第 26 卷第 11 期
2014 年 11 月

强 激 光 与 粒 子 束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS

Vol. 26, No. 11
Nov., 2014

炮射电磁脉冲弹实际弹道上引战配合研究*

史云雷， 张 合， 马少杰， 顾 林

（南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室，南京 210094）

摘 要： 分析了炮射电磁脉冲弹的工作原理，分两阶段描述了实际弹道上引战配合过程：阶段 1 建立了电磁脉冲弹杀伤区域模型，分析了最佳起爆点应满足条件，引入毁伤参量并通过毁伤率表征了该阶段的配合效率；阶段 2 建立了最佳起爆时序模型，分析了延时误差的产生原因，介绍了采用小偏差法计算误差散布的方法，通过种子电流与最大值接近程度表征了该阶段的配合效率。结合两阶段分析，最后得出炮射电磁脉冲弹引战配合效率的计算模型及提高配合效率的技术途径。

关键词： 炮射电磁脉冲弹； 引战配合； 起爆点； 起爆时序； 配合效率

中图分类号： TJ434； TM935 **文献标志码：** A **doi:**10.11884/HPLPB201426.115004

在电磁环境复杂多变的信息战中，利用电磁脉冲对敌方武器系统进行电子攻击或者干扰，可造成敌方指挥、通信、控制系统的瘫痪或失灵，从而赢得战场的信息主动权[1-4]。电磁脉冲弹分为核电磁脉冲弹和非核电磁脉冲弹。大力发展非核电磁脉冲武器有着重要的军事意义。非核电磁脉冲弹又称为爆磁压缩电磁脉冲弹[5-6]，其作战平台包括火炮、装甲车辆、飞机等，一般作用范围为数十 m 至数 km。国内将非核电磁脉冲弹用于炮射平台是由南京理工大学何勇等[7]提出；张合等[8]将种子电源归于引信范畴，进行常规引信和种子电源一体化设计。受弹体积限制，炮射电磁脉冲弹作用时辐射功率低，杀伤区域小，对引战配合精度和效率提出更严格的要求。传统基于破片飞散的引战配合理论不完全适合于新型的电磁脉冲弹引战配合系统。海军工程大学毛超等[9]给出弹目交会参数对电磁脉冲弹对准精度的影响，但没有具体分析弹内引信和战斗部的作用时序匹配；国防科技大学刘建平等[10-11]研究过爆磁压缩发生器的时序控制，并采用同轴型导爆索延时开关实现了时序误差为±10 μs，但没有从理论上分析最佳起爆时序。本文拟在分析炮射电磁脉冲弹工作原理的基础上，将实际弹道上引战配合过程描述为两个独立阶段，通过研究各阶段的配合效率，得到电磁脉冲弹实际弹道上引战配合效率的计算模型，并提出提高引战配合效率的技术途径。

1 引战配合原理

炮射电磁脉冲弹工作原理如图 1 所示。弹体发射后，引信后坐接电开关闭合，种子电源内部充电回路导通；引信安全与解除保险机构利用后坐力、出炮口磁信号等环境相继解除两道安全保险，双路微时差输出传爆序列同时对正，放电开关雷管和战斗部起爆雷管处于待发状态；到达目标区域前，种子电源完成弹道上充电，探

