

四、结 论

1. 圆锯片在内径被钳定、外缘处自由的边界条件下,其横向振动可视为一环形薄板振动。锯齿的影响可被忽略。如要进一步提高精度,可用有限元法来处理齿的影响。

2. 高速旋转圆锯片产生的哨叫声起因于锯片横向振动的共振,而空气动力噪声只起到激发锯片共振的强迫力作用。为此,可采取各种措施来抑制哨叫声,如采用胶合锯片;贴近锯片表面放置控噪板;直接用表面平直度好的稍厚单锯片等。

3. 在圆锯片不产生哨叫声的前提下,对木工圆锯机采取一些隔声、减振措施,并采用低噪声轴承、电动机,可有效地降低圆锯机空载噪声。据此,我们研制的木工圆锯机,在线速度为47.1m/s时,空载平均噪声级低达63.5dBA。

4. 圆锯机的噪声主要来源于锯片。在激光测振的基础上,可为研制低噪声圆锯片开创一条新的途径。本文对圆锯片所作的分析,同样适合于其他行业,如石料加工、金属切削、食品工业中所用的圆锯片。

参 考 文 献

- [1] Impact of Noise Control at Workplace, U. S. Department of Labor, Office of Standards, Report No. 2671, Submitted by Bolt Beranek and Newman Inc. 1974.
- [2] Bies D. A., Adelaide Symposium, Satellite Conference, Sydney, Australia, 1980.
- [3] Dugdale D. S., *J. Sound and Vib.*, 10(1969), 296—304.
- [4] Powell P. L., *J. opt. Soc. Am.*, 55(1965), 1593—1598.
- [5] Reiter W. F., Keltie R. F. Jr., *J. Sound and Vib.*, 44(1976), 531—543.
- [6] Leu M. C., Mote C. D., *Wood Science and Technology*, 18(1984), 33—49.

参差宽带换能器最优频率布阵的计算机模拟*

陈启敏 臧晓非 张伊立

(陕西师范大学应用声学研究所)

1989年3月23日收到

本文叙述了参差调谐宽带换能器频率布阵优化方案的计算机模拟。根据扫描系统分辨率的要求,指出频率布阵优化方案必须满足两个条件:1.阵列中任何有限区间的频率响应,都应满足一定的带宽。2.阵列的波束空间响应是最好的。为此必须首先把频率级数序列阵按有限区间响应重新整序排列;其次,使重新整序排列后的波束指向函数与一给定的较优指向函数等价。根据采样合成定理就可模拟出重新整序后的参差阵的布阵方案。

一、引 言

我们曾叙述了参差宽带换能器的基本原理、结构工艺及性能参数^[1]并进一步叙述了参差宽带换能器对脉冲超声多普勒频移频谱响应的特征^[2]。本文将就参差宽带换能器频率布阵的优化方案作进一步讨论。

在医用超声检测设备中,为了提高系统的分辨率,换能器的带宽及其空间波束特性是十分重要的。参差宽带换能器是在一个确定的频率范围内由若干频率不同的谐振子组成一个阵列而形成的。振子频率不同、布阵不同,都会影响换能器的频率响应及波束空间响应。如何进

* 本项目是国家自然科学基金资助项目。

行频率布阵,寻找一个布阵的优化方案,是参差宽带换能器设计的关键问题。

我们曾对阵元频率一致、阵元间距一定条件下的面加权基阵,根据扫描系统波束分布的要求,进行了孔径优化的计算机模拟^[3]。本文则是对阵元频率不一致、阵元间距不同条件下的参差阵,根据扫描系统带宽、分辨率的要求,及波束空间分布的可能性,或是在波束角一定的情况下使副瓣级最低,或是在副瓣级一定的情况下使波束角最小,综合考虑寻找相对“最优”的布阵方案。

二、频率布阵的基本原则

换能器阵列中,各阵元是依次扫描工作的,要改善换能器的带宽及波束分布,则对阵列中各扫描区域的带宽和波束响应都应该有一定的要求。因此,换能器频率布阵的优化方案必须满足两个条件

1. 阵列中任何有限区间的频率响应,都应满足一定的带宽;

