

面向空间引力波探测的电荷管理系统研究

贾远东^{1#}, 张尹博文^{1#}, 邓霖¹, 刁瑗⁴, 张泽民¹, 张毅³, 柴国志¹, 李红信⁴,
霍红庆^{1*}, 李宗峰^{2*}, 刘润球⁵

¹ 兰州大学物理科学与技术学院 甘肃兰州

² 中国科学院空间应用工程与技术中心太空应用重点实验室 北京

³ 兰州大学核科学与技术学院 甘肃兰州

⁴ 兰州大学信息科学与工程学院 甘肃兰州

⁵ 中国科学院数学与系统科学研究院 北京

【摘要】空间引力波探测任务需要保持检验质量处于自由落体状态。而在空间环境中, 检验质量积累电荷后会产生额外的电磁噪声, 因此需要对检验质量进行有效的电荷管理。本文对电荷来源及噪声进行分析, 并总结了电荷管理系统的原理。对电荷管理系统的相关仿真和实验发展进行介绍, 并分析了基于 UV-LED 的电荷管理系统研究现状。在此基础上设计了基于 UV-LED 实现对惯性传感器检验质量进行电荷管理的系统, 并在实验室中进行了电荷管理平行板实验和电荷管理系统样机实验, 为后续的电荷管理系统空间实验打下基础。

【关键词】空间引力波探测; 惯性传感器; 电荷管理系统; UV-LED

【基金项目】国家重点研发计划检验质量电荷管理方法和技术研究 (2021YFC2202501)

【收稿日期】2026 年 5 月 3 日

【出刊日期】2026 年 6 月 3 日

【DOI】10.12208/j.ae.20260001

Research on charge management system for space gravitational wave detection

Yuandong Jia^{1#}, Yinbowen Zhang^{1#}, Lin Deng¹, Yuan Diao⁴, Zemin Zhang¹, Yi Zhang³, Guozhi Chai¹,
Hongxin Li⁴, Hongqing Huo^{1*}, Zongfeng Li^{2*}, Runqiu Liu⁵

¹School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu

²Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering Center of Space Utilization,
Chinese Academy of Sciences, Beijing

³School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu

⁴School of Information Science & Engineering, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu

⁵Academy of Mathematics and System Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing

【Abstract】In the space gravitational wave detection, it is necessary to keep the test mass free falling. However, accumulated charges on the test mass in the space environment can produce additional electromagnetic noise, requiring effective charge management of the test mass. This article analyzes the sources of charge and noise, and summarizes the principles of the charge management system. Then introducing the development of relevant simulations and experiments of the charge management system, and the research status based on UV-LED is analyzed. On this basis, a charge management system for test mass of inertial sensor based on UV-LED is designed, and the parallel plate experiment of charge management and the prototype experiment of charge management system are conducted in the laboratory, laying the foundation for the subsequent space experiment of the charge management system.

【Keywords】Space gravitational wave detection; Inertial sensor; Charge management system; UV-LED

#共同第一作者: 贾远东, 张尹博文

*通讯作者: 霍红庆, 李宗峰

1 引言

引力波是广义相对论的重要预言之一, 对引力波的探测不仅仅是对广义相对论正确性的检验, 同时也能直接检验广义相对论的基本物理思想“动力学时空”。从 2016 年 LIGO 首次直接探测到引力波后, 引力波探测的科学内容已从对广义相对论验证变成通过引力波探测来认识天体物理现象^[1,2]。引力波探测为人类认识宇宙结构、研究黑洞和其他致密天体提供一条不可取代的途径。地面引力波探测由于受到地表振动、重力梯度等噪声的限制, 探测频段被限制在 10 Hz 以上, 其对应的引力波源主要包括几十到几百太阳质量的黑洞并合系统、双中子星并合系统等。而对质量在百万太阳质量的超大黑洞波源而言, 探测频段应当在 0.01 mHz 到 1 Hz 左右, 这时需要在空间实现精密激光干涉测量^[3,4]。通过地面引力波探测与空间引力波探测两者互补能够实现更宽波段的引力波探测与引力波天文学。

在空间引力波探测中, 卫星的主载荷为一到两个惯性参考金属物体(检验质量)。作为惯性参考基准, 检验质量受到的非保守力必须尽可能小, 其轨迹尽可能沿着测地线运动。在轨运行过程中, 深空中星际宇宙射线和高能太阳粒子所引起的电离辐射会导致检验质量表面累积电荷^[5]。检验质量带电后会与外壳之间产生库仑力, 同时也会由于空间磁场而引入洛伦兹力, 从而给引力波测量引入噪声。为了减少这些噪声, 需要对检验质量所带电荷量进行控制^[6-10]。对于引力波探测任务来说, 检测质量块带电荷的上限为 10^{-12}C (10^7e)。当前的空间惯性传感器通常采用接触式的电荷管理方法, 如金丝放电。而金丝不可避免的会引入热噪声, 进而限制惯性传感器的性能。因此在空间引力波探测中, 需要使用非接触式的电荷管理方法。利用光电效应可以通过非接触的方式进行电荷管理。从 GP-B 到后来的 LISA Pathfinder (LPF) 均利用光电效应实现非接触式的电荷管理, 使用汞灯产生紫外光并引入传感器内部, 在镀金表面产生光电子, 并通过施加外部电场控制光电子的流向, 进而实现电荷管理^[6,7]。随着 UV-LED 的技术发展, 使得其有望代替汞灯作为电荷管理系统的光源。UVLED 具有体积小、重量轻、动态范围大、可以在科学带宽外运行等优点^[11]。

本文介绍了空间引力波探测中惯性传感器的电荷来源及电荷相关的噪声, 并总结了相关的电荷管

理方法。分析了电荷管理系统的原理, 并对相关的电荷管理实验展开介绍。最后, 本研究采用非接触式的 UV-LED 电荷管理系统, 设计了电荷管理平行板实验和电荷管理系统样机实验, 为电荷管理提供了新的技术路线。

2 电荷来源

检验质量的电荷来源因任务环境和轨道的不同而存在差异, 主要来源包括: 检验质量释放过程中产生的残余电荷、南大西洋异常区、宇宙射线和太阳高能粒子。

2.1 检验质量释放时产生的电荷

检验质量在载荷进入轨道与外壳分离时, 电荷会在相接触的表面之间发生转移使得检验质量带电, 又称“接触起电”^[13]。GP-B 的陀螺转子释放后, 产生的接触起电约 0.4 V^[14]。LPF 的检验质量释放后, 产生了 10^8e 量级的电荷^[7]。

2.2 南大西洋异常区

对于低轨卫星, 航天器通常通过南大西洋异常区(SAA), 在这个区域, 捕获质子的强度升高。对 STEP 的模拟表明, 每个轨道周期都会在检验质量上积累 $\sim 10^{-14}\text{C}$ 的电荷。将 STEP 的结果可以外推可以得到, GP-B 每通过 SAA (太阳最大值) 的估计电荷率为 $+8 \times 10^{-14}\text{C}$ 。考虑到每天 8 次 SAA 通过, 这相当于 $\sim 1.5 \times 10^9$ 质子/年^[5]。

2.3 星际宇宙射线 (GCR)

星际宇宙射线可以穿透航天器的屏蔽, 直接沉积或者通过二次电子发射使得检验质量带电。星际宇宙射线自身的通量和成分可以认为是保持稳定的。长期来看, 星际宇宙射线受太阳活跃程度的影响, 与太阳活跃度负相关。在太阳平静期, 星际宇宙射线对测试质量充电效应的影响成为主要因素。

GCR 模型可对地磁场外的近地轨道质子和 $Z=2\sim 92$ 的核子通量进行预测, 主要模型包括 ISO-15390 模型^[15]、CREME86 模型^[16]、CREME96 模型^[17]和 Badhwar-O'Neill 模型^[18]等, 各个模型对能量大于 30 MeV 的高能粒子计算结果趋于一致。GCR 是来自太阳系外的宇宙射线, 可以看做是宇宙背景射线, 其自身是稳定的, 但是在太阳系受到太阳磁场等太阳活动的影响较大, 因此, GCR 受到太阳活跃周期性变化的调制作用 (11 年周期)。

Ara'ujo 等人的模拟预测了对 LISA 的测试质量在太阳小年时约 $+50\text{ es}^{-1}$ 和太阳大年时约 $+20\text{ es}^{-1}$ 的

充电速率^[19]。Wass 等人对 LPF 进行的模拟得到了类似的充电速率^[20]。

2.4 太阳高能粒子 (SEP)

来自太阳高能粒子又称为太阳宇宙线, 在平静时期也是较为稳定的, 其变化幅度与自身的 11 年活跃周期相关。伴随太阳耀斑的暴发, 太阳宇宙线通

量会出现急剧增长, 瞬时增幅可达几个数量级, 太阳宇宙线的成分主要是质子, 如表 1 所示^[21]。太阳宇宙射线的发生是随机的, 并有几天的持续时间, 在太阳活动峰年期间出现得更频繁。

将 SEP 按通量进行分级, 并给出每级事件的平均质子通量强度, 如表 2 所示。

表 1 太阳高能质子年积分通量表

能量 E/MeV	E>30		E>100	
太阳活动状况	接近高年	接近低年	接近高年	接近低年
年积分通量/cm-2	8×10^9	5×10^5	6×10^8	5×10^4

