

# 等离子体对空间飞行器表面充电效应探测研究

杨 艳<sup>1</sup>, 郑 义<sup>1</sup>, 高志强<sup>1</sup>, 钟 亮<sup>1</sup>, 郑玉展<sup>2</sup>, 史 青<sup>1</sup>, 彭泳卿<sup>1</sup>

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076  
2 北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

**摘要:** 为确保空间飞行器在轨安全, 有必要搭载探测器对轨道空间环境进行实时监测, 获取表面充电效应数据。在对轨道空间充电环境分析的基础上, 确定探测器的任务目标并完成基于电位探头和电流探头的探测器方案设计, 包括探头设计和电路设计。探测器设计方案在空间环境特殊效应测量领域迈出的关键一步, 为更多空间效应参数的测量奠定了坚实基础。

**关键词:** 空间飞行器; 电位; 电流; 探测器

中图分类号: V520 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)06-0051-06

## Research on detection scheme and application technology of surface charge effect for spacecraft

YANG Yan<sup>1</sup>, ZHENG Yi<sup>1</sup>, GAO Zhiqiang<sup>1</sup>, ZHONG Liang<sup>1</sup>, ZHENG Yuzhan<sup>2</sup>, SHI Qing<sup>1</sup>, PENG Yongqing<sup>1</sup>

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. Institute of Spacecraft System Engineering, CAST, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To ensure the safety of spacecraft in orbit, the detection of real-time monitoring of the orbital space environment and obtaining the surface charge effect data are required. Based on the analysis of orbit charging environment, the mission target is determined and the scheme design based on the potential probe and the current probe is completed, including the probe design and the circuit design. This detector is a key step in the measurement of special effects in space environment, which lays a solid foundation for the measurement of more parameters of space effects.

**Key words:** Spacecraft; Potential; Current; Detector

## 引 言

空间飞行器在轨运行期间, 沉浸于具有一定能量和密度的空间等离子体之中, 尤其当太阳风引起地磁层亚暴时, 空间飞行器将处于等离子能力达数千电子伏到数十千电子伏的环境中, 等离子体与飞行器表面材料相互作用, 会在飞行器表面积累电荷, 导致空间飞行器表面充电现象。由于表面材料的介电特性、光照条件、几何形状等情况不同, 可能会造成在飞行器表面出现不等量充电, 形成局部静电电位差, 在表面与飞行器结构地之间也形成电位差, 当电位差增大到一定值后, 可能导致飞行器表面放电, 影响飞行器在轨工作。因此, 为分析飞行器在轨期间是否会因等离子体造成的表面放电导致飞行器异常和故障, 世界各国在飞行器的设计中, 都进行了充分的表面电位分析、表面电流分析监测等工作。探测数据可以用于辅助飞行器在轨故障判别、在轨管理等, 积累的探测数据可用于为表面充电风险分析及告警提供技术手段。

本文基于探测飞行器表面典型介质材料的充电电位和充电电流的任务目标, 完成了探测器的方案设计, 包括探头设计和电路设计以及实验数据分析, 最终给出标定试验曲线。

## 1 探测器设计

探测器由表面电位探头、表面电流探头、电子线路处理系统等组成。

表面电流探头采用高阻法进行 I-V 变换后完成测量。将其微弱电流信号放大到便于测量的电压时, 必须使用高阻值的反馈电阻, 同时应当选取高输入电阻和极低偏置电流的运算放大器, 以防止偏置电流的噪声淹没输入待测电流信号以及其温度漂移影响输出零点的稳定。

表面电位探头选择微分电容法进行测量。该方法简单, 线性关系好, 容易还原数据。其缺点是接触法造成的少量电荷流失, 通过采用高阻抗测量回路减少传导电流, 使其远低于等离子体环境产生的表面充电电流, 从而可以最大程度地降低其电荷流失和测量误差。

### 1.1 探头设计

飞行器表面充电探测器的探头分为两部分, 一部分为表面电流探头即金属(铝板)传感器, 一部分为表面电位探头即飞行器典型介质材料传感器, 两个传感器集成到一个探头结构中, 如图 1 所示。

