



·效应、试验与评估·

基于TEM喇叭的电磁脉冲辐射天线优化设计*

周星, 芦艺兵, 赵敏, 王平平

(陆军工程大学石家庄校区 电磁环境效应重点实验室, 石家庄 050003)

摘要: 针对TEM喇叭天线终端反射大、低频辐射效率低的问题, 对其进行了仿真优化设计。采用时域分析方法, 分析了端部加载电阻与背部加载电阻的低频补偿方法, 对TEM喇叭天线的尺寸、极板顶角等结构参数进行了优化, 采用末端卷边结构, 提升了辐射场的峰值场强与脉宽。根据仿真优化结果, 研制了长度2.5 m、天线极板间张角45°、天线极板顶角45°的TEM喇叭天线, 通过实测验证了仿真结果。结果表明, 加载电阻可以有效降低反射, 背部加载电阻方式的峰值场强和脉宽比端部加载电阻高, 且采用4个电阻并联加载的效果较好; 适当增加天线长度、极板顶角以及极板间夹角可以提高天线辐射性能。该研究结果为TEM喇叭天线在辐射式核电磁脉冲试验系统的应用提供了参考。

关键词: TEM喇叭天线; 核电磁脉冲; 天线尺寸优化; 加载电阻; 天线结构优化

中图分类号: TN822.8

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230367

Optimization design of EMP radiation antenna based on TEM horn

Zhou Xing, Lu Yibing, Zhao Min, Wang Pingping

(National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the problem of high reflection and poor low-frequency radiation performance of TEM horn antenna, the simulation optimization design is carried out. The low frequency compensation methods of end loading resistance and back loading resistance are analyzed by using time domain analysis method, and the structural parameters such as the size of the TEM horn antenna and the apex angle of the plate are optimized. The peak field strength and pulse width of the radiation field are improved by using the end crimping structure. According to the simulation results, TEM horn antenna with length of 2.5 m, the included angle of the plates of 45° and antenna plate apex angle of 45° is developed. The simulation results are verified by the measurement of the new antenna. The results show that the loading resistance can effectively reduce the reflection, and the peak field strength and pulse width of the back loading resistance are higher than that of the end loading resistance, and the effect of 4 resistors in parallel loading is better. The radiation performance of the antenna can be improved by appropriately increasing the antenna length, the apex angle of the plate and the included angle between two plates. The research results provide a reference for the application of TEM horn antenna in the radiation nuclear electromagnetic pulse test system.

Key words: TEM horn antenna, nuclear electromagnetic pulse, antenna size optimization, loading resistor, antenna structure optimization

核电磁脉冲, 尤其是30 km以上爆炸产生的高空核电磁脉冲, 具有能量强度大、峰值场强高、频谱范围宽、作用时间长、作用范围极广的特点^[1], 能够通过多种途径耦合进电子信息设备, 对其造成严重损伤。为考核电子电气设备的电磁脉冲耐受性, 世界各国建立了各种核电磁脉冲模拟器, 以此来进行试验评估, 但这些模拟器普遍体积庞大, 且建立在固定的场所中, 不具便携性和移动性, 不能满足地面固定设施或不便移动大型设备的电磁脉冲现场测试需求。为了减小系统体积, 研制可拆卸便携式的模拟系统, 本文提出了基于TEM喇叭天线的辐射式电磁脉冲模拟系统。核电磁脉冲的能量主要集中在低频部分^[2], 常用双指数波来模拟其波形。TEM喇叭天线是一种常用的时域天线, 具有方向性较好、体积小、移动方便等优点, 但TEM喇叭天线低频辐射效率较低, 且天线末端开路造成其

* 收稿日期: 2023-06-30; 修订日期: 2024-03-18

基金项目: 国防基础科研计划项目 (JCKYS2023DC03)

联系方式: 周星, zxlwbh@126.com。

反射较大,导致辐射场波形失真^[3-4],且降低了馈源的馈电效率。

为了提高 TEM 喇叭天线的低频辐射性能,国内外学者进行了大量研究^[5-16]。西南交通大学的学者在 TEM 喇叭天线馈电过渡结构上设计低频分离回路结构,减小了低频分量在天线末端的反射,且提高了天线端口馈电效率。西安电子科技大学的学者对弹载小型 TEM 喇叭天线阵列以及非对称的加脊 TEM 喇叭天线进行了研究。西北大学的学者设计了一种采用巴伦馈电结构的瞬时大功率 TEM 喇叭天线用于电磁脉冲测量。中国工程物理研究院的学者采用同轴到平板的馈入结构,并将辐射极板改为两段折线形式,设计了一种新型天线,提升了辐射场的峰值场强,压缩了主瓣宽度,提高了瞬态脉冲峰值功率。

