

天琴电荷管理系统研制与测试

洪葳 李泓钢 白彦峥 周泽兵

Development and testing of the charge management system for tianqin

HONG Wei, LI Hong-gang, BAI Yan-zheng, ZHOU Ze-bing

引用本文:

洪葳, 李泓钢, 白彦峥, 周泽兵. 天琴电荷管理系统研制与测试[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0087

HONG Wei, LI Hong-gang, BAI Yan-zheng, ZHOU Ze-bing. Development and testing of the charge management system for tianqin[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0087

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0087>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

涡旋光轨道角动量的拓扑荷差值法测量

Measurement of orbital angular momentum of vortex beam by topological charge difference

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 216 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0141>

CCD/EMCCD光电参数测试系统的设计与应用

Design and application of CCD/EMCCD photoelectronic parameter test system

中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 693 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0016>

基于曼彻斯特编码的图像式角位移测量系统

Image-based angular displacement measurement system based on Manchester coding

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 830 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0178>

基于单相机的空间目标相对位姿测量系统

Monocular camera-based relative position and orientation estimation system for space targets

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1111 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0057>

用于紫外光谱仪的探测器温度控制系统

Detector temperature control system for ultraviolet spectrometer

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 209 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0133>

大孔径太赫兹波成像光学系统设计

Design of terahertz wave imaging optical system with large aperture

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 374 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0129>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-09

天琴电荷管理系统研制与测试

洪 葳, 李泓钢, 白彦峥*, 周泽兵*

(华中科技大学 国家精密重力测量科学中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 检验质量(TM)在轨存在高能粒子充电效应, 从而干扰引力波探测。本论文针对天琴计划的电荷管理需求, 首先建立静电力模型, 确定检验质量的电荷阈值上限为 2×10^{-13} C; 然后设计基于紫外 LED 光源的电荷管理系统, 并研制工程样机; 最后构建基于精密扭摆的地面测试系统, 用于评估电荷管理样机性能。实验结果表明: 在 2V、1 mHz 的调制作用下, 电荷测量的分辨率优于 2×10^{-14} C, 电荷控制的分辨率约为 6×10^{-14} C, 满足空间引力波探测需求。上述研究成果为天琴计划的实施提供了关键技术。

关键词: 天琴计划; 电荷管理系统; 电荷测量与控制; 深紫外 LED

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0087 CSTR: 32171.14.CO.2026-0087

Development and testing of the charge management system for tianqin

HONG Wei, LI Hong-gang, BAI Yan-zheng*, ZHOU Ze-bing*

(MOE Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities Measurements, Hubei Key Laboratory of Gravitation and Quantum Physics, PGMF and School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

* Corresponding author, E-mail: abai@hust.edu.cn; zhouzb@mail.hust.edu.cn

Abstract: The test mass (TM) in orbit is subject to the charging effect of high-energy particles, which interferes with gravitational wave detection. This paper addresses the charge management requirements of the TianQin Project. First, an electrostatic force model is established to determine the charge threshold of the TM, which is limited to less than 2×10^{-13} C. Then, a charge management structure using a UV LED light source is designed, and an engineering prototype is developed accordingly. Finally, a ground testing system based on a torsion pendulum is constructed to evaluate the charge management performance. Experimental results show that at 1 mHz, the resolution of charge measurement is better than 2×10^{-14} C, and the resolution of charge control is approximately 6×10^{-14} C, which meet the requirements of space gravitational wave detec-

收稿日期: 2026-04-30; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2021YFC2202504, No. 2022YFC2204102); 国家自然科学基金面上项目 (No. 1257051822)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2021YFC2202504, 2022YFC2204102) and the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 1257051822)

tion. These achievements provide a solid foundation for TianQin project.

Key words: TianQin project; charge management system; charge measurement and control; UV LED.

1 引言

2015 年, 激光干涉引力波天文台(LIGO)首次探测到引力波, 开启了人类探索宇宙的新纪元^[1]。地面引力波探测器面临诸多挑战, 包括臂长受限、地面振动噪声以及地表重力梯度变化等, 这些因素阻碍了 1 Hz 以下引力波的探测。为了克服这些限制, 空间引力波探测器成为观测毫赫兹频段引力波的最佳方案^[2]。这些空间探测器由三艘航天器组成一个三角形星座, 构成用于引力波探测的大型激光干涉仪^[3-4]。激光干涉仪的惯性参考基准是航天器内部自由悬浮的检验质量(TM)。理想情况下, 这些检验质量仅受引力场作用而沿测地线运动, 从而真实反映引力波信息^[5-6]。然而, 空间中的高能带电粒子(如银河宇宙射线和太阳高能粒子)会导致检验质量带电。带电的检验质量会与周围电磁场相互作用, 引入额外的加速度噪声^[7], 因此需要对检验质量上的电荷进行控制^[8]。

迄今为止, 有两种成熟的电荷控制方法。第一种方法应用于 GOCE、CHAMP 和 GRACE 等重力卫星, 采用金丝将检验质量与电源地连接, 以中和电荷。由于金丝的热噪声, 检验质量的加速度噪声被限制在 $10^{-12} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 量级, 显然无法满足引力波的探测需求^[9]。第二种方法是非接触式电荷控制方案, 被 GP-B 和 LISA Pathfinder 所采用, 利用紫外光产生光电子来中和电荷。该方法理论上可使检验质量的加速度噪声达到 $10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 量级, 因而成为引力波探测的可行方案^[10]。其具体过程为: 首先在电极上施加调制电压, 带电的检验质量在调制作用下发生运动, 运动幅度与电荷量成正比, 从而可根据运动数据计算出电荷量; 进而通过控制光照方向、强度和持续时间, 将检验质量上的电荷调控至预期值^[11]。

