

激光测振

(译文集)

浙江大学激光仪器专业

1975·10·



一. 几种激光测振方法简介

摘要

用激光技术检查和测量宇宙飞船模型在振动台上的振动研究进行了四个月，现已告一段落。测量的振幅范围小于半时峰间值，频率在 $10 \sim 2000$ 赫之间。研究过八种不同的系统，其中三种是微波副载波激光调幅系统，用解调后的副载波信号的相移来检测反射表面振动。另两种是相干光检测系统，检测光载波的相移。还研究了干涉测绘技术，它在某些方面和全息摄影类似。一般看来，相干检测系统用于测量低于一个微米或更小的峰值振幅，甚至用于漫射表面却是很有效的。微波系统灵敏度最差。干涉测绘系统可以给出表面摆动或法线位移梯度的直观显示，这样就可提供有价值的最大和最小位移图形。这些系统大部分都经过试验，其结果与所分析的情况相当符合。本报告对每种方法进行了详细描述，对不同系统的相对性能进行了比较，并推荐了对未来最切实可行的研制技术。

引言

研究的目的是为了寻求用激光检测特性和测量机械振动的方方法，虽然上述提到的检测技术也用于其他方面，如传感器校准和精密位移测量，而这里被研究的专门用于测量宇宙飞船模型在振动台上的振动位移。

根据系统分析的目的，把检测和测量问题规定为下述几方面：

1. 振动物体可能有形状不规则的广扩表面。光学上，表面分为单向反射和漫反射，其中漫反射是主要的，因为大多数表面属于漫反射。运动表面的峰间值偏移可大到半时，而最小偏移可任意小。不过，室内振动和冷热气流通光路时可对频率低于 100 赫振幅仅几个微米的振动测量产生时延干扰，这就是说振幅的下限约为一个微米。除测量表面位移外，还希望对表面进行扫描找出若干个最大偏移点。

2. 振动的频率范围是 10 赫到 2000 赫。因为宇宙飞船模型是在振动台上激动的，所以大部分振动测量都在表面进行，并且表面按已知频率的正弦波运动。又因大型机械结构的共振频率很低

所以最大偏移可能发生在最低的一些频率上。

3. 所用激光系统要尽量小而轻便。激光头或光学检测头最好避免使用精细与冷却系统。通常这套系统离振动表面很近，有效范围从几寸到几呎。事实上，作为一种测量工具，对系统的主要要求是工作可靠，稳定和无需经常维修。这些要求实际上排除了使用除氦氖激光头之外的所有连续波激光头的可能性。出于对检测头和调制的考虑，同时操作要简便，在使用可见光谱而不用红外光谱。做为比较讨论的基础，我们取波长为6328埃，选出了两个有代表性的功率输出。在希望单频工作的相干检测系统中，功率取为0.1毫瓦。其他系统，功率可取为3毫瓦，实际在不足两呎长的民用元件中已达到了这个要求。以下各节中的数字讨论都基于漫反射表面的最坏状态，漫反射表面距光接收头3呎远，接收头光圈直径为3吋。

以下各节将对各系统进行描述。在各系统的讨论中，包括灵敏度讨论，主要部件介绍及试验测量的结果。还包括表明需要哪些部件的各系统简图。最后一节对各种技术性能进行了简单地比较，并选出了对将来有研制价值的一些系统。

检测技术

为了测量可移动的反射头的运动分量，这里研究几种用频率相干、空间相干或调制激光强度的方法。这些研究的有效应用，主要有测量垂直于表面的偏移分量和角偏转或者测量表面中围绕某轴的分量摆动。对这两种运动形式的检测方法进行了分析研究。

通常，运动表面的检测是通过观察对光载波进行幅值调制的高频副载波的相位和频率的效应，或观察反射光载波本身的相位和频率变化实施的。此外，表面有反射光流的作用，它改变着光相对于接收头在空间的方向，直射反射光的投射角随目标的位置而变化，並可以被检测。所有研究的振动测量技术都适用于上述一般分类。

用副载波方法时，振动产生的相移正比于振动振幅和副载波长之比。很明显，希望尽可能应用高频副载波或调制频率这样可以实现高效率的调制和检测。用最佳工艺状态下的调制头和检测头，其频率可能接近微波范围的S波段。因此，副载波技术属于

