# 考虑参数不确定性的高空电磁脉冲 E1 分量环境计算及分析<sup>\*</sup>

# 董 宁,谢彦召

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室,瞬态电磁环境与应用国际联合研究中心,西安 710049)

摘 要: 高空电磁脉冲的早期分量幅值高、频谱宽、分布范围广,是高空核爆的电磁效应的重要组成部分。分析了国内外高空电磁脉冲早期分量仿真计算法的研究进展,并选取基于高频近似并考虑电子与电磁场自治作用的 EXEMP 算法进行详细介绍,通过数值计算结果总结了高空电磁脉冲的时域波形和空间分布随场源当量、爆高等参数变化的规律,与 IEC 标准约定的波形时域和空间特征一致。针对 HEMP 计算中部分参数的不确定性,分析参数取值偏差和波动对电磁脉冲计算结果的影响,使用多项式混沌方法联合 Sobol 全局敏感度指标对其进行不确定量化,得到电磁脉冲关键值可能分布的上下界、分布的概率密度等信息,分析各参数在特定取值范围内对电磁脉冲转征参数的影响及联合影响。

关键词: 高空电磁脉冲; 电磁场计算; 不确定性; 不确定量化 中图分类号: O441.2 **文献标志码:** A **doi**:10.11884/HPLPB201931.190140

# Early-time high-altitude electromagnetic pulse simulation and analysis considering parameter uncertainty

Dong Ning, Xie Yanzhao

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,

National Center for International Research on Transient Electromagnetic Environments and Applications, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The early-time high-altitude electromagnetic pulse is an important component of the electromagnetic effect of high-altitude nuclear burst. The relative simulation research work at home and abroad are studied and compared. One of the classical methods EXEMP is introduced in this paper in detail. The numerical result is compared with the IEC reference value of IEC 61000-2-9. The time domain waveform and spatiotemporal distribution of HEMP are studied using numerical result. The influence of burst parameter including energy and height are studied, the uncertainty is quantified by polynomial chaos method and global sensitivity indices.

Key words: HEMP; electromagnetic simulation; uncertainty; uncertainty quantification

PACS: 41.20. Jb

高空电磁脉冲(HEMP)是指距地面 30 km 以上的核爆产生的各种电离源与空气分子、地球磁场相互作用 而产生的电磁脉冲辐射效应<sup>[1-2]</sup>,其中一个重要的组成成分是由瞬发 γ 源引起的高空电磁脉冲的早期分量 (E1),有幅值高、频谱宽、分布范围广的特点。为了分析高空电磁脉冲早期成分的时频域特征、空间分布等规 律,需要遵从第一性原理对电磁脉冲的产生过程中的物理过程进行建模。高空核爆后,瞬发 γ 辐射远离爆点运 动并与空气分子相互作用产生康普顿散射,产生大量 γ-康普顿电子,同时形成电子离子引起大气电离。从 γ 辐射中获得初始动能的康普顿电子形成康普顿电流,也称为初级电流。运动的康普顿电子与空气分子发生碰 撞产生次级电子并在空间电磁场的作用下运动形成次级电流。初级电流、次级电流与空间电磁场相互作用,并 在非球对称的地磁场、空气密度等因素影响下产生电磁脉冲。HEMP的产生过程可以表征为一个包含康普顿 电子、次级电子、空间电磁场(包括地磁场)的自洽模型,为了计算HEMP,需要对康普顿电子、次级电子进行建

\* 收稿日期:2019-05-02; 修订日期:2019-06-05
 基金项目:西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室基金项目(EIPE19114)
 作者简介:董 宁(1995-),女,博士研究生,从事电磁兼容传输线理论及电磁场仿真研究;dongning96@163.com。
 通信作者:谢彦召(1973-),男,博士,从事电磁脉冲研究;yzxie@xjtu.edu.cn。

模计算、并基于麦克斯韦方程求解空间中的电磁过程。本文对比了国内外经典的高空电磁脉冲仿真方法和特点,介绍了考虑自洽效应的 EXEMP 算法,对比了使用 EXEMP 算法的数值结果与 IEC 中推荐的 HEMP 波形和空间分布特征,通过混沌多项式联合 Sobol 敏感度分析法对 HEMP 计算中的不确定参数进行了分析。

