

瞬态电场时域测试技术的研究现状与展望

刘卫东, 胡小锋

(军械工程学院电磁环境效应国家级重点实验室, 石家庄 050003)

摘要: 随着电磁环境效应与防护技术研究的不断深入,瞬态电场时域测试技术已成为电磁脉冲攻防领域急需解决的关键性科学问题之一。文章从“硬件”和“软件”两个方面,对不同类型电场传感器的特点以及瞬态电场时域测试系统的动态补偿技术等进行了对比总结,指出瞬态电场时域测试技术在测试系统动态性能提高、测量误差评定、动态性能补偿等方面均有待进一步研究和完善,并对其发展趋势进行了展望。

关键词: 瞬态电场; 时域测试; 电场传感器; 电光调制

中图分类号: TM835;O441.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)07-0132-07

Review of Transient Electric Field Measurement in Time Domain

LIU Weidong, HU Xiaofeng

(Key Laboratory of Electromagnetic Environment Effect, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: With the development in the research of electromagnetic environment effects and the corresponding protection technologies, transient electric field measurement in time-domain has become one of the focal points in the field of EMP attack and protection. In this paper, different types of electric field sensors are contrasted in terms of dynamic modeling and compensation methods of transient electric field measurement systems. It is concluded that further efforts should be made for improvement of dynamic property, dynamic error estimation, and dynamic compensation of the measurement system. Furthermore, the development trend of the transient electric field measurement technology in time-domain is forecasted.

Key words: transient electric field; measurement in time-domain; electric field sensor; electric-optical modulation

0 引言

长期以来,由于受测试手段和仪器设备的限制,电磁场测试的相关理论与技术大多是在时谐电磁场理论的基础上建立和发展起来的,其测量多在频域进行。目前,时谐电磁场测试已可做到准直流至几十 GHz 的测试范围^[1-2]。但是,由瞬变电磁场产生的脉冲信号不同于时谐电磁场产生的连续波信号,它属于典型的非平稳信号^[3],在时域上通常表现为单个或一串具有极快上升沿、持续时间很短、幅值变化剧烈的脉冲信号,在频域上则占有极宽的频谱范围,这也使得瞬态电磁信号的时域波形在传播、传输、辐射、

散射以及穿透过程中往往会产生不同程度的畸变现象。瞬态电磁信号的这些时、频域特征使得传统的时谐场测试技术和研究方法可能不再适用^[4],而通过时域测试方法获得其时域波形不仅方便直观,利用傅里叶变换还可以同时提供信号的幅频和相频特性等,这对于宽频带特性的电磁参数测量具有明显优势,这也是近几年来瞬态电磁场时域测试技术越来越受到人们重视的原因所在^[5]。

瞬态电磁场的测试对象包括电场和磁场,这其中又以瞬态电场的时域测试应用最为广泛^[6]。笔者就将对国内外在瞬态电场时域测试方面的研究现状进行对比总结,并指出其面临的问题与挑战,为下一步有针对性地开展相关研究工作提供参考。

收稿日期:2013-11-17; 修回日期:2013-12-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10927506)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(10927506).

1 国内外研究现状

瞬态电场时域测试技术的关键在于如何将空间传播的瞬态电场辐射信号不失真地转换为便于处理的电压或电流信号,并解决好脉冲信号的传输、显示、记录以及后期分析和处理等问题,国内外在此方面的研究概括起来主要集中在“硬件”和“软件”两个方面。

1.1 “硬件”方面的研究现状

从“硬件”上来讲,主要是从瞬态电场时域测试系统的设计研制方面,研究如何拓展测试系统的测试带宽、降低其对被测场的扰动效应、提高测试系统在复杂测试环境下的工作可靠性等。而上述研究又主要是围绕场电转换的关键环节和瞬态电场时域测试系统的核心组成部分——电场传感器所展开的。