微波系統。

用无載波時，仅一个光电檢測口是不能檢測出在在用中产生如此小的频率变化。需要采用某种光学干涉方法把反射信号的光学相位变化转换为强度变化（即干涉条纹），这种强度变化可由光电檢測口檢測。由激光透镜分出的参考光束可与信号光束在接收口光学系统中汇聚而产生干涉。在此系統中，参考光束常称为“本机振荡光束”，該技术术语来源于射頻接收口。用参考光束解調就是众所周知的相干檢測法。如果参考光束或本机振荡口光束的频率和传递信号的光束频率一致，此系統就是相干光学相位檢測系統或称为“零差系統”。若参考光束频率与传递信号光束波長之間有頻移，平方律光电檢測口就在两光束中间的差頻或中頻产生电差拍。此系統称为“外差”檢測口或相干光学中頻檢測系統。显然，相干相位檢測或零差檢測是外差檢測在中頻为零的特殊情况。

如果光学零差法中的光电檢測口用有足够分辨力的较大型相底片代替，並去掉接收口的光学系統，若曝光时反射面近乎不动，这样由反射光和参考光产生的干涉条纹就可以记录下来。这种照相记录称为全息摄影，同时用显影的负片可重现表面的三维影像。並強調指出，全息摄影必须用参考光束。如表面为漫反射口，没有参考光束也会产生干涉。这种自身干涉产生有名的“閃光干涉”，它在漫反射激光中始终出现。这些干涉在激光仅仅与表面位置有关。这些条纹是干涉位移測量技术的基础。

微波調載波系統

这里分析三种不同的微波調載系統。每种方法都用光—电調幅口，按微波速率改变传递的激光强度。在实际裝置中，只有光强的某一部分M受到調制。这些强度变化表示在光載波口上有調載波色譜，並可由光电檢測口檢測。这种光电檢測口应具有足夠的高頻性能来感应調載波频率的强度变化。当調制光束被运动表面反射时，調載波色譜相位按下式随时间变化：

$$\Phi(t) = \frac{4\pi X_0}{\lambda_m} \cdot \sin \omega_r t$$

式中 X_0 是零—峯值間的振動幅度， ω 是振動頻率， λ_m 是微

波副载波波长。假设副载波频率为34兆周/秒， λ_m 为10厘米，这时，较小振动的峰值相位偏差远小于一个弧度。表面振荡状态的信息在反射光中以相位随时间改变而后产生的副载波边带形式表现出来。对较小的频值相位偏差，电阻性头保着确定给定系统的最大灵敏度，只有前两个边带是有意义的（严格的表达式给定一组具有贝塞尔（Bessel）函数幅度的无限多边带，其中大多数项可以忽略不计）。在这种情况下，可由下式近似地给出反射光强的频谱

$$P = \frac{P_0}{2} \quad (\text{无调制光})$$

$$+ \frac{MP_0}{2} \cdot \sin \omega_m t \quad (\text{副载波频率})$$

$$+ \left. \begin{aligned} & \frac{MP_0}{\lambda_m} \cdot \frac{\pi X_0}{\lambda_m} \cdot \sin(\omega_r + \omega_m) \cdot t \\ & - \frac{MP_0}{2} \cdot \frac{\pi X_0}{\lambda_m} \cdot \sin(\omega_m - \omega_r) \cdot t \end{aligned} \right\} \quad (\text{边带})$$

式中 ω_m 是微波信号， M 是入射光的调制指数， P_0 是反射功率。必要的接收口的带宽正是所测振动频率的最大范围。因此，任何可应用的微波系统必须能从接收口越过要求带宽的噪音中检测出边带的振幅。应当说明，上述表达式只是对光功率的；电路中调制功率的各光谱分量与上述等式中每项的平方成正比。这点很重要，因为信噪比通常用直接测量的电子量表示。

由光电检测口供给接收放大口第一级的电噪音，率可表示为

(原译文遗漏公式)

式中 F = 前端噪音数值
 K = 玻耳兹曼 (Boltzman) 常数
 T = 绝对温度
 B = 接收口带宽
 e = 电子电荷量
 I_0 = 全功率的平均光电流
 η = 电流放大倍数，经检测口为任意值

R_{eq} = 等效检测口输出阻抗。

上式第一项是免不了的，但第二项，或称散粒效应噪声分量，取决于光电检测口暗电流和光信号感生的光电流。在光放大作用的检测口中，比如半导体二极管，在低亮度级时，主要是热噪声。对高亮度级或对有明显放大作用的元件，散粒效应噪声较大。通常检测口的质量由它的噪声等效功率 (NEP) 来决定。这就是在给定的检测口和带宽内可以检测的最小输入光信号。

