

大功率超声换能器系统的研制

袁易全 杨厚基

(南京工学院) (无锡超声设备研究所)

一、引言

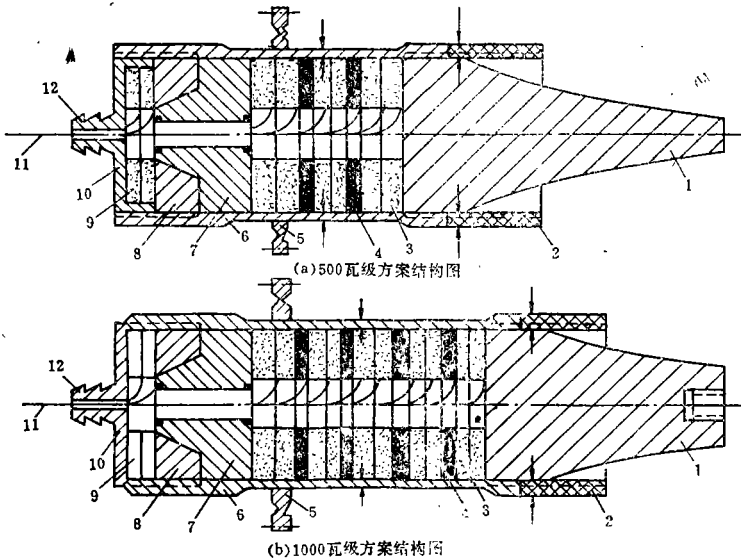
随着化学合成工业的发展和料塑制品的广泛应用。近几年来,超声塑料焊接技术^[1]迅猛发展,超声焊接设备急需开发推广。因为它的突出优点为:(一)工件变形极小;(二)被焊接材料不易变质老化;(三)可靠性高;(四)速度快、易于自动化;(五)没有环境污染。

本文从小信号的特性估计大功率状况这一原则出发,根据超声塑料焊接的特殊要求,

进行了500瓦级及1000瓦级换能器的简易结构设计,建立了数学模型,并进行了计算机辅助计算以及通过工艺装配和实际测量,表明了理论与实际的基本一致性。本文还列举了某些初步的功率试验结果,验证了大功率负载的可行性。

二、换能器结构系统

本文设计的纵向压电功率换能器系统采用两种方案:(1)500瓦级的方案(见图1(a))设计成全波长组件,压电堆和前后负载块共



- | | | |
|------------------|----------------|----------------------|
| 1. 辐射头(钛铝合金), | 2. 微调套筒(45°钢), | 3. PZT—8压电陶瓷片主晶堆, |
| 4. 4mm厚铜电极(散热片), | 5. 节点支座, | 6. 45°钢薄壳予应力套筒, |
| 7. 后振动体(45°钢), | 8. 后锥体(45°钢), | 9. 声反馈晶片(PZT—8压电陶瓷), |
| 10. 进高压气后盖, | 11. 电极引线, | 12. 进高压气管。 |

图1 换能器结构图

占半个波长,指数聚能器占半个波长。应力套筒与前负载块螺纹连接,处于应力波节附近位置;压电片分成两组:一组为主晶堆共六片,作为驱动元件,靠近应力波节^[2],以利提高电声效率;另一组较薄的两片后置端部,作为电、声反馈元件。(2)1000瓦级的方案(见图1(b)),虽亦设计成全波长系统,但主晶堆十片和前后负载块共占3/4波长,指数聚能器仅占1/4波长。其余结构形式同前。

两类结构设计的共同特点为:(1)采用外预应力套筒^{[3][4]}代替常规的中心预应力螺杆结构。它的优点是可对振子晶片施加足够的均匀预应力;用平台压力机对晶堆平稳地逐步施加不同压力级。并测出压力与晶堆电量关系曲线。拧紧外预应力套筒时,进行电量监测,就可控制预应力的多少,这对换能器的研制质量关系极大。(2)采用厚铜电极与压缩空气配合的结构,以获得良好的散热条件。它的原理见图2。(3)采用后置晶片,形成电、声反馈,获得谐振跟踪和大振幅稳

