

非球面透镜的制造技术

1. 前言

从照相机、双目望远镜等民用仪器，以至到显微镜、各种摄影机、激光应用仪器等企业，以及学术研究用的光学仪器，大都采用球面或平面的透镜及反射镜，这两种曲面容易掌握，所以从很早以前就一直在制造和研磨方面进行着高精度的加工、检查，但是，由于球面透镜具有按五种类别分类的象差原理，所以增加透镜的枚数，使象差相互抵消，是实现高性能光学系统的实际问题。

在防止反射技术还不十分发达的时代，想要增加透镜的枚数是十分困难的，因为做了许多不能一举消除象差的试验，所以在1930年发明了补正大口径天文望远镜象差的施密特校正板(图1)就是其中一个有代表性的例子。即使是在光学玻璃，多层镀膜、自动设计等材料技术、加工技术，设计技术高度发展的现在，以进一步大口径化，高精度化，小型化等为目标，正在热心地试验非球面的应用、研究适应各种用途的加工方法^[2]。特别是最近，由原来的手工操作朝着高精度的生产技术的发展速度非常快。举一个例子，最近我们亲手确定了的摄影用的高精度非球面透镜的构成和它的效果，如图2及图3所示^[4,5]。

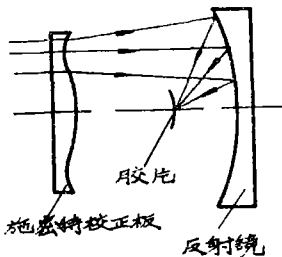


图1 施密特照相机

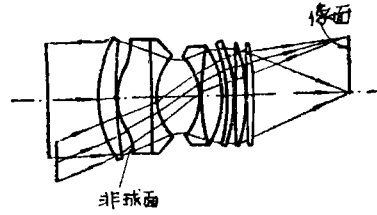
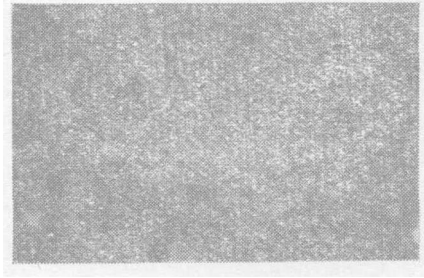


图2 照相机用非球面透镜 (强调非球面的形状)



(a) 普通透镜



(b) 非球面透镜

图3 非球面透镜的效果

2. 非球面透镜的种类

非球面透镜由于用途，设计目的，条件要求等不同，实际有各种各样的形式，从加工的角度来看，有下列特点：

- ①材料
- ②要求精度
- ③形状 (尺寸，曲面性质)
- ④产量

材料主要是用光学玻璃，而不要求精度的塑料、红外线的材料用锗，硅等，另外，

反射镜用的材料也用铝，金、以及不锈钢等。

表 1 非球面透镜的精度和用途、加工方法

精度等级	要求精度标准	适用范围及	产品	加工方法
低精度	100~10 μ m	肉眼视用光学系统(放大镜、各种观察镜)眼科光学系统(散光眼镜、白内障眼镜、无形眼镜、眼膜曲率镜)照明受射系统(聚光器,红外线探照灯,辐射温度计,太阳灶)		压力加工,压力加工后研磨加工
中精度	5~1 μ m	红外线成象系统(温度记录器、眼底照相机)照相摄影系统(鱼眼透镜、电影广角透镜特殊仪器用光学系统)彩色阴极射线管、烧结用透镜风洞观测用锥体透镜		磨削加工后研磨加工
高精度	1~0.2 μ m	照相摄影系统(大口径透镜、超广面透镜)激光光学系统(干涉仪,扫描器)		
超高精度	0.3~0.05 μ m	天文、宇宙观测摄影系统:(施密特校正板、反射镜)航空照相摄影系统(侦察用、测量用透镜)		手工研磨加工离子束加工

