爆炸性环境用本安电源过流保护短路瞬态能量抑制方法研究*

隆腾舞[1,2]，宗乐文[1,2]，梁龙[1,2]，费汉强[1,2]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.金属矿山安全技术国家重点实验室， 湖南 长沙 410012）

摘要：针对在爆炸性危险环境中，截流型本安电源在半导体开关元件切断过流主回路时，仍存在瞬态能量向负载传递的问题，提出在过流保护电路中增设瞬态抑制元件，降低短路电流上升速率从而抑制瞬态能量的方案。通过分析短路放电过程，建立短路放电数学模型，并采用Multisim对不同电感值的保护电路进行仿真分析，得到电感参数与瞬态能量的非线性关系：增大电感可抑制瞬态电流幅值，但过量电感会延长保护响应时间，导致能量累积。基于短路放电模型，设计和制作了本安电源，试验结果表明，增加电感能有效抑制短路电流和瞬态能量，47 μH电感可使短路电流降低至0.988 A，瞬态能量降低至1.17 μJ，较无电感电路分别减少了87.3%和33.9%。结合并接续流二极管，瞬态电压峰值被限制在安全阈值内，为本安电源的瞬态抑制设计提供了理论与试验依据。

关键词：本安电源；过流保护；瞬态能量抑制；截流型电路；电感储能

中图分类号：TD685　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)07-0249-09

Research on Short-Circuit Transient Energy Suppression Method for Overcurrent Protection of Intrinsically Safe Power Supply in Explosive Environments

LONG Tengwu[1,2], *ZONG Lewen*[1,2], *LIANG Long*[1,2], *FEI Hanqiang*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In explosive hazardous environments, transient energy still transfers to the load when the semiconductor switching element of the current-intercepting intrinsically safe power supply cuts off the overcurrent main circuit. In view of this problem, a scheme was proposed to add transient suppression components in the overcurrent protection circuit to reduce the rising rate of short-circuit current and thereby suppress transient energy. Through the analysis of the short-circuit discharge process, a mathematical model of short-circuit discharge was established. Multisim was used to simulate and analyze protection circuits with different inductance values, and the nonlinear relationship between inductance parameters and transient energy was obtained. Increasing inductance can suppress the amplitude of transient current, but excessive inductance will prolong the protection response time, leading to energy accumulation. Based on the short-circuit discharge model, an intrinsically safe power supply was designed and fabricated. The test results show that increasing inductance can effectively suppress short-circuit current and transient energy. A 47 μH inductance can reduce the short-circuit current to 0.988 A and the transient energy to 1.17 μJ, which are 87.3% and 33.9% lower than those of the inductance-free circuit, respectively. Combined with the parallel freewheeling diode, the peak transient voltage has been limited within the safe threshold, which provides a theoretical and test basis for the transient suppression design of intrinsically safe power supplies.

Key words: Intrinsically safe power supply, Overcurrent protection, Transient energy suppression, Current-intercepting circuit, Inductive energy storage

* **收稿日期**：2025-04-26
基金项目：湖南省重点研发计划项目(2023SK2076)
作者简介：隆腾舞(1990—)，男，湖南邵阳人，硕士，工程师，主要从事矿山机电设备安全及检测检验研究。E-mail:285504933@qq.com

0 引言

本安型是电气设备的一种防爆型式,其通过将设备内部和暴露于爆炸性环境的连接导线可能产生的电火花或热效应能量限制在不能产生点燃的水平来实现防爆。本安型设备具有结构紧凑、体积小、重量轻等优势,支持带电维护、标校及部件更换等操作,被广泛应用于石油化工、烟花爆竹、煤矿等易燃易爆高危场所,已成为煤矿等高危场所中不可缺少的电气设备,且是防爆技术领域的核心发展方向之一。本安型输出电源作为传感器等现场设备的能量来源,必须严格控制其输出能量,否则将导致失爆等危险,因此应严格要求本安电源的输出功率、过压过流及其保护响应速度。

根据保护模式,本安型输出电源输出特性可分为恒流型、减流型和截流型。恒流型电路在故障状态下,回路电流接近额定电流,电路发热严重、效率降低。减流型电路可将故障后的电流降低到某个低于额定值的较小电流。截流型电路在故障状态下通过保护电路中的半导体开关元件直接切断电源输出,让负载侧的电压和电流快速降为零,保证本质安全性能,其性能最优[1]。但半导体开关元件存在一定的响应时间,因此采用此类元件设计的保护电路需要符合《爆炸性环境 第4部分:由本质安全型"i"保护的设备》(GB/T 3836.4—2021)附录E中的瞬态能量试验要求。若瞬态能量过大,可能导致失爆风险,因此需要采取瞬态能量抑制措施[2],这也是本安型输出电源的重大安全隐患之一。针对上述问题,研究人员基于过流保护电路的结构设计,对电路中存在的多个影响因素展开了研究,并提出了解决方案。郭长娜[3]研究了半导体芯片反应速度及短路瞬间电压、电流对瞬态能量的影响。张岩[4]分析了瞬态能量产生的因素,并提出了两种抑制瞬态能量的设计方法,解决了本安电源设计过程中不能通过火花点燃试验及瞬态能量试验的问题。聂鸿霖等[5]对混合型本安电路的短路瞬态能量进行了研究,并针对截流型电路设计建立了短路瞬态能量数学模型,分析了电容、电感、电源电压和保护时间对短路瞬态能量的影响,最后设计了本安电源进行短路试验,验证了混合电路中增大电源电压会显著增加短路瞬态能量,得出了缩短动作保护时间可有效降低瞬态能量的结论,为本安电源设计提供了参考。

