

# 激光与光电子学进展

## 惯导应用中光力加速度计前沿研究综述

王一松, 胡姝玲\*, 张雍丰

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 光力加速度计的测试质量不受外界环境干扰并且它的光学检测精度高, 可实现超灵敏加速度探测, 广泛应用于各种惯性导航、超精密微重力探测、娱乐等领域。光力加速度计系统分为装载、光阱捕获、位移探测与冷却反馈四大模块, 从实践角度分别对各模块现有技术进行梳理总结。未来, 光力加速度计会以各模块简约化与紧凑化为目的进行发展, 与此同时, 其加速度探测精度与可靠性也会不断提升。

**关键词** 惯性导航; 光力加速度计; 真空微球装载; 真空光阱; 光强探测; 图像探测

中图分类号 TH824

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1100008

### Review on Frontier Research of Optical Force Accelerometer in Inertial Navigation Application

Wang Yisong, Hu Shuling\*, Zhang Yongfeng

School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** The test quality of optical force accelerometer is isolated from the external environment, and the optical detection accuracy is excellent. It can detect ultrasensitive acceleration and is widely used in different navigation systems, ultraprecision microgravity detection, entertainment, and other fields. The optical accelerometer system comprises four modules: a loading module, an optical trapping module, a displacement detection module, and a cooling feedback module. From a practical standpoint, the existing technical methods of each module are combed and summarized in this research. The optical accelerometer will be developed in the future for simplifying and compacting each module, and its acceleration detection accuracy and reliability will be continuously improved during this process.

**Key words** inertial navigation; optical force accelerometer; vacuum microsphere loading; vacuum optical trapping; light intensity detection; image detection

## 1 引言

加速度计能根据当前载体运动的线加速度对整个运动信息进行推算, 广泛应用于各种交通工具的惯性导航系统、汽车自动驾驶、微重力精密测量、娱乐等领域。不同应用场景对加速度计的参数指标要求不同, 但在尺寸上均存在小型化的需求<sup>[1]</sup>。2005年 Kelleher<sup>[2]</sup>明确提出光力加速度计的概念, 它是一种以牛顿第二定律为基础的力平衡式闭环传感器<sup>[2]</sup>, 其加速度可通过观测微球位移并计算而获得。

与机电式加速度计相比, 光力加速度计无需耐磨表面和弯曲支撑结构, 因而可以被设计成线性形状; 在实际操作过程中还可根据实时数据对其系统参数进行校准; 系统结构上, 光力加速度计由于采用集成光学和光纤组件, 因而可使仪器的空间尺寸最小化<sup>[3-5]</sup>。此外, 光力加速度计的微球与外界环境高度隔离, 且位移探测采用高精度光学手段, 因而它在超灵敏加速度探测领域拥有极大的潜力。

超精密微重力探测是空间探测计划中的重要环节之一, 常使用加速度计的噪声功率谱密度来代表

收稿日期: 2021-07-30; 修回日期: 2021-08-25; 录用日期: 2021-08-30

通信作者: huixi@buaa.edu.cn

其探测的最小加速度,通常称为该加速度计的灵敏度或分辨率。除文献[2]外,国外研制光力加速度计系统的机构主要有麻省理工学院(MIT)、斯坦福大学与耶鲁大学。2006年至2008年,MIT在恒定1g重力加速度环境中,分别使用垂直单光束与水平双光束,利用直径为10 μm的微球获得优于100 μg·Hz<sup>-1/2</sup>的加速度灵敏度<sup>[1,3]</sup>。2018年,斯坦福大学采用外差探测法,用垂直单光束与直径为4.8 μm的微球得到优于10 μg·Hz<sup>-1/2</sup>的加速度灵敏度<sup>[6]</sup>。2017年至2020年,耶鲁大学使用垂直单光束与直径为23 μm的微球<sup>[7]</sup>,并添加照明光辅助探测与“环外”反馈<sup>[8]</sup>,将加速度灵敏度提升至(95±41)ng·Hz<sup>-1/2</sup>。

国内光力加速度计的研制起步稍晚,目前从事光力加速度计研究的有浙江大学、国防科技大学等,他们在液态光阱芯片相关研究中取得了一定进展。其中,浙江大学胡慧珠等<sup>[9-10]</sup>设计了液浮式片上光阱传感单元,并对多种微球装载方法进行仿真模拟;国防科技大学罗辉等<sup>[11-12]</sup>系统分析了液态环境中微球在水平双光束光阱作用下的动态特性和位移探测。中国科学技术大学的研究人员主要开展对真空中微球的参量反馈调节机制的研究<sup>[13]</sup>。近年来,浙江大学和国防科技大学也在原有液态光阱芯片的研究基础上开展对真空光力加速度计的研究<sup>[14-16]</sup>。

本文中,我们从基本原理出发,分析光力加速计中激光导引的具体形式,对加速度测量的方法进行阐述,并对光力加速计四个系统模块:装载、光阱捕获、位移探测、冷却反馈,从实践的角度分别进行综述。

## 2 基本原理

### 2.1 理论模型

光力加速度计可看作一个光弹簧,如图1所示,微球在轴向移动的位移为 $z$ 时,微球受到的力 $F = -kz$ ,其中 $k$ 定义为光阱刚度,保持这一参数稳定是获取高精度加速度信息的关键。所谓的光阱指对称的梯度光场与微球相互作用时,形成一种能束缚微球的势阱<sup>[17-18]</sup>。根据牛顿第二定律 $F = ma$ ,其中 $m$ 为测试质量,则微球的轴向瞬时加速度 $a = -kz/m$ 。光力加速度计中测试质量通常为pg~ng级,在整个系统的测试过程中通常认为微球质量 $m$ 是固定不变的,但实际测试中微球会由于光吸收质量发生变化,因而微球质量的不确定性是光力加速度计系统误差的主要来源<sup>[7-8]</sup>。

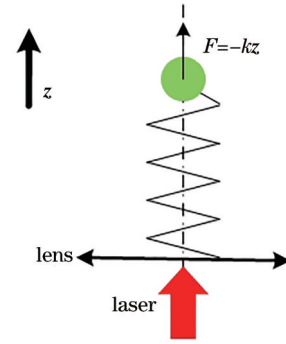


图1 光弹簧示意图

Fig. 1 Optical spring diagram

### 2.2 激光导引 F

激光导引也称为光辐射压力,通过激光束将微球控制在光阱中。其物理模型可根据微球半径 $r$ 与激光工作波长 $\lambda$ 的比值划分为瑞利模型<sup>[19-23]</sup>( $r \ll \lambda$ )、米氏模型<sup>[24-25]</sup>( $r \approx \lambda$ )和几何模型<sup>[26-28]</sup>( $r \gg \lambda$ )。这三种模型均较为成熟,可直接利用现有的编程软件进行处理<sup>[29-30]</sup>。考虑到构建光阱一般使用1064 nm的激光,根据动量守恒定律,当激光照射在微球表面时,光子的动量传递至微球,几何模型下微球受到的激光导引<sup>[30]</sup>为

$$F = Q \frac{np}{c}, \quad (1)$$

式中: $Q$ 代表捕获效率, $p$ 代表激光功率, $n$ 代表介质折射率, $c$ 为光速。一般的激光导引可以看成轴向散射力( $F_{\text{scat}}$ )和径向梯度力( $F_{\text{grad}}$ )的合力。图2显