光电检测口的另一个重要特性是对光学信号的响应。光电检测口是平方律元件，也就是说，光电流 I 和输入光功率 P 成线性关系：

$$I = SP = \frac{ne}{h\nu} \cdot P$$

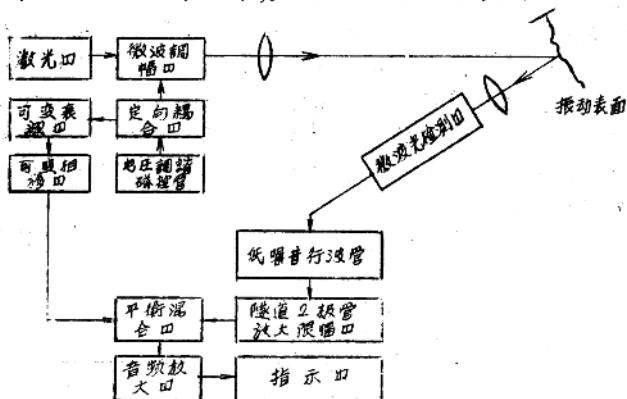
式中 S 是检测口的灵敏度，安培/瓦， n 是量子效率， h 是普朗克 (Planck) 常数， ν 是光波频率，检测口输出的电信号功率为

$$P_s = \frac{1}{2} i_s^2 (n^2 R_{eq})$$

式中 i_s 是由入射的光输入信号功率感生的峰值光电流。

由上述关系，就可很容易地对不同系统的性能做出评价。

直接相位检测系统——这种方法是简单的微波技术，并在做此项计划时，早已做过实物实验，图 1 是这套系统的简图。副载波在反射后由检测口接收再现，检测口可用光电管或固态二极管。



图一 微波直接相位检测系统

管。用二极管，缺点是放大作用，且有效输出阻抗最好也不过几百欧姆。但，固态量子效率可接近于1。为了进行比较，Sylvania公司的行波光电信管在大电流时 ($n^2 R_{eq}$) 为 6×10^9 欧姆，光电管阴极的量子效率约为 10^{-3} 。因为表征管子的价值参数是 $n^2(n^2 R_{eq})$ 所以上述管子比最佳四二二极管还好。在目前使用的S-1型的基础上，还可能再生产出各种光电管阴极，性能将不断改进。本研究工作中所采用的管子是根据计算和部分试验确定的。

低噪声行波放大器和隧道二极管限幅器用于抑制由于表面波动、激光强度波动和其他效应在接收信号中引起的低频幅值波动。平衡混合器进一步抑制两微波输入信号的振幅调制。

选用电压调谐磁控管作光调制器的微波激励源。调制器功率要求在1到2瓦等幅波之间。它可用伺服控制系统调节。这个部分在图1中没有画出。预调时，调制器共振频率允许有20兆周/秒的漂移。该伺服系统在调制空腔中或附近有一个传感器，对空腔场中的相位和振幅取样。这个信号经过窄带电子设备，得到使振荡器跟踪空腔谐振所需要的调谐电压。这次研究中没搞搞这套系统。但如发生由于手动跟踪不理想时，就必须搞一套伺服机构。

定向耦合器、衰减器和可变相移器为平衡混合器提供参考信号，即本机振荡信号，以便使检测器相位有正确光相位和幅度。混合器要求本机振荡器的功率约为10毫瓦。试验发现，在测量振幅不变的振荡表面时，用最大限度地输出音频信号能简单地实现相位调节。

将微波信号直接混合成音频差，能使混合器噪声降低约10分贝。这样做并不影响本系统性能。因为显著的热放大和动态范围压缩是在混合器之前进行的。光检测器中并没有太大的（散粒效应）噪声，微波噪声是由前边的行波放大器引起的。如下面所述，微波元件实质上是被看作理想的接收器。同时本系统的限制仅局限于光学方面。

由上述对波带的分析，及检测器输出信号和噪声的表达式，检测器的信噪比是：

$$\frac{S}{N} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{ne}{h\nu} \right)^2 \left(\frac{\pi \rho P_0 R_r X_0}{\lambda_m} \right) (n R_{eq})}{F k T B + 2 e B \cdot \frac{ne}{h\nu} \cdot \frac{\rho P_0 R_r}{2} (n^2 R_{eq})}$$

式中, P_0 是激光输出功率, ρ 是表面反射系数, K_r 是反射到接收口的传递光的几何分量, 对单向反射表面 K_r 可能等于 1, 但对漫反射表面 K_r 为:

$$K_r = \frac{d^2 \cos \theta}{4D^2}$$

式中, d 为接收口直径, D 是接收口到表面的距离, θ 是接收口和表面法线之间的夹角 (通常 $\cos \theta$ 近于 1)。

设 $S/N=1$, 求得最小可测振动幅度 X_0 为:

$$X_{0(\min)} = \frac{[2FKTB + 2eB \frac{ne}{h\nu} (\rho P_0 K_r) (n^2 R_{eq})]^{\frac{1}{2}}}{\frac{ne}{h\nu} \cdot \frac{\pi \rho P_0 K_r}{\lambda_m} (n^2 R_{eq})^{\frac{1}{2}}}$$