在上述研究中,研究人员通过数学建模、电路仿真和实物测试等方式提出并验证了影响过流保护电路瞬态能量的主要参数,但是尚未进一步分析参数优化在本安电源保护电路设计时的可操作性,也没有针对保护电路的瞬态能量抑制提出具体的电路优化设计方案。鉴于此,本文将针对主要影响参数在过流保护电路中的变化特征展开分析,并在考虑实际可操作性的基础上,确定一种简单且高效的瞬态能量抑制电路设计方案。主要影响参数首先是电压,短路故障时,输出电压会迅速拉低,在瞬态能量计算中的权重占比很小;其次是开关元件的响应时间,由于开关元件的动作[6]在一定程度上受后级电路的干扰,在实际的设备配接中无法有效控制响应时间;最后是电流,短路故障时,瞬态电流急剧上升导致电路输出功率显著增大,采取合适的限流方式可以显著降低短路瞬态电流,因此通过限制瞬态电流来抑制瞬态能量是更有效的方式之一[8]。本文提出在过流保护电路设计中增设瞬态抑制元件降低瞬态电流,结合二极管作为续流元件,吸收抑制元件的分断高压,对过流保护电路进行可靠保护,再结合数学模型、电路仿真及实物测试进行分析和验证。

1 截流型过流保护电路结构与瞬态分析

本安电源的截流型[9-10]过流保护电路设计如图1所示。当模拟火花点燃装置制造短路故障时,开关元件寄生参数会导致电路从导通到关断存在一定的响应时间,电路在这个短暂过程中将会瞬间释放较高的能量[11]。图1中U为电源电压;R_1为限流电阻;R_2为过流保护采样电阻;C为电路等效电容;R_L为负载;G为火花试验机接入点;i_1为电源电流;i_2为流经电感的后级负载电流;i_c为电容放电电流;i_g为短路故障支路的电流;u_L为电感元件两端电势差;u_c为电容元件两端电势差;u_0为最高输出电压。

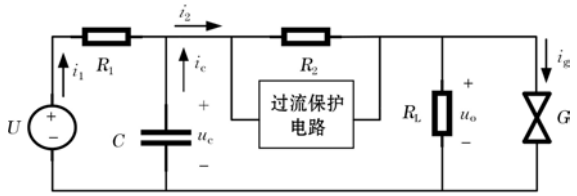


图1 截流型过流保护电路

Fig.1 Current-intercepting overcurrent protection circuit

图2所示为过流保护短路瞬态波形。由图2可

知，当后级电路发生过流或短路故障时，电路会被过流保护元件关断，输出电压被拉低至 0。同时，由于保护具有延时性[12]，电流会瞬间上升再下降。瞬态过程放电模型可划分为 3 个过程：T_1 为正常工作阶段，电路正常工作，无危险能量释放；T_2 为过流能量持续释放阶段，电流急剧上升，快速释放能量；T_3 为过流保护动作关断阶段，过流保护触发，从而关断输出，能量被抑制。综上，T_2 阶段最为危险，本文的主要研究内容为抑制 T_2 阶段的能量释放。

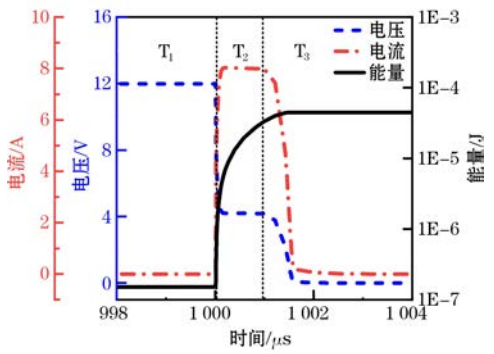


图 2　过流保护短路瞬态波形

Fig.2　Short-circuit transient waveform in overcurrent protection

为降低过流保护电路的瞬态能量，本文提出在电路中增设瞬态抑制元件的方法。图 3 为增设瞬态抑制元件后的过流保护电路，因为电感元件两端的电流不能突变[13]，电路串接电感元件，在开关元件响应时间内抑制短路电流上升的速率，从而降低施加到负载上的瞬态能量[14]。

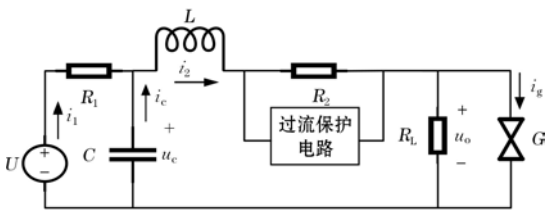


图 3　增设瞬态抑制后的过流保护电路

Fig.3　Enhanced overcurrent protection circuit with transient suppression

根据图 3 可列出电路的瞬态表达式为：

$$\begin{cases} i_2 = i_c + i_1 \\ i_c = -C\dfrac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} \\ U = u_c + R_1 i_1 \\ u_c = u_L + R_2 i_2 + u_o \\ u_L = L\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{1}$$

式中：L 为电感；t 为时间。

整理式(1)可以得到关于 i_2 的二阶非齐次微分方程：

$$LC\frac{\mathrm{d}^2 i_2}{\mathrm{d}t^2} + \left(CR_2 - \frac{L}{R_1}\right)\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + C\frac{\mathrm{d}u_o}{\mathrm{d}t} - i_2 - \frac{R_2}{R_1}i_2 = \frac{u_o - U}{R_1} \tag{2}$$