注:精度的表示本身有很多问题,这里只是供参考的大概标准。

要求精度和工件的尺寸一同是选择加工方法和设备时的最主要条件。在表 1 中以加工难度为基准来分组精度,大略地列举了对应各自的用途与加工方法。

同样,从加工尺寸上来看形状的特征,列举了对直径、凹凸、光轴的对称性、近似球面半径、近似球面(平面)的差别情况(最大值,最大倾斜角、极限值以及有无回折点)等。虽然根据各自不同的情况选择加工方法和设备的构造,但是不论怎样,只是为了积累高度的经验,强烈地影响着技术习惯和历史的特殊性,一般很难评论,对于产量也同样。

3. 加工工艺方法

非球面透镜加工,本质只是三维万能曲面创成,与通常的透镜加工有许多地方不同。三维万能曲面的创成技术有下列特征,形成自己独特的领域。

- 1) 大多要求精度非常高。
- 2) 表面粗糙度一般在30~100 $^{\circ}$ △。
- 3) 材料限定玻璃、锗等硬脆材料及铝等。
- 4) 形状坡度小、简单,除一部分特殊形状外,均是轴对称。

非球面透镜的历史,据说可上溯到1600

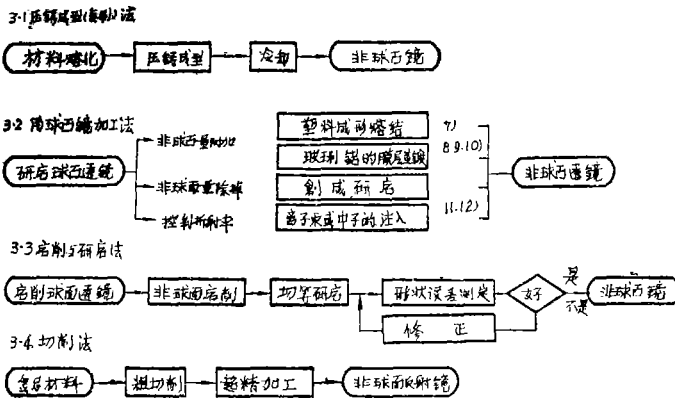
年代的笛卡儿,从那以后,一直进行了很多研究。但是,回顾一下近三十年左右在学术界,产业界实行的非球面透镜的制造方法,如表 2 所示大体可分为四种加工工艺。

3.1 加压成形方法

是最简单的加工方法,然而也是最便宜的。一方面、冷却变形大、冷却时间长,形状和材料的熔结等问题很多,不仅与玻璃、塑料共同使用的材料少,而且,精度低。然而,不管毛坯在型材改良和球面透镜上蒸镀非球面膜如何花费工夫,做为民用仪器的非球面透镜的制造方法是很有希望的。

3.2 创成磨削后的研磨方法

至今,相当多的非球面采用了这种方法,特别是在最近,以 35mm 照相机用的中、高精度非球面透镜为目标,进行了广泛的研究,市场上出售的磨床也发表了。为了在磨削工程上实现超高精度,必须解决磨床的间隙。弹性变形,热变形、振动等问题。必须解决由于工具的磨耗及弹性变形引起的接触状态(形状,压力、位置)的变化以及切削刃、冷却剂,工件表面等的状态而决定的磨削力的变化等多种精度恶化的主要原因。通过磨削而获得的光学玻璃的表面光洁度,即使花费特殊的工夫,水平也是 0.2~1 μ m。要想不使形状变化,就必须均等地研磨整个球面。这个过程就是均等研磨。因为玻璃磨削面通常存



在着是它表面光洁度的 3 ~ 5 倍深的裂纹，所以，即使获得的光学研磨面很低，也必须去掉 1~5μm 以上。为了均匀地进行研磨，和磨削一样必须使工具、工件系统的条件和相对运动的轨迹、速度全面均一。如果磨削面光洁度达不到均等研磨技术限度而完全损坏形状时，为了稍加除去它的凸部复原形状，必须做修正研磨。

