

高空核电磁脉冲空间分布特征研究

杨集, 李玉春, 刘秋实*, 熊磊, 董见

(中国工程物理研究院战略技术装备发展中心, 四川绵阳 621900)

摘要: **目的** 评估一定范围内高空核电磁脉冲, 计算高空核电磁脉冲电场强度, 以及研究电场强度的空间分布特征。**方法** 从高空核爆炸物理过程出发, 结合现有的理论成果和相关计算公式, 对高空核爆炸产生早期高空核电磁脉冲的场强数值计算过程进行推导, 并编写相应计算程序。**结果** 得到指定情况下的核电磁脉冲时域波形和观测范围内电场强度分布, 计算结果与 IEC 标准中变化规律一致。此外, 对不同爆炸当量、爆炸高度、爆炸位置 and 不同观测位置下电场强度进行了计算, 并对高空核电磁脉冲空间分布特征进行了分析, 讨论了各主要计算参数对高空核电磁脉冲电场强度和时域波形的影响。**结论** 爆炸高度增加, 高空核电磁脉冲场强峰值降低, 到达场强峰值的时刻延后。随着爆炸当量的增大, 高空核电磁脉冲场强峰值也会增加, 但会随着当量变大增速变缓直至趋向饱和, 到达电场峰值的时刻也会相对提前。随着纬度的增大, 场强峰值也随之增大。随着观测高度的增大, 场强峰值呈线性趋势有一定升高。

关键词: 高空核电磁脉冲; 装备环境; 高空核爆; 数值计算; 电场强度; 空间分布

中图分类号: O441

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)10-0151-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.10.019

Spatial Distribution Characteristics of High-altitude Nuclear Electromagnetic Pulse

YANG Ji, LI Yuchun, LIU Qiushi*, XIONG Lei, DONG Jian

(Strategic Technology Equipment Development Center, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the high-altitude nuclear electromagnetic pulse within a certain range, calculate the electric field intensity of the high-altitude nuclear electromagnetic pulse and investigate the spatial distribution characteristics of the electric field intensity. Based on the physical process of high-altitude nuclear explosion, combined with the existing theoretical results and related calculation formulas, the numerical calculation process of field strength of early high-altitude nuclear electromagnetic pulse generated by high-altitude nuclear explosion was deduced, and the corresponding calculation program was compiled. The time-domain waveform of nuclear electromagnetic pulse and the distribution of electric field intensity in the observation range under the specified condition were obtained. The calculation results were consistent with the variation law in IEC standard. In addition, the electric field intensity under different explosion equivalents, explosion heights, explosion positions and different observation positions was calculated, and the spatial distribution characteristics of high-altitude nuclear electromagnetic pulse were analyzed. The effects of main calculation parameters on the electric field intensity and time domain waveform of high altitude nuclear electromagnetic pulse were discussed. With the increase of explosion height, the peak value of

收稿日期: 2024-04-14; 修订日期: 2024-06-14

Received: 2024-04-14; Revised: 2024-06-14

引文格式: 杨集, 李玉春, 刘秋实, 等. 高空核电磁脉冲空间分布特征研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(10): 151-157.

YANG Ji, LI Yuchun, LIU Qiushi, et al. Spatial Distribution Characteristics of High-altitude Nuclear Electromagnetic Pulse[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(10): 151-157.

*通信作者 (Corresponding author)

high-altitude nuclear electromagnetic pulse field intensity decreases, and the time to reach the peak value of field intensity is delayed. With the increase of the explosion equivalent, the peak value of the high-altitude nuclear electromagnetic pulse field intensity will also increase, but the growth rate will slow down with the increase of the equivalent until it tends to be saturated, and the time to reach the peak value of the electric field will be relatively advanced. With the increase of latitude, the peak value of field intensity also increases. With the increase of observation height, the peak value of field strength increases linearly.

