2016 年 10 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

#### 文章编号: 2095-4980(2016)05-0742-04

# 圆柱体的外系统电磁脉冲模拟

孙会芳,董志伟,张 芳

(北京应用物理与计算数学研究所,北京 100094)

摘 要:为深入研究具有复杂角分布和能谱分布的系统电磁脉冲(SCEMP)的规律和特性,利用三维全电磁粒子模拟(PIC)程序,并添加相应功能模块——用蒙特卡洛方法实现电子发射的余弦角分布和指数能谱分布。模拟计算光电子由圆柱端面向外发射引起的 SGEMP 模型,选取 2 组 X 射线数据进行计算,并与文献估算结果进行对比。2 次计算所得结果量级都与文献结果一致,说 明本程序可用于深入研究各种 SGEMP 问题,为抗核加固和 SGEMP 效应研究提供基础数据。

关键词:全电磁粒子模拟(PIC)程序;系统电磁脉冲;角分布;抗核加固

中图分类号: TN753.4 文献标识码: A doi: 10.11805/TKYDA201605.0742

# Simulation analysis of external SGEMP effects of cylinder

SUN Huifang, DONG Zhiwei, ZHANG Fang

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to research System-Generated Electromagnetic Pulse(SGEMP) effects which have complicated angular distribution and energy spectra, the 3-D Particle In Cell(PIC) code is used and the function module is appended to it to characterize cosine angular distribution and exponential energy spectra of photoelectrons. The external SGEMP effects induced by photoelectrons emitted from cylinder top surface are simulated by the 3-D PIC code. Two sets of parameters of X ray are adopted for simulation and the results are compared with the data from literature. It is shown that both results are the same in magnitude as that from literature. It is concluded that the PIC code is available for studying SGEMP effects to support basic data for nuclear hardening.

**Key words:** Particle In Cell code; System Generated Electromagnetic Pulse; angular distribution; nuclear hardening

系统电磁脉冲(SGEMP)是核电磁脉冲的一个分类,是指 X 或 γ 射线与系统表面相互作用产生的电磁脉冲<sup>[1]</sup>。 由于系统电磁脉冲可直接在系统内部产生,无法使用电磁屏蔽的方法屏蔽,其对系统内电子部件的危害不可忽 视<sup>[2]</sup>,因此抗 SGEMP 效应是抗核加固的重点。美国在 20 世纪 70 年代对 SGEMP 基本规律和特性进行了系统的 理论分析和数值模拟研究,为至今仍在持续的 SGEMP 效应研究奠定了基础<sup>[3-8]</sup>,但受模拟发展水平的限制,所 用程序大都局限于二维,对物理规律的认识有局限性。国内有很多单位涉及 SGEMP 的研究,但多侧重于各种 专门效应的计算程序、模拟实验的研究,对 SGEMP 基本规律和特性的研究较少<sup>[9-12]</sup>。为深入研究 SGEMP 的规 律和特性,本文利用三维全电磁粒子模拟(PIC)程序,并添加了相应的功能模块——用蒙特卡洛方法实现 SGEMP 中电子发射的余弦角分布和指数能谱分布,对圆柱体外端面在 X 射线照射下产生光电子,进而产生的 系统电磁脉冲进行了数值模拟研究,并利用文献提供的由二维数值模拟得到的数据图表对计算模型的结果进行 了估算<sup>[13]</sup>,将程序计算结果和估算结果进行了对比。

#### 1 物理模型

图 1 是计算模型示意图。黑体谱 X 射线从一端沿轴向均匀入射到自由空间未接地的圆柱金属系统上,受照 端面向外发射光电子,产生系统表面电流及系统周围的电磁场。圆柱体半径为 10 cm,长度为 20 cm。X 射线的 特征参量有注量  $\phi(J/m^2)$ 、特征温度 T(eV)和时间脉冲<sup>[14]</sup>,取高斯分布的时间脉冲:

 $N(t) = N_0 \sin^2[(\pi t / 2) / \tau]$ 

式中 $\tau$ 为特征时间参量,  $0 \le t \le 2\tau$ 。

分别选取 2 组 X 射线的输入参数进行研究,第 1 组为:  $\phi = 4.0 \text{ J/m}^2$ , T = 2 keV,  $\tau = 25 \text{ ns}$ ,  $Y = 2 \times 10^{12} \text{ n/J} = 3.2 \times 10^{-7} \text{ C/J}$ 。 Y 是光电产额(C/J),与 X 射线 的特征温度和受照面材料有关。第 2 组:增大 X 射线的注量为原来的 100 倍, 即  $\phi = 4.0 \times 10^2 \text{ J/m}^2$ ,其他参数不变。



(1)

Fig.1 Model sketch 图 1 模型示意图

## 2 SGEMP 的规范变换及表面电场和侧面电流的估算

圆柱体是 SGEMP 效应研究的典型几何结构,将各个入射参数作规范化处理,可使解的通用性增强。文献中首先给出半径为 *R*,长度为 2*R*的标准圆柱体的 SGEMP 输入参数的规范变换,得到特征输入参数如下<sup>[13]</sup>:

归一化的脉冲时间: τ/(2πR/c),其中τ为时间的特征参量,R 为圆柱体半径,c 为光速。此参数值远大于 1时为准静态激发,远小于1时为瞬态激励,当比值接近1时将出现谐振效应。 φR 为注量积,是注量和圆柱体 半径的乘积。c 为特征能量,即X 射线的特征能量。

SGEMP 响应结果主要由 2 个特征输出参数来描述:一是发射面上的垂直电场  $E_z$ ; 二是通过圆柱侧面中心的电流,与磁场有关系:  $I = 2\pi R H_{\phi}$ 。

文中将特征参数作为输入参数,由二维 ABORC(Arbitrary-Body-Of-Revolution Computer Code)程序解规范化的方程计算 SGEMP 的响应,跨越注入 X 射线的线性区域(X 射线的注量较低,发射的光电子运动不受其本身电磁场的影响)和非线性区域(X 射线的注量较高,发射的光电子运动受到本身电磁场的影响,产生非线性效应)作了大量计算,并以图表形式给出了特征输出参数随各个输入参数的变化关系,可用于 SGEMP 特征场量量级的估算和场随输入参数变化趋势的判定。

将本计算中的输入参数进行规范化处理,用文献中的图表估算 SGEMP 响应的 2 个特征场量。将第 1 组 X 射线的输入参数代入得到规范变换后的参数,通过  $E_z R \in [10^3, 10^4]$  V,可估算出其表面电场最大值约为  $E_z \approx 10^4 \text{ V/m} \sim 10^5 \text{ V/m};$ 侧面电流最大值约为 $I = 2\pi R H_{\ell} \approx 0.1 \text{ A} \sim 1.0 \text{ A}$ 。将第 2 组 X 射线的输入参数代入,得 到表面电场的最大值约为 $E_z \approx 10^5 \text{ V/m} \sim 10^6 \text{ V/m};$ 侧面电流最大值约为 $I = 2\pi R H_{\ell} \approx 1.0 \text{ A} \sim 10.0 \text{ A}$ 。

需要说明的是,用于估算的文献是有关 SGEMP 规律和特性研究的典型文献之一,多次被引用,其对 SGEMP 研究方法和规律认识的正确性已得到界内充分的认可。但受模拟技术发展的限制,其所用的二维程序不 能反映出 SGEMP 的三维特性,计算结果的准确性也不够。为了深入研究 SGEMP 的特性和规律,必须发展三维 模拟能力,应用半开放式的三维 PIC 程序研究本文中的 SGEMP 模型,为了更加贴近 SGEMP 的物理本质,还 自行添加相应的功能模块。

#### 3 数值模拟结果及分析

#### 3.1 计算条件

由 X 射线的输入参数可以得到发射光电子的特征参量,受照面发射的总光电子数(正比于 X 射线注量):

$$Q_{\rm TOT} = YA\phi$$

(2)

(3)

式中:  $Q_{\text{rer}}$  是总发射电荷(C); A 是发射面的面积(m<sup>2</sup>)。

光电子的能谱(黑体谱 X 射线产生的光电子的能谱为指数谱):

$$\mathrm{d}n \,/\, \mathrm{d}E = N_0 \,\mathrm{e}^{-E/E_1}$$

式中: *E* 是电子能量(keV); *N*。是常量; *E* 是表征射线能量的一个参数,对黑体谱射线可用黑体温度近似代替,但不是黑体温度本身。黑体谱 X 射线产生的光电子的角分布是余弦角分布,即发射电子数与 cos *θ* 成正比(*θ* 为电子发射方向与发射面法线的夹角)。光电流的时间谱一般认为等同于 X 射线的时间谱。

将光电子的特征参量作为输入参数,用三维全电磁粒子模拟程序进行模拟计算,发射电子的时间函数由式 (1)决定,取 *τ* 为 25 ns,电子发射的总时间 *t* 为 50 ns,总发射流可由式(2)得出,由式(1)和式(2)联立求解可得出 *N*。的值。计算空间大小: *x*=30 cm, *y*=30 cm, *z*=50 cm;半径为 10 cm,长度为 20 cm 的圆柱体置于中间位置, 电子由右端面均匀向外发射,计算外边界设置理想吸收边界条件,即 PML 吸收边界。

第 14 卷

所用的三维全电磁粒子模拟程序为半开放式的,为实现 SGEMP 特有的复杂角分布和能谱分布,在程序中 添加了相应的功能模块——用蒙特卡洛随机抽样的方法实现电子发射的余弦角分布和指数能谱分布。

## 3.2 计算结果

取第 1 组 X 射线所得数据进行计算,图 2 为不同时刻电子三维相空间分布图,由于电子分布为余弦角分布,其法向发射的电子密度最大;由于其能谱为指数分布,发射的电子都分布在同一球面内。

图 3 为不同时刻电场的空间分布,在发射电子的时间内发射面附近电场最大,当电子发射结束时仍有电场 存在,说明由于电荷密度较大,空间形成虚阴极振荡,产生了非线性效应。



