http://www.bisee.ac.cn

E-mail: htqhjgc@126.com

Tel: (010)68116407, 68116408, 68116544

航天器介质充电效应模拟试验中的 非接触式电位转接测量技术

郑耀昕^{1,2},张振龙¹,郑汉生^{1,2},韩建伟¹ (1. 中国科学院 国家空间科学中心,北京 100190; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 航天器充放电效应地面模拟试验中需要测量的一个重要参数是介质的充电电位。文章基于介质充电 电位的非接触式转接测量技术,分析了测量中引起误差的各个因素,讨论了减小测量误差和提高转接测量分辨 率的方法,并进行试验验证。据此设计了一套介质电位非接触式转接测量系统,其测量分辨率达到10V以下, 且由电荷泄漏引起的测量误差<1%,能够满足航天器介质充电电位的测量要求。

关键词: 航天器充电效应; 电位测量; 非接触式测量; 分辨率 中图分类号: V416.8 文献标志码: B 文章编号: 1673-1379(2016)02-0211-05 DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2016.02.018

Non-contact transferred potential measurement technology in ground testing for spacecraft dielectric charging effect simulation

Zheng Yaoxin^{1,2}, Zhang Zhenlong¹, Zheng Hansheng^{1,2}, Han Jianwei¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The dielectric charging potential is one of the important parameters to be measured in the charging and discharging effect simulation test. A non-contact transferred measurement method is presented, the influencing factors on the measurement errors are analyzed, the methods for improving the transferred measurement resolution are proposed, and a non-contact measurement system with a transfer mechanism is designed. The validation test results show that the resolution of the dielectric charging voltage is less than 10 V, and the error caused by the charge leakage is less than 1%. The system can meet the requirements of the spacecraft dielectric charging potential measurement.

Key words: spacecraft charging effect; potential measurement; non-contact measurement; resolution

0 引言

在空间带电粒子辐射环境下,航天器充放电效 应会破坏介质材料,损坏或干扰电子设备,进而威 胁航天器的运行安全^[1-3]。地面模拟试验是研究充 放电效应的有效手段,也是对其进行风险评估和防 护设计的重要依据,其中样品(介质)的充电电位 是试验中需要测量的一个重要参数^[4]。

地面模拟航天器充电效应需将被测样品置于 真空室内对其进行辐照充电。由于介质电导率很 小,介质中的电荷不易移动,为了保持其带电状态, 只能通过非接触方式对其表面电位进行测量^[5]。

收稿日期: 2015-09-23; 修回日期: 2016-03-20

若直接将电位计探头放于真空室内,则一是需要研 制高压过渡装置;二是探头会受辐射环境影响,使 测量结果不准确;三是对探头进行维修时必须打开 真空罐,这不利于在试验中对电位计可能出现的问 题进行修复与校正。而充电电位的转接测量方法是 将电位计探头放于真空室外,对连通真空室内外的 转接机构上的监测板进行非接触式测量,从而可有 效避免上述问题和不便。这种方法最初由美国 A. R. Fredericson 教授提出^[6-7];犹他大学的 J. L. Hodges 对此进行了研究,并设计了一套转接测量 机构,其试验装置适用于对宽度小于 19 mm 的 平板样品进行一维扫描测量,转接距离很短,因此 测量结果受转接机构影响较小,系统分辨率可达 1 V^[8]。这里所说的系统分辨率指的是电位计与转 接机构组合在一起进行测量时的分辨率。虽然电位 计本身的分辨率通常很高,但经过转接机构电容分 压后会降低系统的分辨率;同时转接机构会不可避 免地存在电荷泄漏而使测量结果偏离真实值,即引 起测量误差。

为满足航天器部件级模拟试验要求,中国科学 院国家空间科学中心研制了航天器充放电模拟试 验装置,采用转接测量方法对样品表面充电电位进 行较大范围的三维扫描测量。此装置结构复杂、体 积大、转接线较长,测量结果受转接机构影响大而 导致系统分辨率较低,测量过程中电荷泄漏快而引 起误差较大。本文从转接测量原理出发,通过一系 列试验验证,对转接机构的各个部件进行分析和设 计改进,以求减小测量误差并提高系统分辨率。

1 非接触式转接测量原理

1.1 航天器充放电模拟装置

航天器充放电模拟装置包括真空容器、真空抽 气系统、电子辐照装置、三维平移机构和转接测量 系统(见图 1)^[9]。测量系统中的表面电位测量采 用 Trek341B 型非接触式静电电位计,量程为-20~ 20 kV。真空容器直径约为 1 m,转接导线长约 1.5 m,三维平移机构可牵引转接测量系统的感应 探头从远离样品台 200 mm 处到达辐照中心,然后 进行 100 mm×100 mm 范围内的三维扫描 测量或任意一点的定位测量。



