

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.02.009

半导体桥起爆器在固体火箭冲压发动机转级装置中的应用研究*

张爱军 王增辉 陶小亮
中国空空导弹研究院(河南洛阳,471009)

[摘要] 转级装置是固体火箭冲压发动机(固冲发动机)的重要组成部分,关系着固冲发动机能否实现从助推向冲压的成功转换。进气道堵盖是冲压发动机转级过程中的关键部件之一,可控制气体进入补燃室。提出了一种使用半导体桥起爆器作为起爆装置的易碎式堵盖,起爆时通过点燃半导体桥起爆器使堵盖破碎,使气体进入补燃室,完成固冲发动机转级控制。重点介绍该易碎式堵盖的结构形式、使用特点,并对半导体桥起爆器的转级控制电路进行了介绍。实验结果证明,半导体桥起爆器可应用于固冲发动机转级装置中。

[关键词] 固冲发动机转级装置;半导体桥起爆器;转级控制电路

[分类号] TJ45

Application Research on Semiconductor Bridge Primer in Transition Device of Integrated Rocket Ramjet Engine

ZHANG Aijun, WANG Zenghui, TAO Xiaoliang
China Airborne Missile Academy (He'nan Luoyang, 471009)

[ABSTRACT] Transition device is an important part of integrated rocket ramjet engine. It decides the transform of integrated rocker ramjet engine from boosting period to punching press period. Port cover on the air intake ports is the essential part in transition process of integrated rocket ramjet engine. It can control air into the combustion chamber. A brittle port cover using semiconductor bridge primer as the explosive device was introduced. Through firing semiconductor bridge primer, the port cover was broken and air got into the combustion chamber. Transition control of engine was achieved. Structural form and usage characteristics of this brittle port cover, and the transition control circuit was described. Experimental results improves that semiconductor bridge primer could be applied in transition device of integrated rocket ramjet engine.

[KEYWORDS] transition device of integrated rocket ramjet engine; semiconductor bridge primer; transition control circuit

引言

固体火箭冲压发动机(简称固冲发动机)的使用是超声速导弹动力装置的一个主要发展方向。固冲发动机是一种由冲压和火箭技术有机组合的二级组合型发动机。其中,转级系统起着衔接助推级到冲压级工作的关键作用。助推转级发动机工作结束后,作用在弹体上的阻力使导弹的飞行速度减小,只有尽快完成转级过程,才能使主发动机及时接力工作,保证导弹有良好的弹道性能。进气道出口

堵盖是冲压发动机转级过程中的关键部件之一,半导体桥起爆器在堵盖中可使堵盖破碎或打开,使气流进入补燃室,和燃气流掺混燃烧^[1-2]。

1 转级装置介绍

固冲发动机的主要特征是固体火箭助推器燃烧室与冲压发动机燃烧室一体化整体式结构。工作时,空气以冲压方式进入补燃室,并在补燃室里与燃气发生器喷出的富燃燃气均匀混合燃烧,随后补燃室内产生的高温燃气通过喷管膨胀产生推力。固冲

* 收稿日期:2017-05-09

作者简介:张爱军(1979-),男,高级工程师,主要研究方向为点火电路控制技术。E-mail: jimizhang@sina.com.cn

发动机性能较好、成本适中,它的使用是发展冲压发动机技术中较为可行的一种途径。

转级技术是固冲发动机设计中的一项关键技术,涉及了机构运动、信号处理、电路控制和火工品等技术范畴。转级系统设计一般包括部件设计、控制设计及试验设计等,部件可分为进气道入口堵盖、出口堵盖、燃气喷嘴堵盖以及附带的电子元器件和火工品等^[3-4]。

进气道入口堵盖功能是:在导弹助推阶段,封闭进气道入口,接收到控制舱下达的转级指令后,执行机构按预定程序打开堵盖,从而使空气进入进气道。进气道入口堵盖的设计要求:堵盖结构简便,工作可靠,能安全承受迎头气动载荷和热载荷;转级时,能迅速、可靠地打开。

进气道出口堵盖主要功能是:在助推阶段将进气道和助推器安全隔离,并承受助推器工作压强,转级时迅速打开,使气流顺利进入补燃室,和燃气流掺混燃烧。进气道出口堵盖设计要求:能承受助推器工作压强,结构完整、密封可靠;转级时,堵盖能迅速打开;若有抛出物,不能损坏导弹和发动机部件。