TEM 喇叭天线虽然已被广泛深入地研究,但多被用于超宽带、雷达、高功率微波等领域,而核电磁脉冲的频率相对更低,因此在核电磁脉冲模拟器的应用上,对如何改进 TEM 喇叭天线的低频性能还需进一步研究。为此,本文对提高 TEM 喇叭天线低频辐射性能进行了系列优化设计,使之满足核电磁脉冲模拟的需求。

1 加载电阻对辐射场的影响

TEM 喇叭天线由两块张开的有限长三角形金属板组成,具有一定的方向性,较宽的带宽,是一种较为理想的瞬态脉冲辐射天线。标准 TEM 喇叭天线端口相当于开路,对于低频信号来说,开路天线不能提供电流的回流通路,对于高频信号来说,能量传播到端口时会产生反射。因此,可以通过加载电阻的方式来解决这个问题。加载电阻的方法一般有两种,一种是在端部加载电阻,一种是在背部加载电阻。

本文采用德国 CST 公司开发的 CST MicroWave Studio2019 微波工作室进行仿真。天线基本尺寸为 2 550 mm(长) \times 2 200 mm(宽) \times 2 136 mm(高),天线材料为理想导体,其厚度为 2 mm,在 CST 软件中建立 TEM 喇叭天线模型如图 1 所示。在天线两个极板顶点处采用离散端口馈电。激励信号采用双指数脉冲,峰值电压为 150 kV,上升时间 2.3 ns,半峰值脉宽 23 ns,波形如图 2 所示。频率范围为 0~300 MHz。

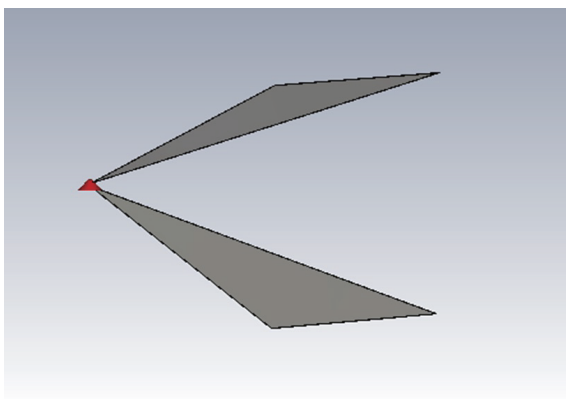


Fig. 1 TEM horn antenna

图 1 TEM 喇叭天线

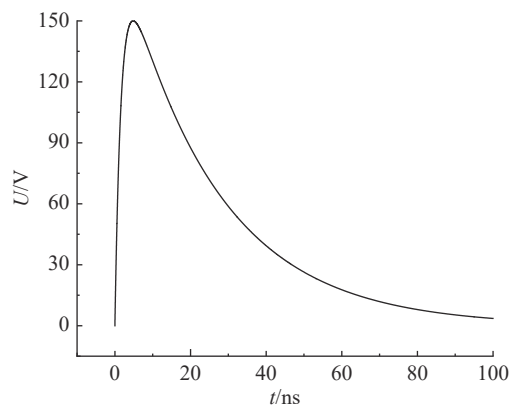


Fig. 2 Excitation pulse waveform

图 2 激励脉冲波形

1.1 端部加载电阻

加载电阻后给电流提供了回路(尤其对于低频信号),如图 3 所示,而且,通过加载电阻实现与天线特性阻抗的匹配,会减小天线末端的反射,使天线电流波形与场波形满足核电磁脉冲波形的要求。

建立端部加载电阻 TEM 喇叭天线模型,如图 4 所示。由于仿真得到 TEM 喇叭天线的特性阻抗为 178 Ω ,加载 1 个电阻时,加载电阻的取值为 TEM 喇叭天线的特性阻抗,取 180 Ω ,加载 2 个电阻时,加载电阻的阻值分别为 360 Ω ,加载 4 个电阻时,电阻阻值分别为 720 Ω 。

