

压电陶瓷非刚度模机电耦合系数的 附加串联电容法测量

朱锡南 叶奕坤 沈嘉祺
(上无一厂) (上无一厂) (上海科大)

压电陶瓷各种振动模的机电耦合系数 K ，均可用下列近似公式(1)(2)进行计算：

$$\frac{1}{k^2} = \frac{a}{\delta_f} + b \quad (1)$$

式中， $\delta_f = \frac{f_n - f_m}{f_m}$ ，

f_n ——最小导纳频率， f_m ——最大导纳频率，

系数 a ， b 随振动模式而异，对于非刚度模的横向长度伸缩振动模式(k_{31})， $a=0.405$ ， $b=0.595$ [1]；对于非刚度模的圆片径向扩张模式(k_p)， $a=0.399$ ， $b=0.581$ [3] 该近似公式，在大多数情况下，具有误差小于 1% 的良好精度。

采用传输线路法(4)测得振子的 f_n 和 f_m 后，即可按(1)式来计算相应的 k 。因为同时要测定 f_n 和 f_m ，该法也称共振——反共振法。

对于高机电耦合系数的压电陶瓷，用传输线路法来测定 f_n 时，由于寄生振动模式的存在，有时往往会发生困难。因此，避免测量 f_n 而只要测得 f_m 后就能求出 k 的方法，显得颇有实用价值。为区别于共振——反共振法，一般把它称之为共振法。

泛音比法(5)是一种共振法，使用于刚度模机电耦合系数的测量。附加串联电容法也是一种共振法，在国际电工委员会 IEC—483 文件中，被推荐用于非刚度模机电耦合系数的测量^[8]。该方法是：在引入一个已知的与振子串联的电容 C_L 的前后，测量串联共振频率，然后按下式计算 k ^[11]，

$$\left(\frac{1}{k^2} - 1\right) \left(1 + \frac{C_L}{C_D}\right) = \frac{a}{\eta} + (b-1) \quad (2)$$

式中， C_D ——部分夹持电容，

$$\eta = \frac{f_{mL} - f_m}{f_m}$$

f_{mL} ——振子串联 C_L 后的串联共振频率，

f_m ——振子的串联共振频率，(最大导纳频率或共振频率)。

系数 a ， b 同公式(1)。

在公式(2)中， C_D 的测量是困难的。为了克服这个麻烦，本文提出了两种具体方法——单电容法和双电容法，并导出了有关公式，设计了一些实验进行验证。现把初步结果综合于后。

单电容法

取 C_L 等于振子的静态电容 C_T 代入(2)式，得

$$\left(\frac{1}{k^2} - 1\right) \left(1 + \frac{C_T}{C_D}\right) = \frac{a}{\eta'} + (b-1) \quad (3)$$

式中， $\eta' = \frac{f_{m'} - f_m}{f_m}$ ，

$f_{m'}$ ——振子串联 C_T 后的串联共振频率。

在振子的基频附近时，可以认为

$$\frac{C_1}{C_D} \approx \frac{C_1}{C_0} = \frac{f_n^2 - f_m^2}{f_m^2}$$

C_1 ——动态电容， C_0 ——并联(分路)电容。

$$C_T = C_D + C_1$$

这样， $\frac{C_T}{C_D} = \frac{f_n^2}{f_m^2}$ 。

把上式代入(3)式,得

$$\left(\frac{1}{k^2}-1\right)\left(1+\frac{f_n^2}{f_m^2}\right)=\frac{a}{\eta'}+(b-1) \quad (4)$$

另外,由(1)式可得

$$\frac{f_n}{f_m}=\frac{a}{\frac{1}{k^2}-b}+1$$

代入(4)式,得

$$\left(\frac{1}{k^2}-1\right)\left[1+\left(\frac{a}{\frac{1}{k^2}-b}+1\right)^2\right]=\frac{a}{\eta'}+(b-1)$$

令 $\frac{1}{k^2}=x$

不难得出

$$2x^3 + \left(2a - 5b - 1 - \frac{a}{\eta'}\right)x^2 + \left(a^2 - 2ab - 2a + 4b^2 + 2b + \frac{2ab}{\eta'}\right)x - \left(a^2 + b^3 + b^2 - 2ab + \frac{ab^2}{\eta'}\right) = 0 \quad (5)$$

用数值法解此方程,并作图,就可得 $k-\eta'$

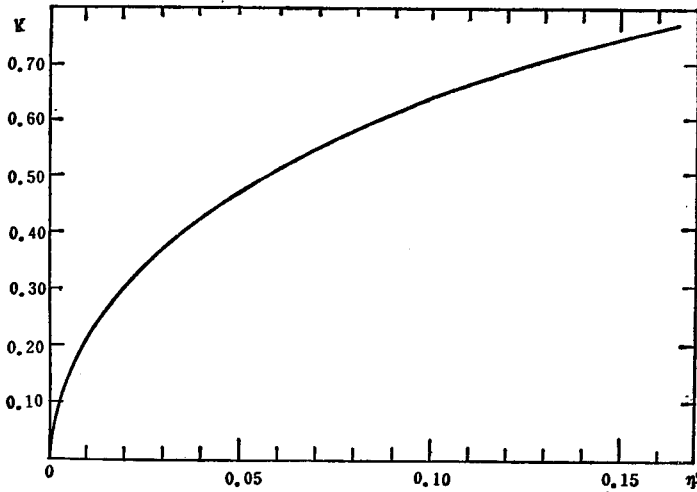


图1 $k(k_p, k_{s1})$ 与 η' 之间的关系曲线

表1 单电容法测量数据

试样编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_p	0.571	0.563	0.571	0.559	0.596	0.579	0.583	0.577	0.564	0.604
试样编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
k_p	0.574	0.607	0.597	0.600	0.612	0.576	0.548	0.593	0.587	0.557
算术平均值 \bar{k}_p	0.582									