天琴计划是中国自主提出的空间引力波探测项目, 计划于 2035 年左右发射^[13]。由于干涉臂长较短, 天琴计划对检验质量电荷量的要求比 LISA 更为严格^[12]。因此, 天琴团队对电荷管理技术开展了进一步研究, 理论上揭示了地心轨道充电规律^[14-16]; 评估了电荷测量与控制的误差^[17-18]; 发展了多种先进电荷管理方法及差分补偿方案^[19-22];

研制了基于深紫外 Micro-LED 的电荷管理样机^[23-25]; 搭建了基于精密扭摆的地面测试系统^[26-27]; 实验验证了 10 mV 以内的电势控制精度^[25,28], 形成了从理论、样机到测试的完整技术链条^[30]。

本文将系统介绍天琴电荷管理系统的研制与测试工作。后续章节安排如下: 第 2 节分析天琴计划对电荷管理系统的需求, 第 3 节描述电荷管理系统的设计, 第 4 节测试电荷管理系统的性能, 第 5 节给出结论。

2 电荷管理需求分析

2.1 天琴轨道环境分析

由于天琴计划的探测卫星处于距离地球 10 万公里的地心轨道如图 1 所示, 其空间环境显著区别于 LISA 计划和太极计划的日心轨道^[29], 需充分考虑地球磁层对高能粒子的屏蔽与捕获效应。为准确预测检验质量的在轨充电速率, 天琴团队利用人工神经网络融合了 GOES(3 万公里)与 IMP8(20 万公里)的卫星实测数据与银河宇宙射线力场模型, 构建了天琴轨道处质子与 α 粒子的能谱分布, 并基于蒙特卡洛方法模拟了高能粒子碰撞天琴卫星, 评估出检验质量在不同太阳活动时期的背景充电速率为 $10\sim 60 \text{ e/s}$, 如图 2 所示。由于地磁场的捕获效应, 天琴轨道中百 MeV 能段的粒子通量较日心轨道高出 1 至 2 个数量级, 从而导致其充电速率相比日心轨道高出约 10%。该结果揭示了天琴轨道独特的充电规律, 为电荷管理系统的动态范围和放电能力设计提供了关键依据。

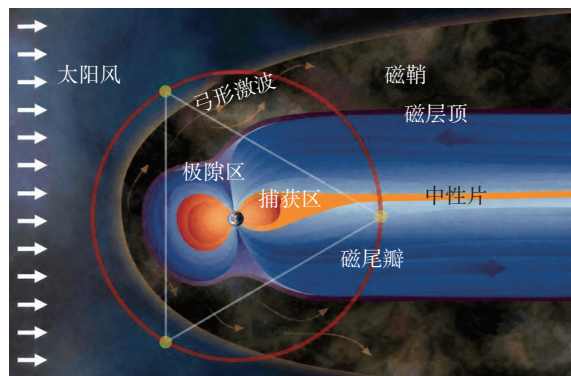


图 1 天琴计划探测轨道示意图

Fig. 1 Diagram of the detection orbit for the Tianqin Project

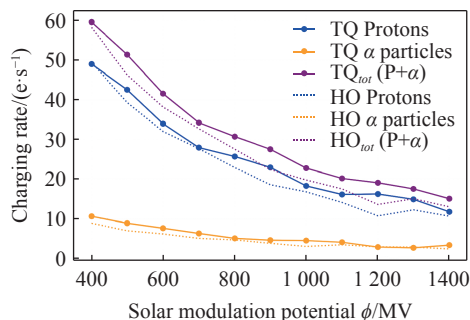


图 2 检验质量在轨充电速率

Fig. 2 Test Mass on-orbit charging rate

2.2 电荷容限分析

为了在空间中测量和控制自由悬浮的检验质量,其周围设计有多个极板。图 3 展示了检验质量与沿 X 轴分布的四个电极。

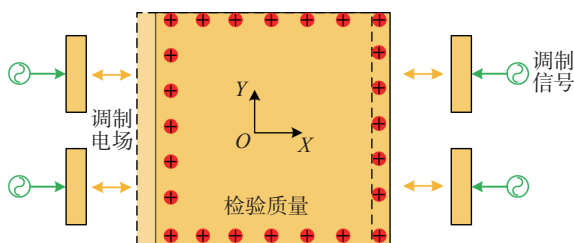


图 3 检验质量二自由度模型

Fig. 3 Test Mass 2-DOF model

当检验质量沿 X 轴方向发生位移(如图 3 中虚线所示)时,可利用储能方程求得其沿 X 轴方向所受的静电力^[31]:

$$F_x = \frac{1}{2} \sum_i \frac{\partial C_i}{\partial x} (V_i - V_{TM})^2, \quad (1)$$