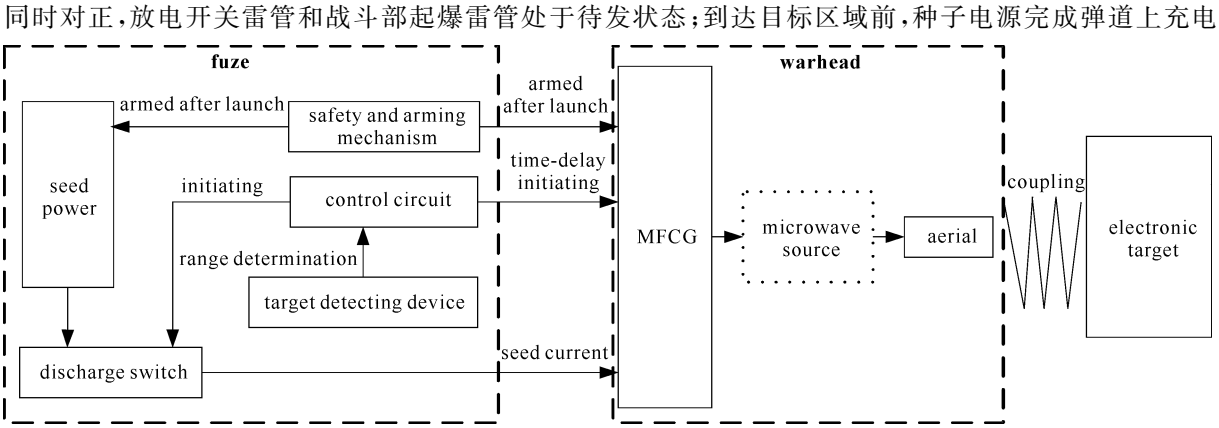


Fig. 1 Working principle of Gun-launched Electron-Magentic Pulse bomb (GEMPB)

图 1 炮射电磁脉冲弹工作原理

* **收稿日期：**2014-03-28； **修订日期：**2014-08-25
基金项目：国防装备预研基金；江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13_204)
作者简介：史云雷(1987—)，男，博士研究生，研究方向为非核电磁脉冲弹引信技术；13770562272@163.com。

测装置开始运行；目标区域内，引信确定最佳起爆高度和倾角，给控制电路发出起爆信号；控制电路首先起爆放电开关雷管，种子电源开始向战斗部提供种子电流；当种子电流接近最大值时，控制电路起爆战斗部雷管，战斗部开始运行，引信完成工作。

战斗部磁通量压缩发生器（MFCG）采用螺旋型，作用过程如图 2 所示。种子电流通过螺线管在金属套筒和线圈之间产生轴向磁场；主炸药起爆后，金属套筒在爆轰波作用下膨胀变形压缩磁场，并与螺旋线圈接触，使螺旋线圈内短路线圈数量增多，放大电流。被放大的电流经调制后，通过微波源或者直接到天线，辐射高功率电磁脉冲[12]。

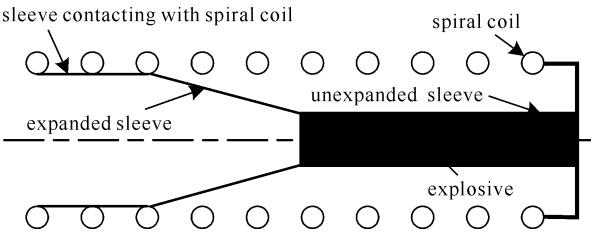


Fig. 2　Working process of magnetic flux compression generator

图 2　磁通量压缩发生器作用过程

根据上述描述将炮射电磁脉冲弹在实际弹道上的引战配合过程分为两个独立阶段：阶段 1 为弹体至杀伤区域后，引信确定最佳起爆高度和倾角，尽量实现实际起爆点与最佳起爆点吻合；阶段 2 为确认电磁脉冲攻击后，引信控制种子电源放电与战斗部 MFCG 主装药起爆时序匹配，尽量实现种子电流达最大值时，战斗部开始运行。

2　最佳起爆点

电磁脉冲弹辐射方式分为全向和定向两种。全向辐射无论目标位于辐射源哪个方向，在一定区域内都有能量耦合进入目标内部，形成电磁干扰或毁伤；炮射平台下，受体积限制，初始辐射功率较低，一般采用定向辐射，该方式辐射能量更为集中，但只有辐射方向对准目标，才能最大效率地对目标进行电磁耦合。假定炮射电磁脉冲弹选用角锥喇叭定向辐射天线，其杀伤区域模型如图 3 所示[5]，O 点为起爆点，OO' 为波束中心线，设起爆高度为 h，弹体轴线与地面倾角为 φ，天线向目标辐射波束角为 θ，在目标空间形成一个近似圆锥体的杀伤区域 V。当目标基本处于同一高度时，认为不同目标的最大高度差 Δh 远小于起爆高度 h，因此将杀伤区域 V 简化为一个杀伤面 S。由于天线辐射存在方向性，杀伤面是不规则的，可将其近似为一个椭圆，如图 3 中圆锥体的斜切面阴影部分所示。

