

文章编号:1671-251X(2019)02-0018-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018080008

一种高性能矿用本质安全型电源设计

黄鹤松¹, 陈曦¹, 田成金², 付振²

(1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590;
2. 北京天地玛珂电液控制系统有限公司, 北京 100013)

摘要:针对目前本质安全型电源电磁抗扰性差、带载能力弱等问题,设计了一种高性能矿用本质安全型电源。该电源基于准谐振反激式开关电源和双重过压、过流保护设计,可将AC85~250 V宽输入电压转换为稳定的DC12 V/2 A输出。测试结果表明,该电源纹波小,效率高,电磁抗扰性强,符合GB 3836.4—2010《爆炸性环境 第4部分:由本质安全型“i”保护的设备》中本质安全性能要求。

关键词:矿用电源;本质安全;开关电源;电磁抗扰性;过压保护;过流保护;带载能力
中图分类号:TD60 **文献标志码:**A
网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20190124.1453.003.html>

Design of a high-performance mine-used intrinsically safe power supply

HUANG Hesong¹, CHEN Xi¹, TIAN Chengjin², FU Zhen²

(1.College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2.Beijing Tiandi-Marco Electronic-Hydraulic Control System Company Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: For problems of poor electromagnetic immunity and weak load capacity of current intrinsically safe power supply, a high-performance mine-used intrinsically safe power supply was designed. The power supply is based on quasi-resonant flyback switching power supply and dual overvoltage and overcurrent protection, which can convert AC85-250 V wide input voltage into stable DC12 V/2 A output. The test results show that the power supply has small ripple, high efficiency and strong electromagnetic immunity, which meets intrinsic safety performance requirements of GB 3836.4-2010 *Explosive Atmospheres Part 4: Equipment Protection by Intrinsic Safety "i"*.

Key words: mine-used power supply; intrinsically safe; switching power supply; electromagnetic immunity; overvoltage protection; overcurrent protection; load capacity

0 引言

随着煤矿管理现代化和煤矿综采工作面智能化、无人化的迅速发展,传感器、通信站、控制器等智能设备广泛应用于煤矿井下综采自动化控制系统中^[1]。本质安全型(以下简称本安)电源是综采自动

化控制系统的动力核心^[2-3],其性能直接影响综采自动化控制系统的可靠性和安全性^[4]。目前本安电源主要存在2方面的问题:①由于煤矿井下空间狭小、大型机电设备多且位置相对集中、设备启停频繁等,导致井下存在严重的电磁干扰,影响电源正常工作,容易引起误动作、重启等故障^[5-6]。②综采自动

收稿日期:2018-08-04;修回日期:2019-01-13;责任编辑:盛男。
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804304);中国煤炭科工集团科技创新基金资助项目(2017QN010);煤炭科学研究总院科技创新基金资助项目(2016ZYQN004)。
作者简介:黄鹤松(1972—),男,江苏启东人,教授,博士,主要研究方向为煤矿自动化,E-mail:huang_sust@163.com。通信作者:陈曦(1993—),男,河南淮阳人,硕士研究生,主要研究方向为矿山电气,E-mail:jessechan0110@163.com。
引用格式:黄鹤松,陈曦,田成金,等.一种高性能矿用本质安全型电源设计[J].工矿自动化,2019,45(2):18-23.
HUANG Hesong, CHEN Xi, TIAN Chengjin, et al. Design of a high-performance mine-used intrinsically safe power supply[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(2): 18-23.

化控制系统中大量本安设备投入使用,为减少本安电源的使用量,降低综采自动化控制系统运行成本,本安电源的带载能力亟待提升。对恒压型电源而言,带载能力即恒压下最大输出电流能力,而提升输出电流会增大瞬态能量,因此二者的均衡设计是提升电源带载能力的关键^[7-8]。本文设计了一种高性能矿用本安电源,具有带载能力强、可靠性高的特点。