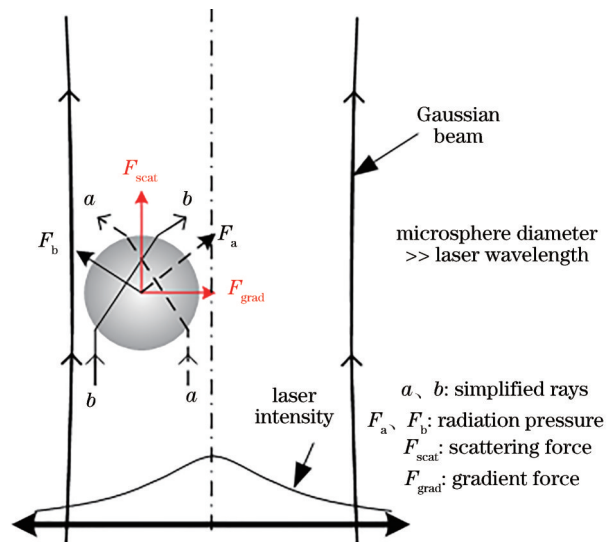


图2 离轴的高折射率微球在弱聚焦高斯光束近场中受到的散射力和梯度力示意图<sup>[31]</sup>

Fig. 2 Scattering force and gradient force of off-axis high index microsphere in the near-field of a mildly focused Gaussian beam<sup>[31]</sup>

示的是由高斯光束构成的光阱中的微球的受力情况(未标明重力)。考虑到尺寸因素,微球大多数偏离光束中心,此时微球除受重力外,还受到光线  $a$  的激光导引和光线  $b$  的激光导引。由于高斯光束光强分布不均匀,此时偏离激光束中心的微球会受到指向中心的径向梯度力作用,始终使微球向高斯光束中心移动,从而实现微球的三维俘获。

### 2.3 加速度 $a$

根据谐振子运动模型,参考图 2 中微球与激光导引分布的关系,可得任一自由度方向上微球加速度的功率谱密度(PSD)公式<sup>[32-33]</sup>为

$$\langle S(\omega) \rangle = \frac{4k_B \Gamma T}{m} \left[ \frac{\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \Gamma^2 \omega^2} \right], \quad (2)$$

式中:  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为微球的质心温度;  $\omega_0$  为激光导引下微球的谐振角频率;  $\Gamma$  代表系统阻尼系数。阻尼系数  $\Gamma$  和激光导引下微球的谐振角频率  $\omega_0$  可以通过微球位移测量实验数据拟合直接获得。因此将位移和谐振频率关联起来的光阱刚度  $k$  成为整个系统理论分析和获取加速度信息的关键。

光阱刚度可以将测量的位移变化量转换为微球的加速度数据<sup>[34]</sup>,且仅当谐振子处于欠阻尼状态时,通过数据拟合获得谐振角频率  $\omega_0$  和阻尼系数  $\Gamma$ 。当谐振子处于欠阻尼状态时,谐振角频率  $\omega_0$  和阻尼系数  $\Gamma$  的关系需要满足  $\Gamma < 2\omega_0$ ,图 3 中可以看出欠阻尼状态可以通过提高真空度来获得<sup>[35-36]</sup>。

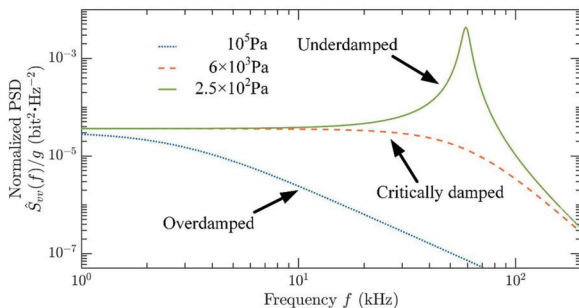


图 3 不同压强下微球沿捕获光束传播方向运动的归一化 PSD。三条曲线分别代表欠阻尼,临界阻尼与过阻尼状态<sup>[35]</sup>

Fig. 3 Normalized PSD of the microsphere moving along the propagation direction of the trapped beam under different pressures. The three curves represent underdamped, critically damped and overdamped statuses respectively<sup>[35]</sup>

## 3 光力加速度计

围绕基本原理构建光力加速度计的实践,经过调研<sup>[37-42]</sup>可以看出光力加速度计可包含四个模块:装载、光阱捕获、位移探测、冷却反馈。装载模块是将干燥的微球装载至光阱捕获范围内;光阱捕获模块则是在真空环境下,将微球稳定俘获在激光导引范围内;位移探测模块可以快速精准地获取激光导引下微球的三维位置信息;冷却反馈模块扩大光力加速度计的量程,同时降低系统噪声。图 4 为各模块之间的联系与技术路线。

### 3.1 装载模块

微球装载成功与否直接决定光力加速度计系统能否正常启动与持续工作,该模块设计有间接装载和直接装载两种方式。微球装载锁定技术为间接装载,直接装载的方法则包括压电换能器振动和光子晶体光纤输运。在整个模块中需要注意避免污染以保持高真空环境(即欠阻尼状态)。

#### 3.1.1 微球装载锁定技术

微球装载锁定技术是预先使用装载腔室锁定微球,而后在运载装置作用下将微球推至实验腔室。图 5 所示为西班牙光电科学实验室的研究人员<sup>[17]</sup>设计的微球装载锁定装置<sup>[43]</sup>,图中单模光纤 1 安装在三维各方向可移动的机械馈通<sup>[44]</sup>上,机械馈通包括光纤、准直器和透镜组,可以将输入激光会聚到锁定区域 2 处。在常压下使用喷雾装置将微球送入装载腔室 A 的锁定区域 2 处,然后将装载腔室 A 的压力降至高真空度范围,再打开腔室 B 与装载腔室 A 之间的阀门,三维调节机械馈通将处于装载腔室 A 中的微球推至腔室 B 中,此过程可以通过雪崩二极管(APD)探测微球的散射场 3 或电荷耦合器件(CCD)相机在各视口的图像来观测。需要注意腔室 B 保持高真空,高精度常数的光学腔室 4 放置在腔室 B 的内部。

#### 3.1.2 压电陶瓷振动

与间接装载相比,直接加载的方法对应的结构相对简单,实施起来也更容易。压电换能器振动的方法主要利用压电陶瓷的振动特性,图 6 中,压电换能器(PZT)在高功率脉冲发射器作用下沿厚度方向周期性振动<sup>[45-47]</sup>,这为附着在发射基板表面的干燥微球提供初始加速度,在该加速度加持下微球克服与发射基板之间的粘着力进入捕获区域<sup>[48]</sup>。



