

基于夫琅和费衍射原理的制冷系统振动测量研究

代飞, 王凯*, 林伟, 黎军, 雷海乐

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621000

摘要 对于制冷机振动幅度的测量, 基于夫琅和费衍射原理研制一套振动测量装置。该装置利用样品振动与干涉条纹移动量的相关性并通过视觉成像来采集干涉条纹的移动规律, 从而得到被测物体的振动信息。实验中发现测量被测物体振动信息的过程中存在影响因素, 为此对影响测量结果的因素进行分析并采用 PZT (Piezoelectric Transducer) 对该装置的测量准确性进行验证。结果表明, 所提方法能够高精度测量得到待测样品的微小位移, 测量精度可达 10 nm。利用该装置可以得到采取减振措施后制冷机的振动特性, 为后续优化制冷机的振动水平提供技术支撑。

关键词 测量; 惯性约束聚变; 振动测量; 夫琅和费干涉; 亚微米振动

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2404003

1 引言

随着低温工程技术的发展, 无液氦的吉福德-麦克马洪(G-M)制冷机逐渐成为模拟极端环境的主要设备之一, 因其冷头的振动位移在 $\pm 15 \mu\text{m}$ 左右^[1], 所以无法适用于对振动要求较高的科学实验^[2], 如光学干涉、微波成像以及 X 射线相衬成像等精密系统都要求将样品座的振动位移控制在亚微米量级^[3]。根据自适应减振原理, 本实验室已经研制了一套基于 G-M 制冷机的低振动制冷装置, 并使用高速摄像法对其振动水平进行了初步表征^[4-5], 但是还需要使用更为精确的手段对其振动位移进行进一步的测量分析, 为进一步降低样品座的振动幅度提供参考数据。

由于直接接触的测量方法会破坏系统的固有频率使测量结果偏离实际值, 因此必须采用一种非接触的测量方法。非接触无损测量方法主要有高速摄像法、多普勒法^[6]、光学干涉法^[7]、光纤光栅振动传感器^[8]、三角法以及全息干涉法等^[9-10], 但是这些方法在测量振动频率为 1 Hz 和振动水平为百纳米量级的振动过程中均存在一定的缺陷。如基于高速摄

像法的亚像素处理技术的基本原理是利用高速相机来获取一系列与时间相关的数字图像, 然后对这一系列图像中的相邻两图像进行相关处理, 用来跟踪特征点的位置随时间的变化情况, 从而得到被测物体的位移、速度和加速度信息。虽然采用高倍的镜头再结合图像的亚像素处理技术处理后分辨率可以达到 10 nm, 但是其分辨率的提高所带来的问题是物镜的工作距离变得很短。由于实验研究的对象处于真空环境, 样品架与窗口之间的距离为 10 cm, 因此由于工作距离的约束限制了这种方法的应用。多普勒法是另一种测量振动的常用方法, 其基本原理是采用多普勒频移效应和激光解调技术从被测物体反射回来的激光中提取振动信息, 目前市场上已经出现了相关产品, 如 SIS 品牌的 LV-S01 型多普勒测量仪, 其可以测量 1 Hz~1000 kHz 的频率范围, 速度分辨率为 $1 \mu\text{m/s}$, 但是该仪器仅适用于振动频率较快和振动速度较快的振动测量。对于本实验室研制的制冷装置, 其主要振动频率为 1 Hz, 样品架的振动速度远低于 $1 \mu\text{m/s}$, 因此该制冷装置也不满足超低频振动的高分辨率测量要求。由于光学干涉法是一种常用的非接触式振动测量方法, 因此常被

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-05-10; 录用日期: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(11804318)

通信作者: *goodkai@163.com

用来测量分析制冷机的微小振动,如 Chijioko 等^[11]提出了一种基于声光调制器的外差式迈克耳孙干涉振动测量分析技术,但其数据处理过程复杂,并且需要增加载频。为了解决高精度和长距离微小振动的测量问题,从文献[12-13]中关于有相位差调制关系的夫琅禾费衍射计算结果可知,两狭缝光束的相位差与中央主峰(最亮条纹)位置的关系为线性关系,因此当被测量物体移动时,两狭缝光束的相位差也会发生相应的变化,即最亮条纹的位置也会随之发生改变。根据此关系,本文提出基于夫琅禾费双缝衍射原理的微小位移振动测量方案,根据最亮条纹的位置随时间的变化关系,再根据相应的公式便可计算得到待测样品的振动信息。该方法不仅具有分辨率高的优点,而且具有能够对远距离物体进行振动测量的能力,因此特别适用于本装置中样品架的振动测量。

2 基本原理

2.1 测量原理

图 1(a)为振动测量的原理示意图,由激光器发出的激光经过准直后被分光镜分成两束,其中光束 1 和光束 2 分别作为参考光和信号光,光束 1 和光束 2 分别通过狭缝后产生狭缝光,然后分别由位置固定不动的反射镜 1 和固定在待测振动物体上的反射镜 2 进行反射,接着反射光经过狭缝,最终由透镜将两光束聚焦在焦平面处的面阵 CCD(Charge Coupled Device)上以产生干涉条纹。假定两狭缝光互相平行,而且经过分光镜后存在一定的间隔,此时焦平面处条纹的光强分布与夫琅禾费衍射的光强分布相似,如图 1(b)所示,其中 a 为狭缝宽度, c 为两狭缝中心的距离, b 为狭缝长度, f 为透镜的焦距。

