

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.04.04

真空光镊中纳米粒子的参数反馈冷却实验研究

苏琛^{1,2}, 胡绍民^{1,2}, 曹慧杰^{1,2}, 韩翔^{1,2*}, 肖光宗^{1,2}, 罗晖^{1,2*}

(1.国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

2.国防科技大学 南湖之光重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了解决真空光镊中粒子稳定捕获等问题, 开展了参数反馈冷却纳米粒子质心运动的实验研究, 在单光束真空光镊系统中, 成功实现了 3 mPa 气压下直径为 200 nm SiO₂ 粒子的稳定捕获和等效冷却。比较了拟合曲线延伸法、拟合曲线截取法和真实曲线截取法的特点, 选取真实曲线截取法评估纳米粒子的等效冷却温度。实验结果表明, 粒子单轴质心运动等效温度最低被冷却至约 390 mK, 相应的力测量极限噪声水平大约降低至原先的 3.6%。研究成果为实现基于真空光镊技术的超高灵敏度物理量测量提供了重要参考。

关键词: 真空光镊; 纳米粒子; 参数反馈冷却; 等效冷却温度评估

中图分类号: TB9; O439; TN247

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2024) 04-0071-08

Experimental study on parametric feedback cooling of nanoparticles in vacuum optical tweezers

SU Chen^{1,2}, HU Shaomin^{1,2}, CAO Huijie^{1,2}, HAN Xiang^{1,2*}, XIAO Guangzong^{1,2}, LUO Hui^{1,2*}

(1.College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2.Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to solve the problem of stable trapping of particles in optical tweezers in vacuum, experimental research on parameter feedback cooling of nanoparticle's center-of-mass motion was conducted. In a single beam vacuum optical tweezers system, stable capture and equivalent cooling of SiO₂ particles with a diameter of 200 nm under 3 mPa pressure were successfully achieved. Several methods for equivalent temperature estimation were compared, including the integral method using the extension based on the fitted power spectral density curve (PSD), the integral method using the truncation based on the fitted PSD curve, and the integral method using the truncation based on the real PSD curve. The last method was selected to evaluate the equivalent cooling temperature of nanoparticles. The experimental results show that the equivalent temperature of the nanoparticle's center-of-mass motion in single axis is cooled to approximately 390 mK in minimum, and the corresponding thermal noise limit can be reduced to about 3.6% of its original value in the ultra-weak force measurement. The research results provide valuable references for the ultra-high sensitivity measurement of physical quantities based on optical tweezers in vacuum.

Key words: optical tweezers in vacuum; nanoparticles; parametric feedback cooling; evaluation of equivalent cooling temperature

收稿日期: 2024-08-09; 修回日期: 2024-08-13

基金项目: 湖南省重大科技攻关项目(2023ZJ1010); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ40679)

引用格式: 苏琛, 胡绍民, 曹慧杰, 等. 真空光镊中纳米粒子的参数反馈冷却实验研究[J]. 计测技术, 2024, 44(4): 71-78.

Citation: SU C, HU S M, CAO H J, et al. Experimental study on parametric feedback cooling of nanoparticles in vacuum optical tweezers[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(4): 71-78.



0 引言

真空光镊技术利用真空环境的光阱实现对微纳尺度机械振子的捕获和束缚,借助光动量和角动量监测振子的运动参数,可实现对物理量的精密测量^[1-2]。真空环境中悬浮的机械振子几乎不与外界环境发生能量交换,可近似为理想状态的简谐振子。基于真空光镊技术的测量方法具有非接触、高灵敏度、易于小型化等特点^[3]。2020年,奥地利维也纳大学 DELIĆ U 等在真空光镊中实现了纳米粒子的宏观量子态,从而揭开了宏观量子态研究新的篇章^[4]。与基于原子体系的精密传感方案不同,真空光镊中悬浮的机械振子处于微纳尺度,相较原子系综^[5-7]具有更多的原子数量和独特的量子现象^[8],为量子传感技术的发展提供了新途径^[9]。

