

文章编号: 2095-4980(2018)06-1120-05

用粒子模拟方法研究 SG-III 装置的腔体 SGEMP

徐志谦^{a,b}, 孟 萃^{a,b}, 刘以农^{a,b}

(清华大学 a.工程物理系; b.粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: X 射线照射金属腔体后, 会在内部空间中发射出大量光电子, 从而产生很强的系统电磁脉冲(SGEMP)。激光惯性约束聚变(ICF)装置内的 X 射线环境非常复杂, 在靶室内工作的诊断设备即使有良好的电磁屏蔽, 仍会面临严重的 SGEMP 干扰。以神光-III(SG-III)装置靶室内部的 X 射线环境为背景, 采用时偏时域有限差分(FDTD)方法和粒子模拟(PIC)方法对二维圆柱腔体模型内部的 SGEMP 进行数值模拟。针对电磁场的振荡现象, 在传统的粒子模拟算法基础上采用时偏方法进行滤波, 去除了高频误差对计算的影响, 结果更加准确。最后, 得到的 SG-III 装置靶室内 SGEMP 干扰约为 1.5 MV/m。

关键词: SG-III 装置; 系统电磁脉冲; 粒子模拟; 时域有限差分法

中图分类号: TN972⁺.2; O434.14 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201806.1120

Study on cavity SGEMP of the SG-III facility by particle-in-cell method

XU Zhiqian^{a,b}, MENG Cui^{a,b}, LIU Yinong^{a,b}

(a.Department of Engineering Physics; b.Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: When the X-ray irradiates metal cavities, a large number of photoelectrons will be emitted into the internal space, resulting a strong System Generated Electromagnetic Pulse(SGEMP). The X-ray environment within laser Inertial Confinement Fusion(ICF) facilities is very complicated, so diagnostics working in target chamber area will face severe SGEMP interference even with good electromagnetic shielding. In light of the X-ray environment inside target chamber of Shenguang-III (SG-III) laser facility, a numerical simulation of the EM field inside a two-dimensional cylindrical cavity model is completed with the time-biased Finite-Difference Time-Domain(FDTD) and Particle-In-Cell(PIC) methods. As for the oscillation of electromagnetic field, based on the classic PIC method, the time-biased arithmetic is utilized to filter the waveform. Therefore, the influence of high-frequency error on the calculation result is removed, and the simulation would be more accurate. Finally, the SGEMP interference in the SG-III laser facility is estimated to be about 1.5 MV/m.

Keywords: SG-III facility; System Generated Electromagnetic Pulse; Particle-In-Cell; Finite-Difference Time-Domain

X 射线等电离辐射作用到金属壳体表面时, 会发生光电效应, 向内部空腔发射大量光电子。这些自由电子具有一定的能量和角分布, 电子运动形成空间电流, 并会自洽地激发出很强的瞬态电磁场。这种完全由系统自身电子产生的电磁场称为系统电磁脉冲(SGEMP)。在 20 世纪 70 年代, 国外就开始研究导弹和卫星系统在高空核环境中受到的 SGEMP 干扰, 国内也开展了一些相关研究。由于国际上已经禁止进行核试验, 而利用浓密等离子体焦点装置(Dense Plasma Focus Facility, DPF)、改装相对论电子束(Relativistic Electron Beams, REB)或电流注入等方法进行的 SGEMP 模拟实验, 又受到 X 射线注量低, 对真空环境要求高或信号干扰大等因素的制约, 实施难度大^[1-2], 所以数值模拟成为了研究 SGEMP 干扰的主要手段。Woods 等建立了多种腔体模型, 利用 ABORC(Arbitrary Body of Revolution Code)程序进行了大量数值计算, 探究了 X 射线注量、能谱、脉冲宽度和腔内气体压力等参数对 SGEMP 时域响应的影响, 并发现其峰值场强可以达到几 MV/m^[3-5]。西北核技术研究所的研究人员计算得到核爆炸释放的脉冲 X 射线对飞行器产生的 SGEMP 响应超过 5 MV/m^[6-7]。