图 5 为加载电阻后对反射波形的影响。反射信号的第一个波峰来源于天线的馈电端口,它是由于天线特性阻抗和馈电端口不匹配形成的。第二个波峰的形成原因是为天线口径面与自由空间波阻抗不匹配。仿真结果表明,端部加载电阻可以吸收末端反射能量,减小反射,端部加载 4 个电阻时反射最小。图 6 为端部加载电阻对辐射场波形的影响。由图可得,端部加载电阻方案可以有效减小天线末端反射,但会降低辐射场的峰值场强与脉宽,加

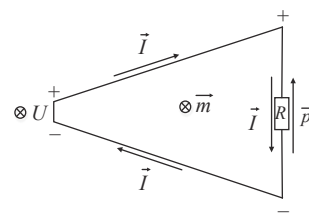


Fig. 3 Schematic diagram of end load resistor

图 3 端部加载电阻原理图

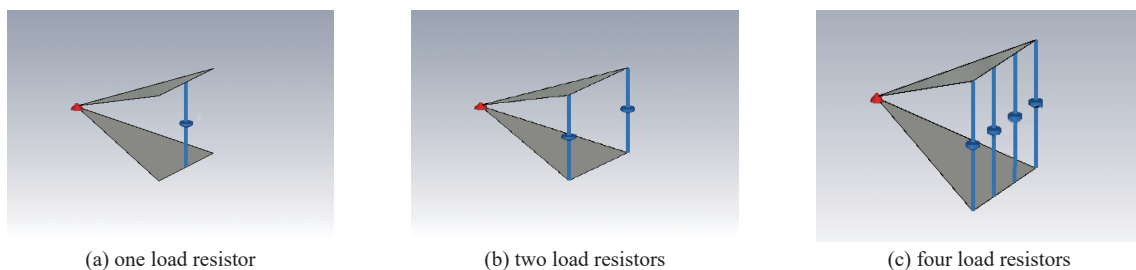


Fig. 4 Model of TEM horn antenna with end load resistors

图 4 端部加载电阻 TEM 喇叭天线模型

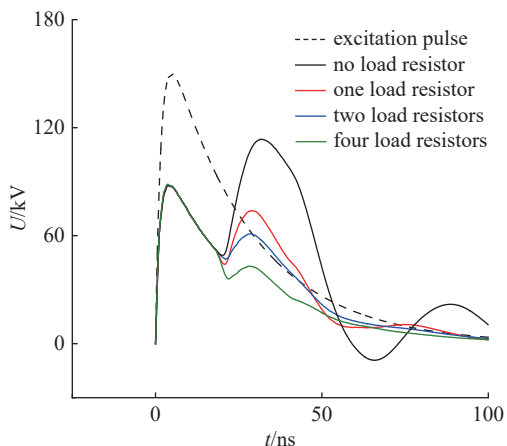


Fig. 5 Comparison of reflection waveforms with end load resistors

图 5 端部加载电阻反射波形对比

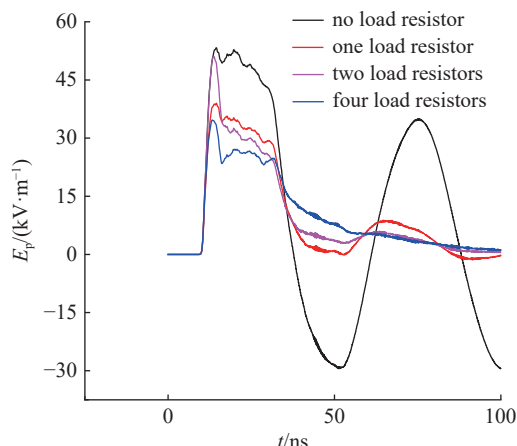


Fig. 6 Radiation field waveforms with end load resistors

图 6 端部加载电阻辐射场波形

载 4 个电阻时, 虽然天线末端反射最小, 但由于加载电阻及导线对辐射场有阻挡作用, 因此其辐射场场强反而比加载两个电阻时更小。

TEM 喇叭天线的辐射主要是电偶极子的辐射, 上下极板集聚电荷形成电偶极子 \vec{p} , 端部加载电阻后, 形成磁偶极子 \vec{m} , 图 3 所示, 它在轴上方向的辐射场与电偶极子在此方向的辐射场方向相反, 说明磁偶极子的存在会削弱辐射场, 而且加载 4 个电阻时, 加载电阻还会对辐射场产生阻挡作用, 因此, 为了改善电阻加载的不良影响, 可以采用背部加载电阻的方式。

