

# 基于 DSP 的地铁制动能量吸收装置设计

曾建军

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 设计了地铁制动能量吸收装置, 装置控制系统采用双微机结构, 上位机为管理机, 下位机控制器采用 DSP 芯片 TMS320LF2407, 充分利用其强大的数据处理功能实现对装置的实时控制, 上、下位机之间的通信采用 RS-485 总线实现。地铁系统的电压、电流等信号经模拟量检测电路送至 DSP, 由其内置 A/D 转换器进行模数转换, 然后根据采集的信号对列车运行状况进行综合判断, 满足吸收条件时装置快速投入工作, 并经 PID 运算输出相应的 PWM 信号, 放大后控制斩波器的通断, 从而稳定网压。为提高系统稳定性, 在 IGBT 驱动放大电路中采用带光电隔离的高压 IGBT 驱动芯片 2SD315AI-33。实验结果表明该装置实时、可靠, 实现了稳定网压的功能。

**关键词:** 吸收装置; DSP; 中断; 斩波器; PID

**中图分类号:** U 260.359; TP 23

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1006-6047(2010)03-0126-03

地铁列车制动时所产生的能量往往不能完全被其他车辆或用电设备吸收, 剩余能量若回馈至电网会造成网压升高, 这对电站设备和车辆的运行不利<sup>[1-2]</sup>。目前常采用在地面牵引变电所内设置再生制动能量吸收装置的方法, 合理解决了网压升高及温升问题, 制动能量吸收装置所采用的吸收方案主要有电阻耗能型、电容储能型、飞轮储能型和逆变回馈型 4 种。目前普遍采用电阻耗能型, 该方案控制简单、工作可靠<sup>[3-4]</sup>。

## 1 装置的工作原理

装置的主要功能是维持网压稳定, 同时具有温度检测功能, 即检测斩波器各开关器件的温度, 当发现温度过高, 控制系统将自动降低吸收功率, 限制温度继续上升, 以保证吸收装置的安全运行。

## 2 装置的硬件设计

根据装置的工作原理及功能设计装置的总体结构, 其框图如图 1 所示, 它主要由主电路和控制系统 2 部分构成。

主电路主要由电动隔离开关、接触器、滤波装置、吸收电阻、斩波器、续流二极管、电流和电压传感器等构成, 其中斩波器采用电力电子器件 IGBT 作为开关组件, 响应速度快<sup>[5]</sup>。

控制系统采用双微机控制结构, 其中上位机为管理机, 提供人机界面, 并负责与 SCADA 系统和下位机进行通信, 上、下位机之间的通信采用 RS-485 总线实现<sup>[6]</sup>; 下位机为装置的核心, 控制器采用 DSP 芯片 TMS320LF2407, 其供电电压 3.3 V, 功耗低, 片

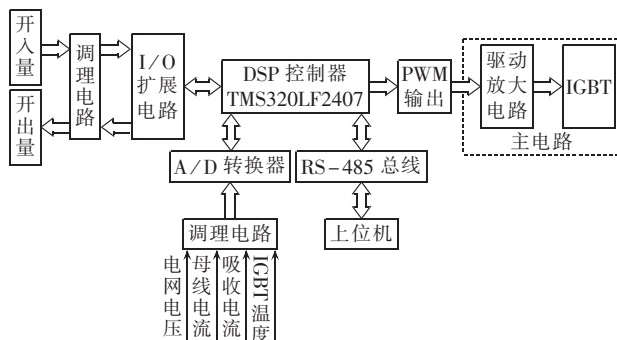


图 1 装置总体结构框图

Fig.1 Overall structure of device

内资源丰富, 指令周期较短, 运算速度较快, 主要负责数据采集、PID 调节运算、多相 PWM 输出、系统通信等工作<sup>[7-9]</sup>。

电网电压、母线电流经电压、电流检测电路, 送入 DSP 进行模数转换后, 首先根据电网电压的变化及母线电流的极性对列车的运行状态进行准确判断, 一旦确认列车处于再生制动状态并需要吸收能量时, 装置做好投入准备工作, 然后将测量出的电网电压与设定值进行比较, 得到电网电压偏差, DSP 根据电网电压偏差, 利用 PID 控制算法计算出控制量, 来改变其 PWM 管脚上输出的 PWM 波形的占空比<sup>[10]</sup>, 该 PWM 信号经驱动放大电路后, 用来控制主电路中斩波器开关管的导通和关断, 从而控制吸收电流大小, 最终实现网压稳定。当车辆由再生制动转为其他工况运行时, 经系统判断, 自动关断各相斩波器, 使装置处于待命状态。

