关于长半径的测量方法

张二星　　张星晔

光学车间生产的球面镜，其曲率半径多在一米以内，测量方法也比较多。但是，也常常遇到半径比较长的球面镜，其测量方法较少，有时甚至用卷尺去量半径。对于一些高质量的球面镜这是不能满足要求的。本文介绍几种方法，并加以分析。

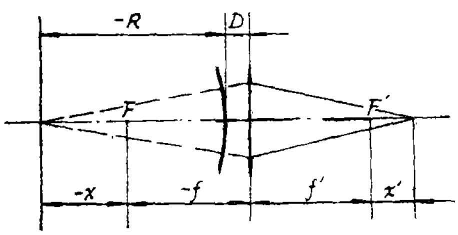
球径仪是专用来测曲率半径的。测量短半径时，精度较高。测量长半径时，它就显得无能为力了。因它不是直接测量半径，而是通过测量弧高算出半径。在长半径的情形，测量弧高的微小误差都会给半径带来大的误差。当测量 5 m 长的半径时，相对误差$\Delta R/R$达2%，测量10m 长的半径时达4%[1]。

用牛顿环法测量时，精度也不算高[2]。

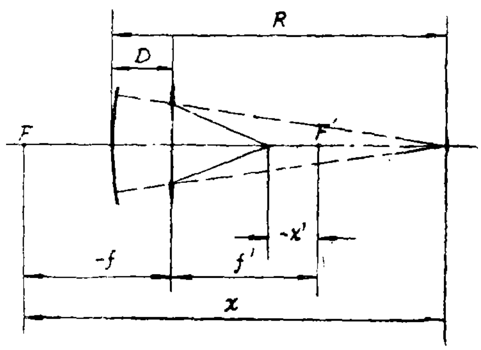
上述二种方法都属于接触测量法。测量时，有可能划伤被测表面。

用自准直望远镜法测量时，可避免被测面的划伤。此法的原理是：当从自准望远镜发出的光线调节成沿被测面半径方向入射时，经反射，光线将沿原路返回。轴向移动分划板和目镜，直至反射回的分划象与分划面重合为止。测出分划面离物镜后焦点的距离，就可算出半径。见图 1，由牛顿公式

$$xx' = -f'^2,$$



(a) 测凸面



(b) 测凹面

图　1

测凸面时

$$(R-D+f')x' = -f'^2$$

测凹面时

$$(R-D+f')(-x') = -f'^2$$

故

$$R = D - \frac{f'(f' \pm x')}{\pm x'}$$

其中R为被测球面的半径，D为被测面到物镜主平面的距离，f'为物镜后焦距，x'为象距。测凸面时，x'前的符号为“+”，测凹面时，x'前的符号为“-”。其误差可用下式计算：

$$\Delta R=\sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial D}\right)^2(\Delta D)^2+\left(\frac{\partial R}{\partial f'}\right)^2(\Delta f')^2+\left(\frac{\partial R}{\partial x'}\right)^2(\Delta x')^2}$$

$$\frac{\partial R}{\partial D}=1$$

$$\frac{\partial R}{\partial f'}=\mp\frac{2f'}{x'}-1$$

$$\frac{\partial R}{\partial x'}=\pm\left(\frac{f'}{x'}\right)^2$$

因$\left(\frac{\partial R}{\partial D}\right)^2(\Delta D)^2$比其它二项小得多，故可忽略不计。当焦距$f'$取较大的数值时，$\frac{\partial R}{\partial f'}$与$\frac{\partial R}{\partial x'}$的绝对值很快地变小。可见，为减小误差应取长焦距的望远镜。其误差约为$\pm0.15\%$[3]。

用激光束偏转法测量半径的光路示于图2。氦—氖激光器在位置1时，激光束通过被测球面镜M的球心射向球面，经反射后，返回到点1本身。当镜M相对于激光器有一平移d以

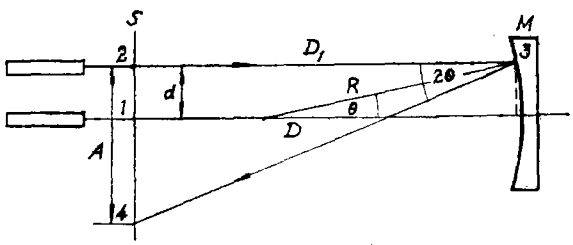


图　2

后，激光束走的路程为2－3－4。S为垂直于激光束放置的屏。θ是曲率半径R和激光束的夹角。D、D_1、A分别为1－M、2－3、2－4的长度。由图可见

$$\tan\theta=d/(R^2-d^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\tan2\theta=A/D_1$$

变换上述二式得

$$A^2R^4-4d^2(A^2+D_1^2)R^2+4d^4(A^2+D_1^2)=0$$

解此代数方程得

$$R=\frac{2dD_1}{A}\left(1+\frac{3A^2}{8D_1^2}-\frac{13A^4}{128D_1^4}+\cdots\cdots\right)$$