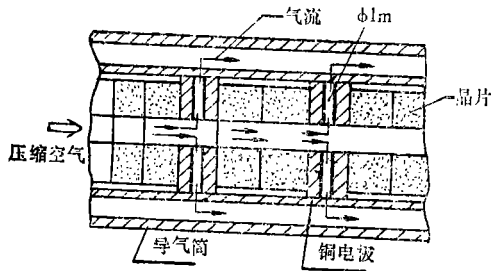


图2 散热结构原理

定输出的特性;(4)采用电极连接线全部外引方式,以利于性能可靠及安装方便;(5)采用微调提升谐振套筒机构。该技术经计算机模拟和测量表明,更换不同长度的套筒,谐振可提高0.1~0.5kHz;(6)采用聚能器作为前辐射头。由于超声塑料焊接需要大功率密度,短时间工作方式,聚能器除必须选择抗疲劳强度好的钛铝合金材料,此外还必须选择机

械损耗比较小的聚能器形式。根据本设计的功率要求,选择指数形聚能器。

三、设计原理和方法

为了满足工程简便设计要求,假定:(1)任一横截面上的应变是均匀分布的;(2)晶片、激励相位满足理想条件,即认为各晶片激励振动波传递到聚能器输出端面是同相叠加的。对于长度大于直径,以及晶堆总厚度小于 $\lambda/4$ 的纵向半波谐振器,以上假定是可近似满足的。此外,当换能器纵振棒作为声传输线讨论时,输出端负载抗分量的影响暂不考虑。根据以上假定条件,设计时先分解成若干个 $\frac{\lambda}{4}$ 谐振子,再合并成整体尺寸。

(1)等效 $\frac{\lambda}{4}$ 共振复合棒的设计公式。

设有一复合细棒如图3所示。则按声传输线原

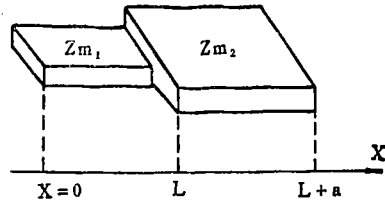


图3 $\frac{\lambda}{4}$ 复合棒

理^[4]可得

$$\operatorname{tg} k_1 L \cdot \operatorname{tg} k_2 a = z_{m1} / z_{m2}$$

式中: $Z_{m1} = \rho_1 C_1 S_1$; $Z_{m2} = \rho_2 C_2 S_2$;

$$K_1 = \frac{2 \pi f}{c_1}, K_2 = \frac{2 \pi f}{c_2};$$

f 为振子工作频率; $\rho_1, C_1, \rho_2, C_2, S_1, S_2$ 分别为二节棒的密度、声速及横截面。

面。

(2)振子组合等效声参数。在计算参数时,往往在同一横截面内不是同一材料组成,所以参数必须修正。为此,假定外预应力筒各截面的速度、位移与筒内同一截面的压电陶瓷片是一致的,故选择一组由陶瓷和外预应力筒的组合密度 ρ^* 、组合声速 c^* 、组合截面 s^*

来代替通常只用陶瓷的声学参数。将它代入有关的方程、公式来求振子的频率、长度等有关参数^[3]。

$$\rho^* = \frac{\rho_P S_P + \rho_F S_F}{S_P + S_F} \quad (2)$$

$$C^* = \frac{C_P S_P + C_F S_F}{S_F + S_P} \quad (3)$$

$$Z^* = \rho^* C^* (S_P + S_F) \quad (4)$$

$$K^* = \frac{2 \pi f}{C^*} \quad (5)$$

式中： ρ_P 、 S_P 、 C_P 分别为PZT—8的密度、截面积及声速； K^* 为组合波数； ρ_F 、 S_F 、 C_F 分别为外预应力套筒的密度、截面积及声速。

(3) 500瓦级主晶堆和前后负载计算。

500瓦级系统组成：主晶堆由六片PZT—8中孔圆片(外径 $\phi 52\text{mm}$ ，内径 $\phi 17\text{mm}$ ，厚 6mm)与二片厚 4mm 铜电极、三片极薄铜电极，并通过环氧胶合而成，如图1(a)所示。前后负载块分别是钛铝合金和45号钢。前负载块兼作螺纹连接用，作预应力套筒及微调套筒固定机构，并与聚能器加工成一体。后负载块中的镶嵌声反馈晶片，没有参予修正。按式(2)分段设计尺寸，有

$$\text{tg}k^* L_{01} \cdot \text{tg}k_T L_{0T} = \frac{Z^*}{\rho_T C_T S_{0T}} \quad (6)$$

式中： L_{01} 主晶堆前半尺寸； K_T 钛铝合金波数； L_{0T} 前负载块长度尺寸； C_T 、 ρ_T 钛铝合金声速和密度； S_{0T} 前负载块截面积加套筒截面积。

$$\text{tg}k^* L_{02} \cdot \text{tg}k_F L_{0F} = \frac{Z^*}{\rho_F C_F S_{0F}} \quad (7)$$

