

镜面单锥时-频域性能验证实验设计



张荟如¹, 林浩宇², 何梓滨^{1*}, 路润喜¹, 邢昊¹, 王碧云¹, 王子月¹

1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100029

2. 中国计量科学研究院, 北京 100089

【摘要】 为解决镜面单锥电场标准装置的时域和频域性能验证问题, 深入分析了国内外相关的标准规范和研究现状, 提出了一种镜面单锥电场标准装置的时-频域性能验证方法。在时域上, 将镜面单锥电场标准装置与 TEM 室所产生瞬态电磁脉冲电场的脉冲波形参数(幅度、上升时间、脉冲宽度)进行比对; 在频域上, 将镜面单锥电场标准装置与 μ TEM 室产生的连续波电场强度进行比对, 时域和频域性能验证的比对结果均采用 E_n 值进行评定。研究镜面单锥电场标准装置的时-频域性能验证方法, 突破镜面单锥电场标准装置的时域和频域性能验证难点, 对于保证我国脉冲电场量值溯源的准确性, 促进我国瞬态脉冲电场参数的量值统一, 具有重要意义。

【关键词】 计量学; 电磁脉冲; 性能验证; 时域; 频域; 电场

【中图分类号】 TB972

【文献标识码】 A

【文章编号】 2096-9015(2023)08-0043-05

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2023.0234

【引用本文】 张荟如, 林浩宇, 何梓滨, 等. 镜面单锥时-频域性能验证实验设计 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(8): 43-47, 60.

Experimental Design for Verifying the Time-Frequency Domain Performance of Specular Single Cone Electric Field Standard Devices

ZHANG Huiru¹, LIN Haoyu², HE Zibin¹, LU Runxi¹, XING Hao¹, WANG Biyun¹, WANG Ziyue¹

1. Beijing Oriental Institute of Metrology and Testing, Beijing 100029, China

2. National Institute of Metrology, Beijing 100089, China

Corresponding author: HE Zibin, Email: vip20090909163.com

【Abstract】 This study proposes a method to verify the time domain and frequency domain performance of specular single cone electric field standard devices, drawing on an analysis of relevant international and domestic standards and research. In the time domain, pulse waveform parameters (amplitude, rise time, pulse width) of the transient electromagnetic pulse electric fields generated by both the specular single cone electric field standard device and the TEM chamber are compared. In the frequency domain, the comparison is made between the continuous-wave electric field strengths generated by the specular single cone device and the μ TEM chamber. The E_n value is employed to assess the comparison results in both time and frequency domain performance verifications. This research, focusing on the development of a time-frequency domain performance verification method for specular single cone electric field standard devices, addresses the challenges in verifying both time and frequency domain performances of these devices. It is crucial for ensuring the accuracy of pulse electric field measurements in China and for harmonizing the transient pulse electric field parameters.

【Key words】 metrology, electromagnetic pulse, performance verification, time domain, frequency domain, electric field

0 引言

近些年来, 雷电放电、核爆炸以及高功率微波等产生的瞬态强电磁脉冲受到越来越多的关注。瞬

态强电磁脉冲是指频率范围覆盖数千赫兹至数吉赫兹^[1], 峰值场强高达数万伏每米的脉冲电场。瞬态强电磁脉冲对于国防、通信、航空航天等方面的影

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2023-11-02

基金项目: 航天科技集团计量科研项目(2022JS1923)。

作者简介: 张荟如(1999-), 北京东方计量测试研究所读研究生, 研究方向: 航天器电磁测量与校准技术, 邮箱: 2859687903qq.com; 通讯作者: 何梓滨(1982-), 北京东方计量测试研究所高级工程师, 研究方向: 航天器电磁测量与校准技术, 邮箱: vip20090909163.com。

响巨大,如电磁脉冲武器可以在战争中让所有的武器失效,航天器在轨运行过程中遇到的星际间电离辐射、太阳活动等也会产生电磁脉冲,影响航天器的在轨运行^[2-4]。因此,强电磁脉冲的测量成为各军事强国的研究热点^[5]。

