

# 爆磁压缩发生器延时控制系统的分析与改进\*

刘建平,孟志鹏,曹胜光,李 达

(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要** 延时控制系统是保证爆磁压缩发生器运行的关键部件,介绍了传统平板型开关延时控制系统的工作机制,分析了其优缺点。在此基础上,通过理论和实验研究,对平板型开关延时控制系统进行了改进,采用固化的同轴式导爆索接通开关,提出了一种符合爆磁压缩发生器工作要求的同轴型开关延时控制系统,测量了导爆索的爆速和固化开关的导通时间,并在爆磁压缩实验中对该延时控制系统的性能进行了验证。

**关键词** 爆磁压缩发生器;延时控制系统;平板型开关;固化同轴型开关;导爆索

**中图分类号** :TD238 **文献标识码** :A

## Analysis and Improvement of Timing Control System of Magnetic Flux Compression Generator

LIU Jian-ping, MENG Zhi-peng, CAO Sheng-guang, LI Da

(College of Photo-electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Timing control system is the important element for Magnetic Flux Compression Generator (MFCG)'s operation. This paper introduced the operating principle of classical timing control system using flat switch along with an analysis of its merits and drawbacks. Then it improved the classical timing control system by means of theoretic and experimental study, and designed a kind of timing control system, which used primacord and solidified coaxial switch. Furthermore, the explosive velocity of primacord and opening time of solidified switch were measured. Finally, the system in the experiment of MFCG was verified.

**Key words** MFCG; timing control system; flat switch; solidified coaxial switch; primacord

爆磁压缩发生器(MFCG)是一种基于磁场冻结效应,利用炸药爆炸压缩磁通,从而将炸药的部分化学能转化为电磁能的一种高能量、大功率的装置,其工作过程是:利用初始能源系统的储能电容器对MFCG的线圈放电,当电流达到最大值时,装置俘获的磁通最大,MFCG开始运行,压缩磁通,使回路中电流和能量得以放大。从MFCG的工作过程可以看出,需要一个简单有效的延时控制系统来控制储能电容器的放电开关和MFCG的主炸药的起爆时间,以实现放电电流达到最大值时间与装置运行时间的同步。

## 1 延时控制系统

### 1.1 延时方案选择

延时控制是MFCG的关键技术之一,在本研究室目前使用的储能电容器放电时间条件下,要满足MFCG实验的技术要求,延时误差控制在 $20\mu\text{s}$ 内为宜。要实现爆轰延时控制,目前主要有以下几种方案:火药延时、电路控制延时、导爆管延时、导爆索延时等。

(1)火药延时是利用压制成型具有一定密度和燃烧速度的黑火药柱或药盘来实现,药柱经过一定时间的燃烧后,再点燃雷管引爆,但目前采用的微秒延期药柱主要有两种,一种是延期时间为 $300\sim 600\mu\text{s}$ ,另一种是延期时间为 $600\sim 1000\mu\text{s}$ <sup>[1]</sup>,它们的延时精度都在 $\pm 20\%$ ,误差分析发现不能满足MFCG的延时要求,故不予采用;

(2)电路控制延时是用延时电路控制两个 $\mu\text{s}$ 雷管来分别控制放电开关和MFCG,该方案的缺点是

\* 收稿日期:2006-05-11  
基金项目:国家863计划资助项目(2005AA835051)  
作者简介:刘建平(1977—),男,讲师,硕士生。

在爆轰和强电流实验中,对电路本身的抗干扰能力要求比较高,而且市场上 $\mu\text{s}$ 雷管比较昂贵<sup>[2]</sup>;

(3)导爆管延时是利用一根内壁涂有薄层炸药粉末的空心塑料软管来传递稳定的爆轰波,导爆管的爆轰传播速度稳定性在微秒量级,但目前与之配套的导爆管雷管的作用时间的稳定性在 $\pm 0.1\text{ ms}$ 左右<sup>[3-4]</sup>,达不到MFCG所需要的延时精度;

(4)导爆索是传递爆轰波的索状传爆器材,它是以太安或黑索今(RDX)做药芯,以棉线、纸条或塑料包缠而成,导爆索的爆速很高,不低于 $6500\text{m/s}$ ,产生的能量很大,用它可以直接引爆药柱而不需要再用雷管,也不受地下杂散电流和空中雷电感应的影响,能够达到MFCG的延时要求。

