

Buck 变换器的输出短路火花放电能量及输出本质安全判据*

刘树林[†] 崔强 李勇

(西安科技大学电气与控制工程学院, 西安 710054)

(2013年2月3日收到; 2013年4月28日收到修改稿)

为得出 Buck 变换器的输出本质安全判据, 基于安全火花试验装置, 对其输出短路火花放电特性进行了试验研究, 发现其放电过程可分为介质击穿、火花产生、火花维持和火花熄灭四个阶段. 基于得出的火花放电特性, 对其输出短路火花放电能量进行了深入分析, 指出对于给定电感的 Buck 变换器, 当负载电阻 R_L 小于给定电感对应的临界电阻 R_{LC} 时, 火花放电能量是关于 R_L 的凹函数; 而在 $R_L > R_{LC}$ 时, 是关于 R_L 的凸函数. 考虑到实际的参数取值范围, 进一步指出: $R_L < R_{LC}$ 时的火花放电能量随 R_L 的增加而增大, 且在 $R_L = R_{LC}$ 时达到最大值; 而在 $R_L > R_{LC}$ 时, 则随着 R_L 的增加, 先增大后减小, 在增加到特征电阻 $R_{L,DCM}$ 时达到最大值. 得出了变换器在全动态范围内的最危险工况: 变换器在输入电压最高及负载电阻等于 $R_{L,DCM}$ 时工作于 DCM, 此时, 短路火花放电能量达到最大值. 基于能量等效, 提出了可模拟变换器输出短路放电特性的等效简单电容电路及输出本质安全判据, 仿真和试验结果验证了理论分析及所提出判据的正确性和可行性.

关键词: Buck 变换器, 本质安全, 短路火花放电能量, 输出本质安全判据

PACS: 84.30.Jc, 84.30.Bv, 52.80.Mg

DOI: 10.7498/aps.62.168401

1 引言

在煤矿等危险环境推广应用本质安全 (简称“本安”) 型电气电子设备是必然趋势^[1,2], 本安型开关电源作为其中的重要组成部分受到广泛关注^[2-6]. 根据国家强制性标准要求, 本质安全开关电源必须通过防爆及本安认证, 才能应用于危险环境^[7]. 本安防爆性能的评价方法主要包括最小点燃能量^[8]、临界点燃曲线^[7]、基于安全火花试验装置的开闭爆炸性试验^[7]、能量或功率判别式^[9]以及非爆炸性本安判据^[10,11]等. 最小点燃能量通常比实际需要的点燃能量小得多, 因而不适用于用作判断电路的本安性能; 临界点燃曲线仅适用于简单直流线性电路; 目前获得的能量或功率判别式仅适用于简单电感电路; 文献^[10, 11]提出的评价方法仅适用于判断变换器的内部本安性能. 目前, 评价

开关电源或开关变换器输出本安性能最有效的方法仍然是采用基于 IEC 标准的安全火花试验装置进行开闭爆炸性试验. 但爆炸性试验装置是一个复杂的试验系统^[6], 国内只有少数检测认证机构具备此类装置, 大多数本安产品研发机构不具备试验的环境和条件. 因此, 爆炸性试验方法制约了本安防爆开关电源产品的设计、制造及推广应用, 加大了研发成本; 同时, 开闭爆炸性试验可能并非在所试验产品的最危险工况下进行, 因而其评价结果的可信度也还有待提高. 因此, 迫切需要研究开关电源或变换器的最危险工况, 并得出其非爆炸性输出本质安全判据, 以便指导本安开关电源产品的开发与研制, 并提高相关产品的安全性能.

Buck 变换器是最常用的开关电源拓扑之一, 至今仍受到业界专家、学者的广泛关注, 文献^[12—15]对其分岔行为及混沌控制问题进行了研究, 文献^[16, 17]分别对其单周控制中的降频现象及峰

* 国家自然科学基金 (批准号: 50977077, 51277149) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: slliu100@xust.edu.cn

值电流控制中的次谐波振荡现象进行了分析,文献[18]探讨了输出电容等效串联电阻对其稳定性的影响,相关报道还有很多,均旨在改善 Buck 变换器性能,提高其稳定性. Buck 变换器在煤矿、石化等危险环境的电气电子设备中也被广泛应用. 针对 Buck 变换器应用于危险环境的本安防爆问题,文献[11]提出了一种等效电阻法,得出了其内部本安判据,但不能评价其输出本安性能;虽然文献[19]提出了一种 Buck 变换器输出本安性能的判断方法,但未考虑实际的变换器输出短路放电特性及负载电阻的影响,使得根据该判断方法设计的本安 Buck 变换器过于保守,限制了其本安输出功率的提高. 文献[20]对一种改进 Buck 变换器的输出短路放电特性进行了建模研究,通过改变电路结构提高其本安性能. 文献[2]提出了一种变换器输出短路放电能量的分析及输出本安性能的评价方法,但该方法着重考虑电感变化对输出短路放电能量的影响,并认为电感电流连续导电模式 (CCM) 时的短路放电能量总是比电感电流断续导电模式 (DCM) 时的更大 [2,20]. 而实际上对一工程应用中的变换器,电感已给定,因此文献[2]采用的分析方法的出发点与工程实际存在偏差,而且未能得出变换器的最危险工况,特别是以此方法分析 Buck 变换器的输出短路放电能量及本安性能时,所得出的结论与应用安全火花试验装置进行试验的评价结果还出现了一些矛盾 (本文的分析结果是 DCM 时的能量更大): 即根据前者判断为安全的情况,还有可能存在安全隐患,主要原因在于 Buck 变换器输出短路火花的引燃能力强力依赖于负载电阻.

为此,本文依据安全火花试验装置对 Buck 变换器的输出短路放电特性进行研究,并对负载电阻变化对输出短路火花放电能量的影响进行深入分析,据此得出 Buck 变换器的最危险工况及非爆炸性输出本质安全判据,为本质安全开关变换器的本安性能试验、判断及其设计提供理论指导.

2 Buck 变换器及其临界负载电阻 R_{LC}

Buck 变换器的组成原理电路如图 1 所示.

