

文章编号: 1672-2892(2010)01-0036-05

## 电磁脉冲在传输线上激励电流规律研究

李宝忠<sup>1,2</sup>, 何金良<sup>2</sup>, 周辉<sup>1</sup>, 程引会<sup>1</sup>, 马良<sup>1</sup>, 吴伟<sup>1</sup>, 李进玺<sup>1</sup>

(1.西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2.清华大学 电机系, 北京 100084)

**摘要:** 对传输线在电磁脉冲环境下的感应电流规律进行了研究。分别在传输线一端接负载、一端接地, 以及两端分别接不同负载状态下, 研究了感应电流、负载电压及消耗功率的变化规律。在实验上采用非接触脉冲电流注入方式, 理论研究采用传输线模型, 二者得到了相同的规律。结果表明, 电磁脉冲环境下传输线感应电流、端口电压与负载大小有直接的关系, 且在某个阻值附近负载消耗功率出现极大值。

**关键词:** 电磁脉冲; 传输线; 脉冲电流; 负载电压; 消耗功率

中图分类号: TN811<sup>+.5</sup>

文献标识码: A

## Study about induced current law by EMP on transmission line

LI Bao-zhong<sup>1,2</sup>, HE Jin-liang<sup>2</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>, CHENG Yin-hui<sup>1</sup>, MA Liang<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1</sup>, LI Jin-xi<sup>1</sup>

(1.Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China;

2.Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The induced current law on transmission line was studied in electromagnetic pulsed environment. The variety laws including induced current, load voltage and the power were researched according to the following situations: one terminal was in short-circuit state and the other terminal was linked with resistance; two terminals were connected with different resistances respectively. The way of non-contact pulsed current injection was taken on the experiment, and the theoretical analysis was done with the transmission line theory model. The results showed that both ways were complied with the identical rule, and in electromagnetic pulsed environment the induced current on transmission line and the voltage on the end port resistance had direct relationships with the values of load. The dissipative energy by the resistance would reach the maximum value when special resistance values were selected.

**Key words:** electromagnetic pulse; transmission line; pulsed current; load voltage; dissipative power

电子系统处于强电磁脉冲环境(高空核爆电磁脉冲)中时, 通过传导耦合, 可以在指令控制线、数据传输线、电源线、电缆等部件上产生干扰电流, 进入端口电路中。这些电磁脉冲能量在电路与半导体器件中产生大电流与高电压, 会引起系统性能降低或功能损坏。随着微电子技术发展, 电子系统集成度越来越高, 工作频率不断提高, 而工作电压逐渐降低, 对电磁脉冲的敏感性也不断增加。无论商用还是军事, 电子系统电磁脉冲干扰规律、损伤阈值测试技术等方面的研究越来越重要, 对系统在电磁脉冲环境中可靠工作具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。

本文将数据线、指令线等简化为传输线模型, 对传输线在电磁脉冲环境下的响应进行研究, 在传输线两端连接不同负载情况下, 研究了端口电流和电压幅度变化规律, 得到传输线电流、端口消耗功率与电阻大小的关系。从实验测试和理论计算两方面均得到了相同的规律。之所以关注端口电流和电压, 是因为传输线上干扰最终作用的对象是所连接的电子系统, 线上的脉冲最终要进入电路中, 才会影响电路的正常工作。

本文实验测试采取脉冲电流注入方法, 通过电感耦合技术在传输线上注入脉冲电流, 然后测量端口负载上的电压和电流信号。这种非接触式注入方式具有环境参数干净、重复性好、数据准确性高、对设备状态改变小、可以在工作状态下进行动态测试等优点, 尤其适合传输线、电缆等结构的电磁敏感性测试。

理论计算模型采用了经典的传输线计算方法, 具体采用了 Agrawal 模型, 将场、线耦合问题处理为电磁散射问题, 激励源为沿传输线入射电场的水平分量和垂直线路端点处的垂直入射电场, 激励产生分布电压源。在计算结果上, 该模型与 Taylor 模型、Rachidi 模型效果是相同的<sup>[5-8]</sup>。

## 1 实验装置与计算方法

### 1.1 实验方法

图 1 为脉冲电流注入实验装置,采用电感耦合方式,为非接触电流注入装置,由脉冲源及耦合注入部件两大部分组成<sup>[9-14]</sup>。可以用于耦合通道保护器件、电路的瞬态抑制/衰减性能测试,以及电子系统敏感性位置确定和干扰损伤阈值测试等。将耦合部件套在被测试线、缆周围,可以产生注入双指数脉冲电流。幅度 1 A~200 A 可调。脉冲宽度 300 ns~500 ns,上升沿 40 ns。