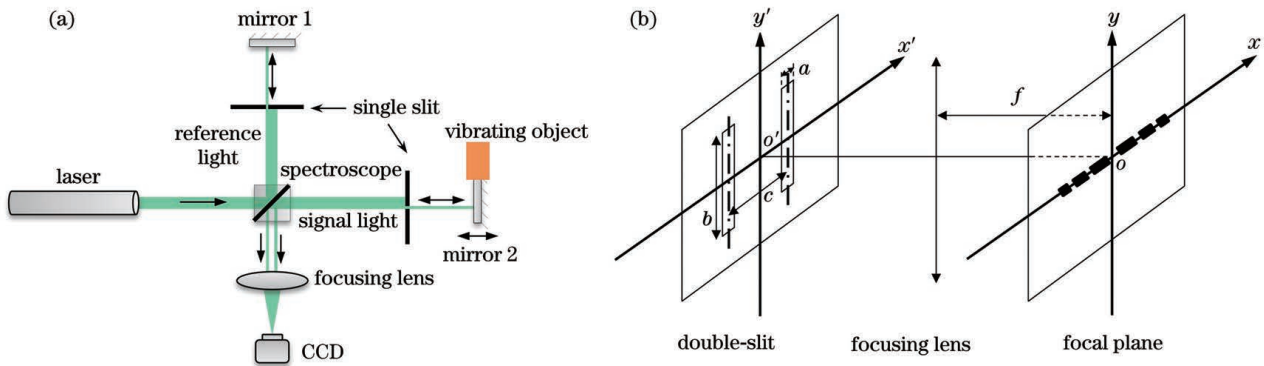


图 1 振动测量的原理示意图。(a)改进型迈克耳孙干涉测量的原理示意图;(b)夫琅禾费双缝衍射的原理示意图

Fig. 1 Schematic of principle of vibration measurement. (a) Schematic of principle of improved Michelson interferometry; (b) schematic of Fraunhofer double-slit diffraction

为了便于计算,假设透过两狭缝的光束的相位复振幅可表示为分别为 δ 和 $-\delta$,两束光的振幅均为 E_0 ,狭缝面上的

$$\tilde{E}(x_1, y_1) = \begin{cases} E_0 \exp(i\delta), & -c/2 - a/2 \leq x_1 \leq -c/2 + a/2, \quad -b/2 \leq y_1 \leq b/2 \\ E_0 \exp(-i\delta), & c/2 - a/2 \leq x_1 \leq c/2 + a/2, \quad -b/2 \leq y_1 \leq b/2, \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x_1, y_1) 为狭缝面上的位置坐标。

根据衍射理论^[12-13]可知,夫琅禾费衍射的计算公式为

$$\tilde{E}(x, y) = \frac{1}{if\lambda} \exp(ikf) \exp\left[i \frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right] \iint_{\Sigma} \left\{ \tilde{E}(x_1, y_1) \exp\left[-i \frac{k}{f}(xx_1 + yy_1)\right] \right\} dx_1 dy_1, \quad (2)$$

式中: $\tilde{E}(x, y)$ 为焦平面上 (x, y) 位置处的复振幅分布; λ 为入射激光光源的波长; k 为波数; Σ 为孔径范围。

联立(1)式和(2)式,可以得到

$$\tilde{E}(x, y) = E_0 \frac{4b}{i\lambda kx} \exp(ikf) \exp\left[i \frac{k}{2f}(x^2 + y^2)\right] \left[\frac{\sin\left(\frac{kyb}{2f}\right)}{\frac{kyb}{2f}} \sin\left(\frac{kxa}{2f}\right) \cos\left(\delta + \frac{kxc}{2f}\right) \right]. \quad (3)$$

由(3)式可知,两束光在焦平面上的分布为

$$I(x, y) = |\tilde{E}(x, y)|^2 = E_0^2 \frac{4b^2}{\lambda^2 k^2 x^2} \left[\frac{\sin\left(\frac{kyb}{2f}\right)}{\frac{kyb}{2f}} \right]^2 \left[\sin\left(\delta + \frac{kxc + kxa}{2f}\right) - \sin\left(\delta + \frac{kxc - kxa}{2f}\right) \right]^2. \quad (4)$$

因此两束光在焦平面上的干涉图像沿 x 轴的分布可表示为

$$I(x, 0) = \lim_{y \rightarrow 0} [I(x, y)] = E_0^2 \frac{b^2}{\pi^2 x^2} \left[\sin\left(\delta + \frac{kxc + kxa}{2f}\right) - \sin\left(\delta + \frac{kxc - kxa}{2f}\right) \right]^2. \quad (5)$$

由(5)式可知,当 a, b, c 和 f 为常数时,焦平面上干涉条纹的光强分布与透过两狭缝的相干光束的相位差是一一对应的关系。图 2 为干涉条纹的光强分布随透过两狭缝相干光相位差的变化规律,其中狭缝宽度设置为 0.1 mm,狭缝间距设置为 0.2 mm,

