航天火工品爆炸引起的电磁干扰测量

曹景阳 谢树果 苏东林 麻智超

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 通过地面模拟试验测量了火箭分离时火工品的爆炸产生的电磁辐射. 通过杆天线和实时频谱仪测量了不同种类的航天火工品的爆炸辐射,表明辐射随着爆炸能量的增加而增强. 使用聚能炸药索时,在爆炸分离后的数十毫秒内都会有明显的电磁脉冲出现,其频率主要集中在兆赫兹量级,在单个频点上的电场峰值可达数个 V/m. 使用偶极子天线对爆炸时舱体内外的电磁环境进行了对比,并对舱内线路上的感应电流脉冲进行了测量,得到了一些初步结论. 试验结果可为舱内电子设备的抗干扰设计提供参考.

关 键 词: 化学爆炸; 火工品; 电磁脉冲; 电磁干扰; 级间分离

中图分类号: TM 154

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1384-04

Electromagnetic interference caused by aerospace explosives

Cao Jingyang Xie Shuguo Su Donglin Ma Zhichao

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Simulative experiments on the ground were carried out to measure the radiation by chemical explosion of aerospace explosives in stage separation and evaluate the impaction on the electronics in the rocket. Electromagnetic pulses by different explosives were captured by a rod antenna and measured by a real time analyzer. The results show that radiation increases as the energy of the explosion. When using a mild linear shaped charge, considerable pulses were recorded in dozens of milliseconds after the separation, with the frequencies around megahertz and magnitude about several V/m on single frequency. Electromagnetic environment inside and outside the rocket were recorded and compared by simple dipoles, and current pulses induced on the circuits inside the rocket were also measured. The conclusion could direct the anti-interference design on the inner electronics of launch vehicle.

Key words: chemical explosion; explosive; electromagnetic pulse; electromagnetic interference; stage separation

爆炸螺栓和聚能炸药索等火工品在航天领域应用十分广泛,如多级火箭的级间分离、整流罩的打开等[1]. 其中,爆炸螺栓属于多点连接型分离装置,每个爆炸螺栓内部装有炸药和点火器. 分离时点火器接收到起爆信号后引爆炸药,将螺栓炸断从而完成分离. 聚能炸药索是一种条带型的分离装置,以环形安装在火箭的级间段,工作时由点火控制器发出分离信号,触发聚能炸药索从起爆点(一般有两个)起爆,并沿炸药索同时向两个方向爆炸和燃烧,将级间段割断实现分离. 分离过程中的火工品的爆炸属于化学爆炸,在这一过程中除了震动和冲击之外还会伴随着电磁脉冲辐射现象,而瞬态的电磁脉冲有可能会对分离面附近的电子设备造成干扰,影响其正常工作,甚至对火箭的飞行安全构成威胁. 2009 年,戴晴等使用 150 g 的铝镁工质炸药进行测试,其爆炸所产生的宽带

收稿日期: 2010-07-12; **网络出版时间**: 2011-11-23 15:06; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111123.1506.005

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111123.1506.005.html

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB731800); 国家自然科学基金资助项目(60831001,F010610)

作者简介: 曹景阳(1983 -),男,山东邹城人,博士生,caojingyang@ee.buaa.edu.cn.

电磁辐射使 5 m 外的计算机死机[2].

普通的化学爆炸和核爆炸一样能够产生电磁脉冲,这一现象自上世纪 50 年代已被发现[3-4],但由于试验成本和难度很高,布置复杂,结果的重复性差,在随后的几十年里只有少量的试验研究公布[5-7]. 测量表明,不同类型的化学爆炸产生的电磁脉冲频谱非常宽,从赫兹量级至吉赫兹量级都有报道;另一方面,辐射的幅度变化范围也很大,从 10^{-4} V/m 到 10^{2} V/m 不等. 脉冲的波形和幅度受到诸多因素的影响,炸药的组成成分、封装形式、壳体外形、安装方式,以及周围环境和使用的天线等都会影响测量的结果. 由于化学爆炸的复杂性,目前对其产生电磁脉冲的机制还只是提出了一些原理性的解释,没有形成完整的普遍适用的理论模型[8-9],因此试验测量仍是此类研究的重要手段.

