

直流电机无速度传感器闭环控制系统设计

赵鹏飞, 俞建定*, 吴 鑫, 骆国庆

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 提出一种利用直流电机运转过程中的反电动势作为反馈参数的控制方案, 采用分时产生 PWM 输出的方法, 实现了直流电机无速度传感器闭环控制系统. 该系统由主控电路、功率驱动电路、采样电路、过流保护电路等模块组成. 经验证, 该系统调速精度高、简单可靠、经济实用, 可供直流电机速度控制系统设计参考.

关键词: 反电动势; 脉宽调制; 直流电机; 闭环控制

中图分类号: TM302

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 02-0059-05

直流电动机作为电机的主要类型之一, 以其良好的启动和调速性能在电力、制造、家电等行业得到广泛应用. 为实现其高精度控制, 电机速度及位置调节通常都引入闭环控制, 而速度反馈作为实现电机闭环控制的一个重要参数, 有着不可或缺的作用. 目前通常采用的是利用霍尔传感器、光电编码器、测速发电机等传感器实现转速的测量和反馈. 显然, 利用此类传感器件比较容易实现直流电机的闭环控制, 但不可避免也存在一定缺陷, 比如增加产品成本、电机本身体积变大、加大安装及维护难度等^[1]. 针对此不足, 笔者采用分时产生脉宽调制(PWM)输出的方法, 利用直流电机运转过程中的反电动势作为速度反馈参数, 对直流电机无速度传感器闭环控制系统进行了研究和设计.

1 原理分析

直流电机是电能和机械能相互转换的旋转电机之一, 既可以作为直流发电机使用, 也可以作为直流电动机使用. 做直流发电机使用时, 将机械能转换为直流电能输出; 做直流电动机时, 则将直流电能转换成机械能输出. 因此, 可以利用电机在运转过程中电源关断时由于惯性而继续运转所产生的与转速成正比的反电动势作为速度反馈信号, 实现直流电机的闭环控制^[1].

脉宽调制调压法利用功率晶体管的开关特性, 通过改变开关元件关断和接通的时间比来改变输出平均电压的大小, 进而控制电机电枢供电的电压, 达到调节转速目的^[2-5]. PWM 输出电压波形如图 1 所示, 计算公式如(1)式. PWM 调速系统中, 在电源电压 U_S 不变的情况下, 电机电枢端电压平均值 U_0 取决于占空比的大小.

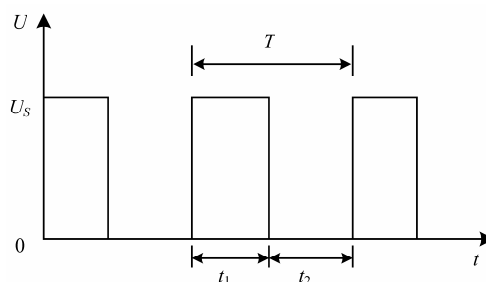


图 1 PWM 输出电压波形

$$U_0 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} U_S = \frac{t_1}{T} U_S = \alpha_T U_S, \quad (1)$$

式中: α_T 为占空比, $0 \leq \alpha_T \leq 1$.

相比 PWM 连续输出方式, 本系统采用分时产生 PWM 波(图 2). 以 10 kHz 的频率产生 PWM 输出, 每个脉冲周期为 100 μ s, 每开启 1000 个周期(时间为 100 ms), PWM 关断 20 个周期(时间为 2 ms). 在 PWM 开启的 100 ms 时间内, 电机转速取决于电枢端平均电压, 即 PWM 占空比; 在 PWM 关闭的 2

收稿日期: 2013-02-01.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

第一作者: 赵鹏飞 (1985—), 男, 河南安阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式系统与应用. E-mail: zhpfnbu@sina.com

*通信作者: 俞建定 (1968—), 男, 浙江宁波人, 高级实验师, 主要研究方向: 嵌入式系统与应用. E-mail: yujianding@nbu.edu.cn

