



·脉冲功率技术·

分布式负载垂直极化有界波电磁脉冲 模拟器外泄场的规律分析*

谢霖燊, 吴 伟, 朱湘琴

(强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室(西北核技术研究院), 西安 710024)

摘 要: 将基于 MPI 平台的并行时域有限差分 (FDTD) 方法与基于完全磁导体 (PMC) 镜像法相结合, 并结合 CST 模拟软件, 模拟给出分布式负载垂直极化有界波电磁脉冲 (EMP) 的外泄场 (包括侧泄场和后泄场) 的分布规律。模拟结果与实验结果符合得很好。研究表明: 在高度方向上, 地面附近的外泄场峰值最大, 但远离模拟器时, 在 1.5 m 高的高度范围内, 外泄场的峰值差别不大; 不管采用何种双指数脉冲源, 距离模拟器边缘位置比较近的测点在传输线段的侧泄场的幅值大于分布式负载段侧泄场的幅值, 且两者都大于分布式负载末端的后泄场幅值, 但随着测点与模拟器边缘的垂直距离的增加, 分布式负载段的后泄场可能会比侧泄场大; 对于电压峰值相同的双指数激励源而言, 所含的高频分量越多, 在一定范围内, 从其分布式负载末端外泄的后泄场更大; 模拟器下方大地的电导率增加, 模拟器的外泄场增加。

关键词: 分布式负载; 有界波; 模拟器; 电磁脉冲; 外泄场

中图分类号: TN011; O441.3

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190434

Regularity analysis of leakage-field from vertically polarized bounded wave electromagnetic pulse simulator with distributed load

Xie Linshen, Wu Wei, Zhu Xiangqin

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect (Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, China)

Abstract: A parallel finite difference time domain (FDTD) method combined with perfectly magnetic conductor (PMC) image method and CST software is firstly presented for computing the leakage field (including sideward and backward leakage field) from vertically polarized bounded wave electromagnetic pulse (EMP) simulator with distributed load. The results got from simulation agree well with those from experiment. Numerical results show that the leakage field's peak-value near the ground reaches maximum in the direction of height, but there's little difference of leakage fields' peak-values at the testing points under 1.5 m height and far away from the simulator; The peak-values of sideward leakage field from simulator's transitional section are larger than those from distributed load section, both of them are larger than the backward leakage field from the end of distributed load section, as the testing point is near the simulator, and the backward leakage field may be larger than those sideward leakage fields, as the vertically distance between the testing point and the simulator increases; The regularity conclusion suits for the simulator with different double exponential source. The more excited source component in high frequency domain, the larger backward leakage field in some distance domain. The leakage field from the simulator increases, as ground's conductivity increases.

Key words: distributed load; bounded wave; simulator; electromagnetic pulse(EMP); leakage field

垂直极化有界波电磁脉冲 (EMP) 模拟器由于能够提供垂直极化的 EMP 环境而得到广泛的研究^[1-12]。根据结构类型分, 这类模拟器可以分为集总负载有界波 EMP 模拟器^[1-4]、分布式负载有界波 EMP 模拟器^[5-10]及混合结构的有界波 EMP 模拟器^[11-12]。在强电磁脉冲效应实验中, 为了满足被试系统效应测试的需求, 需要模拟器工作空间提供

* 收稿日期: 2019-11-21; 修订日期: 2019-12-25

基金项目: 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室专项经费资助项目 (SKLIPR1601Z)

作者简介: 谢霖燊 (1982—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事脉冲功率技术和电磁脉冲模拟产生技术等; xielinshen@nint.ac.cn。

峰值高的场强,相应地模拟器就需要峰值较高的电压脉冲源^[13-15]。另一方面,考虑到垂直极化有界波 EMP 模拟器属于导波天线,从脉冲源发出的电磁波在模拟器内部传输的过程中,不可避免地向外辐射电磁波。这就导致模拟器工作空间场强增强的同时,其外泄场不可避免地增强,从而很有可能对模拟器周围的人员及机器设施造成一定的影响^[16-18]。因此,有必要对垂直极化有界波 EMP 模拟器的外泄场的分布规律进行模拟分析。

已有文献对垂直极化模拟器的外泄场进行了模拟计算^[19-23],其中,文献 [19] 先根据传输线理论给出属于集总负载有界波 EMP 模拟器的先进性研究电磁脉冲模拟器 (ARES) 的电流分布,并在此基础上使用近似的 Norton 表面波公式求出该集总负载 EMP 模拟器的外泄场;文献 [20] 将地面等效为 PEC 金属面并采用矩量法 (MOM) 模拟给出了集总负载有界波 EMP 模拟器在距离地面 1 m 的水平面上 20 m 范围内与工作空间中心线夹角分别为 0° , 45° , 90° 及 270° 的若干测点的时域波形,并给出水平面及垂直面上几个频率点的场分布图;文献 [21] 给出了集总负载有界波 EMP 模拟器附近几个截面上场的分布图,给出了距离地面 1 m 的水平面上且与模拟器内部波传播方向平行的直线上场的峰值分布;文献 [22] 采用时域有限差分 (FDTD) 技术并结合近-远场外推变换方法给出了混合结构的有界波 EMP 模拟器终端附近的前向外泄场,并对该场进行了模式分析;文献 [23] 采用 FDTD 算法,模拟给出了混合结构的有界波 EMP 模拟器在平行板工作空间中心处、与地面垂直的平面上场的分布,并给出了平行板工作空间中心位置的侧向沿线上泄露场的峰值随距离的变化关系。分布式负载有界波 EMP 模拟器由于能提供快前沿的工作空间而得到人们的重视^[5-8],但到目前为止,鲜有文献专门模拟分析分布式负载有界波 EMP 模拟器外泄场的分布规律。

并行 FDTD 方法由于具有通用性,已被广泛应用于垂直极化有界波 EMP 模拟器场的模拟分析中^[4-6, 22-23]。此外,考虑到分布式负载有界波 EMP 模拟器的外泄场属于模拟器天线的辐射场,而根据天线辐射近-远场分界处的定义^[24],在距离模拟器一定范围内的外泄场都属于其辐射近场,故该区域的外泄场不能简单地使用近-远场外推变换计算得到。为保证模拟结果的准确性、节约计算资源及计算时间,本文将采用基于 MPI 平台的并行 FDTD 方法^[4]与基于完全磁导体 (PMC) 镜像法^[25]相结合,并借助 CST 模拟软件,先模拟给出“春雷号”模拟器^[26]内部测点场的时域场波形及若干外泄测点场的峰值的分布,并与实验结果进行比较,说明模拟的准确性;然后采用该方法对常规的分布式负载有界波 EMP 模拟器的外泄场进行模拟分析,给出其外泄场的分布规律。