图 4 为发射面中点法向电场和侧面中点处横向磁场波形,由图中读出发射面电场  $E_z$ 最大值为 21 kV/m,侧面磁场  $B_{\phi}$ 最大值为 9.0×10<sup>-7</sup> T,得出电流最大值为  $I_{max} = 2\pi r H_{\phi max} = 0.45$  A,发射面电场和侧面电流最大值都与估算结果量级一致。

取第 2 组参数进行计算,图 5 为发射表面法向电场和侧面中点角向磁场波形,由图中读出发射表面电场  $E_z$ 最大值为 2.5×10<sup>5</sup> V/m,侧面磁场  $B_{\phi}$ 最大值为 1×10<sup>-5</sup> T,得出侧面电流最大值为 5.0 A,发射面电场和侧面电流最大值都与估算结果量级一致。





Fig.5 Electromagnetic field waveform received from second group data 图 5 第 2 组数据所得电磁场的波形图

# 4 结论

本文利用三维 PIC 程序研究了圆柱端面向外发射的 SGEMP 模型,采用蒙特卡洛方法在程序中添加功能模块,实现光电子的余弦角分布和指数谱能量分布。并用文献提供的由二维模拟得到的图表对 SGEMP 的特征场量进行估算,选取 2 组数据进行研究,模拟结果和估算结果量级一致,规律正确,说明本程序可用于具有复杂角分布和能谱分布的 SGEMP 深入研究,为抗核加固和 SGEMP 效应研究提供基础数据。

## 参考文献:

- [1] 王泰春,贺云汉,王玉芝. 电磁脉冲导论[M]. 北京:国防工业出版社, 2011. (WANG Taichun, HE Yunhan, WANG Yuzhi. Introduction to Electromagnetic Pulse[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.)
- [2] 程引会,周辉,李保忠,等. 光电子发射引起的柱腔内系统电磁脉冲的模拟[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(8):1029–1032. (CHENG Yinhui,ZHOU Hui,LI Baozhong, et al. Simulation of system-generated electromagnetic pulse caused by emitted photoelectron in cavity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004,16(8):1029–1032.)
- [3] WENAAS E P,ROGERS S,WOODS A J. Sensitivity of SGEMP response to input parameters[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1975,22(6):2362-2367.
- [4] CARRON N J,LONGMIRE C L. Scaling behavior of the time-dependent SGEMP boundary layer[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978,25(6):1329-1335.
- [5] HIGGINS D F,LEE K S H,MARIN L. System-generated EMP[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1978, 26(1):14-22.
- [6] MICHAEL J Schmidt. Elementary external SGEMP model for system engineering design[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1985,32(6):4295-4299.
- [7] HOLLAND R. Comparison of FTDT particle pushing and direct differencing of Boltzmann's equation for SGEMP problems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1995,37(3):433-442.
- [8] JOHN W. Graphical interface for the physics-based generation of inputs to 3-D MEEC SGEMP and SREMP simulations[C]// The 16th Annual Hardened Electronics and Radiation Technology(HEART) Conference. Monterey, CA, USA: USDOE Office of Defense Programs, 1999.
- [9] 周辉,李宝忠,王立君,等.不同注量 X 射线系统电磁脉冲响应的数值计算[J]. 计算物理, 1999,16(2):157-161. (ZHOU Hui,LI Baozhong,WANG Lijun,et al. The calculation of SGEMP response in various ranges of X-ray fluence. Chinese Journal of Computational Physics, 1999,16(2):157-161.)
- [10] 陈雨生,华鸣. 系统电磁脉冲的数值模拟技术[J]. 计算物理, 1992,9(4):663-668. (CHEN Yusheng,HUA Wu. The simulation technique of system-generated electromagnetic pulse[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1992,9(4): 663-668.)
- [11] 周辉,郭红霞,李宝忠,等. 金属壳体和电缆的系统电磁脉冲响应[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(5):645-648. (ZHOU Hui,GUO Hongxia,LI Baozhong, et al. Response of metal shell and cables to system generate electromagnetic pulse effects[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004,16(5):645-648.)
- [12] 李宝忠,周辉,郭红霞,等. 圆柱模型在金属腔体内的系统电磁脉冲响应[J]. 原子能科学技术, 2004,38(5):448-451.
  (LI Baozhong,ZHOU Hui,GUO Hongxia, et al. Research on system-generated electromagnetism pulse response for column model in metal cavity[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004,38(5):448-451.)
- [13] WOODS A J, WENNAS E P. Scaling laws for SGEMP[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1976,23(6):1903-1908.

#### 作者简介:



**孙会芳**(1974-), 女,山东省德州市人,硕 士,副研究员,主要研究方向为高功率微波技 术、电磁脉冲效应.email:sun\_huifang@iapcm. ac.cn. 董志伟(1962-),男,河北省滦县人,博 士,研究员,主要研究方向为高功率微波技 术、脉冲功率技术、太赫兹技术.

张 芳(1984-), 女,河北省保定市人, 硕士,助理研究员,主要研究方向为脉冲功率 技术、太赫兹技术.