

# 环 路 干 涉 仪

王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文对环路干涉仪作为白光剪切干涉仪的特性作了仔细讨论,从最简单的由三平板组成的干涉仪开始,对它的白光横向剪切特性及剪切量调整方法作了分析。讨论了四平板以及更多平板组成的干涉仪的性质,尤其是四平板形成空间环路时的性质,表明可以形成任意转角的旋转剪切。同时还讨论了环路内有光学系统时的表现,表明用确定焦距的透镜或望远镜可以达到预定的径向剪切干涉。最后讨论了这种干涉仪的制造精度要求和它能达到的测量精度。本文写作于1976年,用这些思想已做过一些有意义的实验工作,并已发表在 IEEE J. of Quantum Electronics, QE-17 (1981) 1768。

## 一、引 言

环路干涉仪是一类独特的干涉仪,它和其它干涉仪不同之处是:相干涉的二光路都通过一个闭合环路,如图1所示。由于二光路通过的光程接近相同,因此可以得到白光干涉条纹,而且干涉条纹对振动影响不灵敏。这些特点与剪切干涉仪很相似<sup>[1]</sup>。事实上从下面讨论的结果可以看出,环路干涉仪实际上就是一种剪切干涉仪,并且可以形成各种可能的剪切。

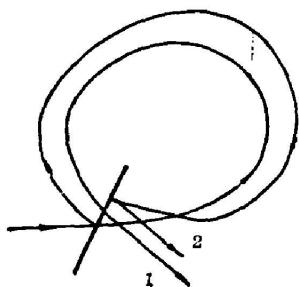


图 1

最早采用环路干涉仪于物理实验的有 Sagnac 和 Harress,前者采用四边形的环路进行了著名的条纹对旋转敏感的实验。后者采用的环由玻璃内多次全反射形成,可用来测量 Fizeau 牵引的色散。Sagnac 效应曾以多种方式重复过,其中 Michelson 以  $340\text{ m} \times 610\text{ m}$  的环路面积测出了地球转动。由于激光的出现,使高精度的差频测量成为可能,可以用很小的环路测出很小的角速度<sup>[2]</sup>。

Augustyn 最近描述了一种“同路干涉仪”用于光学检验<sup>[3]</sup>,作为散射干涉仪的革新<sup>[4]</sup>,实际上这可看作环路干涉仪的一种特殊情况。使用环路干涉仪于光学检验也曾做过不少工作<sup>[5]</sup>,其中 Brown 描述的球面干涉仪与文献[3]是很相似的。

环路干涉仪内顺时针方向和逆时针方向的光路一般而言是不同的,当环内有透镜或球面反射镜时更是如此。由于这两种原因,环路干涉仪可以形成各种波面剪切干涉。

由于转向不同的光路内透镜对模式的作用完全不同,因此具有完全不同的横模结构,似乎没有注意到光陀螺可用这种方式消除纵模锁定;另外,用光导纤维形成多圈的环路,可使环所包含的面积易于做得很大,这样就可能使光陀螺的测角灵敏度提高。

为了对激光波面进行测量,由于不可能将它与已知标准波面相比较,环路干涉仪成为有力的测量工具。

## 二、平面反射组成的环

用平面反射就可以形成多种环路,既可以做横向平移剪切,也可以做平移加旋转的剪切,剪切量任意可调;还可以形成任意转角的旋转剪切。故可以用来检测平面波或任意半径的球面波并测量其波面半径。

1. 最简单的环由三平面组成,三平面的法线在同一平面内,如图 2 所示。图 2 中平面  $C$  是半透光反射镜,  $A$ 、 $B$  则均为全反射镜。它是横向剪切量可调而且两光路出射光恒相互平行的剪切干涉仪。逆时针方向光路是在  $A$ 、 $B$  两镜面反射而透过  $C$  两次,故出射方向与入射方向的夹角即为  $AB$  夹角的二倍。顺时针方向光路依次经  $C$ 、 $B$ 、 $A$ 、 $C$  反射四次,故出射方向和入射方向夹角为  $CB$  夹角和  $AC$  夹角之和的二倍,亦即二倍于  $AB$  夹角。因此,两种出射光路恒相互平行。从而二波面作横向平移剪切。