考虑电路在发生短路故障的瞬间，负载 R_L 两端的电流远远小于短路故障点的瞬态电流，因此 i_g 可以由 i_2 近似代替。

$$u_o = i_g R_g \approx i_2 R_g \tag{3}$$

式中，R_g 为短路等效电阻。

式(2)可近似为：

$$\frac{\mathrm{d}^2 i_2}{\mathrm{d}t^2} + \left(\frac{R_2 + R_g}{L} + \frac{1}{CR_1}\right)\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + \frac{(R_1 + R_g + R_2)}{LCR_1}i_2 = -\frac{U}{LCR_1} \tag{4}$$

式(4)中对应的二阶齐次微分方程的特征方程为：

$$r^2 + \left(\frac{R_1 + R_g}{L} + \frac{1}{CR_1}\right)r + \frac{(R_1 + R_g + R_2)}{LCR_1} = 0 \tag{5}$$

式中，r 为特征根。

特征方程的特征根判别式为：

$$\Delta = \left(\frac{R_1 + R_g}{L} + \frac{1}{CR_1}\right)^2 - \left(4\frac{(R_1 + R_g + R_2)}{LCR_1}\right) > 0 \tag{6}$$

根据式(6)解得的特征根可判别二阶动态电路的振荡状态[5]：当判别式 $\Delta \geqslant 0$ 时，特征根为实数，电路在动态变化过程中不会出现振荡；当 $\Delta < 0$ 时，特征根为复数，电路在动态变化过程中会出现振荡。在设计的二阶动态电路系统中，系统由电源电压、电阻、电感和过流保护电路组成，输出端并接的模拟短路装置设置了一定的延时。因此在初始阶段，回路电流约等于电源电压与输出端负载的比值，电路处于正常工作状态，电感元件等效于导线，系统电源对其分压接近于 0。当模拟短路装置触发时，电路将从正常状态过渡到短路故障状态，回路中总电阻急剧减小，在电源电压和电容的作用下，回路电流将会急剧增大。由于电路中串接电感元件，根据楞次定律[13]，电感线圈会反抗电流的变化而产生反电动势。电源电压先分压给电感线圈来抵消电感线圈的反电动势，因此发生短路故障的瞬间，负载端的电压很小，回路中电流的增长趋势被抑制。随着电感元件不断储能，电感线圈的反电动势电压值将会从电源电压值逐渐减小，直至为 0，回路中的电流增大。当过流保护电路中检流电阻的电流达到设定值，开

关元件从导通变为关断,切断输出电流。在电路从初始稳态经短路故障和过流保护的瞬态过渡过程中,电感线圈两端的电压先上升后下降,变化轨迹近似于脉冲激励,其脉冲曲线幅值约等于电源电压。根据二阶动态电路系统[15-16]单位脉冲激励响应的过阻尼非振荡曲线可知,待求函数波形趋势为先短暂地超调然后逐渐衰减至 0,因此上述二阶动态电路中电感上的电流具有大致相同的变化趋势。另外当微分方程的非齐次项不是单位脉冲函数,而是单位脉冲函数的倍数时,系统响应的幅值同样会乘以相应的倍数值。根据式(4)可以看出,非齐次项中电源电压为分子项,电感为分母项,因此增大电源电压会增大系统电感电流响应的幅值,而增大电感值则会减小系统电感电流响应的幅值。

2　截流型过流保护电路瞬态抑制设计仿真与研究

根据上述理论分析可知,增设瞬态抑制后的电路电感电流呈过阻尼的非振荡状态,并且瞬态电流值与电感成反比例关系。图 4 为利用分立器件搭建的本安型过流保护电路,设供电电压 VCC 为 12 V,R_3 和 R_5 为过流保护检流电阻。当负载电流增大时,检流电阻两端的压降也增大,当压降大于三极管 Q_1 的开启电压时,Q_3 导通控制 MOS 管 Q_5 关断,从而实现过流保护。电路设定的过流保护值为 1 A,针对本过流保护电路,选取不同规格的电感 L_2 进行瞬态仿真,分析不同电感对过流保护电路瞬态电流及能量的抑制作用。

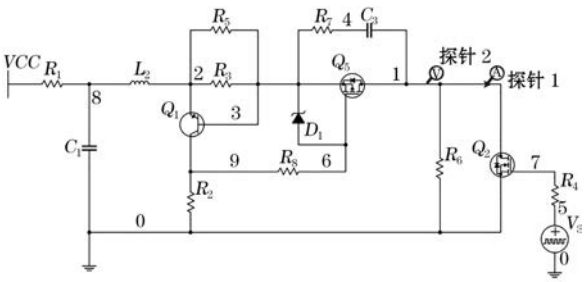
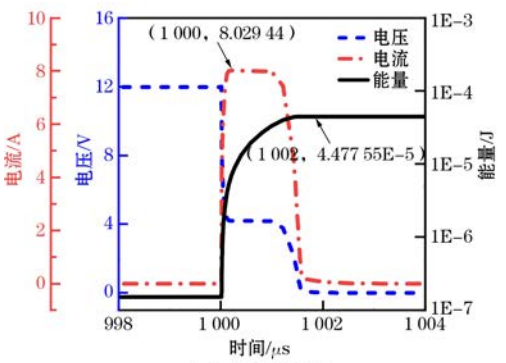


图 4　截流型过流保护电路原理

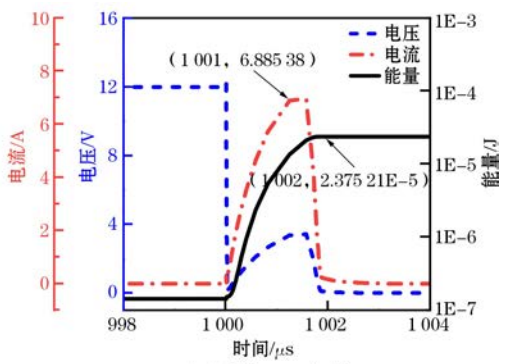
Fig.4　Principle of current-interrupting overcurrent protection circuit