3.3 修整研削球面的方法

精度良好地加工球面或非球面，仅仅追加加工非球面量的想法，自施密特创成研磨方法成功以来，接着 3.2 的方法进行了很多试验。创成研磨不能获得理想的精度时，进行修整研磨，另外在加工中一边测定除去量的分布一边进行修整研磨。从加工技术角度来看，创成研磨和修整研磨重复的部分较多，关于塑料压制成形熔敷，膜片蒸镀，中子注入请参照下一章。

3.4 切削方法

非球面反射镜通常靠 (1) 制作非球面透镜后蒸镀反射用的金属，(2) 在球面透镜上蒸镀薄厚不均的金属，或者 (3) 用与 3.2 类似的方法用固体金属磨光非球面获得，最后用金钢石车刀直接削出加工面。

4. 加工技术

4.1 加压成形

柯达 (Kodak) 公司建议用玻璃状石墨

压模挤压光学玻璃，制造非球面 (以及球面透镜)。一般情况下，压床只使用于透镜毛坯的粗制成形，因此，能把成形面做成完善的镜面，并且不能引起玻璃和模具的粘附，最后的成品透镜可由压床直接获得。压床在模具里的热电偶的控制下，在惰性气分中持续进行加热、加压，这样直至玻璃的转点除了冷却后的荷重，获得精度在两个牛顿环以内 (曲率半径误差相当于 1 个波长)。这如可能，对于循环时间的缩短，模具的寿命、各种玻璃的适用性等，则将可能成为今后的课题。

蔡司 (Zeiss) 公司的方法是在玻璃的球面透镜面上涂有非球面的树脂层，以一种胶合透镜构成非球面透镜 (图 4)。其制造方法是在玻璃透镜上放置定量的树脂，再用非球面模具进行挤压，同时对成形和玻璃进行固定。为了获得透镜的性能，重要的条件是透镜和模具的重合，温度控制等。这样做的优点是加热成形 (树脂) 部分的厚度薄，成形时变形小。因为树脂的成形温度比玻璃等低，所以对型材的条件要求比较松。另一方面，

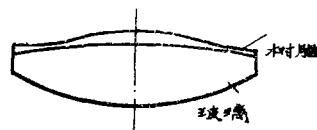


图 4 在玻璃上用树脂成形的透镜

做为光学元件能使用的树脂材料种类有限，其稳定性比玻璃低等，这些都是问题。

4.2 切削加工

加里福尼亚大学的布鲁安一直在研究超精密加工的基本问题。制造了一种金钢石精密车削设备(图5)，用它加工直径150mm F/0.25的银的抛物面反射镜。因为切削后的表面具有75~78%的高反射率，这样如可以用光波干涉法进行形状测定。其结果，形状的绝对误差是 $0.6\mu\text{m}$ ，加工表面光洁度为 $0.03\sim 0.05\mu\text{m}$ 。在形状误差中出现了振幅 $0.2\mu\text{m}$ 、波长约 4.4mm 的周期起伏，这是由于旋转工作台的推断误差造成的。布鲁安的机床在用气动轴承的主轴前面，有带垂直回转轴

的旋转工作台，也就是支持金钢石刀具的工具台，(工作台能在水平面内XY移动)。全部机床均被透明壳罩盖着，在这中间装有温度调节用的冷却剂喷射器，这就基本上解决了重要的热稳定性的问题。

理想的切削加工，工件的加工形状应该是由工具和它的相对运动轨迹创成的，为了实现这一条件，必须使刀具不能构成尖状，不能忽略工具磨损程度小，进刀量小(深度是 $0.08\mu\text{m}$)。

