

研  
究  
开  
发基于 CAN 通信的电源并联冗余结构  
在电力机车上的应用研究张玉平<sup>1,2</sup>, 王玉松<sup>2</sup>(1. 成都电子机械高等专科学校, 四川 成都 610031;  
2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

作者简介: 张玉平 (1976-), 男, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向为载运工具智能控制、列车通信网络。

**摘要:** 以电力机车 110 V 电源为研究背景, 利用 TI 公司的数字信号处理芯片 TMS320F2812 作为主控制器件, 采用电压外环、电流内环的双闭环控制策略, 通过 CAN 总线进行信息传输, 用软件编程的方式实现各个并联模块的智能均流。试验证明, 电源带载运行稳定, 均流效果好。

**关键词:** 并联冗余; 均流; DSP; 双闭环控制; CAN 总线; 电力机车

**中图分类号:** U264.5\*6; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)01-0024-04

Application Research of Parallel Redundancy Structure  
of the Power on Electric Locomotive Based on CANZHANG Yu-ping<sup>1</sup>, WANG Yu-song<sup>2</sup>

(1. Chengdu Electromechanical College, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** This paper researched the 110V power supply for electric locomotive, which used TI's TMS320F2812 digital signal processing chip as the CPU and adopts the double closed-loop controlling (voltage loop outside, current loop inside). The message were transferred through the CAN bus and intelligent current-sharing of the parallel modules had been realized by using the software. The experiments show that the power with load run stably and current-sharing effects is well.

**Key words:** parallel redundancy; current-sharing; DSP; double closed-loop control; CAN bus; electric locomotive

## 0 引言

电力机车 110 V 电源是电力机车控制系统的供电电源, 其输入电压额定值为 AC 396 V, 输出电压额定值为 DC 110 V, 输出额定功率为 6 kW。其中输入电压是接电力机车牵引变压器二次绕组输出, 由于受到机车供电网压 (25 kV) 波动的影响, 会造成 110 V 电源的输入电压发生波动, 其变化范围大 (277~495 V), 谐波干扰大, 污染严重。以往的 110 V 电源采用晶闸管相控调压方式, 输出电压精度和转换效率低, 体积庞大, 质量大, 不利于电力机车空间的有效利用和减小电力机车整车的重量<sup>[1-2]</sup>。同时, 由于电源的控制系统采用模拟分立元件进行设计, 造成了系统的控制精度不高, 实际运行过程中的故障率也较高。

目前, 国内先进的高速电力机车 110 V 直流电源已

经大量采用了 IGBT 或者 IPM 作为主功率器件进行设计, 提高了转换效率, 减小了体积和质量。国外动车组已经实现了全数字化设计, 稳压精度高, 功能强大。本文采用 TI 公司的 TMS320F2812 数字信号处理芯片作为 CPU<sup>[3-4]</sup>, 以分布式模块化的设计思路, 利用电源并联技术增大电源的输出功率, 通过 CAN 总线传输各种信息<sup>[5]</sup>, 实现并联模块的均流。

## 1 系统结构及工作原理

电力机车 110 V 电源的主电路结构如图 1 所示, 由牵引变压器二次绕组输出的交流电压首先通过 EMI 电磁干扰滤波器后送入一次整流滤波电路中, 一次整流滤波电路采用全波整流方式, 将交流电压转换成直流电压。然后通过高频逆变器进行斩波, 转换成高频脉冲方波电压信号, 通过主功率变压器进行降压处理后再从二次整流滤波电路中输出 110 V 直流电压信号。