2.1　不同电感对过流保护电路瞬态抑制的作用

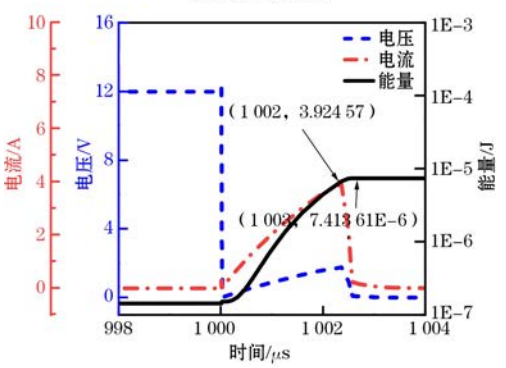
针对电感对过流保护电路瞬态抑制的影响,本节设计了 6 组仿真试验,设定电路过流保护动作值为 1 A,在不改变其他电路参数的条件下,分别对未串接电感和串接 1 μH、5 μH、10 μH、50 μH、100 μH 电感的电路模型进行仿真,借助 Multisim 软件的瞬态分析功能抓取过流保护输出的瞬态电流和瞬态能量。串接不同电感对应的瞬态电流及瞬态能量曲线如图 5 所示。



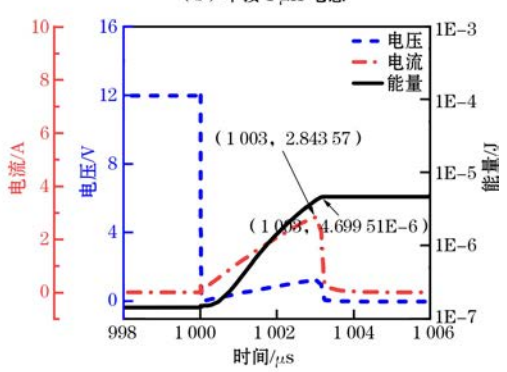
(a) 未串接电感



(b) 串接 1 μH 电感



(c) 串接 5 μH 电感



(d) 串接 10 μH 电感

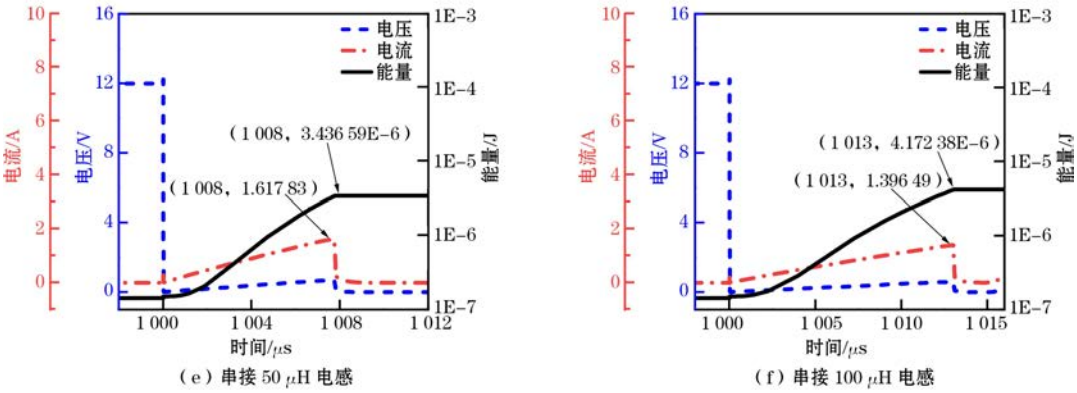


图 5 不同电感值下的过流保护输出瞬态波形

Fig.5 Output transient waveforms of overcurrent protection under different inductance values

由图 5 可知,当电路发生过流或者短路故障时,输出端电压被拉低,输出电流逐渐升高,而后产生过流保护电路动作,使输出断开,电流变为 0。不同电感下对应的瞬态电流和瞬态能量如图 6 所示。

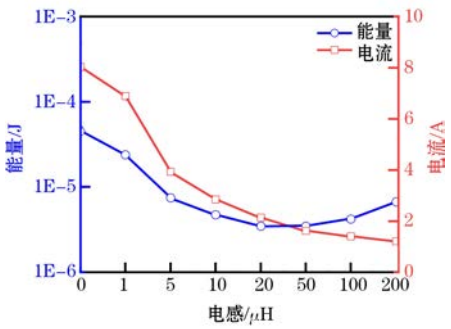


图 6 不同电感值下的输出瞬态电流和瞬态能量

Fig.6 Output transient current and transient energy under different inductance values

从图 5 可以看出,未串接电感时,短路电流和瞬态能量值最大,随着串接的电感增加,短路输出电流逐渐减小,而瞬态能量则先减小,在 50 μH 时达到极值,然后略微增大。随着电路串接的电感值增大,短路瞬态电流上升和下降时间逐渐变长,但瞬态电流峰值的变化较小,进而导致在 100～200 μH 电感值下产生的瞬态能量相较会略微增大。由图 6 可知,在极值点前电流和能量的下降斜率大,极值点后变化趋于平缓,逐渐逼近过流保护动作值。因此并非串接的电感值越大,对过流保护电流瞬态抑制的效果就越好,要根据实际情况选择合适的电感。