金属(铝板)传感器用于测量充电电流, 通过金属板模拟暴露于空间环境下的绝缘材料表面, 铝板受充电粒子撞击而产生电流, 电流大小决定于外界空间充电电子环境, 因此, 铝板上测量的充电电流能反映外界充电环境的变化。

测量表面电流的电原理图如图 2 所示。

飞行器典型介质材料传感器用于测量表面电位, 上层为典型介质材料薄膜, 下层为铝板, 连接芯线引出, 薄膜与铝板等效成电容。当空间环境对薄膜产生充电效应时, 由传感器输出的表面电位经过分压网络, 将电压信号输送给电子学处理系统。

以长 40mm、宽 25mm、厚 25 $\mu\text{m}$  的聚酰亚胺薄膜为例。

其面积为

$$A_{\text{矩形}} = 40 \times 25 = 1000 \text{mm}^2 \quad (1)$$

真空介电常数为

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m} \quad (2)$$

聚酰亚胺薄膜相对介电常数为

$$\epsilon_r = 3.45 \quad (3)$$

电容量为

$$C_s = \frac{A \times \epsilon_0 \times \epsilon_r}{d} = \frac{10 \times 10^{-4} \times 8.85 \times 10^{-12} \times 3.45}{25 \times 10^{-6}} = 1221.3 \text{pF} \quad (4)$$

测量表面电位的电原理图如图 3 所示。

图中  $C_s$  为探头聚酰亚胺薄膜和铝板形成的等效电容,  $C_r$  为分压电容,  $C_r$  由  $C_s$  和测量量程决定,  $R$  为测量电路的等效输入电阻。从等效电路可看出,  $V_{\text{out}}$  呈微分响应。

$$C_s \frac{d}{dt}(V_s(t) - V_{\text{out}}(t)) = \frac{V_{\text{out}}}{R} + C_r \frac{d}{dt} V_{\text{out}} \quad (5)$$

$$V_s(t) = \frac{C_r + C_s}{C_s} V_{\text{out}} + \frac{t}{RC_s} \int_0^t V_{\text{out}} dt \quad (6)$$

表面电位探头经分压电容  $C_r$  接地, 其表面电位经  $C_s$  和  $C_r$  分压后接电子线路。分压电容  $C_r$  为具有温度及长期稳定性高、绝缘电阻大的性能优异的金属化聚苯硫醚电容。

### 1.2 电子线路设计

表面电流测量电路的工作原理是对探头接收到的电流

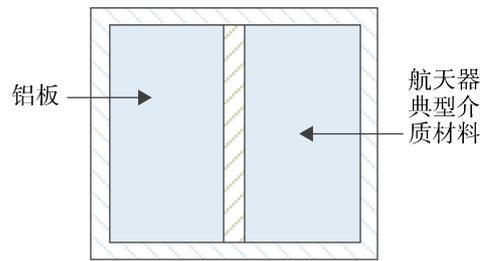


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of sensor

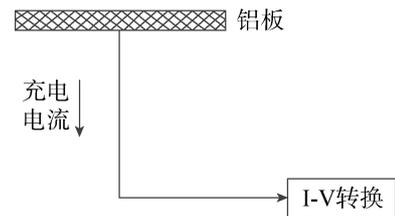


图 2 测量表面电流的电原理图

Fig. 2 The electrical schematic diagram for measuring surface currents

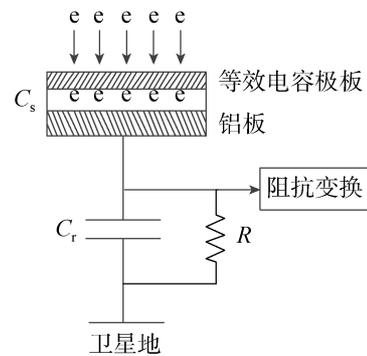


图 3 测量表面电位的电原理图

Fig. 3 The electrical schematic diagram for measuring surface potential

信号经过 IV 转换电路，通过高阻值采样电阻和高阻放大器将微小电流转换成电压信号，同时将电压信号转换为低阻输出，再经过后级电路进行偏置放大滤波，最终通过输出接口电路得到电压信号。测量电路工作流程如图 4 所示。