式中： L_{02} 为主晶堆后半尺寸； K_F 为45号钢的波数； L_{0F} 为后负载块长度尺寸； S_{0F} 为后负载块截面积加套筒截面积。

故主晶堆驱动元件(包括电极、胶层)实施长度为

$$\begin{aligned} & L_{01} + L_{02} \\ &= (6 \times 6) + (2 \times 4) + (0.01 \times 9) + (0.1 \times 3) \\ &= 43.2\text{mm} \end{aligned} \quad (8)$$

若联立方程(6)、(7)、(8)、并预先选定节点位置，就能获得 L_{0F} 及 L_{0T} 尺寸。

(4) 1000瓦级主晶堆和前后负载块计算。此系统的主晶堆由外径 $\phi 60\text{mm}$ 、内径 $\phi 17\text{mm}$ 、厚为 6mm 共十片，厚铜电极4片(厚 4mm 中心沿截面钻通气孔)以及板薄铜电极5片，通过胶合组装而成。根据前负载块分别与预应力微调套筒螺纹连接的需要，前负载块长度选定为 18mm 。但材料与 $\lambda/4$ 聚能器同，均为钛铝合金，并加工成一体。此时，剩下的 $\frac{3}{4}\lambda$ 棒可分成三个 $\frac{\lambda}{4}$ 谐振器设计。按式(1)有。

$$\text{tg}k^* L_{11} \text{tg}k_T L_{1T} = \frac{Z^*}{\rho_T C_T S_{1T}} \quad (9)$$

式中： L_{1T} 前负载块长度尺寸(已选定)； L_{11} 晶堆前小半长度尺寸； S_{1T} 前负载块截面积加套筒截面积。

另二个 $\frac{\lambda}{4}$ 棒段设计为

$$\text{tg}k^* L_{13} \cdot \text{tg}k_F L_{1F} = \frac{Z^*}{\rho_F C_F S_{1F}} \quad (10)$$

$$L_{12} = \frac{\lambda^*}{4} = \frac{C^*}{4f} \quad (11)$$

式中： L_{13} 晶堆后小半长度尺寸； L_{12} 晶堆中间长度尺寸； L_{1F} 后负载块长度尺寸； S_{1F} 后负载块截面积加套筒截面积。

$$\begin{aligned} & L_{11} + L_{12} + L_{13} \\ &= (10 \times 10) + (4 \times 4) + (0.1 \times 5) \\ &+ (0.01 \times 15) = 116.5\text{mm} \end{aligned} \quad (12)$$

若联立方程(9)、(10)、(11)、(12)，可分别获得 L_{1F} 、 L_{11} 、 L_{12} 、 L_{13} 的尺寸，及节点固定位置。

(5) $\frac{\lambda}{2}$ 及 $\frac{\lambda}{4}$ 聚能器尺寸设计。 $\frac{\lambda}{2}$ 指数

形聚能器长度设计为^[5]

$$L_{\text{聚}} = \frac{\lambda}{2} \left[1 + \left(\frac{1\text{nN}}{\pi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$\frac{\lambda}{4}$ 指数形聚能器长度设计，可通过下面公式计算。因这长度是变幅杆的力波腹至力

波节的距离。设力波节处为坐标原点, $L_{\text{泵}}$ 为力波腹坐标, 则按文献^[5]有

$$\operatorname{tg}[\sqrt{k_T^2 - \beta^2} \cdot L'_{\text{泵}}] = -\frac{\sqrt{k_T^2 - \beta^2}}{\beta} \quad (14)$$

故经简单运算可得

$$L'_{\text{泵}} \cong \frac{\lambda}{2\pi} \left[1 + \left(\frac{\ln N}{\pi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \operatorname{arc} \left\{ \operatorname{ctg} \left(\frac{\ln N}{\pi} \right) \right\} \quad (15)$$

