

实验一 数字干涉测量原理及应用

一 实验目的

1. 掌握精密位移的光学干涉测量方法。
2. 了解激光数字干涉技术的原理、特点、以及测量方法。
3. 利用数字干涉测量技术完成一些实际测量。

二 实验原理

2.1 普通干涉测量技术

光学干涉测量实验采用泰曼—格林（Twyman-Green，简单T-G）干涉系统，T-G干涉系统是著名的迈克尔逊白光干涉仪的简化系统。通常用激光作为光源，可获得清晰、明亮的干涉条纹，其原理如图1.1所示[1, 2, 3, 4, 5]。

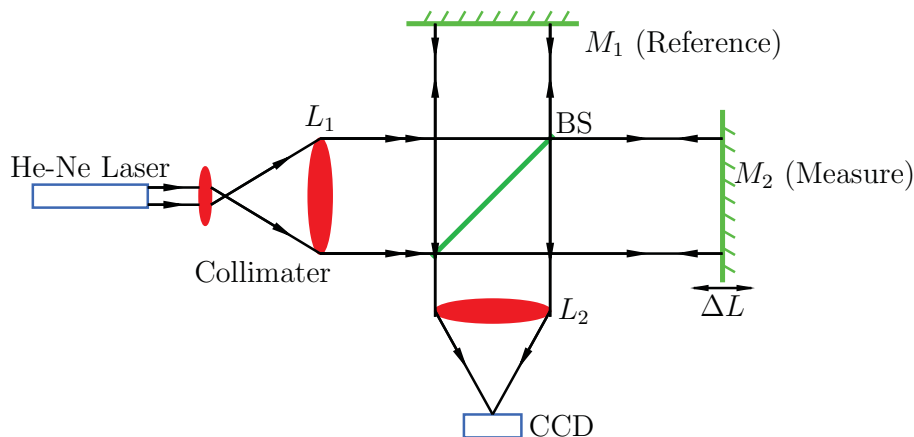


图 1.1: T-G干涉系统原理图。

激光通过扩束准直系统 L_1 （通常为透镜组）提供入射的平面光波（平行光束）。设光轴方向为 z 轴，则此平面波可用下式表示：

$$U = A \exp(ikz) \quad (1.1)$$

式中 A 为平面波的振幅， $k = 2\pi/\lambda$ 为波数， λ 为激光波长。此平面波经半反分束镜BS（Beam splitter）分为二束，一束经参考镜 M_1 ，反射后成为参考光束，其复振幅 U_R 用下式表示

$$U_R = A_R \exp[i\Phi_R(z_R)] \quad (1.2)$$

式中 A_R 参考光束的振幅， $\Phi_R(z_R)$ 为参考光束的位相，它由参考光程 z_R 决定。另一束为透射光，经测量镜 M_2 反射，其复振幅 U_T 用下式表示：

$$U_T = A_T \exp[i\Phi_T(z_T)] \quad (1.3)$$

式中 A_T 为测量光束的振幅， $\Phi_T(z_T)$ 为测量光束的位相，它由测量光程 z_T 决定。此二束光在分束镜BS上相遇，由于激光的相干性，因而产生干涉条纹。干涉条纹的光强 $I(x, y)$ 由下式决定

$$I(x, y) = U \cdot U^* = (U_T + U_R) \cdot (U_T^* + U_R^*) \quad (1.4)$$

式中 $U = U_T + U_r$, 而 U^* , U_R^* , U_T^* 分别为 U , U_R , U_T 的共轭波。当反射镜 M_1 与 M_2 彼此间有一交角 2θ , 并将式(1.2), 和式(1.3)代入方程(1.4); 当 θ 较小, 即 $\sin\theta \sim \theta$ 时, 经简化可求得干涉条纹的光强为:

$$I(x, y) = 2I_0[1 + \cos(2kl\theta)] \quad (1.5)$$

式中 I_0 为激光光强, l 为光程差, $l = Z_R - Z_T$ 。式(1.5)说明干涉条纹由光程差 l 及 θ 来调制。当 θ 为一常数时, 干涉条纹的光强如图1.2所示。当测量在空气中进行, 且干涉臂光程不大, 略去大气的影响, 则

$$l = N \frac{\lambda}{2} \quad (1.6)$$

式中 N 为干涉条纹数。因此, 记录干涉条纹移动数, 已知激光波长, 由方程(1.6)即可测量反射镜的位移量, 或反射镜的轴向变动量 Δl 。干涉条纹的计数, 从图1.1中知道, 定位在BS面上或无穷远上的干涉条纹由成像物镜 L_2 将条纹成在探测器上, 实现测量和计数。有关干涉测量更详细的讨论, 请参考文献[1]。

