

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306231

超大型低反射镜面单锥脉冲电场标准装置*

何梓滨¹ 邢昊¹ 蒋廷勇² 柴昊¹ 吴梦娟¹ 王晓嘉² 张荟如¹

(1. 北京东方计量测试研究所 北京 100086; 2. 中国人民解放军 63660 部队 洛阳 471000)

摘要:针对现有镜面单锥 TEM 室用作脉冲电场传感器校准时存在测试尺寸空间较小、低频响应较差、内部与环境反射影响测量准确度等问题,采用超大型精密单锥结构、终端阻抗加载和低反射异形电波暗室等方法,在仿真优化分析基础上,设计研制了基于超大型低反射镜面单锥的脉冲电场标准装置。该镜面单锥母线长 2 m,能够适应脉冲宽度大于 5 ns 的脉冲信号,整体装置所产生的标准脉冲电场幅值 50~150 V/m 可调、脉冲前沿小于 100 ps、脉冲宽度大于 5 ns,满足装备测试脉冲电场传感器的大空间、宽频带、高准确度校准需求。

关键词: 镜面单锥; 脉冲电场标准; 阻抗匹配; 电波暗室

中图分类号: TB973; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

Ultra large low reflection mirror monocone pulsed electric field standard device

He Zibin¹ Xing Hao¹ Jiang Tingyong² Chai Hao¹ Wu Mengjuan¹ Wang Xiaojia² Zhang Huiru¹

(1. Beijing Oriental Institute of Metrology and Test, Beijing 100086, China;

2. No. 63660 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Luoyang 471000, China)

Abstract: In view of the problems of small test size space, poor low-frequency response, and internal and environmental reflection affecting measurement accuracy when the existing specular monocone TEM cell is used as the calibration of pulsed electric field sensors, the standard device of pulsed electric field based on ultra-large low-reflection specular monocone is designed and developed on the basis of simulation optimization analysis by using ultra-large precision single-cone structure, terminal impedance loading and low-reflection special-shaped anechoic chamber. The generatrix of the monocone is 2 m long and can adapt to pulse signals with a pulse width greater than 5 ns, and the amplitude of the standard pulse electric field generated by the device is 50~150 V/m, the rise time of the pulse is less than 100 ps, the pulse width is greater than 5 ns. This standard device meets the needs of large space, wide frequency band and high accuracy calibration equipped with test pulse electric field sensors.

Keywords: mirror monocone; pulsed electric field standard; impedance matching; anechoic chamber

0 引言

瞬态强电磁脉冲攻击对现代信息化、智能化装备构成了极大威胁,核爆炸、高功率微波、电磁脉冲弹在内的强电磁脉冲武器产生的脉冲信号具有前沿快、频带宽的特点,能够对导航接收系统、天线、雷达等造成暂时或永久性的功能损伤^[1-3]。北京卫星环境工程研究所对空间核爆的研究表明,卫星方圆 800 km 以内的空间核爆释放

的瞬时核电磁脉冲会使卫星丧失功能甚至烧毁^[4]。面对日益复杂的强电磁脉冲环境,国内外的研究机构开展了包括核电磁脉冲在内的强电磁脉冲毁伤实验,以提高装备对电磁脉冲的防护能力。为保证实验结果的准确性,首先要解决对瞬态脉冲电场参数的溯源和量传问题。IEEE Std 1309-2013 中提出采用标准场法校准场强传感器^[5],其中 TEM 室、GTEM 室以及单锥 TEM 室均为可应用于瞬态脉冲电场传感器校准的标准装置^[6-7],国内标准 GJB 8218-2014《高功率超宽谱脉冲辐射场测量方法》中

收稿日期: 2023-02-01 Received Date: 2023-02-01

* 基金项目: 航天科技集团计量科研项目资助

也将镜面单锥作为超宽谱时域标准场产生装置,用于天线的时域标定^[8-9]。国外开展相关研究的机构主要有美国劳伦斯-利弗莫尔实验室、俄罗斯全俄光学物理计量院以及韩国国家计量科学研究院(KRISST)^[10-12];国内主要有清华大学、北京交通大学、浙江大学、国网浙江省电力研究院、西北核技术研究院以及北京东方计量测试研究所开展过相关方面的研究^[13-18]。

目前军事、国防及航天等领域的脉冲电场监测、试验装备的脉冲宽度越来越宽、测试频带范围越来越广,对场强校准设备提出了脉冲宽度更宽、均匀场空间尺寸更大、测量不确定度更小、信号频带更宽的新需求。而现有镜面单锥装置难以满足上述装备新需求。本文设计了一种新型的基于超大型低反射镜面单锥 TEM 室的脉冲电场标准装置,该装置具有传感器测量空间尺寸大、脉冲电场脉宽宽、频带宽、测量不确定小的特点,所产生的标准脉冲电场幅值 50~150 V/m、脉冲前沿小于 100 ps、脉冲宽度大于 5 ns,满足装备测试脉冲电场传感器的大空间、宽频带、高准确度校准需求。

1 问题分析

镜面单锥系统采用镜面板加单锥结构形式,其为无限长双圆锥传输线的变形结构。无限长双圆锥传输线结构如图 1 所示^[19]。

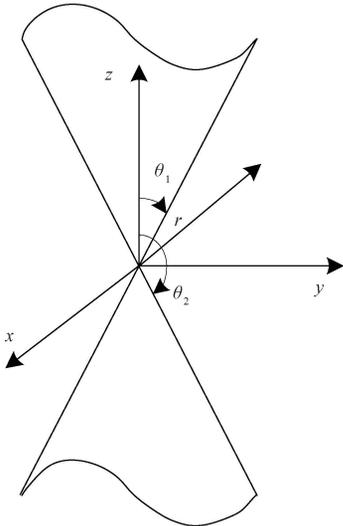


图 1 双圆锥传输线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double-cone transmission line

图 1 中, θ_1 和 θ_2 分别为球坐标系中上下锥母线在 θ 方向的角度。通过求解 Maxwell 方程组,结合球坐标系下的亥姆霍兹方程,可得圆锥传输线内部电磁场为:

$$E_\theta = \frac{V_e(f)}{r \sin\theta \ln\left(\cot \frac{\theta_1}{2} / \cot \frac{\theta_2}{2}\right)} e^{-jkr} \quad (1)$$