如果选取下面给出光参量的典型数值, 可获得用数字表示光灵敏度。

令:

$$P_0 = 3 \text{ 毫瓦}$$

$$M = 0.1$$

$$B = 10^4 \text{ 赫}$$

$$KT = 4.1 \times 10^{-21} \text{ 焦耳}$$

$$F = 3$$

$$\lambda_m = 10 \text{ 厘米}$$

$$n = 6 \times 10^{-4} \text{ 电子/光子}$$

$$e/h\nu = 0.5 \text{ 库仑/焦耳 (波长} = 6328 \text{ \AA)}$$

$$K_r = 1.7 \times 10^{-3} \text{ (漫反射表面)}$$

$$\rho = 0.1$$

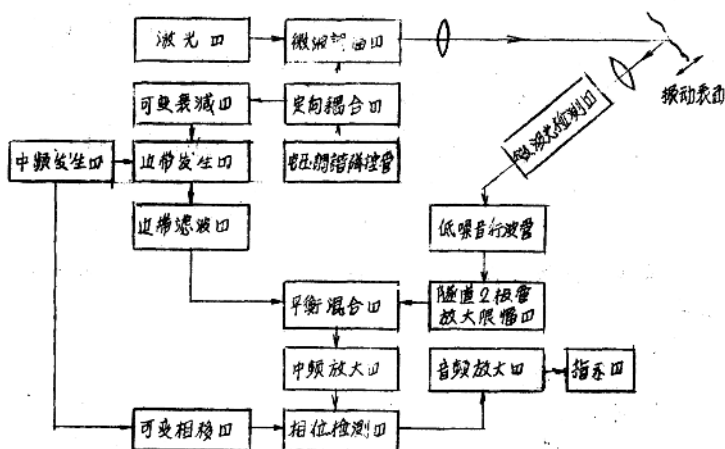
$$n^2 R_{eq} = 10^9 \text{ 欧姆}$$

按上述数据, 微波直接相位检测系统最小可测振动振幅 $X_{0(\min)}$ 为 1.8 毫米。这么大的移动用肉眼就可以很轻易地看到, 这样, 该系统就不可能以这种带宽来测量漫反射表面的移动。

该试验用光实验件不同于分析模型之处仅仅在于其表面是镀锌的镜面。用 $B=10^4$ 赫的频谱分析接收口, 测出载波信噪比约为 30 分贝。使用混合口和几个音频级, 并对微波相位做适当调整, 则 1 毫米的振动可用调谐电压表测出, 並可在监听耳机中听到。

实验中发现, 限幅器已将由表面摆动而产生的较大的假调制信号消除。简言之, 这套系统对单面反射表面已达到预期效果, 其灵敏度达千分之几时或更低。

中频检测系统——在它是这种检测技术的简称。这个系统的接收机和前面谈到的一种不同，供给微波混合机的本机振荡信号



看 2 微波中頻檢測系統

有 近于 160 兆周/秒 的 頻 移， 为 此 要 用 中 頻 发 生 器 和 边 带 滤 波 器。 当 信 号 输 入 时， 混 合 器 在 近 于 160 兆 周 处 产 生 拍 频。 第 二 混 合 器， 即 相 位 检 测 器， 用 于 解 调 因 表 面 波 对 中 频 产 生 的 相 位 调 制。 这 种 混 合 直 到 音 频 放 大 器 是 分 两 步 进 行 的。 这 就 改 进 了 混 合 器 噪 音 特 性。 又 因 限 制 在 中 频 放 大 器 部 分， 就 可 以 使 光 电 管 输 出 直 接 供 给 第 一 混 合 器。 如 前 节 所 指 出 的， 混 合 器 噪 音 总 是 忽 略 不 计 的， 因 此， 在 该 技 术 中 以 加 复 杂 性 就 没 有 必 要 了。

灵敏度与上节所分析的直接渡波相位检测系统相同。

双调制系统——上述系统性能的主要限制是微波光电管的量子效率太低。为避免上述问题，分析并试验了另一种方法，如图3所示。这里相位调制不用高频检测口，通过微波光调制口对反射折回的光进行微波频率的调制。半透明镜成分解后继续反 $1/4$