研究强电磁脉冲,首先要研究产生强电磁脉冲的装置,其次对强电磁脉冲进行准确的测量。国内外用于产生标准电磁脉冲的装置主要有 TEM 室、GTEM 室、镜面单锥^[6]等,TEM 室受限于频带带宽窄、GTEM 室受限于场均匀性差,不建议作为优选的场生成装置,国际上更推荐镜面单锥室作为场发生器用于校准时域传感器^[7]。对于镜面单锥室,国外主要有俄罗斯全俄光学物理研究院、美国计量技术和标准化研究所(NIST)、韩国计量院(KRIS)等进行相关研究^[8-9],国内清华大学、西北核技术研究所、北京东方计量测试研究所等单位取得了一些研究成果^[10-15],但是我国对镜面单锥的研究还不够成熟,尚无法对镜面单锥进行准确溯源。西北核技术研究所蒋廷勇等人联合清华大学工程物理系、俄罗斯全俄光学与物理研究院,采用 D-dot 传感器为传递标准,开展镜面单锥标准场的联合比对实验^[16]。西北核技术研究所燕有杰等人采用标准场计算法,将镜面单锥电场标准装置分别溯源到脉冲参数、S 参数以及长度参数基准^[17]。

电场强度是无线电计量领域中一个重要的参数,关于电场计量器具检定、校准的标准,目前国际上 IEEE Std 1309-2013 给出了三种 9 kHz 至 40 GHz 频率范围内电磁场传感器和探头的校准方法^[20],分别为传递标准法、标准场计算法和基准探头法,该标准提供了频域校准参数,但对于时域校准参数没有规定。该标准给出了可以产生标准脉冲电磁场的几种装置,分别为 TEM 室、GTEM 室和镜面单锥,但是对于这几种装置的如何溯源并未体现。国内相关的标准有 JJF1886-2020《电场探头校准规范》^[21]、JJF1884-2020《10kHz~100MHz 电磁场探头校准规范》^[22]、JJG(军工)24-2018《电磁场传感器和探头》^[23],规定了用 TEM 室、GTEM 室、同心锥等对电磁场探头进行校准,但是这三个规范提供的校准项目为电场强度、线性响应等,没有时域参数的校准方法。GJB8218-2014《高功率超宽谱脉冲辐射场测量方法》中利用镜面单锥标定脉冲电场传感器,但标定结果只给出了被校传感器的等效高度计算方法,标定项目和结果有待明确^[24-25]。

瞬态电磁脉冲在时域上表现为幅值变化迅速^[18],具有单个极快的上升沿,持续时间短,通常为 ps 或者 ns 级,在频域上表现为频带范围宽^[19]。目前关于瞬态电磁脉冲相关标准中,绝大部分都是频域校准,时域校准也只有较少的相关论文,而镜面单锥由于其时域特性好,研究镜面单锥电场标准装置的时-频域性能验证方法,突破镜面单锥电场标准装置的时域和频域性能验证难点,对于保证我国脉冲电场量值溯源的准确性,促进我国瞬态脉冲电场参数的量值统一,具有重要意义。

1 镜面单锥电场标准装置

由北京东方计量测试研究所联合中国人民解放军 63660 部队项目团队研制的基于超大型低反射镜面单锥的脉冲电场标准装置^[26-27],可产生的标准脉冲电场幅值为 50~150 V/m 可调,脉冲前沿小于 100 ps,脉冲宽度大于 5 ns。如图 1 所示,镜面单锥电场标准装置由脉冲源、镜面单锥系统以及配套的测试仪器组成。其工作原理为:脉冲源产生脉冲信号,馈电到镜面单锥系统,镜面单锥和镜面圆板之间产生可以计算的标准脉冲电场,该标准脉冲电场主要用来校准电场传感器。经过详细分析、仿真,研制了图 2 所示的超大型低反射镜面单锥的脉冲电场标准装置。

镜面单锥系统的示意图如图 3 所示,由单锥锥体和镜面圆板组成。镜面单锥是由无限长双锥天线演变而来,根据麦克斯韦方程,镜面单锥锥体和镜面圆板间电场与馈入电压之间的关系式为式(1)。

$$E\theta = \frac{(1+\Gamma)V_s(t)}{r \sin\theta \ln[\cot(\theta h/2)]} \quad (1)$$

