

<http://htkz.cn>

引用格式:张浩楠,张洁,郑伟,等.一种运载火箭时序姿控系统消反峰电路的设计方法[J].航天控制,2025,43(1):81-87.
(ZHANG Haonan, ZHANG Jie, ZHENG Wei, et al. Design method of anti-peak circuit for timing attitude control system of launch vehicle[J]. Aerospace Control, 2025, 43(1): 81-87.)

一种运载火箭时序姿控系统消反峰电路的设计方法

张浩楠¹, 张 洁², 郑 伟¹, 胡海峰¹, 张 隽¹

1. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854

2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076

摘 要 运载火箭时序姿控系统消反峰电路采用“二极管+电阻”电路与“电阻+二极管+稳压二极管”电路,利用 MULTISIM 进行仿真,并利用试验进行验证,发现消反峰电阻越大或者稳压二极管稳压电压越大,电磁阀理论关断时间均越小。对于相同的电磁阀关断时间指标要求,增加稳压二极管稳压值的方法产生的反峰电压要低于增大电阻产生的反峰电压;电磁阀通过精确控制燃料和气体的流动,确保其按照预定的比例和时间被送入发动机,所以增压阀、安溢阀、辅助动力电磁阀等在姿控系统中承担着调节压力和安全保护的重要作用,维护着火箭的姿态稳定和飞行安全,故其关断时间和反峰电压需要精确控制。

关键词 电磁阀;消反峰电压;姿控系统;MULTISUM 软件

中图分类号:V416.8

文献标识码:A

文章编号:1006-3242(2025)01-0081-07

Design method of anti-peak circuit for timing attitude control system of launch vehicle

ZHANG Haonan¹, ZHANG Jie², ZHENG Wei¹, HU Haifeng¹, ZHANG Jun¹

1. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

Abstract The anti-peak circuit of the timing attitude control system of the launch vehicle adopts a "diode+resistor" circuit and a "resistor+diode+voltage regulator diode" circuit. MULTISIM is used for simulation and experimental verification. It is found that the theoretical solenoid valve shutdown time becomes shorter when anti-peak resistance grows larger, and the voltage regulator diode voltage goes larger, separately. Regarding the same electromagnetic valve shutdown time index requirements, a lower reverse voltage produced by using the method of increasing the voltage regulator than using the method of increasing the resistance; Due to the precisely controlling of the flows of fuel and gas that are ensured to be delivered to the engine in the predetermined ratio and time, the boost valve, relief valve and auxiliary

收稿日期:2024-11-27

作者简介:张浩楠(2000-),男,硕士研究生,主要研究方向为控制系统综合。

power solenoid valve. play an important role of adjusting regulating pressure and protecting safety in the attitude control system, which maintain the stability of the launch vehicle's attitude and flight safety. Therefore, their shutdown time and anti-peak voltage need to be precisely controlled.

Key words Solenoid valve; Eliminate anti-peak voltage; Attitude control system; MULTISUM software

0 引 言

运载火箭的时序控制系统是指按时间序列完成各种控制功能的软硬件设备的统称,它主要完成发动机的点火、关机指令及各个舱段和部件的分离指令^[1],即在控制信号的作用下通过开关的闭合将高压电源进行输出,以控制飞行器发出不同动作的设备。根据后端负载的不同,时序可以分为火工品时序、电磁阀时序和其他时序。无论何种时序,时序控制系统的输出主要依赖继电器实现,传统的时序控制模块采用电磁继电器作为开关,线圈通电,电磁开关吸合,时序输出;线圈断电,电磁开关断开,时序无输出。近几年,电磁继电器朝高电压、高频率、大功率、小型号、高可靠和长寿命的方向发展,在航空航天领域得到了广泛的应用。而电磁继电器最容易被侵蚀熔焊等破坏,近年来,大量学者和研究人员针对阻性负载条件下的电磁继电器进行了大量的实验和详细的分析研究,然而鲜有研究人员研究电磁继电器在感性负载条件下的应用。针对此问题,文献[2]提出了一种在负载两端并联辅助功率管的方案,在感性负载关断的同时将辅助功率管倒贴以钳位负载两端电压,同时对负载上的电流进行泄放。但是该方案需要增加额外的控制信号,同时对辅助功率管的介入时间有严格要求,否则容易导致短路故障,有一定的危险性,且实现方式较为复杂。文献[3]将辅助功率管替换为二极管,负载两端电压方向改变后被续流二极管钳位,并通过续流二极管续流,解决了电感性负载关断电压应力大的问题,并且无需额外的控制电路,无短路风险,实现方式简单。余力凡等^[4]介绍了在运载火箭中,为了消除继电器关断时产生反峰电压而经常采用的两种消反峰电路,分别是“二极管+电阻”电路与“电阻+二极管+稳压二极管”电路,并使用MULTISIM进行了仿真,发现“电阻+二极管+稳压二极管”电路消反峰效果更好,对于要求快速泄放反峰电流的电路应采用此种消反峰电路。范宇等^[5]利用“二极管+电阻”电路仿真对比了有、无消反峰电