基于以上分析,决定采用导爆索延时方案。

### 1.2 平板型开关延时控制系统

图1为传统的平板型开关延时控制系统原理图,开关 $k_1$ 由两块相互绝缘金属板构成,上部覆盖塑料炸药,靠炸药爆炸接通;开关 $k_2$ 是MFCG的撬断开关,在电枢内装炸药的作用下,电枢膨胀,从而接通,爆磁压缩装置俘获磁通开始运行。实验前,爆磁压缩装置不装药,并用电触发火花隙开关代替平板开关 $k_1$ ,测量电容器对爆磁压缩放电波形,从而得到“ $1/4$ ”周期即电流到达最大值的时间,由于导爆索具有相对比较稳定的爆轰速度( $\sim 7000\text{m/s}$ ),在平板开关接通时间、撬断开关接通时间和导爆索爆速事先测定的情况下,控制导爆索4和5的长度,就能实现当线圈中电流达到最大值的时候,爆磁压缩发生器开始运行。实验证明该系统运行比较可靠,其延时控制精度在 $\pm 10\mu\text{s}$ <sup>[2]</sup>。但从图1可以看出,该延时控制系统用到的部件比较多,加工安装比较麻烦,用到的炸药比较多,共使用传爆药柱三个,导爆索两根,以及塑料炸药等,安全性相对较低。

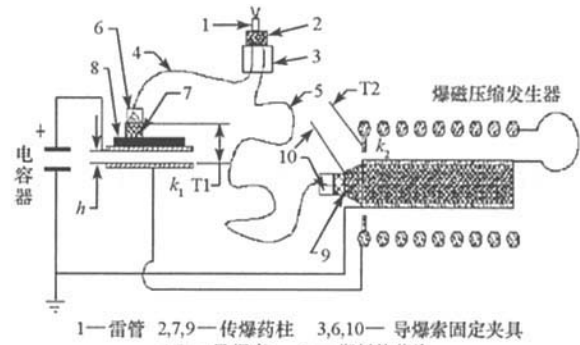


图1 平板型开关导爆索延时起爆原理图  
Fig.1 Timing control system using flat switch

## 2 延时控制系统的改进

### 2.1 理论与数值模拟

对延时控制系统的改进,主要考虑简化系统构造和提高系统工作稳定性。实验证明,雷管可以直接起爆导爆索,而导爆索的爆炸能量能够使较薄的金属管膨胀并且破坏绝缘膜,因此可以设计一种爆炸开关来控制电容给装置的充电,利用导爆索爆速比较稳定的特点,可以实现延时控制。

图2是改进后的延时控制系统原理图,图中电容器的放电开关采用同轴式导爆索接通开关,也就是用两个同轴的相互用聚乙烯膜绝缘的金属管作为电极。内筒里面穿过导爆索并跟雷管直接接触,雷管

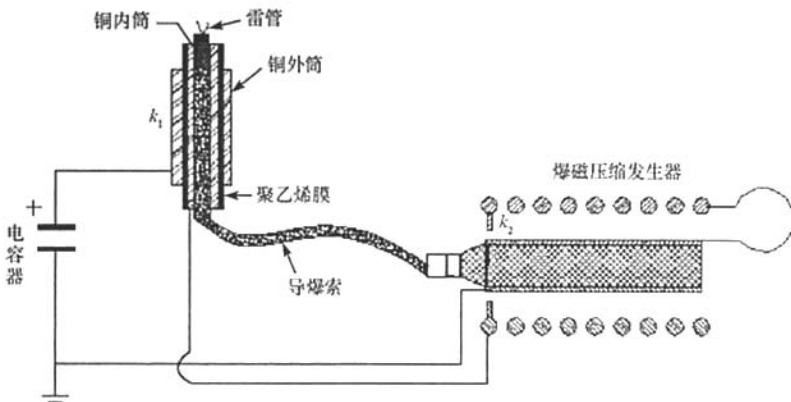


图2 同轴型开关导爆索延时起爆原理图  
Fig.2 Timing control system using coaxial switch

起爆导爆索后,内筒在导爆索爆炸作用下膨胀,破坏绝缘层,从而跟外筒接通,电容器开始放电,爆轰波沿导爆索继续传播到MFCG的主炸药前的传爆药柱,调节导爆索的长度就可以控制MFCG的起爆延时时间<sup>[2]</sup>。此系统只使用了一根导爆索,一个传爆药柱,在一定程度上减少了延时的误差,提高了系统工作的稳定性,改进后的系统较原系统也简洁得多。

