DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0043-07

爆炸式电磁感应脉冲发生器*

贲 驰,何 勇,潘绪超,何 源,凌 琦
(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 为了探索脉冲发生器新的技术方法,在传统脉冲发生器的基础上,提出了一种依靠爆炸驱动的电磁感应脉冲发生器。介绍了发生器的工作过程,对发生器中炸药的爆炸和冲击过程进行了计算和数值模拟,建立了带有初始电压和初始静磁场的发生器的工作电路模型,得出了感应电压的计算方法。设计了一种通过永磁体提供初始静磁场的脉冲发生器,并分别对装有两种不同炸药的发生器进行了实验。实验表明:爆速较高的炸药驱动发生器可产生峰值更高的电压脉冲。实验结果偏低于计算结果,原因是理论计算中简化了磁芯磁场和冲击波速度。

关键词: 爆炸力学;相变反应;电磁感应;脉冲发生器
中图分类号: O382.3 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

电子信息技术在现代战争中占据很高的地位,电子压制是火力压制的前提[1]。电磁脉冲战斗部武器是现代战争中的主导武器,它可以产生强烈破坏性电磁辐射场并通过天线辐射出去,瞬间破坏或摧毁敌方重要的电子设备系统。传统的电磁脉冲战斗部较多以爆炸磁通量压缩发生器为核心部件[2-4],其原理为电枢管导体在炸药爆炸的驱动下,快速压缩定子绕组围成空腔内的磁通量,在小体积内聚集成超强磁场。传统的电磁脉冲战斗部一般配备体积大且结构复杂的的初级能源系统,战斗部的空间利用率较低,不利于引战配合,且爆炸磁通量压缩发生器的能量转换效率低,有很多不足有待改进。S. I. Shkuratov 等[5-6]、E. F. Talantsev 等[7]、伍俊英等[8]曾对铁磁电磁脉冲发生器进行研究,由于铁磁电磁脉冲发生器仅使用永磁体的剩磁作为其初始磁场,因此不能直接输出高幅值的电压脉冲。

线圈内部磁通量的变化使线圈产生感应电压,感应电压的幅值取决于磁通量的变化速率。当带磁芯的螺线管线圈内部磁场稳定时,其磁通量随磁芯的磁导率而变化,快速改变磁芯材料的磁导率可使发生器产生高幅值的脉冲电信号。基于现有脉冲发生器和上述原理,本文中,对一种爆炸驱动电磁感应脉冲发生器进行研究,对发生器的爆炸冲击过程和工作电路进行分析与计算,最后通过实验对研究结果进行验证。

1 发生器工作过程

图 1 为爆炸式电磁感应脉冲发生器的原理图,它主要包括磁芯、初始能源、螺线管以及触发装置等部件。

发生器的工作原理为:使用高压电容器和充磁永磁体单独或共同作为发生器的初始能源,为螺线管内部提供初始磁场。利用高磁导率、低矫顽力的软磁材料金属铁作为螺线管的磁芯,在初始能源提供的外磁场中磁芯尽可能被磁化,使发生器获得较高的初始磁通量。采用高能炸药作为发生器的触发

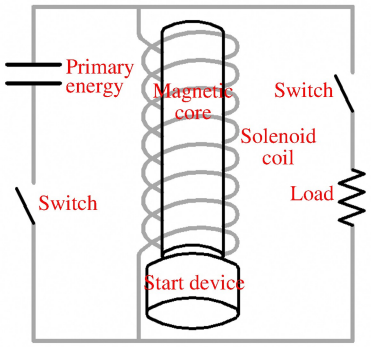

图 1 发生器原理图
Fig. 1 Schematic of generator

* **收稿日期**: 2014-07-01; **修回日期**: 2014-11-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(11502118);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX_0401)
第一作者: 贲 驰(1990—),男,博士研究生; **通讯作者**: 何 勇,yhe1964@mail.njust.edu.cn。

装置，在初始磁通量为最大值时引爆炸药，产生的冲击波由交界面传入磁芯中，通过冲击波对磁芯的压缩做功，使磁芯的温度与压力快速升高，当软磁材料的温度高于其居里温度时发生相变反应，磁性由铁磁性转变为顺磁性[9]，磁导率由高降低，从而使螺线管磁通量降低，产生感应电压。

