

检验光学表面和透镜的数字波前测量干涉仪

摘要 用自扫描1024单元光电二极管阵列和小型计算机测量干涉仪干涉图形的相位(波前)测到 $\lambda/100$ 。通过压电晶体改变参考臂长,在干涉图形中 32×32 矩阵排列的光电二极管阵列采样光强。应用这些数据通过傅里叶级数方法小型计算机同步探测每1024个点的相位并把波前的等高图和透视图在少于1分钟内显示在存储示波器上。阵列的光强是以随机形式多次采样并取平均值,使大气抖动,振动和热流效应最小。很重要的是容易测定干涉仪的波前误差并且从当时的或以后的波前处理中自动相减。支持测量系统的各个程序包括确定孔径边界,波前总和和区分,倾斜和聚焦误差的消除或引入以及波前空间操作程序等软件。快速傅里叶变换程序把波前数据转换成点扩散函数以及透镜的光学传递函数的模和相位。显示程序以等高图和透视图形式绘制这些函数。已设计这个系统使收集数据最佳化并得出比测量单个元件和测量衍射极限光学系统性能的通常精度更高,更进一步,由于循环操作只需要短暂几分钟的时间使该系统成为光学车间取样板施加的限制更有吸引力。

I 绪言

光学干涉术已长期用于检验透镜组元的表面和完成的镜头的质量。激光的出现使干涉仪更便于使用,但灵敏度并没有提高。泰曼-格林干涉仪中透镜表面的条纹图形代表 $\lambda/2$ 的等高图间隔,这在许多应用中是不够满意的。集成光学的光刻透镜就是这种情况。这种透镜可能有20多个表面。物空间中由点光源产生而在像空间会聚的球面波前,其误差必须小于 $\lambda/4$ 。这要求透镜的每个表面面形好于 $\lambda/10$,当然,为了制造表面,要求更高的测量精度。一般干涉法或玻璃样板,提供不了这种精度。

曾经叙述过的干涉仪已用来拍摄干涉图,用光学扫描图片,并用计算机处理密度计读数获得更灵敏的波前测量。这些系统由于下述理由可能不精确或不方便的。

(1) 图片处理的非线性在未定心于条纹极值的点引入畸变。

(2) 为获得准确间隔的全部条纹参考面的倾斜引起畸变或其它转换成相位误差的横向测量误差。

(3) 平均波前而消除大气湍流和漂移效应是很困难的。

(4) 测定和补偿干涉仪的缺陷也是很困难的。

(5) 处理需要相当长的时间并要做很大的努力,这就不适用于通常的加工控制的系统。

本文叙述精密测量零件和透镜的系统,这是通过平均许多波前消除湍流和噪音效应来获得在用等高图和透视图显示波前,点扩散函数,调制传递函数或光学传递函数之前,准确地测量和补偿干涉仪的误差。

只需要1分或2分钟自动提取条纹视场,计算相位,和绘制出所需的输出,使系统便于日常的加工控制。

II 一般的干涉仪系统

一般的干涉仪系统包括采用单频激光光源的改进型泰曼-格林干涉仪。在干涉仪样品臂中采用光学系统匹配被检验零件表面的或适当其轭的加工的透镜的入射波前。条纹图形成象在提取图象的具有 32×32 二极管阵列的探测器上。二极管阵列信号显示在电

视屏上并能调整条纹,定准和放大图象以适应填满视场。二极管阵列信号也被数字化并传给小型计算机,在那里处理多次重复采样的数据为在波前每个点上测量相位。在干涉仪的参考臂上采用压电驱动反射镜使得在不同相位多次采样以便探测系统尽量减少噪音、漂移、大气湍流和非线性引起的误差。模拟-数字转换器把二极管信号转换成计算机数字信号,而数字-模拟转换器把计算机信号转换成模拟电压去驱动压电元件到所需位置。

在参考臂中引入相位位移增量以后,重复测量1024点阵列的强度来探测波前。当线性地改变引入的相位位移时,每个取样二极管的强度正弦地改变着,例如,相对于中心二极管的每个二极管相位位移是波前中那些点的相对相位的测量。用傅里叶级数方法计算这个相位阵列,然后处理再给出所需的显示。

A 相位探测技术

考虑如图1所示的泰曼-格林干涉仪。

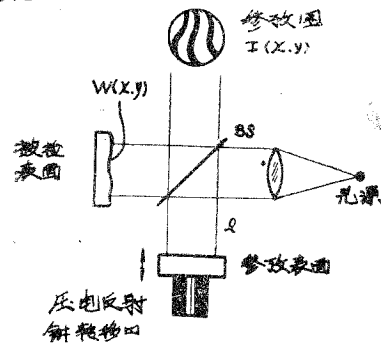


图1 参考臂压电程长控制的泰曼-格林干涉仪
假定参考面是完整的,用下式分别给出有关参考和被检验波前:

$$W_1 = a \exp(2ikl), K = 2\pi/\lambda,$$

$$W_2 = b \exp[2ikw(x,y)],$$

式中 l 是从分光器到参考面的平均程长,而 $w(x,y)$ 表示所求的检验表面二维轮廓。干涉波前的振幅分别是 a 和 b 。从中我们可以发现干涉图形或条纹花样的光强分布是

$$I(x,y,l) = (w_1 + w_2)(w_1 + w_2) \\ = a^2 + b^2 + 2ab \cos 2kl \\ [w(x,y) - l] \quad (1)$$

最小光强或条纹间的间隔如等式(1)所证明的相当于干涉仪二个臂中的光程差等于 $\lambda/2$ 。我们最关心的是函数 $w(x,y)$,它是表面或光程差。从等式(1)中可以清楚地看出,在条纹图形中,对所有 (x,y) , $I(x,y)$ 是 l 的正弦函数。