1 模拟器的结构及计算方法

图 1 给出了常规分布式负载有界波 EMP 模拟器的俯视图及侧视图。可以看出,该模拟器由脉冲电压源、倾斜传输线段、铺地金属网及末端的分布式负载所构成; a 和 b 分别为模拟器馈电处的极板宽度及上、下极板的间距; w 及 h 分别为工作空间的最大宽度及高度; L_1 为前过渡段在 x 方向投影的长度; L_2 为末端分布式负载在 x 方向投影的长度; h_d 为测试点 (所在的平面) 距离地面的高度。若模拟器倾斜传输段拉线很直且足够密 (即相邻线栅之间的最大间距小于 $\lambda_{\min}/(10\sqrt{\epsilon_r})$, 其中, λ_{\min} 为模拟器的激励源所对应的最高有效频率, ϵ_r 为模拟器周围大地的相对介电常数), 模拟器铺地金属网的网格足够细,则上述两者可以等效为平直的金属板来进行等效。此外,常规模拟器中满足 $w/h = a/b$; 且为满足阻抗匹配条件,要求分布式负载的总阻抗 Z_l 与模拟器的特性阻抗 Z_c 相等^[27]。

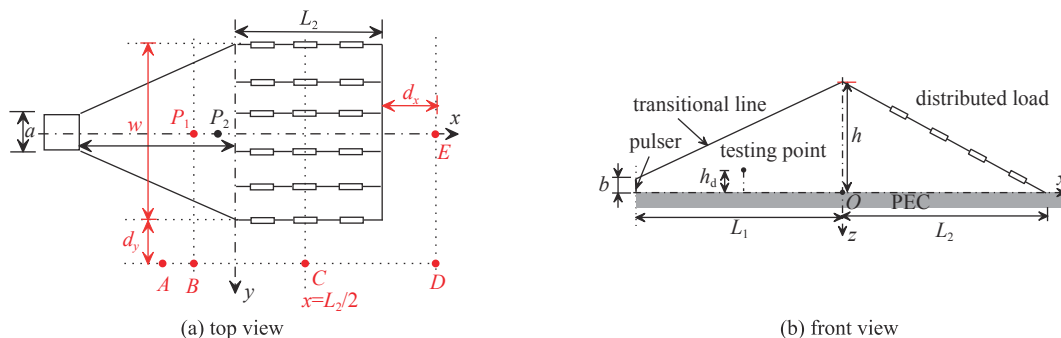


Fig. 1 Configuration of bounded-wave EMP simulator with distributed load

图 1 常规分布式负载有界波电磁脉冲模拟器的示意图

采用基于 MPI 平台的并行 FDTD 方法^[28]计算模拟器的外泄场时,先将整个计算区域划分为若干子域,并令相邻子域之间有半个网格的重叠;然后再进行并行 FDTD 的电磁场的迭代。对于各子域内部的网格点,直接采用 FDTD 的电磁场迭代公式来计算其电 (磁) 场即可;而对于相邻子域交界面上的网格点,则需先采用 MPI 平台的 MPI_Recv() 函数接收相邻子域传递过来的前半个时间步的切向磁 (电) 场,然后进行常规的 FDTD 的电 (磁) 场迭

代, 最后再采用 MPI_Ssend() 函数向相邻子域发送切向磁(电)场。考虑到模拟器下方有大地, 因此在并行 FDTD 计算时, 吸收边界采用截断有耗均匀介质的单轴各向异性介质完全匹配层 (UPML) 吸收边界^[6]。考虑到常规分布式负载有界波 EMP 模拟器内部电场及外泄电场的 z 分量关于 xOz 平面对称, 故为节约计算时间及计算资源, 可将 xOz 平面设置为 PMC 镜像面, 只计算模型 $y \geq 0$ 的区域的内部场及 $x > 0$ 区域的侧泄场。对 $x \leq 0$ 区域分布式负载段外泄场的计算, 则采用 CST 商用软件进行。将并行 FDTD 计算与 CST 软件模拟相结合, 一方面是为了互相校验 $x > 0$ 区域侧泄场的模拟结果, 另一方面是考虑到 CST 商用软件由于使用内核受限, 在计算远距离的侧泄场时, 只能使用本文的并行 FDTD 算法计算。

设并行 FDTD 计算时的 x, y 及 z 三个方向的网格尺寸分别为 $\Delta x, \Delta y$ 及 Δz , 对应的时间步长为 Δt ; 分别用 E_x 及 E_z 代表电场的 x 及 z 分量, 并用 m 分别代表这两个分量的网格坐标位置 $(i+1/2, j, k)$ 和 $(i, j, k+1/2)$; 分别用 H_x, H_y 及 H_z 代表磁场的 x, y 及 z 分量; 用各电场分量右上角的“ $n+1$ ”及“ n ”来表示该电场分量分别为 $(n+1)\Delta t$ 及 $n\Delta t$ 时刻的电场分量, 类似的, 用各磁场分量右上角的“ $n+1/2$ ”来表示该磁场分量为 $(n+1/2)\Delta t$ 时刻的磁场分量。结合 PMC 镜像法, 得到镜像面上 FDTD 中 E_x 及 E_z 迭代式如下^[21]

$$E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) = C_A(m)E_x^n(i+1/2, j, k) + C_B(m) \left\{ \left[2H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) \right] / \Delta y - \left[H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2) \right] / \Delta z \right\} \quad (1)$$

$$E_z^{n+1}(i, j, k+1/2) = C_A(m) \cdot E_z^n(i, j, k+1/2) + C_B(m) \left\{ \left[H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i-1/2, j, k+1/2) \right] / \Delta x - \left[2H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) \right] / \Delta y \right\} \quad (2)$$

式中

$$C_A(m) = \{1 - \sigma(m)\Delta t / [2\varepsilon(m)]\} / \{1 + \sigma(m)\Delta t / [2\varepsilon(m)]\} \quad (3)$$

$$C_B(m) = [\Delta t / \varepsilon(m)] / \{1 + \sigma(m)\Delta t / [2\varepsilon(m)]\} \quad (4)$$

对于 PMC 镜像面外侧 $y < 0$ 的区域, 令该区域磁场的 x 分量及 z 分量为 0; 其它区域电场及磁场各分量的计算与常规 FDTD 方法相同。模拟器的激励源采用平面馈电的方式馈电^[3]。

2 与实验结果的比较

根据文献 [26] 中的“春雷号”模拟器的实际模型, 建立该模拟器的理论模型。设: 模拟器馈电处极板宽 $a=0.24$ m、上/下极板的间距 $b=0.07$ m; 工作空间的最大宽度 $w=10$ m, 高度 $h=6$ m; 前过渡段在 x 方向投影的长度 $L_1=17.95$ m, 末端分布式负载在 x 方向投影的长度 $L_2=7$ m, 如图 1 所示。但该理论模型与图 1 所示的常规分布式负载 EMP 模拟器略有不同, 主要体现在建模时考虑了保护“春雷号”模拟器馈电装置的小木屋、因小木屋地面垫高出现的模拟器底部金属网下的水泥小斜坡、支撑模拟器的 4 对玻璃钢圆柱、从激励源到第一对支撑柱之间模拟器极板宽度和高度之比不是等比例变化以及模拟器两侧存在的大树等。此外, “春雷号”模拟器位于平坦的水泥地上。模拟时, 设水泥地的相对介电常数为 4, 电导率为 0.002 S/m; 并设水泥地下方的大地的相对介电常数 $\varepsilon_r=10.0$, 电导率 $\sigma=0.003$ S/m; 设置构成小木屋的木头的相对介电常数为 3.3, 电导率为 0.000 7 S/m; 设模拟器旁的大树的相对介电常数为 3, 电导率为 0.007 S/m; 设模拟器支撑架玻璃钢的相对介电常数为 4.5。实验时模拟器的激励源为“上升沿约 1.4 ns、半高宽约 18 ns”的双指数脉冲电压源。为与实验一致, 模拟时设置激励电压源的表达式为

$$V(t) = V_0 [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (5)$$

式中, V_0, α 及 β 均为双指数脉冲电压源函数的特征参数, 其中 V_0 的取值决定了电压源的峰值, α 及 β 的取值决定了脉冲的前沿和半高宽; 取 $V_0=1.191$ kV, $\alpha=4.695 \times 10^7$ s⁻¹, $\beta=11.76 \times 10^8$ s⁻¹; 对应的电压源的峰值约为 100 kV, 其上升沿和半高宽分别为 1.4 ns 及 18 ns。

