

一种新型传感器的研究

采长彬 谭深 郭健

(国防科技大学应用物理系, 400078)

提要: 本文研究一种新型的电声传感器。它较传统的微音器有更高的灵敏度和信噪比。进行了理论估算和实验研究, 取得了和理论分析一致的实验结果。

关键词: 电声传感器

Investigation of a novel sensor

Cai Changbin, Tan Shen, Guo Jian

(Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha)

Abstract: A novel acousto-electric sensor is studied, which possesses higher sensitivity and greater detective signal-noise ratio than traditional microphones. The experimental results are in agreement with the theoretical analysis.

Key words: acousto-electric sensor

一、前言

现有的电声传感器主要是微音器。目前, 微音器的灵敏度均在 100mV/Pa 数量级^[1,2]。微音器的一个缺点是噪声信号大, 信噪比小。其噪声源于微音器内部电荷的无规则运动和电子密度的涨落, 因此, 是微音器本身所固有的。我们设计了一种新型的电声传感器, 并把它用于光声光谱中, 以取代传统的微音器, 取得了较好的结果。

二、光声信号的激光检测原理

光声池内, 声压强的变化幅度通常正比于样品所吸收的光能。若在光声池内不安装微音器, 而是安装一个高灵敏度的膜片, 并使此膜片成为激光干涉仪的移动臂, 则此膜片在声压强

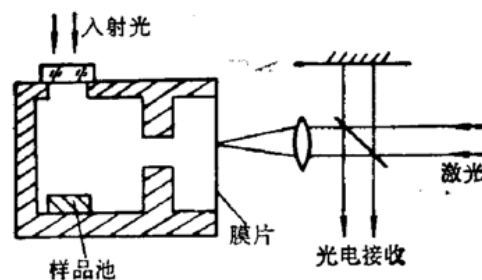


图1 新传感器原理图

ΔP 的作用下, 将作受迫振动, 膜片的振动反映了 ΔP 的变化。用激光干涉法测出膜片的振幅, 即可实现对光声信号的检测。图 1 中, 光学系统采用球面干涉仪。光声池内无光声信号时, 需将透镜的焦点调整到膜片的表面。

三、膜片的设计

边缘固定的圆形膜片均匀受力时, 其最大挠度发生于膜片的中央, 并等于^[3~5]

$$W_{\max} = \frac{Pa^4}{64D} \quad (1)$$

其中 $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$, E 为杨氏模量, h 为膜片厚度, a 为膜片半径, P 为声压强, ν 为材料的泊松比。对于聚对苯二甲酸乙二(醇)酯材料, $\nu = 0.44$ ^[6], $P = 1.4 \text{ g/cm}^3$ ^[7], $E = 8.23 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$, (实测)。于是有

$$w_{\max} \simeq 0.15 \frac{Pa^4}{Eh^3} \quad (2)$$

对于实际使用情况, 应有^[3]

$$h \geq a \sqrt{\frac{0.32}{E}} \quad (3)$$

根据上式, 我们选取 $h = 0.02 \text{ mm}$, $a = 10 \text{ mm}$ 。则其固有频率为^[8, 8]

$$f_n \simeq \frac{2.54h}{\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3(1-\nu^2)\rho}} \simeq 2.5 \times 10^3 \text{ (Hz)} \quad (4)$$

实际使用的调制频率为 40 Hz, 故其动态响应是足够的。

目前, 微音器的灵敏度大约为^[9]

$$M_0 \simeq 100 \text{ mV/Pa} \simeq 10 \text{ mV}/\mu\text{bar} \quad (5)$$

通常, 微音器输出的电信号约为 $\sim 1 \mu\text{V}$ 级, 所以声信号大约为

$$P_{a,c} \simeq 10^{-4} \mu\text{bar} \quad (6)$$

根据方程(2), 膜片振动的最大位移为

$$w_{\max} \simeq 0.15 \frac{a^4 P}{Eh^3} \simeq 0.23 \text{ nm} \quad (7)$$

本文实验系统中, 光电接收器件采用 3DU31, 电源电压为 6 V。一个条纹的移动对应的位移量为 $\lambda/2 = 316.4 \text{ nm}$, 光电管输出交流电信号约为 $\sim 1 \text{ V}$ 级, 因此, 若设 nm 级振动所产生的交流电信号为 U , 则有

$$U = \frac{1}{316.4} \simeq 0.3 \times 10^{-4} \simeq 0.03 \text{ (mV)}. \quad (8)$$