早期研制的电场传感器主要利用接收天线感应获取瞬态电场辐射信号,并直接通过高频同轴线缆直接将接收天线上的感应电压信号送入示波器进行记录和显示。从理论上讲,由于使用与频率基本无关的电小天线作为接收天线来检测瞬态电场,可以不失真地反映被测电场的时域波形,而且对被测电场的扰动较小,故电场传感器的接收天线通常采用电小极子天线。对于有效高度为 h_e 的电小极子天线,通常认为其电阻可以忽略不计,其输入阻抗主要呈容抗,不妨记为 $Z_{ant}=1/(j\omega C_{ant})$,则当接收天线通过 $50\ \Omega$ 同轴线缆端接匹配负载 Z_L 时,该电场传感器的时间常数 $\tau=Z_L C_{ant}$ 通常远小于被测电场信号的持续时间 t ,从而导致其输出信号 U_0 与被测电场信号 E_{inc} 呈微分关系,即^[7]

$$U_0=Z_L C_{ant} \frac{dE_{inc}}{dt} \cdot h_e, t \gg \tau. \quad (1)$$

符合式(1)的电场传感器通常又被称为 D-dot 传感器。美国 EG & G 公司早期为满足核爆探测需要所研制的空心球型偶极子(hollow spherical dipole, HSD)、嵌入式平板偶极子(flush plate dipole, FPD)、共形扁平偶极子(conforming flat dipole, CFD)以及渐进锥形偶极子(asymptotic conical dipole, ACD)等均属于此类传感器^[8]。在上述几种 D-dot 传感器中,目前研究和使用的就是 ACD D-dot 传感器^[9-10],这主要得益于其经过优化设计的外形,使得其电容更小,测试频率可达数 GHz,且其输出阻抗在天线锥角为 47° 时约为 $50\ \Omega$,可以与同轴线缆相匹配,信号传输性能更佳。EG & G 公司所研制的 ACD D-dot 传感器实物图见图 1。此外,美国的 Prodyn 公

司、瑞士的 Montena 公司等也都在研制和销售类似的 ACD 传感器。

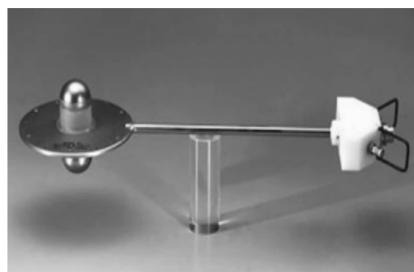


图 1 EG & G 公司生产的 ACD D-dot 传感器

Fig. 1 ACD D-dot sensors made by EG & G company

由于 ACD D-dot 的实测输出与被测信号呈微分关系,在实际应用中可以将其与额外购买的有源或无源积分器模块进行串联,以便直接获得被测瞬态电场信号的时域波形。但此时积分模块的测试带宽往往成为制约瞬态电场时域测试系统整体性能的瓶颈。此外,为了增强信号传输过程中的抗电磁干扰能力,也可以利用光纤代替同轴电缆对实测信号进行传输,但这需要购买额外的电光转换模块和光电转换模块。笔者所在课题组就从美国 Prodyn 公司购买了一套型号为 AD-70D(R)的 ACD D-dot 传感器,并配套购买了 PPM 公司的电光转换模块和光电接收机,相关实物见图 2。

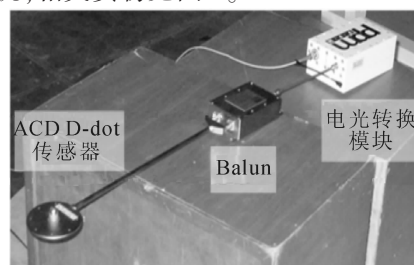


图 2 利用光纤传输的 ACD D-dot 传感器

Fig. 2 ACD D-dot sensor with electric-optical transform

D-dot 类型的电场传感器虽然在实际应用中可以根据实际测试需要选购额外的模块,但这也在无形中增加了测试成本以及测试系统的整体尺寸,且金属构建的增加还会进一步增大其对被测瞬态电场的扰动影响。因此,研究人员开始考虑将有源积分功能和电光转换功能进行集成化和一体化设计,并由此形成了基于电光集成的有源积分式电场传感器的设计思路。这种类型的电场传感器通过将 D-dot 传感器、有源积分模块和电光转换模块进行整合设计,使得其实测信号与被测信号具有线性关系,且可以通过光纤进行传输,具有集成度高、体积小、原理简单、性价比高等优点。

