

月面环境月球车摩擦充放电风险研究*

夏清¹⁾ 李梦瑶¹⁾²⁾ 蔡明辉^{1)3)†} 唐程雄⁴⁾ 张尊⁵⁾
杨涛¹⁾ 许亮亮¹⁾ 贾鑫禹¹⁾

1) (中国科学院国家空间科学中心, 太阳活动与空间天气全国重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

3) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

4) (北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

5) (北京航空航天大学空间与地球科学学院, 北京 100191)

(2025年8月2日收到; 2025年8月29日收到修改稿)

月面任务将面临月球车车轮与月尘摩擦充放电风险, 初步的理论研究表明金属材质的车轮可能会充电至 -5000 V 量级, 放电脉冲电流可达 0.1 A 量级, 严重威胁航天员生命安全和器件电路的正常工作. 本文采用地面实验手段研究了真空、太阳风等离子体环境下月球车车轮摩擦充放电风险. 研究表明, 真空环境下, 直径为 136 mm 的铝合金月球车车轮以 0.003 m/s 在月尘层上行驶时快速充电至几百伏正电位, 车轮行驶距离至约 20 m , 电位为 550 V 时即发生放电击穿, 此时捕捉到的放电电流脉冲幅值可达 1.5 A , 脉冲持续时间约 100 ns ; 增加摩擦频率充电速率明显增加, 放电更频繁地发生; 在模拟的太阳风等离子体环境下, 车轮以 0.003 m/s 行驶时环境和摩擦共同作用使充电电位为负, 平衡后电位约 -830 V , 且放电更加频繁, 行驶至 8.5 m 时即发生放电击穿, 放电电流脉冲幅值可达 0.3 A , 脉冲持续时间 100 ns . 该放电脉冲对线性电路造成了电磁干扰, 导致信号的异常输出. 本研究表明月球车摩擦充放电风险较高, 需在后续工程任务中关注并进一步评估其危害程度.

关键词: 充放电, 摩擦, 月球车, 月面环境

PACS: 94.05.Jq, 94.05.Bf

CSTR: 32037.14.aps.74.20251035

DOI: 10.7498/aps.74.20251035

1 引言

月球充电效应是探月任务中必然面临的安全隐患之一^[1-5]. 月球表面覆盖着一层厚厚的月壤^[6], 无光照、低温时月壤电导率极低 (约 10^{-14} S/m)^[7]. 近年来, 月球南极的科研站建设任务意味着人类将长期面临月球南极的月面环境^[8-11]. 月球南极区域具有温度低、地形地貌复杂 (撞击坑多、坡度较大)、太阳高度角低等特点, 如南极点的太阳高度角

在 $\pm 1.54^\circ$ 之间变化^[12]. 在月表, 光电效应是航天器表面充电电荷泄放的重要途径, 地形起伏对太阳光照和太阳风的遮挡作用将形成大量局部阴影区和等离子体尾流区等环境, 这些区域内电子富集、月表绝缘且电荷难以通过光电效应泄放. 月球南极区域特殊的环境特点使该区域面临比中纬度地区更加恶劣的静电积累, 具有高充放电风险.

除环境带来的充放电效应, 月面任务还将面临严重的摩擦充放电风险. 在月表干燥、真空环境中, 月壤与月球车、航天服表面材料接触和摩擦, 极易

* 国家自然科学基金 (批准号: 42204175, 42441833) 和中国科学院国家空间科学中心攀登计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: caiminghui@nssc.ac.cn

引发表面材料的摩擦充放电现象. 光照下摩擦产生的电荷会通过光电子发射及等离子体环境中作用在很短的时间内中和掉, 而当月球车、航天员位于低温、无光照、月表电导率较低的月球南极区域时, 摩擦产生的电荷无法泄放、会不断累积, 导致月球车充放电风险. 美国 NASA 的 Farrell 团队对月球车、航天员与月壤摩擦充电进行了一系列研究^[13,14], 建立了月球车与月壤及周围等离子体环境之间的摩擦充电理论模型, 估算了 Apollo 任务中两种型号月球车 Modular Equipment Transporter (MET) 和 Lunar Roving Vehicle (LRV) 在不同环境下作业时可能导致的摩擦充电电位 (其中 MET 月球车车轮材质为橡胶, 车轮半径 0.203 m; LRV 月球车车轮材质为铝钛合金, 车轮半径 0.409 m). 结果表明, 在最恶劣的环形山背阳面环境下, 地形遮挡产生的等离子体尾流环境将产生严重的月球车与月尘摩擦充电风险, 两种月球车以 2π rad/s 的速度运行 50 s 后月球车轮胎即可被快速充电至 -3000 和 -5000 V, 存在非常高的静电放电风险. 此外, 根据 Apollo 宇航服研究结果表明, 基于相同的原理, 当宇航服为导体时航天员分别以 10, 2 s/步速度运动 30 s 后摩擦充电电位可达到 -400, -2000 V^[13]. 高电位和较长的电荷耗散时间极易引发静电放电危害. 如一个充电到 5000 V 的月球车金属轮有大约 10^7 C 的电荷. 如果航天服系统上的导电块与轮子接触, 将发生超过 10 mA 的电荷转移 (放电时长为 10 μ s) 或 0.1 A (放电时长为 1 μ s). 如此大的脉冲电流可能会导致电子系统中的 ESD 敏感部件如 FPGA 等故障^[15], 当电流大于 40 mA 甚至会对航天员生命安全造成威胁.

