

基于双向 TVS 的电磁阀加速释放电路研究

弭 艳, 张红霞, 马兵兵, 任仲强

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘要: 为了解决某型号姿轨控发动机关闭响应性能不满足指标的问题, 对影响发动机关闭响应性能的因素及电磁阀驱动电路进行了分析, 提出了增加外部释放电阻法和基于双向 TVS 的两种电磁阀加速释放电路; 通过仿真分析与试验验证, 采用基于双向 TVS 的电磁阀加速释放电路不仅可以提高电磁阀的关闭响应速度, 减小电磁阀的关闭响应时间; 还能够有效地抑制电磁阀关断时产生的反向电动势, 对驱动电路具有良好的保护作用; 该电路已在多个型号姿轨控发动机电磁阀驱动电路中得到应用, 并参加了全系统热试车及飞行试验, 取得了良好的效果。

关键词: 双向 TVS; 加速电路; 电磁阀; 快响应

Accelerated Release Circuit of Solenoid Valve Based on Bidirectional TVS

Mi Yan, Zhang Hongxia, Ma Bingbing, Ren Zhongqiang

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: To solve the problem that the closing response of a certain type of divert and attitude control motor didn't meet the target, the factors affecting the response performance of engine shutdown and the driving circuit of solenoid valve is analyzed in this paper. Two accelerated release circuits of solenoid valve based on adding external release resistance and bidirectional TVS are proposed. Through simulation analysis and experimental verification, the results show that the improved bidirectional TVS circuit has the fastest response to electromagnetic valve closing. It can effectively control the reverse electromotive force produced when the solenoid valve is turned off, and meet the overall target. This circuit has been widely applied in the driving circuit of attitude and orbit control engines, and has participated in the whole system hot test and flight test, and achieved good results.

Keywords: bidirectional TVS; accelerated circuit; solenoid valve; quick response

0 引言

航天器在太空中运行的姿态和轨道, 需要根据其状态变化情况和任务执行指令进行即时控制, 而执行其控制任务的就是姿轨控动力系统。随着航天技术的进步和发展, 对姿轨控发动机快响应要求越来越高, 姿轨控发动机响应时间包括推力室燃烧响应时间和电磁阀开关响应时间^[1], 其中电磁阀开关响应时间占到较大一部分, 因此提高电磁阀开关响应性能可以提高姿轨控发动机响应性能, 从而提高航天器的姿态及轨迹的控制精度。

某型号姿轨控发动机要求快响应、高精度控制值, 姿轨控发动机关闭响应时间要求小于 20 ms, 但在电磁阀与驱动电路匹配液流试验时, 发现: 该型号用姿轨控发动机关闭时间远大于 20 ms, 为了提高发动机的快速响应, 缩短发动机的关闭时间, 提出了一种基于双向 TVS 的电磁阀加速释放电路。

1 电磁阀的电器原理

电磁阀工作的原理是由电流在通电线圈中产生磁力使

电磁阀内的活动电磁铁被吸引而运动。当达到电磁阀触动电流时, 电磁线圈产生磁力带动衔铁动作, 使电磁阀开启; 切断电磁阀供电, 电磁铁电流下降, 当低于电磁阀释放电流时, 由于电磁力消失, 衔铁受弹簧力作用复位, 关闭电磁阀^[2]。因此, 电磁阀开启响应时间包括电磁铁电流上升时间和衔铁运动时间, 电磁阀关闭响应时间包括电磁铁电流下降时间和衔铁复位时间。衔铁运动间隙小, 运动速度快, 所用时间极短, 而电磁铁是电感元件, 具有很强的电磁惯性, 电流变化不能一蹴而就, 因此, 电磁阀开关响应时间与其电流上升下降所需时间密切相关。

电磁阀在使用中, 往往是由驱动电路来控制电磁阀的通断, 驱动电路原理如图 1 所示, 其中: L 为电磁铁的电感, r 为电磁铁的直流电阻。电磁铁是电感元件, 具有很强的电磁惯性, 电流变化滞后电压变化; 所以, 关断电磁阀时, 由于电感 L 的存在, 在电磁铁两端产生反向电动势 $\xi = L \frac{di}{dt}$, 将力图保持电流原有的大小和方向^[3]。

为了满足电磁兼容的要求, 消除反向电动势对电路的影响, 以往通常采用二极管对电磁铁电感上的电流进行放电^[4], 并对反向电动势进行钳位, 电流释放曲线及反向电动势波形示意图如图 2 所示。其中, I_0 为电源关断后电磁铁回路中的电流初始值, i_0 为电磁阀释放触动电流, t_p 为电磁