四、实验结果

为了和传统的微音器进行比较, 在实验中我们采用了两套光声光谱系统。一套采用微音器, 一套采用新传感器, 分别实测了 Cr_2O_3 (工业纯) 粉末的光声光谱, 实验结果如图 2(a)、(b)。

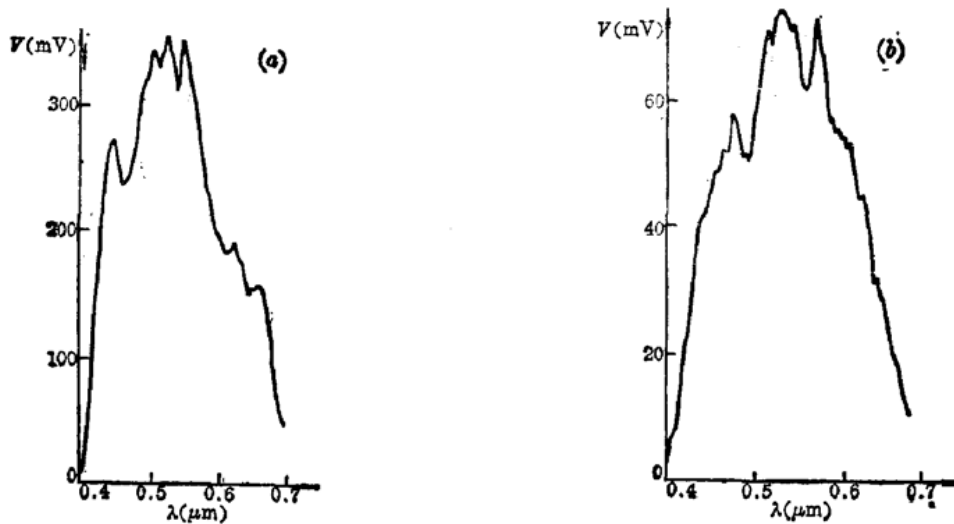


图 2

- (a) 使用新传感器的光声光谱图(调制频率 40 Hz, 锁相时间常数 1 s, 锁相灵敏度 30 mV);
 (b) 微音器作传感器的光声光谱图(调制频率 40 Hz, 锁相时间常数 1 s, 锁相灵敏度 1 mV)

五、分析和讨论

由于样品的纯度不好(工业纯),光源的幅-频特性起伏较大,且谱图又未经归一化处理,因此和 Cr_2O_3 样品的典型光谱图存在差异。但是,从实验结果可以看出,两种实验系统对同一种样品所测得的光谱图基本相同。

1. 灵敏度

国产微音器的灵敏度大约是 $10 \text{ mV}/\mu\text{bar}$ 。以新型电声传感器取代微音器后,声压强为 $10^{-4} \mu\text{bar}$ 时,输出交流信号为 0.3 mV ,其灵敏度为

$$M'_0 \approx \frac{0.3 \text{ mV}}{10^{-4} \mu\text{bar}} \approx 3000 \text{ mV}/\mu\text{bar}。$$