### 2.1.1 爆炸开关的设计

该延时控制系统中,爆炸开关是整个系统的关键,在吸取以前工作经验的基础上,设计了一种同轴型爆炸开关,如图3所示。开关的内筒、外筒分别采用紫铜和黄铜材料,内径分别为6mm、12mm,内外筒分别长200mm、140mm,通过接线环分别与电容器和MFCG连接。爆炸开关必须承受电容器所充的电压,确保导通前不击穿,因此对开关有一定的耐压要求。以电容器最高充电电压10kV考虑,利用有限元分析软件Ansys程序对开关充电后的电场分布进行了模拟,图4为所得结果云图。从图中可以看出,内外筒之间的电场分布比较均匀且电场较大,最大场强为8394V/mm,而在内外筒交界边缘处出现不均匀分布,但电场值较内外筒之间的电场小,因此可能的击穿区域应在内外筒之间。而内外筒之间使用的绝缘膜厚0.1mm,耐压为10kV,显然能满足耐压要求。实际使用时,在内外筒之间缠绕5层绝缘膜。

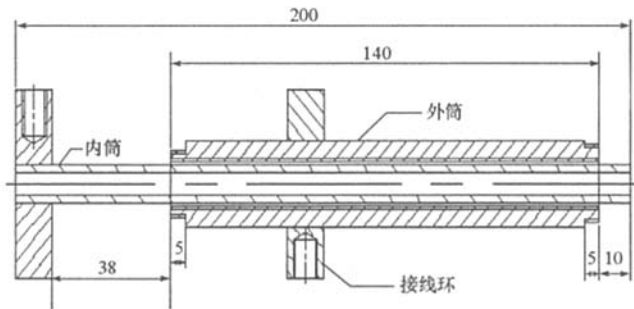


图3 爆炸开关设计图

Fig. 3 Schematic plan of solidified coaxial switch

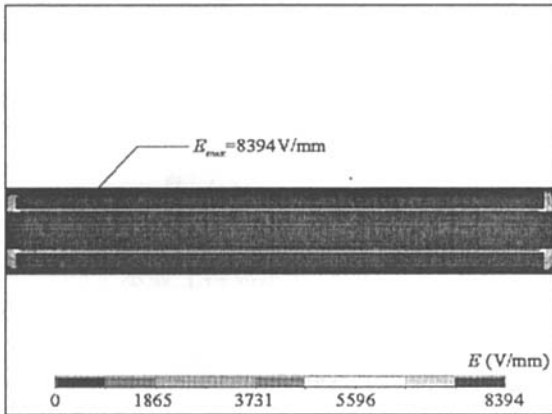


图4 固化爆炸开关电场分布云图

Fig. 4 Electric flux density vector sum of solidified coaxial switch

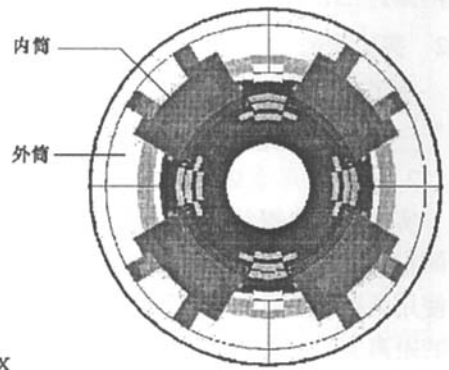


图5 爆炸开关导通状态截面图

Fig. 5 Sectional view of coaxial switch in conducting state

开关导通后,电容器通过开关对装置放电,要求开关保持稳定的接触,为此,对开关的爆炸导通过程中内外筒的应力应变用有限元分析软件LS-DYNA程序进行了模拟,内外筒选用MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_HYDRO\_SPALL作为材料模型,图5为爆轰波传过开关后的状态模拟截面图,从图中可以看出,外筒没有破散且内外筒保持着良好的接触,说明开关设计选用的材料和尺寸是符合要求的。

为了保证开关工作的稳定性,减小外界因素对开关的影响,对开关进行了固化处理,也就是用环氧树脂将整个开关密封。这样做一方面使开关的绝缘膜免受潮湿空气的影响,可以批量制作、长期存放而保证开关的性能,另一方面实验时不需要临时制作开关,方便了开关的使用,减少了实验环节,有助于MFCG实验成功。图6为制作的固化开关实物图。