收稿日期: 2017-09-06; 修回日期: 2017-10-24

在高功率激光装置的打靶实验中, 研究人员发现靶室内的设备即使进行了屏蔽设计仍然会出现电磁干扰现象。这是由于诊断仪器上用于阻隔逃逸电子激励 EMP 干扰的金属屏蔽层, 在受 X 射线辐照后会产生大量自由电子, 从而激发出系统电磁脉冲。美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)开展了许多关于 X 射线环境和 SGEMP 效应的测量和研究工作, 预计靶室内有超过 1 MV/m 的 EMP 和 20~30 kJ/sr 的 X 射线环境^[8-9]。从 2015 年开始, NIF 的研究小组联合圣地亚国家实验室和英国原子武器研究所先后进行了两次验证实验, 分别用能量为 7 keV 和 13 keV 的 X 射线源照射 SGEMP 诊断装置, 得到了准确而全面的实验数据, 并计划使用更高能量的激光和 X 射线进行后续实验。SG-III 装置是我国新建的高功率激光装置, 主要进行惯性约束聚变(ICF)的相关研究。SG-III 装置的靶室直径为 6 m, 包含 6 个束组、共计 48 束的三倍频钷玻璃激光, 并具备在 10 ns 脉冲宽度范围内的整形能力^[10]。可以推测, SG-III 装置靶室内的辐射环境也非常复杂, 会面临不可忽视的 SGEMP 干扰问题。目前, SG-III 装置还在完善中, 不能对 SGEMP 进行有效的实验测量, 所以本文通过数值模拟方法对这一问题进行研究。

1 计算模型及方法

1.1 壳体的物理模型

为了屏蔽 EMP 造成的干扰, 在靶室内工作的诊断设备外都会有一个金属壳体。研究表明, 可以用一个简单的圆柱腔体模型来代替屏蔽壳体^[11], 如图 1 所示。模型的材料为铝, 直径 $d=20$ cm, 长度 $L=30$ cm, X 射线沿着腔体对称轴方向从一个端面均匀照射, 并使内表面均匀发射出大量的前向电子。

由于圆柱体的对称性, 模型可以简化到二维的柱坐标系中。计算时利用时域有限差分(FDTD)方法和粒子模拟(PIC)方法求解任意时刻区域内的电磁场和电子运动信息。

1.2 FDTD 方法

FDTD 方法通过 K S Yee 提出的网格划分方式^[12], 以中心差分的形式在空间和时间上对电磁场进行离散, 经过不断迭代推进就可以求出任意时刻的电磁场。在 Yee 氏网格中, 电流密度离散到网格节点上, 但电场和磁场分量的取值点并非在网格点上, 而是交叉放置, 电场分量位于网格棱边的中点, 磁场分量位于网格的中心。

式(1)是 Maxwell 微分方程组, $\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{J}$ 代表网格节点处的电场强度、磁场强度和电流密度, $\mathbf{D}, \mathbf{B}$ 则表示电通量密度和磁通量密度。

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

由于腔体是各向同性的线性媒介, 满足成分方程式(2), ε 是介电常数, μ 是磁导系数。

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \end{cases} \quad (2)$$

按照中心差分进行处理后就转换为式(3)的差分格式, 物理量上标表示所处的时刻, Δt 为计算的时间步长。

$$\begin{cases} \mathbf{E}^{n+1} = \mathbf{E}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon} (\nabla \times \mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{J}^{n+\frac{1}{2}}) \\ \mathbf{H}^{n+\frac{3}{2}} = \mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} (\nabla \times \mathbf{E}^{n+1}) \end{cases} \quad (3)$$