Buck 变换器存在 CCM 和 DCM 两种工作模式,其临界电感 L_C 为 [2]

$$L_C = \frac{R_L(V_i - V_o)}{2fV_i}, \quad (1)$$

(1) 式中, V_i , V_o 分别为变换器的输入和输出电压, R_L 为负载电阻, f 为变换器的开关工作频率. 对于给定的电感 L , 随着 R_L 的变化, Buck 变换器可跨越 CCM 和 DCM, 由 (1) 式可得, 对应 CCM 和 DCM 的临界负载电阻 R_{LC} 为

$$R_{LC} = \frac{2fLV_i}{V_i - V_o} = \frac{2fL}{1 - V_o/V_i}. \quad (2)$$

当 $R_L < R_{LC}$ 时, 变换器工作于 CCM; 当 $R_L > R_{LC}$ 时, 变换器工作于 DCM. 从 (2) 式可看出: 临界负载电阻 R_{LC} 随输入电压的增加而增大.

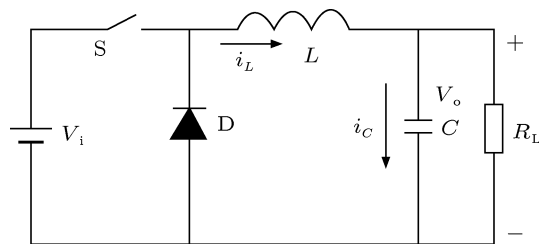


图 1 Buck 变换器原理图

3 本安型 Buck 变换器及其输出短路火花放电特性

为了减小 Buck 变换器的输出短路火花放电能量, 提高其本安性能, 输出出现短路等故障时必须首先切断输入电源. 因此, 本安型 Buck 变换器需要采用截止型输出短路保护电路 [21], 如图 2 所示. 采用安全火花试验装置对其输出进行开闭爆炸性试验的试验原理电路如图 2 所示, 其中 G 表示安全火花试验装置.

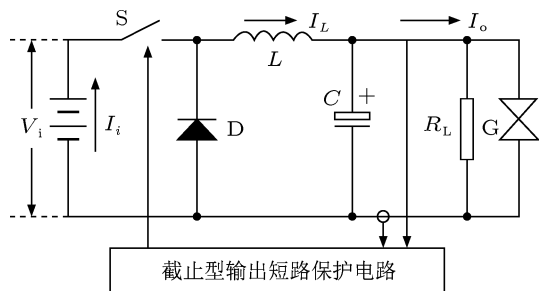


图 2 本质安全 Buck 变换器及其输出短路试验电路

应用安全火花试验装置得到的典型输出短路放电电流、电压波形如图 3 所示.

由图 3 可看出, Buck 变换器的输出短路放电过程可分为四个阶段: 即介质击穿 I、火花产生 II、火花维持 III 和火花熄灭 IV, 与简单电容电路的放

电过程^[22]类似. 不同之处在于火花维持阶段的火花电压逐渐下降, 以及火花熄灭时的峰值电流减小, 原因在于变换器的输出端具有外接负载电阻, 且外接负载电阻越小, 火花电压下降越大(图3中 $R_L = 18 \Omega$). 火花维持阶段的时间要比其他几个阶段长得多, 即整个火花放电维持时间主要取决于火花维持阶段的时间. 可见, Buck 变换器的输出部分相当于容性电路, 当输出出现短路故障时, 即使保护电路迅速切断其供电来源, 但由于电感及电容储能仍然会产生很大的电火花, 下面就对输出短路时的火花放电能量进行分析.

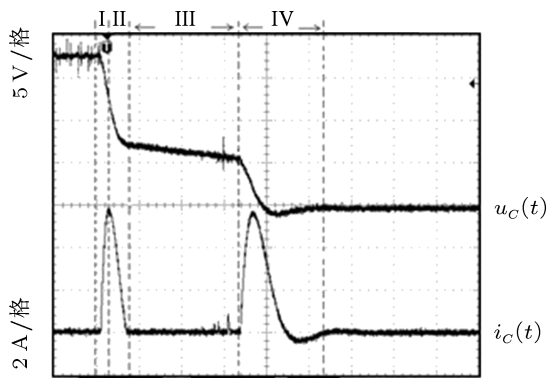


图3 Buck 变换器的输出短路放电电流和电压实验波形

4 Buck 变换器的输出短路火花放电能量

4.1 输出短路火花放电的能量构成及其分析思路

Buck 变换器的输出短路火花放电能量 W 可表示为^[2]

$$\begin{aligned} W &= W_s + W_L + W_C - W_{R_L} \\ &= V_i \left(I_{LP} + \frac{V_i}{L} \Delta t \right) \Delta t + \frac{1}{2} L I_{LP}^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} C V_o^2 - \frac{V_H^2}{R_L} T_C, \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式中, W_s , W_L , W_C 分别为输入电源、电感 L 及电容 C 向输出短路处提供的能量, W_{R_L} 为短路放电期间负载电阻消耗的能量; I_{LP} 为流过电感的峰值电流, Δt 为输出短路保护响应时间, V_H 为火花放电维持电压的平均值, T_C 为火花放电维持时间.

假设变换器的输入电压范围为 $V_{i,\min}$ — $V_{i,\max}$, 负载电阻变化范围为 $R_{L,\min}$ — $R_{L,\max}$. 在整个动态范

围内, Buck 变换器存在两种工作情形: 1) $R_L < R_{LC}$ 时处于 CCM; 2) $R_L > R_{LC}$ 处于 DCM. 为得出整个动态范围的放电火花能量最大值, 首先要求出各种情形的短路火花能量最大值.

由 (3) 式可看出, 输出短路处的能量与诸多因素有关. 但对于给定的变换器, V_o , f , 电容 C 及电感 L 均可看作固定值. 大量试验表明, 在其他参数不变, 而仅当负载电阻及输入电压变化时, 短路火花维持时间 T_C 也基本不变 (T_C 主要取决于电容). 因此, 下面将重点讨论负载电阻 R_L 及输入电压 V_i 变化对短路火花放电能量的影响.