2. 阵列的波束空间响应是最优的。

为了保证区域响应的宽带性,首先把参差宽带换能器的频率级数阵列,按有限区间的响应重新整序排列。第一步,确定带宽 $f_{\max} - f_{\min}$; 第二步,根据响应曲线要求,确定相邻阵元频率差 Δf ; 第三步,确定区域响应的最少阵元数 q , 即 $q = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\Delta f}$ (取最大整数); 第四步,根据接收面积和灵敏度要求,确定总阵元数 N ; 第五步,进行总体排列。

例如有一阵列,区域响应的最少阵元数为 5 个 (a, b, c, d, e), 总阵元数为 15 个。为响应均匀,阵元在横向稍加错位,作如下形式交叉排列

$$\begin{bmatrix} b & d & a & c & e & b & d \\ a & c & e & b & d & a & c & e \end{bmatrix} \quad (1)$$

实际上,由于每个振子都很小,5 个不同谐振子的区域排列,在扫描方向上的线度比回波波束横截面小,因此,不论回波波束如何在阵列

上扫描,阵列每一区域响应都是宽带的。

满足了区域响应的宽带性以后,还必须同时满足阵列波束空间响应的优化条件。为此,把上述按区域重新整序排列后的波束指向函数与一给定的较优的指向函数等价,再根据采样合成定理模拟出重新整序后的参差阵的布阵方案,就得到了这一条件下的布阵。

三、参差阵的指向函数

设参差阵是由 N 个阵元组成的一直线阵 (如图 1 所示),每一阵元对空间某一点, (距离声源 r 处) 声压的贡献为

$$p_n = \frac{p_0}{r} e^{-ik_n r} e^{-ik_n d_n \sin \theta}$$

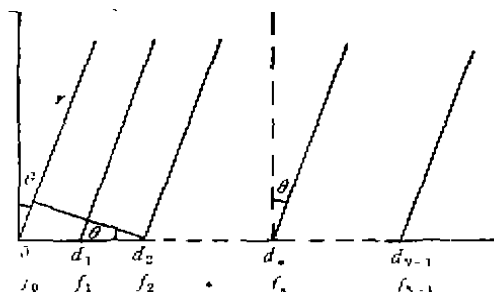


图 1 参差阵空间波束分析示意图

其中, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$; k_n 为相应阵元 n 的波数; d_n 为阵元 n 距扫描起始阵元 (阵元 0) 的距离, $d_n = \sum_{i=1}^n \Delta d_i$ 。若 $e^{-ik_0 r} \approx e^{-ik_1 r} \approx \dots \approx e^{-ik_{N-1} r}$, 则 N 个阵元在该点所产生的总声压为

$$p_T = \frac{p_0}{r} e^{-ik_0 r} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-ik_n d_n \sin \theta} \quad (2)$$

上式作归一化处理, 得到 θ 方向的指向特性为

$$R_1(\sin \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-ik_n d_n \sin \theta}$$

因此, 该阵列的指向特性函数为

$$R_1(m \sin \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-ik_n d_n \sin \theta} \quad (3)$$

式中: $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$,

式(3)即为参差阵的波束指向函数。有了这一数学模型,我们就可以给定一个声场分布与它等价,从而得到所需的布阵方案。

四、频率布阵优化模拟

1. 与均匀线阵波束图等价的模拟运算

若有一 N 元均匀线阵,它的指向函数为

$$R_2(m \sin \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-jk_0 d_0 m \sin \theta} \quad (4)$$

令 $R_1(m \sin \theta) = R_2(m \sin \theta)$, (3)、(4)两式中对应项相等,就得到 $k_0(nd_0) = k_n d_n$, 所以

$$d_n = \frac{k_0(nd_0)}{k_n} = \frac{f_0}{f_n} \cdot nd_0 \quad (5)$$

若给定一系列 f_n 值,就得到一系列频率布阵位置坐标 d_n , 及一系列阵元间距 Δd_n

$$\Delta d_n = d_n - d_{n-1} \quad (6)$$

f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0 (MHz)
0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5