这样, 每个时刻的电场分量都可以根据 Δt 时间之前的电场分量和 $\Delta t/2$ 时间之前的磁场分量与电流密度分量计算得到, 每个时刻的磁场分量都可以根据 Δt 时间之前的磁场分量和 $\Delta t/2$ 时间之前的电场分量计算得到。此外, 由于差分式引入了误差项, 必须考虑迭代过程中的收敛性和稳定性。一般地, 只要空间步长和时间步长满足式(4)的 Courant 稳定性条件, 迭代计算的过程就是收敛的^[12]。

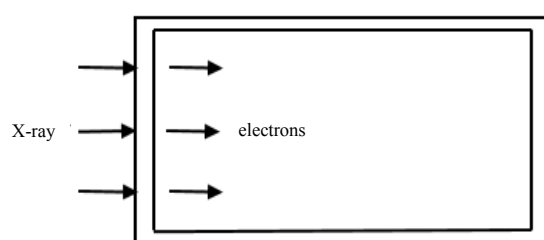


Fig.1 Physical model of the metal shield cavity outside diagnostics

图 1 诊断设备屏蔽壳体的物理模型

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (4)$$

在二维柱坐标系中, 由于空间的对称性, 电磁场分布大大简化。电场强度和电流密度都只有径向分量和轴向分量, 而磁场强度则只有环向分量。所以, 差分式(3)可以进一步简化, 将电磁场直接分解到 3 个互相垂直的方向上, 整理后就可以得到径向电场、轴向电场和环向磁场等场强分量的计算公式。

1.3 PIC 方法

考虑到发射电子的总数很大, 可以将大量特征接近的电子归为一个具有一定大小的正方形电子云, 以简化计算。将电子云占据某个网格面积的比例作为权重因子, 利用插值方法可以将周围 4 个网格点上电磁场的作用等效到这个粒子云的中心位置, 同时将电荷密度的空间分布离散到网格节点上。

因为电子的速度很高, 甚至可能接近光速, 所以必须考虑相对论效应, 一般采用 Boris 方法来求解运动方程^[13]。定义 $\mathbf{u} = \gamma \mathbf{v}$, $\mathbf{v}$ 是粒子云的速度, 利用中心差分形式可以将运动方程改写为式(5)。

$$\begin{cases} \frac{\mathbf{x}^{n+1} - \mathbf{x}^n}{\Delta t} = \frac{\mathbf{u}^{n+\frac{1}{2}}}{\gamma^{n+\frac{1}{2}}} \\ \frac{\mathbf{u}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{u}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{q}{m} (\mathbf{E}^n + \frac{\mathbf{u}^n}{\gamma^n} \times \mu \mathbf{H}^n) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}$ 代表粒子云的位置; $\gamma = 1/\sqrt{1+u^2/c^2}$, 表示相对论因子。电磁场对粒子云的作用效果可以分解为两次电场的作用和一次磁场的作用, 电场的作用会引起粒子云的半加速, 而磁场的作用则会导致粒子云发生旋转。这样就得到了粒子云速度和位置的求解方法, 进而可以计算出空间电流密度。电流密度作为源项, 可以求解 Maxwell 方程组, 形成自洽的过程。

1.4 时偏算法

研究发现, 当粒子云的速度达到相对论水平时, 在 PIC 方法的计算过程中将空间电荷离散到网格节点上的插值分配会引起电荷分布高速的非统计性跳变, 从而给结果带来高频噪声。这些“数值上”产生的场又会作用到粒子的运动过程中, 通过自洽迭代的过程不断积累, 导致计算出的结果不再准确。时偏方法正是为了消除这些不必要的高频分量而对 FDTD 方法进行的优化^[14]。

在时偏 FDTD 算法中, 电场的计算只利用一个时刻的磁场强度, 而采用式(6)的半隐式差分, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 是时偏因子, 代表各时刻磁场的重要程度, 满足 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 。

$$\mathbf{E}^{n+1} = \mathbf{E}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon} \left[\nabla \times (\alpha_1 \mathbf{H}^{n+\frac{3}{2}} + \alpha_2 \mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} + \alpha_3 \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}) - \mathbf{J}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (6)$$