式中: $V_e(f)$ 为馈电点处的激励电压, r, θ 为观测点在球坐标系下的坐标。当 $\theta_1 = \theta_h$ (θ_h 为镜面单锥传输线半锥角)、 $\theta_2 = \pi/2$ 时,双圆锥传输线结构变换为镜面单锥传输线结构。

镜面单锥 TEM 室主要由单圆锥体、镜面板及脉冲信号源组成,其锥体核心结构示意图如图 2 所示。单圆锥体反向悬挂,单圆锥锥尖触及镜面板,锥体和镜面板分别与脉冲信号源输出同轴线的内导体和外导体连接,电磁波在圆锥体和镜面板之间反射传播。单锥结构由无限双锥天线演变而来,由于脉冲电场在锥体之间以球面 TEM 波的形式传播,所以理论上锥体间只存在 φ 向磁场分量以及 θ 向电场分量。

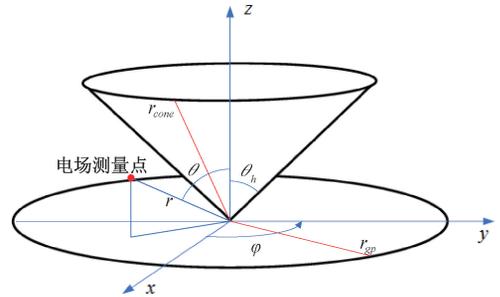


图 2 单锥锥体结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of monocone body structure

针对无限长双锥传输线锥体间向外辐射电磁波的磁场 H_φ 和电场 E_θ 可通过 Maxwell 方程分别表示,如式(2)与(3)所示:

$$H_\varphi = \frac{H_0}{4\pi \sin\theta} \frac{\exp(-jkr)}{r} \quad (2)$$

$$E_\theta = \eta \frac{H_0}{4\pi \sin\theta} \frac{\exp(-jkr)}{r} \quad (3)$$

式中: H_0 为常量; r 为被测点径向坐标; φ 为柱坐标系下切向角; θ 为测点位置到轴线的夹角; η 为空气波阻抗; k 为波数; j 为虚数单位。

两锥体之间的电压和电流可通过 E_θ 和 H_φ 的线积分得到:

$$U(r) = \int_{\theta_h}^{\pi-\theta_h} E_\theta r d\theta = \frac{\eta H_0}{2\pi} \exp(-jkr) \ln\left(\cot \frac{\theta_h}{2}\right) \quad (4)$$

$$I(r) = \int_0^{2\pi} H_\varphi r \sin\theta d\varphi = 2\pi H_0 \quad (5)$$

式中: θ_h 为锥体半锥角。

镜面单锥天线的结构和双锥天线的情况类似,同理可知道,锥体和地之间的电压 $U_g(r)$ 也可通过线积分得

到,因此锥体电压方程变为:

$$U_g(r) = \int_{\theta_h}^{\pi/2} E_\theta r d\theta = \eta H_0 \exp(-jkr) \ln\left(\cot \frac{\theta_h}{2}\right) \quad (6)$$

因此可以得到镜面单锥天线的特征阻抗 Z_0 表达式为^[20]:

$$Z_0 = \frac{U_g(r)}{I(r)} = \frac{\eta}{2\pi} \ln\left(\cot \frac{\theta_h}{2}\right) \quad (7)$$

理想情况下,单锥的特征阻抗只与单锥体半锥角相关。当半锥角设计值为 47° 时,可以实现与 50Ω 同轴线的匹配。

对于镜面单锥 TEM 室,在研究的时间窗口内 ($t_w = [r/c, 2r_{cone}/c]$),其瞬态场分布与无限长双锥天线结构电磁场分布一致。其馈入电压与电场的关系式为:

$$U(r,t) = \frac{\eta H_0}{4\pi} \exp(-jkr) \ln\left(\cot \frac{\theta_h}{2}\right) \quad (8)$$

将式(8)与式(3)联立求解可得无限长单锥 TEM 室内部场强分布为:

$$E_\theta = \frac{U_{t-r/c}}{r \sin\theta \ln\left(\cot \frac{\theta_h}{2}\right)} \quad (r/c \leq t \leq 2r_{cone}/c) \quad (9)$$

其中, E_θ 为与单锥轴线夹角为 θ , 与单锥馈电点距离为 r 的测量点的电场强度, $U_{t-r/c}$ 为单锥馈电点在 $(t-r/c)$ 时刻的脉冲源输出电压值,式(9)适用于对无限长单锥系统的分析,工程实际中只能进行有限长单锥系统设计,为应对脉冲宽度更宽、均匀场空间尺寸更大、测量不确定度更小、信号频带更宽的校准需求,采用超大型、低反射设计,对有限长单锥系统进行以下优化:

1) 提高激励信号源脉冲宽度,增大单锥系统校准时间窗口

设单锥的锥体母线长度为 r_{cone} , 锥尖至接地金属平板的外边缘距离为 r_{gp} , 通过式(10)可以根据预期时间窗口确定单锥体母线及镜面板半径长度^[21]。

$$r/c \leq t \leq \frac{2\min(r_{cone}, r_{gp})}{c} \quad (10)$$

式中: $c = 3 \times 10^8$ m/s, 本系统中 $r_{cone} = r_{gp}$ 。

由式(10)可知,锥体母线长度和镜面板直径决定了单锥系统可使用的时间窗口,采用超大型单锥设计,延长单锥母线的长度,同时在增大脉冲源输出的脉冲信号宽度的基础上,则可以提高单锥系统产生的脉冲电场宽度以及对更大尺寸传感器的校准能力。

2) 扩大可用于校准的电场空间尺寸

根据 IEEE Std 1309-2013,传感器的长度应当至少小于标准场产生装置尺寸的 $1/5$ ^[22],为了实现较大被测传感器的校准,通过超大型镜面单锥设计,为被校传感器提供更大的校准空间,减少被测传感器对标准场引入