4.3 磨削加工

从1958年到1966年美国贝尔和豪维尔(Bell & Howell)公司的考克斯(COX)等人进行了高精度非球面加工机床的研究，它基本是采用正交座标方式的创成机床。其原理如图6所示。如图所示，在工件台进给丝杠上连结一个磁转子，由它发出的控制信号使刀具工作台前后运动进行加工。虽然刀具工作台进给丝杠有节距误差和弹性变形等问题，但是刀具工作台的实际位置要用容量电桥检出，通过作用在刀具工作台和它之间的磁质伸缩元件进行补正，在工件轴上采用静压轴承获得半径方向 $0.2\mu\text{m}$ 、轴方向 $0.1\mu\text{m}$ 的回转精度，工具用长盘型轴承支承。用半径方向 $0.75\mu\text{m}$ ，轴向 $0.13\mu\text{m}$ 的精度安装，



图5 超精密车削设备

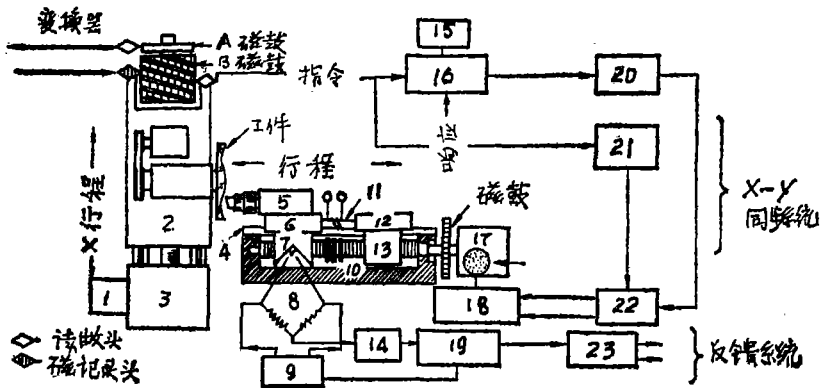


图6 非球面研磨机原理图

1. 工件驱动马达 2. 工件车架 3. 减速器 4. 滑板(滚柱轴承) 5. 刀具(车刀或磨料) 6. 刀架滑座 7. 位置误差检出仪(静电螺母) 8. 测量电桥 9. 振荡器(10KH_2) 10. 联轴器 11. 激励(电致伸缩元件) 12. 驱动滑板 13. 驱动螺母 14. 放大器 15. 紧急停止开关 16. 可逆计数器 17. 减速器 18. 脉冲马达驱动设备 19. 相位检测器 20. 脉冲发生器 21. 手动预置计数器 22. 正逆转置回路 23. 终止开关 SW

磨料用直径 $50\mu\text{m}$ ，厚约 $0.3\mu\text{m}$ 的铁粉结合剂，粗磨用 $44\mu\text{m}$ ，精磨用有 $30\mu\text{m}$ 的金刚石磨料。加工面的光洁度可获得大约 $0.25\mu\text{m}$ 。

最近我们在美国 Zygo 公司的协助下，以生产照相机透镜为目标，研制了非球面加工机床，如图7所示，由于机床构造简单，提高了刚性，此外影响温度变化也很小。磨料通过微动随动系统以 0.01 的分辨率进行进给控制，所以，透镜能够得到 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 的加工精度，图7(a)是用树脂结合剂金刚石磨料加工的被加工表面，它与一般常见的玻璃研削时的破损面不同（如图8(b)），是完整的切削面。这个加工机床，除了工件的装卸外，大都是自动化，一个月能加工1000多个非球面透镜。

4.4 研磨、抛光

大阪工业试验所的牧野，川井等人用创成研磨法试验研究了直径 120mm ， $F/3$ 的施密特校正板。研削盘如图9所示那样接触工件，将加工面制成一种图样，这个图样通过