路及不同消峰电阻下的电磁阀性能,得到释放响应时间随消峰电阻的增大而减小,而感应电动势随消峰电阻的增大而增大的规律。同时发现消峰电阻对电磁阀性能的影响存在一个转折点,选择此点作为电磁阀控制系统的设计点可以得到更优的方案。沈公槐^[6]给出了不同保护回路的阀门开、关时间表表达式,从而寻找出提高阀门动态特性的途径。并对阀门的动态特性进行了3种保护回路的测试,分别是只接二极管、二极管和电阻串联、二极管和稳压管串接,最终得出二极管和稳压管串接比串接电阻更优越。本文研究分析了时序电路中的电磁阀电路,对“二极管+电阻”电路和“电阻+二极管+稳压二极管”电路这两种消反峰电路参数进行了选择,并且利用试验验证得出“电阻+二极管+稳压二极管”电路能够满足要求,为后续工程应用优化提供参考。消反峰电路在电磁阀时序姿控系统中扮演着至关重要的角色,是确保系统正常运行和性能优化的关键因素之一,本文针对某型运载火箭时序姿控系统的电磁阀消反峰电路设计进行了研究。

1 电磁阀消反峰设计

电磁阀的消反峰电路一般由电阻与二极管组成,电磁阀控制电路设计如图1所示。

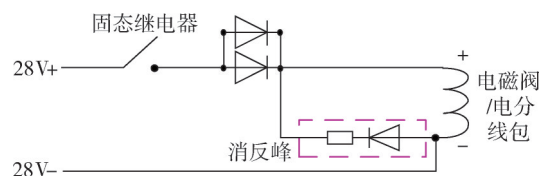


图1 电磁阀消反峰电路

工作原理:正常时序指令接通时,28V电源E经过固态继电器MOS管输入到发动机电磁阀两端,通电中电流走向沿外部回路,通电中电流为 $I_0 = \frac{E}{r}$,E为电源电动势,r为负载内阻。当时序指令断开时,电流沿内圈小回路方向,经二极管和电阻,形成闭环泄放回路,如图2所示。

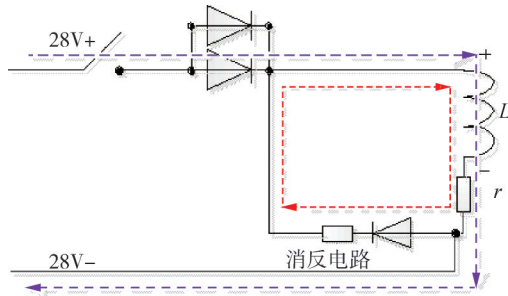


图2 电流流向分析图

2 消反峰电路原理分析

感性负载工作时线圈带电并存储一定能量,当控制开关断开瞬间,线圈存储的磁能就会产生抑制电流变化的反电势加在继电器开关两端。图3表示电感为 L ,内阻为 r 的感性负载接到电路时的情况。