KEY WORDS: high-altitude nuclear electromagnetic pulse; equipment environment; high-altitude nuclear explosion; numerical calculation; electric field intensity; spatial distribution

随着科技发展,各种设备对电磁敏感度越来越高,其面临的电磁环境越来越复杂,尤其是高功率电磁脉冲对设备安全性乃至生存能力带来严重威胁^[1-2]。高功率电磁脉冲包括高空核电磁脉冲(High-altitude nuclear Electromagnetic Pulse, HEMP)、高功率微波和雷电电磁脉冲等^[3-4]。其中,HEMP是指当核爆高度大于30km时所产生的核电磁脉冲^[5],根据持续的时间不同,高空核爆产生的电磁脉冲可分为早期(E1)、中期(E2)和晚期(E3)HEMP^[6-8]。在发生高空核爆炸时,由于在高空中空气密度很小,核爆产生的瞬发 γ 射线在低密度的介质中传播的平均自由程极大, γ 射线向下传播时,随着空气密度逐渐增大,射线与空气发生康普顿散射,产生大量康普顿电子,形成电离沉积区^[9-10]。在电离沉积区内,高速运动的康普顿电子受到地磁场的偏转,围绕磁力线做旋转运动,形成极强的环形电流,向外辐射电磁脉冲,从空中面积极大的源区发射的电磁脉冲覆盖的地区极广^[11],且该过程产生的电磁脉冲的振幅最强且频谱也最丰富^[12]。早期HEMP产生原理如图1所示。

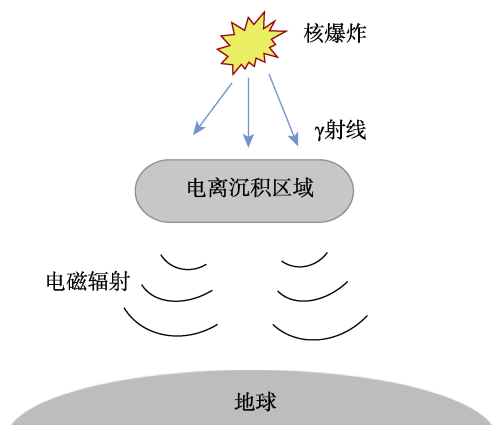


图1 HEMP产生原理
Fig.1 Principle of HEMP generation

由于早期HEMP具有辐射覆盖范围广、强度高、频谱范围宽等特点,可通过电缆,天线,信号线,天线及屏蔽体上的孔缝耦合进入武器装备电子系统^[13-16],造成系统设备中电子设备元器件被烧毁,电路被烧断以及晶体管被击穿等破坏性效应。此外,也会致使基础设施和电网系统面临极大的风险^[17-21]。因此,为提高

设备安全和生存能力,分析计算核电磁脉冲环境是十分必要的。

本文从高空核爆炸物理过程出发,结合现有的理论成果和相关计算公式^[22],对高空核爆产生早期HEMP的场强进行计算,并分析了不同爆炸当量、爆炸高度、爆炸位置 and 不同观测位置下电场强度的变化规律,为设备所面临的电磁脉冲环境提供一定参考。

1 计算物理模型

1.1 坐标系的选取

假设地球的地磁场为均匀、平行分布,且空气吸收层为平行的,建立地球直角坐标系(x, y, z)以及以爆心 b 点为原点的球坐标系(r, θ, φ),极轴与地磁场平行,坐标系示意图如图2所示。其中 θ 为 γ 射线传播方向与地磁场线的夹角, φ 为地磁场线磁倾角。

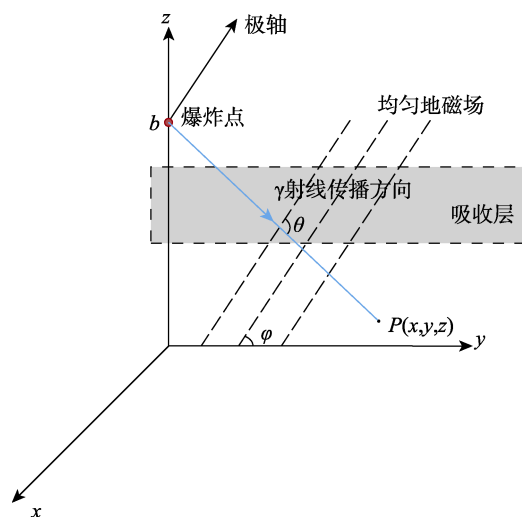


图2 计算坐标系
Fig.2 Construction of coordinate system

1.2 数学方程

麦克斯韦方程组体现了变化的分布电荷和电流必向外以波的形式辐射电磁场的规律^[23]。了解激励源 $\vec{J}$ 是求解麦克斯韦方程组的关键之处, γ 射线产生的康普顿电流 J_c 和次级电子及离子所产生的电导率造成的欧姆电流 $\sigma\vec{E}$ 则为激励电磁场的源项,即:

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \sigma \vec{E} \quad (1)$$

激励电流 $\vec{J}$ 分为径向分量 $\vec{J}_r$ 及 θ 、 φ 方向的 $\vec{J}_\theta$ 、 $\vec{J}_\varphi$, 若爆炸及其环境为轴对称, 则电流径向分量 $\vec{J}_r$ 和 θ 方向分量 $\vec{J}_\theta$ 将激励横磁波, φ 方向电流 $\vec{J}_\varphi$ 会激励横电波^[13]。

由康普顿电流在 3 个方向上的分量可表示为:

$$\vec{J}_{c,r} = -e \cdot V_0 \cdot g(r) \int_0^{R/V_0} f(T) \cdot (\sin^2 \theta \cos \omega \tau' + \cos^2 \theta) d\tau' \quad (2)$$

$$\vec{J}_{c,\theta} = -e \cdot V_0 \cdot g(r) \int_0^{R/V_0} f(T) \cdot [\sin \theta \cos \theta (\cos \omega \tau' - 1)] d\tau' \quad (3)$$

$$\vec{J}_{c,\varphi} = -e \cdot V_0 \cdot g(r) \int_0^{R/V_0} f(T) \cdot (\sin \theta \sin \omega \tau') d\tau' \quad (4)$$

$$g(r) = \frac{Y}{E} \cdot \frac{\exp\left[-\int_0^r 1/\lambda(r') dr'\right]}{4\pi r^2 \lambda(r)} \quad (5)$$

次级电子密度为:

$$n_{\text{sec}} = \frac{qV_0}{R} \cdot g(r) \int_{-\infty}^{\tau} \int_0^{R/V_0} f(T') d\tau' d\tau' \quad (6)$$

式 (6) 中:

$$T = \tau - \left(1 - \frac{V_0}{c} \cos^2 \theta\right) \tau' + \frac{V_0}{c} \sin^2 \theta \frac{1}{\omega} \sin \omega \tau' \quad (7)$$

$$T' = \tau' - (1 - \beta \cos^2 \theta) \tau'' + \beta \sin^2 \theta \frac{1}{\omega} \sin \omega \tau'' \quad (8)$$

式中: $g(r)$ 为 γ 射线在 r 处与大气发生相互作用的光子密度; Y 为 γ 当量, 与爆炸当量有关; E 为 γ 射线的平均能量, 与核爆类型有关, MeV; $\lambda(r)$ 为 γ 射线平均自由程, 与爆心处空气密度有关; e 为电子电荷量绝对值; V_0 为康普顿电子或光电子初速度; $g(r)$ 为在 r 处与大气发生相互作用的光子密度; ω 为拉莫尔频率, $\omega = \frac{eB_0}{m\gamma}$; $\beta = \frac{V_0}{c}$; B_0 为地磁场磁感应强度, T。

由次级电子运动引起的次级电流密度为:

$$\vec{J}_{\text{sec}} = \sigma(\tau) \vec{E} \quad (9)$$

$$\sigma(\tau) = \frac{n_{\text{sec}}(\tau)}{mv_{\text{cs}}} e^2 = \frac{\frac{qV_0}{R} \cdot g(r) \int_{-\infty}^{\tau} \int_0^{R/V_0} f(T') d\tau' d\tau'}{m \cdot 4 \times 10^{12} \cdot e^{\left[(r \cos \theta - h_b)/H_0\right]}} e^2 \quad (10)$$

考虑电流空间变化相较于时间变化更缓慢, 在建立电场方程组时只考虑时间变化项, 即高频近似, 最终得到电场方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \tau} \vec{E}_r + \frac{1}{\varepsilon_0} \vec{J}_r = 0 \\ \frac{2}{c} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vec{E}_\theta) + \mu_0 \vec{J}_\theta = 0 \\ \frac{2}{c} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vec{E}_\varphi) + \mu_0 \vec{J}_\varphi = 0 \end{cases} \quad (11)$$