考虑到模拟器为导波天线, 故电磁波从激励源出发, 沿着模拟器内部传播的过程中, 不停地向外侧泄露电磁波。因此, 模拟器内部的场与侧泄场是相互影响的。若模拟器导波性能较好, 则模拟器内部的场会比较大, 侧泄场比较小; 反之, 内部的场会比较小, 侧泄场则比较大。此外, 考虑到 FDTD 算法的通用性, 因此, $x > 0$ 区域内侧泄场的 FDTD 方法及 CST 软件模拟结果的符合程度, 完全可以通过两者对模拟器内部工作空间场模拟结果的符合程度来体现。以模拟工作空间内测点 $P_1(-7, 0, -0.5)$ m 处电场 z 分量的峰值为归一化因子(下同), 根据本文所述的模拟方法, 模拟得到“春雷号”模拟器内部工作空间测点 $P_1(-7, 0, -0.5)$ m 及 $P_2(-3, 0, -0.5)$ m 归一化场 z 分量的时域波形

如图2所示。作为比较,图中还给出了实测结果。其中,实测时采用了由接收天线、前置电路、电光转换电路、传输光纤和光电转换电路等组成的基于光纤传输的有源电场测量系统,该系统测试带宽为10 kHz~100 MHz,量程能覆盖1 V/m~100 kV/m的范围;且实测时只测了电场 z 方向的分量。从图2可以看出,采用FDTD方法及CST软件计算得到的模拟器内部的场符合得很好,且两者都与实验结果符合得较好。从而实现了FDTD方法及CST软件模拟的校验,也说明了模拟的准确性。

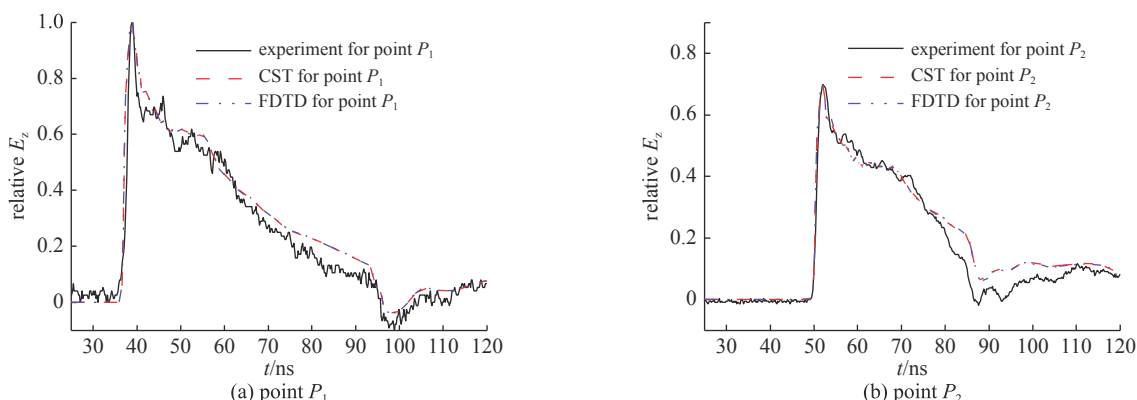


Fig. 2 Comparison of results got from simulation and experiment

图2 测点 P 时域波形理论模拟和实验结果的对比

此外,位于水泥地面上方 $h_d=0.5$ m高的水平面上,经过测点 P_1 的 $x=-7$ m直线及位于分布式负载段 $x=L_2/2=3.5$ m直线上(如图1所示)的若干侧泄场测点场 z 分量的归一化峰值随其 y 坐标变化的关系分别如图3(a)和图3(b)所示;位于相同水平面的 $y=0$ m的直线上分布式负载末端外的后泄位置若干测点场 z 分量的归一化峰值随其 x 坐标变化的关系如图3(c)所示。作为比较,图中均给出了实验结果。从图3可以看出,模拟器外泄场 z 分量峰值的模拟结果与实验结果符合得很好,说明外泄场 z 分量峰值模拟的准确性。考虑到模拟器附近一定范围内外泄电场的 z 分量仍然为主极化分量,且计算时电场的三个分量都是相关的,故本算例也可以说明外泄场幅值模拟的准确性。此外,从图3还可以看出,测点距离模拟器越远,外泄场越小。

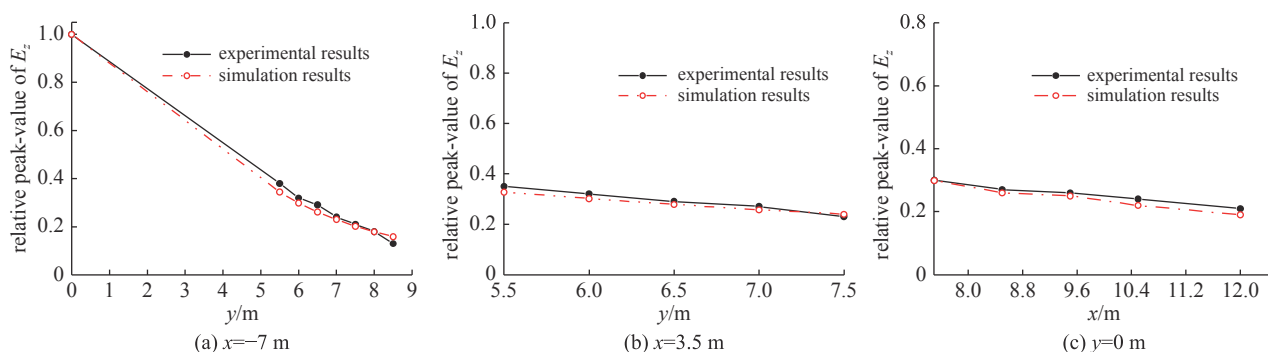


Fig. 3 Comparison of relative peak-values of leakage electric fields got from simulation and experiment

图3 若干测点外泄场理论模拟和实验结果的对比

3 常规分布式负载有界波EMP模拟器的模拟

第2节中“春雷号”模拟器虽然是分布式负载有界波EMP模拟器,但其本身结构、构建及周围环境比较复杂,对其外泄场规律的分析不具有代表性。为此,本节将建立如图1所示的常规分布式负载有界波EMP模拟器的模型,并对其外泄场进行模拟分析。建模时,将图1所示的模拟器倾斜传输段及模拟器铺地金属网都用金属直板来等效处理;并设模拟器馈电处极板宽 a 、上/下极板的间距 b 、工作空间的最大宽度 w 、高度 h 、前过渡段及末端分布式负载在 x 方向投影的长度 L_1 及 L_2 均与第2节的“春雷号”模拟器相同;模拟器分布式负载的设计也与“春雷号”模拟器^[26]相同。模拟计算时,仍然以模拟器内部测点 $P_1(-7,0,-0.5)$ m场的 z 分量为归一化因子。