然后等式(1)还可表示成:

$$I(x,y,l) \triangleq a_0 + a_1 \cos 2kl + b_1 \sin 2kl \quad (2)$$

这是仅有直流项和一次谐波的傅里叶级数。这个系数可以理解为是 x 和 y 的函数。在取样的数据判读中,用顺序地采样条纹图形和利用三角函数的正交特性来得出每个 (x,y) 系数:

$$a_0 = \frac{1}{np} \sum_{i=1}^{np} I(x,y,l_i) = a^2 + b^2 \quad (3)$$

$$a_1 = \frac{2}{np} \sum_{i=1}^{np} I(x,y,l_i) \cos 2kl_i \\ = 2ab \cos 2kw(x,y) \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{2}{np} \sum_{i=1}^{np} I(x,y,l_i) \sin 2kl_i \\ = 2ab \sin 2kw(x,y); \quad (5)$$

$$\text{于是 } 2kw(x,y) = \tan^{-1}(b_1/a_1) \text{ mod } 2\pi \quad (6)$$

$$l = l_i = \frac{i\lambda}{2n} \quad i = 1, 2, \dots, np$$

整数 p 表示采样干涉花样的周期数目而 n 表示每个周期的分隔数目。所以,对于干涉花样每个点来说,在 2π 某些倍数中发现相位或波前。知道 $w(x,y)$ 是孔径内 (x,y) 的连续函数,就能很容易解决 $w(x,y)$ 中 $\lambda/2$ 的间断点。

在这种情况下值得注意的是傅里叶级数表示法正是自相关或同步探测技术。测定的系数表示 $I(x,y,l)$ 是最小二乘法的最佳近似值。由于这是一个同步探测技术,对接近载波频率 $2kl(t)$ 采样时间的倒数的频率成分的漂移和湍流是很敏感的。在这种情况下,采样时间是参考反射镜移动 $p\lambda/2$ 所需的时间或者是函数 $I(x,y,l(t))$ 的 p 周期所需的时间。这种误差源的灵敏度是根据随机地多次

采样 $I(x, y, t_i)$ 来减少。采样数据的随机次序把接近载频的强的漂移成份转换成均匀分布在很宽频谱中的漂移成份。如果出现很慢的但相当大漂移时, 许多周期 (p 值大) 中累加数据, 探测技术用采样时间就不能取得改进的结果。然而, 如果许多波前被平均, 而对漂移来说每次用相当短时间间隔 (p 值很小) 累加数据, 则用许多数据改进结果。由于缓慢的位移产生线性, 可以通过计算从各个波前中消除这些效应, 而且消去剩余倾斜和聚焦误差。

在每次操作期间确定漂移状态, 既一般包括 4 个周期每个周期采样 25 次 ($p=4, n=25$), 每周期累加数据以后, 从最后一对部分求和有一个矢量绘制到存储示波器上。 x 和 y 坐标对应的矢量分量分别相当于没有归一化的 a 和 b [参见等式 (4) 和 (5)]。每次操作结束后, 如果矢量不落到同一个直线, 这就说明有漂移, 就要重新测量。

B. 误差源

误差来源很多, 在该系统中必须加以考虑。激光源的噪音, 探测器电子噪音, 附加光束引起的非线性条纹轮廓, 机械漂移和大气抖动都影响系统的特性。

要想测量波前到 $\lambda/100$, 有时忽略这些系数, 那就会有很大影响。激光源是必须认真考虑的一个器件。首先, 输出功率必须具有很好的短时间稳定性, 这就意味着条纹图形对比度, 以及激光相干性也必须保持短期稳定性。后者的状态要求单频稳定激光器或者能使干涉仪两臂程差保持常数并且等于激光器腔长的整数倍。尽管代价较大, 由于消除了全部程长限制 (并把检验表面用的全部光学零件保持固定), 却采用了纵向单模工作激光器。

由于用好稳定性的光源, 波前系统得到最佳的重复性。二个相继的操作产生少于 $10^{-4}\lambda$ 的均方根差。这就是说它能准确报导所见的条纹图形。然而, 在各种环境下, 看到的条纹图形不能精确显示理想干涉波前。

当由二个以上干涉波前组成干涉条纹时, 出现这种情况。而用偏振滤波时大大减少这类干涉, 这时将考虑三个波前的干涉效应。让我们考虑下述三个波前:

$$w_1 = \exp(ip) \text{——来自干涉臂;}$$

$$w_2 = \exp(i\tau) \text{——来自检验臂;}$$

$$w_3 = \varepsilon \exp(i\eta) \text{——附加的。}$$

一般使参考波前相位恒等于零是没有问题的。这样, 条纹图形成为正面式子。

$$I(x, y) = \alpha + \beta \cos(\tau - \phi),$$

式中 $\alpha =$ 常数

$$\beta = \text{条纹对比度} \leq 1$$

函数 $\phi(x, y)$ 在我们要测的条纹图形 $I(x, y)$ 和波前 $\tau(x, y)$ 中引起畸变。这个畸变的大小很容易说明是同附加波前 $\varepsilon \exp(i\eta)$ 有关, 因为

$$\phi = \tan^{-1}[(\varepsilon \sin \eta)/(1 + \varepsilon \cos \eta)]$$

然而如果 η 是位置的快速变化的函数或常数时, 畸变就消失。举例说明这点, 在特殊情况下将有明显的误差。要考虑检验臂的未镀膜表面和镀有单层增透膜表面的附加反射。这样, 检验表面的反射率是 0.04 而附加表面反射率是 0.01。这就导致振幅比率 $\varepsilon = 0.5$ 。也假定附加波前是位置的缓慢变化函数并且呈现包括 $\pm \pi/2$ 的相对数值。这样对整个孔径中具有 $\lambda/7$ 总误差的波前来说将有 $\phi = \pm \tan^{-1}(0.5)$ 那么多。在检验无反射层玻璃表面时已看到这个效应 (尽管比 $\lambda/7$ 还小), 但在检验表面有反射膜层时就看不到。

这个误差源不是由于探测技术的原因, 而是扩大激光源相干性的结果。通过移去检验表面而旋转该系统很容易检查附加波前的存在。如果附加波前振幅是很明显的, 则比较好的条纹图形将显示在存储示波器上。否则, 这个图形将呈现出噪音。

