DOI：10.13199/j.cst.2008.10.66.wangwq.016

矿用本安直流稳压电源的设计与研究

王文清，田柏林
（北京工业职业技术学院，北京 100042）

摘 要：为解决目前矿用本安电源上电时，因负载电容充电造成本安电源误动、可靠性差的现状，结合本安电源短路保护的整定原理和本安电源的特点，对决定本安电源性能和设计水平的核心电路（可靠性组件电路）进行研究，提出一种新型本安电源的设计方案。在该方案中采用功率监视IC做可靠性组件的核心芯片，减小取样电阻值，实现过流、过压、过功率保护，增加上电保护电路，解决了容性负载上电时对本安电源暂态冲击的影响。结果表明，该设计方案提高了本安电源的带负载能力和可靠性。

关键词：本安电源；可靠性组件；功率监视IC；取样电阻；可靠性
中图分类号：TD684 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-2336（2008）10-0061-04

Design and research on mine intrinsic safe DC voltage stabilized electric power

WANG Wen-qing, TIAN Bo-lin
(*Beijing Polytechnic College, Beijing* 100042, *China*)

Abstract: In order to solve the present mine intrinsic safe power connected on power, due to the wrong action of the intrinsic power occurred by the loaded resistance charging charge and the poor reliability, in combined with the setting principle intrinsic safe of the power short circuit protection and the power features, the paper studied the key circuit reliability module circuit to the intrinsic safe power performance and design level. The paper provided new design plan of the mine intrinsic safe power. The design plan had adopted a power monitoring IC as the key chip of the reliability module to reduce the sampling resistance value and to have over current, over voltage and over power protection. A power on protection circuit added could solve the intrinsic safe power momentary phase impact when the volume loading power on. The results showed that design plan had improved the loading capacity and reliability of the intrinsic safe power.

Key words: intrinsic safe electric power; reliability component; power monitoring IC; sampling resistance; reliability

随着煤矿管理现代化的提高，本安设备越来越多地被煤矿所采用。矿用本安直流稳压电源（简称本安电源）作为本安系统不可缺少的组成部分，其技术先进性和产品质量决定了本安设备的可靠性，从而直接影响到监测系统数据采集的准确性、可靠性、稳定性，关系到矿井安全生产、抗灾能力和矿工安危。据资料统计，电子设备的故障大约有70%是由于电源引起的。因此，本安电源的质量、技术发展水平越来越得到人们的重视。

本安电源在实际应用中经常会遇到2个难题：① 在交流电网上电时，本安电源出现误保护，影响本安设备的正常工作；② 本安电源带负载能力差，特别是当负载为容性负载时，因负载启动电流较大，本安电源误动作。这2个难题使设计本安电源时陷入两难的境地，一方面，本安电路需使用电容消除电源纹波，达到增加设备抗干扰能力，提高设备工作稳定性的目的；另一方面，本安电路中短路点的电火花能量除来自于本安电源外，还来自本安设备里电容或电感储存的能量，这要求在本安电路中限制电容或电感的应用。

针对上述状况，根据多年防爆电气产品的制造经验，查找本安电源保护误动的原因，通过改进本安电源的设计，解决了此难题，在煤矿井下移动目标自动识别与管理系统中得到验证，取得了很好的效果。

基金项目：北京市教育委员会课题资助项目（PXM2008_014225_055773）

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　本安电源的原理

本安电源是由非本安电源转化而来。通过在非本安直流电源中接入稳压、限流、快速切断双重化的保护电路，保证电源及负载在正常工作和规定的故障状态下产生的电火花和热效应均不能引起周围可燃性气体燃烧或爆炸，从而达到本安电源的性能要求。本安电源与非本安电源相比，具有许多特殊性。

1）输入和输出端电气隔离。由于本安电源的输入端为非本安输入，输出端为本安型输出，电路内部是由非本安向本安转换的过程。为防止非本安的输入端传递到本安的输出端，影响本安电源性能，要求输入、输出端必须采取电气隔离，并且达到规定的耐压等级。

2）不间断供电。煤矿井下交流电因多种原因造成供电中断。根据煤矿相关的规定，许多传感器在电网停电后必须继续工作 2 h。因此，本安电源必须具有备用电池，以便在电网停电时由备用电池继续向负载供电。

3）保护电路多重化。本安型电气设备根据安全程度的不同分为 ia 和 ib 等级。按 GB3836 - 2000《爆炸性气体环境用电气设备》标准的规定，本安电源采用 ib 等级，保护元件或组件需要双重化。

