

文章编号: 1671- 251X( 2010) 10- 0024- 05

# 数字控制技术在本质安全型开关电源中的应用

尹相卿, 白林绪, 申利飞, 王聪

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对部分本质安全型开关电源产品在实际应用中存在输出功率小、工作频率低、输出纹波较大、故障率高等问题, 提出了一种基于数字控制芯片 DSPIC30F1010/ 2020 的本质安全型开关电源的设计方案, 给出了该开关电源的总体结构, 重点介绍了该开关电源的硬件电路及其数字控制器的软件设计。通过理论分析、整体设计、仿真、实际电路的调试及安全火花试验, 验证了数字控制技术在本质安全型开关电源中应用的可行性。

**关键词:** 开关电源; 本质安全; 数字控制; DSP; DC- DC 变换器

**中图分类号:** TD684 **文献标识码:** B

## Application of Digital Control Technology in Intrinsic Safety Switching Power Supply

YIN Xiang-qing, BAI Lin-xu, SHEN Li-fei, WANG Cong

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering of CUMT. (Beijing),  
Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to solve problems of small output power, low working frequency, large output ripple and high fault rate, the paper proposed a design scheme of applying DSPIC30F1010/ 2020 digital

收稿日期: 2010- 06- 07

作者简介: 尹相卿(1985- ), 男, 山东日照人, 中国矿业大学(北京)在读硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。E-mail: 13811591616@ 139. com

的散热问题, 将发热元件(如隔离变压器和整流桥)紧靠电源的外壳安装, 增加散热面积, 散热效果明显。该新型本安电源的主要创新点如下:

(1) 采用了高效率、低温升、低损耗、无噪音的 R 型隔离变压器, 与同等功率的 E 型或 EI 型变压器相比, 体积减小了很多, 有利于安装。

(2) 采用新型整流桥 GBPC2508, 其配有 4 个玻璃钝化的硅芯片、铜引线结构、密封四管封装, 比传统的整流芯片具备更佳的高温反向偏压特性和低的导通电阻等特性。

(3) 采用高效率、低纹波、高可靠的 DC/DC 开关转换器, 提高了整机的效率, 减少了输出纹波噪声。

(4) 新颖的、双重化的过压和过流保护电路, 增加了电源的可靠性。

(5) 解决了多输入电压等级电源笨重和单输入电压电源局限性的矛盾。

综上所述, 该新型本安电源非常适合为目前煤矿下的各种监测和监控系统的设备提供本安电源, 具有很好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 王磊, 李振壁. 一种新型的本质安全型电源[J]. 工矿自动化, 2008(2): 82- 84.
- [2] 孟进, 马伟明, 张磊, 等. 带整流桥输入级的开关电源差模干扰特性[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 14- 18, 24.
- [3] 胡斌. 双色图文详解电感器及应用电路[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [4] 国家安全生产监督管理总局. MT/T408- 1995煤矿用直流稳压电源[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [5] GB3836. 4-2000 爆炸性气体环境用电气设备[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [6] 肖景和. 555 集成电路应用精粹[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.

control chip in intrinsic safety switching power supply, gave the whole structure of the switching power supply, and emphatically introduced design of hardware circuit of the switching power supply and software of the switching power supply's digital controller. The results of theoretical analysis, global design, simulation, circuit debugging and safe spark experiment verified the feasibility of applying digital control technology in intrinsic safety switching power supply.