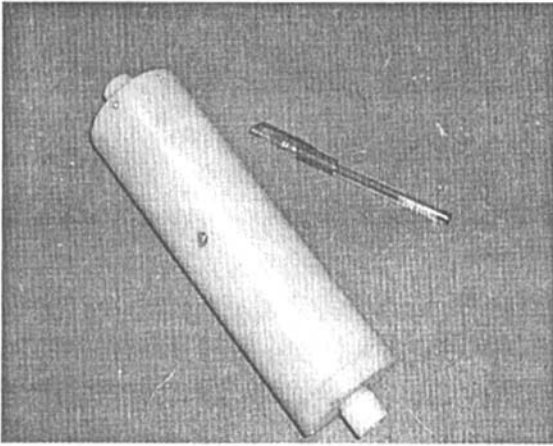


图6 固化爆炸开关实物图  
Fig.6 Solidified coaxial switch

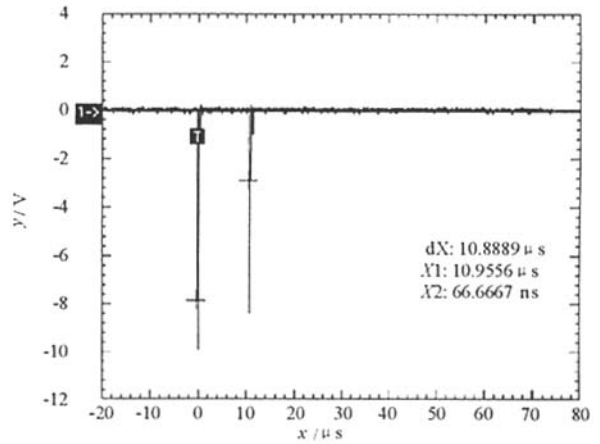


图7 导爆索爆速测量波形图  
Fig.7 Waveform of the experiment for explosive velocity of primacord

### 2.1.2 导爆索长度计算

从同轴型开关延时控制系统的工作原理可以看出,导爆索的长度选取是延时准确与否的重要环节,要确定导爆索的长度,首先要测量电容器放电的“1/4”周期,此外,还要考虑装置前端的传爆药柱的延时作用,装置中撬断开关和电枢的结构以及爆炸开关的导通时间也会对延时产生影响。下式为综合各种因素后所得的导爆索长度计算公式:

$$l = \left( t + t_1 - \frac{h}{D_1} - \frac{S}{D_2} - \frac{L}{D} - \frac{\Delta R}{V} \right) \bar{v}$$

式中,  $t$  为电容器对装置放电的“1/4”周期,  $t_1$  为爆炸开关导通时间,  $h$  为传爆药柱的长度,  $D_1$  为传爆药柱的爆速,  $S$  为平面波发生器的高度,  $D_2$  为平面波发生器的爆速,  $L$  为撬断开关上方的装药长度,  $D$  为装药爆速,  $\Delta R$  为撬断开关与电枢外壁的距离,  $V$  为电枢的膨胀速度,  $\bar{v}$  为导爆索爆速。

## 2.2 实验测试

为了测试同轴型开关延时控制系统的实际性能,检验固化爆炸开关能否满足 MFCG 实验的要求,进行了一系列实验测量,并应用该延时控制系统进行了 MFCG 实验。

### 2.2.1 导爆索爆速测量

实验采用电探针法对导爆索进行了爆速测量,待测量的导爆索外径为 5mm,内装药为太安,电探针用两根较细的漆包线相互缠绕而成,相互绝缘,在爆轰作用下,就会导通,在示波器上显示窄的脉冲。实验使用两探针进行测量,通过测量两探针先后导通的时间,就能测知探针间爆轰波传播的时间。探针之间的距离实验前测定为 73mm,图 7 为实验所得波形图,可得两探针导通时间差为 10.89  $\mu\text{s}$ ,进而可得待测导爆索的爆速约为 6710m/s。

### 2.2.2 固化爆炸开关导通时间测量

爆炸开关是靠内筒的膨胀破坏绝缘层而与外筒接通,其导通时间对系统的延时会产生影响,因此在使用此延时控制系统前,有必要对开关导通时间进行测量,为导爆索长度的选取提供依据,实验的测量电路如图 8 所示。