的关系曲线,见图1,采用同一条 $k-\eta'$ 曲线, k_p 和 k_{s1} 之间的误差小于2%。

在实验中,对 $k_p \approx 0.58$ 的压电陶瓷,用同一批号的材料按同一工艺加工了大量振子,从中任取二十片,按共振—反共振法测量。发现在最小导纳频率附近,有时会出现寄生响应。其中有一片,寄生响应与主响应相等;另一片,寄生响应强于主响应。即只有18片能用共振—反共振法测量。若采用共振法—附加串联电容法(单电容法),则测量可顺利进行。二十个振子测得二十个可信的机电耦合系数值。具体数据,如表1所示。

采用单电容法时,为要满足 $C_L=C_T$ 的条件,每一振子需要逐一串接其相应的 C_L ,显然尚嫌麻烦。能否进一步克服这个麻烦呢?

双电容法

若取二个附加串联电容,

其一为 C_L ,另一为 $\frac{C_L}{2}$,则有

$$\left(\frac{1}{k^2}-1\right)\left(1+\frac{C_L}{C_D}\right) = \frac{a}{\eta_2} + (b-1) \quad (6)$$

$$\left(\frac{1}{k^2}-1\right)\left(1+\frac{C_L}{2C_D}\right) = \frac{a}{\eta_2} + (b-1) \quad (7)$$

式中, $\eta_1 = \frac{f_{m1}-f_m}{f_m}$ (8)

表2 双电容法测量数据

k	材料种类	测量方法	试样编号		
			1	2	3
k_{s1}	CM-12	I	32.37	31.90	32.87
		II	32.34	31.79	31.24
	CM-19	I	27.21	27.09	28.19
		II	27.42	27.46	27.91
	CM-45	I	20.97	19.64	19.82
		II	20.74	19.09	20.00
k_p	SN-3	I	54.45	52.64	52.72
		II	54.15	53.84	52.55
	SN-7	I	42.09	43.27	—
		II	42.08	44.18	—
	SN-12	I	15.09	14.69	15.29
		II	14.44	14.99	14.34

I——共振—反共振法

II——双电容法 $C_L=1000\text{pf}, 500\text{pf}$,III——双电容法 $C_L=300\text{pf}, 150\text{pf}$.

表3 三种测量方法比较数据

陶瓷种类	I	II	III	IV	V	
k_p	共振—反共振法	0.113	0.252	0.379	0.539	0.590
	双电容法	0.118	0.268	0.378	0.540	0.583
	单电容法	0.113	0.265	0.381	0.541	0.571

或 $k_p-\eta'$ 和 $k_{s1}-\eta'$ 表, 即可查得 k 。两种方法均有实用价值, 而双电容法更为方便些。

本工作自开展以来, 陈永权同志参加了许多实验工作, 表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Mario Onoe et al. J. A. S. A. 41, 9759-980 (1967)
- [2] 田中哲郎等《压电セラミック材料》第七章(1973)
- [3] IEC 483 "Guide to dynamic Measurements of Piezoelectric Ceramics with high Electromechanical Coupling" (1976)
- [4] IRE Standard on Piezoelectric Crystals: Measurements of Piezoelectric Ceramics, 1961, Proc. IRE, 49, 1162-1169 (1961)
- [5] Mario Onoe et al. J. A. S. A. 35, 36-42(1963)

$$\eta_2 = \frac{f_{m_1} - f_m}{f_m} \quad (9)$$

f_{m_1} ——振子串联 C_L 后的串联共振频率,

f_m ——振子串联 $\frac{C_L}{2}$ 后的串联共振频率。

(6)–(7), 得

$$\left(\frac{1}{k^2} - 1\right) \frac{C_L}{2C_D} = a \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2}\right) \quad (10)$$

若将(10)式代入(7)式, 则得:

$$\frac{1}{k^2} = \frac{a}{\delta_f'} + b \quad (11)$$

$$\text{式中, } \frac{1}{\delta_f'} = \frac{2}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_1} \quad (12)$$

(11)式与(1)式具有相同的形式, 这就表明, 只要测定三个最大导纳频率 f_m 、 f_{m_1} 和 f_{m_2} , 并由此导出 δ_f' 后, 即可根据 $k-\delta_f'$ 通用曲线求得机电耦合系数, 而不必计及具体的附加电容值。

在实验中, 选取了 k_{s1} 和 k_p 不同的压电陶瓷振子各三种, 各种试样均为10片, 同时用共振——反共振法和双电容法进行测量, 其结果部分地列于表2中, 可以发现, 两种测量方法的数据相近。但用双电容法测的数据, 分散性来得小。双电容法的测量误差与附加串联电容的选择有关, 如 C_L 的值选得过大或过小, 都会引起较大的测量误差。建议 C_L 可选取与振子静电容 C_T 相近的容量。

另外, 对 k_p 为 0.1 至 0.6 左右的五种压电陶瓷振子, 分别用共振——反共振法、单电容法和双电容法进行测量, 并计算其相应的 k_p 值, 获得了比较满意的结果, 对比数据列于表3中。

结 束 语

共振法能避开寄生振模引起的麻烦, 具体办法有单电容法和双电容法。

采用双电容法时, 先测得 δ_f' , 然后查照通用的 $k-\delta_f'$ 曲线求得 k 。采用单电容法时, 先测得 η' , 然后查照本文新作出的 $k-\eta'$ 曲线