从上面的分析, 可以得出该方法的测量灵敏度: 当 $N = 1$, 则(以He-Ne激光器为例, 其波长为632.5nm) $\Delta l \approx 0.3\mu\text{m}$ 。如果细分 N (通常, 人眼能够分辨出小于0.3个条纹的移动量, 而程序判断能达到更高的精度), 一般以1/10细分为例, 则干涉测量的最高灵敏度为 $\Delta l = 0.03\mu\text{m}$ 。

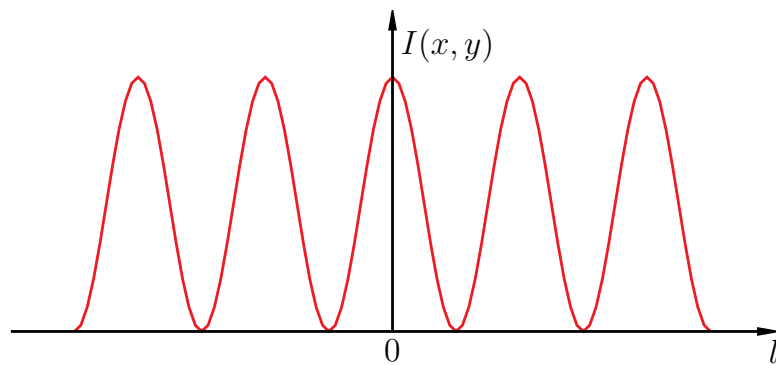


图 1.2: 干涉测量过程中的条纹的分布情况。

2.2 数字干涉测量技术

随着电子技术与计算机技术的迅速发展, 并与传统的干涉检测方法结合, 产生了一种新的位相检测技术—数字干涉测量技术, 这是一种位相的实时检测技术[1, 2, 3]。这种方法不仅能实现干涉条纹的实时提取, 而且可以利用波面数据的存储功能消除干涉仪系统误差, 消除(或降低)大气扰动及随机噪声的影响, 使干涉技术达到 $\lambda/100$ 精度的测量, 这是目前测量精度最高的近代干涉测量方法, 其原理如图 1.3所示。

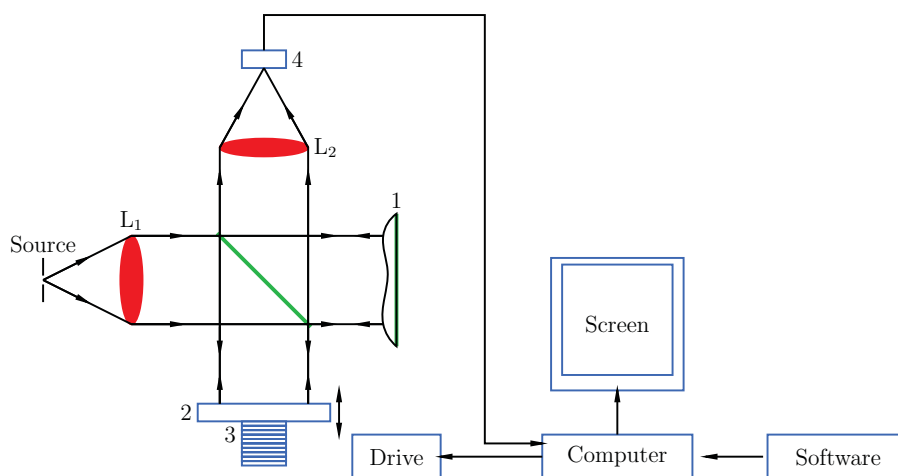


图 1.3: 数字干涉系统结构示意图。

图 1.3中的实验系统仍采用T—G干涉仪, 但参考镜 L_2 由压电陶瓷PZT (Piezoelectric Pottery) 驱动产生位移。此位移的频率与移动量由计算机控制。设参考镜的瞬时位移为 l_i , 被测表面的形貌(面形)

为 $w(x, y)$ ，则参考光路和测试光路可分别用下式表示：

$$U_R = a \exp[i2k(s + l_i)], \quad U_T = b \exp\{i2k[s + w(x, y)]\} \quad (1.7)$$