2 爆炸冲击过程

爆炸冲击过程是爆炸式电磁感应脉冲发生器工作过程中最重要的部分，炸药爆炸传入磁芯的冲击波参数直接决定发生器性能。炸药爆炸产生的高压高温场随冲击波从炸药与磁芯接触面位置($x=0$)传入磁芯中，冲击波沿磁芯轴向传播，从另一端面($x=l_m$)传出。

2.1 冲击波参数的计算

磁芯的相变速度和程度主要决定于炸药爆炸传入磁芯内部的冲击波参数，假设爆轰波阵面上的参数即为 CJ 参数，不考虑爆轰波阵面后面跟进的稀疏波，对一维平面冲击波的正入射过程进行分析。爆轰波阵面上的质点速度 u_H 与压力 p_H 为：

$$u_H=\frac{1}{\gamma+1}D \tag{1}$$

$$p_H=\frac{1}{\gamma+1}\rho_0 D^2 \tag{2}$$

式中：γ 为多方指数，D 为炸药爆速，ρ_0 为装药密度。

由于炸药的冲击阻抗($\rho_0 D$)小于磁芯的冲击阻抗($\rho_m D_m$)，因此爆轰波到达接触界面后在爆轰产物中反射冲击波，界面处的压力大于炸药爆轰波阵面压力。根据界面连续条件，界面两侧的压力和质点速度连续，即磁芯中传入的冲击波压力与炸药中反射冲击波压力大小相等且方向相反，反射波后产物所获得的附加速度方向与爆轰波后质点速度方向相反[10]。因此有：

$$u_m=u_H-u_r=u_H-\sqrt{(p_m-p_H)(v_H-v_m)} \tag{3}$$

式中：u_r 为附加质点速度，u_m 为磁芯质点速度，p_m 为磁芯压力，v_H、v_m 分别为反射冲击波前后爆轰产物比容。

将式(2)和反射冲击波 Hugoniot 方程代入式(3)中，整理得：

$$u_m=\frac{D}{\gamma+1}\left(1-\frac{\sqrt{2\gamma}\left(\dfrac{p_m}{p_H}-1\right)}{\sqrt{(\gamma+1)\dfrac{p_m}{p_H}+(\gamma-1)}}\right) \tag{4}$$

磁芯内的冲击波速度 D_m 与该点的质点速度 u_m 为线性关系[11]，且 u_m 与 p_m 满足动量守恒定律：

$$D_m=c_0+\lambda u_m \tag{5}$$

$$p_m=\rho_m D_m u_m \tag{6}$$

式中：c_0 与 λ 为与材料性质有关的实验常数(铁介质，$c_0=3.78$ km/s，$\lambda=1.652$)，ρ_m 为磁芯密度。

表 1 为根据 TNT 与 8701 炸药的参数、联立方程(2)～(6)解出的磁芯中传入的冲击波参数 u_m、D_m 与 p_m。

表 1 炸药与冲击波参数

Table 1 Parameters of explosive and shock wave

炸药	ρ_0/(g·cm^{-3})	γ	D/(km·s^{-1})	p_H/GPa	u_m/(km·s^{-1})	D_m/(km·s^{-1})	p_m/GPa
TNT	1.54	2.83	6.831	18.76	0.906	5.278	29.65
8701	1.64	2.91	8.245	28.51	1.197	5.760	42.75

2.2 磁芯冲击过程的数值模拟

为了验证冲击波初始参数计算结果的准确性，研究冲击波在磁芯内的传播过程，通过 AUTODYN 有限元软件欧拉网格法对两种炸药的爆炸驱动进行数值模拟。图 2 为二维轴向建模结构图，磁芯材料

为纯铁，密度为 6.2 g/cm^3，壳体材料为尼龙，永磁体材料为钕铁硼，线圈材料为铜，炸药分别采用 TNT 和 8701，参数见表 1，起爆方式为点起爆。为了监测磁芯内冲击波的传播过程，在磁芯轴线附近依次添加监测点 1～6，在磁芯与炸药接触界面附近依次添加监测点 7～10。

