

# 光学球面曲率半径的测量

周学海

**摘要:** 光学仪器, 不论是照相系统、显微系统、望远系统抑或多光束折反系统, 占较大比例的是球面光学零件。随着仪器性能的改善、功能的扩大, 对这些球面零件的面形和曲率半径的准确度要求也越益提高, 并且, 球面零件曲率半径随所处仪器不同其长短相差甚大, 检测方法不能互相套用, 何况要求的准确度又不一。为此, 本文就球面曲率半径的各种测量方法、技术和装置, 以及它们所能达到的精度等作一甚为详细的描述, 以供有关工作人员参考。

## 一、引言

光学仪器, 不论是照相系统、显微系统、望远系统还是多光束折反系统(指激光谐振腔等), 都离不开球面光学零件。随着科学技术的不断发展, 对光学仪器所能达到的性能及要完成的功能更高、更多。所以, 要求球面面形及其曲率半径加工得更准确。于是, 一方面促进了球面零件加工工艺的更新, 另一方面, 对球面面形和曲率半径的检测方法提出了更高的要求。一般来说, 照相物镜, 显微物镜或投影物镜之类的球面零件其曲率半径较短, 通常在几毫米到几百毫米量级, 最长不过数米, 测量它显然要有高的精度; 而望远物镜和激光谐振腔之类光学球面的曲率半径较长, 短者数米, 长者可达上百米。虽然精度要求相应较低, 但测量方法却不同于短半径的情况。这里, 我们撇开球面面形的检测问题不谈, 仅就短半径(约几米)和长半径(几米~上百米)的测量技术、方法、装置及其可能达到的精度、优缺点等作由简入繁且比较详细的描述, 目的是为一些有关工作人员提供参考, 使之有所取舍, 有所改进。

## 二、短曲率半径的测量方法

### 1. 球径仪

#### (1) 环形球径仪

这种球径仪是利用测量球面的一部分对应的矢高来计算球面曲率半径的。如图1所示, 设球面被测部分的环半径为 $r$ , 对应的矢高为 $h$ , 则曲率半径 $R$ 可由下式:

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} \quad (1)$$

计算得到, 测量环的断面如图2所示, 中心是测量杆 $b$ , 用读数显微镜读取测量杆 $b$ 的位置, 测微目镜可准确地读到 $\pm 1\mu\text{m}$ , 而测量环的半径值是预先准确给出的, 精度约为 $\pm 2\mu\text{m}$ , (图2是测凸面的情况, 测凹面时, 球面与测量环的外棱相接触)。为了测量不同口径的透镜

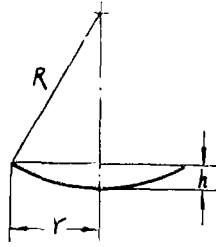


图1 球径仪原理简图

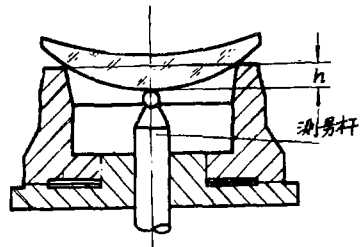


图2 测量环

的曲率半径，环形球径仪备有一组不同环直径的测量环。这种仪器最小可测半径凸面约为 5 mm、凹面约为 8 mm，测量精度约为半径的  $\pm 0.03\%$ 。但由于环、杆要与被测球面接触，且接触面尖小，所以容易损坏被测件的抛光表面。

(2) 三钢珠球径仪

这种球径仪的原理简图如图 3 所示，由钢珠中心确定的圆的半径为  $r$ ，钢珠半径为  $\rho$ ，显然，曲率半径可按下式

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} \pm \rho \quad (2)$$

计算得到。式中测凹面时取“+”号，测凸面时则为“-”号。

用球径仪测量时，均先选取测量环的直径，以较被测透镜直径小 3 ~ 10mm 为宜，然后把一块平板玻璃放在测量环上，以此时测量杆的位置为零位，从读数显微镜上记下其位置读