可见新型传感器的灵敏度较微音器高两个数量级。

2. 信噪比

(1) 微音器的信噪比

通常,由于调制器的频率很低,在这里,调制频率为 40 Hz ,因此在微音器的噪声源中,起主要作用的是偏置电阻的热噪声,其噪声的功率谱可表示为(小信号情况)^[10]

$$|V_{nm}|^2 = \frac{4KT}{\omega^2 C_m^2 R_B} \quad (9)$$

应该说明,由于这里只讨论微音器的噪声,所以没有考虑放大器的噪声。式中 R_B 为偏置电阻; T 为绝对温度; ω 为调制器工作频率; k 为波尔兹曼常数; C_m 为微音器等效高频电容。取 $T = 300 \text{ K}$, $R_B = 10 \text{ k}\Omega$, $\omega = 2\pi \times 40 \text{ 1/s}$, $C_m = 44 \times 10^{-12} \text{ F}$ ^[10], 则有

$$|V_{nm}|^2 = \frac{4KT}{\omega^2 C_m^2 R_B} \approx 1.33 \times 10^{-8} \text{ V}^2 \text{ Hz}^{-1}。$$

微音器输出信号电压的功率谱,此处大约是

$$|V_s|^2 \approx (10^{-6})^2 \approx 10^{-12} \text{ V}^2 \text{ Hz}^{-1}。$$

得到微音器的信噪比为

$$\frac{S}{N} = \frac{|V_s|^2}{|V_{nm}|^2} \simeq 7.5 \times 10^{-3} \quad (10)$$

(2) 激光测振系统(新传感器)的信噪比

激光测振系统中,能够对系统性能指标产生显著影响的噪声机构是光电转换环节。我们实际使用的光电转换器件是光电三极管。在光频段,可以做到使光电管的暗电流噪声和热噪声较其散粒噪声为小。若只考虑散粒噪声,则线性探测器的信噪比为^[11]

$$\frac{S}{N} \simeq \eta \frac{P_s}{hfB} \quad (11)$$

式中, η 为量子效率; P_s 为信号功率, f 为入射光频率; B 为光电三极管响应带宽; h 为普朗克常数。取 $\eta=1$, $f \simeq 10^{14}$ Hz, $B \simeq 10^9$ Hz。

在干涉仪的输出处,接收器所接收到的光强为^[12]

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta \right) \right] \quad (12)$$

其中: $\lambda = 632.8$ nm, $I_0 \simeq 10^{-3}$ W。0.1nm级振动所引起的光强变化(信号光功率)为

$$\Delta I = I_0 \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda/2} \Delta \right) \simeq I_0 \left(\frac{2\pi}{\lambda/2} \Delta \right)^2 \simeq 10^{-6} I_0$$

即

$$P_s = \Delta I \simeq 10^{-6} I_0 \simeq 10^{-9} \text{ W}$$

由方程(11)得到

$$\frac{S}{N} \simeq \eta \frac{P_s}{hfB} \simeq 3 \quad (13)$$

可见新型电声传感器比微音器的信噪比要高两个数量级。

参 考 文 献

- 1 张学福 *et al.*, 实用传感器手册, 电子工业出版社, 1988, p. 474
- 2 沈峻, 声学测量, 科学出版社, 1986, p. 41
- 3 牛德芳 *et al.*, 力学量敏感器件及其应用, 科学出版社, 1987, pp. 86, 57, 87, 136
- 4 C. H. 尼基伏罗夫, 弹性与塑性理论, 高等教育出版社, 1957, pp., 2221, 247
- 5 汉斯-乔治·伊利亚斯, 大分子(上册), 上海科学技术出版社, 1986, p. 285
- 6 I. M. 沃德, 固体高分子的力学性质, 科学出版社, 1980, p. 263
- 7 D. W. 范德雷维克, 聚合物的性质, 科学出版社, 1981, p. 206
- 8 清华大学工程力学系, 机械振动, 机械工业出版社, 1988, p. 474
- 9 李宝善, 近代传声器和拾音技术, 广播出版社, 1984, p. 39
- 10 Yoh-Han Pao, Optoacoustic Spectroscopy and Detection, Academic Press, 1977, pp. 18, 23
- 11 Dietrich Marcuse, Principles of Quantum Electronics, Academic Press, 1980, Chap. 6, Sec 6, 5
- 12 W. 戴姆特瑞德, 激光光谱学的基础和技术, 科学出版社, 1980, p. 66