在真空光镊中,被捕获的纳米粒子并非处于静止状态,在周围环境残余气体分子热运动的撞击下纳米粒子会产生布朗运动。随着环境真空度的提升,粒子所受阻尼大幅降低,粒子可表现为高速惯性运动,其位置的稳定性和捕获寿命将受到显著影响,不利于物理量的精密测量。通常需要利用反馈控制措施提升粒子捕获的稳定性,该方法可降低粒子质心运动的等效温度,因而也被称为反馈冷却。参数反馈冷却是真空光镊中纳米粒子常用的反馈冷却方法,其实质是借功率调节抽离被捕获粒子的机械势能,从而有效抑制粒子的均方位移,并促使其逼近并达到量子基态^[10],具有所需装置结构简单、实现便利等特点。2012年, GIESELER J 等人^[11]首次提出参数反馈冷却方案,并在 1 mPa 气压下将直径 140 nm 的 SiO₂ 粒子的等效温度冷却至 50 mK。2019年,中国科技大学 ZHENG Y 等人^[12]提出基于方波调制的数字参数反馈冷却方案,在 0.02 mPa 下将直径 160 nm 的 SiO₂ 粒子的质心运动冷却至 10 mK。2022年,浙江大学 LIANG T 等人^[13]利用参数反馈冷却将直径 150 nm 粒子的等效温度冷却至 2 mK。与激光冷却原子体系不同,参数反馈冷却是对被捕获粒子外部自由度的操控。

为了解决真空光镊中粒子稳定捕获等问题,

本文开展单光束真空光镊中直径 200 nm 被捕获纳米粒子质心运动的参数反馈冷却实验研究,比较不同的粒子等效冷却温度的评估方法,并进行分析讨论。

1 基本理论

1.1 真空光镊中粒子的动力学行为

通常真空光镊中被捕获粒子在 3 个方向上的运动相互独立,其运动可分解为一维运动的叠加。以一维运动为例,在真空环境残余气体分子热运动的撞击下,被捕获粒子的位置会存在波动^[14]。设其相对于平衡位置的位移为 x ,当 x 为小位移时,该位移满足朗之万方程,即^[15]

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \Gamma_0 \frac{dx}{dt} + \Omega_0^2(1 + \alpha_\kappa)x = \frac{F_{\text{fluct}}}{m} \quad (1)$$

式中: t 为时刻; Γ_0 为残余气体的阻尼; Ω_0 为粒子的谐振角频率, $\Omega_0 = (\kappa/m)^{1/2}$; κ 为光阱刚度; F_{fluct} 为随机布朗力, $F_{\text{fluct}} = (2k_B T_0 m \Gamma_0)^{1/2} \zeta(t)$; k_B 为玻尔兹曼常数; T_0 为环境温度; $\zeta(t)$ 为均值为 0、方差为 1 的随机白噪声; m 为粒子质量; α_κ 为功率调制深度。

在真空光镊中,若不调制改变捕获光束的功率, $\alpha_\kappa = 0$; 若调制改变捕获光束的功率,一般情况下 α_κ 大约在 1% 级别,并满足式(2)中的关系。

$$\alpha_\kappa = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{P_{\text{max}} + P_{\text{min}}} \quad (2)$$

式中: P_{max} 和 P_{min} 分别为捕获光束功率调制时的最大和最小光功率。

在真空环境中,粒子所经受的残余气体阻尼可以修正为^[11]

$$\Gamma_0 = \frac{6\pi\eta r}{m} \frac{0.619}{0.619 + K_n} (1 + c_k) \quad (3)$$

式中: r 为粒子半径; η 为粘滞系数; c_k 为参数; K_n 为克努森数, $K_n = \bar{l}_{\text{avg}}/r$, 其中, $\bar{l}_{\text{avg}}$ 为气体介质的平均自由程,与气压 P_{gas} 成反比。 c_k 可表示为

$$c_k = \frac{0.31K_n}{0.785 + 1.152K_n + K_n^2} \quad (4)$$

一般情况下,可采用蒙特卡洛法和有限差分法等数值方法求解式(1),从而模拟仿真被捕获粒子在真空环境中的动力学行为。

1.2 参数反馈冷却基本原理

参数反馈冷却方法通过被捕获粒子的位移状态来反馈控制(或调制)捕获光束的功率,抽离粒子的机械能量,以降低其质心运动所对应的等效温度,即达成冷却效果。这种方法所需的控制系统较为简单,其核心控制思路为:当粒子远离平衡位置时增大光功率,反之则减小光功率^[11-12]。

