

# 提高球面曲率半径测量精度的方案探讨

杨 力

(中国科学院光电技术研究所)

## 提 要

本文讨论了激光球面干涉仪以及数字干涉仪在球面曲率半径测量中的应用,同传统的球面样板检测进行了比较,分析并计算了两者的测量精度,给出了提高球径仪测量精度的原则性方案。

## 一、引 言

随着微电子学技术的飞速发展,古老的应用光学技术在超大规模集成电路设备工业中勃发了崭新的生机。微米及亚微米级线条的光刻技术导致各种光刻镜头的光学性能几乎趋近了理论上的可能性。这种超高精度要求业已推动光学加工与检测技术产生一系列新的发展。

例如,对于面形的局部偏差要求达 $\lambda/20 \sim \lambda/40$ ,曲率半径测量精度要求 $\Delta R/R$ 达到0.01%,等等。显然传统的球面样板法不能满足其精度要求。我们在研制光刻物镜中已将数字干涉仪从实验室的研究应用阶段转到直接用于加工检测过程中,从而使加工与检测水平有了新的突破。

本文从球径仪测量精度分析入手,介绍了球面样板同数字干涉仪匹配应用的精度比较,提出了改进球径仪结构提高测量精度的原则性方案及有关建议。

## 二、球径仪测量精度分析

球径仪测球面曲率半径是一种间接测量法,其精度分析实为函数误差计算。这里采用单项误差绝对值求和法,即计算各单项误差对测量结果的最大影响<sup>[1]</sup>。下面将选定误差值研究测量误差,实际上可看做为函数系统误差计算<sup>[2]</sup>。

由图1有

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

对(1)式微分并改写成曲率半径误差的形式,则

$$\Delta R = \frac{r}{h} \Delta r + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{r}{h} \right)^2 - 1 \right] \Delta h, \quad (2)$$

式中符号的意义见图1,  $\Delta r$  为测量环半口径标定误差,  $\Delta h$  为矢高测量误差。

为了更准确地讨论  $\Delta R$  误差的分布情况,给定一组数据用式(2)计算,结果列于表1。

Table 1 Distribution of  $\Delta R$  error $(r=60, \Delta r=0.001, \Delta h=0.001, D=2r)$ 

series No.	$R(\text{mm})$	$h(\text{mm})$	$\frac{r}{h} \Delta r (\mu\text{m})$	$\frac{1}{2}[(\frac{r}{h})^2 - 1] \Delta h (\mu\text{m})$	$\Delta R (\mu\text{m})$	$\Delta R/R (\%)$	$D/R$
1	60.000	60.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0016	2/1
2	66.667	37.6073	1.5954	0.7727	2.3681	0.0036	1.8/1
3	75.000	30.0000	2.0000	1.5000	35.000	0.0047	1.6/1
4	84.854	24.8525	2.4142	2.4142	4.8284	0.0057	1.414/1
5	100.000	20.0000	3.0000	4.0000	7.0000	0.007	1.2/1
6	120.000	16.0770	3.7323	4.4641	10.1964	0.0083	1/1
7	150.000	12.5227	4.7913	10.9783	15.7696	0.011	1/1.25
8	200.000	9.2122	6.5181	20.7102	27.2283	0.014	1/1.67
9	300.000	6.0812	9.8990	48.4053	58.3943	0.019	1/2.5
10	600.000	3.0075	19.9501	108.5087	218.45	0.036	1/5
11	1000.000	1.8016	33.8087	554.0692	587.37	0.059	1/8.3
12	1200.000	1.5009	39.9750	798.499	838.47	0.07	1/10
13	2000.000	0.9002	66.6519	2220.738	2287.4	0.11	1/16.7
14	4000.000	0.4500	133.3333	8880.889	9021.7	0.22	1/33.3
15	8000.000	0.2250	266.66	35533.79	35820.5	0.45	1/66.7
16	16000.000	0.1125	533.33	142218.9	142752.9	0.89	1/133

取不同的测量环(即变换  $r$  值)和相应的  $R$  值, 计算在同一相对口径时不同曲率半径的  $\Delta R$  误差, 计算结果列于表 2

为了便于绘图和讨论, 将表 1 的计算结果按相对口径大小分为两段绘制曲线于图 2 和图 3 将表 2 的结果绘曲线于图 4

由表 1、2 和图 2、3 与 4 可见, 对于确定的  $D/R$  值, 两项误差  $\Delta r$  与  $\Delta h$  的系数值为常数。由上述结果无需另行计算即可过渡到测量环半口径为  $r=30$ 、15 时的  $\Delta R/R$  曲线。把不同测量环口的  $\Delta R/R$  曲线绘制在同一坐标内, 见图 5