易碎式堵盖由经过特殊处理的高强度易碎陶瓷或其他材料制成。转级时,采用电爆装置爆破或爆炸尖锥撞击堵盖的某个特定部位,使其碎成岩盐颗粒状,并在气流作用下吹脱。该堵盖与拼合式堵盖相比,抛出物危险性较小,但尖锐的颗粒也有可能损伤补燃室热防护层,需要控制好起爆器威力和材料破碎结构。图1为易碎式堵盖示意图。

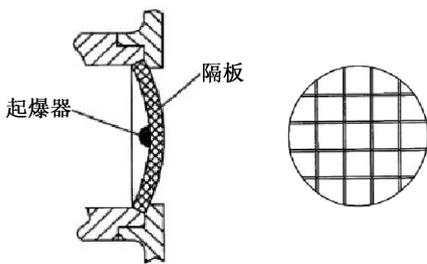


图1 易碎式堵盖示意图

Fig. 1 Diagram of the brittle port cover

2 起爆器的选择

为保证堵盖打开,引爆堵盖的起爆器除了具备一定的能量,同时应具备起爆时间快、钝感、安全性好等特点。半导体桥是新一代点火器件,它与常用的Ni-Cr金属桥丝(热桥丝)相比,具有体积小(为热桥丝的1/30)、点火能量小(可小至3 mJ)、作用时间短(可缩短到5 μs)等优点。通常情况下,金属桥

丝在加上3~5 A的电流后,几毫秒的时间内实现引爆;而半导体桥在加上十几安的电流下,5~8 μs的短时间内便可实现引爆^[5-7]。为了增加堵盖打开的可靠性,每个发动机堵盖拔销器采用两个单桥半导体桥(SCB)起爆器作为起爆元件,为了实现对发动机进气道左右入口和出口4个堵盖的起爆器起爆,共需要8个半导体桥起爆器。

3 转级控制电路的设计

转级控制原理见图2,飞控系统发出转级指令,数字信号处理(DSP)接收到指令后,输出转级控制信号,经过转级控制电路转换为起爆信号,触发半导体桥起爆器,将转级装置中的堵盖粉碎,完成固冲发动机的转级。

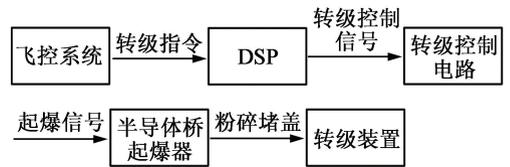


图2 转级控制原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of transition control

转级控制电路的主要功能是完成发动机4个堵盖内8个半导体桥起爆器的起爆。引燃半导体桥起爆器需要在极短时间内提供较大的电流;因此,普遍采用先给储能电容充电,再利用电容储能引爆半导体桥的方法。某路起爆电路原理图见图3。

DSP选用TI公司的TMS320F2812,主频为150 MHz,高性能32位CPU,含通用定时器及串形通信接口(SCI)等部件。DSP与飞控系统之间采用通讯芯片MAX3490连接,采用RS422通讯进行信息交换。该电路主要由两部分组成,即电容充电控制电路和起爆控制电路^[8]。

DSP接收到飞控系统的电容充电指令后,通过DSP的PWM₁、PWM₂口输出电容充电控制信号,经过总线收发器SM164245将信号电压由+3.3 V转换为+5.0 V,两路信号共同控制光金属氧化物半导体(MOS)继电器K₁由关断到开通,+27.0 V通过光MOS输出级对储能电容C₀充电,该部分电路为电容充电控制电路。

DSP接收到飞控系统的转级指令后,通过DSP的PWM₃、PWM₄口输出转级控制信号,两路信号共同控制光MOS继电器K₂由关断到开通,储能电容C₀通过K₂的输出级放电,在半导体桥起爆器上形