由上文可知,真空光镊中被捕获粒子的动力学行为可近似为简谐运动。时刻 t 时,粒子一维质心位移 $x(t)$ 可表示为

$$x(t) = A \sin(\Omega_0 t + \varphi) \quad (5)$$

式中: A 和 φ 分别为振幅和相位, Ω_0 为粒子的谐振频率。当粒子围绕平衡位置近似简谐运动时,将机械能分解为势能和动能,二者可以相互转化。若以平衡位置处为势能零点,则粒子的势能 E_p 和动能 E_k 可分别表示为

$$\begin{cases} E_p = \frac{1}{2} m A^2 \Omega_0^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\Omega_0 t + 2\varphi) \right) \\ E_k = \frac{1}{2} m A^2 \Omega_0^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\Omega_0 t + 2\varphi) \right) \end{cases} \quad (6)$$

显然,在时刻 $t = (n\pi - \varphi + \pi/2)/\Omega_0$ 时($n = 0, 1, 2, \dots$),粒子运动到势能零点,动能最大,势能为零;当粒子运动到势能极值点 $t = (n\pi - \varphi)/\Omega_0$ 时,势能最大,动能为零。当捕获光束功率改变时,所形成的光势阱深度会发生变化,即粒子势能被改变,由此反复控制捕获光束功率,可逐渐降低粒子的机械能。在捕获光束功率的参数反馈控制作用下,粒子运动振幅逐渐衰减,并在毫秒级时段内趋向于平稳^[15],可与此处粒子机械能被抽离的预期相对应。

一般而言,参数反馈冷却方法的实施过程如图1所示。

1.3 粒子质心运动的等效冷却温度

对于被捕获粒子而言,参数反馈冷却所抽离的机械能相当于等效阻尼的做功。因此,若忽略光子反冲加热效应,参数反馈冷却后粒子质心运动的等效温度 T_{eff} 为

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_0 \Gamma_0}{\Gamma_0 + \alpha_k \Omega_0 / \pi} \quad (7)$$

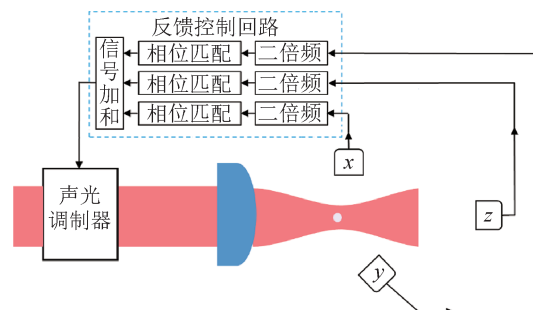


图1 参数反馈冷却方法的实施过程

Fig.1 Scheme of parametric feedback cooling

一般而言,在如图1所示的参数反馈冷却实施过程中,反馈控制和控制生效都存在一定延时,使得控制信号与观测信号(粒子位移信号)之间存在相位差异 φ_1 。则有

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_0 \Gamma_0}{\Gamma_0 + \alpha_k \Omega_0 \cos \varphi_1 / \pi} \quad (8)$$

在 $0 \sim 2\pi$ 的单个相位周期内,当 $\varphi_1 = 0$ 时,等效冷却温度 T_{eff} 最低,冷却效果最好;当 $0 < \varphi_1 < \pi/2$ 或 $3\pi/2 < \varphi_1 < 2\pi$ 时,等效冷却效果变弱;当 $\varphi_1 = \pi/2$ 或 $\varphi_1 = 3\pi/2$ 时,等效冷却效果消失;当 $\pi/2 < \varphi_1 < 3\pi/2$ 时,粒子被加热,处于等效冷却的“反状态”。

2 参数反馈冷却实验

2.1 实验系统

如图2所示,1 064 nm激光(Laser Quantum)经过光隔离器后,通过透镜 L_1 汇聚后进入声光调制器(Acousto-Optic Modulators, AOM)(型号为AA Opto-Electronic MT200)中,经过扩束准直后由100X物镜汇聚形成单光束光阱,并在真空腔内捕获直径为200 nm的 SiO_2 粒子。捕获光束经粒子的散射光由透镜CL收集,随后经过2个分束棱镜分为3束功率相近的光束,分别用于3轴的位置探测。以 X 轴为例,光束通过D形反射镜从中间分成左右两光束,分别进入自制平衡光电探测器的2个光电探头(D_3 和 D_4)。用于 Y 轴位置探测的光束先通过一个Dove棱镜旋转 45° ,之后射入光电探测器(D_5 和 D_6)。对于粒子在 Z 轴的位移,采用粒子前向散射光与捕获光束参考光之间的功率差值来表征,其中光电探测器 D_1 和 D_2 分别用于探测捕获光束参考光的功率和粒子前向散射光的功率。

