

声道面积函数和元音共振峰²频初步报告

On the relationship between cross-sectional area function of vocal tract and formant frequencies of vowel, A preliminary report

鲍 怀 翹

中国社会科学院语言研究所

将声道作为无损声管的线性系统。当每段截面 $A(x, t) = A$ 为常数时，则声管中的声压 P 和体积速度 U 满足下列微分方程：

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{\rho}{A} \frac{\partial U}{\partial t} \\ -\frac{\partial U}{\partial x} &= \frac{A}{\rho c^2} \frac{\partial P}{\partial x} \end{aligned} \quad \text{---(1)}$$

对声学量 P (压力)、 U (体积速度)、 P/A (声感抗) 和 $A/\rho c^2$ (声容) 与电气量 V (电压)、 i (电流)、 L (电感) 和 C (电容) 之间的类比关系，〔2〕文已作了详尽的推导，因而有可能运用传输线理论来计算声道的共振频率。

图 6 为无损多节声道 T 型网络摹拟，采用阻抗相移法〔9〕在 620/L-100 计算机上计算了普通话 9 个单元音的共振峰频率。此外，人为地改变声道某一部份的面积函数，计算各共振峰的变化，期望找出声道各部位与各共振峰的简单关系。

阻抗相移法的定义为：

$$Z_{iq} = Z_{qj} \text{tg} \left\{ \omega L_q / c \dots \text{arctg} \frac{K_2}{K_1} \text{tg} [\omega L_2 / c + \text{arctg} K_1 \text{tg} (\omega L_1 / c + \text{arctg} b_0 / z_0)] \right\} \quad \text{---(2)}$$

其中 Z_{iq} 为声门阻抗， L_1 为声道每段长度， c 为声速， K_1 为两相邻截面积之比，也就是反射系数 r 。

$$r_i = \frac{A(i+1) - A(i)}{A(i+1) + A(i)} \quad i=1, 2, \dots, N \quad \pi \quad \text{--- (3)}$$

当相角 $\varphi = \omega L / c = 2\pi / \lambda$ 由 $(2n-1)\pi/2$ 变到 $n\pi$ 时，声门阻抗 Z_{1q} 也随之变化

$$Z_{1q} \approx \begin{cases} \infty, & \omega L / c = (2n-1)\pi/2 \\ 0, & \omega L / c = n\pi \end{cases} \quad \text{--- (4)}$$

$n=1, 2, 3, \dots$

这就表明，随着声源频率由低到高改变时，会出现一系列极大值和零值，这些极大值就是声道的共振峰频率。公式(2)表明，对共振峰频率有决定意义的是 I_i 和 K_i 。

由声道的矢状距离 d 转换为面积 A 已有许多学者做过了 [3] [4] [5] [6]。本文根据 I ad foged 的变换曲线 [5] 计算出口腔、上咽腔和下咽腔的变换公式为：

$$A_{\text{口腔}} = 2.50 x^{1.20}, \quad A_{\text{上咽}} = 3.20 x^{1.26}, \quad A_{\text{下咽}} = 3.62 x^{1.30}$$

其中 $x = d$ ，唇形面积 $A_0 = \pi ab$ (椭圆公式)， $a = h/2$ (h 为唇高度)， $b = w/2$ (w 为唇宽度)。 I_0 为门齿至双唇外侧切线的距离。唇园度 $B = I_0 / A_0$ ， B 值愈大，唇度愈园。

2、 结 果

2.1 普通话单元音的共振峰频率计算:

普通话九个单元音的截面积函数见表一。这是根据〔10〕文的x光矢状图(发音人的编号为“2”)实测d计算得到的。表二是根据表一的数据计算得到的头5个共振峰频率(F_{i0})。若将各元音的头两个共振峰频率值填入双对数刻度纸上,得到声学元音图(图7)。

表二的共振峰值(F_{i0})与〔10〕文给出的普通话九个单元音女声实测平均共振峰值(F_{im})比较显示出,它们各自在声学元音图上的相对位置是很相似的,特别有意思的是〔ɿ〕和〔ʅ〕的位置,〔ɿ〕在前、〔ʅ〕在后(〔ʅ〕的 F_2 大于〔ɿ〕)。这种一致性说明计算方法反映了生理上的特点,也再次肯定了〔10〕文对普通话单元音〔ɿ〕、〔ʅ〕声腔具有两个舌高点(双焦点)的分析是正确的和有效的。

(表一见下页)

从两者的共振峰频率绝对值上看,差异是不小的,主要是 F_{10} 偏低, F_{20} 高低不一,造成这种差异的原因将在下面加以讨论。

表一 普通话单元音面积函数

单位: cm^2

元音	i	u	y	a	o	ɤ	e	ɪ	ʌ
1	1.88	0.19	0.25	3.79	1.42	2.31	2.35	1.34	0.33
2	0.30	0.35	0.30	4.70	3.10	1.82	2.45	0.30	0.40
3	0.41	3.15	0.62	6.35	5.55	3.95	1.78	0.18	0.62
4	0.18	6.18	0.23	5.02	5.02	2.96	1.14	0.78	0.28
5	0.32	4.48	0.41	6.36	3.78	3.78	1.21	2.90	1.65
6	0.36	3.80	0.45	5.47	3.80	3.52	2.08	3.96	1.82
7	0.72	2.31	1.16	3.62	1.40	1.55	3.62	3.62	1.82
8	2.06	1.20	3.16	2.19	1.20	1.10	4.18	2.61	2.06
9	5.02	0.57	5.58	1.65	0.89	1.32	4.72	3.16	3.78
10	5.90	0.56	5.90	1.11	0.89	1.92	4.37	2.89	4.70
11	6.11	0.55	6.40	1.58	1.34	4.24	3.93	3.79	4.96
12	5.88	1.72	6.10	1.24	1.48	4.90	3.62	4.50	4.00
13	5.40	1.83	5.78	1.58	2.24	3.79	3.52	3.23	3.03
14	3.57	2.52	3.98	1.92	2.52	4.37	2.89	3.34	3.34
15	2.42	1.65	2.21	2.42	2.12	2.42	2.12	2.42	2.42
16	1.62	1.20	1.82	1.62	1.42	1.62	1.42	1.62	1.82
17	1.20	1.00	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
18	1.60	2.00	1.80	2.00	1.80	2.00	1.60	1.40	1.60

2·2 声腔面积对共振峰的影响：假若我们以舌高点为基点将声腔区分为前腔和后腔的话，那末这两部份在实际发音中是互补的，也就是说，前腔的缩小会使后腔增大，如发〔i、y〕这类前高元音那样，当发后元音〔u、o、a〕时，后腔缩小而前腔扩大。因此在实际发音中我们不能孤立地研究某一腔体与共振峰的关系，但是我们可以借助发音器管模型来达到这个目的。