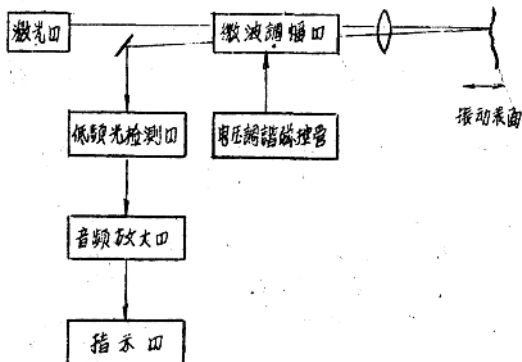


图 3 微波双调制系统

波片可使光在同一光学系统中透射和吸收。这时，重调信号将出现音频的强度变化，它随振动产生的副载波相移的变化而变化。在这些频率中，实际上低噪声光电管和二极管都可以应用。

附加一个外部可调光路，使第二次调制与第一次产生 90° 相移，被检测的光功率如下式：

$$P = P_r \left[1 + M^2 \frac{2\pi X_0}{\lambda_m} \cdot \sin \omega t \right]$$

式中， P_r 是返回光检测器的平均功率。在这些频率范围内，检测器噪声由 NEP 确定，对硅二极管可为 10^{-9} 瓦，对优质的 (S-20) 光电倍增管为 10^{-11} 瓦。在信噪比公式中，以 NEP 代替热噪声，可得：

$$\frac{S}{N} = \frac{\left[2\pi M \cdot \frac{X_0}{\lambda_m} X_r \rho P_r S \right]^{\frac{1}{2}}}{4e K_r P_r S B + 2(NEP)^2 S^2}$$

式中 S 为检测器的灵敏度，安培/瓦。

求出 X_0 的最小值：

$$X_{0(\min)} = \frac{\lambda_m [4e K_r P_r S B + 2(NEP)^2 S^2]}{2\pi M K_r \rho P_r S}$$

取 $S = 0.025$ 安培/瓦的光电管和 0.25 安培/瓦的二极管，计算表

明，光电管是受散粒效应噪声限制的，取与其他微波系统相同的参考值， $\lambda_0(\text{min}) = 0.11$ 厘米。对于二极管，NEP 项是主要的，最小可测量位移约为 $1/2$ 厘米。这比其他副载波系统预期的灵敏度要好些。

该检测系统用 15 千兆周和 9.4 千兆周两种频率在实验室里做了多次实验。使用这两组频率是因为在 L 波段可应用的调制指数比在 S 波段约大 50%。这些实验暴露了该系统的一个重要缺陷，在分析结果时已预感到了。由于表面摆动引起较大的假幅度波动，它不能检测出副载波的相移。就是把振动物镜放在透镜焦点上

即使几何光学原理减小角灵敏度也同样检测不出副载波光相移。这有两个主要原因，在上面给出的关于副载波解调光功率的表达式中，因为 M^2 只近于 10^{-3} ，入射检测口中的光的调制部分显然是全部能量非常小的部分。这样，由于激光噪声或反射光偏转而产生的大幅度变化将压倒有效信号。另一个原因是，副载波音频解调是用光学方法进行的，在检测前消除大幅度变化也是不可能的，因此，该系统能否达到理论上的性能极限也是值得怀疑的，即使调整调制口，使 M 几乎近于 1 也不行。如果这个问题部分地解决，那么双调系统将具有不要求带微波元件的优点，并可广泛地使用光学检测口。

相干光学检测方法

由振动引起的光学载波的相移可用干涉方法解调，这时需将信号光束和做为相位参考的本机振荡光束混合起来。当两光束合成一束线射入光检测口，则输出电流和总入射电场平方成正比。这个电流可写成：

$$i(t) = I_{L0} + I_{Sig} + 2\sqrt{I_{L0} I_{Sig}} \cdot \cos(\omega_{L0}t - \omega_{Sig}t + \phi_0 - \phi_{Sig})$$

式中 I_{L0} 是由本机振荡光束电场产生的直流电流， I_{Sig} 是由信号光束产生的直流电流， ω_{L0} 和 ϕ_0 是本机振荡波的频率和相位， ω_{Sig} 和 ϕ_{Sig} 是信号波的频率和相位。显然，前两项表示平均电流，它仅有助于研究有关频率范围内的散粒效应噪声。余弦项的有效值 (rms) 为 $\sqrt{2I_{L0} I_{Sig}}$ ，是拍频输出并表示外差信号或差信号。通常本机振荡电流大于信号电流，这样，本机振荡电流所产生的散粒效应噪声成为接收口的主要噪声，随本机振荡电流以大