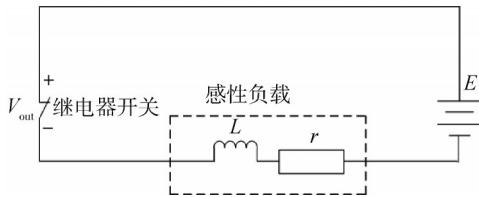


图3 感性负载电路示意图

由于电流变化的时间很短,因此产生的反电势很大,若没有放电回路,反电势将对继电器开关造成反压冲击。为了减小断电瞬间电磁阀反峰电压对继电器开关的冲击,电路中设计了消反峰回路,一般为在电磁阀两端并联一个二极管串联一个电阻 R 的电路,如图4所示。当开关闭合时,电阻 R 和二极管 d 串联支路不工作,回路1中的各元器件工作;当开关断开时,电磁继电器线圈中存储的能量通过回路2释放,消耗在内阻 r ,二极管 d 和外加电阻 R 中。

继电器关断前,电流为 I_0 。继电器关断时,感性负载与消反峰电路形成通电,由于电感电流不会突

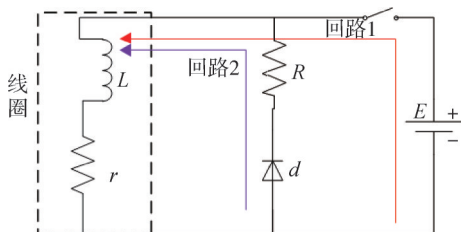


图4 二极管串联电阻消反峰电路

变,负载两端电压为

$$R \times I_0 = E \times \frac{R}{r} \quad (1)$$

因而输出端耐受的电压为

$$V_{out} = E \times \frac{R}{r} + E = E \left(\frac{R}{r} + 1 \right) \quad (2)$$

电感贮存能量的释放时间 T (计算中认为电路中电流降为 $0.05I_0$ 时能量释放完毕)为

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = -(R+r)i \\ \frac{di}{i} = -\frac{R+r}{L} dt \\ \int_{I_0}^{0.05I_0} \frac{di}{i} = -\int_0^T \frac{R+r}{L} dt \end{cases} \quad (3)$$

$$T = \frac{L}{R+r} \ln 20 \approx \frac{3L}{R+r} \quad (4)$$

开关闭合时,电感上存储总能量为

$$W = \frac{1}{2} Li^2 \quad (5)$$

电感内阻和限流电阻分担该能量,因此在 3τ 内功率 P 计算为

$$P = \frac{\frac{1}{2} Li^2 \cdot \frac{R}{R+r}}{\frac{3L}{R+r}} \quad (6)$$

式中: R 为限流电阻, r 为电感内阻, I 为初始电流, L 为电感值。 τ 为负载及消反峰构成电路的放电时间

常数: $\tau = \frac{L}{R+r}$ 。

如果负载需要频繁动作,需要按照平均功率进行电阻功率计算:

$$\begin{cases} P = \frac{W}{T} \\ W_{RR} = \frac{1}{2} \times L \times \left(\frac{U}{r} \right)^2 \times \frac{R}{R+r} \times \frac{1}{T} \\ W_{RR} < P_R \end{cases} \quad (7)$$

根据式(2)~(7)可得如下结论:

1)继电器关断时,继电器开关承受的最大电压为 $E \left(\frac{R}{r} + 1 \right)$,此值不能超过继电器开关能承受的最大瞬态电压值,显然 R 越小越安全;

2)为了使得电感上的能量尽快释放掉,要求 R 取值大一些;

3)消反峰电阻在释放时间 3τ 内的功率应不超过电阻在对应时段内的瞬时功率指标,频繁动作的负载的消反峰电阻,动作周期内的平均功率应不超过电阻在对应时段内的瞬时功率指标。

