

旋转液体反射抛物面镜

刘 畅, 刘成森, 孙佳星, 徐佳敏, 杨 瑶, 梅雪君, 赵琳琳
(辽宁师范大学 物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要:利用光学 Mach-Zehnder 干涉仪对旋转液体产生的轴对称抛物面的光学反射性能进行了研究. 液体抛物面反射镜作为干涉仪的一个反射镜产生的球面波与另一条光路中的平面波干涉形成同心圆的干涉条纹, 利用 CCD 相机采集干涉条纹图像, 通过计算机图像处理程序得到旋转液体反射波面的形貌, 实现对液体反射镜表面形状的分析. 光学干涉技术的高精度特点保证了测量的准确性.

关键词:旋转液体; 抛物面镜; 干涉条纹; 图像处理; 牛顿环

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-4642(2016)07-0020-03

在光学实验室中, 经常用到大孔径、高质量的平面波或球面波, 以便进行精密光学测量和光学精细加工, 获得这些光波的光学元件, 通常使用品质优良的玻璃光学元件, 其加工难度大, 价格昂贵. 匀速旋转的液体可以在液体表面形成面积巨大且光滑的轴对称抛物面^[1], 旋转水银制作大孔径反射物镜已经用于天文望远镜进行天文观测^[2-3], 其成像质量优良, 得到的反射抛物面镜不但面积大, 表面质量精良, 而且焦距参量可以调节. 在数字测量情况下, 通常对光强度要求比较低, 没有必要使用反射系数高但易挥发的有毒水银作为反射液体, 使用普通液体如水、硅油或蓖麻油等稳定不易挥发的廉价材料作为反射透镜材料, 就可以获得满意效果. 也有研究人员将这一物理现象应用于各种液体折射率和黏度的测量^[4-5], 获得了满意的实验结果.

旋转液体反射镜的轴对称抛物表面形状极易受到旋转速度均匀性和实验台稳定性的影响, 转速不均匀和实验台不稳定, 会在液体表面产生偏离抛物面的波纹, 从而使反射光波波面偏离标准波面. 针对以上问题, 建立了一套 Mach-Zehnder 干涉仪光学测量系统, 可以通过考察反射镜所反射光波波面形状及其随时间变化关系, 研究旋转液体反射镜抛物面形状的稳定性的, 这一研究将有助于建立合理的实验装置以便获得稳定的旋转液体反射镜, 在光学实验室建设中发挥积极作用.

1 实验原理

在气垫式光学全息防震台上建立 Mach-Zehnder 干涉光路. 入射激光经扩束镜 S 发散后到达准直镜 L, 形成平行于主光轴的平行光; 在分束镜 BS_1 分别发生反射和透射; 反射部分经反射镜 M_1 反射至分束镜 BS_2 后表面, 透射部分经反射镜 M_2 反射至分束镜 BS_2 前表面; 两束光发生干涉, 利用旋转液体反射抛物面镜代替原平面镜 M_1 , 为了满足光程相等的干涉条件, 改变分束镜 BS_2 的位置(如图 1 所示), 用 CCD 采集相应的干涉条纹图像.

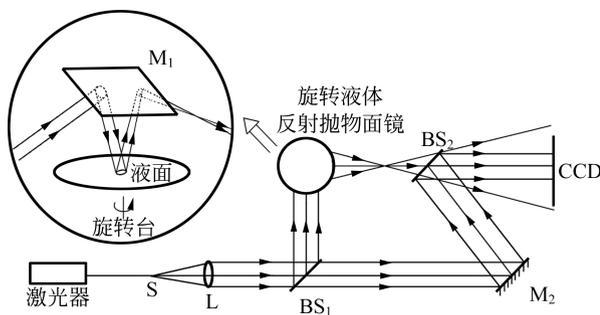


图 1 Mach-Zehnder 干涉光路

2 实验装置及实验结果

图 2 是旋转液体转台的实物照片. 1 台老式唱机作为机械性能稳定、转速均匀的转台, 它提供

收稿日期: 2016-03-02; 修改日期: 2016-04-01

作者简介: 刘 畅(1992—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 辽宁师范大学物理与电子技术学院 2014 级硕士研究生.