1.2 背部加载电阻

电磁波传播过程中, 电场能量与磁场能量相互转化, 电场能量与磁场能量相等时才能传播得更远。TEM 喇叭天线的上下极板集聚电荷形成电偶极子, 背部加载回路相当于一个磁振子, 与 TEM 喇叭天线上下极板形成的电振子形成电-磁振子互补辐射(如图 7 所示), 增大了天线的辐射能流密度, 扩展了天线的工作频带。这样的低频补偿电路不仅能减小天线末端的反射, 还能加强天线在轴上的低频辐射。

在 CST 软件中建立背部加载电阻 TEM 喇叭天线模型, 如图 8 所示, 分别考虑了加载 1 个电阻和 2、4、6 个电阻并联加载四种情况。

加载电阻的取值为: 加载 1 个电阻时, 加载电阻的取值为 TEM 喇叭天线的特性阻抗, 取 180Ω , 加载 2 个电阻时, 加载电阻的阻值分别为 360Ω , 加载 4 个电阻时, 电阻阻值分别为 720Ω , 加载 6 个电阻时, 电阻阻值分别为 1080Ω 。

图 9 为背部加载电阻对反射波形的影响。仿真结果表明, 背部加载电阻可以吸收末端反射能量, 减小反射, 图 10 为背部加载电阻对辐射场波形的影响。从图 9 和图 10 可以看出, 背部加载电阻方案可以在基本不影响辐射场峰值与脉宽的基础上减小反射, 加载电阻数量越多, 反射越小, 这是因为加载电阻数量较小时, 虽然与天线阻值匹配, 但有结构上的突变, 因此会有一定的反射。当加载电阻超过 4 个以后, 改善效果随着加载电阻的增加变化不明显, 因此从工程的角度来说, 背部加载 4 个电阻的方案最好。

