

文章编号: 1671- 251X(2011)03- 0055- 04

# 基于 FPGA 的直流电动机 PWM 控制系统

陆斌, 苏成功

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 针对基于单片机的直流电动机 PWM 控制系统存在精度差、抗干扰能力差的问题, 而基于 DSP 的直流电动机 PWM 控制系统很难满足实时性要求的问题, 提出了一种基于 FPGA 的直流电动机 PWM 控制系统的设计方案; 详细介绍了该系统在直流电动机运行在强加速、弱加速、减速、定速四个状态的实现原理。仿真结果表明, 该系统具有一定的可行性, 可应用于煤矿井下直流电机调速控制系统中。

**关键词:** 矿井; 直流电机; 调速; 直流电动机; PWM; FPGA

**中图分类号:** TD614 **文献标识码:** A

## PWM Control System of DC Motor Based on FPGA

LU Bin, SU Cheng-gong

(School of Electrical and Information Engineering of Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In view of problems of bad precision and anti-interference ability existed in PWM control system of DC motor based on single-chip microcomputer and being difficult to meet with requirement of real-time performance existed in PWM control system of DC motor based on DSP, the paper proposed a design scheme of PWM control system of DC motor based on FPGA. It detailedly introduced implementing principle of the system in four operation states of strong acceleration, weak acceleration, deceleration and constant speed of DC motor. The simulation result showed that the system has certain feasibility and can be applied in speed-regulation control system of DC electric locomotive of coal mine underground.

**Key words:** mine, DC electric locomotive, speed-regulation, DC motor, PWM, FPGA

## 0 引言

目前, 煤矿井下直流电机调速控制系统广泛

采用 PWM 技术, 该技术用于控制直流电动机的转速, 可大大节省能量<sup>[1]</sup>。传统的直流电动机 PWM 控制系统以单片机和 DSP 作为微处理器。基于单片机的直流电动机控制系统利用单片机内部的定时/计数器产生所需的 PWM 信号, 从而实现对直流电动机速度的控制。该控制方法存在输出信号频率

收稿日期: 2010- 11- 26

作者简介: 陆斌(1986- ), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电路与系统。E-mail: lbcl861210@163.com

克服了现有算法存在的一些问题, 提高了处理效率, 对于研发矿用矢量制图系统和解决其它行业类似问题具有一定的参考价值。如何改进折线偏移算法, 使之能够适应各种极限情况, 以及进一步提高多边形区域与折线求交点的效率是该算法的主要优化方向。

参考文献:

- [1] 郭金运, 李瑞国. 煤矿采掘工程平面图自动绘制系统研究[J]. 测绘通报, 2000(8): 11-13.
- [2] 谭正华, 王李管, 陈建宏, 等. 基于中心线的双线巷道自

动生成算法与实现[J]. 计算机应用研究, 2009(11): 4371-4374.

- [3] 魏连江, 郝宪杰, 张宏捷, 等. 矿井通风仿真系统区分并巷层位关系的新方法研究[J]. 金属矿山, 2008, 6(6): 105-107.
- [4] 倪景峰, 刘剑. 矿井通风系统可视化固定宽度巷道双线处理[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(5): 636-638.
- [5] 陈建春. 矢量图形系统开发与编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 337-340.

低、精度差、抗干扰能力差、相位容易产生抖动等缺点,影响了系统的可靠性。基于 DSP 的直流电动机 PWM 控制系统以串行方式传输数据,很难满足实时性要求,其控制性能受到了一定的限制。可编程门阵列器件 FPGA 的出现,给直流电动机的数字控制提供了一种新的方法。FPGA 内部集成了上千万个逻辑门阵列,不仅功能强大、运算速度快、开发过程简单,还易于升级与完善<sup>[2]</sup>。因此,笔者设计了一种基于 FPGA 的直流电动机 PWM 控制系统,该系统不仅可提高电动机的调速精度,而且能够灵活控制煤矿井下直流电机车的速度<sup>[3]</sup>。

## 1 FPGA 的特点

FPGA 与其它 ASIC(专用集成芯片)相比,具有开发周期短、设计制造成本低、可实时在线调试等优点,被广泛应用于产品的初始原型设计和产品的规模生产之中。此外,FPGA 还具有以下特点<sup>[4-5]</sup>:

(1) 随着集成工艺以及相关制造技术的不断发展,FPGA 的单片逻辑门数已经达到上百万门,甚至上千万门,因此,其实现的功能也越来越强大,并可用来实现系统集成。

(2) FPGA 在出厂之前做过完备的测试,设计人员只需通过相关的软硬件环境设计相应的功能即可,因此,FPGA 的资金成本投入较小。

(3) 用户可重复地进行编程、擦写操作,使 FPGA 不断地被升级、优化,从而满足不同外围环境的需要。

(4) FPGA 应用在电力电子设备控制系统中,可大大简化系统结构,具有较高的性价比。

## 2 系统控制原理

基于 FPGA 的直流电动机 PWM 控制系统工作原理如图 1 所示,转速测量装置用于测量直流电动机的运行速度,该速度值经编码电路编码后送入 FPGA 中与目标速度值进行比较来产生 PWM,从而控制直流电动机的运行状态。

该系统设定直流电动机有 4 种状态,分别为强加速、弱加速、减速、定速,下面分别介绍这 4 种状态。

### (1) 强加速状态

根据公式  $T = C_M \Phi I_a$  ( $T$  为直流电动机电磁转矩;  $C_M$  为转矩常数;  $\Phi$  为每极磁通;  $I_a$  为电枢电流),如果想要直流电动机朝某个方向不断加速,只要让  $I_a$  不断朝着某个方向流动,便可以达到直流电动机

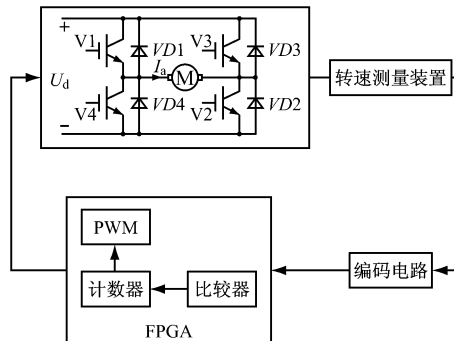


图1 基于FPGA的直流电动机PWM控制系统工作原理

强加速的目的。因此,通过FPGA控制功率管V1和V2保持导通(功率管V1、V2在1个直流电动机运行周期内一直处于导通状态), $I_a$ 就不断地从直流电动机的左边流向右边,直流电动机就会朝一个方向不断加速,理想情况下会加速到额定值。

### (2) 弱加速状态

如果想要直流电动机弱加速运行,只需通过FPGA控制功率管V1、V2在1个直流电动机运行周期内导通的时间 $t_{on}$ 比功率管V3、V4导通的时间 $t_{off}$ 长一些即可。在任何时刻,直流电动机的平均电压为  $U_0 = \frac{U_d(t_{on} - t_{off})}{t_{on} + t_{off}}$ ,此时 $t_{on}$ 的时间比 $t_{off}$ 长, $U_0$ 为正,由于在1个周期中功率管V1、V2有 $t_{off}$ 时间处于关断状态,所以此时直流电动机处于弱加速状态。

### (3) 减速状态

如果想要直流电动机减速运行,只需通过FPGA控制功率管V3和V4保持导通,使电流反向流经直流电动机。在这种状态下, $t_{off} > t_{on}$ 。

### (4) 定速状态

如果想要直流电动机定速运行,只需在FPGA中产生相应的信号,使功率管V1、V2和V3、V4轮流导通,从而可随意改变电流方向。在这种状态下, $t_{on} = t_{off}$ 。

## 3 系统软件设计

图2为经过Quartus II软件编译生成的PWM控制模块(FPGA)元件实例化图,下面分别对其端口和内部定义的信号进行说明。

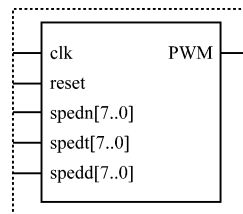


图2 PWM控制模块元件实例化图

PWM 控制模块端口说明:

clk: FPGA 提供的 10 MHz 的时钟信号;

reset: 系统复位信号;

spedn[7..0]: 编码电路检测的直流电动机的速度;

spedt[7..0]: 直流电动机的目标速度;

spedd[7..0]: 直流电动机进入弱加速时的临界速度差;

PWM: 脉宽调制输出。

PWM 控制模块内部定义信号说明:

spedc[7..0]: 用于设定电动机进入弱加速状态的临界值,  $\text{spedc} = \text{spedt} - \text{spedd}$ ;