图 4 表面电流测量电路工作流程

Fig. 4 The flow chart of surface current measurement circuit

表面电位测量电路的工作原理是对探头接收到的电压信号经过电容分压，经过高输入阻抗跟随器输出充电电压信号，同时将高阻信号源转换为低阻输出，再经过后级电路进行偏置放大滤波，最终通过输出接口电路得到电压信号。测量电路工作流程如图 5 所示。



图 5 表面电位测量电路工作流程

Fig. 5 The flow chart of surface potential measurement circuit

### 2 测试影响分析

表面电位探头电容为 1222pF，实际上由于聚酰亚胺薄膜在贴合过程中不能做到完全无缝贴合，因此，实际电容一般小于计算值，样机实测值  $C_s$  约为 560pF，分压电容  $C_r$  选 680nF。

表面充电具有一定的充电速率，一般要求测量电路的时间常数  $C_r R$  大于 1000s。 $C_r$  为 680nF， $R$  则取 2GΩ，此时， $C_r R$  为 1360s。对于周期为 100s 的峰值 10kV 电压信号进行仿真，结果如图 6 所示。

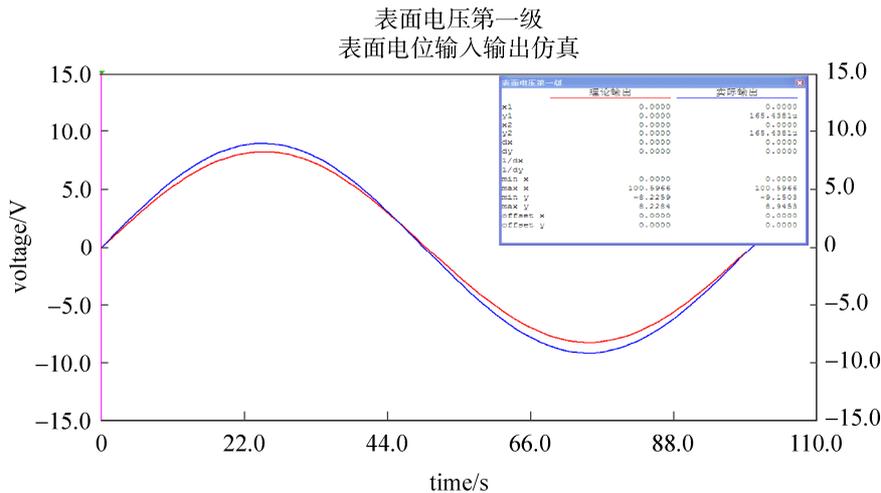


图 6 100s 充电周期时电位测量电路输入输出对比

Fig. 6 The comparison of the input and output of the potential measurement circuit

根据仿真，理论最大输出为 8.229V，实际输出与理论输出最大偏差为-924mV，最大偏差比例为 11.22%。由于放电电阻造成的偏差很小，可认为不影响测量精度。因此，测试时充电电压的改变速度不能太快，否则电路无法及时响应，应至少保证几十秒。

### 3 标定实验结果及分析

#### 3.1 表面电流探头标定

电流探头的测量电路是将接受的电子多少（电流在 nA 级以下）转换为电压信号。对于电流探头的处理电路可以采用微弱电流源模拟电流输入（模拟入射电子的通量大小）的方式来对处理电路的线性度进行测试。将微弱电流信号转换为电流信号进行测量，具体的测试连接图如图 7 所示。

测试结果如表 1 和图 8 所示。

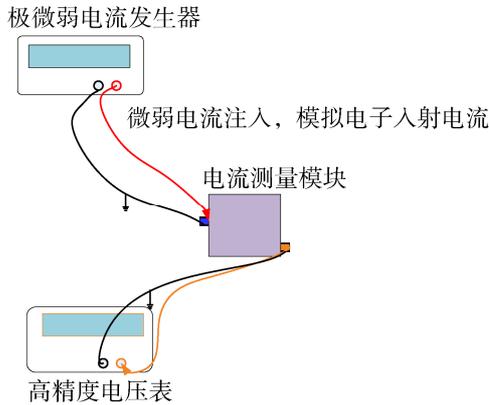


图 7 电流探头测量电路的测试连接图

Fig. 7 The test connection diagram for current probe measurement circuit

从标定结果上看, 表面电流测量电路的线性度很好。输入电流和输出电压的关系为

$$Y = 0.1776X + 4.5088 \quad (7)$$

其中,  $X$  表示输入电流, 单位为 nA;  $Y$  为输出电压, 单位为 V。

### 3.2 表面电位探头标定

通过在电位探头上加高压, 确定探头电压与电路输出电压的关系。直流高压模拟标定试验的真空度优于  $5.4 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。实验原理如图 9 所示。