图 2 (2—3)MHz 频率布阵示意图

若有一带宽为 2—3MHz 的区域响应阵列,作如图 2 的频率布阵。根据阵列理论,^[4]为了不出现附加极大值, d_0 必须满足条件 $d_0/\lambda_0 \leq 1$ 。上述阵列中, $f_0 = 2\text{MHz}$, 波长最大为 $\lambda_0 = 0.75\text{mm}$, 所以取 $d_0 = 0.75\text{mm}$ 。以均匀线阵波束图等价,由(5)式得上述布阵的阵元位置为

$$d_1 = \frac{f_0}{f_1} d_0 = \frac{2}{2.2} \times 0.75 = 0.68\text{mm},$$

$$d_2 = \frac{f_0}{f_2} \cdot 2d_0 = \frac{2}{2.4} \times 2 \times 0.75 = 1.25\text{mm},$$

$$d_3 = \frac{f_0}{f_3} \cdot 3d_0 = \frac{2}{2.6} \times 3 \times 0.75 = 1.73\text{mm},$$

$$d_4 = \frac{f_0}{f_4} \cdot 4d_0 = \frac{2}{2.8} \times 4 \times 0.75 = 2.14\text{mm},$$

$$d_5 = \frac{f_0}{f_5} \cdot 5d_0 = \frac{2}{3} \times 5 \times 0.75 = 2.50\text{mm},$$

应用声学

阵元间距为 $\Delta d_1 = 0.68\text{mm}$, $\Delta d_2 = 0.57\text{mm}$,
 $\Delta d_3 = 0.48\text{mm}$, $\Delta d_4 = 0.41\text{mm}$,
 $\Delta d_5 = 0.36\text{mm}$ 。上述是与均匀线阵指向函数等价的讨论。

2. 与最优波束图等价的模拟运算

均匀线阵的指向性不是最优的^[5], 我们可以根据扫描系统灵敏度,分辨率、系统信噪比的要求,以及阵列指向函数特征原则的要求来模拟一个最优波束分布。

根据上述要求,若给定一较优的指向函数 $R_3(m \sin \theta)$, 并使其与 $R_1(m \sin \theta)$ 等价,根据采样合成定理,对给定的 $R_3(m \sin \theta)$ 以间距 $\sin \theta$ 采样,则有

$$R_3(m \sin \theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-jk_n d_n m \sin \theta} \quad (7)$$

其中, $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

(7)式实际上是 N 个非线性方程的联立方程组。计算机模拟阵元排布的过程,就是求解该方程组,计算出 d_n 或 Δd_n , 确定阵元的位置。求解的方法采用下降法,其概要如下

定义函数

$$f_m = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-jk_n d_n m \sin \theta} - R_3(m \sin \theta),$$

再根据 $d_n = \sum_{i=1}^n \Delta d_i (n = 1, 2, \dots, N-1)$

一式,则方程式(7)可写作

$$f_m(\Delta d_0, \Delta d_1, \Delta d_2, \dots, \Delta d_{N-1}) = 0 \quad (8)$$

其中, $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。定义目标函数 F 为 f_m 的方均根相对误差,即

$$F(\Delta d_0, \Delta d_1, \Delta d_2, \dots, \Delta d_{N-1}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \left(\frac{f_m}{R_3(m \sin \theta)} \right)^2}$$

若 $F(\Delta d_0^*, \Delta d_1^*, \Delta d_2^*, \dots, \Delta d_{N-1}^*) < \varepsilon$, 则 $(\Delta d_0^*, \Delta d_1^*, \Delta d_2^*, \dots, \Delta d_{N-1}^*)$ 就是方程组(8)满足精度 ε 的一组解。

五、计算机模拟运算的流程及结果

整个计算过程按如下步骤进行

1. 从给定初值 $\mathbf{D}^{(0)} = (\Delta d_0^{(0)}, \Delta d_1^{(0)}, \dots, \Delta d_{N-1}^{(0)})$ 出发, 设已迭代到第 k 次, 得到

$$\mathbf{D}^{(k)} = (\Delta d_0^{(k)}, \Delta d_1^{(k)}, \dots, \Delta d_{N-1}^{(k)});$$

2. 计算目标函数在点 $\mathbf{D}^{(k)}$ 处的值

$$F(\mathbf{D}^{(k)}) = F(\Delta d_0^{(k)}, \Delta d_1^{(k)}, \dots, \Delta d_{N-1}^{(k)});$$