在消除探测器噪音和快速变化的大气抖动影响中数据平均是非常有效的。用很长时间的平均就不能完全消除机械系统的缓慢漂移和缓慢改变的大气折射效应, 这是由于缓慢变化与参考光束相位的周期是同步的

果。通过多次短的平均操作, 每次操作中恢复波前并平均这些波前来消除这种噪音。这种平均根据噪音的相应变化而能自动继续很长时间。

III 干涉仪

A 概述

目前的干涉仪结构如图 2 所示。图 3 是其照片。

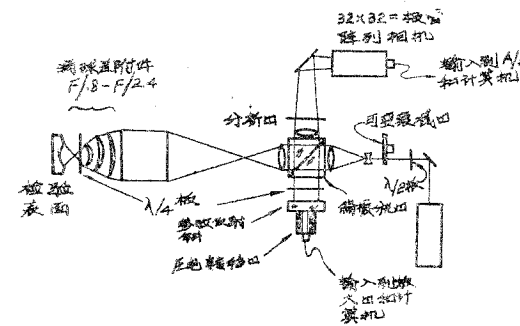


图 2 泰曼-格林数字波前测量干涉仪

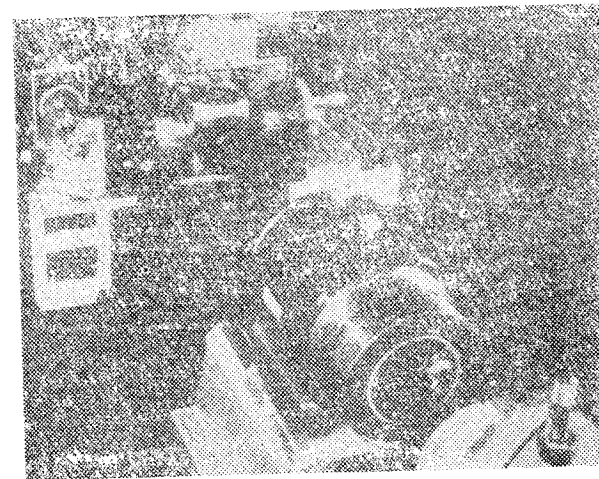


图 3 干涉仪

最初系统试验已表明, 在 $\lambda/100$ 范围的精度需要一稳定的单频光源。采用拉姆下陷稳定的单频激光器满足频率稳定要求并也允许干涉仪在两臂之间采用程差长的操作, 而不单纯地等于激光器腔长的整数倍, 这就允许参考臂的长度保持固定在大约 5 厘米。

用图表示出表面和零件的最后检验包括

非镀银或抗反射膜表面。后种情况要求有效的利用光, 因为反射率是低于 1%。在这种情况下, 使用偏振分束器 (PBS) 是光损失最小的最佳解决办法。

偏振激光是通过一个 $\lambda/2$ 板产生。旋转 $\lambda/2$ 板的方向把入射线偏振定向在与垂直方向成 ϕ_i 角。这样控制检验和参考臂之间的光强比, 即分别是,

$$I_{\text{检验}} = I_0 \sin^2 \phi_i$$

$$I_{\text{参考}} = I_0 \cos^2 \phi_i$$

这二个信号二次通过 $\lambda/4$ 板, 使他们分别旋转 90° 无衰减地进入观察臂。偏振分束器— $\lambda/4$ 板结构的重要情况是由于安排所有反射表面先于每个 $\lambda/4$ 板前面, 所有反射光由偏振分束器抑制, 可能进到观察臂, 在样品臂上采用或检验复杂的光学系统时, 这是很重要的。在这种情况下, 紧靠着被检验表面或参考镜的表面之前放 $\lambda/4$ 板。样品臂中的 $\lambda/4$ 板可以用于会聚光达到大约 $F/2$ 的光束中, 这时没有返回光束振幅的明显不均匀性。除非存在两臂相同偏振的成份以外是不能产生干涉。检偏器放在接收器之前, 从两个正交偏振的返回光束中产生两个偏振分量。对垂直方向的检偏器方位角 ϕ_A 来控制相同偏振方向中的返回光束的相对强度并且这样就控制了条纹图形的对比度。当两返回光束的强度相等时, 对比度最大。如果我们假设参考臂的反射镜的反射率为 1 并且检验表面的反射率为 R , 上述条件要求:

$$R I_{\text{检验}} \cos^2 \phi_A = I_{\text{参考}} \sin^2 \phi_A,$$

$$\text{或 } R I_0 \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_A = I_0 \cos^2 \phi_i \sin^2 \phi_A, \quad (7)$$

$$\text{因此 } \phi_A = \tan^{-1}(R \tan \phi_i) \quad (8)$$

当 λ 射偏振 ϕ_i 合适地选定时, 才获得最大信号。受到 (8) 式约束参考信号最大值得

$$\text{出下述结果: } \frac{\partial}{\partial \phi_i} (\cos \phi_i \sin \phi_A) =$$

$$\frac{\partial}{\partial \phi_i} \left[\frac{R \sin \phi_i}{(1 + R^2 \tan^2 \phi_i)^{1/2}} \right] = 0$$

$$\text{或 } \phi_i = \tan^{-1}(1/R)^{1/2} \quad (9)$$

$$\phi_A = \tan^{-1}(R)^{1/2} \quad (10)$$

把等式(9)和等式(10)代入等式(7)得出接收器最大信号为

$$I_{\text{最大值}} = I_0 [R / (1 + R)] \quad (11)$$

当R是很小时,这个最终结果是相当重要的。如果我们把上述 $I_{\text{最大值}}$ (用偏振分光器获得的)同非吸收50/50非偏振分光器获得的 $I_{\text{最大值}}$ 相比较,当 $R \rightarrow 1$ 时我们得出2倍光强,而R小时得出4倍光强。即使在 $R \sim 0.01$ 时这个结果已允许使用300微瓦激光光源。在大部分情况下,光必须衰减。