图 2 为脉冲电流注入进行传输线响应规律测试示意图。传输线两端分别连接不同的负载,实验中以纯电阻等效。注入装置从线的中部注入,并对两端负载上的电流、电压进行监测。测试系统包括电流探测器与电压探测器<sup>[15-16]</sup>,探测器指标:电流探测器灵敏度 1.3 V/A,频响范围 100 MHz,线性范围 500 A;电压探测器使用 TEK 探针,最高电压范围可以到 2 000 V。

### 1.2 计算模型

在理想状态下,传输线为理想导体,介质为无损介质,传输线间距远大于传输线半径,Agrawal 模型频域传输线方程组为<sup>[6,17-18]</sup>:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V^s(x) \\ I(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & R' + j\omega L' \\ G' + j\omega C' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^s(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s2}'(x) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $R', L', G', C'$  为单位长度电阻、电感、电导、电容。

计算得到散射电压加上入射电压就是总电压:

$$V(x) = V^s(x) - \int_0^h E_z^i(x, z) dz \quad (2)$$

在传输线两端有边界条件:

$$\begin{cases} V(0) = -Z_1 I(0) + \int_0^h E_z^i(0, z) dz \\ V(l) = Z_2 I(l) + \int_0^h E_z^i(l, z) dz \end{cases} \quad (3)$$

其中  $Z_1$  和  $Z_2$  分别为传输线两端阻抗。

图 3 为计算模型示意图,入射电磁场平面波的时间域波形取 Bell 标准<sup>[19]</sup>,上升沿 4.1 ns,半高宽 184 ns,幅度  $5 \times 10^4$  V/m,电磁脉冲正入射到传输线,入射波矢量垂直于传输线,电场极化方向与传输线平行。传输线在地面附近平行架设,两端接地或接电阻。

## 2 实验与计算结果

传输线选择为平行于地面的单根传输线,连接负载分两种状态,分别为一端直接接地、一端接负载,以及两端分别连接不同数值的电阻负载。

### 2.1 传输线一端接地、一端接负载

注入实验中,在传输线一端接电阻,另一端接地,传输线长度为 4 m。注入电流为双指数脉冲波形,实验测试示意图如图 2 所示。

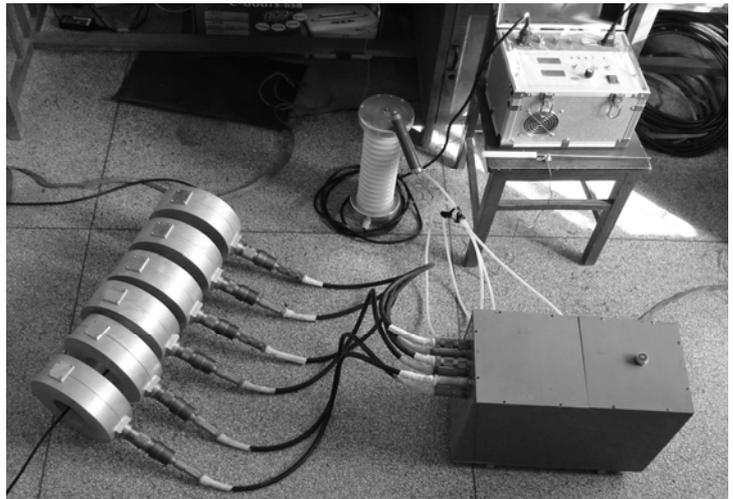


Fig.1 Picture of non-contact pulsed current injection device  
图 1 非接触电流注入装置实物图

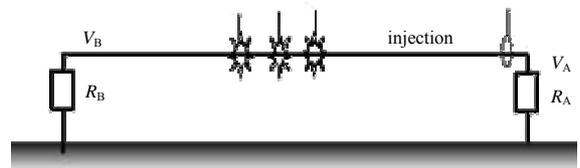


Fig.2 Illustration of non-contact pulsed current injection test  
图 2 非接触脉冲电流注入测试示意图