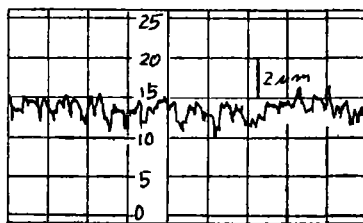
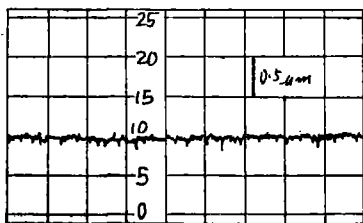
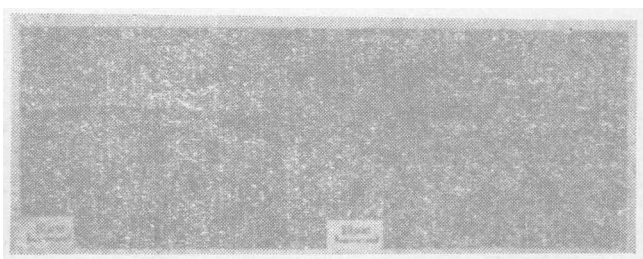
比例盘面和工件的相对线速度，相互的接触面积的条件，计算得出研削盘的磨削速度。在加工中，多次修正工件形状的测定量和对它的结果的盘子图样，才能获得最终精度。



(b) 磨料/工件部

图7 超精密非球面研削装置

实际加工结果，形状的误差为 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 。这种方法存在的问题是抛光盘加工特性很难与予测值一致，往往容易采用错误的工艺，而



(a) 非球面研削设备加工的工件面 (b) 球面研削盘加工的工件表面

图8 加工面光洁度的比较

注：因原文图 7(a)不清，省略。

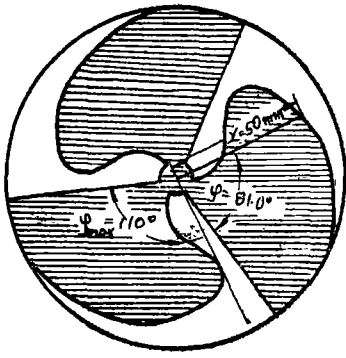


图9 抛光创成透镜的研削盘

另一方面，它具有不需要特殊的非球面加工机床，形状的全面修正较容易等优点，可以说是适于少量加工不少来自标准球面（或平面）的非球面量。

美国 Itek 公司的阿斯顿等人，正在研究一种被称为以计算机配合的非球面创成法，这种方法，首先用干涉法测定工件的形状，对于各部分的材料要除去应有的高度。然后将整个工件分成适当的尺寸小六角形组，对每个六角形区域内记录刚才除去的高度，其次是研磨，抛光等工具中心在每次通过六角形时所研磨掉的部分单位深度，计算机所产生的随机轨迹与工具所必须通过各处一样，工具在工件上借助于数字程序控制而运动（如图10）。实际上要用工件直径大小1/2以下的工具，加工形状可获得光波长内的精度。

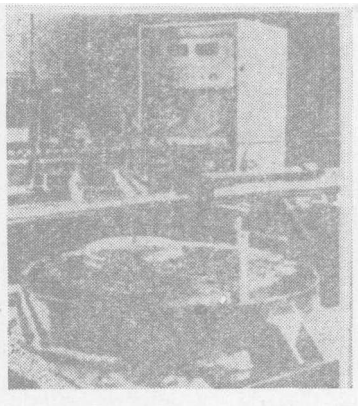


图10 用 CAOS 的修正研磨

其次关于已最终成形的非球面透镜，为了去掉它的磨削纹络作成光学面而实行的“均等研磨”，一般如在整个工件上常常以同样加压作用一样，用弹性工具，如图11 Taylor Hobson 公司的气球式抛光器的例子；是在尼龙膜上涂沥青，再用工具腔的空气压以同样面压挤压工件进行抛光加工。这个抛光器能把材料研去量的均匀误差收到2个牛顿环以内。

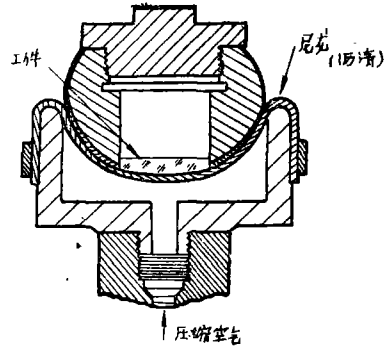


图11 用空气压的抛光器

均匀研磨的其它方法，大都是将海绵等弹性材料贴在金属盘上作抛光器用，海绵柔软，有一定厚度，加工面所受的压力均匀，一方面金属盘易出振动现象，特别是在一种极限条件下，透镜容易塌边，为了避免这种现象，可在工件的周围用一夹具保护。