综上所述与所列图表, 可做出如下讨论:

(1) 对于确定的相对口径  $D/R$  值,  $\Delta h$  与  $\Delta r$  两项误差的误差传递系数值为常数。对于给定的误差  $\Delta h$ 、 $\Delta r$  值, 测量误差  $\Delta R$  只同测环所限定的被测球面的相对口径  $D/R$  的大小有关。

(2) 由上列曲线可以清楚地判断两项误差  $\Delta h$  与  $\Delta r$  的误差传递趋势及其分布情况。

在  $D/R$  为 2/1~1.414/1 区间, 误差  $\Delta r$  的贡献起主要作用; 在  $D/R$  为 1.4~1.0 区间,  $\Delta h$  的贡献显著增大,  $\Delta h$  与  $\Delta r$  两条误差曲线在  $D/R=1.414$  处相交;  $D/R<0.5$  以后,  $\Delta h$  曲线急剧上升,  $\Delta r$  误差趋于可以忽略不计。

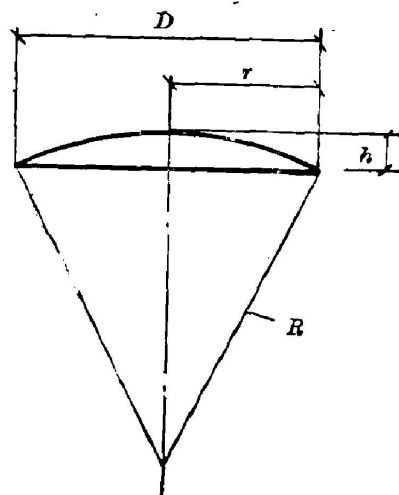
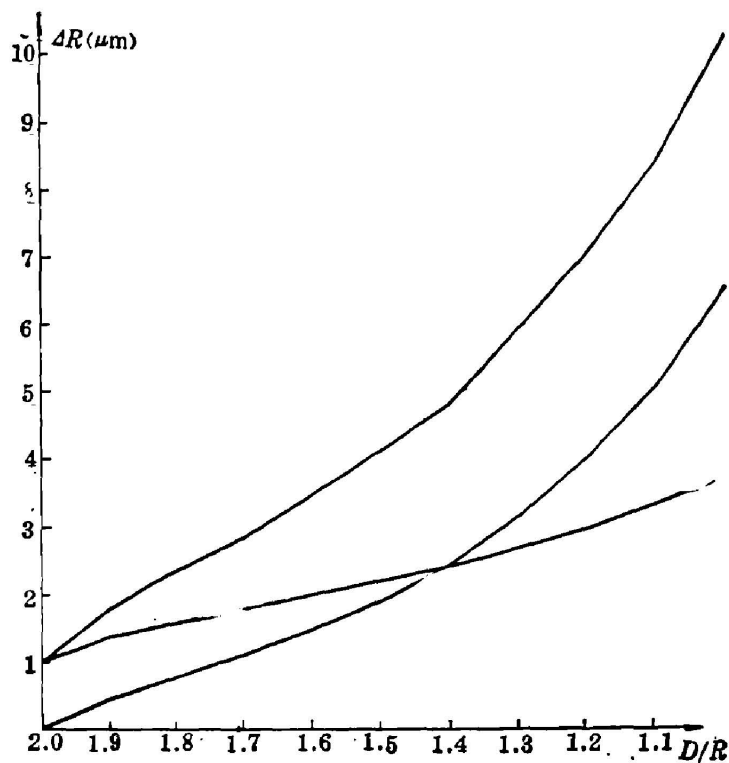


Fig. 1 Diagram of spherical curvature radius  $R$ , aperture radius  $r$  and vector height  $h$

Table 2 Distribution of error  $\Delta R$  with fixed relative aperture  $D/R$ 

$R$ (mm)	$r$ (mm)	$h$ (mm)	$\frac{r}{h} \Delta r$ ( $\mu\text{m}$ )	$\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{r}{h} \right)^2 - 1 \right] \Delta h$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta R$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta R/R$ (%)	$D/R$
30	15	4.0192	3.7322	6.4641	10.1961	0.034	1/1
60	30	8.0385	as above			0.017	1/1
120	60	16.0770				0.0085	1/1
60	15	1.9053	7.8730	30.4919	38.365	0.064	1/2
120	30	3.8105	as above			0.032	1/2
240	60	7.6205				0.016	1/2