的扰动。

3) 降低单锥系统低频反射

通过对单锥系统的 TDR 测试可以发现,在电磁波传输至锥体或镜面板边缘时,单锥阻抗特性会产生突变,偏离预设的 50Ω ,产生阻抗失配的情况,极易在单锥内部产生电磁波反射,如图3所示。结合对单锥端口 S_{11} 参数的测量结果,系统在低频,特别是在 300 MHz 以下,反射比较严重。由于单锥的低频特性依赖于单锥尺寸^[23],通过延长单锥尺寸,提高系统与低频电磁波的匹配程度,可以有效优化低频段的反射情况,进一步扩宽单锥系统的频带下限。

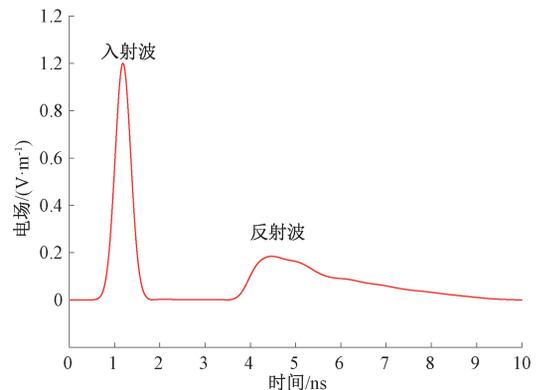


图3 单锥空间内电场测量点电场时域波形

Fig.3 Electromagnetic wave propagation in cone space

4) 减少来自锥体内部、周围环境等的多径反射,提高所产生电场的幅值稳定度

单锥内的低频反射一方面会影响端口 S_{11} 参数,另一方面会对内部电场稳定性造成破坏;同时锥体外围环境内电磁波的反射以及仪器辐射电磁波也会对电场幅值稳定性产生干扰。采用终端阻抗加载的方式可以在一定程度上减少锥体末端反射^[24]。为保证校准准确性,在镜面板及锥体末端产生第一次反射之前,被校传感器脉冲响应必须要衰减到足够小的值;此外,在锥体外围环境建立低反射的吸波环境,可以有效减少锥体外围环境空间对单锥内部电场产生的影响。

本系统在单锥系统的周围设计了全电波暗室,在 30 MHz~ 6 GHz 范围内,屏蔽性能 ≥ 70 dB,反射率 < -20 dB,此暗室可以有效减少单锥系统对外辐射的信号向测量区域的反射,同时也可有效屏蔽掉单锥系统可能对外界环境的电磁波影响。此外,本系统设计了单锥末端阻抗加载系统,可以有效减少电磁波传播到单锥末端时因阻抗不连续而出现的反射情况。由此,延长单锥尺寸,在其与周边环境敏感度方面不会产生影响。

综合以上几方面的影响因素,设计了脉宽 $t_w \geq 5$ ns 的脉冲信号源,提升了脉冲电场激励源持续时间,同时为

保证锥体内被测传感器不受到反射波影响,单锥母线长 r_{cone} 及镜面板半径 r_{gp} 应当满足式(11):

$$\begin{aligned} r_{gp} &> t_w \cdot c \\ r_{cone} &> t_w \cdot c \end{aligned} \quad (11)$$

所设计的超大型低反射镜面单锥脉冲电场标准装置如图 4 所示,由异形电磁波暗室低反射系统、镜面单锥系统、快上升沿脉冲源以及脉冲电磁场强传感器组成,单锥母线长度为 2 m,半锥角为 47° ,根据式(10)可知,单锥的时间窗口长度取决于单锥的母线及镜面板半径的最小值,本设计中镜面单锥系统的单锥母线与镜面板半径尺寸相同,均为 2 m,所设计的超大型镜面单锥系统可适用于脉宽 6 ns 以内的标准脉冲信号。单锥系统与脉宽 ≥ 5 ns、上升沿 ≤ 100 ps 的脉冲源相配合,则可以产生脉冲宽度 ≥ 5 ns、上升沿 ≤ 100 ps,脉冲峰值 ≥ 100 V/m 的脉冲电磁场。

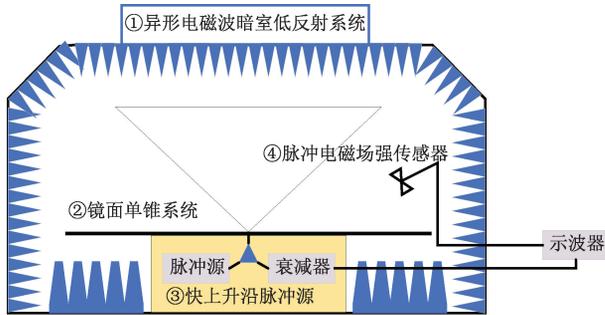


图 4 基于超大型低反射镜面单锥的脉冲电场标准装置
Fig. 4 Pulsed electric field standard device based on super large low reflection mirror monocone

在实现上述设计的实际工程研制过程中,需对以下问题开展进一步研究解决:

- 1) 单锥末端阻抗加载的串并方式对单锥 TEM 室的 S_{11} 参数优化影响较大;
- 2) 由于锥体体积较大,在实际车床加工过程中锥体母线直线度不可避免地存在加工误差,需分析其对单锥电性能指标的影响;
- 3) 如何设计异形低反射电磁波暗室构型,以实现暗室对单锥 TEM 系统的总反射率为最低。

2 仿真优化分析

单锥馈电口的散射参数 S_{11} 值反应了单锥馈电口的反射情况,直接关系到镜面单锥系统所产生的电场与理论设计计算值的一致性情况, S_{11} 越小,则脉冲信号在单锥馈电口的反射系数越小,那么镜面单锥系统所产生的电场与理论设计计算值的偏差就越小,所设计的基于镜面单锥的脉冲电场标准装置的测量不确定就越小。

单锥的反射主要有阻抗失配产生的反射以及外部环境反射。由式(12)可得, S_{11} 参数能够反映单锥 TEM 室的阻抗匹配程度,而由前文分析可知,有限单锥阻抗与以下因素有关:1)单锥半锥角;2)单锥导体边缘处的阻抗突变。其中单锥的半锥角又受到单锥表面的平面度影响。

$$S_{11} = -20 \lg \left(\frac{VSWR + 1}{VSWR - 1} \right) = -20 \lg \left(\frac{Z_0}{Z_d} \right) \quad (12)$$