当检验不同反射率R的其它表面时,角 ϕ 和 ϕ_A 被适当调正到同上要求。峰值光强是利用一个可变衰减器调正使之探测器工作在正好低于饱和状态下。这就得出没有限制的最大动态范围。二极管阵列探测器按着电荷存储形式工作,在画幅扫描期间线性积累光通量。计算机利用传递时钟脉冲给阵列控制扫描。目前,计算机(PDP8/I)限制这个速率,目前每单元为20微秒或每个画幅为大约20毫秒。自扫描二极管阵列探测器超过普通采样视频系统,这是由于输入数据仅仅被计算机限制。计算机不需同步于标准摄像管线速率地调正数据速率。由于用计算机使阵列相机定时,消除同步问题。由于电荷存储,在画幅数据存储前,阵列必须清楚或复原。在复原期间,用压电转换器把参考反射镜移到一个新位置并给出机械固定的时间。某位置用控制程序来确定,也就是调正数模转换器并将高电压放大器接到压电转换器。与此同时,在傅里叶系列中积累最后画幅的强度。对这种应用来说由于分立的光电二极管灵敏度提高1000倍并积累光的变化在100赫以上,电荷存储操作是很理想的。此外由于二极管的有效面积是阵列面积的一半,我们也好空间积分。对检验透镜和表面来说,32×32的波前数值取点是足够的,因为抛光处理不能引起从球形的快速随机偏离的局部差。计算机系统如图4所示,列阵相机的联接如图5所示。



图4 PDP8/1计算机系统

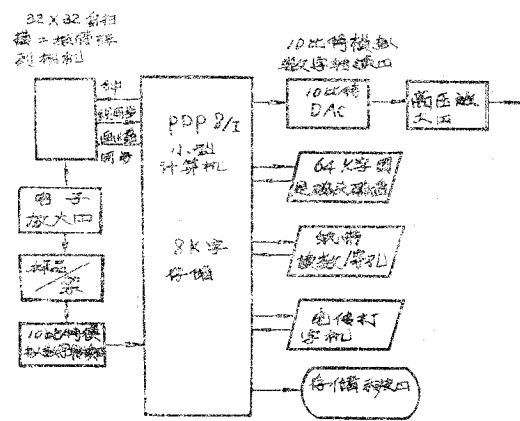


图5 计算机联接和外部设备

B 干涉仪误差

小型计算机能存储大量波前。这就使实际测量干涉仪的误差并且从每次连续测量中自动减去它们。这样稍微降低干涉仪的个别另件所需的精度。例如,如果获得和存储检验表面的波前,然后从同一半径的完整标准获得的波前中减去它,干涉仪误差将任意大。如果标准表面和检验表面的半径不同,考虑波前形状的变化效应,如同它传播的距离等于检验和参考表面半径的差。要求误差达到 $\lambda/100$ 的结果,这种考虑要求干涉仪另

件的全部误差规定为 $\leq 1\lambda$ 。这是一个相当宽的容限。在没有波前相减的干涉仪中存在 1λ 误差,则不能清楚地探测检验表面的 $\lambda/100$ 误差。

IV 软件

为了使用磁盘操作系统波前测量系统的软件以模数形式写成。执行程序是数字仪器公司提供的PS/8系统。这就能很容易对有名字的数据外存储器编程序,编辑,排除故障和汇编的键控操作。实际上,这个方便使某些事先编好的程序系列存储在磁盘系统上执行。由于要求的全部程序不能同时存在在内存中(8K12比特字),这是很必要的。测量波前的程序如图6所示并表示了每步显示的波前状况。在操作者选择中,程序系列都可进入任何点。每个程序和外存储器的名称当碰到时将简短叙述。下面将介绍典型的表面的检验。

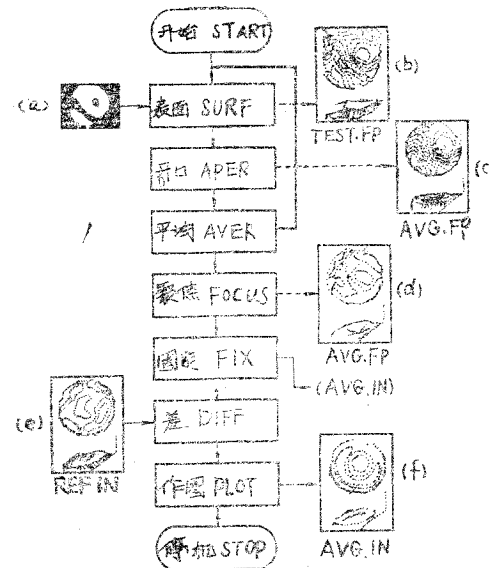


图6 测量透镜表面的程序:

(a)出现如同在监视器示波器上所见到的数字化条纹图形。(b)表示 $\lambda/2$ 波前间断的数据积累后原始相位输出;(c)确定孔径和消除不连续点以后的波前;(e)表示干涉仪误差的存储波前;(f)校正的波前显示,被检表面以 $\lambda/20$ 等高线显示。

A Surf

在电传打字机键盘打上SURF,操作系统直接找到程序SURF的磁盘外存储器位置并使这个程序进入内存存储器并且开始执行。这是获得数据的主要控制程序。为了把一连串数据输入到模拟数字转换器,它传递时钟脉冲到二极管阵列,控制可移动反射镜,并且以前叙述过的傅里叶级数方法完成相位计算。在采样数据之前,需要某些选择,比如进行运算的地址数,在其中运算并被平均。这个选择影响其它程序也被进入这一点,并且他们的出现将被说明。如果没有什么规定时可以不选择。在傅里叶级数中已积累数据后,反正切值被按模 2π 计算。这就表示出从SURF输出的未处理的波前数据。这些数据处于浮点格式中并自动写在叫做(TEST.FP)的外存储器上。外存储器的外延,FP说明外存储器处在三字浮点格式中,这样要求 3×1024 十二比特字的存储。在这点上波前的出现(尽管他通常不显示)如图6(b)所示。