收稿日期: 2019-04-14; 修回日期: 2019-05-13。

作者简介: 弭 艳(1988-), 女, 山东德州人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事姿轨控动力系统电控设计方向的研究。

阀关闭时的释放时间, U 为电源电压, $-U_1$ 为反向电动势钳位电压。

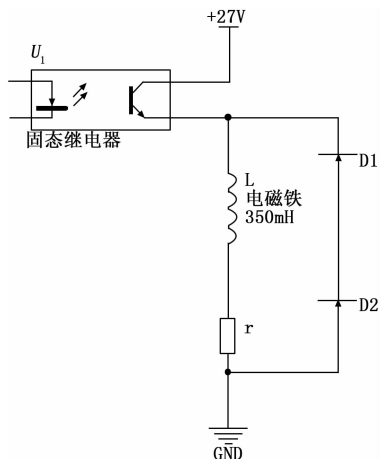


图 1 电磁阀电路原理图

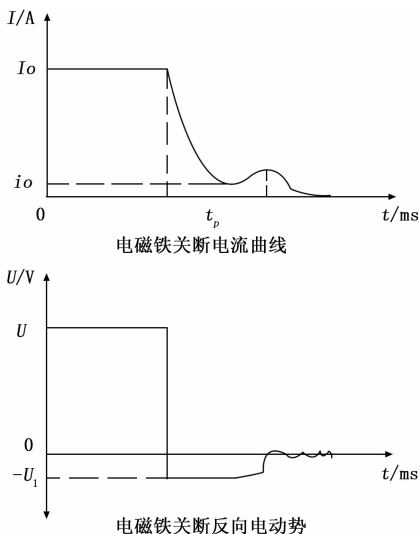


图 2 电磁铁关断电流及反向电动势

采用 Altium Designer 软件, 根据图 1 电路设计要求, 使用原理图编辑器绘制仿真电路原理图, 设置仿真元件参数, 使用场效应晶体管模拟固态继电器开关功能, 通过电感-电阻组合模拟电磁阀的电气特性, 设置电感为 350mH, 电阻为 36Ω, 双阀并联, 在电路中串入 0.25 Ω 采样电阻用于模拟实际电路中数据采集。选用脉冲电压激励源 VPULSE 提供周期性的连续脉冲激励, 用于模拟实际电路中的激励信号, 脉冲电压设为 27 V、脉冲宽度设为 100 ms 脉冲周期为 200 ms。在采样电阻端设置节点网络标签 V1, 在电磁阀供电正端设置节点网络标签 V2, 用于测试电磁阀反向电动势及电磁阀工作电流波形。通过在原理图编辑环境中, 执行“设计”→“仿真”→“Mixed Sim (混合仿真)”命令, 选择仿真方式并设置仿真参数, 复选静态工作点分析 (Operating Point Analysis) 和瞬态特性分析 (Transient Analysis), 设置显示周期数 (Default Cycles

Displayed) 为 1, 每周期仿真点数 (Default Points Per Cycle) 为 50^[5-7]。执行仿真命令对该电路进行仿真分析, 仿真结果如图 3 所示。

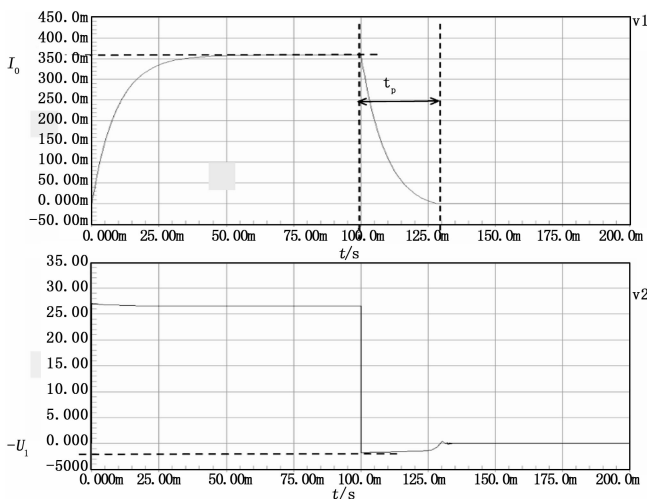


图 3 电路仿真结果

图中电磁铁释放时间 t_p 约为 30 ms, 反向电动势钳位电压 U_1 约为 2 V, 该电磁阀释放时间 t_p , 未包含电磁铁动作时间, 实际时间将大于理论分析。因此, 该电路虽然有效地控制了电磁阀关断时产生的反向电动势, 但其释放时间无法满足要求。