利用连续 3 个时刻的磁场加权平均后的磁场强度来计算电场, 以减小误差, 增强结果的抗干扰性。为了达到滤波的目的, 去除高频噪声, 还需要松弛迭代的光滑特性。引入松弛因子 $\tau_i (i=1,2,\dots,I)$, 满足 $1 = \tau_1 > \tau_2 > \dots > \tau_I > 0$, 在反复进行的 I 次迭代过程中对计算结果进行修正。所以, 计算电场强度的差分方程为:

$$\mathbf{E}^{n+1,i} = (1 - \tau_i) \mathbf{E}^{n+1,i-1} + \tau_i \mathbf{E}^{n+1,I} + \frac{\tau_i \Delta t}{\varepsilon} \left[\nabla \times (\alpha_1 \mathbf{H}^{n+\frac{3}{2},i-1} + \alpha_2 \mathbf{H}^{n+\frac{1}{2},I} + \alpha_3 \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2},I}) - \mathbf{J}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (7)$$

2 数值模拟结果及分析

参考过去的研究以及 SG-III 装置靶室内预计的辐射环境^[7-8], 在计算中假定 X 射线的能量为 2 keV, 总注量为 4.2 J/cm²。X 射线照射腔体端面后产生的出射电子可以根据蒙特卡罗方法进行计算。参考周辉、程引会等的工作^[6-7,15], 本研究中模拟出射电子的数量为 10^{13} , 并且所有电子均以 2 keV 的能量垂直受照端面出射, 即不考虑电子的能谱分布和角分布。电子在 5 ns 的时间内以高斯谱的形式持续发射, 如图 2 所示。

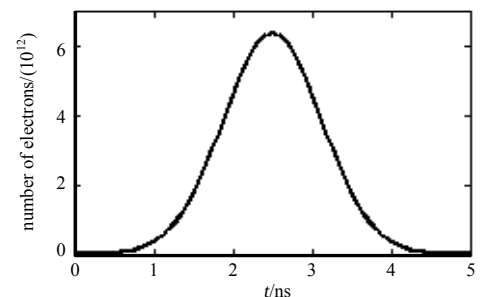


Fig.2 Time waveform of the emitted electrons
图 2 发射电子的时间谱

本文编写了 SGEMP 计算程序,通过数值模拟得到腔体内部采样点(发射面上半径 $r=R/2$ 处)的电磁场强度的时域波形,并对结果进行了频谱分析。本文给出了 FDTD 方法和时偏 FDTD 方法的计算结果,通过比较验证时偏算法对数值模拟的优化能力。

2.1 FDTD 方法的计算结果

FDTD 方法得到的电场时域波形如图 3 所示。在开始的一段时间内,电场强度逐渐升高;随后,电场波形开始出现振荡,并且不断加剧,甚至出现负值,几乎看不出任何明显的规律。为了方便分析,在图 4 中画出了电场波形的包络线,发现电场强度呈现出先增加后减小的趋势,整体而言只有一个明显的峰,接近高斯波形,和以往的研究结果比较接近。电场波形及其包络线在开始的一段时间内比较接近,然后波形出现剧烈振荡,二者表现出显著差别。分析认为,这是由于在计算过程中出现了一定的数值误差,这些误差项随着时间不断积累,影响越来越大,最后掩盖了真实信号。接着,本文对电场的时域信号进行了傅里叶变换,得到了频谱,如图 5 所示。图中的频率分布在两个部分,以低频为主的 2 GHz 以下部分和以 6 GHz 为中心的高频部分。其中,低频部分很有可能对应着真实的电场信号,而高频中心的存在难以在物理上进行合理的解释,推测是计算过程中引入的噪声。这些噪声干扰不断累积,最后淹没了实际的电场波形。