表 2 太阳质子事件分级

等级	等级阈值 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$)	平均质子通量>10MeV ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	平均质子通量>30MeV ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)
1 级	>10	5.56E7	1.16E7
2 级	>100	2.61E8	3.65E7
3 级	>1000	1.66E9	2.64E8
4 级	>10000	1.60E10	4.90E9

1975 年至 2008 年 3 个太阳活动周中, 1-4 级事件分别为 120、62、27、9 次, 共计 218 次。平均到一个太阳周内 (1-132 月), 总事件数约为 73 次, 1-4 级事件分别为 40、21、9、3 次。

能够显著提高检验质量充电速率的事件预计在太阳活动大年时每年只发生几次, 在太阳活动小年时每年发生不到一次。研究表明, 在一个太阳周期中可能只发生一次的大型 SEP 事件, 可以产生约 $+70000 \text{ es}^{-1}$ 的充电速率。较小的 SEP 事件会产生约 $+100 \text{ es}^{-1}$ 的充电速率, 并且在太阳活动小年时每年可能发生几次^[19]。

3 电荷相关噪声

Timothy J Sumner 研究了 LPF 的惯性传感器中与电荷有关的噪声项^[12]。

3.1 静电加速度噪声

依照惯性传感器参数及上述的影响因素的大小, 可以得到检验质量带电后惯性传感器受到的静电力噪声和洛伦兹力噪声, 如图 1 中, 检验质量所带自由电荷为 $5\text{e}6$ 个基本电荷, 这是惯性传感器工作在科学模式下, 采用连续放电策略时检验质量所带的

由宇宙射线沉积产生的随机自由电荷 Q 会产生电荷噪声 $S_Q^{1/2}$, 从而产生加速度噪声。单独考虑 x 方向时, 检验质量相对于电极笼运动时, 产生位移噪声 $S_x^{1/2}$ 。位移噪声可以通过直接影响 x_0 产生加速度噪声, 还可以通过单个电容 C_x 和总电容 C_T 产生加速度噪声。对于电极上的电压, 由于传感器的对称性, 可以将电压分为共模电压 V_c 和差模电压 V_d 两部分。这时, 共模电压噪声 $S_{V_c}^{1/2}$ 和差模电压噪声 $S_{V_d}^{1/2}$ 也会产生加速度噪声。

3.2 洛伦兹加速度噪声

除了电荷噪声, 航天器的速度噪声, 检验质量的速度噪声, 星际磁场噪声和飞船内部磁场噪声都会产生加速度噪声。

3.3 加速度噪声评估

LISA 惯传的加速度噪声性能需求为:

$$S_a^{1/2} \leq 3 \times 10^{-15} \sqrt{1 + \left(\frac{0.4}{f}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{8}\right)^4} \text{ ms}^{-2} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (1)$$

电荷水平。

S_{a_1} 是最主要的贡献项, 在图中基本与总的静电加速度噪声重合。它来自于自由电荷 Q 与差分电压噪声谱的相互作用。 S_{a_8} 和 S_{a_4} 也贡献了较大的噪

声。其中, S_{a_8} 来自于差分电压和电荷噪声谱, S_{a_4} 来自于共模电压和电荷噪声谱。

图 2 展示了单独的洛伦兹力噪声分量, 并假定

自由电荷 Q 处在相对高的量级, 即 $5e8$ 个基本电荷。其中, 主导项为 $S_{a_{14}}$, 来自电荷与外部磁场波动的相互作用 (假定霍尔效应屏蔽了 99%)。

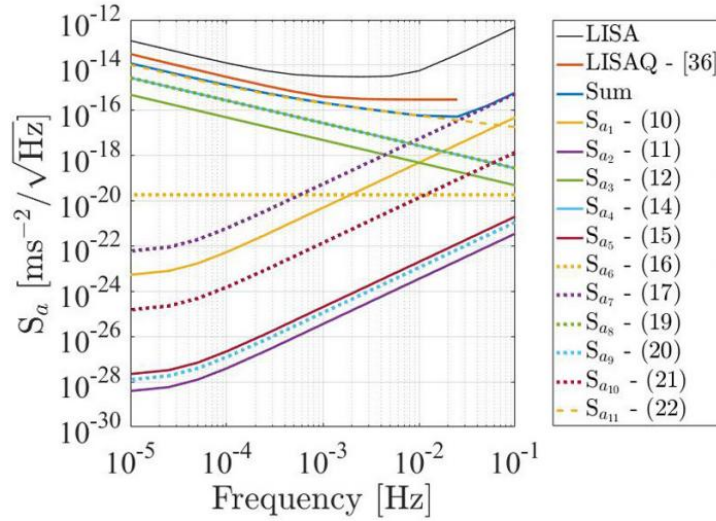


图 1 电磁噪声功率谱^[12]

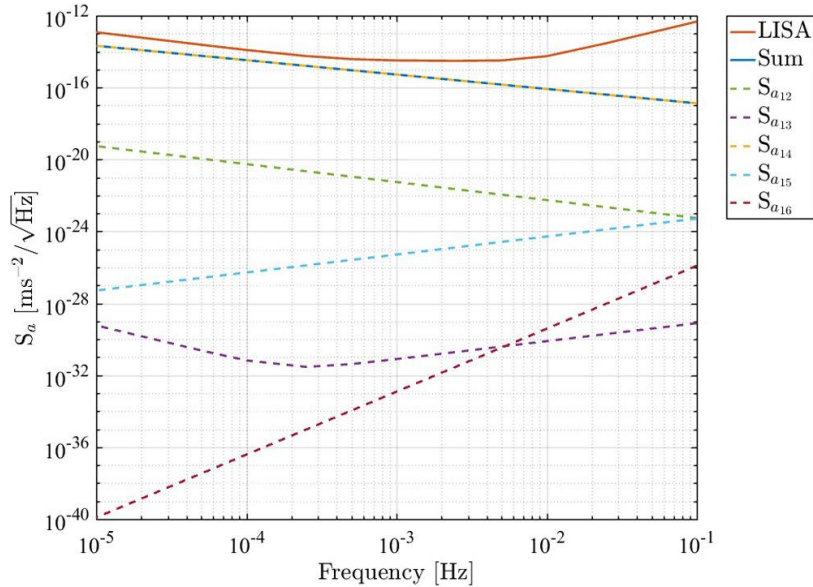


图 2 洛伦兹力噪声功率谱^[12]

为了达到科学任务的目的, 减少因检验质量充电而引入的加速度噪声, 对检验质量进行电荷管理与控制是空间惯性传感器工作的关键。一般来说, 检验质量带电荷的上限为 $0.1 \text{ pC} - 10 \text{ pC}$ ($10^{-13} \text{ C} - 10^{-12} \text{ C}$), 需要电荷管理系统连续或周期性的运行。

4 电荷管理系统方法

CHAMP, GRACE, GOCE 和 MICROSCOPE 采用接触式电荷管理方法, 利用一根金丝实现检验质

量与电极笼的电连接^[22-25]。但金丝的热噪声限制了传感器的性能, L Liu 利用扭摆得到金丝的热噪声水平为 $2 \times 10^{-13} \text{ ms}^{-2} / \sqrt{\text{Hz}}$ ^[26]。

为了提高传感器性能, 需要进行非接触式电荷管理方法。S Buchman 针对 LIGO 提出采用电离气体对悬挂的镜子进行电荷管理, 通过交替将正电荷和负电荷束射向镜面, 确保了电荷中和^[27]。GP-B 和 LPF 采用汞灯产生 254 nm 的紫外光, 利用光电效应

实现电荷管理,同时采用力调制法测量检验质量所带电荷。在 GP-B 中,紫外光直接照射陀螺转子,经过反射后照射外壳内表面,在两个表面分别产生光电子,通过在照明点施加外部直流电场实现双向电荷控制^[6]。在 LPF 中,每个传感器内部引入 3 束紫外光,一束直接照射检验质量,两束直接照射电极笼。为了允许在放电过程中继续进行全精度的加速度测量,LPF 被设计为通过测试质量和周围外壳的差分照明来实现电荷控制,避免了大的直流静电场^[7]。

表 3 典型的电荷管理方法对比

任务	电荷检测方式	电荷释放方式	放电模式
GOCE 等	力调制法	金丝放电	接触放电
LIGO	Kelvin 探针	电离气体中和	直流放电
GP-B	力调制法	光电效应(汞灯)	直流放电
LISA Pathfinder	力调制法	光电效应(汞灯)	差分放电
UV LED mission	高阻抗放大电路	光电效应(UV LED)	交流放电

5 电荷管理系统原理

电荷管理系统的性能取决于许多相互关联的因素。包括入射紫外光的分布、惯性传感器几何构型和内部的电场分布等。为了更好地理解电荷管理过程,设计相应的电荷管理系统,需要对电荷管理系统进行仿真。仿真过程需要对紫外光进行光线追踪,计算光电效应产生的光电流的大小,最后根据惯性传感器内部的电场分布确定光电子的迁移方向得到检验质量电势变化情况。

5.1 光线追踪

LPF 团队利用 Geant4 中编写的射线轨迹模拟了紫外光在惯性传感器内的传播。Geant4 使用蒙特卡罗技术来准确描述物理过程^[28]。光线追踪需要设置:

由于 UV-LED 体积小,重量轻,功耗低,具有高的调制频率和高动态范围,因此 LISA, Taiji 和 Tianqin 计划采用 UV-LED 代替汞灯作为紫外光源。斯坦福大学的 UV LED mission 项目针对 UV LED 实现电荷管理的可行性于 2014 年做了飞行验证,采用 UV-LED 产生 255nm 紫外光,通过对 UV-LED 和电极进行高频调制,验证了交流(AC)电荷管理,避免了在科学频带内引入噪声。其电荷测量采用接触式测量方法,使用一个高阻抗放大电路测量检验质量电势^[11]。

对应的惯性传感器几何模型(如,检验质量、电极笼和电极),建立光源模型,UV 以点光源发射,每个光子的方向由适当的权重随机决定,以及对应的入射面的表面参数^[29]。

5.2 光电流计算

光电效应为光束照射物体时会使其发射出电子的物理效应,发射出来的电子称为“光电子”。要发射光电子,光必须提供足够的能量来克服材料中束缚电子的力(金属的功函数/逸出功)。紫外光照射到物体表面后发生光电效应产生光电流。光电流的计算包括光子激发电子、电子迁移和电子出射,该过程被称为三步模型^[51]。

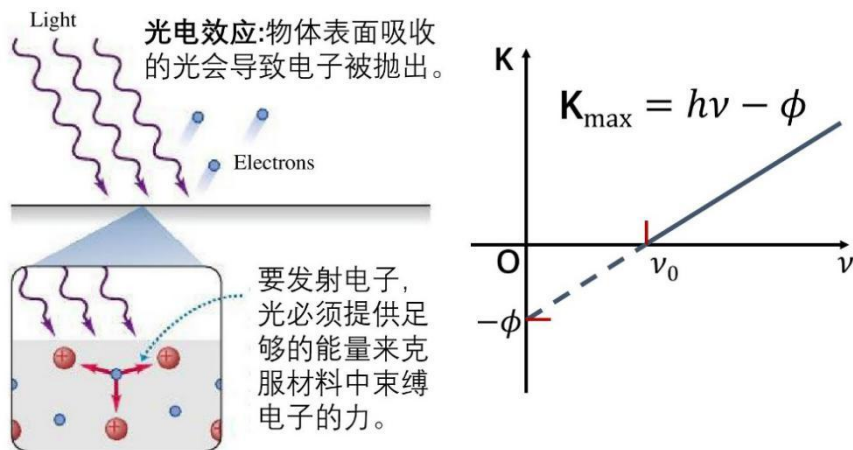


图 3 光电效应工作原理

5.2.1 光子激发可逸出电子的比例

由于光不是正入射, 所以光的平均穿透深度也会发生改变。光在穿越金属时垂直方向上的衰减系数为:

$$\lambda'_{opt} = \lambda_{opt}(\theta) \quad (2)$$

电子作为费米子遵守费米狄拉克分布, 可以根据费米狄拉克分布求得电子沿着垂直于表面方向的速率分布律为^[30]:

$$n(u)du = \frac{4\pi kT}{m} \left(\frac{m}{h}\right)^3 \ln \left(1 + \exp \left(\left(\varepsilon_F - \frac{1}{2} mu^2 \right) / kT \right) \right) du \quad (3)$$

考虑边界条件 $E_{\perp} \geq \chi_0 - h\nu$ 其中 χ_0 是总的能垒。可以得到, 在考虑光子的能量非常接近逸出功时, 电子发射是几乎垂直的, 因此计算平均自由程时可以不考虑角度因素。

由于激发电子的过程是随机的, 所以能够逃逸出金属的电子数与激发总数的比例为吸收光子后垂直方向能量大于能垒的电子数与总电子数的比例 k 为^[30]:

$$k = \frac{\int_{E_F + \phi_{eff} - h\omega}^{E_F} dE \int_{\sqrt{\frac{E_F + \phi_{eff}}{E_F + h\omega}}}^1 d(\cos \theta) \int_0^{2\pi} d\Phi}{\int_{E_F - h\omega}^{E_F} dE \int_{-1}^1 d(\cos \theta) \int_0^{2\pi} d\Phi} = \frac{(E_F + h\omega)}{2h\omega} \left[1 + \frac{E_F + \phi_{eff}}{E_F + h\omega} 2 \sqrt{\frac{E_F + \phi_{eff}}{E_F + h\omega}} \right] \quad (4)$$

5.2.2 电子迁移

在电子迁移中, 电子将会与靶材中的价电子发生非弹性散射。由于激发电子的能量不高, 考虑激发电子与价电子发生一次非弹性散射便失去能量以至于不能逃逸出金属。因此电子由于迁移所导致的量子产率的降低可以看作是电子与电子非弹性散射的效应。可以通过电子与电子碰撞的平均自由程来衡量这个物理过程。

考虑到电子在 300K 时使用费米分布与使用阶跃函数误差在 0.1% 量级, 使用阶跃函数替代费米分布, 并且给定边界条件: 1. 价电子能级小于 E_F ; 2. 价电子被碰撞后 $E > E_F$; 3. 碰击后价电子能量小于激发电子。再对各能量的激发电子频率做加权平均, 得到激发电子的电子与电子非弹性散射的平均自由程为^[31]:

$$\bar{\lambda}_{e-e}(\hbar\omega) = \frac{\int_{\chi_0}^{\hbar\omega} \lambda(E) dE}{\int_{\chi_0}^{\hbar\omega} dE} = \frac{2\lambda_m E_m^{\frac{3}{2}}}{\hbar\omega \sqrt{\chi_0}} \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\chi_0}{\hbar\omega}}} \quad (5)$$

可以得到, 量子产率为:

$$QE(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{opt} \cos \theta}{2\lambda(E_m)} \frac{\hbar\omega \sqrt{\chi_0}}{E_m^{\frac{3}{2}}} \left(1 + \sqrt{\frac{\chi_0}{\hbar\omega}} \right)} k \quad (6)$$

可以得到产生的光电流为:

$$I = \int P(\omega) \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{opt} \cos \theta}{2\lambda(E_m)} \frac{\hbar\omega \sqrt{\chi_0}}{E_m^{\frac{3}{2}}} \left(1 + \sqrt{\frac{\chi_0}{\hbar\omega}} \right)} k d\omega \quad (7)$$

5.2.3 电子出射

电子在通过金属和真空的界面时, 由于逸出功的影响, 垂直方向动能减少, 水平方向动能不变, 所以电

子运动方向发生变化。如图 4 所示, 为边界处的动量、角度变化^[31]。

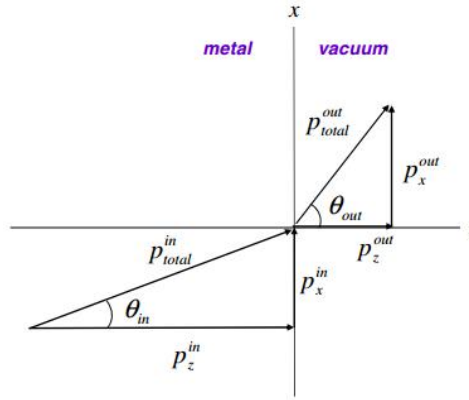


图 4 边界处的动量、角度变化^[31]

相应的, 角度关系为:

$$\frac{\sin \theta_{out}}{\sin \theta_{in}} = \sqrt{\frac{E + \hbar \omega}{E + \hbar \omega - E_F - \phi_{eff}}} \quad (8)$$

可以计算得到电子通过边界后, 角度分布的概率为^[32]:

$$H(\phi) = \int_0^{E_{max}} \frac{\eta(E, \hbar \omega)}{\int_0^{\theta_0} 2\pi \sin \theta d\theta} \frac{1 - \frac{\Phi}{\Phi + E}}{\sqrt{1 + \tan^2 \phi \frac{\Phi}{\Phi + E}}} dE \quad (9)$$

如图 5 为电子角度分布概率理论曲线与实验测量值的对比, 可以看出, 具有较好的一致性。并且, 角度分布概率曲线可以使用余弦曲线进行拟合和简化, 减少后续计算的复杂度。

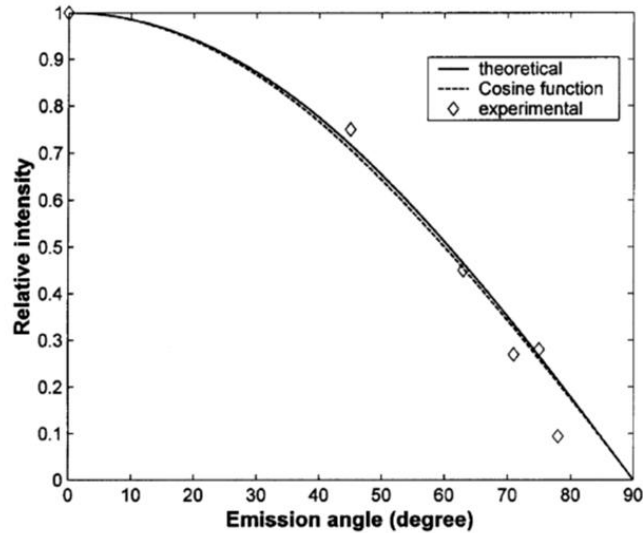


图 5 电子角度分布概率^[32]

