

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

用于超构表面衍射光帆光力测量的扭秤设计

龚攀, 杜安斌, 张飞, 蒲明博, 唐拓疆, 李兰婷, 罗先刚

引用本文:

龚攀, 杜安斌, 张飞, 等. 用于超构表面衍射光帆光力测量的扭秤设计[J]. *光电工程*, 2024, 51(8): 240040.

Gong P, Du A B, Zhang F, et al. Torsion pendulum design for metasurface-based diffraction light sail optical force measurement[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240040.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240040>

收稿日期: 2024-02-26; 修改日期: 2024-04-16; 录用日期: 2024-04-24

相关论文

超表面的矢量光场调控

梁茂伟, 卢德宙, 马耀光

光电工程 2024, 51(8): 240068 doi: 10.12086/oe.2024.240068

超构表面赋能的矢量光场调控、检测与应用

杨辉, 何海蓉, 胡跃强, 段辉高

光电工程 2024, 51(8): 240168 doi: 10.12086/oe.2024.240168

超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展

柯岚, 章思梦, 李晨霞, 洪治, 井绪峰

光电工程 2023, 50(8): 230117 doi: 10.12086/oe.2023.230117

Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band

Huan Zhao, Xinke Wang, Shutian Liu, Yan Zhang

Opto-Electronic Advances 2023, 6(2): 220012 doi: 10.29026/oea.2023.220012

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240040

用于超构表面衍射光帆光力测量的扭秤设计

龚攀^{1,2,3,4}, 杜安斌^{1,2,3}, 张飞^{1,2,3}, 蒲明博^{1,2,3,4},
唐拓疆^{1,2,3,4}, 李兰婷⁵, 罗先刚^{1,2,4*}

¹中国科学院光场调控科学技术全国重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室,

四川 成都 610209;

³中国科学院光电技术研究所矢量光场研究中心, 四川 成都 610209;

⁴中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

⁵天府兴隆湖实验室, 四川 成都 610209

摘要: 基于超构表面技术的衍射光帆在矢量光场的作用下, 其最大加速度、自稳定推进力和姿态可控性可以得到提高。在真空环境中, 精确测量衍射光帆在矢量光场作用下产生的光力对建立完整的空间动力学模型至关重要。基于扭秤弱力测量技术, 本文分别设计了面向形状规则与不规则的衍射光帆的光力测量扭秤。对于形状规则的光帆, 可通过严格控制扭秤的尺寸及各部件相对位置误差等方法提高测量精度, 该扭秤理论测量误差为 0.55%。形状不规则光帆样品的转动惯量及误差难以精确计算, 通过在扭秤上增加可随时取放的标准球, 标准球的转动惯量可以通过其几何尺寸及位置严格计算, 测量扭秤在有无标准球的状态下的周期即可以给出其受到的光力大小。本研究提升了光力测量实验的效率和灵活性, 为光帆推进、空间碎片轨道操控等应用提供数据支撑。

关键词: 光压力; 衍射光帆; 弱力测量; 扭秤; 超构表面

中图分类号: O439

文献标志码: A

龚攀, 杜安斌, 张飞, 等. 用于超构表面衍射光帆光力测量的扭秤设计[J]. 光电工程, 2024, 51(8): 240040

Gong P, Du A B, Zhang F, et al. Torsion pendulum design for metasurface-based diffraction light sail optical force measurement[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240040

Torsion pendulum design for metasurface-based diffraction light sail optical force measurement

Gong Pan^{1,2,3,4}, Du Anbin^{1,2,3}, Zhang Fei^{1,2,3}, Pu Mingbo^{1,2,3,4}, Tang Tuojiang^{1,2,3,4}, Li Lanting⁵,
Luo Xiangang^{1,2,4*}

¹National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

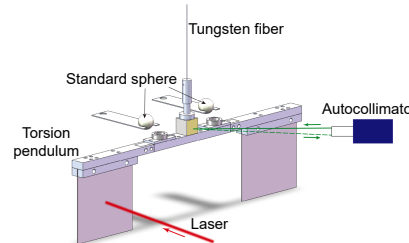
²State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and

收稿日期: 2024-02-26; 修回日期: 2024-04-16; 录用日期: 2024-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12304489)

*通信作者: 罗先刚, lxg@ioe.ac.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所



Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³ Research Center on Vector Optical Fields, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

⁴ College of Materials Sciences and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁵ Tianfu Xinglong Lake Laboratory, Chengdu, Sichuan 610299, China

Abstract: When a vector optical field acts on the metasurface-based diffractive light sail, the maximum acceleration, self-stabilizing thrust, and attitude controllability of the diffractive light sail can be enhanced. In a vacuum environment, it is important to measure the optical force acting on the diffraction light sail to establish a comprehensive space dynamics model under the influence of vector optical fields. Based on the weak force measurement technique, we have designed an optical force measurement torsion pendulum for both regular and irregular shaped diffraction light sails. The measurement accuracy of regular-shaped light sails can be enhanced by ensuring that the size of the torsion pendulum and relative position errors of each component are strictly controlled. The force measurement has a relative error of 0.55%. We have also designed a torsion pendulum to measure the optical force of the irregular-shaped light sails, which can hardly calculate the moment of inertia. There are two standard spheres on the torsion pendulum that can be placed or removed at any time. The magnitude of the optical force acting on the complex object can be measured by calculating the moment of inertia of the spheres. This research enhances the efficiency and flexibility of optical force measurement experiments, providing data support for applications such as laser-driven light sail and space debris remediation.