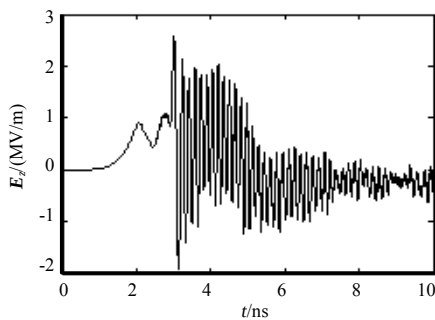


Fig.3 Waveform of the electric field
图 3 电场的波形

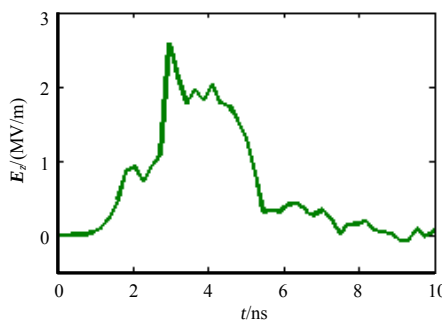


Fig.4 Envelope of the electric field waveform
图 4 电场波形的包络

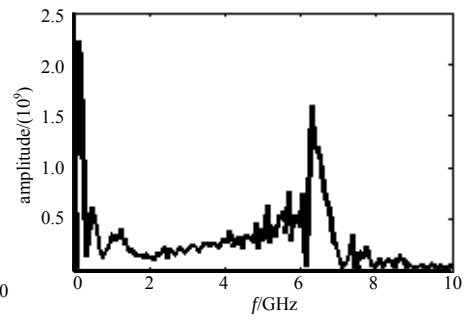


Fig.5 Frequency spectra of the electric field
图 5 电场的频谱

2.2 时偏 FDTD 方法的计算结果

在加入时偏算法后再次对电磁场进行了计算,得到的轴向电场波形及其频谱如图 6 和图 7 所示。与没有加入时偏算法时的计算结果相比,电场波形平稳了许多,与发射电子的谱形非常接近。这是因为电磁场是电子运动激发出来的,电子发射速度快的时候,电荷密度大,空间电流高,激发的电磁场自然也就更强,电场的峰值与发射电子的峰值几乎是同时出现的。在频谱之中,高频部分已经消失,说明之前的计算结果中确实存在高频噪声。现在滤掉这些干扰之后,电场波形恢复了正常,振荡明显减弱,电场的方向也不再反复变化了。根据加入时偏算法后的计算结果可知,电场强度的峰值为 1.5 MV/m,磁场强度的峰值为 277 A/m,SGEMP 的频率主要分布在 1 GHz 以下。

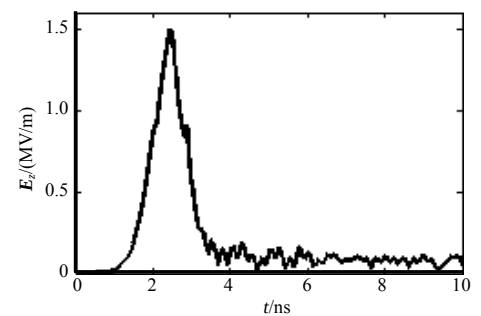


Fig.6 Time-domain waveform of the electric field
图 6 电场的时域波形

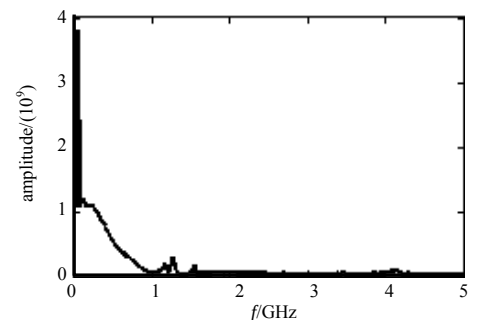


Fig.7 Frequency spectra of the electric field
图 7 电场的频谱

3 结论

在 SG-III 装置的靶室内,SGEMP 会对诊断设备带来严重的干扰。基于圆柱腔体模型,本文利用时偏 FDTD 方法和 PIC 方法编写了二维 SGEMP 数值模拟程序,在传统 FDTD 方法的基础上采用时偏算法消除了非物理的高频振荡数值误差,得到了更加准确的电磁场波形和频谱信息,预测出 SG-III 装置靶室内的 SGEMP 干扰应该在 1.5 MV/m 附近,对高功率激光装置具有实际意义。