speeding\_status: 用于产生强加速、弱加速、减速、定速 4 种状态信号, 在系统软件设计中, 将这 4 种状态的值得分别定义为 0、1、2、3。

基于 FPGA 的直流电动机 PWM 控制系统的主程序流程如图 3 所示。

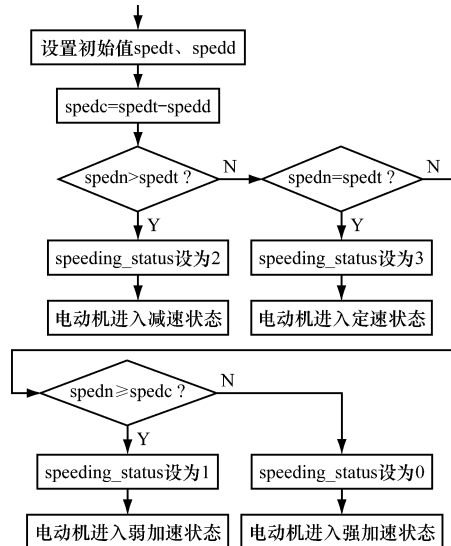


图 3 基于 FPGA 的直流电动机 PWM 控制系统的主程序流程

该程序有 2 个进程: 第一个进程用于判别输入信号, 让 FPGA 知道以何种模式进行速度控制, 如果  $\text{spedn} > \text{spedt}$ , 则进行减速控制; 如果  $\text{spedn} = \text{spedt}$ , 则进行定速控制; 如果  $\text{spedc} \leq \text{spedn} < \text{spedt}$ , 则进行弱加速控制; 如果  $\text{spedn} < \text{spedc}$ , 则进行强加速控制; 第二个进程负责计数与产生 PWM 信号, 当 PWM 值为 1 时, 功率管 V1、V2 导通, 导通时间为  $t_{on}$ , 此时图 1 中的  $I_a$  从直流电动机的左边流向右边; 当 PWM 值为 0 时, 功率管 V3、V4 导通, 导通时间为  $t_{off}$ , 此时图 1 中的  $I_a$  从直流电动机的右边流向左边<sup>[6-7]</sup>。该系统设定的时钟频率  $t_{dk}$  为

10 MHz, 直流电动机的频率为 20 kHz, 设  $k$  为直流电动机运行 1 周所需的时钟周期数,  $k = \frac{10\,000}{20} = 500$ 。由于 PWM 的频率必须与直流电动机的频率相同, 为 20 kHz, 故 PWM 的周期  $kt_{dk}$  为 50  $\mu\text{s}$ 。

强加速控制时,  $t_{on} = kt_{dk} = 50 \mu\text{s}$ , 输出 PWM 值恒为 1, 即功率管 V1、V2 恒导通; 弱加速控制时, 设定  $t_{on} = \frac{4}{5}kt_{dk} = 40 \mu\text{s}$ ,  $t_{off} = \frac{1}{5}kt_{dk} = 10 \mu\text{s}$ , 功率管 V1、V2 导通时间大于功率管 V3、V4 导通时间; 减速控制时, 设定  $t_{on} = \frac{1}{5}kt_{dk} = 10 \mu\text{s}$ ,  $t_{off} = \frac{4}{5}kt_{dk} = 40 \mu\text{s}$ , 即功率管 V1、V2 导通时间小于功率管 V3、V4 导通时间; 定速控制时,  $t_{on} = t_{off} = \frac{1}{2}kt_{dk} = 25 \mu\text{s}$ , 即功率管 V1、V2 导通时间与 V3、V4 导通时间相等, 为电动机运行周期的一半。

#### 4 仿真结果与分析

利用 Quartus II 软件, 在设定直流电动机的目标速度 speedt 和直流电动机进入弱加速时的临界速度差 speedd 的前提下, 给定不同的检测速度 speedn 来对 PWM 控制模块进行仿真。

图 4 为直流电动机进入强加速状态的仿真波形。从图 4 可看出, 此时 speedn 为 16, speedt 为 132, speedd 为 36, speedc 为 96, 则  $\text{spedn} < \text{spedc}$ , 输出 PWM 值恒为 1, speeding\_status 的值为 0, 直流电动机进入强加速状态。

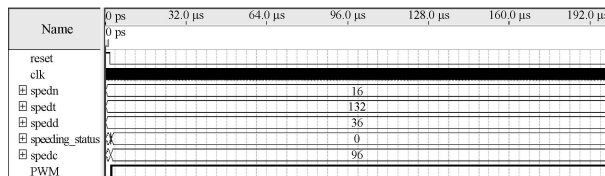


图 4 直流电动机进入强加速状态的仿真波形

图 5 为直流电动机进入弱加速状态的仿真波形。从图 5 可看出, 此时 speedn 为 98, speedt 为 132, speedd 为 36, speedc 为 96, 则  $\text{spedc} < \text{spedn} < \text{spedt}$ , 此时在 1 个 PWM 周期内, 输出 PWM 值恒为 1 的时间维持在 40  $\mu\text{s}$ , 为 0 的时间维持在 10  $\mu\text{s}$ , speeding\_status 的值为 1, 直流电动机进入弱加速状态。