式中, V_i 为第 i 个电极上的电势,其主要包含 100 Hz 级的控制电压、100 kHz 的注入电压以及杂散电势; C_i 为检验质量周围的第 i 块极板; V_{TM} 为检验质量上电势。检验质量的电势则由自身携带的电荷及所处的电场环境决定,可表示为:

$$V_{TM} = \frac{Q_{TM} + \sum C_i V_i}{C_{tot}}, \quad (2)$$

其中, Q_{TM} 为检验质量电荷, C_{tot} 为检验质量对地总电容。因此,检验质量沿 X 轴方向的加速度可以描述为:

$$a_x = \frac{1}{2m} \sum_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \left(V_i - \left(\frac{Q_{TM} + \sum C_i V_i}{C_{tot}} \right) \right)^2, \quad (3)$$

其中, m 为检验质量的质量。其加速度噪声来源

包括位移噪声 S_x 、电荷噪声 S_Q 和电压噪声 S_{V_i} , 因此总加速度噪声为:

$$S_{a_x}^{1/2} = \sqrt{S_x \left(\frac{\partial a_x}{\partial x} \right)^2 + S_Q \left(\frac{\partial a_x}{\partial Q} \right)^2 + \sum_{i=1} S_{V_i} \left(\frac{\partial a_x}{\partial V_i} \right)^2}. \quad (4)$$

天琴计划要求总静电噪声低于 $2.4 \times 10^{-16} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ ^[13], 其中与检验质量电荷相关的噪声主要是杂散电势波动噪声和电荷波动噪声。根据天琴惯性传感器的设计参数,可以估计不同因素贡献的静电加速度噪声如图 4 所示。图中展示噪声曲线是在检验质量电荷量为 $3.4 \times 10^{-13} \text{ C}$ 、杂散电势控制在 10 mV 的条件下绘制的,此时总静电加速度噪声在 1 mHz 低于 $3 \times 10^{-16} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 。因此,为了确保总静电噪声满足需求,引力波探测过程中需要将检验质量的电荷量控制在 $2.0 \times 10^{-13} \text{ C}$ 以内^[32]。

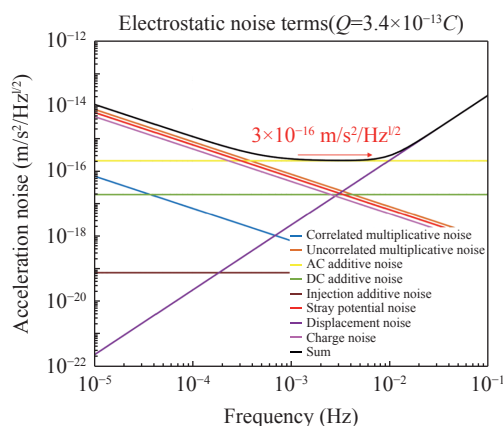


图 4 检验质量在轨噪声分析

Fig. 4 Test Mass On-orbit noise analysis

3 电荷管理系统设计

3.1 总体方案

天琴团队提出的电荷管理系统如图 5 所示。该系统由测量控制单元、紫外光源、光纤及真空馈通器组成。电荷管理系统的工作流程是:首先在电极上施加调制电压使检验质量产生位移,然后通过电容位移传感或激光测距系统读取检验质量位姿数据,再通过测量算法结合控制指令与配置参数,实现电荷量解算,最后由控制算法输出波形驱动紫外光源组件产生紫外光,经过光纤、馈通器照射到检验质量上,实现充放电。同时紫外光源组件内设光功率和温度反馈,供内核监测并调整参数以应对环境变化。样机还支持与卫星平

台及地面系统的通信、指令收发及高精度时间广播。该系统需满足:在引力波探测过程中,将检验质量电荷维持在 2×10^{-13} C 以内;在连续放电模式下,放电分辨率需优于 100 e/s;面临极端太阳风暴时,最大放电速率需大于 10^5 e/s。

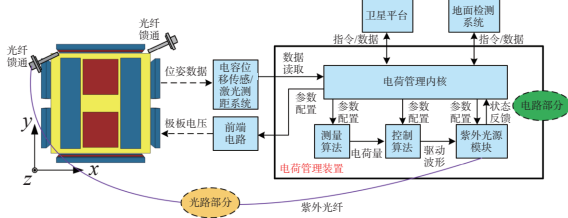


图 5 电荷管理系统结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of the charge management system

3.2 电路设计

电荷管理装置的电路部分采用 FPGA+ARM 的架构,融合了 FPGA 并行计算能力与 ARM 处理器的编程通用性,其内部功能模块如图 6 所示。

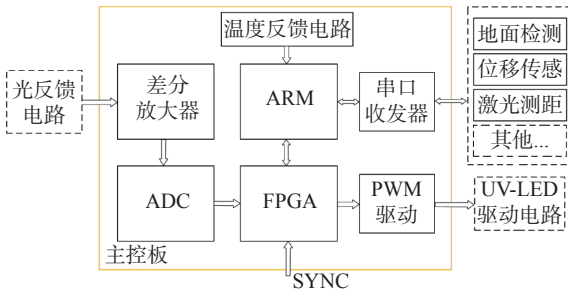


图 6 电荷管理电路结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of charge management circuit