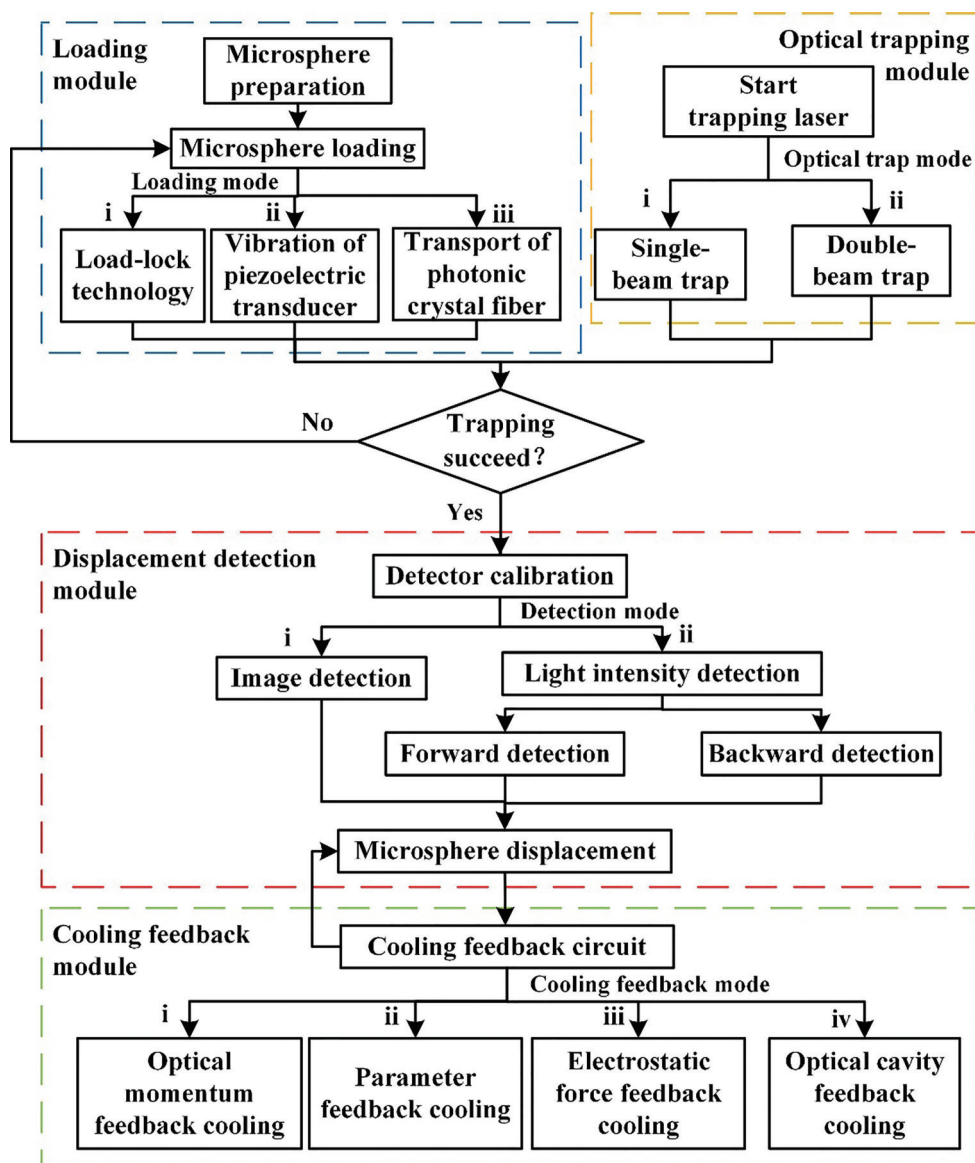


图 4 总体布局图

Fig. 4 General layout diagram

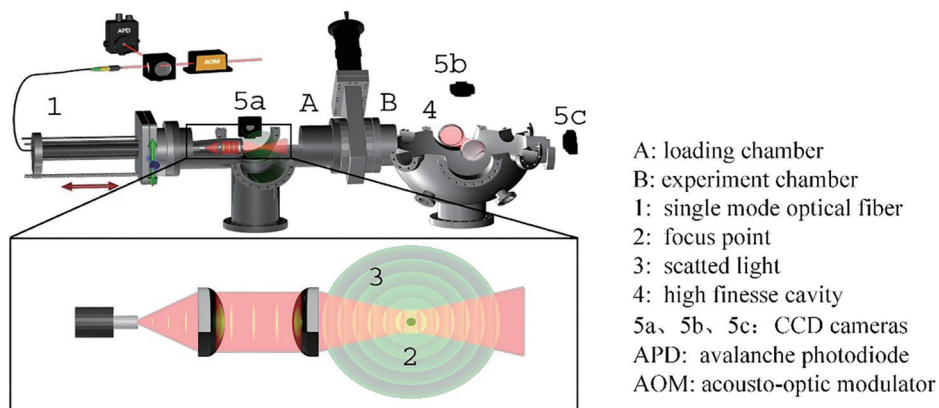


图 5 负载锁定技术示意图<sup>[43]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of load-lock technology<sup>[43]</sup>

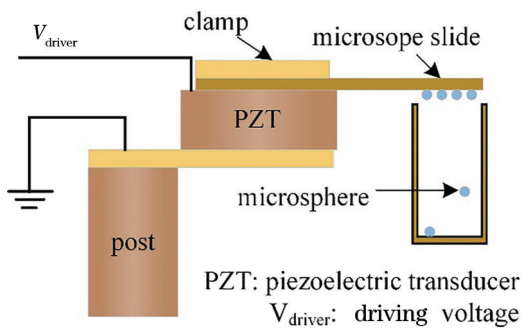


图 6 压电换能器振动示意图<sup>[47]</sup>

Fig. 6 Vibration diagram of piezoelectric transducer<sup>[47]</sup>

### 3.1.3 光子晶体光纤运输

从图 6 可以看出微球发射的过程是随机和不受控制的,因而有研究人员添加空心光子晶体光纤(HC-PCF)以增加对微球发射过程的调控<sup>[49]</sup>,如图 7 所示,使用压电换能器振动或喷雾器等方法将微球送入 HC-PCF 一端的纤芯中,向 HC-PCF 中注入激光,激光导引下的微球在散射力  $F_{scat}$  的推动下移动到 HC-PCF 另一端的捕获范围内。

装载锁定技术可以实现高真空度( $10^{-4}$  Pa)下的微球装载,但预先装载腔室和机械馈通的添加造成设备复杂且体积庞大,不便于设计紧凑的光力加速度计;光子晶体光纤输运可实现低真空度( $10^{-1}$  Pa)下的微球输运,但不易使用成像器件监测输运过程<sup>[50-51]</sup>;压电换能器振动装置简单,且能使用成像器件直接检测微球状态,但装载的微球数量和运动方向不易控制。这三种装载方法各有优势,在相关报道中由于成本低且微球检测便利,使用压电换能器振动的方法居多。此外,激光诱导声波解吸法可以实现微球的高真空度装载<sup>[52]</sup>,但该方法仅在磁阱中

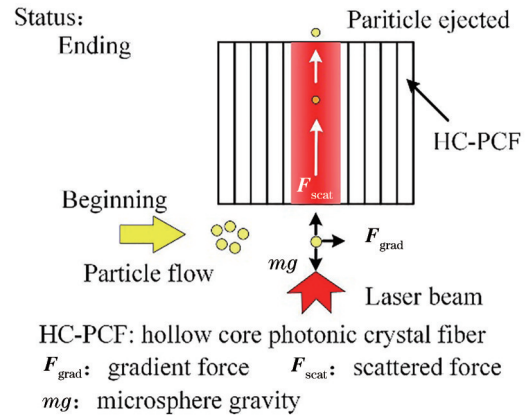


图 7 空心光子晶体光纤运输示意图<sup>[50]</sup>

Fig. 7 Transport diagram of HC-PCF<sup>[50]</sup>

得到应用。

### 3.2 光阱捕获模块

最常见的光阱捕获技术手段多在光镊中,严格地讲是一种特殊的“光镊”应用,因而许多常规真空光镊的技术可以直接移植到光力加速度计的设计中<sup>[36,53]</sup>。光力加速度计中光阱与常规光镊的区别在于:1) 应用对象不同,常规光镊所夹持的对象大多为细菌、病毒等生物对象,而光力加速度计中主要的测试对象为透明、低吸收率的光学介质<sup>[54-57]</sup>;2) 环境要求不同,光力加速度计要求高真空度,因此在装载中应避免引入污染源,故不宜直接使用常规光镊中使用的液化装置进行微球装填<sup>[55-56]</sup>。

图 8 所示的实验装置为装载和光阱捕获一体化模块<sup>[26]</sup>,封闭环境中的微球在环形压电陶瓷 PC 振动下克服与玻璃基板 P 之间的粘着力,由捕获光束 BEAM1 捕获,捕获后的微球在平衡位置 E 处往复振动,可通过观察窗 M2 明确微球的捕获情况。