4）输出功率受限制。本安电源必须限制电路火花的放电能量，即限制电源的输出电压、放电电流和放电时间。在电路实现上，就是要有过流（或短路）、过压、快速切断功能。

2　本安电源的设计方案

本安电源由 AC/DC 交直流变换、不间断供电、可靠性组件（过压、过流保护）3 部分构成，不间断供电由充电电路、后备电池、电池切换电路组成。图 1 是三路相互隔离输出的本安电源原理，其中 2 路 9 V 本安电源由后备电池供电，具有不间断供电功能。

2.1　交直流转换

交直流转换采用 AC/DC 开关电源，开关电源与线性电源相比具有明显的优越性。

1）适应性强，效率高。线性稳压电源一般采用串联稳压电源，其调整管工作在线性区，调整管的功耗和温升随调整管所承受管压降 U_{ce} 的增大而

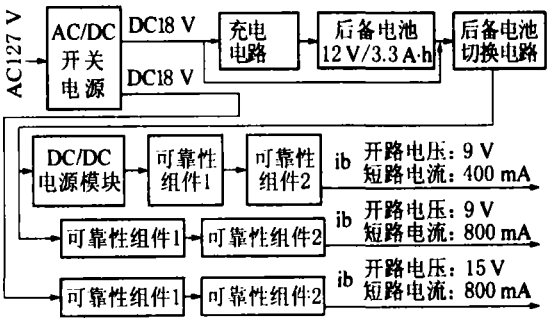

图 1　本安电源原理

增大，不适应电网电压变动大的场合。开关稳压电源通过调整开关管占空比来适应电网电压的变化，其功率损耗基本不随电网电压的波动而变动，能适应电网电压较大幅度的波动。一般串联稳压电源允许电网电压变化 10%，效率大约 40%，而开关型稳压电源允许电网电压在 80 ~ 260 V 变化，效率高达 80%。

2）本质安全，电气隔离。线性串联稳压电源调整管工作在线性区，分担一部分输入电压。如果调整管短路，输入电压将全部加到输出端，产生危及负载的过电压；开关稳压电源是依靠开关管控制主电路的通断，控制高频变压器进行能量大小的传递，实现高低电压的转换。开关管故障，高频变压器不会有电能传递，电源没有电压输出，电路本质安全（电路故障，输出为零）。电气隔离依靠高频变压器实现，耐压可达 2.5 kV。

3）体积小，质量小。工频电源变压器工作频率 50 Hz，体积大，质量大；开关电源的高频变压器工作频率为 20 kHz，体积小，质量小。

2.2　不间断供电

AC/DC 输出的非本安直流电一路经充电电路对后备电池充电，储存电能。另一路经过切换电路输送给可靠性组件，实现非本安到本安的转换。

交流电网供电时，充电电路采用恒压、限流方式为备用电池充电。在备用电池充满电后，自动转为浮充状态，防止电池过充；交流电网断电时，备用电池通过切换电路自动投入工作，对负载进行不间断供电。当备用电池电压值低于设定值时，切换电路切断电池供电回路停止对负载供电，防止电池的过放电。

2.3　可靠性组件

可靠性组件实现非本安电源到本安电源的转

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

化，是本安电源的核心电路，决定本安电源的性能和设计水平。新本安电源的可靠性组件由取样电路、功率监视 IC 和功率开关管组成，采用集成电路实现过流（或短路）、过压、快速切断，限制电路火花的放电能量，达到本安性能要求。电路原理如图 2 所示。