4.2 $R_L < R_{LC}$ 时的最大短路火花放电能量

当 $R_L < R_{LC}$ 时, 变换器工作于 CCM, 其峰值电感电流 I_{LP} 为^[2]

$$I_{LP}^{(CCM)} = I_o + \frac{1}{2} \Delta i_L = \frac{V_o}{R_L} + \frac{V_o(V_i - V_o)}{2V_i L f}. \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (3) 式可得 $R_L < R_{LC}$ 时的短路火花放电能量 W'_{CCM} 为

$$\begin{aligned} W'_{CCM} &= V_i \left[\frac{V_o}{R_L} + \frac{V_o(1 - V_o/V_i)}{2L f} + \frac{V_i}{L} \Delta t \right] \Delta t \\ &\quad + \frac{L}{2} \left[\frac{V_o}{R_L} + \frac{V_o(1 - V_o/V_i)}{2L f} \right]^2 \\ &\quad + \frac{C V_o^2}{2} - \frac{V_H^2}{R_L} T_C \end{aligned} \quad (5)$$

由 (5) 式显然可看出: 短路火花放电能量随 V_i 的增加而增大, 则只考虑 V_i 变化时, W'_{CCM} 在 $V_i = V_{i,\max}$ 取得最大值, 该最大值在本文中用 W_{CCM} 表示, 则有

$$\begin{aligned} W_{CCM} &= V_{i,\max} \left[\frac{V_o}{R_L} + \frac{V_o(1 - V_o/V_{i,\max})}{2L f} + \frac{V_{i,\max}}{L} \Delta t \right] \Delta t \\ &\quad + \frac{L}{2} \left[\frac{V_o}{R_L} + \frac{V_o(1 - V_o/V_{i,\max})}{2L f} \right]^2 \\ &\quad + \frac{C V_o^2}{2} - \frac{V_H^2}{R_L} T_C. \end{aligned} \quad (6)$$

将 (6) 式对 R_L 求一阶偏导可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_{CCM}}{\partial R_L} &= -\frac{2f V_{i,\max}^2 V_o \Delta t + V_o^2 (V_{i,\max} - V_o) - 2f V_{i,\max} V_H^2 T_C}{2V_{i,\max} f R_L^2} \\ &\quad - \frac{L V_o^2}{R_L^3}. \end{aligned} \quad (7)$$

令 (7) 式等于零, 可得 $R_L < R_{LC}$ 时的特征电阻 $R_{L,CCM}$ (实际上 $R_{L,CCM}$ 是 W_{CCM} 的驻点) 为

$$R_{L,CCM} = -\frac{2V_{i,max}fLV_o^2}{2fV_{i,max}^2V_o\Delta t - 2fV_{i,max}V_H^2T_C + V_o^2(V_{i,max} - V_o)}. \quad (8)$$

为简便分析 W_{CCM} 随 R_L 的变化趋势, 引入一倍增因子 λ , 即令

$$R_L = \lambda R_{L,CCM}. \quad (9)$$

将 (8) 和 (9) 式代入 (7) 式可得

$$\frac{\partial W_{CCM}}{\partial R_L} = \frac{LV_o^2(\lambda - 1)}{(\lambda R_{L,CCM})^3}, \quad (10)$$

由 (10) 式可看出: 1) 当 $\lambda > 1$, 即 $R_L > R_{L,CCM}$ 时, $\frac{\partial W_{CCM}}{\partial R_L} > 0$, W_{CCM} 随 R_L 的增加而增大; 2) 当 $\lambda < 1$, 即 $R_L < R_{L,CCM}$ 时, $\frac{\partial W_{CCM}}{\partial R_L} < 0$, W_{CCM} 随 R_L 的减小而增大. 可见, 在 $R_L < R_{LC}$ 时, Buck 变换器的输出短路火花放电能量 W_{CCM} 是关于 R_L 的凹函数, 其底部为 $R_L = R_{L,CCM}$, 如图 4 所示.

在实际工程中, 由于 V_H 约为 6—9 V, T_C 一般不小于 30 μs , Δt 通常小于 5 μs , 本安型 Buck 变换器的最大输入电压 $V_{i,max}$ 不超过 30 V, 开关频率 f 通常在 200 kHz 以上; 变换器为危险环境的电子设备提供的电压 (V_o) 不超过 24 V, 最大工作电流也不会太大 (不超过 1 A), 即最小负载电阻 $R_{L,min}$ 的取值不会太小. 考虑到上述参数的实际取值范围, 实际上特征电阻 $R_{L,CCM}$ 要比负载电阻小很多 (如图 4 中所示), 即有

$$R_{L,CCM} < R_{L,min}. \quad (11)$$

由上述分析可得: 对于实际的负载电阻变化范围, 变换器在 $R_L < R_{LC}$ 时的短路火花放电能量 W_{CCM} 实际上随 R_L 的增加而增大, 当 R_L 增大到临界电阻 R_{LC} 时, W_{CCM} 达到最大值 (见图 4). 再考虑到 W_{CCM} 及 R_{LC} 随 V_i 的增加而增大, 当 V_i 增加到最大值 $V_i = V_{i,max}$ 时, 对应的最大临界电阻 $R_{LC,max}$ (参照 (2) 式) 为

$$R_{LC,max} = \frac{2V_{i,max}fL}{(V_{i,max} - V_o)}. \quad (12)$$

则考虑到 (12) 式, 将 $R_L = R_{LC,max}$ 代入 (6) 式, 即可得在 $R_L < R_{LC}$ 的情况下, 同时考虑 V_i 和 R_L 变化时, W_{CCM} 的最大值 $W_{CCM,max}$ 为

$$W_{CCM,max} = W_{CCM}^{R_{LC,max}}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{V_o(V_{i,max} - V_o)}{Lf}\Delta t + \frac{V_{i,max}^2}{L}\Delta t^2 \\ &+ \frac{V_o^2(V_{i,max} - V_o)^2}{2V_{i,max}^2Lf^2} + \frac{CV_o^2}{2} \\ &- \frac{V_H^2(V_{i,max} - V_o)}{2V_{i,max}Lf}T_C. \end{aligned} \quad (13)$$

上述分析可见: 当 $R_L < R_{LC}$ 时, 短路火花放电能量 W_{CCM} 随 V_i 及 R_L 的增加而增大, 且在 $V_i = V_{i,max}$, $R_L = R_{LC,max}$ 时取得最大值.