目前描述月表摩擦充电的模型只是简单的理论模型^[13,14]. 该模型中摩擦电流源项是基于地球环境下的材料特性进行假设和估计的, 而月球环境与地球差异极大, 材料在真空、等离子体环境下摩擦特性极有可能发生改变, 因此理论模型中的摩擦电流源项具有很大的不确定性; 另一方面, 该模型未考虑放电的耦合作用. 在实际的场景中, 月球车、航天服的摩擦充电情形还与放电息息相关. 放电的难易程度也决定着充电电位能够达到的最高值, 放电脉冲幅值、持续时间等特性也决定了对仪器设备和航天员生命安全的危害程度. 材料与月壤摩擦的研究应当也包含放电的耦合作用. 综上, 亟待进行地面模拟实验, 验证和补充理论模型.

本文在月面环境地面模拟装置中研究了月球车车轮在模拟月尘上行驶过程中的摩擦充放电现象. 参考月球科研站选址的月球南极区光照微弱、太阳风几乎平行于月面的特征^[16], 研究了真空和太阳风等离子体环境下材料与月壤摩擦导致材料表面充放电效应, 评估了放电对电路的影响. 通过本项目的研究可提升我国月球探测中未知空间环境风险的认识, 为我国后续月球探测任务的实施提供科学认知和技术储备.

2 实验装置

月球作为无全球性磁场无大气天体, 其表面直接暴露在空间环境中, 与太阳风、地球磁尾等离子体、光照和宇宙线等环境要素相互作用. 月球表面为高真空环境, 气压 10^{-14} — 10^{-12} Pa, 电荷无法通过气体介质泄放. 月球的向阳面大部分时间处于光照和太阳风等离子体环境中, 太阳风等离子体为平均速度 430 km/s, 密度 10^7 m⁻³, 温度 10 eV 的各向异性等离子体. 我国未来月球探测任务主要面向月球高纬度的南极区域, 相对中纬度地区光照更弱、太阳风几乎平行于月面、温度更低^[16], 极区地形起伏变化还将在背阳面产生电子富集的等离子体尾流区域^[17,18]. 月球车充放电效应是月面等离子体环境和摩擦共同作用的结果, 摩擦充电实验有必要在月面环境下进行. 根据月面极区环境特点, 本研究中的地面实验模拟了真空、太阳风等离子体和等离子体尾流环境要素^[19,20], 同时设置了月壤和位移平台驱动的月球车车轮.

材料与月尘摩擦充电实验装置如图 1 所示, 其基本参数如表 1 所列. 摩擦充电实验装置的主体是一个模拟的月球车车轮. 参考我国月球车车轮形状 (齿轮状) 和材质 (铝合金), 并综合考虑真空室内部空间和易操作性, 选取了直径为 136 mm, 轮宽 56 mm, 材质为 304 不锈钢, 重量为 0.79 kg 的齿轮作为本实验中的月球车车轮. 采用位移平台驱动的车轮轮轴推动不锈钢车轮, 且轮轴仅对车轮施加水平方向的推力, 车轮整体放置于一层模拟月球土上, 车轮重量使车轮与模拟月球土充分接触. 考虑到材料与尘埃颗粒间的摩擦充电水平也受材料表面摩擦后吸附的带电颗粒物影响, 因此模拟月球土壤选取了粒径较小的中国科学院地球化学研究所研制的 CLDS-1 型模拟月尘. CLDS-1 型模拟

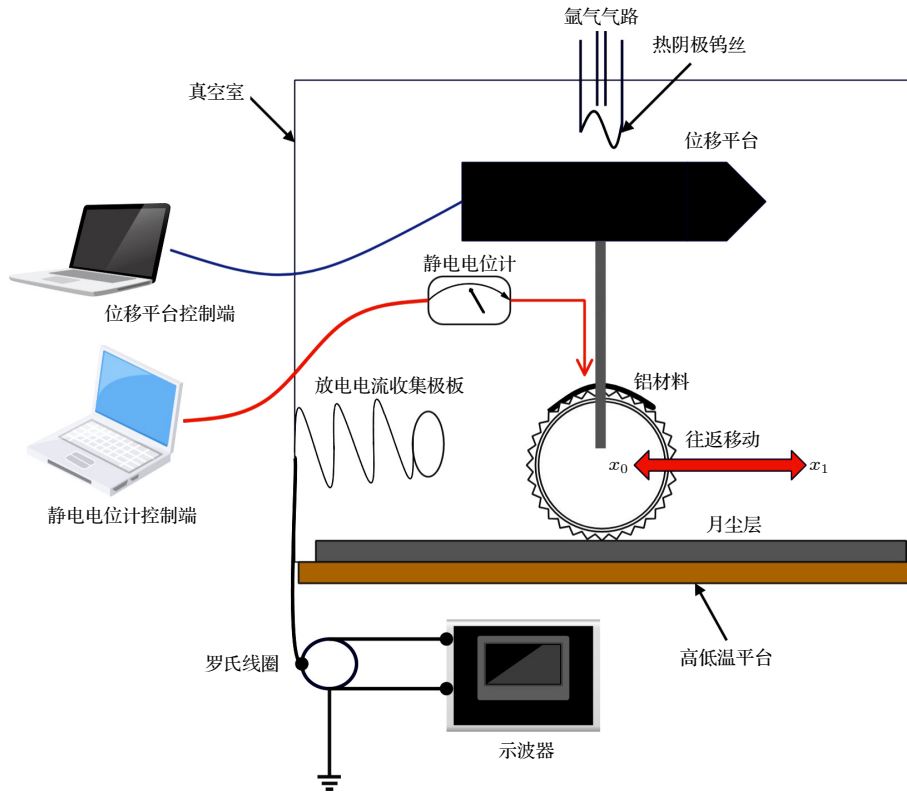


图 1 材料与月尘摩擦充电实验装置图

Fig. 1. Schematic diagram of the triboelectric charging test device for materials and lunar dust.