3. 若 $F(\mathbf{D}^{(k)}) < \varepsilon$, 则 $\mathbf{D}^{(k)}$ 是方程组的一组解, 否则, 计算 F 在点 $\mathbf{D}^{(k)}$ 处的偏导数

$$\frac{\partial F}{\partial \Delta d_n} = [F(\Delta d_0^{(k)}, \Delta d_1^{(k)}, \dots, \Delta d_n^{(k)} + h_n, \dots, \Delta d_{N-1}^{(k)}) - F(\Delta d_0^{(k)}, \Delta d_1^{(k)}, \dots, \Delta d_n^{(k)}, \dots, \Delta d_{N-1}^{(k)})] / h_n$$

式中: $n = 1, 2, \dots, N-1$, $h_n = C_n \Delta d_n^{(k)}$, C_n 为常数, 取值 $10^{-3} \sim 10^{-4}$;

$$4. \text{ 计算 } \Delta d_n^{(k+1)} = \Delta d_n^{(k)} - \lambda_k \frac{\partial F}{\partial \Delta d_n},$$

其中: $n = 1, 2, \dots, N-1$,

$$\lambda_k = \frac{F(\mathbf{D}^{(k)})}{\sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta d_i} \right)^2},$$

然后重复从 2 开始的计算步骤。

我们的模拟运算程序用 FORTRAN 语言编写, 在 IBM-PC/XT 机上调式运行。在程序实际运行中应注意两点。

1. 对于阵元 f_0 , $d_0 = 0$, $\Delta d_0 = 0$, 故 Δd_0 不参加迭代, 恒取值为零。

2. 迭代过程可能不收敛, 需要监视这个过程, 必要时采取适当措施, 使运算结束。

若根据系统要求, 需要模拟一个如图三所示的波束分布, 其采样间距离为

$$\sin \theta \approx \theta = 0.5^\circ = \frac{0.5}{180} \times 3.14159 \text{ (rad)}$$

则对采样结果进行归一化得

$$R_3(0) = 0.87/0.87 = 1;$$

$$R_3(\sin \theta) = 0.7/0.87;$$

$$R_3(2 \sin \theta) = 0.4/0.87;$$

$$R_3(3 \sin \theta) = 0.1/0.87;$$

$$R_3(4 \sin \theta) = 0;$$

$$R_3(5 \sin \theta) = 0.02/0.87;$$

$$R_3(6 \sin \theta) = 0.05/0.87;$$

$$R_3(7 \sin \theta) = 0.02/0.87.$$

若选择各阵元频率 $f_n (n = 0, 1, \dots, 7)$ 为下列值(单位 MHz)

$$2.0, 2.143, 2.286, 2.429, 2.571, 2.714,$$

$$2.857, 3.0 \text{ 则将 } k_n = \frac{2\pi f_n}{c} (n = 0, 1, \dots, 7) \text{ 与}$$

$R_3(m \sin \theta) (m = 0, 1, \dots, 7)$ 的值代入方程(8), 用前述算法进行模拟后得到, 当 $\Delta d_n (n = 0, 1, \dots, 7)$ 取下列值时(单位 mm)

$$0.0, 5.577, 2.149, 1.624, 1.975, 1.493,$$

1.050, 3.574 所得的模拟波束分布如图 4 所示, 与图 3 的给定波束分布非常接近。

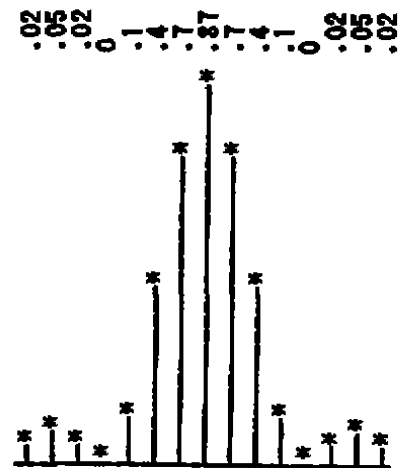


图 3 给定的波束分布

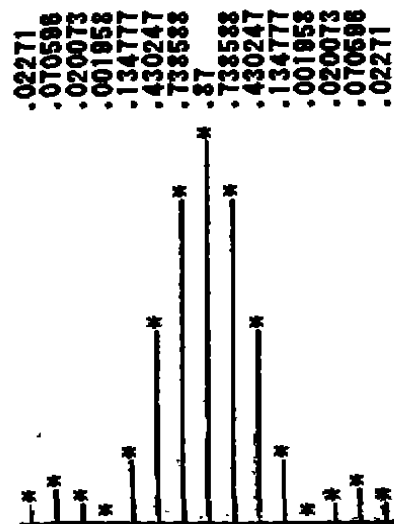


图 4 模拟的波束分布

713/517

参 考 文 献

- [1] 张伊立等, 医疗器械, 9-3(1985), 5-10.
[2] 侯泽章等, 医疗器械, 10-5(1986), 9-12.