2·2·1 前腔的影响。图8(A)是前腔面积变化的图解，横轴代表声道长度，第1点为双唇，第2点是门齿，18点为声门；纵轴是面积。每条曲线代表不同形状的声道，其中o为声道原型，d代表加大前腔但唇形面积保持原样，e是在d的基础上扩大唇、齿点上的面积，f代表唇、齿面积的进一步扩大，相反，b代表前腔面积的缩小，a代表前腔面积的进一步缩小。

图8(B)是前腔面积变化引起各共振峰位置移动的情况。横轴代表不同面积的声道，字母含义与图8(A)相同；纵轴代表共振峰频率。每一声道有5个共振峰。我们用线段将相同的共振峰联结起来，以示共振峰频率随声道面积不同而升降的情况。共振峰频率的具体数值见表三。

图8(B)显示出前腔变化对F1有明显的影响。一般说来，前腔愈大，F1就愈高而F2则愈低。F3只有在前腔非常窄的

情况下，如前高元音〔i、y〕的声腔，才会明显升高。由此可见，〔i、y〕的F₃基本上是舌头收紧点两边1/4波长共鸣，也可以解释为舌通道加前腔的半波长共鸣。〔8〕

前腔由小变大，很像元音发言中舌位由高变低的变化，如〔i - e - ε - a〕，共振峰频率随舌位的下降，F₁逐渐升高，F₂逐渐降低。

图8(B)上O、a代表的是在前腔面积不变条件下改变唇、齿面积对共振峰的影响。共振峰变化曲线表明：唇、齿面积加大使F₁、F₂都有增加的趋势，这区别于单纯改变前腔面积。

2·2·2 后腔对共振峰。图9(A)是后腔面积变化的图解，其中的线b为声道原形(同图8(A)O，下同)，a为扩大后腔，c和d都是缩小后腔。

表四列出了由不同后腔面积计算得到的共振峰频率，根据表四绘制了共振峰变移曲线(图9(B))。这些曲线显示出，随着后腔面积的缩小，F₁上升而F₂则下降，F₃有升高的趋势。F₄和F₅的变化不大，F₄微升而F₅微降。

在实际发音中，后腔面积变化在前元音中比较明显，〔i〕的咽腔最宽，〔a〕的最窄。因此对前元音来说，前后腔面积变化是互补的，即前腔面积的扩大意味着后腔的缩小，而其声学效

果是相同的:

前腔扩大=后腔缩小—
→ F1 升高
→ F2 下降

2·3 唇形面积对共振峰。前面已提到唇形面积 A 。与辐射阻抗有直接关系(见式())，它是计算声道共振峰频率的边界条件。图 10(A) 是不同唇形的声道面积函数图，唇面积分别为 0.15 cm^2 (a)、 0.6 cm^2 (b)、 6.3 cm^2 (c) 和 9.3 cm^2 (d)，其中曲线 b 为原形。考虑到实际发音中唇、齿及后续点往往是联合行动的，因此在改变唇形时也相应地改变后续点的面积。

表五开列了由图 10(A) 面积函数计算得到的共振峰频率。根据表五绘制的共振峰变移曲线见图 10(B)。这些变移曲线显示出，F1、F2 和共 F3 都随唇形面积的增大而升高。特别要指出的是，b-c 段事实上只改变唇齿的面积，F1、F2 和 F3 的升高比较明显。这一点得到图 8(B) 中 d-c 段的印证。图 10 中 a-b 段与 c-d 段因为还包括唇齿后续点面积的变化，因此 F1、F2 的上升比较平坦。F4、F5 无大变化，但从 b-c 段看，与头三个共振峰正相反，唇齿面积加大，F4、F5 有些

微的下降。

我们在面积函数推导一节中已提到 I_1/A 。表征园唇度 R ，唇齿面积小，园唇度 R 就大，因之 F_1 、 F_2 和 F_3 都要低于相应的展唇之音。这一点也得到〔10〕文共振峰数据的证实。

2·4 舌高点前后移动对共振峰。上面已提到舌高点是区分前腔后腔的基准点，因此舌高点在声道横轴上的移动也包含了两个腔容积的变化。图 11(A) 给出了舌高点四种位置的声道面积变化曲线。曲线 a 表示舌高点距唇最近，而曲线 d 靠近声门，曲线 b 为原型。

表六是变更舌高点位置计算得到的共振峰频率。图 11(B) 是表六的图解，共振峰频率的变化显示出 F_1 随舌高点后移而升高，上升的幅度是很小的 ($332\frac{H_2}{H_1}$ — $382\frac{H_2}{H_1}$)； F_2 与之相反，随舌高点后移而降低。这种变化反映了元音发音中由前元音向后元音的移动。Jindblom 和 Sundberg(1971)〔7〕的舌体位置移动实验得到了相似的结果。

2·5 声道长度对共振峰频率。公式(2)已指明声道长度和截面积对共振峰频率有决定意义。考虑到共振峰的驻波特

性，长度比截面积更为重要。

声道长度对共振峰频率的影响见表七。表中“长度比”是指与原型声道长度之比， $r=1$ 即是原型声道，它的每段声道的实际长度是 0.9410m。图 12 是根据表七的数据画成的共振峰曲线。由图可见，长度对共振峰频率的影响是十分强烈的，而且对所有的共振峰具有相似的影响。声道愈长，频率愈低，反之则反是。这些共振峰变移曲线都是幂函数形式，它们分别为：

$$\begin{aligned} F_1 &= 332r^{-0.93} & F_2 &= 1385r^{-0.96} \\ F_3 &= 2295r^{-0.98} & & \dots\dots (13) \end{aligned}$$

表七中有些空缺的数据并不是因为声道的缩短使这些共振峰消失了，而是由于我们的程序所规定的扫描频率 ω 的高限为 5000 Hz，当高次共振峰频率值超过此限时，程序本身就给不出共振峰频率值了。但是我们可以凭借它们的幂函数关系来予测共振峰频率，如声道长度比 $r=0.25$ ，它们 F_1 是 1135 Hz，那末 F_2 、 F_3 分别是：

$$F_2 = 1385 \times 0.25^{-0.96} = 5241$$

$$F_3 = 2295 \times 0.25^{-0.98} = 8929$$

在实际发音中，声道长度的影响也是十分明显的。一般来说，

女人的声道比男人短，儿童的声道最短。因此从共振峰的平均值来说，女人为男人的1.25倍，儿童为男人的1.35倍。〔10〕

3. 讨 论

3.1 共振峰计算值和实测值的比较。为了检查计算中各环节的合理性，我们列表比较了共振峰实测值 (F_{1m}) 和计算值 (F_{1c}) (见表八)。实测值 F_{1m} 并非与 x 光照相同步录音得到的，而是事后在录音室中单独录音，并经 B & K 2105 分析得到的。我们可以通过表八中的 F_{1m}/F_{1c} 和 F_{2m}/F_{2c} 之比，看出计算值与实测值的差距。