早在 1984 年,美国的 Thomson 等人就研制了一款基于电光集成的、用于测量雷击瞬态电场的光

纤传输式三维球形电场测试系统,并在肯尼迪太空中心得到了成功应用^[11]。该测试系统所用球形探头直径约 45 cm,可测频带为 3 Hz~4 MHz,可在距离雷击点小于 1 km 至大于 100 km 的范围内进行雷击瞬态场测试。为了测量高压设备附近的瞬态电场分布,德国斯图加特大学和瑞士 HAEFELY 公司也曾合作研制了类似的三维球形光纤传输电场测量系统。2002 年,国内的华北电力大学就从德国斯图加特大学引进了一款测试频带范围为 15 Hz~100 MHz 的三维球形电场测量系统(可测场强范围为 0.1~48 kV/m 和 -30~-0.1 kV/m),并在变电站瞬态电场测试中得到了成功应用^[12]。

国内西北核技术研究所、军械工程学院、中国工程物理研究院、解放军理工大学等单位在此类电场传感器的设计研制方面也进行了深入研究,并在其小型化设计和动态性能改善等方面取得了一些显著成果^[13-20]。比如,军械工程学院朱长青教授设计研制了一套截面积约 1 cm²,长度约 6 cm 的圆柱形电场传感器,见图 3。动态响应时间 <1 ns,测试带宽达 GHz,可满足小空间内瞬态电场的时域测试需求^[17];中国工程物理研究院周开明高工设计研制的一套宽频带小型化模拟量光纤电场测量系统,见图 4,测试频带范围在 24 kHz~1 GHz,能测量小于 100 kV/m 的瞬态电场^[18]。



图 3 文[17]中设计研制的电场传感器

Fig. 3 E-field sensor made in reference document 17



图 4 文[18]中设计研制的瞬态电场测试系统

Fig. 4 E-field test system made in reference document 18

目前,基于电光集成的有源积分式电场传感器大多采用内部电池供电方式,而由于电池的体积和容量存在矛盾,导致电场传感器在小型化设计上无法取得更大突破,同时也限制了电场传感器的连续

工作时间,而且在实际应用中更换电池也存在诸多不便。为此,文[21-23]研制了一款采用外部激光供电的电场传感器,见图 5,其尺寸为 6.6 mm×6.6 mm×42 mm,测试带宽为 500 kHz~3 GHz,测试动态范围为 130 dB。该电场传感器利用光伏电池将外部激光器通过光纤提供的光能转换为电能,从而满足传感器内有源器件的供电需求,打破了传感器连续工作时间的限制,目前 W. Mann 已在德国成立 Enprobe 公司负责生产和销售该型电场传感器。但笔者通过与 W. Mann 联系获知,该电场传感器目前仅适用于场强小于 100 V/m 的弱瞬态电场测试,还无法满足强瞬态电磁场环境下的测试需要。

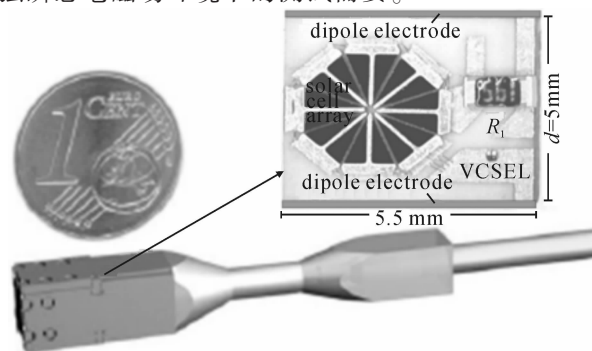


图 5 Enprobe 公司的 EFS-105 电场传感器

Fig. 5 EFS-105 made by Enprobe company

上述基于电光集成的有源积分式电场传感器相比基于接收天线的 D-dot 类型传感器虽然在集成度和小型化等方面有了显著提升,但其内置的有源电路部分却需要加装金属屏蔽壳体进行防护加固,这无疑会增大对被测场的扰动影响。因此,伴随着光电子科学的迅猛发展以及消除金属构件对被测场扰动影响的需求,基于铌酸锂(LiNbO₃)等电光晶体电光效应的光学电场传感器在瞬态电场时域测试中得到了广泛关注^[24-25]。