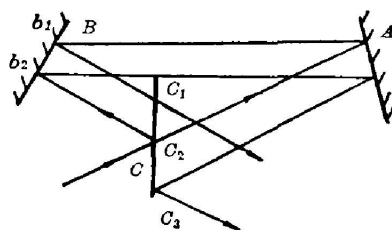


图 2

干涉仪的横向剪切量可以这样来调整:对逆时针方向光路而言,平板  $C$  对光路不发生影响,移动平板  $C$  可以使入射点  $C_2$  和出射点  $C_1$  不重合;再转动平板  $C$  使反射光  $C_2b_2$  与  $C_1b_1$  平行,那么它形成的顺时针方向光路将在  $C_3$  点出射,距离  $C_1C_3$  为  $C_2C_2$  的二倍。

当镜  $C$  和入射方向不变,保持  $AB$  夹角不变,并使二者绕  $b_1$  点转动,就可以使剪切量作单调变化从而得到任意的剪切量。

由此可见,这是一种剪切量很容易变动的横向平移剪切干涉仪,而且是白光干涉仪,它对光学检验和光学传递函数测量,都是一种有用的工具。

当入射波面为平面时,剪切产生的本底条纹为零。当入射波面为球面时,剪切产生与纸面垂直的平行直条纹与杨氏双孔干涉条纹相同。

2. 当三镜面的法线不在同一平面内时,取  $AB$  两面法线所在平面为图 2 的纸平面,则  $C$  面法线和纸面夹角为  $\delta$ ,逆向光路仍在纸平面内,顺向光路为镜  $C$  反射而与纸平面呈夹角  $2\delta$ ,这就使二种光路出射方向不再平行,这种夹角对干涉仪来说形成附加光程差,产生和纸面平行的等距直条纹。

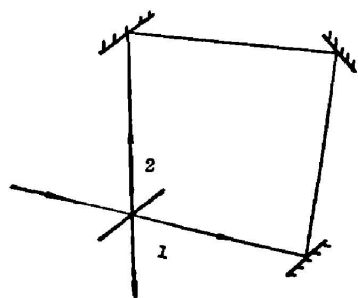


图 3

3. Sagnac 和 Michelson 使用的都是四角形环路,由四平面反射组成,如图 3 所示。鉴于四角形环内光路经历奇次反射,与三角形不同,因此可以设想顺逆光路不再能保持出射时自动平行,实际上考察任一反射镜转动的后果时就可看出,它使二种光路作反向转动,因此只有仔细调整才能保持二路出射相互平行,否则出射光路总是不平行的。

当入射干涉仪的波面是球面时, 横向平移剪切时产生的杨氏干涉条纹会很密, 过密的本底条纹使测量不方便, 在这时使二路有夹角可以使本底条纹除去——使顺逆二路相交于入射波面球心。例如, 当入射球面波球心和反射镜之一重合时, 旋转此镜面即可在本底条纹为零的条件下得到任意的横向剪切。如图 4 所示, 将入射光束焦点处于可转动的小反射镜上就可获得这种效果。

4. 四反射面的法线不在同一平面内时, 也可用以组成闭合的环, 例如图 5 中的  $ABCD$ 。图中  $XYZ$  是直角坐标系, 原点  $C$  处为半透板, 将入射光  $EC$  分为  $CD$ 、 $CB$  二路, 显然, 此半透板的法线在  $xy$  面内, 并与  $y$  轴夹  $45^\circ$  角。在  $D$  点有反射平板将光线  $CD$  反射为光线  $DA$ , 在  $A$  点有反射平板将光线  $DA$  反射为光线  $AB$ , 在  $B$  点的反射平板则将光线  $AB$  转为  $BC$ 。  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点都在坐标轴上, 显然  $B$  处和  $C$  处的反射面法线都在相应坐标面内, 而  $A$  处则非。这样的空间环路与平面环路不同之处在于波面坐标转动。如图中的入射坐标  $EYZ$  在  $CF$  处出射时, 方向一般与  $XZ$  方向不重合而有转动。用一般的几何方法易于算出这个转角<sup>[8]</sup>。