4.5 离子束加工

通过高频率和放电使气体电离，借助于强电场在真空中加速离子，就能容易得到每秒数十~数百公里的速度。把这些高速离子打入固体表面，通过弹性冲撞能够一个一个除掉固体原子，这就是离子束加工的概念，与采用使动能变热，熔化，蒸发的激光和电子束的加工原理不同。为此，在固体表面不留下不平 and 裂纹地进行精密加工。它采用反应低的氩A、氙Xe等惰性气体，加速电压为20~50KV。

图12是1972年美国佛朗克福奥特兵工厂的莱斯特尔用静电偏转进行射线扫描的例子，通过高频电离的氙离子由加速器和静电

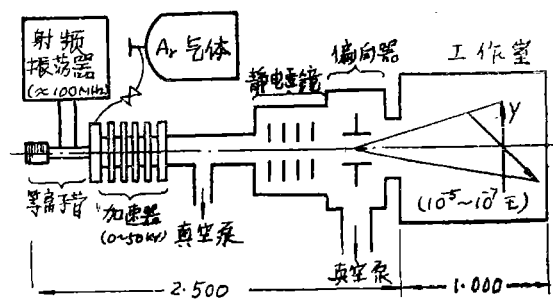


图12 射束偏向型离子束加工机

透镜构成直径5的射束打入工件,此外用记录加工前的加工形状和设计值偏差的微型电子计算机控制直流电压。扫描射束,射束有时折回在原点的传感器,控制离子电流和座标的变化。这个设备是已制成的最大规格为50KV/1.5mA的离子束加工机,其性能较高。

通常以熔融石英,无铅玻璃等材料为主进行加工,例如, $\phi 75$ 的最大加余量为 $1\mu\text{m}$ 的非球面透镜大约需要10个小时,以 $0.01\mu\text{m}$ 的精度要求连续进行加工,用万倍电子扫描显微镜观察不到加工面上有任何凹凸,测定光的分散比机械研磨面好。

通过离子束的偏向进行扫描的方法容易控制和提高精度。但是如果工件直径大。曲率半径小的话,由于对应工件射线的入射角失灵而使加工特性发生变化。表面形状有时也将发生变化。

我们参加进行的理化研究所的例子,离子束不发生偏向,转动工件,使它操动,但位置重合和射束条件变动的补正等还有很多问题。由于射线不发生偏向,基本上垂直射入工件,所以容易控制,容易达到高功率,目前正采用20KV/1mA的离子束以 $0.1\mu\text{m}$ 的精度和 $0.01\mu\text{m}$ 光洁度为目的进行研究。

4.6 辅助加工

在真空蒸镀装置上,由于在工件和蒸发源之间没有一个适宜的,并有开口蔽光框,用以控制粘着厚度,这就是辅助加工,这是一个较古老的并取得成功的方法,但是,为了获得所要求的形状,有必要对误差进行反

复试验。它的还原性也差,另外,粘着材料限定为SiO主要成分蒸镀用的玻璃和铝Al等几种材料,粘着厚度最大可达数个 μm ,所以设计面狭。

最近,由于离子束对蒸镀物质的作用,用了高能粒子蒸镀工件材料,以及增大厚度范围和提高还原性等方法。与离子束直接加工的方法相比,是一种容易把离子源变成大容量化的生产方法。

另外,在前节所述的离子束加工机的加速电压可达50KV,即使提高到200KV~2MV,在表面的附近也不发生弹性冲撞,搞乱原子排列,制成折射率变化层。折射率由于射入的离子密度而发生变化,所以以球面的样子来制成光学作用的非球面透镜。1969年法国P.SINAI在硼硅酸玻璃上注入中子来修整球面象差,哪以后基本没有再考虑此问题。