#### 1 高空电磁脉冲经典仿真方法

针对图 1 所示电磁脉冲的产生机理,国内外研究者提出了多种 HEMP 仿真算法和计算模型,根据求解器 可分为基于公式求解的数值计算和基于粒子模拟软件的仿真;根据计算模型维度可分为一维、二维和三维求 解;按照物理过程可分为自洽与非自洽的求解<sup>[1-18]</sup>。



 Fig. 1
 Generation mechanism of early-time HEMP

 图 1
 高空电磁脉冲 E1 分量产生机理

1965年,Latter和Karzas首次提出了高空电磁脉冲全过程的求解算法,针对电磁脉冲的高频特性提出了 高频近似(HFA),认为电磁脉冲关于空间的偏导远小于其对于时间的偏导,从而对麦克斯韦公式进行近似,利 用其差分形式进行有限时域差分的求解。然而该算法没有考虑到电磁场与带电粒子的自洽作用[1-2]。同一时 间,Longmire 等人提出了外行波算法(OWM),即只关注在爆点和观测点连线上(视线上)的电磁过程,将空间 中任意位置的 HEMP 计算转化为一个一维问题,其本质与高频近似一致。此算法将带电粒子运动产生电磁 场、新产生的电磁场反过来继续作用在带电粒子上的自洽作用考虑在内。Longmire 等人利用外行波算法实现 HEMP 计算的程序为 CHAP。1978 年 Longmire 又提出蒙特卡洛法求解康普顿多散射对 CHAP 法进行优 化<sup>[3-6]</sup>。1971 年,Radasky 等人在前期 HEMP 仿真的基础上,利用高频近似将 HEMP 近似为一个横向磁场波 和一个横向电场波的组合,将空间中的麦克斯韦方程简化为两组解耦的偏微分方程,实现 HEMP 二维仿真算 法 HAPS。HAPS考虑了视线圆周带电粒子运动和大气密度等空间因素的不对称性[7-8]。1992年,德国学者 Leuthäuser 基于 Latter 等人的高频近似模型,利用相对论电子运动方程统一描述电磁场与电子运动的自洽作 用,将康普顿散射角度、电子崩等因素都计算在内,开发了 EXEMP 程序,对不同环境参数下的 HEMP 进行了 充分的计算[9-11]。2011年,美国学者 Chester 利用麦克斯韦的积分形式计算 HEMP,这种方法将空间中的电流 作为电磁场的源项,分离了电流与电磁场的计算,从而可以更准确的计算空间电流和电磁场[12-13]。2017年,中 国学者程引会等人使用基于粒子模拟的方法对 HEMP 进行了自洽的计算,将空间中任意位置的 HEMP 电磁 场求解,转化为爆点到观测点视线的圆柱腔体内的二维粒子模拟,该方法将空间中的电子运动、电子与电磁场 互相耦合的多物理过程使用仿真软件直接求解,利用计算机的数值求解取代解析求解,可以得到不同空间电流 条件下的电磁脉冲时域波形[14]。

随着 HEMP 仿真方法的发展, HEMP 物理过程的建模不断细化, 以得到更真实准确的结果。然而由于 HEMP 产生时的环境信息无法准确获取, 现有计算方法都对仿真过程中的部分参数进行了假设或近似, 包括 伽马射线的时间函数, 康普顿电子的散射角度, 大气密度, 大气电离-复合系数, 电子离子形成时滞等。通过理 论分析、对比公开试验数据, 这些近似虽然为计算引入了一些不确定性, 但并没有造成数值结果上的严重错 误<sup>[13,19-20]</sup>。对这些参数进行不确定度量化, 一方面可以量化参数取值及取值在一定范围变化时对结果的影响, 从而判断近似取值的合理性; 另一方面可以得到参数变化时高空电磁脉冲特征参数的变化范围, 为防护设计等 后续研究提供有意义的结论。