综上,本文通过对阻抗加载方式、锥体表面平面度要求和电磁波暗室构型方式等 3 方面进行仿真分析,优化单锥系统馈电点的 S_{11} 参数指标。

2.1 阻抗加载方式对 S_{11} 的影响

为解决单锥 TEM 室低频响应差的问题,采用了单锥锥体末端与镜面板边缘连接匹配阻抗的方式来提高单锥 TEM 室低频段的性能。通过如图 5 所示仿真结果可知阻抗加载对 S_{11} 参数指标具有较好的优化效果。

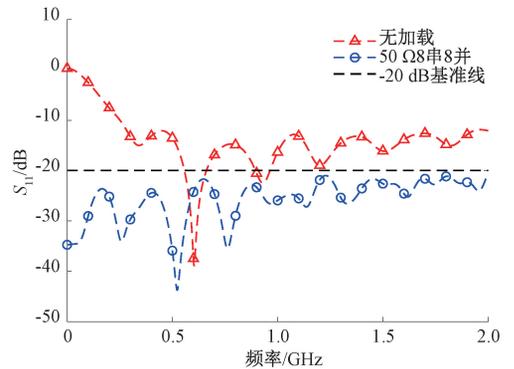


图 5 加载电阻及未加载电阻 S_{11} 对比

Fig. 5 Impedance loaded and unloaded S_{11} comparison

但不同的阻抗加载方式,对单锥 TEM 室的优化效果可能不同。阻抗匹配网络设计时应当考虑以下 4 点影响因素:

- 1) 单锥在结构上具有轴对称性,产生的脉冲电磁场在空间内各个方向也具有相似性;
- 2) 单锥系统自身特征阻抗为 50Ω ,需要考虑阻抗匹配问题;
- 3) 减少阻抗匹配网络组成的金属网格造成电磁波在 TEM 腔体内产生反射;
- 4) 阻抗匹配网络应预留出传感器校准空间。

基于以上设计思路设计了 6 竖直线并联、6 斜直线并联、7 串 8 并、8 串 8 并等 7 种阻抗加载方式,电阻加载示意图如图 6 所示。

通过对不同的阻抗加载后端口 S_{11} 参数变化进行仿真比较,优选效果最佳的匹配负载加载方式。仿真结果如图 7 所示,具体 S_{11} 参数数据如表 1、2 所示。结果表明,7 串联-8 并联和 8 串联-8 并联的加载方案相对其他

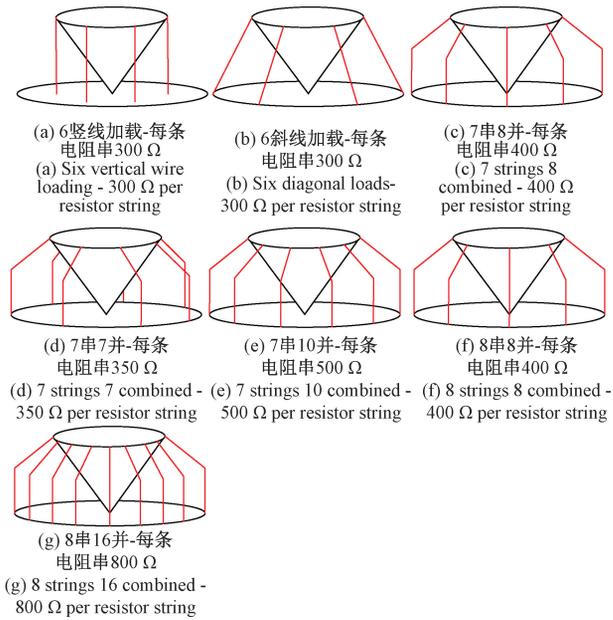


图6 电阻加载示意图

Fig. 6 Schematic diagram of resistance loading

方案更佳。10 并联以及 16 并联的方案阻抗线密度较大,端口反射反而增加,此外,过于密集的阻抗加载方式也影响到在实际使用过程中传感器放置的可操作性,不利于镜面单锥系统的优化设计。

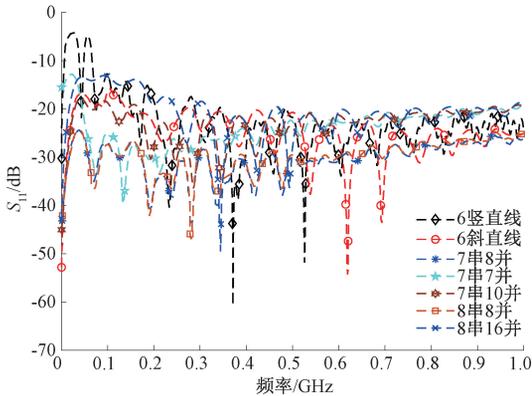


图7 不同阻抗加载方式的 S_{11} 参数值

Fig. 7 S_{11} parameters of different impedance loading modes

表1 不同阻抗加载方式的 S_{11} 均值

Table 1 The mean value of S_{11} under different impedance loading modes

| 阻抗加载方式 | S_{11} 均值/dB | S_{11} 最大值/dB | 负载电阻单元值/ Ω |
|-----------|----------------|-----------------|-------------------|
| 6 竖直线并联接地 | -19.8 | -4.0 | 300.00 |
| 6 斜直线并联接地 | -25.2 | -15.8 | 300.00 |
| 7 串 8 并 | -29.1 | -22.9 | 57.14 |
| 7 串 7 并 | -25.1 | -10.2 | 50.00 |
| 7 串 10 并 | -23.0 | -17.8 | 71.40 |
| 8 串 8 并 | -29.1 | -22.4 | 50.00 |
| 8 串 16 并 | -21.3 | -12.9 | 25.00 |

表2 不同阻抗加载方式的不同频点下 S_{11} 变化

Table 2 S_{11} changes at different frequency points with different impedance loading methods

| 频点/GHz | 0.05 | 0.10 | 0.30 | 0.50 | 0.70 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6 竖直线并连接地 | -7.3 | -12.7 | -24.7 | -21.8 | -24.6 |
| 6 斜直线并连接地 | -7.3 | -16.1 | -24.7 | -20.7 | -30.5 |
| 7 串 8 并 | -25.9 | -27 | -28.8 | -30.1 | -30.4 |
| 7 串 7 并 | -22.7 | -25.2 | -27.3 | -22.8 | -21.2 |
| 7 串 10 并 | -18.6 | -18.6 | -25.1 | -23.9 | -21.1 |
| 8 串 8 并 | -25.8 | -27.3 | -28.4 | -29.5 | -29.7 |
| 8 串 16 并 | -13.6 | -13.2 | -18.5 | -28.0 | -21.3 |