对第一共振峰来说，9个单元音的平均比， \bar{X} ，为1.52，标准偏差 σ ，为0.09。这就是说 F_{1m} 要比 F_{1c} 大50%左右，而 σ 值仅为9%，说明各音比值之间的波动性是很小的，因而可以把50%的差值归因于系统误差。但对第二共振峰来说， $\bar{X}=1.05$ ，好像 F_{2m} 与 F_{2c} 十分接近，但 $\sigma=0.28$ ，这就表明各元音之间的比值波动性很大(1.42-0.66)，所以，应该从计算方法上来查找原因。我们初步认为可能与面积函数变换的系数 a、b 选择不当有关。

表八 共振峰实测值与计算值的比较

	F1 _m (Hz)	F2 _m (Hz)	F1 _m F1 _c	F2 _m F2 _c	F1 _m F1' _c
i	328	3000	1.49	1.35	0.86
u	428	606	1.40	0.73	0.90
y	338	2900	1.66	1.40	0.88
a	1028	1300	1.65	1.03	1.17
o	795	805	1.48	0.66	1.06
ɤ	686	1130	1.40	0.73	1.01
e	673	2575	1.44	1.42	1.03
ɪ	490	1768	1.60	1.09	1.02
ɨ	465	2010	1.56	1.07	0.96
\bar{x}			1.52	1.05	0.99
σ			0.09	0.28	0.09

在第10届国际语音学会上, Ionchamp等人(1983)⁽¹¹⁾的报告中提到F1的计算值与实测值之间存在着系统的误差。他们认为这是由于腔壁振动造成的, 他们提出了一个F1的校正公

式:

$$F1' = \sqrt{F\omega^2 + F1c^2} \quad \text{--- (14)}$$

其中 F_w 为与腔壁振动有关的因子:

$$F_w = 0.42 F_{1c} + 187 \quad [12] \quad \text{----- (15)}$$

根据式 (14) 和 (15), 我们对 F_{1c} 进行了校正, 得到了 9 个单元音的一组校正值, $F_{1'c}$, 一并列于表八。我们进一步比较了 F_{1m} 与 $F_{1'c}$, 它们的平均比值 $\bar{x} = 0.99$, 标准偏差 $\delta = 0.09$, 表明了经过腔壁振动因子的权重后, 实测值与计算值符合得相当好。

再回过头来评论 F_2 。上面已提到 F_{2m} 与 F_{2c} 之间的误差较大。仔细检查起来, 前高元音 [i]、[y] 和 [e] 的 F_{2m}/F_{2c} 偏高, 它们的发音特点是前腔窄小; 后元音 [u] [o] 和 [ɔ] 的 F_{2m}/F_{2c} 偏低, 其特点是后腔狭窄。由图 9 (B) 和 3·2 节中的图 14 可推知, 前元音缩小后腔会使 F_2 降低, 后元音缩小后腔会使 F_2 升高。这就启示我们要适当减小咽腔的两个系数 a、b。

3·2 声道原始构形对共振峰的影响。在 2·2 节中分别给出了前腔、后腔变化引起共振峰频率变化的规律, 但那是特定声道构形 (图 8 (A) O 曲线) 条件下的结果。它能否代表所有

不同的原始构形呢？

Pant(1960)^[8]应用赫姆霍兹双管共鸣器理论对六个俄语元音进行了研究。他用 V_1 、 l_1 和 A_1 代表前腔的容积、长度和面积，用 V_2 、 l_2 和 A_2 代表后腔的容积、长度和面积。用参数 $r = V_1 l_2 A_2 / V_2 l_1 A_1$ 作为表征声腔和共振峰关系的一种可能的手段。他指出当 $r > 1$ 时，后腔与 F1 的关系胜过 F2，前腔与 F2 的关系超过 F1；当 $r < 1$ 时，关系相反。他进一步指出，[u] 的后腔局部面积的增加对 F1 的作用较小，改变 [a]、[o] 的前腔面积，对 F1 的影响不大。由此我们可以断定：在不同 r 值情况下，也就是不同的原始构型条件下，改变前腔或后腔面积，对共振峰的影响是不同的。因此图 8 (B) 9 (B) 的声腔—共振峰关系曲线，只是对特定原始构型来说才是正确的。

为了证实这点，我们以 [u] 的声腔（面积函数数据见表一）作为原始构型（图 13 A 曲线 b），扩大后腔（曲线 a）和缩小后腔（曲线 c、d）并计算了共振峰频率（见表八）。根据表八数据绘制了共振峰频率移曲线（图 13 B）。由数据和曲线看，[u] 后腔的扩大使所有的共振峰明显降低，其中以 F3 为最大，F2 次之，F1 最小。与图 9 (B) 比较起来，F1 的走向相同，F2

的走向相反。这与 Fant 利用赫姆霍兹双管共鸣器理论所得出的结论是一致的。

表八 [u] 后腔变化对共振峰的影响 单位：赫兹 (Hz)

声道 \ 共振峰	F1	F2	F3	F4	F5
a	191	591	801	3257	3998
b	304	827	2614	3756	4472
c	328	843	2753	3756	4710
d	397	965	2863	3907	4840

鉴于以上的实验，我们可以认为，对各不相同的原始声道构型，按比例地去加大或缩小前腔（后腔），所得到的共振峰变移曲线是不相同的。但是，可以将不同的原始声道构型进行归纳成几类，如 [i]、[u]、[ə] 和 [a] 四类，找出各类的共振峰变移曲线。这样做是可行的而且在实际预测中是有用的。

4、 结 论

4·1 本文介绍了由发音器管矢状面求导面积函数、利用传输线理论的阻抗相移法计算共振峰频率的方法是可行的。这种方法对舌面元音是适用的，而且对具有双焦点的舌尖元音也是适用的。计算值与实测值之间的较大差距说明需要选择更适当的系数 a 、 b 。

4·2 用 I_0 / A_0 之比来表征园唇度证明是有效的。园唇将影响所有共振峰的降低，对头三个共振峰的影响尤为明显。

4·3 前腔的扩大意味着舌位的降低，使 F_1 升高、 F_2 降低；后腔的扩大意味着舌位的前伸，使 F_1 降低、 F_2 升高。前腔、后腔与 F_1 、 F_2 之间存在着一种内在的关系：当 V_1 / V_2 增大时（即前腔扩大）， F_1 升高， F_2 降低；当 V_1 / V_2 减小时（后腔扩大）， F_1 降低， F_2 升高。由此可见， F_1 、 F_2 的变化取法于前、后腔容积之比。

4·4 在不改变声道舌高点宽度条件下，改变舌高点前后的位置， F_1 的影响甚小（波动幅度仅为 50 Hz），但对 F_2 有较大影响。舌高点愈接近后咽壁， F_2 愈低。这是对 $F_1 \rightarrow$ 舌位高低、 $F_2 \rightarrow$ 舌位前后的强烈支持。舌高点前后移动对共振峰

的影响, 也符合 V_1/V_2 与共振峰频率变化的关系。

本实验是一次初步尝试, 还有很多工作要做。对 P. Ladefoged 教授来华期间提供的指导和有益的讨论仅表谢意!