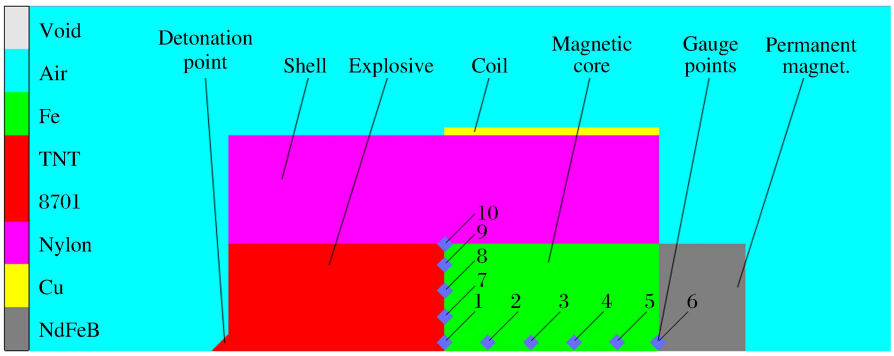

图 2　建模结构图

Fig. 2　Schematic of modeling

表 2～3 分别列出了炸药为 TNT 与 8701 时，磁芯相变过程中各监测点的质点速度与压力所达到的最大值 u_m 与 p_m、起爆后各监测点参数达到最大值所用时间，以及结合式(5)计算得到的冲击波速度 D_m。可见，监测点 1 的冲击波参数 u_m、p_m 与 D_m 与传入磁芯界面冲击波参数理论计算结果(见表 1)基本吻合，证明理论计算结果可信。对比表中数据可以看出，冲击波的传播过程存在衰减与叠加，表现为：炸药起爆后轴线方向传播的爆轰波先传入磁芯形成第 1 道冲击波，其他方向的爆轰波传播至外侧壳体界面时发生反射，反射冲击波与爆轰波的叠加作用增加了波的压力与速度，与炸药接触的磁芯端面上半径越大处反射冲击波与爆轰波的叠加越强烈，因此监测点 7～10 的参数逐渐增加。当第 1 道冲击波传播至监测点 2～4 时与上述叠加波汇合，因此经过监测点 2～4 的最大冲击波压力与波速存在驻点，随后该叠加波在监测点 4～6 逐渐衰减。综上可知，中心点起爆炸药传入磁芯内的冲击波的传播是复杂多变的过程，为了简化计算，假定磁芯中的冲击波为轴向匀速传播的平面波。

表 2　炸药为 TNT 时磁芯内部冲击波参数

Table 2　Parameters of shock wave in magnetic core with TNT

监测点	t/μs	u_m/(km·s^{-1})	p_m/GPa	D_m/(km·s^{-1})
1	3.81	0.803	25.92	5.206
2	6.34	0.478	23.60	7.963
3	6.81	0.559	27.77	8.013
4	7.27	0.550	23.45	6.877
5	7.74	0.479	16.98	5.718
6	8.58	0.351	10.55	4.848
7	3.85	0.692	22.99	5.358
8	3.94	0.683	23.15	5.467
9	4.15	0.785	28.06	5.765
10	4.19	0.802	30.19	6.072

表 3　炸药为 8701 时磁芯内部冲击波参数

Table 3　Parameters of shock wave in magnetic core with 8701

监测点	t/μs	u_m/(km·s^{-1})	p_m/GPa	D_m/(km·s^{-1})
1	3.16	1.263	46.25	5.906
2	5.48	0.623	31.60	8.181
3	5.94	0.875	48.47	8.935
4	6.47	1.037	54.34	8.452
5	7.01	1.042	48.68	7.535
6	7.59	0.859	32.88	6.174
7	3.21	1.265	46.61	5.943
8	3.28	1.264	47.19	6.022
9	3.40	1.309	50.46	6.218
10	3.40	1.413	56.10	6.404

3　发生器工作电路

爆炸式电磁感应脉冲发生器的工作电路如图 3 所示，包括初始回路与负载回路。初始回路中，C 为高压储能电容，R_0 为初始回路总电阻，L 为螺线管电感。闭合初始回路开关 K_1，带有初始电压 u_C 的高压电容 C 激励螺线管线圈产生初始电流 I_0，可得初始回路中各电量关系：

$$u_C = R_0 i_0 + u_L \tag{7}$$

电感、电容中，$u_L = L\mathrm{d}i_0/\mathrm{d}t$，$i_0 = -C\mathrm{d}u_C/\mathrm{d}t$，式(7)可整理为关于 i_0 的二阶常系数线性齐次微分方程：

$$LC\frac{\mathrm{d}^2 i_0}{\mathrm{d}t^2} + R_0 C\frac{\mathrm{d}i_0}{\mathrm{d}t} + i_0 = 0 \tag{8}$$