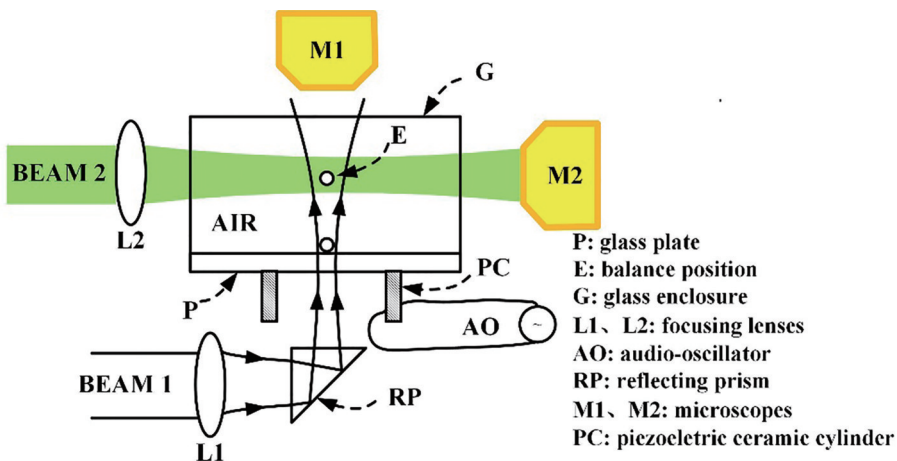


图 8 微球光阱捕获实验装置图<sup>[26]</sup>

Fig. 8 Microsphere optical trap apparatus diagram<sup>[26]</sup>

光阱捕获模块主要有单光束光阱与双光束光阱两种形式,如图 9 所示。捕获光束要拥有大的束腰范围和瑞利长度,即扩大捕获光阱的深度和宽度,在光阱刚度不变的情况下,这将使光力加速度计拥有更大的探测量程,同时也可防止微球逃逸,提高系统的可靠性。

垂直向上的单光束光阱可以使用低数值孔径

( $NA$ )的聚焦透镜<sup>[7-8]</sup>,因此单光束光阱可提供更大的瑞利长度,适合较大直径微球的捕获<sup>[58]</sup>。由图 9(a)中受力分析可以得出,微球的重力  $mg$  被散射力  $F_{scat}$  抵消,但单光束光阱中的微球在外界压强变化时容易丢失,需要相应反馈调节模块将微球维持在平衡位置<sup>[13]</sup>。

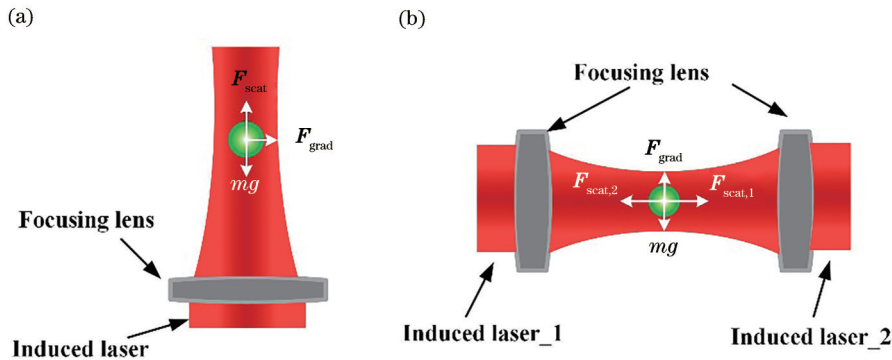


图 9 典型光阱示意图。(a)垂直向上的单光束光阱;(b)传播方向相对的水平双光束光阱

Fig. 9 Schematic diagram of typical optical trap. (a) Upward single-beam trap; (b) counter-propagating horizontal double-beam trap

传播方向相对的水平双光束光阱常使用高  $NA$  的聚焦透镜<sup>[14]</sup>,当两束传播方向相反的诱导激光的输出功率相同时,根据图 9(b)的受力分析可得,轴向上散射力  $F_{scat,1} = F_{scat,2}$ ,微球此时仅受梯度力  $F_{grad}$  调控,这有利于微球的运动及受力分析,且通过调节双光束的功率大小可以在轴向调节微球运动<sup>[18,45]</sup>。当两诱导激光功率不等时,轴向上微球会

靠近输出功率小的一侧,但双光束光阱的稳定性需要保证两光束严格对准,需要专用的对准装置保证两束激光的光路重合<sup>[12,15]</sup>。目前单光束光阱的最佳实验结果为  $(95 \pm 41) \text{ ng} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ,双光束光阱暂无明确实验报道。表 1 列出单光束与双光束的主要实验参数和研究单位。

表 1 捕获光阱模块类型对比

Table 1 Comparison of capture trap module types

Optical trap mode	Single-beam trap <sup>[7,19]</sup>	Double-beam trap <sup>[24,46]</sup>
Microsphere diameter	50 nm-25 $\mu\text{m}$	500 nm-10 $\mu\text{m}$
Strength	Compact and flexible, large Rayleigh length	Stabilization, only gradient force
Limitation	Easy to lose when the pressure changes, complex force analysis	Strict alignment, high precision circuit control
Main research organizations	Purdue University <sup>[59-60]</sup> , University of Southampton <sup>[23-61-62]</sup> , The Institute of Photonic Science <sup>[63-65]</sup> , Yale University <sup>[7,66]</sup> , Stanford University <sup>[67-68]</sup> , University of Science and Technology of China <sup>[69-70]</sup>	ETH Zurich <sup>[22-71-72]</sup> , The University of Texas <sup>[24]</sup> , University of Nevada <sup>[46,73]</sup> , Zhejiang University <sup>[10,28,74]</sup> , National University of Defense Technology <sup>[11-12]</sup>

### 3.3 位移探测模块

位移探测模块的功能是快速精准地获取激光引导下微球的位移信息,光力加速度计中尤其强调该模块的位移探测精度与实时处理性能。根据探

测器种类,可将位移探测分为光强式与图像式。光强式探测是利用位置敏感探测器(PSD)、四象限探测器(QPD)或平衡探测器(BPD)直接对微球散射光场的光强进行探测<sup>[24,75]</sup>;图像式探测则是使用



CCD 传感器或互补金属氧化物半导体 (CMOS) 传感器直接获取微球在光场中的具体图像<sup>[76-77]</sup>。

### 3.3.1 位移探测主要方式

#### 1) 光强探测

微球被光辐照后产生散射光, 散射光的变化反映了微球的动态位置信息<sup>[78]</sup>。光强式探测多数情况下是利用 PSD、QPD 或 BPD 检测散射光的变化<sup>[79-80]</sup>。光强式探测具有 MHz 的高采样率, 适用于真空环境中高速随机运动的微球探测。

根据信号光传播方向与探测器的相对位置关系, 光强探测可分为前向探测和后向探测<sup>[81-82]</sup>, 如图 10 所示。图 11 为斯坦福大学 Rider 团队<sup>[6]</sup>的探测模块示意图, 该团队利用 QPD 对微球径向位移 (X,

Y 方向) 进行前向探测, 而采用后向探测获取微球的轴向位移 (Z 方向)。

为快速准确获取微球的位置信息, 微球三个自由度方向的中心位置需要预先确定。中国科学技术大学郑瑜等<sup>[69]</sup>利用道威棱镜 (Dove prism) 辅助微球位置测量, 实现微球位置探测过程中 XY 方向的自由切换。

#### 2) 图像探测

图像探测是使用 CCD 或 CMOS 相机记录被捕获微球的动态图像过程<sup>[78]</sup>, 在设计时需要注意相机的响应波长、曝光时间、空间分辨率以及帧率<sup>[37,83]</sup>。光力加速度计中微球常被放置于带光窗的真空腔中, 为提高获取图像的清晰度常使用可见光对微球进行照明操作, 若采用近红外光对微球进行照明则需要使用响应近红外的特定相机<sup>[84]</sup>。得到微球的动态图像后, 需要选择图像处理技术提取微球位移数据, 常用的图像处理法有: 质心算法<sup>[16]</sup>、高斯匹配法算法<sup>[85]</sup>、相关算法<sup>[86]</sup>、绝对差算法<sup>[87]</sup>。