将总电流密度带入, 源区电场强度方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \tau} \vec{E}_r + \frac{1}{\varepsilon_0} \vec{J}_{r,c} + \frac{\sigma(\tau)}{\varepsilon_0} \vec{E}_r = 0 \\ \frac{2}{c} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vec{E}_\theta) + \mu_0 \vec{J}_{c,\theta} + \mu_0 \sigma(\tau) \vec{E}_\theta = 0 \\ \frac{2}{c} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vec{E}_\varphi) + \mu_0 \vec{J}_{c,\varphi} + \mu_0 \sigma(\tau) \vec{E}_\varphi = 0 \end{cases} \quad (12)$$

将式 (10) 变换为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \tau} \vec{E}_r = -\frac{1}{\varepsilon_0} [\vec{J}_{r,c} + \sigma(\tau) \vec{E}_r] \\ \frac{\partial}{\partial \tau} \vec{E}_\theta = -\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{2} c \mu_0 \sigma(\tau)\right] \vec{E}_\theta - \frac{1}{2} c \mu_0 \vec{J}_{c,\theta} \\ \frac{\partial}{\partial \tau} \vec{E}_\varphi = -\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{2} c \mu_0 \sigma(\tau)\right] \vec{E}_\varphi - \frac{1}{2} c \mu_0 \vec{J}_{c,\varphi} \end{cases} \quad (13)$$

通过四级四阶 Runge-Kutta (RK4) 方法^[24]可求解在 (r, θ, φ) 坐标系下任意一点的电场强度, 通过坐标变换即可得到在大地直角坐标 (x, y, z) 位置处的电场强度。

源区以下观测区域电场强度为:

$$E = \frac{E_{r\text{max}} \cdot r_{\text{max}}}{r} \quad (14)$$

式中: r_{max} 为爆心距计算外边界的距离, km; r 为爆心距观测点距离, km。由于 γ 射线传播到距地面一定距离以下时的能量趋近于 0, 不再有新的电磁场产生, 故需要确定计算外边界, 通常计算外边界为距地面 20 km 处。

通过上述计算方法形成计算程序, 对不同爆炸当量、爆炸高度、爆炸位置 and 不同观测位置下电场强度进行计算, 并对高空核电磁脉冲空间分布特征进行分析, 讨论各主要计算参数对高空核电磁脉冲电场强度和时域波形的影响。

2 计算结果

2.1 HEMP 波形与范围内电场分布

以北纬 30°、当量 1 000 kT、爆高 100 km 为计算条件, 得到地面电磁脉冲峰值场强波形如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 核电磁脉冲波形上升沿陡峭, 经过 3 ns 上升时间后, 电场强度达到最大, 为 70.1 kV/m, 场强到达最大值后缓慢下降, 波形半宽为 10 ns。

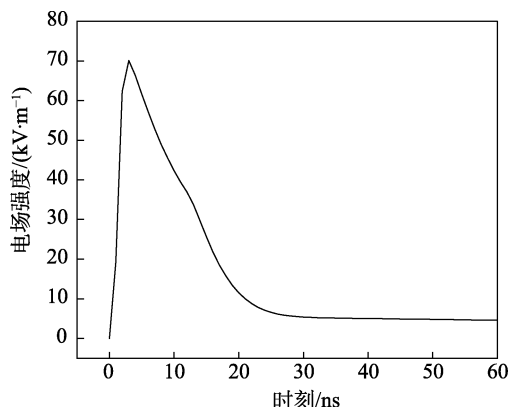


图3 HEMP 电场强度时域波形
Fig.3 Time domain waveform of HEMP electric field intensity

以爆心正下方为原点,爆心向东南西北方向各延伸 500 km 为计算区域进行计算,范围内的电场分布情况如图 4 和图 5 所示。可以看出,场强达到峰值时刻,电场强度分布情况与 IEC-61000-2-9^[25]中地球表面电场峰值的变化规律一致,场强最大值处大致位于爆心南向 91 km 处。

2.2 场强空间分布特征

1) 爆炸高度对场强及时域波形的影响。在北纬 30°, 爆炸当量为 1 000 kT 条件时,分别计算了爆高为 100、150、200 km 时的电磁脉冲地面场分布,不同爆高下的 HEMP 场强峰值与爆高的关系见表 1,不同爆高下场强峰值处的时域波形如图 6 所示。