当电路中 i_0 达到最大值 $i_{0\mathrm{m}}$ 时，由电流产生的线圈内部磁场强度 H_e 达到最大值 H_{em}。蔡旭红等[12]通过毕奥-萨伐尔定律，计算得出有限长通电螺线管内部磁场分布比较均匀，仅在端面与螺线管壁处存在衰减。因此，可将螺线管内部磁场大小作为恒值计算，且数值参考轴线中点处的磁场强度，方向为沿轴线方向。由单层螺线管轴线上磁场的计算公式[13]，得：

$$H_{\mathrm{em}} = \mu_0 n i_{0\mathrm{m}}\frac{l}{\sqrt{(2r)^2 + l^2}} \tag{9}$$

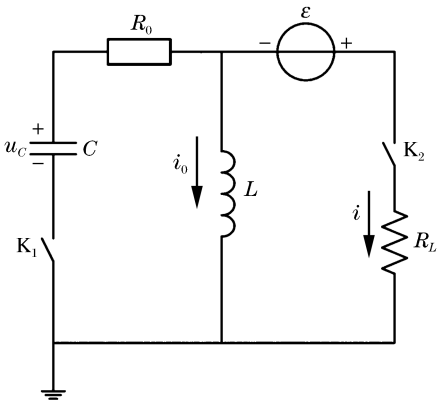

图 3 发生器工作电路图

Fig. 3 Working circuit of generator

式中：l 为螺线管长度；r 为螺线管半径；n 为线圈匝数。若螺线管线圈外部设置永磁体提供静态初始磁场，假设所提供的静态磁场为关于轴向位置 x 的一维磁场 $H_\mathrm{f}(x)$，则线圈内部总初始磁场为：

$$H_0(x) = H_\mathrm{f}(x) + H_{\mathrm{em}} \tag{10}$$

若磁芯面积为 S，则磁芯内部初始磁通量为：

$$\Phi_0(x) = B_0(x)S = \mu_\mathrm{r} H_0(x)S \tag{11}$$

断开初始回路开关 K_1，同时闭合负载回路开关 K_2，启动电雷管引爆炸药，在与炸药接触的磁芯中激发冲击波，冲击波在磁芯内部传播的过程中对磁芯压缩做功，引起磁芯温度与压力的升高。磁芯在冲击波传播时产生的高温、高压环境下，从与炸药接触一端向另一端发生高速相变反应，冲击波阵面后的磁芯部分由铁磁性转变为顺磁性，磁芯截面 x 处的磁感应强度从初始 $B_0(x)$ 下降了 $\Delta B(x)$，磁通量也随之下降，若磁芯长度 l_m 与螺线管长度 l 相等，则缠绕在磁芯 x 处的线圈中产生的感应电压为：

$$E(x) = \frac{\Delta B(x)}{l_\mathrm{m}} S D_\mathrm{m} \qquad 0 < x < l_\mathrm{m} \tag{12}$$

若磁芯外缠绕了 n 匝线圈，则产生的总感应电压为：

$$E_\mathrm{m} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta B(l_\mathrm{m} i/n)}{l_\mathrm{m}} S D_\mathrm{m} \tag{13}$$

由式(13)可知，发生器的感应电压大小与磁芯面积、磁芯内部冲击波速度成正比，与磁芯长度成反比，且当磁芯磁感应强度的变化量变大或线圈匝数增加时，感应电压增大。由此可知，爆速较高的炸药可使发生器产生幅值更高的感应电压。

负载回路中螺线管线圈产生的感应电压相当于电路中附加一个电压源，在负载等效回路表示为 ε。由于发生器工作过程中螺线管磁芯材料发生变化，因此螺线管电感 L 为随时间的函数 $L(t)$，当 L 很大时，忽略负载回路中其他形式的电感。R_L 为负载电阻，当 R_L 很大时，忽略螺线管电阻、电缆电阻以及其他电阻损耗。负载回路中电流 $i(t)$ 与电动势 $\varepsilon(t)$ 有以下关系：

$$L(t)\frac{\mathrm{d}(i(t))}{\mathrm{d}t} + i(t)\frac{\mathrm{d}(L(t))}{\mathrm{d}t} + R_L i(t) = \varepsilon(t) \tag{14}$$