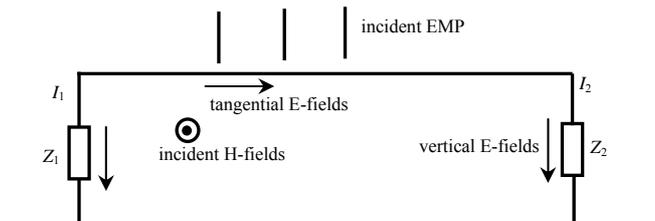


Fig.3 Calculation model of transmission line under situations that two terminals connected with resistances load  
图 3 传输线两端对地接电阻的电流计算模型

图 4 为传输线电流、电阻电压随不同阻值的变化曲线。结果显示,在注入装置储能电容充电电压不变情况下,随传输线上电阻增大,注入电流幅度呈减小趋势,电阻上的电压降呈增大趋势,而且电流、电压不是线性变化,电阻减小时,电流趋于短路电流值,电阻增加时,电压幅度也有趋于稳定的迹象。计算得到了电阻上消耗的最大功率,图 5 为功率随电阻的变化曲线,可以看到在某一阻值附近有极大值出现。

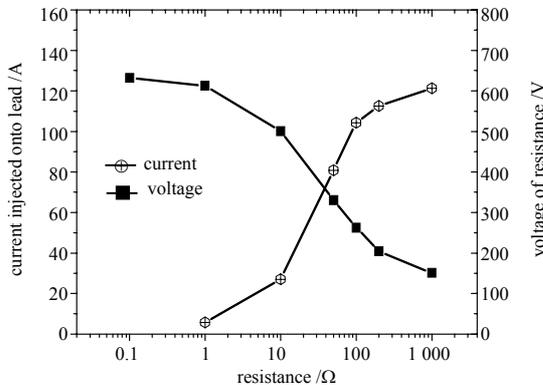


Fig.4 Curve of transmission line current, load voltage vs. resistance

图 4 传输线电流、负载电压随电阻变化曲线

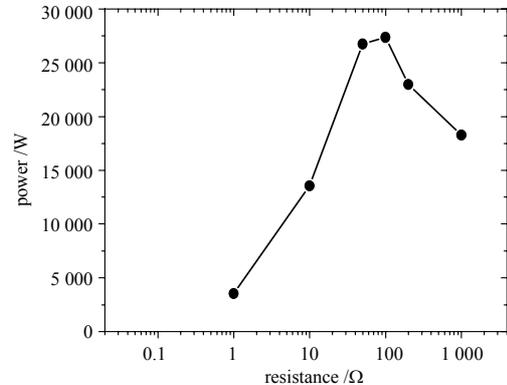


Fig.5 Curve of resistance dissipative power vs. resistance

图 5 电阻消耗功率随电阻变化曲线

理论计算了相同状态下的变化规律,同样得到在环境电磁脉冲参数不变条件下,随传输线上电阻增大,注入电流幅度呈减小趋势。图 6 与图 7 为计算结果。电阻在小于一定值后,传输线上的感应电流趋于饱和,而电压降也趋于一个稳定值;电阻增加时,电压也有饱和值。图 7 为电阻消耗功率随电阻的变化曲线,功率在一定阻值上有吸收极大值。

