

激光反馈测振方法的研究

林 劲 赵 东 屏

(中国计量科学研究院, 北京)

激光反馈现象在 1963 年为人们发现, 同年 Ashby 应用该原理测量等离子体的密度^[1], 1964 年 Clunie 对该现象进行了一些实验研究^[2]. 本文从原理上讨论激光反馈测振, 以及分析测振中存在的问题。

一、激光反馈测振原理

He-Ne 激光器发出的稳定基模的激光被物体上的镜片反射回来, 重新返回激光器内. 由于返回的光与腔内的光频率相同, 因此它们将产生干涉. 如图 1 所示, 激光反馈测振仪可视为多光束 Fabry-Perot 干涉仪. 干涉条纹从激光器后端输出, 并由光电接收器接收. 如果不计内部损耗, 干涉仪的组合反射率与透过率之和等于 1, 即

$$\bar{R}(\nu) = 1 - \bar{T}(\nu), \quad (1)$$

其中组合透过率 $\bar{T}(\nu)$ 为

$$\bar{T}(\nu) = \frac{1}{1 + F \sin^2 \Phi / 2}, \quad (2)$$

式中 Φ 表示相邻光束间的相位差, 取决于被测物体与 He-Ne 激光器之间的距离。

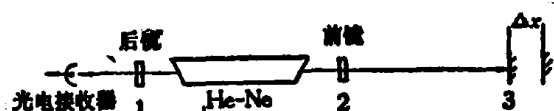


图 1 激光反馈测振原理图

因此, 光电接收器接收的光强变化一个周期对应于物体移动 $\lambda/2$. 对于往返振动的振幅 D 有

$$D = \frac{1}{8} N \lambda, \quad (3)$$

返回的光 $\bar{E}_i$ 进入激光器, 如图 2 所示. 通过反射率 R 的前镜进入腔内变为 $(1 - R) \bar{E}_i$, 通过激光介质后, 从后镜输出为

$$\bar{E}_1 = (1 - R)^2 G_0 \bar{E}_i, \quad (4)$$

在 B 端面另一部分光反射返回, 第二次通过介质后贡献给输出为

$$\bar{E}_2 = R^2 (1 - R)^2 G_0^2 \bar{E}_i. \quad (5)$$

同理, 振荡 n 次后的输出为

$$\bar{E}_n = R^{2(n-1)} (1 - R)^2 G_0^{2(n-1)} \bar{E}_i. \quad (6)$$

如果反馈返回的光 $\bar{E}_i$ 与腔内的光相比很弱, 多次振荡后形成同一相位, 则全部输出 $\bar{E}_0$ 为

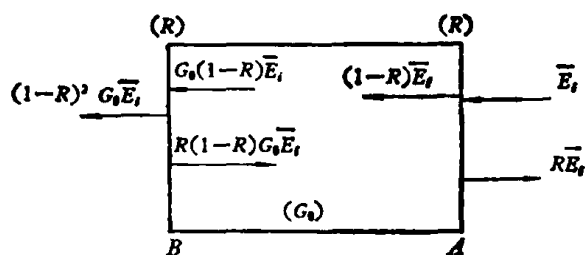


图 2 激光反馈振荡示意图

R —— A, B 端面反射率; $(1 - R)$ —— A, B 端面透过率; G_0 ——激光介质增益

本文 1983 年 7 月 8 日收到。

$$\bar{E}_0 = \bar{E}_i G_0 (1 - R)^2 \sum_{n=1}^{\infty} (G_0 R)^{2n}. \quad (7)$$

显然,输出的光 $\bar{E}_0$ 与反馈光 $\bar{E}_i$ 的相位有关,即与振动位移有关。

反馈光 $\bar{E}_i$ 进入腔内,从扰动开始至建立新的稳定振荡过程可用 Fox-Li 的平面平行反射镜谐振腔来描述^[3],对应于 $L = 100\text{cm}$, $2a = 5\text{mm}$ 的例子,计算表明需要持续 200 次以上。

二、影响激光反馈测振因素的研究

(1) He-Ne 激光反馈与输出光强的关系 反馈光与输出光强的变化用等效反射率变化来描述。计算和实验表明,仅约 1~10% 激光反馈返回就可产生约 2~10 倍的光强变化输出。

(2) 激光反馈测振的速度限制 反馈引起腔内扰动至建立新的稳态,大致需要 200 次往返振荡,因此估计可测速度最大为

$$V_{\max} = \frac{C}{n \times L} \times \frac{\lambda}{2} = 0.48 \text{ 米/秒}, \quad (8)$$

式中 C 是光速,对应可测最高频率为

$$f_{\max} = \frac{V_{\max}}{\lambda/2} = 1.5\text{MHz}. \quad (9)$$

该振荡次数还与介质增益,镜面损耗以及原子弛豫速度有关。1963 年 Ashby 和 Clunie 实验达到最高频率为 1 MHz。采用中国计量科学研究所的高增益 He-Ne 激光器,最大可测频率达到 4 MHz,对应最大速度为 1.2 米/秒。