3 “二极管+电阻”消反峰电路实测分析

3.1 参数设计

当前固态继电器耐压指标为 100 V, 按要求 I 级降额为 ≤ 70 V, 为保险起见, 推荐降额 ≤ 50 V。

当线圈电压 V_2 为 30 V, 线圈电阻 R_2 为 25 Ω , 电感 L_1 为 0.6 H, 消反峰电阻 R_1 为 1 Ω 时, 得到各计算值。

电流:

$$I_{\max} = \frac{E}{r} = \frac{30}{25} \text{ A} = 1.2 \text{ A} \quad (8)$$

继电器两端电压:

$$U_{\max} = E \left(\frac{R}{r} + 1 \right) = 31.2 \text{ V} \quad (9)$$

电流释放时间:

$$t_{\max} = \frac{3 \times L}{R + r} = \frac{3 \times 0.6}{1 + 25} = 69.2 \text{ ms} \quad (10)$$

3τ 内冲击功率:

$$P = \frac{1}{2} \frac{LI^2 \cdot \frac{R}{R+r}}{3L} = 0.2 \text{ W} \quad (11)$$

消反峰电阻为 5 Ω 、10 Ω 或其他阻值时, 计算方法同上类似。

时序系统共涉及多类时序, 以下分别介绍不同消反峰电阻选型对涉及结果的影响。

选取消反峰电阻分别为 1 Ω 、5.1 Ω 和 10 Ω 时, 反峰电压最大值 42.2 V, 满足 I 级降额指标要求, 参数计算结果如表 1。

表 1 消反峰电路典型参数设计表

电磁阀	线圈电压/V	线圈电阻/ Ω	电感/H	关断时间指标/ms	电流计算/A	回路电阻/ Ω	关断时间计算值/ms	继电器两端电压/V	3τ 内冲击功率/W	反峰电阻/ Ω
增压	22~30	25.2 \pm 2	0.6	160	1.20	25	69.2	31.2	0.2	1
增压	22~30	25.0 \pm 2	1.44	200	1.20	25	166.2	31.2	0.2	1
动力	22~30	23.0 \pm 1	0.6	60	1.30	23	75.0	31.3	0.3	1
动力	22~30	25.2 \pm 2	0.6	160	1.20	25	59.8	36.1	1.2	5.1
安溢	22~30	27.0 \pm 2	2.42	260	1.11	27	226.2	35.7	1.0	5.1
动力	22~30	23.0 \pm 1	0.6	60	1.30	23	64.1	36.7	1.4	5.1
安溢	22~30	25.2 \pm 2	0.6	160	1.20	25	51.4	42.0	2.4	10
动力	22~30	27.0 \pm 2	2.42	260	1.11	27	196.2	41.1	2.1	10
动力	22~30	25.0 \pm 2	0.6	20	1.20	25	51.4	42.2	2.4	10

统计各类参数计算结果, 发现动力阀的关断时间超出规定指标, 关断时间指标值为 20 ms, 关断时间计算极大值为 196.2 ms, 由此可以看出“二极管+电阻”消反峰电路有时不能保证有效及时地消除反峰电压, 故将在第 4 节中讨论稳压二极管方案。

3.2 仿真校验

对“电阻+二极管”消反峰电路情况进行仿真, 搭建电路如图 5 所示。用示波器观察反峰电压的变化情况, 仿真结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 反峰电压为 32 V, 下降至 5% 用了 67 ms, 与电流释放

时间计算值大致相似。

3.3 方案验证试验

在消反峰电阻为 1 Ω 、5 Ω 、10 Ω 、15 Ω 和 20 Ω 的状态下, 对电磁阀进行瞬态试验, 其他条件设置如 3.1 节所示, 通过瞬态试验, 得到电磁阀的瞬态特性, 包括关断时间实测值和反峰电压实测值, 由此可以看出实测结果和仿真结果还有参数计算结果吻合较好。

试验验证情况如表 2。

实测结果表明, 辅助动力电磁阀特性与计算设

表 2 试验电磁特性统计表

消反峰电路电阻值/ Ω	反峰电压计算值/V	反峰电压实测值/V	电磁阀关断时间计算值/ms	电磁阀关断时间实测值/ms
1	31.2	34.5	69.2	66
5	36	37.6	60	61
10	42	42.5	51.4	55
15	48	48.6	45	50
20	54	52.6	40	45