3.1 不同高度的外泄场的对比

设模拟器置于平坦的水泥地面上,水泥地及其下方大地的介质参数与第2节同。模拟器电压源为双指数脉冲,其上升沿为5 ns、半高宽为80 ns,对应的式(5)中 $\alpha=1.0155 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $\beta=3.445 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 。分别在在水泥地面相

距 $h_d=0.01\text{ m}$ 及 1.5 m 的水平面上, 位于传输线段 $x=-7\text{ m}$ 的直线上选择若干侧泄场测点, 在分布式负载后端 $y=0$ 的直线选择若干后泄场测点; 并设侧泄场测点与模拟器 $+y$ 方向边缘的垂直距离为 d_y (下同); 设后泄场测点与模拟器 $+x$ 方向边缘的垂直距离为 d_x (下同), 如图 1(a) 所示。根据模拟, 图 4(a) 及图 4(b) 分别给出了上述两个水平面上若干侧泄场及后泄场测点场 z 分量的归一化峰值分别随 d_y 及 d_x 的变化曲线; 图 5(a) 和图 5(b) 则分别给出了对应的侧泄场和后泄场测点的归一化电场幅值分别随 d_y 及 d_x 的变化曲线。

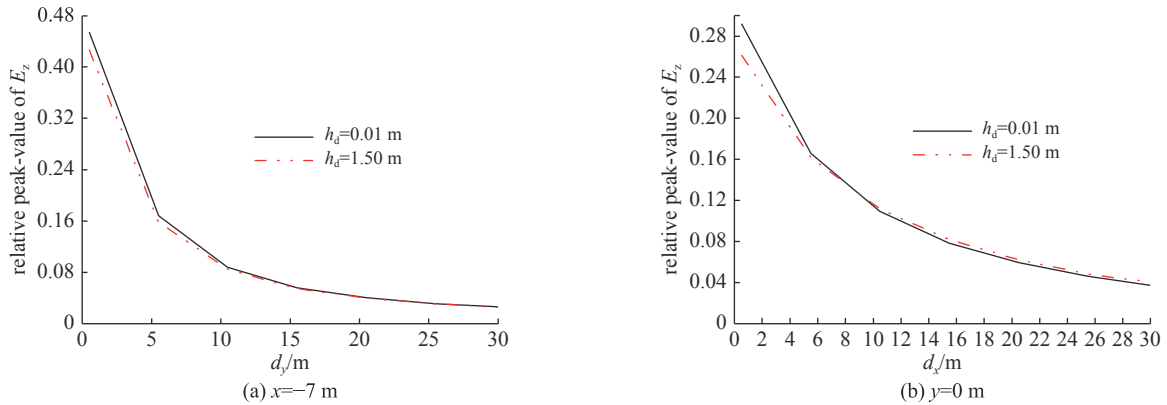


Fig. 4 Comparison of relative peak-values of leakage field(E_z) at different horizontal plane with various h_d

图 4 距离水泥地面高度 h_d 不同的侧泄场及后泄场 z 分量的归一化峰值的比较

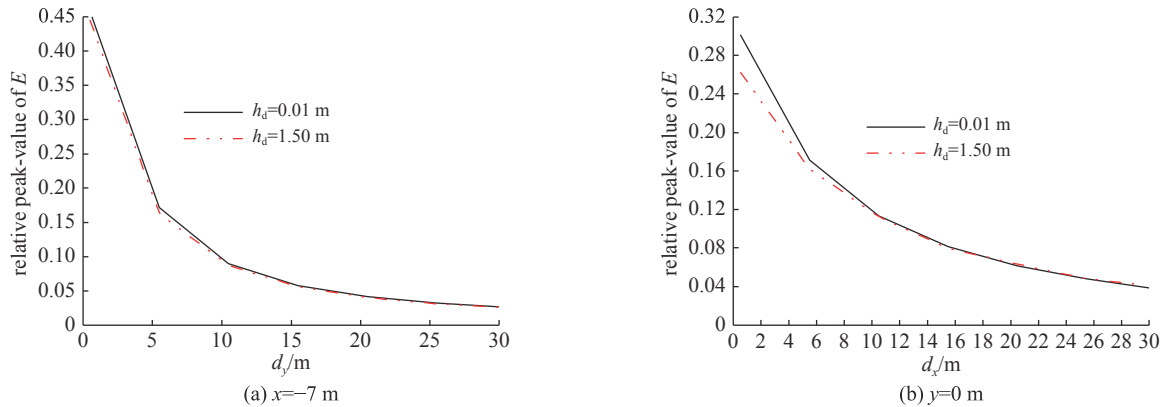


Fig. 5 Comparison of relative peak-values of leakage field at different horizontal plane with various h_d

图 5 距离水泥地面高度不同的侧泄场及后泄场的归一化幅值的比较

从图 4 和图 5 可以看出: (1) 与模拟器 $+x$ 方向边缘的垂直距离 d_x 相同且 d_x 比较小的后泄场测点, 其所在的水平面越接近水泥地面, 测点场的幅值或者 z 分量峰值越大。侧泄场也有类似的结论。这是由于水泥地面相对于空气, 导波性能更好, 故贴近水泥地的外泄场衰减更缓慢。但随着与模拟器边缘的垂直距离 d_x 及 d_y 的增加, 外泄场在 $h_d \leq 1.5\text{ m}$ 高度范围内受测点高度的影响减小, 即外泄场测点位置距离模拟器越远, 其电场幅值及 z 分量的峰值受高度的影响越小。这是由于外泄的电磁波在沿着水泥地面传输的过程中, 水泥地面上的电磁波也在逐渐衰减。在后续讨论中, 为了考虑外泄场最恶劣的情况, 将外泄场的测点选择与水泥地面相距 $h_d=0.01\text{ m}$ 的水平面上; (2) 不同水平面上外泄场的幅值及 z 分量峰值的变化规律相同。考虑到工程人员更关心外泄场的总场幅值对周围人员及环境设施的影响, 故后续的分析比较中将只考虑外泄场的幅值。

3.2 不同激励源时外泄场的比较

设模拟器置于平坦的水泥地面上, 水泥地及其下方大地的介质参数与第 2 节同。设模拟器的激励源分别为“上升沿 1 ns 、半高宽 20 ns ”、“上升沿 2.5 ns 、半高宽 23 ns ”及“上升沿 5 ns 、半高宽 80 ns ”的双指数电压源。其中, 前两个脉冲源对应的式 (5) 中的 α, β 分别为“ $\alpha=3.937 \times 10^7\text{ s}^{-1}, \beta=17.962 \times 10^8\text{ s}^{-1}$ ”及“ $\alpha=4.0 \times 10^7\text{ s}^{-1}, \beta=6.0 \times 10^8\text{ s}^{-1}$ ”。根据模拟, 给出激励源不同时与水泥地面相距 $h_d=0.01\text{ m}$ 高的水平面上若干测点电场的归一化幅值如表 1 所示。其中, 测点 A(-12, 5.5, 0.5) m、测点 B(-7, 5.5, 0.5) m 及测点 C(3.5, 5.5, 0.5) m 为与模拟器 y 方向边缘的垂直距离 $d_y=0.5\text{ m}$ 的侧泄场测点, 测点 D(7.5, 5.5, 0.5) m 为距离分布式负载末端角点 x 和 y 方向各 0.5 m 的监测点, 测点 E(7.5, 0, 0.5) m 为与分布式负载末端 x 方向边缘的垂直距离 $d_x=0.5\text{ m}$ 的后泄场测点, 如图 1(a) 所示。从表 1 可知,

