

用激光干涉仪测量大幅度机械振动

在进行各种物理实验及解决许多技术课题时,经常遇到高于光波长的大幅度机械振动的测量问题。实际上,与校准和鉴定振动测试设备有关的大多数工序(如研究机器、部件和机构振动,研究大功率源及超声波接收器的动态和强度特性)都属于上述测量^[1]。

目前,激光干涉仪差频法被认为是测量较大振动参数的方法中最有前途的方法^[2~4]。这种方法属无接触并且是远距离工作的,能保证测量结果的良好精度和可重复性。然而,研制大动态范围宽频带差频测量系统是相当复杂的问题。这关系到,除平方律光电接收器、频率检波器和干涉仪本身外,把单频激光辐射转换成双频激光辐射的装置也是差频系统必须的部件。该装置必须是稳定而高效率的,并能保证基准信号相对于探测频率的频移为 $\Delta F \geq 10\Delta v_D = 40\pi l_{x, \max} f_{x, \max} / \lambda$, 式中, ΔF 为基准光信号与探测光信号的频移, Δv_D 为所研究物体振动引起的多普勒频移; $l_{x, \max}$, $f_{x, \max}$ 为测得的振动最大幅值和最大频率值, λ 为使用的激光辐射波长。在 $l_{x, \max} \approx 1 \times 10^2 \mu\text{m}$, $f_{x, \max} \approx 1 \times 10^4 \text{Hz}$ 时,差频 ΔF 应不小于200MHz。对于多数已有的变频器要保证完成上述要求是不容易的。此外,差频测量系统本身需要校准。

因此,我们讨论测量大幅度机械振动的两种简单干涉方法:示波器法和使用电子频率计法。虽然这两种方法都是大家熟知的,但在文献中缺乏充分的描述,不能得到测量误差的估价。使用频率计时提出的信息计数方式有独特之点,它不需要测量探测信号的多普勒频移。

如果双光束干涉仪一面反射镜的机械振动带有与频率 f_x 及幅度 l_x 调和的特性,则干涉图的强度 I 是在所研究物体振动的超调制频率(промодулированная частота),按下式测量:

$$I = 0.5I_0(1 + \cos\delta) \quad (1)$$

式中, I_0 是干涉仪输入的光强; δ 是 $4\pi(l_0 + l_x \sin 2\pi f_x t) / \lambda$, $2l_0$ 是相干光束的初始光程差。在所研究振动的一个周期内,相干信号的变化图样将重复两次。相干信号变化频率的瞬时值 $f_{\text{变化}}$ 由下式确定

$$f_{\text{变化}} = (4\pi l_x f_x) / \lambda (\cos 2\pi f_x t)$$

而平均值为

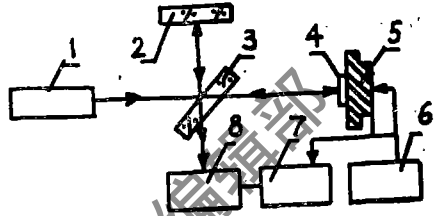
$$f_{\text{变化}} = 8l_x f_x / \lambda \quad (2)$$

按照所研究振动半周期内相干信号强度变化的周期数 $m = f_{\text{变化}} / 2f_x$,用示波器最能简便地测量振动幅度 l_x 。振动幅度 $l_x = m\lambda / 4$ 。

在干涉系统中,使用 $\lambda = 0.63\mu\text{m}$,输出辐射功率8~15mW的单模连续氦氛激光器,很容易达到相干图光电流落差2~3mA的最大-最小值。这类激光器的辐射功率起伏集中在

0~10⁶Hz光谱范围。干涉仪输出端的相对电平不超过1×10⁻²。在这样噪声电平下容易计算一个相干信号周期的几十分之一，振动幅度测量的绝对误差不超过0.01μm。

在测量大幅度周期性振动时，如干涉图变化周期很大，则可方便地使用以分频方式工作的频率计。图中给出了这种测量计的结构图。氦氖激光器1（型号ЛГ-79/1）照射干涉仪。干涉仪由分光元件3、基准镜2、紧接到耳机5振动膜上的可动反射镜4，及产生正弦信号的可控振荡器6所组成。干涉图的强度用光电接收器（光电二极管ФД-21КП，时间常数~6×10⁻⁹s）来记录。用ЧЗ-34А频率计进行振动测量。振荡器6输出的信号同时供给耳机5及频率计7输入端，频率计的另一输入端连到光电接收器8的输出。 l_x 值按频率计读数 $n = f_{\text{变化}}/f_x$ 与 $\lambda/8$ 的乘积[见式(2)]来确定。