在以上仿真分析的基础上,从表1和2中可以看出,阻抗加载方式为7串联-8并联和8串联-8并联两种方案在各个频点的 S_{11} 参数值优于其他阻抗加载方式,为进一步区分,设计了如图8所示的5种不同电阻串分布的组合方式。

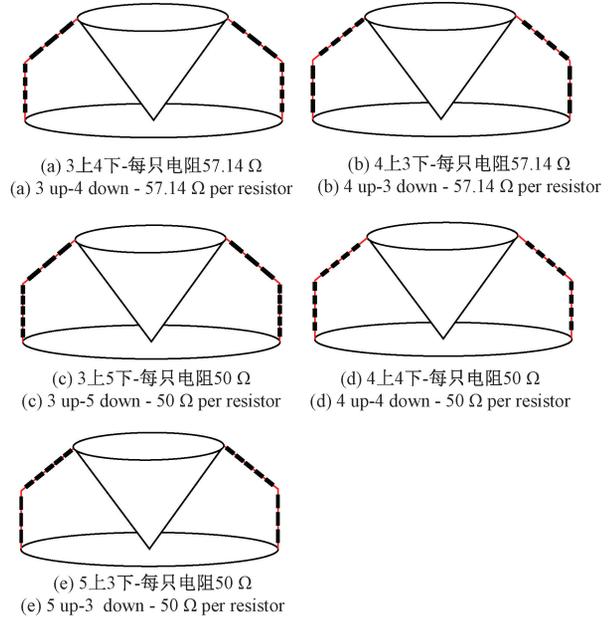


图8 不同电阻分布加载示意图

Fig. 8 Schematic diagram of loading with different resistance distribution

仿真频率范围为 DC ~ 1 GHz,仿真结果如图9所示,比对结果如表3所示。结果表明,5种方案的 S_{11} 均值为 -29 dB 左右,且均值差异小于 0.6 dB,从仿真结果来看,采用8串联-8并联的方式端口 S_{11} 参数在仿真频段处于较优水平。

2.2 单锥母线直线度对 S_{11} 参数的影响分析

母线 2 m 的超大型镜面单锥,加工难度较大,加工过程中难以避免出现锥体母线直线度加工误差,导致锥体表面局部出现起伏现象。为研究锥体母线直线度对端口

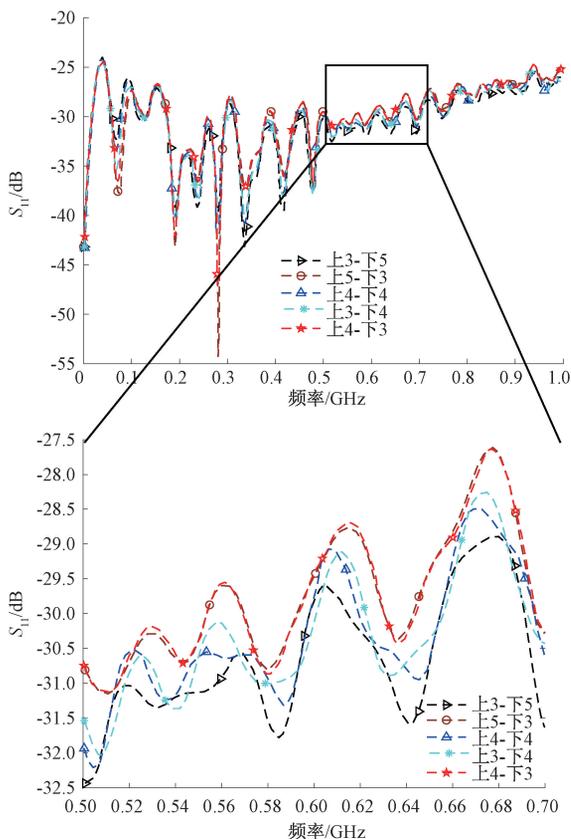


图 9 支路串联电阻方式不同情况的比较

Fig. 9 Comparison of different cases of branch series resistance

S_{11} 参数的影响,通过对锥体表面存在的起伏情况,在锥体母线距锥尖 30 cm 外设置局部表面变化模型,如图 10 所示。

表 3 支路不同串联电阻方式的 S_{11} 均值

Table 3 The mean value of S_{11} of different series resistance modes of the branch

| 负载加载方案 | S_{11} 均值/dB | 负载电阻单元值/ Ω |
|------------|----------------|-------------------|
| 7串(上4下3)8并 | -28.8 | 57.14 |
| 7串(上3下4)8并 | -29.1 | 57.14 |
| 8串(上4下4)8并 | -29.1 | 50.00 |
| 8串(上5下3)8并 | -28.8 | 50.00 |
| 8串(上3下5)8并 | -29.3 | 50.00 |

从距锥尖 30 cm 外母线设置凹陷,长度为 60 cm,最大凹陷深度位于距锥尖 60 cm 处,整体设计为下凹三角形,三角形高 ΔH 为局部母线直线度,仿真中分别设置 ΔH 为 0、1.5、5 和 20 mm。仿真模型如图 11 所示,仿真得到的 S_{11} 曲线如图 12 所示。

单锥在 4 种局部凹陷状态下的 S_{11} 参数仿真值如表 4 所示,从数据统计中可以发现 S_{11} 均值的增量为 0.04 dB, S_{11} 最大值增量为 0.09 dB,且在仿真频段内 S_{11} 最大值频点是稳定的,结果表明, S_{11} 参数在 3 GHz 以内