Keywords: optical force; light sail; torsion pendulum; weak force measurement; metasurface

1 引言

光力的本质是光子与物体产生动量交换。对于光力的研究最早可以追溯到天文学家开普勒对彗尾的观察^[1]。当彗星离太阳很近时彗尾始终背向太阳,开普勒认为彗尾是彗星的灰尘与和气体分子受到太阳的光压力作用而产生的。麦克斯韦的经典电磁场理论^[2]与爱因斯坦的光量子模型^[3]的提出深化了人们对光力的认识。随着激光器的不断发展,光力技术迎来了新阶段,涌现出光镊^[4-5]、激光冷却^[6-7]、太阳帆^[8-9]等新应用。

光帆被认为是实现星际旅行的途径之一,具有无需携带推进剂、有效载荷高等优势。2016年,霍金提出“突破摄星”计划^[10]:利用100 GW的激光在~1000 s内将微型星际探测器加速到0.2倍光速。近年,NASA多次提出激光衍射光帆先进概念项目,旨在通过超构表面技术实现复杂的衍射光场调控,以解决传统太阳帆姿态控制难、加速度受限等问题^[11-13]。超构表面具有易于加工、可灵活调控波前等优点^[14-16],通过调节超构表面亚波长结构的几何形状、材料组成和排列等,可以实现对光束偏振态以及波前的调控^[17-25],进而实现对光力的灵活操控^[26-32]。2019年,

美国加州理工学院研究团队通过设计超构表面衍射光帆实现了多自由度自稳定光学操纵^[12];2023年,美国加州大学的研究团队通过超构表面设计控制阳光动量转移的方向实现了太阳帆的面内旋转^[33]。这些工作提高了光帆驱动技术的可行性,但对衍射光帆的研究主要集中在验证标量光场下的单个光力效应。矢量光场的偏振态随空间位置变化而变化^[34-35],将偏振复用矢量光技术和空间复用超构表面结合,可以增加衍射光帆姿态操纵的自由度,提高最大加速度、自稳定推进力和姿态可控性^[36]。

在太空环境中,即使是细微的力学效应也将会导致空间目标的飞行轨迹远离预设轨道^[37],衍射光帆与矢量光场之间的力学效应也需要进行实验验证,因此精确测量衍射光帆在矢量光场作用下产生的多轴光力至关重要。目前,测量光力的方法主要有压电晶体法^[38-39]、平板电容法^[40-42]、天平法^[43-45]、扭秤法^[46-48]等。1999年,崔金松等使用以压电陶瓷片为核心元件的光压观测仪对光压进行了测量。该方法可以有效地降低温度的影响,但测力精度不高,仅能得到实验测量值与理论值在同一数量级^[38]。2007年,德国联邦物理技术研究院(PTB)基于平板电容测力原理搭建了nN力系统,测量了7 mW的氦氖激光器产生的光压

为 0.047 nN, 不确定度低于 5%^[42]。该装置不确定度主要由电压的不确定度和测量导电盘摆偏转位移的干涉仪的分辨力引入。2017 年, 美国标准技术研究院 (NIST) 通过改良商用天平实现了 1~50 kW 高功率激光光压的快速测量, 对在高于 10 kW 激光的测量, 不确定度优于 1.7%^[43-44]。光压测量天平的测量重复性随入射激光功率的增大而逐渐降低, 表明天平测光压法在测量高功率激光时更具优势^[45]。

扭秤弱力测量技术也是光力测量的有效方法。早在 1900 年, 俄国物理学家 Lebedew 通过使用扭秤测力系统首次实现了对光力的观测^[46]。经过一百多年的发展, 研究人员不断对光力测量扭秤进行优化完善。2016 年, 刘泽刚团队将机械共振、光杠杆和电磁阻尼等引入扭秤装置中, 实现了常压下的光力测量^[49]。2019 年, 罗切斯特理工学院的实验团队为了验证衍射光帆的恢复力, 实验测量了扭秤的阶跃函数响应, 以 1.2 W 的激光入射, 测得光力大小为 (0.39±0.03) nN^[48]。传统光力测量方案大多只能测量光致推力, 因此通过实验验证多轴光力效应是一项新挑战。扭秤具有原理简单、高灵敏度的优势, 经过巧妙设计的光力扭秤是测量多轴光力的有效工具之一。本文提出了两种基于弱力测量原理的扭秤设计方案, 用于精确测量衍射光帆所受光力。一种是通过精密加工与组装的扭秤, 可以精确测量外形规则的光帆样品所受的光力; 另一种是面向复杂物体的光力扭秤, 通过取放扭秤上的标准球可以测量不同形状的光帆样品所受的光力。

2 基本原理

2.1 光力效应原理与衍射光帆受力分析

光是一种电磁波, 当光作用在物体上时, 物体中的带电粒子受到电磁场的作用, 使整个物体受到力^[50-51]。假设电磁场空间区域 V 内有一定电荷分布, 对于电磁场中电荷受到的洛伦兹力为 $\mathbf{F} = e(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$, 力密度 $\mathbf{f} = \rho\mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 。根据麦克斯韦方程组, 可推导出

$$\mathbf{f} = -\nabla \cdot \mathbf{T} - \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t}, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{T} = \varepsilon_0 \mathbf{E}\mathbf{E} + \frac{\varepsilon_0}{2} \mathbf{I}E^2 - \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B}\mathbf{B} + \frac{1}{2\mu_0} \mathbf{I}B^2$ 为麦克斯韦应力张量, \mathbf{I} 为单位张量, $\mathbf{g} = \varepsilon_0(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$ 为电磁动量密度。式 (1) 对空间区域 V 积分得

$$\int_V \mathbf{f} dV + \frac{d}{dt} \int_V \mathbf{g} dV = - \int_V \nabla \cdot \mathbf{T} dV = - \oint_S d\mathbf{S} \cdot \mathbf{T}. \quad (2)$$

