

声光器件电阻抗的计算及声速测量

张 晶

(西安工业学院光学系仪器教研室)

本文从传输线理论着手,给出了求解声光器件电输入阻抗的一般公式。在理论上证明了声驻波存在时,器件的电阻抗呈周期性变化,且与声驻波的变化周期相同,并基于此理论,提出了一种新的测量声光器件中声速的方法。

一、前 言

声光器件电输入阻抗 Z_i 随频率的变化是测试声光器件性能的一条较重要的曲线,在过去发表的文章中,给出了比较详细的讨论^{[1],[2]}。然而这些讨论都是在声光相互作用介质中无声反射或无声驻波存在的前提下进行的。在实际中有时需要计算某些特殊场合下应用的驻波声光器件的阻抗值,也还需要掌握一些吸声体与声光介质有不同声阻抗时的(有一定的声驻波存在)器件阻抗随频率 f 的变化关系,这就需要有一个能计算声光器件电阻抗的一般公式。

二、器件阻抗公式的推导

由传输线理论知,特征阻抗为 Z_0 、负载阻抗为 Z_2 、长度为 l 的传输线,其输入阻抗为^[3]:

$$Z_i = \frac{Z_0 \text{Ch}Tl + Z_2 \text{Sh}Tl}{\frac{\text{Sh}Tl}{Z_0} + \text{Ch}Tl} \quad (1)$$

$$T = \alpha + j\beta \quad (2)$$

T —传播常数

α —传输线固有衰减系数

β —相移因子

将传输线网络用一特征矩阵表示:

$$[M] = \begin{bmatrix} \text{Ch}Tl & Z_0 \text{Sh}Tl \\ \frac{\text{Sh}Tl}{Z_0} & \text{Ch}Tl \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 \\ M_3 & M_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则(1)式变成:

$$Z_i = \frac{Z_2 M_1 + M_2}{Z_2 M_3 + M_4} \quad (4)$$

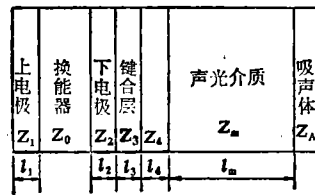


图1. 声光器件等效传递网络

将声光器件看成一个传递网络,各部分的特征参量如图1所示。由(1)式不难得到换能器右端面处的等效声阻抗为:

$$Z_{02} = \frac{Z_{4m}A + B}{Z_{4m}C + D} \quad (5)$$

A 、 B 、 C 、 D 为膜层传递矩阵 $[A]$ 的4个元素

$$[A] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = [A_2] \times [A_3] \times [A_4] \quad (6)$$

$$[A_n] = \begin{bmatrix} \text{Ch}T_n l_n & Z_n \text{Sh}T_n l_n \\ \frac{\text{Sh}T_n l_n}{Z_n} & \text{Ch}T_n l_n \end{bmatrix} \quad (n=2, 3, 4) \quad (7)$$

$$Z_{4m} = \frac{Z_A \text{Ch}T_m l_m + Z_m \text{Sh}T_m l_m}{\frac{\text{Sh}T_m l_m}{Z_A} + \text{Ch}T_m l_m} \quad (8)$$

Z_A —吸声体声阻抗

Z_m —声光介质声阻抗

l_m —声光介质沿通声方向的长度

$T_m = a_m + j\beta_m$

a_m —声光介质的声衰减

β_m —声光介质相移

经过压电换能器传递矩阵 $[A_0]$, 器件的电输入阻抗为:

$$Z_i = \frac{Z_{02}A_0 + B_0}{Z_{02}C_0 + D_0} \quad (9)$$

$$[A_0] = \frac{1}{\phi Q} \begin{bmatrix} 1 & \frac{jz_b}{\omega C_0} \\ j\omega C_0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos\gamma + jz_b \sin\gamma & Z_0(z_b \cos\gamma + j \sin\gamma) \\ j \sin\gamma / Z_0 & 2(\cos\gamma - 1) + jz_b \sin\gamma \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Q = \cos\gamma - 1 + jz_b \sin\gamma$$

$$z_b = j \frac{Z_1}{Z_0} \operatorname{tg} \gamma_1$$

$$\gamma = \pi F = \pi \cdot \frac{f}{f_0} \quad (11)$$

$$\gamma_1 = \gamma t_1 \quad \omega = 2\pi f$$

$$\phi = k \cdot \sqrt{Z_0 \omega_0 C_0 / \pi}$$

γ —压电换能器总相移

t_1 —上电极相对厚度

Z_1 —上电极声阻抗

C_0 —无形变电容

k —机电耦合系数

f_0 —换能器中心频率

f —超声波频率

由式(9)可以看到器件电阻抗 Z_i 与换能器特征参数 A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 及等效声阻抗 Z_{02} 有关。在给定了换能器材料、厚度及特定的超声频率后, 矩阵 $[A_0]$ 为一常数, 此时 Z_i 只受 Z_{02} 的影响。由式(5)知 Z_{02} 与 Z_{4m} 和 $[A]$ 有关。由于金属层的厚度都较薄, 一般在微米的数量级, 可将金属膜的固有损耗及热耗影响略去, 则传播常数 T_n 为纯虚数:

$$T_n = j\beta_n \quad (12)$$

$$[A_n] = \begin{bmatrix} \cos\gamma_n & jZ_n \sin\gamma_n \\ \frac{j \sin\gamma_n}{Z_n} & \cos\gamma_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\gamma_n = \pi F t_n \quad (14)$$

t_n —各镀层相对厚度

γ_n —各镀层相移

给定了金属材料、厚度及超声频率后, $[A_n]$ 也是一常矩阵, 所以影响 Z_i 的主要因素是 Z_{4m} 。

声光介质的厚度较大, 通声方向的尺寸一般在10毫米以上, 应考虑介质中的声衰减。下面分三种情况详细讨论 Z_{4m} 。

1. 声终端负载声阻抗 Z_A 等于声光介质声阻抗 Z_m , 即 $Z_A = Z_m$:

$$\text{此时式(8)为: } Z_{4m} = Z_m \quad (15)$$

$$\text{式(5)为: } Z_{02} = \frac{Z_m A + B}{Z_m C + D} \quad (16)$$

将(16)式代入(9)式, 得出器件的阻抗值, 这个公式与文献[2]给出的计算公式相同。

2. $Z_A \neq Z_m$

此时 $T_m = a_m + j\beta_m$, Z_{4m} 由(8)式给出

$$a_m l_m = a_0 f^2 \cdot l_m$$

$$\beta_m l_m = \pi F \cdot t_m \quad (17)$$

a_0 —声光介质的声衰减系数

t_m —声光介质的相对厚度

在这种情况下, Z_{4m} 不但与声光介质的声阻抗和相对频率有关, 而且还随器件的工作频率和晶体沿通声方向长度的不同而变化。

3. $Z_A = 0$

这是 Z_A 不等于 Z_m 的一个特例。器件无吸声体, 对应着驻波器件的情况。将 $Z_A = 0$ 代入(8)式:

$$Z_{4m} = Z_m \frac{Sh T_m l_m}{Ch T_m l_m} \quad (18)$$

经化简得:

$$Z_{4m} = Z_m \frac{e^{2a_m l_m} - e^{-2a_m l_m} + 2j \sin 2\beta_m l_m}{e^{2a_m l_m} + e^{-2a_m l_m} + 2 \cos 2\beta_m l_m} \quad (19)$$

由上式可知, Z_{4m} 随频率呈周期性的变化, 变化周期由 $\beta_m l_m$ 决定, 图2给出了 $f_0 = 110\text{MHz}$, $l_m = 11.2\text{mm}$ 时三种不同情况下, 相对阻抗 Z_1 随相对频率 F 的变化关系。

三、一种新的测量声光器件中声速的方法

在给定了介质材料及通声方向的长度后, 声驻波频率为:

$$\Delta f = \frac{V_m}{2l_m} \quad (20)$$

V_m —声速

当测得驻波频率后, 就可计算出声速, 这就是这种测量方法的原理。

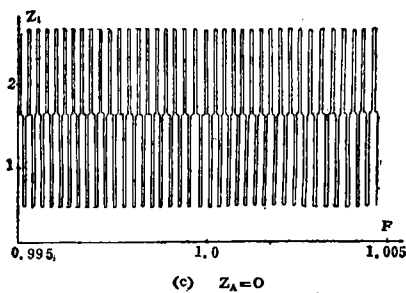
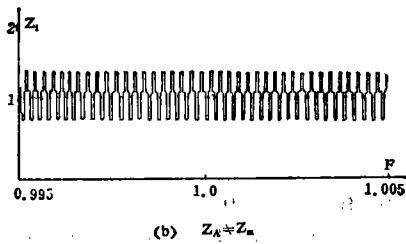
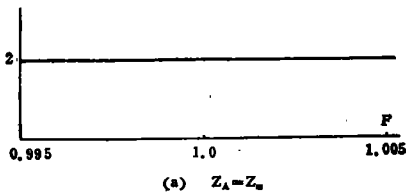


图2. 三种情况下相对阻抗随相对频率的变化

由于驻波的存在, 使阻抗呈周期性变化, 如果能够证明阻抗的变化与声驻波有同样的周期, 就可以通过测量阻抗的频率, 获得声速。

前面已经推导出当存在驻波时, 阻抗呈周期性的变化, 且由 $\beta_m l_m$ 决定。由于驻波存在:

$$\beta_m l_m = \pi = \pi F \cdot t_m \quad (21)$$

$$\text{因为: } t_m = \frac{2f_0}{V_m} \cdot l_m \quad (22)$$

$$F = \frac{f}{f_0}$$

$$\text{所以: } f = \frac{V_m}{2l_m}$$

通过对式(19)求导数的方法, 可以得到同样的结果。

由上面的结果可以看到, 阻抗的变化周期与声驻波的周期相同, 所以这种方法的原理是正确的, 图3给出了测量方框图。

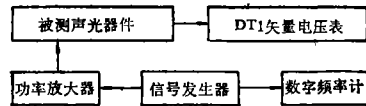


图3. 测量声速方框图

四、实验结果

用这种方法测量了几个声光器件介质中

表1. 66号器件声速测量值
(晶体沿通声方向长11mm)