2 加速释放电路的研究

2.1 外部增加释放电阻法

根据图 1 电路原理分析计算, 当电磁阀断电后, 电磁铁中的电流不能突变, 而由于释放电路的存在, 给电磁铁提供了电流释放回路, 根据电感电路的过渡过程可知, 电源 U 关断后, 释放回路中的电流 i 为:

$$i = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1)$$

其中: $I_0 = \frac{U}{r}$ 为电源关断后电磁铁回路中的电流初始值, U 为电源电压, r 为电磁铁内部电阻, R 为释放回路外部等效电阻, t 为时间。

当瞬时电流 i 降到电磁阀释放触动电流 i_0 时, 电磁阀开始释放, 则有释放时间 t_p :

$$t_p = \ln \frac{I_0}{i_0} \cdot \frac{L}{R+r} \quad (2)$$

其中: r, L, i_0 均取决于电磁阀的内部结构, 电磁阀设计完成后这些参数均已固定; I_0 取决于供电电源 U , 设为定值; 因此, 由公式 (2) 可见, 释放时间 t_p 与外部等效电阻 R 成反比关系, R 越大, t_p 越小, 即释放时间越短。

根据以上分析, 使用二极管 D1 和电阻 R 组成释放电路, 电路原理图如图 4 所示。

释放电阻 R 分别选取为 47 Ω 和 92 Ω, 并进行仿真分析, 仿真结果如图 5、图 6 所示。

对两图中仿真结果进行对比分析, 见表 1。当释放电阻

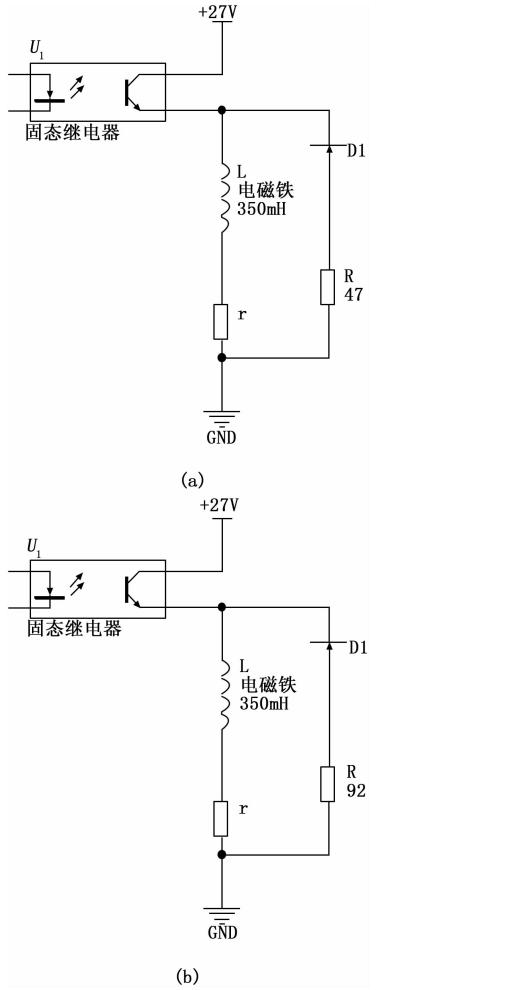


图 4 增加释放电阻原理图

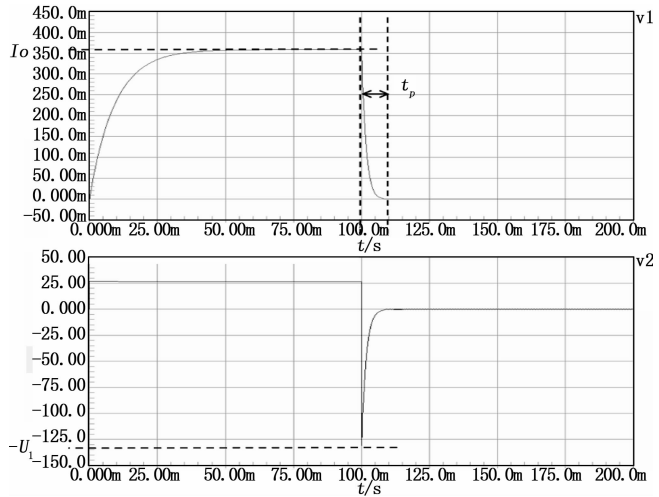


图 6 增加释放电阻的改进电路仿真结果 ($R = 92 \Omega$)