橙色框内为主控板,其中差分放大器用于放大光强反馈电路输出的紫外光功率信号,并输给 ADC 芯片。FPGA 主要用于驱动 ADC 芯片的以实现模数转换功能,以及根据 SYNC 外部同步信号产生 PWM 波形控制 LED 的发光功率。ARM 主要实现电荷管理算法以及通讯功能。电荷管理算法包括电荷测量算法和电荷控制算法等,通讯功能包括与地面检测、卫星平台和激光测距系统等平台通讯。

3.3 光路设计

由于紫外 LED 在响应速度、质量及功耗等方面相较于汞灯具有明显优势,因此是电荷管理系统的优选紫外光源。根据惯性传感器探头结构,设计了由紫外 LED、紫外光纤和光纤馈通装置组成的电荷管理系统光路,如图 7 所示。

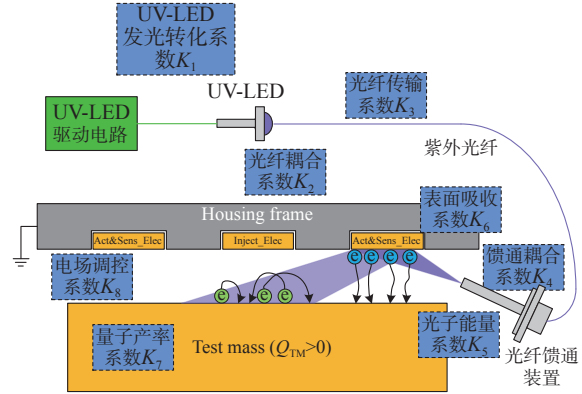


图 7 光路设计示意图

Fig. 7 Schematic diagram of optical path

在此光路中,影响检验质量放电速率的因素有 8 个,放电速率可以描述为:

$$\dot{Q} = i_{LED} K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{1}{h\nu} \rho \Psi \int \Phi(E) dE, \quad (5)$$

其中, i_{LED} 为紫外 LED 的驱动电流。 $K_1 \sim K_4$ 为光路传输系数, $K_5 \sim K_8$ 为与探头结构、材料等有关的系数。通过对上述八个系数进行理论分析和实验测试,可得到以下结果,如表 1 所示。

表 1 光路传导系数

Tab. 1 Optical path transmission coefficient

模型参数	理论值	实测值
K_1 发光转化系数($\mu\text{W}/\text{mA}$)	15.00	13.13 $\pm$ 4.49
K_2 光纤耦合系数	40%	36.07% $\pm$ 3.55%
K_3 光纤传输系数	80%	
K_4 馈通耦合系数	100%	74.66% $\pm$ 4.05%
K_5 光子能量系数(J)	1.28×10^{18}	N.A.
K_6 表面吸收系数	66.48%	N.A.
K_7 量子产率系数(e/Photon)	N.A.	$(1.13 \pm 0.37) \times 10^{-5}$
K_8 电场调控系数	100%	50% $\pm$ 10%

代入公式后,可得不同电荷管理策略对紫外 LED 光功率和驱动电流的需求,如表 2 所示。

表 2 不同电荷管理策略的光功率与电流需求

Tab. 2 Optical power and current demand for different discharge strategies

放电方式	放电速率	紫外光功率	驱动电流
快速放电	1×10^5 e/s	20 nW	5.9 μA
连续放电	10~100 e/s	2~20 pW	0.59~5.9 nA

3.4 电荷管理样机

根据天琴计划的电荷管理需求,团队研制了

电荷管理样机(Charge management device, CMD), 如图 8 所示。



图 8 电荷管理样机

Fig. 8 Charge management device

其包含 6 路独立的 UV-LED 和光纤接口, 能够实现 0~100 nW 光功率调节, 调节分辨率优于 10 pW, 光功率动态响应速度达到 1 μ s, 如图 9 所示。

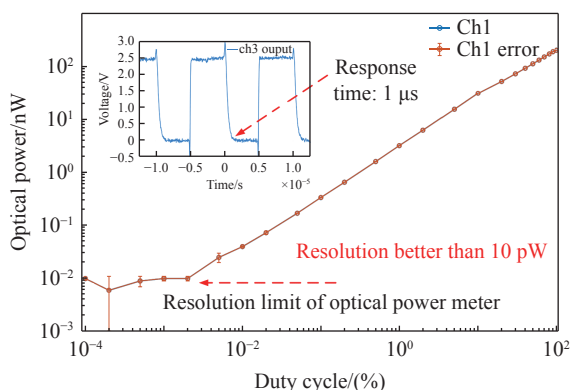


图 9 电荷管理样机的紫外光性能

Fig. 9 Performance of charge management prototype

4 电荷管理系统测试

4.1 扭摆测试系统

为了评估电荷管理系统的性能, 天琴团队采用真空扭摆装置搭建了电荷管理样机的地面测试系统^[33], 如图 10 所示。为检验质量在轨处于自由悬浮状态, 团队采用石英丝悬挂检验质量, 从而在绕悬丝旋转的自由度上实现在轨弱力等效^[34]。石英丝的主要成分为二氧化硅, 直径约为 40 μ m, 长度约为 80 cm, 其室温电阻高达 10^{22} Ω , 外界电荷难以迁移至检验质量上, 因此不影响检验质量的电荷测量和控制。同时为了减少地面环境的干扰, 检验质量及其周围的极板框架被放置于真空腔体内部, 而整个真空腔体又放置于隔振基础之上, 此外还在真空腔周围安装保温板用于减小外界温度