2.2 不同过流保护值下电感的作用

通过仿真验证了电感可以有效抑制短路输出电流和瞬态能量,并且分析了不同电感值对于电路的抑制效果。本节基于 10 μH 电感,研究了电感对不同过流保护动作值电路的瞬态抑制效果。通过调整过流保护电路中检流电阻的阻值可以设置不同的过流保护动作值。本安电源过流保护动作典型值为 1 A 和 2 A,本文选择 2 A 的过流保护电路进行分析。图 7 为未串接电感和串接 10 μH 电感时 2 A 过流值的过流保护输出瞬态波形。

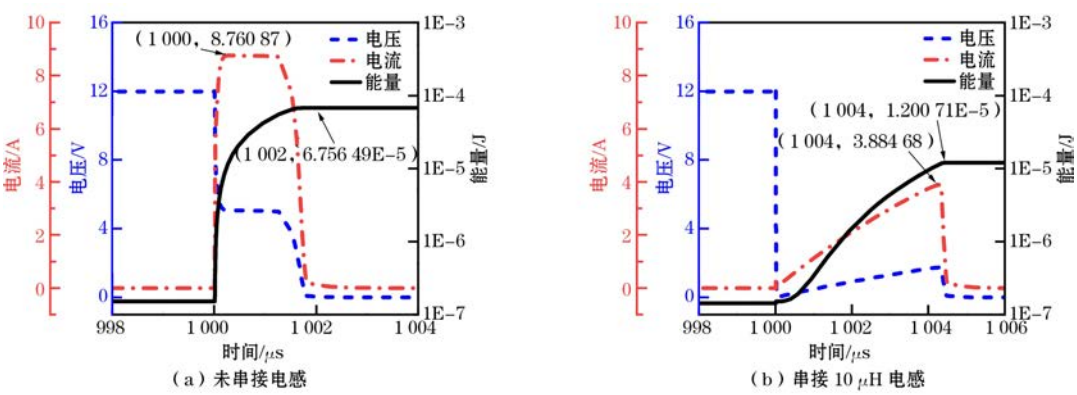


图 7 2 A 过流值的过流保护输出瞬态波形

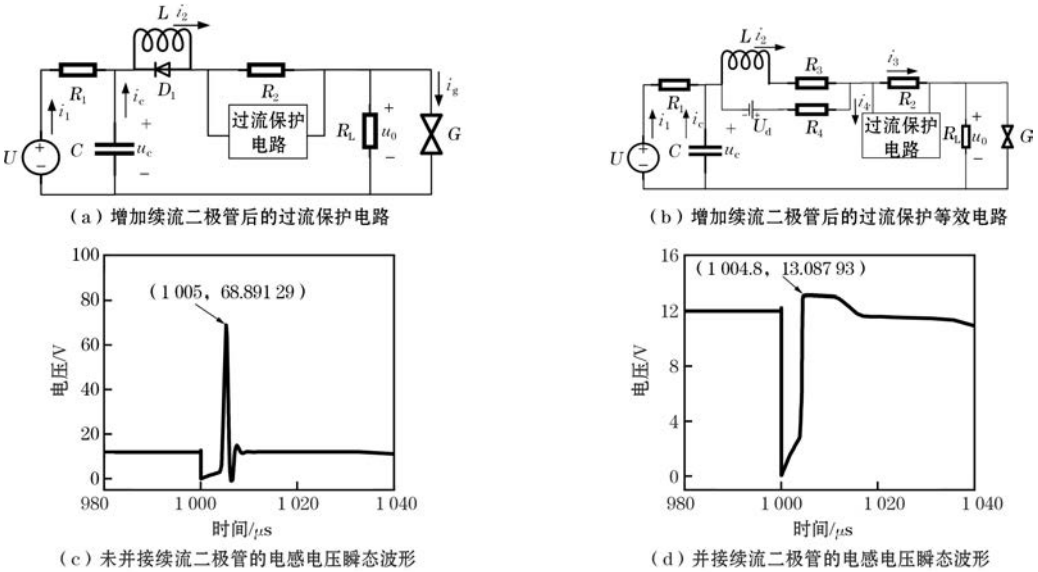
Fig.7 Overcurrent protection output transient waveforms with 2 A overcurrent value

与图 5(a)进行对比,1 A 过流值条件下短路瞬态电流值为 8.029 A,瞬态能量值为 44.776 μJ;由图 7(a)可知,2 A 过流值条件下短路瞬态电流值为 8.761 A,瞬态能量值为 67.565 μJ。因此过流保护电路的动作值越大,短路瞬态电流和瞬态能量也会越大。对比图 5(d)和图 7(b),增加电感后的短路电流峰值及瞬态能量相较于无电感电路明显减小。过流保护值为 2 A 时,增加 10 μH 电感,短路电流由 8.761 A 降到 3.885 A,瞬态能量由 67.565 μJ 下降到 12.007 μJ,电流和电感分别下降了约 55.7%和 82.2%。由上可知,当电感一定时,过流保护动作值越大,电感对电路的瞬态抑制效果会减弱。

通过仿真可知,在过流保护电路中增加瞬态抑制电感能有效减小短路电流和瞬态能量。另外,串接的电感值要根据实际电路和需求进行选择。

2.3 续流二极管对电感的影响

增加电感虽然能有效地降低短路电流和瞬态能量,但电感对电流的瞬态抑制原理是将能量暂时存储,然后逐渐释放[17]。当电路设计为图 4 时,在开关管完全断开时,电感能量没有合适的释放回路,会在断开处形成高电压[18]。如果开关管承受不住电感释放的高压,将会击穿开关管的漏源极,使得过流保护失效。因此,如图 8(a)所示,在瞬态抑制电感的两端并接续流二极管,为能量提供释放回路,其等效电路如图 8(b)所示。如图 8(c)所示,在过流保护作用后,电感将存储的能量转换为电压对外释放,电压高达 68.891 V,远远高出电源电压;图 8(d)为并接续流二极管后的波形,瞬态电压未出现明显尖峰,最大瞬态电压峰值比源电压值高出不到 1 V,能有效抑制电感产生的高压。