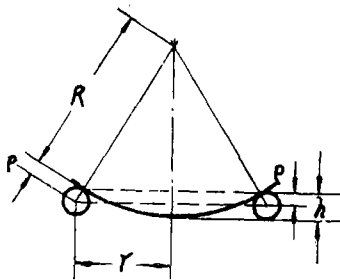


图3 三钢珠球径仪

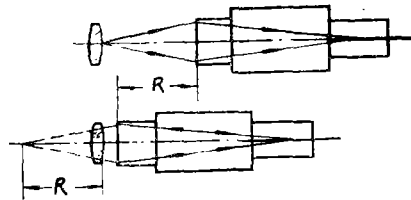


图4 自准直显微镜法

数，再将被测透镜放上，又得一读数，两次读数差，即为被测量球面所选测量环的矢高。

用钢珠代替尖棱与被测球面接触，既可减小接触应力，又可减少测量的磨损，延长使用寿命，而测量精度相同。

2. 自准直显微镜法

在这种方法中，我们把被测的抛光球面作为反射面，当入射光线皆沿曲率半径方向（即球面法线方向）投射到球面上时，反射光线就按原路折回，根据这个原理，如图 4 所示，首先移动显微镜（或被测透镜），使得由显微镜射出的光束经被测球面反射回来在分划板上生成清晰而无视差的分划象，然后前移（测凸面）或后移（测凹面）显微镜，使之无视差地看清球面上的脏点（以小脏点为宜），此时，移动距离即为被测球面的曲率半径。这种方法虽系非接触式，但由于受自准直显微镜孔径角和光束截面的限制，所以被测球面的口径较小，测凸面

更其困难。一般凹面可测半径多在 0~500mm 之内，而凸面在 20mm 之内，然而测量精度则可达 0.01mm。

### 3. 刀口仪法

从刀口仪（图 5）星点孔发出的光束射向被测凹球面，倾斜调节球面和纵向移动刀口仪，使从球面反射回来的星点象呈现在刀口的附近，横向移动刀口仪，用刀口来切割星点象。测

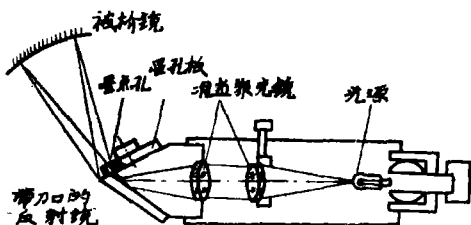


图 5 刀口仪测球径示意图

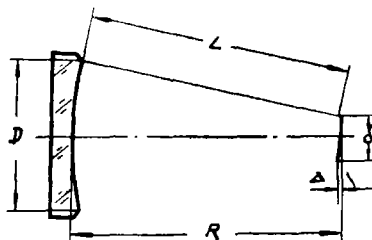


图 6 刀口仪测球径的结构参数

量时，主要是找凹球面球心的位置。当球面有局部误差时，则以找到半明半暗（阴影）的面积最大为准。找到球心位置后，用较好的卷尺量出被测球面边缘到刀口的距离  $L$ ，如图 6 所示，设被测面的直径为  $D$ ，星点孔到刀口的距离以  $\delta$  表示，则曲率半径可用下列近似公式<sup>[1]</sup>来求出：

$$R \approx L + \frac{D\delta}{4L} \quad (3)$$

图 6 中，当  $\delta$  很小时， $\Delta$  可以忽略不计。显然，刀口仪法只适于测凹球面，其可测最小半径由刀口到星点孔的距离  $\delta$  来决定，其精度为  $\pm 0.05\%$ 。

### 4. 球面干涉仪

能测量球面光学零件曲率半径的球面干涉仪有激光球面干涉仪<sup>[2]</sup>和全息球面干涉仪<sup>[3]</sup>，它们都应用高相干性的 He-Ne 激光作光源。前者是采用经很好消象差的光学设计和精细研磨的标准镜头（图 7），而其最后一个折射面为分光面，构成一个菲索型干涉系统，由分光面反射返回的光波作参考波，而由被测球面反射返回的光波作物波，在干涉场可以观察到相应的干涉条纹。测量被检球面曲率半径的原理基本上和自准显微镜法大致相同。若移动被测球面使标准镜头的焦点落在球面顶点上时（此时，干涉场出现对称型条纹或能辨别焦前焦后的折衷干涉图象）记下被测件的位置读数  $Z_1$ ，然后，再移动被测件至光束在其上自准反射回来时