图 1 航天器充放电模拟装置示意图 Fig. 1 Schematic diagram of spacecraft charging and discharging simulator(SCADS)

1.2 电位转接测量原理与分析

转接测量系统如图 2 所示,中间部分即是转接 机构,由内部电容探头、转接导线和外部监测板 3 部分构成。其中,电容探头是转接机构的主要部件, 由感应探头、绝缘体和屏蔽体构成,如图 3 所示。



图 2 转接测量系统示意图 Fig. 2 Schematic diagram of transfer measurement system



图 3 常用电容探头结构 Fig. 3 Structure of a traditional capacitance probe

图 2 中的被测样品受电子辐照而呈负电位,探 头靠近样品时感应正电荷。理想情况达到静电平衡 时,转接机构总电荷为 0,且为等势体。根据电容 分压原理,转接机构的电位与样品电位成正比例关 系,通过标定可测量样品电位^[10]。

对转接测量系统进行标定时,需在真空环境下 将标准电压源接于铜质标定电极上来模拟带电样品。 调节电压源的输出,使用转接测量系统对每个输出值 进行多次测量并求平均值,将标准值和测量平均值线 性拟合,求出关系式。实际测量时,即可根据测量值 和标定关系式推算出样品电位。

样品对地可等效为一电容 *C*_s,设其测量前带 电量为 *Q*,则电位 *V*_s=*Q*/*C*_s。设转接机构对地等效 电容为 *C*_w,对地等效电阻为 *R*_i;测量时感应探头 与样品的耦合电容为 *C*_f,则系统等效电路如图 4 所示,其中 *V*_s'和 *V*_p分别为测量时样品和转接机构 的电位。





实际测量中当探头靠近样品时,因分布电容的 存在会导致样品电位降低;而标定时,因标定电极 一直被施以恒压,电位并不会降低。因此,经标定 关系式推算出的样品电位要比真实值略低。从图 4 可得测量时与测量前样品的电位之比 *V*_s'/*V*_s= *C*_s/(*C*_s+*C*),其中 *C* 为 *C*_w和 *C*_f的串联电容。以几种 典型材料的参数估算得 *V*_s'/*V*_s的值都在 0.9 以上,这 样可经过再次换算求得更接近真实值的样品电位值。

严格来讲,静电感应的正负电荷不只分布在转 接机构两端,且由于分布电容电阻的存在会引起电荷 泄漏,因此转接机构的电位会随时间指数衰减,即

$$V_{\rm p} = V_{\rm s} \cdot \frac{C_{\rm s}}{C_{\rm s} + C} \cdot \frac{C_{\rm f}}{C_{\rm w} + C_{\rm f}} \cdot e^{\frac{t}{R_{\rm f}C_{\rm w}}} \,. \tag{1}$$

设转接系数 K=V_p/V_s,则K 值越大,系统分辨 率越高; 电荷泄漏越快,测量误差越大。从 式(1)可看出:影响系统分辨率的主要因素为 C_f和 C_w;导致电荷泄漏的主要因素为 R_i和 C_w。另外, 空气中的异号电荷也会中和监测板上的感应电荷, 使测量结果衰减。

2 测量误差和分辨率影响因素分析及对策

针对测量中所面临的问题,转接机构的设计目 标主要是减小测量误差和提高系统分辨率。

2.1 减小测量误差

测量误差主要来源于转接机构上的电荷泄漏。 其主要有两种泄漏方式:一是通过相连的物体将电 荷泄漏至大地;二是与空气中的异号电荷中和。要 减小测量误差则应尽量避免泄漏。

2.1.1 减少感应电荷向大地泄漏

设系统的放电时间常数 τ = R_iC_w,由式(1)可知 应同时增大 R_i和 C_w。但增大 C_w将导致系统分辨 率降低,因而要求转接机构具有很高的泄漏电阻。 转接机构主要通过 3 个接地点即转接导线、真空转 接口和感应探头向大地泄漏电荷,因而应:

1) 增大转接导线对地电阻

最初为了真空室内布线美观,曾直接将转接导 线紧贴真空室壁,造成转接测量系统不仅分辨率 低,还有明显电荷泄漏。测量 3000 V 的标准电压 时,电位计示数每秒衰减将近10 V。后来根据真空 室的特殊构造设计了2个绝缘支柱,将转接导线架起,不仅使测量时电位计每秒衰减值降低到5V左右,系统分辨率也提高了近1倍。