式中, $V_s(t)$ 是馈电点的输入电压; θ 是电场测量点与馈电点之间连线和单锥轴线形成的夹角; θ_h 是单锥的半锥角; r 是测量点到馈电点的距离; Γ 是馈电点的反射系数。上式在时间窗口: $0 \leq t \leq \frac{2l-r}{c}$ 内成立, l 是母线长度, c 是光速。

2 镜面单锥时域频域性能验证方法

前文相关标准分析可知,TEM 室是场强校准中常用的标准装置。在结构上,TEM 室由中间平行的波导段和两端锥形波导组成,其结构封闭,不向外辐射能量,结构简单,运输便携,成本低,环境适应性强,常用作标准场产生装置^[21-22]。IEEE Std 1309-

2013 标准中推荐 TEM 室、GTEM 室、单锥 TEM 室等作为场产生装置,用于校准电磁场传感器,但由于 GTEM 室场均匀差,会产生高次模,不推荐作为优选的场产生装置^[29-30],而 TEM 室产生场的均匀

性相对较好,产生的场可以精确计算,发展历史较长^[26-28],因此本文选择 TEM 室作为镜面单锥时域和频域性能验证的比对装置。

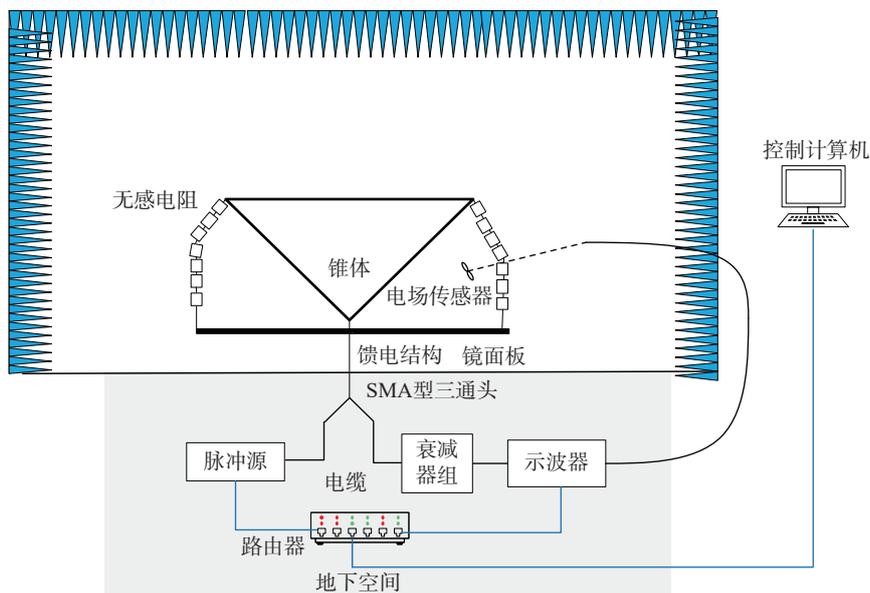


图 1 镜面单锥电场标准装置

Fig.1 Standard device for specular single cone electric field

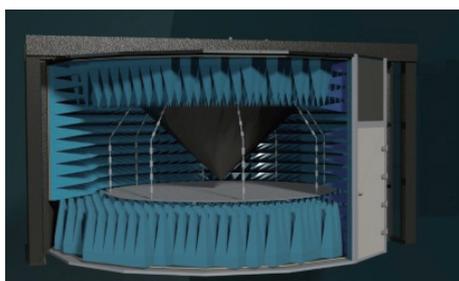


图 2 超大型低反射镜面单锥

Fig.2 Super large low reflective mirror single cone

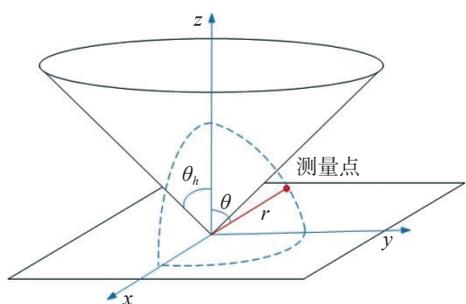


图 3 镜面单锥示意图

Fig.3 Schematic diagram of mirror single cone

清华大学姜云升等人提出了一种采用 TEM 室和镜面单锥进行电场传感器的时域联合校准方法^[30],

并推导出时域校准和频域校准的等价性,时域校准系数和频域校准系数具有等价性。综上所述,针对镜面单锥系统的性能验证,本文提出在时域上,将 TEM 室和镜面单锥产生脉冲电场的波形、上升沿、时域校准系数进行比对,同时脉冲宽度也是脉冲电场的时域特性之一,因此比对项目为脉冲波形、上升沿、脉冲宽度。在频域上,将镜面单锥与中国计量科学研究院场强计量标准 μ TEM 室的电场强度进行比对,比对项目为校准系数、电场强度值。