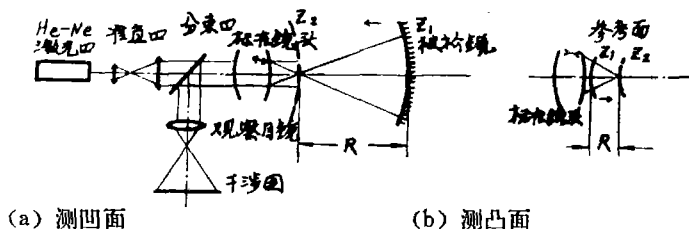


图 7 激光球面干涉仪测球径示意图

（此时干涉场为直条纹或一片均匀亮场或暗场）记下位置读数  $Z_2$ ，则  $|Z_2 - Z_1|$  就是被测件的曲率半径。

由于在顶点位置时波面反射后发生了横向颠倒，而标准镜头及其前面的光学系统不可能有非常对称的光学常数（如色散，均匀性、应力条纹等），所以将发生干涉条纹不直，只能以大略对称位置为顶点位置，这种定位不准确的情况就影响了曲率半径测量的精度。

全息球面干涉仪是利用全息波带板的原理<sup>[4]</sup>，以一个薄膜全息透镜作为标准透镜，如图8所示，测曲率半径的基本原理和步骤与激光球面干涉仪相类似，所差的是为了提高干涉条

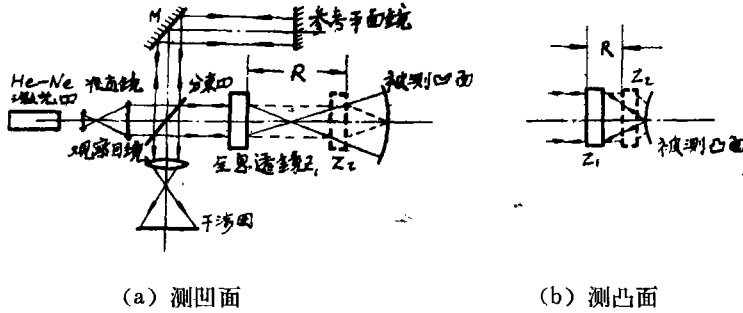


图8 全息球面干涉仪测球径示意图

纹对比度，不移动被测球面而是移动全息透镜（激光球面干涉仪难以做到），使泰曼型的两光束支路等程差，但是，由于薄膜透镜上光学常数的对称可以做得较好，即使球面顶点处波面横向颠倒后，干涉条纹仍能很直。所以顶点定位很准。用这种干涉仪测曲率半径可精确到  $1\mu\text{m}$  以内。

上述两种球面干涉仪对凸面和凹面都可兼测，只是凸面的半径受标准镜头或全息透镜的口径和相对孔径的限制，不能测得很大。

### 三、长曲率半径的测量方法

#### 1. 直接测量法

如图9所示，在待测凹面镜的曲率中心附近放置一块标记有十字线的毛玻璃屏，十字线由约为100瓦的灯所照明，十字线的反射象呈在屏上，调节镜与屏之间的相对位置直到屏上能观察到明锐的十字线象为止，这时，屏与镜之间的距离就是曲率半径，其测量精度取决于我们对明锐聚焦屏上的判断能力。用瑞利判据来确定离焦误差，则有下列关系式<sup>[5]</sup>：

$$\text{测量误差} = \pm 2\lambda R^{\#2} \tag{4}$$

式中 $\lambda$ 是波长， $R^{\#}$ 是凹面镜的 $R$ 数 ( $R^{\#} = \text{半径}/\text{口径}$ )。这种方法需要有一个较大的操作空间，并且不适用于凸面镜。