大多数高速相机的帧数在几十至百 Hz 之间, 在采集过程中容易丢失 kHz 以上的信号, 不能满足高速运动的探测。但在使用 CMOS 相机进行探测时, 通过选取探测感兴趣的区域, 降低空间分辨率, 可以得到 kHz 以上的高速采集频率<sup>[88-89]</sup>, 也可采用超高速分辨结构光照明显微技术提高位移探测精度与成像速度<sup>[90-91]</sup>。

为获得更高的图像清晰度与探测精度, 如图 12 所示, 耶鲁大学 Moore 团队<sup>[7]</sup>选用 532 nm 的绿光进行照明。两束照明光中一束沿捕获光束的传播路径

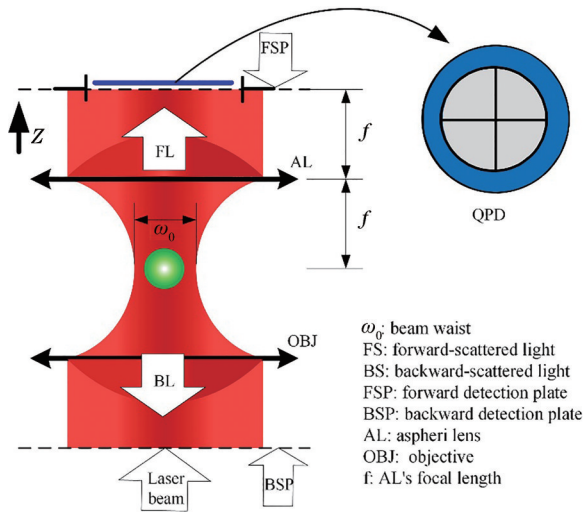


图 10 前向探测与后向探测示意图<sup>[81]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of forward detection and backward detection<sup>[81]</sup>

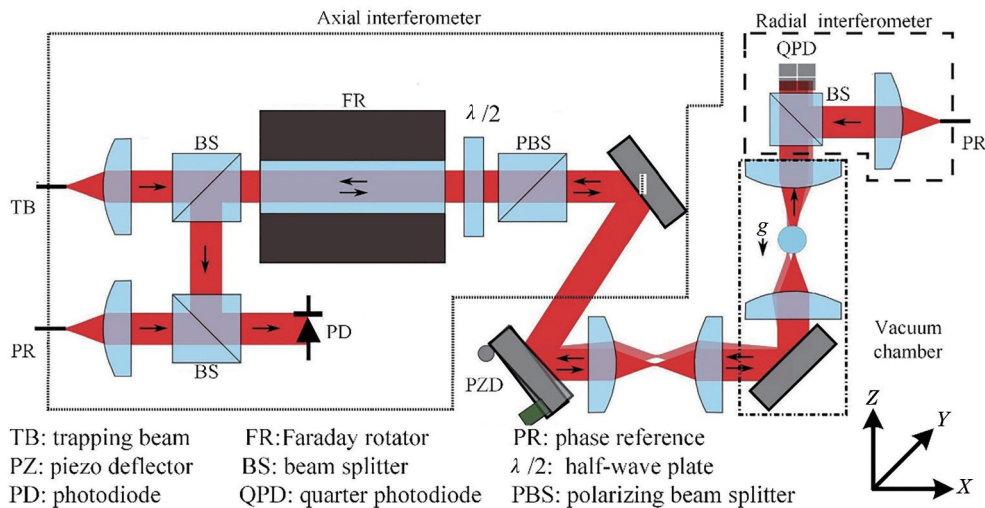


图 11 Rider 团队微球探测模块示意图<sup>[6]</sup>

Fig. 11 Schematic diagram of microsphere detection module of Rider's team<sup>[6]</sup>

提供微球 XY 方向的位移信息,另一束则从与真空腔侧面垂直的方向入射,提供微球 Z 方向的位移信息。该模块中同时使用相机和平衡探测器,相机直

观地展示微球的运动状况可以弥补平衡探测器单一数据的不足,此为光强式和图像式的混合探测方式。

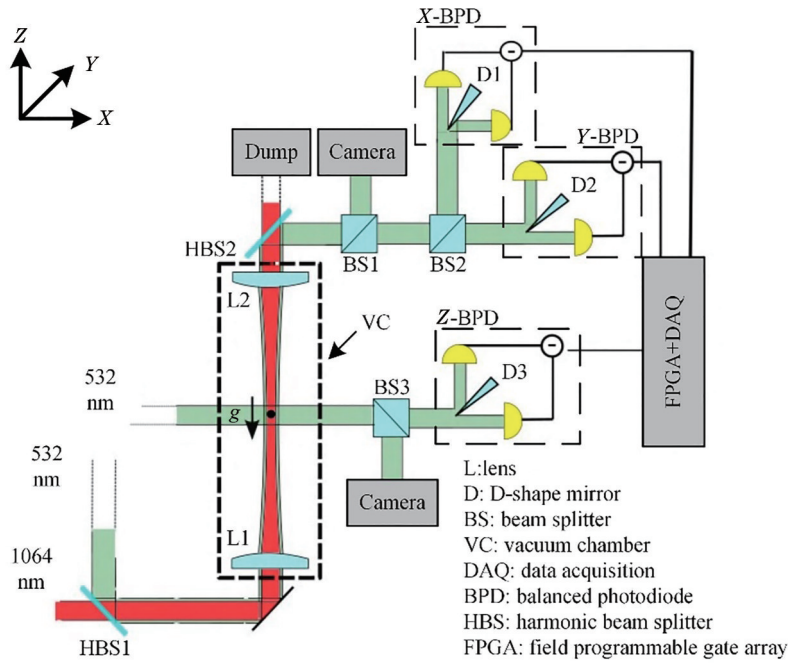


图 12 Moore 团队的位置探测模块示意图<sup>[92]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of position detection module of Moore's team<sup>[92]</sup>

### 3.3.2 位移标定

为获取微球的实际位移,需要对探测器输出进行标定。位移标定可分为直接标定与间接标定。直接标定是利用已知位移量进行标定,常用的直接标定方法有:使用压电平台提供已知振幅驱动样品室内微球往复运动的标定方法<sup>[12]</sup>、使用分辨率测试卡校准获取的图像像素的标定方法<sup>[32,93]</sup>、在静电场中使用已知电场驱动带电微球运动的标定方

法<sup>[94-95]</sup>,表 2 列出三种直接标定方法所适用的探测方式。间接标定主要利用微球的热运动特性,当微球处于热平衡状态时,此时的光阱为简谐势阱,通过分析测量获得电压信号的功率谱密度并利用均分定理对探测器进行标定<sup>[41,96]</sup>。考虑到光力加速度计要实现高精度测量,而间接标定误差较大不适于精密测量,应进行直接标定,已知实验中使用静电场标定方法可得到优于 2% 的标定精度<sup>[68]</sup>。

表 2 直接标定方法及对应探测方式

Table 2 Direct calibration methods and corresponding detection modes

Calibration method	Detection mode
Microsphere motion driven by piezoelectric platform	Image detection, light intensity detection
Using standard test card to calibrate image pixels	Image detection
Electric field driving the motion of charged microsphere	Image detection, light intensity detection

### 3.4 冷却反馈模块

众多研究人员尝试在基础物理的量子研究中使用冷却反馈来实现量子基态<sup>[97]</sup>,但在光力加速度计中冷却反馈模块设计的作用,一方面是设计闭环位移控制系统,扩大光力加速度计的量程;另一方面是抑制系统中的噪声<sup>[7-8]</sup>。冷却反馈模块的主要方案有:光动量反馈冷却<sup>[24,46,60]</sup>、参量反馈冷却<sup>[19,72,98]</sup>、静电