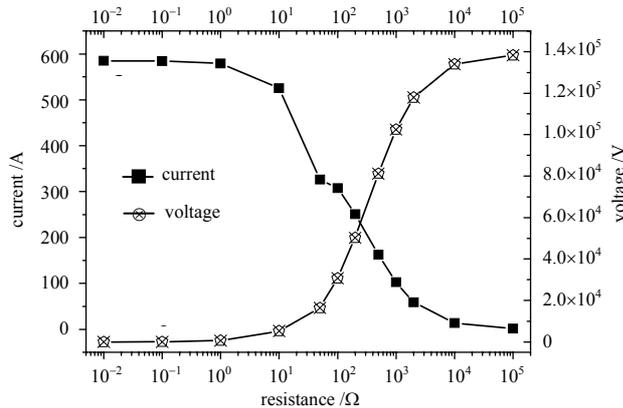


Fig.6 Curve of current, voltage vs. resistance

图 6 电流电压随电阻变化曲线

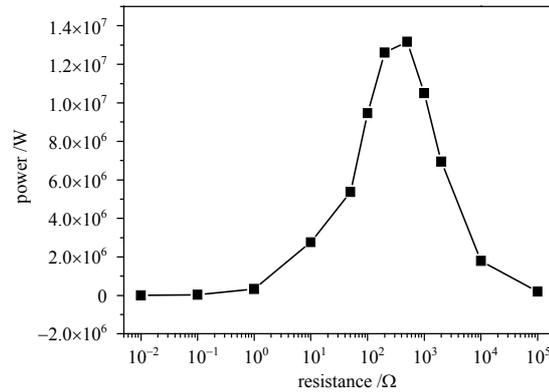


Fig.7 Curve of resistance dissipative power vs. resistance

图 7 电阻消耗功率随电阻变化曲线

## 2.2 传输线两端接不同电阻

在传输线两端分别对地接不同大小的电阻,传输线长度为 4 m。测量传输线上注入电流,以及两端负载上对地的电压。图 8 为传输线两端对地分别接 200 Ω、50 Ω 的实验波形。图 9 为两端电阻分别为 50 Ω、10 Ω 时的理论计算波形。波形表明装置在传输线上注入的电流为单向流动,在传输线一端负载上产生正向电压降,在另一端产生负电压降,两端的电压降幅度与阻值有关系,这个结果与实际电磁环境在传输线上产生电流的情形一致。同时理论数据也验证了实验结果。

在传输线两端负载阻值变化时,图 10 与图 11 给出了实验结果,图 12 与图 13 给出了理论计算结果。实验和理论结果均表明,随传输线两端电阻的增加,注入电流幅度在减小。在传输线两端电阻阻值大小不同时,两端的电压降绝对值不同,较大电阻上电压降要大于另一端阻值较小的电压,这是因为传输线上电流大小是不变的。

图 10 与图 12 分别为传输线电流、B 端电压降随电阻变化的实验与理论曲线。感应电流、负载电压随传输线负载阻抗的变化为非线性关系,电流随阻抗增加而减小,电压随阻抗增加而增加。

传输线端点电流在短路时幅度最大,开路时电流最小;电阻在小于一定值后,传输线上的感应电流趋于饱和,接近短路电流值;在电阻由小到大增加时,电流非线性减小,在高阻时波形、幅度趋于开路振荡电流;电压随负载增大非线性变化增加,开路时幅度最大,在高阻时接近开路电压。电阻在大于一定值时,电压出现振荡,波形、幅度接近于开路电压;随电阻减小,电压呈非线性减小,在电阻接近零时,电压幅度也都趋于一个稳定值。

图 11 与图 13 结果显示两端电阻分别消耗的功率，电阻阻值大的一端消耗功率总是相对较高。一端的功率在非线性减小，另一端的功率随电阻增大而非线性变化，并出现极大值，在电阻  $R_B$  达到高阻时，电流趋于零，两端消耗的功率相接近。

考虑到传输线两端电阻为串联连接，在分析时，将电阻与消耗功率各自相加，得到传输线上的总消耗功率与总电阻的关系。结果显示两端电阻消耗总功率随电阻变化曲线，在某个阻值附近有消耗功率极大值存在。

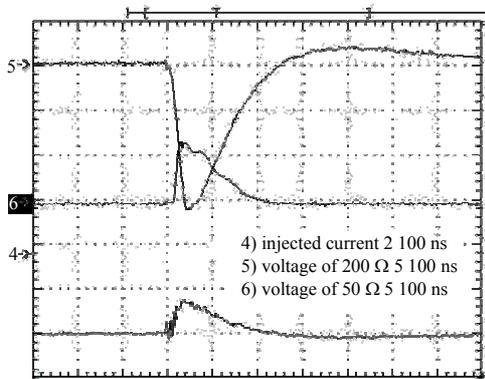


Fig.8 Experiment waveform of transmission line with two terminals connected to different resistances  
图 8 传输线两端接不同电阻的实验波形

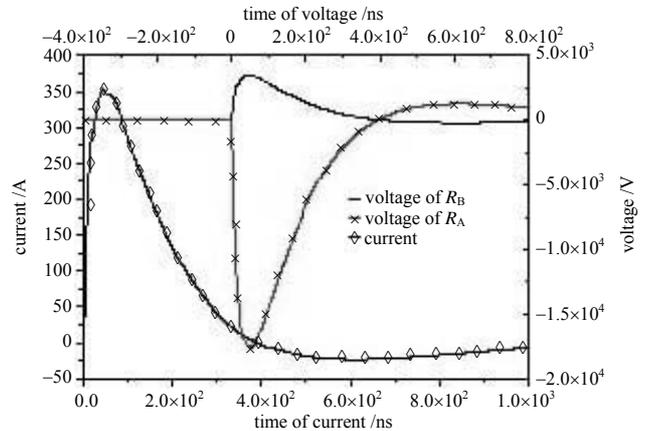


Fig.9 Theoretical waveform of 10Ω, 50Ω two terminals load  
图 9 两端负载分别为 10Ω, 50Ω 的理论波形