Fig. 2  $\Delta R$  curves with relative aperture  $D/R$  in the range of 2/1~1/1

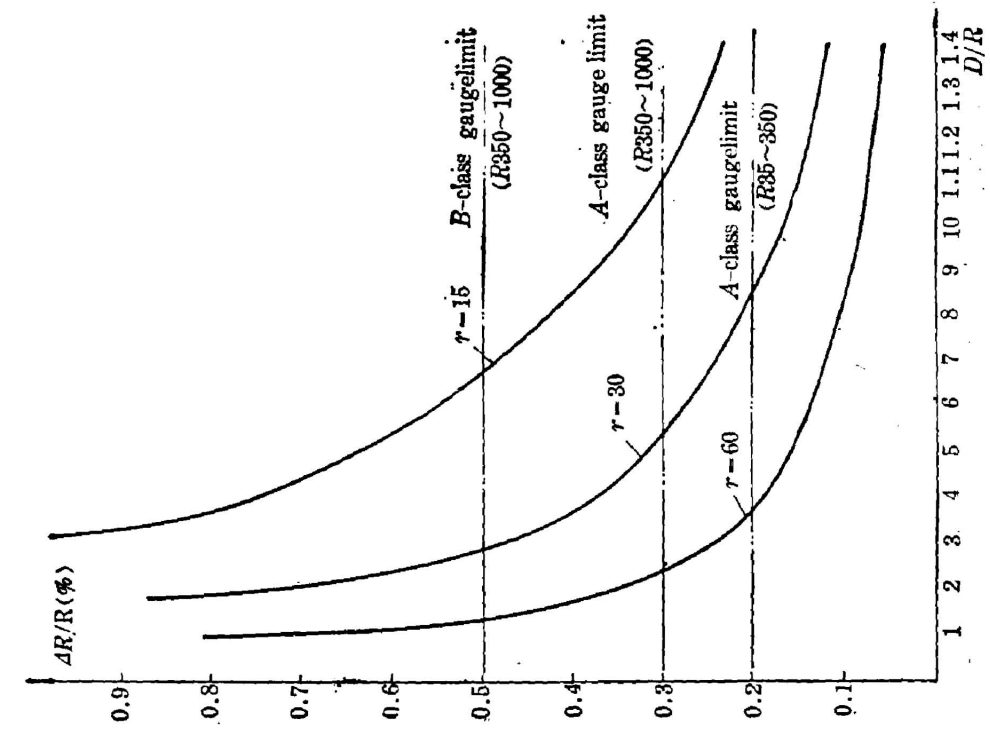


Fig. 4  $\Delta R/R - R$  curves for fixed  $D/R$

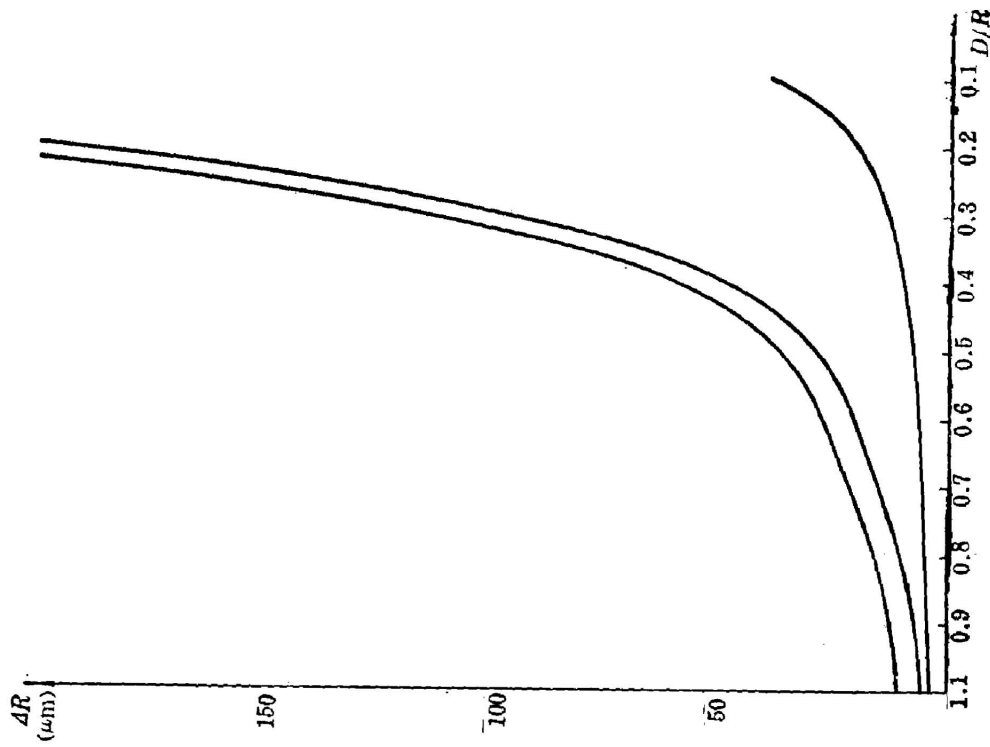


Fig. 3  $\Delta R$  curves with  $D/R$  in the range of  $1/1 \sim 1/10$

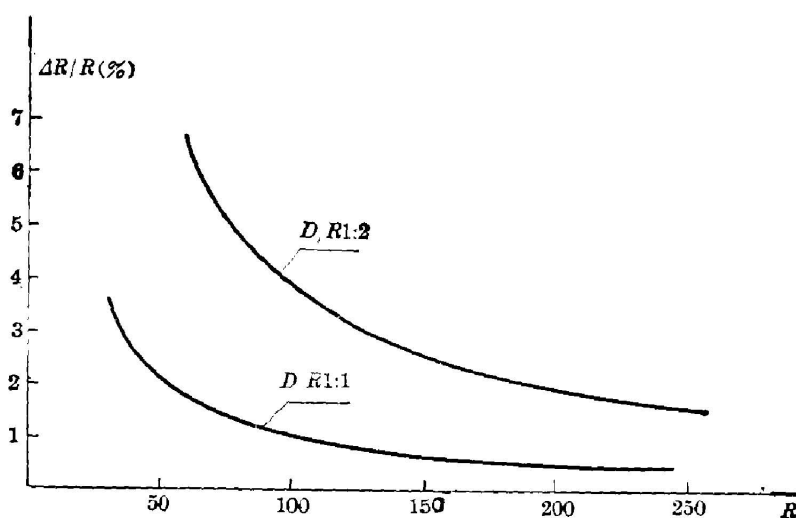


Fig. 5  $\Delta R/R$  curves corresponding to different measuring rings

(3) 当  $D/R=2$  时,  $\Delta h$  系数为零,  $\Delta R=\Delta r$ , 这是  $\Delta R$  取得最小值的理论上的极限位置。表明直接测量球体的直径要比通过测量矢高间接得到曲率半径精确。这同令函数的标准误差式为零时得到的计算结果是一致的<sup>[2]</sup>。