式中, β 是指数变幅杆的形状系数; N 是 $\lambda/2$ 指数变幅杆的大小端截面积半径比; λ 为钛铝合金均匀细棒中的波长; k_T 符号同前。

(6) 预应力设计的安全估算。大功率压电换能器的极限功率一般受到压电陶瓷片的电极限、力极限和热极限的限制。保证散热良好的条件下, 主要是力极限将首先起限制作用。例如, 我们若选取下列参数: 电场 $E_{\text{max}} = 4 \times 10^5$ 伏/米; 机械 Q 值取 5; 杨氏模量 $Y = 6 \times 10^{10}$ 牛顿/米²; 纵向压电常数 $d_{33} = 3 \times 10^{-10}$ 米/伏, 则

$$P_{\text{max}} = d_{33} \cdot Y \cdot E \cdot Q \quad (16)$$

可算得最大拉力值是 350 公斤/厘米²。此值已超过压电陶瓷拉力极限 200 公斤/厘米²。即对振子加 150 公斤/厘米² 预应力, 才能保证晶片不拉坏; 加 350 公斤/厘米², 保证始终在受压状态下振动。(倘 Q 更高, 预应力值应更大些)

本设计 500 瓦级压电片面积为 20 厘米², 1000 瓦级为 30 厘米²。故前者加 3 吨、后者加 4.5 吨, 可保证不拉坏。若分别加上 7 吨和 10.5 吨, 可保证始终处在受压状态下振动换能。

另外, 45 号钢一般可忍受 6 吨平方厘米的安全应力。按本设计的二个方案, 预应力筒截面积分别为 5 厘米² 及 6 厘米², 故套筒可加安全预应力至少为 15 吨及 18 吨(以预应力筒的一半截面计)。由此可见, 45 号钢套筒对压电陶瓷施加 200 公斤/厘米² ~ 350 公斤/厘米² 以内的预应力, 对套筒来说完全在足够安全的范围之内。

四、计算机数学模型及实测

数据

1. 计算机计算的数学模型

图 4 所示的物理、数学模型是根据机电等效原理^[4]建立的网络。均能适用于 500 瓦级及 1000 瓦级二类换能器系统。

(1) 机端网络参数计算公式

$$T_1 = jz_2 \operatorname{tg}(k_2 L_2 / 2) \quad (17)$$

$$T_2 = \frac{Z_2}{j \sin(k_2 L_2)} \quad (18)$$

式中: $Z_2 = \rho_2 C_2 S_2$; ρ_2 、 C_2 、 S_2 、 K_2 、 L_2 分别为微调套筒的密度、声速、横截面积、波数及长度; 由于微调套筒一端与空气接触, 为声空载, 故受力为零, 相当于此处等效机械网络短路。

$$H_1 = jz_3 \operatorname{tg}(k_3 L_3 / 2) \quad (19)$$

$$H_2 = \frac{Z_3}{j \sin(k_3 L_3)} \quad (20)$$

式中: $Z_3 = \rho_3 C_3 S_3$; ρ_3 、 C_3 、 S_3 、 K_3 、 L_3 分别为前负载块与套筒组合的密度、声速、截面积、波数及长度。

$$Q_1 = jz_4 \operatorname{tg}(K_4 L_4 / 2) \quad (21)$$

$$Q_2 = \frac{Z_4}{j \sin(k_4 L_4)} \quad (22)$$

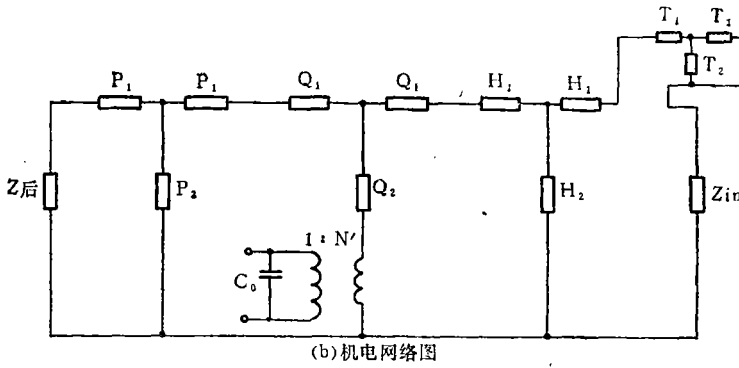
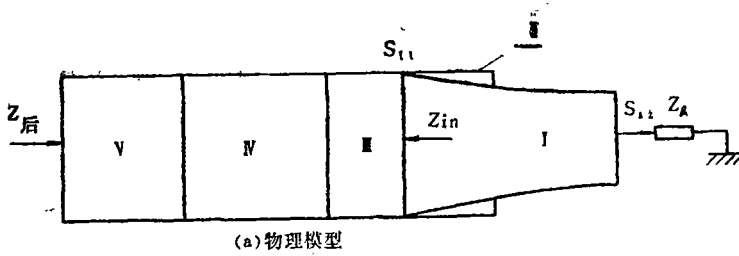
式中: $Z_4 = \rho_4 C_4 S_4$; ρ_4 、 C_4 、 S_4 、 K_4 、 L_4 分别为 PZT-8 晶堆与应力套筒的组合密度、声速、截面积、波数及长度(黄铜电极及胶层未参与修正)。