波动。最终搭建的地面测试系统如图 11 示。

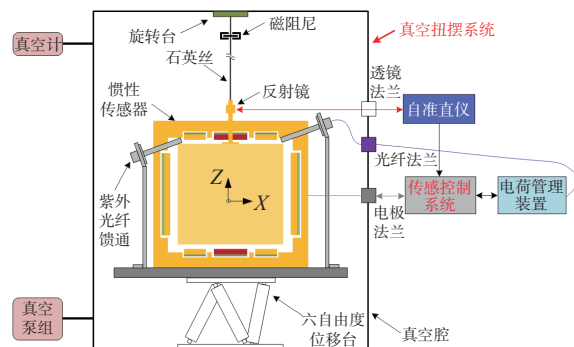


图 10 电荷管理地面测试系统示意图

Fig. 10 Schematic diagram of charge management ground test system

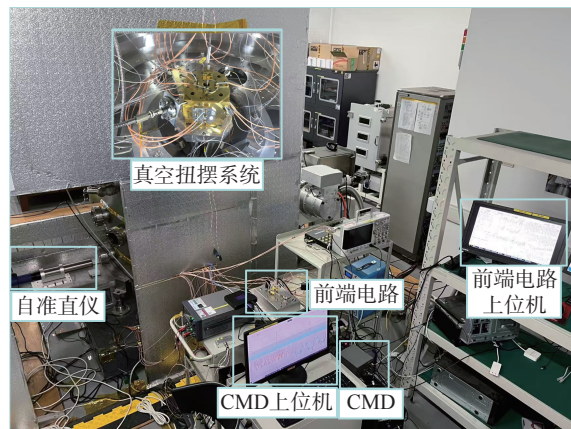


图 11 基于精密扭摆的地面测试装置

Fig. 11 Ground testing device based on precision torsion pendulum

该系统采用的石英丝悬挂 5cm 的空心立方体检验质量, 通过高精度自准直仪(ELCOMAT 3000, 角度分辨率 $0.1 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}@1 \text{ mHz}$)测量扭转角位移, 再结合扭摆传递函数可以评估检验质量的力矩噪声。结果表明: 在 1 mHz 处扭摆的力矩分辨率约 $5 \times 10^{-14} \text{ Nm}/\text{Hz}^{1/2}$, 如图 12 所示。

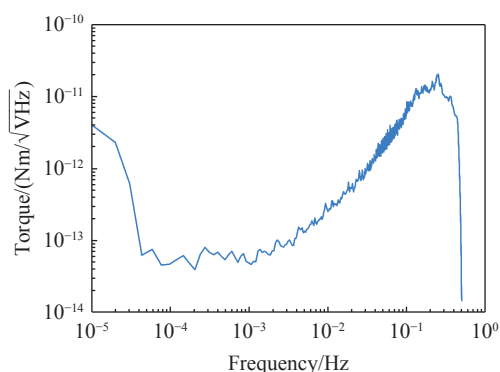


图 12 扭摆的力矩分辨率

Fig. 12 Torque resolution of torsion pendulum

4.2 电荷管理性能测试

在 X 轴电极上施加调制电压,并在注入电极上施加高频载波电压,再分别利用自准直仪和电容传感测量检验质量的转动角度,并据此解算检验质量的电荷量。根据检验质量受到的静电力与携带电荷之间的关系^[31],检验质量的电荷测量表达式为:

$$Q_{TM} = \frac{F_{MOD} d_0^2 C_{tot}}{8 \varepsilon S V_{MOD}}, \quad (6)$$

其中, F_{MOD} 为静电力的直流项, d_0 为检验质量与周围极板的平衡间距, C_{tot} 为检验质量对地总电容, ε 为介电常数, S 为检验质量与极板的相对面积, V_{MOD} 为调制电压幅值。

因此,检验质量电荷测量精度受限于静电力测量噪声和调制电压输出噪声:

$$\delta Q_{TM} = \sqrt{\left(\frac{\delta V_{MOD}}{V_{MOD}} Q_{TM} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{TM}}{\partial F} \delta F \right)^2}, \quad (7)$$

其中, $\delta V_{MOD}/V_{MOD}$ 为调制电压相对噪声, δF 为静电力测量噪声。

为了评估两种位移读取方法的电荷测量分辨率,设置调制电压幅值为 2 V,调制频率分别为 0.3 mHz、1 mHz、3 mHz、10 mHz、30 mHz 和 100 mHz,对比测量结果与理论精度,如图 13(a) 所示。进一步,在调制频率为 10 mHz 条件下,设置调制幅值分别为 0.2 V、0.5 V、1 V、1.5 V 和 2 V,结果如图 13(b) 所示。