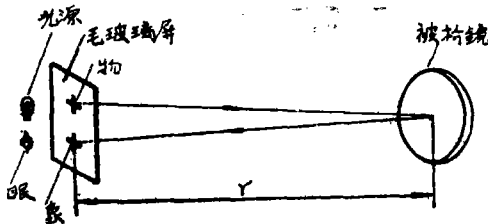


图9 直接测量法

#### 2. 象散法

当一束准直光束以一离轴角度入射在镜面上时，镜面的反射光就产生了诸如象散之类的

象差。通过象散的测量，就可以测得此镜子的曲率半径。这种方法的实验装置如图10所示。从 He-Ne 激光射出的激光束由显微物镜和准直物镜使之准直，在显微物镜焦点上放一空间

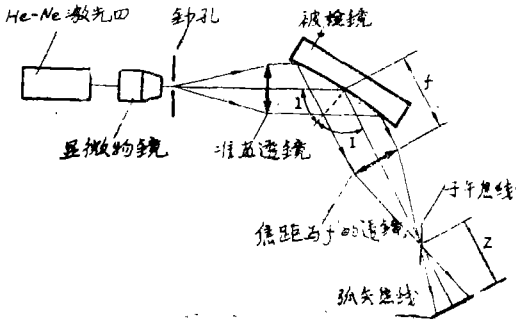


图10 象散法测球径示意图

滤波器，待检的镜面置于入射角为  $I$  的光束中，该镜面的反射光束通过会聚透镜聚焦在一个屏上，而此屏放在观察显微镜的移动架上，聚焦透镜与光轴同轴，并置于距镜面为  $f$  的地方，首先使子午象（竖直线）聚焦在屏上，记下此时屏的位置，然后，让此屏后移，以便使弧矢象（子午线）明锐地聚焦，再记下此象的位置，这两个位置之差即得到由此镜面引入的轴向象散，用  $A$  来表示，于是曲率半径可按下面的关系式<sup>[5]</sup>求得：

$$r = 2(f \sin I)^2 / A \cos I \quad (5)$$

待检镜被装在旋转台上，首先通过观察针孔本身的反射象自准地调好此镜子，然后使其相对于这个位置旋转一个  $I$  角（转台带度盘），这种情况下， $I$  角也可测出。这种方法既可测凹面，也可测凸面。不过，在凸面镜下，弧矢焦点靠近透镜，而在凹镜下，子午焦点靠近被检镜。这种方法的测量误差大约是曲率半径的  $\pm 3.5\%$ 。

### 3. 自准直望远镜法

同自准直显微镜法原理一样，我们将一块平面镜放在望远镜前面（如图11所示），轴向地

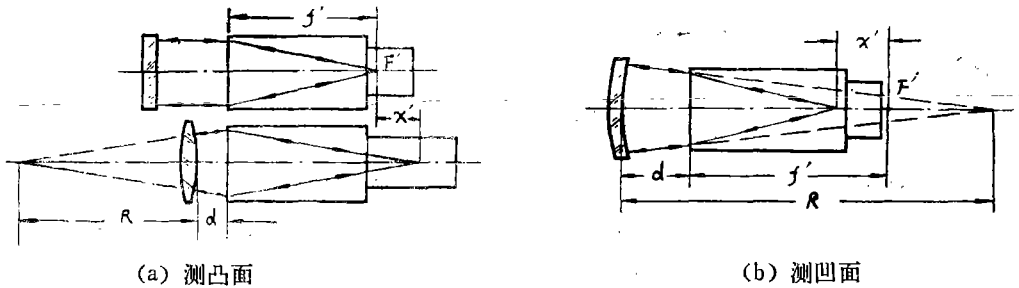


图11 自准直望远镜法

移动望远镜的自准直目镜，直至从平面镜反射回来的光束能在分划板上生成一清晰而无视差的分划象为止，其目的是使分划板准确地位于望远镜物镜的焦平面上。将平面镜换以被测透镜，再移动自准直目镜，重新达到从被测球面反射回来且又一次在分划板上生成清晰无视差的分划象。显然，此时的分划板位置与被测球面中心位置对望远镜物镜是物象共轭位置。设分划板移动距离为  $x'$ ，被测球面顶点到望远镜物镜主面的距离用  $d$  表示，物镜焦距为  $f'$ ，则被测球面的曲率半径  $R$  为：

$$R = d - f' (f' \pm x') / \pm x' \quad (6)$$

式中凸面时（分划板远离物镜）用“+”号，凹面时取“-”号。由于分划板的移动距离不能太大，故自准直望远镜只宜测量大的曲率半径，测量范围甚至可达数百米。但这种方法精度是较低的，约为  $\pm 0.15\%$ 。