式 (2) 左边为区域 V 内电荷系统和电磁场的总动量变化率, 右边表示由区域 V 通过界面 S 流进的动量流。若 V 为全空间, 面积积分 $\oint_S d\mathbf{S} = 0$, 有:

$$\int_V \mathbf{f} dV + \frac{d}{dt} \int_V \mathbf{g} dV = 0, \quad (3)$$

即为动量守恒定律。当平面电磁波入射于表反射率为 R 的一般物体表面, 由于电磁波速度为 c , 则每秒通过单位截面的平面波的动量为 $\bar{\mathbf{g}}c$ 。设入射角为 θ , 则入射光动量法向分量为 $\bar{\mathbf{g}}c \cdot \cos\theta$, 且实际上入射于物体表面 $1/\cos\theta$ 的面积上, 因此入射光在单位面积上每秒作用于物体的动量法向分量为 $\bar{\mathbf{g}}c \cdot \cos^2\theta$ 。而对于反射光, 电磁波动量与入射光动量相同, 乘以反射率 R , 即为 $\bar{\mathbf{g}}cR \cdot \cos^2\theta$ 。由于电磁场的动量密度 $\bar{\mathbf{g}}$ 和能量密度 S 关系为: $\mathbf{g} = S/c^2$, 根据动守恒定律, 物体表面所受的辐射压力 (光力) 法向分量为

$$F_{\perp} = (1 + R)\bar{\mathbf{g}}c \cos^2\theta = (1 + R)\frac{\bar{S}}{c} \cos^2\theta. \quad (4)$$

基于超构表面技术的衍射光帆对光场有着灵活的调控能力, 可以实现斥力、吸引力、侧向力以及面内旋转力等力学作用^[11]。当激光作用于衍射光帆时, 其反射或透射光场满足广义折反射定律^[52] 并且存在多级衍射。以反射型几何相位超构表面为例, 超构表面为左右旋圆偏光 (LCP 和 RCP) 附加相反的相位梯度, 使得正交圆偏振的衍射光力方向关于法线对称, 如图 1 所示, 红光表示左旋圆偏振光 (LCP), 蓝光表示右旋圆偏振光 (RCP)。

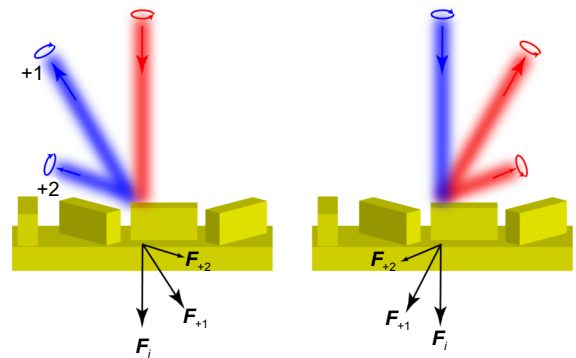


图 1 圆偏光作用下的反射型几何相位超构表面
Fig. 1 Reflective-type geometric-phase metasurface under the illumination of circularly polarized light

理论上, 任意一束偏振态的光均可分解为两束正交圆偏振光叠加, 假设 LCP 分量和 RCP 分量能量占比分别为 q_l 和 q_r ($q_l + q_r = 1$)。对于任意偏振的入射光垂直作用于超构表面产生的横向衍射光力可以表示为

$$F = \frac{P}{c}(q_1 - q_r) \sum \eta_m \sin \alpha_m, \quad (5)$$

其中: P 为光强, c 为真空中光速大小, η_m 为各级衍射效率, α_m 为各级衍射角。根据式 (5) 可以知道, 可以通过控制入射光偏振态以改变光力的大小与方向。而对于任意衍射光帆, 当波矢量为 k_i 的激光入射时, 设 R_m 、 T_m 分别第 m 级 ($m=0, 1, 2, 3, \dots$) 反射与透射光的衍射效率 ($\sum(R_m + T_m) = 1$), $k_{r,m}$ 、 $k_{t,m}$ 分别为第 m 级反射与透射光的波矢量, 所受光力可表示为

$$\begin{cases} F_x = \frac{P}{c}(k_i^x - \sum(R_m k_{r,m}^x + T_m k_{t,m}^x)) \\ F_y = \frac{P}{c}(k_i^y - \sum(R_m k_{r,m}^y + T_m k_{t,m}^y)) \\ F_z = \frac{P}{c}(k_i^z + \sum(R_m k_{r,m}^z - T_m k_{t,m}^z)) \end{cases}, \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} k_i = k_i^x + k_i^y + k_i^z \\ k_{r,m} = k_{r,m}^x + k_{r,m}^y + k_{r,m}^z \\ k_{t,m} = k_{t,m}^x + k_{t,m}^y + k_{t,m}^z \end{cases}. \quad (7)$$

光转矩可表示为

$$\begin{cases} \tau_x = l_y F_z - l_z F_y \\ \tau_y = l_z F_x - l_x F_z \\ \tau_z = l_x F_y - l_y F_x \end{cases}, \quad (8)$$

其中: l_x 、 l_y 、 l_z 为各方向力距。图 2 展示出了衍射光帆在矢量光场作用下所受的多轴光力, 衍射光帆上的合力可以看作是每个微结构产生的光力和扭矩的叠加。

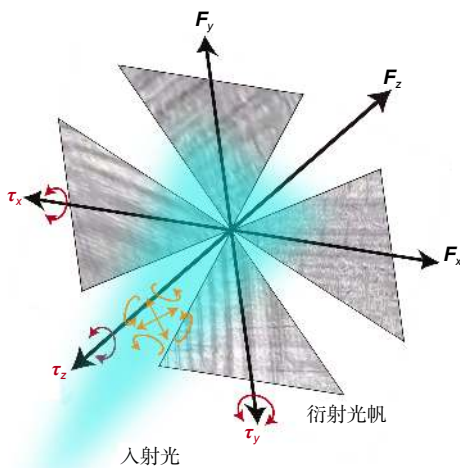


图 2 矢量光场作用下衍射光帆的多轴运动

Fig. 2 Multi-axis movement of the diffractive light sail under the illumination of vector optical fields