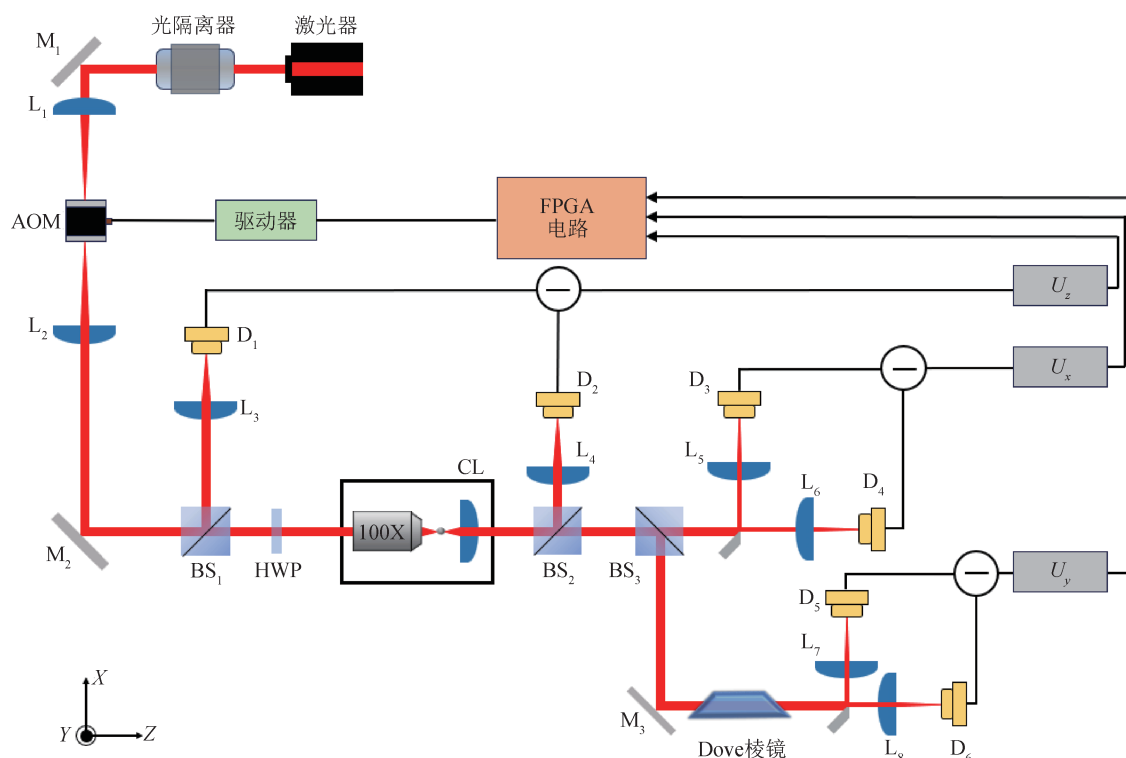


图 2 实验系统光路图

Fig.2 Scheme of optical system

一般情况下,对于线偏振光而言,上述物镜汇聚光束在束腰处为椭圆形光斑^[16],其长轴和短轴方向难以直接与人为规定的直角坐标轴相符合,可能造成径向位移间的耦合,耦合情况与捕获光束线偏振方向有关。因此,在物镜前添加了半波片(Half Wave Plate, HWP)用于调整捕获光束线偏振方向^[17]。为了测量的便利性,在 Y 轴位移测量光路中增加了一个Dove棱镜,可以消除 Y 轴位移测量中来自 X 轴位移的耦合。实验得到三轴位移信号如图3所示,呈现简谐运动规律。

2.2 反馈冷却的实施与效果评估

参照图1所示实施过程,在得到粒子三维位移电压信号后,由模数转换(Analog to Digital Converter, ADC)模块采集,经现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)处理,产生二倍频电压信号由数模转换(Digital to Analog Converter, DAC)模块输出,施加在AOM上。