(4) 本文计算中选定  $\Delta h=\Delta r=0.001\text{mm}$  仅作为计算的初始依据。由此可以显而易见地过渡到  $\Delta h$ 、 $\Delta r$  为其它值时的测量误差。对于球径仪测环半口径标定精度, 不同作者持有出入颇大的不同看法。例如文献[3]认为  $\Delta r$  应按  $0.002\text{mm}$  估计。而文献[4]认为,  $\Delta r$ 、 $\Delta h$  达  $0.001\text{mm}$  是一般球径仪应保证的精度水平, 更好一些的情况下应达  $0.0005\text{mm}$ 。基于这种判断, 文献[4]认为国产球径仪的测量精度同我国“标准样板精度等级”标准相适应。

以上计算表明,  $\Delta h$  与  $\Delta r$  可以看做未定系统误差, 很难统一确定它们的实际值大小。其次, 评价球径仪的测量精度必须确定在哪一段相对口径区间内进行。即使在本文依据的  $\Delta h$ 、 $\Delta r$  取  $0.001\text{mm}$  的水平上, 仍然有相当一部分区间不符合上述标准要求。而且本文还未涉及到其它一些误差来源。因此, 可以说在很多具体情况下, 球径仪测量精度并不能够符合标准<sup>[4]</sup>的要求。显然, 对于  $\Delta R/R$  要求更高的场合, 例如  $\Delta R/R$  要求为  $0.005\%\sim 0.01\%$ <sup>[5]</sup>, 用球径仪测量是难以保证的, 这就必须寻求更高精度的测量方法。