2.2 扭秤测量光力原理

图 3 为根据扭秤弱力测量原理对光力和光转矩进行精确测量与标定的示意图。在一根横杆两端固定待测样品组成扭摆, 横杆的中间粘贴反射镜用于测量扭秤转角 θ 。使用扭转弹性系数为 k 的扭丝将扭秤悬挂于高真空环境中, 忽略速度阻尼, 扭秤自由摆的运动方程可以写成以下形式:

$$I\ddot{\theta} + k\theta = 0. \quad (9)$$

求解方程可以给出扭秤的扭秤周期为 $T = 2\pi\sqrt{I/k}$, 其中 I 为扭秤的转动惯量。当光照射到样品表面时, 扭秤受到光力作用, 其平衡位置会发生变化, 使用自准直仪可以精确测量扭秤的平衡位置变化 $\Delta\theta$, 从而求出光力矩 τ 的大小:

$$\tau = FR = k\Delta\theta, \quad (10)$$

其中: F 为光力, R 为力臂。可以得到光力的表达式为

$$F = \frac{4\pi^2 I \Delta\theta}{RT^2}. \quad (11)$$

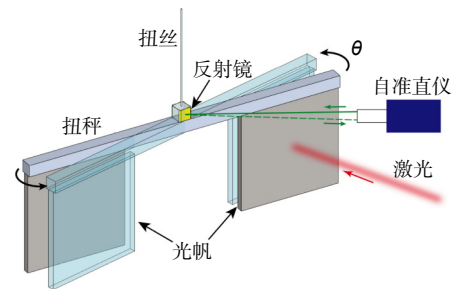


图 3 扭秤测量光力原理

Fig. 3 Principle of torsion pendulum for optical force measurement

3 光力测量方案

3.1 面向形状规则的衍射光帆光力扭秤设计

精确测量光帆等空间物体在矢量光场作用下所受的光力对于建立其动力学模型有着重要的作用。本文设计了一种精密扭秤, 实际实验时可通过精密加工、测量、组装等过程精确计算出扭秤的转动惯量, 结合自准直仪测量的角度数据, 计算出光力的准确结果。本方案旨在提高作用在形状规则的薄片型光帆样品表面的光力测量精度。

如图 4 所示扭秤的设计图, 由于激光长时间作用于光帆表面会导致扭秤温度上升, 为了降低温度对测力精度的影响, 使用热膨胀系数较低的石英玻璃作为面向形状规则衍射光帆的光力测量扭秤的主体材料。扭秤主体为 $200\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的石英玻璃秤杆,

秤杆上端连接石英玻璃, 石英玻璃侧面镀金膜作为反射镜。石英玻璃上端连接扭丝夹具, 结合套管连接扭丝。秤杆下端两侧各与一组样品夹具连接, 每组样品夹具由铝夹具与玻璃夹具组成, 二者间隙设计值为 0.75 mm。为了实现光帆的可拆卸设计, 在铝夹具上均匀地打 5 个螺纹孔, 可通过螺丝固定光帆, 夹具中心距扭秤中心设计值为 75 mm。扭秤质量设计值为 65.16 g, 通过理论计算该扭秤转动惯量 $I=2.7284 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

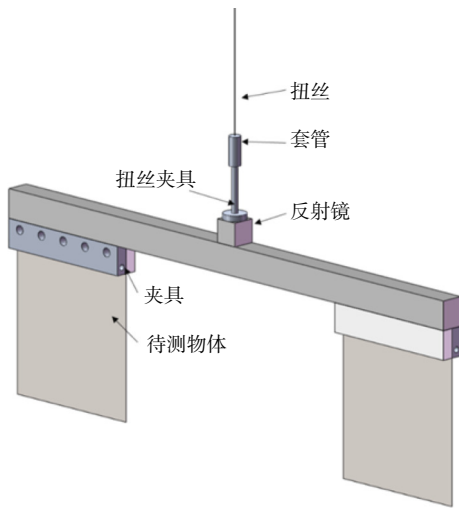


图 4 面向形状规则光帆样品的光力扭秤
Fig. 4 Optical force torsion pendulum for the regular-shaped light sail

拟采用直径 25 μm , 长度 0.3 m 的钨丝悬挂扭秤。钨丝最大屈服应力可以表示为 $F_s = \pi R^2 \delta_s$, 其中 R 为钨丝半径, δ_s 为拉伸屈服强度, 直径 25 μm 的钨丝的拉伸屈服强度取 3200 MPa, 所能承受的最大质量为 160.3 g。根据扭丝的扭转弹性系数公式 $k = \pi G_s d^4 / (32L)$, 其中 G_s 为扭丝的剪切模量, d 为钨丝的直径, L 为钨丝的长度, 根据公式可计算出扭丝的扭转弹性系数 k 的理论值为 $2.0 \times 10^{-8} \text{ Nm/rad}$, 可算得扭秤理论周期 $T=731.0 \text{ s}$ 。扭秤测量光力范围为 $\pm 2.0 \times 10^{-9} \text{ N}$, 力臂为 75 mm, 可算得扭秤平衡位置变化量 $\Delta\theta$ 为 $\pm 7.4 \text{ mrad}$ 。

将式 (11) 进行微分与误差合成可以得到测力误差的表达式为

$$dF = \sqrt{\frac{16\pi^4 I^2}{R^2 T^4} d\theta^2 + \frac{64\pi^4 I^2 \theta^2}{R^2 T^6} dT^2 + \frac{16\pi^4 I^2 \theta^2}{R^4 T^4} dR^2 + \frac{16\pi^4 \theta^2}{R^2 T^4} dI^2} \quad (12)$$

扭秤各组件尺寸测量与装配将在测量精度为 $(2+l/200) \mu\text{m}$ 的影像仪下进行 (l 为待测尺寸), 称量各

组件质量的天平精度可达 $\pm 0.01 \text{ mg}$, 扭秤的转动惯量 I 的理论误差为 $6.0 \times 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。对于扭转角 $\Delta\theta$ 的测量使用精度为 $\pm 1.2 \mu\text{rad}$, 测量范围为 $\pm 7.5 \text{ mrad}$ 的商用自准直仪来实现。扭秤运动周期 T 通过测量扭秤运动曲线拟合得出, 实际实验时需要考虑激光功率不稳定、修正温度效应等因素对周期 T 的影响, 例如, 可以使用激光功率稳定系统以降低功率波动对扭秤测力精度的影响, 理论上可满足 0.1 s 的周期测量误差。当待测光场光斑较大、光强分布不均匀时, 会导致扭秤所受光力的合力臂 R 难以精确确定, 在实际实验时可以采用平移光轴等方法规避这一问题, 其基本原理是使用功率恒定的激光垂直作用在光帆表面, 当激光光轴沿水平方向平移 Δd 的距离, 扭秤扭摆运动的平衡位置改变量为 $\Delta\alpha$, 则待求光力可表示为

$$F = \frac{k\Delta\alpha}{\Delta d} = \frac{4\pi^2 I \Delta\alpha}{T^2 \Delta d} \quad (13)$$