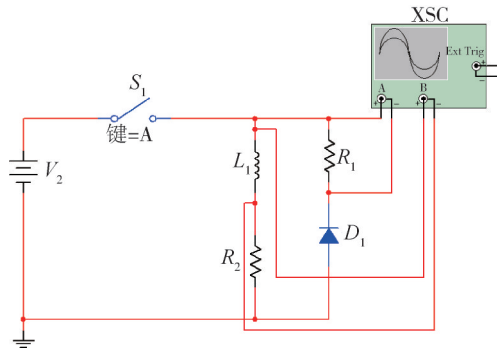


图5 消反峰电路仿真图

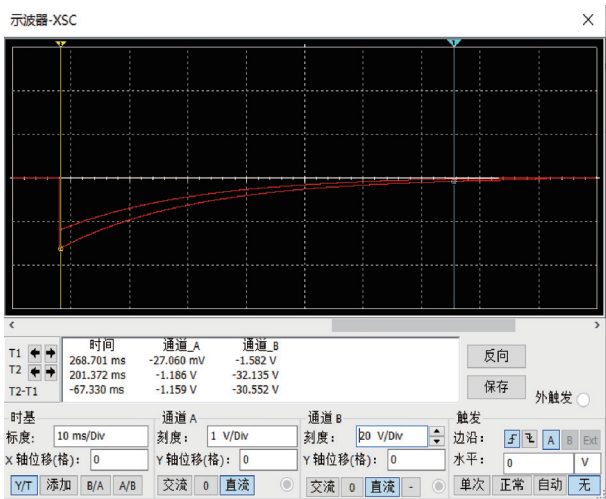


图6 示波器结果

计预期一致。按“电阻+二极管”消反峰电路设计方案,电磁阀关断时间无法满足指标,若关断时间满足 20 ms 指标时,消反峰电阻 $\geq 56 \Omega$,反峰电压 $\geq 97.2 \text{ V}$,不满足 I 级降额(70 V)要求。故传统“电阻+二极管”方案无法满足总体指标。

4 稳压二极管方案

4.1 理论分析

稳压二极管也称作齐纳二极管,是一种用特殊工艺制造的面结型硅半导体二极管。当反向电压加到某一定值时,反向电流急增,发生反向击穿。当反向电流小于某一值时,稳压二极管进入反向截止状态。在余力凡等^[4]的研究基础上,开展“二极管+电阻+稳压二极管”方案探索,方案示意如图 7。

理论分析得到反峰电流:

$$i = \frac{E}{r} \exp\left(-\frac{r+R}{L}t\right) + \frac{[\exp\left(-\frac{r+R}{L}t\right) - 1]V}{R+r} \quad (12)$$

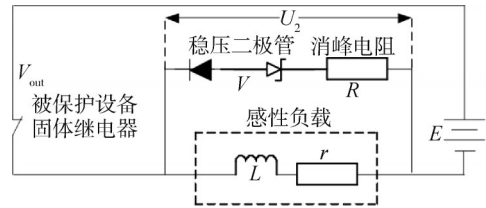


图7 稳压二极管消反峰电路原理图

不加稳压二极管,电流为 $i = \frac{E}{r} \exp\left(-\frac{r+R}{L}t\right)$,那么在相同的 t 时刻,增加了稳压二极管的消反峰电路中的反峰电流会更小。

理论分析得到反峰电压:

$$U_2 = i \times R + V = \frac{R \times E}{r} \exp\left(-\frac{r+R}{L}t\right) + \frac{[\exp\left(-\frac{r+R}{L}t\right) - 1]R \times V}{R+r} + V \quad (13)$$

相比不加稳压二极管的电路,反峰电压增加了 $\frac{[\exp\left(-\frac{r+R}{L}t\right) - 1]R \times V}{R+r} + V$,在相同的 t 时刻,增加了稳压二极管的消反峰电路中的反峰电压会更大,电路关断瞬间增加值最大,为稳压二极管反向击穿电压 V 。

理论电磁阀关断时间 t :

$$t = -\frac{L}{r+R} \ln \left[\frac{V + 0.06(R+r)}{V + 1.2(R+r)} \right] \quad (14)$$