直流高压电源输出到探头的电压, 一般为阶跃电压, 信号处理电路输出电压为类似于指数变化的电压脉冲。 $V_S$  与  $V_0$  的关系为

$$V_S(t) = \frac{C_r + C_s}{C_s} V_0(t) + \frac{1}{RC_r} \int_0^t V_0(t) dt \quad (8)$$

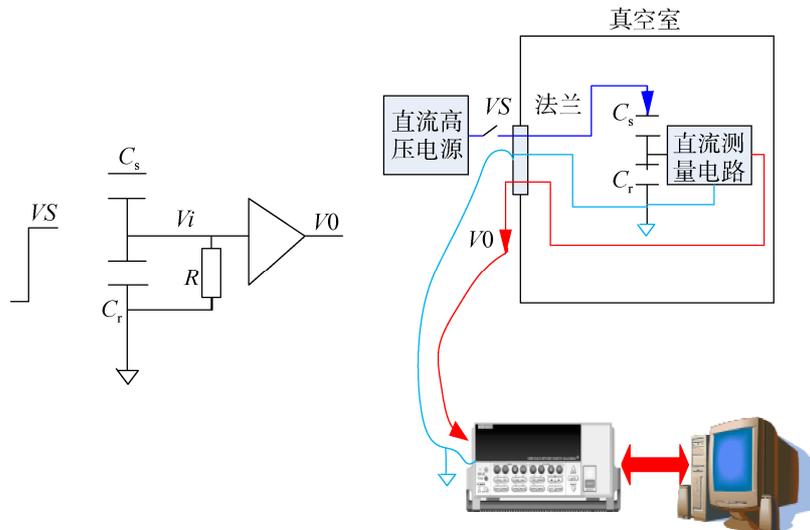


图 9 电容分压式传感器加直流高压标定原理

Fig. 9 The principle of capacitor voltage divider sensor plus DC high voltage calibration

表 1 电流探头测量电路测试结果记录表

Table 1 The results of current probe measurement circuit

输入电流/nA	输出电压/V
0	4.509
-0.1	4.491
-5	3.621
-10	2.734
-15	1.846
-20	0.957
-25	0.07
-30	-0.818
-35	-1.706
-40	-2.593
-45	-3.481
-50	-4.369
-55	-5.256
-60	-6.145

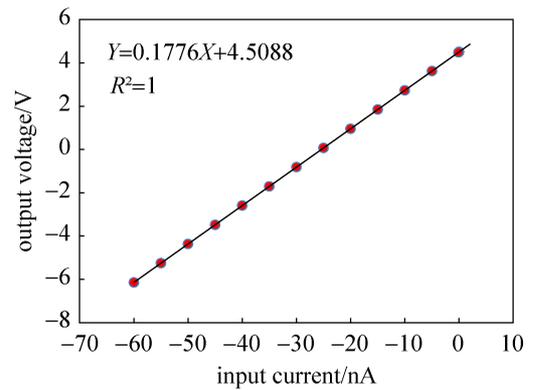


图 8 电流测量电路的标定结果

Fig. 8 The calibration results of current measurement circuit

如果  $RC_r$  足够大, 或  $t_0$  足够小, 则

$$VS(t_0) = \frac{C_r + C_s}{C_s} V_0(t_0) \quad (9)$$

实际测量结果如图 10 所示。图中每个台阶代表所加载的不同高压, 根据所加高压, 不断地有台阶式上升。在每个台阶上, 通过采样程序取测量数据的平均值来获得测量结果。