B APER

在上面的图中 $\lambda/2$ 间断性和未确定的口径完全表现出来了。APER程序解决这些模糊问题(参看图6(c)。在每一1024点上条纹图形的调制度通过计算信号峰值一峰值的数量来测定。

$$2ab / (a + b)^2 = (a_1^2 + b_1^2)^{1/2} / [a_0 + (a_1^2 + b_1^2)^{1/2}]$$

[参看等式(1)一(5)]。口径中的点比外面的点调制度大。采用这种方式来确定口径。一般地15—20%的额定门限值能很好确定口径。也必须查明,成像光学元件把口径的象成在二极管阵列上,如果不这样安排接收器位置,则由于夫累涅耳衍射,开口就不能准确地确定下来。这也会在口径边界引起相位误差。口径的确定是根据比较门限值的对比度由APER程序进行,这个程序和SURF程序是连续地自动执行。指定口径外的点为很小的常数负相位。然后,用一简单算法对

径内的 2π 或 $\lambda/2$ 不连续性进行考查。如果二个邻近点的相位大于 π ，则 $\pm 2\pi$ 加到其中之一，一直到连续性重新确立为止。这就相当于设定：测量波前的斜率在二极管间不能超过 $\lambda/4$ 。用稍微更复杂的连续算法到扩大这个范围，但对实际情况来说（对已被加工的高质量光学元件）这是足够的。当确立连续性和固定了口径边界后。波前数据写到外存储器TEST.FP上。

C AYER

通过处理许多数据使这个数据收集方案获得很高的精度。这是通过平均很多波前或对每一个波前积累傅里叶系数用许多数据或二者来进行。一组波前的平均被存储在名叫AVG.FP的外存储器中。外存储器的第一个字表示目前平均的外存储器的序号数指示，结果当平均被校正时，该外存储器适当地被加权重。这表示积累的平均，因此每次连续的操作，TEST.FP和AVG.FP的加权的平均被返回到AVG.FP。除非开始有另外的规定，如同在SURF中的选择，在完成AVER之前，AVG.FP是零。

D FOCUS

由于在干涉仪的误差中含有代表额外倾斜和聚焦误差的信息，很难解释条纹图形。用目视方法很难区别出干涉仪误差和装调倾斜及聚焦误差。当波前数据存储在计算机内时，很容易求出倾斜和聚焦误差。口径内每一点的波前 (x_i, y_j) 可写成：

$$w(x_i, y_j) = w_0(x_i, y_j) + A + Bx_i + Cy_j + D \\ (x_i^2 + y_j^2) \quad (12)$$

$w(x_i, y_j)$ 是在 (i, j) 测量的相位， $w_0(x_i, y_j)$ 是dc位移(A)，倾斜(B)和(C)以及离焦(D)被消除后的相位。为了求出 w_0 必须确定出系数A到D。这是通过口径内全部点对A、B、C和D使 w 的均方值最小的方法实现。确定系数并且把它们按波长数值打印在电传打字机上。新的波前 $w_0(x_i, y_j)$ 现在代替以前的AVG.FP数值。由于它允许整个波

前以同样方式相比较，这个过程是精确波前测量的重要部分。由于消除这些固定误差，在干涉仪中不必很费力地放入和精调被检另件位置。经过FOCUS处理之后的波前再如图6(d)所示。在SURF程序开始进入时选择/J将使该程序连续地旁路到FOCUS程序。

可以改进波前表示式(12)使之含有其它系数比如最初象差系数。如果 $w(x, y)$ 表示检验透镜的光程差，这对评价设计性能是很有用的。当 $w(x, y)$ 代表透镜表面时，可以把非球面系数加到等式(12)上。一旦求出这些，用图解非球面时，根据设计数值，我们就能检验它们，这样可免除干涉仪需要的零校正器。进一步说，如果测量装校以前的高质量透镜组元，被测表面的小非球面系数代入透镜设计程序并且求出新的空气间隔使最接近于匹配真实表面面形，这样得到最佳性能。这个后面的应用是满足最精确的要求的最好调整方案。

E FIX

包括累加和数学键控的全部计算要求浮动点表示完全保持最高精度。对于相减和绘制波前来说，采用固定点和整数形式。固定浮点外存储器并重新写到固定点的磁盘系统上，时用外存储器的外延IN。这个程序也将是固定点浮点外存储器并在分别称呼时指定外延FP。如果整数外存储器组合要求数据键控时这个特征是很有用的。数据的外存储器在整数形式保存是为了节省存贮之故。

F DIFF

当检验表面时，他们同参考表面进行比较。这个参考波前被运算并存储在REF.IN中。系统又同检验表面一起操作(AVG、IN)，并且DIFF计算AVG、IN—REF、IN并把这个结果放在AVG、IN中。这是个没有干涉仪误差的表面图形，如图6(e)所示。正在检验一透镜时，REF、IN是没有检验透镜的波前，而AVG、IN是具有干涉仪检验透镜的波前。这些差别得出在那个特殊视场

位置上单次通过透镜的光程差。当你要去看来时，比如改变其抛光冲程的影响，也广泛采用这种方法。改变冲程的影响简要显示为改变冲程前、后的表面波前的区别。如果在操作表面SURF前/D被进入选择，这个程序自动显示出区别。

G 制图

当数据外存储器在整数格式中时，他们可显示存在储示波器上。以 $\lambda/20$ 等高线间隔PLOT绘制波前同等相位的等高线，这实际上也代表条纹图形。因为条纹变窄，在外表上这类似于多光束条纹图形。当分别称呼PLOT时等高线间隔是可变的。

H 3-D

没有数字标记的条纹图形或等高图形无论极值是极大或极小都没有表示。在等高曲线的下面3-D产生和显示同样数据的斜透视图，这样得出这些模糊。这二种曲线提供清晰的位置和波差大小或光程差畸变值的显示。采用的其它程序将在文章中叙述。

V 校正

一般认为一个表面的检验精度是能够制造的面形精度。当然这也是假定说测量结果能合理地表示出来。这在目前程序中已是一最大目标——测量结果的明显显示，即表明除了加工材料外的光学车间的加工技术程度。