狭缝长度设置为 40 mm,透镜的焦距设置为 150 mm。从图 2 可以看到,通过跟踪两个时刻最亮条纹位置的变化关系,能够推算出这两个时刻由振动引起的相位变化量,即可得到样品的振动信息。

图 3 为两连续时刻最亮条纹位置的变化关系,

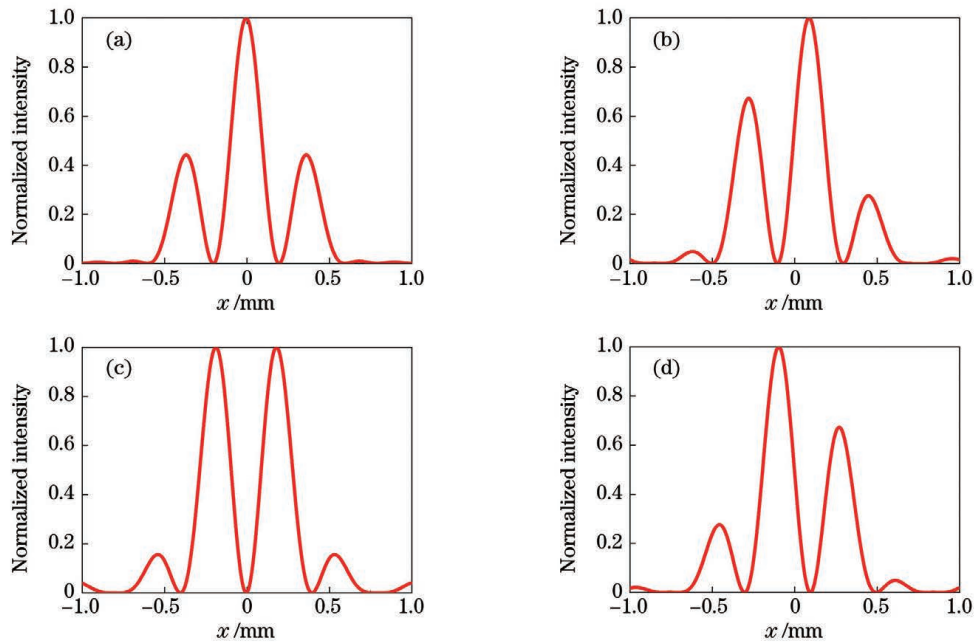


图 2 不同相位差下的条纹相对光强。(a)相位差为 0;(b)相位差为 $\pi/2$;(c)相位差为 π ;(d)相位差为 $3\pi/2$

Fig. 2 Relative light intensity of fringe at different phase difference. (a) Phase difference is 0; (b) phase difference is $\pi/2$; (c) phase difference is π ; (d) phase difference is $3\pi/2$

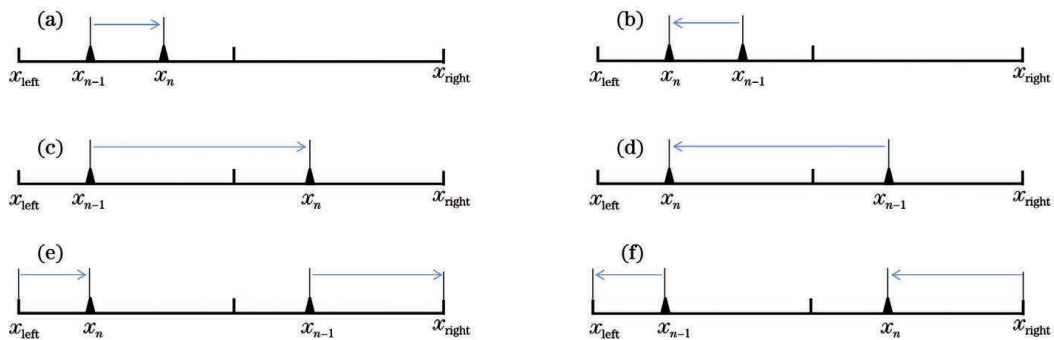


图 3 最亮条纹位置的变化示意图。(a)(c)(e)最亮条纹从左到右移动;(b)(d)(f)最亮条纹从右到左移动

Fig. 3 Schematic of change in position of brightest stripe. (a) (c) (e) Brightest stripes move from left to right; (b) (d) (f) brightest stripes move from right to left

共有 6 种情况。其中 x_{left} 和 x_{right} 分别为最亮条纹在极左端和极右端出现的位置,数值模拟结果表明其对应的相位差为 π ,最亮条纹移动的方向为振动的位移方向。假定 $T_x = x_{\text{left}} - x_{\text{right}}$,以 $T_x/2$ 为分界线,当 $|x_n - x_{n-1}| \leq T_x/2$ (其中 x_n 为第 n 个主条纹位置, $n=1, 2, 3, \dots$) 时,在两连续时刻的两幅干涉图片中会出现图 3(a)和图 3(b)两种情况,此时透过两狭缝的光束的相位差可表示为

$$\Delta\delta = \frac{\pi}{T_x}(x_n - x_{n-1}). \quad (6)$$

当 $|x_n - x_{n-1}| > T_x/2$ 时,两连续时刻的两幅干涉图片理论上会出现图 3(c)~3(f) 4 种情况,其中图 3(c)和图 3(d)为条纹在一个周期范围内移动。考虑到设计过程中要求 CCD 的采样率远大于干