在反馈冷却电路中,控制电压信号相对于粒子位移电压信号存在数百纳秒乃至微秒级别的电路时间延迟,这对于测量运动周期约为数微秒的

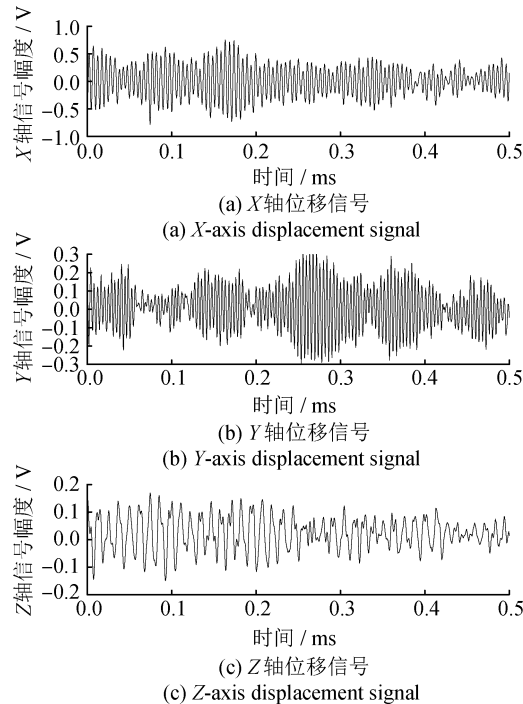


Fig.3 Time sequence of particle's displacements

纳米粒子而言影响较为明显, 因此需要加以补偿。由于低真空(如 200 Pa 附近)环境中反馈控制粒子

的效果较为明显,且残留的气体阻尼可以防止粒子被等效加热而从势阱中逃逸,因此选取约 200 Pa 气压环境施加参数反馈控制。改变延迟时间,得到粒子的均方位移如图 4 所示。

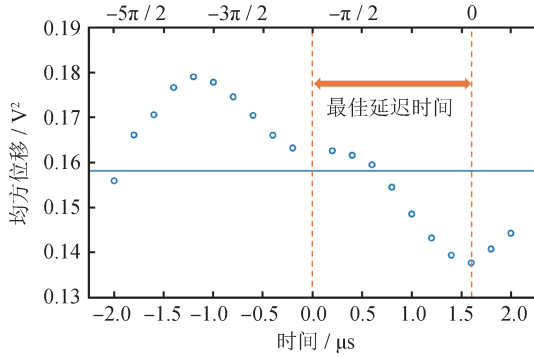


图 4 不同延时时间下的均方位移

Fig.4 Mean square displacement under different delay times

根据延时时间与所施加方波的周期将延时时间换算成相位并标注在图 4 上方,蓝色直线为未反馈控制时粒子的均方位移。结果表明,随着延时的变化,均方位移按近似正弦函数趋势变化;在延时为 1.5 μs 时,粒子的均方位移最小。

将 1.5 μs 的延时用于反馈控制信号的相位补偿。在气压值约为 180 Pa 时加入反馈冷却,调控捕获光束的功率,随着气压降低,粒子仍被稳定捕获,记录不同气压下粒子位移信号功率谱密度 (Power Spectrum Density, PSD) 曲线,如图 5 所示。结果表明,随着气压值的降低,粒子的运动幅度被显著抑制,这意味着粒子质心运动被等效冷却。

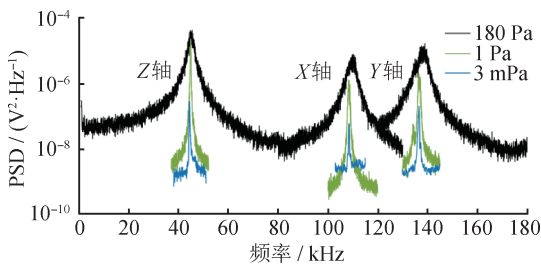


图 5 不同气压下粒子位移信号功率谱密度曲线图

Fig.5 Power spectrum density curves of particle displacement signals under different gas pressures

根据能量均分定理,热平衡状态下纳米粒子一维运动的动能 $\langle E_k \rangle$ 等于 $0.5k_B T$, 如式(9)所示。

$$\langle E_k \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{1}{2} k_B T \quad (9)$$