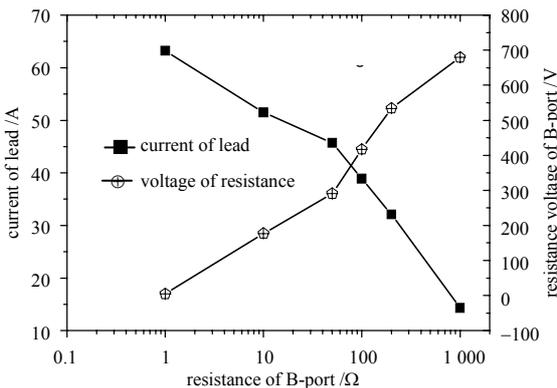


Fig.10 Experiment curve of transmission line current and B-port voltage  
图 10 传输线电流与 B 端电压实验结果曲线

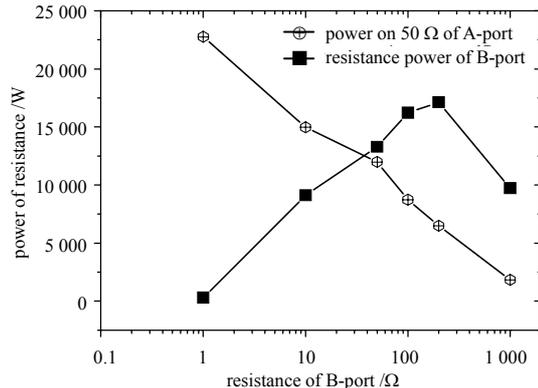


Fig.11 Experiment curve of two terminals load dissipative power vs. resistance  
图 11 两端电阻消耗功率随电阻变化实验结果曲线

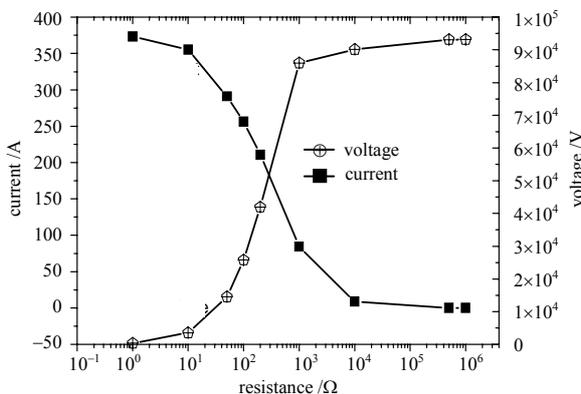


Fig.12 Theoretical curve of current and B-port voltage vs. resistance  
图 12 电流、B 端电压随电阻变化理论曲线

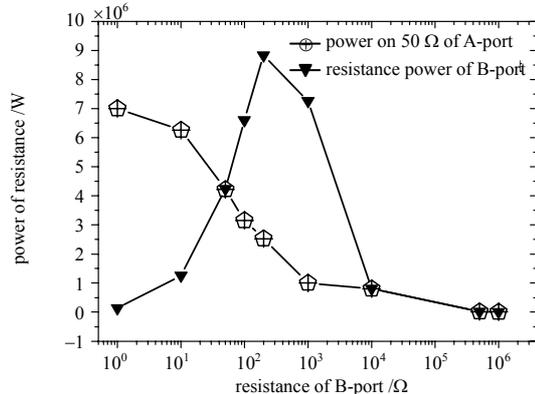


Fig.13 Theoretical curve of resistance dissipative power vs. resistance  
图 13 电阻消耗功率随电阻变化理论曲线

另外，文献[20]采用 FDTD 方法，结合 Holland 细传输线模型，以高斯波做入射，对传输线的电磁脉冲响应电流进行研究，得到同样的规律结果。该文献中用电路模型对规律给出了理论解释，电磁脉冲环境对传输线辐照，可简化为电压源与内阻串联的戴维宁等效，在传输线连接电阻变化时，相当于等效电路的负载变化，因此在负载与内阻相等时，会有输出功率的最大值。这个解释模型同样也适用于解释装置对传输线注入电流实验结果。