5.2.4 紫外辐照放电原理

检验质量、电极和电极笼的表面将被紫外光照

亮以释放光电子。在被紫外光照射后, 将重新对检验质量的电荷进行测量, 必要时在迭代调整中重复

这一过程, 以将电荷降低至科学数据采集所需的水平。放电性能不仅取决于发射的光电子, 还取决于检验质量与电极/外壳表面之间的电压差异, 随着电极的电压差异分出了不同的放电模式。如果需要的话, 外加电场可以帮助特定方向的电子转移。检验质量与电极/外壳表面之间的电压差异也可用于增强/抑制放电。

5.3 电荷检测原理

$$F_k = -\frac{\partial E}{\partial k} = \frac{1}{2} \sum \frac{\partial C_i}{\partial k} V_i^2 + \frac{Q^2}{2C^2} \frac{\partial C}{\partial k} - \frac{Q}{C} \sum V_i \frac{\partial C_i}{\partial k} \quad (10)$$

公式中的第一项为静电悬浮力和控制力, 第二项为任意的自由电荷与周围电极结构相互作用产生的杂散力, 第三项为自由电荷与周围电极上施加的电势之间的相互作用。

因为电极对的正弦电压导致检验质量产生了力或力矩进而使得检验质量产生了平移或转动, 惯性传感器伺服反馈控制器补偿的正是检验质量的位移, 在这种情况下, 检验质量的电荷信息将成为控制器信号的一部分。因此, 可以使用静电或光学传感器来测量检验质量所发生的位移, 通过位移信息和电力伺服控制来间接计算得到检验质量的电荷信息。

6 电荷管理系统发展

2004 年, GP-B 任务第一次成功的验证了深紫外光诱导的光电子发射是对超导陀螺仪转子进行电荷控制的一种有效方法^[33]。基于这一经验, LPF 也使用了汞灯作为电荷管理系统的紫外光源^[34,35]。与汞灯相比, 基于 UV-LED 的电荷管理系统具有体积小、重量轻、功耗低等优点。具有高带宽的 UV-LED 也开启了一种新的电荷传输技术: AC 电荷传输技术。为了将 UV-LED 设备验证至 TRL-9 阶段, 电荷管理系统验证至 TRL-7 阶段, 由沙特阿拉伯和美国宇航局联合开发, 并于 2014 年发射了一颗基于斯坦福大学的研究成果 UV-LED 电荷管理系统的卫星^[11]。而在未来的 LISA 任务中, 也将使用 UV-LED 电荷管理系统。

6.1 GP-B 电荷管理

GP-B 使用静电悬浮的球形陀螺转子来测量广义相对论预测的两种效应(框架拖曳效应和测地线效应)^[33]。空间中, 陀螺的充电来自于宇宙射线、陀螺悬浮和自转。宇宙射线对陀螺充电约 1 V/yr, 而

电荷测量作为电荷管理重要组成环节, 可以通过测量检验质量上的带电情况进而决定检验质量的放电策略。空间中常采用力调制技术实现电荷测量。力调制技术的基本原理是在电容电极上施加正弦电压信号, 这样检验质量上的自由电荷会与周围电极上施加的电场之间产生相互作用, 导致检验质量周期运动, 运动的振幅和相位决定了电荷的大小及其符号。检验质量带电后, 会受到库仑力:

陀螺悬浮和自转产生的电荷极性和大小不定。为了满足陀螺仪的扭矩要求, 需要将陀螺的电势控制在 15 mV 以下。

GP-B 利用光电效应实现电荷管理。利用汞灯产生 253.7 nm 的紫外光并通过光纤引入传感器内部产生光电子。通过在电极上施加相应的电压控制光电子的流向^[6,14]。同时采用力调制的方式进行电荷测量, 在相对的电极上施加反向的正弦电压得到陀螺电势。测量灵敏度受限于控制信号在激励施加于电极的频率附近的噪声, 如果激励电压减小到 25 mV 时, 预计灵敏度为 $0.04 \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在轨飞行中, 偏置电极上施加 $\pm 3 \text{ V}$ 的电压, 用来引导光电子转移到陀螺或者外壳实现双向的电荷控制。

其陀螺 2 在悬浮后, 测到了 $2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$ 的加速度, 这么大的加速度来自于陀螺从外壳分离时积累的电荷。使用电荷控制系统将转子的初始电势从 0.4 V 减少到 0.015 V, 相应的, 减少了转子和飞船之间的相对加速度。图 6 显示了 2 号陀螺仪的首次在轨悬浮情况和 3 号转子使用 3 对独立电极得到在三个正交方向上测量的电荷。理想状态下, 三对电极的电荷测量结果应该相同, 但在实际中由于斑块效应, 测量结果存在差异^[14]。

6.2 LPF 电荷管理

LPF 为 LISA 的关键技术做了验证实验^[34,35]。对于 LPF, 电荷主要来自于三个方面: 宇宙射线, 太阳高能粒子和 TM 释放时的电荷转移。相较于 GP-B, 为了允许在放电过程中继续进行全精度的加速测量, LPF 被设计为通过测试质量和周围外壳的差分照明来实现电荷控制, 避免了大的直流静电场。测试质量电荷需要保持在大约 $2\text{e}7$ (约 100 mV) 基本

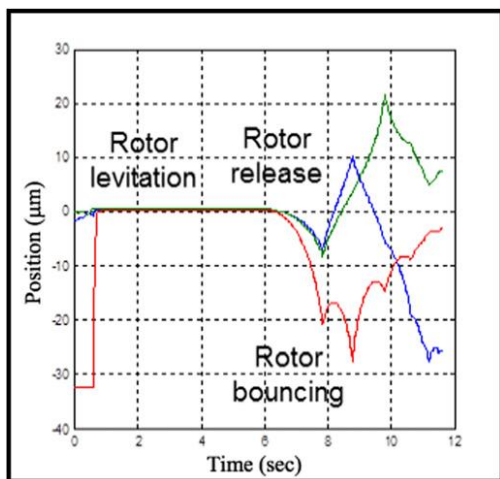
电荷以下^[7]。

LPF 的电荷管理系统有两种工作模式：快速放电控制，主要将检验质量所带电荷快速释放到所需的水平；连续放电控制，将测试质量电荷保持在一定的阈值以下，而不引入明显的加速度噪声^[36]，表 4 总结了电荷管理系统功能的性能要求^[37]。

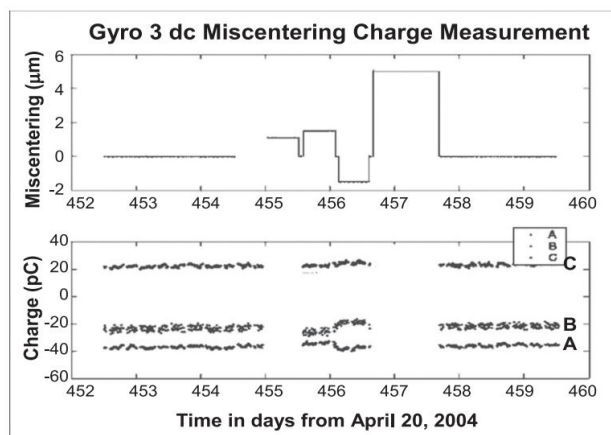
初始释放后，在检验质量上测量到 -421 mV 和 -281 mV 的残余电势。在科学模式中，两个检验质

量的充电速率是相似的，从任务开始时的约 $+21\text{ e/s}$ 向上漂移到任务结束时的约 36 e/s 。这种增长主要是由于太阳周期的下降，导致 GCR 通量逐渐增加^[7]。且与预测得到的结果相符合^[8]，使得检验质量的电势每天增加约 $+12\text{ mV}$ ，图 7 为一段时间内 LPF 检验质量的电荷。

实验中还进行了几个专门的实验来表征每个灯的全放电曲线。



2 号陀螺初始阶段转子悬浮与释放



3 号陀螺的位置和三轴测量的电荷

图 6 GP-B 飞行中陀螺数据

表 4 电荷管理系统功能的性能要求

功能	需求
加速度模式下快速放电	$7.23 \cdot 10^7\text{e}$
科学模式下快速放电	$1.36 \cdot 10^6\text{e}$
科学模式下连续放电	$1.00 \cdot 10^5\text{e}$
科学模式下仅电荷测量	$1.00 \cdot 10^4\text{e}$