参考文献:

- [1] 周开明,王艳,邓建红. 典型线缆 SGEMP 综合效应试验方法[C]// 中国核科学技术进展报告. 北京:中国核学会, 2013(3):115-119. (ZHOU Kaiming,WANG Yan,DENG Jianhong. Research for SGEMP synthesize response of typical-cable bind[C]// Progress Report on China Nuclear Science & Technology. Beijing:Chinese Nuclear Society, 2013(3):115-119.)
- [2] 刘焱. SGEMP 模拟实验方法探讨[C]// 第 9 届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集. 北京:[s.n.], 1998:246-248. (LIU Yan. Study on SGEMP-simulated experiment[C]// Proceedings of the 9th National Conference on Nuclear Electronics & Nuclear Detection Technology. Beijing:[s.n.], 1998:246-248.)
- [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] LOPEZ O,RICH W F. Dynamic internal electromagnetic pulse calculations in three spatial dimensions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1973,20(6):14-19.
- [5] WOODS A J,WENAAS E P. Pre-charging effects on the SGEMP response[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978,25(6):1365-1369.
- [6] 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.)
- [7] 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[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1999,16(2):157-161.)
- [8] MAY M J,FOURNIER K B,COLVIN J D,et al. Bright X-ray stainless steel K-shell source development at the National Ignition Facility[J]. Physics of Plasmas, 2015,22(6). Doi:10.1063/1.4922751.
- [9] BROWN C G,BOND E,CLANCY T,et al. Assessment and mitigation of electromagnetic pulse(EMP) impacts at short-pulse laser facilities[J]. Journal of Physics Conference Series, 2010,244(3):032001.
- [10] 余波,黄天暄,李三伟,等. 神光 III 主机双束组激光间接驱动内爆实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2015,27(9):124-129. (YU Bo,HUANG Tianxuan,LI Sanwei,et al. Experimental study on laser indirect-drive implosion with double quads on SG-III facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015,27(9):124-129.)
- [11] WOODS A J,WENAAS E P. SGEMP geometry effects[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1975,22(6):2374-2380.
- [12] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2005:1-9,32-35. (GE Debiao,YAN Yubo. Finite-difference time-domain method for electromagnetic waves[M]. Xi'an,China:Xidian University Press, 2005:1-9,32-35.)
- [13] 周俊. 电磁粒子模拟方法及其应用研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009:18-23,48-50. (ZHOU Jun. Electromagnetic particle-in-cell simulation method and its applications[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2009:18-23,48-50.)
- [14] 周俊,祝大军,刘大刚,等. 粒子模拟中的时偏 FDTD 算法[J]. 计算物理, 2007,24(5):566-572. (ZHOU Jun,ZHU Dajun,LIU Dagang,et al. Time-biased FDTD method for particle-in-cell simulation[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2007,24(5):566-572.)
- [15] 李进玺,程引会,吴伟,等. 圆柱腔体内系统电磁脉冲计算软件[C]// 全国核电子学与核探测技术学术年会. 北京:中国核学会, 2008:735-739. (LI Jinxi,CHENG Yinwei,WU Wei,et al. Software for calculating system generated electromagnetic pulse in cylindrical cavity[C]// Proceedings of the 14th National Conference on Nuclear Electronics & Nuclear Detection Technology. Beijing:Chinese Nuclear Society, 2008:735-739.)

作者简介:



徐志谦(1995-), 男, 四川省眉山市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为强电磁脉冲辐射环境.email:xzq17@mails.tsinghua.edu.cn.

孟 萃(1970-), 女, 长春市人, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为高功率电磁环境及效应.

刘以农(1963-), 男, 北京市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为核电子学.