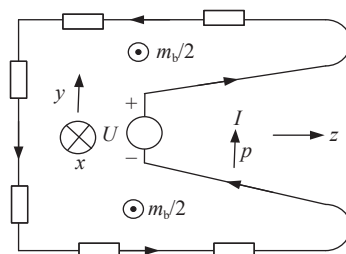


Fig. 7 Schematic diagram of back loading resistor

图 7 背部加载电阻原理图

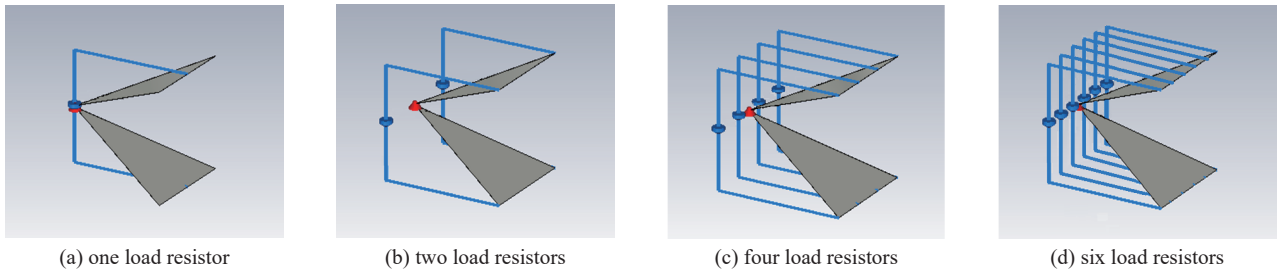


Fig. 8 Model of TEM horn antenna with back loading resistors

图 8 背部加载电阻 TEM 喇叭天线模型

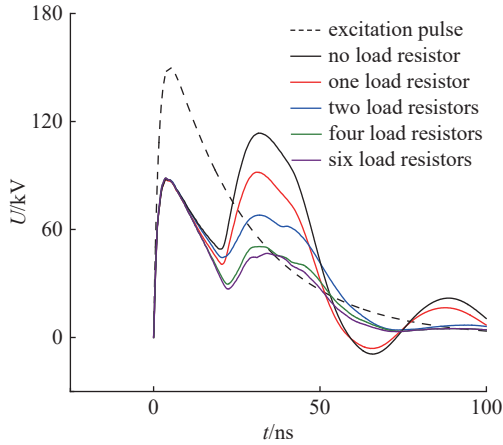


Fig. 9 Reflection waveforms with back loading resistors

图 9 背部加载电阻反射波形对比

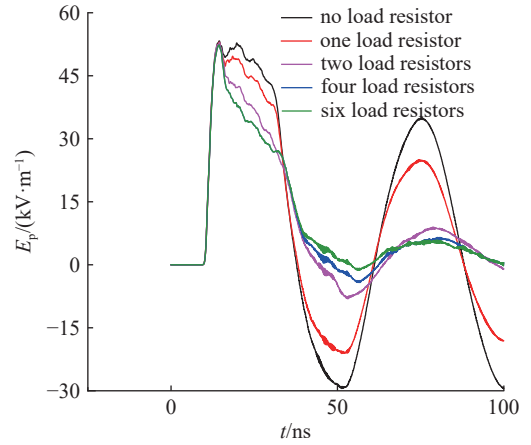


Fig. 10 Radiation field waveforms with back loading resistors

图 10 背部加载电阻辐射场波形

将端部加载 4 个电阻和背部加载 4 个电阻的辐射场频谱进行比较,如图 11 所示,从图中可以看出,相对于端部加载 4 个电阻而言,背部加载 4 个电阻的方式产生的辐射场在 500 MHz 以下频域具有更大的幅度,说明背部加载 4 个电阻的方式在 500 MHz 以下频带辐射性能更佳,证实了这种加载负载的方式对天线低频性能有一定改善作用。

综上所述,相比于端部加载电阻,背部加载电阻方式更优,且背部加载 4 个电阻的方案最好。

2 TEM 喇叭天线尺寸优化

影响 TEM 喇叭天线结构的参数主要有天线长度 l , 天线极板间的张角 θ , 天线极板的顶角 φ 。

保持天线极板间的张角 θ 和天线极板顶角 φ 不变, 改变天线的长度 l , 令其分别为 1、2、3、4、5 m, 观察天线中心轴上距口径面 0.5 m 天线辐射场的峰值场强 E_p , 半峰值脉宽 t_{pw} , 上升时间 t_r 。表 1 为改变天线长度对辐射场的影响。仿真结果表明, 随着天线长度的增加, 辐射场的峰值场强先升高再降低, 半峰值脉宽和上升时间都升高。这是由于适当增加天线的长度, 提高了天线的低频辐射效率, 因此辐射场的峰值和脉宽会提高, 但天线过长时能量会更多地分布于天线极板间, 流入近场区的能量变少。因此, 天线长度需合理取值, 太小难以保证合适的辐射场脉宽, 太大会导致峰值场强较低和前沿时间增加。为了使场波形满足上升时间小于 2.8 ns, 脉宽大于 18 ns, 取天线长度为 2.5 m。

保持天线长度 l 和天线极板顶角 φ 取值不变, 观察天线极板间张角 θ 对辐射场波形的影响。由于天线张角过大时方向性会变差, 这里取 θ 为 15°、30°、45°、60°、75°。图 12 为天线极板张角对辐射场波形的影响。随着天线极板间张角的增大, 峰值场强逐渐变低, 脉宽逐渐增加。天线极板间张角需合理取值, 太小难以保证足够的测试区域, 太大会导致峰值场强较低。这里取 θ 为 45°。

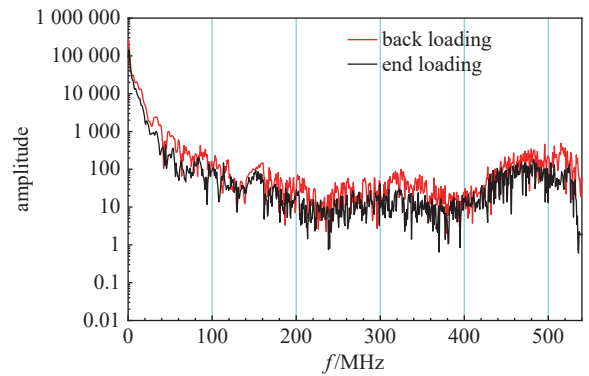


Fig. 11 Frequency spectrum of radiation field waveform with end loading resistors and back loading resistors