(a) 增加续流二极管后的过流保护电路　(b) 增加续流二极管后的过流保护等效电路

(c) 未并接续流二极管的电感电压瞬态波形　(d) 并接续流二极管的电感电压瞬态波形

图 8 增加续流二极管后保护电路和电感电压瞬态波形

Fig.8 Protection circuit and inductance voltage transient waveforms with added freewheeling diode

由于二极管的伏安特性,可将电路等效为图 8(b)所示电路:其中 R_3 为电感内阻,U_d 为二极管最大开启电压,R_4 为二极管动态内阻。当负载过流或者短路后,可对电路进行模型分析,初始时刻 $i_3(0)=I$,得到回路电压:

$$L\frac{\mathrm{d}(i_3+i_4)}{\mathrm{d}t'}+(i_3+i_4)R_3+U_d+i_4R_4=0 \quad (7)$$

式中,t'为放电即时时间。

在电感电路线性衰减模型状态下,电弧放电电流为:

$$i(t)=I\left(1-\frac{t'}{T'}\right) \quad (8)$$

式中:I 为初始电流;T'为放电总时间。

得到线性微分方程:

$$i_4=\frac{IL}{R_3+R_4}\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}\frac{1}{T'}-\frac{R_d}{L}-\frac{U_d}{IL}\right)\cdot\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_3+R_4}{L}t'}\right)+\frac{IR_3t'}{(R_3+R_4)T'} \quad (9)$$

放电电压为:

$$u(0)=U+U_d+i_4R_4-i_3R_2 \quad (10)$$

可得到放电能量 W:

$$W=\frac{UIT'}{6}+\frac{1}{2}L_DI^2 \quad (11)$$

得出等效电感 L_D:

$$L_D=L\left\{\frac{R_4}{R_3+R_4}\left(\frac{R_4}{R_3+R_4}-\frac{R_3}{L}-\frac{U_dT'}{IL}\right)\left\{1-2\left[\frac{L}{T'(R_3+R_4)}-\left(\frac{L}{T'(R_3+R_4)}\right)^2(1-e^{-\frac{R_3+R_4}{T'}})\right]\right\}\right\}+\frac{2R_3T'}{3L}+\frac{R_3R_4T'}{3L(R_3+R_4)}+\frac{U_dT'}{IL} \tag{12}$$

考虑最理想情况，即$R_3=0$时，其等效电感为：

$$L_D=L\left\{1+\frac{2L}{T'R_4}\left(\frac{U_dT'}{IL}-1\right)\left[1-\frac{L}{T'R_4}(1-e^{-\frac{T'R_4}{L}})\right]\right\} \tag{13}$$

当$U=8$ V，$I=1$ A，$L=20$ μH时，放电时间为$T'=94.56$ μs[19]，且电感越大，放电时间越长；二极管$U_d=0.55$ V，25 ℃时，二极管温度电压当量约为26 V，静态电流取1 A，得出二极管动态电阻$R_4=26$ Ω，则等效电感$L_D=15.56$ μH。可知并接二极管后，电感减小，且对电感储能形成放电回路，保证过流保护器件的安全。

3　实物验证

为验证过流保护及瞬态能量抑制模型的正确性，制作了基于该模型的本安电源，并对不同的电感分别进行短路试验。如图9所示，不同电感电路情况下，分别用示波器测试输出电压、瞬态电流及瞬态能量。

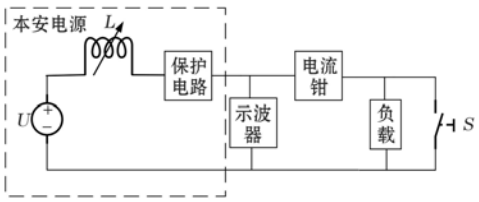
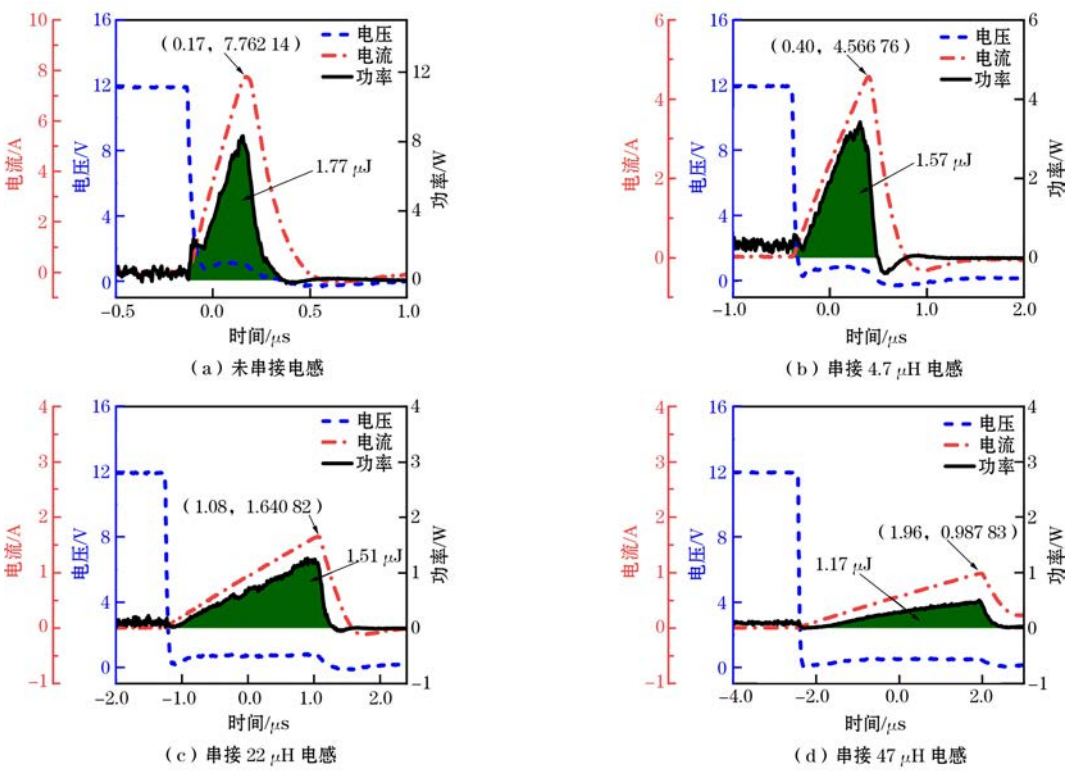