方程满足初始条件：

$$i(0) = 0 \tag{15}$$

推导得到 $i(t)$ 的表达式为：

$$i(t) = \mathrm{e}^{-\int \frac{1}{L(t)}\left(R_L + \frac{\mathrm{d}(L(t))}{\mathrm{d}t}\right)\mathrm{d}t}\left(\int \frac{\varepsilon(t)}{L(t)}\mathrm{e}^{\int \frac{1}{L(t)}\left(R_L + \frac{\mathrm{d}(L(t))}{\mathrm{d}t}\right)\mathrm{d}t}\mathrm{d}t - \int \frac{\varepsilon(t)}{L(t)}\mathrm{e}^{\int \frac{1}{L(t)}\left(R_L + \frac{\mathrm{d}(L(t))}{\mathrm{d}t}\right)\mathrm{d}t}\mathrm{d}t\Bigg|_{t=0}\right) \tag{16}$$

4　实　验

4.1　实验设计

图 4 为发生器的实验照片，共进行两组实验。为了降低电路的复杂程度、减少计算过程，实验中发生器采用钕铁硼永磁体作为唯一初始能源，利用两块 N35 钕铁硼永磁体在同一端面同轴吸附磁芯为其提供初始磁场。所用钕铁硼的剩磁为 1.17～1.21 T，矫顽力为 876～899 kA/m，最大磁积能为 263～279 kJ/m^3，直径为 25 mm，单块厚度为 5 mm，沿轴线方向均匀充磁。磁芯由直径 150 μm 的铁粉颗粒压制成型，直径 25 mm，长 25 mm，压制密度 6.2 g/cm^3，常温下相对磁导率 μ_r 可达 10^3 数量级，居里温度约为 770 ℃。螺线管由直径 1.2 mm 的漆包线缠绕而成，共 17 圈。两组实验分别使用 TNT 和 8701 高能炸药，其他条件相同。图 5 为发生器及实验装置结构示意图，用高压探头测量发生器两端电压脉冲曲线，通过数字示波器进行记录。



图 4　实验照片

Fig. 4　Photograph of experiment

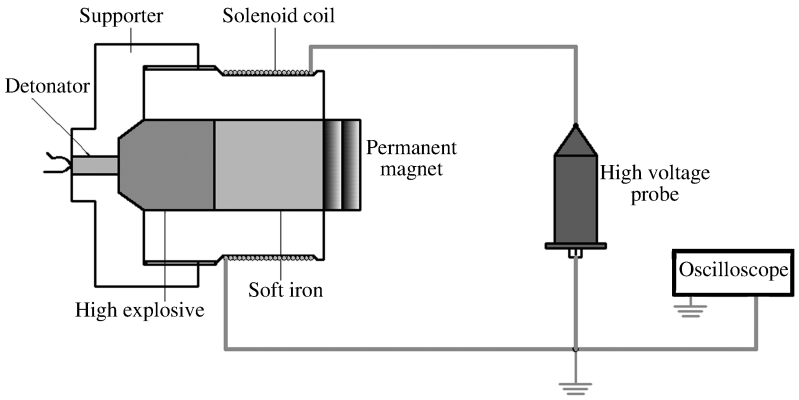

图 5　发生器及实验装置结构示意图

Fig. 5　Schematic of generator and experiment system

4.2　磁场分析

通过 Maxwell-3D 软件计算圆柱永磁体相邻介质中的磁感应强度，永磁体采用两块直径 25 mm、厚 5 mm 的 N35 钕铁硼同轴吸附，与其同轴接触的介质直径 25 mm、长 25 mm。磁芯在相变前为铁介质，高温相变后磁芯失去磁性，可等效为不导磁的空气介质，假设磁芯相变足够完全，则铁介质与空气介质内磁感应强度的差，可看作磁芯相变前后磁感应强度变化量 ΔB。

图 6 为与钕铁硼相邻介质内轴线上与接触表面不同距离的磁感应强度分布曲线的数值模拟结果，相邻介质分别为空气、铁，Fe-Air 为两种磁感应强度的差值曲线。为方便计算，对差值曲线做 x 变换，