涉条纹移动 $T_x/2$ 个像元所需的时间,将不会出现图 3(c)和图 3(d)的情况,只会出现图 3(e)和图 3(f)的情况。对于图 3(e),条纹首先由 x_{n-1} 移动到 x_{right} ,然后由 x_{left} 移动到 x_n ,对应物体背向双缝装置所在的位置移动,此时移动量为 $\pi[T_x - (x_{n-1} - x_n)]/T_x$;对于图 3(f),条纹首先由 x_{n-1} 移动到 x_{left} ,然后由 x_{right} 移动到 x_n ,对应物体面向双缝装置所在的位置移动,此时移动量为 $-\pi[T_x - (x_n - x_{n-1})]/T_x$ 。为了便于计算,将图 3(e)和图 3(f)的情况进行整合,表达式为

$$\Delta\delta = -\frac{\pi}{T_x} \frac{x_n - x_{n-1}}{|x_n - x_{n-1}|} (T_x - |x_n - x_{n-1}|). \quad (7)$$

综上所述,两连续时刻透过两狭缝的光束的相位差与焦平面上最亮条纹的位置关系可表示为

$$\Delta\delta = \begin{cases} \frac{\pi}{T_x}(x_n - x_{n-1}), & |x_n - x_{n-1}| \leq T_x/2 \\ -\frac{\pi}{T_x} \frac{x_n - x_{n-1}}{|x_n - x_{n-1}|} (T_x - |x_n - x_{n-1}|), & |x_n - x_{n-1}| > T_x/2 \end{cases}. \quad (8)$$

由干涉原理可知,被测物体移动单个波长的距离所对应的相位差变化量为 2π ,因此两连续时刻的干涉图所对应的位移量为

$$d_n = \lambda \Delta\delta_n / 2\pi. \quad (9)$$

通过面阵或线阵 CCD 来实时采集干涉图像,并分析得到相邻两幅图像中最亮条纹随时间的变化规律,则物体的振动量可表示为

$$d(t) = \sum d_n (n=1, 2, 3, \dots). \quad (10)$$

2.2 振动信号还原精度的影响因素

2.2.1 狭缝宽度及间距的影响

为了提高振动信号的还原精度,由(6)式和(9)式可知,在相同的位移速度以及相同的 CCD 采样速率下,通过调整干涉光路的参数来增大 T_x 值可有效提高位移测量的分辨率,从而提高测量精度,而 T_x 与狭缝宽度、狭缝间距以及聚焦透镜的参数有关。图 4 为由(5)式计算得到的不同狭缝宽度下干涉条纹的光强分布。虽然 T_x 值会随着狭缝宽度的减小而增大,但狭缝宽度减小后会降低衍射图样中的条纹光强。同理,改变狭缝间距后的变化规律与改变狭缝宽度的情况类似,即 T_x 值随着狭缝间距的增大而减小,且狭缝间距太大会导致狭缝偏离激光的光斑区域,从而降低衍射图样中的条纹光强。因此在实际的测量过程中,应在保证衍射图样中条纹光强的情况下尽量减小狭缝宽度和狭缝间距。

图 5 为聚焦透镜在不同焦距 f 下的干涉条纹光强分布。从图 5 可以看到,虽然 T_x 值随着聚焦透镜焦距的增加而增大,但干涉条纹的光强随着焦距的增加而降低,不利于 CCD 信号的获取与处理。

综上,实验过程中应根据 CCD 的实际情况来选择合适的狭缝间距、狭缝宽度及聚焦透镜焦距等参数,在干涉条纹的光强满足要求的情况下尽量增大 T_x 值,从而提高微小位移的分辨能力。

2.2.2 CCD 像素尺寸的影响

振动信号的还原精度与算法本身的逻辑严密性相关,还与相关配套的 CCD 及光源波长等因素有关。在不考虑像素细分等数据处理的前提下,假设最亮条纹的移动范围 T_x 占据 CCD 中 n 个像素,此时位移测量的分辨率为 T_x/n 。根据(5)式可知,增大聚焦透镜的焦距 f ,同时降低狭缝宽度 a 以及狭缝间距 c 可有效提高最亮条纹移动周期 T_x 所占据的像素数,因此在 CCD 总尺寸大于 T_x 的情况下,CCD 的像素尺寸越小,位移测量的分辨率越高。

2.2.3 CCD 采集速度的影响

本文提出的振动测量技术对 CCD 的图片采集速率有一定的要求,为了避免出现图 3(c)和图 3(d)的情形,要求 CCD 的图片采样速率必须足够高。CCD 的图片采集速率对测量精度的影响曲线如图 6 所示。从图 6 可以看到,CCD 的图片采集速率越