收稿日期: 2009-11-27; 收修改稿日期: 2010-08-01

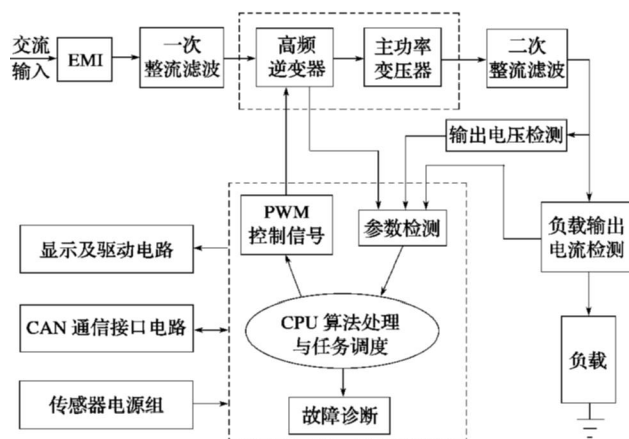


图1 电力机车110 V主电路结构原理框图

在主电路的设计中,EMI选用S120-50GS型滤波器,用于防止电网和电源之间的谐波干扰。如图2所示,一次整流滤波选取了2组110 A、1 600 V的整流二极管和4个大电容构成全波整流电路,进行AC/DC变换。高频逆变器选用日本三菱公司的PM25CLA120智能功率器件IPM,工作频率为20 kHz,将直流转换成脉动交流。为了能使系统在较宽输入电压范围内都能得到110 V的稳压输出,必须对IPM的开启范围进行实时调节控制。同时,由于IPM内部具有过流、过压、过热等保护电路,提高了整个系统的稳定性。主功率变压器中的磁芯采用非晶材质,绕制成环形结构,通过试验证明,与铁氧体等其他磁芯相比提高了转换效率,降低了系统噪声。二次整流滤波选用了2组型号为DSE12×101-12A的快恢复二极管和电感电容共同组成桥式整流电路,由于快恢复二极管的反向恢复时间较短,耐压值高,从而可以避免在高频条件下因冲击电流过大造成对器件的损害<sup>[6]</sup>。

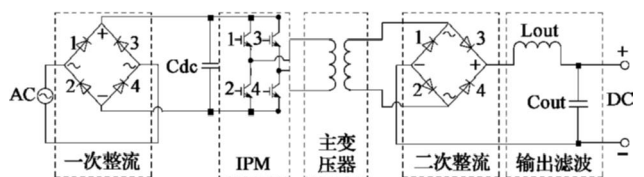


图2 电力机车110 V直流电源主电路原理图

控制电路设计中,采用TI公司的数字信号处理芯片TMS320F2812作为主CPU,通过对电源输出电压和输出电流的检测,及时调整PWM输出控制信号的脉宽,从而保证输出电压的稳定。另外,系统还可以很方便地进行数据储存和下载功能的设计。

根据分布式电源系统(DPS)的设计思路,将电力机车110 V电源的控制部件分为主模块组和从模块组两大部分,如图3所示。主模块组由工作主模块和备用主模块组成,主要完成输入输出电压的检测、显示和故障诊断等功能,并通过CAN总线与从模块进行实时信息交换。从模块组由 $n$ 个AC/DC从模块并联组成,主要完成负荷分担的任务,其中 $n$ 个从模块可以通过软件控制采取同时工作方式或者部分工作另一部分备用的冗余工作方式。

主模块组采用热备用方式进行工作,其切换机理为:工作主模块和备用主模块之间实时传输生命信息,如果备用主模块在100 ms内没有收到工作主模块的生命信息,证明工作主模块出现故障,这时备用主模块自动转换到工作主模块状态,并提示报警信息,原来的工作主模块停止工作。如果工作主模块在100 ms内没有收到备用主模块的生命信息,证明备用主模块出现故障,工作主模块也提示报警信息,说明系统存在故障隐患。同时,如果某一主模块自身检测到故障,也向另一主模块报告故障信息,同时进行切换或故障提示。

从模块组中设置了 $k$ 个工作从模块( $k < n$ ), $n-k$ 个备用从模块。当某个工作从模块发生故障或者电源负载功率增大时,系统将从备用从模块中自动选取一个或多个进入工作从模块组中,以保证整个电源系统的输出功率达到设计要求。为了能够识别故障从模块并自动退出工作状态以及备用从模块转变成工作状态,系统设计了一套热插拔预警机制<sup>[7]</sup>,从而实现电源系统冗余结构的热插拔。