以往的化学爆炸的测量对象都是球形或柱形爆炸物(如炮弹等),爆炸过程是瞬间完成的,时间可以忽略不计. 而聚能炸药索与之不同,其结构细长,传爆需要一定的时间;聚能效应又使得爆炸具有很强的方向性,这些因素都会对其辐射的电磁脉冲的特征产生重要影响. 为了分析和评估火箭在级间分离过程中聚能炸药索爆炸产生的电磁脉冲及其对舱内电磁环境的影响,进行了一系列地面模拟试验研究.

1　测量方案

为了获得足够多的数据以提高测量结果的准确性,同时降低试验成本,分阶段设计实施了两次地面模拟试验:第 1 次使用多个模拟件,第 2 次使用实际箭舱.

第 1 次模拟试验的布置框图如图 1 所示. 为了尽可能地模拟级间分离的真实情形,使用了与火箭同等尺寸的金属圆筒作为模拟件. 圆筒的直径为 1.5 m,每两个为一组,分别模拟火箭的初级和次级;聚能炸药索环绕布置在两筒之间的连接部的内壁上. 模拟件纵向吊起至下端面离地面1 m 高度. 由于最关心的是舱体内部的场强,因此将无源拉杆天线布置在模拟件内部的轴线上,并通过同轴电缆与实时频谱仪相连,以记录分离过程中产生的电磁脉冲. 实时频谱仪是一种能够在时域和频域同时进行测量的仪器,可以准确地捕捉和记录频谱的变化.

为了评估电磁干扰对舱内设备的影响,在模拟件的次级中还设计安装了一个由电阻和导线构成的简单回路,并使用电流探头和示波器监测回路中的感应电流脉冲. 电流探头卡在模拟回路的导线上,试验时能够将回路中感应出的电流转化成电压信号并通过示波器显示. 实时频谱仪和示波器的触发信号由点火控制器的点火信号提供.

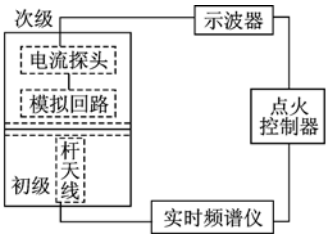


图 1　模拟件测量布置图

第 2 次的实际箭舱测量进行了一次,布置框图如图 2 所示. 箭舱仍竖直吊起至距地面 1 m 的高度,聚能炸药索布置在箭舱的级间段. 试验中,为了对比舱体内外的脉冲辐射情况,增加了两个偶极子天线,其中一个贴附于次级舱段的内壁上(和舱壁绝缘),另一个布置在距舱体外壁 5 m 远处. 两个偶极子天线接收到的信号通过示波器记录. 由于实际舱体内布置了设备,受空间限制,棒天线布置在距舱体外壁 10 m 远处,仍通过实时频谱仪进行记录. 电流探头则卡在了舱内电子设备的一组互联线上.

试验地点选在野外空旷处,以尽量避免环境中的电磁信号的影响. 此外,爆炸试验有很强的震动和冲击,为了确保试验仪器的安全,还采取了多种减震和加固措施,并按照规定的安全距离布置仪器.