2.1 时域性能验证方法

针对上述镜面单锥电场标准装置,本文提出一种镜面单锥的时域性能验证方法:如图 4 和图 5 所示,首先利用脉冲源在 TEM 室内产生一标准脉冲场,该脉冲幅值可由 TEM 室的芯板高度、TEM 室输出信号幅度等参数计算得到,利用脉冲电场探头测量该脉冲场,示波器记录探头的输出波形,并记录脉冲信号的上升沿,输出脉宽。利用相同脉冲源在镜面单锥内产生相同幅值的脉冲场,利用脉冲电场探头进行测量,示波器记录探头的输出波形,并记录脉冲信号的上升沿,输出脉宽。通过脉冲信号的幅值和传感器恢复信号的幅值计算时域校准系数,比

较两次测量结果对镜面单锥系统时域性能进行验证, 参考国家标准 GB/T 28043-2019《利用实验室间

比对进行能力验证的统计方法》, 采用 E_n 值法对对比结果进行评定, 其中 E_n 值定义如式(2)所示。

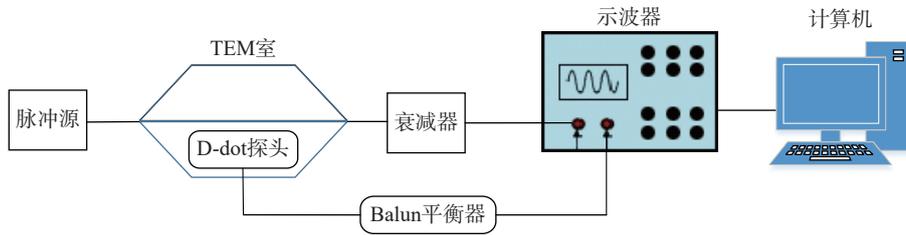


图 4 TEM 室时域校准系统

Fig.4 TEM chamber time domain calibration system

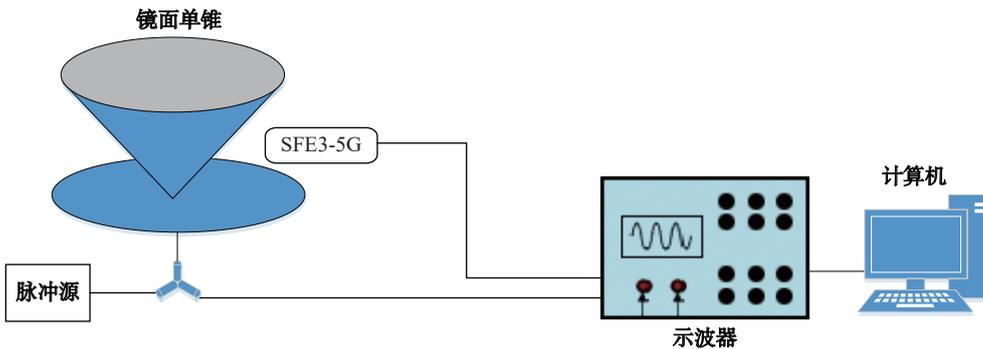


图 5 镜面单锥时域校准系统

Fig.5 Specular single cone time domain calibration system

$$E_n = \frac{x_{lab} - x_{ref}}{\sqrt{U^2(x_{lab}) + U^2(x_{ref})}} \quad (2)$$

式中, x_{lab} 为镜面单锥测量值; x_{ref} 为 TEM 室测量值; $U(x_{lab})$ 为镜面单锥测量系统的扩展不确定度; $U(x_{ref})$ 为 TEM 室测量系统的扩展不确定度。