图9　增设瞬态抑制后的过流保护电路示意

Fig.9　Schematic of overcurrent protection circuit with added transient suppression

本文共设计4组试验，分别为未串接电感和串接4.7 μH、22 μH和47 μH的电感，在不改变电路其他参数的条件下，使用示波器触发功能抓取过流保护输出的瞬态电流和瞬态能量，如图10所示。



(a) 未串接电感　(b) 串接4.7 μH电感

(c) 串接22 μH电感　(d) 串接47 μH电感

图10　不同电感值下的输出电流和瞬态能量抑制波形

Fig.10　Waveforms of output current and transient energy suppression under different inductance values

由图(10)可知，未串接电感时电路具有最大的短路电流和瞬态能量，分别约为7.762 A和1.77 μJ。当电路串接4.7 μH电感时，电路输出短路电流和瞬态能量分别约为4.567 A和1.57 μJ；串接22 μH电感时，电路输出短路电流和瞬态能量分别约为1.641 A和1.51 μJ；串接47 μH电感时，电路输

出短路电流和瞬态能量分别约为 0.988 A 和 1.17 μJ,较无电感电路分别降低了 87.3%和 33.9%。可以得出,随着电路串接电感值的增大,电路短路电流和瞬态能量值逐渐减小。试验测试结果与理论分析和仿真试验结果一致,因此,在过流保护电路中增加瞬态抑制电感能够有效抑制过流保护电路的短路电流和瞬态能量。

测试短路瞬态输出电压和能量的同时,分别测试电感在未并接二极管和并接二极管两种情况下的电压,如图 11 所示。未并接二极管时,产生 131.540 V 的高电压,而并联二极管后,产生的电压为 28.916 V,电压降幅为 78.0%。

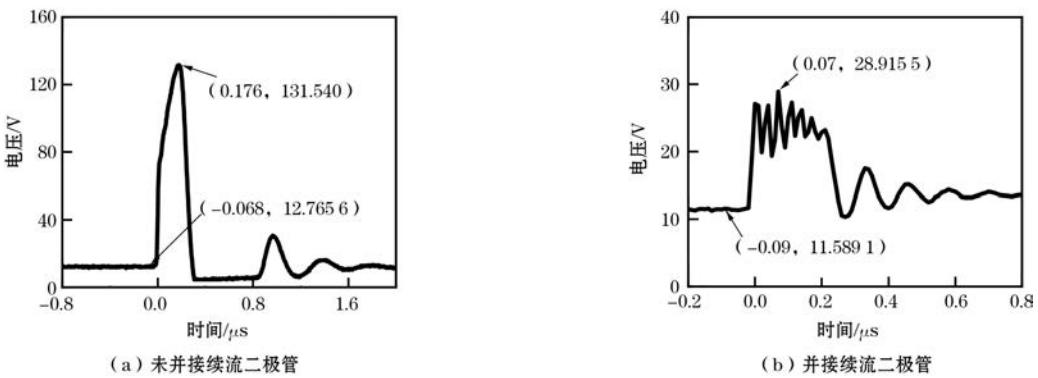


图 11 电感电压瞬态波形

Fig.11 Transient waveforms of inductance voltage

4 结论

本文针对本安型电源短路过程中瞬态能量的产生机理及发展规律进行了研究和分析,提出了抑制瞬态能量的方法。

(1) 针对过流保护电路的瞬态抑制方法开展研究,结合理论建立了模型和仿真验证。增加电感可明显减小短路瞬态电流和瞬态能量,随着电感的增加,短路瞬态电流随之减小。但随着电感的增加,保护器件关断时间越长,使得瞬态能量呈现先大幅降低,再缓慢增加,最后趋于稳定的特性。

(2) 引入电感虽然有效地抑制了瞬态能量,但电感会对保护器件产生过冲电压,如果电压过大,会损坏保护器件,导致整个电路过流保护失效。基于电感电弧放电机理,引进续流二极管,并对电感并联二极管的放电模型进行电路仿真分析,得出并联二极管后过冲电压下降。

(3) 基于瞬态能量抑制模型,设计了本安电源过流保护电路,对未串接电感和串接不同电感值的电路进行测试,发现串接电感电路能有效地抑制短路电流和瞬态能量,47 μH 电感短路电流较无电感电路降低了 87.3%,瞬态能量较无电感电路减少约 33.9%。另外对抑制趋势进行了分析,随着电路串接电感值的增加,电感对于电路瞬态抑制的作用趋于饱和,电流关断时间会逐渐增大;同时对电感增加二极管后的电路进行测试,相比未并接二极管的电路,过冲电压降低幅度为 78.0%,效果显著。通过实物验证了理论分析和电路仿真的正确性,为后续本安电源设计提供了更加开阔的思路。

参考文献(References):

[1] 康骞.矿用大功率本安电源的开发[D].太原:太原理工大学,2021.
KANG Qian. Development of high power intrinsically safe power supply for mining[D].Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2021

[2] 徐直. 本质安全电路放电特性的研究[J].煤矿机械,2014,35(7):92-93.
XU Zhi. Research on discharge characteristics of intrinsicall safe circuit[J]. Coal Mine Machinery,2014,35(7):92-93.