1 设计要求

根据 GB 3836.4—2010《爆炸性环境 第4部分:由本质安全型“i”保护的的设备》相关规定,综合考虑综采自动化控制系统实际情况,本安电源设计指标需满足以下要求:① 输入电压允许波动范围为 AC85~250 V;② 输出电压为 DC12 V,额定电流为 2 A,额定输出功率为 24 W;③ 纹波峰峰值小于 200 mV;④ 电源效率不低于 80%;⑤ 电快速瞬变脉冲群(EFT)、电压暂降(DIP)和浪涌(冲击)(Surge)抗扰度均达到等级 3(典型的工业环境);⑥ 可通过火花试验;⑦ 瞬态能量低于 260 μJ。

2 设计方案

本安电源主要由 AC-DC 电路、DC-DC 电路和安全栅组成,如图 1 所示。AC-DC 电路对交流电进行滤波、整流后输出直流电,直流电经过 DC-DC 电路稳压后降低为 DC12 V/2 A,并通过安全栅实现过压、过流保护。

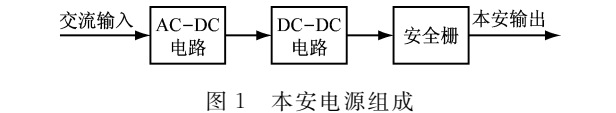


图 1 本安电源组成

Fig. 1 Composition of intrinsically safe power supply

2.1 AC-DC 电路

AC-DC 电路主要包括滤波和整流 2 个部分,如图 2 所示。滤波电路能有效抑制来自输入端交流电的谐波干扰,同时减小电源自身产生的电磁干扰。滤波后的交流电经整流后变为锯齿波形的直流电,并通过电解电容进一步滤波,得到稳定的直流电。

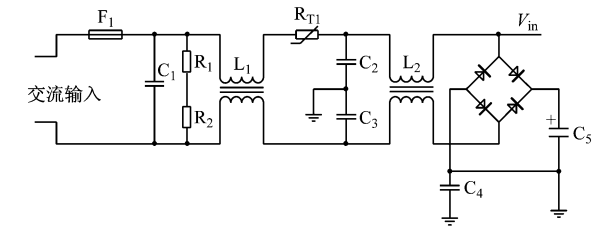


图 2 AC-DC 电路

Fig. 2 AC-DC circuit

图 2 中, C_1 为“X”电容, L_1 为差模电感, C_1, L_1 主要用来抑制差模干扰; C_2, C_3 为“Y”电容, L_2 为共模电感, C_2, C_3, L_2 能有效将共模干扰减弱到最小; R_1, R_2 为 C_1 的泄放电阻,根据 IEC 60950-1《信息技术设备 安全 第1部分:通用要求》的规定——在 1 s 内电压峰值需下降至 37%,选用阻值均为 820 kΩ 的 R_1, R_2 串联; R_{T1} 为负温度系数热敏电阻,常温时为 8~10 Ω,在上电瞬间能起到较好的限流作用,电源启动后该电阻下降至 1~2 Ω,减少了电源损耗。

2.2 DC-DC 电路

选用准谐振控制芯片 L6566B 来设计准谐振反激式 DC-DC 电路^[9],如图 3 所示。L6566B 的引脚 CS 通过 R_3 检测流过 MOS 管 Q_2 的电流,并与内部基准值比较,进而控制 GD 引脚提供 Q_2 的栅极电压,来控制 Q_2 通断,将 AC-DC 电路产生的直流电转换为高频脉冲直流电,再通过高频变压器 T_1 降压得到低频脉冲直流电,实现电气隔离^[10-11]。DC-DC 电路通过在谐振电压为零时开通 Q_2 来实现 MOS 管的软开关工作,减小 MOS 管开通损耗,提高电源效率。二极管 D_2 能实现自然过零关断,反向恢复电流较小,降低了电磁干扰^[12]。