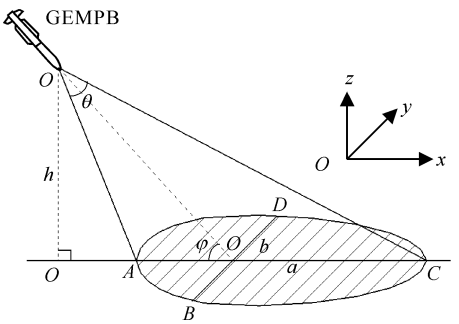


Fig. 3　Killing area of GEMPB

图 3　炮射电磁脉冲弹杀伤区域模型

引入毁伤参量 D 对电磁脉冲弹的杀伤能力进行分析

$$D=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i T_i \tag{1}$$

式中：n 为杀伤面内电子设备总数，假设目标近似均匀分布，则 n 值与杀伤面积 S 成正比；T_i 为电磁脉冲弹对第 i 个目标的毁伤程度（$0\leqslant T_i\leqslant 1$，0 表示没有任何毁伤和干扰，1 表示完全毁伤），T_i 可以用第 i 个目标处辐射场强 $E(x_i,y_i)$ 或功率密度 $q(x_i,y_i)$ 表征，取 E_i^0，q_i^0，χ_i 为第 i 个电子设备的毁伤场强阈值、功率密度阀值和电磁耦合率，则 $\chi_i E(x_i,y_i)$，$\chi_i q(x_i,y_i)$ 越接近毁伤阀值，T_i 越大，当 $\chi_i E(x_i,y_i)$，$\chi_i q(x_i,y_i)$ 等于或超过毁伤阀值时，$T_i=1$；λ_i 为第 i 个目标的个体权重（$0\leqslant\lambda_i\leqslant 1$），战场环境下若目标特征未知，可认为 $\lambda_i=1$。

为确定最佳起爆点，需分析杀伤面积 S、场强 E、功率密度 q 与电磁脉冲弹起爆高度 h、倾角 φ 和波束角 θ 的关系。定义图 3 中过 O' 点的线段 AC，BD 为杀伤面的长轴 m 与短轴 n，由几何运算可得

$$\begin{cases} m=[\cot(\varphi-\theta/2)-\cot(\varphi+\theta/2)]h \\ n=2h\tan(\theta/2)/\sin\varphi \end{cases} \tag{2}$$

取 $\theta=30°$，当 φ 为 30°，45°，60°，90°时，杀伤面积 $S=$

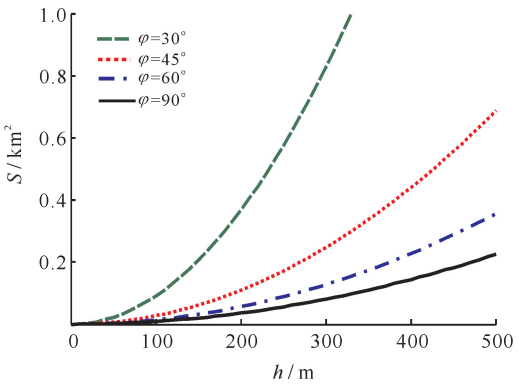


Fig. 4　Killing area at different height of burst

图 4　杀伤面积随起爆高度变化

πmn 随起爆高度 h 的变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可知 S 随 h 增加而增大，随 φ 增加而减小。实际弹道上选择最佳起爆点，当目标区域远大于电磁脉冲弹作用区域时，则要求 S 尽量大，以覆盖更多目标；当目标区域小于电磁脉冲弹作用区域时，则要求 S 尽量接近目标区域面积，以提高区域内所辐射电场强度和功率密度。