5. 检查、测定

测定非球面形状的方法,大致可分为机械方法和光学方法。光学方法主要是根据标准参照面和它的光波干涉,定量求得形状,和通过测定组成试验非球面系统的光学特性来推断非球面的形状(精度)的两种方法,可是为了评定和改善非球面加工工艺,必须知道定量加工的结果。

图13是我们研制的一种非球面形状测定机,这是利用激光干涉仪的一种极坐标测定机。被测定透镜以参照球面的曲率半径为轴

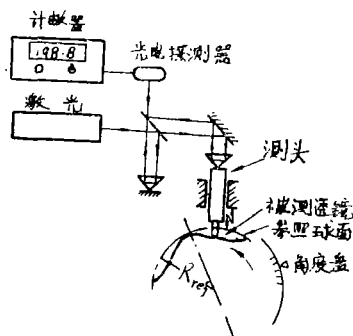


图13 非球面形状测定机的原理

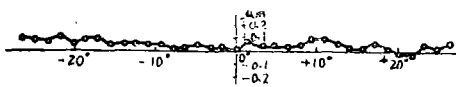


图14 非球面形状测定值 (误差量)

进行分度旋转。从垂直方向接瞳透镜的测头的升高,对透镜的分度量记录,获得非球面的剖面。这种测定机在控制环境的特殊防振台上使用。测头的分辨率是 $0.02\mu\text{m}$, 工件的分度分辨率是 0.5 秒, 综合测定精度是 $0.06\mu\text{m}$, 用附设微型电子计算机在理论上是很容易调整, 消除设定物差的。图14就是用这种装置测定的非球面形状的一个例子。

为了了解非球面的形状, 要采用各种干涉方法。其中最重要的是用计算机产生全息图的方法, 它是用计算机的非球面透过波(或反射波)而产生的干涉条纹, 将这些干涉图形印入干板。

再用图15那样的形式的特外曼, 格临干涉仪, 求得从全息图原板通过的波面和被检非球面的反射面所产生的干涉波纹, 就能知道非球面的形状误差。用计算机产生的全息图法作为测定误差的因素, 必须考虑绘图仪的量子额和精度, 摄影精度, 干板膜的变形以及定位精度等因素。把这些因素综合起来, 其测定精度大约是 $1/4$ 波长。

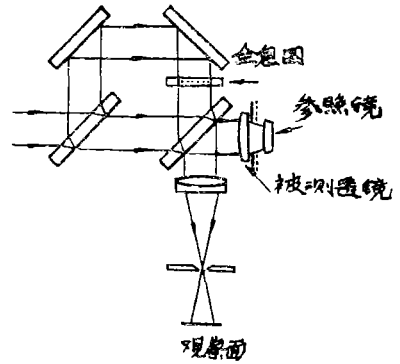


图15 特外曼格临干涉仪

6. 结束语

非球面透镜的制造技术, 飞出科学和尖端的研究室在广泛的企业中固定下来的日子, 已经为期不远了, 为了加速实现这一天, 有必要整理至今为止的经验, 归纳技术精髓, 对于这个迫在眼前的命题, 要通过各种途径, 事先掌握各个要点和问题的程度, 早日完成提高研制精度的问题。

译自“机械の研究”第28卷、第9号1976年第1071~1078页

(春译、王书岩 校)

(上接58页)

(57) 溅射薄膜研究

Sputtered thin films research, AD-A022385/9GA.

(58) 在紫外辐射的前后, MgF_2 薄膜保护铝镜的 Auger

Auger spectroscopic examination of MgF_2 -coated Al mirrors before and after UV radiation, Applied Optics Vol.16, No.7, 1977, p1886.

(59) 采用喷涂沉淀过程涂塑料透镜的研究

Investigation of coating plastic lenses with sputter-deposition process, AD-733943.

(60) 用法布里——珀罗干涉仪对非常薄的光学膜进行厚度测量

Optical thickness measurement of very thin films with a Fabry-perat interferometer, J. of Applied Physics Vol.48, No.6, 1977, p2628.