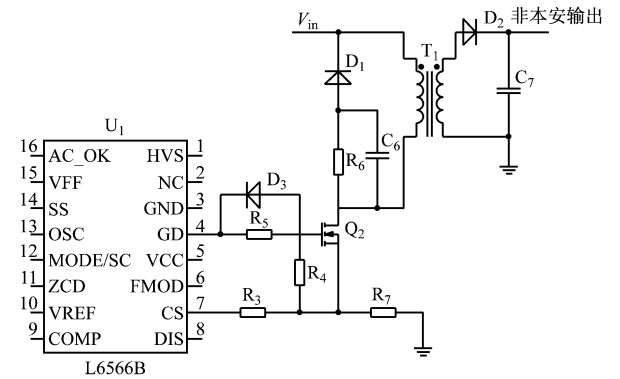


图 3 DC-DC 电路

Fig. 3 DC-DC circuit

为减小高频变压器 T_1 的发热量、体积及提升效率,选用 PQ 磁芯结构,采用 PC40 软磁铁氧体磁芯、PM9820 骨架、QA-1/155 漆包线作为主要材料。根据 GB 3836.4—2010 关于影响本安性能的可靠元件、可靠组件和可靠连接的规定,设计高频变压器 T_1 绕组结构为 2 型(内外重叠绕制),绕组之间采用铜箔进行屏蔽,上下磁芯处与骨架开口处用胶纸进行隔离,变压器绝缘等级达到 F 级。

2.3 安全栅

安全栅的作用是对非本安直流电进行能量限制^[13-14],具备过压、过流保护功能,保证瞬态能量不

点燃混合性爆炸气体。“ib”等级的本安电源必须具备双重化保护^[15-16],因此,安全栅由 2 路相同的过压、过流保护电路串联组成^[17]。选用浪涌抑制器 LT4363IMS-2 和 N 沟道超低内阻场效应管 FDB3632 来设计过压、过流保护电路,如图 4 所示。

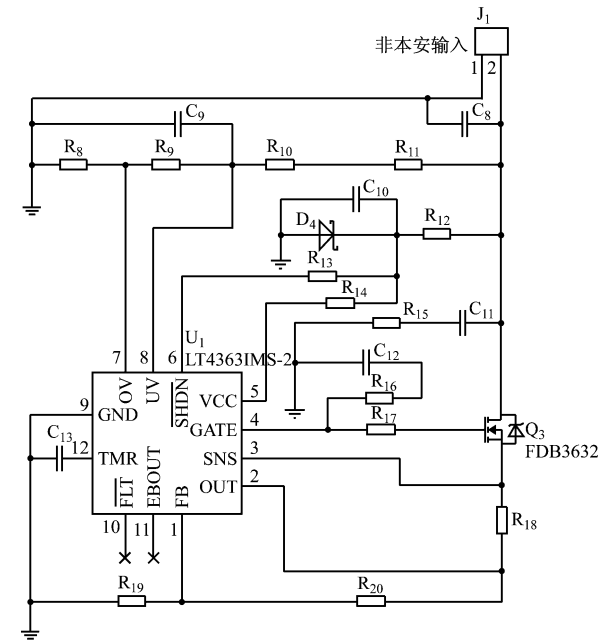


图 4 过压、过流保护电路

Fig. 4 Overvoltage and overcurrent protection circuit

LT4363IMS-2 通过控制 FDB3632 的开启和关断来控制电源输出,可对负载端的过流、过压和短路故障做出快速响应,功耗小且具备自恢复功能^[18-19]。LT4363IMS-2 的引脚 OV 和 UV 连接的电阻 R_8, R_9, R_{10}, R_{11} 用于设定欠压保护阈值电压 U_{UV} (式(1))和过冲保护阈值电压 U_{OV} ^[20](式(2)),LT4363IMS-2 内部参考电压 U_{ref} 为 1.275 V。当 DC-DC 电路输出电压小于 U_{UV} 或大于 U_{OV} 时,控制 FDB3632 关断并不再进行自恢复,防止电源持续工作在不稳定供电状态下,避免在发生电压冲击时造成电源损坏。

$$U_{UV} = \frac{R_8 + R_9 + R_{10} + R_{11}}{R_8 + R_9} U_{ref} \tag{1}$$

$$U_{OV} = \frac{R_8 + R_9 + R_{10} + R_{11}}{R_8} U_{ref} \tag{2}$$

LT4363IMS-2 的反馈引脚 FB 连接的电压采样电阻 R_{19} 和 R_{20} 用于设定过压保护阈值电压,当 DC-DC 电路的直流输出电压超出该过压保护阈值电压,FDB3632 关断,实现过压保护。 R_{18} 为电流采样电阻,用于设定电源的过流保护阈值电流,将引脚 SNS 与 OUT 两端压降与 LT4363IMS-2 内部基准电压 50 mV 进行对比,当压降小于 50 mV 时,引脚 GATE 输出低电平,FDB3632 关断,实现过流