图 11 端部加载和背部加载电阻辐射场频谱

表 1 天线长度对辐射场的影响
Table 1 Influence of antenna length on radiation field

l/m	$E_p/(kV \cdot m^{-1})$	t_{pw}/ns	t_r/ns
1	57.33	15.37	0.89
2	61.05	17.64	1.85
2.5	55.30	20.68	2.04
3	51.01	21.27	2.26
4	42.26	22.35	2.49
5	34.61	27.34	2.79

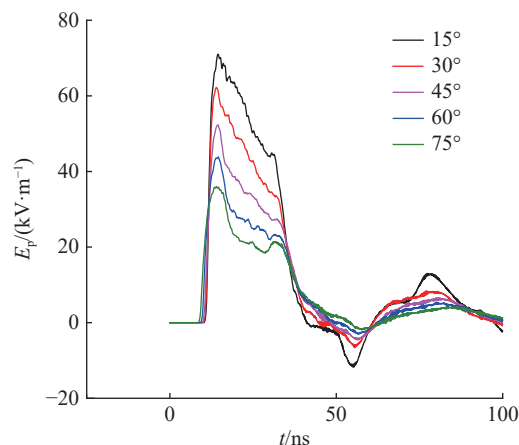


Fig. 12 Influence of included angle between antenna plates on radiation field waveform

图 12 天线极板间张角对辐射场波形的影响

保持天线长度 l 和天线极板间张角 θ 取值不变, 令天线极板顶角 φ 分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° , 观察其对辐射场波形的影响, 如表 2 与图 13 所示。仿真分析可得, 随着天线极板顶角的增大, 辐射场的峰值场强与脉宽均增加, 增加至 45° 时, 峰值场强与脉宽的上升已不再明显, 为取得尽量小的上升时间, 取 φ 为 45° 。

表 2 天线极板顶角对辐射场波形的影响
Table 2 Influence of antenna plate apex angle on radiation field

$\varphi/(^\circ)$	$E_p/(kV \cdot m^{-1})$	t_{pw}/ns	t_r/ns
15	37.67	20.28	2.28
30	47.00	21.88	2.35
45	53.76	20.85	2.50
60	54.51	20.86	2.52
75	54.81	22.04	2.59

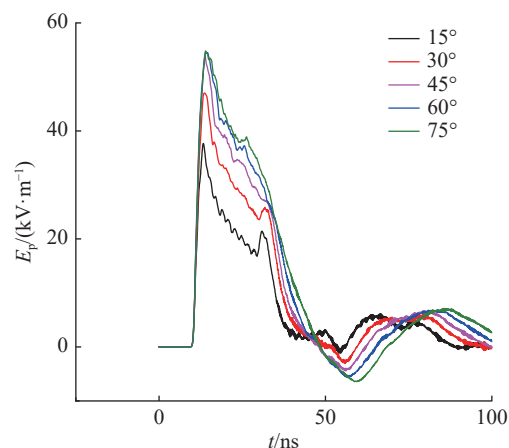


Fig. 13 Influence of antenna plate apex angle on radiation field

图 13 天线极板顶角对辐射场的影响

3 TEM 喇叭天线结构优化

基本形式的 TEM 喇叭天线宽度和高度按相同的比例增加, 阻抗恒定, 取天线长度为 2.5 m, 天线极板间张角为 45° , 天线极板顶角为 45° 。其特性阻抗如式(1)所示, 而辐射场的波阻抗为 377Ω , 因此可以改变天线结构, 减小天线内波阻抗与自由空间波阻抗的差别, 从而改善 TEM 喇叭天线的辐射性能。

$$Z_c/\Omega = 240\pi \left[\left(2\frac{w}{h} + 1.393 + 0.677 \ln \left(2\frac{w}{h} + 1.444 \right) \right) \right] \approx 178 \quad (1)$$

为此, 本文提出一种卷边型 TEM 喇叭天线结构, 卷边型 TEM 喇叭天线是将 TEM 喇叭天线末端向外卷起, 并在末端设计 11 个三角形锐化角, 这种卷边结构不但改善天线阻抗与自由空间波阻抗的匹配, 而且在不增加天线长度的情况下增加了电流回路路径, 即增加了天线有效长度, 锐化角的尖端结构可以使平板型天线与电阻加载线栅之间更好的连接过渡, 从而提升 TEM 喇叭天线的低频辐射能。在 CST 软件中建立卷边型 TEM 喇叭天线模型如图 14 所示。