#### 2 EXEMP 算法简介

本文以考虑了自洽效应的 EXEMP 算法为例进行介绍,简单介绍高空电磁脉冲的仿真过程,并通过数值计 算结果得到一些规律性的认识<sup>[9]</sup>。EXEMP 算法采用球坐标系,并进行了τ=t-z/c 变换进行了推迟时间坐标 变换,在新坐标系中,任意位置处的计算起始时间推迟至γ辐射以光速传播到达该位置的时间。 康普顿电流与次级电流由相应电子的积分得到

$$\begin{cases} \boldsymbol{J} = \boldsymbol{J}_{p} + \boldsymbol{J}_{s} \\ \boldsymbol{J}_{p} = -eS(r) \int_{0}^{\infty} \boldsymbol{v}_{p}(\tau') f(\tau - \tau' + \frac{1}{c}(r - r')) d\tau' \\ \boldsymbol{J}_{s} = -ekS(r) \boldsymbol{v}_{s}(\tau) \int_{0}^{\tau} (\int_{0}^{\infty} v_{p}(\tau') f(\tau' - \tau'' + \frac{1}{c}(r' - r'')) d\tau'') d\tau \end{cases}$$

$$(1)$$

式中:  $f(\tau)$  为  $\gamma$  辐射能量时间函数; S(r) 为 r 处受  $\gamma$  辐射产生的电子数密度。

电子速度 v<sub>p</sub>, v<sub>s</sub> 通过求解相对论下的电子运动方程

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = -\frac{e}{m\gamma}\boldsymbol{E} - \frac{e}{m\gamma}\boldsymbol{v} \times (\boldsymbol{B}_0 + \boldsymbol{B}_1) - \frac{\boldsymbol{v}_c}{\gamma}\boldsymbol{v}$$
(2)

得到。式(2)右边分别表征为电场对电子的作用、磁场(包括地磁场和电磁脉冲磁场)对电子运动的作用,以及 空气碰撞损耗对电子速度的影响。初速度较高的康普顿电子速度主要受到磁场与空气碰撞损耗的作用影响, 次级电子速度主要受到电场作用影响。对电磁脉冲的电磁计算过程从球坐标中的麦克斯韦方程旋度方程出 发,

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{cases}$$
(3)

方程在新坐标系的新微分算符下可得

$$-\nabla \nabla \cdot \boldsymbol{E} + \nabla^2 \boldsymbol{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{E} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{J}$$
(4)

对于高空电磁脉冲,高频近似认为其电磁场的时域微分远大于空间微分,即∂E/∂τ ≫∂E/∂r。将式(4)以 三个分量形式展开并舍去其中的一阶的空间偏导,可得

$$\begin{cases} \frac{\partial (\mathbf{r} \boldsymbol{E}_{\theta})}{\partial r} = -\frac{2\pi r}{c} \boldsymbol{J} \\ \frac{\partial (\mathbf{r} \boldsymbol{E}_{\varphi})}{\partial r} = -\frac{2\pi r}{c} \boldsymbol{J} \\ \frac{\partial \boldsymbol{E}_{r}}{\partial \tau} = -4\pi \boldsymbol{J} \end{cases}$$
(5)

将式(1)中的康普顿电流和次级电流相加得到的空间电流  $J = J_p + J_s$  代入(5),即可计算得到瞬发  $\gamma$  源在 空间各处产生的电磁脉冲。

#### 3 电磁脉冲 E1 分量数值计算结果

根据 IEC61000-2-9 标准给出的北纬 30°~60°范围内报告 100~500 km 时地面电磁脉冲幅值分布示意图, 计算北纬 45°爆高 100 km 时爆点地面投影周围 A,B,C 三点处的时域波形,如图 2(b)所示,各处 HEMP 幅值 相对关系与 IEC 标准一致<sup>[21]</sup>。



Fig. 2(a) IEC 61000-2-9 standard HEMP distribution on Earth's surface 图 2(a) IEC 地面电磁脉冲幅值分布示意图



Fig. 2(b) time-domain HEMP waveform at A, B, C 图 2(b)A,B,C 三点处电磁脉冲时域波形

HEMP 受到 γ 能量及能量时间函数、场源高度、当地磁倾角、空间大气密度等多个参数的影响。通过对比 不同计算条件下的 HEMP 时域波形的数值计算结果,可以得到一些规律性的结论。

对比同一场源在一条传播路径上不同高度处的 HEMP 时域波形,结果如图 3(a)所示。随着观测点高度 的降低 HEMP 半高宽随着高度的降低而逐渐变窄,幅值先增加后减小。这是由于大气密度随海拔减小而指数 增加,而场源辐射出的能量随距离平方增加,在其共同作用下,在 20~40 km 的高空形成一个电子离子密度较 高的源区,HEMP 电场幅值在源区到达峰值。HEMP 有丰富的频谱,在电离空间中传播时,低频成分逐渐衰 减,造成波形半高宽的缩减。