早期的光学电场传感器主要采用分立器件制作,但这类器件结构复杂、体积较大、稳定性也不好。随着光通信技术的迅猛发展和集成光学制作工艺的不断成熟,出现了集成光波导电光调制器,使得光学电场传感器的整体性能得到了大幅提升。1993 年,美国 Srico 公司的研究人员 Sriram S. Sriram 和 Stuart A. Kingsley 等人研究制作了一种基于反转极化的无金属电极光波导电场传感器^[26-27],并申请了发明专利^[28]。这种传感器消除了金属电极和天线对被测电场的影响,降低了工艺难度,而且能有效提高测试灵敏度。从其官网上发布的资料来看,这种传感器已经商品化,产品实物见图 6。其官网资料显示该传感器的频带范围约为 1 Hz~2 GHz,测试范围为 1 V/m~5 kV/m,最大损伤阈值大于 10 MV/m。

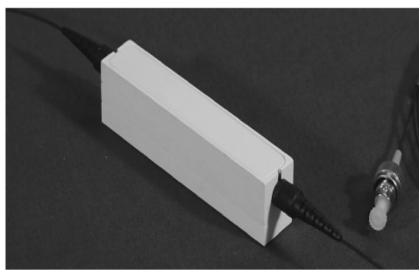


图6 Srico 公司的光学电场传感器

Fig. 6 Optical fiber E-field sensors made by Srico company

目前,国内也有多家单位在进行光学电场传感器相关的研究工作,比如西北核技术研究所、成都电子科技大学、清华大学、中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室等,并取得了一定进展^[29-34]。比如,文[31]利用铌酸锂晶体作为衬底材料,基于 M-Z 结构设计研制了一套光学电场传感器,见图 7,实验测试结果显示其动态响应时间不大于 1.12 ns,可满足 100 kV/m 以上的强场测试要求。由于相关研究工作起步较晚,国内大多数单位设计研制的光学电场传感器还处于实验室测试阶段,真正商品化的产品还未见有公开报道。

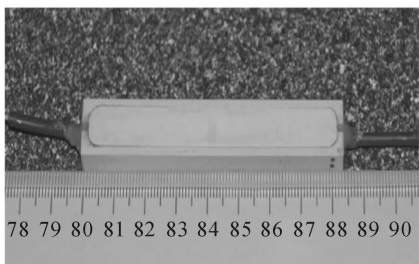


图7 文[31]中设计研制的光学电场传感器

Fig. 7 Optical E-field sensors made in reference document 31

1.2 “软件”方面的研究现状

瞬态电场信号作为一种脉冲信号,对测试系统的动态性能提出了较高的要求,测试系统动态性能的优劣将直接决定其能否快速、无失真地再现动态被测瞬态电场信号随时间的变化规律。但由于受硬件技术性能、设计研制水平等方面的制约,大多数实际研制的瞬态电场时域测试系统往往都难以获得理想的动态特性,使得测试结果存在不同程度的失真或畸变现象^[35],这就需要从系统建模、动态补偿等“软件”的角度来研究改善和提高测试系统动态性能的方法。

测试系统的动态特性通常用其动态数学模型来描述,而建立动态数学建模的方法主要有两种:一种是针对测试系统的机理和运行规律,根据已知的定律和原理建立其数学模型,一般称之为机理分

析法;另一种是从测试系统的运行和实验数据出发获得其数学模型,一般称之为系统辨识法。机理分析法在建模时,需要对实际情况作较大简化,通常适用于结构和原理较简单的系统建模;相比之下,系统辨识法仅通过设计合理的实验获取所需的测试数据就可以完成系统的建模,而且由于测试数据是在系统实际运行和工作中获得的,所以建模的精度相对较高,该方法已随着计算机技术的迅猛发展得到了广泛应用。根据所建立的动态数学模型,就可以对测试系统的动态特性进行分析和评估,并结合实际的测试要求构建相应的动态补偿环节对测试系统进行性能补偿。