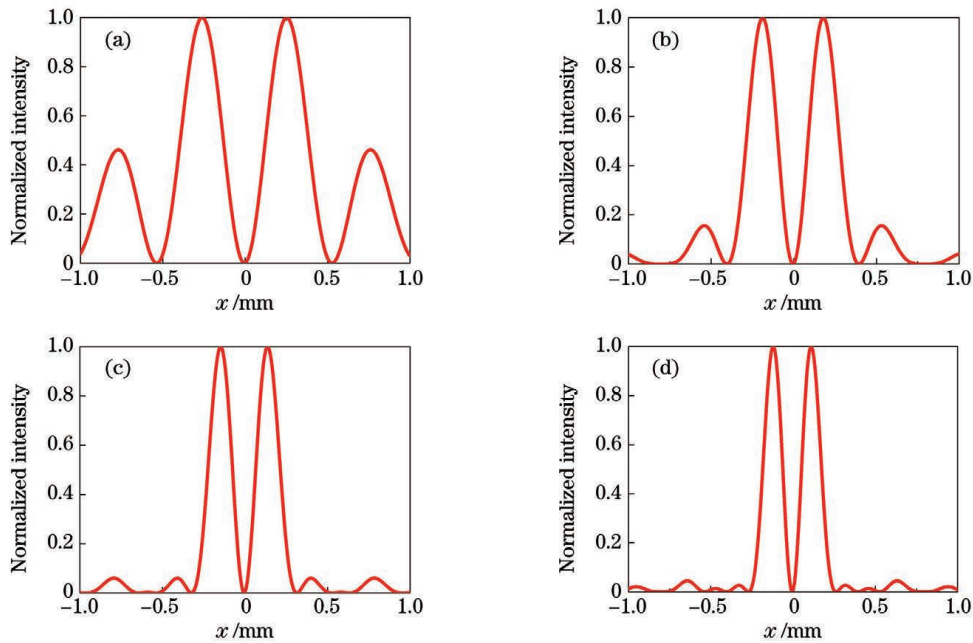


图 4 焦平面上干涉条纹的相对光强分布与狭缝宽度的关系。(a)狭缝宽度为 0.05 mm;(b)狭缝宽度为 0.10 mm;(c)狭缝宽度为 0.15 mm;(d)狭缝宽度为 0.20 mm

Fig. 4 Relationship between relative light intensity distribution of interference fringe and width of slit on focal plane. (a) Slit width is 0.05 mm; (b) slit width is 0.10 mm; (c) slit width is 0.15 mm; (d) slit width is 0.20 mm

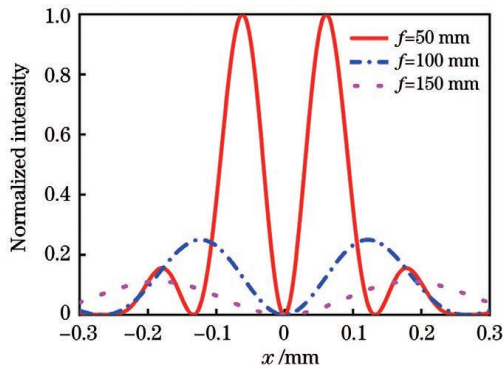


图 5 聚焦透镜在不同焦距下的干涉条纹光强分布

Fig. 5 Light intensity distribution of interference fringe of focusing lens at different focal lengths

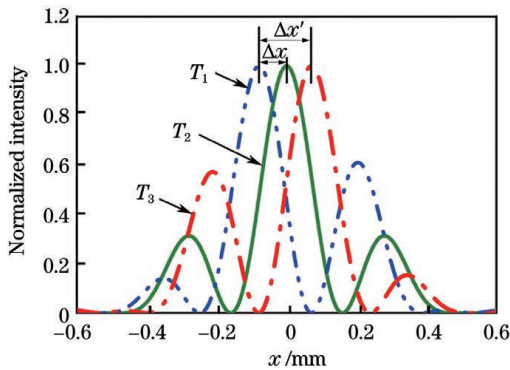


图 6 CCD 的图片采集速率对测量精度的影响曲线
Fig. 6 Influence curves of CCD image acquisition speed on measurement accuracy

快,能够分辨的最小移动步长 Δx 越小,若在 CCD 采集相邻两张图像的时间间隔内,当干涉条纹中最亮条纹的移动量较大时,甚至超过半个移动周期 $T_x/2$ (图 6 中的 $\Delta x'$)时,CCD 将无法分辨待测物体的移动方向,从而造成测量精度的显著下降,甚至造成位移值的还原出现错误。因此为了保证测量的分辨率,CCD 的图片采集速率 R 应该大于移动一个像素间距所需的时间。

2.2.4 激光波长对还原精度的影响

由(9)式可知,振动位移量的还原精度与激光波长呈负相关,当激光波长越短和 CCD 的采样速率一定时,能够分辨的两连续时刻的干涉图所对应的位移量越小,即位移分辨率越高。假设干涉条纹中最亮条纹的移动范围 T_x 占据 CCD 中 n 个像素,则对应的 CCD 能分辨的最小移动量理论上为 $\lambda/2n$,因此在 CCD 的量子效率以及激光强度足够的情况下,应选择短波长的激光光源。

2.2.5 离散数据均值滤波及高斯拟合

受到光源波动以及 CCD 噪声的影响,CCD 所采集到的干涉条纹光强分布并不会是一条理想的光滑曲线。在最亮条纹处采取比较法进行提取,当噪声出现在干涉条纹中最亮条纹所在的区域时,将会影响最亮条纹位置的获取,从而给出错误的位移计算结果。为此本文在数据处理的过程中首先采用中