γ能量与爆炸当量成正比,一般按爆炸总能量的 0.3%计算。对比不同当量时地面观测点处 HEMP 的时 域波形,如图 3(b)所示。电磁脉冲的半高宽随 γ能量增加而变窄,电场幅值随能量增加而增加,但变化趋势逐 渐减慢。空气分子的总量一定,随着 γ 辐射能量增加,电离电子的数量逐渐增加但趋于饱和,导致 HEMP 的变 化与 γ 辐射的能量变化不呈线性关系。



(a) HEMP time-domain waveform at different height Fig. 3 HEMP time-domain wav

veform at different height (b) HEMP time-domain waveform with different bomb energy HEMP time-domain waveform at different height and bomb energy

# 图 3 不同高度和不同当量下的电磁脉冲时域波形

为了更好的定性与定量地分析 HEMP 辐射场,提取 HEMP 波形的特征参数,包括电场峰值、能量流、波前时间、半高宽等。对于不同参数条件下的 HEMP 分布,利用场源视线范围内 HEMP 波形特征参数超过固定值的覆盖范围,对其进行定量的描述和对比<sup>[9]</sup>

$$A(Q > Q_0) = \int_{-\pi}^{\pi} \mathrm{d}\varphi \int_{0}^{R_{\mathrm{T}}} \sin \frac{r}{R_{\mathrm{E}}} u(Q(R,\varphi) - Q_0) \mathrm{d}r$$
(6)

式中:u(x)为阶跃函数;Q代表不同的 HEMP 特征参数

$$Q_{i} = \{E_{\text{peak}}, \frac{1}{Z} \int_{-\infty}^{+\infty} E^{2}(t) \, \mathrm{d}t, T_{\text{rise}}, T_{1/2}, \alpha\}$$
(7)

以 HEMP 的峰值为例,即  $Q_i = E_{peak}$ ,对比不同高 度场源在地面产生的 HEMP 峰值的覆盖面积,如图 4 所示。HEMP 峰值的最大值先随着场源高度的增加 而变大并趋于饱和,当场源高超过 150 km 后随着高 度的进一步升高而下降。随着场源高的增加,视界内 面积越来越大,更多的低幅值区域被包含在视界范围 内的地面,但相对的,稍高幅值覆盖的面积越来越少。

#### 4 高空电磁脉冲特征参数的不确定度量化

为了研究场源高、γ辐射能量、γ射线时间函数等 仿真计算中的不确定参数对概率分布的影响和敏感度 分析,高空电磁脉冲在某观测点产生的电磁脉冲特征 值可以表示为爆炸当量、场源高、瞬发γ时间函数、地



磁场、电离-附和系数等一系列核爆相关参数和环境参数共同组成的高维函数。

 $Q_{i} = F_{i}(Y, H_{\text{burst}}, \boldsymbol{B}, f(t), k)$ 

由于函数 F 无解析形式,为了研究函数 F 的不同输入变量对该观测点可能被辐照的高空电磁脉冲特征参

数的影响,得到该点在不同条件下潜在电磁脉冲的分布 概率、上下界、置信区间等,利用多项式混沌的方法 (PC),通过少量的采样结果将F展开成一个由正交多项 式基底组成的完备无穷项多项式,截断其中有限项作为 代理模型。利用多项式混沌代理模型,可以分析其中各 输入参数服从特定概率时,观测点电磁脉冲特征参数的 概率分布,并使用 Sobol 全局敏感度分析法在多项式混 沌展开的基础上对输入参数进行全局敏感度分析,得到 输入参数在确定取值范围内,对电磁脉冲参数的主效应 敏感度指标(S)和总效应敏感度指标(S<sup>T</sup>),分别表征单 个参数对 HEMP 幅值相应方差的贡献和参数于其他输 入相互作用对响应方差的总贡献<sup>[22]</sup>。



(8)

height and relative distance and direction of observation 图 5 场源参数主效应敏感度指标和总效应敏感度指标