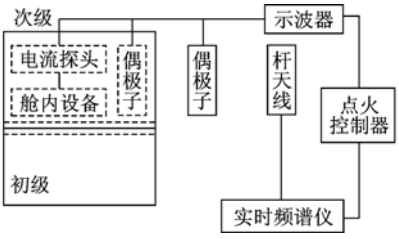


图 2　箭舱测量布置图

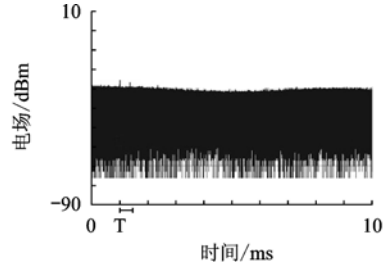
2　测量结果

2.1　各种火工品的电磁脉冲辐射

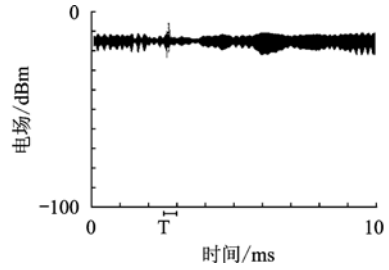
为了进行预估和对比,在圆筒模拟试验之前首先对火箭分离中常用的火工品分别进行了多批次的爆炸试验,包括保险管、起爆器、爆炸螺栓和聚能炸药索. 每一种火工品都进行了多次测量,以尽量避免偶然因素的影响. 前 3 种火工品爆炸时场强随时间变化的测量结果见图 3. 图中横轴下面的 T 型标记为触发位置,其中保险管的试验中设在 10% 处(即触发前记录 1 ms,触发后记录 9 ms);爆炸螺栓和起爆器的试验中触发位置设为

25%. 纵轴为电场强度(尚未经天线因子修正).

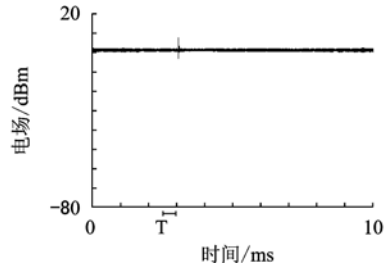
从图中各火工品爆炸时的电磁脉冲的对比可以看出,保险管和起爆器的能量最小,辐射的脉冲也比较弱,基本只存在于爆炸的瞬间;爆炸螺栓的脉冲辐射较明显,但比较单一. 另外,聚能炸药索爆炸时产生的辐射则非常明显,并且数量很多. 这说明随着爆炸的能量的增加,产生的电磁脉冲的幅度也明显的增强.



a 保险管(触发时刻可以看出有很小的脉冲出现)



b 起爆器(触发时刻附近有脉冲出现)



c 爆炸螺栓(触发后 0.5 ms 处有明显脉冲)

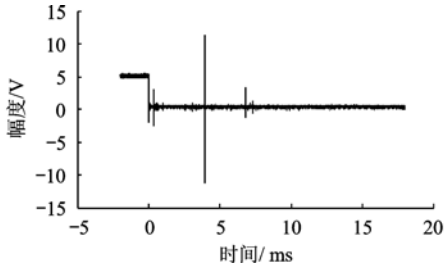
图 3 火工品爆炸时场强随时间变化的测量结果

聚能炸药索爆炸燃烧时,辐射出的脉冲数量很多,但这些脉冲并不是连续的,而是分布在长达几个毫秒的时间范围内. 在第 2 次测量中,记录了更长的时间(50 ms),结果发现在 35 ms 的时间范围内都能观察到明显的电磁脉冲. 虽然爆炸和切割的过程在 1 ~ 2 ms 内即可完成,但爆炸完成后的较长时间内仍有明显的脉冲出现. 这表明分离的过程中电磁辐射的持续时间比爆炸持续的时间要长很多. 另外,每个脉冲的持续时间很短,一般在数十个微秒左右;从频域来看,电磁脉冲的频率主要集中在兆赫兹量级. 对一些典型频点进行了计算分析,发现其场强接近 1 V/m,个别频点可至 4 V/m.

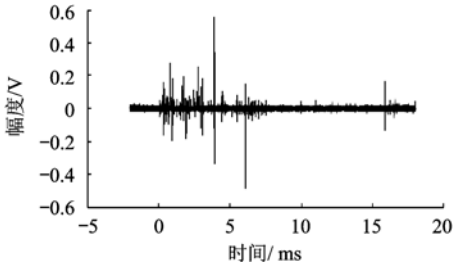
通过将两次地面模拟试验中所记录的场强较大值的频点分布进行比较发现,虽然两次试验的地点不同,但在场强幅度上比较一致,频点分布范围也大致相同,两次试验的一致性较好. 通过实时频谱仪的频谱变化图看出,在电磁脉冲出现的时刻,对应的频谱在数兆赫兹范围内都有整体的抬升,但是峰值特性并不明显,这说明分离过程中产生的电磁脉冲的频谱呈现宽带特性,没有固定的峰值频率. 另外,脉冲信号首次出现的时间与触发时刻相比都有一定的延迟,从 150 ~ 600 μs 不等.