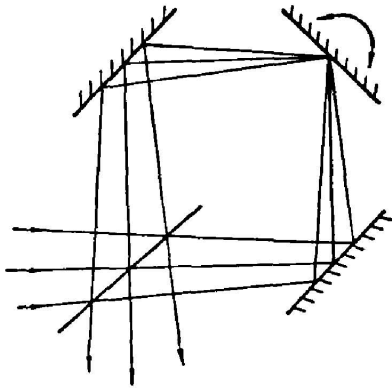


图 4

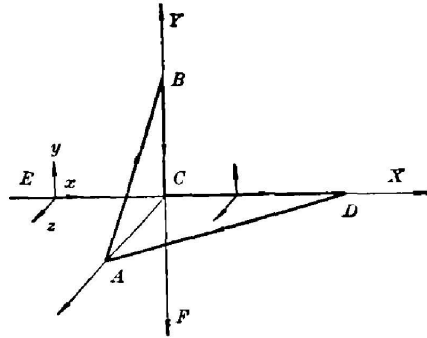


图 5

对于平面环路来说, 与此平面垂直的坐标方向恒定不变, 因此不存在这个问题。对于空间环路则一般都有这个问题, 例如图 5 中环路, 发生的转角随  $B$  点的高度而增加。再由于逆向光路引起逆向转动, 故当输出方向相重叠时, 两波面有成倍的相对转动。也就是说, 用这种方法可以形成任意的旋转剪切。

显然更多角的环的性质和上述的几种环没有本质的区别, 环路的性质由角数奇偶而定, 并根据它是否在一个平面内而定。

### 三、环内有光学系统

由平面反射形成的环不使波面半径变化, 因此出射波面半径恒相等, 孔径恒相等, 故只会产生横向剪切或旋转剪切, 不能产生径向剪切, 显然当环内有光学系统时就容易产生径向剪切。例如对激光器的环形腔内顺逆光路有不同的横模<sup>[9]</sup>。为了使干涉所得的本底条纹为零, 应使二路输出波面具有相同的曲率半径, 并且又有不同的扩孔倍率。下面的分析表明, 这是做得到的。从光学系统理论可知, 环内的光学系统不外乎二种可能性, 即使是等价于定

焦距透镜或是等价于一个望远镜。现分别讨论如下:

### 1. 环内有一望远镜

当平行光入射时,若顺时针方向时望远镜使光束扩孔  $M\times$ ,则逆时针方向通过缩孔  $M\times$ ,因此顺时针方向光束波面的  $1/M^2$  与逆时针波面的整体相干涉。

当入射方向与干涉仪内望远镜轴的夹角为  $\theta$ ,则出射光束分别倾斜一个角度  $M\theta$  和  $1/M\theta$ ,即不相互平行,从而产生水平或垂直条纹。

当入射波面偏离平面时,出射波面半径分别是入射半径的  $M^2$  或  $1/M^2$ ,从而形成牛顿环或弯曲条纹。

入射光束作平移时由于两种光路倍率不同,从而使出射光束平移量不同,导致横向剪切。因此,内部包含一个望远镜的环路干涉仪可以将波面的任一局部扩孔后与其整体相干涉。

### 2. 环内有确定焦距的透镜

若入射波面和平面波差得远,那么用望远镜产生径向剪切时将形成很密的干涉环,为使二路输出的波面半径相等,可在环路内加入适当的定焦距透镜。如图 6 所示,透镜焦距为  $f$ ,主平面离半透板距离为  $d_1$  和  $d_2$ ,要使距离干涉仪半透板  $l$  处发出的球面波经过干涉仪内二种光路后半径相等,有二种可能:(1)  $d_1=d_2$ , (2) 输出波面聚焦在距半透板  $l$  处。为满足后一要求,  $l_1$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $f$  应满足关系:

$$\frac{1}{l-d_1} + \frac{1}{f} = \frac{1}{d_2-l}, \quad (1)$$

而二种光路使波面孔径角之比为:

$$m = \left( \frac{l-d_1}{l-d_2} \right)^2. \quad (2)$$

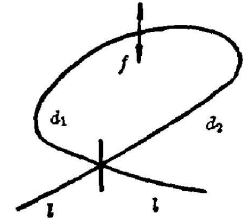


图 6

故当预定  $l/d_2$  之值及径向剪切倍率  $m$  后,即可由(2)式决定  $d_1/d_2$ ;再由(1)式决定  $f/d_2$ ,亦即完全决定了这个干涉仪的参数。可以证明,除上述二种解以外,这个问题没有其它解。