值滤波将明显的噪点去掉,然后采用滑动平均值滤波对干涉条纹的光强分布进行去噪处理,最后提取出最亮条纹出现位置附近的光强分布曲线,采用高斯拟合的算法对像素进行细分,从而提取出最亮条纹所在的位置,进而使位移测量的分辨率得到进一步的提高。最亮条纹位置的提取方法如图 7 所示。

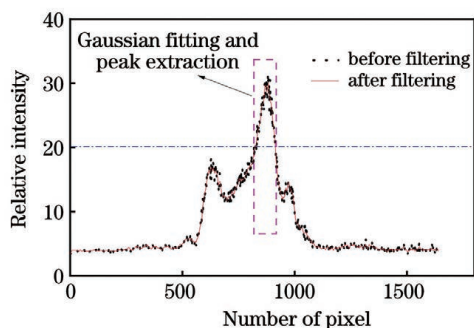


图 7 最亮条纹位置的提取方法示意图

Fig. 7 Schematic of extraction method of brightest stripe position

3 分析与讨论

依据图 1 的振动原理,将反射镜 2 固定在经过

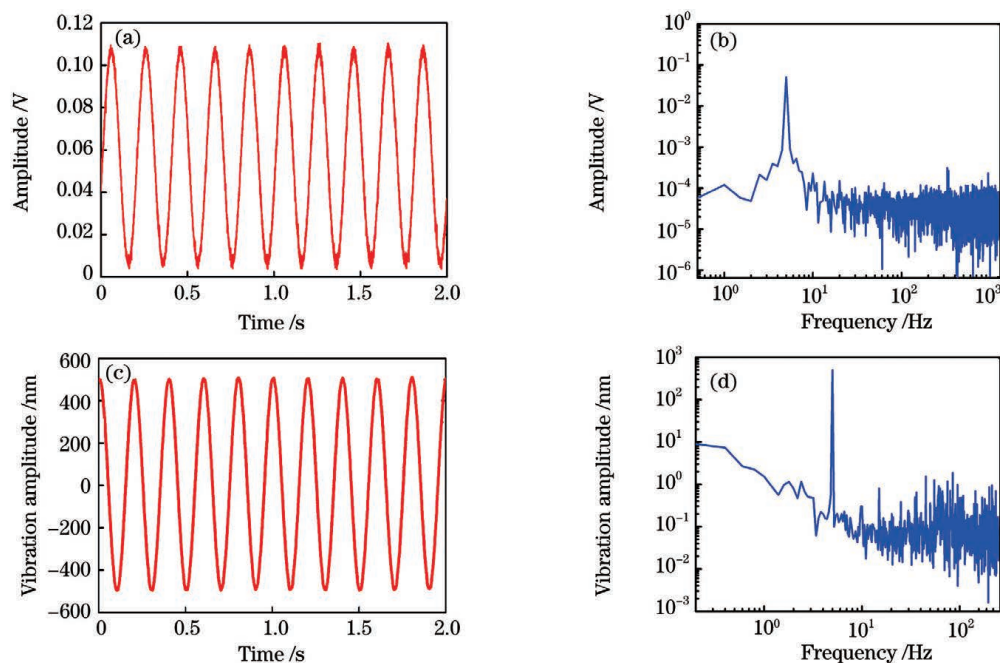


图 8 500 nm 振幅下的振动信号还原结果。(a)PZT 输入信号;(b)输入信号的傅里叶变换;(c)时间-振动幅度测量结果;(d)振动信号的傅里叶变换结果

Fig. 8 Reduction results of signal restoration at 500 nm amplitude. (a) PZT input signal; (b) Fourier transform of input signal; (c) time-vibration amplitude measurement result; (d) Fourier transform result of vibration signal

利用搭建的干涉光路将反射镜 2 固定在制冷装置的样品座上,测量得到制冷装置^[2]的振动曲线如图 9 所示。从图 9 可以看到,采取振动抑制措施后,

测试的商业化 PZT (Piezoelectric Transducer) 上, PZT 的位移驱动由可编程的信号发射器产生,并由分辨率为 12 bit 的示波器采集信号发射器输出驱动信号。使用计算机处理干涉条纹中最亮条纹的位置后,结合(8)~(10)式即可得到反射镜 2 的位移随时间的变化关系。

本文中聚焦透镜的焦距选择为 150 mm, CCD 的单个像素尺寸为 13.5 μm 。综合考虑信噪比后,通过调试两狭缝的相对位置和狭缝宽度,使一个周期内的像元数约有 40, CCD 的采样率最大为 3000 frame/s, 激光波长为 532 nm。由 2.2.5 节的分析可知,在未考虑像素细分的前提下,该参数能达到的测量分辨率为 6.65 nm。

图 8 为频率为 5 Hz 和振动幅度为 500 nm 的振动测量结果。从图 8 可以看到,还原的信号为理想的正弦信号,表明所提方法可以对振动信息进行准确还原。表 1 为振动幅度为 50~1000 nm 的振动信号还原结果。从表 1 可以看到,该实验系统能够对样品的振动信息进行准确测量,误差分布在 0.8~5.6 nm 之间。