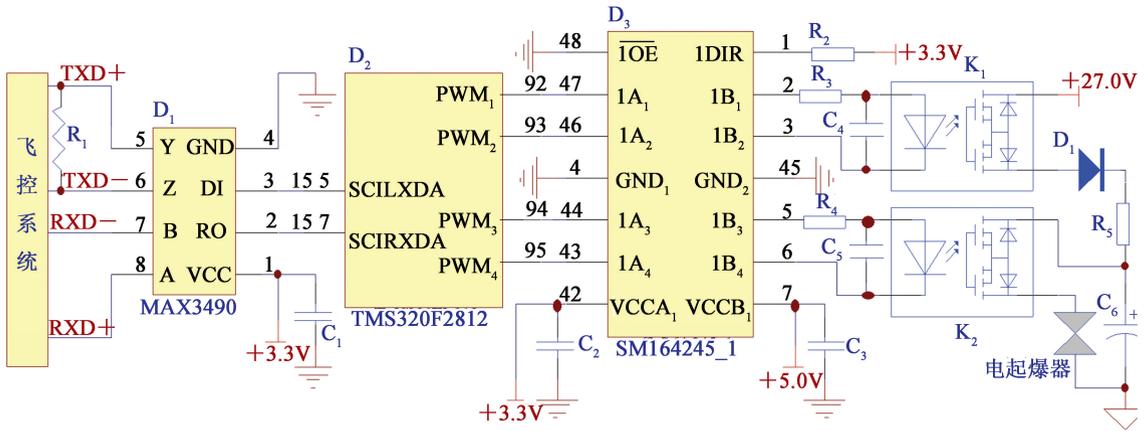


图 3 转级控制电路图

Fig. 3 Transition control circuit

成瞬时大电流,起爆半导体桥起爆器。该部分电路为起爆控制电路。

点火电路必须安全可靠,因此,安全性和可靠性设计是必须考虑的因素。为了防止 DSP 管脚偶然失效导致误点火,采用 DSP 输出双路控制,一路高电平有效,另一路低电平有效。为了防止电磁干扰的影响,在光 MOS 继电器前设计有 RC 滤波器,可有效滤除尖峰干扰。为了保证起爆的可靠性,采用冗余设计,每个堵盖内采用两个半导体桥起爆器,只要有一个起爆器成功起爆,即可使堵盖打开。8 路转级控制电路完全一样^[9]。

4 试验研究

半导体桥起爆器应满足 1A、1W、5 min 不发火的钝感要求,符合 GJB344A—2005 的要求,主要指标为:1) 半导体桥起爆器内阻为 $(1.0 \pm 0.1)\Omega$, 拔销器点火两极与点火本体间电阻大于 $5\text{ M}\Omega$ (500 V 直流); 2) 流过点火头电流不小于 15 A、持续时间不小于 $5\ \mu\text{s}$ 的条件下应可靠发火。

储能电容 C_c 选用规格为 $47\ \mu\text{F}/50\ \text{V}$ 的钽电解电容,充电电压为 27 V。电容放电时间常数太大,即使储能再多,也不能引爆半导体桥起爆器。因此,储能要够,放电要快。考虑从转级控制电路到半导体桥起爆器线缆电阻的影响,取 $R_{\text{线}} = 0.5\ \Omega$, 则放电时间常数 τ 为

$$\tau = (R_s + R_{\text{线}}) \times C = 1.5 \times 47 = 70.5\ \mu\text{s}.$$

式中: R_s 为半导体起爆器的电阻。

起始放电电流 I_0 为

$$I_0 = \frac{V_c - V_T}{R_s + R_{\text{线}}} = \frac{27 - 0.5}{1 + 0.5} = 17.7\ \text{A}.$$

式中: V_T 为光 MOS 继电器输出管压降。

放电 $10\ \mu\text{s}$ 后放电电流 I_{01} 为

$$I_{01} = I_0 \times e^{-t/\tau} = 17.7 \times e^{-10/70.5} = 15.3\ \text{A}.$$

因此,半导体桥起爆器上的有效放电时间(电流 $\geq 15\ \text{A}$) 约为 $10\ \mu\text{s}$ 。

依据图 2 和图 3 搭建转级试验装置。当 DSP 收到转级指令后,通过 PWM_3 、 PWM_4 口输出两路转级控制信号,波形见图 4 的 1# 通道和 2# 通道。其中,1# 通道高电平有效,2# 通道低电平有效,3# 通道为起爆器起爆时的波形图。

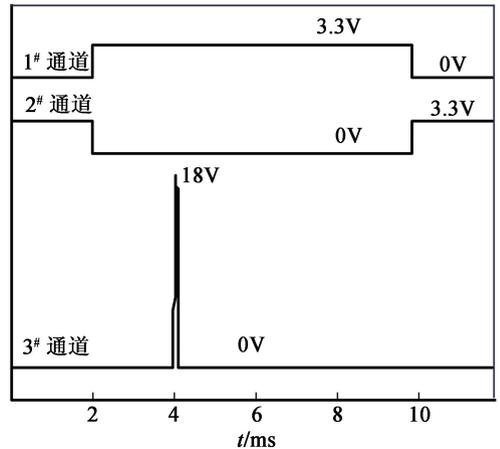


图 4 转级控制信号波形

Fig. 4 Signal waveform diagram of transition control

起爆信号展开的波形见图 5,起爆信号大于 5 A 的时间约为 $5 \sim 15\ \mu\text{s}$, 半导体桥起爆器成功起爆。试验时,监测到的其他 7 路起爆信号与此基本相同,均能正常起爆,堵盖被成功打开。