月尘的颗粒半径范围为 40 nm 至 2 mm, 其化学成分也与真实月尘相似^[21]. 实验过程中, 将待摩擦的铝合金 (2A12 型) 材料样品安置于月球车轮表面, 且布置绝缘夹层使铝合金材料样品与月球车轮保持电隔离.

表 1 月面环境地面模拟参数

Table 1. Ground simulation parameters of lunar surface environment.

环境要素	环境参数	
	真实情况	地面实验
真空度/Pa	10^{-14} — 10^{-10}	10^{-4}
太阳风等离子体	密度: $10^7/\text{m}^3$; 温度: 10 eV	电子密度: 约 $10^8/\text{cm}^3$; 电子温度: 约10 eV; 离子温度: 约2.5 eV ^[22,23]
月尘	月尘	CLDS-1型模拟月尘
月球车轮材质	铝合金	铝合金
月球车运动速率 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.014—0.056	0.003

本实验采用了非接触式静电电位计 (JDC-M03) 模块测量材料摩擦后的表面电位. 该模块测量范围为 ± 20 kV, 分辨力优于 1 V, 响应时间为 50 ms. 每次实验前对探头进行矫正保证测量的准确性; 实验前先采用接地金属材料对待摩擦材料进行消电

处理, 处理后大气环境下可测得待测材料的表面电位在 ± 1 V 之间. 之后的摩擦实验在气压为 10^{-4} Pa 的真空环境下进行. 每次摩擦后对摩擦位置进行电位测量, 观测材料表面电位变化情况. 如图 1 所示, 实验过程中月球车车轮先从 x_0 位置移动到 x_1 , 使待测材料在 x_1 处与模拟月尘接触, 再返回 x_0 处并进行电位测量. 往返移动车轮进行摩擦和电位测量, 直到电位达到相对稳定状态. 参考我国月面移动探测器拟采用的移动速度为 50—200 m/h (0.014—0.056 m/s), 本实验采用位移平台以 0.003 m/s 的最大速度移动车轮. 根据模拟月尘的特性, 实验前将模拟月尘在 125 °C 下烘干 12 h 以上, 以去除水分和其他气体成分.

3 结果与讨论

首先, 基于相同的装置设置在室温 20 °C 条件下对比了大气和真空环境铝合金车轮与月尘摩擦的充电规律, 如图 2 所示. 大气环境下, 静置一段时间后的铝材料初始电位为 -115.2 V, 铝材料与月尘摩擦后失去电子, 随着摩擦铝材料表面电位逐渐升高, 达到 -40 V 后基本稳定不再明显变化, 且摩

擦过程中未观测到放电现象. 真空环境下, 每次摩擦后电位明显升高, 在达到 550 V 左右后不再增加, 基本达到平衡状态. 摩擦过程中对放电信号也进行了监测. 将直径 15 mm 的圆形接地金属片安置于实验台侧面, 通过罗氏线圈捕捉放电脉冲信号. 车轮移动至 x_0 处时金属片与铝合金材料距离最近, 此时金属片距离材料侧边 20 mm. 检测到放电事件的数据用紫色方框标记, 如图 2 所示. 实验中当车轮转动至第 47 圈, 充电电位为 550 V 时接地金属片接收到放电脉冲信号, 表明此次摩擦后发生了放电击穿. 此外, 从图 2 可以看出, 在第 37 圈摩擦后电位多次超过 550 V 但却未探测到放电信号. 可从两个方面分析其原因: 1) 对放电信号的测量依赖对放电路径的提前预设. 而摩擦放电路径具有随机性, 材料周围的导体甚至模拟月壤都可能是放电对象, 因此本实验中测得的放电脉冲信号很可能只是一部分, 较小的放电信号很可能被遗漏; 2) 通常来说, 对于固定的放电结构和环境其击穿阈值也是确定的, 但摩擦放电影响因素较多, 如材料表面吸附的月尘、车轮移动过程发生的位置偏移和震动, 都将导致其放电通路和阈值发生改变.

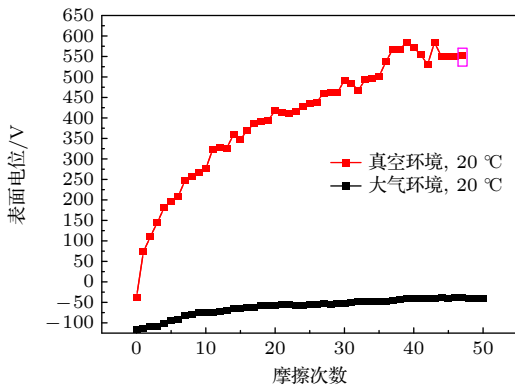


图 2 在 20 °C 条件下, 真空和大气环境中铝材料摩擦充电电位随摩擦次数的变化 (紫色方框代表此次摩擦后探测到放电信号)

Fig. 2. Curve of triboelectric charging potential of aluminum material vs. friction cycles under vacuum and atmospheric environments at 20 °C.