式中: T 为温度; $\langle v^2 \rangle$ 为粒子的速度均方值,可以通过式(10)积分得到。

$$\langle v^2 \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \Omega^2 S(\Omega) d\Omega = \frac{c^2}{\pi} \int_0^\infty \Omega^2 S_U(\Omega) d\Omega \quad (10)$$

式中: c 为电压位移系数; U 为粒子位移电压信号; $S_U(\Omega)$ 为由粒子位移电压信号计算的功率谱密度,如式(11)所示。

$$S_U(\Omega) = \frac{1}{c^2} S(\Omega) = \frac{1}{c^2} \frac{2k_B T}{m} \frac{\Gamma_0}{(\Omega_0^2 - \Omega^2)^2 + \Omega^2 \Gamma_0^2} \quad (11)$$

由于粒子位移中常包含大量的低频扰动,无法直接使用均方位移计算粒子质心运动的等效冷却温度,因此需要计算等效冷却温度,如式(12)所示^[18],其中, $S_{U_{cool}}(\Omega)$ 与 $S_U(\Omega)$ 对应,为加入反馈冷却后的功率谱密度, T_{cool} 为冷却后粒子的质心运动等效温度。

$$\frac{T_{cool}}{T_0} = \frac{\int_0^\infty \Omega^2 S_{U_{cool}}(\Omega) d\Omega}{\int_0^\infty \Omega^2 S_U(\Omega) d\Omega} \quad (12)$$

根据式(12)可知,需要对功率谱密度曲线进行加权积分。由粒子位移的功率谱密度曲线可以看出,粒子质心运动的能量主要集中在谐振频率附近,研究者相继提出了三种积分方法——拟合曲线延伸法^[18]、拟合曲线截取法^[19]和真实曲线截取法^[19]。其中,拟合曲线延伸法(方法1)先对粒子位移的功率谱密度曲线拟合,再将拟合得到的曲线延伸到高频区域完成区域积分。拟合曲线截取法(方法2)先对粒子位移 PSD 曲线拟合,再截取拟合曲线进行区域积分。真实曲线截取法(方法3)则从真实 PSD 曲线中截取一段包含谐振频率的频段进行区域积分。

在环境气压为 3 mPa 时,采用这些方法计算得到三轴质心运动等效冷却温度,如表 1 所示。其中,方法 1 的积分区域选为 x 轴 (10 Hz ~ 100 kHz)、 y 轴 ($10^{-25} \text{ V}^2/\text{Hz} \sim S_{U_{拟合}}(\Omega)$), $S_{U_{拟合}}(\Omega)$ 为拟合后得到的 PSD 曲线,如图 6(a)所示。方法 2 的截取积分区域选为 x 轴 (102 ~ 116 kHz)、 y 轴 ($10^{-12} \text{ V}^2/\text{Hz} \sim S_{U_{拟合}}(\Omega)$), 如图 6(b)所示。在图 6(a)和图 6(b)

中,灰色、黑色曲线分别是反馈冷却前真实的PSD曲线和拟合的PSD曲线,天蓝色、深蓝色曲线分别是反馈冷却后真实的PSD曲线和拟合的PSD曲线。方法3的积分区域选为 x 轴($106 \sim 113$ kHz)、 y 轴($10^{-10} \text{ V}^2/\text{Hz} \sim S_{U\text{拟合}}(\Omega)$),如图6(c)所示,灰色、天蓝色曲线分别为反馈冷却前、后截取的真实PSD曲线。各曲线中谐振频率附近的数值远高于其他区域,因此所选取积分区域的差异并不会