2) 增大真空转接口电阻

转接导线需穿过真空室壁与监测板相连,为了 增大导线与真空室壁间的电阻而设计了转接口。转 接口为铜芯聚四氟乙烯柱,绝缘厚度约为2cm。这 样的转接口电阻极大,能够大大减少电荷泄漏。

3) 增大感应探头对地电阻

为了更大程度增大电阻并改善屏蔽效果,对常用 电容探头进行改造(如图5所示)。其优点为:感应 探头与屏蔽罩之间的沿面泄漏距离增大,其间大部分 为真空,可减小探头电容,增大泄漏电阻;静电屏蔽 效果更好,且有利于感应电场均匀分布^[11]。



图 5 新型电容探头结构及实物图 Fig. 5 New type of the capacitance probe and its picture

对改造前后的电容探头进行对比试验。调节电 压源,使分别安装图 3 和图 5 中 2 种探头的转接系 统对标定电极的测量初始值都为 700 V。保持电压 源恒定,记录测量值的变化,得出的电荷泄漏特性 曲线如图 6 所示。可见安装新探头的转接系统电荷 泄漏更慢,测量误差更小。



图 6 电容探头改造前后电荷泄漏特性对比 Fig. 6 Charge leakage characteristics of different capacitance probes

2.1.2 减少感应电荷与空气中异号电荷中和

考虑环境因素,对监测板周围空气干燥除湿以 降低异号电荷密度;同时在满足 Trek 电位计探头 有效测量面积的前提下,选用较小的监测板,以 减少与空气的接触面积。

另外,对铜质的感应探头和监测板都进行了抛 光镀金加工,这样不仅有利于感应电场均匀分布, 提高测量精确度,同时还能防止长期环境因素引起 的氧化效应,减少因表面污染而引起的电荷泄漏。 2.1.3 系统清零和校准

无论如何增大转接机构的泄漏电阻并减少其 与空气接触,总有少量电荷泄漏使电位计读数随时 间漂移,或者由于空间电荷在电容探头上沉积而导 致测量误差。因此在每次测量之前必须将转接机构 接地以对其清零,并对电位计进行校准。

2.2 提高系统分辨率

从式(1)看出,通过增大 C_f、减小 C_w可以提高 系统分辨率,而由此导致系统放电时间常数的减小 则尽量通过增大 R_i进行补偿。

2.2.1 增大感应探头与样品间的耦合电容 C_f

平板电容计算公式为 $C_0=\varepsilon_0 \cdot S/d$,其中 ε_0 为真 空介电常数; S 和 d分别为两板正对有效面积和间 距。因此,要使电容增大,可减小感应探头与被测 样品的距离,同时增大两者的有效感应面积。

对于足够大的样品,增大感应探头即是增大感 应面积。图 7(a)为相同条件下对安装不同直径感应探 头的转接测量系统进行标定试验得出的拟合曲线,直 径为 10、16、20、30 和 40 mm 的感应探头对应的系 统分辨率分别为 25.9、15.5、11.9、6.9 和 5.5 V,如 图 7(b)所示。可见感应探头越大,系统分辨率越高。 但是非接触测量实际得到的是样品上有效感应面 积的电位平均值,感应探头越大,其对被测样品的 空间分辨率越低。对于面积较大的平板样品,若样 品充电均匀,测得的电位平均值即是期望的真实 值。但若样品的结构复杂,电位分布不均,则测得 的平均电位将与真实值存在较大差距。因此应根据 被测样品的具体结构选用不同大小的感应探头。

设置不同的感应距离,并在相同条件下分别进 行标定试验,得到拟合曲线和系统分辨率如图 8 所 示,其中,2、3 和 4 mm 的感应距离对应的系统分 辨率分别为 16.6、21.5 和 25.9 V。可见感应距离越 小,系统分辨率越高。但考虑感应距离过小会导致 带电样品有放电风险,因此最终选取了 2 mm 的感 应距离。







2.2.2 减小转接机构的对地等效电容 Cw

如图 2,转接装置的对地等效电容主要由感应 探头对地等效电容 C_{w1}、转接导线对地等效电容 C_{w2}和监测板对地等效电容 C_{w3}这 3 部分组成。

1) 减小感应探头对地等效电容 Cw1

上文为了增大感应探头的对地电阻而对电容 探头进行改造的同时,也减小了感应探头的对地等 效电容。对安装新旧2种探头的转接系统分别进行 标定试验,得系统分辨率分别为7V和8V,可知 新电容探头效果更好。

2) 减小转接导线对地等效电容 Cw2

设有限长水平导线半径为 r,长度为 L,对地 距离为 h,则当(4h)² << L²时,导线对地等效电容 C 与 ln(h/r)成反比例关系。因此应尽量缩短转接导线 的长度,增大转接导线与接地导体间的距离,同时 选用横截面较小的导线,以减小转接导线的对地等 效电容。