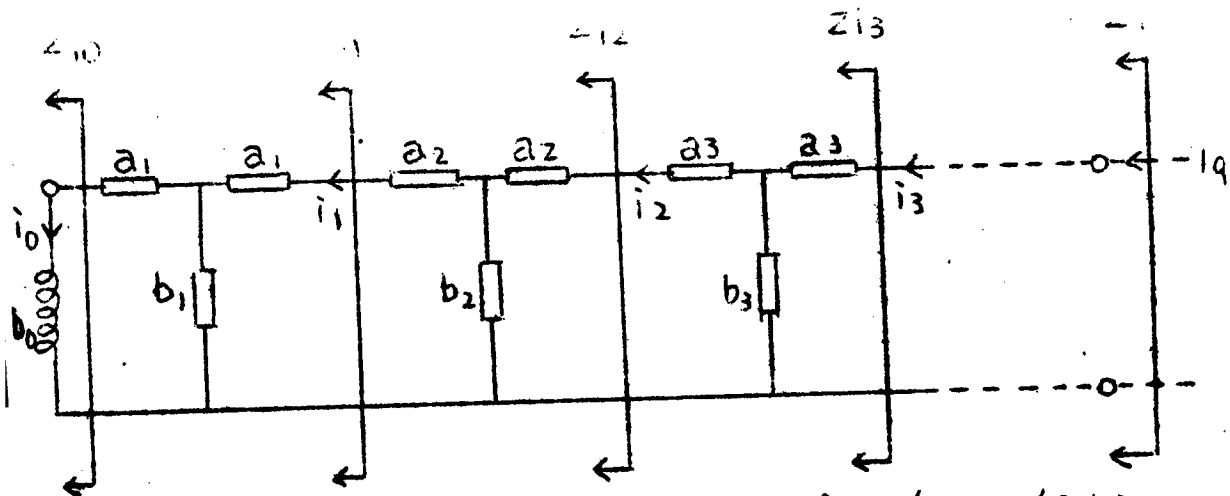
参 考 文 献

- (1) 邹晓魁: 语音研究的新发展, 吉林大学学报 (社科版) 1980年第2期
- (2) Rabiner, L.R., and Schafer, R.W., (1978) Digital processing of speech signals, Prentice-Hall, New Jersey.
- Heinz, J.M., and Stevens, K.N., (1964) On the derivation of area functions and acoustic spectra from cine-radiographic films of speech, JASA 36:1031(a)
- (4) Sundberg, J., (1969) Articulatory differences between sung and spoken vowels in singers, STL-QPSR 1/1969: 34-45
- (5) Wood, S., (1982) X-ray and model studies of vowel articulation, Working papers 23. 1982, Lund University
- (6) Johansson, C., et al (1983) From sagittal distance to area, STL-QPSR 4/1983
- (7) Lindblom, B., and Sundberg, J., (1971) Acoustical consequences of lip, tongue, jaw, and larynx movement, JASA 50:1166
- (8) Fant, G., (1960) The acoustic theory of speech production, Hague
- (9) Liljencrants, J., and Fant, G., (1975) Computer program for VF-resonance frequency calculations, STL-QPSR 4/1975

(10) 鍾振鐸 = 普通話單元音的生理解釋, 《中國語文》
1984年第2期

(11) Lonchamp, F., Zerlign, J.P., and Leferer.
(1983) Estimating vocal tract area functions;
A progress report, Proceeding of 10th ICPS, p:271

(12) 式(14)的原文為 $F_w = 0.4Z F_{1u} + 187$, 其中 F_{1u}
即是本文 F_{1c} , 而“Z”可能是“2”之誤排, 本文
引同時作了更正。



$$b_0 = j\omega g l_0 / A_0$$

$$a_n = Z_n j \operatorname{tg}(\omega l_n / 2c)$$

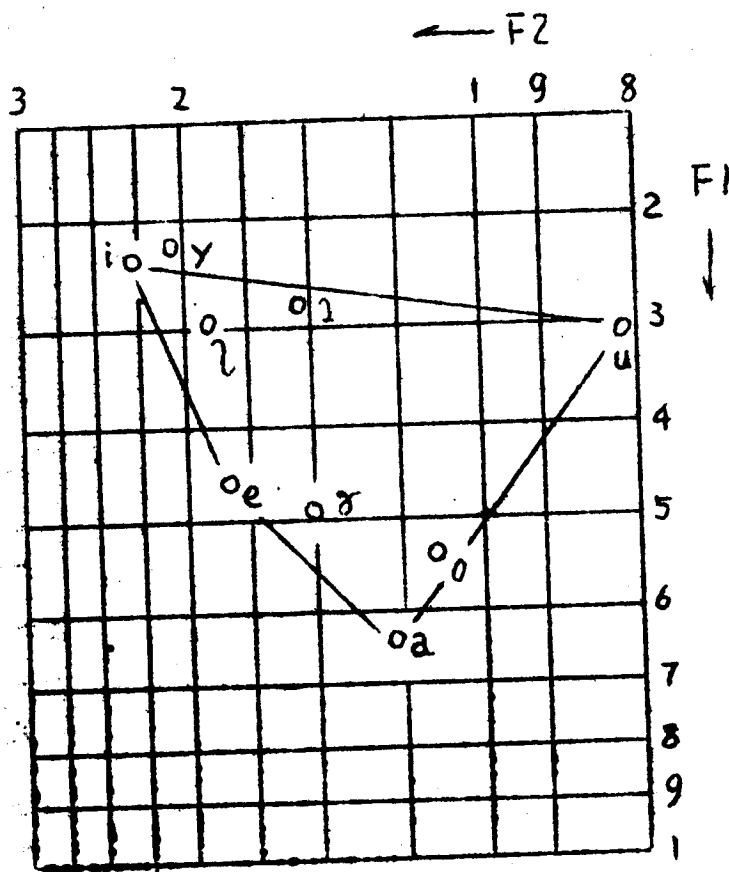
$$l_0 = 0,8 \sqrt{\Delta_0 / \pi}$$

$$b_n = Z_n / j \sin(\omega l_n / c)$$

$$Z_n = \rho c / A_n$$

$$a_n + b_n = Z_n / j \operatorname{tg}(\omega l_n / c)$$

图6. 无损多节声道T-网络摹拟 (引自Liljencrants & Fant(1975))