当测量表面或透镜时，它的波前可同标准的参考表面所获的相比较——其区别表示检验波前或表面的状态。测量结果的绝对精度完全由参考表面决定，在目前装置中好于 $\lambda/50$ 。可重复性远远超过这个。

近代已叙述了绝对校正方法，它完全适应于实时数字干涉仪。它要求一数学键控三种波前 W_1 、 W_2 和 W_3 的装置。这些如图7所示。

W_1 是在某特定位置下的检验表面结果。 W_2 是如同前面但沿轴旋转 180° 位置的检验

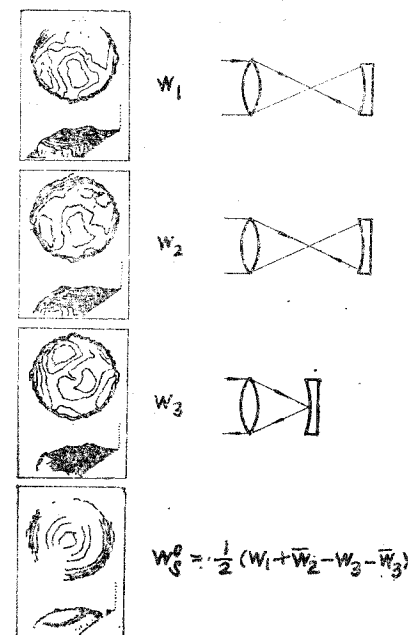


图7 干涉仪绝对校正处理的波前。

W_1, W_2 和 W_3 是输入波前， W_5 代表没有干涉仪误差的检验表面（见文章）。

表面结果。最后 W_5 是把检验表面的顶点放在准直器焦点上获得。如果我们用下面表示法，结果将变成

$$W_1 = W_R^0 + W_T^0 + W_S^0$$

$$W_2 = W_R^0 + W_T^0 + W_S^\pi$$

$$W_3 = W_R^0 + \frac{1}{2}(W_T^0 + W_T^\pi)$$

式中 W_R^0 = 参考壁的波前分布；

W_T^0 = 没有检验表面的检验壁的波前分布；

W_S^0 = 具有检验表面的波前分布；

α = 波前方位（0或 π ）。

在干涉仪完全没有误差时， W_R^0 和 W_T^0 都等于0。因此，目前， W_S^0 是所需的结果，但是，从上述波前来看，要用下面的计算来测量：

$$W_4 = \frac{1}{2}(W_1 + \overline{W_2})$$

$$= \frac{1}{2}(W_R^0 + W_R^\pi + W_T^0 + W_T^\pi) + W_S^0$$

$$W_5 = \frac{1}{2}(W_3 + \overline{W_3})$$

$$= \frac{1}{2}(W_R^0 + W_R^\pi + W_T^0 + W_T^\pi)$$

所以， $W_S^0 = W_4 - W_5$

这里，上面的一横表示波前旋转 π 弧度的相位阵列的变换。也需注意， W_1 ， W_2 和 W_3 是已经消除焦点和倾斜误差的波前。用程序CAL自动完成计算并包括安装的全部处理大约用5分钟。

这就告诉我们使用这个干涉仪检验表面或透镜可选择这样二种方案。或者采用这种方法检验或校正当作参考表面的主表面或者采用不凭借同参考表面相比较的上述方法。当要做一个测量所需精度的参考面并进行比较，然而只要作一个，这在最初是很困难的。在这个之后，以后的全部测量只要求发现二波前并相减——一个是具有检验表面的另一个是不具有检验表面的。很清楚，如果许多表面要在同一数值孔径下测量，则参考表面波前只要一次获得并存储在计算机中与每个检验表面进行比较就可以。这时参考表面波前表示该干涉仪的误差。上述的不需要有一个精确参考表面的方法，总是要求获得三种波前的测定。这时所需波前和结果如图7所示。也要求有一个使被检表面沿其光轴精确旋转 180° 的另件支持架。

当测量表面时，必须选定适当方位。凹镜表面曲线在存储器中显示成把同一光学检置的凸镜表面相对旋转 180° 。程序ALTER可援引以前的PLOT并且波前显示是相当于实际表面按1:1的方式显示。

VI 球面表面的测量

在样品壁上采用的光学系统允许广泛范围的球面的测量。 $f/4$ 准直器用在光束分束器之后使光束聚焦在一点上如图2所示。这个点被125毫米直径 $f/4$ 准直器准直，然后用第二个相等准直器成像。三个齐明附件在第二个准直器之后得出 $f/0.7$ 会聚光锥。能测量相当于60毫米半径的凸镜表面或任何半径凹镜表面直到这个锥角。当移去一个齐明附件时，用 $f/1.4$ 锥角测量相当于120毫米半径的凸镜表面和任何半径的凹镜表面。移去二个齐

明附件用 $f/2.4$ 锥角测量250毫米凸镜表面。移去全部三个齐明附件，在 $f/4$ 测量450毫米半径凸镜表面。当移去一个准直器，测量125毫米直径的平面并通过逐渐离焦第一个准直器能测量长半径凸镜和凹镜表面。这就允许大多数处在适当大小的光学另件被测量。

在这个光学系统中每次变化后由于干涉仪误差在变化必须测量参考表面。在这部干涉仪中产生或补偿的最大误差是 $\lambda/3$ 。

VII 半径测量

半径测量的经典技术包括把自准直器先定位在表面曲率中心上，然后定在表面顶部，并且测量自准直器(或表面)移动的距离来求半径。用距离测量干涉仪测量这些点的波前和跟踪这些点之间的移动距离，很容易进行几分之一微米精度的半径测量(见图8)。