若 $-1.0 < E_n < 1.0$, 则比对结果满意; 若 $E_n \leq -1.0$ 或者 $E_n \geq 1$, 则比对结果不满意。

时域性能验证系统中, TEM 室工作频率范围 10 kHz ~ 200 MHz; 脉冲源的上升时间 2.3 ns, 半峰值脉冲宽度 23 ns, 输出电压范围 1 ~ 20 kV; 示波器的上升时间小于 100 ps, 频率范围覆盖 100 kHz ~ 1 GHz, 脉冲电场探头选型方面, 考虑到探头的高度和 TEM 室要满足 1/3 关系, 且上升时间要快, 可用于测量脉冲电场, 因此选用 Montena 公司生产的 SFE3-5G 型 D-dot 探头。时域性能验证系统可满足频率范围 10 kHz ~ 200 MHz 内 2.3 (上升沿) ~ 23 ns (脉宽) 脉冲波形的时域验证。

2.2 频域性能验证方法

频域性能验证方法如图 6、图 7 所示, 利用信号发生器在 μ TEM 室内产生可计算标准场, 用射频电场探头进行测量, 然后在镜面单锥内相同频点下产

生相同幅值的标准场, 利用射频电场探头进行测量, 通过信号发生器产生信号的幅值和传感器恢复信号的幅值计算频域校准系数, 比较两次测量结果在频域下对镜面单锥系统进行验证, 采用 E_n 值法对对比结果进行评定。

频域性能验证系统中, μ TEM 室为中国计量科学研究所的场强标准装置, 其频率范围为 10 MHz ~ 1 GHz, 产生场强范围 10 ~ 60 V/m。由于 μ TEM 室体积小, 芯板高度仅为 35 mm, 开口极狭, 直径仅为 8 mm 左右, 且只有一个开口, 目前市面上仅有北京森馥科技定制的射频电场探头 RF-06M 可以放入且满足相关频率及场强范围要求, 因此选用该型号的探头进行频域性能验证。

3 结论

对于电磁脉冲的校准, 相关的文献和标准大多是频域校准, 时域校准中校准项目和校准过程也较为模糊, 对于电磁脉冲场强在时域下的量值溯源目前尚未有相关的标准或者规范能够提供完整的指导。因此对于镜面单锥电场标准装置, 其时域性能和频域性能如何进行验证亟待解决。本文提出了一

种镜面单锥电场标准装置的时-频域性能验证方法。在时域上,将镜面单锥电场标准装置与 TEM 室所产生瞬态电磁脉冲电场的脉冲波形参数(幅度、上升时间、脉冲宽度)进行比对;在频域上,将镜