### 三、数字干涉仪测量的精度分析

数字干涉仪测量球面曲率半径的原理见示意图 6。

图 6 表明, 其工作原理实质上是采用球面干涉定位的长度测量。载有被测球面的工作台的第一位置由该球面的球心自准干涉图形来定位, 目视对球面干涉图形的纵向离焦量的判读精度为  $\lambda/20$ 。工作台第二位置由球面顶点波前翻转自准干涉来定位, 在球面干涉仪标准镜头质量可靠、仪器调正良好的情况下, 目视纵向离焦量的判读精度仍可达  $\lambda/20$ 。测得工作台在此两个位置间的移动距离即为被测球面的曲率半径  $R$ 。

下式可足够精确地描述球面干涉定位精度

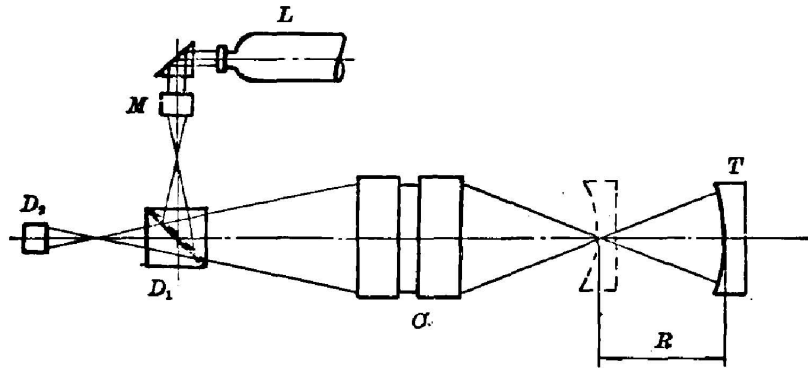


Fig. 6 Schematic of spherical interferometer in measurement of spherical curvature radius

$L$ —laser;  $M$ —microscopic object;  $D_1$ —prism;  $D_2$ —receiver or human eye;  $C$ —collimator object;  $T$ —spherical surface to be measured;  $R$ —spherical surface radius

$$\Delta R = \frac{4N\lambda}{(D/R)^2}, \quad (3)$$

式中  $N$  为被测球面参与球面共心干涉有效口径内的干涉条纹数, 这里仅计纵向离焦量并选择最接近比较球面情况下判读,  $D/R$  为有效相对口径。

如上所述, 两次球面干涉图形判读误差之和为  $\lambda/10$ , 相应于  $N=0.2$ , 给定一组  $D/R$  值, 用(3)式计算球面干涉定位误差, 记以  $\Delta R$  定位, 列入表 3。

Table 3 Error of spherical-surface-radius measurement using an interferometer (units: millimeter)

$D/R$	1/1	1/1.11	1/1.25	1/1.43	1/1.67	1/2	1/2.5	1/3.3	1/5	1/10
$R_{\text{exp}}$	120	133	150	171	200	240	300	400	600	1200
$\Delta R_{\text{判读}}$	.0005	.0006	.0008	.001	.0014	.0020	.0032	.0056	.0126	.0700
$\Delta R_{\text{定位}}$	.0012	.0013	.0015	.0017	.002	.0024	.003	.004	.006	.012
$\Delta R_{\text{总}}$	.0017	.0019	.0023	.0027	.0034	.0042	.0062	.0096	.0182	.0825
$K$	0.17	—	0.15	—	0.125	—	0.11	—	0.05	—

目前, 数字干涉仪测长系统多为光栅数显长度传感装置, 测长精度一般不低于  $0.001 \text{ mm}/100 \text{ mm}$ , 其测长误差为半径误差, 计以  $\Delta R_{\text{测长}}$ , 以  $1 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$  计, 列入表 3。

上述两项误差之和做为曲率半径测量总误差记以  $\Delta R_{\text{总}}$ , 此处的  $\Delta R_{\text{总}}$  与表 1 的  $\Delta R$  在相应相对口径时加以比较, 比值记以  $K$ , 一并列入表 3。由  $K$  值可以定量判断干涉仪较球径仪测量精度提高的倍率。

在数字干涉仪中, 微机控制的波前探测系统可借助终端设备直接显示出  $X$ - $Y$  两个方向的横向离焦量与纵向离焦量, 在测量曲率半径时实际上可以把调焦的不精确程度控制在可以忽略的程度, 其灵敏度为  $1 \times 10^{-4} \lambda (\lambda = 6328 \text{ \AA})$ 。