下位机系统主要包含模拟量检测电路、开关量输入/输出电路及 PWM 输出电路等几个部分。

**a. 模拟量检测电路。**其功能是实现电压、电流信号和温度信号的采集工作。电压通过电压传感器、电流通过电流传感器、温度通过温度传感器转换成为

低电压/电流信号,再经由运算放大器组成的信号调理电路生成 0~3.3 V 的电压信号送入 A/D 转换器,将模拟量转换成数字量,放入指定单元,供程序调用。装置主要功能是使电网电压稳定在一定范围内,对测量精度的要求不是很高,因此 A/D 转换器采用 TMS320LF2407 片内的 10 位 A/D,充分利用了 DSP 的内部资源,减小了电路板空间,提高了可靠性,同时减少了装置的开发成本。

**b. 开关量输入/输出电路。**开关量输入/输出电路主要完成状态信号的输入和动作信号的输出。其中,输入信号主要为电动隔离开关、接触器触头、温度开关、热继电器等信号,输出信号主要用于各继电器动作。由于现场开关量信号返回的是 DC 24 V,而 TMS320LF2407 能采集和输出的信号为 0~3.3 V,故需要设计开关量调理电路,同时系统开关量较多,因此对 I/O 进行了扩展。

**c. PWM 输出电路。**系统根据所采集的信号进行 PID 运算,再利用 TMS320LF2407 片内的 EV 模块输出占空比可调 PWM 波,用于控制 IGBT 的通断时间,达到调节装置吸收电流的目的。由于 TMS320LF2407 的 PWM 输出电压就是 I/O 的电压(3.3 V),不能直接驱动 IGBT<sup>[7,11]</sup>,故需设计驱动放大电路;另一方面,主电路为高电压、大电流情况,而控制系统为弱电电路,为了保护 DSP 不受主电路的干扰,提高系统的稳定性,需加入光耦隔离环节,综合考虑采用带光电隔离的高压 IGBT 驱动芯片 2SD315AI-33<sup>[12-14]</sup>。

### 3 装置的软件设计与实现

本装置的软件设计采用模块化设计的思想,具有灵活、便于功能扩展等特点<sup>[15]</sup>,主要包括系统主程序和中断服务子程序 2 部分。为提高开发效率,系统软件采用 C 语言编程,对实时性要求较高的部分采用汇编语言<sup>[16]</sup>。

#### 3.1 主程序

系统主程序流程图如图 2 所示。程序开始运行后,首先对系统的变量、中断及 PWM、ADC 模块等进行初始化;然后进入一个大循环,在循环内执行输入/输出处理、故障处理及通信处理。其中,输入/输出处理的任务是读取系统采集到的装置内部信息,并对信息进行运算处理输出相应的控制信号;故障处理是根据输入量及装置的工作状态进行故障判断,并输出故障状态信息;通信处理的任务是实现与上位机之间的通信,互相交换数据信息。主程序执行过程中,当中断发生时则会自动调用中断服务子程序,中断结束后返回主程序。