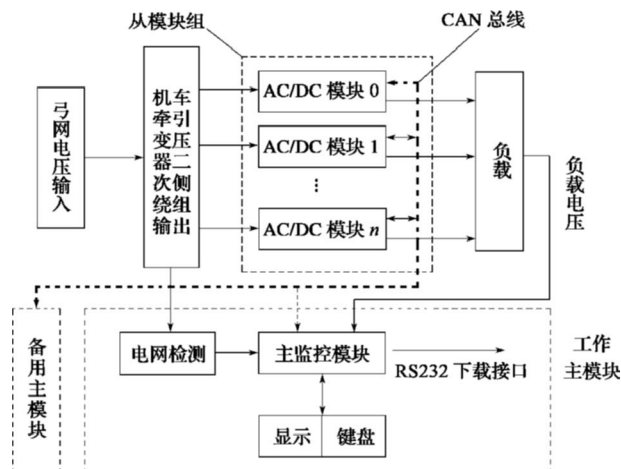


图3 系统主从模块组成原理框图

## 2 系统控制策略

实现从模块组中 $n$ 个AC/DC从模块并联均流是系统的关键之一。目前,有关电源并联均流技术的研究很多,比如输出阻抗法、主从设置法、平均电流自动均流法等,这些方法大都采用硬件电路来实现。本文利用DSP数字信号处理芯片作为核心控制器件,通过软件编程实现 $n$ 个AC/DC从模块的并联均流。由于DSP处理器的高速性能(工作频率为150 MHz),其反应速度不亚于均流硬件电路,可以达到系统控制对实时性的要求。同时,通过软件编程可以灵活地实现多种均流方案,便于系统调试。

主控部件DSP通过A/D口和CAN通信口获得输入电压、输出电压、输出电流及平均电流信息,然后进行双闭环调节,输出主功率器件IPM的控制信号PWM。双闭环调节的系统结构如图4所示,其中外环采用电

压调节控制输出电压恒定,内环采用电流调节控制输出均流<sup>[8-9]</sup>。

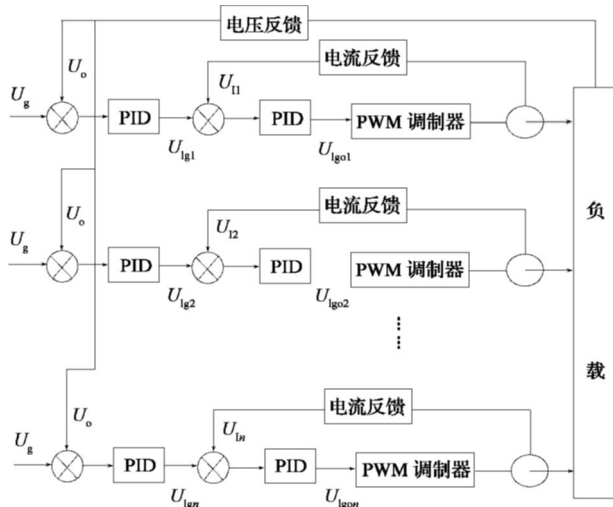


图4 双闭环控制及并联结构

实现均流控制的基本思想是由工作主模块检测出电源的输出电压反馈值 $U_o$ ，通过CAN总线发送给工作从模块组中各个CPU均流运算单元，将 $U_o$ 值与电源设定的输出值 $U_g$ （本电源系统中就是110V）做比较，经过PID调节后输出 $U_{lg}$ ，然后再与由工作从模块通过A/D口检测出的本路输出电流反馈值 $U_i$ 进行比较，最后经过PID调节后输出 $U_{lgo}$ 作为PWM的调节控制信号，调节输出电压的变化，同时也保证了电流跟随，实现均流平衡<sup>[10]</sup>。

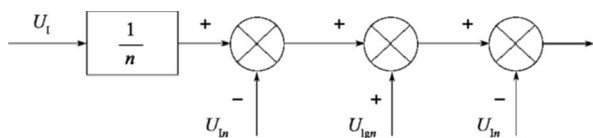


图5 均流补偿原理

在调试的过程中发现由于各个功率模块不可能完全做到一致，从而使得各个功率模块输出的电流值发生了较大的偏差，为了减小这种偏差，增加各个均流功率模块的耦合性，在电流内环中引入了均流补偿，其方法如图5所示。

首先，由工作主模块通过CAN总线收集各个工作从模块的单路工作电流，然后计算工作从模块组的平均电流，并再次通过CAN总线发送给所有的工作从模块，各个工作从模块收到该平均电流后就将它作为本路电流环控制的均流补