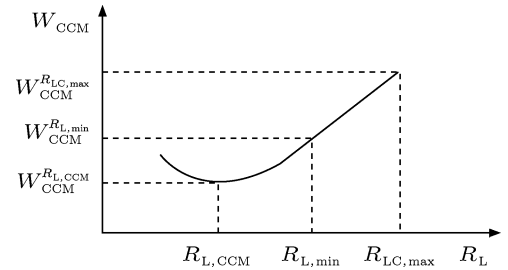


图 4 CCM 时的短路火花放电能量随 R_L 的变化关系

4.3 $R_L > R_{LC}$ 时的最大短路火花放电能量

当 $R_L > R_{LC}$ 时, 变换器工作于 DCM, 其峰值电感电流 I_{LP} 为 [2]

$$I_{LP}^{(DCM)} = \Delta i_L = \frac{d(V_i - V_o)}{Lf} = V_o \sqrt{\frac{2(V_i - V_o)}{V_i L f R_L}}. \quad (14)$$

将 (14) 式代入 (3) 式, 可得 $R_L > R_{LC}$ 时的短路火花放电能量 W'_{DCM} 为

$$\begin{aligned} W'_{DCM} &= V_i V_o \Delta t \sqrt{\frac{2(1 - V_o/V_i)}{LfR_L}} + \frac{V_i^2 \Delta t^2}{L} \\ &+ \frac{V_o^2(1 - V_o/V_i) - fV_H^2 T_C}{fR_L} + \frac{CV_o^2}{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

由 (15) 式也显然可看出: $R_L > R_{LC}$ 时的短路火花放电能量随 V_i 的增加而增大. 同理, 则在只考虑 V_i 变化时, W'_{DCM} 在 $V_i = V_{i,max}$ 取得最大值, 该最大值用 W_{DCM} 表示, 则有

$$\begin{aligned} W_{DCM} &= V_{i,max} V_o \Delta t \sqrt{\frac{2(1 - V_o/V_{i,max})}{LfR_L}} + \frac{V_{i,max}^2 \Delta t^2}{L} \\ &+ \frac{V_o^2(1 - V_o/V_{i,max}) - fV_H^2 T_C}{fR_L} + \frac{CV_o^2}{2}. \end{aligned} \quad (16)$$

将 (16) 式对 R_L 求一阶偏导可得

$$\frac{\partial W_{DCM}}{\partial R_L} = \frac{-V_{i,max} V_o \Delta t}{R_L^2} \sqrt{\frac{R_L(V_{i,max} - V_o)}{2V_{i,max} L f}}$$

$$-\frac{V_o^2(V_{i,\max}-V_o)-V_{i,\max}fV_H^2T_C}{V_{i,\max}fR_L^2}. \quad (17)$$

令 (16) 式等于零, 可得 $R_L > R_{LC}$ 时的特征电阻 $R_{L,DCM}$ (实际上 $R_{L,DCM}$ 是 W_{DCM} 的驻点) 为

$$R_{L,DCM} = \frac{2L[V_{i,\max}fV_H^2T_C - V_o^2(V_{i,\max}-V_o)]^2}{V_{i,\max}^3V_o^2\Delta t^2f(V_{i,\max}-V_o)}. \quad (18)$$

同理, 在此也引入倍增因子 λ , 即令

$$R_L = \lambda R_{L,DCM}. \quad (19)$$

将 (19) 和 (18) 式代入 (17) 式可得

$$\frac{\partial W_{DCM}}{\partial R_L} = \frac{[V_{i,\max}fV_H^2T_C - V_o^2(V_{i,\max}-V_o)](1-\sqrt{\lambda})}{V_{i,\max}f(\lambda R_{L,DCM})^2}. \quad (20)$$

同样, 考虑实际工程中 V_H , T_C , V_o , f 的取值范围后, 可得

$$V_{i,\max}fV_H^2T_C - V_o^2(V_{i,\max}-V_o) > 0. \quad (21)$$

结合 (20) 和 (21) 式可知: 1) 当 $\lambda > 1$ 时, 即 $R_L > R_{L,DCM}$ 时, $\frac{\partial W_{DCM}}{\partial R_L} < 0$, W_{DCM} 随 R_L 的增加而减小; 2) 当 $\lambda < 1$, 即 $R_L < R_{L,DCM}$ 时, $\frac{\partial W_{DCM}}{\partial R_L} > 0$, W_{DCM} 随 R_L 的减小而减小. 因此, 在 $R_L > R_{LC}$ 时, W_{DCM} 是关于 R_L 的凸函数, 顶部为 $R_L = R_{L,DCM}$, 如图 5 所示.

为了确定 W_{DCM} 取得最大值时所对应的负载电阻, 需要比较在 $R_L > R_{LC}$, 且输入电压为最大 ($V_i = V_{i,\max}$) 时, $R_{L,DCM}$ 和 $R_{LC,\max}$ 的大小. 由 (12) 和 (18) 式可得

$$\begin{aligned} & R_{L,DCM} - R_{LC,\max} \\ &= \frac{2L[V_{i,\max}fV_H^2T_C - V_o^2(V_{i,\max}-V_o) + V_{i,\max}^2V_o\Delta t f]}{V_{i,\max}^3V_o^2\Delta t^2f(V_{i,\max}-V_o)} \\ & \times [V_{i,\max}fV_H^2T_C - V_o^2(V_{i,\max}-V_o) - V_{i,\max}^2V_o\Delta t f]. \end{aligned} \quad (22)$$

同上, 根据 V_H , T_C , Δt , V_o , $V_{i,\max}$ 和 f 的实际取值范围, 可得

$$V_{i,\max}fV_H^2T_C - V_o^2(V_{i,\max}-V_o) - V_{i,\max}^2V_o\Delta t f > 0,$$

再考虑到 (21) 式, 即有

$$R_{L,DCM} > R_{LC,\max}. \quad (23)$$

因此, 当 $R_L > R_{LC}$ 时, W_{DCM} 随着 R_L 的增加, 先增大后减小, 当 R_L 增加到 $R_{L,DCM}$ 时, W_{DCM} 达到最大值 (参见图 5). 则可得: 同时考虑 V_i 和 R_L 变化时, 根据 (18) 式, 将 $R_L = R_{L,DCM}$ 代入 (16) 式可得 W_{DCM} 的最大值 $W_{DCM,\max}$ 为

$$\begin{aligned} W_{DCM,\max} &= W_{DCM}^{R_{L,DCM}} \\ &= \frac{V_{i,\max}^2V_o^2\Delta t^2(V_{i,\max}-V_o)}{2L[V_{i,\max}fV_H^2T_C - V_o^2(V_{i,\max}-V_o)]} \\ & \quad + \frac{V_{i,\max}^2\Delta t^2}{L} + \frac{CV_o^2}{2}. \end{aligned} \quad (24)$$

上述分析可见: 当 $R_L > R_{LC}$ 时, W_{DCM} 是关于 R_L 的凸函数. 考虑本安变换器的参数取值范围及性能指标, W_{DCM} 在 $V_i = V_{i,\max}$, $R_L = R_{L,DCM}$ 时取得最大值.