两种测量方法在调制电压为 2 V、调制频率为 1 mHz 时都达到了 2×10^{-14} C 的测量分辨率,均能满足电荷管理系统的地面测试需求。

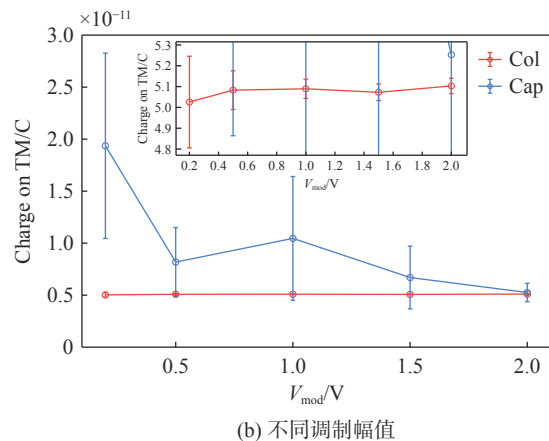
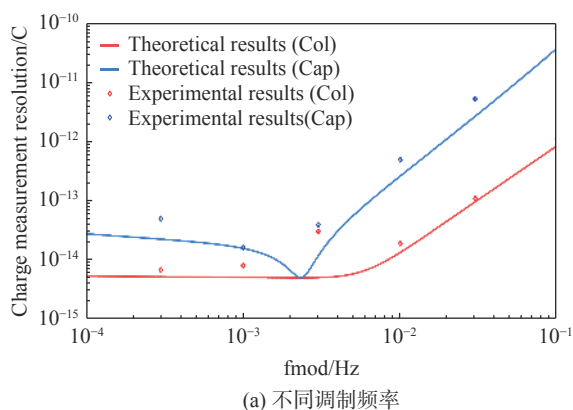


图 13 电荷测量分辨率结果.

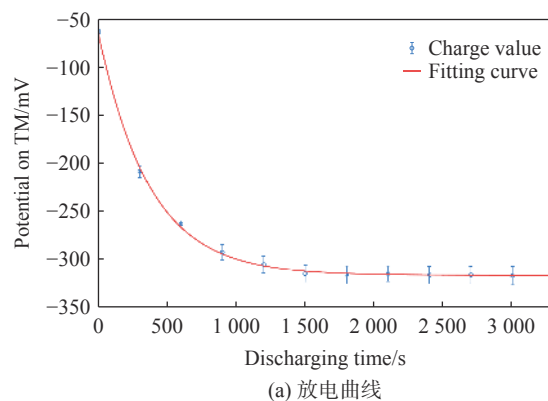
Fig. 13 Charge measurement resolution results. (a) different modulation frequencies (b) different modulation amplitudes

为了获得检验质量电势随充放电时间的变化规律,天琴团队开展了充放电实验。首先对 X 轴方向的四个控制电极持续施加频率为 10 mHz、幅值为 2 V 的调制电压约 30 分钟,以测量检验质量的电势;再采用约 50 nW 的紫外光照射检验质量或电极框架 300 s。重复上述过程,直至检验质量电势接近饱和。

图 14 展示了检验质量的充放电结果,其中蓝色点为检验质量电势的测量值。显然,检验质量电势随时间呈指数变化,相关研究^[25]给出了如下的充放电模型,采用该模型拟合结果为红色曲线。

$$V_{TM}(t) = (V_0 - V_{TMeq})e^{-t/\tau} + V_{TMeq}, \quad (8)$$

其中, V_0 为检验质量的初始电势, V_{TMeq} 为检验质量的平衡电势, τ 为与光功率相关的时间常数。



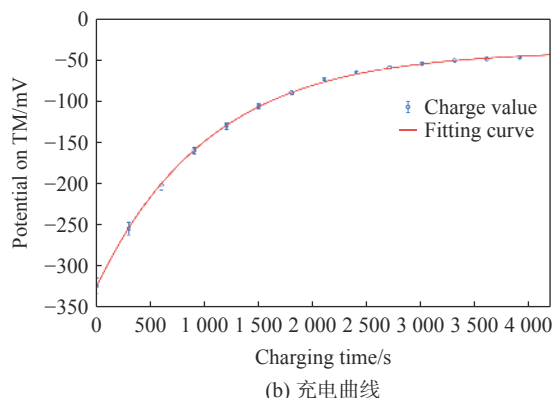
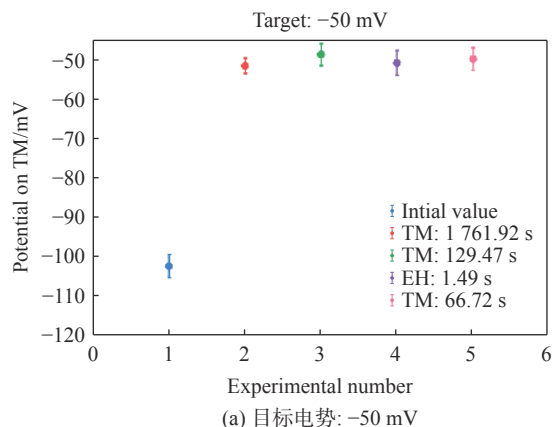


图 14 检验质量充放电曲线标定结果.