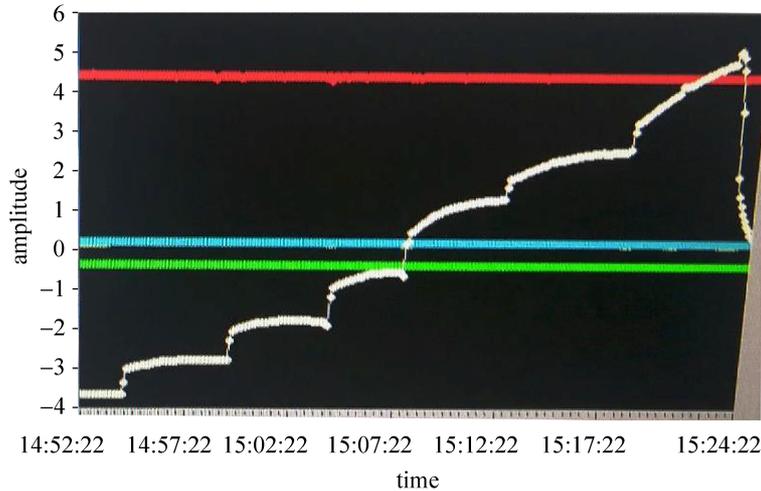


图 10 表面电位测量结果

Fig. 10 The surface potential measurement results

测量结果与高压模拟源输出高压的关系, 如图 11 所示。图中还给出了根据电容分压得出的理论值。从图中可以看出, 基于直流高压模拟源的实验结果拟合曲线与理论结果比较接近。线性拟合公式如图 11 中左下表所示。

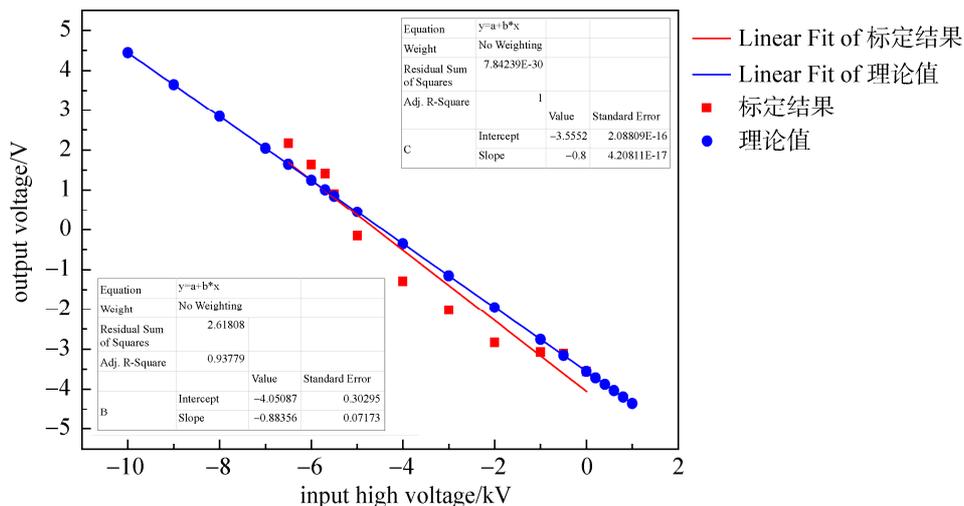


图 11 表面电压探头高压模拟源标定结果及理论结果

Fig. 11 The calibration results and theoretical results of high voltage analog source of surface voltage probe

### 3.3 表面电位和电流探头的电子源环境下的标定

低能电子束照射表面充电监测模块传感器的定标试验原理如图 12 所示。

采用电子束照射电位探头和电流探头, 通过法拉第筒对电子束流密度进行实际测量。采用设备测量电位探头表面所带高压, 并与电位测量电路测试获得的电压建立线性关系。同时, 也会检测电流探头测量电路测量的电流, 并与法拉第筒所测量电流密度建立线性关系。电子束标定试验的真空度优于  $5.4 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 。