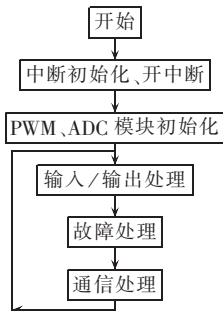


图 2 主程序流程图

Fig.2 Flowchart of main program

#### 3.2 中断服务子程序

中断服务子程序流程图如图 3 所示。

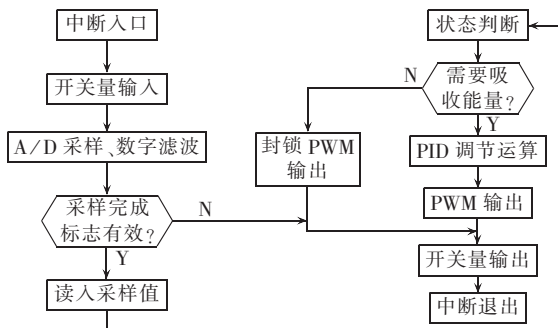


图 3 中断服务子程序流程图

Fig.3 Flowchart of interrupt subroutine

进入中断首先对输入开关量进行处理;再调用 A/D 采样程序,采样后需进行数字滤波以防止干扰;接下来检查采样完成标志是否有效,如果无效则执行开关量输出,之后退出中断,如果有效则读入采样值并将采样完成标志置为无效,然后根据采样值对列车运行状态进行综合判断,若不满足吸收条件则封锁 PWM 输出,装置不投入工作,若需要装置吸收能量,则 PID 调节程序对给定值和网压采样值进行计算,并将计算结果存放于 PID 输出寄存器中,完成 PID 运算后,将 PID 输出寄存器中的值作相应处理后送入 EV 模块,从而产生相应占空比的 PWM 脉冲;最后执行开关量输出并退出中断。

### 4 实验结果及分析

为了验证系统设计方案的正确性,在硬件电路的基础上设计软件并进行整体调试,地铁系统的工作环境为高电压、大电流,为降低成本,采用低电压替代高压环境进行实验,实验结果如图 4、5 所示。

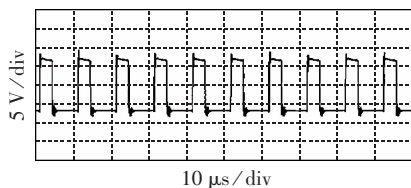


图 4 PWM 波形

Fig.4 Waveform of PWM

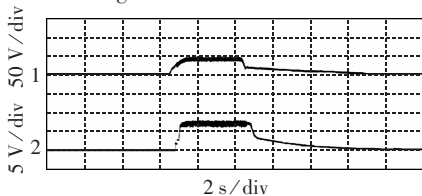


图 5 实验电压波形

Fig.5 Waveform of experimental voltage

图 4 为经驱动放大后的 PWM 波形,占空比为 32.8%;图 5 中 1、2 通道分别为电网电压、吸收电阻两端电压,当电网电压升高至设定值时斩波器开通,吸收电阻吸收能量,电网电压在设定值附近波动,当电网电压下降至一定值时斩波器关断,结果说明装

置能根据网压大小自动控制斩波器的通断,实现网压稳定。

## 5 结论

本文设计了基于 TMS320LF2407 控制的电阻耗能型制动能量吸收装置,采用双微机控制结构,根据网压和母线电流综合判断,满足吸收条件时通过 PID 调节运算,然后产生相应的 PWM 脉冲信号控制斩波器的导通与关断,从而控制吸收电流的大小。实验结果表明,装置能根据列车的工作状况快速、准确地投入,实时调节吸收功率的大小,实现网压稳定。