忽略电磁波在大气中的传输损耗，可得电磁脉冲弹在远场区辐射场强振幅和功率密度[13-14]

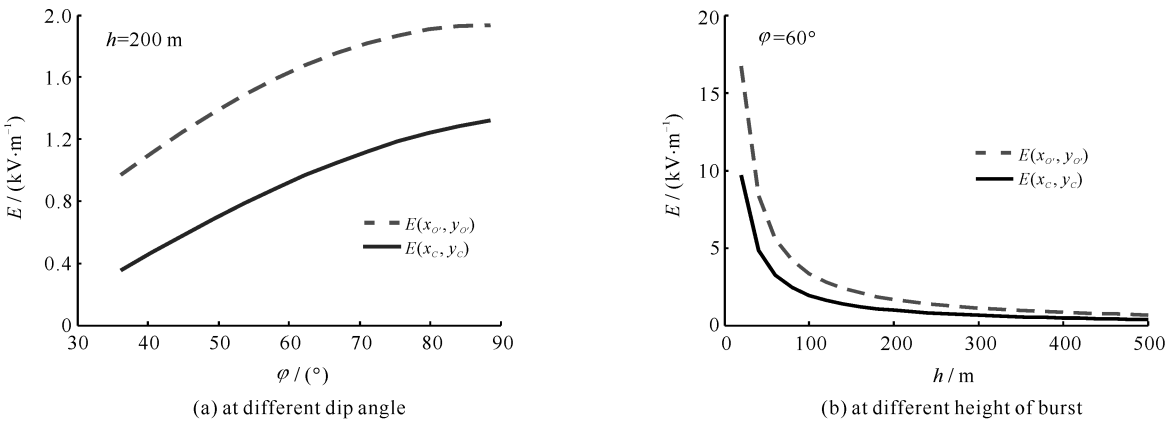
$$\begin{cases} E=(60PG)^{1/2}/R_l \\ q=PG/(4\pi R_l^2) \end{cases} \tag{3}$$

式中：P 为电磁脉冲弹初始辐射功率；G 为定向辐射天线增益；R_l 为电子设备目标到 O 点距离。取杀伤面中心 O' 和边缘上 A，B，C 四特殊点，根据空间辐射区边缘上的增益是波束中心的 1/2[15]，得

$$\begin{cases} E(x_{O'},y_{O'})=(60PG_{O'})^{1/2}/l_{OO'}=(60PG_{O'})^{1/2}\sin\varphi/h \\ E(x_A,y_A)=(60PG_A)^{1/2}/l_{OA}=(30PG_{O'})^{1/2}\sin(\varphi+\theta/2)/h \\ E(x_B,y_B)=(60PG_B)^{1/2}/l_{OB}=(30PG_{O'})^{1/2}\sin\varphi\cos(\theta/2)/h \\ E(x_C,y_C)=(60PG_C)^{1/2}/l_{OC}=(30PG_{O'})^{1/2}\sin(\varphi-\theta/2)/h \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} q(x_{O'},y_{O'})=PG_{O'}/(4\pi l_{OO'}^2)=PG_{O'}\sin^2\varphi/(4\pi h^2) \\ q(x_A,y_A)=PG_A/(4\pi l_{OA}^2)=PG_{O'}\sin^2(\varphi+\theta/2)/(8\pi h^2) \\ q(x_B,y_B)=PG_B/(4\pi l_{OB}^2)=PG_{O'}\sin^2\varphi\cos^2(\theta/2)/(8\pi h^2) \\ q(x_C,y_C)=PG_C/(4\pi l_{OC}^2)=PG_{O'}\sin^2(\varphi-\theta/2)/(8\pi h^2) \end{cases} \tag{5}$$