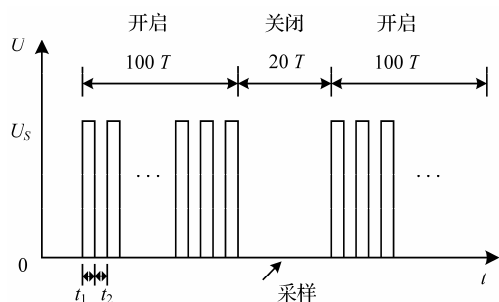


图2 分时 PWM 输出波形

ms 内, 电机电枢端输入电压截止, 直流电机由于惯性继续运转而产生反电动势, 此时通过采样电路采得这个反电动势, 并转换为电机的转速, 从而形成闭环反馈。由于分时间间隔为毫秒级别, 经验证对电机运转平稳度不会造成影响。相比连续 PWM 输出低电平期间反电动势采样^[1]的方式, 该设计使得反电动势波形曲线更趋于平滑, 采样及运算时间充足, 且 PWM 占空比调节可以实现 0%~100%, 稳定性及可靠性更高。根据 PWM 截止的 2 ms 间隔电机运转所产生的反电动势与电枢输入端电势作差, 当此差值越大(反电动势越大)时, 说明电机转速越快, 反之则越慢。控制芯片则根据此速度误差, 调用 PID 控制程序, 对电机转速进行调节。

另外, 由于电机运转所产生的反电动势瞬时值可以反应出电机瞬时转速, 所以根据电机转速和反电动势对应的正比关系, 在时间上积分, 可以推算出电机运转路程, 计算公式如下:

$$S = \int_0^T V_e dt, \quad (2)$$

式中: V_e 表示反电动势对应的转速, t 为积分时间间隔, S 表示转过的路程。

2 硬件模块设计

该设计要求电机能按照给定指令实现软启动、平稳运转、正反转换向, 同时电机对应转速也可以通过运转所产生的反电动势反馈给控制芯片, 便于速度信号显示及上位机控制。硬件部分主要包括控制模块、功率驱动模块、AD 采样模块以及电流保护模块等。

2.1 主控模块

图 3 为主控模块原理图, P1.1 分时产生 PWM 输出, 用于电机转速控制; P3.0、P3.1 分别实现对电源输入端和功率 MOS 管漏极电压采样反馈; P3.3、

P2.1 分别控制 2 个继电器, 单刀双掷继电器 K1 用于控制电源的通断, 双刀双掷继电器 K2 用于控制直流电机的正反转, 用 2 个继电器实现电机的运转及换向。相比 H 桥式电路而言, 此电路设计较简易, 且 K1 断开可切断电机电源, 从而可使电机输入端悬空, 便于实际应用中设备不需要电力拖动时外力转动电机。

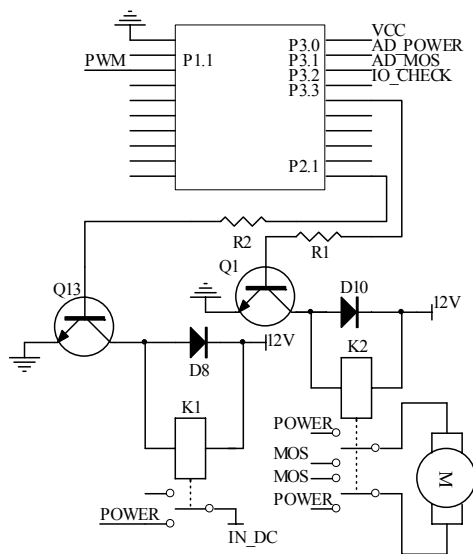


图3 主控模块原理图

2.2 功率驱动模块

图 4 为电机功率驱动部分硬件电路, 在 PWM 驱动直流电机过程中, 利用输入端电压的接通时间和断开时间之比(线圈两端电压的占空比)改变输入平均电压的大小, 从而控制直流电机的转速。

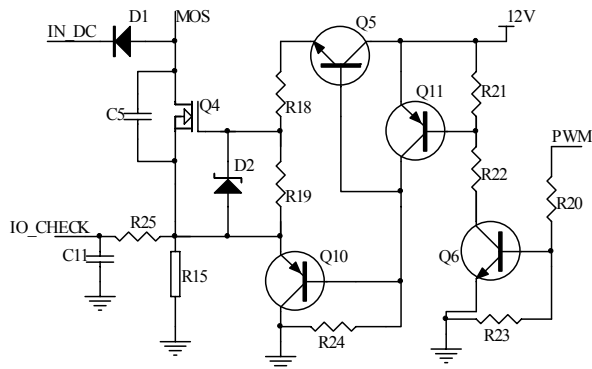


图4 功率驱动模块原理图

图 4 中 D1 采用快恢复二极管 FR608, 用于直流电机过剩反电动势的释放; 稳压二极管 D2 可对 MOS 管起到一定保护作用, 防止栅极电压过高而导致管子烧坏; R15 采用 0.1 Ω 的功率电阻, 做采样