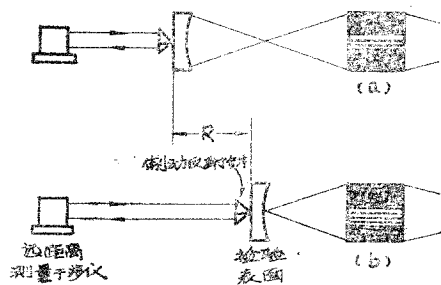


图8 用距离测量干涉仪和波前校正测量曲率半径的装置。

在每个位置上获得波前并记录每个位置的轴向离焦误差。在这些位置的每一个上已知的数字孔径允许计算弧矢高度的变化。这个量补偿不精确定位表面顶点或曲率中心所引起的误差。从测量干涉仪测得的距离求得半径R的真实值需要作如下校正。

$$R = R_{\text{计算}} + \delta_2 - \delta_1;$$

$$\delta_1 = 2e_i / (NA_i)^2;$$

e_i = 从波前测量确定的聚焦误差;

NA_i = 准直仪或表面的数字孔径，用程序DELTA进行这个校正。

在这个测量中也考虑周围环境的参数，因为它会影响激光波长。激光头部，远距离

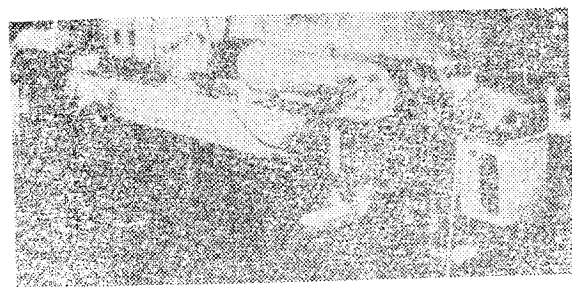


图9 半径测量的波前和距离干涉仪

干涉仪和返回反射器见图9。

干涉仪对表面和半径测量的非常重要的成果是：可制造和检验任意半径的表面。这样光学车间不用为了加工一个球面就加工一个样板。除此之外，用样板检验表面时由于接触而经常被损坏，使用样板要求在评定干涉图形前其半径要非常接近于被检验玻璃的半径。甚至，条纹图形很难读到 $\lambda/5$ 并且含有检验玻璃的误差。

从著名的光学制造厂借用40多块样板进行了试验，检验了半径和图形然后送回。样板面形误差平均是 $\lambda/8$ 而有些是不到 $\lambda/4$ 。半径误差大约0.5%。这些结果表明在制造和检验高质量光学另件方面还存在一些问题。这个试验的详细结果将在以后的文章中叙述。

VIII 检验镜头

光刻用的镜头要求具有衍射极限的性能。这样，在物空间一点发出的全部光线，通过镜头在像空间相遇时光程差少于 $\lambda/4$ 。可以在干涉仪一个壁上放入被检验镜头测量性能。这样获得的干涉图形是透镜光瞳处的光程差加上各系统误差的条纹图形，系统误差部分可按如下方法消除。简单的方法如图10。

首先把参考表面放入检验臂中计算出系统误差，如图10(a)所示。这个波前被储存起来以后作相减用(REF, IN)。然后放入被检验镜头并把参考表面放在镜头的像方，如

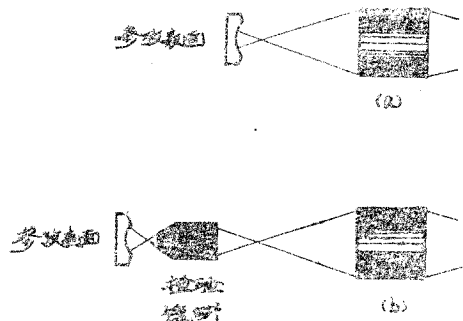


图10 透镜检验装置

(a)获得系统误差波前和
(b)镜头误差加系统误差。

图10(b)。单次通过镜头的光程差是波前(a)减波前(b)。这个测量假设参考表面没有自己的误差。如果参考表面不是完美无缺的，则上述测量可用同前面提到的在参考表面每个位置上确定校正的计算程序相结合进行处理。对1:1成像系统的特殊情况可用不完善的参考表面，而不必校正，这时要把参考表面在两个位置间旋转 180° 。

镜头光瞳中的波前很有效地说明镜头质量，并且其它的性能也是很容易获得的。这些就是点扩散函数(PSF)和光学传递函数(OTF)。点扩散函数(PSF), $I(x', y')$ 是通过光瞳函数 $w(x, y)$ 傅里叶变换来获得：

$$I(x', y') = A(x', y')A^*(x', y'),$$

$$A(x', y') = F[w(x, y)] = \int_0^1 w(x, y) \exp[-2\pi i(x'x + y'y)] dx dy.$$

点扩散函数的付氏变换得出复数OTF。 $O(fx, fy) = F^{-1}[I(x', y')]$ 。OTF的模式通常表示成调制传递函数(MTF)。他代表空间频率 fx , fy 物体成象的对比。图11(a)表示0.1倍镜头光瞳中的波前，图11(b)表示在像面中的点扩散函数，图11(c)表示成像的调制传递函数。用 fx 表示水平空间频率，用 fy 表示垂直空间频率沿径向绘出空间频率。零频在中心。其它方位的空间频率也能表示出来。狭扫描技术使调制传递函数测量给出单方向的空间频率，然而波前数据处理得出任意方向的空间频率，光学传递函数的相位如

图11(d)并表示从零频到高空间频率的相位移动。呈现的边界代表任意截止频率而不能误解为口径的错误判断。

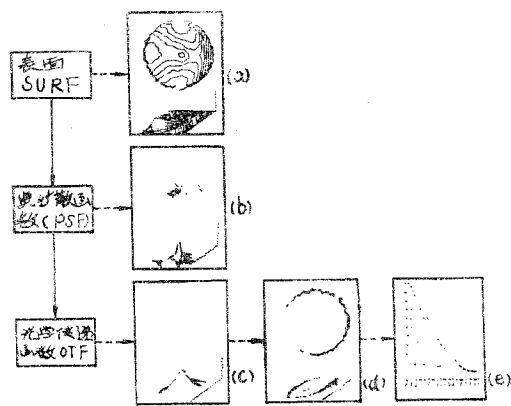


图 11

用6328埃在0.7全视场位置10倍缩小镜头特征

- (a) 镜头入瞳波前
- (b) 计算的点扩散函数
- (c) 光学传递函数的模
- (d) 光学传递函数的位相
- (e) 是两主截面上的调制传递函数。

在小型计算机中用快速傅里叶变换 (FFT) 方法完成傅里叶变换。点分布函数 $I(x', y')$ 是 32×32 个真实阵列。这个阵列放入到零值的 64×64 阵列中并转换得出包括调制传递函数和位相传递函数的复数光学传递函数。这个放入必须防止假的——违背采样理论的结果。