$$P_1 = jz_5 \operatorname{tg}(k_5 L_5 / 2) \quad (23)$$

$$P_2 = \frac{Z_5}{j \sin(k_5 L_5)} \quad (24)$$

式中: $Z_5 = \rho_5 C_5 S_5$; ρ_5 、 C_5 、 S_5 、 K_5 、 L_5 分别为后负载块加套筒的密度、声速、截面积、波数及长度(声反馈晶片未参与修正)。

(2)、电端网络参数计算公式



图中， Z_{in} 为前负载块的前端输入阻抗， S_{11} 及 S_{12} 为指数形聚能器的大小端截面积， $Z_{后}$ 为后幅射阻(空气)
 $P_1, P_2, Q, Q_2, H_1, H_2, T_1, T_2, N', C_0$ ，均为机电网络参数

图4 换能器分析模型

$$C_0 = \frac{S_P \pi}{t} \epsilon_{33}^T (1 - k_{33}^2) \quad (25)$$

$$k_{33}^2 = d_{33}^2 / S_{33}^E \cdot \epsilon_{33}^T \quad (26)$$

式中： c_0 为静态电容， t 为压电片厚度； k_{33}^2 为纵向机电耦合系数； n 为压电片数； ϵ_{33}^T 为自由介电常数； S_{33}^E 为顺性常数。

(3) 机电网络电力转换系数计算公式：

$$N' = \frac{d_{33} \cdot S_P}{S_{33}^E \cdot t} \quad (27)$$

式中： N' 为电力系数，其余符号同前。

(4) 网络机端输入阻抗计算公式：

500瓦级为

$$Z_{in} = Z_R \cdot N^2 \quad (28)$$

式中： Z_R 为塑料焊接时，实际声负载阻抗。
1000瓦级为^[6]

$$Z_{in} = \frac{L_{a1} Z_{a2}}{Z_R} (1 + j \frac{2Z_R \cdot \beta}{Z_{a2} \cdot K_T}) \quad (29)$$

式中： $Z_{a1} = \rho_T C_T S_{11}$ ； $Z_{a2} = \rho_T C_T S_{12}$ ； ρ_T 、 C_T 、 K_T 、为指数杆材料(即钛铝合金)细棒之密度、声速及波数； S_{11} 、 S_{12} 分别为聚能器大小端截面积；其余符号同前。

2. 换能器参数计算结果及实测结果
详见表1、2、3、4及图5、6。

表1、 本研制用计算参数值

参 数	声 速 m/s	密 数 Kg/m ³	杨氏模量 N/m ²	d_{33} c/N	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	抗拉极限 Kg/cm ²	损耗系数 $\epsilon \cdot 10^4$
PZT-8	3.1×10^3	7.5×10^3	7.2×10^{10}	3×10^{-12}	1000	200	1.5~3.0
45号钢	5×10^3	7.8×10^3	20×10^{10}			600	4.0
钛铝合金	5.1×10^3	4.5×10^3	11×10^{10}				1.4
硬 铝	5×10^3	2.7×10^3	6.8×10^{10}				3.0

表2

换能器谐振频率比较(在空气中)

功率级	设计型式	设计频率 (KHz)	计算机计算频率 (KHz)	实测频率 (KHz平均)	聚能器材料
500瓦	半波	20	20.06	19.45	硬铝
	全波	20	20.10	19.65	钛合金
1000瓦	全波	20	20.16	19.53	硬铝
	全波	20	20.02	19.42	钛合金
	全波	20	20.61	19.78	45号钢

注：此表频率值均未考虑微调套筒补偿。

表3 1000瓦级20KHz附近导纳数据

频率 (KHz)	电纳 B (mV)	电导 G (mV)
19.00	2.841	0.01
19.20	2.925	0.02
19.30	2.940	0.06
19.50	2.987	0.15
19.80	2.950	0.21
19.88	2.923	0.25
19.90	2.885	0.27
19.98	2.840	0.29
20.00	2.745	0.22
20.50	2.705	0.16
20.70	2.725	0.12
20.90	2.783	0.06
21.00	2.885	0.01