保护^[20]。

3 安全栅参数整定与仿真

3.1 安全栅参数整定

根据 LT4363IMS-2 芯片手册和实际需求,对安全栅各项指标和主要器件进行参数整定。

(1) 输入保护阈值。图 4 中, $R_8 = 10\text{ k}\Omega, R_9 = 2\text{ k}\Omega, R_{10} = 23.2\text{ k}\Omega, R_{11} = 68.1\text{ k}\Omega$,联立式(1)、式(2)可得欠压保护阈值电压 $U_{UV} \approx 10.98\text{ V}$,过冲保护阈值电压 $U_{OV} \approx 13.17\text{ V}$ 。

(2) 过流保护阈值电流 $I_{LIM} = 2\text{ A}$,则电流采样电阻 $R_{18} = \frac{50\text{ mV}}{I_{LIM}} = 25\text{ m}\Omega$,选用 2 个 50 mΩ 电阻进行并联获得。

(3) 电源额定电压为 12 V,考虑到要留出一定的裕量,取 $R_{13} = 44.2\text{ k}\Omega, R_{14} = 5.1\text{ k}\Omega$,则过压保护阈值电压 $V_{REG} = \left(\frac{R_{13}}{R_{14}} + 1\right) 1.275\text{ V} = 12.325\text{ V}$ 。

(4) 引脚 TMR 接地电容 $C_{13} = 47\text{ nF}$,则安全栅故障自恢复时间 $T = \frac{2.925\text{ V} + 3.8\text{ V}}{2\text{ }\mu\text{A}} C_{13} \approx 158\text{ ms}$ 。