当  $d_1=d_2$  时,由于顺逆时针光路有同一倍率,因此对入射波面并不产生径向剪切。但当考虑到焦距  $1/f$  是由复合光学系统组成,顺逆时针二光路可以是非常不同的。这种干涉仪虽不能反映入射波面的误差,却可以测出顺逆二路的差别,并可将其文献[3]看作是这种解的一个应用。

## 四、用剪切干涉测量波面

用干涉仪测量波面时,一般都是将被测面与已知的标准面相比较,犹如光学加工中用样板检验工件;剪切干涉仪不同,是将被测波面本身作相互比较,犹如光学加工时为加工样板本身而将一对样板作相互比较,因此无论是横向剪切而剪切量可调;或是用径向剪切,将波面的任一局部放大后检查整体,都可充分检查出波面的局部误差。

干涉仪也可用来测量波面曲率半径,原则上光程差测量精度达到  $1/4$  波长与焦距测量精度达到焦深相当。下面考察几种具体的情况。

### 1. 横向平移剪切

如图 7 所示,波面曲率半径  $r$ ,波面半孔径  $b$ ,二波面平移剪切量  $d$ ,测出条纹数为  $n$ ,则

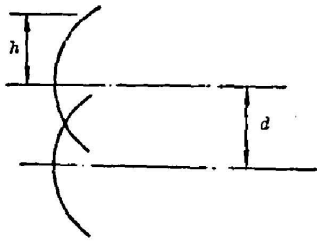


图 7

$$[h^2 - (h-d)^2]/2R = n\lambda,$$

当  $\Delta n = 1/4$  时, 引起半径测量误差  $\Delta R$ , 则

$$\Delta R/2R^2[h^2 - (h-d)^2] = \lambda/4.$$

当  $h=d$  时,  $\Delta R = \lambda/2u^2$ ,  $u = h/R$  为半孔径角。当  $h-d = h/2$  时,  $\Delta R = 4\lambda/6u^2$ , 还是和焦深接近。

显然用剪切干涉测量波面曲率半径时, 首先要将干涉仪用平面波标定好, 使  $R = \infty$  时,  $n = 0$ 。由此可见, 用横向平移剪切干涉测量波面半径, 事实上是将此波面与平面波相比较, 当半径很小时,  $n$  很大, 准确到  $1/4$  就不容易。

当预先将干涉仪对  $R = R_0$  的波面校正到  $n = 0$ , 那么就可以用来测出波面和  $R_0$  之差, 显然所能达到的精度是一样的。

## 2. 径向剪切

无论是环路内加入望远镜或是定焦距透镜, 干涉仪总可对某一定的波面半径标定好(使条纹弯度为零), 对于其它波面则条纹弯曲或成同心圆, 从而测出其半径与标准值之差。

以曲率半径为  $R$  的球面波入射  $M \times$  望远镜为例, 顺逆二光路经过望远镜后, 波面半径分别是  $M^2R$  和  $R/M^2$ , 从而在半孔径  $h/M$  内形成程差:

$$m\lambda = \frac{h^2}{2M^2} \left( \frac{1}{RM^2} - \frac{M^2}{R} \right) = -\frac{h^2}{2R} \left( 1 - \frac{1}{M^4} \right).$$

可见与平面样板观察此波面时所得的结果几乎一样, 例如  $M = 2$  时差别是 16:15。与前述相似, 此干涉仪内的望远镜必须先用平行光束进行标定, 使其  $n = 0$ 。