以 HEMP 峰值为例,选择北纬 45°处某处地面作为观测点,对比当场源的当量、高度、相对位置随机变化时对结果的影响。场源的爆炸当量 Y 服从 U[0.1 kt,100 kt]的均匀分布,高度 H 服从 U[100 km,400 km]均匀分布,发生位置在以观测点为中心半径 1000 km 的圆周范围内均匀分布,因此场源投影与观测点距离 r 的平方根服从均匀分布,场源与观测点连线与地磁北极的夹角 φ 服从均匀分布。使用 4 阶混沌多项式对 HEMP 的峰值进行不确定度量化。当量、场源高度、相对距离和相对方位的主效应敏感度指标和总效应敏感度指标如图 6 所示。在本算例取值范围内,场源高度对结果的影响远大于当量和场源与观测点相对关系。



图 6 电磁脉冲幅值累积概率分布

选择北纬 45°处某处地面作为观测点,研究场源在其周围随机分布时,参数不同取值范围对该点电磁脉冲 幅值概率分布和参数全局敏感度的影响。三个参数与相应的概率分布类型分别为:场源高度服从均匀分布,场 源在地面投影在观测点周围一定半径内均匀分布。各算例中参数的取值范围见表 1。

当场源参数服从算例 3 中参数分布时,观测点处 HEMP 幅值的累积概率密度如图 6(a)所示,使用 4 阶混 沌多项式代理模型与 1000 次蒙特卡罗采样法(MC)结果基本一致。图 6(b)为不同算例的 HEMP 幅值累积概 率密度。90%置信幅值随场源高度变化范围的降低而增加。当场源与观测点距离取值范围较大和较小时, 90%置信幅值都会变小,这也与图 2(a)IEC 给出的 HEMP 地面幅值分布"笑脸图"给出信息一致,即 HEMP 的较高幅值主要在场源投影的 1HOB(Height of Burst)~3HOB 之间分布。

分别对比三个输入参数在不同参数变化范围内时的主效应敏感度指标和总效应敏感度指标,结果如表 1 所示。对于每一个算例各个输入参数的总效应敏感度大于主效应敏感度,参数间协同变化对结果的影响不容 忽视,在表 1 中参数取值范围内,幅值对参数变化的依赖度依次为:距离>高度>相对方位。当场源与观测点 距离增大时,幅值对场源高度的敏感度减小。当场源投影与观测点距离取值范围小,场源与观测点相对方位变 化对幅值的影响较大,这是因为出在靠近场源投影的地方,电磁脉冲的分布较为不对称,而随着距离增加,相对 方位对幅值的影响逐渐削弱场,场源投影各方向上电磁脉冲幅值变化较小。同理,场源高度取值范围增大时,场源四周各方向上电磁脉冲幅值变化减小。但当各参数共同变化时,对幅值的影响需要针对性的分析。

表 1	HEMP	算例参数取值范围与全局敏感度指标	

Table 1	Parameter ran	e and globa	l sensitivitv	indices of	HEMP	simulation	cases
I HOLE I	- ar annever i ang	,e una gioba	i Semsier, rey	marces or		Simulation	enser

H/km			r/km			$\varphi/\operatorname{rad}$			
d	variable istribution	major sensitivity indices	total sensitivity indices	variable distribution	major sensitivity indices	total sensitivity indices	variable distribution	major sensitivity indices	total sensitivity indices
case 1 h~	-U[50,150]	0.163	0.624	$\sqrt{r} \sim U[0, \sqrt{200}]$	0.160	0.647	$\varphi \sim U[0, 2\pi]$	0.105	0.256
case 2 $h \sim$	U[100,200]	0.321	0.884	$\sqrt{r} \sim U[0, \sqrt{100}]$	0.051	0.597	$\varphi \sim U[0, 2\pi]$	0.016	0.117
case 3 $h\sim$	U[100,200]	0.180	0.763	$\sqrt{r} \sim U[0, \sqrt{200}]$	0.120	0.681	$\varphi \sim U[0, 2\pi]$	0.023	0.209
case 4 $h \sim$	U[100,200]	0.100	0.496	$\sqrt{r} \sim U[0, \sqrt{500}]$	0.347	0.737	$\varphi \sim U[0, 2\pi]$	0.089	0.164
case 5 $h \sim$	U[150,250]	0.202	0.831	$\sqrt{r} \sim U[0, \sqrt{200}]$	0.106	0.704	$\varphi \sim U[0, 2\pi]$	0.028	0.120