3.2 安全栅仿真

通过 LTspice IV 软件仿真,分别得到安全栅带 10 Ω 负载时在正常工作、短路、过压、过流情况下的仿真波形,如图 5—图 8 所示。

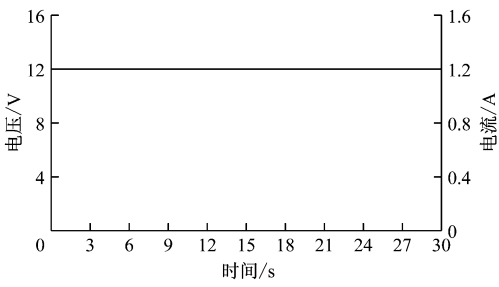


图 5 正常工作时输出电压、电流仿真波形

Fig. 5 Output voltage and current simulation waveforms during normal operation

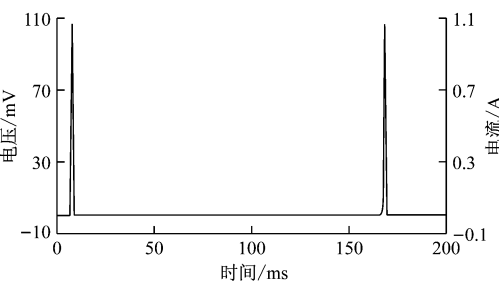


图 6 短路时输出电压、电流仿真波形

Fig. 6 Output voltage and current simulation waveforms during short circuit

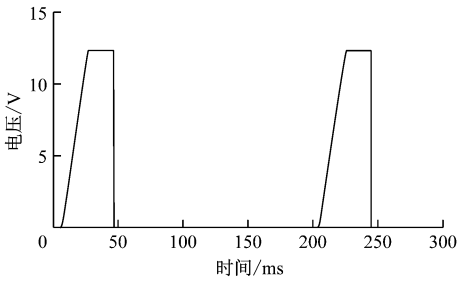


图 7 过压时输出电压仿真波形

Fig. 7 Output voltage simulation waveform during overvoltage

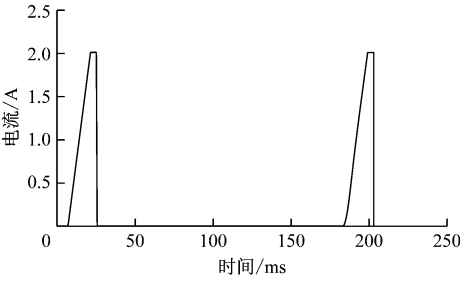


图 8 过流时输出电流仿真波形

Fig. 8 Output current simulation waveform during overcurrent

从图 5 可看出,正常工作时安全栅输出电压、电流稳定。从图 6—图 8 可看出,在短路、过压、过流情况下,安全栅会切断输出,并经过一定时间后自动恢复。

4 电气性能测试

4.1 纹波测试

纹波测试前将本安电源输出两端并联 SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation, 标准性能评估机构)规定的滤波电容(10 μ F 电解电容、0.1 μ F 陶瓷电容),去掉示波器探头的地线夹和探头帽,接上专用的接地探针。电源输出纹波波形如图 9 所示,可看出纹波波形良好,纹波峰峰值约为 65 mV,符合设计要求。

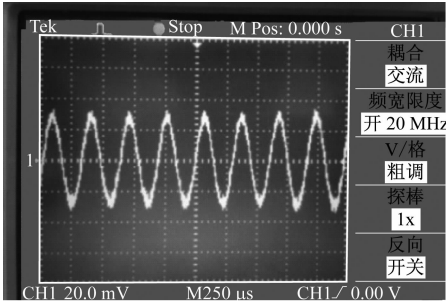


图 9 电源输出纹波波形

Fig. 9 Output ripple waveform of power supply

4.2 效率和功率因数测试

在 AC85~250 V 输入电压范围内,采用功率

计、电子负载、数字式电压表对电源效率和功率因数进行数据采集,结果见表 1。可看出该电源功率因数为 0.95 以上,效率大于 80%,符合设计要求。

表 1 电源效率和功率因数测试数据

Table 1 Test data of efficiency and power factor of power supply

输入电压/V	输出功率/W	功率因数	效率/%
85	24	0.99	84.7
127	24	0.99	85.4
170	24	0.98	86.2
220	24	0.97	86.9
250	24	0.96	87.1

4.3 运行温度测试

电源置于恒温箱(设置温度为 60 $^{\circ}$ C)运行,在 AC85~250 V 输入电压范围内,测试主要器件最高温度,结果见表 2。可看出电源局部最高温度符合 GB 3836.4—2010 中规定的最高表面温度不超过 150 $^{\circ}$ C 的要求。

表 2 电源主要器件最高温度

Table 2 The maximum temperature of main components of power supply $^{\circ}$ C

主要器件	最高温度
共模电感 L_1, L_2	72
变压器 T_1	83
FDB3632	70

4.4 绝缘耐压测试

参照 GB/T 15290—2012《电子设备用电源变压器和滤波扼流圈总技术条件》的试验方法进行绝缘耐压测试,分别将电压施加在开关电源(包括 AC-DC 电路和 DC-DC 电路)与安全栅、开关电源与外壳、安全栅与外壳的两端,测试数据见表 3。可看出绝缘电阻不低于 50 $M\Omega$,工频耐压达到 2.5 kV,漏电流不超过 5 mA,满足 GB/T 15290—2012 相关技术要求。

表 3 绝缘耐压测试数据

Table 3 Test data of insulation withstand voltage

测试对象	绝缘电阻/ $M\Omega$	工频耐压/kV	漏电流/mA
开关电源与安全栅	≥ 50	2.5	≤ 5
开关电源与外壳	≥ 50	2.5	≤ 5
安全栅与外壳	≥ 50	2.5	≤ 5