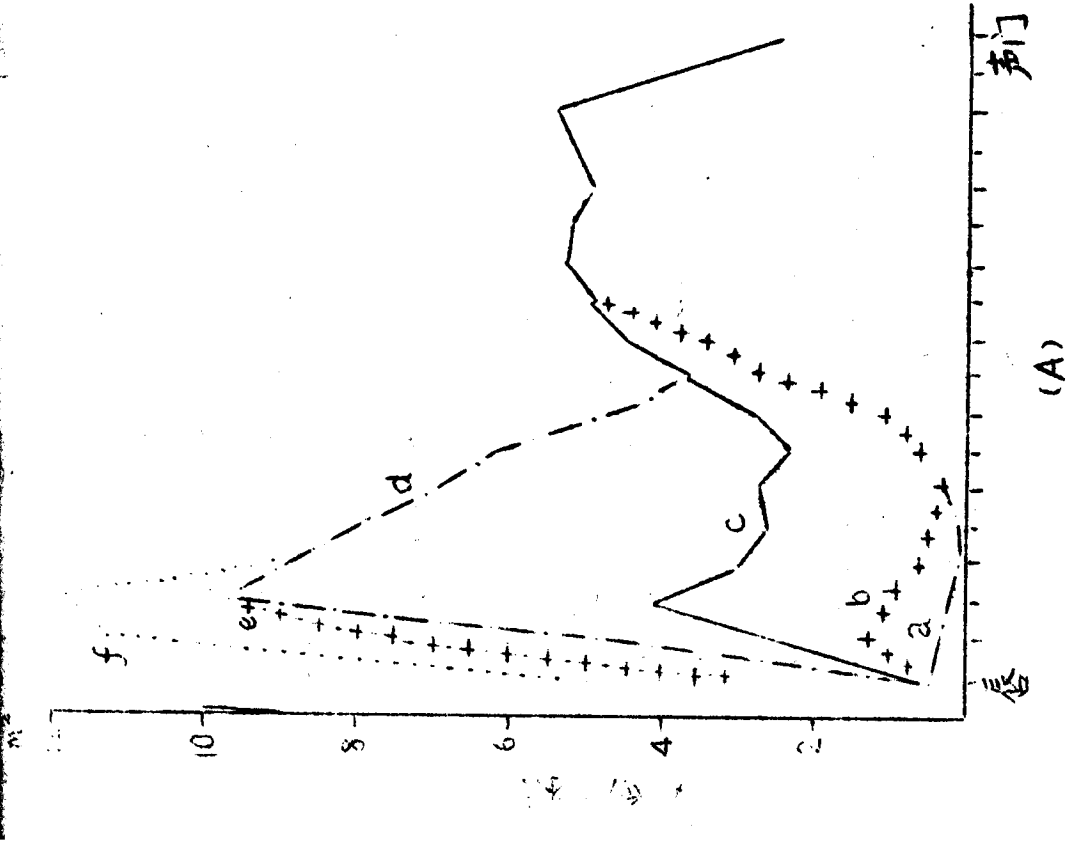
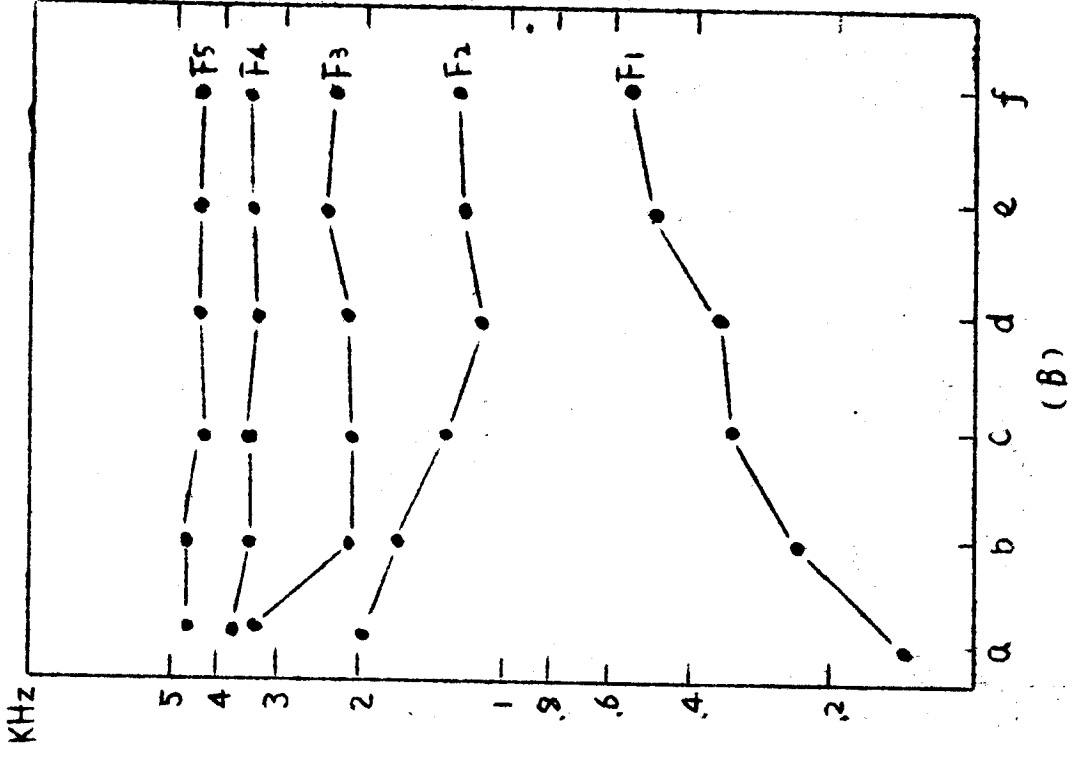


图8. 前腔面积变化(A)对共振峰的影响(B)