## 参考文献:

- [1] 张振森. 城市轨道交通车辆[M]. 北京:中国铁道出版社,2000:1-9.
- [2] 王彦峥,苏鹏程. 城市轨道交通再生能量回收技术方案的研究[J]. 电气化铁道,2004(2):37-39.  
WANG Yanzheng, SU Pengcheng. Study on technical plan for recycling of regenerated energy in urban mass transit system[J]. Electric Railway, 2004(2):37-39.
- [3] 李珣. 重庆单轨交通再生制动能量地面吸收装置的应用[J]. 现代城市轨道交通,2005(4):18-21.  
LI Luo. Application of trackside absorbing device of regenerated brake energy for monorail transit in Chongqing[J]. Modern Urban Transit, 2005(4):18-21.
- [4] 孙延焕. 再生制动吸收设备的应用介绍[J]. 电气化铁道,2005(3):40-41.  
SUN Yanhuan. Introduction of application of regenerative braking and absorption equipment[J]. Electric Railway, 2005(3):40-41.
- [5] 曾建军,林知明,郭万岭. 地铁再生制动能量吸收装置[J]. 电气化铁道,2008(6):44-47.  
ZENG Jianjun, LIN Zhiming, GUO Wanling. Regenerating brake energy absorbing device for subway[J]. Electric Railway, 2008(6):44-47.
- [6] 吴雄英,秦开宇,谢兴红. DSP 与单片机之间串行通信的设计与实现[J]. 计算机工程与科学,2009,31(5):132-133.  
WU Xiongying, QIN Kaiyu, XIE Xinghong. Design and implementation of the serial communications between the microcontroller and the DSP[J]. Computer Engineering & Science, 2009, 31(5):132-133.
- [7] 刘和平,严利平,张学锋,等. TMS320LF240x DSP 结构、原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002:15-52.
- [8] 夏清文,韩立,林云生,等. 基于 DSP 的数字 PID 控制在 SPM 中的应用[J]. 微计算机应用,2007,28(5):506-508.  
XIA Qingwen, HAN Li, LIN Yunsheng, et al. Application of digital PID control in the SPM system[J]. Microcomputer Applications, 2007, 28(5):506-508.
- [9] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002:17-26.
- [10] 郭少朋,吴岚军,唐小萍,等. 基于 TMS320F240 的 PID 和 PWM 温度控制[J]. 仪表技术,2004(4):44-45.  
GUO Shaopeng, WU Lanjun, TANG Xiaoping, et al. PID & PWM temperature control based on TMS320F240[J]. Instrumentation Technology, 2004(4):44-45.
- [11] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社,2002:33-40.
- [12] 孙稚,孙梅生,王磊. 大功率 IGBT 驱动模块 2SD315A 特性及其应用[J]. 电力电子技术,2002,36(6):46-48.  
SUN Zhi, SUN Meisheng, WANG Lei. Character and application of a power IGBT drive module 2SD315A[J]. Power Electronics, 2002, 36(6):46-48.
- [13] 孙强,陶健. 新型 IGBT 集成驱动模块 2SD315A 应用研究[J]. 现代电力,2003,20(3):79-83.  
SUN Qiang, TAO Jian. Study on a new type hybrid IC (2SD315A) for IGBT drive and protection[J]. Modern Electric Power, 2003, 20(3):79-83.
- [14] 卫三民,李发海. 一种大功率 IGBT 实用驱动及保护电路[J]. 清华大学学报,2001,41(9):55-58.  
WEI Sanmin, LI Fahai. High power IGBT drive and protection circuit[J]. Journal of Tsinghua University, 2001, 41(9):55-58.
- [15] 刘和平,王维俊,江渝,等. TMS320LF240x DSP C 语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002:273-281.
- [16] 刘旭东,亢海伟,周淑静,等. TMS320LF240x DSP 汇编语言与 C 语言的混合编程[J]. 电测与仪表,2004,41(4):31-33.  
LIU Xudong, KANG Haiwei, ZHOU Shujing, et al. Mixed programming TMS320LF240x DSP with C language and assemble language[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(4):31-33.

(责任编辑:李玲)

## 作者简介:

曾建军(1982-),男,江西新干人,助教,硕士,研究方向为交通信息工程及控制(E-mail:jjzeng@4y.com.cn)。

## Design of metro braking energy absorption device based on DSP

ZENG Jianjun

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** A metro braking energy absorption device is designed. Its control system adopts dual-processor architecture: upper management computer and lower controller. The powerful processing function of the lower controller, DSP TMS320LF2407, is fully used to carry out the real-time control of the device. The communication between two processors is implemented with RS-485 bus. The voltage and current signals of metro system are inputted from analogue detection circuit to DSP and converted by its built-in ADC, based on which the running condition of train is evaluated. When the absorption condition is met, the device is put into operation, and after PID calculation, the corresponding PWM signals are outputted via amplifier to control the chopper for stabilizing the supply voltage. The driving chip 2SD315AI-33 with optoelectronic isolation is used for high-voltage IGBT to enhance the system stability. Experimental results show that the device is reliable and stabilizes the supply voltage in real time.

This work is supported by the Research Fund of East China Jiaotong University(08DQ03).

**Key words:** absorption device; DSP; interruption; chopper; PID