

# 脉冲激光斑纹干涉术测量高速运动物体的实验研究

冯 士 煜

(香港中文大学物理系)

郭斯淦 马莹莹 郑顺旋

(广州中山大学物理系)

## 提 要

本文介绍利用脉冲激光斑纹干涉术作高速测量的新方法。作者把单脉冲红宝石激光通过分光、光学延迟变成双脉冲激光,测量高达 100 m/s 运动物体的速度。

激光斑纹干涉术已成为一种新兴的测量技术,一般均采用连续输出的激光光源,如 He-Ne、Ar<sup>+</sup> 激光等。采用脉冲红宝石激光光源的不多<sup>[1]</sup>,其原因之一是红宝石激光模式不很稳定。此外,已报道用激光斑纹干涉术测量低速运动物体<sup>[2]</sup>,至今尚未见报道用大功率脉冲激光斑纹干涉术测量高速运动物体。我们通过对静态面内位移的双曝光脉冲斑纹工作曲线的研究,证明红宝石激光能用作斑纹干涉术,并把脉冲斑纹干涉术用于测量高速运动物体的速度,所测得速度达 100 m/s。按工作原理,所测速度尚可进一步提高。

## 一、判断性实验

红宝石激光器的空间相干性和时间相干性均较氦-氖激光和氩激光为差,特别是非优质红宝石更是如此,利用红宝石激光作二次曝光斑纹干涉术,能否产生两个相关的斑纹场,除了需在理论上进行分析外,还应该作认真的实验验证。为此,我们作了大量的试验,实验装置如图 1 所示, A 为红宝石激光器, B 为扩束透镜, C 为漫射物体(一块带有厘米标尺的白色泡沫塑料,用来测量照相系统的放大倍数),漫射物体装在读数显微镜座上, D 为照相机,采用天津 II 型(对 6943 Å 灵敏)底片。按照常规的二次曝光激光斑纹测量面内位移的技术<sup>[3]</sup>,测得物体位移与傅里叶变换面上干涉条纹频率的关系,如图 2 所示。从图 2 看出,工作曲线十分理想,近乎直线。这里值得特别指出的是红宝石的质量没有挑选,经多根红宝石试验结果一样。

在二次曝光实验中,第一次激光脉冲与第二次激光脉冲相隔半小时,在没有用防震台情况下,也能得出清晰的干涉条纹及线性工作曲线。可测量的最大位移甚至可达 500 μm。这些实验证明,脉冲红宝石激光能用作激光斑纹干涉术,为斑纹测量技术开辟了新的途径。

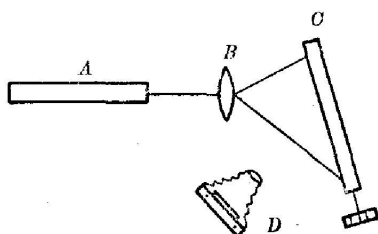


图 1

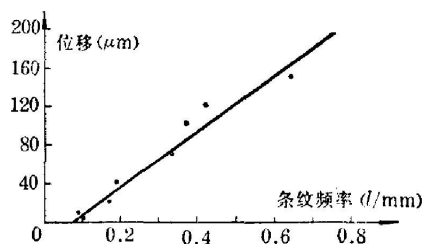


图 2

## 二、基本原理

为简化起见,假设激光脉冲为矩形脉冲,脉冲宽度为 $\tau$ ,两个脉冲之间的时间间隔为 $T$ 。令 $D(\eta, \zeta)$ 为物体不动时在照相底片上的斑纹场。在曝光时间内,物体沿 $\zeta$ 方向位移 $\zeta_0$ ,这样 $\zeta_0 = v\tau$ , $v$ 是物体的速度。那么在 $\tau$ 时间内所记录的斑纹场为

$$D(\eta, \zeta) \otimes \text{rect}(\zeta/\zeta_0) \quad (1)$$

两个脉冲之间的时间间隔为 $T$ ,那么在时间 $T$ 内,物体位移为 $\zeta_1 = vT$ ,二次曝光后,底片上所记录的斑纹场为

$$[D(\eta, \zeta) \otimes \text{rect}(\zeta/\zeta_0)] \otimes [\delta(\zeta) + \delta(\zeta - \zeta_1)] \quad (2)$$