这里理论上取力臂 R 误差为 0.03 mm。表 1 给出了光力扭秤设计值及理论误差分配, 通过误差合成, 总的测量误差为 $1.1 \times 10^{-12} \text{ N}$, 理论上可达到 0.55% 的相对测量误差。

表 1 面向形状规则光帆样品的光力扭秤测光力理论误差
Table 1 Theoretical error in optical force measurement for the optical force torsion pendulum for the regular-shaped light sail

参数名称	中心值	理论误差	对待测力的影响/N
光力 F	$\pm 2.0 \times 10^{-9}$		
力臂 R	75 mm	0.03 mm	8.0×10^{-13}
转动惯量 I	$2.73 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$6.0 \times 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	4.4×10^{-13}
扭秤振幅 $\Delta\theta$	$\pm 7.4 \text{ mrad}$	1.2 μrad	3.2×10^{-13}
扭秤周期 T	730.1 s	0.1 s	5.5×10^{-13}
总误差			1.1×10^{-12}

3.2 面向形状复杂的衍射光帆光力扭秤设计

对于外形不规则的宏观物体、微观结构复杂的衍射光帆等目标, 其间的非周期电磁耦合、加工误差等因素会导致理论模型难以精确预测其所受的复杂光力效应^[11]。针对这一问题, 本文提出了一种面向复杂物体的光力扭秤设计方案, 如图 5 所示。扭秤核心部分为中间的扭秤横杆、横杆上的两个石英玻璃环以及直径为 10 mm 的标准球, 标准球放在两面抛光的石英玻璃环上。可使用机械装置对标准球进行取放操作。通过测量扭秤上有小球与无小球两种状态的周期可以求出扭丝的扭转弹性系数 k , 从而测量出扭秤所受外力矩大小。

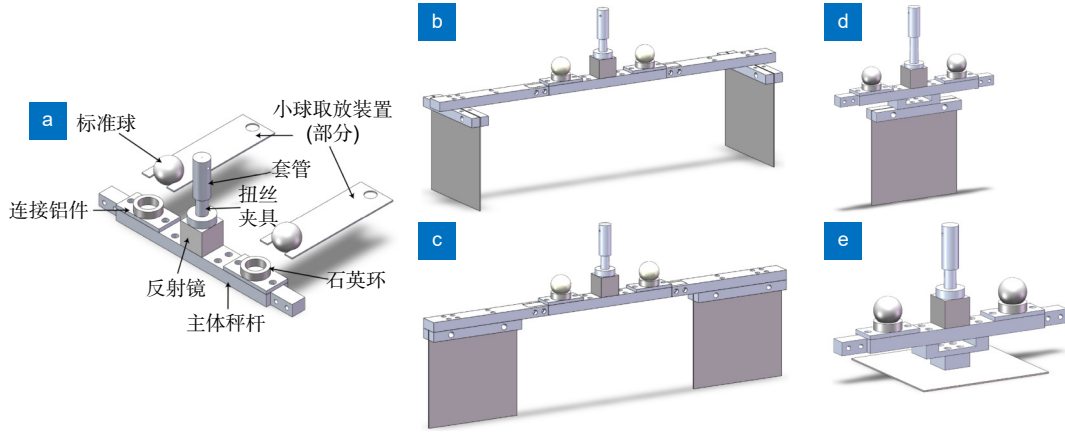


图 5 面向形状复杂光帆样品的光力扭秤。(a) 扭秤核心部分; (b-e) 六轴光力扭秤: (b) x,y 方向光力扭秤; (c) z 方向光力扭秤; (d) x,y 方向光转矩扭秤; (e) z 方向光转矩扭秤

Fig. 5 Optical force torsion pendulum for the irregular-shaped light sail. (a) Core part of the torsion pendulum; (b-e) Six-axis optical force torsion pendulum: (b) Optical force torsion pendulum in the x and y directions; (c) Optical force torsion pendulum in the z direction; (d) Optical torque torsion pendulum in the x and y directions; (e) Optical torque torsion pendulum in the z direction

当扭秤没有标准球时, 扭秤周期为 $T_1 = 2\pi\sqrt{I_1/k}$; 当扭秤放置标准球时, 通过精确确定标准球与扭秤准确的相对位置以及标准球的尺寸、质量等参数, 可以求出标准球的转动惯量 I_2 , 此时扭秤周期为 $T_2 = 2\pi\sqrt{(I_1+I_2)/k}$, 联合两次测量结果, 消去转动惯量 I_1 , 计算出扭丝的 k 值与标准球的转动惯量 I_2 以及有无球时扭秤的运动周期 T_1 、 T_2 的关系, 继而求出扭丝的 k 值和光力 F 的大小为

$$k = \frac{4\pi^2 I_2}{T_1^2 - T_2^2}, \quad (14)$$

$$F = \frac{k\Delta\theta}{R} = \frac{4\pi^2 I_2 \Delta\theta}{R(T_1^2 - T_2^2)}. \quad (15)$$

扭秤横杆可与不同夹具进行连接配合。针对复杂的待测物体, 可以对夹具进行差异化设计。夹具通过螺丝连接至扭秤横杆并锁紧, 因此可以便捷地切换各种待测样品, 高效地测量六轴光力。

对式 (15) 进行微分, 可以得到此时光力的误差计算公式为

$$\delta F = \sqrt{\left(\frac{4\pi^2 \Delta\theta}{R(T_1^2 - T_2^2)} \delta I_2\right)^2 + \left(\frac{4\pi^2 I_2}{R(T_1^2 - T_2^2)} \delta \theta\right)^2 + \left(\frac{4\pi^2 I_2 \Delta\theta}{R^2(T_1^2 - T_2^2)} \delta R\right)^2 + \left(\frac{8\pi^2 I_2 \Delta\theta T_1}{R(T_1^2 - T_2^2)^2} \delta T_1\right)^2 + \left(\frac{8\pi^2 I_2 \Delta\theta T_2}{R(T_1^2 - T_2^2)^2} \delta T_2\right)^2}. \quad (16)$$