**Key words:** switching power supply, intrinsic safety, digital control, DSP, DC-DC converter

## 0 引言

随着我国煤矿生产机械化、自动化的不断发展, 井下通信、检测等设备也日益增多。由于井下存在着瓦斯等危险性爆炸气体, 出于安全考虑, 国家要求给这些设备供电的电源电路必须具有安全防爆特性。由于本质安全型(简称本安型)开关电源电路本身就是安全的, 它所产生的放电火花、电弧以及热能均不能点燃电路周围环境中的爆炸性混合物, 所以具有尺寸小、重量轻、安全性能高、成本低等一系列优点<sup>[1]</sup>。正因为如此, 本安型开关电源受到广泛青睐。但是, 目前一些本安型开关电源产品在实际应用中仍存在一定问题, 如输出功率小(一般在 20 W 以下)、工作频率低(100 kHz 以下)、输出纹波较大、故障率高等<sup>[2]</sup>。除此之外, 目前的服务器和通信等

高性能的电子设备要求采用输出电压和电流稳定的新型电源, 而现有的模拟电源性能难以满足需要<sup>[3]</sup>。数字电源从 2005 年开始受到市场追捧, 引入数字控制技术能够设计出可以根据电源系统状态的变化而更加精准地改变输出电压和电流特性的电源<sup>[4]</sup>。因此, 本文提出采用 Microchip 公司生产的 DSP 数字控制芯片作为本安型开关电源控制器的构想, 并编写了该控制器的控制算法, 建立了仿真模型, 并在电路中予以实现, 具有重要的理论意义和应用前景。

## 1 本安型开关电源的总体设计

传统的本安型开关电源的储能部分由蓄电池构成, 参考文献[5]提出了用超级电容器来替换蓄电池的构想。基于该构想, 设计的本安型开关电源的基本结构如图 1 所示。

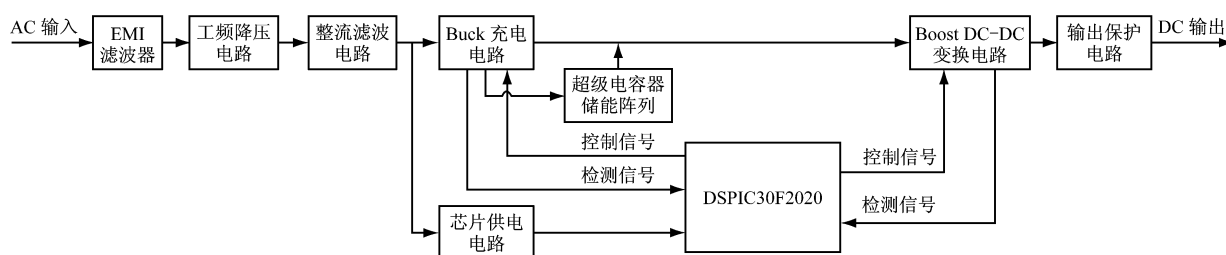


图 1 本安型开关电源的基本结构

从图 1 可看出, 本安电源通常由交流输入、整流滤波部分、Buck 充电电路、Boost DC-DC 变换电路、储能部分和输出保护电路组成。通常交流输入部分为 127 V 交流电, 首先进行 EMI 滤波, 滤除外界电网的高频脉冲对本安型开关电源的干扰, 同时还减少开关电源本身对外界的电磁干扰。输入的交流电经过工频变压电路降压隔离后进入整流滤波电路, 整流输出相应的直流电供给 Buck 充电电路。Buck 充电电路要根据储能部分所选用的元器件来设计, 本文设计的储能部分为超级电容器, 充电部分只需要恒压恒流。由于故障出现时 DC-DC 变换电路的直流输入来自超级电容器, 而超级电容器放电的一个特点是其电压随着能量的释放而降低, 选用 Boost 拓扑作 DC-DC 变换器使用时具有升压的功能, 可以将低电压在一定的范围内升上来, 从而使

输出电压保持不变。

## 2 本安型开关电源的硬件电路设计

### 2.1 输入部分

输入部分主要是指输入整流/滤波电路。输入整流/滤波电路通常由 EMI 滤波器、启动浪涌电流限制器、整流级和输入滤波电容<sup>[6]</sup>组成, 如图 2 所示。