综上所述, 干涉仪测量球面曲率半径精度从相对口径  $D/R$  1.0 到 0.2 较球径仪提高

5~15 倍。

当然, 这种比较仅限于测量精度在有限测量范围内而言。球径仪以其简便可靠适用范围广的优点具有不可缺少的应用价值。

#### 四、实际应用途径

一是用干涉仪标定球面样板的曲率半径, 在球面加工过程中, 仍然使用球面样板控制被加工球面的光圈数, 干涉仪只检验球面面形。这种方案使操作简便, 效率较高。

二是直接用干涉仪控制加工过程中的曲率半径的变化。适用于根本没有球面样板或者对半径精度要求更高的情况。

曲率半径公差按下述原则分配:

直接把相应的标准样板允许的  $\Delta R/R$  值换算为半径允差, 同时把被测球面的允许光圈数  $N$  亦按(3)式换算为半径允差, 这两项允差之和做为曲率半径的允许极限偏差。

在要求更高的情况下, 可由光学设计直接给定半径公差。

在加工过程中使用球面干涉仪不仅可以提高检测精度, 同时有利于提高加工效率。例如, 当  $D=120$ ,  $R=120$ ,  $D/R=1$  时, 允许 A 级样板的曲率半径相对允差为 0.02%, 由(3)式算出相当于  $N=20$ , 或  $N=\pm 10$ 。同用样板检验相比把光圈逼近到  $N=1\sim 3$  要容易得多。加工者在  $N=\pm 10$  的范围内把面形修好, 较之用样板去“卡”被测表面的光圈既合理又省力。

#### 五、方案建议

要全面提高球面曲率半径检测水平, 首先, 应该进一步提高国产球径仪的性能和仪器精度。可以考虑将现有光学机械式球径仪的测长读数系统改进为光栅数显长度传感系统, 并把矢高测量值直接换算为曲率半径  $R$  直接显示在计数装置上。

更值得注意的是, 如果采用一系列经过准确校正过的标准球体和样板来校对出厂球径仪的测量误差, 编制成误差修正曲线存储在专用微机中, 在仪器使用过程中使测量误差得到实时修正, 则可进一步提高仪器精度水平。

同时, 应有计划地改善和加强标准计量工作中有关球面测量的技术手段和管理体制, 建立标准球和标准样板的基准系列, 设置高质量的数字干涉仪和球径仪以及有关量仪, 按计量检定工作程序, 定期分级校验有关部门的球径仪与库存样板。从而全面提高球面曲率半径检测水平, 以适应我国光学工业发展和提高的需要。

#### 六、结束语

计算和讨论表明, 对球径仪的测量精度的评价应做具体分析。现有仪器在大部分应用范围同我国有关标准样板的精度要求相符合, 在有的区段达不到要求。当前一些更高质量的光学系统对曲率半径提出高于现有技术标准的要求, 因此, 必须发展更高精度水平的球径

仪和数字干涉仪。精度分析概算表明数字干涉仪在  $D/R$  为  $1\sim 0.2$  的范围内较球径大约提高  $5\sim 15$  倍。其测长范围一般为  $500\text{ mm}$ , 可复盖大约  $70\sim 80\%$  的常用半径范围, 但其操作较球径仪复杂。因此, 这两者宜互相匹配应用。文中提出了改进球径仪结构提高测量精度的原则性方案和有关建议, 供参考。

### 参 考 文 献

- [1] В. С. Плотников, и др.; «Расчет и конструирование оптико-механических приборов», (Машиностроение, Москва, 1983), 14.
- [2] 费业泰主编; «误差理论与数据处理», (机械工业出版社, 1981), 38.
- [3] B. Jurek; «Optical Surfaces», (Elsevier Scientific Publishing Company, 1977), 181.
- [4] 光学零件工艺手册编写组; «光学零件工艺手册», (国防工业出版社, 1977), 437.

## Investigation on increasing measurement accuracy of radius of spherical curvature

YANG LI

(Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica)

(Received 29 August 1985; revised 4 February 1986)

### Abstract

Application of laser interferometry and digital interferometry in measuring curvature radius of spherical surfaces is discussed and compared with conventional method using spherical glass plates. The calculation results of measurement accuracies of both methods are given. The principle for further improvement of measurement accuracy of spherometer is presented.