目前,基于系统辨识的线性和非线性测试系统动态建模方法及相应的动态补偿技术已在冲击波、压力场以及温度场等工程测试中得到广泛应用,并在较大程度上弥补了仪器设备在硬件上的不足。而在电磁脉冲测试领域,基于系统辨识建模和动态补偿技术的波形重建方法也得到了广泛关注,比如文[36]和[37]分别对自行研制的用于脉冲电压测试的电容分压器测量系统进行了辨识建模,并利用动态补偿技术有效实现了纳秒级脉冲电压信号的波形重建;文[38]和[39]则利用系统辨识方法分别实现了对微分式脉冲磁场传感器和 Rogowski 线圈脉冲电流探头的动态建模,并通过设计相应的动态补偿环节较好地实现了瞬态磁场信号和脉冲电流信号的波形重建。

上述研究工作均是在线性时不变系统的假设前提下展开的,没有考虑测试系统引入的非线性失真,而实际的测试系统大多都具有一定的非线性,特别是随着电磁脉冲测试系统中有源模块(如有源积分模块、电光转换模块等)的应用,其非线性效应也愈加凸显。因此,建立测试系统的非线性动态模型将具有更普遍的应用价值。文[40]结合非线性 Hammerstein 块联模型,初步研究了非理想阶跃脉冲激励下电磁脉冲测试系统的非线性辨识建模方法和动态补偿技术,获得了较好的效果。同时,由于受实验设备等因素的限制,对电磁脉冲测试系统的动态建模目前主要集中在高频段,对测试系统的低频响应特性关注较少,由此建立的动力学模型通常具有典型的低通特性,无法全面反映电磁脉冲测试系统在宽频带范围内的动态性能。针对此问题,文[41]提出了一种连续域的分步辨识建模方法,由此得到的数学模型能同时反映测试系统从低频至高频全频带范围内的动态特性,可用于解决宽带测试系统在全频段范围内的数学建模问题。

由于电磁脉冲信号本身的快时变(ns级)、宽频谱(可达数GHz)等显著特点与力学、温度等缓变信号差别较大,针对电磁脉冲测试系统所进行的动态建模和性能补偿研究在理论、算法和技术等方面与其他工程领域相比均显得比较滞后,还有待进一步研究和完善。

2 面临的问题与挑战

随着光电子科学的迅猛发展,基于光纤传输的瞬态电场时域测试系统愈来愈受到国内外相关研究人员的青睐。基于电光集成的有源积分式电场传感器,具有原理简单、工作稳定、性价比高等优势,但其中也存在一些不足之处:①需要供电电源,若采用内部电池供电,会限制传感器的尺寸和持续工作时间;若采用外部激光供电,则需要购置额外的大功率激光源和高效光电池,增大了研制成本;②传感器的动态性能不仅受其内置电路设计的影响,也受其所用器件本身性能参数的制约,这也是导致国内设计研制的同类传感器相比国外在性能上差距较大的主要原因;③由于传感器采用了有源电路设计,为适应强场环境下的测试需要,其往往需要使用金属屏蔽壳体进行防护加固,从而对被测场引入了较大的扰动影响。而由于电光晶体的非金属特性,光学电场传感基本克服了金属构件对被测场的扰动影响,在理论上是较为理想的电场传感器,这也使得其成为国内外的研究热点。从目前的研究现状来看,国外已有商品化的产品出售,但由于技术封锁等原因,购买比较困难。笔者所在课题组就曾通过在美人员与Srco公司多方联系购买事宜,但得到的答复是可以共同研制开发。此外,受所用电光晶体调制深度等因素的制约,光学电场传感器的灵敏度往往较低,主要适用于强场测试环境,在弱场测试环境下往往不能进行有效的电光调制,且其制作工艺比较复杂,对所使用激光器的稳定度、光谱纯度等有较高要求,实现难度大且费用昂贵。同时,由于电光晶体对温度等外界环境变化非常敏感,其在实际工程应用中的工作稳定性也有待进一步提高。

随着不同类型电场传感器的不断涌现以及瞬态电场时域测试应用领域的不断拓展,作为对电场传感器进行动态性能分析、动态建模和性能补偿的前提与基础,其在动态校准和动态误差评定等方面的需求越来越迫切,而目前国内外在此方面的研究均处于发展阶段,还存在诸多问题有待进一步研究解决。比如:①动态校准平台有待构建。目前可供参考的电场传感器校准标准主要是IEEE颁布的