式中 a, b 为光场振幅常数，参考光与测试光相干产生干涉条纹，其瞬时光强由以上两式可得：

$$I(x, y, l_i) = 1 + r \cos 2k[w(x, y) - l_i] \quad (1.8)$$

式中 $r = 2ab/(a^2 + b^2)$ 是干涉条纹的对比度。方程(1.8)说明，干涉场中任意一点的光强都是 l_i 的余弦函数。由于 l_i 随时间变化，因此式1.8的光强是一个时间周期函数，可用傅里叶级数展开。设 $r = 1$ ，则

$$I(x, y, l_i) = a_0 + a_1 \cos(2kl_i) + b_1 \sin(2kl_i) + \dots \quad (1.9)$$

式中： $a_0 = a^2 + b^2$ ， $a_1 = 2ab \cos 2kw(x, y)$ ， $b_1 = 2ab \sin 2kw(x, y)$ 由三角函数的正交性，可求出傅立叶级数的各个系数，即

$$a_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I(x, y, l_i), \quad a_1 = \frac{2}{n} I(x, y, l_i) \cos(2kl_i), \quad b_1 = \frac{2}{n} I(x, y, l_i) \sin(2kl_i) \quad (1.10)$$

从而求得被测波面，由下式给出：

$$w(x, y) = \frac{1}{2k} \tan^{-1} \frac{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I(x, y, l_i) \sin(2kl_i)}{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n I(x, y, l_i) \cos(2kl_i)} \quad (1.11)$$

式中， $l_i = \frac{\lambda i}{2n}$ ， $i = 1, 2, 3, \dots$ 。为进一步降低噪声，提高测量精度，可用 P 个周期进行驱动扫描，测量数据作累加平均，即

$$w(x, y) = \frac{1}{2k} \text{tg}^{-1} \frac{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n \times p} I(x, y, l_i) \sin(2kl_i)}{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n \times p} I(x, y, l_i) \cos(2kl_i)} \quad (1.12)$$

式(1.12)说明孔径内任意一点的位相可由该点上的 $n \times p$ 个光强的采样值计算出来，因此，可获得整个孔径上的位相。利用该方法，以及计算机自动处理功能，除了能够实现自动检测外，还可以测定被测件的三维形貌。

2.3 三维面形的数字干涉测量及评价

采用上述的数字干涉测量原理（该部分与上面部分完全相同，不同是测量中采用了扫描技术），因而可以实现面形的三维测量。高精度光学零部件的面形精度可用下列二个评价指标，如图 1.4 所示。其中参

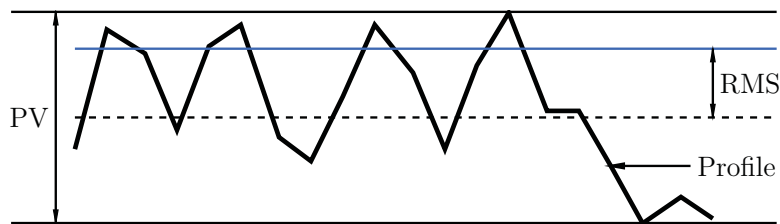


图 1.4: 光学表面精度的评价参数示意图。

数的意义为：

1. PV 值——是表面形貌的最大峰谷值之差。
2. RMS 值——是表面形貌的均方根值，RMS 的定义是：

$$\text{RMS} = \frac{\sqrt{\sum \nu^2}}{N - 1}$$

式中 $\nu = x_i - T$ ， x_i 单次测值， N 重复测定次数， $T = \frac{\sum x_i}{N}$ 为 N 此测量的平均值。

三 实验内容与操作步骤

本实验的几本内容是掌握数字干涉测量的几本原理和操作方法。要求搭建正确的光路，首先用“数条纹”的方法进行普通的光学干涉测量，测量较大的位移。然后进行数字干涉测量，对比两种方法的特点，掌握测量方法，加深对数字干涉测量原理的理解；最后测量并评价光学系统的形貌。