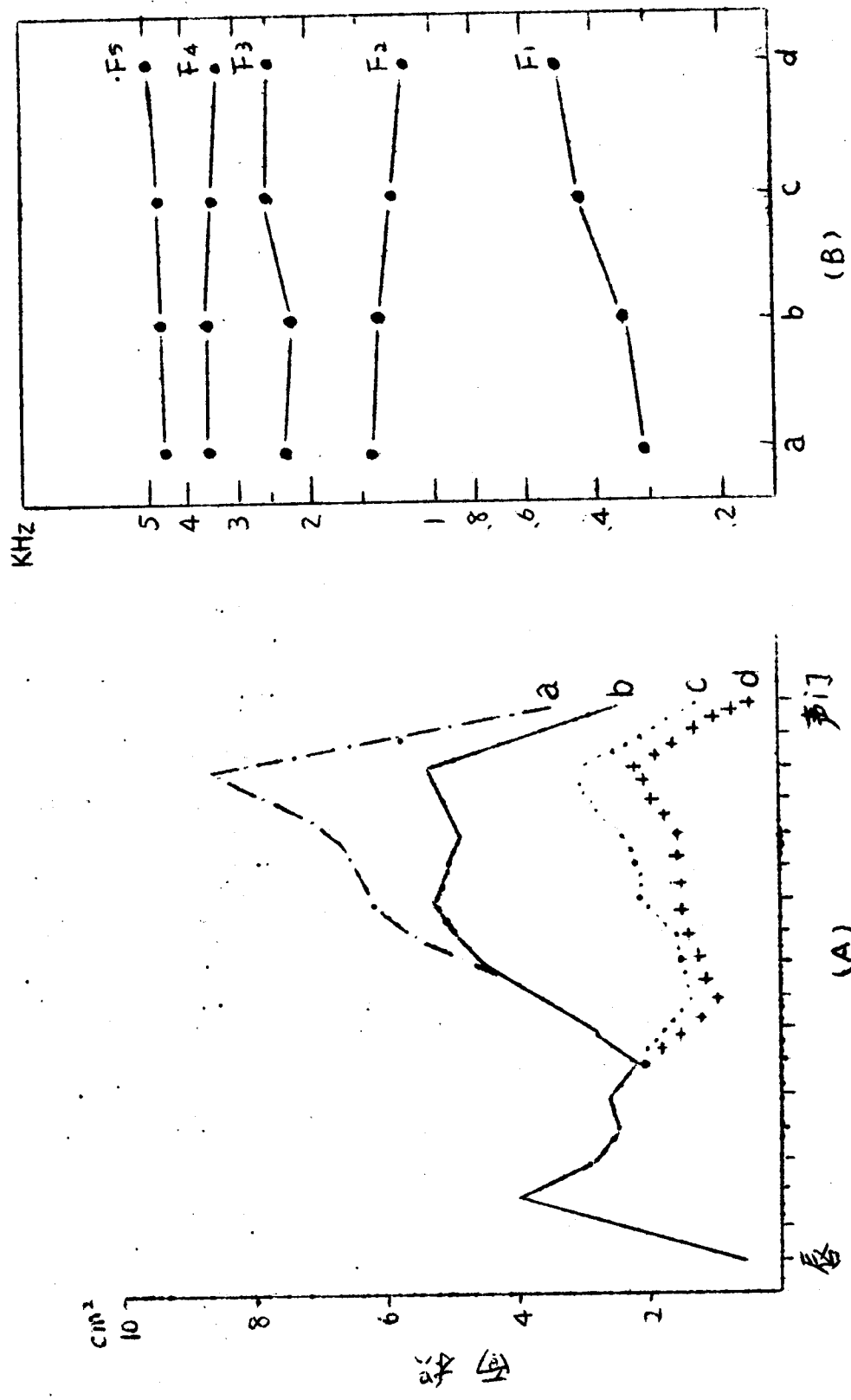


图 9. 后腔面积变化(A)对共振峰的影响(B)

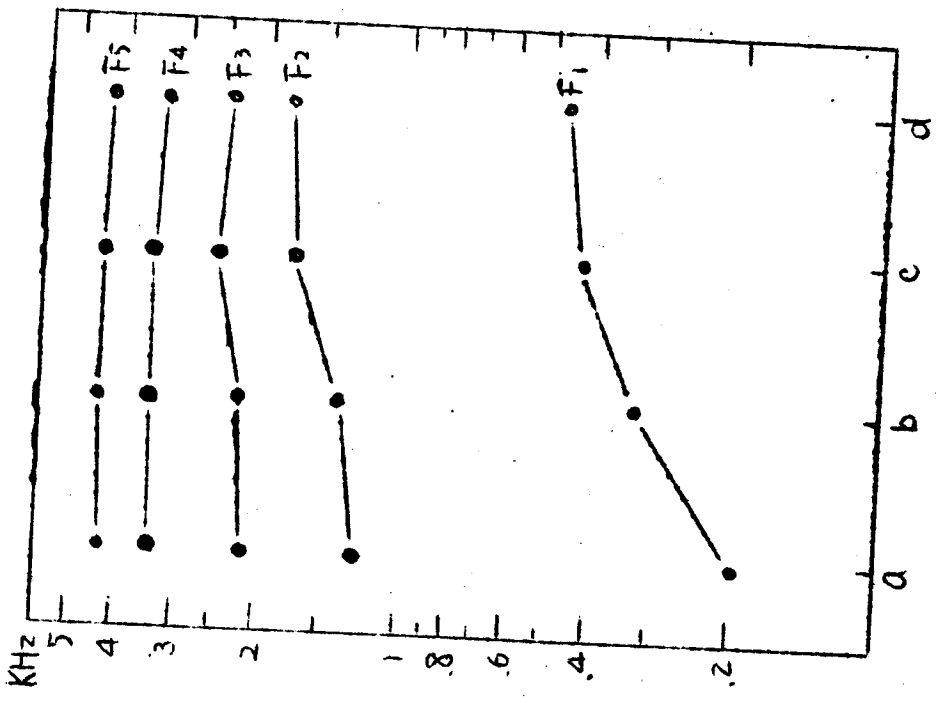
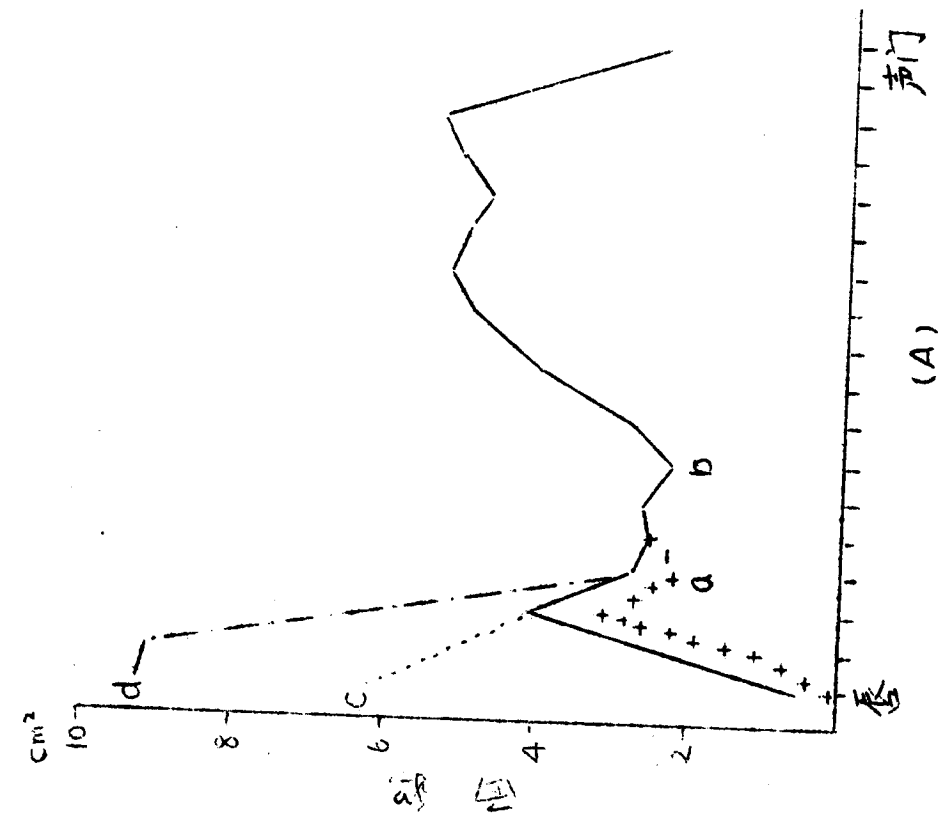