放电脉冲电流波形如图 3 所示, 放电脉冲幅值可达 1.4 A, 持续时间约 100 ns. 值得注意的是, 由于摩擦放电通路无法提前预测, 接地金属片接收到的电荷量很可能只是总放电电荷的一部分; 且放电的铝合金材料面积仅为 47.9 cm², 约占整个车轮的 1/5, 如考虑未被捕捉到的放电电荷及整个车轮摩擦充放电的情况, 放电脉冲幅值更大、持续时间更长.

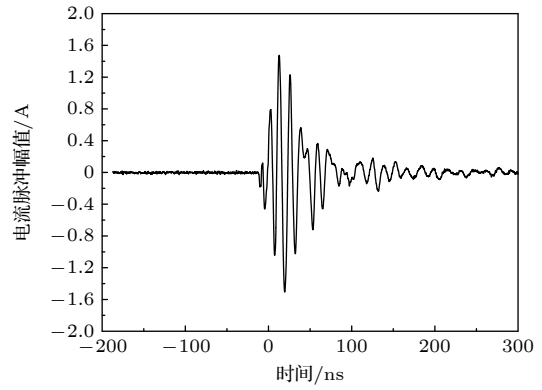


图 3 铝材料摩擦放电脉冲电流波形

Fig. 3. Triboelectric discharge pulse current waveform of aluminum material.

另一方面, 进一步研究了真空环境下车轮材料摩擦充电电位与摩擦周期的关系. 受限于位移平台的运动速率最大值仅为 0.003 m/s, 无法采用运动提高速率的方法提高摩擦频率, 因此采用在 x_1 处摩擦 1 次和略回退后再重复摩擦 2 次、3 次后再测量电位来模拟提高摩擦频率后车轮材料的摩擦充电规律. 如图 4 所示, 每圈摩擦 1 次时, 第 47 次摩擦后充电电位达到了击穿阈值 (约 550 V); 每圈摩擦 2 次时, 第 17 次摩擦后充电电位就达到了 550 V 并发生放电击穿, 击穿后测得材料电位降低至 90 V; 每圈摩擦 3 次时, 第 7 次摩擦后就捕捉到放电脉冲, 此时对应的摩擦充电电位为 361 V, 放电发生后摩擦电位降低至 45 V. 每圈摩擦 3 次时, 由于摩擦电荷积累极快, 极可能在探测范围之外就发生了放电击穿, 导致捕捉到放电信号时已经有部分电荷通过放电形式泄放, 因此对应的 361 V 摩擦电位低于放电阈值 (约 550 V). 每圈摩擦 1, 2, 3 次

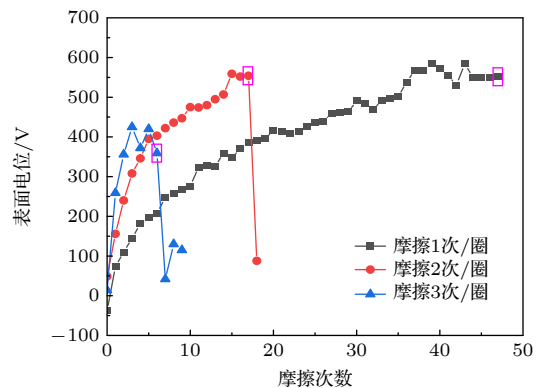


图 4 不同摩擦周期铝材料摩擦充电特性 (真空, 20 °C)

Fig. 4. Triboelectric charging characteristics of aluminum material under different friction cycles (vacuum environment, 20 °C).

捕捉到的 3 次电流脉冲幅值分别为 1.2 V, 2.1 V 和 2.4 V, 放电持续时间均在 100 ns 量级.

考虑到月球环境还包括太阳风、地球磁尾等离子体环境要素, 因此进一步地研究了模拟的太阳风等离子体环境下的材料与月尘摩擦充电规律. 在真空装置内安装电热丝发射电极, 将电热丝采用 6 A 的直流电源点亮, 通过偏压为 -10 V 的加速电源拉出电子使其发射电流为 30 μ A. 同时以 12 sccm (1 sccm = 1 mL/min) 通入 Ar 气, 保持真空罐内气压在 6×10^{-3} Pa. 在该参数下材料附近的电子密度在 10^8 cm^{-3} 量级, 电子能量约为 10 eV, 离子能量约为 2.5 eV^[22,23]. 实验中采用与真空环境相同的摩擦和电位测量方式, 月球车车轮以 0.003 m/s 的速率运动, 每圈摩擦一次, 共进行了 22 圈摩擦运动, 得到了如图 5 所示的摩擦电位随摩擦次数的变化规律. 在模拟的太阳风等离子体环境中的摩擦, 车轮表面材料的充电效应来自环境和摩擦两种源项. 摩擦前材料在环境中充电后的平衡电位为 -694 V, 随着摩擦次数升高, 材料表面电位进一步降低, 平衡后电位约 -830 V, 且放电比真空环境更加频繁, 分别在第 5, 10, 16, 17 和 19 圈探测到了放电脉冲信号; 太阳风等离子体环境下测得的脉冲幅值均在 0.2—0.4 V, 比真空环境下放电脉冲幅值降低约一个数量级, 脉冲持续时间则与真空环境下相同为 100 ns, 其中第 5 圈探测到的放电脉冲波形如图 6 所示. 相比于真空环境, 太阳风等离子体环境下的摩擦充电规律有明显的改变: 一方面, 真空环境中铝材料摩擦充电电位为正, 且随摩擦次数升高, 而太阳风等离子体环境中摩擦充电电位为负, 且随摩擦次数降低; 真空环境中摩擦放电发生后材料表面电位会发生显著降低, 可以明显地测量到放电导致的电荷转移, 而太阳风等离子体环境中未观测到这一现象. 另一方面, 摩擦放电频率显著增加, 同时放电脉冲幅值降低, 相比于图 3 所示真空环境下的放电脉冲释放的电荷量减少.