由图 15 的辐射场波形对比来看, 卷边型 TEM 喇叭天线的峰值场强与脉宽都有提高。

4 实验验证

为了验证所设计天线的效果以及加载方法的有效性, 对天线实物加工, 搭建辐射式电磁脉冲试验系统。辐射

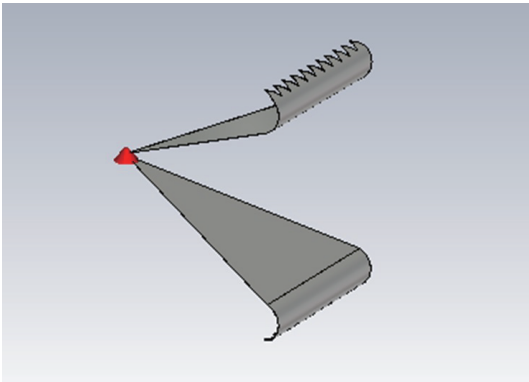


Fig. 14 Crimped TEM horn antenna
图 14 卷边型 TEM 喇叭天线

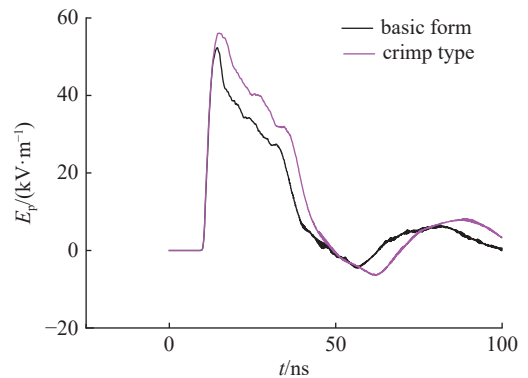


Fig. 15 Comparison of radiation waveform between crimped and basic TEM horn antennas

图 15 卷边型与基本形式的 TEM 喇叭天线辐射场波形对比

式电磁脉冲试验系统由电磁脉冲源、TEM 喇叭天线以及场测量装置组成。天线采用铝板制成,用尼龙棒进行支撑。实测天线尺寸为长 2.5 m,天线极板顶角和极板间张角均为 45°,计算得天线特性阻抗约为 180 Ω 。电磁脉冲源采用双电容并联充电,采用 100 kV 电压充电,开关触发方式采用机械触发,采用远程控制系统对脉冲源进行控制,提高了其工作可靠性和稳定性。最后,脉冲电场测量装置将测得的场通过光纤传输到示波器中,进行辐射场波形的观察与记录。

脉冲辐射天线采用改进卷边型 TEM 喇叭天线,天线结构如图 16 所示。分别对端部加载电阻与背部加载电阻的方式进行了验证实验,图 17 为两种加载方式下的实测波形。从图中可以看出,端部加载方式幅值小于背部加载方式,由此可见,背部加载的方式优于端部加载的方式。



Fig. 16 Electromagnetic pulse radiation test
图 16 电磁脉冲辐射试验

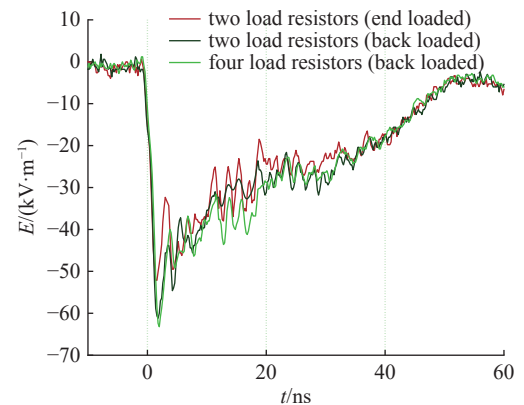


Fig. 17 Testing electromagnetic pulse waveform
图 17 电磁脉冲辐射试验波形

5 结论

本文对 TEM 喇叭天线的尺寸、结构等因素以及加载电阻方式进行了仿真分析,并进行了实验验证。结果表明:加载电阻可以减小天线末端反射,但对峰值场强、半峰值脉宽、上升时间没有太大改变,背部加载方式比端部加载方式更优,综合考虑,背部加载四个电阻的方案最好;增加天线长度,峰值场强先升高后降低,脉宽逐渐增加;增大天线极板间张角,峰值场强逐渐变低,脉宽逐渐增加;增大天线极板顶角,辐射场的峰值场强与脉宽均逐渐增加。为了满足上升时间小于 2.8 ns,脉宽大于 18 ns,以及测试区域的需求,取天线长度为 2.5 m,天线极板间张角 45°,天线极板顶角 45°;卷边型 TEM 喇叭天线可以增加辐射场的峰值场强与脉宽。