面单锥电场标准装置与 μ TEM 室产生的连续波电场强度进行比对,时域和频域性能验证的比对结果均采用 E_n 值进行评定。

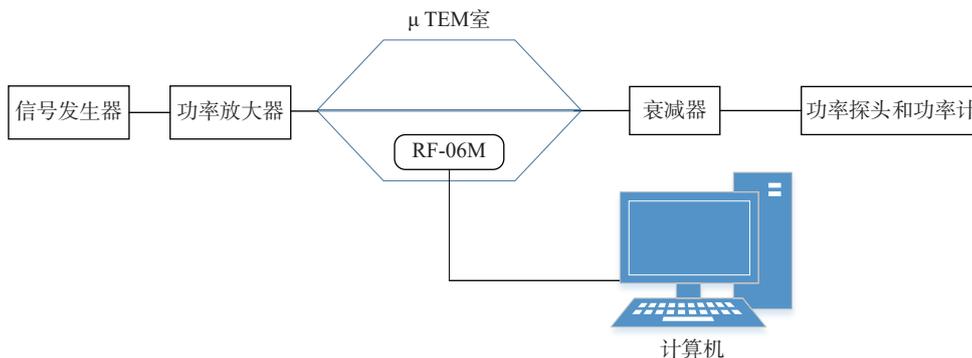


图 6 μ TEM 室频域校准系统
Fig.6 μ TEM chamber frequency domain calibration system

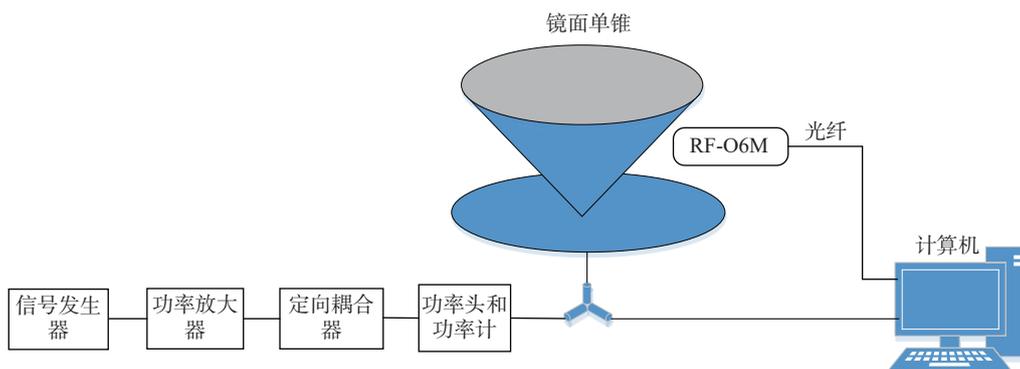


图 7 镜面单锥频域校准系统
Fig.7 Specular single cone frequency domain calibration system

由于时域校准系数和频域校准系数具有等价性,因此本文提出的镜面单锥时域性能和频域性能验证方法,对于保证我国脉冲电场量值溯源的准确性,促进我国瞬态脉冲电场参数的量值统一,具有重要意义。

本文重点是研究时域和频域性能验证的方法,设计镜面单锥时域和频域上的性能验证方法实验,并对性能验证系统采用的设备进行选型,实验测试的结果将在之后的研究中侧重。

参考文献

[1] 吴昊. 窄脉冲强电场的光学传感技术 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
[2] 李跃波, 黄刘宏, 杨杰, 等. 军事设施电磁脉冲易损性评估关键技术能力需求分析 [J]. 防护工程, 2023, 45(4): 68-73.
[3] 周宁. 关于计量科学技术发展若干问题的思考 [J]. 计测技术, 2022, 42(1): 1-8.

[4] 彭博, 王淞宇, 齐万泉, 等. 基于光电调制技术的脉冲场强校准方法 [J]. 宇航计测技术, 2023, 43(1): 17-21.
[5] 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, 43(11): 1501-1505.
[6] 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.
[7] 王少华, 刘科, 杨丽, 等. 100MHz~18GHz 混响室场均匀性测试及分析 [J]. 计量技术, 2018(12): 23-26.
[8] Sakharov K Y, Mikheev O V, Turkin V A. National Standard of Russian Federation for reproduction and transmission of unit sizes of pulse electric and magnetic intensities in uhrawide band range[C]. The 18th High-Power Electromagnetics Conference, 2012.
[9] Joo-Gwang Lee, Jin-Seob Kang, Jeong-Hwan Kim *et al* . Time domain antenna range at KRISS[C]. 2008 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2008.