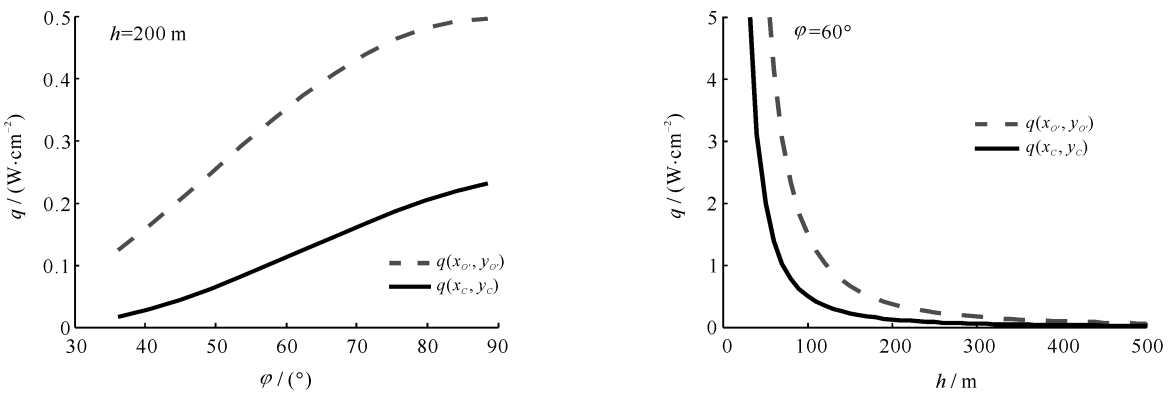
杀伤面内场强振幅和功率密度以中心点 O' 处最大，边缘点 C 处最小，据此可估算出电磁脉冲弹起爆后形成了一个场强振幅在区间$[E(x_C,y_C),\ E(x_{O'},y_{O'})]$内、功率密度在区间$[q(x_C,y_C),\ q(x_{O'},y_{O'})]$内变化的杀伤面。取 $P=0.5$ GW，$G_{O'}=5$，$\theta=30°$，不同倾角 φ 和起爆高度 h 时，O' 点和 C 点场强变化如图 5 所示，功率密度



(a) at different dip angle (b) at different height of burst

Fig. 5 Electric field intensity of points O', C at different dip angle or burst height

图 5 不同倾角和起爆高度时 O'，C 点场强变化



(a) at different dip angle (b) at different height of burst

Fig. 6 Power density of points O', C at different dip angle or burst height

图 6 不同倾角和起爆高度时 O'，C 点功率密度变化

变化如图 6 所示。由图可得杀伤面上辐射场强随着倾角的增加而变大，随着起爆高度的增加而减小，功率密度的变化趋势和场强相同。

假设电磁波进入各电子设备内部的耦合率 χ_i 相等，如果要求杀伤面上目标全部毁伤，为确保作用效果，应以边缘点 C 为参考值设定初始参数，最佳起爆点应满足

$$E(x_C,y_C)\geqslant \max(E_1^0/\chi,E_2^0/\chi,\cdots,E_i^0/\chi,\cdots)\ \text{or}\ q(x_C,y_C)\geqslant \max(q_1^0/\chi,q_2^0/\chi,\cdots,q_i^0/\chi,\cdots) \tag{6}$$

为研究引战配合效率，引入参数 ξ，令

$$\xi=D/D_{\max} \tag{7}$$

式中：$D_{\max}$表示杀伤面内所有电子设备完全毁伤，在未知目标权重情况下，其数值等于杀伤面内目标总量。参数 ξ 值反映炮射电磁脉冲弹在引战配合第一阶段实际起爆点和理想起爆点的吻合程度。

3 最佳起爆时序

为建立最佳起爆时序模型，首先分析种子电源的瞬态放电过程。种子电源储能元件为脉冲储能电容，战斗部磁通量压缩发生器等效为电阻和电感串联形式，瞬态放电回路如图 7 所示。