4.5 瞬态能量测试

依据 GB 3836.4—2010 附录 E 进行瞬态能量试验,电源正负输出端短接形成冲击电流,如图 10

所示(通过使用输出电压率为 0.1 V/A 的钳式电流探头和示波器相连获得)。根据冲击电流波形可估算出瞬态能量为 180 μ J,符合设计要求。

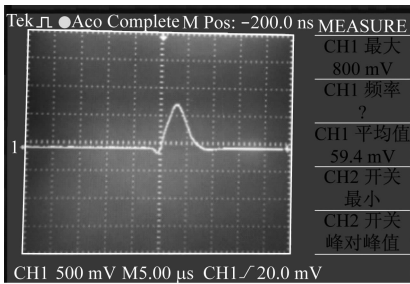


图 10 短路输出冲击电流波形

Fig. 10 Output impulse current waveform during short circuit

4.6 电磁抗扰度测试

依据 GB/T 17626. 4—2008《电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验》、GB/T 17626. 5—2008《电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验》和 GB/T 17626. 11—2008《电磁兼容 试验和测量技术 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验》,从 EFT, Surge, DIP 3 个方面进行电磁抗扰度测试,结果见表 4—表 6,可看出 EFT, DIP 抗扰度均达到等级 4, Surge 抗扰度达到等级 3。

表 4 EFT 测试结果

Table 4 Results of EFT test

等级	电压峰值/kV	重复频率/kHz	测试结果
1	0.5	5 或 100	正常
2	1.0	5 或 100	正常
3	2.0	5 或 100	正常
4	4.0	5 或 100	正常

表 5 Surge 测试结果

Table 5 Results of surge test

等级	电压峰值/ kV	波前时间/ μ s	半峰时间/ μ s	测试结果
1	0.5	1.2	50	正常
2	1.0	1.2	50	正常
3	2.0	1.2	50	正常
4	4.0	1.2	50	损坏

4.7 火花试验

根据 GB 3836. 4—2010 中 I 类测试设备的测试要求,在国家安全生产抚顺矿用设备检测检验中心对本安电源进行火花试验,测试结果未出现失爆现象,本安性能良好。

表 6 DIP 测试结果
Table 6 Results of DIP test

等级	电压暂降百分比 (参考电压 127 V)/%	持续时间/ s	测试结果
1	80	5.00	正常
2	70	0.50	正常
3	40	0.20	正常
4	0	0.02	正常

5 结语

针对煤矿井下实际情况,根据 GB 3836. 4—2010 相关规定,设计了一种高性能矿用本安电源。该电源具有较宽的输入电压范围(AC85~250 V),额定输出为 DC12 V/2 A,纹波小,效率高,电磁抗扰性强,具有良好的本安性能。该电源在兖州煤业股份有限公司转龙湾煤矿已投入使用,满足现场应用需求。

参考文献(References):

[1] 林引. 一种矿用开关电源设计[J]. 工矿自动化, 2018, 44(2):95-99.
LIN Yin. Design of a mine-used switching power supply[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44 (2):95-99.

[2] 蔡广亮, 宋建成, 李永学, 等. 基于 MAX4211 的本质安全开关电源的研究[J]. 煤炭技术, 2014, 33(3): 148-151.
CAI Guangliang, SONG Jiancheng, LI Yongxue, et al. Research on mine intrinsic safety power supply based on MAX4211 [J]. Coal Technology, 2014, 33 (3): 148-151.

[3] 梁博, 刘春富, 冯文彬. 煤矿用传感器开关电源电磁干扰抑制方法[J]. 煤矿安全, 2017, 48(3):95-98.
LIANG Bo, LIU Chunfu, FENG Wenbin. Suppression method of electromagnetic interference for switching power supply of mine sensor [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(3):95-98.

[4] 周亚夫, 许辰雨. 矿用本安电源保护电路的优化设计[J]. 中国煤炭, 2015, 41(1):70-72.
ZHOU Yafu, XU Chenyu. Research on optimization design of the protection circuit of mine intrinsically safe power [J]. China Coal, 2015, 41(1):70-72.

[5] 肖记. 反激式开关电源的电磁干扰建模及抑制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017:39-45.

[6] 林引. 矿用高可靠性本安型传感器电源电路设计与实现[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6):88-91.