过多地干扰结果分析。

表1 三种方法计算所得等效冷却温度对比

方法	X轴等效温度	Y轴等效温度	Z轴等效温度
方法1	315	483	272
方法2	347	602	292
方法3	676	852	390

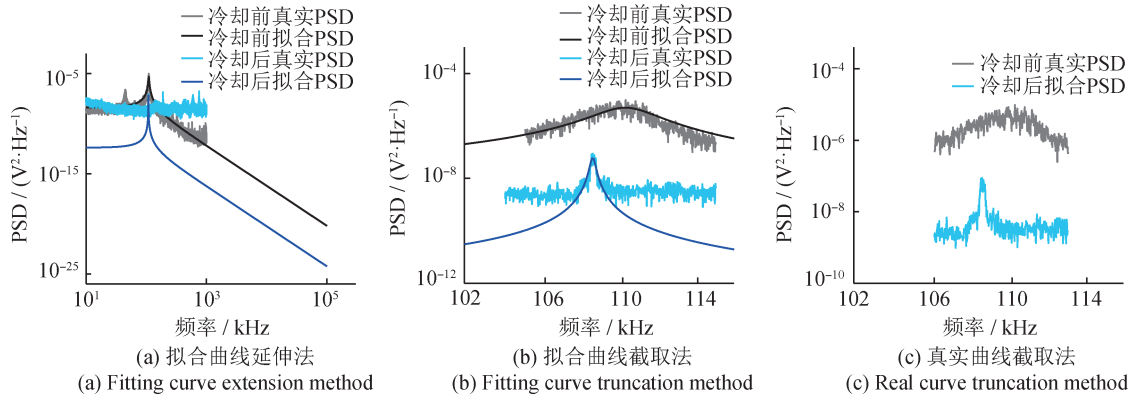


图6 三种计算等效冷却温度的方法

Fig.6 Three methods for estimating equivalent cooling temperature

结果表明,由于系统噪声的影响^[12],反馈冷却后拟合PSD曲线与真实PSD曲线在谐振频率左侧和右侧区域相差较大,采用方法1会导致计算冷却后的区域积分所得动能偏小,使得等效冷却温度的评估偏小。方法2虽然可以避免低频噪声和高频噪声影响,但由于谐振频率附近PSD曲线也可能受到系统噪声干扰,导致拟合PSD与真实PSD不完全符合(如图6(b)所示)。方法3采用真实PSD曲线完成积分,尽管计算得到的冷却温度最大,与获得更低冷却温度的初衷不符,但该结果更能反映真实系统的噪声状况。综合比较后,选用方法3更合适。

2.3 反馈冷却实验结果讨论

以极弱力(低于 10^{-18} N)测量为例,在经典物理框架中,捕获粒子所感受作用力的传感通常受限于热噪声,其对应的等效噪声 F 如式(13)所示^[1]。

$$F = \sqrt{4k_B T m \Gamma_0} \quad (13)$$

显然,随着粒子周围环境阻尼或者环境温度的降低,极限力测量噪声也将降低。一般而言,

极弱力测量的极限噪声等效水平变化情况可以通过式(14)观察。

$$\frac{F_{\text{cool}}}{F_0} \approx \sqrt{\frac{T_{\text{cool}}}{T_0}} \quad (14)$$

式中: F_{cool} 为冷却后的等效噪声, F_0 为冷却前的等效噪声, T_{cool} 为冷却后粒子的质心运动等效温度, T_0 为冷却前粒子的质心运动等效温度。

因此,根据式(14),可以计算得到390 mK的等效冷却温度,等价于极弱力测量的极限噪声等效水平降低至原先的3.6%左右,在系统其余噪声得到充分抑制后,可获得更优的传感性能^[20]。尽管如此,从式(13)可以看出,这种极弱力测量极限噪声的降低仍然是由粒子阻尼率变小导致的,主要归因于环境气压的降低。

3 结论

本文在单光束真空光镊中开展了被捕获纳米粒子质心运动的等效冷却实验。选取了真实功率谱密度曲线截取法评估等效冷却温度,在3 mPa环

境中粒子单轴质心运动等效温度被冷却至最低 390 mK, 所对应的极限噪声水平可降低至原先的 3.6% 左右。研究成果为实现基于真空光镊的超高灵敏度传感奠定了技术基础。