以 z 方向光力测量扭秤为例, 图 5(c) 所示, 对扭秤误差进行分析。由于扭秤多数部件设计有螺孔, 因此设计使用便于加工的铝合金作为各部件材料, 扭秤

质量设计值为 72.17 g, 假设实验采用直径 25 μm , 长度 0.3 m 的钨丝对扭秤进行悬挂, 其扭转弹性系数 k 的理论值为 $2.0 \times 10^{-8} \text{ Nm/rad}$ 。样品夹具与铝横杆平行连接, 力臂为 75 mm。选用直径为 10 mm 的钨球作为标准球, 质量为 9.948 g, 距离扭丝中心 30 mm, 转动惯量为 $2457.2 \times 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。有小球时扭秤的转动惯量为 $2153.0 \times 10^{-7} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 扭秤的理论周期为 649.3 s。无小球时扭秤的转动惯量为 $1907.2 \times 10^{-7} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 扭秤的理论周期为 611.2 s。 z 方向光力测量扭秤的理论误差如表 2 所示, 总的测力误差理论上可以达到 $7.6 \times 10^{-12} \text{ N}$, 相对测量误差为 0.38%。

表 2 z 方向光力扭秤测光力理论误差
Table 2 Theoretical error in optical force measurement for the optical force torsion pendulum in the z direction

参数名称	中心值	理论误差	对待测力的影响/N
光力 F	$\pm 2.0 \times 10^{-9}$	—	—
力臂 R	75 mm	0.03 mm	8.0×10^{-13}
扭秤振幅 $\Delta\theta$	$\pm 7.44 \text{ mrad}$	1.2 μrad	3.2×10^{-13}
标准球转动惯量 I_b	$2.457 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$1.79 \times 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	1.5×10^{-12}
扭秤周期 T_1 (有球)	649.3 s	0.1 s	5.4×10^{-12}
扭秤周期 T_2 (无球)	611.2 s	0.1 s	5.1×10^{-12}
总误差			7.6×10^{-12}

4 结论

基于扭秤弱力测量技术, 本文分别提出了面向形状规则与不规则的衍射光帆的光力扭秤设计方案, 并对两种扭秤进行了理论误差分析。对于形状规则的衍射光帆, 通过严格控制扭秤的尺寸及各部件相对位置

误差等方法提高测量精度, 扭秤相对测量误差为 0.55%。为了对外形不规则的衍射光帆受到的光力进行精确测量, 本文提出一种适用于复杂物体的光力扭秤设计方案, 其核心部分为中间的扭秤横杆以及两个标准球。通过测量有球无球两种状态的扭秤运动, 可以准确给出扭丝的扭转弹性系数 k ; 通过设计不同的夹具可以测量不同样品所受到的光力, 该设计可以满足形状复杂的待测样品的光力测量需求。通过理论误差分析, 面向形状复杂衍射光帆的光力扭秤理论上可以达到 0.38% 的相对误差。本文设计的方案提升了光力的测量精度与实验的效率和灵活性, 为光帆推进、空间碎片轨道操控等应用奠定了基础。