3.1 实验光路

本实验所用光路如图1.5所示。

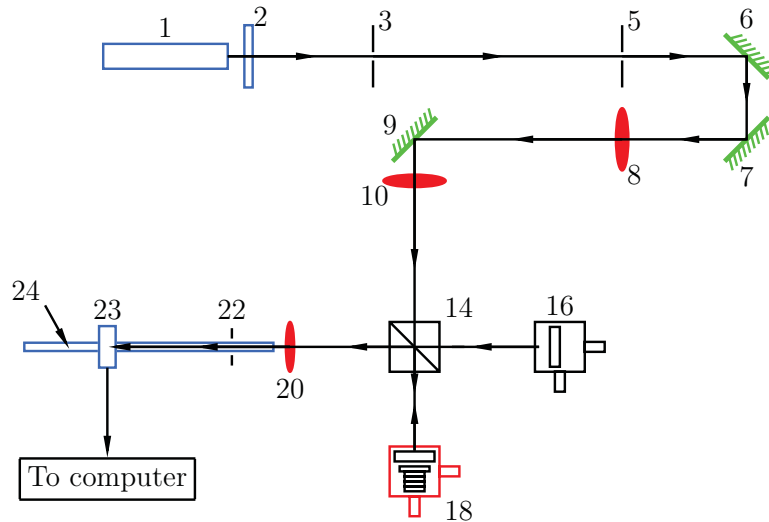


图 1.5: 实验光路

光线传播路径: 激光器1发出的激光经衰减器2（用于调节激光强度）后由两个定向小孔3、5引导，经反射镜6、7后进入扩束准直物镜8、10（即图 1.1中的 L_1 ），由分光镜14（即图 1.1中BS）分成二束光，分别由反射镜16（即图 1.1中的 M_1 ），18（ M_2 ）反射形成干涉条纹，并经成像物镜20（即图 1.1中 L_2 ）将条纹成于CMOS 23（即图 1.1的CCD）上，这样在计算机屏上就可看到干涉条纹。

仪器操作 在进行所有实验之前，本套实验设备都必须进行如下实验步骤：

1. 开机，激光器1迅速起辉，待光强稳定；
2. 打开 PZT 驱动电源开关；
3. 检查CMOS23 上电信号灯亮否；
4. 调整光路时若移开反射镜4，13，扩束激光；移入反射镜4，13，不扩束激光，
5. 然后针对不同实验要求，分别进行其他不同的操作步骤。

3.2 干涉位移测量

这一部分实验内容是普通干涉测量，实验操作步骤参考如下：

1. 首先将扩束系统装入；
2. 在组合工作台16，18上分别装平面反射镜，调节工作台16，18上调平调向测微器，使两路反射光较好重合（在成像物镜20后焦面上，两反射光会聚的焦斑重合）；
3. 打开计算机，然后微调工作台上测微器，在显示屏上看见干涉条纹；
4. 调整CMOS在轨道上的位置，使干涉条纹清晰，锁定23；
5. 调节可调光阑22的孔径位置，滤除分光镜寄生干涉光；
6. 测量程序操作参见软件操作说明书；
7. 将实验结果记录在表1.1中。表格中的驱动位移量系压电陶瓷在电压驱动下的位移量，通常可以由下面的公式近似给出 $\Delta x = c_1 U + c_2 U^2 + c_3 U^3$ ；其中 Δx 为驱动位移量， U 为所加电压，而 $c_{1,2,3}$ 为与具体机构和特性相关的系数。本仪器所使用PZT晶体， $c_1 = 3.657\text{nm/V}$ ， $c_2 = 0.003(\text{nm/V})^2$ ， $c_3 = 0$ 。

表 1.1: 精密位移测量实验结果记录(其中 $\lambda = 632.8\text{nm}$)

序号	驱动位移量(L)	条纹数(N)	测量位移 $N\lambda/2$	相对误差
1				
2				
3				
4				

表 1.2: 三维面形测量实验结果记录

序号	PV	RMS	EM	等高图(凸凹)
1				
2				
3				
4				

3.3 数字干涉测量技术

这一部分为数字干涉测量，基本操作步骤与上一部分类似。但是根据程序的计算方法，要求条纹为竖直分布（此时的计算精度最高）。具体步骤如下：

1. 首先装入扩束系统；
2. 调节工作台18上的测微螺杆并启动压电晶体工作电源，使反射镜产生轴向位移，在计算机上看到条纹平移；
3. 调整CMOS23 在轨道上的位置，使干涉条纹清晰，锁定23；
4. 调节可调光阑22孔径位置，滤除寄生干涉光；
5. 点击“实时采样”，确定采样周期，扫描步数，波面类型，等等一系列参数，得到采集数据；然后点击数据显示，得到计算机自动处理后的结果，具体操作过程见仪器说明书。
6. 改变条纹分布的方向（如前所说，条纹竖直分布时测量结果精度最高），观察结果的变化情况。

3.4 三维面形的数字干涉测量

这部分实验内容紧接上部分的“数字干涉测量技术”，将上述实验结果进行分析，记录其波差，PV值，RMS等特征值；将实验结果记录在表1.2中。

3.5 思考题

完成实验后，请思考如下的问题：

1. 一般干涉测量有那些优点和不足之处，如何改进？
2. 干涉条纹的间隔大小对测量有什么影响？应如何取值？
3. 增加一个周期内的台阶数(n)，增加扫描的周期数(p)，对测量结果有什么影响？分析其利弊关系。
4. 试分析决定数字干涉仪测量准确性的因素和提高测量准确性的主要方法。
5. 光圈数 N ，局部光圈数 ΔN ，EM的物理意义以及与PV，RMS 的大致关系。
6. 测量表面三维形貌有什么意义和作用？为什么说本实验中所用方法可以消除干涉仪自身的系统误差，而普通干涉仪则不可能，只能靠加工水平来保证。