以上差异源于太阳风等离子体和真空环境中的摩擦充电形式差异. 真空环境下摩擦充电机制较为单纯, 是材料之间接触-分离后的电荷交换, 取决于两种材料电子束缚能力差异; 而太阳风等离子体环境下, 各材料均吸附了大量环境中的电子, 摩擦充电过程中有环境中的电子和电场的参与, 物理机制更复杂. 等离子体环境的存在也会对放电阈值产生影响^[24]. 此外, 还存在一些不确定因素可能干扰

了测量结果, 如等离子体环境导致月尘的静电迁移和月尘吸附污染, 进一步使电场复杂化, 同时可能也对非接触式静电电位计的准确性带来一定影响. 由于月面环境中的摩擦充电效应为新的物理场景和研究领域, 因此存在很多理论盲区, 如太阳风等离子体环境对月尘和铝材料表面摩擦系数的影响、太阳风等离子体环境对放电阈值的影响等, 有待进一步细致的分析和研究.

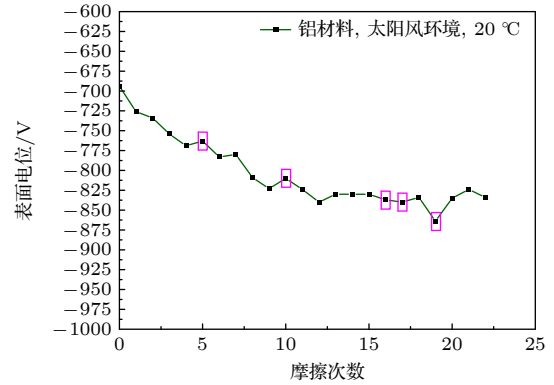


图 5 太阳风环境下铝材料摩擦充电电位随摩擦次数的变化 (真空, 20 °C, 其中紫色方框代表此次摩擦后发生了放电)
Fig. 5. Curve of triboelectric charging potential of aluminum material vs. friction cycles under solar wind environment (Vacuum, 20 °C).

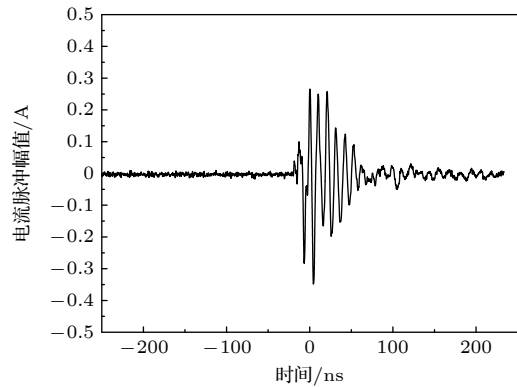


图 6 太阳风环境下铝材料与月尘摩擦放电脉冲电流波形 (6×10^{-3} Pa, 20 °C; 电子密度约 10^8 cm^{-3} 量级, 电子能量约 4 eV, 离子能量约 1 eV)
Fig. 6. Triboelectric discharge pulse current waveform of aluminum material rubbed against lunar dust under solar wind environment (6×10^{-3} Pa, 20 °C; electron density $\sim 10^8$ cm^{-3} , electron energy ~ 4 eV, ion energy ~ 1 eV).

放电产生的电磁场会在 PCB 电路的轨线上引起感应电流, 在输出端引起电压异常^[25-27]. 放电位置、轨线长度、宽度及端接电阻均会影响感应电流的强度^[28]. 因此, 本文进一步研究了摩擦放电对典型电路的影响, 选取了星用线性电路作为研究对

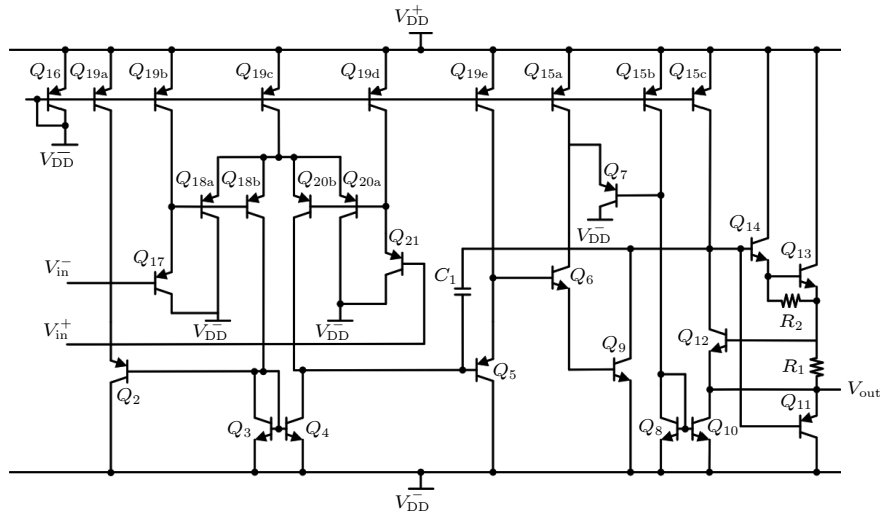


图 7 星用线性电路结构图^[30]

Fig. 7. Schematic diagram of space-used linear circuit^[30].