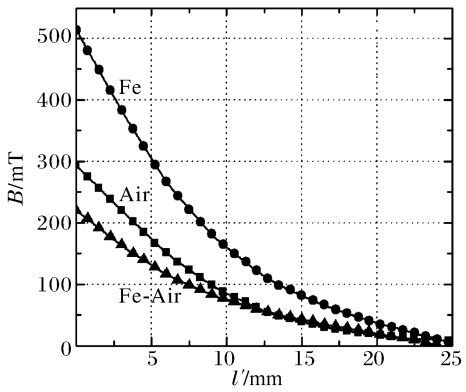

图 6　钕铁硼轴线上的磁感应强度曲线

Fig. 6　Magnetic flux density curves on the axis of $Nd_2Fe_{14}B$

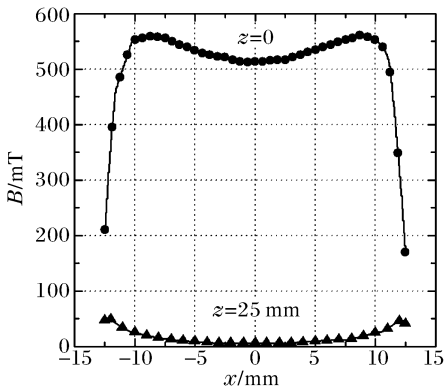

图 7　铁块截面的磁感应强度曲线

Fig. 7　Magnetic flux density curves on the surface of iron

得出以磁芯与炸药接触面作为坐标原点、以磁芯与永磁体接触面处为磁芯长度 l_m 的一元函数 $\Delta B(x)$。图 7 为与钕铁硼同轴吸附的圆柱铁块在距离二者接触面 0 和 25 mm 处截面上到轴线不同距离处的磁感应强度分布曲线的数值模拟结果。由图 7 可知，本实验条件下铁块截面内的磁感应强度比较均匀，只在半径最大处存在较大变化，为简化计算，将磁芯截面上的磁感应强度均看作相应位置轴线上的磁感应强度 $B(x)$。

结合计算得到的冲击波速度 D_m、差值曲线变换得到的 $\Delta B(x)$ 以及式(13)，计算得出 TNT 炸药驱动下发生器的感应电压为 142.4 V，8701 炸药驱动下发生器的感应电压为 155.7 V。

4.3 实验结果

图 8 为驱动炸药分别为 TNT 与 8701 时得到的两组电压曲线。实验通过探头直接连接发生器两端的方法测量其电压变化，由于测试电路中的负载电阻 R_L 远大于其他元件的阻抗，因此示波器测得电压信号即可视为发生器产生的电压脉冲。由图 8 可以看出，采用爆速相对较低的 TNT 作为发生器磁芯相变的驱动炸药时，电压脉冲的峰值约 116 V；采用爆速相对较高的 8701 作为发生器磁芯相变的驱动炸药时，电压脉冲的峰值约 132 V。实验所得数据偏小于理论计算结果，原因较复杂，其中将磁芯内冲击波的传播速度看做恒值、将磁芯磁感应强度变化量简化为一维函数以及未考虑除负载电阻外电路中的其他阻抗为主要原因。由于 8701 炸药爆炸后传入磁芯的冲击波速度和压力更大，因此，装有 8701 炸药的发生器产生的电压脉冲幅值高于装有 TNT 炸药的发生器，实验结论验证了本文理论研究的正确性。

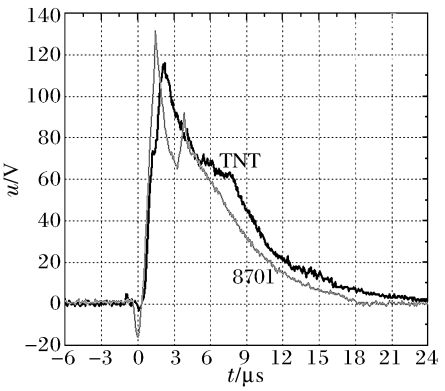

图 8 实验测得的电压波形

Fig. 8 Voltage curves of generator

5 结 论

对爆炸式电磁感应脉冲发生器的工作机理进行了研究，对发生器工作中炸药的爆炸冲击过程进行了理论计算与 Autodyn 模拟，得到了 TNT 与 8701 炸药爆炸后传入磁芯的冲击波初始速度与压力，以及磁芯内部冲击波参数的变化。建立了具有初始电压和初始静磁场装置的发生器的工作电路模型，得出了发生器工作前后电量与磁量的转换关系。通过对不同炸药驱动发生器的实验研究，证明了爆速较高的炸药驱动发生器可产生更高的脉冲电压峰值。作为一种新结构的脉冲发生器，爆炸式电磁感应脉冲发生器具有体积小、成本低且结构灵活等特点，在电磁脉冲战斗部领域中有非常大的发展空间。