越大。

表 1 不同释放电阻 R 的仿真结果对比

	电磁铁释放时间 t_p	反向电动势钳位电压 U_1
$R = 47 \Omega$	15ms	70V
$R = 92 \Omega$	10ms	130V

由此可见，若通过增加释放电阻 R 的阻值，可以减小电磁铁释放时间 t_p ，但由于电流变化加快，根据 $\xi = L \frac{di}{dt}$ ，反向电动势将增大，虽然解决了总体对姿轨控制发动机响应性能的要求，但无法有效地控制电磁阀关断时产生的反向电动势，以致固态继电器降额不足或受损。

2.2 基于双向 TVS 的加速释放电路

分析以上仿真结果可以看出：在电磁阀释放初期，电流变化速率极快，反向电动势突变；后期随着电流变化速率减慢，反向电动势也相应减弱，整个释放时间中电流释放后期占比较大。以增加释放电阻 $R = 47 \Omega$ 的改进电路仿真结果（图 5）为例，在 $t = 100 \text{ ms}$ 时，反向电动势突变为 70 V ，到 $t = 105 \text{ ms}$ 之间变化极快，降为 4 V 左右，在 $t = 115 \text{ ms}$ 时才逐步变为 0 V ；由此可见，电流释放前期用时约为 5 ms ，后期用时约为 10 ms 。因此，将改进设计思路确定为：在电流释放初期限制反向电压，在电流释放后期增大释放回路电阻。我们设计了一种基于双向 TVS 的电磁阀加速释放电路，原理如图 7 所示。

TVS 即瞬态电压抑制二极管 (Transient Voltage Suppressor Diode)，是在稳压二极管的基础上发展而来的，是一种二极管形式的新型高效能的保护器件。TVS 瞬态电压抑制二极管分为单向 TVS 管和双向 TVS 管，单向 TVS 管只对一个方向的浪涌电压的冲击起到保护作用，双向 TVS 管对两个相反方向的浪涌电压的冲击都能起到保护作用，相当于两只稳压二极管反向串联。具有响应速度快、瞬态功率大、漏电流低、钳位电压易控制、体积小等优良的防

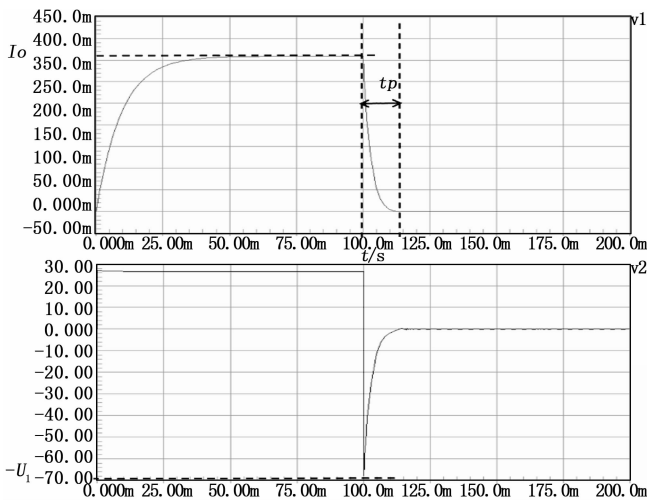


图 5 增加释放电阻的改进电路仿真结果 ($R = 47 \Omega$)

$R = 47 \Omega$ 时，电磁铁的释放时间为 15 ms ，反向电动势为 70 V ；当释放电阻 $R = 92 \Omega$ 时，电磁铁的释放时间为 10 ms ，反向电动势为 130 V 。由仿真结果可以看出，增加的释放电阻越大，电磁铁释放时间越短，但反向电动势则