首先选择输入整流器。整流器通常采用桥式二极管整流, 要考虑的主要参数包括正向平均电流、浪涌电流、直流击穿电压、预期的耗散功率。在电路启动时, 浪涌电流有可能比正常工作时输入电流值的 10 倍还大。因此, 一般在电源的输入端接一个热敏电阻, 以保护整流器。热敏电阻低温时的阻值为 6~12 Ω, 加热后电阻值一般只有 0.5~1 Ω。

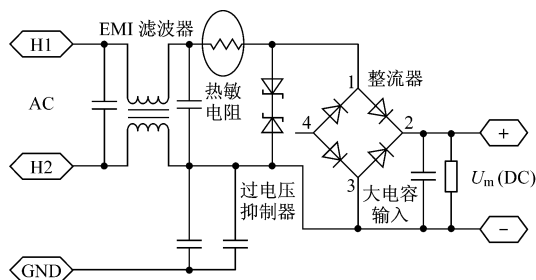


图2 输入整流/滤波电路

通过输入整流器的电流有效值是热设计时要考虑的, 它会使整流器发热更加严重。最小的二极管等级要符合式(1)~(3):

$$U_R \geq 1.414 U_{in(p-p)(max)} \quad (1)$$

$$I_F \geq 1.5 I_{in(DC)(max)} \quad (2)$$

$$I_{FSM} \geq 5 I_F \quad (3)$$

式中:  $U_R$  为热敏电阻电压;  $U_{in(p-p)(max)}$  为输入电压最大峰峰值;  $I_F$  为浪涌电流;  $I_{in(DC)(max)}$  为直流端输入电流最大值;  $I_{FSM}$  为浪涌电流最大峰值。

由式(1)~(3)可得出整流二极管应选的类型。接下来要计算输入滤波电容的大小, 首先要确定电源直流输入端能承受多大的纹波电压。电压纹波越小, 所选的电容就要越大, 这样上电时的电流浪涌也更大。选择滤波电容时主要考虑3个方面: 能满足期望电压纹波的电容值、电容的额定电压、电容的额定纹波电流。对于DC-DC变换器, 纹波电压峰值设计为0.1~0.5 V。输入滤波电容的大小  $C_{in}$  为

$$C_{in} = \frac{0.3 P_{m(av)}}{f_{in} U_{ir(min)} U_{ripple(p-p)}^2} \quad (4)$$

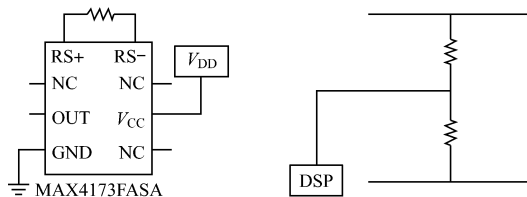
式中:  $f_{in}$  为电源输入交流电压的最小额定频率;  $U_{ir(min)}$  为整流输出电压的最小峰值;  $U_{ripple(p-p)}$  为输入滤波电容上要得到的电压纹波峰峰值。

## 2.2 采样电路

采样电路包括电流采样电路和电压采样电路<sup>[7]</sup>。传统的电流采样电路一般是用康铜丝或锰铜丝或者电流传感器采样数据后送入放大器, 这些方案采样精确度不高, 而且操作较繁琐。本文设计的电流采样电路采用美信公司生产的、将电流传感器和放大器集成在一起的 MAX4173FASA 芯片。该芯片为8引脚 SOT23-6 封装, 成本低, 具有紧密的电流传感器, 可使用的电压范围为0~28 V, 精确度为0.5%, 具有1.7 MHz 带宽, 可在-40~+85 °C 温度范围内工作。

传统的电压采样电路都由电阻和功率放大器组成, 一般来说是先由2个电阻分压, 再经过一个功率放大器将增量放大。该方案是长期实践得出的一种

比较实用的方案。本文仍采用该方案, 不同的是电阻分压后不需要再用功率放大器, 而是在软件程序中实现。具体的采样电路如图3所示。



(a) 电流采样电路

(b) 电压采样电路

图3 采样电路

## 2.3 保护电路

该本安型开关电源的保护主要在软件中完成。硬件部分通过前馈采集回输入电压, 又通过采样电路采集输出电压和电流, 然后将采样值送到DSP芯片, 由软件具体实现保护功能。