### 4. 牛顿环法

用牛顿环法测量曲率半径的光路简略地如图12所示。由激光器射出的激光束经准直后透

过分束器垂直地入射在光学平板和待测镜面上，从平板和镜面反射出来的光互相干涉构成牛顿环，利用一个横向移动的显微镜来观察屏上的牛顿环，并测出第  $N$  级圆环的直径，观察平面上，波前的曲率半径可由下面的关系式<sup>[5]</sup>计算得到：

$$R_L = Y_N^2 / 2N\lambda \quad (7)$$

式中  $Y_N$  是第  $N$  个环的半径。

若  $L$  是镜面到观察平面的距离，那末，被测镜面的曲率半径为：

$$r = \frac{Y_N^2}{N\lambda} + 2L \quad (8)$$

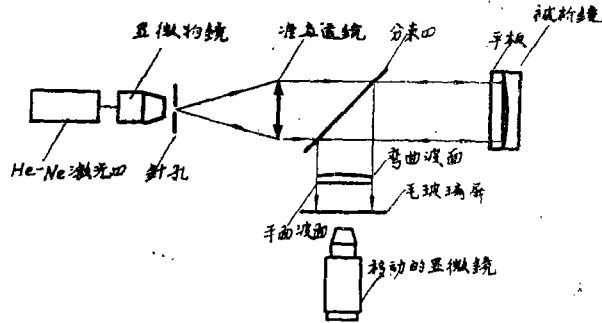


图12 牛顿环法光路示意图

曲率半径的测量误差为：

$$\frac{\delta(r)}{r} = \frac{\delta N}{N} \quad (9)$$

为了达到高精度， $N$  应该取得尽可能大，也即  $Y_N$  应该在镜子的周边附近量出。一般来说，其测量精度为曲率半径的  $\pm 0.6\%$ 。

### 5. Murty干涉法

Murty楔形平板剪切干涉仪<sup>[6]</sup>可以用来检测透镜的曲率半径，其基本光路如图13所示。由He-Ne激光器发出的激光束通过显微物镜聚焦在透镜的焦点上，一块楔板放在此光路中，并使楔块的顶棱是水平的，通过在剪切波前的重叠区上获得水平直条纹的方法来检验光束

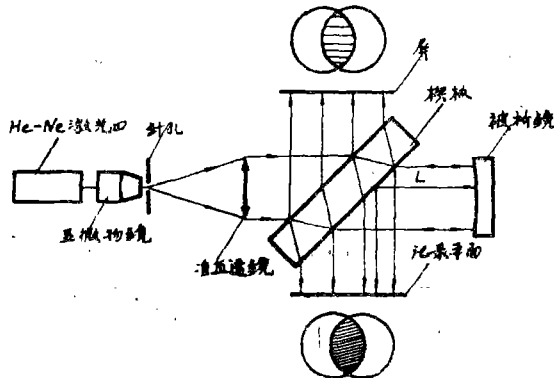


图13 Murty楔板剪切干涉法测球径示意图

的准直性，待检透镜放在光轴上，这时，镜面反射的光把针孔本身聚焦在针孔上，于是，照相干板记下了剪切干涉图。由于从弯曲的镜面得到弯曲的波前，所以，干涉条纹相对于剪切方向是倾斜的。图14是剪切干涉仪产生的干涉条纹示意图。假定  $d$  是该条纹的间隔， $s$  是剪切量， $\phi$  是条纹相对于剪切方向的转角，那末，在记录平面上，此波前的曲率半径可以由 Riley 和 Gussinow 推导出来的关系式<sup>[7]</sup>计算得到：

$$R_L = \frac{sd}{\lambda \sin \phi} \quad (10)$$

横向剪切量  $s$  为

$$s = \frac{t \sin 2i}{(n^2 - \sin^2 i)^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