表 1 激励源不同时若干外泄场测点电场归一化幅值的比较

t_r /ns	FWHM/ns	relative peak-values of leakage field				
		A	B	C	D	E
1.0	20	0.415	0.424	0.361	0.244	0.310
2.5	23	0.439	0.445	0.376	0.259	0.309
5.0	80	0.459	0.458	0.409	0.245	0.301

当模拟器采用上述 3 种激励电压源激励时: (1) 与模拟器 +y 方向边缘和 +x 方向边缘间距为 0.5 m 的外泄场测点, 其在 $x < 0$ m 的传输线段对应的侧泄场归一化幅值大于其在 $x > 0$ m 的分布式负载段的侧泄场的幅值, 也大于模拟器分布式负载末端的后泄场的幅值; (2) 与模拟器 $\pm y$ 方向边缘间距相同的测点, 在 $x < 0$ m 的传输线段, 测点在 x 方向距离激励源越远, 侧泄场越大; (3) 位于角点的测点 D 的场最小。

在与水泥地面相距 $h_d = 0.01$ m 高的水平面上, 分别在位于传输线段 $x = -7$ m 及 $x = -3$ m、分布式负载段 $x = 3.5$ m 的直线上选择若干外泄场测点, 在分布式负载后端 $y = 0$ 的直线上选择若干后泄场测点。分别采用上述 3 个激励源激励, 根据模拟, 得到不同位置的外泄场测点的归一化电场幅值随与模拟器边缘距离的变化关系如图 6 所示。

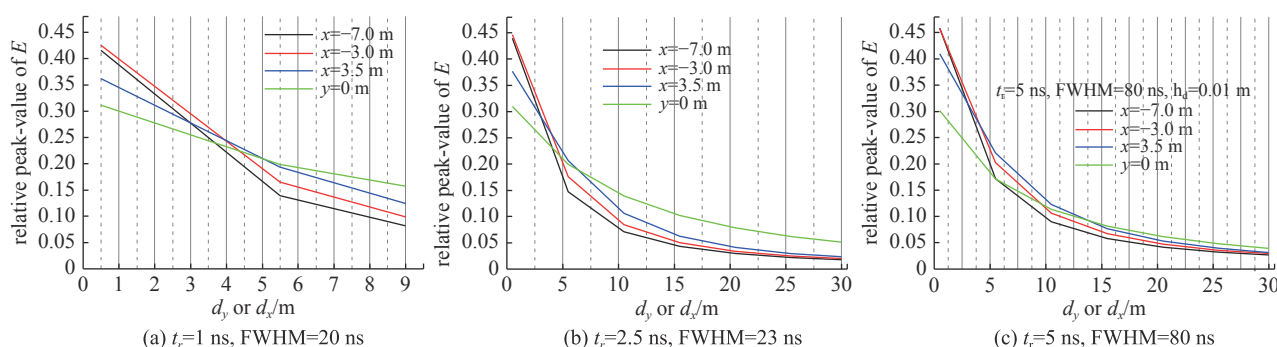


Fig. 6 Comparison of relative peak-values of leakage field at different location

图 6 不同位置的外泄场测点电场归一化幅值的比较

从图 6 可以看出: (1) 分别采用上升沿为 1, 2.5 ns 及 5 ns 的 3 个双指数脉冲源激励时, 当外泄场的测点与模拟器 +y 方向边缘或 +x 方向边缘的垂直距离分别大于 3.64, 6.25 m 及 13.75 m 时, 后泄场的幅值大于侧泄场的幅值。根据文献 [7] 可知, 上述 3 个激励源中所含低频成分依次增多。由于模拟器末端的分布式负载用于吸收低频分量, 泄露高频分量, 因此, 理论上, 激励源所含的低频成分越多, 从分布式负载端泄露的后泄场越少, 从而导致开始出现“后泄场的幅值大于侧泄场的幅值”的外泄场测点与模拟器边缘的间距更远。模拟结果与理论分析一致; (2) 分别采用上升沿为 1, 2.5 ns 及 5 ns 的 3 个双指数脉冲源激励时, 侧泄场的测点与模拟器 +y 方向边缘的垂直距离 d_y 分别约大于 3.86, 3.92 m 及 4.15 m 时, 模拟器分布式负载段对应的 $x = 3.5$ m 侧泄场幅值大于传输线段对应的侧泄场的幅值; (3) 不管采用上升沿为 1, 2.5 ns 还是 5 ns 的电压源, y 方向距离模拟器边缘相同距离时, $x = -3$ m 位置的侧泄场大于 $x = -7$ m 位置的侧泄场; (4) 不管采用上升沿为 1, 2.5 ns 还是 5 ns 的电压源, 距离模拟器边缘位置比较近的测点在传输线段的侧泄场的幅值 > 分布式负载段侧泄场的幅值 > 分布式负载末端的后泄场幅值, 这一点与表 1 的结论一致; 随着与模拟边缘间距的增加, 分布式负载段侧泄场的幅值开始大于传输线段的侧泄场, 当测点与模拟器边缘的距离增加到一定程度, 分布式负载段的后泄场比侧泄场大。

图 7(a)~图 7(d) 分别给出上升沿 $t_r = 2.5$ ns、半高宽为 23 ns 及上升沿为 5 ns、半高宽为 80 ns 的电压源激励时, 在距离地面 0.01 m 的水平面上, 不同位置的外泄场测点归一化电场幅值的比较。

从图 7(a)~(c) 可以看出, 在距离模拟器 y 方向边缘垂直距离小于 30 m 的范围内, 与上升沿为 5 ns、半高宽为 80 ns 相比, 激励源的上升沿为 2.5 ns、半高宽为 23 ns 时, 侧泄场归一化幅值稍有减小但差别不是很大。理论上, 垂直极化的有界波模拟器属于导波天线, 传输低频能量, 侧泄高频能量。因此, 当激励源所含的高频分量越多, 侧泄出去的能量就越多。但从模拟器侧泄出去的电磁波沿着水泥地面传输的过程中, 高频分量损失得比低频分量多, 因此上述两种激励源激励时模拟器的侧泄场差别不是很大。从图 7(d) 可以看出, 在距离模拟器 x 方向边缘垂直距离小于 30 m 的范围内, 激励源上升沿为 5 ns、半高宽为 80 ns 时的侧泄场归一化幅值比上升沿为 2.5 ns、半高宽为 23 ns 时小。这是由于吸收负载用于吸收低频, 泄露高频, 而相比于上升沿为 5 ns、半高宽为 80 ns 的激励源, 上升