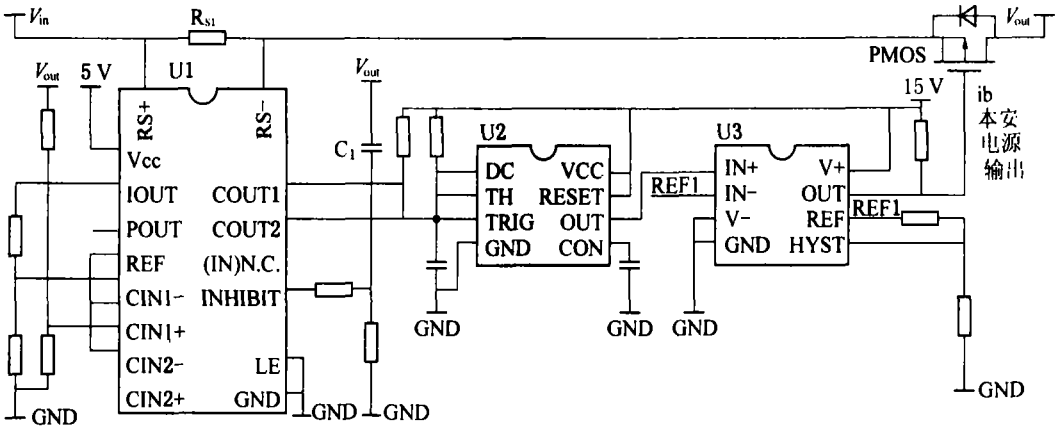

图 2　可靠性组件电路原理

功率监视 IC 是对功率、电流、电压参数具有同时监视功能的集成电路器件。该器件集成了高边电流检测放大器、1.21 V 带隙基准、2 个带漏极开路输出的比较器，可以对过功率、过流、过压的条件进行监视。其中比较器 1（COUT1）设置成在负载电流达到整定保护门限时进行翻转，比较器 2（COUT2）设置成在负载电压超过保护门限时进行翻转。

漏极开路输出可以与 28 V 的高压连接，适用于在电路保护中功率开关管的驱动控制。2 个开漏极输出比较器在上电时都具有内置的 300 μs 屏蔽周期，防止保护电路中功率开关管的误输出。功率监视 IC 原理如图 3 所示。

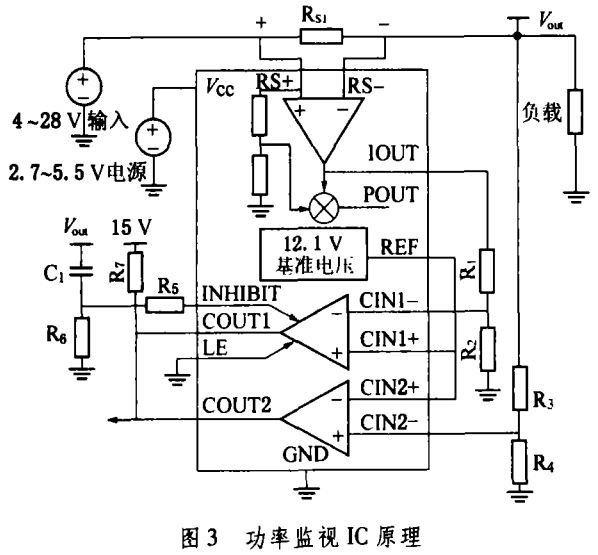

图 3　功率监视 IC 原理

2.3.1　过流保护

本安电源过流保护的取样电路由 R_{s1} 取样电阻构成。功率监视 IC 内部集成的电流检测放大器为差分放大器，用于放大 RS + 和 RS - 两端的电压。取样电阻 R_{s1} 跨接在 RS + 和 RS - 上。当负载电流流经 R_{s1} 时，其 2 端产生电压差。该电压被电流检测放大器放大，其输出的电流 I_{out} 与负载电流成正比，经电阻 R_1 和 R_2 分压后输入给比较器 1 的输入端 CIN1 -。

本安电源过载时，本安电源的输出电流增大，比较器 1 的输入端 CIN1 - 的输入电压增大。当本安电源输出电流达到整定值后，比较器 1 输入电压超过其门槛电压，COUT1 输出为低电平，PMOS 管关断，切断电源输出回路。过流故障消除后，本安电源自动恢复工作。

2.3.2　过压保护

本安电源过压保护取样电路由电阻 R_3 和 R_4 串联构成。本安电源输出电压的变化信号通过取样电路接到功率监视 IC 内部比较器 2 的输入端 CIN2 +。电阻 R_4 上的压降与本安电源输出电压成正比。本安电源输出过压时，比较器 2 引脚 CIN2 + 的输入电压增大，当本安电源输出电压达到整定值后，比较器 2 引脚 CIN2 + 的输入电压超过其门槛电压，COUT2 的输出为低电平，PMOS 管关断，切断本安电源输出回路。在过压故障消除后，本安电源自动恢复工作。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.3.3 上电保护

当具有容性特性的负载接到本安电源输出端时，电源的上电过程会产生对本安电源的瞬态冲击。这些瞬变情况可能被检测为满足过流动作条件，关断 PMOS 场效应管，造成电源误动。通过功率监视 IC 的 INHIBIT 电路能够有效防止这样的瞬变误动现象。