通讯作者: 刘成森(1961—), 男, 山东济南人, 辽宁师范大学物理与电子技术学院教授, 主要研究方向为光信息技术.



2 个转速:17 r/min 和 30 r/min. 盛放液体的瓷盘放在转台中央,瓷盘底部玻璃表面贴有黑纸,吸收从液体上表面进入液体的测量光束,只有液体上表面(旋转反射抛物面)反射的光能够进入测量系统,盛放液体的瓷盘直径为 20 cm,本实验中以蓖麻油作为旋转液体,当其以 30 r/min 的转速旋转时,形成稳定的抛物面反射镜. 其中反射镜 M_1 将平面光反射向下入射到旋转液体表面,被液体上表面(转台旋转形成抛物面)反射成为会聚球面光向上到达 M_1 ,经 M_1 反射后会聚到焦点,然后再发散射向分束镜 BS_2 . 透过 BS_2 的发散球面波与另一条光路经 BS_2 反射的平面光干涉,调节 BS_2 形成的圆形干涉条纹. 采用快速拍摄模式帧数设为 5,每 0.2 s 记录 1 幅干涉图像,连续拍摄 40 s,选出具有清晰干涉条纹的图像如图 3 所示. 测量发散球面波焦距和旋转液体反射抛物面镜到 CCD 的距离,进行旋转液体表面的静态分析,为研究液体表面受外部干扰的动态情况提供帮助.

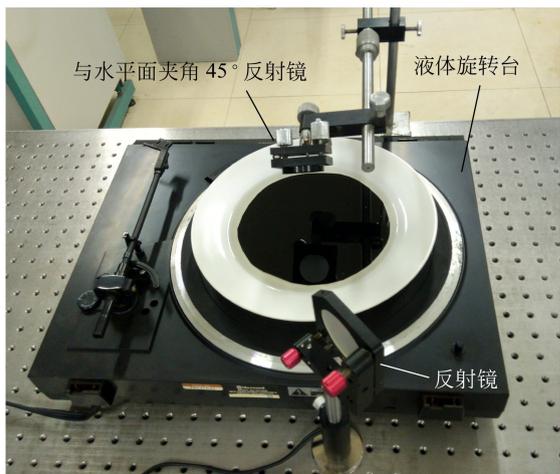


图 2 旋转液体转台

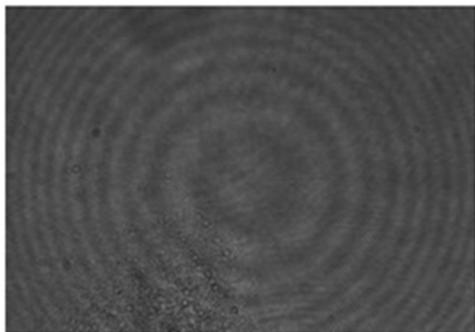


图 3 干涉条纹

在条纹中间设置搜索区域,寻找干涉条纹圆心,以减少运算时间. 在所选区域内逐点计算对应半径为 160 像素、宽度为 16 像素的环带区域内光强平均值,统计环带内各点光强与这一平均值的偏差并求和,偏差求和最小的搜索点即为条纹中心. 从条纹圆心邻近的 8 像素为起点,逐一计算半径为 5 像素的圆形区域内各点光强,依次沿半径方向以各个点为圆心,重复上述处理,并标记光强极大处,完成对图像进行亮条纹的中心提取,如图 4 所示,并依次获得干涉图像中干涉条纹沿半径方向的光强分布,如图 5 所示.

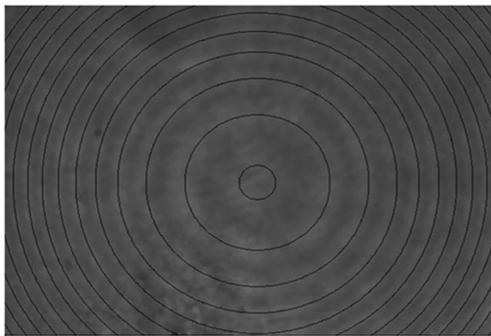


图 4 亮条纹的中心提取连线

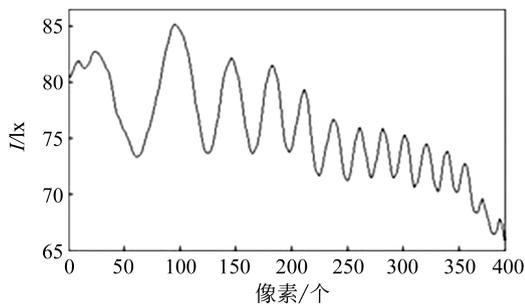


图 5 干涉条纹沿半径方向的光强分布

表 1 为干涉图像中亮条纹的半径数据. 为了使计算结果更准确,去除像素过少的中心非整数级亮条纹以及 $n=14$ 的亮条纹半径数据.