IEEE Std 1309—2005,即《9 kHz—40 GHz 电磁场传感器和探头校准标准》,而国内则没有相关标准可供参考,也没有搭建相应的动态校准平台,使得国内相关单位自行研制的一些电场传感器在走向工程实用化方面受到了较大制约;②动态性能评价指标体系有待统一规范。科学、合理地对瞬态电场时域测试系统的动态性能进行评价,可以为实验人员在不同工程应用背景下选择和使用测试系统提供重要的参考依据,但目前不同研究人员所关注或选择的评价指标还存在不统一、不规范等问题,这一方面会导致其无法全面客观地反映测试系统的动态性能,另一方面也使得不同研究人员所设计和研制的测试系统之间缺乏可比性;③动态误差评定方法有待制定。瞬态电场信号的时域测试属于典型的动态测试,其测量误差的分析与评定方法也应从以往的静态分析扩展到动态分析上来,但由于动态测量误差评定方法的研究起步较晚、复杂程度较高,在动态误差溯源、动态误差合成计算等方面还需要做进一步研究工作。

此外,考虑到实际测试系统大多都具有一定的非线性以及瞬态电场本身的快时变、宽频谱特点,瞬态电场时域测试系统的动态建模方法也需要从以往的线性建模向宽带、非线性建模方面拓展,以进一步提高数学模型表征实际测试系统的能力,且其动态补偿技术也需要做相应的调整,并结合实际工程应用的需要,进一步研究在线、实时动态补偿平台的构建。

3 结论

随着电磁兼容、电磁脉冲效应与防护技术研究的不断深入,瞬态电场时域测试技术的应用领域得到不断拓展,相关理论和技术研究在一定程度上取得了较大突破,但也面临许多问题和挑战,需要在“硬件”和“软件”两方面做进一步的研究和完善,今后研究的重点可以概况为以下几个方面:

1)在瞬态电场时域测试系统的设计研制方面,重点研究如何实现对瞬态电场的宽频带、大动态范围以及微扰测试,进一步提高测试系统的动态性能及其在复杂测试环境下的工作稳定性和可靠性;

2)参考借鉴国外的相关研究经验,制定适合国内研究现状的电场传感器动态校准标准及其动态测量误差评定方法,并搭建相应的校准平台。

3)围绕实际研制的电场传感器搭建具有较高集成度、人机交互界面良好的自动化测试平台,提高其在动态校准、测量误差评定、性能补偿以及在线

测试等方面的实时性和自动化水平。

参考文献:

- [1] POKOVIC K, SCHMID T, KUSTER N. Millimeter-resolution E-field probe for isotropic measurement in lossy media between 100 MHz and 20 GHz[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(4): 873-878.
- [2] YOUNG P. Electro-optic E-field sensors for shielding measurements up to 18 GHz[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 1995: 87-91.
- [3] 刘卫东, 刘尚合, 胡小锋. 电晕放电电磁辐射信号的双谱估计与时频分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 26-29.
LIU Weidong, LIU Shanghe, HU Xiaofeng. Bispectrum estimation and time-frequency analysis of electromagnetic signal radiated from corona discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 26-29.
- [4] SCHUTTE A, KARNER H C. Comparison of time domain and frequency domain electromagnetic susceptibility testing[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 1994: 64-67.
- [5] KELLER C, FESER K. Fast emission measurement in time domain[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(4): 816-824.
- [6] 刘顺坤, 聂鑫, 陈向跃, 等. 电磁脉冲辐射场试验中的光纤传输测量系统[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(3): 370-373.
LIU Shunkun, NIE Xin, CHEN Xiangyue, et al. Electromagnetic pulse measurement system based on optical fiber transmission under radiated-wave test[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(3): 370-373.
- [7] MILLER E K. Time-domain measurements in electromagnetics[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1986.
- [8] BAUM C E, BREEN E L, GILES J C, et al. Sensors for electromagnetic pulse measurements both inside and away from nuclear source regions[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1978, EMC-20(1): 22-35.
- [9] MURPHY D P, WEBER B V, ALLEN R J, et al. Mitigation of background EMI, mechanical and acoustic effects from the Gamble II pulsed power generator[C]//14th IEEE International Pulsed Power Conference. [S.l.]: IEEE, 2003: 891-894.
- [10] RAO M M, THOMAS M J, SINGH B P. Measurement of transient electric field emission from a 245 kV gas insulated substation model during switching[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2007, 2(3): 306-311.
- [11] THOMSON E M, MENELAUS P J, UNMAN M A. A remote sensor for the three components of transient electric fields[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1988, 35(3): 426-433.
- [12] 王泽忠, 李成榕, 李鹏, 等. 用球形三维电场探头测量变电站瞬态电场[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(3): 16-19.
WANG Zezhong, LI Chengrong, LI Peng, et al. Transient E-field measurement in substation using spherical sensor[J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, 29(3): 16-19.
- [13] 李炎新, 石立华, 高成, 等. 用宽带模拟量光纤传输系统测量脉冲电磁场[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 34-36.
LI Yanxin, SHI Lihua, GAO Cheng, et al. Measurement of pulse electromagnetic field using wide band fiber optic analogue transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 34-36.
- [14] 马良, 吴伟, 程引会, 等. 基于原始波形测量的脉冲电场探测器[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(11): 2763-2768.
MA Liang, WU Wei, CHENG Yinhui, et al. Pulsed electric field sensor based on original waveform measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11): 2763-2768.
- [15] 谢彦召, 焦杰, 郑振兴, 等. 宽频带电光式脉冲电场测量系统的研制及应用[J]. 核电子学与探测技术, 2000, 20(1): 43-46.
XIE Yanzhao, JIAO Jie, ZHENG Zhenxing, et al. Development and application of wide band electro optic measurement system for pulsed E-field[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2000, 20(1): 43-46.
- [16] 张卫东, 崔翔. 光纤瞬态电场传感器的研究[J]. 测控技术, 2004, 23(4): 7-9.
ZHANG Weidong, CUI Xiang. Research on optical fiber transient electric field sensor[J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(4): 7-9.
- [17] 朱长青. 脉冲电场微型传感探头的研制[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1940-1945.
ZHU Changqing. Development of a mini-probe for testing pulsed E-field[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1940-1945.
- [18] 周开明, 王艳, 谢泽元. 一种宽频带小型化光纤电场测量系统的研制[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(1): 30-32.
ZHOU Kaiming, WANG Yan, XIE Zeyuan. Design of a wideband and minitype optical fiber metrical system[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(1): 30-32.
- [19] 祝敏, 贺亦成, 郑振兴, 等. 新型偶极电场探测器及对空间电场的测量[J]. 传感器技术, 2000, 19(4): 49-53.
ZHU Min, HE Yicheng, ZHENG Zhenxing, et al. A new dipole electric field sensor and its application in EMP simulator[J]. Journal of Transducer Technology, 2000, 19(4): 49-53.
- [20] 祝敏, 贺亦成, 刘顺坤, 等. 有源光纤 EMP 测量系统及对 EMP 模拟器空间场测量[J]. 核电子学与探测技术, 2001, 21(5): 401-403.
ZHU Min, HE Yicheng, LIU Sunkun, et al. A fiber detector