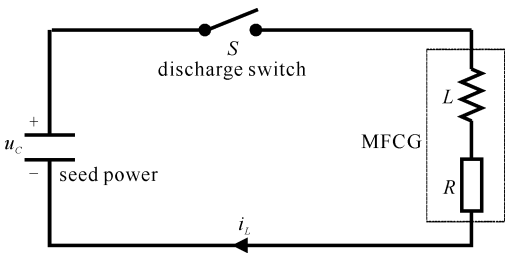


Fig. 7 Equivalent circuit of seed power transient discharging

图 7 种子电源瞬态放电回路

得到微分方程

$$\frac{\mathrm{d}^2u_C}{\mathrm{d}t^2}+\frac{R}{L}\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+\frac{1}{LC}u_C=0 \tag{8}$$

给定初始条件，可计算出种子电源放电电流波形，如图 8 中 c 线所示，放电起始至峰值时间为 $\tau_C/4$，τ_C 为放电回路的时间常数。

图 8 为电磁脉冲弹最佳起爆时序图。a 为探测装置给引信的起爆信号；b 为放电开关电雷管起爆信号；c 为种子电源放电电流信号；d 为战斗部 MFCG 电雷管起爆信号；e 为 MFCG 撬断开关闭合信号。t_0 为探测装置给引信的起爆时刻；t_1 为放电开关电雷管起爆时刻；t_2 为种子电源放电起始时刻；t_3 为 MFCG 电雷管起爆时刻；t_4 为放电电流峰值时刻及 MFCG 撬断开关闭合时刻。

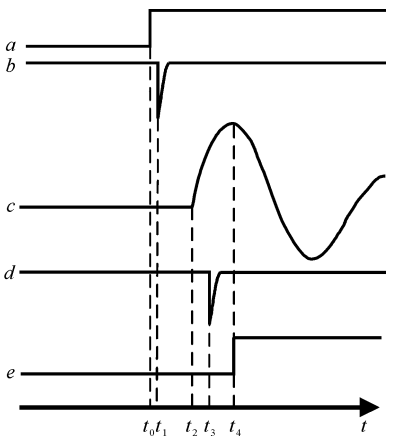


Fig. 8 Best initiation timing of GEMPB

图 8 最佳起爆时序

引信反应时间 $\tau'=t_1-t_0$，由于极短不考虑其对起爆高度 h 和倾角 φ 的影响；放电开关起爆至闭合所持续时间 $t_{bh}=t_2-t_1$；MFCG 电雷管起爆至撬断开关闭合所持续时间 $t_{\mathrm{db}}=t_4-t_3$，最佳起爆延时

$$\tau=t_3-t_1=t_{bh}+\tau_C/4-t_{\mathrm{db}} \tag{9}$$

引战配合第二阶段起爆时序控制主要要求减小其延时误差散布。导致延时误差产生的主要因素包括：脉冲储能电容容值散布、MFCG 电参数（包括电感和电阻）测量误差、电雷管作用时间散布、放电开关闭合时间误差、引信电路延时误差，以及 MFCG 装药、平面透镜、金属电枢作用时间误差等。

实际延时 τ 可用相关参变量表示为

$$\tau=\tau(C,L,R,t_{bh},t_{\mathrm{db}},t_{de}\cdots) \tag{10}$$

采用小偏差法求式(10)中任意一记为 x_i 参变量的散布 σ_{x_i} 引起的延时散布

$$\sigma_{\tau xi}=\left|\tau(x_i+\sigma_{x_i})-\tau(x_i)\right| \tag{11}$$

当变量散布比较大时，小偏差法作如下修正

$$\sigma_{\tau xi}=\sum_{j=-N}^{N-1}\left|\tau(x_i+\frac{j+1}{2N}\sigma_{x_i})-\tau(x_i+\frac{j}{2N}\sigma_{x_i})\right| \tag{12}$$