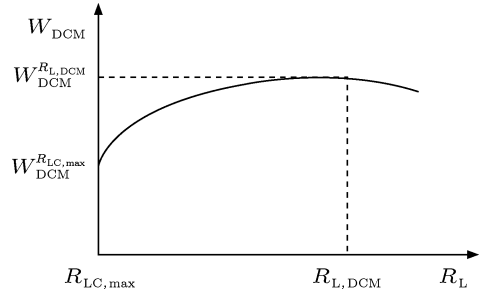


图 5 DCM 时的短路火花放电能量变化趋势

4.4 全动态范围的最大短路火花放电能量

对 $W_{CCM,\max}$ 和 $W_{DCM,\max}$ 进行比较, 其中最大者即为 Buck 变换器的最大短路火花放电能量.

由前面的分析可得: 当 $R_L < R_{LC}$ 及 $R_L > R_{LC}$ 时, Buck 变换器的短路火花放电能量变化趋势分别如图 4 和图 5 所示.

当 $R_L > R_{LC}$ 时, 考虑到 (12) 式, 将 $R_L = R_{LC,\max}$ 代入 (16) 式, 可得此时的短路火花放电能量为

$$\begin{aligned} W_{DCM}^{R_{LC,\max}} &= \frac{V_o(V_{i,\max}-V_o)}{Lf}\Delta t + \frac{V_{i,\max}^2}{L}\Delta t^2 \\ & \quad + \frac{V_o^2(V_{i,\max}-V_o)^2}{2V_{i,\max}^2Lf^2} + \frac{CV_o^2}{2} \\ & \quad - \frac{V_H^2(V_{i,\max}-V_o)}{2V_{i,\max}Lf}T_C. \end{aligned} \quad (25)$$

由 (25) 和 (13) 式比对可知

$$W_{CCM,\max} = W_{CCM}^{R_{LC,\max}} = W_{DCM}^{R_{LC,\max}}, \quad (26)$$

即在整个负载变化范围内, 尽管变换器的工作模式将跨越 CCM 和 DCM, 但其输出短路火花放电能量

在 $V_i = V_{i,\max}$, $R_L = R_{LC,\max}$ 处是连续的. 因此, 根据 (26) 式及图 4 和图 5, 可得短路火花放电能量在整个负载动态范围内的变化趋势如图 6 所示.

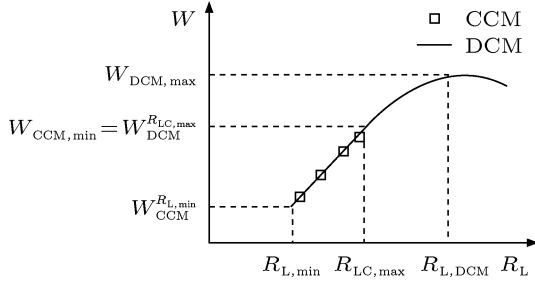


图 6 输出短路火花放电能量随负载的变化趋势

由图 6 显然可看出

$$W_{DCM,\max} > W_{CCM,\max}. \quad (27)$$

因此, 在整个动态范围内, $R_L > R_{LC}$ 时的最大输出短路火花放电能量总是比 $R_L < R_{LC}$ 时的更大, 即最大输出短路火花放电能量在 $R_L > R_{LC}$ (变换器工作于 DCM) 时取得, 且在 $V_i = V_{i,\max}$, $R_L = R_{L,DCM}$ 时达到最大值 $W_{\max}$, 即

$$\begin{aligned} W_{\max} &= W_{DCM,\max} = W_{DCM}^{R_{L,DCM}} \\ &= \frac{V_{i,\max}^2 V_o^2 \Delta t^2 (V_{i,\max} - V_o)}{2L [V_{i,\max} f V_H^2 T_C - V_o^2 (V_{i,\max} - V_o)]} \\ &\quad + \frac{V_{i,\max}^2 \Delta t^2}{L} + \frac{C V_o^2}{2} \\ &= W'_{\max} + \frac{C V_o^2}{2}, \end{aligned} \quad (28)$$

(28) 式中, 第二项为 Buck 变换器的电容存储能量; 第一项 $W'_{\max}$ 为输出短路火花放电期间, 电感和电源向输出短路处转移的最大有效能量, 即

$$\begin{aligned} W'_{\max} &= \frac{V_{i,\max}^2 V_o^2 \Delta t^2 (V_{i,\max} - V_o)}{2L [V_{i,\max} f V_H^2 T_C - V_o^2 (V_{i,\max} - V_o)]} \\ &\quad + \frac{V_{i,\max}^2 \Delta t^2}{L}. \end{aligned} \quad (29)$$

5 Buck 变换器的输出本安判据

由第 4 节的分析可得: 对于给定电感的 Buck 变换器, 在输入电压和负载电阻的整个变化范围内, 对应的最危险工况为: Buck 变换器工作于 DCM, 且 $V_i = V_{i,\max}$, $R_L = R_{L,DCM}$.