偿信号，利用电压PID输出信号、电流反馈信号和均流补偿信号做比较，将比较结果经PID调节后送入PWM调制器中进行电压电流调节，获得了较好的均流效果。

### 3 系统软件设计

根据电力机车110V电源控制策略，利用软件编程来实现各个并联模块的智能均流。工作主模块作为监控模块通过CAN总线通信接收各个工作从模块的输出电流，然后计算出工作从模块组的平均电流作为均流补偿信号发送给各个工作从模块进行电流内环调节。从模块实现均流控制的算法较多，通过实际调试发现，采用增量式PID控制算法，其控制效果较好。数字均流算法的软件流程如图6所示。

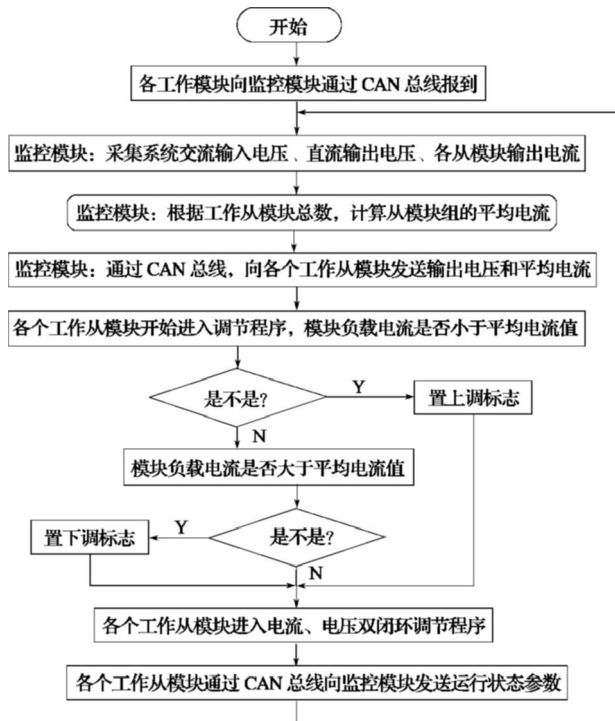


图6 数字均流算法流程图

实现双闭环控制策略和智能均流的主程序如下。

```

if (3 == G_Lock.TLock.Lock) // 处于主从模块均解锁状态
{
    OSSchedLock(); // 锁定任务调度
    G_nCnOut = G_nCnOut + fnRegulateVolLoop(1884, G_nIref); // 电压闭环PI调节
    G_nCompen = (INT32S)G_nIout - (INT32S)G_nIvae; // 计算补偿电流
    G_nIout: 负载电流 G_nIvae: 平均电流
    G_nGiveI = G_nCnOut + G_nCompen; // 给定电流 = 电压环PID调节输出 + 补偿电流
    G_nCnIOut = G_nCnIOut + fnRegulateIoLoop(G_nGiveI, G_nIout); // 电流闭环调节
    if (G_nCnIOut > 60000) G_nCnIOut = 60000; // <= 150
    if (G_nCnIOut < 0) G_nCnIOut = 0;
    fnSetMvDelayI(G_nCnIOut/355.0); // 200 (0.5A) -> 3 (angle)
    fnStartEvaPWM(); //
    PWMOUT_OFF; // 高电平为封锁 必须永远为高，否则后级为低，直通///
    OSSchedUnlock(); // 解锁任务调度
}

```

4 系统测试结果

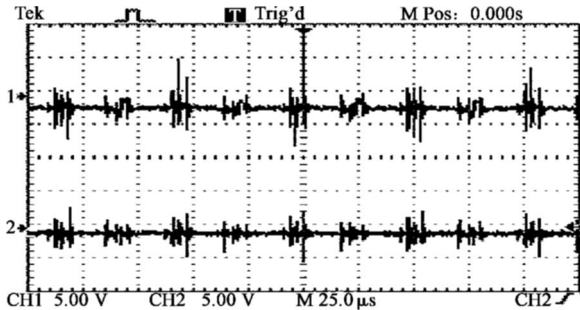
根据系统软硬件设计方案, 本文进行了 2 个阶段试验环境的调测工作。第一阶段, 搭建了单路工作从模块硬件结构, 通过调试实现了电压外环、电流内环的双闭环控制, 稳压效果好。同时, 定义 CAN 通信数据传输协议, 完成了系统监控任务。第二阶段, 搭建了 2 路工作从模块的并联结构, 通过调试实现了智能均流的策略, 2 路输出均流效果好。