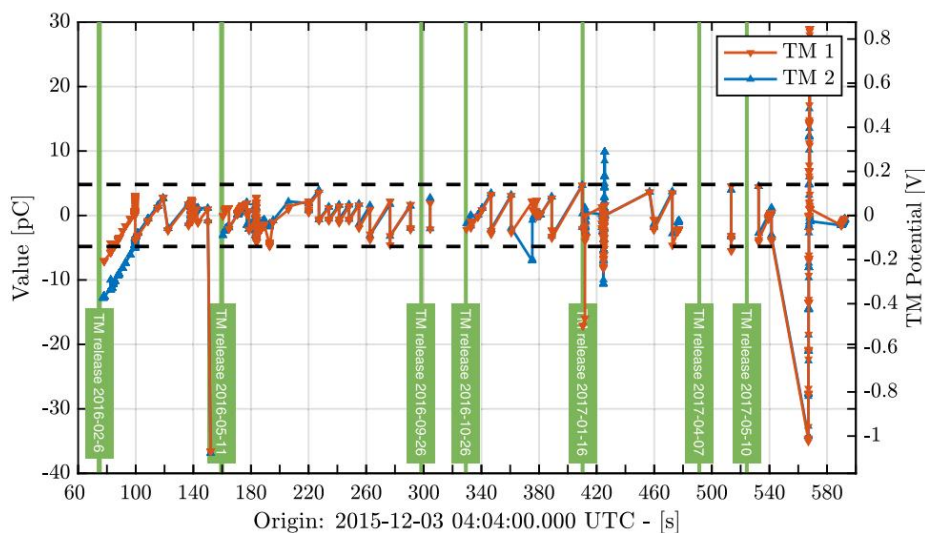


图 7 LPF 检验质量电荷

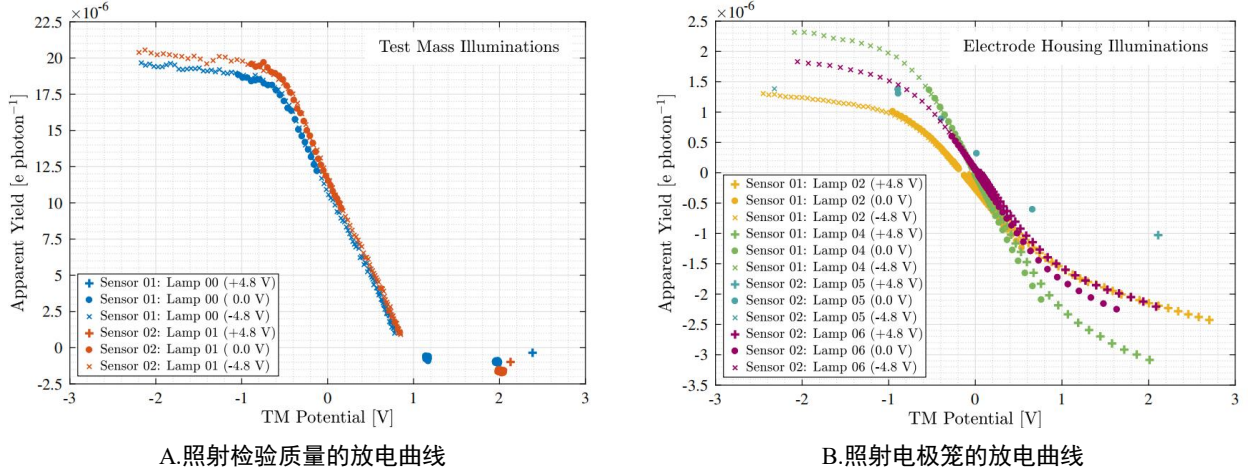


图 8 LPF 汞灯的放电曲线

可以看出, 直接照射检验质量的灯 00 和 01 的曲线之间具有较好的相似性。直接照射外壳的灯 02, 04, 05, 06 的曲线在性质上彼此相似。04 和 06 灯的平衡电位接近于零, 只有 02 灯具有显著的负平衡电位 (-150 mV), 使其成为唯一适合自动 CMS 连续放电的灯。

6.3 斯坦福 UV-LED 实验^[11]

受时代与技术的限制, GP-B 和 LPF 中使用的紫外线光源为汞灯。而汞灯有体积大、质量重、功耗高、响应缓慢、动态范围有限和寿命短的缺点, 并且, 还会引入射频干扰^[8]。UV-LED 的出现为电荷管理系统提供了新的技术路线。UV-LED 可以有效解决汞灯的缺点, 成为未来电荷管理系统发展的理想选择。

斯坦福大学的 UV-LED 实验用以验证 UV-LED 作为电荷管理系统光源的可行性。并通过改变 UV-LED 驱动电流和偏置电极驱动电压的相位差, 实现对检验质量的交流电荷控制。其使用的 UV-LED 中心波长为 255 nm , 半高全宽 12 nm 。通过调整驱动电流可以调节输出光功率从 1 nW 到 100 uW , 调制频率 $>10\text{ kHz}$ 。检验质量是一个直径 88.9 mm , 壁厚 3.175 mm 的空心铝球, 偏置电极为一个铝正方形板, 边长为 92 mm , 距离检验质量最近点 20 mm 。表面均镀有 20 nm 的 Ti 和 150 nm 的 Au。检验质量由绝缘的 Ultem-1000 支撑。

实验中, 用 100 Hz 的方波调制 UV-LED 和偏置电压实现相对相位的精确控制。使用静电计读取检验质量电位, 使用皮安计测量集成光电二极管的响应来监测 LED 状态, 实验结果如图 9 所示。

实验中, UV-LED 峰值电为 6.4 mA , 峰值光功率输出为 $10\text{ }\mu\text{W}$ 。偏置电极电压为 3.0 Vpp 。初始检验质量电势为 0.9 V , LED 和偏置同相 (0°), 产生 0.21 pA 的正电荷峰值转移速率; 达到峰值后, 偏置相位翻转到 180° , 产生负电荷峰值转移速率为 0.15 pA 。

在飞行实验中, LED 的数量增加到 16 个用于研究寿命和性能。还可以实现更高的光功率提高充放电速率。同时使用了表贴式和平窗式 LED, 以测试空间环境对不同封装和镜头材料的影响。用接触探头和电荷放大器测量检验质量的电荷。偏置板的数量从 1 个增加到 4 个并增加了尺寸, 以减少杂散反射。图 10 展示了在轨运行中, LED 在 75% 占空比和电极组合下的电荷控制, 测试质量电位在几秒钟内迅速稳定到预定的偏置电位。

6.4 LISA 的检验质量的电荷管理 (未来)

激光干涉仪空间天线 (LISA) 将是一个专用的、基于空间的引力波观测平台。它将在太空中充当一个巨大的干涉仪, 测量相隔 500 万公里的孤立测试质量之间的相对距离变化。LISA 将继承 LISA Pathfinder 的绝大部分设计和技术, 同时计划将电荷管理系统紫外光源更换为 UV-LED。

6.5 其他相关电荷管理实验

6.5.1 快慢光电子^[40]

Wang 等依照 LISA 需求的检验质量电势 V 与光电子初动能的关系, 提出并验证了两种被动电荷管理方法: 快光电子方法和慢光电子方法。当 $K/e > V$ 时为快光电子, 反之则为慢光电子。其中, e 为单位电荷, K 为光电子初动能。

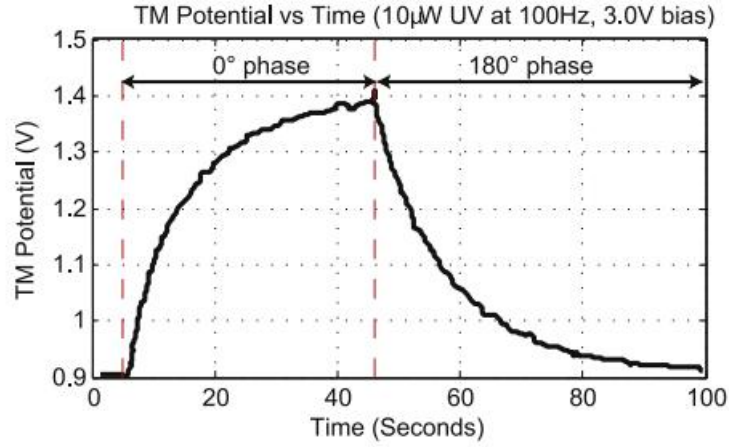


图9 实验结果

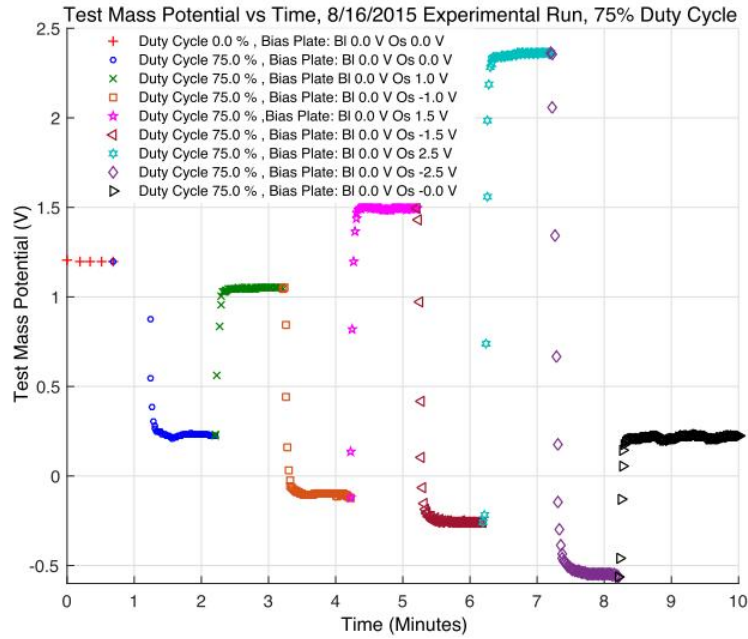


图10 在轨运行中电荷管理结果

A. 快光电子方法

快光电子方法使用两个波长为 255nm 的 LED。通过调节两个 LED 的光子流, 实现检验质量 (TM^a) 与偏置 (TM^b) 之间的电流为零和检验质量的电势为零。当 LED^b 设定为 10mA, TM^b 接地, 通过调节 LED^a 的电流从 0-12mA, 得到 TM^a 的电流和电压, 如图 11 所示。

控制 LED^a 和 LED^b 的电流比例, 使得 TM^a 的电势保持在 0V 附近。验证长时间下的电流比例的稳定性, 得到检验质量电压漂移约 1.5mV/day, 远小于 LISA 由于宇宙射线的充电。快光电子方法在一定程度上对系统条件的变化, 如真空、温度和可能