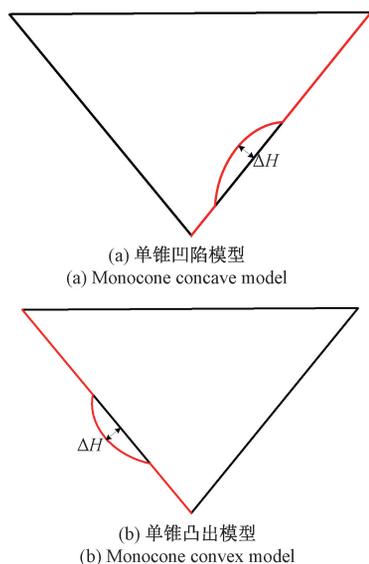


图 10 表面形变单锥模型示意图

Fig. 10 Schematic diagram of monocone model with surface deformation

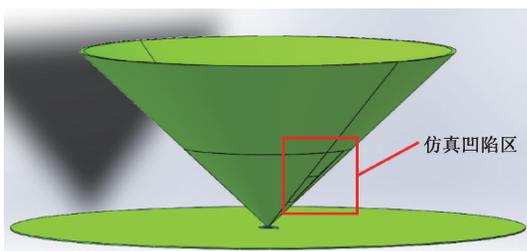


图 11 单锥局部锥面凹陷建模

Fig. 11 Modeling of monocone local conical sag

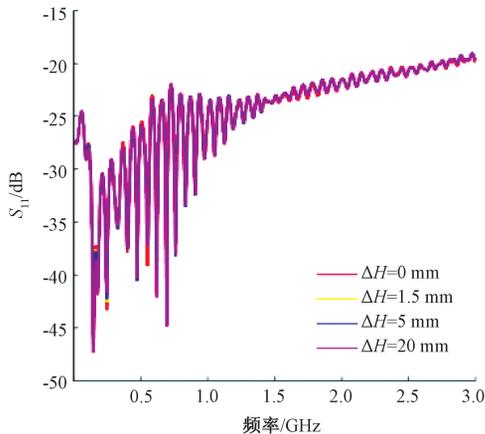


图 12 锥面局部凹陷的镜面单锥的 S_{11} 仿真结果

Fig. 12 S_{11} simulation results of mirror monocone with local concave cone

S_{11} 变化很小,但从图中可以得出,随频率增大, S_{11} 参数呈增大趋势。依据电磁波传输原理,随频率增大, S_{11} 参

数受单锥表面平整度影响越大,因此为提高高频性能,在设计中对表面平整度要有较高要求。

表 4 单锥 4 种局部凹陷状态端口 S_{11} 参数统计表

Table 4 Statistical table of parameters of port S_{11} in the four local depressions of the cone

| 局部凹入深度/ mm | S_{11} 均值/dB | S_{11} 最大值/dB | S_{11} 最大值频点/ GHz |
|---------------|----------------|-----------------|------------------------|
| 0 | -23.0 | -19.1 | 2.973 |
| 1.5 | -22.9 | -19.1 | 2.976 |
| 5 | -22.9 | -19.0 | 2.976 |
| 20 | -22.9 | -19.0 | 2.976 |

2.3 电磁波暗室构型对 S_{11} 参数的影响分析

针对本项目的异形电磁波暗室,提出了半电波暗室和全电波暗室两种设计方案,如图 13 所示。半电波暗室的镜面板与地面平齐,地面无法安装吸波材料,三轴调节机构等设备安置于地下室中;全电波暗室的镜面板高于地面,地面上安装吸波材料。

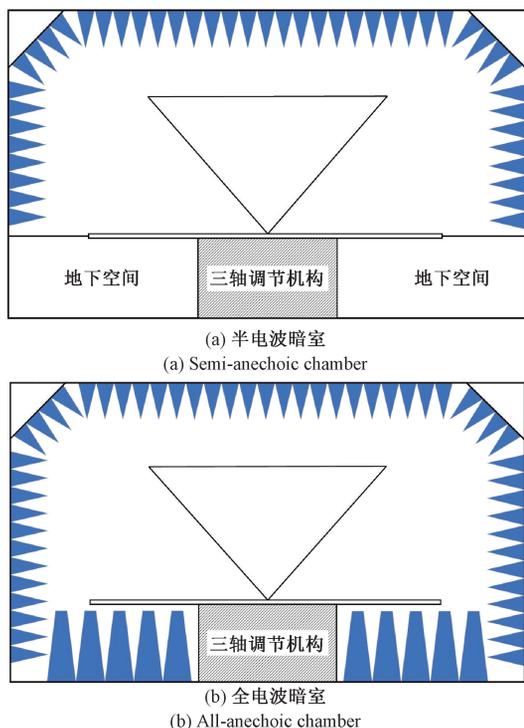


图 13 电波暗室设计示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the electric wave anechoic chamber

仿真结果如图 14 所示,相较于无暗室状态,添加无地面吸波材料的暗室后, S_{11} 参数大幅恶化, S_{11} 参数量值对比如表 5 所示,无地面吸波材料在 0.07 GHz 处 S_{11} 参数高达 -5.74 dB;而在增加地面吸波材料后,则可在仿真频段内将 S_{11} 参数优化至 -20 dB 以下。

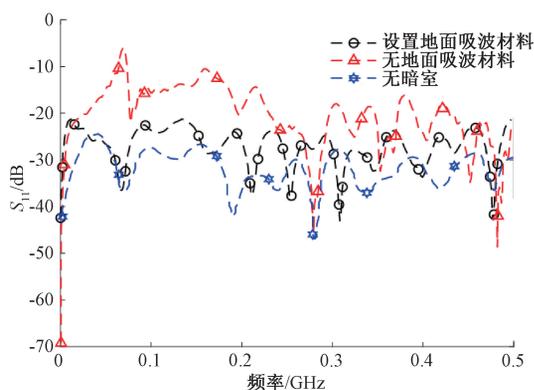


图 14 半电波暗室与全电波暗室内 S_{11} 参数对比

Fig. 14 Comparison of S_{11} parameters in half-wave anechoic chamber and full-wave anechoic chamber

表 5 半电波暗室与全电波暗室内 S_{11} 参数统计量对比
Table 5 Comparison of S_{11} parameter statistics in half-wave anechoic chamber and full-wave anechoic chamber

| 设计方案 | S_{11} 均值/dB | S_{11} 最大值/dB |
|----------|----------------|-----------------|
| 无地面吸波材料 | -15.65 | -5.74 |
| 设置地面吸波材料 | -25.69 | -21.06 |