参考文献

- [1] 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): 187-206.
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): 187-206. (in Chinese)
- [2] 张皓铭, 熊威, 韩翔, 等. 悬浮光力传感技术研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 46-63.
ZHANG H M, XIONG W, HAN X, et al. Research progress in levitated optomechanical sensing technology (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(6): 46-63. (in Chinese)
- [3] GONZALEZ-BALLESTERO C, ASPELMEYER M, NOVOTNY L, et al. Levitodynamics: levitation and control of microscopic objects in vacuum[J]. Science, 2021, 374(6564). DOI: 10.1126/science.abg3027.
- [4] DELIĆ U, REISENBAUER M, DARE K, et al. Cooling of a levitated nanoparticle to the motional quantum ground state[J]. Science, 2020, 367: 892-895.
- [5] 邓敏, 李佳佳, 王柯穆, 等. 原子干涉仪灵敏度的阿伦方差分析[J]. 计测技术, 2023, 43(4): 135-145.
DENG M, LI J J, WANG K M, et al. Allan variance analysis of atomic interferometer sensitivity[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 135-145. (in Chinese)
- [6] 陈雪花, 丛楠, 罗文浩, 等. 基于里德堡原子的电场传感技术[J]. 计测技术, 2023, 43(4): 83-94.
CHEN X H, CONG N, LUO W H, et al. Electric field sensing technology based on Rydberg atoms[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 83-94. (in Chinese)
- [7] 张旭, 颜树华, 李期学, 等. 基于冷原子重力仪的轨道移动绝对重力测量[J]. 计测技术, 2023, 43(4): 128-134.
ZHANG X, YAN S H, LI Q X, et al. Movable measurement of absolute gravity on the rail based on cold atom gravimeter [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 128-134. (in Chinese)
- [8] RADEMACHER M, MILLEN J, LI Y L. Quantum sensing with nanoparticles for gravimetry: when bigger is better[J]. Advanced Optical Technologies, 2020, 9(5): 227-239.
- [9] 肖太龙, 曾贵华. 量子精密测量参数估计优化研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43(4): 44-60.
XIAO T L, ZENG G H. Research progress of parameter estimation optimization in quantum metrology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 44-60. (in Chinese)
- [10] TEBBENJOHANNIS F, MATTANA M L, ROSSI M, et al. Quantum control of a nanoparticle optically levitated in cryogenic free space[J]. Nature, 595: 378-382.
- [11] GIESELER J, DEUTSCH B, QUIDANT R, et al. Subkelvin parametric feedback cooling of a laser-trapped nanoparticle [J]. Physical Review Letters, 2012, 109(10). DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.103603.
- [12] ZHENG Y, GUO G C, SUN F W. Cooling of a levitated nanoparticle with digital parametric feedback[J]. Applied Physical Letters, 2019, 115(10). DOI: 10.1063/1.5099284.
- [13] LIANG T, ZHU S, HE P, et al. Yoctonewton force detection based on optically levitated oscillator[J]. Fundamental Research, 2023, 3(1): 57-62.
- [14] 曾小飞. 双光束真空光镊的参数反馈冷却控制技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
ZENG X F. Research on parameter feedback cooling control technology for dual beam vacuum optical tweezers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
- [15] 高立夫, 胡展铭, 韩翔, 等. 真空光阱中微球参数反馈控制的数值仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(11): 259-263.
GAO L F, HU Z M, HAN X, et al. Numerical simulation on parametric feedback control of optically trapped microsphere in vacuum[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(11): 259-263. (in Chinese)
- [16] JIN Y B, YU X D, ZHANG J. Polarization-dependent center-of-mass motion of an optically levitated nanosphere [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(9): 2369-2377.

- [17] SU C, HU S M, HAN X, et al. The elimination of polarization-dependent crosstalk between radial displacements of levitated nanospheres in optical tweezers in vacuum [C]// World Photonics Conference 2024 and 13th Applied Optics and photonics China, Beijing, 2024.
- [18] ZHENG Y, ZHOU L M, DONG Y, et al. Robust optical-levitation-based metrology of nanoparticle's position and mass [J]. Physical Review Letters, 2020, 124 (22). DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.223603.
- [19] GIESELER J, GOMEZ-SOLANO J R, MAGAZZU A, et al. Optical tweezers — from calibration to applications: a tutorial [J]. Advances in Optics and Photonics, 2021, 13 (1): 74–241.
- [20] RANJIT G, CUNNING M, CASEY K, et al. Zeptonewton force sensing with nanospheres in an optical lattice [J]. Physical Review A. 2016, 93 (5). DOI: 10.1103/PhysRevA.93.053801.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 苏琛(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为悬浮光力学精密传感技术。



通信作者: 韩翔(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为新型光电惯性检测技术、悬浮光力学精密传感技术。



通信作者: 罗晖(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 国防科技大学激光陀螺及系统方向学术带头人、国防科技大学科技委员会委员、湖南省光学学会理事长, 主要研究方向为激光陀螺、惯性技术、光电检测技术。