总的延时散布

$$\sigma_\tau=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sigma_{\tau xi}^2} \tag{13}$$

σ_τ 决定了种子电流 I 和最大电流 I_{max} 的接近程度。引入参数

$$\vartheta = I/I_{max} \tag{14}$$

参数 ϑ 值反映了炮射电磁脉冲弹引战配合第二阶段引信起爆时序的控制精度。算例参考：由式(8)，取 MFCG 电参数为 0.4 Ω，28 μH，电容 5 kV，50.4 μF 时放电种子电流 I_{max} 约为 5400 A，大于 5000 A 的脉宽为 13.6 μs，当延时散布 σ_τ 为 6.8 μs 时，ϑ=5000/5400=0.926。

4 引战配合效率

炮射电磁脉冲弹实际弹道上引战配合效率 η 为

$$\eta = \xi\vartheta = (D/D_{max})(I/I_{max}) \tag{15}$$

根据以上分析，提高炮射电磁脉冲弹引战配合效率的主要途径包括：(1)优化弹体气动力布局，改善飞行稳定性，并根据不同作战任务选择合适的弹道参数测量方法，提高参数测量精度。(2)提高战斗部天线的辐射增益并针对不同作战任务合理选择天线波束角，可采用弹道末段伞降式天线、尾部拖曳式天线或在条件允许下直接以弹体作为天线。(3)掌握所攻击电子目标的特性，包括目标要害部位、尺寸、分布情况、耦合途径以及加固程度等。(4)优化算法，缩短引信对弹道参数的解算时间，提高引信灵敏度，并增强引信控制电路的抗电磁干扰能力。(5)提高引信种子电源脉冲电容的储能密度，体积受限下尽量提升引信电源储能；根据瞬态放电等效电路合理选择脉冲储能电容和 MFCG 的电参数，满足 MFCG 电流增益的情况下，优化初始电流波形，降低时序匹配难度；优化放电开关、MFCG 起爆装置等关键器件设计，减小作用时间误差散布，提高时序匹配精度。

5 结 论

在分析炮射电磁脉冲弹工作原理的基础上，将实际弹道上引战配合过程描述为两个独立阶段，分别讨论了起爆点控制效率 ξ 和起爆时序控制效率 ϑ。参数 ξ，ϑ 对引信和战斗部的作用体制选择、关键器件设计、技术指标确定以及参数优化有着重要意义，结合两参数得到引战配合效率 η，其值越大，引战配合越成功，η 值低于某一设定值则认为引战配合失效。本文工作可为炮射电磁脉冲弹引战配合参数设计及战术使用提供理论参考。

参考文献：

[1] Clay W. High altitude electromagnetic pulse (HEMP) and high power microwave(HPM) devices: Threat assessments[R]. Washington, DC: Library of Congress, 2006.

[2] Yurtoğlu E. Simulated E-bomb effects on electronically equipped targets[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2009.

[3] 王彦，焦红灵，车文荃，等. 电磁脉冲对数字信号处理器的干扰及其防护[J]. 强激光与粒子束，2013，**25**(8)：2173-2176.(Wang Yan, Jiao Hongling, Che Wenquan, et al. Interference and protection of electromagnetic pulse to digital signal processor. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(8):2173-2176)

[4] 冯德仁，段大卫，蒋顺利，等. 重复频率电磁脉冲对氢闸流管栅极的触发干扰[J]. 强激光与粒子束，2013，**25**(7)：1856-1860.(Feng Deren, Duan Dawei, Jiang Shunli, et al. Electromagnetic interference of repetitive frequency electromagnetic pulses toward hydrogen thyratron trigger. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(7):1856-1860)

[5] 肖金石，刘文化，张世英，等. 爆磁压缩电磁脉冲弹的杀伤能力分析与仿真[J]. 弹道学报，2009，**21**(1)：91-95.(Xiao Jinshi, Liu Wenhua, Zhang Shiying, et al. Analysis and simulation on killing ability of cascaded flux compression electromagnetic pulse bomb. *Journal of Ballistics*, 2009, **21**(1):91-95)

[6] Ertekin N. E-bomb: The key element of the contemporary military-technical revolution[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2008.