于是在傅里叶变换面上观察到的光场为

$$|\tilde{D}(u, v)|^2 \sin^2 C(\pi v \zeta_0 / \lambda) \cos^2(\pi v \zeta_1 / \lambda) \quad (3)$$

其中 $|\tilde{D}(uv)|^2$ 为光晕, $\sin C(\pi v \zeta_0 / \lambda) = \sin(\pi v \zeta_0 / \lambda) / (\pi v \zeta_0 / \lambda)$ , $u, v$ 为变换面上的坐标, $\lambda$ 为激光波长。由(3)式可知,在傅里叶变换面上观察到的光晕受余弦平方所调制,产生了干涉条纹,从干涉条纹间隔,可以得到物体位移的信息<sup>[4]</sup>。至于 $\sin C$ 项,由于激光器是Q开关的, $\tau$ 很小,所以 $\zeta_0$ 也很小, $\sin C$ 的周期很长,所以对光晕的调制影响很小。

## 三、测速实验装置与方法

我们采用光学延迟办法,使单脉冲激光变成为双脉冲激光。实验装置如图3所示。A为作准直用的He-Ne激光器,输出功率为2mW;B为高反膜反射镜;C为调Q用的隐花菁乙醇溶液池,对6943Å的透过率为20%;D为 $\phi 12\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的红宝石棒;E为半透射镜; $f_1, f_2$ 焦距分别为 $f_1 = 59\text{mm}$ 和 $f_2 = 233\text{mm}$ 的凸透镜,它们组成一组望远系统,以改善光束的平行度;S为分束器; $m, M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ 均为对6943Å全反镜;O为高速运动物体,实验是在一台高速马达上装一个刻有标尺的白色转盘( $\phi 100\text{mm}$ )来模拟,以便测量照相系统的放大率,高速马达转速最高为 $3 \times 10^4 \text{c/min}$ ,通过改变马达的供电电压可改变它的转速;H为DFAB型照相机,底片采用比利时8E75型全息干板,照相机对焦于转盘边缘。于是,转盘边缘每一点的线速度为

$$v = \omega \cdot R / 60, \quad (4)$$

式中 $\omega$ 为马达转速(c/min), $R$ 为圆周半径。

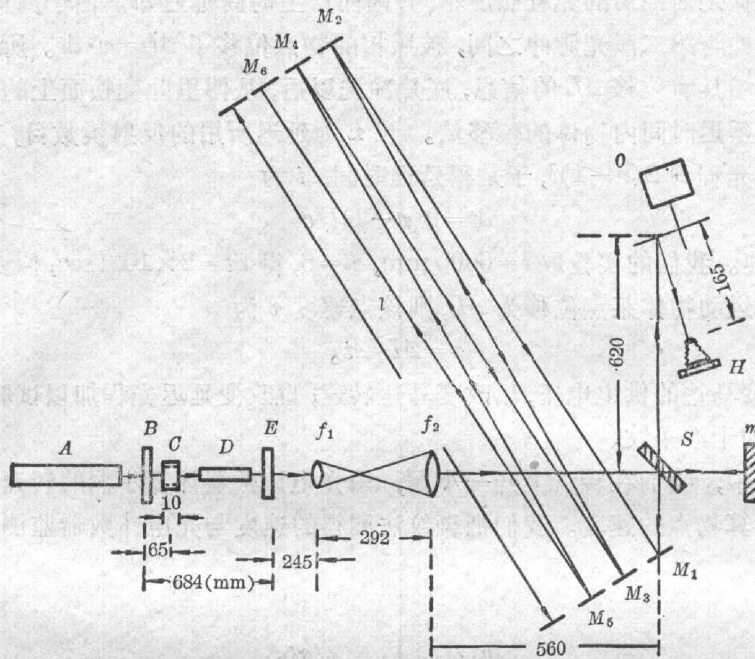


图 3

拍摄过程如下:红宝石激光经望远系统  $f_1$ 、 $f_2$  和分束器  $S$  后被分为两束光,一束到达全反射镜  $m$  反射回  $S$ , 成为第一个激光脉冲, 照明景物, 在照相底片上产生第一个斑纹场。另一束激光被  $S$  反射, 到达  $M_1$ , 经  $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 、 $M_5$ 、 $M_6$  多次反射后, 再由原光路返回  $S$ , 透过  $S$  成为第二个激光脉冲, 照明景物, 在照相底片上产生第二个斑纹场。因为光束 1 与光