实验还表明,可测频带与激光器的工作电流或反馈光强无关,如图 3a、图 3b 所示。

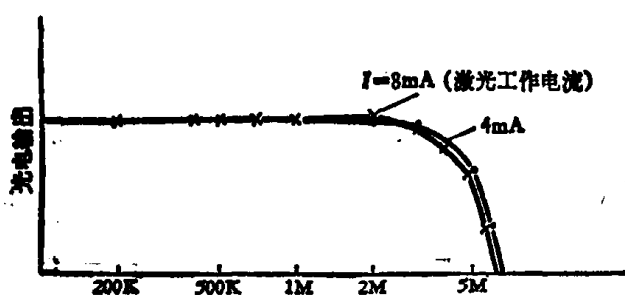


图 3a 测量频带与工作电流关系

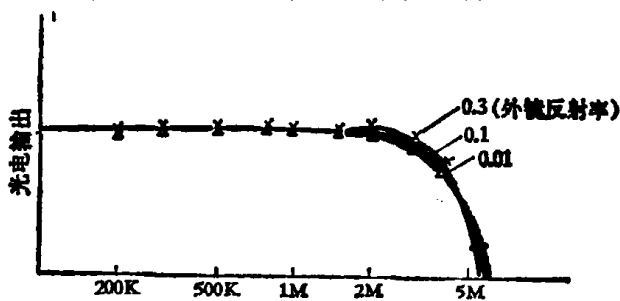


图 3b 测量频带与反馈光强关系

(3) 多模对激光反馈输出波形的影响 我们采用 $L = 18\text{cm}$ 的 He-Ne 激光器在没有稳频条件下,由于腔长的慢变化等因素,激光将产生多模输出,影响振动测量精度,但是这种腔长的变化是缓慢的,我们通过调节腔长来改善输出波形获得较好的测量精度。

(4) 外界地脉动的干扰 激光反馈测振时,由于被测物体与激光器之间存在相位差为

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} x, \quad (10)$$

如果被测物体以正弦运动, $x = A \sin \omega t$, 则

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} (A \sin \omega t). \quad (11)$$

在 n 个周期内求平均相移为

$$\Phi_p = \frac{1}{nT} \int_0^T \int_0^t |d\Phi| dt. \quad (12)$$

若测量过程受到外界地脉动的随机低频振动 $f(\tau)$ 的干扰, 则实测相位为

$$\Phi'_p = \frac{1}{n\tau} \int_0^{n\tau} \int_0^t \left| \frac{d}{dt} \left[\frac{4\pi}{\lambda} A \sin \omega\tau + \frac{4\pi}{\lambda} f(\tau) \right] \right| d\tau dt. \quad (13)$$

所以产生误差为

$$\bar{r} = \left| \frac{\Phi'_p - \Phi_p}{\Phi_p} \right| \leq \frac{\pi}{2} \frac{n}{n-1} \frac{A'\omega'}{A\omega}, \quad (14)$$

其中 $A'\omega'$ -地脉动的振动速度; $A\omega$ -被测物体的振动速度. 一般情况 $A\omega \gg A'\omega'$.

三、实验结果和测量误差

用中国计量科学研究院中频振动标准, 在频率从 20 Hz 至 2 KHz, 振幅从 1mm 至 $1\mu\text{m}$ 范围内进行比较, 结果列表如下:

频率 (Hz)	20	40	60	80	160	200	400	600	800	1K	2K
振动位移 (μm)	≥ 100	50	50	50	50	50	10	10	10	1	1
误差 (%)	0.35	0.07	0.08	0.07	0.10	0.09	0.19	0.30	0.28	0.54	0.87

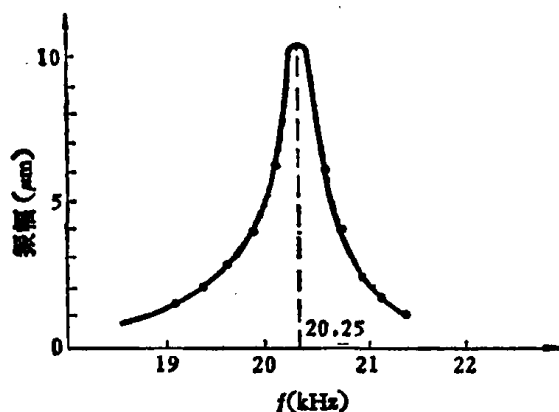


图 4a H66025 超声换能器振幅-频率特性

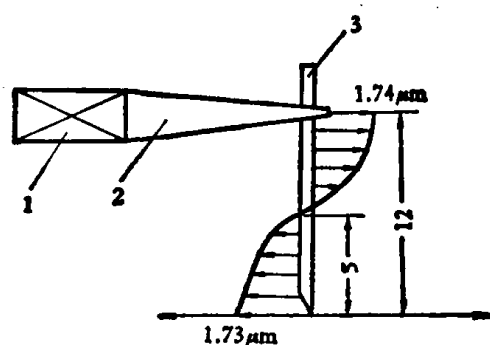


图 4b CWD-3 超声点焊机劈刀振幅分布

1. 换能器; 2. 变幅杆; 3. 劈刀

在频率为 20 kHz 时, 对 H66025 大功率超声发生器的振动系统进行测试, 测得最大振动速度是 1.2 米/秒, 对应频率为 4 MHz. 首次测得超声换能器的精确振幅频率特性, 如图 4a 所示. 我们还对 CWD-3 超声点焊机劈刀振幅分布进行测试, 振动频率为 40 kHz, 如图 4b 所示.

四、结 论

激光反馈原理可用于测量物体振动位移, 采用该原理可使仪器在结构、成本以及对测量条件的要求等方面具有明显优点.

致谢: 参加实验工作的还有秦辅英、范国良、林仲茂、马玉龙、冯永方同志. 另外, 苗家鼎、张仲先、朱如曾、倪育才、谭山等同志在工作中给予有益帮助, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Ashby, A. A., *Appl. Phys. Letters*, 3(1963), 13.
- [2] Clmie, D. M., *J. Sci. Instr.* 41(1964), 489.
- [3] Fox, A. G. & Li, T., *Bell. Syst. Tech. J.*, 40(1961).