图10. 唇面积变化(A)对共振峰的影响(B)

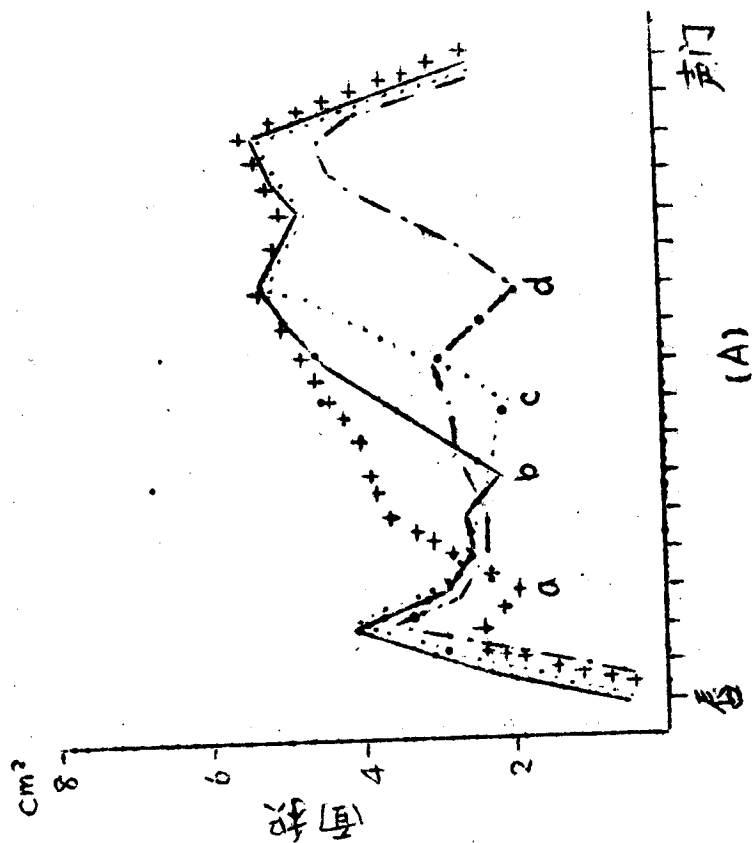
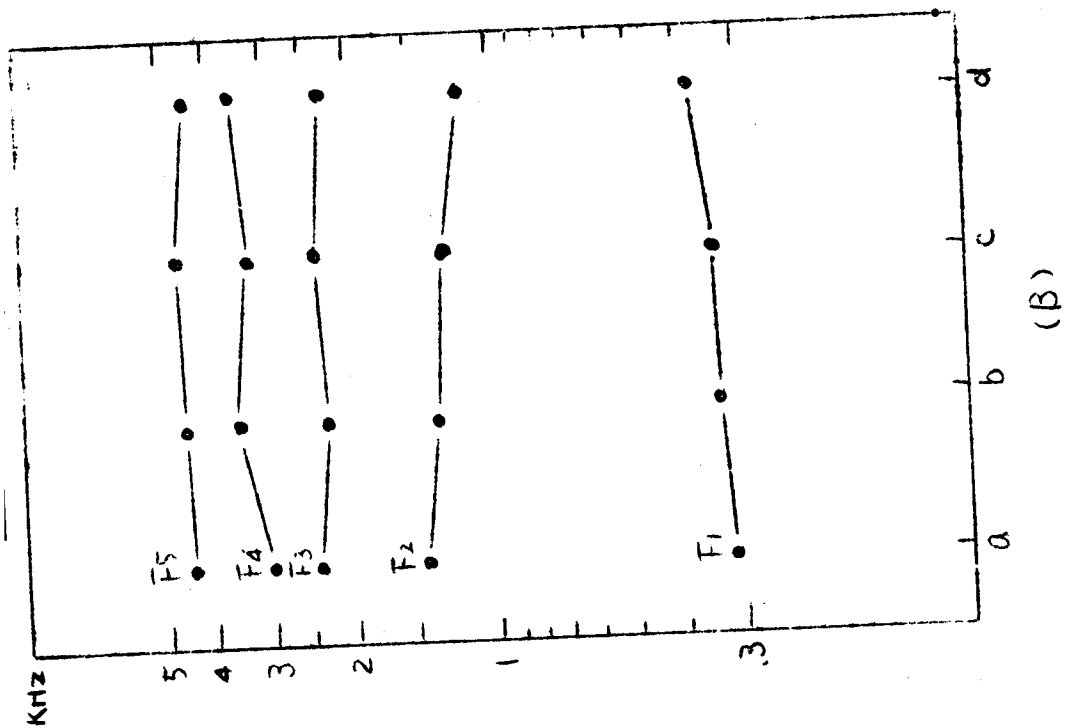


图 11. 台高点位置变化(A)对共振峰的影响(B)