的老化非常敏感, 因此需要定期重新校准。

B. 慢光电子方法

慢光电子方法只使用 1 个 LED 照射镀金板, 波长选择 275nm 和 295nm。实验中, 调节其中一块镀金板的电压, 记录另一块板的电压变化情况。如图 12 显示了作为检验质量的镀金板的电压随偏置板的电压变化情况。

相应的, TM^a 接地, 测量 TM^b 的电压。得到 TM^b 的漂移电压。可以得到, 275nm 和 295nm 的 LED 均可以将检验质量的电荷控制到 0V 附近, 且漂移均在 2mV/day 以内。

兰州大学对于被动电荷管理方法进行了进一步

实验。使用 255-285nm 直接照射检验质量, LED 驱动电流为 10mA, 偏置电极接地。利用指数函数 $y = A * \exp(-t/\tau) + y_0$ 对检验质量的电势化情况进行拟合, 可以得到在使用不同波长的 LED 时检验质量电压变化的时间常数和稳定状态下检验质量的

电压, 对于稳定电压, 这几种波长的 UV-LED 均可以使检验质量的电压控制到 100mV 以内。并且, 当波长从 255nm 增大到 285nm 时, 检验质量的稳定电压先减少后增加。其中, 275nm 波长的稳定电压最接近 0V。

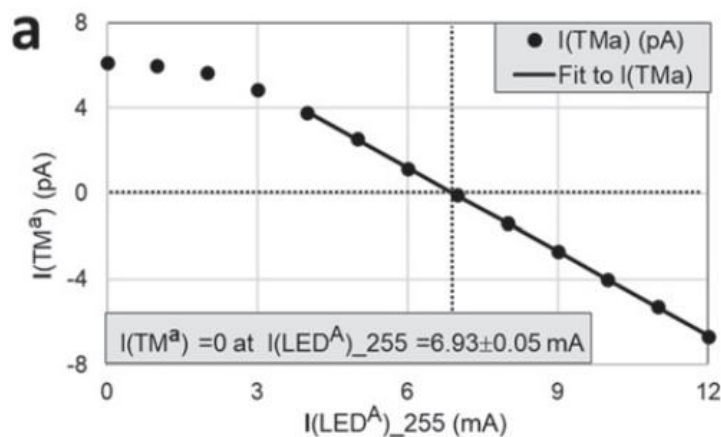


图 11 改变 LED^A 时 TM^a 的电流与电压

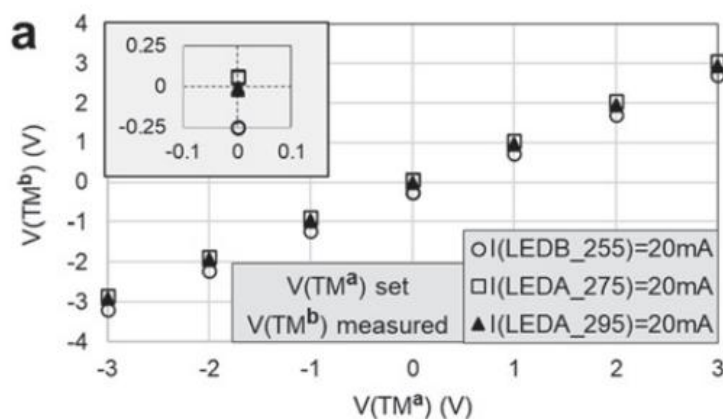


图 12 检验质量的电压随偏置板的电压变化情况

表 5 不同波长的 LED 时检验质量的稳定电压和时间常数

波长 (nm)	稳定电压 (mV)	时间常数
255	62.3	0.29
265	26.4	0.22
275	-1.7	0.15
285	-7.6	0.94

6.6 国内电荷管理研究现状

电荷管理作为惯性传感器的一个子系统, 在国内的研发还是处于一个起步阶段。目前华中科技大学、中山大学、中国科学院国家空间科学中心、兰州空间技术物理研究所、兰州大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等开展相关工作, 目前

都在进行地面原理实验验证^[41-45,50]。同时华中科技大学已开始工程样机的搭建, 兰州大学也开始探索系统优化, 考虑不同波长以及光功率在不同的太阳活动场景的应用 (见 6.5B 以及附录)。

其中, 华中科技大学以及中山大学开展了关于差分连续放电的实验。通过调节两个灯的照射情况

进而调节 TM 的平衡电压。Yang^[41]等介绍了使用差分紫外光发射实现自适应电荷中和的连续电荷控制方法, 该方法不需要测量传感器的功函数, 反射率和量子产率等物理参数。结果表明, 一旦将两个紫外光的光功率比设置在合适的值附近, 就可以自动控制检验质量的电势在目标值附近。Pi^[42]等对差分连续电荷管理方法进行了进一步实验, 对可行性和稳定性进行了进一步的系统研究。结果表明, 试验质量与周围壳体表面特性的差异是连续放电成功的最关键因素。

然而, 由于电荷管理本身的控制参数较为复杂, 其开发仍然面临诸多挑战, 研究方向包括紫外灯的选取、紫外灯波长的选择、控制策略的设计等。目前电荷管理系统地面试验已有一定成果, 但是对于不同参数的电荷管理系统仍需要进一步进行在轨实验, 以进一步提高相关器件的技术成熟度, 为后续惯性传感器的电荷管理研发积累工程经验和基础。

7 结论

惯性传感器是引力波探测中提供惯性参考的关键载荷。然而, 空间环境将会导致惯性传感器中的检测质量上积累电荷, 产生额外的加速度噪声进而影响引力波探测精度。为了减少这些噪声满足空间引力波探测对于噪声的要求, 惯性传感器的电荷管理需要使用非接触式紫外放电技术, 紫外放电利用光电效应控制检测质量上的残留电荷。

本文针对惯性传感器中的电荷管理系统, 从检验质量的电荷来源及相应的噪声影响出发, 阐述了电荷管理系统方法和基于紫外放电的电荷管理系统原理, 并对国内外当前电荷管理系统发展和现状进行了介绍。在文章的附录部分, 给出了兰州大学对于电荷管理系统优化的探索。

8 致谢

本研究得到国家自然科学基金国家重点研发计划检验质量电荷管理方法和技术研究(2021YFC2202501)的支持。

9 附录: 光电效应演示

基于对国内外相关研究的调研, 兰州大学对基于 UV-LED 光源的电荷管理系统展开研究, 设计了基于 UV-LED 实现对惯性传感器检验质量进行电荷管理的系统。在实验室中进行了平行板电荷管理实验和电荷管理系统样机实验。

电荷管理系统如图 13 所示, 主要包括: 电源模

块、电荷测量模块和电荷释放模块。电荷管理系统的工作原理是: 接触式电荷传感探头将检验质量的电荷信息作为输入提供给电荷检测电路, 电荷量信息经电荷检测电路采集并转换为数字信号后传输进入微控制器(MCU)进行控制处理, 这便完成了电荷测量的任务; MCU 通过判断 TM 上的电荷信息来控制偏置驱动电路与 UV-LED 驱动电路工作, 进而达到对检验质量进行电荷管理的效果。所有电路的供电都将由电源模块提供。

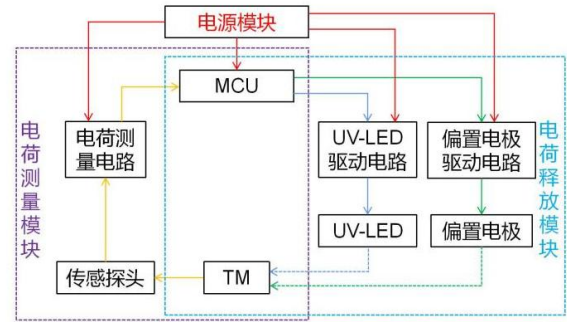


图 13 电荷管理系统

电荷测量模块的功能类似于一个精密的电压表。由于检验质量与地构成电容 $C_{TM,G}$, 因此检验质量上的电荷量 Q 可以由检验质量的对地电压 $U_{TM,G}$ 得到, 即 $Q = C_{TM,G} \cdot U_{TM,G}$ 。为了使测量时检验质量上的电荷不发生泄漏, 要求测量电路具有超高的输入阻抗。

电荷释放模块用于控制光功率以及通过控制光子转移方向来选择对检验质量进行定向充放电。采用脉宽调制技术(PWM), 通过调节 PWM 波的占空比改变 UV LED 的平均驱动电流, 实现对光功率的控制。同时通过调节偏置电极所用 PWM 波相对于 UV-LED 所用 PWM 波的相位, 利用调整偏置电极与 UV-LED 驱动电流的相位, 实现对检验质量的充放电。

9.1 基于平行板的电荷管理实验

9.1.1 实验装置

实验装置如图 14 所示, 实验中, 两块 $55\text{mm} \times 55\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的镀金铝板平行相对安装, 间距为 6mm , 一块镀金板模拟偏置电极(Bias), 一块镀金板模拟检验质量(TM)。两块镀金铝板利用绝缘材料 Ultem-1000 做固定。光源部分采用的 UV-LED 中心波长为 255nm , 半高全宽为 10nm , 在 20mA 驱动电流时光功率约为 0.5mW 。电荷测量采用静电计 Keithley 6514。实验中还通过控制继电器的通断来实