制冷机中样品座的振动水平由 $\pm 15.0 \mu\text{m}$ 降低至 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 以内,但是在制冷机频率为 1 Hz 处的振动幅度仍然较大,证明该制冷系统的减振装置还有

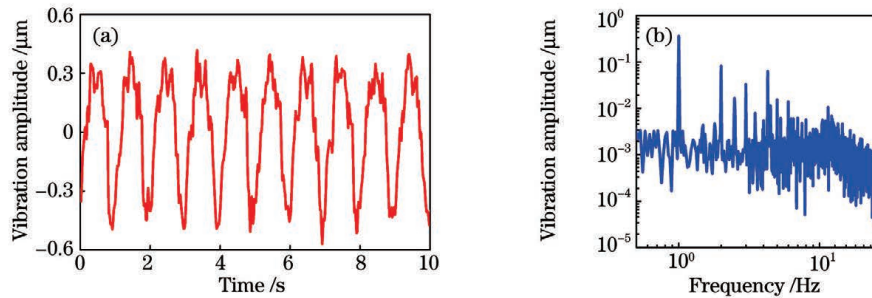


图 9 样品座的振动测量结果。(a)时间-振动曲线;(b)振动信号的傅里叶变换结果

Fig. 9 Vibration measurement results of sample holder. (a) Time-vibration curve; (b) Fourier transform result of vibration signal

进一步优化的空间。

表 1 振动幅度在 50~1000nm 之间的振动信号还原结果

Table 1 Reduction results of vibration signals with vibration amplitude between 50 and 1000 nm

Measured voltage /mV	Vibration amplitude of PZT /nm	Measured amplitude /nm	Error /nm
5.130	51.3	52.6	1.3
10.005	100.1	105.7	5.6
19.990	199.9	198.8	1.1
50.320	503.2	498.9	4.3
79.470	794.7	795.5	0.8
100.190	1001.9	997.3	3.5

4 结 论

基于夫琅禾费双缝衍射原理研制一套振动测量装置,并通过 PZT 测试了该系统的测量误差。结果表明,该装置在 50~1000 nm 的振动范围内的测量精度可达 10 nm。利用该装置测量分析了减振后制冷机样品座的振动特性,实验结果表明,在采取减振措施后,制冷机的振动水平由 $\pm 15.0 \mu\text{m}$ 降低至 $\pm 0.3 \mu\text{m}$,但在制冷机频率为 1 Hz 处的振动仍然存在,证明该制冷系统的减振装置虽然能够有效抑制制冷机冷头振动的传递,但仍有一定的优化空间,研究结果将为后续继续降低样品座的振动幅度提供重要的技术支撑。

参 考 文 献

[1] Tomaru T, Suzuki T, Haruyama T, et al. Vibration analysis of cryocoolers[J]. *Cryogenics*, 2004, 44(5): 309-317.
 [2] Ma K Q, Mei L S, Liu Y Q, et al. Analysis and measurement of cryocooler vibration[J]. *High Power*

Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 637-640.

马坤全,梅鲁生,刘元琼,等.低温制冷机振动测试与分析[J].*强激光与粒子束*, 2013, 25(3): 637-640.

- [3] Wang C, Hartnett J G. A vibration free cryostat using pulse tube cryocooler[J]. *Cryogenics*, 2010, 50(5): 336-341.
 [4] Liu X C, Li J, Wang K, et al. Study on the flexible connection method for vibration reduction at ultra-low temperature [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2018, 46(11): 26-30.
 刘喜川,黎军,王凯,等.超低温减振的软连接工艺研究[J].*低温与超导*, 2018, 46(11): 26-30.
 [5] Tao X, Xu D, Zhang Z T, et al. Vibration measurement in high precision for flexible structure based on microscopic vision[J]. *Robotics*, 2016, 5(2): 9.
 [6] Li Y H, Wu Z S, Wu Y L. Small damping vibration measurement using laser Doppler effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 231-235.
 李艳辉,吴振森,武颖丽.基于激光多普勒法测量微小阻尼振动[J].*中国激光*, 2010, 37(1): 231-235.
 [7] Yu H J, Zhao G G. Improving measurement accuracy of dual-frequency laser interferometer based on vibration node optimization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 151202.
 于海娇,赵国罡.基于振动节点优化提高双频激光干涉仪的测量精度[J].*激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 151202.
 [8] Wei L, Liu Z, Li H C, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on sensitive structure for “土”-shaped beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106004.
 魏莉,刘壮,李恒春,等.基于“土”字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器[J].*光学学报*, 2019, 39(11): 1106004.
 [9] Cui H, Guo R, Li X Q, et al. Calibration of laser triangular displacement sensor based on nonlinear fitting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9):

0904003.

崔昊, 郭锐, 李兴强, 等. 基于非线性拟合的激光三角位移传感器标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904003.

- [10] Duan C Q, Chen J, He S L. Thickness measurement of a metal sheet by an adaptive two-wave mixing interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0808002.

段昌琪, 陈剑, 何赛灵. 基于自适应双波混合干涉仪的金属板厚度测量[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0808002.