频率计利用通道起动的锁定电平工作，因此可能测不出干涉图变化最后一个周期的细微部分，如果其幅度低于频率计动作电平的话。由此确定了测量的绝对误差。如果在相干光束不同初始相位差（±π/2范围内）测量数 n ，并为了计算振动幅度而取其平均值 \bar{n} ，就能把绝对误差减小到 $\lambda/16 = 0.04\mu\text{m}$ 。

表中列出了按照第一类贝塞耳函数 $I_1(4\pi l_x/\lambda)$ 的根用目前最精确方法得到的振幅数

变换器上的电压 (V)	函数 $I_1(4\pi l_x/\lambda)$ 根的序号与振幅值		l_x (μm)	$l_{x,0}$ (μm)	平均值 \bar{n}	$l_{x, \text{频}}$ (μm)
	N	$4\pi l_x/\lambda$				
0.046	—	—	0.062	0.06	1.0	0.079
0.083	—	—	0.111	0.116	1.5	0.119
0.127	—	—	0.170	0.175	2.5	0.198
0.145	1	3.8317	0.193	0.198	2.5	0.198
0.165	2	7.0156	0.354	0.364	4.5	0.356
0.334	3	10.1735	0.513	0.514	6.5	0.514
0.501	4	13.3237	0.672	0.680	8.5	0.672
0.574	—	—	—	—	9.5	0.751
0.620	5	16.4706	0.830	0.831	10.5	0.831
0.737	6	19.6159	0.989	0.989	12.5	0.989
0.855	7	22.7601	1.147	1.147	14.5	1.147
0.972	8	25.9020	1.305	1.305	—	—
1.090	9	29.044	1.464	1.479	18.5	1.463
1.208	10	32.186	1.622	1.622	20.5	1.622
1.328	11	35.327	1.78	—	—	—
1.450	12	38.469	1.939	1.938	24.5	1.938
1.590	13	41.610	2.097	—	26.5	2.096

距离分辨的相干差分吸收光雷达的灵敏度

我们研制了一种用外差探测的距离分辨的差分吸收光雷达(简称DIAL)。它采用混合型TEA CO₂激光器作发射机的振荡器,能发射140mJ的单频脉冲。最小可探测功率为 2×10^{-11} W的外差接收机,能探测5km或更远距离处大气气溶胶后向散射的回波信号。定义系统对目标气体的灵敏度为最小可探测浓度和吸收系数差分的乘积,实验发现,在300m距离分辨范围内,对50次后向散射信号进行平均后,测得的灵敏度为 $3.7 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ 。

一、引言

距离分辨的差分吸收(RRDA)光雷达技术提供了一种新的现场测定大气中气体成分的探测方案。RRDA光雷达系统使用脉冲激光发射机,以大气气溶胶粒子作为后向散射介质,进行距离分辨测量。因为这种技术具有距离分辨能力,所以引起了人们的极大注意,目前已有报导用各类激光器作成的此种系统^[1~3]。

在这些系统中,由CO₂激光器作成的RRDA光雷达有很多优点:全天候大气的穿透能力和多功能性;在CO₂受激跃迁波长范围内存在着O₃, H₂O, NH₃等等许多种气体的吸收谱线。尽管CO₂激光雷达有这些优点,但因为气溶胶的散射截面是极小的,而直接探测系统需要有高能量(例如几焦耳)的发射振荡器,因此此类系统仅报导过少数几例^[3]。然而,在这一波长范围,外差(相干)探测的灵敏度比直接探测要高得多。Kobayasi和Inaba^[4]提出了用外差探测的RRDA光雷达方案,使用一台低能量激光器能获得较好的测距能力。虽然他们的方案看起来是有希望的,但至今,所遇到的实际技术困难却阻碍了它的实现。

由于外差接收机的最小可探测功率(MDP)是与中频带宽成正比的,所以发射激光脉冲的光学带宽必须是窄的,而且其中心频率必须是稳定的。由于带宽较宽($\sim 1\text{GHz}$),虽然通常的TEA CO₂激光器的输出能量较高,但却不适合作相干光雷达的发射振荡器。即使

