EB/OL]. (2019-04-08). <https://arxiv.org/abs/>.
- [3] EETHA S, SRUTHI P K, PANT V, et al. TileNET: hardware accelerator for ternary Convolutional Neural Networks [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, 83(11): 104039.
- [4] SHARMA A, SINGH V, RANI A. Implementation of CNN on Zynq based FPGA for real-time object detection[C]//2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). [S. l.]: IEEE, 2019: 1-7.
- [5] WANG W, ZHU M. An efficient and low-cost FPGAs-accelerated CNN-based edge intelligent garbage classification system on Zynq[C]//2021 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). [S. l.]: IEEE, 2021: 1-8.
- [6] ZHANG X X, MA H Z, WEI S Y, et al. Design of day-lily robot recognition system based on ZYNQ[C]//2021 International Conference on Networking, Communications and Information Technology (NetCIT). Manchester: IEEE, 2021: 154-157.
- [7] 秦华标, 曹钦平. 基于 FPGA 的卷积神经网络硬件加速器设计[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(11): 2599-2605.
- [8] SHEN J, YOU H, WANG Z, et al. Towards a uniform template-based architecture for accelerating 2D and 3D CNNs on FPGA[C]//The 2018 ACM/SIGDA International Symposium. [S. l.]: ACM, 2018: 97-106.
- [9] NGUYEN D T, NGUYEN T N, KIM H, et al. A high-throughput and power-efficient FPGA implementation of YOLO CNN for object detection[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2019, 27(8): 1861-1873.
- [10] 胡永阳. 目标检测网络硬件加速研究与实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [1] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once, unified, real-time object detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2016: 779-788.
- [2] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: an incremental improvement [EB/OL]. (2019-04-08). <https://arxiv.org/abs/>.
- [6] PRATIKANTA M, ATANU B, MOUSAM G. FPGA-based real-time implementation of quadral-duty digital-PWM-controlled permanent magnet BLDC drive[J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(3): 1456-1467.
- [7] 肖宜辉, 宋保业, 许琳. 一种无刷直流电机模糊比例积分控制器的设计[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(19): 7750-7755.
- [8] 祝相泉, 黄海龙, 田昊. 无刷直流电机模糊 PID 控制[J]. *辽宁工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(1): 22-25.
- [9] 刘甫, 曾国辉, 黄勃, 等. 基于改进模糊控制的无刷直流电机控制系统[J]. *制造业自动化*, 2021, 43(10): 64-67, 118.
- [10] 孙兆龙, 钱翰宁, 刘振田, 等. 基于 ARM+FPGA 的永磁无刷直流电机控制智能方法[J]. *海军工程大学学报*, 2023, 35(1): 93-98, 105.
- [11] 尹洪桥, 易文俊, 贾芳, 等. 基于单神经神经网络的无刷直流电机控制系统仿真[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(7): 2747-2753.
- [12] 宋丽君, 王燕. 一种无刷直流电机模糊自适应控制方法[J]. *制造技术与机床*, 2022(4): 145-148.
- [13] SAMAHY A A, SHAMSELDIN M A. Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, 9(3): 341-352.
- [14] 韩团军. 高精度无刷直流电机模糊控制系统的研究及 FPGA 实现[J]. *现代电子技术*, 2018, 41(9): 175-178.
- [15] 葛佳航. 基于 FPGA 的直流无刷电机无位置传感器控制系统设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- [16] 卿金晖, 胡黄水, 王宏志. 基于 FPGA 的 BLDCM 模糊 PID 控制器设计[J]. *长春工业大学学报*, 2021, 42(2): 168-174.
- [17] 杨兴旺. 基于 FPGA 的直流电机转速控制研究与设计[D]. 长春: 长春工业大学, 2020.

(责任编辑 胡亚敏)

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 903 页)