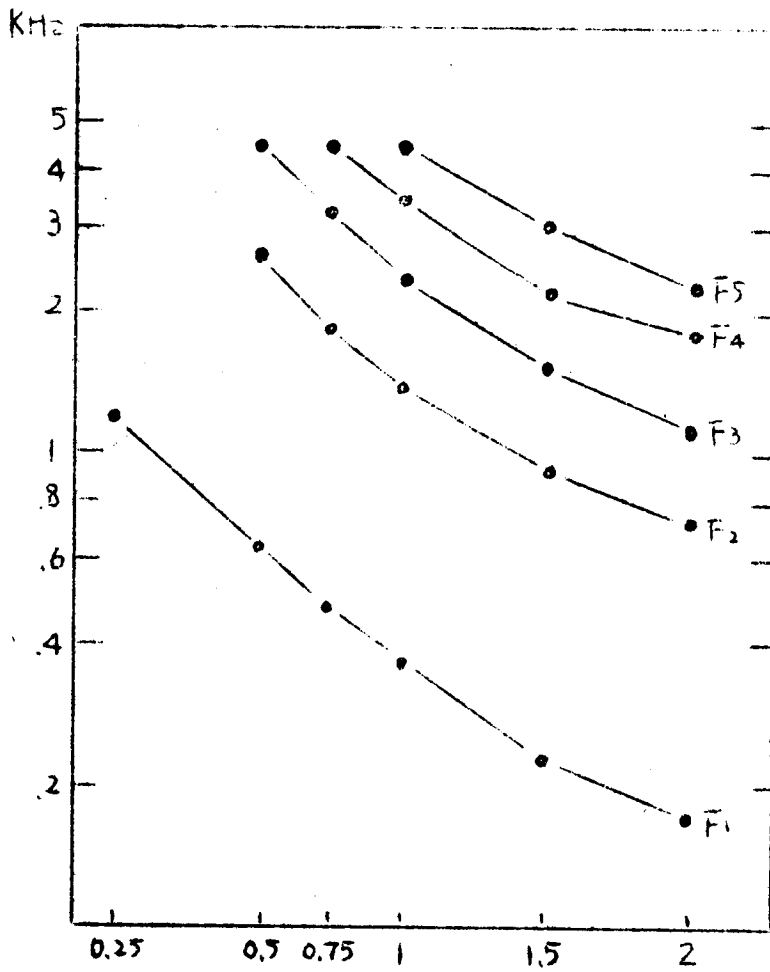


图12. 声道长度对共振峰的影响

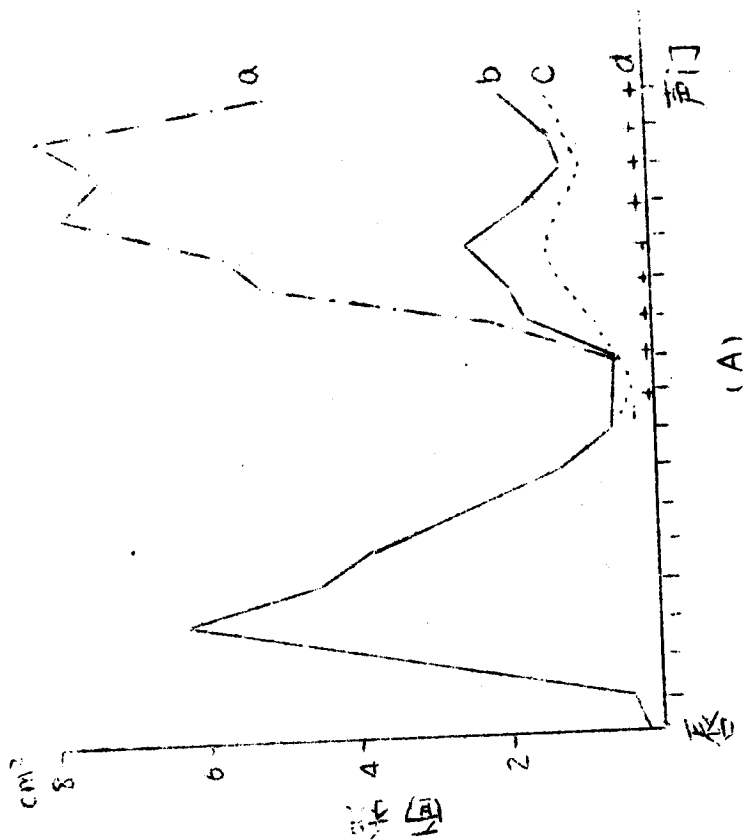
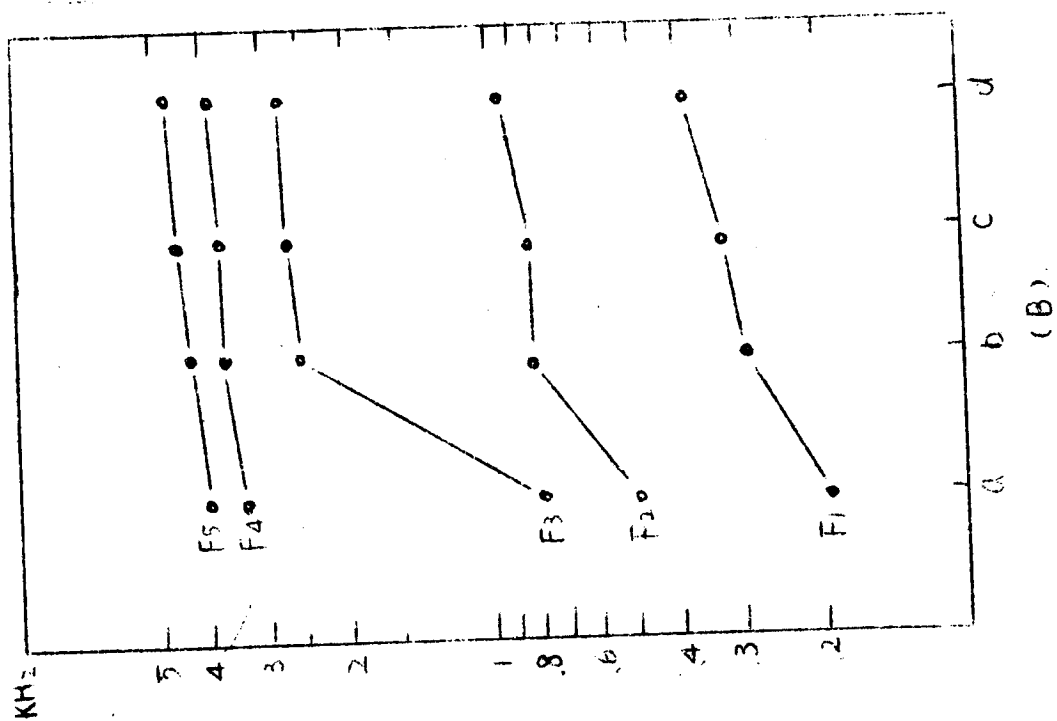


图13. [u] 后腔面积变化(A)对其共振峰的方向(B)