参考文献

- Nichols E F, Hull G F. The pressure due to radiation. (second paper.)[J]. *Phys Rev (Series I)*, 1903, **17**(1): 26–50.
- Maxwell J C. A treatise on electricity and magnetism[J]. *Nature*, 1873, **7**(182): 478–480.
- Einstein A. Concerning an heuristic point of view toward the emission and transformation of light[J]. *Am J Phys*, 1965, **33**(5): 367
- Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. *Opt Lett*, 1986, **11**(5): 288–290.
- Long L, Deng Q R, Huang R T, et al. 3D printing of plasmonic nanofocusing tip enabling high resolution, high throughput and high contrast optical near-field imaging[J]. *Light Sci Appl*, 2023, **12**(1): 219.
- Chan J, Alegre T P M, Safavi-Naeini A H, et al. Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state[J]. *Nature*, 2011, **478**(7367): 89–92.
- Peterson R W, Purdy T P, Kampel N S, et al. Laser cooling of a micromechanical membrane to the quantum backaction limit[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, **116**(6): 063601.
- Tsuda Y, Mori O, Funase R, et al. Flight status of IKAROS deep space solar sail demonstrator[J]. *Acta Astronaut*, 2011, **69**(9-10): 833–840.
- Johnson L, Whorton M, Heaton A, et al. NanoSail-D: a solar sail demonstration mission[J]. *Acta Astronaut*, 2011, **68**(5-6): 571–575.
- Atwater H A, Davoyan A R, Ilic O, et al. Materials challenges for the Starshot lightsail[J]. *Nat Mater*, 2018, **17**(10): 861–867.
- Achouri K, Céspedes O V, Caloz C. Solar “meta-sails” for agile optical force control[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2019, **67**(11): 6924–6934.
- Ilic O, Atwater H A. Self-stabilizing photonic levitation and propulsion of nanostructured macroscopic objects[J]. *Nat Photonics*, 2019, **13**(4): 289–295.
- Swartzlander G A. Theory of radiation pressure on a diffractive solar sail[J]. *J Opt Sci Am B*, 2022, **39**(9): 2556–2563.
- Xu K, Wang X E, Fan X H, et al. Meta-holography: from concept to realization[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220183.
- 许可, 王星儿, 范旭浩, 等. 超表面全息术: 从概念到实现[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220183.
- Pu M B, Luo X G. Advancing nonlinear nanophotonics: harnessing membrane metasurfaces for third-harmonic generation and imaging[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(8): 230153.
- Zhang F, Pu M B, Li X, et al. Extreme-angle silicon infrared optics enabled by streamlined surfaces[J]. *Adv Mater*, 2021, **33**(11): 2008157.
- Zhang Y X, Pu M B, Jin J J, et al. Crosstalk-free achromatic full Stokes imaging polarimetry metasurface enabled by polarization-dependent phase optimization[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(11): 220058.
- Yang G, Guo Y H, Pu M B, et al. Miniature computational spectral detection technology based on correlation value selection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220130.
- 杨港, 郭迎辉, 蒲明博, 等. 基于相关性选择的微型计算光谱探测技术[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220130.
- Liu B, Xie X, Gan X T, et al. Applications and progress of all-metal metasurfaces in phase manipulation of electromagnetic waves[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(9): 230119.
- 刘博, 谢鑫, 甘雪涛, 等. 全金属超表面在电磁波相位调控中的应用及进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(9): 230119.
- Jiang M N, Chen Y, Zhang F, et al. Alignment-free angular momentum detection via spin-independent astigmatic transformation[J]. *Adv Opt Mater*, 2024, **12**(2): 2301314.
- Xie T, Zhang F, Pu M B, et al. Ultrathin, wide-angle, and high-resolution meta-imaging system via rear-position wavevector filter[J]. *Laser Photonics Rev*, 2023, **17**(9): 2300119.
- Zhang F, Guo Y H, Pu M B, et al. Meta-optics empowered vector visual cryptography for high security and rapid decryption[J]. *Nat Commun*, 2023, **14**(1): 1946.
- Lan X, Deng Q R, Zhang W T, et al. Efficient chiral absorber based on twisted catenary structure[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220157.
- 蓝翔, 邓钦荣, 张汶婷, 等. 基于扭转悬链线结构的高效手性吸波器[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220157.
- Ke L, Zhang S M, Li C X, et al. Research progress on hybrid vector beam implementation by metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230117.
- 柯岚, 章思梦, 李晨霞, 等. 超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230117.
- Chen Y Z, Pan W K, Jin X Y, et al. Far-field radiation manipulations of on-chip optical near-fields[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230173.
- 陈宜臻, 潘威康, 金相宇, 等. 片上光学近场的远场辐射调控[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230173.
- Shi Y Z, Xu X H, Nieto-Vesperinas M, et al. Advances in light transverse momenta and optical lateral forces[J]. *Adv Opt Photonics*, 2023, **15**(3): 835–906.
- Shen K H, Duan Y, Ju P, et al. On-chip optical levitation with a metalens in vacuum[J]. *Optica*, 2021, **8**(11): 1359–1362.
- Xu F, Liu Y, Zhang C, et al. Optically levitated conveyor belt based on polarization-dependent metasurface lens arrays[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(9): 2194–2197.
- Li X Y, Zhou Y, Ge S Y, et al. Experimental demonstration of optical trapping and manipulation with multifunctional metasurface[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(4): 977–980.
- Andrén D, Baranov D G, Jones S, et al. Microscopic metavehicles powered and steered by embedded optical metasurfaces[J]. *Nat Nanotechnol*, 2021, **16**(9): 970–974.
- Li H, Cao Y Y, Shi B J, et al. Momentum-topology-induced optical pulling force[J]. *Phys Rev Lett*, 2020, **124**(14): 143901.

- [32] Jin R C, Xu Y H, Dong Z G, et al. Optical pulling forces enabled by hyperbolic metamaterials[J]. *Nano Lett*, 2021, 21(24): 10431–10437.
- [33] Joly-Jehenne T, Davoyan A R. Anomalous reflection under ambient sunlight: accessing in-plane radiation pressure for solar sailing[Z]. arXiv: 2307.09750, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.09750>.
- [34] Dorrah A H, Rubin N A, Zaidi A, et al. Metasurface optics for on-demand polarization transformations along the optical path[J]. *Nat Photonics*, 2021, 15(4): 287–296.
- [35] Liu W W, Li Z C, Ansari M A, et al. Design strategies and applications of dimensional optical field manipulation based on metasurfaces[J]. *Adv Mater*, 2023, 35(30): 2208884.
- [36] Luo X G. Multiscale optical field manipulation via planar digital optics[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(7): 2116–2127.
- [37] Ziebart M, Adhya S, Sibthorpe A, et al. Combined radiation pressure and thermal modelling of complex satellites: algorithms and on-orbit tests[J]. *Adv Space Res*, 2005, 36(3): 424–430.
- [38] Cui J S, Li C R, Liu Y F. Development of a light pressure observatory[J]. *Phys Exp*, 1999, 19(1): 29–30. 崔金松, 李成仁, 刘玉凤. 光压观测仪的研制[J]. *物理实验*, 1999, 19(1): 29–30.
- [39] Long T, Zhao G Q, Du B Q, et al. Measuring light pressure using piezoelectric ceramic[J]. *Phys Exp*, 2016, 36(11): 20–22. 龙腾, 赵改清, 杜炳清, 等. 应用压电陶瓷测量光压[J]. *物理实验*, 2016, 36(11): 20–22.
- [40] Nesterov V. Facility and methods for the measurement of micro and nano forces in the range below 10^{-5} N with a resolution of 10^{-12} N (development concept)[J]. *Meas Sci Technol*, 2007, 18(2): 360–366.
- [41] Nesterov V. A nanonewton force facility and a novel method for measurements of the air and vacuum permittivity at zero frequencies[J]. *Meas Sci Technol*, 2009, 20(8): 084012.
- [42] Nesterov V, Mueller M, Frumin L L, et al. A new facility to realize a nanonewton force standard based on electrostatic methods[J]. *Metrologia*, 2009, 46(3): 277–282.
- [43] Williams P A, Artusio-Glimpse A B, Hadler J A, et al. Radiation-pressure-enabled traceable laser sources at CW powers up to 50 kW[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2019, 68(6): 1833–1839.
- [44] Williams P, Hadler J, Maring F, et al. Portable, high-accuracy, non-absorbing laser power measurement at kilowatt levels by means of radiation pressure[J]. *Opt Express*, 2017, 25(4): 4382–4392.
- [45] Zhao L Q, Sun Z S, Yu D Y, et al. Measurement repeatability of high power laser measuring device based on light pressure[J]. *Chin Opt*, 2023, 16(2): 382–389. 赵利强, 孙振山, 于东钰, 等. 光压型高功率激光测量装置的测量重复性研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(2): 382–389.
- [46] Masalov A V. First experiments on measuring light pressure I (pyotr nikolaevich lebedev)[M]//Boyd R W, Lukishova S G, Zadkov V N. *Quantum Photonics: Pioneering Advances and Emerging Applications*. Cham: Springer, 2019: 425–453. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98402-5_12.
- [47] Chu Y J L, Jansson E M, Swartzlander Jr G A. Measurements of radiation pressure owing to the grating momentum[J]. *Phys Rev Lett*, 2018, 121(6): 063903.
- [48] Chu Y J L, Tabiryann N V, Swartzlander Jr G A. Experimental verification of a bigrating beam rider[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, 123(24): 244302.
- [49] Liu Z G, Huang G S, Li Z Z, et al. Measuring light pressure based on mechanical resonance[J]. *Phys Exp*, 2017, 37(1): 1–6, 12. 刘泽刚, 黄耿石, 李振柱, 等. 基于谐振的光压测量[J]. *物理实验*, 2017, 37(1): 1–6, 12.
- [50] Guo S H. *Electricity and Magnetism*[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2008: 180–185. 郭硕鸿. 电动力学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 180–185.
- [51] Ye Q, Lin H Z. On deriving the Maxwell stress tensor method for calculating the optical force and torque on an object in harmonic electromagnetic fields[J]. *Eur J Phys*, 2017, 38(4): 045202.
- [52] Zhao Z Y, Pu M B, Wang Y Q, et al. The generalized laws of refraction and reflection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, 44(2): 129–139. 赵泽宇, 蒲明博, 王彦钦, 等. 广义折反射定律[J]. *光电工程*, 2017, 44(2): 129–139.