- [3] 陈启敏等, 应用声学, 7-3(1988), 16-20.
[4] 周福洪, 水声换能器及基阵, 国防工业出版社, 1984, 205-209.
[5] 陈启敏等, 中国生物医学工程学报, 3-1(1984), 1-7.

超声弯曲谐振杆准确计算和应用的几个问题

阮 世 勋

(广 西 大 学)

1989年1月17日收到

本文由 Timoshenko 理论出发, 给出对等截面超声弯曲谐振杆杆长、频率和截面尺寸三大主参数进行准确值计算的两种简便新方法——回归公式法和编、查表法。指出在设计与运用超声弯曲谐振杆时传统算法的结果需加修正的几个问题。

一、引 言

从同时考虑弯曲、剪切和转动惯量的 Timoshenko 理论方程^[1]

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \rho J \left(1 + \frac{E}{K'G} \right) \times \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 J}{K'G} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (1)$$

消去时间变量因子, 考虑约束条件, 我们导出如下频率方程

自由-自由杆

$$1 - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^3 \frac{Z_1}{Z_2} - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^3 \frac{Z_2}{Z_1} \right] \text{sh} \lambda_2 L \cdot \sin \lambda_1 L - \text{ch} \lambda_2 L \cdot \cos \lambda_1 L = 0 \quad (2)$$

固定-自由杆

$$1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) \text{sh} \lambda_2 L \cdot \sin \lambda_1 L + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^2 \frac{Z_1}{Z_2} + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^2 \frac{Z_2}{Z_1} \right] \times \text{ch} \lambda_2 L \cdot \cos \lambda_1 L = 0 \quad (3)$$

固定-固定杆

$$1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{Z_1}{Z_2} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{Z_2}{Z_1} \right) \text{sh} \lambda_2 L \cdot \sin \lambda_1 L - \text{ch} \lambda_2 L \cdot \cos \lambda_1 L = 0 \quad (4)$$

应用声学

所需满足的条件是

$$K_0 = \frac{2\pi f}{C} \sqrt{\frac{J}{S} \frac{E}{K'G}} < 1 \quad (5)$$

由该理论计算等截面弯曲谐振杆, 与工程实际有很好的符合精度, 其在超声频的适用性与准确性, 亦已由文献[2]实验验证。为解决其难以计算和应用的问题, 文献[2]给出了一种计算谐振杆长的简便算法。本文从上述频率方程出发找出更简便计算此类杆件三大主参数——杆长、频率和截面尺寸值的新方法——回归公式法和编、查表法, 指出传统算法和观念中若干需加修正之处。

式中符号 E ——拉压弹性模数; G ——剪切弹性模数; J ——杆截面对中性轴的惯性矩; S ——杆横截面积; L ——杆长; ρ ——材料密度; f ——频率; C ——声速; $\omega = 2\pi f$; $K = \omega/C$; K' ——由截面形状决定的系数 (圆形截面, $K' = 1/1.11$; 矩形截面, $K' = 1/1.2$; 薄壁圆环截面, $K' = 1/2$; 工字形截面, $K' = \text{腹板面积}/\text{总横截面积}$); $K_0 = \omega^2 \rho S / EJ = K^2 S / J$; $a = K_0 (1 + E / K'G) J / S$; $b = K_0 [1 - K_0 \times (J/S)^2 E / K'G]$; $\lambda_1 = [a/2 + (b + a^2/4)^{1/2}]^{1/2}$; $\lambda_2 = [-a/2 + (b + a^2/4)^{1/2}]^{1/2}$; $Z_1 = 1 + \lambda_1^2 / (K'GS / EJ - K^2)$; $Z_2 = 1 - \lambda_2^2 / (K'GS /$