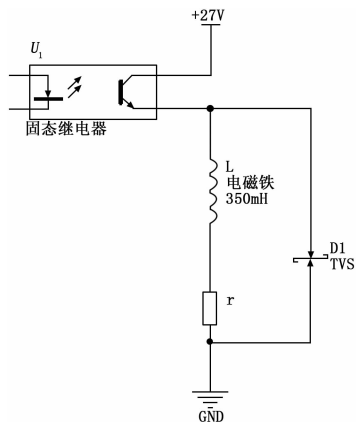


图 7 基于双向 TVS 的电磁阀加速释放电路原理图

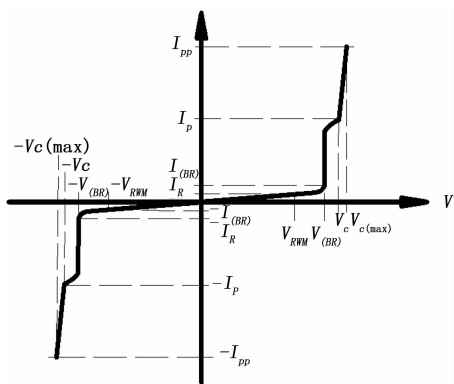


图 8 双向 TVS 的 V-I 特性曲线

护性能。单向 TVS 管多用于直流和已知方向的信号电路，双向 TVS 管多用于交流和变化的信号电路，TVS 阵列多用于多线保护^[8]。本文选用的是双向 TVS 管。

它的工作原理是：在规定的反向应用条件下，当承受一个高能量的瞬时过压脉冲时，其工作阻抗能立即降至很低的导通值，允许大电流通过，并将电压钳制到预定水平，从而有效地保护电子线路中的精密元器件免受损坏^[9]。TVS 管能承受的瞬时功率可达上千瓦，其钳位响应时间仅为 1 ps (10⁻¹² s)。TVS 允许的正向浪涌电流在 T_A = 25 °C、t = 10 ms 条件下，可达 50~200 A。双向 TVS 可在正反两个方向吸收瞬时大脉冲功率，并把电压钳制到预定水平。双向 TVS 的 V-I 特性曲线如图 8 所示^[10]。以正向为例，当 TVS 管电压为反偏，且位于 0~V_{BR} 时，TVS 管呈高电阻状态；当反偏电压超过 V_{BR} 时，流经 TVS 管的电流迅速增加，进入低电阻状态，从高电阻状态到低电阻状态的延时极短，只有 ps 数量级。TVS 管两端电压被钳制在 V_C 以下，当电压脉冲过后，TVS 管又重新恢复到高阻状态。

基于双向 TVS 的电磁阀加速释放电路的原理图如图 7 所示，驱动电路控制端打开固态继电器 U1，电磁阀 L 通电，正常打开，控制端关闭固态继电器 U1，电磁阀 L 断电，电磁阀电感 L 产生反向电动势，双向 TVS 管 D1 为高

阻态，瞬时提升反向电动势；当反向电动势大于双向 TVS 管的击穿电压时，双向 TVS 管导通，电磁阀电感 L 内的能量在反向高电压下快速释放；当大部分能量释放完后，反向电动势小于双向 TVS 管 D1 的击穿电压，双向 TVS 管 D1 重新为高阻态，迅速减低电磁阀内剩余电流，从而快速关断电磁阀。本设计通过利用双向 TVS 管小于击穿电压时表现为高阻态的特性，增大外部释放回路等效电阻，减小释放时间；根据反向电动势公式 $\xi = L \frac{di}{dt}$ ，电流变化越快，反向电动势越大，当反向电动势大于 TVS 管击穿电压时，TVS 管工作阻抗能立即降至很低的导通值，允许大电流通过，并将电压钳制在预定水平，在高电压大电流条件下，快速释放电磁阀线圈内的能量；当电磁阀线圈能量快速消耗后，电流变化速度减慢，反向电动势将小于 TVS 击穿电压，TVS 管工作阻抗立即变为高阻态，即增大释放回路外部等效电阻 R，减少释放时间 t_p。该释放电路工作时，TVS 管将电磁阀反向电动势钳制到预定水平，有效地保护驱动线路中的精密元器件免受损坏。

根据总体指标要求，系统工作电压最大为 V_{max} = 33 V，钳位电压小于 50 V，对双向 TVS 管进行选型。根据 V_{RWM} ≥ 1.1V_{max}，选取最大反向工作电压 V_{RWM} = 36.3 V，则击穿电压 V_{BR} = $\frac{V_{RWM}}{0.85} = 42.7$ V，因此选取双向 TVS 的型号为 P6KE43CA^[11]，其瞬态功率为 600 W，瞬态抑制电流为 100 A，击穿电压为 43 V。