[3] 郭长娜.矿用输出本质安全型电源瞬态能量抑制策略研究[J].煤矿安全,2025,56(1):188-194.
GUO Changna. Research on transient energy suppression strategy of intrinsically safe output power supply for mine [J]. Safety in Coal Mines,2025,56(1):188-194.

[4] 张岩.本安电源设计中的瞬态能量抑制[J].煤矿安全,2017,48(8):63-68.
ZHANG Yan. Transient energy suppression in design of intrinsic safe power source[J]. Safety in Coal Mines,2017,48(8):63-68.

[5] 聂鸿霖,许春雨,宋建成,等.混合型本安电路短路瞬态能量分析[J].工矿自动化,2023,49(7):120-125.
NIE Honglin, XU Chunyu, SONG Jiancheng, et al. Short circuit transient power analysis of hybrid intrinsically safe circuit [J]. Journal of Mine Automation,2023,49(7):120-125.

[6] 师亚萍.复合型本质安全型电路的放电特性分析[J].煤矿机电,2020,41(6):68-71.
SHI Yaping. Analysis of discharge characteristics in compoundintrinsically safe circuits[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology,2020,41(6):68-71.

[7] 邓佳楠,郭庆瑞,余波,等.新型本质安全电源保护电路设计[J].煤炭工程,2024,56(1):21-25.
DENG Jia'nan, GUO Qingrui, YU Bo, et al. Design of a new-type intrinsically safe power supply protection circuit for mining[J]. Coal Engineering,2024,56(1):21-25.

[8] 董建国,李艳民,周兴东,等.本安电源降低火花能量的几个措施[J].煤矿安全,2020,51(3):97-99.
DONG Jianguo, LI Yanmin, ZHOU Xingdong, et al. Several methods of reducing discharge energy for intrinsic safety power supply[J]. Safety in Coal Mines,2020,51(3):97-99.

[9] 于月森.本质安全型开关电源基础理论与应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2012.
YU Yuesen. Study on the theory and application of the intrinsically safe switch power supply[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2012.

[10] 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]. Journal of Mine Automation,2016,42(12):56-58.

[11] 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 mineused intrinsic safety power supply[J]. Journal of Mine Automation,2012,38(2):22-25.

[12] 金业勇,陈贤.锂电池输出瞬态能量分析及抑制电路[J].煤炭技术,2021,40(7):161-163.
JIN Yeyong, CHEN Xian. Output transient energy analysis and suppression circuit of lithium battery [J]. Coal Technology,2021,40(7):161-163.

[13] 赵永秀,王骑,王瑶,等.爆炸性环境电感分断放电引燃能力及本安性能评价方法[J].煤炭学报,2020,45(增刊2):867-874.
ZHAO Yongxiu, WANG Qi, WANG Yao, et al. Criterion of intrinsically safe and ignition capability of inductor-disconnected-discharge in explosive environments [J]. Journal of China Coal Society,2020,45(Suppl.2):867-874.

[14] 刘建华.爆炸性气体环境下本质安全电路放电理论及非爆炸评价方法的研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.
LIU Jianhua. A study on discharge theory and non-explosion evaluating method of the intrinsically safecircuits for explosive atmospheres[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2008.

[15] 闫崇,李良光.CL复合电路火花放电特性的仿真与设计[J].黑龙江工业学院学报(综合版),2022,22(6):65-69.
YAN Chong, LI Liangguang. Simulation and design of spark discharge characteristies of CL composite circuit[J]. Journal of Heilongjiang University of Technology (Comprehensive Edition),2022,22(6):65-69.

[16] 于月森,戚文艳,胡义涛,等.复合电路的放电特性研究[J].煤矿安全,2013,44(9):54-57.
YU Yuesen, QI Wenyan, HU Yitao, et al. Study on discharge characteristics of compound circuits[J]. Safety in Coal Mines,2013,44(9):54-57.

[17] 朱林,刘树林,刘柏清,等.本质安全低压直流电路放电理论及数值研究综述[J].工矿自动化,2022,48(8):16-25.
ZHU Lin, LIU Shulin, LIU Boqing, et al. Review of discharge theory and numerical research on intrinsically safe low voltage DC circuits[J]. Journal of Mine Automation,2022,48(8):16-25.

[18] 陈锐,范志磊,李欣颖,等.本质安全电路电感储能抑制分析[J].电气防爆,2022(1):4-9.
CHEN Rui, FAN Zhilei, LI Xinying, et al. Analysis on inductive energy storage suppression in intrinsically safe circuit[J]. Electric Explosion Protection,2022(1):4-9.

[19] 孟庆海,胡天禄,牟龙华.低能电弧放电时间与电路参数间的关系[J].电工技术学报,2000,15(4):19-22.
MENG Qinghai, HU Tianlu, MU Longhua. Relationship between discharge time of low energy arc and circuit parameters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2000,15(4):19-22.