力反馈冷却<sup>[22,66,99]</sup>、光腔反馈冷却<sup>[100-101]</sup>等。

图 13 分别列出四种冷却反馈方案的原理示意图。使用三对互相垂直的冷却激光抑制微球运动可实现光动量反馈冷却<sup>[24,46]</sup>,见图 13(a);额外添设静电场且精准控制微球的带电量可进行静电力反馈冷却<sup>[66]</sup>,见图 13(c);利用高精细度的光腔实现光腔反馈冷却<sup>[21]</sup>,见图 13(d)。与上述三种方案相比,



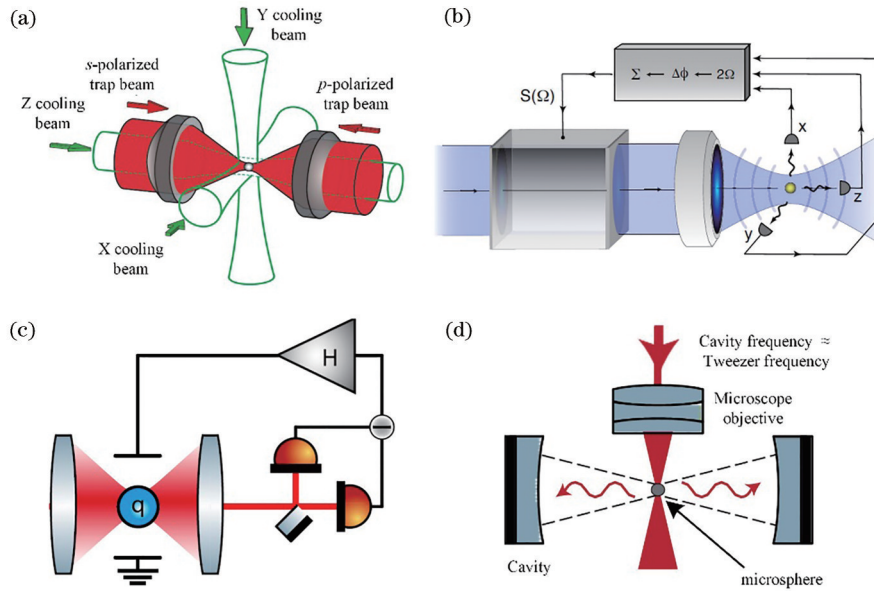


图 13 反馈冷却方案原理示意图。(a)光动量反馈冷却<sup>[24]</sup>;(b)参量反馈冷却<sup>[19]</sup>;(c)静电力反馈冷却<sup>[99]</sup>;(d)光腔反馈冷却<sup>[21]</sup>  
 Fig. 13 Schematic diagrams of feedback cooling. (a) Optical momentum feedback cooling<sup>[24]</sup>; (b) parameter feedback cooling<sup>[19]</sup>;  
 (c) electrostatic force feedback cooling<sup>[99]</sup>; (d) optical cavity feedback cooling<sup>[21]</sup>

参量反馈冷却拥有独特的优势而被广泛应用<sup>[70,72,96,98]</sup>,也有使用振动偏转镜对捕获光束的空间位置进行调节的报道<sup>[27,102]</sup>。

## 4 结 论

封闭于真空腔室内的光力加速度计,具有优良的抗外界干扰能力,再搭配一些高精度的光学设备,在微重力探测中具有明显的优势。近年来,光力加速度计的探测精度由约  $100 \mu\text{g}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$  提升至约  $100 \text{ng}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ,实现了大约 3 个数量级的提升,可望应用于对加速度灵敏度需求高的飞行器和舰船等惯性导航系统中。但是现阶段真空光力加速度计系统仍处于实验阶段,存在测试质量变化引起系统误差增大、腔内压强减小时微球易逃逸、高精度微球位移探测困难等问题。

为解决上述问题,可改进微球材质或制造工艺减小微球在系统运行过程中质量的变化,保证光阱刚度不变,降低光力加速度计的系统误差;使用大数值孔径的光子晶体光纤构建大的高质量对称梯度光场,增加捕获微球的个数及运动范围,避免微球逃逸造成系统的运行停止;添加高速超分辨结构光照明技术,提高微球位移探测精度,这些技术手段的应用有望进一步提升系统在外界微弱扰动下加速度探测灵敏度。

未来光力加速度计将减少透镜、反射镜、棱镜等光学元件的使用,增加光纤及光纤相关产品的使

用,从而降低光路对准、系统搭建的难度,提高系统的操作灵活性;同时根据微球运动特性,改进探测器的有效面积与数据采集电路相关参数,减小光阱捕获模块与位移探测模块所占用的空间体积,实现模块的简约化与紧凑化;与此同时不断提高光力加速度计的探测精度与可靠性,从而加快光力加速度计从实验室到工程化的步伐。

## 参 考 文 献

- [1] Butts D L. Development of a light force accelerometer [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2008: 19-28.
- [2] Kelleher W P, Smith S P, Stoner R E. Optically rebalanced accelerometer: US6867411[P]. 2005-03-15.
- [3] Kotru K. Toward a demonstration of a light force accelerometer[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010: 57-70.
- [4] 葛崇琳, 宋来亮, 冉龙俊, 等. 基于 T 矩阵的光压加速度计的光阱力研究[J]. 半导体光电, 2018, 39(1): 26-31.  
 Ge C L, Song L L, Ran L J, et al. Research on optical trapping force in the light-force accelerometer based on T-matrix[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(1): 26-31.
- [5] Krause A G, Winger M, Blasius T D, et al. A high-resolution microchip optomechanical accelerometer [J]. Nature Photonics, 2012, 6(11): 768-772.