表4 500瓦级20KHz附近导纳数据

频率 (KHz)	电纳 B (mV)	电导 G (mV)
18.5	1.095	0.15
19.00	1.470	0.43
19.30	2.470	0.85
19.60	3.000	1.62
19.80	1.520	3.41
20.00	0.406	3.11
20.30	-0.303	1.64
20.60	-0.039	1.22
21.00	0.066	0.44
21.50	0.554	0.15
22.00	0.871	0.08
23.00	1.084	0.07

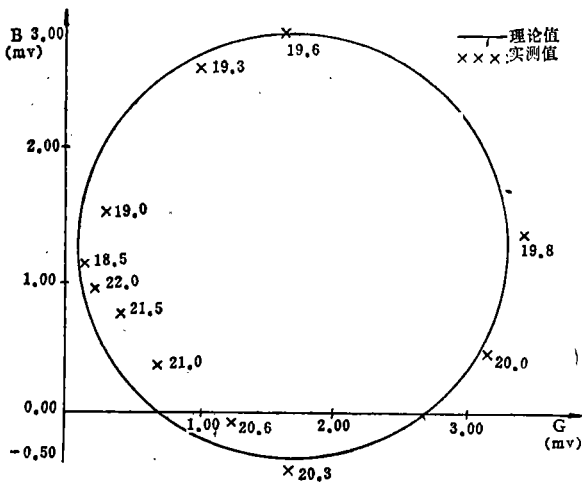


图5 500瓦级20KHz附近导纳圆图

- 注：(1) 理论值是采用本文的数学模型由 TR-80 计算机上获得的数据；
 (2) 理论计算和设计尺寸时均提高 0.5KHz，即按 20.5KHz 条件下进行。这样，理论值与实测值更一致些

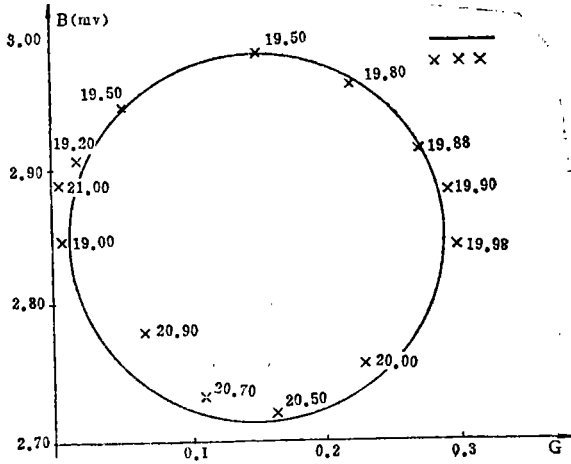


图6 1000瓦级20KHz附近导纳圆图

五、结果

1) 本设计500瓦级换能器系统空载条件下, 加电功率250瓦, 端部输出振幅达 $45\mu\text{m}$ 以上。并且未加散热条件, 持续2小时, 温升仍不大。可见机电效率较高。

2) 500瓦、1000瓦两类换能器在空气中及水中, 用小信号分析测量它的导纳曲线, 进行计算获得: 机电效率均可大于90%, 前者可更高达95%。

3) 本研制表明, 工程简易设计与计算机辅助设计, 二者计算结果比较一致。但它们与设计组装后实测相比, 谐频一般偏高 $0.5 \sim 0.7\text{KHz}$ 。分析其原因: (A) 是各种材料的实际声速比设计时使用数据偏低; (B) 是本研制横向尺寸仍较大, 故不能忽略横向对纵向的耦合, 因此声速又将进一步减低。

4) 本研制由于采用了铜厚电极以及1000瓦级晶堆片用量较大, 故损耗较大以及驱动元件的激励相位误差(相对于振幅输出端)已很明显。这些现象反映到电端, 生产较

高的换能器输入阻抗(500瓦级仅为 400Ω , 而1000瓦级达 $4\text{K}\Omega$)。这问题有待于今后改进解决。

参加本项研制工作的还有黄清、欧阳肃利、许云等同志, 无锡超声设备研究所副所长吴凌愚同志给予本研制工作以指导讨论, 在此一并致谢。

参考文献

- [1] Ashoh, *Vitrasonics*, (1976), 209
- [2] 丁时成、牛勇, 《全国功率超声学术会论文》(1981)
- [3] 林向真, *声学学报*, 第5期, (1981), 351
- [4] L. Camp, 《水声学》, 水声译丛编辑组, (1977), 255
- [5] D. 锡林, *超声波焊接*, 《国防出版社》(1965), 181
- [6] 汪承瀛, *声学学报*, 第1期, (1980)