对基于双向 TVS 的加速释放电路进行仿真分析，仿真结果如图 9 所示。

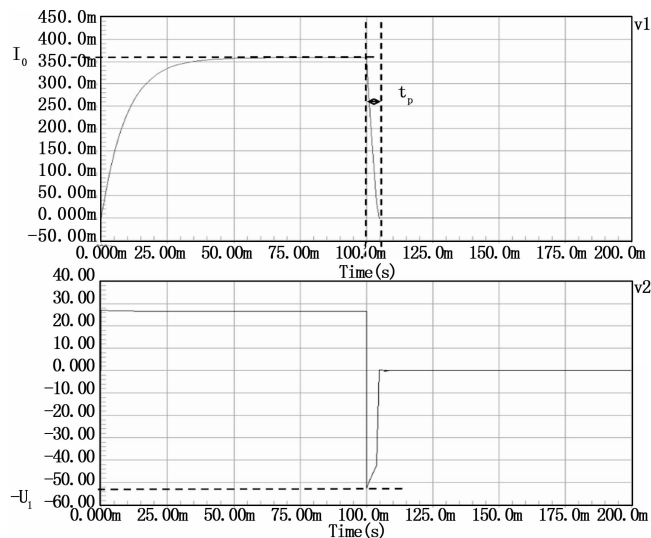


图 9 双向 TVS 加速释放电路仿真结果

由仿真结果可以看出：电磁铁释放时间 t_p 约为 5 ms、反向电动势钳位电压 U₁ 为 52 V，满足了总体对姿轨控发动机响应性能的要求，且有效地控制电磁阀关断时产生的反向电动势，保证了固态继电器降额要求。

3 试验验证

对以上三种加速释放电路状态分别进行了试验验证, 参试电磁阀为某型姿轨控动力系统改的 200N 电磁阀。

参试的加速释放电路分别为:

- 1) 电路 1: 1 个二极管与 $R = 47 \Omega$ 串联, 原理如图 4 (a) 所示;
- 2) 电路 2: 1 个二极管与 $R = 92 \Omega$ 串联, 原理如图 4 (b) 所示;
- 3) 电路 3: 1 个双向瞬态电压抑制二极管 (双向 TVS 型号为 P6KE43CA), 原理如图 7 所示。

电磁阀数据曲线见图 10~图 12, 根据电流数据曲线及反向电动势曲线判读电磁阀响应结果见表 2。电路 1 状态电磁阀关闭响应时间为 28 ms、最大反向电动势为 80 V; 电路 2 状态电磁阀关闭响应时间为 21 ms、最大反向电动势为 130 V。由于电路 3 状态采用双向 TVS, 电磁阀释放时刻电流曲线的波动不明显, 故通过电磁阀出口压力下降时刻来判断关闭响应, 电磁阀关闭响应时间为 6 ms、最大反向电动势为 43 V。