3 低反射镜面单锥 TEM 室设计

3.1 单锥系统设计

经过理论及仿真分析后,进行了单锥系统设计。基于超大型低反射镜面单锥的脉冲电场标准装置由异形电波暗室低反射系统、镜面单锥系统、快上升沿脉冲源以及脉冲电场强传感器组成。锥体母线长度为 2 m,半锥角为 $47^\circ \pm 0.1^\circ$,镜面板直径 4 m。

1) 阻抗加载设计

根据阻抗加载仿真结果,采用 8 串 8 并的电阻加载方式;根据不同电阻加载分布的仿真结果,“4 上 4 下”的分布方式与其他分布加载方式比较,在仿真全频段的 S_{11} 参数波动幅度较小,故本文阻抗加载采用如图 8(d) 所示的“8 串 8 并、4 上 4 下”加载方式。

2) 锥体表面平面度保证

单锥 TEM 室的主要馈电表面为锥体外表面与镜面板上表面,所以本文设计的表面平面度指标指单锥外表面与镜面板表面的加工精度。限于加工能力、整体尺寸、重量与原材料尺寸限制,锥体与镜面板采用分段、分块式设计:锥体 3 段采用不同的加工方式,末段锥体采用钢板卷边方式进行加工,中段锥体与锥尖采用车床加工;镜面板同样采用车床加工。锥体末段和中段采用焊接的方式连接,镜面板则采用拼接。系统对加工和装配精度提出

了较高的要求,为保证表面平面度,选用合适的加工工艺,实现了锥体母线直线度小于 0.5 mm/m ,镜面板平面度达到了 0.2 mm/m^2 。依据前文的仿真分析,满足项目系统指标的设计要求。

3) 异形电磁波暗室设计

本文所设计的异形电磁波暗室主要由屏蔽钢板、吸波材料、铁氧体等组成。为实现单锥 TEM 室低反射环境需求,屏蔽室采用型钢拼接,组成接近圆柱的正 15 边棱柱,墙体、地面与屏蔽室顶安装铁氧体及吸波材料。为了提高电磁波暗室对电磁波的吸收率,采用圆柱形切边方式拟合半球形。异形电磁波暗室剖面图如图 15 所示。

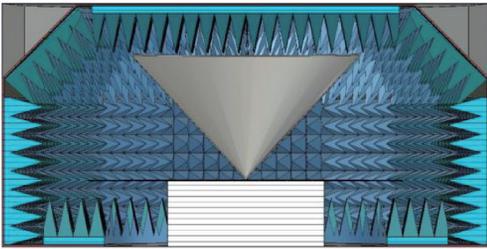


图 15 电磁波暗室设计

Fig. 15 Design of the electric wave anechoic chamber

3.2 系统全波仿真验证

经过以上仿真设计及验证,确定了最终的设计方案,其基本特征是:电磁波暗室为正 15 边形,半径 2.88 m ,高 3 m ,墙面和顶部角锥高 70 cm ,地锥高 81 cm ,镜面板高度 90 cm ,锥体母线长 2 m ,镜面板半径 2 m ,并以此参数进行了全电磁学仿真。对全电磁波暗室进行了全尺寸、完整吸波材料的仿真建模,对单锥系统、阻抗加载系统也进行了仿真建模,在此基础上,对系统装置的馈电口 S_{11} 参数进行了仿真评估,设置输入波形为单峰高斯脉冲,DC ~ 0.5 GHz 频段内的 S_{11} 曲线如图 16 所示,整体低于 -20 dB ,达到了预期的设计效果。

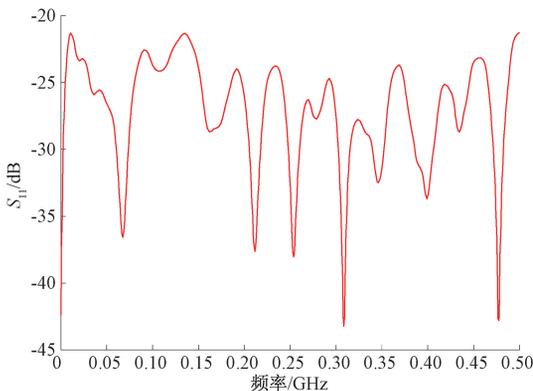


图 16 最终设计端口 S_{11} 参数

Fig. 16 The S_{11} parameters of final design

4 结 论

本文通过理论与仿真分析说明了开展镜面单锥脉冲电场标准装置的超大型和低反射设计的必要性和可行性,并进行了初步方案设计;采用电磁学仿真软件,对研制过程中遇到的阻抗加载、母线直线度以及电磁波暗室设计问题进行了仿真验证,通过仿真优化,确定了效果最佳的方案;对最终设计方案进行了全波仿真,从仿真效果来看,所设计的基于超大型低反射镜面单锥系统的脉冲电场标准装置其端口 S_{11} 参数在仿真频段内均小于 -20 dB ,满足设计要求,装置可应用于脉冲电场传感器的测试与校准。

参考文献

- [1] 严雪飞,朱长青,王佳.瞬态脉冲电场传感器研发现状与展望[J].核电子学与探测技术,2019,39(3):356-362.
YAN X F, ZHU CH Q, WANG J. Research and development status and prospect of transient pulse electric field sensor [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2019, 39 (3): 356-362.
- [2] 宋海声,李兴华,王萱轩,等.同时测量脉冲磁场和电场的仿真研究[J].电子测量技术,2022,45(1):140-144.
SONG H SH, LI X H, WANG X X, et al. Study on simultaneous measurement of pulsed magnetic field and electric fields[J]. Electronic Measurement Technology, 2022,45(1):140-144.
- [3] 李智宇,李昊,曹鹤飞,等.基于 D-dot 传感器的弓网离线放电瞬态电场时域测试方法[J].强激光与粒子束,2022,34(12):70-79.
LI ZH Y, LI H, CAO H F, et al. Time-domain measurement of the transient electric field caused by pantograph-catenary off-line discharge based on D-dot sensor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(12): 70-79.
- [4] 夏彦,孙韶蕾,杨艳斌,等.空间核爆对地面与航天活动的影响[J].航天器环境工程,2020,37(1):12-16.
XIA Y, SUN SH L, YANG Y B, et al. Effects of space nuclear explosions on ground and space activities [J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2020, 37 (1): 12-16.
- [5] IEEE standard for calibration of electromagnetic field sensors and probes (excluding antennas) from 9 kHz to