电阻 R_5，R_6 和电容 C_1 组成 RC 微分检测网络。在本安电源的上电过程中，RC 网络使功率监视 IC 内部的比较器 1 输出无效，从而在式（1）给出的时间段内不受上电瞬变事件的影响。

$$t_{INHIBIT} = R_6 C_1 \ln(\Delta V/0.6) \qquad (1)$$

式中 $t_{INHIBIT}$——电源上电时屏蔽电路检测的时间；

R_6——微分检测网络电阻；

C_1——微分检测网络电容；

ΔV——上电过程中或者在不同电压源之间切换时 V_{out} 上的电压变化值。

对应于 ΔV = 10 V 以及电压 V_{out} 建立时间为 42.5 μs 的情况，功率监视 IC 的初始配置时间 $t_{INHIBIT}$ 约为 425 μs。

较长的 $t_{INHIBIT}$ 时间会减少功率开关管误触发的次数，但会造成本安电源瞬时的过流输出，破坏电源的本安性能。合理调整时间 $t_{INHIBIT}$ 是保证电源满足本安特性，提高抗扰性的关键。

2.3.4 功率开关管

功率开关管采用 PMOS 场效应管，驱动功率小，导通电阻小，饱和压降小，开关速度快，损耗小，效率高。

3 本安电源等效电路模型

本安电源由 AC/DC 开关电源模块、取样电路、功率监视 IC、功率开关管、电容、电阻构成，可等效为理想电压源、电阻、电感、电容的串联电路，9 V 和 0.8 A 的本安电源等效参数实测为 C_0 = 4 μF，L_0 = 10 mH，其等效电路如图 4 所示。

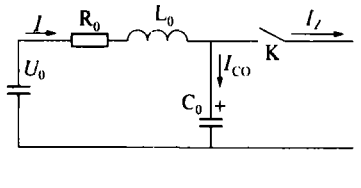

图 4　本安电源的电路模型

电源电流 I 由负载电流 I_z 和暂态电流 I_{CO} 两部分叠加而成。在电源上电期间，电容 C_0 要产生很大的暂态充电电流。当电源电流 I 峰值达到本安电源短路保护整定值时，本安电源保护开关 K 动作，切断电源的输出。这就是本安电源在开路时，短路保护也可能动作的原因。

为了减小等效电容 C_0、暂态电流 I_{CO} 的影响，可采取减小电容、增加等效电阻、限制电压上升率的方法，减小暂态的冲击电流，提高本安电源的带载能力和可靠性。

4 本安电源设计方案的创新点

1）宽电源。国家标准规定的电源电压适应范围为 185 ~ 242 V，采用该技术后，产品的电源电压适应范围为 85 ~ 265 V，实测为 60 ~ 265 V，明显提高了系统抵抗电源波动的能力。

2）高抗干扰性。国家标准规定产品应抵抗 1 500 V 的电快速瞬变脉冲群干扰；采用该技术后，产品可抵抗 4 000 V 的电快速瞬变脉冲群干扰，使系统更能适应煤矿井下强电磁干扰环境，该项技术通过了中国计量科学院的检测。

3）取样电阻小。普通本安电源的电流取样电阻通常为 3 ~ 6 Ω，造成本安电源的内阻大，带载能力差，在负载电流达到短路保护整定值（0.8 A）时，取样电阻的功率损耗高达 3.84 W。采用该技术后，电流取样电阻为 0.2 Ω，电源的内阻小，带载能力强，取样电阻上的功率损耗仅为 0.128 W，降低了备用电池的损耗，提高了备用电池的利用率。

4）功率监视 IC 集成电路。过压、过流、过功率保护采用一片功率监视 IC 集成电路，功能强，电路简单，可靠性高，一致性好，参数调整方便，功率监视 IC 集成电路上电保护功能有效消除了电源送电过程中的误动，提高了本安电源的可靠性。

5 结　　语

本安电源的带载能力和可靠性一直是本安电源研究的课题。在新的本安电源设计方案中以 AC/DC 开关电源取代电源变压器，具有体积小、质量小、效率高的优点，特别是在 AC/DC 电路故障时不会有电能的传递，没有电压输出，电路本质安全，而且具有较宽的电网适应性，很好的抗干扰性