拍频和散粒效应噪音电流 $\sqrt{2eI_{L0}B}$ 也同时以 $\sqrt{B}$ 增大。这样，对较大的本机振荡电流 I_{L0} 可写成：

$$\frac{S}{N} = \frac{2I_{L0} I_{Sig}}{2eI_{L0}B} = \frac{I_{Sig}}{eB}$$

这表示理想接收机性能。 I_{Sig} 和光学信号输入功率 P_{Sig} 的关系为：

$$I_{Sig} = \eta \frac{e}{h\nu} P_{Sig}$$

或者为

$$\frac{S}{N} = \eta \frac{P_{Sig}}{h\nu B}$$

令 $S/N = 1$ ，则最小可检测功率为：

$$P_{Sig(min)} = \frac{1}{\eta} \cdot h\nu B$$

对于理想的接收机，如果波长为 $6328 \text{ \AA}$ ， $B = 10^4$ 周/秒， $\eta = 1$ ，则：

$$P_{Sig(min)} = 3.2 \times 10^{-19} \times 10^4 = 3.2 \times 10^{-15} \text{ 瓦}$$

这种非常小的功率级表明相干检测机的灵敏度很高。还应注意，仅 $1/2$ 光波波长的总表面运动就能改变光的相位，由此拍频的相位也改变 2π 弧度。这表示相位调制量大，所以上面所导出的最小功率也就要求调制量小到 $3200 \text{ \AA}$ 或 3.2×10^{-5} 厘米的偏转的近似最小值。对较大位移， ϕ_{Sig} 经多次变化后，会因反射光的多普勒漂移而偏离它的平均值。对于峰值振幅为 X_0 ，频率为 f_r 的正弦振动，若用于测量的激光波长为 λ_0 ，则最大漂移表示为：

$$\Delta f = \frac{2X_0 \omega_r}{\lambda_0} = 4\pi f_r \frac{X_0}{\lambda_0}$$

如果 10 赫的峰间漂移为 $1/2$ 时，离开平均拍频的最大多普勒漂移则近似为 1.3 兆周/秒。因此，检测机必须有很好的频率响应曲线。如果在 $\omega_L = \omega_{Sig}$ 时，要求带宽为 1.3 兆周，或 $(\omega_L - \omega_{Sig})$ 被调制到高于 1.3 兆周的中间拍频时，则要求有 2.6 兆周的带宽。

·所有的普通光电倍增管和一些光电二极管都可以提供上面两种情况的足够频率响应。光电倍增管因理想的散粒效应噪音的限制，要求本机振荡功率相当小；又因为这种装置中的倍增管电极结构有较高的增益和均匀的频响，所以尽管S-20阴极的 $\eta=0.05$ ，而优质硅二极管 $\eta=0.5$ ，但还是倍增管比二极管好。

对于远比 λ_0 小的偏角，可用与微波副载波相类似的分析方法。调相边带的功率分量必很大于噪音。如果适当调节本机振荡光束的相位或频率，解调这些边带，那么：

$$X_0(\min) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \left(\frac{S}{N} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

式中 S/N 是未调制的载波信噪比，或者

$$X_0(\min) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \left(\frac{h\nu B}{\eta P_{\text{Sig}}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

所有这些分析都是用单频激光二极管作的。使用中红外大功率的激光二极管，必须考虑多普勒频率工作的影响。主要影响是在中频时产生重迭的拍频分量，每个激光二极管有一个模态，每个分量的相位与到达表面的光程有关。又因为这些模态有100到500兆周/秒的频率，所以这些重迭的拍频分量每以几时光程就改变一次相对相位。实验结果表明，能观察到的纯拍频信号在一定的距离内是很小的。同时，如果激光二极管是单色的，那么它可以周期地变大。这些最大信号的表面位置被准确地间隔为一个激光二极管的空腔长度。因此探测器表面就要安装在产生最佳信号几时的位置上。

另外，多模激光二极管可能有输出噪音，因为若干振荡频率并没有被准确均匀地间隔开，而且有无规则的相对相位。这种本机振荡光束中的噪音可能严重地降低相干接收机的灵敏度。

可以看到，在离表面很近的地方使用该系统时，市售的小功率单频激光二极管比用特殊控制的激光二极管有利。选用现有四件，单频功率输出可达0.1毫瓦。使用这种激光二极管，取3时光孔和3呎远的距离，使 P_{Sig} 达到 10^{-8} 瓦是比较合理的。再用一只S-20型光电管和效率为 $\eta=10^{-2}$ 的滤波器，可得：

$$X_0(\min) = 5.7 \times 10^{-8} \text{ 厘米}$$

在实际应用中，激光回和光路元件的振动，光路中气流的影响和表面干涉效应，都可能降低估计的最小值，所以对灵敏度较现实的估计是取 $X_0(\min)$ 近似等于 10^{-4} 厘米。