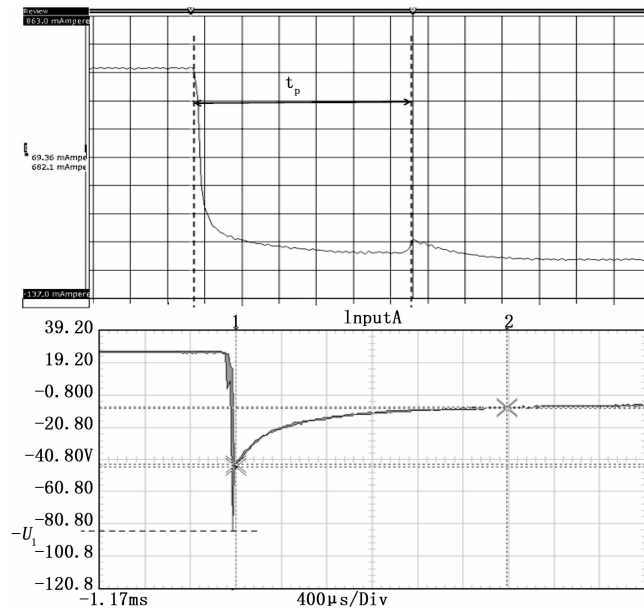


图 10 电路 1 电磁阀电流曲线及反向电动势曲线

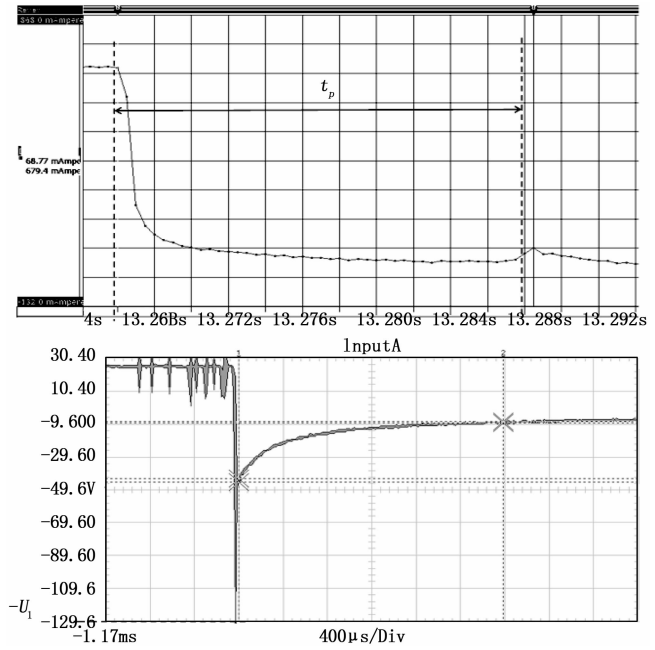


图 11 电路 2 电磁阀电流曲线及反向电动势曲线

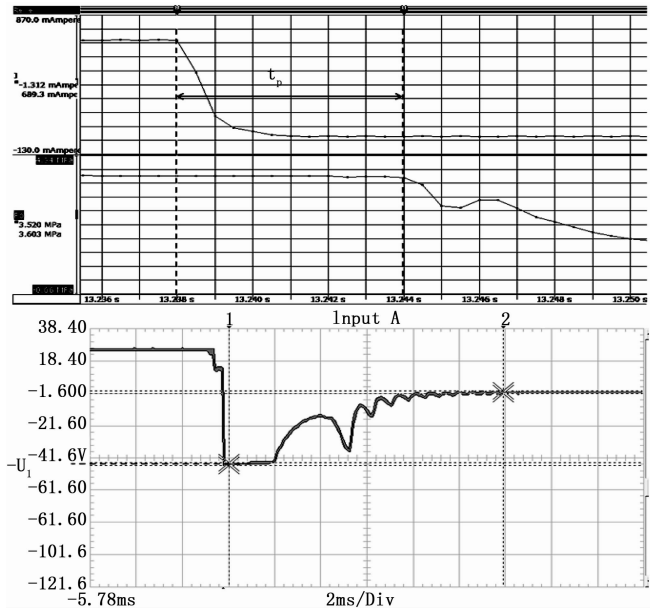


图 12 电路 3 电磁阀电流曲线及反向电动势曲线 (关闭过程含电磁阀出口压力曲线)

表 2 电磁阀响应试验数据

电路状态	关闭响应性能/ms	最大反向电动势/V
电路 1(二极管与 $R = 47\Omega$ 串联)	28	80
电路 2(二极管与 $R = 92\Omega$ 串联)	21	130
电路 3(双向 TVS)	6	43

由以上分析可知:

- a) 电路 1 与电路 2 会使电磁阀响应性能提升, 且响应性能随着串联电阻值的增大而提升, 但仍超出动力系统指

标要求; 最大反向电动势也随着串联电阻值的增大而增大, 不能有效地控制电磁阀关断时产生的反向电动势。

- b) 电路 3 的电磁阀关闭响应性能最快, 达到 6ms; 且能够有效地控制电磁阀关断时产生的反向电动势, 保证了固态继电器降额要求。

因此, 基于双向 TVS 的加速释放电路可以满足动力系统指标要求, 在航天器状态控制过程中, 实现姿轨控发动机的快响应, 同时满足姿轨状态的精确控制。试验验证与前期通过仿真得出的结论一致。

4 结束语

通过分析、仿真及试验验证, 通过在电磁阀驱动回路中增加基于双向 TVS 的加速释放电路, 提高了电磁阀关闭响应速度, 减小了电磁阀关闭响应时间, 解决了某型号姿轨控发动机关闭响应慢的问题, 有效地控制了电磁阀关闭时产生的反向电动势, 保证了固态继电器的降额要求。该电路设计巧妙, 结构简单, 应用效果明显, 器件选择成熟可靠, 有效地节约了成本, 并节省了空间。仿真分析软件有效地仿真了电磁阀释放过程的电流、电压波形, 作为一种有效地辅助设计手段, 大大地提高了设计效率, 同时通过试验验证, 增强了设计的可靠性和可行性。该电路已在多个型号姿轨控发动机电磁阀驱动电路中得到应用, 并参加了全系统热试车及飞行试验, 性能稳定可靠。

参考文献:

- [1] 周文禄. 快响应高精度动力系统技术 [J]. 航天推进与动力, 2003 (2): 8-11.
- [2] 时述有. 一种新的电磁阀节能驱动电路 [J]. 辽东学院学报, 2016, 23 (3): 199-201.