采用“二极管+电阻+稳压二极管”消反峰电路形式的电磁阀匹配试验,试验原理如图 8 所示。

试验结论:

1)增加了稳压二极管,可以使电流下降速度变快,起到加快泄放的效果,但也增加了反向电动势;
2)对于“二极管+电阻+稳压二极管”的消反峰电路,稳压值越大,电磁阀关断时间越短;

3)不管是增大电阻 R 还是增加稳压二极管都可以在断电后使电磁阀关断时间变短,但也都增加了反向电动势。对于相同的电磁阀关断时间指标要求,用增加稳压管的方法产生的反向电压低于增大电阻的方法。

4.2 仿真校验

表 3~5 为消反峰电阻选不同值时,不同稳压值下的一级辅助动力电磁阀理论关断时间。

从表 3~5 的趋势看,消反峰电阻越大或者稳压二极管稳压电压越大,理论电磁阀关断时间均越小,但在选型上需要控制反峰电压满足 I 级降额

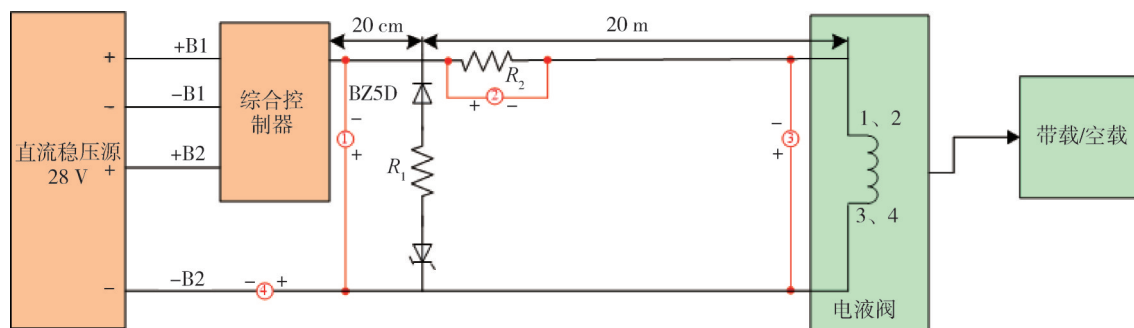


图8 消反峰电路电磁阀匹配试验原理图

表3 消反峰电阻1Ω时一级辅助动力阀理论关断时间表

稳压值/V	5	10	12	15	18	20	22	24	28	31	34	37.5
反峰电压/V	36.2	41.2	43.2	46.2	49.2	51.2	53.2	55.2	59.2	62.2	65.0	68.7
理论电磁阀关断时间/ms	39.4	29.3	26.7	23.7	21.3	20	18.8	17.8	16.0	14.9	14.0	13.0

表4 消反峰电阻5.1Ω时一级辅助动力阀理论关断时间表

稳压值/V	5	10	12	15	18	20	22	24	28	31	34	37.5
反峰电压/V	41	46	48	51	54	56	58	60	64	67	70	73.5
理论电磁阀关断时间/ms	35.9	27.2	24.9	22.2	20.1	18.9	17.8	16.9	15.3	14.3	13.4	12.5

表5 消反峰电阻10Ω时一级辅助动力阀理论关断时间表

稳压值/V	5	10	12	15	18	20	22	24	28	31
反峰电压/V	47	52	53	57	60	62	64	66	70	73
理论电磁阀关断时间/ms	32.4	25	23.0	20.6	18.7	17.1	16.7	15.9	14.5	13.6

要求。

4.3 方案验证试验

验证“稳压二极管”方案。为验证仿真结果的正确性,试验选取“1Ω消反峰电阻+24V稳压二极管+二极管”,统计理论值与实测结果比对如表6。

表6 实测与理论结果对比表

参数	理论值	空载测试	带载测试
反峰电压/V	55.2	56.0	55.6
电磁阀关断时间/ms	17.8	8.8	9
衔铁作动时间/ms	53.4	48	60