- [11] 任万滨, 翟国富. 航天继电器耐力学环境设计理论与应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- [12] 李馨馨. 可靠性分析在实验室仪器设备管理中的应用 [J]. 化学工程与装备, 2022(1): 18-22.
- [13] 琚东升, 琚孟隆, 李凤姣. 盐城地区 2004 型拖拉机使用情况研究 [J]. 农机使用与维修, 2022, 311(7): 64-66.
- [14] 张雪梅, 袁芳, 孔祥吉. LJ6010 多功能标准源系统的可靠性管理 [J]. 工业计量, 2011, 21(3): 36-37.
- [15] 任蕾洁. 考虑退化与冲击效应的机械系统可靠性分析与动态维护策略研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [16] 冯国双. 连续变量的相关与回归分析 [J]. 中华护理杂志, 2011, 46(11): 1153.
- [17] 胡红波, 季文晖. 测量方程、观测方程与不确定度评估 [J]. 中国测试, 2020, 46(9): 7-12.
- [18] 胡红波, 刘爱东, 左爱斌, 等. 加速度计校准的贝叶斯不确定度评估 [J]. 计量科学与技术, 2021, 65(5): 101-107, 61.
- [19] 田骆冰, 徐刚, 张雅中, 等. 血清胃饥饿素水平与 2 型糖尿病周围神经病变的相关性研究 [J]. 中国全科医学, 2020, 23(26): 3263-3267, 3273.
- [20] 胡红波, 杨丽峰, 于梅. 零差干涉仪用于振动校准中关键技术的研究 [J]. 计量学报, 2018, 39(3): 368-372.
- [21] 胡红波. MCMC 方法在测量不确定度评估中的应用 [J]. 计量技术, 2020(5): 89-94, 88.
- [22] 袁浩恒. 数据挖掘中并行离散化数据准备优化研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [23] 冯浩. 后件为数值型属性的关联规则发现策略研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [24] 刘家豪. 基于车联网数据的预警行为分布特征及其影响因素分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [25] 焦锐, 车晨曦, 王健, 等. 基于卡方检验的玉米大豆带状复合种植意愿相关性分析 [J]. 南方农业, 2023, 17(6): 116-119.
- [26] 章姝俊, 陆海清, 陈佳玺, 等. 基于多因素相关性分析的气温敏感负荷预测 [J]. 浙江电力, 2023, 42(9): 27-35.
- [27] 孟晨, 王昊, 吴鲲. 力传感器校准方程系数的不确定度分析 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(5): 52-57.
- [28] 蔡明, 孙杰, 李培德, 等. 三种机器学习算法在回归应用中的对比分析 [J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(8): 165-170.
- [29] 柯日宏, 吴升, 柯玮文. 一种识别共享单车潮汐点的时空模型和基于 KNN-LightGBM 的租还需求预测方法 [J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(4): 741-753.
- [30] 陈丹璐, 孙德亮, 文海家, 等. 基于不同因子筛选方法的 LightGBM-SHAP 滑坡易发性研究 [J/OL]. [2023-10-30]. 北京师范大学学报 (自然科学版): 1-18. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1991.N.20230808.1452.003.html>.

本文编辑: 霍炜炜

(上接第 47 页)

- [10] 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.
- [11] 杨超, 孟萃, 李鹏辉, 等. 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.
- [12] 刘子淇, 杨会敏, 严宇. 交流电磁场检测 (ACFM) 在薄壁不锈钢焊缝中的应用 [J]. 无损检测, 2023, 45(9): 49-53, 60.
- [13] 何梓滨, 邢昊, 蒋廷勇, 等. 超大型低反射镜面单锥脉冲电场标准装置 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(5): 117-126.
- [14] 邢昊, 何梓滨, 吴梦娟, 等. 电场场强校准技术的研究进展 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(3): 20-28, 42.
- [15] Zibin H, Hao X, Huiyu Z, et al. Research on Reducing the Overall Reflectivity of the Electric Wave Anechoic Chamber [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2537(1): 1547.
- [16] 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.
- [17] 燕有杰, 蒋廷勇, 刘小龙, 等. 超宽谱短电磁脉冲标准场装置溯源及不确定度评定 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(6): 105-109.
- [18] 刘潇, 赵兴, 洪力, 等. 微波暗室静区性能评测及不确定度分析 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(4): 89-94.
- [19] 胡翔, 彭煜, 陈俊, 等. 基于智能终端的无线标准测力仪系统设计 [J]. 中国计量, 2023(1): 48-52.
- [20] IEEE. IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, From 9 k Hz to 40 GHz: STD 1309—2013[S]. IEEE, 2013.
- [21] 国家市场监督管理总局. 电场探头校准规范: JJF 1886-2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [22] 国家市场监督管理总局. 10kHz~100MHz 电磁场探头校准规范: JJF 1884-2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [23] 国家国防科技工业局. 电磁场传感器和探头: JJG(军工)24-2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [24] 中国人民解放军总装备部. 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.
- [25] 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.
- [26] 袁钟柱, 万发雨. 宽带横电磁波小室设计与测试应用 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2021, 13(4): 437-443.
- [27] 李建轩, 赵治华, 周忠元, 等. 基于 TEM 小室的宽频高场强校准系统设计 [J]. 海军工程大学学报, 2018, 30(6): 17-22.
- [28] 袁钟柱. 宽带横电磁波小室的设计与应用 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [29] 刘阳, 韩玉峰. 电磁脉冲电场探头转换系数的校准 [J]. 宇航测量技术, 2019, 39(1): 27-30, 82.
- [30] 林浩宇, 谢晶, 李红延, 等. GTEM 室性能测量系统研制 [J]. 安全与电磁兼容, 2022(4): 28-32.

本文编辑: 霍炜炜