- [6] Rider A D, Blakemore C P, Gratta G, et al. Single-beam dielectric-microsphere trapping with optical heterodyne detection[J]. *Physical Review A*, 2018, 97: 013842.
- [7] Monteiro F, Ghosh S, Fine A G, et al. Optical levitation of 10-ng spheres with nano-g acceleration sensitivity[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(6): 063841.
- [8] Monteiro F, Li W Q, Afek G, et al. Force and acceleration sensing with optically levitated nanogram masses at microkelvin temperatures[J]. *Physical Review A*, 2020, 101(5): 053835.
- [9] Su H M, Hu H Z, Zhang L, et al. A chip of fiber optical trap[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10154: 101540C.
- [10] Fu Z H, She X, Li N, et al. Launch and capture of a single particle in a pulse-laser-assisted dual-beam fiber-optic trap[J]. *Optics Communications*, 2018, 417: 103-109.
- [11] Chen X L, Xiao G Z, Luo H, et al. Dynamics analysis of microsphere in a dual-beam fiber-optic trap with transverse offset[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7575-7584.
- [12] Xiong W, Xiao G Z, Han X, et al. Back-focal-plane displacement detection using side-scattered light in dual-beam fiber-optic traps[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9449-9457.
- [13] 郑瑜. 真空光镊及其反馈控制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 25-44, 55-64.  
Zheng Y. Feedback control of the optical levitation in vacuum[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 25-44, 55-64.
- [14] 蒋建斌. 真空光悬浮微粒位移探测系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.  
Jiang J B. Displacement measurement system of micro-particles optically levitated in vacuum[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [15] Zhu X M, Li N, Yang J Y, et al. Revolution of a trapped particle in counter-propagating dual-beam optical tweezers under low pressure[J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 11169-11180.
- [16] 熊威. 基于双光束光阱的开环光力加速度传感理论与实验初步研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019: 53-58, 88-92.  
Xiong W. Preliminary research on theory and experiment of the open-loop light force acceleration sensing based on the dual-beam optical trap[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019: 53-58, 88-92.
- [17] Ricci F, Rica R A, Spasenović M, et al. Optically levitated nanoparticle as a model system for stochastic bistable dynamics[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15141.
- [18] 葛晓佳. 片上光阱传感单元的关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 18-32.  
Ge X J. The key technology research of optical trapping sensing unit on the chip[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 18-32.
- [19] Gieseler J, Deutsch B, Quidant R, et al. Subkelvin parametric feedback cooling of a laser-trapped nanoparticle[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(10): 103603.
- [20] Jain V, Gieseler J, Moritz C, et al. Direct measurement of photon recoil from a levitated nanoparticle[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(24): 243601.
- [21] Delic U. Cavity cooling by coherent scattering of a levitated nanosphere in vacuum[D]. Vienna: University of Vienna, 2019: 95-116.
- [22] Tebbenjohanns F, Frimmer M, Jain V, et al. Motional sideband asymmetry of a nanoparticle optically levitated in free space[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(1): 013603.
- [23] Hempston D, Vovrosh J, Toroš M, et al. Force sensing with an optically levitated charged nanoparticle[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(13): 133111.
- [24] Li T C, Kheifets S, Raizen M G. Millikelvin cooling of an optically trapped microsphere in vacuum[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(7): 527-530.
- [25] Harada Y, Asakura T. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime[J]. *Optics Communications*, 1996, 124(5/6): 529-541.
- [26] Ashkin A, Dziedzic J M. Optical levitation by radiation pressure[J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 19(8): 283-285.
- [27] Monteiro F, Ghosh S, van Assendelft E C, et al. Optical rotation of levitated spheres in high vacuum[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(5): 051802.
- [28] Li W Q, Li N, Shen Y, et al. Dynamic analysis and rotation experiment of an optical-trapped microsphere in air[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 823-828.
- [29] Callegari A, Mijalkov M, Gököz A B, et al. Computational toolbox for optical tweezers in geometrical optics[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(5): B6-B19.
- [30] Nieminen T A, Loke V L Y, Stilgoe A B, et al.

- Optical tweezers computational toolbox[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, 9(8): S196-S203.
- [31] Ashkin A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(10): 4853-4860.
- [32] Lewandowski C W. Towards a precision measurement of the newtonian constant of gravitation and accelerometry with a levitated microsphere in a magneto-gravitational trap[D]. Montana: Montana State University, 2020: 133-148.
- [33] Trevor King W. Thermal cantilever calibration: equipartition theorem and power spectral density fitting [EB]. (2009-10-12) [2021-06-28]. [https://www.physics.drexel.edu/~wking/rsrch/papers/cantilever\\_calib/cantilever\\_calib.pdf](https://www.physics.drexel.edu/~wking/rsrch/papers/cantilever_calib/cantilever_calib.pdf).
- [34] Ricci F. Levitodynamics toward force nano-sensors in vacuum[D]. Barcelona: The Institute of Photonic Science, 2019: 18-32.
- [35] Hebestreit E. Thermal properties of levitated nanoparticles[D]. Zurich: ETH Zurich, 2017: 63-93.
- [36] Gieseler J, Gomez-Solano J R, Magazzù A, et al. Optical tweezers: a comprehensive tutorial from calibration to applications[EB/OL]. (2020-04-10) [2021-04-06]. <https://arxiv.org/abs/2004.05246>.
- [37] 韩翔, 陈鑫麟, 熊威, 等. 真空光镊系统及其在精密测量中的研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401011. Han X, Chen X L, Xiong W, et al. Vacuum optical tweezers system and its research progress in precision measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401011.
- [38] 田原, 郑瑜, 郭光灿, 等. 真空光镊技术与应用[J]. *物理实验*, 2021, 41(1): 1-8, 21. Tian Y, Zheng Y, Guo G C, et al. Technique and application of vacuum optical tweezers[J]. *Physics Experimentation*, 2021, 41(1): 1-8, 21.
- [39] Yin Z Q, Geraci A A, Li T C. Optomechanics of levitated dielectric particles[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2013, 27(26): 1330018.
- [40] Li N, Zhu X M, Li W Q, et al. Review of optical tweezers in vacuum[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2019, 20(5): 655-673.
- [41] Millen J, Monteiro T S, Pettit R, et al. Optomechanics with levitated particles[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2020, 83(2): 026401.
- [42] 熊威, 尹璋琦, 张晓宝, 等. 光力惯性传感技术研究进展[J]. *导航定位与授时*, 2018, 5(6): 1-8. Xiong W, Yin Z Q, Zhang X B, et al. Advance of optomechanical inertial sensing technology[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2018, 5(6): 1-8.
- [43] Mestres P, Berthelot J, Spasenović M, et al. Cooling and manipulation of a levitated nanoparticle with an optical fiber trap[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(15): 151102.
- [44] Torki A. Mechanical transfer of optically trapped nanoparticle[D]. Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2016: 17-23.
- [45] Li T. Fundamental tests of physics with optically trapped microspheres[D]. Texas: The University of Texas, 2012: 27-42.
- [46] Ranjit G, Atherton D P, Stutz J H, et al. Attonewton force detection using microspheres in a dual-beam optical trap in high vacuum[J]. *Physical Review A*, 2015, 91(5): 051805.
- [47] Atherton D P. Sensitive force measurements with optically trapped micro-spheres in high vacuum[D]. Reno: University of Nevada, 2015: 42-48.
- [48] Heim L O, Blum J, Preuss M, et al. Adhesion and friction forces between spherical micrometer-sized particles[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(16): 3328-3331.
- [49] Sharma A, Xie S R, Zeltner R, et al. On-the-fly particle metrology in hollow-core photonic crystal fibre[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 34496-34504.
- [50] Podschus J, Koeppl M, Schmauss B, et al. Position measurement of multiple microparticles in hollow-core photonic crystal fiber by coherent optical frequency domain reflectometry[EB/OL]. (2021-03-23)[2021-04-05]. <https://arxiv.org/abs/2103.12818>.
- [51] Su H M, Li N, Wang C G, et al. Optical rotation conveyor belt based on a polarization-maintaining hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Optical Review*, 2020, 27(6): 561-567.
- [52] Bykov D S, Mestres P, Dania L, et al. Direct loading of nanoparticles under high vacuum into a Paul trap for levitodynamical experiments[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(3): 034101.
- [53] Gieseler J, Millen J. Levitated nanoparticles for microscopic thermodynamics-a review[J]. *Entropy*, 2018, 20(5): 326.
- [54] Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure[J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(4): 156-159.
- [55] Ashkin A, Dziedzic J M. Optical levitation in high