采用该起爆装置在常温、低温、高温下进行试验,用 9 个起爆器进行试验,编号为 1# ~ 9#, $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-45\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 3 个温度下各使用 3 个,将起爆电路和半导体桥起爆器放置到保温箱,达到要求的温度后保

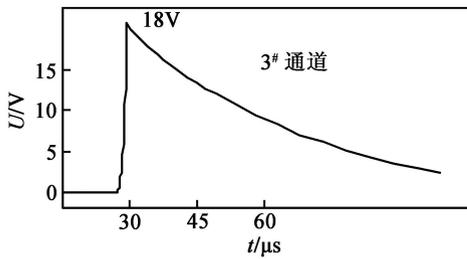


图5 半导体桥起爆信号波形

Fig. 5 Detonating signal waveform diagram of the semiconductor bridge

温2 h,利用上位机模拟飞控系统发送转级指令。根据半导体桥起爆器的起爆条件,记录起爆信号大于15 A所持续的时间,结果见表1。试验中,9个半导体桥起爆器均被成功起爆。可以看出,低温时由于电容下降,充电电荷减少,放电时间相对较短。

表1 半导体桥起爆器起爆试验数据

Tab. 1 Detonating test data of the semiconductor bridge primer

起爆器编号	试验温度/℃	起爆信号 ≥ 15 A的时间/ μ s
1#	25	12.2
2#	25	11.0
3#	25	12.6
4#	-45	7.2
5#	-45	6.4
6#	-45	7.1
7#	60	10.2
8#	60	11.2
9#	60	10.4

5 结论

介绍了半导体桥起爆器在固冲发动机转级装置中的应用,起爆半导体桥起爆器可成功将转级装置中的堵盖打开,实现固冲发动机的转级。选用一种半导体桥起爆器,并设计了转级控制电路。应用转级控制电路对半导体桥起爆器进行了点火试验,试验结果表明,该应用装置结构简单,操作方便,安全性好,可靠性高,对半导体桥起爆器在固冲发动机转级装置中的应用具有重要的借鉴意义。

参考文献

[1] 张国宏,黄少波,崔金平,等. 固体火箭冲压发动机转级技术[J]. 弹箭与制导学报,2012,32(3):129-132.

ZHANG G H, HUANG S B, CUI J P, et al. Transition technology in integrated rocket ramjet engine[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(3):129-132.

[2] 叶定友. 固体火箭冲压发动机的若干技术问题[J]. 固体火箭技术,2007,30(6):470-473.

YE D Y. Some technological problems of solid rocket ramjet[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2007, 30(6):470-473.

[3] 张全,单睿子,刘乐卿,等. 一种先进的固体火箭冲压发动机堵盖设计[J]. 现代防御技术,2008,36(2):25-29.

ZHANG Q, SHAN R Z, LIU L Q, et al. Design of an advanced port cover for solid rocket-ramjet engine[J]. Modern Defence Technology, 2008, 36(2):25-29.

[4] 何德胜,李广武,杨威,等. 固冲发动机三工况转级试验气流转换装置设计[J]. 固体火箭技术,2012,35(3):419-422.

HE D S, LI G W, YANG W, et al. Design of air conversion device for three-operating conditions conversion test of solid-fuel ramjet[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(3):419-422.

[5] 祝逢春,徐振相,周彬,等. SCB火工品的研究与发展[J]. 爆破器材,2003,32(1):18-23.

ZHU F C, XU Z X, ZHOU B, et al. The research and development on semiconductor bridge initiator[J]. Explosive Materials, 2003, 32(1):18-23.

[6] 高滨. 航天火工技术的现状和发展[J]. 航天返回与遥感,1999,20(3):63-67,62.

GAO B. The status and development of space pyrotechnics technique[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 1999, 20(3):63-67, 62.

[7] 张爱军,朱军伟,程时兵. 一种基于DSP的半导体桥起爆电路的设计[J]. 火工品,2011(4):8-11.

ZHANG A J, ZHU J W, CHENG S B. Design on semiconductor bridge initiating circuit based on DSP[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2011(4):8-11.

[8] 张文超,张伟,徐振相,等. 半导体桥的研究进展与发展趋势[J]. 爆破器材,2009,38(2):21-24.

ZHANG W C, ZHANG W, XU Z X, et al. Progress and development on semiconductor bridge initiator[J]. Explosive Materials, 2009, 38(2):21-24.

[9] 黄少波,沈欣,李秋菊. 空空导弹发动机点火系统安全性设计[J]. 航空兵器,2008(1):26-30.

HUANG S B, SHEN X, LI Q J. Safety design for the ignition system of air-to-air missile[J]. Aero Weaponry, 2008(1):26-30.