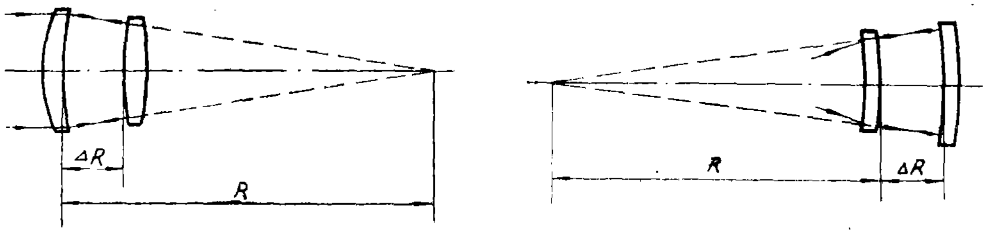
限制d到一小值，$D_1\cong D$，$A\ll D$得

$$R\cong\frac{2dD}{A}$$

应指出，在要测量的几个量中，d的误差对R的误差影响最大，其次是A，再次是D。测量

的精度可达3%[4]。这是一种简单方便的方法。

利用球面干涉仪测量长半径可采用图 3 所示的办法。此时须已知参考面的半径R。测



（a）测凸面　　　　（b）测凹面

图　3

出被测面与参考面间半径之差ΔR，就可算出所求半径。这种方法的精度，当然取决于参考面半径R的精度和测量ΔR的精度。

用差分干涉法测量长半径时[5]，采用斐索干涉仪，在它的参考平面和被测凹球面间形成一供光束折回反射的空腔，如图 4 所示。准直光束通过平面进入空腔，折反射n次后，聚焦

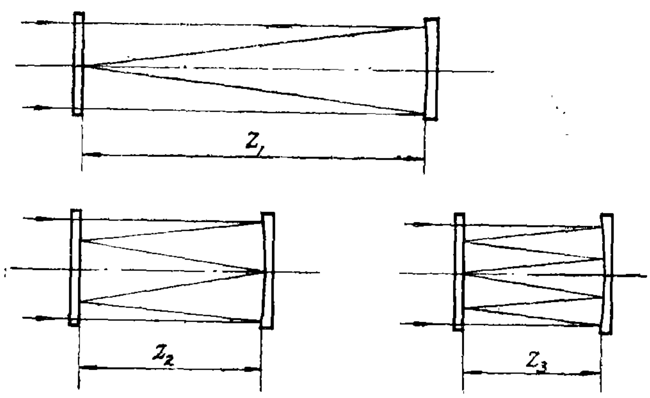


图　4

于任一表面。设腔长为Z_n，则通过测连续两腔长之差$Z_{n-1}-Z_n$，就求出半径R。

腔长Z_n和半径R之间的关系是这样求得的：由高斯成象方程得

$$\frac{2}{R}=\frac{1}{S_m}+\frac{1}{S'_m}$$

由转面公式得

$$S_m=2Z_n-S'_{m-1}$$

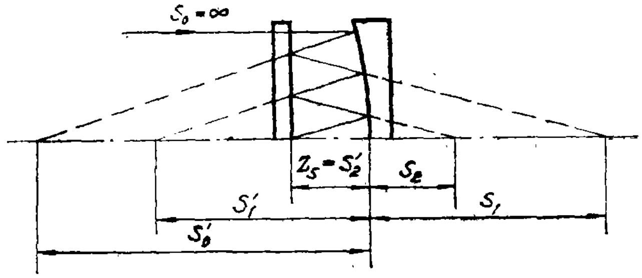


图　5

式中　　$m=k,\ k-1,\ k-2,\ \cdots\cdots 0$

当 n 为奇数时　$Z_n=S'k$,

当 n 为偶数时　$Z_n=S'k/2$。

我们以 $n=5$ 为例，见图5，求 R 与 Z_5 之间的关系式。由高斯公式及转面公式得方程组

$$
\begin{cases}
\dfrac{2}{R}=\dfrac{1}{S_0}+\dfrac{1}{S'_0} \\
\dfrac{2}{R}=\dfrac{1}{S_1}+\dfrac{1}{S'_1} \\
\dfrac{2}{R}=\dfrac{1}{S_2}+\dfrac{1}{S'_2} \\
S_1=2Z_5-S'_0 \\
S_2=2Z_5-S'_1 \\
S'_2=Z_5
\end{cases}
$$

解得

$$Z_5=0.0669873R$$

一般地

$$Z_n=C_nR$$

用此方法算得下表。

n	C_n
1	0.5
2	0.25
3	0.1464466
4	0.0954915
5	0.0669873

最后用下式计算半径 R

$$R=\frac{1}{C_{n-1}-C_n}(Z_{n-1}-Z_n)$$

当 n 足够大时，测出较短的 $Z_{n-1}-Z_n$ 就可算出很长的半径 R。

应注意用差分干涉法时二个表面反射率的匹配。为了在经过多次折反射之后仍有好的条纹对比度，在参考面中心可镀一小圆面的高反射膜。

测量的精度决定于：一、调整被测件时的离焦误差；二、测量 Z_n 的长度误差。在离焦误差为λ/20，测长误差为0.01mm时，测量精度高于0.01%。

参 考 文 献

［1］Daniel Malacara;«Optical Shop Testing»,1978.

［2］B.A.Афанасьев;«Оптический Измерения»,1961.

［3］光学仪器设计手册编辑组;«光学仪器设计手册»,1971.

［4］J.D.Evans;Appl.Opt., 1971, 10,995.

［5］Mark C.Gerchman, George C.Hunter;Opt.Eng., 1980, 19, No.6,843.