实测结果表明:“反峰电压”和“衔铁作动时间”实测值与仿真值相符。但电磁阀关断时间实测值约为仿真值的50%,实测优于仿真值,预估为试验提供电磁阀参数偏差所致,时间常数 $\tau = \frac{L}{R+r}$ 。

电磁阀实际电感L偏小,会导致时间常数变小,即电磁阀关断时间变小。

上述仿真及试验结果对比可得,对于相同的电

磁阀关断时间指标要求,用增加稳压管的方法产生的反向电压低于增大电阻的方法。

因1Ω电阻会在二极管反向击穿时导致电磁阀无法开启,选用“5.1Ω小电阻+稳压二极管+二极管”方案。在满足20ms作动时间指标要求及I级降额指标要求下,稳压二极管可选范围为20~31V,反峰电压范围为56~67V。

稳压管用于消反峰时选型要考虑稳压管瞬态功率的计算,根据功率计算公式,在ms级脉宽时间内,脉宽时间和脉冲峰值功率满足: $P_2 = P_1 \times \sqrt{\frac{t_1}{t_2}}$ 。其中, P_1 是 t_1 脉宽时的峰值功率, P_2 是 t_2 脉宽时的峰值功率。

选用3W的稳压二极管2.0~40V,该系列稳压二极管1ms瞬态功率大于1500W,由理论电磁阀关断时间15.9ms换算成瞬时功率为 $P > \frac{1500}{\sqrt{15.9}} = 376.0\text{W}$,而在消反峰过程中,最大瞬时功率是在固

态继电器断开瞬间, $P = \frac{E}{r} \times V = \frac{30}{25} \times 24 = 28.8 \text{ W}$, 故该参数稳压二极管满足瞬时消反峰电路功率要求。

5 结 论

对于电磁阀,消反峰电路采用“二极管+电阻+稳压二极管”,稳压二极管稳压值分别为22 V、24.5 V,消反峰电阻为5.1 Ω ,理论计算和试验结果表明,采用稳压二极管方案符合电磁阀的关断时间要求。

从可靠性方面考虑,稳压二极管方案增加了串联环节,使稳压二极管与电阻和二极管串联,电路固有可靠性降低;从成熟度方面考虑,此前“二极管+电阻+稳压二极管”应用较少。相比无稳压管的方案,“二极管+电阻+稳压二极管”的消反峰电路具有一定优势。仿真与试验证明,用增加稳压管的方法产生的反向电压低于增大电阻的方法,并且可以减少电磁阀关断时间,加快泄放效果。

参 考 文 献

- [1] 宋征宇. 运载火箭时序控制系统“标准型”的研究[J]. 航天控制, 1998, 8(2): 28-33. (SONG Zhengyu. Research on the "standard type" timing control system for launch vehicles [J]. Aerospace Control, 1998, 8 (2): 28-33.)
- [2] 张敏. 直流固态功率控制器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008. (ZHANG Min. Research on DC solid state power controller [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.)
- [3] 欧世锋. 大容量直流固态断路器关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013. (OU Shifeng. Research on key technologies of large capacity DC solid state circuit breaker [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.)
- [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MULTISIM仿真[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(11): 55-57+182. (YU Lifan, MA Hongmei. Analysis and multisim simulation of anti peak circuit of electromagnetic relay in carrier rocket control system [J]. Computer Measurement and Control, 2017, 25(11): 55-57+182.)
- [5] 范宇, 任志彬, 陈涛. 消反峰电路对电磁阀性能的影响分析[J]. 火箭推进, 2024, 50(2): 113-121. (FAN Yu, REN Zhibin, CHEN Tao. Analysis of the impact of anti peak circuit on the performance of electromagnetic valves [J]. Rocket Propulsion, 2024, 50 (2): 113-121.)
- [6] 沈公槐. 改进电磁阀动态特性的一种方法[J]. 航天控制, 2001, 16(3): 75-81. (SHEN Gonghuai. A method for improving the dynamic characteristics of solenoid valves [J]. Aerospace Control, 2001, 16 (3): 75-81.)