在试验环境下进行带载运行测试, 其输入输出电压及输出并联均流的数据如表 1 所示。

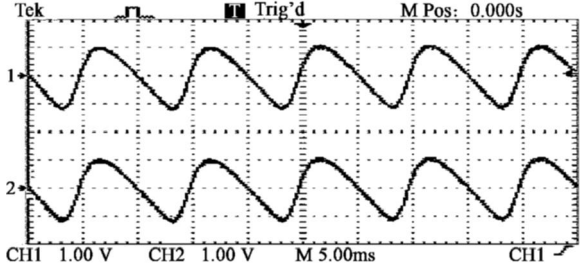
表 1 2 路工作从模块并联运行参数测定

| 输入电压<br>$V_i/V$ | 输出电压<br>$V_o/V$ | 功率模块 1 电流<br>$I_1/A$ | 功率模块 2 电流<br>$I_2/A$ | 平均电流<br>$I_a/A$ | 均流误差<br>百分比 / % |
|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| 278             | 109.55          | 17.16                | 16.37                | 16.77           | 4.7             |
| 326             | 108.98          | 16.98                | 16.21                | 16.60           | 4.6             |
| 363             | 108.52          | 17.10                | 16.29                | 16.70           | 5.3             |
| 393             | 110.13          | 16.95                | 16.37                | 16.66           | 3.5             |
| 439             | 108.43          | 16.77                | 15.86                | 16.32           | 5.6             |
| 496             | 108.15          | 16.52                | 15.17                | 15.85           | 8.5             |

两路并联工作从模块在额定工况下的输出电压测试波形如图 7 所示。



(a) 从模块输出电压波形一



(b) 从模块输出电压波形二

图 7 额定工况下两路工作从模块输出电压波形图

从图 7 波形图可知, 其 2 路输出电压的纹波大约都是 2 V, 输出电压皆为 110 V, 其纹波系数约为 1.8%。

5 结论

本文利用 DSP 数字信号处理芯片和 CAN 通信总线技术提出了电源并联冗余结构的软件控制方法和智能均流策略, 并以电力机车 110 V 直流电源为背景, 搭建了 2 台 AC/DC 并联结构的硬件实物进行调测, 得出了通过并联冗余组建大功率电源的一些重要结论。与传统的并联电源相比, 具有控制灵活、通信可靠、系统稳定等特点, 同时稳压均流效果好, 输出纹波系数小。对组建稳定可靠的大功率开关电源, 实现电源的热插拔, 以及电源系统的全数字控制都有很好的借鉴作用。同时也为分布式智能化电力机车 110 V 直流电源的最终研制成功打下了坚实基础。

参考文献:

[1] 梁 兵, 樊晓平, 陈特放. 电力机车用高频开关电源的研制[J]. 电工技术, 2002(5): 28-31.

[2] 陈特放, 刘 骞, 余明扬, 唐建湘, 樊晓平. 电力机车 110 V 大功率高频开关电源电磁兼容性[J]. 中国铁道科学, 2005(3): 100-105.

[3] 万山明. TMS320F281x DSP 原理及应用实例[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.

[4] 苏奎峰, 吕 强, 耿庆峰, 陈圣俭. TMS320F2812 原理与开发——DSP 应用丛书[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[5] 夏继强. 现场总线工业控制网络技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.

[6] 周志敏, 周纪海. 开关电源实用技术设计与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.

[7] 谢力华, 苏彦民. 逆变电源的并联运行控制技术[J]. 电力电子技术, 2000, 34(4): 1-3.

[8] Chang-Shinra Lin, Chern-Lin Chen. Single-wire Current-share Paralleling of Current-Mode-Controlled DC Power Supplies[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 267-274.

[9] V Joseph Thottuvelil, George C Verghese. Analysis and Control Design of Paralleled DC/DC Converter with Current Sharing[J]. IEEE Transaction on power Electronics, 1998, 13(4): 635-644.

[10] 杜鹏英, 徐 洁, 任国海, 程肇基. 数字式 AC/DC 电源并联系统及其智能化均流[J]. 科技通报, 2005, 5(21): 302-305.