为确保安全及判据的可信性, 必须以最危险工况时的最大输出短路火花放电能量作为判断依据,

得出对应的等效电容, 从而得出输出本质安全判据. 从能量等效的角度可得其输出短路等效电容 C_e 为

$$C_e = \frac{2W_{\max}}{V_o^2} = C + C'_e. \quad (30)$$

(30) 式中, C 为 Buck 变换器的电容, C'_e 为输入电源和电感向输出短路处传输的最大有效能量对应的等效电容. 根据 (29) 式可得

$$\begin{aligned} C'_e &= \frac{2W'_{\max}}{V_o^2} \\ &= \frac{V_{i,\max}^2 \Delta t^2 (V_{i,\max} - V_o)}{L [V_{i,\max} f V_H^2 T_C - V_o^2 (V_{i,\max} - V_o)]} \\ &\quad + \frac{2V_{i,\max}^2 \Delta t^2}{L V_o^2}. \end{aligned} \quad (31)$$

根据所得出的输出短路放电等效电容 C_e , 从本安性能试验评价的角度, 就可将变换器基于安全火花试验装置的输出短路放电特性等效为一简单的电容电路, 如图 7 所示. 图 7 中 V_o 为 Buck 变换器的输出电压, G 表示火花试验装置, S 表示进行开闭试验时的等效开关: G 的两触点闭合时, S 断开, 等效电容 C_e 短路放电; G 的两触点断开时, S 闭合, 对等效电容 C_e 充电.

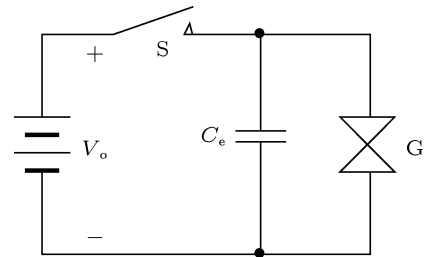


图 7 Buck 变换器的输出短路试验等效简单电容电路

根据图 7 所示的等效简单电容电路, 就可以依据容性电路的点燃电压参考曲线判断其输出本安性能. 假设安全系数为 K (通常取 1.5), 在容性电路的点燃电压参考曲线上查得 KV_o 对应的电容为 C_B , 则根据 (30) 和 (31) 式可得 Buck 变换器的输出本安判据为

$$\begin{aligned} C_e &= C + C'_e \\ &= C + \frac{V_{i,\max}^2 \Delta t^2 (V_{i,\max} - V_o)}{L [V_{i,\max} f V_H^2 T_C - V_o^2 (V_{i,\max} - V_o)]} \\ &\quad + \frac{2V_{i,\max}^2 \Delta t^2}{L V_o^2} < C_B. \end{aligned} \quad (32)$$

6 实例、验证及讨论

假设一台应用在 I 类环境的输出本安 Buck 变换器的技术参数为: 输入电压范围为 20—27 V, 负载电阻变化范围为 18—150 Ω , 输出电压 $V_o = 18$ V, 输出电压纹波允许峰峰值 $V_{pp} = 1\%V_o$, 工作频率为 280 kHz, 电感为 33 μH , 电容为 6.8 μF (独石电容). 通过实验测得 $V_H \approx 8$ V, $\Delta t \approx 3.5$ μs . 根据文献 [22] 及试验可得, 输出短路火花放电维持时间 $T_C \approx 45$ μs .

当输入电压最大时, 根据上述参数, 分别由 (8), (12) 和 (18) 式计算可得: $R_{L,CCM} = 10.8$ $\Omega < R_{L,min} = 18$ Ω , $R_{LC,max} = 55.4$ Ω , $R_{L,DCM} = 119$ $\Omega > R_{LC,max}$.

6.1 输出短路火花放电能量仿真分析和实验验证

6.1.1 仿真分析和实验结果

1) 仿真分析结果

根据上述参数, 采用 MATLAB 进行仿真分析, 得出输出短路火花放电能量随输入电压及负载电阻的变化关系如图 8 所示.

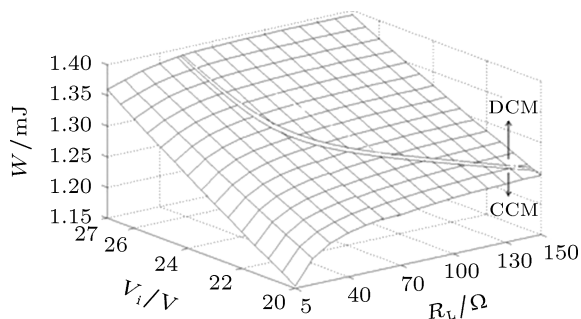


图 8 短路火花放电能量随负载电阻和输入电压的变化关系

2) 实验测试和理论计算结果

当 $V_i = V_{i,max} = 27$ V 时, 依次改变负载电阻的大小为 18, 36, 54, 72, 90, 108, 126 和 144 Ω , 分别在安全火花实验装置上进行短路火花放电试验, 用 TEK 公司的 DPO3034 数字存储示波器测得其不同负载下对应的短路火花放电能量值 (由于火花试验开闭时刻和位置的偶然性, 为确保基于试验测试结果进行安全性能判断的可信度, 对每一组参数试验测量不少于 100 次, 取其中的最大值作为有效测试值).

图 9 所示为 Buck 变换器的典型输出短路火花放电电压、电流及输出短路火花能量波形 (试验参

数: $L = 33$ μH , $C = 6.8$ μF , $V_o = 18$ V, $R_L = 150$ Ω). 图 10 所示为短路火花放电能量随负载电阻变化关系的理论计算和实验结果拟合曲线.