式中  $t$  是板厚， $i$  是入射角， $n$  是玻璃楔板的折射率。根据量出的  $t$  和入射角  $i$ ，可计算出

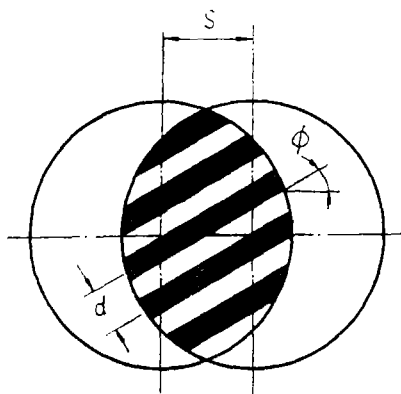


图14 剪切干涉条纹示意图

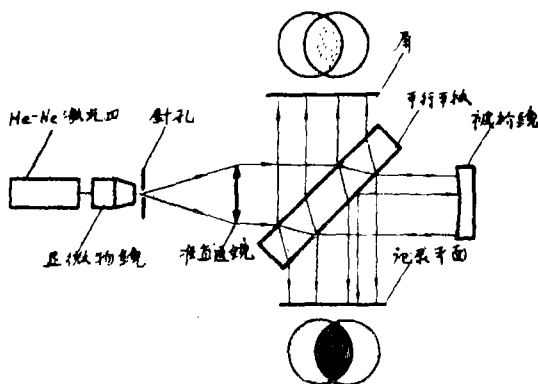


图15 Murty 平行平板剪切干涉法测球径示意图

剪切量，而镜面的曲率半径可由下式求得：

$$r = 2(R_L \pm L) \quad (12)$$

式中当测凹面镜时用“+”号，凸面镜时用“-”号。 $L$ 是从镜面开始经由楔板到记录面的距离。这种方法的测量误差约为曲率半径的0.2%，因此和牛顿环差不多、精度较低。

Murty 平行平板干涉仪则是另一种测量曲率半径的方法，如图15所示。以剪切波前交叠区获得均匀照明表示达到准直。为了取得高准直度的光束，最好使用大孔径的准直透镜和大口径的平行平板（例如透镜为  $\phi 100$ ，平板为  $\phi 150$ ），所构成的干涉条纹垂直于剪切方向，记录板上得到的波前曲率半径为：

$$R_L = \frac{sd}{\lambda} \pm \frac{s}{2} \cot i \quad (13)$$

式中  $d$  是条纹间隔。在实际应用中，由于曲率半径很大， $d$  的变化可以忽略不计，从而可以认为整个记录面上的干涉条纹是不变的，式中凹面镜时取“+”号，凸面镜时“-”号，镜面曲率半径为：

$$r = 2 \frac{sd}{\lambda} \pm \frac{2t \cos^2 i}{(n^2 - \sin^2 i)^{\frac{1}{2}}} \pm L$$

$$= 2 \left[ \frac{sD}{\lambda N} \pm \frac{t \cos^2 i}{(n^2 - \sin^2 i)^{\frac{1}{2}}} \pm L \right]^{[6]} \quad (14)$$

式中  $L$  是记录平面和镜面之间的距离,  $D$  是剪切波前直径方向上整个重叠区中  $N$  条条纹间的距离。为了达到较高的精度, 剪切量可以通过改变入射角或者靠选择合适的板厚和入射角的方法来加以调节。这样就使  $S$  有  $D$  的量级。板厚用测微计测定, 平行平板装夹在旋转度盘上以测出入射角, 用反射的针孔象与针孔相重合的办法使之自准直 (平板垂直激光束), 记下此时度盘读数, 然后度盘带着平板转过所需角度, 入射角可精确到  $\pm 1$  弧分。