- LIN Yin. Design and realization on power of high reliable intrinsic safe sensor [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 88-91.
- [7] 王文清. 提高矿用本安电源带载能力的研究与实践 [J]. 煤炭工程, 2008, 40(11): 104-106.
- WANG Wenqing. Research and practices on improvement of mine intrinsic safe electric power loading ability [J]. Coal Engineering, 2008, 40(11): 104-106.
- [8] 于月森, 谢冬莹, 伍小杰. 本安防爆系统与本安电源结构特点及分类探讨 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(3): 78-82.
- YU Yuesen, XIE Dongying, WU Xiaojie. Discussion on features and classification of intrinsic safe flame proof system and intrinsic safe electric power structure [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(3): 78-82.
- [9] 周雪峰. 输出本质安全型准谐振反激变换器分析 [J]. 工矿自动化, 2013, 39(6): 29-31.
- ZHOU Xuefeng. Analysis of quasi-resonant flyback converter with intrinsic safety output [J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(6): 29-31.
- [10] 俞优姝, 李良光, 王亚清, 等. 基于单端反激式本安电源的设计 [J]. 煤炭技术, 2011, 30(1): 39-41.
- YU Youshu, LI Liangguang, WANG Yaqing, et al. Design of intrinsically-safe power supply based on single-ended flyback [J]. Coal Technology, 2011, 30(1): 39-41.
- [11] 田小超, 王小龙, 王博, 等. 矿用多路隔爆兼本质安全型线性电源设计与研究 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 235-236.
- TIAN Xiaochao, WANG Xiaolong, WANG Bo, et al. Design and research of multiple flameproof and intrinsically safe linear power supply [J]. Coal Technology, 2018, 37(3): 235-236.
- [12] 沙占友, 马洪涛. 准谐振式软开关变换器的设计 [J]. 电源技术应用, 2008, 11(2): 59-64.
- SHA Zhanyou, MA Hongtao. Design of quasi-resonant soft switch converter [J]. Power Supply Technologies and Applications, 2008, 11(2): 59-64.
- [13] 刘树林, 马一博, 文晓明, 等. 输出本安 Buck-Boost 变换器的最危险输出短路放电工况研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 253-260.
- LIU Shulin, MA Yibo, WEN Xiaoming, et al. Research on the most dangerous output short-circuit discharge conditions of output intrinsic safety Buck-Boost converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 253-260.
- [14] 刘树林, 钟久明, 樊文斌, 等. 电容电路短路火花放电特性及其建模研究 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2123-2128.
- LIU Shulin, ZHONG Jiuming, FAN Wenbin, et al. Short circuit discharge characteristics of the capacitive circuit and its mathematical model [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2123-2128.
- [15] 朱前伟. 矿用本质安全电源的基本要求和设计方法 [J]. 工矿自动化, 2012, 38(2): 22-25.
- ZHU Qianwei. Basic requirements and design method of mine-used intrinsic safety power supply [J]. Industry and Mine Automation, 2012, 38(2): 22-25.
- [16] GB 3836.1—2010 爆炸性环境 第1部分: 设备 通用要求 [S].
- [17] 赵四海, 周杰. 矿用隔爆兼本质安全型不间断直流稳压电源的设计 [J]. 工矿自动化, 2012, 38(4): 17-19.
- ZHAO Sihai, ZHOU Jie. Design of explosion-proof and intrinsic safety DC stabilized UPS used in coal mine [J]. Industry and Mine Automation, 2012, 38(4): 17-19.
- [18] 房绪鹏, 于志学, 秦明, 等. 用于本质安全电源的新型截流型保护电路 [J]. 工矿自动化, 2016, 42(12): 56-58.
- FANG Xupeng, YU Zhixue, QIN Ming, et al. A novel chopping current protection circuit for intrinsically safe power supply [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(12): 56-58.
- [19] 房绪鹏, 秦明, 胡秋兰, 等. 一种基于 LT4363 的本安电路 [J]. 煤矿安全, 2017, 48(10): 111-113.
- FANG Xupeng, QIN Ming, HU Qiulan, et al. A new intrinsically safe circuit based on LT4363 [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(10): 111-113.
- [20] 房绪鹏, 秦明, 于志学, 等. 一种基于 LT4363 的本安电源的设计 [J]. 电子器件, 2017, 40(4): 875-878.
- FANG Xupeng, QIN Ming, YU Zhixue, et al. The design of an intrinsically safe power supply based on LT4363 [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2017, 40(4): 875-878.