- system of EMP and it's application in EMP simulator[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2001, 21(5): 401-403.
- [21] MANN W, PETERMANN K. VCSEL based miniaturized E-field probe with high sensitivity and optically power supply[J]. Electronics Letters, 2002, 38(10): 455.
- [22] MANN W, PETERMANN K. Miniaturized electro-optical E-field probe with high sensitivity and optical power supply[J]. Electronics Letters, 2002, 38(10): 455-456.
- [23] MANN W, PETERMANN K. Optically powered small E-field probes with integrated JFET-and HEMT-preamplifiers[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2003: 445-448.
- [24] KOSTRITSKII S M, KORKISHKO Y N, FEDOROV V A, et al. Design of the new type integrated-optical elements for E-field sensor[C]// 3rd France-Russia Seminar. [S.l.]: IEEE, 2007: 67-70.
- [25] 李长胜, 崔翔. 光学电场传感器研究综述[J]. 电气应用, 2008, 27(16): 8-13.
- LI Changsheng, CUI Xiang. Review of the optical E-field sensor[J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(16): 8-13.
- [26] NAGHSKI D H, BOYD J T, JACKSON H E, et al. An integrated photonic Mach-Zehnder interferometer with no electrodes for sensing electric fields[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(6): 1092-1098.
- [27] SRIRAM S S, KINGSLEY S A. Sensitivity enhancements to photonic electric field sensor[C]// Proceedings of SPIE. USA: [s.n.], 2004: 143-152.
- [28] SRIRAM S, KINGSLEY S A, BOYD J T. Electro-optical sensor for detecting electric fields[P]. U.S Patent: 5267336, 1993.
- [29] SUN Bao, CHEN Fushen. Experimental investigation of integrated optical intensive impulse electric field sensor[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(2): 1-3.
- [30] SUN Bao, CHEN Fushen, YANG Yongjun. Integrated optical electric field sensor with telescopic dipole[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(5): 350-352.
- [31] ZENG R, WANG B, YU Z, et al. Design and application of an integrated electro-optic sensor for intensive electric field measurement[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 312-319.
- [32] 曾嵘, 陈未远, 何金良, 等. 光电集成强电场测量系统及其应用研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 1-5.
- ZENG Rong, CHEN Weiyan, HE Jinliang, et al. Study on optical electric integrated electric field measurement system and application in high voltage measurement[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 1-5.
- [33] 陈未远, 曾嵘, 梁曦东, 等. 光电集成电场传感器的设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(10): 1641-1644.
- CHEN Weiyan, ZENG Rong, LIANG Xidong, et al. Design of an electro-optic integrated electric field sensor[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(10): 1641-1644.
- [34] 孙豹, 陈福深. 用于测量工频强电场的集成光学电场传感器[J]. 半导体光电, 2010, 31(2): 202-204.
- SUN Bao, CHEN Fushen. Integrated optical E-field sensor for measurements of power frequency electric field[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 202-204.
- [35] 刘卫东, 魏明, 胡小锋. 带限测试系统对电磁脉冲波形参数的影响分析[J]. 微波学报, 2011, 27(5): 73-78.
- LIU Weidong, WEI Ming, HU Xiaofeng. Effect on the parameters of electromagnetic pulse wave with bandlimited measurement system[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(5): 73-78.
- [36] 韩英杰, 孙广生, 严萍, 等. 纳秒脉冲电压的波形重建[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(4): 514-516.
- HAN Yingjie, SUN Guangsheng, YAN Ping, et al. Waveform reconstruction of nanosecond pulse voltage[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(4): 514-516.
- [37] 潘洋, 严萍, 袁伟群. 纳秒脉冲电容分压器测量系统分析及波形重建[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 53-55.
- PAN Yang, YAN Ping, YUAN Weiqun. Analysis and waveform reconstruction of nanosecond pulse voltage divider measurement system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 53-55.
- [38] 石立华, 周壁华. 自积分式脉冲磁场传感器的补偿研究[J]. 电波科学学报, 1995, 10(4): 50-55.
- SHI Lihua, ZHOU Bihua. Compensation of the self-integrating magnetic field sensor[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1995, 10(4): 50-55.
- [39] 谭坚文, 石立华. 脉冲电流探头的时域标定研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(2): 337-340.
- TAN Jianwen, SHI Lihua. Time domain calibration of pulsed current probe[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(2): 337-340.
- [40] 刘卫东, 刘尚合, 毕军建, 等. 电磁脉冲测试系统的非线性辨识建模与性能补偿[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3431-3436.
- LIU Weidong, LIU Shanghe, BI Junjian, et al. Nonlinear identification modeling and compensating of electromagnetic pulse measurement system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3431-3436.
- [41] 刘卫东, 刘尚合, 魏明, 等. 宽带电磁脉冲测试系统的分步辨识建模方法研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 444-450.
- LIU Weidong, LIU Shanghe, WEI Ming, et al. Stepping identification modeling method of the wideband electromagnetic pulse measurement system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 444-450.
- 刘卫东(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电磁脉冲测试理论与技术。