由此可见, 用径向剪切测量波面半径时, 精度也是难以达到焦深的大小。

为了测量激光的曲率波面半径和非球面程度, 也可以采用剪切干涉法, 将波面与其本身相比较。用网络法(Hartmann法)虽也可以进行测量, 但由于激光波面形式的复杂性, 使数据处理不能达到较高精度。用干涉法则不但可能测出波面半径及误差, 还可由条纹的多组而判定横模的多寡。已有的一些剪切测量激光波面的干涉仪<sup>[6]</sup>由于未计及应使二相干波面的半径接近相等, 因此所得条纹太密, 不宜用以测定波面误差, 而且未使二路光程相等, 因此只对谱线宽度非常小的激光才有足够的能见度。对于环路剪切来说, 条纹能见度则纯由横模非单模所致, 因此对于横模结构可以作出清楚的判断。

## 五、干涉仪本身的误差

用干涉仪测量波面需要假定干涉仪本身是理想的, 事实上当然不会是这样。干涉仪本身的误差对测量发生影响, 从而使测量精度不会超出干涉仪本身误差的量级。

由平板组成的干涉仪, 例如三角形环路干涉仪, 由于横向剪切量可调, 用干涉仪本身就可以检查其零件的局部误差, 为了检查干涉仪内平板的球面度, 要求入射光束具有足够的平行度。用刀口法检查好长焦距球面反射镜的质量并量准半径, 然后将星点放准在焦点位置, 就可以得到精度很高的平行光束。可以用这种平面波检查干涉仪平板的平度或球面度。

当干涉仪不全由平面组成时还将引入象差。如将三角形环路的二平面用球面代替, 就

可以在环内形成望远镜,这种望远镜会有像散等像差。例如用  $R$  为 3 m, 6 m 组成 2 倍望远镜,等边三角形锐角为 0.06 弧度时,对  $\phi 40/80$  的光斑像散为  $\lambda/4$ 。使三角形不等边可以使像散得到完全校正,此时干涉仪主要残余像差是彗差。

在干涉仪内用单个球面反射面以引入光焦度时,由于斜入射,主要像差还是像散。为了校正像散可以将半透板用具有楔角的玻璃平板形成,玻璃平板具有楔角时二面产生的像散差就可以足够大,由于像散和楔角与入射角之积成正比,因此只要楔角适当就可以调整入射角而校正像散。

文章[3]所述的干涉仪中也存在校正正向、反向光路像差,使之相等的问题。

### 参 考 文 献

- [1] O. Bryngdahl; *«Progs. in Opt.»*, 1965, 4 (Amsterdam, North-Holland Pub. Co.).  
M. V. Murty, R. P. Shukla; *Appl. Opt.*, 1973, 12, No. 11 (Nov), 2765.  
S. Yokozeki, K. Ohnishi; *Appl. Opt.*, 1975, 14, No. 3 (Mar), 623.
- [2] P. J. Post; *Rev. Mod. Phys.*, 1967, 39, No. 2 (Apr), 475.  
F. Aronowitz; *«Laser Application»*, 1971, 1, (New York, Academic).
- [3] W. H. Augustyn; *Opt. Eng.*, 1973, 12, No. 5 (Sep-Oct), 180.
- [4] Burch; *Nature*, 1953, 171, 883.  
D. Polster, J. Pastor *et. al*; *Appl. Opt.*, 1969, 8, No. 3 (Mar), 521.
- [5] D. S. Brown; *J. Sci. Instr.*, 1962, 39, No. 2 (Feb), 71.
- [6] R. E. Parks; *Appl. Opt.*, 1973, 12, No. 11 (Nov), 2541.
- [7] 王之江; *«光学设计理论基础»*, (科学出版社, 1965), 第二章, §7.

## Ring Interferometer

WANG ZHIJIANG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 6 April 1982)

### Abstract

The characters of ring interferometer as a white-light shearing interferometer have been discussed. The simplest type of ring interferometer is constructed by three plates. This interferometer can have definite lateral shearing with equal optical path. The adjustment methods are discussed. Ring interferometers formed with four and/or even more plates are analysed, it has been shown that, ring spacial optical path with four plates can form a rotational shearing interferometer with arbitrary shearing angle. The behavior of optical system in ring interferometer is discussed. It shows that, the ring interferometer with definite focal length or telescopic system can obtain the radical shearing expected. Finally, the tolerance and measurment accuracy of ring shearing interferometer are presented. This paper was completed in 1976. Following the idea proposed in this article some interesting experiments were performed, such as a paper published in IEEE J. of Quantum Electronics, QE-17 (1981) 1768.