[7] 孔斌. 非核爆磁通压缩发生器数值模拟与实验研究[D]. 南京：南京理工大学，2007.(Kong Bin. Numerical simulation and test on non-nuclear explosive magnetic flux compression generator. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007)

[8] Gu Lin, Zhang He, Zhang Xiaojing. Simulation of discharge characteristics of ferroelectric ceramics transducer based on SIMULINK[C]// International Conference on Computer Application and System Modeling. 2011:568-571.

[9] 毛超，刘忠，邱志明，等. 爆磁压缩电磁脉冲弹引战配合分析[J]. 弹道学报，2012，**24**(2)：58-61.(Mao Chao, Liu Zhong, Qiu Zhiming, et al. Analysis on coordination system of fuse and warhead of electromagnetic pulse bomb with cascaded flux compression. *Journal of Ballistics*, 2012, **24**(2):58-61)

[10] 刘建平，孟志鹏，曹胜光，等. 爆磁压缩发生器延时控制系统的分析与改进[J]. 国防科技大学学报，2002，**29**(1)：39-43.(Liu Jianping, Meng Zhipeng, Cao Shengguang, et al. Analysis and improvement of timing control system of magnetic flux compression generator. *Journal of National University of Defense Technology*, 2002, **29**(1):39-43)

[11] 钟巍. 轴线起爆式螺线管型爆磁压缩发生器研究[D]. 长沙：国防科技大学，2007.(Zhong Wei. Investigation of flux compression generator

with coaxial initiation. Changsha: National University of Defense Technology, 2007)

[12] 孙承纬,周之奎(译). 磁通量压缩发生器[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (Sun Chengwei, Zhou Zhikui. Magnetocumulative Generators. Beijing: National Defense Industry Press, 2008)

[13] 杨显清,赵家生,王园. 电磁场与电磁波[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (Yang Xianqing, Zhao Jiasheng, Wang Yuan. Electromagnetic fields and electromagnetic waves. Beijing: National Defence Industry Press, 2005)

[14] 李明杰,谭志良,耿利飞. 射频前端强电磁脉冲前门耦合研究[J]. 现代防御技术, 2013, **41**(4):159-165. (Li Mingjie, Tan Zhiliang, Geng Lifei. Research of high power EMP coupling into RF front-end through front-door. *Modern Defence Technology*, 2013, **41**(4):159-165)

[15] 张实华. SP-1 型高功率微波(HPM)弹杀伤能力分析[J]. 四川理工学院学报, 2006, **19**(6):95-97. (Zhang Shihua. Lethal analysis of SP-1 type high power microwave bomb to radar. *Journal of Sichuan University of Science and Engineering*, 2006, **19**(6):95-97)

Coordination of fuze and warhead for gun-launched electron-magnetic pulse bomb on actual ballistics

Shi Yunlei, Zhang He, Ma Shaojie, Gu Lin

(*Ministerial Key Laboratory of ZNDY*, *Nanjing University of Science & Technology*, *Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: To improve the fuze-warhead coordination efficiency, the working principle of gun-launched electron-magnetic pulse bomb was analyzed, and the coordination process in actual ballistics was divided into two stages. Stage 1: the killing area model was built to analyze the optimum burst point, and by introducing damage parameters, this stage's coordination efficiency was characterized by damage rate. Stage 2: the best initiation timing model was built, the timing error spreading was calculated using small deviation method, and the coordination efficiency was characterized by the degree of seed current closer to its maximum. Based on the analysis above, the calculation model of coordination efficiency was summarized, and some technical methods were given.

Key words: gun-launched electron-magnetic pulse bomb; coordination of fuze and warhead; burst point; initiation timing; coordination efficiency

PACS: 84.30.Ng; 84.32.Vv; 84.40.-x