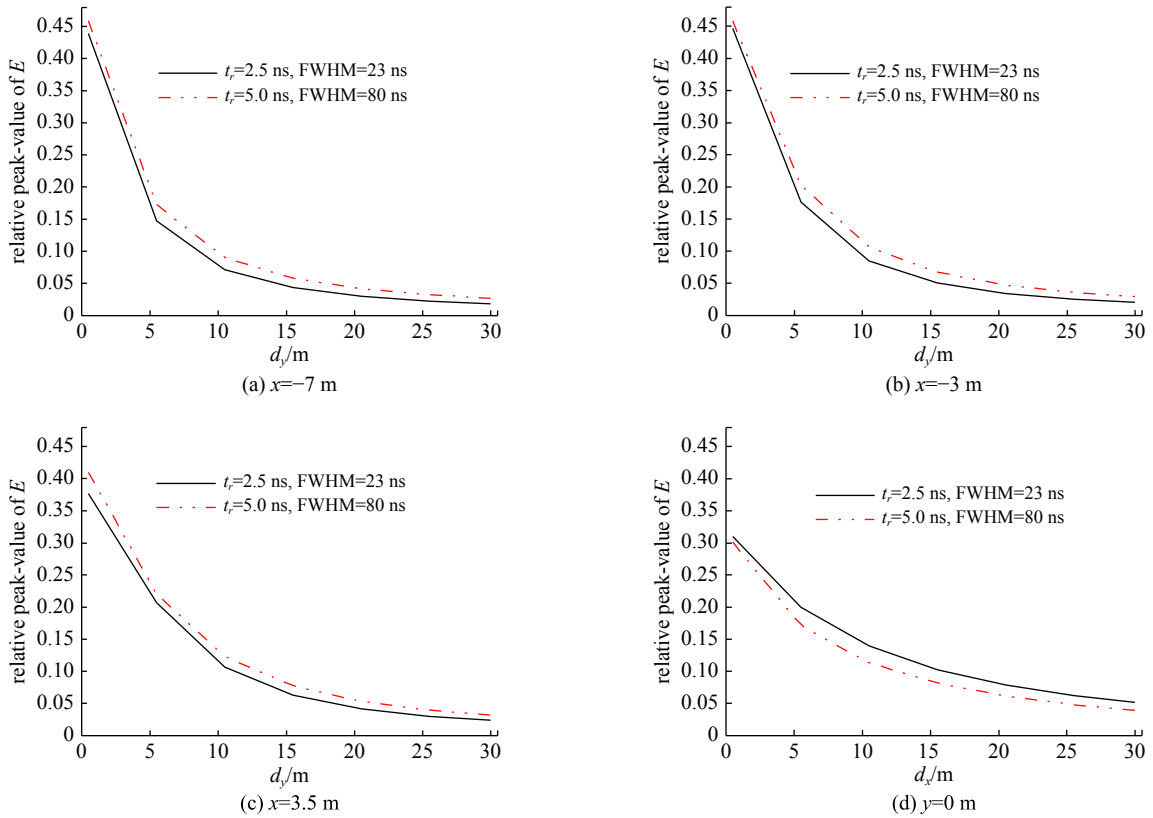


Fig. 7 Comparison of relative peak-values of leakage field as exciting source changes

图 7 激励源不同的各外泄场测点归一化场幅值的比较

沿为 2.5 ns、半高宽为 23 ns 的激励源所含的高频成分比较多,因此在一定距离范围内,采用上升沿为 2.5 ns 的激励源激励时,从分布式负载末端外泄的后泄场更大。

3.3 无水泥地时大地介质参数对模拟器外泄场的影响

与 3.1 节和 3.2 节不同,本小节将假设模拟器底部的金属网直接铺在大地上,即模拟器底部金属网下方及周围没有铺水泥地。根据 3.2 节的模拟分析可知,对于同一个模拟器相同高度水平面上的测点,不同激励源的外泄场衰减曲线相似。因此,本小节在模拟分析大地介质参数对模拟器外泄场影响时,选择上升沿 5 ns、半高宽 80 ns 的双指数电压源作为模拟器的激励源。

3.3.1 大地相对介电常数对模拟器外泄场的影响

与 3.2 节类似,在距离地面 0.01 m 的水平面上,分别在传输线段 $x=-7$ m 及 $x=-3$ m、分布式负载段 $x=3.5$ m 的直线上选择若干外泄场测点,在分布式负载末端 $y=0$ 的直线上选择若干后泄场测点。保持大地的电导率 $\sigma=0.003$ S/m 不变,图 8(a) 给出了大地相对介电常数 ϵ_r 分别为 10 及 3 时各位置外泄场归一化幅值的最大相对差,图 8(b)

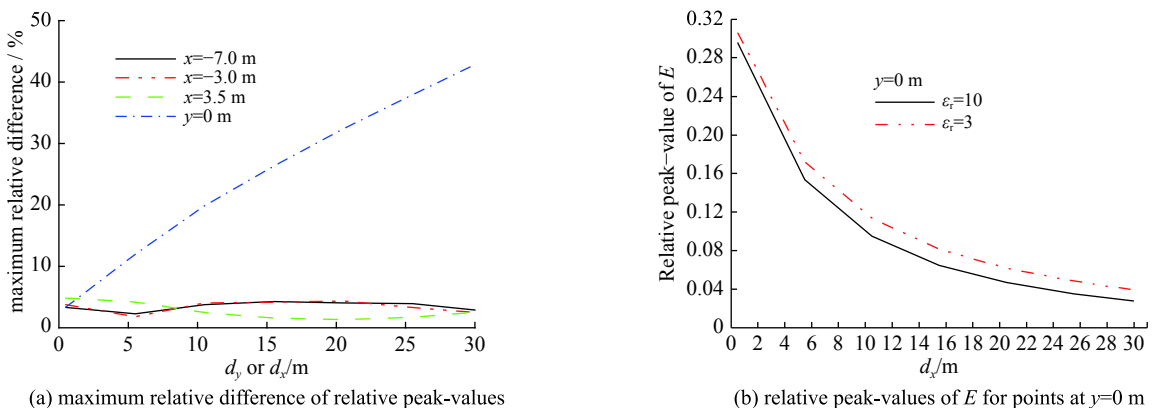


Fig. 8 Comparison of leakage field from simulator as ϵ_r of ground changes

图 8 大地相对介电常数分别为 10 及 3 时外泄场的比较

给出了大地相对介电常数 ϵ_r 分别为 10 及 3 时 $y=0$ 的直线上若干后泄场测点的归一化场幅值。从图 8(a) 可以看出: (1) 当大地相对介电常数在 3~10 范围内变化时, 大地的介电常数对模拟器传输线段对应的侧泄场的影响很小, 两者的最大相对差小于 5%。大地的介电常数对模拟器分布式负载段侧泄场有一定的影响, 当大地的相对介电常数分别取为 3 及 10 时, 两种情况下分布式负载段侧泄场峰值的相对差约为 10%; (2) 当大地相对介电常数在 3~10 范围内变化时, 大地的介电常数对模拟器 $y=0$ m 位置的后泄场的影响比较大, 这一点与图 8(b) 所示一致。随着测点与模拟器边缘间距的增加, 两者的相对差在增大, 这是损耗累加的缘故。此外, 从图 8(b) 还可以看出, 大地相对介电常数越大, 后泄场的幅值越小。这是因为大地相对介电常数的增加使得大地对外泄的电磁波的损耗增加的缘故。