电阻, 电机中电流通过 R15 转换为电压并反馈给 MCU, 实现电机电流的检测控制。

2.3 AD 采样模块

图 5 为反电动势采样模块电路, 分别实现对电源输入 POWER 端和电机输出回路 MOS 端的电压取样。R5、R6 以及 R11、R12 均采用了 10:1 的电阻进行分压。由 POWER 和 MOS 端采到的电压分别通过 R8 和 R9 反馈给 MCU 的 P3.0 和 P3.1。

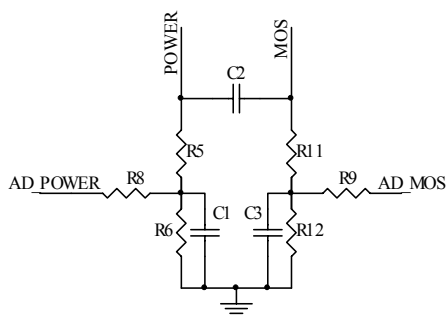


图 5 反电动势 AD 采样模块原理图

2.4 硬件过流保护模块

为增加系统安全性能, 在软件过流保护电路的基础上, 增设硬件过流保护模块, 为电机过流保护实现双保险(图 6)。

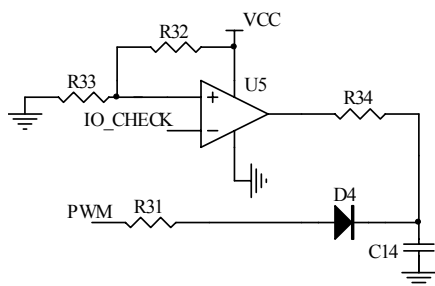


图 6 硬件过流保护模块原理图

图 6 中 LM358 用作电压比较器, 3 脚接基准电压, 2 脚接电机的电流检测电压。对于不同参数的电机, 对 R32、R33 设置不同的电阻值, 可得到不同基准电压。当 IO_CHECK 端电压高于基准电压时, LM358 的比较输出 1 脚即为低电平, 从而 PWM 输出端通过二极管 D4 被直接拉低, 功率 MOS 管截止, 电流断开, 电机停止运转, 从而实现了对直流电机的硬件过流保护。

3 软件设计

该系统方案设定 PWM 输出和截止时间之比为 100:2, PWM 输出和截止时间由中断进行管理, 在

PWM 中断计数 $k=0$ 时产生指定占空比的 PWM 输出, k 随 PWM 输出脉冲个数增加而自增, $k=1000$ 时, PWM 输出截止, $k=1010$ 时, 开启 ADC 采样, $k=1020$ 时, PWM 输出恢复。这里选择在 PWM 输出截止后延迟 10 个周期进行 AD 采样, 以免干扰。PWM 输出开关时间可以根据需求改变设置, 整个 PWM 输出和截止循环进行, 实现电机转速的实时检测。

根据反电动势测出的速度误差, 调用 PID 控制^[6-7]程序进行纠错, PID 调节公式如下:

$$v(x) = kp(v_e) + \frac{1}{T} \int v_e dt + \frac{T_d dv_e}{dt}, \quad (3)$$

式中: v_e 表示输出反馈误差量, 分别对其进行比例、积分、微分调节后得到校正量 $v(x)$ 重新作为输入, 将(3)式进行离散化得到(4)式。

$$v(x) = K_p(v_e) + K_i \sum v_e + K_d(v_e(k) - v_e(k-1)), \quad (4)$$

离散化后(4)式便于用 C 语言实现^[8], 限于篇幅, 在此不再列出程序代码。

3.1 系统总体方案流程

结合流程(图 7)对系统总体方案进行简要阐述。

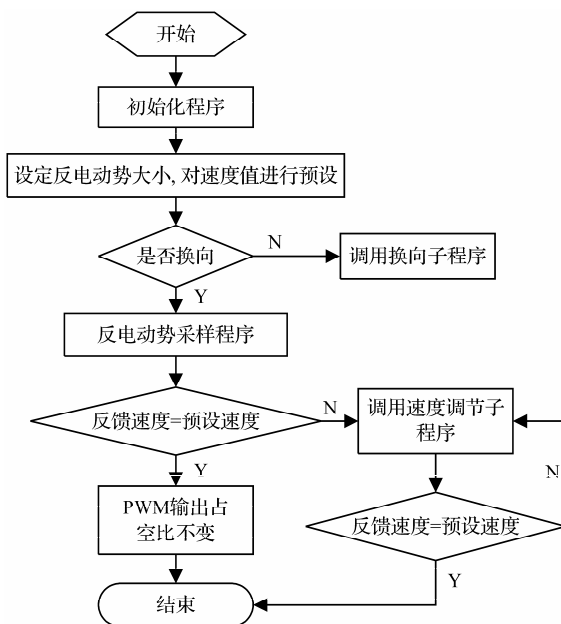


图 7 系统总体流程

(1)系统程序初始化; (2)设定反电动势大小, 即设置反馈量的参考值 v_0 , 由此对电机转速进行预设; (3)换向判断, 由此决定是否调用换向子程序; (4)反电动势反馈的实际运转速度与预设速度比对, 由此决定是否调用速度调节子程序, 此过程循环

检测,对速度进行实时监控;(5)调节电机实际速度按照指定速度平稳运转.

3.2 反电动势采样部分流程

反电动势采样反馈部分引入了 PID 环进行控制,如图 8 所示.

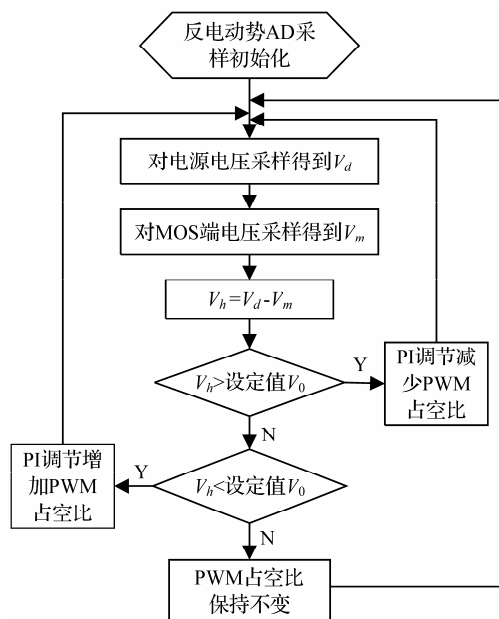


图 8 反电动势采样模块流程

(1)在 PWM 中断计数 $k=1010$ 时,对电机电枢输入端 POWER 和功率 MOS 管漏极进行采样得到 V_d 和 V_m ,并计算 $V_h=|V_d-V_m|$; (2)将 V_h 与预设反电动势参考值 V_0 比较,得出误差 v_e ,并引入 PID 控制器对误差进行校正; (3)PWM 输出按照误差进行调节; (4)AD 数据清零,重新进行下一步采样,整个采样程序构成循环,保证速度的实时监控.

软件部分主要是结合流程图对系统总流程和采样部分流程进行简要描述,突出直流电机反电动势在速度控制中的应用.另外,对于电机控制系统的扩展部分,如键盘、显示、数据通信等设计在文献[9-10]中都有过相关论述,这里不再赘述.

4 实验结果

检测对象采用 DYT-DC 型电机,额定电压 24 V,最高转速 $1800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$.利用示波器测得经分压后转速为 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $1000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时反电动势波形分别如图 9 和图 10 所示.