关于光学相位检测系统——如果表面振动近似于正弦振动且远大于光波波长可用相干零差检测法，这时本机振荡回频率和平均信号频率相同。这套相位检测系统实际上是带有光电检测回加门控计数的迈克尔逊干涉仪。在4是检测系统简图，输出光学系统把传递光聚焦在表面一点上，这是有效地进行光耦合的必要条件，所有通过信号和本机振荡光束的光学部分，必须把象差很好地限制在衍射极限之下；不然混合波波阵面将改变相位和互相抵消。半透明镜安置的角度偏差在小于光波波长与镜面光束直径的比，实际系统中的角度偏差为千分之几弧度。

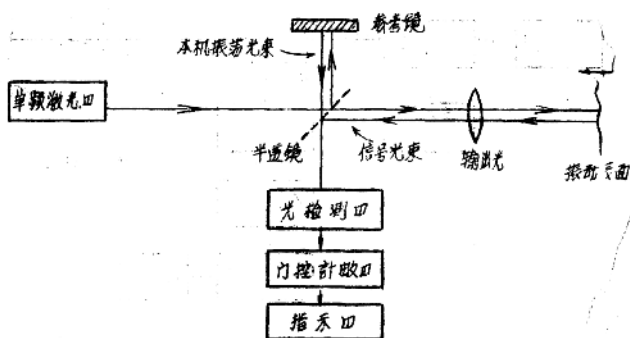


图4. 相干光学相位检测系统

(图5. 因图不清，从略。——译注)

因为颤幅一般在反射光中出现，因此也在检测回输出中出现，所以计数回里须有一个限制电路，限制电路中的失真分量将与由颤速引起的多普勒分量占据的频带一致，因此数字式的计数回（计数通过零点的数目）肯定比模拟式（用调制谐波回）要好，因为计数回的触发电路肯定不记录噪音，所以最大拍频频率确定了末级接收回的频带宽度，因此本系统的信噪比可比理论上最大值降低约30分贝；即或不降低信噪比，由于相干检测灵敏度高，本系统也可以应用，计数回的门仅在已知振动周期回内打开。

計环通过零点的数目，这可由振动台的参考信号来控制，或在計数口中用检测口指示零拍时间。

这套系统在实验室中已組裝起来，試驗时在振动台上裝一个鍍铝的鏡面，用頻譜分析仪和示波口代替計数口。本系统工作情况和预想的基本相同，各5瓦光电检测口输出波形（无限调电路）的照片，通过示波口显示很容易测出近于 10^{-4} 厘米的偏转，较大值可以从頻譜分析仪中指示的边带范围中估計出来。試驗中注意到，激光频率较稳定，运动鏡对反射光的分隔没有什么严重問題。

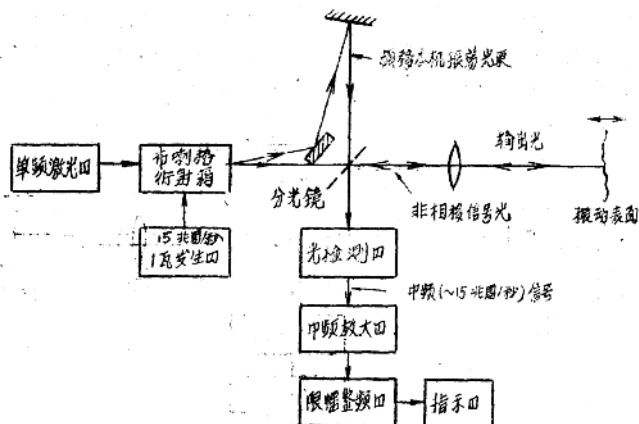


图6 相干中频检测系统（查7页查不清从略——詳註）

相干中频检测系统——用现代技术可以把激光载波转换成新的光频率，它与原来的辐射频率不同，这可用各种边带补偿调制技术或声衍射技术进行。对于相干差动接收口中的本机振荡口，不受各种假调制影响是非常重要的，而通常接收口的电路可能产生干扰，因为实际的滤波口不可能以更窄的带宽分离出由激光频率调制产生的光学边带，用上面提到的方法很难获得足够纯的光谱。但是，衍射方法能引起边带空间分离，因此，就避免了构成调制的重迭频率，同时载波边带分离在实际光学系统中是很有用的，目前这种检测方法是选用声衍射技术。