图中  $C_0$  为充电电容,  $L$  为 MFCG,电探针放置在导爆索 A 点,从 A 点到开关前端 B 点的导爆索长度为 233mm。实验时先是电探针被导通,  $C_1$  通过  $R_1$  放电,在示波器上显示放电波形,然后开关导通,  $C_0$  放电,用示波器记录放电波形,从记录的前后放电的时间差及导爆索的爆速,可得到开关的导通时间。图 9 为实验所得波形图,其中波形 1 为电探针导通后所得的窄脉冲图,图中 A 点为电探针导通时刻,波形 2 为开关导通后  $C_0$  放电波形图, B 点为  $C_0$  开始放电时刻。由图可得从电探针导通到  $C_0$  开始放电的时间为 41.1  $\mu\text{s}$ ,根据测得的导爆索爆速,开关导通时间为:

$$t = 41.1 - \frac{233 \times 10^3}{6710} \approx 6.4 \mu s$$

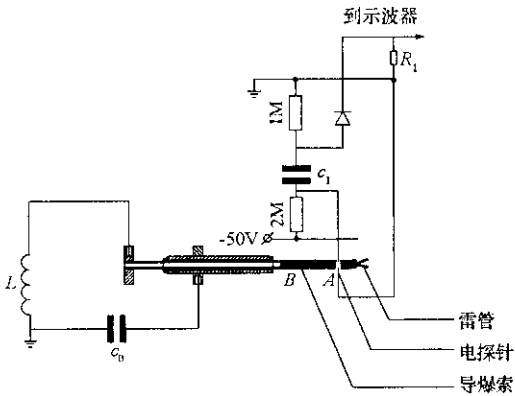


图 8 开关导通时间测量电路

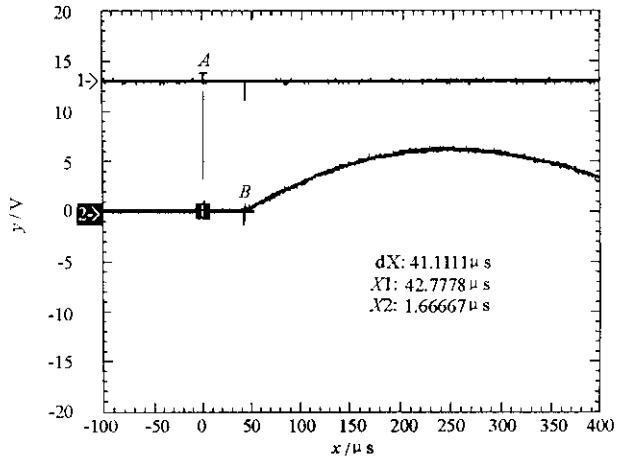


图 9 开关导通时间测量波形图

Fig. 8 Circuit diagram of the opening time of the switch

Fig. 9 Waveform of the opening time of the switch

### 2.2.3 爆磁压缩实验

应用同轴型开关延时控制系统进行了 MFCG 实验, 图 10 是测量电容器对 MFCG 放电的“1/4”周期实验所得的波形图, 可得“1/4”周期为  $139 \mu s$ , 根据导爆索长度计算公式, 实验时选取导爆索长度为  $1 m$ 。图 11 是 MFCG 实验所得波形图, 图中波形为电容器放电电流波形, 在 A 点所示时刻固化开关导通, 电容器开始向 MFCG 放电, B 点时刻放电电流达到最大值, C 点时刻 MFCG 开始运行, 从图中可以看出, B、C 之间的时间间隔为  $15 \mu s$ , 延时误差  $\sim 10\%$ , 符合 MFCG 实验的精度要求, 较好地实现了延时控制。