### 6. 激光菲索干涉仪法

测量球面曲率半径的这类激光菲索干涉仪又称 Zygo 干涉仪<sup>[8]</sup>, 其光路简图如图 16 所示。一个平面和待检测的凹面构成往复的反射腔, 准直光通过部分镀了膜的平面进入此往复反射腔, 并把透射光会聚到一个腔面或另一个腔面的焦点上。采取变更这两个腔面的距离来形成

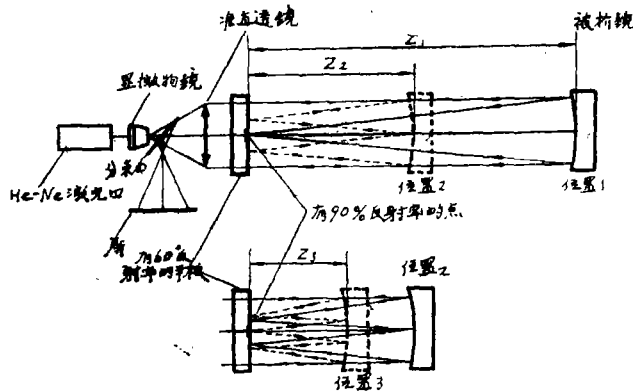


图 16 Zygo 干涉法测球径示意图

几种共焦结构。测量了任意两个连续的共焦结构间光传播的距离后, 就可以算出此凹面的半径。这些腔面之间的距离随往复反射次数增加而缩短。因而, 长曲率半径的镜面可以用短的工作空间来测得。逐次接续的结构中的腔长差和曲率半径之间的关系可以在参考文献 [8] 中获知。表 1 列出一些半径和不同腔长间的关系方程。

表 1: 半径和不同腔长间的关系方程<sup>[8]</sup>

$R = 4(Z_1 - Z_2)$	$R = 57.23525(Z_5 - Z_6)$
$R = 9.65685(Z_2 - Z_3)$	$R = 87.29584(Z_6 - Z_7)$
$R = 19.62512(Z_3 - Z_4)$	$R = 126.47741(Z_7 - Z_8)$
$R = 35.08255(Z_4 - Z_5)$	$R = 175.99437(Z_8 - Z_9)$

表中,  $Z_n$  表示第  $n$  种结构的腔长,  $n = 1, 2, 3, \dots$  表示反射次数。在平面的反射光和凹面、平面构成的共焦腔的反射光之间产生干涉, 调节平面镜与凹面镜之间的距离直到出现直的等间隔条纹为止。干涉条纹的对比度限制了共焦腔的最高反射次数, 一块平板镀上 60% 的反射膜, 而其中心部分为 90% 的反射膜, 这时, 在  $n = 9$  次反射的结构中, 可以获得能用的条纹对比度。这种方法精度可达 0.05%, 但不适用于凸面的情况。

## 四、结 束 语

我们介绍各种测量球面曲率半径的方法、光路及装置，目的是寄希望于对从事有关工作的同志们有所参考有所裨益。但必须指出，各种方法的难易程度、要求的条件以及能达到的精度均各有千秋，所以一定要因地制宜，才能收到良好的效果。同时，我们更切望大家能受上述各种方法的启迪而设想出更简易可靠和更精确的测量球面半径的方法来。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 潘君骅,《刀口原理及其使用方法讲义》,长春光机所,1962,9.
  - [ 2 ] 潘君骅,光学机械,1974,5,1.
  - [ 3 ] 周学海,邹振书,唐祝洲,光学技术,1983,5,25.
  - [ 4 ] 周学海,应用激光,1981,1,4,23.
  - [ 5 ] M. V. R. K. Murty, Opt. Eng., 1983, 22, 2, 231.
  - [ 6 ] M. V. R. K. Murty, Appl. Opt., 1964, 3, 531.
  - [ 7 ] M. E. Riley, M. A. Gusinow, Appl. Opt., 1977, 16, 2753.
  - [ 8 ] Mark C. Gerchman, George C. Hunter, Opt. Eng., 1980, 19, 6, 843.
-