## 5 结 论

本文总结了高空电磁脉冲早期分量仿真计算的几种典型算法,国内外研究者基于第一性原理对电磁脉冲 产生的物理过程中进行建模,并对康普顿散射、大气电离-复合等过程不断细化,使模型和计算结果都更准确。 选用 EXEMP 算法计算得到的数值计算结果符合 IEC 标准给出参考值。最后引入基于多项式混沌方法的不 确定量化,分析固定观测点周围场源产生的电磁脉冲幅值,以场源高度、相对距离和相对方位三个参数为例,计 算参数在不同取值范围内时电磁脉冲幅值的概率分布和 Sobol 敏感度。随着计算技术的发展,高空电磁脉冲 的研究可以对确定的物理过程进一步细化和优化,以得到更准确的结果,而对不能确定的物理参数和物理过 程,使用统计的方法得到 HEMP 特征值的概率分布对后续研究更有参考意义。

## 参考文献:

- [1] Karzas W J. Electromagnetic radiation from a nuclear explosion in space[J]. Phys Rev, 1962, 126(6):40.
- [2] Karzas W J, Latter R. Detection of the electromagnetic radiation from nuclear explosions in space[J]. Physical Review, 1965, 137(5B): B1369-B1378.
- [3] Longmire C. On the electromagnetic pulse produced by nuclear explosions[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 1978, 26(1); 3-13.
- [4] Longley H, Longmire C. Development of the CHAP EMP code[R]. 1972.
- [5] Longmire C. Effect of multiple scattering on the Compton recoil current[J]. Military Technology Weaponry & National Defense, 1978.
- [6] Longmire C. On the electromagnetic pulse produced by nuclear explosions[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 1978, 26(1): 3-13.
- [7] Radasky W A, Knight R L. A two dimensional high altitude EMP environment code[R]. EMP Theor. Notes TN-125, 1971.
- [8] Ianoz M, Nicoara B I C, Radasky W A. Modeling of an EMP conducted environment[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 2002, 38(3): 400-413.
- [9] Leuthäuser K. A complete EMP environment generated by high-altitude nuclear bursts[R]. EMP Theor Notes 363, 1992.
- [10] Leuthäuser K. A complete EMP environment generated by high-altitude nuclear bursts: Data and standardization[R]. EMP Theor Notes 364, 1994.
- [11] Leuthäuser K. Distribution functions of the HEMP[R]. EMP Theor Notes 365, 1995.
- [12] Eng C D. Development of the time dependence of the nuclear (E1) HEMP electric field[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(3):737-748.
- [13] Farmer W A, Cohen B I, Eng C D. On the validity of certain approximations used in the modeling of nuclear EMP[J]. IEEE Trans Nuclear Science, 2016, 63(2):1259-1267.
- [14] 程引会,李进玺,马良.高空电磁脉冲环境计算中的自洽方法[J].计算物理,2017,34(4):403-408. (Cheng Yinhui, Li Jinxi, Ma Liang, et al. Self-consistent method in calculation of high-altitude electromagnetic pulse environment. Chinese Journal of Computational Physics, 2017, 34(4): 403-408)
- [15] 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. Beijing: National Defense Industry Press, 2011)
- [16] Cui M. Numerical simulation of the HEMP environment[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(3): 440-445.
- [17] Zhang J, Zhang Y R. Using a second-order integral equation method to study the high-altitude nuclear EMP[J]. IEEE Trans Electromag-

netic Compatibility, 2018:1-9.

- [18] Lee K S H. EMP interaction: Principles, techniques, and reference data[R]. Hemisphere Publishing Corp, 1986.
- [19] Hoerlin H. United States high-altitude test experiences: A review emphasizing the impact on the environment[R]. 1976.
- [20] 王建国, 牛胜利, 张殿辉. 高空核爆炸效应参考手册[M]. 北京: 原子能出版社, 2010. (Wang Jianguo, Niu Shengli, Zhang Dianhui. Reference manual for high altitude nuclear explosion effects. Beijing: Atomic Energy Press, 2010)
- [21] IEC 61000-2-9, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2: Environment—Section 9: Description of HEMP environment—Radiated disturbance[S].
- [22] Sobol I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates[J]. Mathand Comp in Simulation, 2001: 271-280.