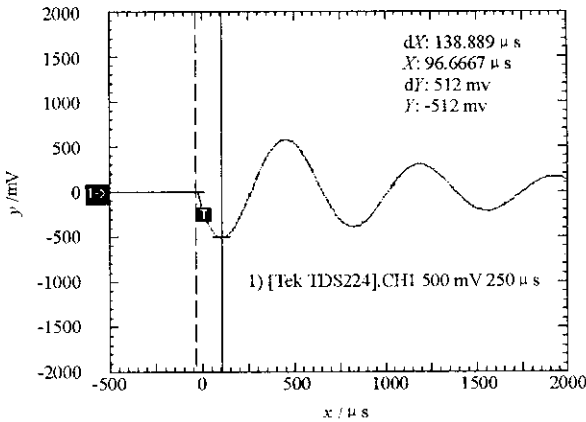


图 10 电容器放电“1/4”周期实验波形图

Fig. 10 Waveform of “1/4” cycle of the capacitor current

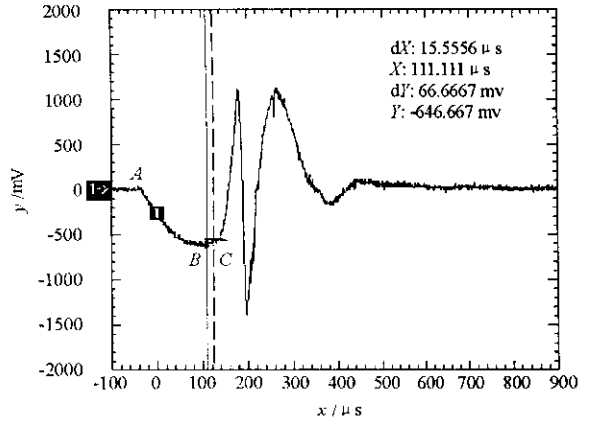


图 11 爆磁压缩实验电容器放电波形图

Fig. 11 Waveform of capacitor current in the MFCG experiment

## 3 结束语

同轴式导通开关的研制, 减少了爆炸开关的炸药量, 使同轴型开关延时控制系统较传统的平板型开关延时控制系统具有结构更简洁, 性能更稳定, 使用更安全的特点, 对爆炸开关进行固化处理后, 使开关的批量制作和长期存放得以实现, 方便了开关的使用。从实验结果看, 使用同轴式固化爆炸导通开关的延时控制系统满足 MFCG 实验的要求。

表2 多预测器与单预测器压缩效果比较(压缩后,比特/像素)

Tab.2 The comparison between single and multi predictors (bpp after compression)

	AVIRIS		OMIS-I					PHI
	Cuprite	Moffett	River9	Desert1-1	Sand2	Sea2	L2rec	WSJ
单预测器	5.08	5.21	5.93	5.59	5.43	6.13	5.61	5.46
多预测器	4.96	5.14	5.82	5.50	5.33	6.01	5.55	5.33

## 4 结论与讨论

本文结合高光谱数据的空间相关性、谱间统计相关性与结构相关性特点,提出了一种预测器方向可选的高光谱数据无损压缩框架。采用单波段预测流程时,多预测器结构可以显著提高压缩率。采用多波段预测流程时,由于接受了统计训练的预测系数,多预测器结构的优越性受到抑制,但相比于单方向预测,仍然可以取得明显效果。

基于以上结果,本文所提压缩方案可在以下几个方面进一步研究(1)行之有效的聚类方法,离线聚类的可实施性与鲁棒性(2)在多波段条件下,不使用聚类,采用自适应预测系数的可能性。

## 参考文献:

- [1] 吴昊, 郝文贤, 匡纲要. 一种基于混合概率 PCA 模型的高光谱图像非监督分类方法[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(2): 61-64.
- [2] Aiazzi B, Alpa P, et al. Lossless Compression of Multi/Hyper-spectral Imagery Based on a 3-D Fuzzy Prediction[J]. IEEE Transactions on Geosci. and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2287-2294.
- [3] 毋立芳, 沈兰荪, 张晓玲. 基于三维上下文预测的遥感图像无损压缩[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6(11): 1107-1110.
- [4] 冯燕, 何明一, 贾应彪. 基于整数小波变换的机载多光谱图像无损压缩[J]. 计算机工程与应用, 2003(36): 55-57.
- [5] Hsieh S H. A Fast Adaptive Lifting Method for Lossless Hyperspectral Data Compression[C]//Applications of Digital Image Processing XXVII Processing of SPIE, SPIE Bellingham, WA, 2004, 5558: 664-675.
- [6] 张晓玲, 沈兰荪, 张培强. 基于三维自适应预测的高光谱图像无损压缩算法[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 957-959.
- [7] Mielikainen J, Toivanen P. Clustered DPCM for the Lossless Compression of Hyperspectral Images[J]. IEEE Transactions on Geosci. Remote Sensing, 2003, 41(12): 2943-2946.
- [8] 孙蕾. 高光谱图像无损压缩技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [9] 刘恒殊. 超光谱遥感图像压缩算法的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2002.

(上接第43页)

## 参考文献:

- [1] 王可, 劳光亮, 等. 微秒针刺延期药的研制[J]. 火工品, 1997(3): 12-16.
- [2] 陈冬群. 动态级联型螺线管爆磁压缩发生器研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [3] 肖绍清, 林大泽, 陈怀宇, 等. FDG-1型非电高精度毫秒雷管[J]. 火工品, 1993(1): 6-11.
- [4] 马宏萱, 姜玉琴, 焦彦玲, 等. LD-14小型桥丝史电雷管的研究[J]. 火工品, 1995(2): 14-18.