使用数字控制的一大优势是可以利用灵活的软件程序来代替复杂的硬件保护电路<sup>[4]</sup>。程序中分别有可屏蔽中断和不可屏蔽中断2种方式。其中不可屏蔽中断通常针对程序或系统配置的错误, 在任何情况下监测到该中断, 程序都会使输出禁止, 以保护电路及器件; 可屏蔽中断通常针对程序运行中的过流、过压、欠压等情况进行处理, 目的是保证对电源系统的指标要求, 如输出电压不得低于要求的5%等, 该中断一般不会使程序终止, 而是用一定的算法处理, 使指标恢复。保护电路的具体设计在此不做详细介绍。

## 2.4 控制电路

控制电路是整个本安型开关电源的核心。它不仅可以处理输入、输出部分的采样, 保护整个电路, 而且还能通过控制PWM输出来驱动整个开关电源。控制芯片的选择至关重要, 好的控制芯片可使外围电路设计简单, 功率损耗小, 电源效率高, 稳定性好。本设计采用Microchip公司生产的高性能控制芯片DSPIC30F1010/2020。该芯片为28脚双列直插塑料封装, 工作频率可达500 kHz, 启动和工作电流低, 具有锁存脉宽调制和逐周限流、欠压锁定等特点, 电压调整精度高, 占空比控制方便, 适用于小功率开关电源。控制电路如图4所示。

## 3 DC-DC变换器控制模型的建立

本安型开关电源DC-DC变换器的基本结构如图5所示。

本安型开关电源DC-DC变换器通过控制全控型功率开关管的开通时间占空比实现对功率和输

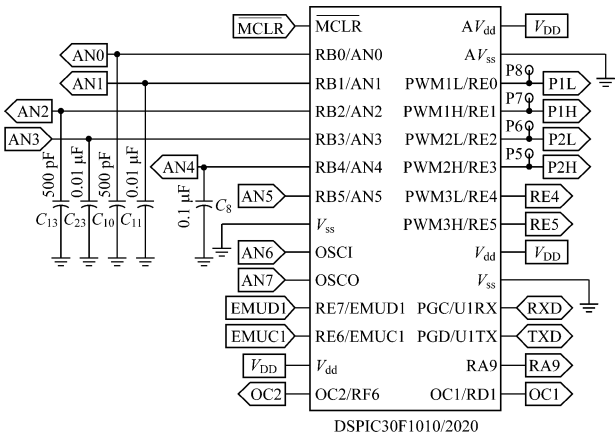


图 4 控制电路

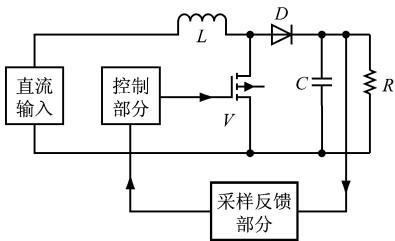


图 5 本安型开关电源 DC-DC 变换器的基本结构

出电压的控制。本设计中 DC-DC 变换器采用 PWM (脉宽调制) 技术。根据采样控制论面积等效原理, 冲量(脉冲面积)相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上, 其效果基本相同。因此, 对于一定的输出电压, 可以等效为具有一定占空比的 PWM 波形, 如图 6 所示。由输出期望值得到其 PWM 波的方法称为调制法。DC-DC 变换器通过把反馈量(输出电压)作为调制信号, 对载波(三角波或锯齿波)进行调制(见图 7), 得到与输出波形(电压值)等效的、占空比不同的一系列脉冲(PWM 波)<sup>[8]</sup>, 从而控制开关的通断, 得到输出电压。