参考文献：

[1] 陈增凯，孙新利，陈黎梅. 电磁脉冲战斗部的发展及其技术[J]. 火力与指挥控制，2004，29(4)：10-12.
Chen Zengkai, Sun Xinli, Chen Limei. Development and techniques of electromagnetic pulsed warhead[J]. Fire Control and Command Control, 2004, 29(4): 10-12.

[2] 孙奇志，龚兴根，谢卫平，等. 高能量爆磁压缩电流发生器理论分析与实验研究[J]. 爆炸与冲击，2003，23(1)：51-55.
Sun Qizhi, Gong Xinggen, Xie Weiping, et al. Theoretic and experimental study of an explosive magnetic flux compression generator with high energy output[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 51-55.

[3] 龚兴根，谢卫平，蔡明亮，等. 高增益螺旋形爆炸磁通量压缩发生器[J]. 爆炸与冲击，1998，18(2)：187-191.
Gong Xinggen, Xie Weiping, Cai Mingliang, et al. Helical exploding magnetic flux compression generator with high gain[J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(2): 187-191.

[4] Altgiber L L. Magnetocumulative Generators[M]. Berlin: Springer, 1999: 16-25.

[5] Shkuratov S I, Talantsev E F, Baird J, et al. Transverse explosive shock-wave compression of $Nd_2Fe_{14}B$ high-ener-

gy hard ferromagnets: Induced magnetic phase transition[C]// Shock Compression of Condensed Matter－2005. 2006:282-285.

[6] Shkuratov S I, Talantsev E F, Baird J, et al. Compact autonomous completely explosive pulsed power systems[C]// IEEE 34th International Conference on Plasma Science. 2007:1347-1351.

[7] Talantsev E F, Shkuratov S I, Dickens J C, et al. Completely explosive pulsed power minisystem[J]. Review of Scientific Instruments, 2003,74:225-230.

[8] 伍俊英，陈朗，冯长根. 爆炸去磁脉冲功率发生器的实验和理论计算[J]. 爆炸与冲击，2007,27(5):398-404.
Wu Junying, Chen Lang, Feng Changgen. Experiments and theoretical calculation of explosive-driven shock wave ferromagnetic generators[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(5):398-404.

[9] Bancroft D, Peterson E L, Minshall S. Polymorphism of iron at high pressure[J]. Applied Physics, 1956,27(3): 291-298.

[10] 何勇，李鸿涛. 弹丸设计基础[M]. 南京：南京理工大学，1990:329-333.

[11] 北京工学院八系. 爆炸及其作用[M]. 北京：国防工业出版社，1979:222-239.

[12] 蔡旭红，李邵辉. 有限长通电螺线管内部空间磁场的模拟[J]. 汕头大学学报：自然科学版，2004,19(2):28-31.
Cai Xuhong, Li Shaohui. Simulation for spatial magnetic field distribution in a finite solenoid[J]. Journal of Shantou University: Natural Science, 2004,19(2):28-31.

[13] 张世远，路权，薛荣华，等. 磁性材料基础[M]. 北京：科学出版社，1988:370-371.

Explosion-driven electromagnetic induction pulse generator

Ben Chi, He Yong, Pan Xuchao, He Yuan, Ling Qi

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

Abstract: In this work, based on the traditional pulse generators, we present an electromagnetic induction generator driven by explosion as a new technology of electromagnetic pulse generator. Having described the working process of the generator, we simulated and calculated the shock process of the explosion. Furthermore, we established the model for the working circuit of the generator with initial voltage and static magnetic, obtaining the calculation method of the induced voltage. An experimental generator with initial static magnetic provided by permanent magnet was designed, and the generators respectively fitted with two different explosives were tested. The experimental results show that the generator driven by higher detonation velocity of explosive can produce higher peak and shorter rise time voltage pulse, which are found to be a little lower than the calculation results due to the simplification in theoretical calculation of the magnetic field of the core and the velocity of shock wave.

Key words: mechanics of explosion; phase transformation; electromagnetic induction; pulse generator

(责任编辑　丁　峰)