表 1

$\Delta L(\mu\text{m})$	$\Delta t(10^{-7}\text{sec})$	$v(\text{m/s})$	对应的干涉条纹
19.4	2.0	97.0	
17.1	2.0	85.5	
15.4	2.0	77.0	
13.4	1.6	83.8	
11.6	1.2	96.7	

速 2 到达高速转盘之前经历的光程长度不同,因而产生时间延迟  $\Delta t$ 。由于高速马达在转动,因此第一激光脉冲与第二激光脉冲之间,被照相的物点位移了  $\Delta L = v \cdot \Delta t$ 。所以照相底片上记录的两个斑纹场具有位移  $\Delta L$  的信息,底片冲洗以后,从傅里叶变换面上的干涉条纹间距便可知两个脉冲延迟时间内物体的位移量。设  $n$  为延迟所用的反射镜数目,每个反射镜的间距为  $l$ ,则延时光程为  $2(n-1)l$ ,于是得延迟时间  $\Delta t$  为

$$\Delta t = 2(n-1)l/c, \quad (5)$$

(5)式中  $c$  为光速。我们的实验取  $l = 6000 \text{ mm}$ ,  $n = 6$ ,得  $\Delta t = 2 \times 10^{-7} \text{ sec}$ ,假设,从傅里叶变换面上测得高速运动物体某点位移为  $\Delta L$ ,则该点速度  $v$  为

$$v = \Delta L / \Delta t. \quad (6)$$

实验中,我们改变马达的供电电压,以改变马达转速;也改变延迟光程加以试验,结果示于表 1。照片是对应的干涉条纹。

在实验过程中,我们在转盘上开一小洞,用光电计数器计算小洞的转速(即马达的转速),从而亦可计算物点的速度。我们把斑纹法测得的速度与光电计数器监测到的速度相比较,相差约 6%。

## 四、讨 论

(1) 本实验方法对被测物的表面状态要求不高,是无接触式测量,对设备稳定性要求极低,受外界干扰少,因而在恶劣环境下测速十分有用。

(2) 本方法采用脉冲斑纹干涉术,脉冲宽度  $\tau$  和脉冲延迟时间  $\Delta t$  是两个重要的彼此相关的参数。当  $\Delta t \gg \tau$  时,其测量精度与通常的斑纹干涉术精度相似,误差主要来源于测量干涉条纹的仪器精度,约为 5% 以下<sup>[5]</sup>。当  $\Delta t \approx \tau$  时,则误差主要来源于在脉冲时间内的物体位移,这时精度就必须进一步考虑。目前, Q 开关红宝石激光脉宽可达 ns 量级。当脉宽确定时,根据精度的要求,用  $\tau / \Delta t$  来选定脉冲延迟时间  $\Delta t$ ; 或者用一确定的  $\Delta t$  来确定对脉宽的要求。

感谢刘惠子同志参加本实验工作。

## 参 考 文 献

- [1] F. P. Chiang; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 16 (15 Aug), 2701.
- [2] 马莹莹;《激光》,1982, No. 5 (May), 93.
- [3] 赵降英;《激光》,1980, No. 4 (Apr), 32.
- [4] M. Francon; *Laser Speckle and Applications in Optics*, (New York, Academic press, 1979), 145.
- [5] 周尚文;《激光》,1979, No. 6 (Jun), 27.

## Measurement of high speed event using pulsed speckle interferometry

FENG SHIYU

*(Department of Physics, Chinese University, Hong Kong)*

GUO SIGAN MA YINGYING AND ZHENG SHUNXUAN

*(Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou)*

(Received 24 April 1983; revised 14 October 1983)

### Abstract

This paper presents a new method, i. e., pulsed speckle interferometry, in the measurement of high speed event. To measure the velocity of objects moving at a speed as high as 100 m/s, the single pulse ruby laser beam is divided into double pulses beam by a splitter and by an optical delay line.