

外大气层区域系统电磁脉冲模拟试验技术*

周 辉 程引会 钟玉芬 李宝忠 吴燕玲 陈雨生

(西北核技术研究所, 西安69信箱16分箱, 710024)

摘 要 对在实验室实现 SGEMP 模拟的各项技术进行了分析, 总结了已经开展的工作, 给出了一些理论计算数据和实测结果, 并对现阶段可能进一步发展的技术提出了研究设想。涉及的各项技术适用于模拟外大气层区域的 SGEMP, 其中包含了光子直接激励、电子激励、电压和电流注入等。

关键词 辐射环境 X 射线 SGEMP 模拟试验

中图分类号 O434.14

研究空间系统 X 光效应的两个内容, 一是系统电磁脉冲(SGEMP), 即与 X 光激励的系统外表面电流相联系的响应; 二是 TREE, 指 X 光穿透系统后与电缆和电路部件及元器件的直接瞬态效应。随着研究工作的深入, 人们开始研究 X 光充电效应(SCC)及其与 SGEMP 之间相互增强的关系(协和效应)及介质放电现象。X 光较硬谱段穿透系统后在器件或线路上的直接效应也急需有可靠的实验手段和设备来进行直接或间接模拟试验, 硬 X 射线在分系统上的效应如何进行模拟, 对这些问题的进一步研究有现实的意义。本文对在实验室实现 SGEMP 模拟的各项技术进行了分析, 给出了一些理论计算数据和实测结果并提出了研究设想。各项技术适用于模拟外大气层区域的 SGEMP, 具体包含了光子直接激励、电子束激励、电压和电流注入等, 讨论了各自的模拟特点和适用范围及成本上的因素。

1 光子激励模拟技术

1.1 DPF-SGEMP 试验技术

DPF (Dense Plasma Focus Facility) 是能量范围为 1~60keV 的脉冲 X 射线源, 可以在相关研究中发挥大的作用。针对 DPF 的 X 射线能谱作了大量计算, 并据此设计并开展了圆柱腔体 SGEMP 试验理论设计和电缆的 SGEMP 实验。

DPF 的 SGEMP 试验系统可以对尺寸为 $\phi 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的圆柱试体进行脉冲 X 射线辐照试验, SGEMP 响应电场为百伏/米量级, 试体侧面电流为百毫安量级。如对单峰 X 射线谱(幅值较大), 前端面最大电场为 $300\text{V}/\text{m}$, 侧面最大面电流为 500mA , 响应信号的主频较低 (20MHz)。在 DPF 的 X 射线注量情况下, 系统响应没有空间电荷层效应, 即 SGEMP 响应随 X 射线注量变化基本是线性关系。这些结果说明可以利用 DPF 开展低注量 X 光试验。分别对应五个不同的 X 光注量给出了试验结果, 受照电缆长 80cm , 屏蔽层直径 $\phi 23\text{cm}$, 实测的屏蔽层电流峰值为第一炮 0.36A , 第二炮 0.68A , 第三炮 0.64A , 第四炮 1.46A , 第五炮 2.70A 。将测到的屏蔽层电流作为输入参数, 计算得到等效负载上的感应电流为零点几微安至微安量级。以上研究的 DPF 参数为: X 光总能量为几十焦耳, 视聚焦情况各炮有差异。能谱范围 1~

* 国防科技基础研究资金资助课题
1998年10月12日收到原稿, 1998年12月28日收到修改稿。
周 辉, 男, 1961年4月出生, 硕士, 副研究员

60keV, 距焦点40cm 处 X 光注量范围为 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{J/cm}^2$ 。

考虑到DPF装置的固有不稳定性,也进行了不同X光时间谱和能谱的SGEMP响应计算,如X光的双峰和单峰时间谱等。对不同能量光电子激励的SGEMP的区别有一些理论研究结果可供参考。

1.2 爆炸金属丝 X 射线源

对于SGEMP的一种比较接近的模拟是利用等离子体,这种等离子体是由爆炸金属丝或金属丝束内聚爆产生的。这种技术产生低能的X射线,可用于X光效应研究。

爆炸金属丝X射线(EWR)源的平均能量较低($< 2\text{keV}$),其产生的低能光电子(约 1keV)成分相对较高,对SGEMP响应而言,意味着较易产生空间电荷积累现象,空间电荷场中低能电子可有较复杂的运动,电磁波谱的频率范围更广。X光脉冲前沿快($3 \sim 10\text{ns}$),有利于在感兴趣的试腔尺寸下激励谐振效应,同时SGEMP的响应比慢前沿X光强。对上述X射线环境进行了SGEMP数值模拟。一组数值模拟结果显示了EWR作为今后SGEMP模拟源的可行性: X射线注量为 $4 \times 10^{-2} \text{J/cm}^2$,发射电子的平均能量为 1keV ,受照面电场达到 10^5V/m 量级。

其缺点与DPF相似,即能谱和温度的变化不利于系统地开展规律研究,而弥补的方法是设计精确的X光监测系统,记录每次试验的X光参数以供分析比较。

1.3 韧致辐射 X 射线源

如对闪光加速器的韧致辐射谱,经特殊设计的多重复合靶软化后,大部分光子的能量可以控制在 $80 \sim 100\text{keV}$ 左右,比较适合用来做硬谱的X射线试验。“效应”装置的硬X射线源能谱在 100keV 级,是开展SGEMP和TREE试验较有前景的源。对能量高达 100keV 的X射线,系统内部的SGEMP响应出现与软X射线不同的特性。系统的多表面发射电子,内部表面材料的多样性,特别是一些介质材料对电子的捕获会改变SGEMP的产生、传输和耦合特性。

1.4 直流 X 射线源

利用直流X射线机可设计不同材料在 $1 \sim 100\text{keV}$ X射线能量范围内的电子发射特性的实验测量,研究电缆等的光电子发射参数和芯线电流响应,对较高能量X射线,测量电缆屏蔽层和芯线的X光响应,进行SGEMP探测系统的标定等。如在直流X射线环境中,公式 $I = YSF_x$ 可用于计算电缆的发射电流。 Y 是单能光电发射产额, S 是等效发射面积,为电缆受照射段长度乘其直径, F_x 是X光注量率。材料的光电发射产额是SGEMP研究的关键参数之一。直流X射线机在电子元器件和电路的TREE研究中也有重要的作用。

1.5 X 光试验及系统环境要求

开展X射线SGEMP试验可以达到两个目的:一是验证理论计算结果,二是通过大量实验数据的分析总结,给出进行解析的SGEMP参数研究的实验依据。试验类型有边界层试验,天线耦合试验,电荷传输试验,元器件和电路的直接辐照试验。

边界层试验,即空间电荷层与电磁场研究,采用圆盘和腔体作为试体,以检验空间电荷层内电磁场的计算结果和场及电流对阴影区域的传播等问题;天线耦合试验,研究对象为金属和介质组成的地附近的T型和M型多极天线及各种电缆和屏蔽导线束及其接插件,重点研究几种耦合途径,如电子直接发射,地平面发射的电子与天线的相互作用,置换电流,电场耦合和环路磁场耦合等;电荷传输试验,研究在X光环境下不同光电子发射率的材料之间的电荷传输规律。

1.6 关于模拟准确性判据和试验技术规范

为了在实验室模拟 SGEM P 效应, 需兼顾许多不同的因素, 并作出一些近似和简化处理。这些近似处理所导致的重要参数的实验结果与数值模拟结果的差别程度, 反映出了该模拟试验的质量好坏^[1]。引入模拟准确性概念对解释试验结果和设计模拟器都是必要的。对 SGEM P 模拟器, 可能得不到与真实环境一致的 X 射线条件和边界条件, 因此需要一个判据来定量地衡量试验的准确性, 并定量地给出确定模拟精确度判据的方法及其理论依据, 并应用于每个具体问题中。这些研究也是今后建立 SGEM P 试验规范所必需的技术基础。

2 表面电场和表面电流模拟

理论研究表明, SGEM P 的强度、脉冲上升前沿等随 X 光注量、系统结构的变化急剧变化, 场分布具有局域性。因此, 除了 X 光直接模拟外, 现有的各种 EM P 模拟器不适合用于 SGEM P 效应试验。需要指出, 所有次级模拟技术均无法完全代替 X 光辐照试验, 但提供了相对简便和较低经费需求的试验机会, 以供系统进行加固技术研究和评估, 而且该技术可以在大气压下进行试验。这一技术也提供了一种模拟强空间电荷限制时电磁场的有效手段。

表面电流模拟技术包括单极近场激励, 实导线电流注入^[2]。表面电场模拟技术重点在产生局部的高电场, 以提供各种耦合试验。

2.1 单极近场激励

在单极到受试系统的近距离范围内可以认为是电容耦合激励。全尺寸表面电流模拟实验采用的就是这个技术——将一块太阳电池板作为激励面, 利用卫星与地面形成的传输模式, 测量卫星上电子系统的干扰和各结构上的电流。该技术的优点是响应随几何形状的变化不明显, 电连接困难较小, 没有实导线连接系统, 可以进行系统侧面照射。单极的尺寸及其与被激励系统的距离, 负载阻抗等可调。但也有两个局限, 即在阶梯面上和对具有不同光电发射特性的材料表面得不到合适的响应。

2.2 实导线(接地)电流注入技术

这也是常用的表面电流模拟技术, 能在系统的局部提供入射电荷的手段。可以单点注入, 也可以多点注入。这一技术有三个用途: 一是作为间接模拟手段, 为理论计算提供参数; 二是作为直接模拟手段, 通过多点电流入射来确定系统的响应情况; 三是用来简单地确定某些一般的系统电学特性, 如电连接、频响、进入点鉴别等等。

其关键技术之一是由系统、激励装置和地形成的实验回路的设计, 其次是脉冲形成网络的设计。SGEM P 脉冲发生器关键在于应具有产生任意模拟 SGEM P 变化波形的功能, 并有丰富的高频成份。若要模拟 $4\text{J}/\text{m}^2$ 量级的 X 光注量, 其 SGEM P 为衰减的振荡波形, 频谱要扩展到 GHz 范围。对一定气压下的 SGEM P 响应, 由于气体电离的后期效应, 其波形往往有较长的持续时间^[3]。对电缆进行了屏蔽层电流注入试验, 将测得的 DPF 辐照时的电缆发射电流放大并注入电缆屏蔽层, 获得了与理论预估一致的芯线电流。

2.3 电缆 SGEM P 表面电场试验技术

由于 X 射线照射系统内部设备, 在内部各表面附近存在较强的空间电荷限制层, 电场耦合比磁场耦合更为重要。考虑到地的影响和垂直电场对编织屏蔽电缆耦合的特殊性, 有必要建立电容性耦合试验装置, 进行金属地附近电缆 SGEM P 表面垂直电场的耦合效应研究。

测量转移导纳泄漏响应的电容性 SGEM P 表面电场模拟系统典型设计如下: 直径 2m、高 1m, 两端开口的铝圆柱腔模拟空间飞行器总体结构, 也代表电缆模型中的地。各种长度和宽度

不等的驱动带来产生 SGEM P 的局部边界层。驱动带尺寸及其与地的距离通过严格的数值方法设计后可以精确模拟施加在电缆上的各场分量。信号源脉冲的特征参数为: 上升沿5ns, 半高宽50ns, 加到驱动带上的信号幅度为500V。

从实验结果可以推断, 在 SGEM P 表面电场作用下, 电缆芯线上产生的电流应当引起重视。实验中电缆屏蔽层是否接地, 对电缆的屏蔽效率影响较大, 电缆两端的负载对屏蔽效率的影响相对较小。屏蔽层两端都接地, 芯线两端均为50Ω 匹配负载时, 在相同的电场下产生的芯线电流最小。

3 讨 论

1. SGEM P 实验研究应两条腿走路: 利用强 X 光源和表面电场和电流模拟技术模拟高注量 X 光电磁效应; 利用 DPF、爆炸金属丝 X 光源和小电流注入模拟低注量 SGEM P 效应, 通过实验数据积累, 验证理论模型和结果。

2. 爆炸金属丝软 X 光装置的指标较 DPF 有较大提高, 可望提供部件级 SGEM P 试验。

3. 表面电流模拟技术和局域场生成技术是开展系统加固技术研究和系统考核的必要技术手段, 这些技术发展的前提是对 SGEM P 的特征和规律要有充分了解。

参考文献

- 1 Stettner R, et al Satellite SGEM P simulation fidelity criteria *IEEE Tran*, 1981, NS28(6): 4227~ 4232
- 2 Demer T N, et al Analysis and test methodology for detemining satellite power system X- ray response *IEEE Tran*, 1981, NS28(6): 4204~ 4210
- 3 Woods A J, et al Air effects on the external SGEM P response of a cylinder: *IEEE Tran*, 1981, NS28(6): 4464~ 4472

THE TECHNIQUES FOR SM ULATING SGEM P IN AN EXOATMOSPHERIC RAD IATION ENVIRONMENT

Zhou Hui, Cheng Yinhui, Zhong Yufeng, L i Baozhong, W u Yanling, Chen Yusheng
(N orthwest Institute of N uclear Technology, P. O. B ox 69, Ext 16, Xi 'an, 710024)

ABSTRACT In this paper the techniques used in simulating SGEM P response were discussed, and some theoretical data and testing results got in resent years were presented. A general survey of the techniques that can be achieved in laboratory was given, focusing of those particularly applicable for SGEM P simulation. The techniques include direct X rays simulation, electron simulation, and direct voltage and current injection.

KEY WORDS radiation environment, X rays, SGEM P, simulation