值^[5]、 $I_{x, \text{频}}$ 的数值以及耳机膜片振动幅度的数值(是用示波器 $I_{x, 0}$ 方法,并借助频率计测量的)。从表中看出,借助示波器,测量的绝对误差不超过 $0.01\mu\text{m}$,借助频率计时不超过 $0.04\mu\text{m}$ 。

用本方法测得的振动最大幅值 $I_{x, \text{max}}$ 可从式(2)求得,它受记录仪表通频带的限制(在用43-34A频率计测量最大频率的具体情况下,通频带等于100MHz)。如果 $f_{\text{变化}} = 10^8 \text{Hz}$ 、 $f_x = 10^3 \text{Hz}$ 、 $\lambda = 0.63\mu\text{m}$,则 $I_{x, \text{max}} = 4 \times 10^3 \mu\text{m}$ 。

因此,所述方法能测量的机械振动幅度从 $0.08\mu\text{m}$ 到 $4 \times 10^3 \mu\text{m}$,绝对误差小于 $0.04\mu\text{m}$ 。

我们能制出高相干性的发射机，即它的输出脉冲带宽很窄（与接收机带宽差不多），还会引起另一个问题：称之为散斑噪声回波信号波动^[5]。因为由RRDA测量结果推算的气体浓度的精度会因信号振幅测定误差而降低，因此，为了改进系统对目标气体的灵敏度，必须要抑制大信号时的主要误差源——散斑波动。

我们研制了一种相干RRDA光雷达，解决了上述的问题。我们用混合型TEA CO₂激光器构成具有高相干性的发射机。在各种可供选择的方案中，之所以选用混合型器件，是因为它的可靠性高，也提供了用于调整输出脉冲频率的连续参考激光输出。为了减少回波信号中的散斑波动，我们使用了对信号进行脉冲间平均的方法。

本文中，我们将叙述新近研制成的相干差分吸收光雷达(DIAL)性能的实验研究结果，其中包括测距能力，外差效率和对目标气体的探测灵敏度等。上述工作可以说是初步工作，它为分析相干RRDA光雷达灵敏度提供了实验基础。

二、相干RRDA光雷达的探测灵敏度

在RRDA技术中，对 λ_0 和 λ_1 两种波长，即分别是在目标气体共振吸收点及偏离共振吸收点的回波信号进行了测量。距离R处的气体浓度C(R)可根据测得的接收功率按下列方程求得：

$$C(R) = \frac{1}{2\Delta k \Delta R} \ln \left[\frac{\langle P_r^1(R - \Delta R/2) \rangle \langle P_r^0(R + \Delta R/2) \rangle}{\langle P_r^1(R + \Delta R/2) \rangle \langle P_r^0(R - \Delta R/2) \rangle} \right],$$

式中， Δk 为两种波长吸收系数之差， ΔR 为距离间隔，以及 $\langle P_r^0 \rangle$ ， $\langle P_r^1 \rangle$ 为对波长 λ_0 和 λ_1 所接收功率的预计值。

浓度不确定性 σ_c^2 为：

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{4(\Delta k)^2(\Delta R)^2} \left\{ \frac{\text{var}[P_r^0(R + \Delta R/2)]}{\langle P_r^0(R + \Delta R/2) \rangle^2} + \frac{\text{var}[P_r^0(R - \Delta R/2)]}{\langle P_r^0(R - \Delta R/2) \rangle^2} + \frac{\text{var}[P_r^1(R + \Delta R/2)]}{\langle P_r^1(R + \Delta R/2) \rangle^2} + \frac{\text{var}[P_r^1(R - \Delta R/2)]}{\langle P_r^1(R - \Delta R/2) \rangle^2} \right\}, \quad (1)$$

其中，我们假定取样 P_r 是彼此无关的^[8]。假如 P_r 随距离的变化不大，则方程(1)能简化成：

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{(\Delta k)^2(\Delta R)^2} \left[\frac{\text{var}(P_r)}{\langle P_r \rangle^2} \right] \quad (2)$$

所研究振动的特性不仅可能是调和的，而且可能是带有恒定周期的其它形式。振动规律所描述的函数 $l(t)$ 的连续性与可微分性是方法适用的唯一条件。很容易看到，把函数 $l(t)$ 写成傅里叶级数并代入式(1)，就能得到相干信号变化频率的平均值 \bar{f} 变化。频率 \bar{f} 变化同振动幅度有关系，类似于关系式(2)。

参 考 文 献 (略)

译自Измерительная техника, 1984, No. 3, P. 26~27.

梁国忠 译 中尧 校