表 1 干涉图像中亮条纹的半径

m	r_m/pixel	n	r_n/pixel
13	371	7	261
12	355	6	238
11	339	5	212
10	320	4	183
9	301	3	146
8	282	2	95

牛顿环亮条纹的半径与透镜的曲率半径的关系^[6]为

$$r = \sqrt{n\lambda R},$$

平行光与点光源干涉条纹半径与球面波半径的关系为

$$r_n = \sqrt{2n\lambda z_0}.$$

测量球面波半径为 $z_{\text{测}} = 885 \text{ mm}$. 实验中所选 CCD 像素尺寸为 $\Delta = 10.0 \mu\text{m} \times 10.0 \mu\text{m}$. 根据牛顿环测量透镜的曲率半径的逐差法得到本实验中的球面波半径与像素关系为

$$\begin{aligned} z &= (r_m^2 - r_n^2) \Delta [2\lambda(m-n)]^{-1}, \\ \bar{z} &= 916.502 \text{ mm}, \\ z_{\text{测}} &\approx \bar{z}. \end{aligned}$$

平面波经旋转液体表面反射后形成球面波, 旋转液体表面为抛物面. 测得旋转液体反射抛物面镜的焦距: $f_{\text{测}} = 235 \text{ mm}$. 由近轴球面波焦距与曲率半径关系得旋转液体反射抛物面曲率半径: $R = 2f_{\text{测}} = 470 \text{ mm}$.

3 结束语

利用计算机对旋转液体反射抛物面镜进行干涉测量所获得干涉条纹图像进行处理, 利用光学

干涉技术的高精度特点结合逐差法计算实现了对球面波曲率半径的分析, 各级亮条纹对应的球面波半径的平均值与测量值近似相等, 且与平均值间的误差较小, 进一步证明了旋转液体反射面为抛物面, 平面波经其表面反射后为球面波, 根据近轴球面波焦距与曲率半径关系可以得出旋转液体反射抛物面镜的曲率半径.

参考文献:

- [1] Borra E F. Liquid mirrors [J]. Scientific American, 1994, 270(2): 76-81.
- [2] Potter A E, Mulrooney M. Liquid metal mirror for optical measurements of orbital debris [J]. Advances in Space Research, 1997, 19: 213-219.
- [3] 刘先曙. 望远镜家族新成员——液体望远镜[J]. 百科知识, 2003(6): 13-14.
- [4] 高严, 范凯, 王爱军, 等. 利用旋转液体特性测量液体折射率[J]. 物理实验, 2007, 27(7): 42-44.
- [5] 胡德旺. 旋转球体法测粘滞系数的方法研究[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(1): 30-31.
- [6] 陈冠英. 牛顿环实验数据处理及实验方法[J]. 物理实验, 1992, 12(4): 176-178.

Parabolic surface of rotating liquid

LIU Chang, LIU Cheng-sen, SUN Jia-xing, XU Jia-min,
YANG Yao, MEI Xue-jun, ZHAO Lin-lin

(School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: The reflection performance of the surface of rotating liquid, which was axisymmetric paraboloid, was observed by optical Mach-Zehnder interferometer. Concentric circular interferometric fringes were produced by two waves, one was a spherical wave reflected by the liquid parabolic surface, the other was a plane wave from another light path. The interferometric image was captured by a CCD camera and the morphology of reflection wave of rotating liquid was obtained by computer image processing program. After that, the analysis of the surface configuration of the rotating liquid was carried out. The accuracy of the measurement was ensured by the high precision of optical interference technology.

Key words: rotating liquid; parabolic surface; interferometric fringe; image processing; Newton ring

[责任编辑:尹冬梅]