Fig. 14 Calibration results of Test Mass's charge-discharge curve. (a) discharge curve (b) charge curve

利用拟合的充放电模型开展检验质量电荷控制实验。首先测得检验质量当前电势值; 然后根据目标电势和拟合的充放电模型, 最后确定紫外光照射时间。图 15(a) 展示了初始电势约为 -100 mV 、目标电势为 -50 mV 时的控制结果, 并在图中标出了所需的充放电时间。图 15(b) 给出了初始电势约为 -50 mV 、目标电势为 -100 mV 的控制结果。实验结果表明: 电荷控制的分辨率优于 2 mV , 对应 $6 \times 10^{-14}\text{ C}$, 满足空间引力波探测的电荷管理需求。



参考文献:

- [1] CAHILLANE C, MANSELL G. Review of the advanced LIGO gravitational wave observatories leading to observing run four[J]. *Galaxies*, 2022, 10(1): 36.
- [2] BARAUSSE E, BERTI E, HERTOOG T, *et al.*. Prospects for fundamental physics with LISA[J]. *General Relativity and Gravitation*, 2020, 52(8): 81.
- [3] AMARO-SEOANE P, AUDLEY H, BABAK S, *et al.*. Laser interferometer space antenna[R]. arXiv: 1702.00786, 2017. (查阅网上资料, 不确定本条文献类型及格式是否正确, 请确认).
- [4] 李建聪, 林宏安, 罗佳雄, 等. 空间引力波探测望远镜光学系统设计[J]. *中国光学 (中英文)*, 2022, 15(4): 761-769.

LI J C, LIN H A, LUO J X, *et al.*. Optical design of space gravitational wave detection telescope[J]. *Chinese Optics*,

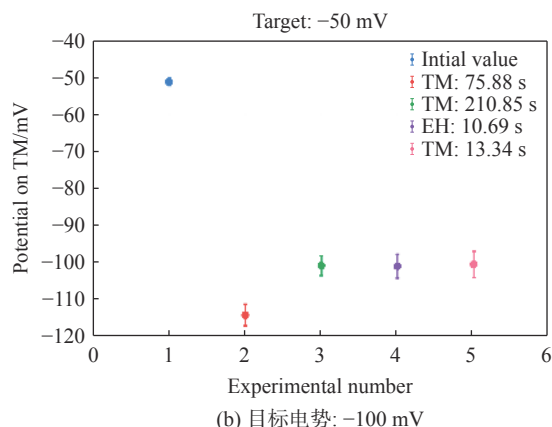


图 15 检验质量电荷控制结果.

Fig. 15 The charge control result of Test Mass. (a) target potential: -50 mV (b) target potential: -100 mV

5 结 论

本文介绍了天琴计划电荷管理系统的设计思路和测试结果。首先根据静电噪声要求, 检验质量的电荷需控制在 $2 \times 10^{-13}\text{ C}$ 以下。然后, 设计了基于紫外 LED 光源的电荷管理系统, 并研制出工程样机。最后, 利用地面测试系统对电荷管理样机进行了实验验证。实验结果表明: 在 2 V 、 1 mHz 的调制作用下, 电荷测量分辨率优于 $2 \times 10^{-14}\text{ C}$, 电荷控制分辨率约为 $6 \times 10^{-14}\text{ C}$, 满足空间引力波探测需求。未来, 天琴团队将开展样机的可靠性研究。例如, 在长寿命的空间任务要求下, 半导体器件深紫外 LED 会在各种应力(温度、电流、辐射)作用下的光功率会发生衰减, 因此在设计 LED 驱动电路时保留一定的裕度, 当 LED 发生衰减后提高其输入电流, 最终确保输出的光功率稳定; 此外, 在惯性传感器的每个光源输入端配置多个光源, 采用多输入单输出的光纤实现光源合束, 以此提高电荷管理样机的冗余度等。

- 2022, 15(4): 761-769. (in Chinese).
- [5] 王铖锐, 白彦峥, 蔡林, 等. 高精度静电惯性传感器[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53(5): 250401.
WANG CH R, BAI Y ZH, CAI L, *et al.*. High precision electrostatic inertial sensor[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2023, 53(5): 250401. (in Chinese).
- [6] 邓剑峰, 蔡志鸣, 陈琨, 等. 无拖曳控制技术研究及在我国空间引力波探测中的应用[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 503-514.
DENG J F, CAI ZH M, CHEN K, *et al.*. Drag-free control and its application in China's space gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 503-514. (in Chinese).
- [7] LEI CH, SU W, HONG W, *et al.*. Simulation for the test mass charging rate in the Tianqin orbit[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2024, 41(2): 025001.
- [8] WASS P J, SUMNER T J, ARAÚJO H M, *et al.*. Simulating the charging of isolated free-falling masses from TeV to eV energies: detailed comparison with LISA Pathfinder results[J]. *Physical Review D*, 2023, 107(2): 022010.
- [9] LIU L, BAI Y Z, ZHOU Z B, *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.
- [10] ARMANO M, AUDLEY H, AUGER G, *et al.*. Sub-Femto-g free fall for space-based gravitational wave observatories: LISA Pathfinder results[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(23): 231101.
- [11] BUCHMAN S, QUINN T, KEISER G M, *et al.*. Charge measurement and control for the Gravity Probe B gyroscopes[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(1): 120-129.
- [12] 王智, 马军, 李静秋. 空间引力波探测计划-LISA 系统设计要点[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 980-987.
WANG ZH, MA J, LI J Q. Space-based gravitational wave detection mission: design highlights of LISA system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 980-987. (in Chinese).
- [13] LUO J, CHEN L SH, DUAN H Z, *et al.*. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035010.
- [14] LEI CH, SU W, HONG W, *et al.*. Simulation for the test mass charging rate in the Tianqin orbit[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2024, 41(2): 025001. (查阅网上资料, 本条文献与第 7 条重复, 请确认).
- [15] SU W, ZHOU Z B, WANG Y, *et al.*. Evaluating residual acceleration noise for the TianQin gravitational waves observatory with an empirical magnetic field model[J]. *Physical Review D*, 2023, 108(10): 103030.
- [16] PENG J H, ZHANG J X, HONG W, *et al.*. Acceleration noise due to space magnetic field for heliocentric gravitational wave detector[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 23287.
- [17] CHEN B X, HONG W, LI H G, *et al.*. Using finite element simulation to evaluate charge measurement precision for space inertial sensors[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(4): 045026.
- [18] CHEN B X, LI Q Q, HONG W, *et al.*. Effect of test mass position on the UV discharge rate of space inertial sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(4): 6464-6472.
- [19] YANG F CH, HONG W, LI H G, *et al.*. Adaptive charge control for the space inertial sensor[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2023, 40(7): 075004.
- [20] YANG F CH, ZHAO Y J, HONG W. Investigation of charge control methods for disturbances and parameter uncertainty in inertial sensor charge management system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(16): 30906-30915.
- [21] YANG F CH, PEI SH X, HONG W. Reinforcement learning-based control of the charge management system in inertial sensors[J]. *Acta Astronautica*, 2026, 239: 391-403.
- [22] CHU L Y, BAI Y ZH, CHEN B X, *et al.*. Optimizing electrostatic acceleration noise by precisely adjusting the differential potential between the electrodes and test mass for space inertial sensors[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2025, 34(1): 2450067.
- [23] RUAN Y D, LI H G, JIA J X, *et al.*. High efficiency deep ultraviolet micro-LED and optical fiber coupling for low power charge management applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111902.
- [24] LI H G, YANG Q F, YANG F CH, *et al.*. Coupling efficiency improvement of light source with a convex lens for space charge managements[J]. *Optik*, 2021, 248: 167999.
- [25] LI H G, ZHOU R F, HONG W, *et al.*. Micro-LED embedded UV discharge solution for space charge management[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(3): 5417-5424.
- [26] YANG F CH, BAI Y ZH, HONG W, *et al.*. Investigation of charge management using UV LED device with a torsion

