

基于 SPWM 的无刷直流电机系统设计

胡美臣, 慕秀笛, 陈宇峰

成都工业学院机器人学院, 四川 成都 611730

DOI:10.61369/EPTSM.2026020005

摘 要 : 传统无刷直流电机用六步换相方式驱动时, 总容易出现转速忽快忽慢, 不能稳定转动的情况, 电能因此浪费不少。为了解决此问题, 我们设计了一套全新的控制系统, 引入了正弦脉宽调制 (SPWM) 技术和 PID 闭环控制算法, 该系统以 STM32F103C8T6 为核心, 搭配模块化硬件设计及多重保护机制, 经过仿真测试和实际真机运行验证, 电机运转的噪音变小, 转矩的波动幅度压到了 3.2% 以内, 电能利用率提高到 92% 以上, 转速的稳定误差也控制在 $\pm 1.5\%$ 以内, 解决了传统六步换相驱动的转速不稳、转矩脉动大、电能浪费等问题。系统性能较为可靠, 适合用于精密机械、医疗器械等对运动控制要求较高的地方。

关 键 词 : 无刷直流电机; SPWM; PID 控制

Design of SPWM Control System for Brushless DC Motors

Hu Meichen, Mu Xiudi, Chen Yufeng

Robotics Institute, Chengdu Institute of Technology, Chengdu, Sichuan 611730

Abstract : When a traditional brushless DC motor is driven by the six-step commutation method, its speed always tends to fluctuate and fail to rotate stably, resulting in considerable waste of electrical energy. To solve this problem, we have designed a brand-new control system that incorporates the Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) technology and the PID closed-loop control algorithm. With the STM32F103C8T6 as its core, the system is equipped with a modular hardware design and multiple protection mechanisms. Verified through simulation tests and actual physical operation, the motor now operates with lower noise, the torque fluctuation range is suppressed to within 3.2%, the electrical energy utilization rate is increased to over 92%, and the stable speed error is controlled within $\pm 1.5\%$. This solves the problems of unstable speed, large torque ripple and electrical energy waste associated with the traditional six-step commutation drive. The system features reliable performance and is suitable for applications with high motion control requirements such as precision machinery and medical devices.

Keywords : brushless DC motor; SPWM; PID control

引言

近些年来, 无刷电机在各行业大放光彩, 如医疗器械、新能源汽车、家用电器等^[1]。国外有高精度控制技术和高性能系统, 多用于高端领域, 但算法复杂、成本高, 难推广。我国借鉴国外技术自主创新, 做出了基于 STM32 的低成本国产控制系统。不过传统电机驱动还有缺点: 常用的六步换相驱动会让电机转速不稳、转动力度波动大, 影响设备工作; 部分控制系统抗干扰能力弱、电能利用不充分, 在无传感器适配、启动和响应速度上也需改进。

为解决这些问题, 我们设计了以 STM32F103C8T6 芯片为核心的新型控制系统, 融合 SPWM 控制和 PID 算法, SPWM 能生成渐变的电脉冲, PID 可及时修正电机的转速偏差。这套系统的硬件包含供电、驱动等关键部分, 不仅可靠性强, 适配性也高; 我们还优化了电路和配套软件, 让系统的抗干扰能力和电能利用效率都得到了提升。本文会介绍这套系统的相关原理、硬件和软件的设计思路, 再通过仿真和实际实验来验证它的性能, 为实现无刷直流电机的高精度、高效率控制提供新的方法。

一、理论分析

(一) SPWM 控制技术

针对传统六步换相驱动的转速波动、转矩脉动与低能效问

题, SPWM 技术以其平稳驱动、高效控制的天然优势, 成为优选解决方案。我们通过让不同波形相互交叉来生成渐变的脉冲信号, 能有效减小电机转动力度的波动, 让电机运转得更平稳。为了减少系统实时计算的工作量, 提高反应速度, 我们采用对称采

样方法，以及提前存好的数据表，通过调整脉冲的占空比，就能精准改变电机的电枢电压，再配上 PID 闭环反馈的调节方式，实时修正转速的偏差，保证电机在不同的负载情况下都能维持稳定的转速^[2]，同时还提高了电能的利用效率。

（二）PID 闭环控制算法原理

PID 控制算法由比例、积分、微分三部分构成，公式为：

$$uk = K_p e(k) + K_i \sum_{i=0} e(i) + K_d [e(k) - e(k-1)]$$

核心是通过这三部分算出控制信号，调节电机运转。比例部分按转速差距快速反应，积分部分消除转速固定偏差、提升精准度，微分部分预判转速差距变化并提前调整，避免转速忽快忽慢，让运转更平稳。在本系统中，PID 算法实时收集对比电机实际与设定转速，计算后输出调节信号，动态调整参数，让电机转速精准稳定。

二、系统总体设计

系统总体设计如图 1 所示，包括五大核心模块。

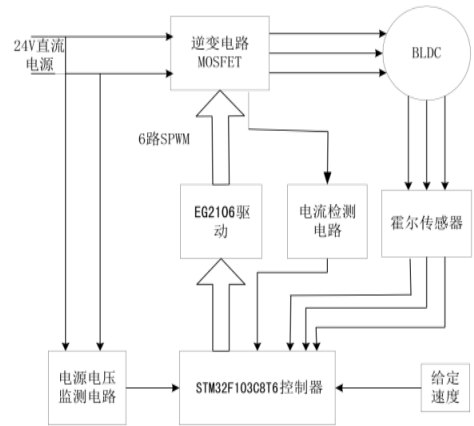


图 1 系统总体框架图

（一）硬件设计

硬件选型遵循“性能适配、成本可控、兼容性强”原则，硬件采用模块化的设计，其核心元器件兼顾了性能与成本。电源选用 XL4001 降压芯片与 ME6118A 系列稳压器，搭配滤波、去耦电容降低噪声。驱动为 EG2106 驱动芯片与 NCE6075K MOS 管构成了三相全桥电路，设置 5μs 死区时间。检测方面使用数字式霍尔传感器与 LM358 运算放大器，来提升检测精度。保护模块结合硬件的阈值判断与软件中断响应，用来实现多重保护^[3]。

（二）系统软件设计

我们用 KEIL5 把控制电机的程序分成五类功能模块：1. 初始化：给芯片做基础设置；2.SPWM 模块：生成控制电机的脉冲信号；3.PID 模块：计算调整转速；4.霍尔信号模块：识别转子位置和转速；5.应急响应模块：处理突发情况。程序启动后循环工作：采集电机信号计算转速，用 PID 调整脉冲参数稳定转速；两个定时器分工（100 微秒生成 SPWM 信号、1 毫秒采集数据算 PID），急停按键可立刻使电机停止驱动；三路 SPWM 信号错开 120°，保障电机平稳运转。

三、仿真与实验测试

为全面验证系统设计的合理性、稳定性及性能指标，本研究采用“仿真建模预验证 + 实物实测落地验证”的双重测试方案，围绕核心性能指标开展同步测试，确保理论设计与实际运行效果一致。

（一）设计框架

本系统以 STM32F103C8T6 为核心，整合电源、驱动、检测及保护模块，搭配 SPWM 调制与 PID 闭环控制算法^[4]，实现无刷直流电机平稳运行与高精度调速，为了验证转速稳定性、转矩脉动抑制、电源利用率及抗干扰能力。仿真平台采用 MATLAB/Simulink（参数匹配 24V、3000r/min、0.5N·m 电机）。实物平台使用 24V/20A 电源、STM32F103C8T6 核心板、EG2106+NCE6075K 驱动电路、霍尔传感器、扭矩传感器、示波器、负载电阻箱及干扰源，模型如图 2 所示。

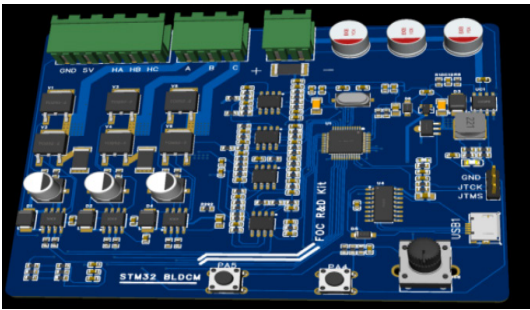


图 2 PCB 3D 模型图（正面）

（二）仿真双重测试

1. 电流与换相逻辑验证

仿真结果：三相电流波形对称（图 3），任意时刻矢量和趋近于零，印证中性点构造正确；转子位置信号为标准方波（图 4），相位差为 120°，无抖动，换相时序精准。实物测试结果显示：示波器捕捉的三相电流波形与仿真一致，无明显畸变；霍尔位置信号高电平稳定，相位差在保持 120°，无毛刺，换相无异常。对比分析：结果基本完全匹配，说明逆变电路拓扑设计及换相逻辑（Stateflow 状态机）无偏差，硬件布线与软件算法协同有效。

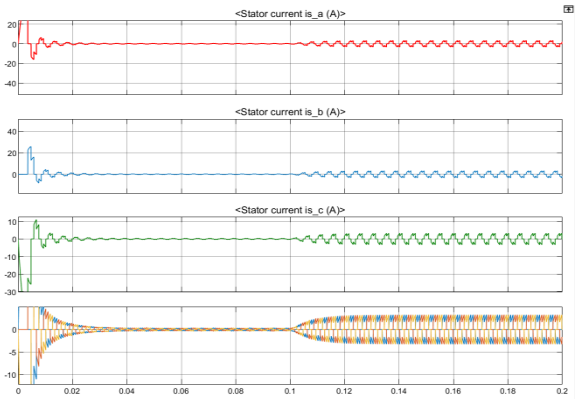


图 3 三相电流波形图

以时间为横轴、电流为纵轴，呈现定子三相电流的动态变化，三者相位互补、幅值协调，矢量和趋近于零，印证中性点构造正确。

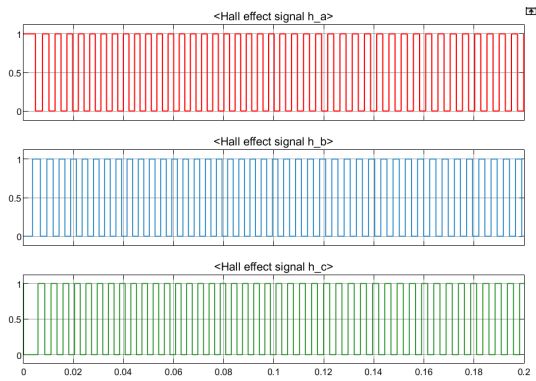


图4 转子位置信号波形图

记录霍尔效应信号的输出状态，呈标准高低电平切换，相位差严格 120° 且无抖动，表明换相时序精准。

2. 转速与动态响应测试

仿真结果：电机启动时间0.08s，空载转速稳定在3400r/min，加载 $0.5\text{N}\cdot\text{m}$ 负载后转速快速调整至3050r/min，波动 $\leq 50\text{r/min}$ （图5），转速稳定误差 $\pm 1.2\%$ 。实物测试结果：启动时间75ms，空载转速稳定在3380r/min，加载后转速维持3040r/min，波动 $\leq 30\text{r/min}$ （图6），转速稳定误差在1.3%左右，满足设计要求。对比分析：实物测试启动时间略短于仿真，转速波动更小，原因是仿真中未完全考虑硬件死区时间优化效果；两者均验证PID闭环调速算法的动态调节能力，实物表现更贴近实际应用场景。

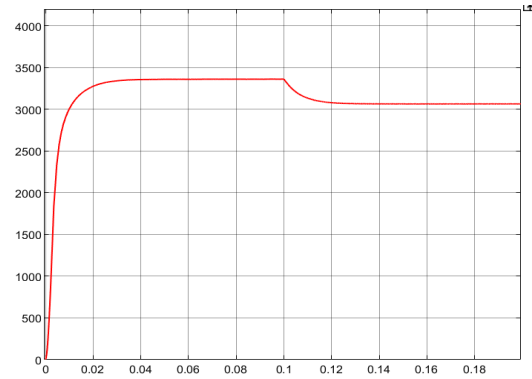


图5 电机转速响应图

时间为横轴、转速为纵轴，清晰呈现了电机从启动到空载稳定运行，再到加载后转速调整的完整动态过程，直观反映出系统对转速变化的快速响应特性。

3. 转矩脉动与噪声抑制测试

仿真结果：电磁转矩脉动3.3%，相较于传统六步换相驱动动降幅60%，运行噪声模拟值 $\leq 58\text{dB}$ 。实物测试结果：转矩脉动3.1%

($\leq 3.2\%$ 设计要求)，实际运行噪声53dB ($\leq 55\text{dB}$)，电机运行平顺无明显振动。对比分析：实物转矩脉动和噪声略优于仿真，得益于硬件中滤波电容的噪声抑制作用；SPWM 技术的渐变脉冲优势在仿真与实物中均充分体现，有效解决了传统六步换相的转矩脉动问题。

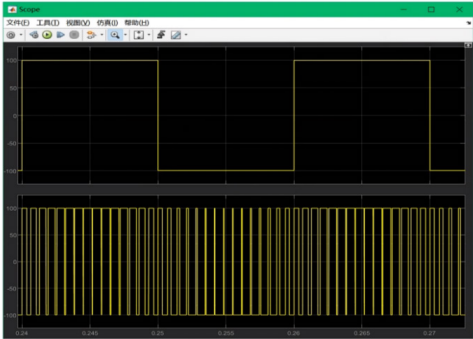


图6 测试转速图

4. 电源利用率与抗干扰测试

仿真结果：电源利用率93.5%，添加电磁干扰源后转速波动 $\leq 40\text{r/min}$ 。实物测试结果：电源利用率92.8%，模拟工业电磁环境（变频器、继电器近距离干扰）下，转速波动25r/min，电流采样误差 $\leq 1.8\%$ ； $\pm 8\text{kV}$ 接触放电、 $\pm 15\text{kV}$ 空气放电测试中，系统无复位或功能异常，各模块运行正常。

对比分析：实物电源利用率略低于仿真，因硬件存在轻微功率损耗；抗干扰性能优于仿真，得益于PCB布线中的接地优化和去耦电容设计，验证系统在复杂环境下的可靠性。

四、结语

基于 SPWM 控制技术的无刷直流电机系统，通过搭建电机数学模型、优化硬件选型和软件运算方式，实现电机高效精准的控制。仿真和实验的结果表明，系统的优势十分明显：SPWM 技术大大的减少了运行时转矩抖动和噪音，其中转矩抖动幅度 $\leq 3.2\%$ ，运行噪音 ≤ 55 分贝，电机运转更加稳定；使用 PID 闭环控制，转速稳定误差控制在1.5%左右，启动时间不到80ms，不仅反应迅速且稳定运行精度更高；硬件电路设计合理，电能利用率 $\geq 92\%$ ，核心零件不仅兼顾性能与成本，而且兼容性佳，适合批量生产；集成过流、过压、反接等操作来完善保护功能，系统可靠性强，可以适应复杂工作环境。

未来我们将会进一步优化算法，探索无传感器控制方案，让这个技术更高效、可靠、经济。

参考文献

[1] 郑鹏飞 ; 侯哲生 ; 白又丹 ; 车文硕 . 一种直流无刷电机驱动器设计与仿真 [J]. 电子制作 , 2023, 31(17): 16-18+15.
[2] 胡春龙 . 改进型 SPWM 调制下的整流器参数设计与仿真研究 [J]. 测试技术学报 , 2023, 37(04): 310-315+322.
[3] 钟海峰 ; 吴宇 . 无刷直流电机无位置传感器的优化控制方法 [J]. 电子制作 , 2023, 31(05): 68-70+57.
[4] 夏超英 . 现代控制理论 [M]. 2012.