2.2 舱体内外电磁环境的对比

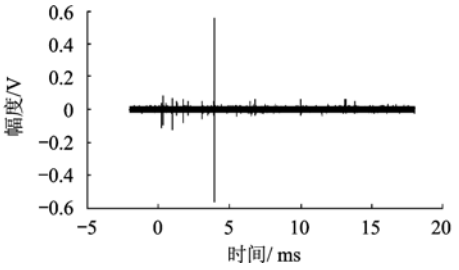
在第 2 次地面模拟试验中,为了对比舱内外的电磁环境,使用自制的偶极子天线在舱体内外同时进行了测量,由示波器上测得的时域波形如图 4.



a 触发通路波形



b 内偶极子波形



c 外偶极子波形

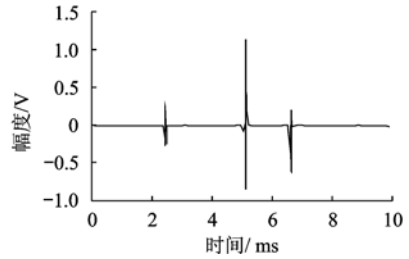
图 4 示波器记录的时域波型

这里给出了点火器的触发信号以作参照. 对比内外偶极子的波形图可以看出,内偶极子接收到的信号要明显多于和强于外偶极子. 这一方面是由于内偶极子更靠近爆炸分离面,能接收到相对较弱的辐射信号;另一方面,爆炸产生的电磁脉冲在相对狭小的金属圆筒的腔内会形成多次反射,反射的电磁脉冲也会被内偶极子接收. 进一步比较内外偶极子波形上出现脉冲信号的时刻发

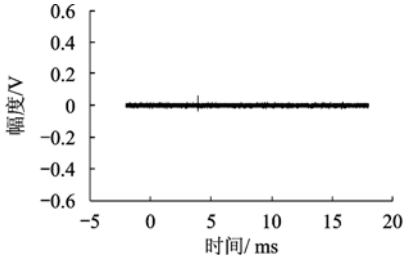
现,在外偶极子波形出现脉冲时,内偶极子也都接收到了明显的电磁脉冲. 这表明二者接收到的信号在时间上是相关的. 从脉冲统计的对比可知,二者在相近时刻接收到的电磁脉冲的幅度相差并不大. 考虑到两个偶极子之间有 5 m 的距离,脉冲的衰减并不显著. 内偶极子在前面几毫秒内接收到的许多小脉冲,而对应时刻外偶极子并没有接收到,由此也可推测,这些小的脉冲可能只是金属圆筒内壁反射的结果.

2.3　脉冲辐射对舱内设备的影响

通过地面模拟分离试验对化学爆炸过程中的电磁脉冲辐射有了大致了解,还需要进一步考察这种电磁脉冲对舱内电子设备的耦合能力,判断其是否会对舱内设备构成干扰. 虽然爆炸测得的单个频点的场强值在零点几至几伏每米之间,对已经通过电磁兼容试验的舱内设备来说并不严酷,但是考虑到脉冲辐射的宽带性,其包含的总能量并不低,应对电磁脉冲的耦合效应做一评估. 试验中使用电流探头对感应电流脉冲进行了测量,其中第 1 次测量时将电流探头卡在模拟回路的导线上,第 2 次测量时卡在舱内某设备的 6 组对绞屏蔽线上,两次试验的结果如图 5 所示(尚未经转移阻抗修正,单位为 V).