3.3.2 大地电导率对模拟器外泄场的影响

保持大地相对介电常数 $\epsilon_r=10$ 不变, 令大地电导率分别取为 0.003 S/m 及 0.1 S/m。根据模拟, 图 9 给出了大地电导率不同时模拟器外泄场若干测点场归一化幅值的对比。可以看出, 随着大地电导率的增加, 距离模拟器边缘相同位置的侧泄场和后泄场都增加。这是由于大地的电导率增强, 大地的导电能力增强, 外泄场衰减缓慢的缘故。

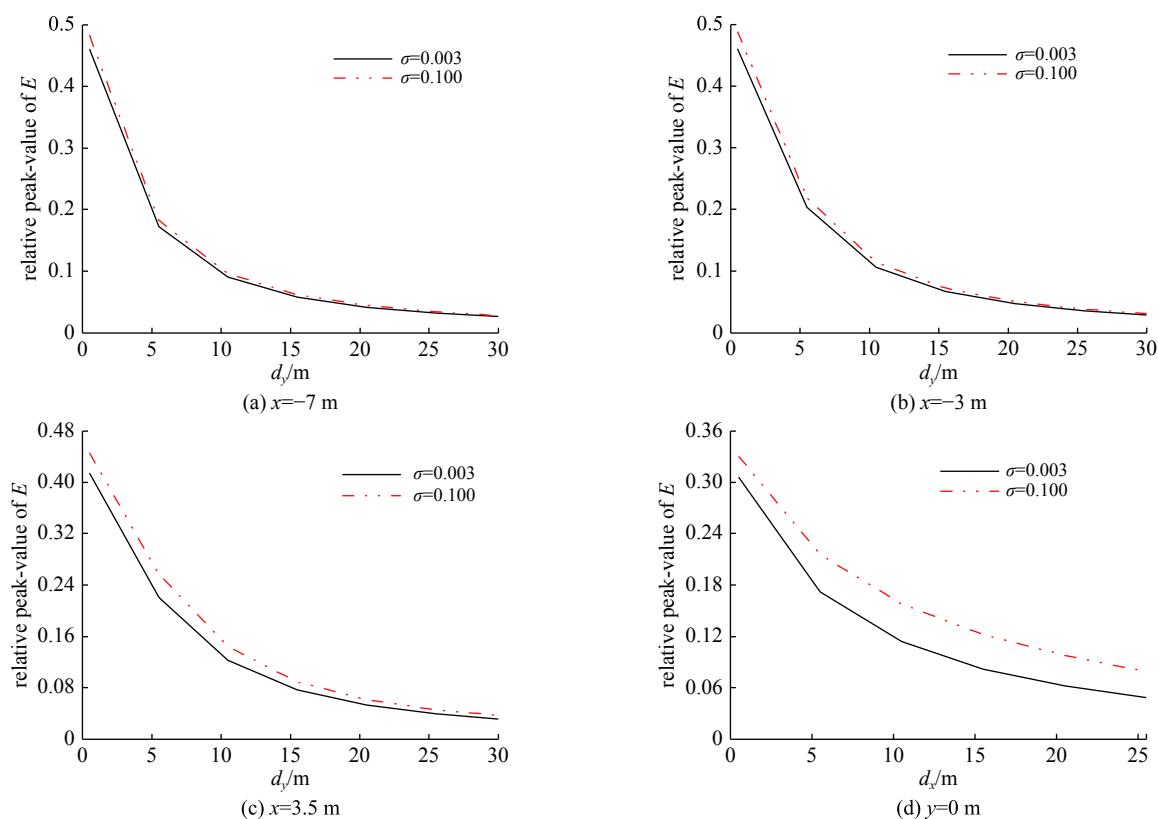


Fig. 9 Comparison of relative peak-values of leakage field as electronic conductivity of ground changes

图 9 大地电导率 σ 不同时外泄场归一化幅值的比较

4 结 论

本文采用基于 PMC 镜像法的并行 FDTD 方法并结合 CST 商用软件, 对常规分布式负载有界波 EMP 模拟器的外泄场进行了模拟分析。先将模拟结果与实验进行对比, 说明模拟的准确性; 然后模拟给出了测点的高度、模拟器激励源及模拟器下方大地介质参数对模拟器外泄场的影响。研究表明: 近地面的外泄场最大; 距离模拟器比较近时分布式负载末端的后泄场幅值小于侧泄场幅值, 但距离模拟器比较远时后泄场会大于侧泄场; 高频分量越多的双指数脉冲激励源激励时, 后泄场越大; 大地电导率越大, 外泄场越大。

参考文献:

- [1] Baum C E. EMP simulators for various types of nuclear EMP environments: an interim categorization[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 1978, 20(1): 35-53.
- [2] 潘晓东, 魏光辉, 任新智. 有界波模拟器内部电场分布仿真研究[J]. 测试技术学报, 2007, 21(5): 410-413. (Pan Xiaodong, Wei Guanghui, Ren Xinzhi.