	测量频率(MHz)	Δf (MHz)	声速 V_m (m/s)
第一次测量	110.1244	0.0999	2198
	110.2243	0.0985	2167
	110.3228	0.0989	2176
	110.4217	0.0986	2169
	110.5203	0.1000	2200
	110.6203	0.0957	2195
	110.7160	0.0997	2193
第二次测量	100.781	0.098	2156
	100.879	0.098	2156
	100.977	0.099	2178
	101.076	0.099	2178
	101.175	0.097	2134
	101.272	0.096	2112
第三次测量	55.224	0.100	2200
	55.320	0.097	2134
	55.420	0.100	2200
	55.517	0.097	2134
	55.617	0.098	2156
	55.714	0.099	2178
	55.812	0.099	2178
	55.911	0.099	2178
三次声速测量平均值(m/s)			2164

114 号器件声速测量值
(晶体沿通声方向长11.44mm)

	测量频率(MHz)	Δf (MHz)	声速 V_m (m/s)
第一 次量	100.081	0.027	617.8
	100.054	0.027	617.8
	100.027	0.027	617.8
	100.000	0.027	617.8
第二 次量	107.570	0.027	617.8
	107.543	0.027	617.8
	107.516	0.027	617.8
	107.489	0.027	617.8
二次声速测量平均值(m/s)			617.8

的声速, 表 1 给出了两个器件的测量结果, 这些结果与理论值(分别为2104m/s和616m/s)及用其它方法得到的结果吻合得很好。这种方法所用仪器不复杂, 容易掌握, 测量精度比较高, 能够直接测量加工好的器件(没有吸声体, 且声光介质端面垂直于声传播方向), 从而确定声光介质中声的传播速度。

五、小 结

本文给出了声光器件电输入阻抗的一般

表达式, 证明了存在声驻波的器件的电阻抗随工作频率呈周期性的变化, 且与声驻波的周期相同, 基于该原理, 提出了一种新的测量声光器件中声速的方法, 实验结果验证了理论分析, 从而证明了电输入阻抗一般表达式的正确性。

六、致 谢

声光器件由中国科学院光电技术研究所第六研究室声光器件组提供, 黎俊杰、王富元同志对实验给予了热情帮助, 特在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Sittig, E. K. IEEE Trans. Sonics. Ultrasonics., Vol. SU-16, No. 1, P. 2, (1969).
- [2] 徐介平《声光器件的原理, 设计和应用》(科学出版社1982).
- [3] 冯慈璋《电磁场》(人民教育出版社)

(上接第39页)

是时候了, 我们必须走自己的路, 赶紧发展中国自己的采油声学研究及专用设备, 未雨绸缪, 迎接世界新技术革命的挑战。

参 考 文 献

- [1] Кузнецов О. Л., Ефимова С. А. Применение Ультразвука В Нефтедобывающей Промышленности. I Квартал 1983 Г. р. 76 р. 138-139
- [2] М. Ф. Двали, О. М. Сумароков НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО 1968. №2 р45-48.
- [3] 东华石油学院采油教研室, “采油工程”第三分册 p.1 09 1977年5月
- [4] Видасюк А. Г., Скублевский Е. м. Нефть. И Газ. лром-стб №2. 1964. р49-51.
- [5] О. Л. КУЗНЕЦОВ, С. А. ЕФИМОВА А. В

ШУВИН. Т. Н. ЯГОДОВ В. Н. МАКАРОВ Н. С. МАРИНИН НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО 1981 №2 р67-70

- [6] АБДУЛЛАЕВ А. Н. МУДУЕВ М. М. СУЛТАНОВ Ю. Н. Нефтепромысловое ДЕЛО 1979 №7. р13-14.
- [7] Billyp. Morris. “Amer oil gas reporter” V18, №11 р58-59 FEB 1976
- [8] И. С. Дубинский, Ю. Ф. Жуйков. О. Л. Кузнецов, В. У. Уразганцев Нефтепромысловое ДЕЛО РНТС №16 р1-3 1978
- [9] T. R. Wright “World oil” V 191, №6 р79-85 Nov 1980
- [10] Albert G. Bodine U. S. P 3, 578, 081
- [11] А. М. ГАЕЫБИН А. В. КАЗАКОВА Ю. А. ПОЕЕУВНЫЙ Ц. А. СИДОРОВ П. М. УСАНЕВ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОЕ ДЕПО №9 р 18-21 1981.