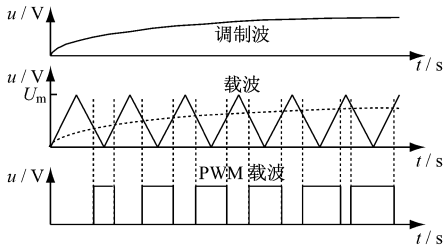


图 6 PWM 控制方式波形

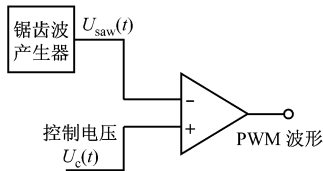


图 7 典型 PWM 调制器

线性平均的情况下, 占空比  $D$ 、控制电压  $U_c$  (即输出电压) 和  $U_m$  有如下关系:

$$D = \frac{U_c}{U_m} \quad (5)$$

在电路连续模式(DCC)下, 取全控型功率开关管的平均作用效果, 即

$$U'_{in} = DU_{in} = \frac{U_{in}}{U_m} U_c \quad (6)$$

式中:  $U'_{in}$  为简化掉全控型功率开关管后电源端的电压值。

这样可得到如图 8 所示的 DC-DC 变换器简化模型。

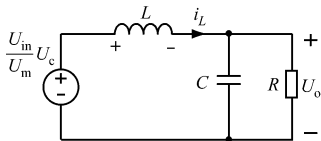


图 8 DC-DC 变换器简化模型

下面对该模型进行推导。首先在时域中根据基尔霍夫电压/电流定律, 得到如下的一组方程:

$$U'_{in} = U_L + U_o \quad (7)$$

$$U_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (8)$$

$$i_L = \frac{U_o}{R} + C \frac{dU_o}{dt} \quad (9)$$

对式(7)~(9)进行整理, 可得到式(10):

$$U'_{in} = LC \frac{d^2 U_o}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{dU_o}{dt} + U_o \quad (10)$$

假设原电路为零状态电路, 对式(10)进行拉普拉斯变换, 可得到复频域的解析式:

$$U'_{in} = (LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1)U_o \quad (11)$$

经整理, 即可得到如下的传递函数:

$$\frac{U_o}{U_{in}} = G(s) = \frac{U_c/(LCU_m)}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} = \frac{U_c/U_m}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (12)$$

由式(12)可知, DC-DC 变换器可以采用数字芯片进行 PID 设计。使用数字控制芯片的 PWM 模块驱动开关管的导通和关断, 在芯片内部执行控制策略, 以控制 PWM 波的占空比大小。这样就不需要诸多的电阻、电容、运算放大器等模拟元件来组成控制器了。