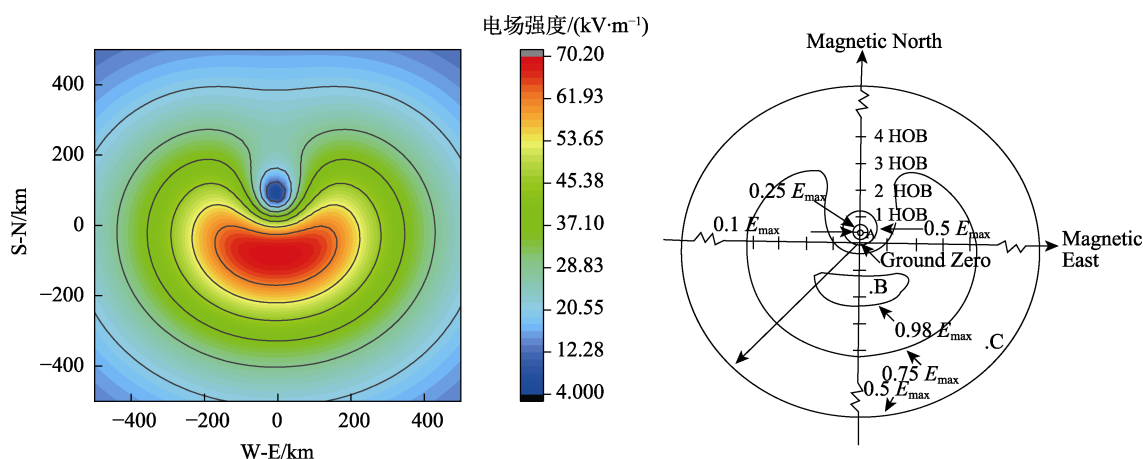


图4 计算结果与 IEC-61000 对比
Fig.4 Comparison of calculation results with IEC-61000

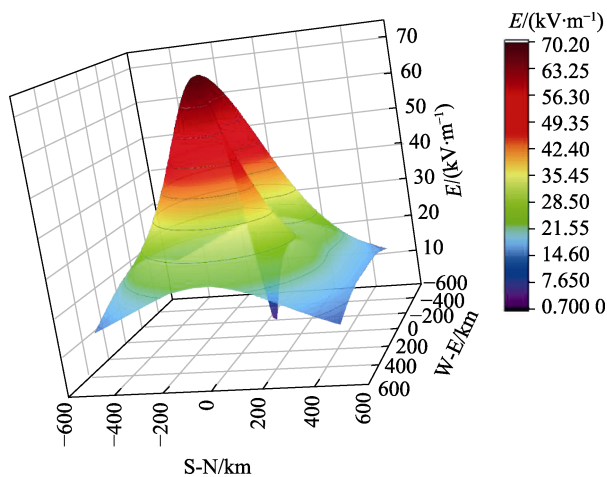


图5 电场强度分布三维图
Fig.5 Three-dimensional diagram of electric field intensity distribution

从计算结果可以看出,随着爆高的增加,HEMP 电场强度峰值随之略有降低。电场强度到达峰值的时刻随爆高的增大而增大,即时域波形图中表现出的波形上升沿随着爆高的增大而相对变缓,波形的半宽也随之增大。随着爆高的增大,电场峰值位置距爆心位

表 1 场强峰值随爆炸高度的变化
Tab.1 Variation of the peak value of the field strength with the explosion height

爆高/km	电场峰值/(kV·m ⁻¹)	峰值位置(爆心正南方)/km
100	70.1	90
150	69.7	120
200	66.2	140

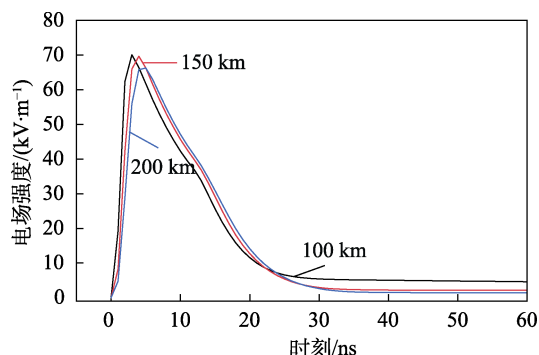


图6 不同爆高下场强峰值点处时域波形
Fig.6 Time domain waveform at the peak point of field strength under different explosion heights