上文通过绝缘支架将转接导线架高后,系统分 辨率已由 16V 提高到 8V。为了验证不同粗细导线 对系统分辨率的影响,对安装不同截面铜芯线的转 接系统分别进行标定试验并得出系统分辨率如图 9 所示,可见转接导线越细,系统分辨率越高。但通 过对更多导线进行试验发现,随着导线越来越细, 分辨率提高的幅度会越来越小。为了保证导线有一 定的柔韧强度,最终选择了截面为 0.05 mm² 的



3) 减小监测板对地等效电容 Cw3

监测板与电位计探头屏蔽罩之间存在耦合电容,其近似于平板电容器,因此应该在满足电位计探头有效测量面积的前提下使监测板尽量小。分别对安装有直径1cm和2cm监测板的转接系统进行标定试验,虽然两者的系统分辨率并无明显差别,但是小的监测板与空气接触面积更小,能够减少感应电荷与空气中异号电荷中和。

3 结束语

本文分析了介质电位非接触式转接测量中引起 误差的各个因素,提出了减小测量误差和提高转接 测量分辨率的方法,并进行试验验证。减少测量误 差的方法主要有:合理对转接导线进行布线,将其 尽量远离接地导体;增大感应探头与屏蔽罩的绝缘 强度;在满足电位计探头有效测量面积的前提下选 用较小的监测板。提高转接测量分辨率的方法主要 有:根据被测材料的要求尽量选用合适的感应探头 和感应距离;尽量减小转接机构的对地等效电容。

根据以上方法对航天器介质充电电位非接触式 转接测量系统进行了改进,改进后的系统测量分辨率 可小于 10 V,且电荷泄漏引起的误差<1%。此测量 系统已应用于电荷贮存衰减法测量绝缘材料电导率 试验、SADA 导电环内部充电模拟试验等材料带电 试验,测量数据符合预期,且与仿真结果基本一致。 由于样品充电电位可达几千甚至上万伏,10 V 的系 统分辨率换算成相对测量误差只有不到 1%,能够满 足航天器充电效应模拟试验中的电位测量要求。

参考文献(References)

- Rodgers D J, Ryden K A. Internal charging in space[R]. European Space Agency, 2011
- [2] Leach R D, Alexander M B. Failures and anomalies attributed to spacecraft charging, NASA Reference Publication 1375[R], 1995
- [3] Violet M D, Frederickson A R. Spacecraft anomalies on the CRRES satellite correlated with the environment and insulator samples[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1993, 40(6): 1512-1520
- [4] 全荣辉. 航天器介质深层充放电特征及其影响[D]. 北 京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2009
- [5] 张荣奇, 谭志良, 林永涛, 等. 常用静电测量技术及其 特点[J]. 装备环境工程, 2007, 4(5): 85-88 Zhang Rongqi, Tan Zhiliang, Lin Yongtao, et al. Overview on electrostatic testing technologies and there characteristics[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(5): 85-88
- [6] Frederickson A R, Benson C E, Bockman J F. Measurement of charge storage and leakage in polyimides[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2003, 208: 454-460
- [7] Fredrickson A R, Dennison J R. Measurement of conductivity and charge storage in insulators related to spacecraft charging[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(6): 2284-2290
- [8] Hodges J L, Dennison J R, Dekany J, et al. In situ surface voltage measurements of dielectrics under electron beam irradiation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(1): 255-265
- [9] 张振龙,韩建伟,曹旭纬,等. 航天器内部充电模拟装置及其应用[J]. 抗核加固,2013,30(1):41-47
- [10] 魏明, 叶伟, 魏光辉. 非接触式静电电压表校验研究[J]. 仪表技术与传感器, 2002(12): 46-48
 Wei Ming, Ye Wei, Wei Guanghui. Study on verification of non-contact electrostatic voltmeter[J]. Instrument Technique and Sensor, 2002(12): 46-48
- [11] 张要强,郑晓泉,刘晓东,等.真空环境下介质表面 电荷分布的测量方法[J]. 绝缘材料,2006,39(3): 61-63

Zhang Yaoqiang, Zheng Xiaoquan, Liu Xiaodong, et al. Measurement methods of surface charge distribution on dielectric in vacuum environment[J]. Insulating Materials, 2006, 39(3): 61-63

(编辑: 许京媛)

作者简介:郑耀昕(1990—),男,硕士研究生,地球与空间探测技术专业; E-mail: zhengyaoxin13@mails.ucas.ac.cn。 指导教师:张振龙(1976—),男,研究员,主要从事空间环境效应研究; E-mail: zzl@nssc.ac.cn。

第2期