由于直流电机运转所产生反电动势电势方向和驱动电机运转的输入电势方向相反,在该电路

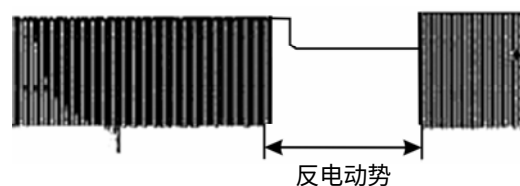


图 9 转速为 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时反电动势波形示意图

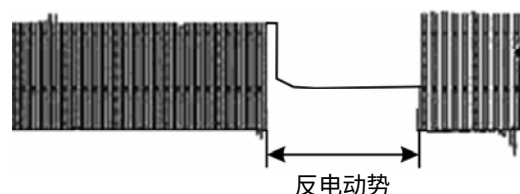


图 10 转速为 $1000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时反电动势波形示意图

表 10 DYT-DC 型直流电机转速与反电动势对应关系

反电动势 差值/V	电机转速百 分比/%	电机实际转 速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
5	9	162
7	19	342
10	30	540
14	41	738
16	50	900
18	60	1080
20	69	1242
22	80	1440
23	90	1620
24	100	1800

设计中,电机停止转动时,测得 MOS 端电势为转速越高,反电动势越大,MOS 端电势被反电动势拉得越低,所以 2 种转速情况下,PWM 输出关闭间隔内,转速为 $1000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时测得电机输入端的电势比 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时低 700 mV .由此可以得出转速与反电动势相关性,进而构成闭环控制系统.

基于该设计,进一步对测试对象 DYT-DC 型电机反电动势及速度对应关系进行了测试验证,对电机转速进行 100 等分,测试结果见表 1.经验证,控制效果可以达到利用测速发电机实现的闭环控制效果.

5 结语

实现直流电机闭环控制的方法很多,文中给出利用直流电动机反电动势作为速度反馈量的闭环控制系统的基本原理和组成,并讨论了其基于 SC91F72B 型单片机的软硬件设计.此方案应用于

跑步机和智能型密集柜的电机控制, 在实际运行中电机加减速及平稳运行都取得了良好效果。

该系统调速范围广、稳速精度高、经济实用, 对那些外部无法安装测速传感装置的直流电机控制系统具有一定的借鉴意义。同时也适用于一般的调速系统以节省外部测速传感器的购置费用或避免其安装维护的麻烦, 在理论和实际应用中都具备一定价值。

参考文献:

- [1] 李莉莉, 李良儿. 基于反电动势测速的直流电动机 PWM 调速系统的设计[J]. 机床与液压, 2009, 37(8): 303-305.
- [2] 虞朝永. 基于单片机的直流电机 PWM 调速系统设计与开发[J]. 煤炭技术, 2011, 30(6):62-63.
- [3] 王苏. 直流电机 PWM 调速研究及单片机控制实现[J]. 机电工程技术, 2008, 37(11):82-84.
- [4] 冯劲梅, 王庆明. 采用单片机的直流电机无线遥控系统[J]. 机电工程, 2010, 27(12):7-10.
- [5] Sun Chunxiang, Mo Bo. Research on an improved PWM control mode of DC motor[C]//2012 International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2012:683-687.
- [6] Praesomboon S, Athaphaisal S, Yimman S, et al. Sensorless speed control of DC servo motor using Kalman filter[C]//ICICS 2009 7th International Conference on Information Communications and Signal Processing, 2009:1-5.
- [7] 王庆明, 孙怡. 基于模糊 PID 控制的直流电机同步控制系统[J]. 机电工程, 2012, 29(5):493-496.
- [8] 赵远东, 方源, 梁路阳. C 语言环境下基于单片机的直流电机调速系统的设计与实现[J]. 计算机与现代化, 2012, 4:45-47.
- [9] 徐海. 基于 PIC 单片机直流电机多速控制器的设计与实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- [10] 陈力, 吕亭亭, 王凯. 基于 SPMC75F2413 单片机的直流双闭环调速系统的设计[J]. 软件, 2011, 32(3):98-100.

Design of Sensor-less Closed-loop Control System of DC Motor

ZHAO Peng-fei, YU Jian-ding*, WU Xin, LUO Guo-qing

(Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In this paper, a new control scheme is proposed for sensor-less closed-loop control based on Back-EMF generated by a running DC motor. The PWM in the design is produced on time-sharing, closed-loop control systems of DC motor without speed sensor. The presented system mainly consists of main control circuit, power driver circuit, sampling circuit, over-current protection circuit. The design is validated by the high speed accuracy system simplicity and reliability, as well as low cost and practicality.

Key words: back-EMF; PWM; DC motor; closed-loop control

(责任编辑 史小丽)