象. 线性电路作为常见的直流电压转换的功率电路, 常用于存储电路的输入电源信号端及信号放大输出端, 影响着电路对放电脉冲的敏感性及其故障在后端电路传播的范围, 图 7 为其电路结构图^[29]. 实验中, 将星用线性电路置于距离 x_0 处的车轮约 15 cm 处. 将线性电路设置为电压跟随模式, 正常工作情况下输出端电压为 +5 V. 当图 3 的放电脉冲发生时, 检测到了该线性电路输出信号的显著变化, 如图 8 所示. 跟随模式的电压输出产生瞬态异常, 输出端检测到了 5 次的连续振荡, 如图 8 中 1—5, 其幅值分别为 9.4, 9.1, 10, 10.7, 11.7 V, 振荡持续时间分别为 0.86, 1.88, 1.31, 4.90, 3.85 μs , 电路异常输出的总持续时间为 29 μs , 随后恢复至正常工作电压 5 V. 放电异常脉冲为连续、不规则的形态. 我们重复进行了多次实验, 每次放电同时都会捕捉到电路的瞬态异常, 表明月球车轮与月尘摩擦产生的放电脉冲将导致线性电路输出异常, 后续任务中应进一步关注这一潜在风险.

综上, 地面实验结果与 Jackson 等^[13,14] 的理论模型差异较大. 主要体现在以下三方面: 1) 模型中预测 LRV 月球车以 0.03 m/s 速率运行时, 摩擦电荷将快速耗散, 各环境中均无充放电风险, 而本实验中, 即使以 0.003 m/s 的缓慢速度运行, 车轮仍然会积累电荷并发生放电击穿, 放电脉冲幅值可达 1 A 量级, 会对电路造成明显的干扰, 理论模型显然低估了月面环境下的摩擦充放电的风险. 这一差异的原因为, 理论模型中摩擦电流源项是基于地球大气环境测得的摩擦电序列推导得出的理论值^[30],

在月面真空、等离子体等环境要素下的适用性有待进一步确认. 2) 理论模型中考虑每次摩擦后带电月尘将以约 10% 的覆盖率吸附于车轮表面 (即 10 圈后车轮被月尘完全覆盖), 实验中的确观测到月尘的吸附, 但并不会完全覆盖车轮表面. 每次接触-分离后车轮表面吸附的带电月尘将在力的作用下重新排布, 但覆盖率并无明显增加; 3) 理论模型中未考虑瞬时放电对电荷的泄放, 而地面实验中月球车轮以 0.003 m/s 的较慢速率 (月球车实际移动速率为 0.014—0.056 m/s) 行驶 47 圈 (真空环境) 和 20 圈 (太阳风等离子体环境) 即发生放电击穿, 放电对电荷的泄放意味着可能不存在理论模型中预测的 -5000 V 量级的高电位. 当然, 放电击穿是部件材料间的差异充电导致的, 因此月球车的充放电风险应结合车轮及周围其他结构和材料参数, 进一步的细化和明确.

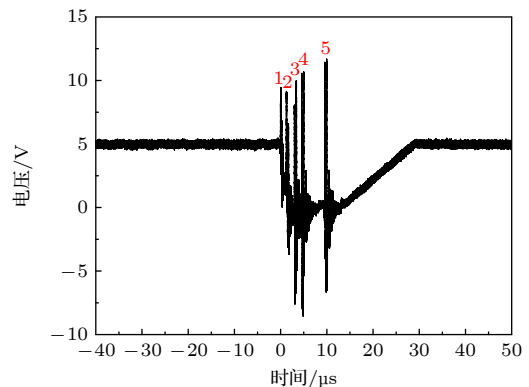


图 8 线性电路输出信号

Fig. 8. Output signal of linear circuits.

4 结 论

研究表明,月面环境下月球车与月尘摩擦将导致车轮表面材料的充放电效应,放电脉冲幅值较高,可达 A 量级,将干扰电路正常运行.此外,月球车行驶速率和背景等离子体环境也将影响车轮的充放电规律,具体包括:1)真空环境下,直径为 136 mm 的铝合金月球车车轮以 0.003 m/s 在月尘层上行驶时快速充电至几百伏正电位,车轮行驶距离至约 20 m 时发生放电击穿,此时电位为 550 V,捕捉到的放电电流脉冲可达 1.5 A,脉冲持续时间约为 100 ns;2)摩擦 Output 放电产生的电磁脉冲对线性电路造成了显著的干扰,严重影响了信号的正常输出;3)增加摩擦频率充电速率明显增加,放电更易发生;4)在太阳风等离子体环境下,环境和摩擦运动共同作用使铝材料充电电位为负,车轮行驶距离至约 8.5 m 时即发生放电击穿,此时充电电位为-694 V,放电电流脉冲幅值可达 0.3 A,脉冲持续时间约为 100 ns.

当然,现有的地面实验还有很多待补充和改进之处.如月尘颗粒的电导率等电学属性对温度非常敏感,而未来月球车工作的区域在低温的月球南极,因此地面实验应进一步耦合低温环境要素,才能更真实地模拟未来任务即将面临的真实情况;另一方面,目前实验中采用的太阳风等离子体环境密度较真实情况高,应进一步优化实验参数,在更接近真实情况的等离子体环境中进行风险评估.