(上接第 181 页)

线性回归与 RANSAC 算法在 85% 之后的范围内偏差较大, Theil-sen 算法在 85% 之后的范围内表现良好, 在其它范围内表现不如前两者。这里我们认为可能是由于线性模型对 SOC 数据规律的表示能力较弱导致的。在未来的工作中, 我们会尝试更加复杂的非线性模型以及分段线性模型来对 SOC 进行预测。

参考文献:

- [1] 林成涛, 王军平, 陈金世. 电动汽车 SOC 估计方法原理与应用 [J]. 电池, 2004, 34 (5): 376-379.
- [2] Kong S N, Moo C S, Chen Y P, et al. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries [J]. Applied Energy, 2009, 86 (9): 1506-1511.
- [3] 邓 涛, 孙 欢. 锂离子电池新型 SOC 安时积分实时估算方法 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2015, 29 (1): 101-106.
- [4] 吴海东, 任晓明, 那 伟, 等. 改进安时法结合神经网络估算锂离子电池 SOC [J]. 电池, 2016, 46 (1): 16-19.
- [5] 鲍 慧, 于 洋. 基于开路电压法的电池荷电状态误差校正 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2014, 25 (5): 77-80.
- [6] Xing Y J, He W, Pecht M, et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures [J]. Applied Energy, 2014, 113 (1): 106-115.

- [3] 方蜀州, 尹治武. 固体姿轨控发动机燃气电磁阀快速驱动电路研究 [J]. 固体火箭技术, 2005, 28 (3): 232-234.
- [4] 余力凡, 马红梅. 运载火箭控制系统电磁继电器消反峰电路分析与 MULISIM 仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 55-57.
- [5] 王建农, 王 伟. Altium Designer 10 入门与 PCB 设计实例 [M]. 国防工业出版社, 2013
- [6] 宋 瑾. 基于 Altium Designer 的直流稳压电源设计与仿真 [J]. 通信电源技术, 2012, 29 (6): 36-38.
- [7] 谢龙汉, 鲁 力, 张桂东. Altium Designer 原理图与 PCB 设计仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [8] 黎莫清, 周小武. TVS 器件特性参数分析与应用 [J]. 现代电子技术, 2013, 36 (16): 127-130.
- [9] 陈云帆, 周中山, 张云峰. 瞬态抑制二极管 (TVS) 的试验分析与应用 [J]. 电瓷避雷器, 2016 (3): 58-63.
- [10] 白树林, 许 波. TVS 及其在电路设计中的应用 [J]. 电子元器件应用, 2009 (4).
- [11] 瞬态电压抑制二极管产品手册 [M]. 中国振华集团永光电子有限公司 (873 厂), 2010.
- [7] 邓 晔, 胡越黎, 滕华强. 锂电池开路电压的预估及 SOC 估算 [J]. 仪表技术, 2015, 2015 (2): 21-24.
- [8] Aung H, Goh S T, Low K S. State-of-charge estimation of lithium-ion battery using square root spherical unscented Kalman filter (Sqrt-UKFST) in Nanosatellite [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (9): 4774-4783.
- [9] 刘艳莉, 戴 胜, 程 泽, 等. 基于有限差分扩展卡尔曼滤波的锂离子电池 SOC 估计 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (1): 221-228.
- [10] 赵云飞, 徐 俊, 王 霄, 等. 双自适应衰减卡尔曼滤波锂电池荷电状态估计 [J]. 西安交通大学学报, 2018 (12): 1-6.
- [11] Chemali E, Kollmeyer P, Preindl M, et al. Long Short-Term Memory-Networks for Accurate State of Charge Estimation of Li-ion Batteries [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, PP (99): 1-1.
- [12] 周美兰, 王吉昌, 李艳萍. 优化的 BP 神经网络在预测电动汽车 SOC 上的应用 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2015, 32 (1): 129-134.
- [13] 孙 威, 修晓青, 肖海伟, 等. 基于 MEA-BP 神经网络的电池储能系统 SOC 状态评估 [J]. 电器与能效管理技术, 2018 (1): 51-54.
- [14] 裴 晟, 陈全世, 林成涛. 基于支持向量回归的电池 SOC 估计方法研究 [J]. 电源技术, 2007, 31 (3): 242-243.
- [15] 李 熠, 石庆升, 崔纳新. 新型电动汽车动力电池 SOC 估计方法研究 [J]. 电力电子技术, 2009, 43 (5): 78-80.