#### 4 本安型开关电源数字控制器的软件实现

该本安型开关电源的前级充电电路和 DC-DC

变换器共用一个数字控制器。该数字控制器选用 DSPIC30F2020 芯片。图 9 为该本安型开关电源的控制程序流程。

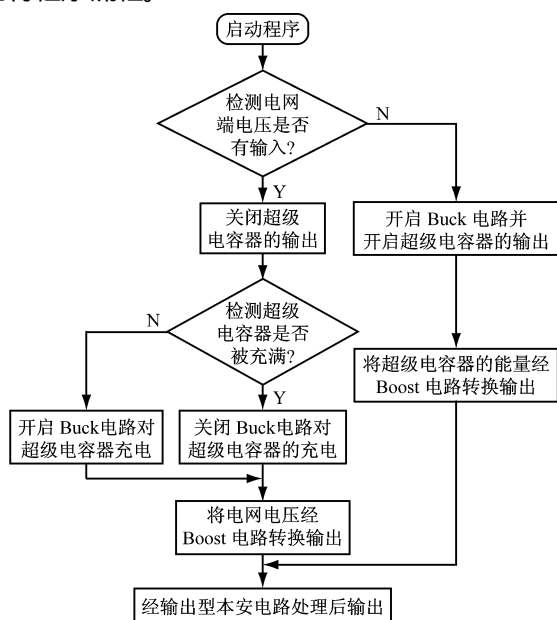


图 9 本安型开关电源的控制程序流程

## 5 仿真与实际电路试验

为证实设计方案的正确性,笔者对该本安型开关电源进行了计算机仿真,并制作了实际的电路板进行调试。仿真软件采用 Microchip 公司开发的 MINDI5.4 软件。图 10 为输出电压波形。从图 10 可看出,在电源输入电路出现故障时,在超级电容器所释放能量的供应下,本安型开关电源输出的电压和电流都是恒定的。可见由超级电容器组成的储能部分在电路出现故障时完全可以满足对后级电路的供电要求。

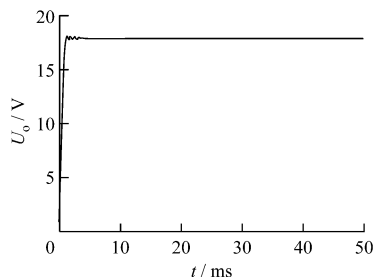


图 10 电源的输出电压波形

在完成仿真后,笔者又对设计的本安型开关电源进行了安全火花试验,得出了在  $U_o - C$  平面上对应的临界点燃曲线,如图 11 所示。从图 11 可看出,当电感的取值一定 ( $L = 600 \mu\text{H}$ ) 时,对于同样的输出电压,DC-DC 变换器的临界点燃电容值随着负

载电阻的减少而增大;而对于同样的负载电阻或输出电流,临界点燃电容值均随着输出电压的增大而减少。将两者进行对照和分析可知,理论和试验曲线变化趋势相同,但理论临界点燃电容总小于试验临界点燃电容,可见设计的基于数字控制的 intrinsic safety 开关电源能够满足输出本安的要求。

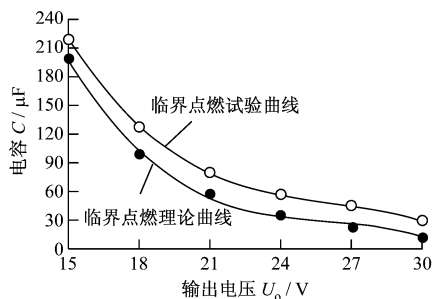


图 11 本安型开关电源的临界点燃曲线

## 6 结语

(1) 数字控制技术在 intrinsic safety 开关电源中应用是可行的;

(2) 本安型开关电源引入数字控制技术后可以大大减少在模拟电源中常见的误差、老化(包括模拟器件的精度)、温度影响、漂移、非线性不易补偿等问题,可以很好地提高开关电源的灵活性和适应性,其稳定的控制参数使得产品个体无需精细调节即可获得很好的一致性,且可靠性和可生产性好。

### 参考文献:

- [1] 崔保春,王聪,程红. 本质安全电源电路理论综述[J]. 电源世界,2006(12): 1-6, 31.
- [2] 高丽珍. 新型矿用本质安全型电源的设计与研究[J]. 机械工程与自动化,2006(3): 125-127.
- [3] 邹雪涛,蔡丽娟. 开关变换器中数字控制设计方法的研究[J]. 通信电源技术,2006(6): 19-21, 42.
- [4] 杨晋,蔡丽娟. 数字技术在开关电源控制中的应用和发展[J]. 电源世界,2006(2): 6-8.
- [5] 白林绪,王聪,崔维. 超级电容器在煤矿井下本安电源中的应用[J]. 煤炭科学技术,2009(4): 80-82.
- [6] BROWN M. 开关电源设计指南[M]. 徐德鸿,沈旭,杨成林,等译. 北京:机械工业出版社,2006: 75-78.
- [7] 孟浩,贾晨,陈志良. 数字控制 PFM/PWM 混合型 DC-DC 开关电源[J]. 微电子学与计算机,2008(1): 166-169.
- [8] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006: 152-154.