a　模拟回路上的感应电流



b　双绞线上的感应电流

图 5　两次试验结果

从图 5 可以看出,模拟回路中有很明显的感应电流脉冲,与之对比的是,在双绞线中只有一个很小的电流尖峰. 这是因为双绞线具有一定的屏蔽作用,可以较好地抑制空间中的电磁脉冲. 对模拟回路中的峰值电流进行了估算,估算的具体做法是:先对示波器记录的电压波形中尖峰附近的时域数据进行 FFT(Fast Fourier Transform)得到其频谱,然后按电流探头的转移阻抗(dBΩ)进行修正得到电流频谱,最后再进行逆 FFT 得到电流尖峰的值. 这一方法存在着一定的误差,但仍可供参考. 经过计算,在模拟回路中感应电流的尖峰可达 0.2 ~0.6 A,这一幅度对电路板上的走线而言是相当可观的.

3　聚能炸药索电磁辐射的特点

一般认为,化学爆炸产生电磁脉冲是因为不同状态的爆炸产物(气态的和固态的)在飞散过程中相互摩擦带上了异种电荷,同时爆炸产物之间的距离随运动状态的变化而发生改变,从而形成了变化的电偶极子的缘故[3]. 与文献中记录的一般炸药的化学爆炸的试验结果相比,聚能炸药索的电磁辐射与一般的炸药或炮弹不同,有一些显著的特点. 聚能炸药索作为一种线状爆炸物,其炸药的爆炸燃烧是一个持续的过程,从点燃到完成切割需要 1 ~2 ms 左右的时间,在已经完成爆炸的部分爆炸产物开始运动和辐射的时候,余下部分的爆炸和燃烧还在持续进行,因此导致辐射的脉冲数目非常多,并且呈现出分散的特点;而普通的化学爆炸的辐射的脉冲则比较单一. 同时,由于爆炸的持续性,以及装药的不均匀性和测量位置的影响,其辐射出的脉冲的幅度也不会像一般化爆的辐射那样明显呈现出随时间衰减的规律,后出现的脉冲幅度甚至超出前面的脉冲. 另外,爆炸产物在运动的过程中还对金属舱壁产生了切割,切割过程中的火花放电和金属碎屑会大大增强电磁脉冲的幅度,对脉冲波形也会产生重要的影响.

4　结　论

通过本次地面模拟试验可得到以下结论:①聚能炸药索爆炸时产生的电磁辐射是多脉冲、宽带性质的,脉宽多在数十微秒,频率分布在数兆赫兹以下;②与爆炸相比,脉冲辐射有数百微秒的延迟,且爆炸完成后还会持续较长的时间;③脉冲辐射的能量随爆炸的能量增加而增加,在单个频点上的场强值可达零点几至几伏每米;④爆炸产生的电磁脉冲能够在未采取屏蔽措施的舱内电子设备中感应出较高的瞬态电流,对设备的正常工作造成干扰. 由于爆炸试验本身不确定性和数据分析的复杂性,所得结论还只是初步的,对电磁脉冲与炸药索诸参数之间的关系还有待进一步研究讨论.

(下转第 1394 页)

模型误差具有一定的鲁棒性,即使存在模型误差,仍以高精度估计姿态. 在不同的滤波周期下,NPDF 对姿态的估计精度均优于 DD2;②传感器精度不同时,姿态的估计精度主要取决于星敏感器精度,而角速度的估计精度主要取决于陀螺精度. NPDF 可以推广应用于其他具有模型不确定的非线性系统的状态估计.

参考文献(References)

[1] Nφrgaard M, Poulsen N K, Ravn O. New developments in state estimation for nonlinear system[J]. Automatica, 2000, 36(11): 1627 - 1638

[2] Gelb A. Applied optimal estimation[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1975: ch. 6

[3] 李骥. 非线性预测滤波及其在卫星姿态控制系统中的应用[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2006
Li Ji. Nonlinear predictive filter theory and its application to the attitude control system of satellites[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006(in Chinese)

[4] Lu P. Optimal predictive control of continuous nonlinear systems [J]. INT J Control, 1995, 62(3): 633 - 649

[5] Crassidis J L, Markley F L. Predictive filtering for nonlinear systems[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1997, 20(3): 566 - 572