- 40 GHz-redline[S]. IEEE Std 1309-2013 (Revision of IEEE Std 1309-2005)-Redline, 2013,22:1-231.
- [6] 李欣,张雪芹,曹保锋,等. 电磁脉冲电场探头校准装置及不确定度评定[J]. 核电子学与探测技术,2014,34(8):1007-1010,1023.
- LI X, ZHANG X Q, CAO B F, et al. Standard device of nuclear explosion electromagnetic pulse and evaluation of uncertainty [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology,2014,34(8):1007-1010,1023.
- [7] 严雪飞,朱长青,欧渊,等. 三维脉冲电场传感器的时域校准及不确定度评定[J]. 高电压技术,2019,45(12):4054-4061.
- YAN X F, ZHU CH Q, OU Y, et al. Time domain calibration and uncertainty evaluation of three-dimensional pulsed electric field sensor [J]. High Voltage Engineering,2019,45(12):4054-4061.
- [8] 高功率超宽谱脉冲辐射场测量方法(GJB 8218-2014)[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2014.
- Measure method for the high power ultra-wide band pulse radiation field (GJB 8218 - 2014) [S]. Beijing: Department of Military Standards Publication and Distribution, General Armament Department, 2014.
- [9] 易涛,杨晓瑜,王峰,等. GJB 8218-2014 在高功率激光装置电磁脉冲测量中的应用[J]. 安全与电磁兼容,2018(5):49-53.
- YI T, YANG X Y, WANG F, et al. Analysis of GJB 8218 - 2014 application at high power laser facility electromagnetic pulse radiation measurement [J]. Safety& EMC, 2018(5):49-53.
- [10] KUNZ K S, HUDSON H G, BREAKALL J K, et al. Lawrence livermore national laboratory electromagnetic measurement facility [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1987, EMC - 29 (2):93-103.
- [11] SAKHAROV K Y, MIKHEEVO V, TURKIN V A. National standard of Russian federation for reproduction and transmission of unit sizes of pulse electric and magnetic intensities in ultrawide band range [C]. The 18th High-Power Electromagnetics Conference,2012.
- [12] LEE J G, KANG J S, KIM J H, et al. Time domain antenna range at KRISS [C]. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest. IEEE, 2008.
- [13] 杨超,孟萃,李鹏辉. 镜面单锥 TEM 小室电磁场标准装置[J]. 高电压技术,2016,42(5):1476-1482.
- YANG CH, MENG C, LI P H, et al. Mirror single cone TEM cell electromagnetic field standard device [J]. High Voltage Technology,2016,42(5):1476-1482.
- [14] 董雪鹤. 脉冲电磁场计量技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- DONG X H. Research on pulse electromagnetic field measurement technology [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [15] LI D, GU Y J, MA H Z, et al. Deep learning inverse analysis of higher order modes in monocone TEM cell[C]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022.
- [16] GONG J, WANG Y, LUO L, et al. Calibration of the sensitivity of UHF partial discharge detection systems based on standard device mono-conical TEM cell [C]. 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). IEEE, 2020.
- [17] 燕有杰,蒋廷勇,刘小龙,等. 镜面单锥结构超宽谱短脉冲电场标准装置[J]. 强激光与粒子束,2012,24(12):2873-2876.
- YAN Y J, JIANG T Y, LIU X L, et al. Standard device for ultra wide spectrum short pulse electric field with mirror single cone structure [J]. Intense Laser and Particle Beam, 2012,24 (12):2873-2876.
- [18] 蒋廷勇,燕有杰,刘小龙,等. 短电磁脉冲标准场装置实验室比对[J]. 计量学报,2019,40(6):1107-1111.
- JIANG T Y, YAN Y J, LIU X L, et al. Laboratory comparison of short electromagnetic pulse standard field device [J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40 (6):1107-1111.
- [19] 罗云川,李国志. 浅析脉冲电磁场计量技术[J]. 仪器仪表标准化与计量,2021(1):37-38,41.
- LUO Y CH, LI G ZH. Analysis on the measurement technology of pulse electromagnetic field[J]. Instrument Standardization & Metrology,2021(1):37-38,41.
- [20] 燕有杰,蒋廷勇,刘小龙,等. 超宽谱短电磁脉冲电场标准装置溯源及不确定度评定[J]. 强激光与粒子束,2014,26(6):105-109.
- YAN Y J, JIANG T Y, LIU X L, et al. Traceability and uncertainty of ultra-wideband short pulse electric-field standard device [J]. High Power Laser and Particle Beams,2014,26(6):105-109.

- [21] WANG X J, JIANG T Y, ZHOU H, et al. Research on resistive loading method of monocone antenna [C]. 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium-China (ACES), 2019.
- [22] 姜云升. 瞬态强电磁脉冲场测量关键技术研究 [D]. 北京:清华大学, 2021.
JIANG Y SH. Research on key technologies of transient strong electromagnetic pulse field measurement [D]. Beijing:Tsinghua University, 2021.
- [23] JIANG Y S, MENG C, JIN H B, et al. Determining the effect of relative size of sensor on calibration accuracy of TEM cells [J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, 30(6):78-87.
- [24] 蒋廷勇, 王晓嘉, 周恒, 等. 电阻阵列加载单锥 TEM 室研究 [J]. 计量学报, 2022(11):1-5.

JIANG T Y, WANG X J, ZHOU H, et al. Research on single cone TEM chamber loaded with resistor array [J]. Journal of Metrology, 2022 (11): 1-5.

作者简介



何梓滨(通信作者), 2006 年于天津大学获得学士学位, 2008 年于天津大学获得硕士学位, 现为北京东方计量测试研究所高级工程师, 主要研究方向为航天器电磁测量与校准技术。

E-mail: vip20090909@163.com

He Zhibin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2006 and M. Sc. degree from Tianjin University in 2008. Now he is a senior engineer in Beijing Oriental Institute of Metrology and Test. His main research interests include spacecraft electromagnetic measurement and calibration technology.