### 3 结论

本文从实验和理论两方面研究了在电磁脉冲环境下传输线上感应电流与端口电压的变化规律。结果表明,在其它参数不变情况下,电磁脉冲在传输线上产生的干扰电流、阻抗上电压随传输线两端阻抗的变化为非线性关系;电流随阻抗增加而减小,电压随阻抗增加而增加;而且在某个阻抗值附近,等效阻抗消耗的能量出现极大值。这意味着,此时干扰能量最容易顺传输线从端口进入电路内部,在电场强度足够大时,产生能量损伤效应。理论计算得到的规律与实验结果相同,并可以用等效电路模型进行解释。由此给出以下推测,在一种确定的电磁环境中,一定连接状态下,某些特定大小等效阻抗的电路会比较敏感,容易产生损伤,而对其它电路则不会;反过来说,某一个具体电子电路,会有可能对某一种电磁环境敏感,而在另一种相同强度的电磁环境中,却不太敏感,其损伤阈值变高。这只是初步推测,要得到明确结论需要后续工作中进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 赖祖武. 强电磁脉冲的破坏效应及防护[J]. 电子科技报道, 1997(11):32-34.
- [2] 何金良. 电磁兼容导论讲义[R]. 清华大学, 2003.
- [3] 乔登江. 电子元器件电磁脉冲效应手册[M]. 西安:西北核技术研究所, 1992.
- [4] 侯民胜,刘尚合,王书平. 单片机系统在核电磁脉冲对辐照下的效应研究[J]. 强激光与粒子束, 2001,13(5):623-626.
- [5] Taylor C,Sattewhite R,Harrison C. The Response of a Terminated Two-Wire Transmission Line Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965,13(6):987-989.
- [6] Agrawal A K,Price H J,Gurbaxani S H. Transient Response of Multiconductor Transmission Line Excited by A Nonuniform Electromagnetic Field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1980,EMC-22(2):119-129.
- [7] Rachidi F. Formulation of the Field-to-Transmission Line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993,EMC-35(3):404-407.
- [8] 谢彦召. 地面附近架空线缆 HEMP 响应计算的 Agrawal 和 Taylor 模型比较[J]. 强激光与粒子束, 2005,17(4):575-580.
- [9] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安:陕西科学出版社, 2003.
- [10] 王瑞华. 脉冲变压器设计[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [11] 奥汉德利 R C. 现代磁性材料原理和应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [12] 孙凤举. 模块化高功率亚微妙脉冲直线型变压器驱动源[D]. 西安:西安交通大学, 2002.
- [13] 韩闯. 脉冲功率技术基础讲义[M]. 北京:清华大学, 2003.
- [14] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [15] 李宝忠,程引会,陈明,等. 卡钳式脉冲电流探测器研究[J]. 核电子学与探测技术, 2004,24(6):775-778.
- [16] 谭伟,高本庆,刘波. EMC 测试中的电流注入技术[J]. 安全与电磁兼容, 2003(4):19-22.
- [17] Tesche F M,Lanzon M V,Karlsson T. EMC Analysis Methods Computational Models[M]. New York: Wiley Publishing Co., 1997.
- [18] 何金良. 传导电磁暂态分析讲义[R]. 清华大学, 2004.
- [19] MIL-STD-464. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for system[S]. 1997.
- [20] 程引会. X 光辐照系统综合电磁环境响应研究[D]. 西安:西北核技术研究所, 2005.

#### 作者简介:



李宝忠(1971-),男,山西平遥人,在读硕士研究生,高级工程师,从事电磁脉冲测量及效应研究.email:abao21@hotmail.com.

程引会(1967-),男,陕西凤翔人,在读博士研究生,高级工程师,从事电磁脉冲环境、测量及效应研究。

吴伟(1976-),男,吉林东辽人,在读硕士研究生,高级工程师,从事电磁脉冲环境及效应研究。

何金良(1966-),男,北京人,博士,教授,从事电力系统电磁环境、防雷接地和电工新材料等研究。

周辉(1961-),男,浙江金华人,博士,研究员,从事电磁脉冲环境及效应研究。

马良(1981-),男,河南卫辉人,在读博士研究生,助理研究员,从事电磁脉冲测量及效应研究。

李进玺(1978-),男,甘肃靖远人,在读硕士研究生,助理研究员,从事电磁脉冲环境及效应研究。