置越远。这是由于爆心与地面电场峰值处连接线垂直于地磁场线, 假设条件为地磁场均匀平行分布, 当确定爆心的爆炸纬度后, 随着爆炸高度的增大, 磁倾角不变, 故场强峰值位置距爆心距离增大。

2) 爆炸位置对场强的影响。选取北纬 53° 、 34° 、 18° 共 3 个位置, 计算爆炸当量为 1 000 kT, 爆炸高度为 100 km 时的地面电场强度分布情况, 其场强峰值分别为 72.6、71.4、63.8 kV/m, 场强峰值位置处场强时域波形如图 7 所示。

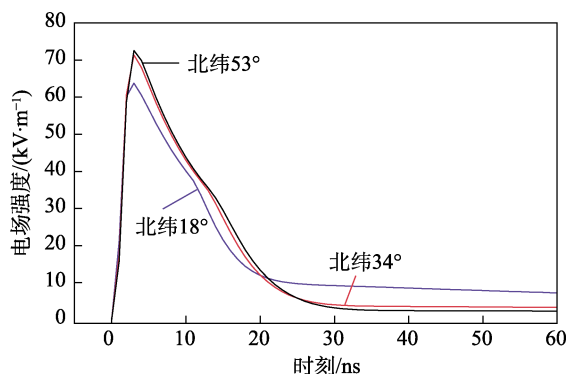


图 7 不同位置下场强峰值点处时域波形
Fig.7 Time domain waveform at the peak point of field strength at different positions

从计算结果可以看出, 电场强度峰值随纬度的增加而增大, 而到达场强峰值时刻不会发生变化。由于爆炸位置纬度越高, 地磁场磁感应强度越大, 磁感应强度的变化影响式 (2) ~ (4) 中各分量上的康普顿电流以及次级电子密度的大小, 导致激励源发生变化, 最终影响激励的电场强度。

3) 爆炸当量对场强的影响。在北纬 30° , 爆高为 100 km, 分别计算爆炸当量为 30、50、100、300、500、1 000 kT 时的电磁脉冲地面分布。不同爆炸当量下核电磁脉冲场强峰值的变化规律如图 8 所示, 同时得到不同当量下场强峰值处时域波形如图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出, 高空核电磁脉冲场强峰

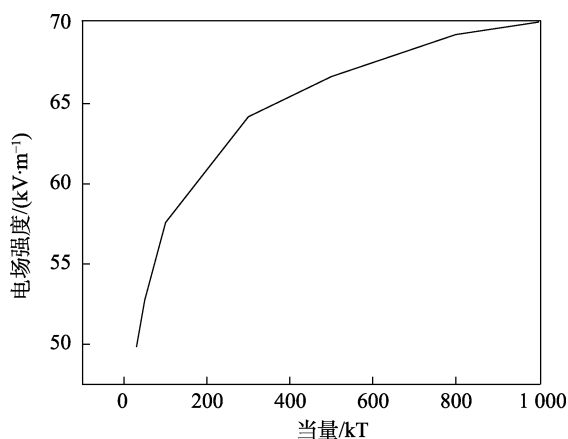


图 8 不同爆炸当量下电场强度峰值
Fig.8 Peak of electric field intensity under different explosion equivalents

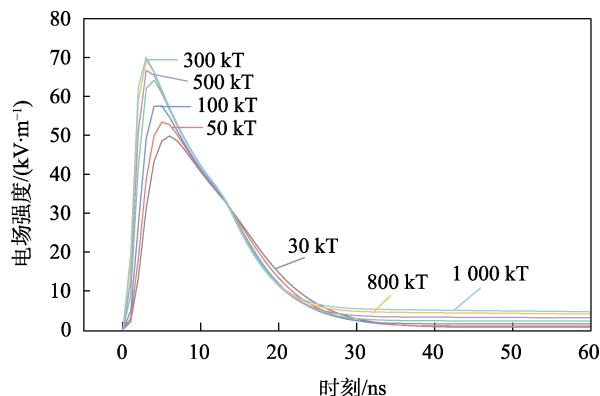


图 9 不同当量下场强峰值点处时域波形
Fig.9 Time domain waveform at the peak point of field strength under different equivalents