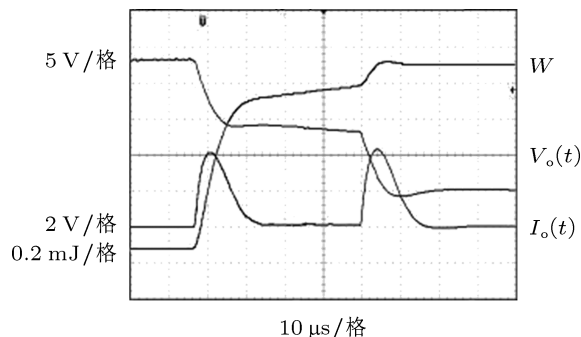


图 9 输出短路火花放电电压、电流及能量波形

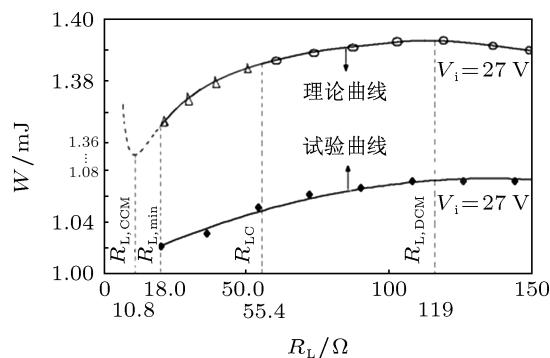


图 10 实验和理论结果

6.1.2 结果分析

图 8 和图 10 所示的仿真及理论计算和试验测试结果均表明: 短路火花放电能量随着输入电压的增加而增大; 而在 R_L 从 $R_{L,min} = 18$ Ω 增加到 $R_{L,max} = 150$ Ω 时, 随着 R_L 的增加, 短路火花放电能量先增大后减小, 当其增加到 $R_L = R_{L,DCM} = 119$ Ω , 且 $V_i = V_{i,max} = 27$ V 时, 短路火花放电能量达到最大值. 同时可看出, $R_L > R_{LC} = 55.4$ Ω (变换器工作于 DCM) 时的最大输出短路火花放电能量比 $R_L < R_{LC} = 55.4$ Ω (变换器工作于 CCM) 时的更大. 由图 10 可知, 当 $V_i = V_{i,max} = 27$ V 时, 其特征电阻 $R_{L,DCM} = 119$ Ω , 在 18—119 Ω 范围内, 短路火花放电能量随 R_L 增大而增大; 而在大于 119 Ω 时, 短路火花放电能量随 R_L 增大而减小.

上述分析可知: 仿真及试验结果反映的趋势与理论分析相一致.

但由图 10 可看出: 实验测得的短路火花放电能量总是小于理论计算结果. 主要原因在于: 试验

时, 线路上及短路接触点不可避免地存在电阻, 电容器存在等效电感和电阻等, 这些寄生参数均会产生附加损耗, 从而使得实验测试结果总是小于理论计算值.

6.2 输出本安判据验证及试验方法讨论

6.2.1 等效电容及本安性能判断 (最危险工况时)

将上述有关参数代入 (31) 式可得: 在最危险工况时, 短路火花放电期间, 电感及输入电源的能量所对应的最大等效电容 $C_e' = 1.8 \mu\text{F}$; 则由 (30) 式可得 Buck 变换器的短路火花放电对应等效简单电容电路的等效电容 $C_e = 8.6 \mu\text{F}$.

取安全系数 $K = 1.5$, 则在最小点燃电压曲线上查得 $KV_0 = 27 \text{ V}$ 对应的电容 $C_B = 8.2 \mu\text{F}$, 根据 (32) 式所示的本质安全判据有 $C_e > C_B$, 可判断出实例给出参数所对应的 Buck 变换器不能满足本质安全要求, 即该变换器是非本安的.

6.2.2 最小短路火花能量时的本安情况讨论

依照上述分析过程可得在电压最低、负载电阻最小时的短路火花放电能量最小, 且其值为 1.143 mJ , 对应的等效电容为 $7.1 \mu\text{F}$, 根据 (32) 式所给出的判据, 该组参数对应的变换器是满足本安要求的.

6.2.3 输出本安判据的试验验证及试验参数的选择

上述分析可见: 对于最危险工况 (参考 6.2.1), 实例中的 Buck 变换器不满足本安要求. 按照标准 GB 3846-2010 的试验规定要求^[7], 采用安全火花装置进行爆炸性试验验证了上述判断得出的结论.

对于短路火花能量最小的情况 (参考 6.2.2), 采用该组参数按规定进行爆炸性试验, 未能引燃规定的爆炸性气体, 即对应的 Buck 变换器满足本安要求.

可见, 对于其他参数相同的 Buck 变换器, 在不同的输入电压和负载电阻时, 对其本安性能进行评价得出的结论会存在明显不同, 因而爆炸性试验参数的选择就成为决定其判断结果可信度的关键. 因此, 在采用开闭爆炸性试验评价变换器的本安性能时, 必须选择最危险工况对应的参数进行爆炸性试验, 才能确保开闭爆炸性试验得出的结论可信、可靠. 所以, 本文分析所得出的最危险工况及本安判据对于爆炸性试验具有重要指导作用.

6.3 参数调节与本安性能改善

根据所得出的判据推断出实例所给参数对应的 Buck 变换器是非本安的, 可通过调整参数使其满足本安要求. 如果将其电容变为 $5.6 \mu\text{F}$, 而其他参数维持不变, 此时, 最危险工况对应的等效电容 $C_e = 7.4 \mu\text{F}$, 根据 (32) 式的判据, 判断为满足本安要求.

在最危险的工况下, 采用安全火花试验装置, 对调整参数后的 Buck 变换器进行爆炸性试验, 没有引爆规定的爆炸性气体混合物, 说明参数调整后的 Buck 变换器满足本安要求, 理论判据与爆炸性试验判断一致. 因此, 应用所提出的判据可指导本安 Buck 变换器的设计.

上述结果及分析说明了本文理论分析及得出判据的正确性、可行性和重要性.

7 结 论

Buck 变换器的输出短路特性类似于容性电路, 其输出短路火花放电过程与简单电容电路相近, 也可分为介质击穿、火花产生、火花维持、火花熄灭四个阶段, 其输出短路火花放电能量随输入电压的增加而增大, 而受负载电阻影响却较为复杂.

对于给定电感的 Buck 变换器, 考虑到其实际的参数取值范围, 如果负载电阻 R_L 小于该电感所对应 CCM 与 DCM 的临界电阻 R_{LC} , 则其短路火花放电能量随 R_L 的增加而增大; 而在 $R_L > R_{LC}$ 时, 其火花放电能量是关于 R_L 的凸函数, 且在 $R_L = R_{L,DCM}$ 时达到最大值.

对于给定电感的 Buck 变换器, 在整个动态范围内, $R_L > R_{LC}$ 时的最大输出短路火花放电能量总是比 $R_L < R_{LC}$ 时的更大. Buck 变换器全动态范围内的最危险工况为: 变换器在输入电压最大及负载电阻等于 $R_{L,DCM}$ 时工作于 DCM.

根据能量等效原理, 得到了一种能模拟变换器输出短路放电特性的等效简单电容电路、等效电容, 并据此得出了 Buck 变换器的输出本质安全判据.

本文提供了一种 Buck 变换器的最危险工况分析方法, 不仅得出了其本质安全判据, 可指导本安变换器的设计; 而且, 还为采用安全火花试验装置进行爆炸性试验的试验参数选择提供指导, 可提高试验判断结果的可信度.