- vacuum[J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 28(6): 333-335.
- [56] Arita Y, McKinley A W, Mazilu M, et al. Picoliter rheology of gaseous media using a rotating optically trapped birefringent microparticle[J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83(23): 8855-8858.
- [57] Ashkin A, Dziedzic J M, Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams[J]. *Nature*, 1987, 330(6150): 769-771.
- [58] 葛晓佳, 沈瑜, 苏鹤鸣, 等. 面向实用化的片上光阱传感单元[J]. *光子学报*, 2018, 47(2): 0206001.  
Ge X J, Shen Y, Su H M, et al. Practical sensing chip based on optical trap[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 0206001.
- [59] Ahn J, Xu Z J, Bang J, et al. Ultrasensitive torque detection with an optically levitated nanorotor[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(2): 89-93.
- [60] Bang J, Seberston T, Ju P, et al. Five-dimensional cooling and nonlinear dynamics of an optically levitated nanodumbbell[J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(4): 043054.
- [61] Beresnev S A, Chernyak V G, Fomyagin G A. Motion of a spherical particle in a rarefied gas. Part 2. Drag and thermal polarization[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, 219: 405-421.
- [62] Rashid M, Tufarelli T, Bateman J, et al. Experimental realization of a thermal squeezed state of levitated optomechanics[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(27): 273601.
- [63] Gieseler J, Novotny L, Quidant R. Thermal nonlinearities in a nanomechanical oscillator[J]. *Nature Physics*, 2013, 9(12): 806-810.
- [64] Neukirch L P, Gieseler J, Quidant R, et al. Observation of nitrogen vacancy photoluminescence from an optically levitated nanodiamond[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 2976-2979.
- [65] Rondin L, Gieseler J, Ricci F, et al. Direct measurement of Kramers turnover with a levitated nanoparticle[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(12): 1130-1133.
- [66] Frimmer M, Luszcz K, Ferreira S, et al. Controlling the net charge on a nanoparticle optically levitated in vacuum[J]. *Physical Review A*, 2017, 95(6): 061801.
- [67] Rider A D, Blakemore C P, Kawasaki A, et al. Electrically driven, optically levitated microscopic rotors[J]. *Physical Review A*, 2019, 99(4): 041802.
- [68] Rider A D, Moore D C, Blakemore C P, et al. Search for screened interactions associated with dark energy below the 100  $\mu\text{m}$  length scale[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(10): 101101.
- [69] Zheng Y, Sun F. Three-dimensional position measurement of a levitated nanoparticle in a vacuum by a Dove prism[J]. *Chinese Optics of Letters*, 2019, 17(6): 060901.
- [70] Zheng Y, Guo G C, Sun F W. Cooling of a levitated nanoparticle with digital parametric feedback[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(10): 101105.
- [71] van der Laan F, Reimann R, Militaru A, et al. Optically levitated rotor at its thermal limit of frequency stability[J]. *Physical Review A*, 2020, 102(1): 013505.
- [72] Jost M, Schaffner M, Magno M, et al. An accurate system for optimal state estimation of a levitated nanoparticle[C]//2018 IEEE Sensors Applications Symposium, March 12-14, 2018, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 2018: 17686320.
- [73] Cunningham M. Ultrasensitive force sensing with nanospheres in an optical standing wave trap[D]. Reno: University of Nevada, 2017: 14-34.
- [74] Li Z G, Shen Y, Hu H Z, et al. Simulation and measurement of stiffness for dual beam laser trap using residual gravity method[J]. *International Journal of Nanotechnology*, 2015, 12(10/11/12): 849-859.
- [75] Tebbenjohanns F, Frimmer M, Novotny L. Optimal position detection of a dipolar scatterer in a focused field[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(4): 043821.
- [76] Han X, Luo H, Xiao G Z, et al. Optically bound colloidal lattices in evanescent optical fields[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 4935-4938.
- [77] Lewandowski C W, Knowles T D, Etienne Z B, et al. High-sensitivity accelerometry with a feedback-cooled magnetically levitated microsphere[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(1): 014050.
- [78] 李银妹, 姚焜. 光镊技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
Li Y M, Yao K. Optical tweezers technology[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [79] Huisstede J, van der Werf K, Bennink M, et al. Force detection in optical tweezers using backscattered light[J]. *Optics Express*, 2005, 13(4): 1113-1123.
- [80] Chavez I, Huang R X, Henderson K, et al. Development of a fast position-sensitive laser beam detector[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 105104.
- [81] Rohrbach A, Kress H, Stelzer E H K. Three-dimensional tracking of small spheres in focused laser beams: influence of the detection angular aperture[J].

- Optics Letters, 2003, 28(6): 411-413.
- [82] Rohrbach A, Stelzer E H K. Three-dimensional position detection of optically trapped dielectric particles[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(8): 5474-5488.
- [83] 曹志良. 光镊光阱刚度影响因素的理论及实验研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2019: 51-55.  
Cao Z L. Theoretical and experimental investigation of the influence factors of stiffness of optical tweezers[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 51-55.
- [84] 曹志良, 梁言生, 严绍辉, 等. 不同偏振态光镊三维光阱刚度的比较研究[J]. 光子学报, 2019, 48(7): 0726002.  
Cao Z L, Liang Y S, Yan S H, et al. Comparison investigation of the three-dimensional stiffness of optical tweezers with different polarization fields[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(7): 0726002.
- [85] Schütz G J, Schindler H, Schmidt T. Single-molecule microscopy on model membranes reveals anomalous diffusion[J]. Biophysical Journal, 1997, 73(2): 1073-1080.
- [86] Dreyer J K, Berg-Sørensen K, Oddershede L. Improved axial position detection in optical tweezers measurements[J]. Applied Optics, 2004, 43(10): 1991-1995.
- [87] Bohs L N, Friemel B H, McDermott B A, et al. A real time system for quantifying and displaying two-dimensional velocities using ultrasound[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 1993, 19(9): 751-761.
- [88] Otto O, Gutsche C, Kremer F, et al. Optical tweezers with 2.5 kHz bandwidth video detection for single-colloid electrophoresis[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(2): 023710.
- [89] Stilgoe A B, Armstrong D J, Rubinsztein-Dunlop H. Enhanced signal-to-noise and fast calibration of optical tweezers using single trapping events[J]. Micromachines, 2021, 12(5): 570.
- [90] 赵天宇, 汪召军, 冯坤, 等. 高速超分辨结构光照明显微的关键技术及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(24): 240001.  
Zhao T Y, Wang Z J, Feng K, et al. High-speed structured illumination microscopy and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(24): 240001.
- [91] 张智敏, 黄宇然, 刘少聪, 等. 共路并行荧光辐射差分超分辨显微成像[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1607002.  
Zhang Z M, Huang Y R, Liu S C, et al. Common-path parallel fluorescence emission difference super-resolution microscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1607002.
- [92] Chang-Ling L. Optical trapping of micron-sized objects to search for new physics beyond the Standard Model[D]. New Haven: Yale University, 2019.
- [93] 王国璋, 钱克矛. 线阵相机标定方法综述[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111011.  
Wang G H, Qian K M. Review on line-scan camera calibration methods[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111011.
- [94] Park H, LeBrun T W. Parametric force analysis for measurement of arbitrary optical forces on particles trapped in air or vacuum[J]. ACS Photonics, 2015, 2(10): 1451-1459.
- [95] Park H, LeBrun T W. Contact electrification of individual dielectric microparticles measured by optical tweezers in air[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(50): 34904-34913.
- [96] Hebestreit E, Frimmer M, Reimann R, et al. Calibration and energy measurement of optically levitated nanoparticle sensors[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(3): 033111.
- [97] Moore D C, Geraci A A. Searching for new physics using optically levitated sensors[J]. Quantum Science and Technology, 2021, 6(1): 014008.
- [98] Vovrosh J, Rashid M, Hempston D, et al. Parametric feedback cooling of levitated optomechanics in a parabolic mirror trap[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(7): 1421-1428.
- [99] Tebbenjohanns F, Frimmer M, Militarú A, et al. Cold damping of an optically levitated nanoparticle to microkelvin temperatures[J]. Physical Review Letters, 2019, 122(22): 223601.
- [100] Delić U, Reisenbauer M, Dare K, et al. Motional quantum ground state of a levitated nanoparticle from room temperature[EB/OL]. (2019-11-11) [2021-05-04]. <https://arxiv.org/abs/1911.04406>.
- [101] Hosseini M, Duan Y H, Beck K M, et al. Cavity cooling of many atoms[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(18): 183601.
- [102] Blakemore C P, Rider A D, Roy S, et al. Three-dimensional force-field microscopy with optically levitated microspheres[J]. Physical Review A, 2019, 99(2): 023816.