总之,本文基于月球车月面行驶过程中可能面临的与月尘摩擦导致的充放电效应进行了初步的研究和风险评估,结果表明,月球车车轮具有摩擦充放电高风险,放电电流幅值较高,具有较高安全隐患,应在后续工程任务中重视和关注.

参考文献

- [1] Freeman J W, Ibrahim M 1975 *Moon* **14** 103
- [2] Halekas J S, Mitchell D L, Lin R P, Hood L L, Acuna M H, Binder A B 2002 *Geophys. Res. Lett.* **29** 1435
- [3] Farrell W M, Stubbs T J, Halekas J S, Delory G T, Collier M R, Vondrak R R, Lin R P 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L05105
- [4] Halekas J S, Delory G T, Brain D A, Lin R P, Fillingim M O, Lee C O, Mewaldt R A, Stubbs T J, Farrell W M, Hudson M K 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** L02111
- [5] Halekas J S, Delory G T, Lin R P, Stubbs T J, Farrell W M 2009 *J. Geophys. Res.: Space Phys.* **114** A05110
- [6] Liu Y, Par J, Hill E, Kihm K D, Taylor L A 2006 *Proceedings of the 10th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments and Second NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration* Houston, TX, USA, March 5–8, 2006 p1
- [7] Alvarez R 1975 *Proceedings of the 6th Lunar Science Conference* Houston, USA, March 17–21, 1975 p3187
- [8] Wang C, Fan Q L 2025 *Sci. Technol. Rev.* **43** 32 (in Chinese) [王赤, 范全林 2025 科技导报 **43** 32]
- [9] Wang C, Lin Y T, Pei Z Y, Zou Y L, Xu L, Cheng H H, Ren J, Yu S 2022 *Chin. Sci. Fund.* **36** 830 (in Chinese) [王赤, 林杨挺, 裴照宇, 邹永廖, 徐琳, 程惠红, 任杰, 于晟 2022 中国科学基金 **36** 830]
- [10] Farrell W M, Halekas J S, Horányi M, et al. 2023 *Rev. Mineral. Geochem.* **89** 563
- [11] Horányi M, Szalay J R, Wang X 2024 *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A* **382** 20230075
- [12] Sathyan S, Bhatt M, Chowdhury M, Gläser P, Misra D, Srivastava N, Narendranath S, Sajinkumar K S, Bhardwaj A 2024 *Icarus* **412** 115988
- [13] Jackson T L, Farrell W M, Killen R M, Delort G T 2011 *J. Spacecraft Rockets* **48** 700
- [14] Jackson T L, Farrell W M, Zimmerman M I 2015 *Adv. Space Res.* **55** 1710
- [15] Narendra R, Sudheer M L, Pande D C 2013 *IEEE Electromagn. Compat. Mag.* **2** 47
- [16] Zhang W G, Jiang J S, Liu H G, Zhang X H, Zhang D H, Li D H, Xu C D 2009 *Sci. China Ser. D-Earth Sci.* **39** 1059 (in Chinese) [张卫国, 姜景山, 刘和光, 张晓辉, 张德海, 李涤徽, 胥传东 2009 中国科学 (D 辑: 地球科学) **39** 1059]
- [17] Farrell W M, Stubbs T J, Halekas J S, Killen R M, Delory G T, Collier M R, Vondrak R R 2010 *J. Geophys. Res.* **115** E03004
- [18] Xie L, Zhang X, Li L, Zhou B, Zhang Y, Yan Q, Feng Y Y, Guo D W, Yu S R 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** e2020GL089593
- [19] Pagan M J H, Xu W, Horányi M, et al. 2024 *Phys. Rev. Lett.* **133** 115301
- [20] Elena O, Hsiang-Wen H, Xu W, Drobnos J, Horányi M 2024 *Icarus* **421** 116213
- [21] Zhang S S, Wang S J, Li X Y, Li S J, Tang H, Li Y, Yu W 2009 *Earth Science* **38** 339 (in Chinese) [张森森, 王世杰, 李雄耀, 李世杰, 唐红, 李阳, 于雯 2009 地球科学 **38** 339]
- [22] Horányi M, Walch B, Robertson S, et al. 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 8575
- [23] Horányi M, Walch B, Robertson S 1995 *Geophys. Res. Lett.* **22** 2079
- [24] Raizer Y P 1991 *Gas Discharge Physics* (Berlin: Springer-Verlag) p13
- [25] Chen R, Chen L, Li S, Zhu X, Han J W 2019 *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* **19** 733
- [26] Chen R, Chen L, Han J W, Wang X, Liang Y N, Ma Y Q, Shangguan S P 2021 *Electronics* **10** 802
- [27] Chen R, Han J W, Zheng H S, Yu Y T, Shangguan S P, Feng G Q, Ma Y Q 2015 *Chin. Phys. B* **24** 046103
- [28] Zhang C M, Xu X Y, Shu X R, Zhou Y X 2020 *J. Electron. Meas. Instrum.* **34** 103 (in Chinese) [张成铭, 徐晓英, 舒晓榕, 周钰雄 2020 电子测量与仪器学报 **34** 103]
- [29] Yuan R J, Chen R, Han J W, Xia Q, Wang X, Chen Q, Liang Y N 2024 *J. Beijing Univ. Aeronaut. Astronaut.* **60** 1 (in Chinese) [袁润杰, 陈睿, 韩建伟, 夏清, 王璇, 陈钱, 梁亚楠 2024 北京航空航天大学学报 **60** 1]
- [30] Desch S J, Cuzzi J N 2000 *Icarus* **143** 87