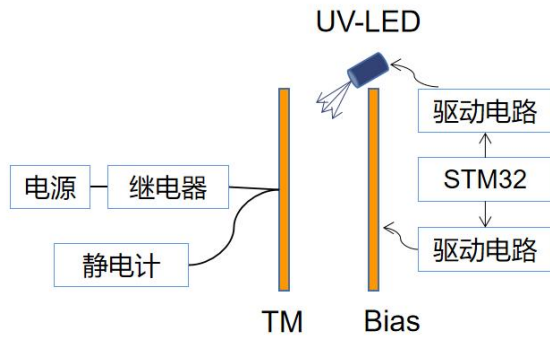
现对检验质量的直接充电。实验在真空度约 10^{-4}Pa 的环境下进行。

9.1.2 实验结果

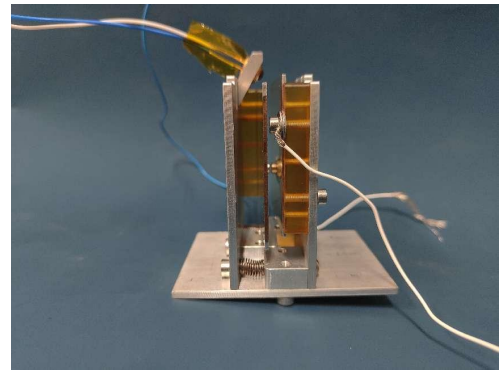
实验中, 使用频率为 1kHz 的 PWM 信号调制 UV-LED 与偏置电极, 占空比分别设置为 10%, 20% 和 40%。通过调整驱动偏置电极与 UV-LED 的 PWM 信号的相位, 实现对于检验质量的充放电。充电模式下, 利用继电器将检验质量初始电势设为 -5V , 放电模式下, 利用继电器将检验质量的初始电势设为 $+5\text{V}$ 。实验开始后断开继电器。

实验结果如图 15 所示, 检验质量的电势在 UV-LED 和偏置电极的作用下发生改变, 并很快趋于稳

定。可以得到在 0V 附近检验质量的电势变化速率, 在充电模式下从 0.98V/s 到 3.74V/s , 放电模式下从 0.13V/s 到 0.53V/s 。经过测量, 检验质量对地电容约为 10pF 。于是可以得到检验质量的充电速率从 9.8pA 到 37.4pA , 放电速率下从 1.3pA 到 5.3pA 。等效的电荷转移速率在充电模式从 $6 \times 10^7 \text{ e/s}$ 到 $2 \times 10^8 \text{ e/s}$, 放电模式下从 $8 \times 10^6 \text{ e/s}$ 到 $4 \times 10^7 \text{ e/s}$ 。由于 PWM 信号占空比的不同影响了 UV-LED 的光功率, 占空比越大, 光功率越强, 单位时间内产生的光电子也越多, 相应的, 对检验质量的充放电速率也越快, 到达稳定电势所需的时间越短。但不同占空比情况下的稳定电势是相同的。

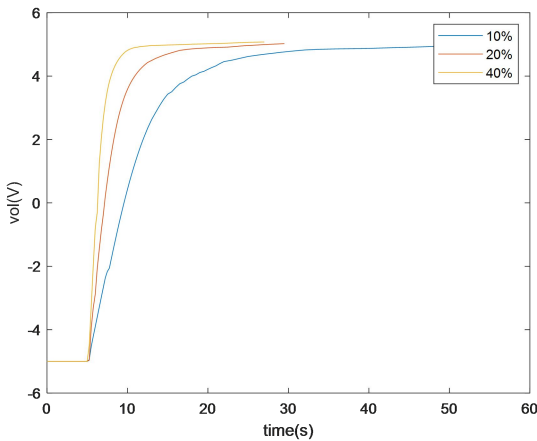


A. 实验装置示意图

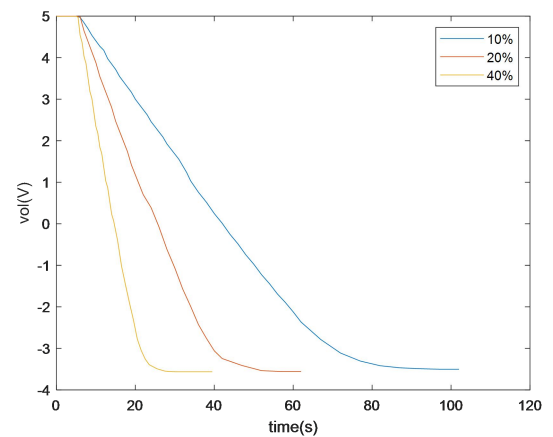


B. 实验装置照片

图 14 基于平行板的电荷管理装置



A. 充电模式实验结果



B. 放电模式实验结果

图 15 基于平行板的电荷管理实验结果

9.2 电荷管理系统样机实验

9.2.1 实验装置

为了测试 UV-LED 在惯性传感器中实现电荷管

理的能力, 设计了电荷管理系统样机如图 16 所示。其中, 检验质量的尺寸为 $45\text{mm} \times 45\text{mm} \times 45\text{mm}$, 是一个钛合金制作成实心的立方体, 检验质量表面

镀钛 300nm, 再镀金 500nm。检验质量的外壳由内部空间为 $55\text{mm} \times 55\text{mm} \times 55\text{mm}$ 的立方体腔构成, 在立方体腔上作镂空设计, 为偏置电极配置安装位置, 每个面上的电极用导线相连, 共同构成 1 个大的偏置电极。立方体腔和安装其上的偏置电极共同构成电极笼。检验质量与电极笼利用包裹厚 2mm 的 Ultem-1000 绝缘材料的钛合金实心顶针固定锁紧。在电极笼上安装 UV-LED, UV-LED 直接照射检验

质量, 并经过反射照亮偏置电极。在检验质量上表面中心, 安装一个接触式探头采集检验质量的电势。

相应的电子学系统如图 17 所示, 包括: 电荷测量电路及控制电路。其中, 电荷测量电路参考 UV LED mission 任务, 利用高输入阻抗特性直接测量检验质量电压, 与接触式探头上端直接相连; 控制电路主要功能包括: 对检验质量的电压进行模数转换、UV LED 驱动、偏置电极驱动、电源模块及与 PC 的通信。

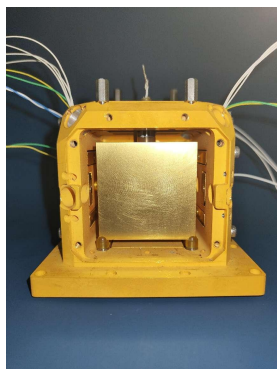
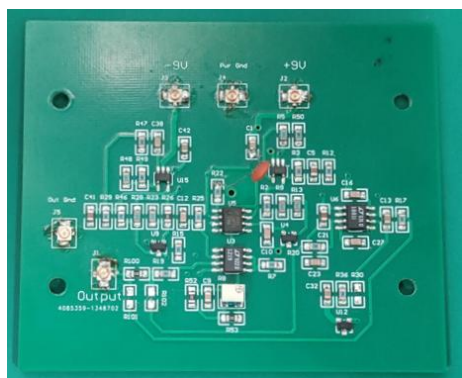
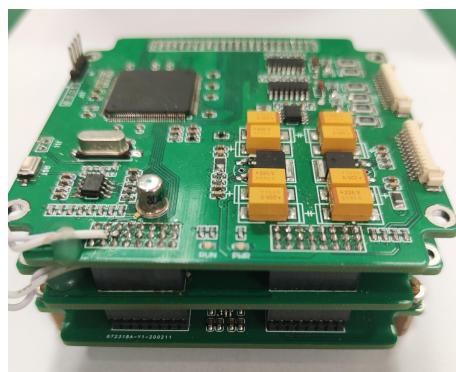


图 16 电荷管理系统样机

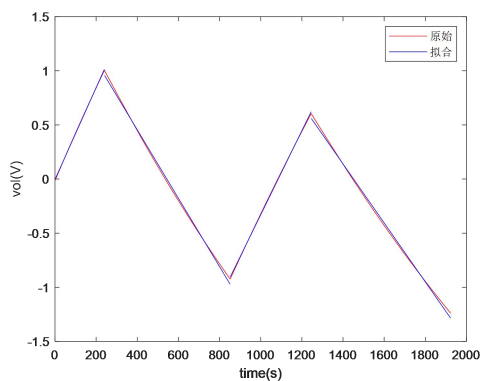


A. 电荷测量电路

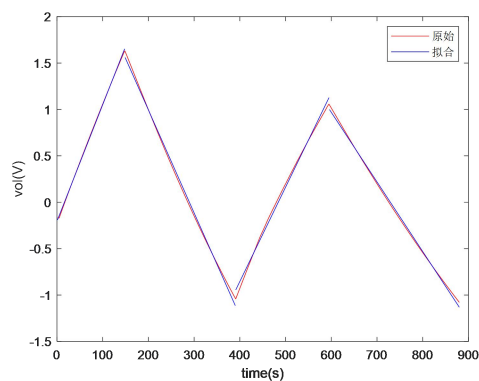


B. 控制电路

图 17 电荷管理的电子学



A. 驱动电流为 5mA



B. 驱动电流为 10mA

图 18 不同驱动电流下检验质量的电势变化

9.2.2 实验结果

实验中,用频率为 1kHz, 占空比为 50%的 PWM 信号调制 UV-LED 和偏置电极, 通过调整 UV-LED 与偏置电极的相位实现对检验质量的充放电。其中, 偏置电压设为 $\pm 5\text{V}$, UV LED 驱动电流分别设为 5mA 和 10mA。