- [11] Chijioko A, Lawall J. Vibration spectrum of a pulse-tube cryostat from 1 Hz to 20 kHz[J]. Cryogenics, 2010, 50(4): 266-270.

- [12] Yang R F, Yang P, Shen F. Experimental investigation of laser coherent combining based on active segmented mirror [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 424-427.

杨若夫, 杨平, 沈锋. 基于能动分块反射镜的激光相干合成实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 424-427.

- [13] Yang R F, Yang P, Shen F. Experimental research on phase detection and correction of two fiber amplifier based on active segmented mirrors[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(12): 8297-8301.

杨若夫, 杨平, 沈锋. 基于能动分块反射镜的两路光纤放大器相位探测及其相干合成实验研究[J]. 物理学报, 2009, 58(12): 8297-8301.

Vibration Measurement of Cryostat Based on Principle of Fraunhofer Double-Slit Interference

Dai Fei, Wang Kai*, Lin Wei, Li Jun, Lei Haile

Research Centre of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621000, China

Abstract

Objective Gifford-McMahon (GM) cryocooler without liquid helium has gradually become the primary method to obtain a low-temperature environment, but the typical vibration displacement is about $\pm 14.6 \mu\text{m}$ at the second-cold stage when the compressor is operated at 50 Hz. This vibration is still too high for some applications, such as optical interference, cryogenic microwave oscillators, X-ray phase-contrast imaging, and other precision systems that require submicron-level vibration control on the sample holder. We have developed a vibration-free cryostat using GM cryocooler years ago and measured the vibrations of the sample holder using the high-speed microscopic vision method. However, a more accurate method is needed to analyze its vibration to provide reference data for further reducing the vibration of the sample holder. Moreover, the direct contact measurement method will destroy the eigenfrequency of the system, resulting in the deviation of results from the real value. Therefore, the non-contact vibration measurement methods, such as the doppler method, triangle method, and holographic interferometry, are needed to analyze the vibration of the sample holder of the cryostat. This paper presents a novel vibration-measuring method for the measurement of the vibration amplitude of the cryocooler based on the Fraunhofer double-slit interference principle. This method not only has a high resolution, but also has the ability to measure the vibration of distant objects, and is especially suitable for cryostat vibration measurement and analysis.

Methods The laser is divided into two beams by the beam splitter after collimation. Beam 1 and beam 2 are used as the reference and signal lights, respectively. First, beam 1 and beam 2 pass through the slit, respectively, to generate slit light. Then, they are reflected by mirror 1, which is fixed, and mirror 2, which is mounted on the vibration object to be measuring and pass through the slit again. Finally, the two beams focus on the focal plane by focusing the lens on generating interference fringes, acquired by the plane-array charge-coupled device (CCD). The light intensity distribution of the fringes at the focal plane is similar to that of Fraunhofer diffraction (Fig. 1) when assuming that the two-slit beams are parallel to each other and there is a specific interval between the two-slit beams after passing through the spectroscopy. Because the position of the interference fringe is related to the phase of the two-slit beams, we can obtain vibration information about the sample holder by acquiring the position of maximum intensity of the interference fringe. Furthermore, the factors influencing measurement results are investigated to avoid a significant amount of experimental work.

Results and Discussions The resolution of displacement measurement is affected by the parameters of the optical

system under the same displacement speed and the same CCD sampling rate through Eq. (6) and Eq. (9). Increasing the focal lengths of the focusing lens, decreasing the slit width and the slit spacing can improve the resolution of the measurement. However, the intensity of light will decrease (Fig. 4 and Fig. 5). We conclude that the appropriate slit spacing, slit width and focal length according to the actual situation of CCD are chosen. In this paper, the focal length of the focusing lens is 150 mm, and the size of a single-pixel of the CCD is $13.5 \mu\text{m}$. By adjusting the parameters of the optical system, the number of pixels in a cycle is set at around 40, the maximum sampling rate of CCD is 3000 frame/s and the laser wavelength is 532 nm. Hence, the resolution of this device is about 6.65 nm theoretically. The results show that this method can accurately obtain the submicron-level vibration of vibrating objects, and the resolution can reach 10 nm (Table 1). Finally, the vibration curve of the vibration-free cryostat is measured using the optical system (Fig. 9).

Conclusions The current study proposes a novel vibration measuring method for measuring the vibration amplitude of the cryocooler based on the Fraunhofer double-slit interference principle. The factors influencing measurement results are investigated, and the performance of the system is evaluated using a commercial PZT. The results show that the precision of the device can reach 10 nm in the 50–1000 nm vibration range. Furthermore, the vibration of the sample holder of the GM cryocooler after vibration reduction is measured and analyzed with this vibration measuring device. Measured results show that the vibration amplitude of the sample holder is reduced from ± 15 to $\pm 0.3 \mu\text{m}$. However, the vibration spectrum of the cryostat shows a frequency of 1 Hz, indicating that, whereas the vibration reduction method effectively inhibits vibration transfer from cold head to sample holder, there is still a large optimization space. As a result, this work provides considerable support for further optimization of the vibration level of the cryocooler.

Key words measurement; inertial confinement fusion; vibration measurement; Fraunhofer double-slit interference; submicron vibration

OCIS codes 120.7280; 260.3160