Study on risk of triboelectric charging and discharging of lunar rovers in lunar surface environment*

XIA Qing¹⁾ LI Mengyao¹⁾²⁾ CAI Minghui^{1)3)†} TANG Chengxiong⁴⁾
ZHANG Zun⁵⁾ YANG Tao¹⁾ XU Liangliang¹⁾ JIA Xinyu¹⁾

1) (*National Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*School of Astronomy and Space Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China*)

5) (*School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China*)

(Received 2 August 2025; revised manuscript received 29 August 2025)

Abstract

With China's lunar exploration program steadily advancing from the landmark orbiting missions of Chang'e-1 to the historic sample-return feats of Chang'e-5 and the groundbreaking far-side landing of Chang'e-4, China has entered a critical phase of deepening lunar exploration, including preparations for crewed lunar missions. Among these ambitious endeavors, identifying and mitigating potential operational risks is crucial to ensuring the success of these ambitious efforts. This work focuses on a critical hazard unique to China's lunar surface exploration efforts: the triboelectric charging and discharging phenomenon between lunar rover wheels and lunar dust, which has a significant impact on astronaut safety and the reliability of onboard electronic systems.

Lunar surface missions will face the risk of triboelectric charging and discharging resulting from friction between lunar rover wheels and lunar dust. Preliminary theoretical studies indicate that metal wheels may become charged to a level of approximately -5000 V, with discharge pulse currents reaching an order of magnitude of 0.1 A, posing a severe threat to astronaut safety and the normal operation of device circuits.

This paper employs ground-based experimental methods to investigate the triboelectric charging and discharging risks of lunar rover wheels in vacuum and simulated solar wind plasma environments. The research findings are given below.

In a vacuum environment, when an aluminum alloy lunar rover wheel (136 mm in diameter) travels on a lunar dust layer at a speed of 0.003 m/s, it rapidly charges to a positive potential of several hundred volts. Discharge breakdown occurs when the wheel travels approximately 20 m and reaches a potential of 550 V. At this point, the captured discharge current pulse amplitude can reach 1.5 A, with a pulse duration of about 100 ns. Increasing the friction frequency significantly accelerates the charging rate and leads to more frequent discharges.

In a simulated solar wind plasma environment, when the wheel travels at 0.003 m/s, the combined effect of the environment and friction results in a negative charging potential. After reaching equilibrium, the potential stabilizes at approximately -830 V, and discharges occur more frequently than in a vacuum environment.

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42204175, 42441833) and the Pandeng Program of National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: caiminghui@nssc.ac.cn

Discharge breakdown takes place when the wheel travels just 8.5 m, with the discharge current pulse amplitude reaching up to 0.3 A and a pulse duration of 100 ns.

These discharge pulses cause electromagnetic interference to linear circuits, leading to abnormal output of voltage signals in subsequent modes. The abnormal signals have an amplitude on the order of 10 V and a duration of 29 ms.

This study confirms that the risk of triboelectric charging and discharging in lunar rovers is relatively high. Although theoretical models predict that the lunar roving vehicle (LRV) would experience rapid dissipation of triboelectric charges (with no charging/discharging risk) when operating at 0.03 m/s, the experiments show that even at a slow speed of 0.003 m/s, the wheels still accumulate charges and experience frequent discharge breakdowns. The amplitude of discharge pulse can reach the level of 1 ampere, causing significant electromagnetic interference to nearby circuits. Clearly, theoretical models underestimate the risk of triboelectric charging and discharging in lunar surface environments. It is recommended that future engineering tasks pay close attention to this issue and further evaluate the extent of its hazards.

Keywords: charging and discharging, friction, lunar rover, lunar environment

PACS: 94.05.Jq, 94.05.Bf

DOI: [10.7498/aps.74.20251035](https://doi.org/10.7498/aps.74.20251035)

CSTR: [32037.14.aps.74.20251035](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20251035)

月面环境月球车摩擦充放电风险研究

夏清 李梦瑶 蔡明辉 唐程雄 张尊 杨涛 许亮亮 贾鑫禹

Study on risk of triboelectric charging and discharging of lunar rovers in lunar surface environment

XIA Qing LI Mengyao CAI Minghui TANG Chengxiong ZHANG Zun YANG Tao XU Liangliang
JIA Xinyu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 219401 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251035

CSTR: 32037.14.aps.74.20251035

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251035>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

月球南极尘埃等离子体环境特性

Characteristics of dust plasma environment at lunar south pole

物理学报. 2024, 73(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240599>

月球玻璃

Lunar glass

物理学报. 2023, 72(23): 236101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231238>

功函数对月球表面附近尘埃充电和动力学的影响

Effect of work function on dust charging and dynamics near lunar surface

物理学报. 2024, 73(23): 239501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241281>

TiO₂纳米粉在水中通过摩擦还原CO₂

Reduction of CO₂ by TiO₂ nanoparticles through friction in water

物理学报. 2021, 70(21): 214601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210210>

不同力程排斥相互作用胶体粒子系统的摩擦特性

Friction characteristics of colloidal particle systems with repulsive interactions of different force ranges

物理学报. 2024, 73(15): 156201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231701>

软体机器人用多孔聚合物水凝胶的摩擦接触非线性行为

Nonlinear frictional contact behavior of porous polymer hydrogels for soft robot

物理学报. 2021, 70(12): 120201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202134>