本文的分析方法还可推广应用到其他开关变换器,对本质安全开关电源的设计及采用非爆炸性方法判断其本质安全性能具有重要指导意义.

特别感谢国家防爆电气产品质量监督检验中心张刚教授在测试试验方面给予的指导与支持.

-
- [1] Hohenstein D 2001 *Control Solutions* **74** 42
 - [2] Liu S L 2007 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an University of Science and Technology) (in Chinese) [刘树林 2007 博士学位论文 (西安: 西安科技大学)]
 - [3] Li J B, Xie K, Cheng R J 2011 *Coal Sci. Tech.* **39** 75 (in Chinese) [黎剑兵, 谢楷, 程仁杰 2011 炭科学技术 **39** 75]
 - [4] Tong Q, Zhang D L, Xu D G 2009 *Power Electron.* **43** 45 (in Chinese) [佟强, 张东来, 徐殿国 2009 电力电子技术 **43** 45]
 - [5] Liu S L, Liu J, Zhong J M 2008 *Proceedings of the CSEE* **28** 60 (in Chinese) [刘树林, 刘健, 钟久明 2008 中国电机工程学报 **28** 60]
 - [6] Liu S L, Liu J, Hong M, Zhang Y Q 2008 *IEEE Trans. Power Electron.* **23** 1813
 - [7] SAC/TC9, China Quality Press 2012 *The National Explosion-Proof Electrical Standards* (No.1) (Beijing: China Standard Press) (in Chinese) [全国防爆电气设备标准化技术委员会, 中国质检出版社 2012 防爆电气国家标准汇编 (一) (北京: 中国标准出版社)]
 - [8] Eckhoff P K 2002 *J. Loss Prevent. Proc. Industries* 305
 - [9] Meng Q H 1999 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: China University of Mining and Technology) (in Chinese) [孟庆海 1999 博士学位论文 (北京: 中国矿业大学)]
 - [10] Liu S L, Liu J 2008 *J. China Coal Soc.* **33** 707 (in Chinese) [刘树林, 刘健 2008 煤炭学报 **33** 707]
 - [11] Liu S L, Liu J, Li Y 2008 *J. Coal Sci. Engineer.* **14** 485
 - [12] Yang R, Zhang B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3789 (in Chinese) [杨汝, 张波 2007 物理学报 **56** 3789]
 - [13] Xie F, Yang R, Zhang B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8393 (in Chinese) [谢帆, 杨汝, 张波 2010 物理学报 **59** 8393]
 - [14] Lu W G, Zhou L W, Luo Q M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5648 (in Chinese) [卢伟国, 周维维, 罗全明 2007 物理学报 **56** 5648]
 - [15] Sha J, Bao B C, Xu J P, Gao Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 120501 (in Chinese) [沙金, 包伯成, 许建平, 高玉 2012 物理学报 **61** 120501]
 - [16] Wang F Q, Zhang H, Ma X K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2842 (in Chinese) [王发强, 张浩, 马西奎 2008 物理学报 **57** 2842]
 - [17] Zhou G H, Xu J P, Bao B C, Wang J P, Jin Y Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 010503 (in Chinese) [周国华, 许建平, 包伯成, 王金平, 金艳艳 2011 物理学报 **60** 010503]
 - [18] Zhang X, Bao B C, Wang J P, Ma Z H, Xu J P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 160503 (in Chinese) [张希, 包伯成, 王金平, 马正华, 许建平 2012 物理学报 **61** 160503]
 - [19] Liu J, Liu S L, Yang Y L, Zhang Y M 2005 *Proceedings of the CSEE* **25** 52 (in Chinese) [刘健, 刘树林, 杨银玲, 张燕美 2005 中国电机工程学报 **25** 52]
 - [20] Cheng H, Li H Q, Wang C 2012 *J. China Coal Soc.* **37** 506 (in Chinese) [程红, 李鹤群, 王聪 2012 煤炭学报 **37** 506]
 - [21] Liu S L, Liu J, Cheng H L, Zhong J M 2008 *China Patent ZL* 200510043096.0 [2008-01-09]
 - [22] Liu S L, Zhong J M, Fan W B, Zhan M 2012 *J. China Coal Soc.* **37** 2123 (in Chinese) [刘树林, 钟久明, 樊文斌, 战美 2012 煤炭学报 **37** 2123]

Output short-circuit spark discharging energy and output intrinsic safety criterion of Buck converters*

Liu Shu-Lin[†] Cui Qiang Li Yong

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(Received 3 February 2013; revised manuscript received 28 April 2013)

Abstract

To obtain the output intrinsic safety criterion of Buck converters, the experimental research on its output-short circuit discharge characteristics is conducted by using the safety spark test apparatus. It is found that its spark discharge process can be divided into four stages, i.e., the dielectric-breakdown, spark-generation, spark-keeping and spark-extinguishment. According to the obtained spark discharge characteristics, the output short-circuit spark discharging energy (OSSDE) is deeply analyzed. It is indicated that the OSSDE of the Buck converter with a given inductance is a concave function of load resistance R_L when R_L is less than the critical resistance R_{LC} corresponding to this inductance, while that is a convex function of R_L in the case of $R_L > R_{LC}$. Considering the actual parameter range of the Buck converter, it is further pointed out that when $R_L < R_{LC}$, the OSSDE increases with the increase of R_L and reaches its maximum in the case of $R_L = R_{LC}$; when $R_L > R_{LC}$, the OSSDE first increases and then decreases with the increase of R_L and reaches its maximum in the case of $R_{L,DCM}$. The most dangerous operating conditions of the converter in whole dynamic range are obtained, i.e., the converter operates in DCM when the input voltage is the highest and $R_L = R_{L,DCM}$. Meanwhile, the maximum OSSDE is achieved. According to the energy equivalence, an output intrinsic safety criterion for Buck converter is proposed by modeling the output short-circuit discharging behaviour as a simple capacitive circuit. The theoretical analysis and proposed criterion are verified by the simulation and experimental results.

Keywords: Buck converters, intrinsic safety, short-circuit spark discharging energy, output-intrinsic safety criterion

PACS: 84.30.Jc, 84.30.Bv, 52.80.Mg

DOI: 10.7498/aps.62.168401

* Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50977077, 51277149).

[†] Corresponding author. E-mail: slliu100@xust.edu.cn