从干涉图绘制点分布函数和光学调制函数每次所需时间少于1分钟。通过调制传递函数表面绘制的水平和垂直截面获得很多定量调制传递函数信息。这是通过完成另一个程序来获得的，这个程序选出并内插以前计算的调制传递函数阵列的数据。这表示在图11(e)中。每毫米周期数的水平尺度是当操作时的口径和波长决定之后才有意义。

有保持同样口径边界时用零波前很容易评价相同口径衍射极限镜头的性能。处理这个光瞳函数一般得出点扩散函数和光学传递函数信息。这样可迅速辨别起模糊作用的波前象差的影响。

镜头工作台如图12所示。由分别相当于物平面，镜头支架和象面的三个可动部分组

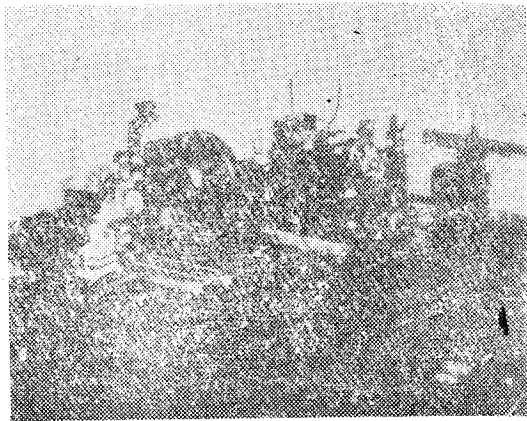


图12 镜头测量装置。镜头装在大圆筒内，物体和象面位于边缘。从背景看出干涉仪。

成。每个部分装在气垫上，所以很容易实现很小的移动。物和象面的精确规定是通过预先定位的

调整物和象面光束中心是靠抖动小倾斜屏，同时显微镜聚焦和 Filar 目镜观察来实现。镜头可以旋转并且关于机械装置可以移动。

干涉仪主要采用6328埃进行表面和镜头检验。4416埃氦镭激光通常检验光刻镜头。在相干光源不能提供的情况下对某波长进行测量时先用6328埃进行测量并用透镜中玻璃色散数据外推法来间接推算。已写出一个程序，根据透镜的设计数据用6328埃对于光瞳中波前计算的数据在纸带上穿孔，这个纸带读入计算机并在存储器存起来。然后对6328埃获得镜头波前检验数据并用相减程序计算其理论和实际的偏差。并把其结果显示在存储器示波器上。

IX 结 论

实时数字干涉图形测量装置已应用于泰曼—格林干涉仪。这是具有 $\lambda/100$ 精度的把透镜表面图形快速地按 1:1 作图显示并误差决定于干涉仪的光学零件误差的干涉仪。应特别指出它的输出形式对光学车间技术人员来说应用最方便。我们自己光学车间人员

(下转第61页)

阿波罗15和16号飞行用的地面遥控电视摄像机

B.M.SOLTOFF*

摘要：为阿波罗15和16号研制的地面控制的电视系统，具有新的工艺，它不仅为广大公众而特别为科学工作者提供了前所未有的优质月球勘测的实时图片。本文概述此种电视系统。

1. 引 言

阿波罗15和16号登月飞行中，传递月球勘测图象的质量是很高的，这并不是最新技术知识和设计应用的最后结果。在地面上对月球照像机进行遥控，能够得到多方面的而且是最佳的传递，并不需要宇航员离开他们本身的任务——月球勘测。

从月球照相机直至家庭用的电视接收机的信号传递，图1中作了图解说明。地面控制的相机装置由彩色电视相机 (CTV) 加上相机控制部分 (TCU) 而组成。在登月飞行器 (月亮徘徊者) 上使用过程中，照相机的信号通过控制部分并在这里附加一个检测扫描行。信号从这里出发到达发射装置和接收

装置 (LCRU)，并在那里调制输出功率为10瓦的S波段发射机。通过一个直径为1.5米的摺叠式抛物线形天线，发射能向着地球方向辐射。接收信号往往是由四个地面站其中的一个进行，并把信号继续传给霍斯顿美国航宇局宇宙飞行中心。图象的顺序信号在那里转变成NTSC信号 (国家电视系统委员会所规定的信号)，最后分发给国内和国际的电视网络。

相机的控制指令发向相反的方向，从宇航中心出发，编码指令越过地面站向月球方向发射。这种传递也是以S波段完成。在登月飞行器上发射/接收中检波之后，本相机控制部分内对信号进行译码，然后控制完成指令。

* 本文作者是美国无线电公司宇航电子学部照相机研制的负责人。

(上接第60页)

的实验表明，这是制造精密光学零件的最有价值的必需的工具。没有给技工遗留什么问题，比如抛光冲程的微小改变效果或如何快速地移去材料等问题。不用接触即可获得 n ppm 的半径测量，设计者可以选择现有样板以外的任意表面曲率。

用一小型计算机控制干涉仪允许使用者对复杂系统正确地定向并且使用非常灵活。这个软件灵活性改进了数据显示和键控操作，它不能活的作任何事情，但实时系统却能达到。

它用光瞳中光程差图解形式以及点扩散函数或调到和位相传递函数形式输出，检验透镜各视场位置的测量结果。也可显示与同样光瞳边界的衍射极限性能镜头的偏差。

它的高灵敏度和实时数据显示已证明在制造衍射极限光学系统和检验中这是必不可少的工具。进一步说，这是第一次为光学技术人员提供有可能直接反馈实现他要实际作的事情。

译自：“Applied Optics” Vol. 13, No. 11 P2693—2704 NOVEMBER 1974.

[苏录译, 韩昌元校]