值与爆炸当量并不是一个线性的关系, 随着爆炸当量的增加, 爆炸产生的 γ 射线发射量增大, 导致 γ 射线与大气发生相互作用的光子密度也会随之增大, 最终导致 HEMP 电场峰值强度增大。由于空气中气体分子有限, 当 γ 射线数增加到一定程度后, 无法造成更多的气体分子电离, 使得产生的电磁脉冲电场强度并不会随着爆炸当量的增大而无限增加, 会逐渐趋于饱和。随着当量的减小, 时域波形上升沿和下降沿都逐渐变缓, 到达场强峰值的时刻也随之延后, 导致波形半宽增大。

4) 不同观测高度下的场强。选取北纬 30° , 爆炸当量为 1 000 kT, 爆高为 100 km 时, 观测高度分别为 0、500、1 000、5 000、10 000 m 时的电场分布进行计算, 如图 10 所示。可以看出, 电场强度峰值随观测海拔高度的增加而增大, 几乎呈线性关系。造成结果的原因与式 (12) 所表示的电场强度与观测点距爆心距离成反比一致, 随着观测点海拔高度的增加, 距爆心距离越近, 其电场强度也随之增大, 呈线性关系, 场强到达峰值时刻不会因此发生变化。

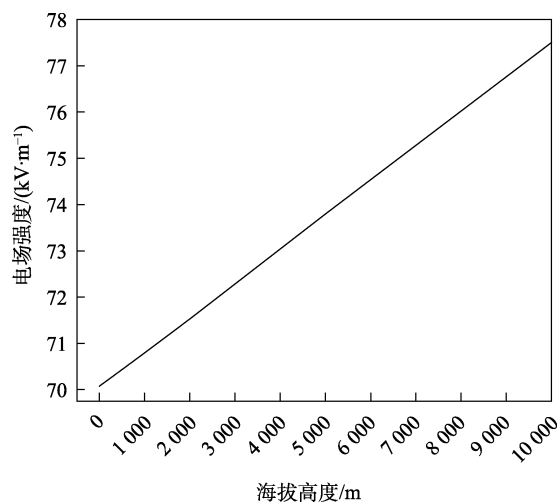


图 10 不同观测高度下场强变化
Fig.10 Variation of field strength at different observation heights

3 结论

根据计算结果, HEMP 的时域波形为双指数波形, 上升沿陡峭, 在几纳秒的时间里场强达到最大值, 半宽为 10 ns, 随后场强缓慢下降。从区域内电场强度分布计算结果可以看出, 计算结果与 IEC-61000-2-9 中地球表面电场峰值的变化规律一致, 最大值处大致位于爆心南向 91 km 处。对不同参数下的计算结果进行分析, 可得到以下结论: 随着爆炸高度的增加, 高空核电磁脉冲场强峰值略有降低, 到达场强峰值的时刻延后; 随着爆炸当量的增大, 场强峰值随之增大, 但会随着当量变大增速变缓直至趋向饱和, 到达电场峰值的时刻也会相对提前; 随着纬度的增大, 场强峰值也随之增大, 而到达场强峰值时刻不会发生变化; 随着观测高度的增大, 场强峰值呈线性趋势有一定升高。

参考文献:

- [1] 刘尚合. 武器装备的电磁环境效应及其发展趋势[J]. 装备指挥技术学院学报, 2005, 16(1): 1-6.
LIU S H. Effect of Electromagnetic Environment to Weaponry and Its Trend of Development[J]. Journal of Institute of Command and Technology, 2005, 16(1): 1-6.
- [2] 李名杰, 刘进. 电子装备面临的强电磁脉冲环境分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 69-73.
LI M J, LIU J. Environmental Analysis of High Power EMP on Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 69-73.
- [3] RADASKY W. The Effects of Three High Power EM Threats on Electric Power Threats, 2012.
- [4] 高怀林, 张志强, 高冬平, 等. 高功率电磁脉冲产生技术与应用[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2021, 51(9): 66-75.
GAO H L, ZHANG Z Q, GAO D P, et al. Generation of High-Power Electromagnetic Pulses and Its Application to Radiation Effect research: A Review[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2021, 51(9): 66-75.
- [5] 乔登江. 核爆炸物理概论[M]. 北京: 原子能出版社, 1988.
QIAO D J. Introduction to Nuclear Explosion Physics[M]. Beijing: Atomic Press, 1988.
- [6] 王建国, 牛胜利, 张殿辉, 等. 高空核爆炸效应参数手册[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
WANG J G, NIU S L, ZHANG D H, et al. Manual of Parameters of High Altitude Nuclear Explosion Effect[M]. Beijing: Atomic Press, 2010.
- [7] LEE KSH. EMP Interaction: Principles, Techniques, and Reference Data[M]. Washington: Hemisphere, 1986.
- [8] 王建国, 刘利, 牛胜利, 等. 高空核爆炸环境数值模拟[J]. 现代应用物理, 2023, 14(1): 3-14.
WANG J G, LIU L, NIU S L, et al. Numerical Simulations of Environmental Parameters of High-Altitude Nuclear Explosion[J]. Modern Applied Physics, 2023, 14(1): 3-14.
- [9] 梁睿, 张恩山, 郑毅. 近地面核爆炸电磁脉冲数值计算[J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23(1): 62-65.
LIANG R, ZHANG E S, ZHENG Y. Numerical Calculation of NEMP from Near-Surface[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, 23(1): 62-65.
- [10] 程引会, 马良, 周辉, 等. 高空核爆电磁脉冲穿透电离层数值计算[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(2): 441-444.
CHENG Y H, MA L, ZHOU H, et al. Calculation of High Altitude Nuclear Electromagnetic Pulse Propagation in Ionosphere[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 441-444.
- [11] 王坚, 李路翔. 核武器效应及防护[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
WANG J, LI L X. Nuclear Weapons Effect and Protection[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 1993.
- [12] 雷盖特. 核电磁脉冲辐射与防护技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
REIGATE L W. EMP Radiation and Protective Techniques[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980.
- [13] MENG C. Numerical Simulation of the HEMP Environment[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(3): 440-445.
- [14] 王涛, 丛佩玺, 石荣荣, 等. 电气线路互联系统线缆抗高空核电磁脉冲耦合效应[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(12): 71-75.
WANG T, CONG P X, SHI R R, et al. Coupling Effect of High Altitude Nuclear Electromagnetic Pulse of Electrical Wiring Interconnection System Cable[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(12): 71-75.
- [15] 吴崇善. 核电磁脉冲效应及其防护与测试[J]. 现代军事通信, 1999(2): 56.
WU C S. Nuclear Electromagnetic Pulse Effect and Its Protection and Testing[J]. Modern Military Communication, 1999(2): 56.
- [16] 李飞. 高空核爆炸的电磁脉冲对地面线缆的影响[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
LI F. Influence of Electromagnetic Pulse of High Altitude Nuclear Explosion on Ground Cable[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [17] 邱扬. 核电磁脉冲及其防护工程[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
QIU Y. Nuclear Electromagnetic Pulse and Its Protection Engineering[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [18] FOSTER J J, GJELDE E, WILLIAM R, et al. Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack: Critical National Infrastructures[R]. Electromagnetic Pulse (EMP) Commission, 2008.
- [19] 翟守阳, 金字, 刘晏平, 等. 高空核电磁脉冲对变压器耦合效应的研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 15-20.

- ZHAI S Y, JIN Y, LIU Y P, et al. The Study on Coupling Effect of High Altitude Nuclear Electromagnetic Pulse on Transformer[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2019(5): 15-20.
- [20] 张晋. 基于一种新型积分法的高空核爆电磁脉冲研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- ZHANG J. Study on Electromagnetic Pulse of High Altitude Nuclear Explosion Based on a New Integral Method[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [21] 秦锋, 陈伟, 毛从光, 等. 电力系统高空电磁脉冲效应研究综述[J]. *现代应用物理*, 2023, 14(3): 16-31.
- QIN F, CHEN W, MAO C G, et al. Review of High Altitude Electromagnetic Pulse Effects on Power System[J]. *Modern Applied Physics*, 2023, 14(3): 16-31.
- [22] CHAPMAN T C. A Computer Code for High Altitude EMP[Z]. 1974.
- [23] 陈暨耀, 郑永令. 电磁学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- CHEN J Y, ZHENG Y L. *Electromagnetics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2021.
- [24] 华冬英, 李祥贵. 微分方程的数值解法与程序实现[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2016: 218.
- HUA D Y, LI X G. *Numerical Solution and Program Realization of Differential Equation*[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016: 218.
- [25] IEC 61000-2-9-1996, Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 2: Environment—Section 9: Description of HEMP Environment-Radiated Disturbance-Basic EMC Publication[S]. 1996.