- Simulation research on electric field distribution in bounded-wave simulator[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2007, 21(5): 410-413)
- [3] 李云伟, 王泽忠, 刘峰. 有界波电磁脉冲模拟器参数对传播模式的影响[J]. *高压技术*, 2007, 33(5): 54-57. (Li Yunwei, Wang Zezhong, Liu Feng. Influence of parameters of boundary electromagnetic pulse simulator on transmitting mode[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(5): 54-57)
- [4] 朱湘琴, 王建国, 陈维青, 等. 集总负载平行板有界波电磁脉冲模拟器的并行时域有限差分模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(9): 2334-2340. (Zhu Xiangqin, Wang Jianguo, Chen Weiqing, et al. Parallelized FDTD simulation for flat-plate bounded wave EMP simulator with lumped terminator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2334-2340)
- [5] 孙凤杰, 罗学金, 李小伟, 等. 亚纳秒前沿有界波模拟器传输线设计的理论分析与实验[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(5): 811-814. (Sun Fengjie, Luo Xuejin, Li Xiaowei, et al. Theoretical analysis and experimental verification on design of transmission line for subnanosecond risetime EMP simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(5): 811-814)
- [6] 朱湘琴, 王建国, 陈维青, 等. 分布式负载平行板有界波EMP模拟器的并行FDTD分析[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 035001. (Zhu Xiangqin, Wang Jianguo, Chen Weiqing, et al. Simulation for flat-plate bounded wave electromagnetic pulse simulator with distributed terminator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 035001)
- [7] Giri D V, Baum C E. Design guidelines for flat-plate conical guided-wave EMP simulators with distributed terminators[R]. Sensor and Simulation Note 402, 1996.
- [8] 国海广, 魏光辉, 范丽思, 等. 快沿电磁脉冲模拟器内部垂直极化场分布仿真研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(3): 403-406. (Guo Haiguang, Wei Guanghui, Fan Lisi, et al. Simulation study on vertical field distribution of EMP simulator with fast risetime[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(3): 403-406)
- [9] 段泽民, 郝凤柱, 张松, 等. 有界波模拟器波形仿真与实验研究[J]. *传感器与微系统*, 2018, 37(2): 76-79, 85. (Duan Zemin, Hao Fengzhu, Zhang Song, et al. Waveform simulation and experimental study of bounded-wave simulator[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2018, 37(2): 76-79, 85)
- [10] Yao Lijun, Shen Tao, Kang Ning, et al. Time-domain simulation and measurement of a guided-wave EMP simulator's field uniformity[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(6): 1187-1194.
- [11] 谢彦召, 相辉, 聂鑫, 等. 不对称结构的分布式负载有界波电磁脉冲模拟器[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(10): 1669-1672. (Xie Yanzhao, Xiang Hui, Nie Xin, et al. Design and construction of an asymmetrical bounded wave EMP simulator with distributed terminators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1669-1672)
- [12] 朱湘琴, 王建国, 陈维青, 等. 垂直极化平行板有界波EMP模拟器辐射近场的快速估算方法[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 115005. (Zhu Xiangqin, Wang Jianguo, Chen Weiqing, et al. Method of fast estimating radiation near-field of flat-plate bounded wave electromagnetic pulse simulator with vertical polarization[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 115005)
- [13] 傅海军, 张维刚, 岳思橙, 等. 系统级电磁脉冲模拟试验技术[J]. *现代防御技术*, 2018, 46(3): 127-132. (Fu Haijun, Zhang Weigang, Yue Sicheng. Electromagnetic pulse simulating test methods on system level[J]. *Modern Defence Technology*, 2018, 46(3): 127-132)
- [14] 谢彦召, 孙蓓云, 聂鑫, 等. 有界波电磁脉冲模拟器下短线缆效应的理论和实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(11): 1717-1720. (Xie Yanzhao, Sun Beiyun, Nie Xin, et al. Response of a short single-wire line illuminated by an EMP simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(11): 1717-1720)
- [15] 翟爱斌, 谢彦召, 韩军, 等. 两种高空核爆电磁脉冲下电话机的效应异同性及概率分布[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(10): 1529-1533. (Zhai Aibin, Xie Yanzhao, Han Jun, et al. Effect of high altitude nuclear electromagnetic pulse upon phone call[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1529-1533)
- [16] 刘洋, 程立, 汪家春, 等. 核电磁脉冲模拟器的电场特性及等离子体阵列的防护性能[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(4): 41-46. (Liu Yang, Cheng Li, Wang Jiachun, et al. Electric field characteristics of nuclear electromagnetic pulse simulator and protection performance of plasma array[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(4): 41-46)
- [17] 杜立航, 高成, 陈海林, 等. 金属挡板对平行线栅有界波模拟器的影响仿真研究[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 073204. (Du Lihang, Gao Cheng, Chen Hailin, et al. Simulation study on influence of metal plate on parallel wire-grid bounded-wave simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 073204)
- [18] Du Lihang, Gao Cheng, Zhang Qi. Numerical analysis on electromagnetic radiation environment of the bounded-wave simulator with a metal plate[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2017, 31(11/12): 1083-1092.
- [19] Tresche F M, Mo C, Shoup R W. Determination of the electromagnetic fields radiated from the ARES EMP simulator[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1994, 36(4): 331-341.
- [20] Kichouliya R, Satav S M, Thomas M J. Leakage electric field analysis of a guided wave NEMP simulator[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2016: 1-6.
- [21] Du Lihang, Gao Cheng, Zhang Qi, et al. Simulation and evaluation of leakage electric field of bounded-wave simulator[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2019, 33(8): 959-971.
- [22] Ahmed S, Raju D, Chaturvedi S, et al. Modal analysis for a bounded-wave EMP simulator-part II: Radiation leakage and mode suppression[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, 47(1): 183-191.
- [23] Zhu Xiangqin, Wu Wei, Zhang Guowei, et al. Analysis of leakage field from bounded wave electromagnetic pulse simulator[C]//IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology. 2019: 1-3.

- [24] 卢万铮. 天线原理与技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004. (Lu Wanzheng. Antenna theory and technology. Xi'an: Xidian University Press, 2004)
- [25] 葛德彪, 魏兵. 电磁波理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (Ge Debiao, Wei Bing. Electromagnetic wave theory. Beijing: Science Press, 2011)
- [26] 谢霖桑, 石跃武, 张国伟, 等. “春雷”号模拟装置新传输线的传输特性[J]. 现代应用物理, 2016, 7: 040501. (Xie Linshan, Shi Yuewu, Zhang Guowei, et al. Study of the new transmission line used in “Spring-Thunder” bounded-wave EMP simulator[J]. Modern Applied Physics, 2016, 7: 040501)
- [27] 杜雷鸣, 谢彦召, 王绍飞. 平行板传输线特性阻抗仿真计算及解析修正[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 083201. (Du Leiming, Xie Yanzhao, Wang Shaofei. Simulation computation and analytic modification of characteristic impedance of parallel-plate transmission line[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 083201)
- [28] Gedney S D. An anisotropic PML absorbing media for FDTD simulation of fields in lossy dispersive media[J]. Electromagnetics, 1996, 16(4): 339-415.

《强激光与粒子束》“速调管放大器”专题 征稿启事

高(大)功率速调管放大器具有高效率、输出微波频率和相位可控等优点, 在相干功率合成、高功率雷达、高梯度粒子加速器、电子对抗等领域具有广泛的应用前景。为促进速调管放大器技术的发展, 《强激光与粒子束》(核心期刊)编辑部邀请国防科技大学张建德教授为专题主编, 组织出版“速调管放大器”专题(拟于2020年下半年出版), 诚邀从事速调管放大器等方面研究的相关学者、研究人员及专业人士投稿。

01 专题征稿范围(包括但不限于)

- (1) 速调管放大器理论
- (2) 高功率速调管放大器技术
- (3) 大功率速调管放大器技术
- (4) 新型速调管放大器理论与技术
- (5) 速调管放大器相关技术

02 论文要求

- (1) 研究论文(包括理论研究、数值模拟和实验研究)。
- (2) 高质量的综述, 要求有较全面的陈述和较深入的评论。
- (3) 研究快报(详见本刊研究快报征稿要求)。
- (4) 来稿请用 Word 排版, 格式、摘要、作者信息参照于《强激光与粒子束》论文模板。(具体论文体例格式和投稿要求请参照《强》刊网站“投稿指南”。)

03 投稿须知

- (1) 请登录《强激光与粒子束》网站(<http://www.hplpb.com.cn>)注册投稿, 栏目选择: 高功率微波技术; 题目前加“速调管放大器专题”。也可以电子邮件投稿, 邮件主题注明“速调管放大器专题”字样, 投稿信箱: 418426551@qq.com。
- (2) 论文投稿的截止日期: 2020年07月31日
- (3) 专题咨询及论文投稿联系人:
 专题主编: 张建德/国防科技大学前沿交叉学科学院, zhangjiande@nudt.edu.cn
 特邀编辑: 巨金川/国防科技大学前沿交叉学科学院, jujinchuan@126.com
 责任编辑: 汪道友/《强激光与粒子束》编辑部, 418426551@qq.com

《强激光与粒子束》编辑部
2020年4月5日