（下转第 67 页）

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

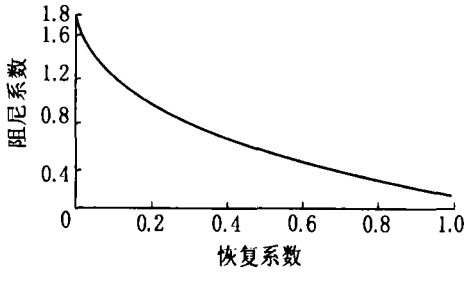

图 4　接触阻尼和恢复系数的关系

固有阻尼，即主要由物料块和反弹板的材料产生内部阻尼产生。而钢质反弹板相对于岩石性质的物料块可以视为完全弹性材料，且在碰撞过程中忽略物料块与反弹板的摩擦作用。故阻尼主要来自物料块的材料阻尼，则在振动分析时所采用的阻尼为物料块的材料阻尼，阻尼系数也即为物料块的材料阻尼系数。

3.2　恢复系数的数值验证与阻尼分析

取半径 $r_1 = 0.02$ m 的煤球以初速度 $v_1 = 5$ m/s 与一厚钢板正碰撞，已知弹性模量分别为 $E_1 = 2.69$ GPa，$E_2 = 196$ GPa，密度 $\rho_1 = 1.39 \times 10^3$ kg/m^3，泊松比 $\varepsilon_1 = 0.23$，$\varepsilon_2 = 0.3$，阻尼系数 $\xi_1 = 0.15$。标号“1”表示煤，标号“2”表示钢。

则根据上面的公式计算可得：$m = 0.047$ kg，$k = 6.506\,2 \times 10^8$ N/m$^{3/2}$，由式（3）得 $e = 0.649\,8$，与文献［2］中给出的煤－钢碰撞恢复系数 $e = 0.648\,7$ 的误差为 0.17%。将 e 的值代入式（4）中得到 $c = 1.497 \times 10^3$。将 c 的计算结果进行反代得到 $\xi = 0.136$，与给定值的误差为 9.37%。出现较大误差原因主要是由于在计算接触阻尼时能量损失环积分与转化后的区域积分存在误差，并且积分时间采用的也是近似值。

4　结　　论

应用线性阻尼接触过程模型得到煤和矸石恢复系数的数学表达式，并推导出影响恢复系数的因素（阻尼系数）和恢复系数的关系。经数值验证表明，由（3）式计算所得的恢复系数与试验测量差异较小，能够满足工程估算需要。

参考文献：

[1]　郎庆田，周甲伟，王元仁，等．基于运动分析和仿真的井下弹道式煤矸分选研究［J］．煤炭科学技术，2008（2）．

[2]　吕冒烈．碰撞恢复系数及其测定［J］．固体力学学报，1984（9）．

[3]　徐志英．岩石力学（第三版）［M］．北京：水利电力出版社，1993．

[4]　金栋平，胡海岩．碰撞振动与控制［M］．北京：科学出版社，2005．

[5]　韩　维．斜碰撞系统动力学研究［D］．南京：南京航空航天大学，2003（6）．

[6]　秦志英，陆启韶．基于恢复系数的碰撞过程模型分析［J］．动力学与控制学报，2006（12）．

作者简介：周甲伟（1984－），男，河南新乡人，硕士研究生，研究方向为机械设计及理论。Tel：13775982003，E－mail：zjwf0204@163.com

收稿日期：2008－06－28；责任编辑：王宗禹

（上接第 64 页）

能；采用新型的单一芯片功率监视 IC 做为可靠性组件的核心器件，完成过流、过压保护，具有功能强、可靠性高、一致性好的优点，提高了本安电源的可靠性和带载能力；同时，由于使用功率监视芯片，电流取样电阻可以减小至 0.2 Ω，降低了电源损耗，提高了备用电池的效率。因此，新型本安电源设计方案具有良好的应用前景。

参考文献：

[1]　王文清．提高煤矿井下智能仪表电磁抗扰度的探讨［J］．选煤技术，2007（6）．

[2]　崔保春，王　聪，戴　颖．提高本质安全开关电源功率及安全火花电路的研究［J］．苏州科技学院学报：自然科学版，2006（3）．

[3]　刘　辉．隔爆兼本安直流稳压开关电源的研究［D］．西安：西安科技大学，2005．

[4]　吴　冰，张睿彬．本安开关电源降压式变换器的仿真及应用［J］．煤炭科学技术，2006（8）．

[5]　张燕美，李维坚．本质安全电路设计［M］．北京：煤炭工业出版社，1992．

作者简介：王文清（1963－），男，北京密云人，高级工程师，北京工业大学软件学院硕士研究生，从事嵌入式系统设计工作。Tel：010－86719621，E－mail：wwenqing@sina.com

收稿日期：2008－07－02；责任编辑：赵　瑞

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net