作者简介



龚攀 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事微纳光学、扭秤测力方面的研究。

E-mail: gongpan21@mails.ucas.ac.cn



【通信作者】罗先刚 (1970-), 男, 博士, 研究员, 中国工程院院士, 中国光学学会会士, 美国光学学会 (Optica) 会士, 国际光学工程学会 (SPIE) 会士, 主要研究方向包括微纳光学、表面等离子体光子学、亚波长电磁学和悬链线光学。

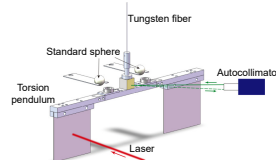
E-mail: lxg@ioe.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Torsion pendulum design for metasurface-based diffraction light sail optical force measurement

Gong Pan^{1,2,3,4}, Du Anbin^{1,2,3}, Zhang Fei^{1,2,3}, Pu Mingbo^{1,2,3,4}, Tang Tuojiang^{1,2,3,4},
Li Lanting⁵, Luo Xiangang^{1,2,4*}



The optical force torsion pendulum for irregular-shaped light sails

Overview: The exchange of momentum between photons and objects is what optical force is all about. The research of optical forces can be traced back to the astronomer Kepler's observations of comet tails. The understanding of the optical force has been enhanced by the Maxwell's classical electromagnetic field theory and Einstein's light quantum model. The continuous development of lasers has led to a new stage in optical technology, such as optical tweezers, laser cooling, and solar sails. Light sails are considered one of the ways to achieve interstellar travel, with the advantages of not needing to carry propellant and carrying a high payload. In recent years, the continuous development of metasurface technology has enabled researchers to apply diffraction optical force technology based on sub-wavelength structures to light sails to solve the problems of traditional solar sails, such as difficult attitude control and limited acceleration, thereby improving the feasibility of light sail driving technology. Spatial positions have an impact on the polarization state of the vector optical. When combined with spatially multiplexed metamaterial surfaces, the degrees of freedom for attitude manipulation of the diffractive light sail can be increased, leading to greater maximum acceleration, self-stabilizing thrust, and attitude controllability. In space, even subtle mechanical effects can cause the flight trajectory of the diffraction light sail to deviate from the preset orbit. Experimentally verification is necessary for the mechanical effects between the diffraction light sail and the vector optical field. Therefore, accurately measuring the multi-axis optical force generated by the diffraction light sail under vector light fields is crucial. There are few experiments that directly measure optical force in the world, and the measurement accuracy is generally not high. These experiments usually use torsion pendulums, piezoelectric crystals, flat capacitors, and other measurement tools. Based on the weak force measurement technology of torsion pendulums, this paper proposes the design of optical force torsion pendulums for regular-shaped and irregular-shaped diffraction light sails, and performs error analysis on the two torsion pendulums. For regular-shaped light sails, measurement accuracy can be improved by strictly controlling the size of the torsion pendulum and the relative position errors of each component. The force measurement has a relative error of 0.55%. In order to meet the optical force measurement of irregular-shaped light sails and reduce the requirements for the processing accuracy and assembly accuracy of each component of the torsion pendulum, this article proposes a design scheme for an optical torsion pendulum suitable for complex objects. The fundamental element is the mid torsion pendulum horizontal rod and two standard balls. Measurement of the torsion pendulum's motion with and without the ball allows for accurate k -value estimation of the system. Different fixtures designed to match the main body of the torsion pendulum can be used to measure the light force on different samples. Complex shapes can be accommodated by this design. The optical power measurement needs to be tested on the sample. The optical torsion pendulum for irregular-shaped light sails is theoretically capable of achieving a relative error of 0.38% through theoretical error analysis. The design of this article enhances the accuracy of optical force measurement and the efficiency and flexibility of experiments, paving the way for applications like laser-driven light sail propulsion and space debris remediation.

Gong P, Du A B, Zhang F, et al. Torsion pendulum design for metasurface-based diffraction light sail optical force measurement[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240040; DOI: 10.12086/oe.2024.240040

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (12304489)

¹National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ²State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ³Research Center on Vector Optical Fields, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ⁴College of Materials Sciences and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁵Tianfu Xinglong Lake Laboratory, Chengdu, Sichuan 610299, China

* E-mail: lxg@ioe.ac.cn