参考文献:

- [1] 谭志良, 胡小锋, 毕军建, 等. 电磁脉冲防护理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. (Tan Zhiliang, Hu Xiaofeng, Bi Junjian, et al. Electromagnetic pulse protection theory and technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013)
- [2] 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)
- [3] Harima K. Numerical estimation for TEM horn antennas with transmission line taper shapes[J]. *IEICE Communications Express*, 2017, 6(9): 560-565.
- [4] Yadav S V, Chittora A. A compact ultra-wideband transverse electromagnetic mode horn antenna for high power microwave applications[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(1): 264-270.
- [5] 徐晓敏, 廖成, 陈凯亚, 等. 超宽带 TEM 喇叭天线的低频分离回路设计[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(11): 2954-2959. (Xu Xiaomin, Liao Cheng, Chen Kaiya, et al. Design of low-frequency separation structure for ultra-wideband TEM horn antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(11): 2954-2959)
- [6] 苏军秀. 弹载超宽带小型化天线阵列研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. (Su Junxiu. Research on the missile-borne ultra wideband miniaturized antenna array[D]. Xi'an: Xidian University, 2019)
- [7] 詹海兵, 李勇, 左炎春, 等. 非对称的超宽带 TEM 双脊喇叭天线[J]. *微波学报*, 2016, 32(s1): 110-112. (Zhan Haibing, Li Yong, Zuo Yanchun, et al. Asymmetric TEM double-ridged horn antenna for ultra-wide bandwidth applications[J]. *Journal of Microwaves*, 2016, 32(s1): 110-112)
- [8] 李其信, 高宝建, 任宇辉, 等. 一种电磁脉冲测量超宽带大功率 TEM 喇叭天线[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(4): 519-524. (Li Qixin, Gao Baojian, Ren Yuhui, et al. An ultra-wideband high-power TEM horn antenna for electromagnetic pulse measurement[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(4): 519-524)
- [9] 周蔚红, 刘培国, 何建国, 等. 时域 TEM 喇叭天线的分析和设计[J]. *国防科技大学学报*, 2006, 28(4): 59-62. (Zhou Weihong, Liu Peiguo, He Jianguo, et al. Analysis and design of time-domain TEM horn antenna[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(4): 59-62)
- [10] 范丽思, 王赞, 周星, 等. 定向辐射式核电磁脉冲场模拟器的研制[J]. *电波科学学报*, 2017, 32(1): 58-64. (Fan Lisi, Wang Yun, Zhou Xing, et al. Research on directional radiation HEMP simulator[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2017, 32(1): 58-64)
- [11] 王赞, 陈永光, 王庆国, 等. 基于 TEM 喇叭的辐射波模拟器天线辐射性能研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2012, 32(9): 1070-1073. (Wang Yun, Chen Yongguang, Wang Qingguo, et al. Research on antenna radiation performance of radiating-wave simulator antenna based on TEM[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2012, 32(9): 1070-1073)
- [12] 王赞, 陈永光, 王庆国, 等. 辐射式核电磁脉冲模拟器 TEM 喇叭天线[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 015002. (Wang Yun, Chen Yongguang, Wang Qingguo, et al. Analysis of TEM horn antenna for radiating-wave nuclear electromagnetic pulse simulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 015002)
- [13] 侯荣璞. 一种超宽带 TEM 喇叭天线及阵列的设计与研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. (Hou Rongpu. Design and research of an UWB TEM horn antenna and array[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019)
- [14] 冯强. 超宽带 TEM 喇叭天线设计及口径辐射特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (Feng Qiang. Design of ultra-wideband TEM horn antenna and study of aperture radiation characteristics[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020)
- [15] 谢平, 廖勇, 徐刚. 超宽带折线型 TEM 喇叭天线实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 103229. (Xie Ping, Liao Yong, Xu Gang. Experimental research of ultra-wideband curving TEM horn antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 103229)
- [16] 原艳宁, 冯强, 易超龙, 等. 分布式阻抗末端加载的 TEM 喇叭天线设计[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 023005. (Yuan Yanning, Feng Qiang, Yi Chaolong, et al. Design of TEM horn antenna based on distributed impedance end-loading[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 023005)