衍射变频口，或叫布喇格衍射箱，有一个水箱，在水里用一

块大石英块能产生行进的射频声波。进入衍射箱的无，因运动的声波波阵面引起密度变化而衍射。在输出中有几束光或几个衍射阶出现。没有发生衍射的光仍保持原有频率，称为零阶分量。如果声波宽几个厘米和输入功率约1瓦，就会发现某一角度上的大部分光属于零阶和一阶衍射，且大小相同。这要求仔细调整声波与光波之间的角度，当这种状态出现时，第一阶光束的频率等于反射镜中反射光的多普勒频移。反射镜在行声波方向上以音速运动着。由于衍射角和声波频率间的关联，发现多普勒分量对于第一阶衍射正好等于声波频率。这种关联因光波波长和声波衰减而限制了频移的有效范围。用这种方法获得的频带范围为5~50兆周/秒。最佳性能近于15兆周/秒，这是较大石英块能比较容易获得的频率。

因为由表面运动引起的最大多普勒频移只有几兆周/秒，所以对目前的在用，15兆周/秒的中频也是合适的。图6是在用布喇格衍射箱的相干中频系统方块图。本系统光学元件和透镜调准公差和相干光学相位检测系统相同，但是，由于感应式限幅器产生的失真至少离通带中心有15兆周/秒，而且可以被滤掉，所以在这种情况下可以使用鉴频器。因此，虽然仍需要有足够大的信号通过前级检测器噪音的带宽使限幅器工作，然而后级检测系统的带宽可以像音频一样窄。如果用光电倍增管，大部分中频放大将在管内进行，电路的噪音值不会影响性能。如果用鉴频器，其后必须有音频电路，对最低振动频率以上的频率分量积分，以便在输出时把被鉴频器加强的高频滤掉。

在研制中，对本系统的光学部件进行了试验，试验结果很好。对于单向反射表面和漫反射表面，在射频频谱分析接收器上都可以观察到外差信号。被测振幅达到1/4吋，实验用单频119型激光器，输出功率为0.1毫瓦，光电检测器为REA7985型光电管，带S-20阴极，频谱分析器显示的波形如图7所示。

在这些实验中，预料由于表面干扰而引起的信号波动都能清楚地看到：在几分之一秒的振动周期内，信号常常下降20多个分贝。因此，对任何工作在漫反射表面的相干系统都需要有一定的限制。

这种方法总的灵敏度比研究时试验过的任何方法都好。尽管这种方法用了许多新概念和部件，但在工程制造时完全可以简

化，取得合理的尺寸和功率要求。

光点投影系统

如果运动表面属于漫射类型，把一束或几束激光投射到表面上，并用光学接收口把这些反射光收集起来，测量运动感生的效应，就能得到某些运动部件的信息。一种方法是直观地测量光点的明显运动，还利用激光光波的相干性。该系统称为非相干光点投影技术。另一种方法是投射两个光点，并利用从这两个光点反射光波之间的干涉，因为利用了激光的相干性，所以称为相干光点投影技术。

非相干光点投影系统——该系统如图8所示。激光光束在振动表面上投出一个很小的光点，一部分反射光汇聚到接收口的矩形光孔中，在接收口的聚焦平面上，由于表面运动，使光点影象产生横向运动。如果把一个刀缘光栏放在距光点影象后面不远的地方，在这里光束将扩散成一个矩形，影象运动会影响通过光栏的部分光的大小，实际上，光栏平均遮住光束的一半，调整焦点后面一段距离，可在线性范围内获得最大预期影象位移。通过刀缘光栏的功率大小，由光电检测口测量，检测口的电流输出是沿投射光束轴向表面位移的线性模拟量。

测量振动的动态范围正好等于检测口的平均光电流和噪音电流的比，同时也是最大预计振动和最小可测振动振幅的比：

$$\frac{I_n}{I} = \frac{P_n}{P_r} = \frac{X_{0(max)}}{X_{0(min)}}$$

式中 I_n 是噪音电流，与光功率 P_n 对应， I 为反射光产生的平均光电流，与接收口的光功率 P_r 对应。

对于一般的几何尺寸和3毫瓦的传递光，光电管的散粒效应噪音可能被控制，那么：

$$\frac{X_{0(max)}}{X_{0(min)}} = \sqrt{\frac{2h\nu B}{\eta P_r}}$$

如 $X_{0(max)} = 1/4$ 吋(屏值)，那么最小的位移 $X_{0(min)}$ 约为 5×10^{-4} 厘米(有效值)。

有意义的是，如果最大位移不大于光波波长，应用优良的光