[6] 郁丰,刘建业,熊智. 预测滤波算法在微小卫星姿态确定中的应用[J]. 宇航学报,2008,29(1):110 - 114
Yu Feng, Liu Jianye, Xiong Zhi. Application of predictive filter in satellite attitude determination [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 110 - 114(in Chinese)

[7] 冀红霞,杨静. 基于非线性预测滤波的卫星姿态确定[J]. 系统仿真学报,2010,22(S1):34 - 42
Ji Hongxia, Yang Jing. Satellite attitude determination based on nonlinear predictive filter [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(S1): 34 - 38(in Chinese)

[8] 杨静,张洪钺,李骥. 预测滤波在惯导非线性对准中的应用[J]. 中国惯性技术学报,2003,11(6):44 - 52
Yang Jing, Zhang Hongyue, Li Ji. Application of the predictive filter on the nonlinear alignment of inertial navigation system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2003, 11(6): 44 - 52(in Chinese)

[9] 宫晓琳,房建成. 基于预测滤波的捷联惯导任意双位置对准方法[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(5):533 - 536
Gong Xiaolin, Fang Jiancheng. Method of any two position alignment based on predictive filter for SINS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 533 - 536(in Chinese)

[10] 林玉荣,邓正隆. 二阶插值非线性滤波在卫星姿态确定中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(3):343 - 347
Lin Yurong, Deng Zhenglong. Study of second-order nonlinear interpolation filtering for satellite attitude determination [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(3): 343 - 347(in Chinese)

[11] 柴霖,袁建平,罗建军,等. 非线性估计理论的最新进展[J]. 宇航学报,2005,26(3) 380 - 384
Chai Lin, Yuan Jianping, Luo Jianjun, et al. New developments in nonlinear systems estimation [J]. Journal of Astronautic, 2005, 26(3): 380 - 384(in Chinese)

(编 辑:刘登敏)

(上接第 1387 页)

参考文献(References)

[1] 梅群. 低能量导爆索关键技术及应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学力学和机械工程系,2007
Mei Qun. Study on key technology and application of low energy detonating fuses [D]. Hefei: Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, 2007 (in Chinese)

[2] 戴晴,李传胪,陈国强,等. 低温等离子体激励宽带电磁波信号的实验研究[J]. 电子信息对抗技术,2009,24(5):72 - 74
Dai Qing, Li Chuanlu, Chen Guoqiang, et al. Experimental study of wideband electromagnetic radiation from plasma cloud [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2009, 24(5): 72 - 74 (in Chinese)

[3] Kolsky H. Electromagnetic waves emitted on detonation of explosives[J]. Nature, 1954, 173: 77

[4] Takakura T. Radio noise radiated on the detonation of explosive [J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 1955, 7(4): 210 - 220

[5] 戴晴,何建国,王尚武,等. 等离子体云团宽带电磁辐射源的实验研究[J]. 强激光与粒子束,2010,22(6):1399 - 1403
Dai Qing, He Jianguo, Wang Shangwu, et al. Experimental study of wideband electromagnetic radiation from plasma cloud [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(6): 1399 - 1403(in Chinese)

[6] Fine J E, Vinci S J. Causes of electromagnetic radiation from detonation of conventional explosives: a literature survey[R]. ARL-TR-1690, 1998

[7] 陈生玉,孙新利,钱世平,等. 化爆引起的电磁辐射[J]. 爆炸与冲击,1997,17(4):363 - 368
Chen Shengyu, Sun Xinli, Qian Shiping, et al. Electromagnetic radiation caused by chemical explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(4): 363 - 368 (in Chinese)

[8] Fine J E. Estimates of the electromagnetic radiation from detonation of conventional explosives[R]. ARL-TR-2447, 2001

[9] Erokhin M A, Kondrat'ev A A, Litvinenko I V, et al. Generation of electric fields by dust grains during the explosions of condensed explosive charges in air[J]. Technical Physics, 2002, 47(1): 121 - 124

(编 辑:娄 嘉)