图 6 为直流电动机进入减速状态的仿真波形。从图 6 可看出, 此时 speedn 为 140, speedt 为 132,  $\text{spedn} > \text{spedt}$ , 此时在 1 个 PWM 周期内, 输出 PWM 值恒为 1 的时间维持在 10  $\mu\text{s}$ , 为 0 的时间维

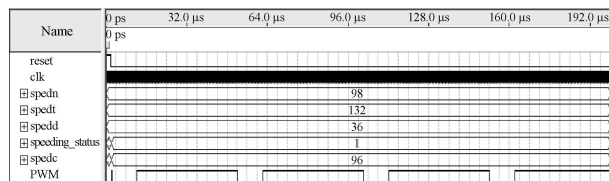


图 5 直流电动机进入弱加速状态的仿真波形

持在  $40 \mu\text{s}$ ,  $\text{speeding\_status}$  的值为 2, 直流电动机进入减速状态。

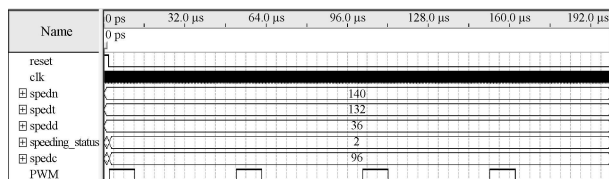


图 6 直流电动机进入减速状态的仿真波形

图 7 为直流电动机进入定速状态的仿真波形。从图 7 可看出, 此时  $\text{speedn}$  为 132,  $\text{speedt}$  为 132,  $\text{speedn} = \text{speedt}$ , 此时在 1 个 PWM 周期内, 输出 PWM 值恒为 1 的时间与 PWM 为 0 的时间相同, 均为  $25 \mu\text{s}$ ,  $\text{speeding\_status}$  的值为 3, 直流电动机进入定速状态。

## 5 结语

介绍了采用基于 FPGA 的 PWM 控制方法控制直流电动机分别运行于强加速、弱加速、减速、定速状态的实现方案。仿真结果验证了该方案的可行

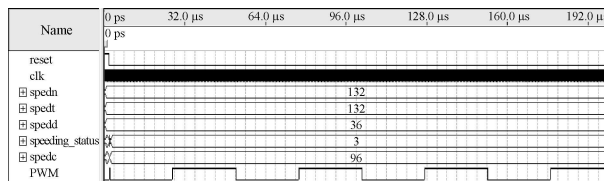


图 7 直流电动机进入定速状态的仿真波形

性。由于 FPGA 具有程序易修改、功能易升级完善、接口设计灵活等特点, 使得基于 FPGA 的直流电动机 PWM 控制系统可广泛应用于煤矿井下直流电机车调速控制系统中。

## 参考文献:

- [1] 林瑞光. 电机与拖动基础[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2010.
- [2] 蒋璇, 臧春华. 数字系统设计与 PLD 应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [3] 孙立志. PWM 与数字化电动机控制技术应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [4] 卢峥, 黄大勇. 基于 FPGA 的电动机微机保护实现方法[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(8): 37-41.
- [5] 张鑫, 牟龙华, 李娜, 等. 基于 FPGA 的电动机保护装置的设计[J]. 电工技术杂志, 2004(11): 86-88, 96.
- [6] 林辉, 王辉. 电力电子技术[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002.
- [7] 王兆安. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

# 力控 ForceCon 产品家族整体解决方案 巡回研讨会会议

以“共话能源环保安全、全面认知蓝色亮点”为主题的力控 ForceCon 产品家族之整体解决方案大型巡回研讨会, 将于 2011 年 3 月在北京、徐州、广州等多个省市相继召开。届时, 将与参会来宾一同分享力控科技在能源、环保、安全等方面的一系列产品特点及成功应用案例, 为您提供高价值的产品信息以及全方面解决方案。

研讨会主要内容为力控 ForceCon 产品家族:

- (1) 力控 ForceCon<sup>hi</sup> ——HMI/SCADA 工业自动化组态软件, 提供了 .net 技术解决方案;
- (2) 力控 pSpace<sup>hi</sup> ——企业级实时历史数据库, 实现企业信息集成的基础平台;
- (3) 力控 pFieldComm<sup>hi</sup> ——通信网关服务器, 提供远程数据处理与数字通信协议转换服务;
- (4) 力控 pSafetyLink<sup>hi</sup> ——工业网络安全防护网关, 真正适用于工业 SCADA 的网络安全防护装置。

会议详细信息请关注: <http://www.sunwayland.com.cn>。

联系人: 北京三维力控科技有限公司市场部 刘春晓

E-mail: liucx@sunwayland.com.cn

电话: 010- 59835588 传真: 010- 59835566