- pendulum for TianQin[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(11): 115005.
- [27] YANG F CH, ZHU Y, JIN X F, *et al.*. Actuation system for inertial sensors in high-precision space missions using a torsion pendulum[J]. *Physical Review D*, 2024, 110(10): 102005.
- [28] YANG F CH, BAI Y ZH, 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.
- [29] 柴国志, 黄亮, 乔亮, 等. 星上剩磁对惯性传感器的影响[J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 515-525.
CHAI G ZH, HUANG L, QIAO L, *et al.*. Effect of the on-board residual magnetism on inertial sensors[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 515-525. (in Chinese).
- [30] HONG W, CHEN B X, CHU L Y, *et al.*. Research progress of charge management system for TianQin project[C]. *Proceedings of the 7th International Workshop on the TianQin Science Mission*, Springer, 2024: 119-126.
- [31] LI H G, LI G L, HONG W, *et al.*. Capacitive sensing-based charge measurement for space inertial sensors[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 6501509.
- [32] LIU Y CH, ZHOU Z B. Progress in the development of space inertial sensor for TianQin project[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2026, 35(5): 2540007.
- [33] ZHOU Z B, LIU Y L, ZHOU H, *et al.*. Precision gravity measurement facility[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2025, 12(4): 1254-1258.
- [34] ZHOU Z B, LIU L, TU H B, *et al.*. Seismic noise limit for ground-based performance measurements of an inertial sensor using a torsion balance[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(17): 175012.

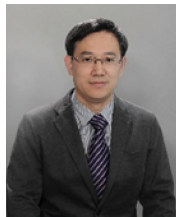
作者简介:



洪 葳(1986—), 男, 广西桂林人, 研究员, 主要从事空间惯性传感器电荷管理与智能诊断研究。分别于2010年和2016年在北京航空航天大学获得机电工程专业的工学学士和博士学位。2016年至2018年, 在新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院担任研究员。自2018年起, 入职华中科技大学物理学院。E-mail: hongwei@hust.edu.cn



李泓钢(1996—), 男, 河南驻马店人, 博士后, 主要从事空间惯性传感器电荷测量与调控研究。于2018年在河南大学获得测控技术与仪器专业的工学学士学位, 于2024年在华中科技大学获得无线电物理专业的博士学位。自2024年起, 在华中科技大学国家精密重力测量科学中心担任博士后。E-mail: hglee1327@hust.edu.cn



白彦峥(1982—), 男, 河南新乡人, 教授, 主要从事空间惯性传感器集成与测试研究。于2004年获得华中科技大学测控技术与仪器专业学士学位, 2010年获得华中科技大学无线电物理专业博士学位。自2013年起, 入职华中科技大学物理学院。E-mail: abai@hust.edu.cn



周泽兵(1973—), 男, 湖北洪湖人, 教授, 主要从事空间惯性传感器、卫星重力测量以及引力波探测等研究。于1995年在江汉石油学院获得电子仪器专业的工学学士学位, 1998年在华中理工大学(现华中科技大学)获得理学硕士学位, 2001在华中科技大学获得结构工程专业的工学博士学位。现为华中科技大学物理学院教授, 国家精密重力测量科学中心主任, 引力波探测团队负责人 E-mail: zhouzb@mail.hust.edu.cn