图 13 给出了电流探头的标定结果, 其中也给出了理论值(电路的标定结果, 与电流模拟源标定曲线一致, 只是变量代表参数相反)。其中, 标定结果的电流值采用的是法拉第筒测量电子源的束流大小, 理论值测试则是输入电流与探头面积的比值。从图中可以看出, 拟合曲线与测试值完全吻合。拟合公式为

$$Y = 0.515X - 2.2982 \tag{10}$$

其中,  $X$  为电流探头输出电压值, 单位是 V;  $Y$  为束流密度, 单位是  $\text{nA}/\text{cm}^2$ 。

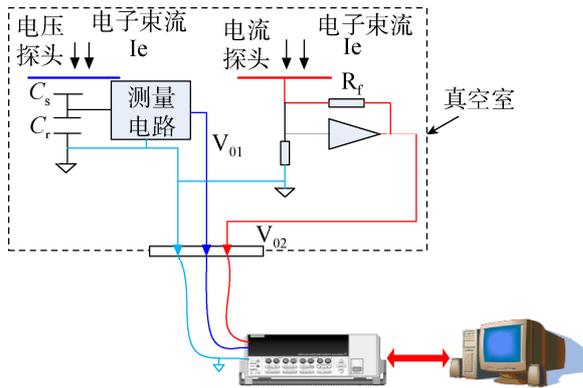


图 12 低能电子束照射表面充电探测器传感器的定标试验原理

Fig. 12 The calibration principle of surface charge detector sensor illuminated by low energy electron beam

图 13 中的标定值与理论有些差别, 这是因为表面充电探头在电子注入下的响应与实际注入电流有差别。因为高电子电流入射下, 表面探头会出现一定的漏电, 导致标定值小于理论值, 标定值与理论值偏差在 5% 以内。

表面电位探头的标定结果如图 14 所示。图中也给出了高压模拟源标定曲线(与高压模拟源标定曲线一致, 只是变量代表参数相反)。从图中可以看出电子源的标定值落在了高压模拟的标定曲线上, 说明高压模拟源的标定曲线可以代替电子源的标定结果。

### 4 结束语

随着航天事业的飞速发展, 有关空间飞行器长寿命、高可靠性设计的研究逐渐成为热点。然而, 国内在飞行器充电效应的研究方面尚处于起步阶段, 开展飞行器充放电效应研究工作对飞行器安全、可靠运行具有重要的工程应用价值, 对提升飞行器水平具有重要意义。

本探测器具有探测范围宽、探测精度高、寿命长、体积小、功耗低等特点。未来还需进一步提高探测范围和精度, 拓宽探测参数的种类, 继续开展总剂量效应、充放电效应、位移损伤效应以及单粒子效应等空间效应参数的探测。进而建立一整套完善的飞行器充电风险预示、评估与防护技术方案, 以满足我国长寿命空间飞行器研制以及在轨稳定、可靠运行的迫切工程需求。

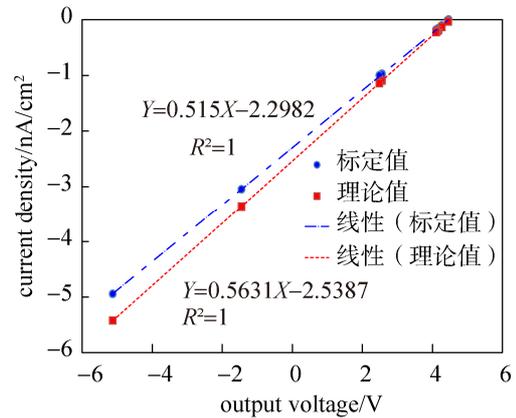


图 13 电流探头的标定值与理论值

Fig. 13 The calibration value and theoretical value of current probe

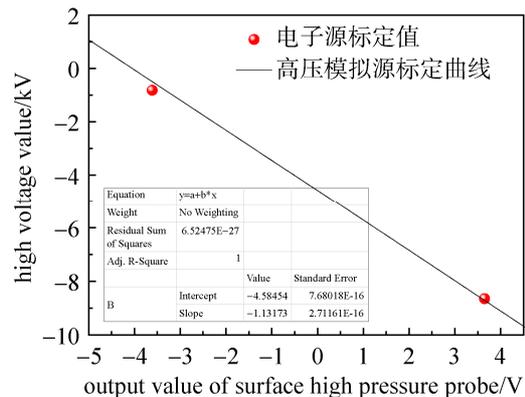


图 14 电压探头的标定值与高压模拟标定曲线

Fig. 14 The calibration curve of voltage robe and high voltage simulation