可以得到在 0V 附近, 检验质量的电势变化速率。对于 5mA 的驱动电流, 在充电模式下为 4mV/s, 放电模式下为 3mV/s。对于 10mA 的驱动电流, 在充电模式下为 10mV/s, 放电模式下为 8mV/s。经过测量, 检验质量对地电容约为 27pF。于是可以得到, 对于 5mA 的驱动电流, 检验质量的充电速率为 108fA, 放电速率为 81fA, 等效的电荷转移速率分别为 $6.8 \times 10^5 \text{ e/s}$ 和 $5.1 \times 10^5 \text{ e/s}$ 。对于 10mA 的驱动电流, 检验质量的充电速率为 270fA, 放电速率下为 216fA, 等效的电荷转移速率分别为 $1.7 \times 10^6 \text{ e/s}$ 和 $1.4 \times 10^6 \text{ e/s}$ 。

参考文献

- [1] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6):61102.
- [2] 黄双林, 龚雪飞, 徐鹏, 等. 空间引力波探测--天文学的一个新窗口[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2017, 47(1): 33-54.
- [3] Sathyaprakash B S, Schutz B F. Physics, Astrophysics and Cosmology with Gravitational Waves[J]. Living Reviews in Relativity, 2009, 12:2.
- [4] 罗子人, 白嫻, 边星, 等. 空间激光干涉引力波探测[J]. 力学进展, 2013, 43(04):415-447.
- [5] Jafry Y, Sumner T J, Buchman S. Electrostatic charging of space-borne test bodies used in precision experiments[J]. Classical and Quantum Gravity, 1996, 13(11A):A97-A106.
- [6] Buchman S, Quinn T, Keiser G, et al. Charge measurement and control for the Gravity Probe B gyroscopes[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(1):120-129.
- [7] Armano M, Audley H, Baird J, et al. Precision charge control for isolated free-falling test masses: LISA pathfinder results[J]. Physical Review D, 2018, 98(6):062001.
- [8] Sumner T, Araújo H, Davidge D, et al. Description of charging/discharging processes of the LISA sensors[J]. Classical and Quantum Gravity, 2004, 21(5):S597-S602.
- [9] Sun K X, Allard B, Buchman S, et al. LED deep UV source for charge management of gravitational reference sensors[J]. Classical and Quantum Gravity, 2006, 23(8):S141-S150.
- [10] Pollack S, Turner M, Schlamminger S, et al. Charge management for gravitational-wave observatories using UV LEDs[J]. Physical Review D, 2010, 81(2):021101.
- [11] Saraf S, Buchman S, Balakrishnan K, et al. Ground testing and flight demonstration of charge management of insulated test masses using UV-LED electron photoemission[J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(24):245004.
- [12] Sumner T J, Mueller G, Conklin J W, et al. Charge induced acceleration noise in the LISA gravitational reference sensor[J]. Classical and Quantum Gravity, 2020, 37(4):045010.
- [13] Lowell J. Contact electrification of metals[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1975, 8(1):53-63.
- [14] Buchman S, Lipa J A, Keiser G M, et al. The Gravity Probe B gyroscope[J]. Classical and Quantum Gravity, 2015, 32(22):224004.
- [15] INTERNATIONAL STANDARD ISO-15390-2004, Space environment (natural and artificial) - Galactic cosmic ray model[S]
- [16] Adams J H. The Natural Radiation Environment inside Spacecraft[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1982, 29(6):2095-2100.
- [17] Tylka A J, Adams J H, Boberg P R, et al. CREME96: A revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics code[J]. Ieee Transactions on Nuclear Science, 1997, 44(6):2150-2160.
- [18] O'Neill, M. P. Badhwar - O'Neill Galactic Cosmic Ray Model Update Based on Advanced Composition Explorer (ACE) Energy Spectra from 1997 to Present[C]. 35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, FRANCE; Jul 18-25, 2004.

- [19] Wass P, Araújo H, Shaul D, et al. Test-mass charging simulations for the LISA Pathfinder mission[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, 22(10):S311.
- [20] Araújo H, Wass P, Shaul D, et al. Detailed calculation of test-mass charging in the LISA mission[J]. *Astroparticle Physics*, 2005, 22(5-6):451-469.
- [21] 沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 中国宇航出版社, 2013:4-13.
- [22] Reigber C, Lühr H, Schwintzer P. CHAMP mission status[J]. *Advances in space research*, 2002, 30(2):129-134.
- [23] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, et al. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results[J]. *Geophysical research letters*, 2004, 31(9):L09607.
- [24] Rummel R, Yi W, Stummer C. GOCE gravitational gradiometry[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(11):777-790.
- [25] Touboul P, Rodrigues M. The MICROSCOPE space mission[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2001, 18(13):2487.
- [26] Liu L, Bai Y, Zhou Z, et al. Measurement of the effect of a thin discharging wire for an electrostatic inertial sensor with a high-quality-factor pendulum[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29(5):055010.
- [27] Buchman S, Byer R, Gill D, et al. Charge neutralization in vacuum for non-conducting and isolated objects using directed low-energy electron and ion beams[J]. 2008, 25(3):035004.
- [28] Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. Geant4 developments and applications[J]. *IEEE Transactions on nuclear science*, 2006, 53(1):270-278.
- [29] Hollington D. The charge management system for LISA and LISA Pathfinder [D]. London, Imperial College London; 2011.
- [30] Fowler R H. The analysis of photoelectric sensitivity curves for clean metals at various temperatures[J]. *Physical Review*, 1931, 38(1):45-56.
- [31] Dowell D H, King F K, Kirby R E, et al. In situ cleaning of metal cathodes using a hydrogen ion beam[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2006, 9(6):063502.
- [32] Pei Z T, Berglund C N. Angular distribution of photoemission from gold thin films[J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters*, 2002, 41(1AB):L52-L54.
- [33] Everitt C W F, Muhlfelder B, DeBra D B, et al. The Gravity Probe B test of general relativity[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, 32(22):224001.
- [34] Armano M, Audley H, Baird J, et al. Beyond the Required LISA Free-Fall Performance: New LISA Pathfinder Results down to 20 μHz [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(6):061101.
- [35] Anderson G, Anderson J, Anderson M, et al. Experimental results from the ST7 mission on LISA Pathfinder[J]. *Physical Review D*, 2018, 98(10).
- [36] Wass P J, Carbone L, Cavalleri A, et al. Testing of the UV discharge system for LISA pathfinder[C]. 6th International Laser Interferometer Space Antenna, Greenbelt, MD; Jun 19-23, 2006.
- [37] Ziegler T, Fichter W, Schulte M, et al. Principles, operations, and expected performance of the LISA Pathfinder charge management system[C]. 7th international LISA symposium, Barcelona, Spain; Jun 16–20, 2008.
- [38] Yang F, Bai Y, Hong W, et al. A charge control method for space-mission inertial sensor using differential UV LED emission[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(12):124502.
- [39] Pi X, Liu Q, Xu J, et al. Continuous charge management scheme for TianQin[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2023, 40(3):035005.
- [40] Wang S, Saraf S, Lipa J, et al. Two approaches for the passive charge management of contactless test masses[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2022, 39(19):195008.
- [41] Fangchao Yang, Yanzheng Bai, Wei Hong, et al. Investigation of charge management using UV LED device with a torsion pendulum for TianQin [J].*Class. Quantum Grav.*, 2020, 37 115005
- [42] Xuanhao Pi, Qi Liu, Jiahao Xu, et al. Continuous charge management scheme for TianQin [J]. *Class. Quantum*

- Grav., 2023, 40, 035005.
- [43] WANG Zidong, ZHOU Bin. Simulation and Experimental Validation of Charge-driven Extreme Ultraviolet Photoelectric Effect (in Chinese). Chinese Journal of Space Science, 2024, 44(2): 368-378.
- [44] KANG Weidong, LI Detian, LEI Jungang, et al. Gravity Reference Sensor Test Mass Charge Accumulation and Control[J]. VACUUM AND CRYOGENICS, 2020, 26(2): 158-164.
- [45] KANG Weidong, LI Detian, LI Gang, et al. Research on UV Light Control Technology for Detecting Mass Charge with Gravitational Reference Sensor[J]. VACUUM AND CRYOGENICS, 2021, 27(4): 407-410.
- [46] 34 Zhou Z B et al Seismic noise limit for ground-based performance measurements of an inertial sensor using a torsion balance[J]. Class. Quantum Grav, 2010, 27 175012.
- [47] Tu H B et al Performance measurements of an inertial sensor with a two-stage controlled torsion pendulum[J]. Class. Quantum Grav, 2010, 27 205016.
- [48] Yin H et al Measurements of temporal and spatial variation of surface potential using a torsion pendulum and a scanning conducting probe[J]. Phys. Rev. D, 2014, 90 122001.
- [49] Bai Y Z et al Improving the measurement sensitivity of angular deflection of a torsion pendulum by an electrostatic spring[J]. Class. Quantum Grav, 2015, 32 175018.
- [50] HOLLINGTON D. The Charge Management System for LISA and LISA Pathfinder [D]. London: Imperial College London, 2011
- [51] David H. Dowell and John F. Schmerge Quantum efficiency and thermal emittance of metal photocathodes [J]. PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 12, 074201 (2009)

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS