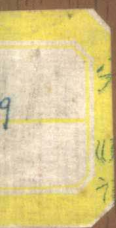


3351
83479

405116

光学精密测量



浙江大学《新技术译丛》编译组

光学精密测量

(译文集)

浙江大学 光仪系激光专业 编译
《新技术译丛》编译组

1973

光学精密测量

浙江大学光仪系激光专业编译
《新技术译丛》编译组

浙江大学《新技术译丛》编译组出版
杭州市新华书店发行
浙江嘉兴印刷厂印刷

定价：0.50元 （只限国内发行）

前 言

随着国防、科学、工业的发展，对于振动、位移、距离、角度、定位的测量精度不断提高。近十年来，激光的出现，由于它具有高度的单色性和方向性，使光干涉方法得到了飞速发展，广泛应用于精密测量中。

遵照毛主席关于“教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合”的方针，结合我校教学、科研和生产的需要，根据“洋为中用”的原则，我们选译出版了这本《光学精密测量》，介绍把激光干涉和光栅原理应用于精密测量的基本方法、结构原理以及有关技术数据等问题。

本译文集可供工厂、科研机关和高等院校中从事光学仪器及精密测量工作的同志们参考。

由于我们思想水平和业务水平不高，在内容选择和译文质量方面都存在不少问题，请读者批评指正。

目 录

1. 测振的激光外差系统..... (1)
2. 标定振动位移的干涉方法..... (16)
3. 测表面位移的干涉仪..... (54)
4. 测表面位移及振动的激光干涉仪..... (64)
5. 工业用激光干涉仪..... (76)
6. 角位移的测量..... (83)
7. 用光学法测量位移的数字化..... (93)
8. 物体定位用干涉仪..... (127)
9. 物体定位用双激光干涉仪..... (132)
10. ГД₁₇ M光测距仪..... (136)

测振的激光外差系统

摘要——本文介绍供测量非正弦振动用的激光外差系统的校准和使用。一频率移动光束与频率未移动但已由反射面的移动而调出的中心光束在光电倍增管内差拍，光电管的输出通过一限幅-鉴频接收器和一积分器，只要频率与振幅乘积在限值范围以内，表面振动便线性再现。曾对13千赫 \times 4700埃乘积试验过直线性及校正技术，获得最小振幅测量值为3.5埃。文中还示有运用二个外差检测器测量时滞或空间相关函数。

引 言

一种激光干涉仪已用来测量振动幅值及表面速率。通常采用光学零差技术，即同频率的二条光线的干涉，典型的干涉仪的条纹图样投射至光电检测器上。当一反射镜以频率 ω_a 作简谐运动时就导致频率为 ω_0 的光的调相，总光强包含已调制和未调制光波的乘积，但检测器反映光强的变化而不是光频的变化。这样，光电检测器输出包含着除光频分量外的全部边带信息(低频)。如不考虑瞬间的恒定相位差，当镜子移动为 $y\cos\omega_a t$ ，则产生的光电流就正比于 $\cos((4\pi y/\lambda)\cos\omega_a t)$ ，其中 λ 是光波波长。

$\cos((4\pi y/\lambda)\cos\omega_a t)$ 的展开是一谐波级数，其振幅是幅角为 $4\pi y/\lambda$ 的贝塞尔函数。Defervari和Andrews已证明，对输出的谐波分量的振幅加以滤波和测量，就可精确确定 y 及振幅。这依靠调整干涉仪的固定平面镜位置，使谐波级数的偶次谐波项或奇次谐波项尽可能最大化。不同谐波下

确定的电压比将导出 J_1/J_2 或 J_1/J_3 值，从后者给出幅角，最后求得振幅值。 $J_1/J_1(\text{最大})$ 之比也属可用，其中 $J_1(\text{最大})$ 点上的幅角 $4\pi y/\lambda$ 相当大，足以使基频 ω_a 输出最大化，这对测定微小振动最为有用。

某些研究人员已用零差技术及其变型测量各种表面的振动，还进行过水下测量。如振动超过 250 埃，零差法测量有一很大缺点，即表面振动必须是 $Ae^{j\omega t}$ 。这项技术未能确定对方形波、瞬时输入或不规则输入的影响，因为由振动的各个频率分量所致的谐波级数诸项的组合妨碍了对各振幅系数的分别测量。如移动小于 250 埃，一般可以假定仅仅某一频率的基本分量是重要的， J_1 贝塞尔函数对一次近似是线性函数。只有在此界限内，零差系统才可用来进行复杂振动图样的频率谱分析。

本文阐明可用光学外差干涉仪产生一高频载波，它将被移动的表面调相。用标准的无线电工程技术检测此调制信号，结果是获得一输出，在振幅和频率很宽范围内与表面移动成线性关系。文中还描述一项精确校正技术以及空间相关函数测量术的实用价值。

1 光学外差系统

试探讨一迈克尔逊干涉仪，其条纹图样入射到光电倍增管狭缝上。令 $E_1 E_2$ 为二干涉光的振幅， $y(t)$ 为一平面反射镜的移动。移动着的反射镜所反射的光等于

$$E_2 e^{j(\omega_0 t + y(t))} \quad (1)$$

另一反射光为

$$E_1 e^{j(\omega_0 t + \theta)} \quad (2)$$

ω_0 为光学频率，角 θ 为二光程中小的相对变化而产生的相位差。光电检测器对光强起反应，这是二条光线复数场强和数中实数部分的平方，从而光强是

$$A_0 = \frac{1}{2} \{ E_1 e^{j(\omega_0 t + \theta)} + E_2 e^{j(\omega_0 t + y(t))} \} \\ \times \{ E_1 e^{-j(\omega_0 t + \theta)} + E_2 e^{-j(\omega_0 t + y(t))} \} \quad (3)$$

为了确定光电流，必须计入光电管检测常数和零差效率。如以 K 代表全部常数乘积，展开(3)式，那末光电流 I_d 是

$$I_d = K(E_1^2 + E_2^2) + KE_1 E_2 \{ e^{j(y(t) - \theta)} \\ + e^{-j(y(t) - \theta)} \} = K(E_1^2 + E_2^2) \\ + 2KE_1 E_2 \cos(y(t) - \theta) \quad (4)$$

假定表面移动可写成 $y(t) = (4\pi y_0 / \lambda) \cos \omega_a t$ ，其中因数 $4\pi / \lambda$ 是把线性峰值位移 y_0 变换成弧度。光波波长为 λ ，于是由光电管出来的交流电流或信号电流为

$$I_s = 2KE_1 E_2 \cos(4\pi y_0 / \lambda \cos \omega_a t - \theta) \quad (5)$$

展开此式导致谐波级数，其振幅系数为幅角 $4\pi y_0 / \lambda$ 的贝塞尔函数。

现在再假定由二条混合在一起的光线中的一条光作 ω_s 频移，那末(3)式变成

$$A_0 = \frac{1}{2} \{ E_1 e^{j(\omega_0 t + \omega_s t + \theta)} + E_2 e^{j(\omega_0 t + y(t))} \} \\ \times \{ E_1 e^{-j(\omega_0 t + \omega_s t + \theta)} + E_2 e^{-j(\omega_0 t + y(t))} \} \quad (6)$$

其结果为

$$\begin{aligned} I_d &= K(E_1^2 + E_2^2) + KE_1E_2e^{j(\omega_s t - y(t) + \theta)} \\ &\quad + KE_1E_2e^{-j(\omega_s t - y(t) + \theta)} \\ &= K(E_1^2 + E_2^2) + 2KE_1E_2\cos(\omega_s t - y(t) + \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

该式的时变部分被认为含载波频率 ω_s 项，由表面移动 $y(t)$ 作相位调制。频率鉴别型相位调制检测器仅对幅角的时间导数瞬时频率 $\hat{\omega}$ 有反应。这样，鉴频器会有一与瞬时频率相关的输出电压

$$e(t) = (\hat{\omega} - \omega_s) = -dy(t)/dt + d\theta/dt \quad (8)$$

鉴频器输出当然应积分以便求出 $y(t)$ 。

必须指出关于该结果十分重要的三点：1)干涉仪中如果二条光线经过的光程不相等，便产生相移 θ 。在外差系统中，当光程不同但是恒定，那末 $d\theta/dt = 0$ ，也没有什么效应产生。这点在讨论实际外差系统时将有仔细研究。2)对 $y(t)$ 没有规定什么限制，因而在理论上可对任意移动进行检测分析。事实上，通常对接收检测器的灵敏度和频带宽度的限制构成了限制因素。3)无论两混合光线中哪一条光线频率移，结果均相同，这在校正实用系统中很重要。

激光频率中要求的高频频率移动在此情况下是由一超声衍射箱(或盒)产生的。泰勒已用实验证明，一阶衍射图样(Raman Nath判据)中有足够光强，即使在中等声功率下也能实现宽频范围光学外差。如若狭的激光光束通过频率为 ω_s 的声波，在非衍射光的两侧将分别有频率 $\omega_0 + \omega_s$ 和 $\omega_0 -$

ω_s 的一阶衍射光谱。衍射图样中的光强取决于入射光光强和声强。

Cummins 和 Knable 表明，采用一振动镜时，衍射和频移光的外差会产生一高频载波和适当的调制边带图样。他们采用30兆赫声波并调制到布来格衍射，后者引起一单衍射旁瓣。Massey 也曾采用15兆赫布来格衍射，并把限幅-鉴频接收器同跟踪接收器在低光度高振幅条件下作性能比较。迄今没有发表过可用的数据表明无线电检测器输出与振动成线性关系，能预料具有怎样的性能范围或能够校正以确定绝对振幅。

希望电子系统尽量简单实用，故在这里选择“正规”衍射。选用了11兆赫超声波频率，故能运用偏栅接收电子设备。水箱2呎见方，16吋长；一石英晶体（X向切割）装在水箱的一端，旁有一小窗允许激光通过；水箱另一端是泡沫橡皮界面，阻止驻波的产生。

最初，采用的是十分类似标准干涉仪的基本光学装置，附加了一个衍射箱（图1）。衍射图样的一条边光在其进入分光器前就转向了；未偏移的光（频率 ω_0 ）撞击靶面，反射回来再同衍射光混合，然后二条光均射向光电倍增管。光电倍增管的输出受到三个阶段的高频放大，而后进入一限幅-鉴频检测器。检测输出经积分、放大，进入测量仪器或显示仪器。

首先，仪器（电子设备除外）安置在封闭式防震平台上，以便降低建筑物振动和气流引起的背景噪音。如（8）式所示，二外差波的恒定光程差对测量结果不起影响，所以在嗣后的试验中，靶面从平台移开，离分光器12呎。建筑物振动及周围气流引起的靶面和仪器间任何相对移动使得（8）

式中 $d\theta/dt$ 不等于零，结果是背景噪音增加，灵敏度有损失（见下述）。

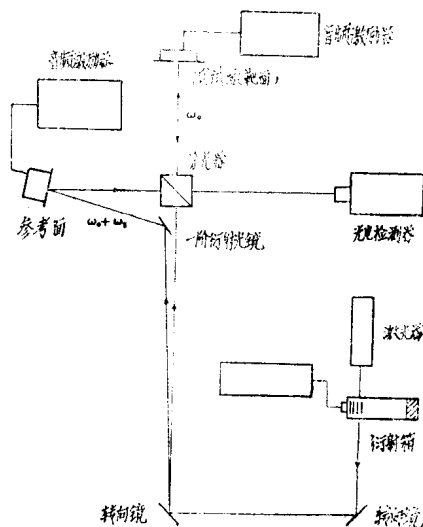


图1 光学装置和测试面安置简图。在嗣后的测试中，测试面移离防震平台，激光光束的外光程保证了与衍射光相互隔开

2 调整及校正

图1 光学装置是笔直排列的。随着超声波激励及激光几乎垂直地入射声波平面，衍射箱略为转动，直到出现一阶衍射图样及左右对称为止。一阶衍射光镜尽量靠近分光器，使光线近乎法线地射向参考面。如靶面高度反射并保证几乎是镜面定向反射，则测量光束和频移光束在抵达光电检测器时仍属准直良好，为了使它们在光电阴极上的光斑重叠，就必须是精确共线的。光电倍增管前放一可调光阑，这不是非装

不可，但有利于阻碍杂散光及限制总光量以免光电管直流电流超过规定，这里用的是 RCA-7265 光电倍增管。

系统作上述调整后，光电倍增管输出可在频谱分析仪上看到。将出现 11 兆赫载波，且要精密调整二条光线的位置使其值达最大。当瞬时遮断测量光束 ω_0 时，高频载波就会消失；如不消失，那么说明载波早就存在。假设把超声激励放大器和衍射箱完全屏蔽以防止高频载波直接射向光电管，则最有可能产生假的载波的因素是进入光电检测器的频率为 ω_0 的杂散光，这大概由于衍射箱散射、脏污的光学零件或不恰当的光学装置所致。必须防止这类情况，因为不需要的载波将破坏线性检测所需的信号。

另一种临界调整是为了在宽频和宽幅范围合理地工作，高频载波必须精确地响应鉴频器特性曲线（或 S 曲线）的零点。最实用的方法看来是调整鉴频器直到特性曲线对称，并对准在 11 兆赫左右或某个接近衍射箱晶体的谐振频率上。随后微调超声波激励器频率，使鉴频器上的（直流）输出为零，这样便达到了所要求的频率匹配。

外差系统的校正如下。图 1 中注明为参考面的镜面必须作正弦振动，其振幅为已知的，应是某个适当频率下激励输入电压或电流的函数。光学电子装置如上述那样布置，参考面处于正弦运动中。外差接收器放大输出当作参考镜面的激励函数加以测定，直线区域的斜率乃是输出电压与激励电压之比 V_0/V_d 。因参考面振动的振幅是已知的，就可表示成另一个常数比：埃/ V_d 。将此式除以前式，则得埃/伏，电压为检测器输出电压。于是只要高频功率不是因激光光强变化而根本变化，这比式便是系统的一个常数，激光光强变化则由于反射面或光学重新调整的变化。这样，被测反射镜就

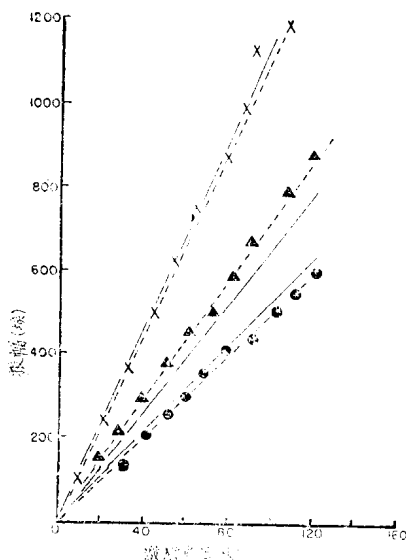


图2 零差技术与外差校正技术测量振幅的比较

零差测量: ●—●— 9千赫; ▲—▲— 4.3千赫; ×—×— 1千赫; 平滑直线表示外差测量的结果, 测量均在2号靶面上进行

可作任意方式的振动, 且在任何频率下的振动度(以埃表示)将是输出电压同校正常数(埃/伏)的乘积。为了检验外差校正系统的精确度, 均采用零差测量法, 求出贝塞尔函数比 J_1/J_1 (最大)、 J_1/J_2 和 J_1/J_3 对参考面所作的一切必要测量及对靶面单独测量。若振动度超过3000埃, 就用零点法。

这种校正技术有一缺点, 即必须保持光学对准, 故校正常数是在光强和其未知值得测量的外差效率条件下确定的。即使在靶面上由一点移至另一点, 校正并不明显变化, 如果调节正弦波激励参考面使系统有最大输出的话。但如靶面的反射率逐点变化很大, 则对镜面每一点均须作校正检验。正

因参考面的特性曲线通常是清楚了解的，故每次只须进行几次测量以保证外差系统的线性和确定一新的校正率。

3 实验结果

曾对四个不同靶面进行测量以检测校正技术。靶面 1 和 2 乃是胶合在压电圆柱传感器上玻璃反射镜的前置镜面；靶面 3 为边缘固定的薄钢片，由压电晶片激励；而靶面 4 是多层传感器，贴有一小反射镜。每次测量时，借助参考面（图 1）的校正常数来确定靶面的正弦振动振幅（埃）。以激励电压函数表示的振幅跟同频率同位置下零差测量所确定的数据作比较，典型结果见图 2。给四块不同靶面总共做了卅次试验，没有一次表明二种方法确定的振幅-激励电压特性曲线斜率（埃/伏）相差超过 10% 的，所有测量平均相差小于 5%。

用外差接收器检测的最小信号或最小振动乃是接收器带宽（噪音）和入射光功率的函数。当检测器信噪比为 1，则最小位移的一般式为

$$(y_0)_{\text{最小}} = (\lambda/2\pi)(h\nu B/\eta P_s)^{1/2} \quad (9)$$

式中 B 是接收器带宽， P_s 是入射至检测器上的光功率， η 是光电检测器的量子效率。若接收器带宽为 200 赫，则 $(y_0)_{\text{最小}} = 2.5$ 埃，实验确定的最小可检振幅为 3.25 埃。

已经指出，对于小的振动，在此范围内只有 $J_1(4\pi y_0/\lambda)$ 是重要的并可被看成是线性的，那末即使表面有瞬时运动或不规则运动，零差技术也会给出精确的结果。既然光电检测器输出的再次宽频带放大将是需要的，各种来源的背景噪音就将决定最低的检测能力。不管外差还是零差法都将估计

到，在许多场合下，难于甚至不可能保证高度的防震或者在完全静止的空气或水中操作，因此便需要某种信号处理来提高最低检测能力。如测量大小振动混合在一起的情况，由于零差检测中大分量谐波将在宽频带范围内遮盖小分量谐波，故外差系统成为唯一可采纳的了。例如存在 300 埃、1 千赫的振动，采用零差法就无法精确测量 2 千赫、50 埃的振动分量，因为 1 千赫的 J_2 项会附加到 2 千赫振动的基项中去。

外差系统的最大振幅受到限制，最大振幅由接收器带宽和鉴频器 S 曲线检测之，令 V_s 表示 (7) 式高频项的振幅，调相系数为 $m_p = 4\pi y_0 / \lambda$ ，式中 y_0 为振幅。鉴频器的输入电压为

$$e_i(t) = V_s \cos\{2\pi f_s t - (4\pi y_0 / \lambda) \cos 2\pi f_a t\} \quad (10)$$

如前规定那样，鉴频器对瞬时频率 \hat{f} 响应， \hat{f} 是高频正弦幅角的导数。于是鉴频器的输出电压为

$$e_o(t) = K_D (\hat{f} - f_s) = K_D f_a (4\pi y_0 / \lambda) \sin 2\pi f_a t \quad (11)$$

式中 K_D 为检测常数。在一调频广播机内，最大频率偏差是固定的，而这里仅由信号振幅确定。(10) 式展开式乃是角度调制的普通方程，每一边频有一振幅系数 $J_n(m_p)$ 。必须有足够的边带通过接收检测器，以使 $e_o(t)$ 精确复制起始的调制信号。无线电工程上，可接受的标准是所需最高阶项为 $J_n(m_p) \geq 0.01$ 。

为了试验大振幅下的性能，接收器频带要宽，同时鉴频器频带也加宽，且鉴频器特性曲线略为平直。这导致一低灵敏度系统，但检测曲线的线性达 ± 140 千赫偏差。现在就很容易计算能进行线性检测的最大振幅了。例如 10 千赫时，

$J_{1,4}$ 是接收器通带的最后边带。从贝塞尔函数表取 m_p 值， $J_{1,4}$ 恰好等于0.01，且因 $m_p = 4\pi y_0/\lambda$ ，则 y_0 (最大)就可确定了。

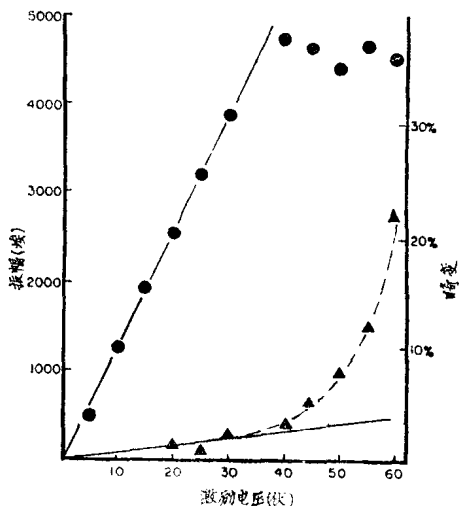


图3 外差检测系统的最大线性测试结果

●--●——外差法测得的振幅值；▲--▲——输出的二次谐波畸变(直线表示激励放大器内的畸变)。此频率(13千赫)下线性检测器最大振幅近于4000埃

运用靶面4有可能在几种频率下超出检频器线性界限。图3表示13千赫的典型结果，零差数据和外差数据作了比较，还绘有外差检测器输出的二次谐波百分率。底部直线以下的面积表示音频激励器中早已存在的靶面二次谐波畸变。预计界限达到后，外差输出马上偏离线性。尽管如此，二次谐波在此点上早就迅速增大，这说明波阵面畸变发生在振幅数据变成完全错误之前，而且仔细分析一周周期性振动时应大致规定某个安全区域。显然，在低频时允许有较大的振幅。

4 用于非周期性振动

虽然外差系统响应是用周期性波形测试的，但最重要的试验包括非周期性振动，这属于瞬时运动和不规则运动的范畴，测量系统乃是干涉测量振动最有用的发展。

一根4吋直径钢管，一端装一小扬声器，管壁上开三个孔，第一孔离扬声器6—8吋，孔间隔3吋。把嵌在塑料环上的铝箔隔膜装进孔内，它们响应管内压力振动，并由激光系统检测这些振动。选择这种测试方法有三种理由：1)能够导出有关风道中或水道中干扰惹起管壁运动的空间或时滞相关关系的最近似分析(二者均不是有用的)；2)虽然反射率高，但箔窗是不平的，它使激光散射得很开，以致只有很弱的测量光束回到光电倍增管上，这样就能在很低的光度下检测系统；3)对于充气管内噪音非扩散传播来说，相关函数是可预测的。

自相关和物理学上可实现的单边能谱密度 $G_x(f)$ 构成一傅里叶变换对

$$R_{xx}(\tau) = \int_0^{\infty} G_x(f) \cos(2\pi f\tau) df \quad (12)$$

如噪音是理想带限并在整个频带上是恒定的，则自相关具有 $\sin Z/Z$ 函数形式。当滤带两边并非陡峭，指数余弦式给出

$$R_{xx}(\tau) = e^{-b|\tau|} \cos 2\pi f_0 \tau \quad (13)$$

希望能观察到这种形式，以及全部实验结果证实这一选择。