

抑制高速圆锯片哨叫声的分析及其应用

沈 保 罗 章 力

(汕头大学物理系) (同济大学声学研究所)

1989年1月26日收到

圆锯机极高的空载噪声级是由高速旋转圆锯片产生的哨叫声所致。本文就产生哨叫声的机理作了探讨,实测了空载圆锯片辐射的声频谱。理论计算了圆锯片实际使用状况时的横向振动固有频率,并采用激光全息技术对圆锯片进行了振型分析,理论值与实验结果相符合。此外,还进行了一些实验分析,得出哨叫声起因于锯片横向振动谐振的结论,提出了抑制哨叫声的一些措施。例如采用胶合锯片;贴近锯片表面放置控噪板;直接用平直度好的较厚单锯片等等。在本工作基础上研制的木工圆锯机在锯削线速度为 47.1m/s 时,空载平均噪声级低达 63.5dBA 。

一、引 言

圆锯机是木材加工业中最常用的机械之一。众所周知,当圆锯机开动时,无论是空载还是切削木材,都会产生极强的噪声。不少圆锯机的噪声级均超过最大允许值 $L_{eq} = 90\text{dBA}$ 。在机器操作者位置产生的噪声级往往超过 100dBA 。它已成为一个重要的噪声污染源。

圆锯机极高的空载噪声是由高速旋转锯片产生的哨叫声所致。我们对旋转圆锯片辐射声频谱进行了测试,其方框图见图1。所用锯片为 $\phi 300\text{mm}$ 、厚 2mm 、有100个三角齿的圆片,转速为 3230转/min 。测得的声频谱见图2。图中横坐标为频率、纵坐标为声压级。哨叫声的频率为 3450Hz ,其声压级高达 95dB 以上。如果哨叫声被抑制,则该峰值消失,一般的木工圆锯机在锯削线速度为 50m/s 左右时的空载噪声级就可下降到 80dBA 以下。因此,弄清哨叫声的产生机理,就可寻找抑制哨叫声的途径,以有效地降低圆锯机空载噪声级。

产生哨叫声的机理说法不一,一种认为是由高速旋转的锯齿与周围空气间相互作用而产生的空气动力噪声所致;另一种认为是由锯片横向振动的共振所引起^[2]。本文在理论计算锯

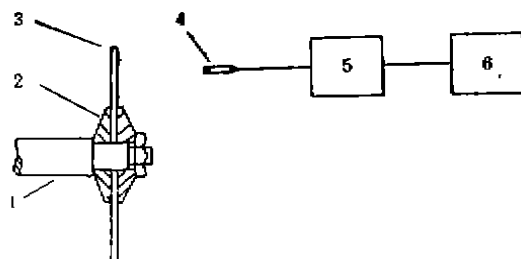


图1 测试旋转圆锯片辐射声频谱的方框图
1——锯轴；2——夹盘；3——锯片；4——B&K 4165 型电容传声器；5——B&K 2120 型频率分析器；6——B&K 2307 型电平记录器

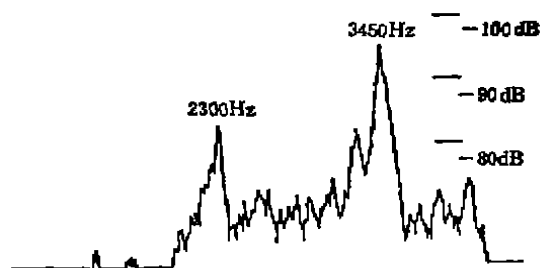


图2 旋转锯片辐射声频谱

片固有频率的基础上,对锯片进行一系列测试和分析,以探讨哨叫声的产生机理,并有效地对它进行抑制。在抑制木工圆锯机的哨叫声后,再采取一系列措施,如隔声、机身的隔振等,使整机的空载平均噪声级进一步降低。

二、关于锯片的共振特性

Dugdale 的工作表明,圆锯片旋转时的共振频率与静态共振频率相近^[3]。现考虑静态共振频率的计算和测试。把圆锯片当作均匀薄圆板来处理,并忽略锯齿的影响。锯片半径为 b , 实用中它又被半径为 a 的钢夹盘钳定。振动区域为半径在 $[a, b]$ 之间的环,可写出其横向自由振动方程

$$\nabla^4 \eta + \frac{K^4}{\omega^2} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中 $K^4 = \frac{12\omega^2 \rho (1 - \sigma^2)}{E h^2}$; η 为振动位移; E 为杨氏模量; ρ 为密度; σ 为泊松比; h 为锯片厚度。

令振动位移 η 可表示为简谐解

$$\eta(t, r, \phi) = \eta_A(r, \phi) e^{j\omega t} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式得

$$\begin{aligned} \eta_A(r, \phi) = & \left\{ \begin{array}{l} \cos m\phi \\ \sin m\phi \end{array} \right\} \cdot \{ A_1 J_m(Kr) \\ & + A_2 Y_m(Kr) + A_3 I_m(Kr) \\ & + A_4 K_m(Kr) \} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 J_m, Y_m, I_m, K_m 分别为 m 阶贝塞尔函数、诺依曼函数、修正贝塞尔函数和修正诺依曼函数; $m = 0, 1, 2, 3, \dots$; 在包含角度一项中, $m = 0$ 时取 $\cos m\phi$, $m \neq 0$ 时取 $\sin m\phi$; A_1, A_2, A_3 和 A_4 分别为待定常数。

边界条件是半径 $r = a$ 处锯片被钳定, 而 $r = b$ 处为自由, 故有

$$\left. \begin{aligned} \eta_A|_{r=a} = 0, \quad \frac{\partial \eta_A}{\partial r} \Big|_{r=a} = 0, \\ \left[\frac{\partial^2 \eta_A}{\partial r^2} + \sigma \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \eta_A}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \eta_A}{\partial \phi^2} \right) \right]_{r=b} = 0 \\ \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\nabla^2 \eta_A \right) + \frac{1 - \sigma}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \left(\frac{\partial \eta_A}{\partial r} - \frac{\eta_A}{r} \right) \right]_{r=b} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

取(3)式中的 $\sin m\phi$, 将(3)式代入(4)式的四个

边界条件,可分别得

$$\begin{aligned} & A_1 J_m(Ka) + A_2 Y_m(Ka) \\ & + A_3 I_m(Ka) \\ & + A_4 K_m(Ka) \\ & = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & A_1 J'_m(Ka) + A_2 Y'_m(Ka) \\ & + A_3 I'_m(Ka) \\ & + A_4 K'_m(Ka) \\ & = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & K^2 [A_1 J''_m(Kb) + A_2 Y''_m(Kb) \\ & + A_3 I''_m(Kb) \\ & + A_4 K''_m(Kb)] \\ & + \frac{K\sigma}{b} [A_1 J'_m(Kb) \\ & + A_2 Y'_m(Kb) + A_3 I'_m(Kb) \\ & + A_4 K'_m(Kb)] \\ & - \frac{\sigma m^2}{b^3} [A_1 J_m(Kb) \\ & + A_2 Y_m(Kb) + A_3 I_m(Kb) \\ & + A_4 K_m(Kb)] \\ & = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & K^3 [A_1 J'''_m(Kb) + A_2 Y'''_m(Kb) \\ & + A_3 I'''_m(Kb) + A_4 K'''_m(Kb)] \\ & + \frac{K^2}{b} (A_1 J''_m(Kb) \\ & + A_2 Y''_m(Kb) + A_3 I''_m(Kb) \\ & + A_4 K''_m(Kb)) \\ & - \frac{K[1 + (2 - \sigma)m^2]}{b^2} \\ & \times [A_1 J'_m(Kb) + A_2 Y'_m(Kb) \\ & + A_3 I'_m(Kb) + A_4 K'_m(Kb)] \\ & + \frac{(3 - \sigma)m^2}{b^3} [A_1 J_m(Kb) \\ & + A_2 Y_m(Kb) \\ & + A_3 I_m(Kb) \\ & + A_4 K_m(Kb)] \\ & = 0 \end{aligned}$$

为得 A_1, A_2, A_3, A_4 的非零解, 必须有

$$\begin{array}{cccc}
J_m(\mu) & Y_m(\mu) & I_m(\mu) & K_m(\mu) \\
J'_m(\mu) & Y'_m(\mu) & I'_m(\mu) & K'_m(\mu) \\
J''_m(3\mu) + \frac{\sigma}{3\mu} J'_m(3\mu) Y''_m(3\mu) + \frac{\sigma}{3\mu} Y'_m(3\mu) I''_m(3\mu) + \frac{\sigma}{3\mu} I'_m(3\mu) K''_m(3\mu) + \frac{\sigma}{3\mu} K'_m(3\mu) & & & \\
- \frac{\sigma m^2}{9\mu^2} J_m(3\mu) & - \frac{\sigma m^2}{9\mu^2} Y_m(3\mu) & - \frac{\sigma m^2}{9\mu^2} I_m(3\mu) & - \frac{\sigma m^2}{9\mu^2} K_m(3\mu) \\
J'''_m(3\mu) + \frac{1}{3\mu} J''_m(3\mu) Y'''_m(3\mu) + \frac{1}{3\mu} Y''_m(3\mu) I'''_m(3\mu) + \frac{1}{3\mu} I''_m(3\mu) K'''_m(3\mu) + \frac{1}{3\mu} K''_m(3\mu) & & & \\
- \frac{[1 + (2 - \sigma)m^2]}{9\mu^2} & - \frac{[1 + (2 - \sigma)m^2]}{9\mu^2} & - \frac{[1 + (2 - \sigma)m^2]}{9\mu^2} & - \frac{[1 + (2 - \sigma)m^2]}{9\mu^2} \\
\times J'_m(3\mu) & \times Y'_m(3\mu) & \times I'_m(3\mu) & \times K'_m(3\mu) \\
+ \frac{(3 - \sigma)m^2}{27\mu^3} J_m(3\mu) & + \frac{(3 - \sigma)m^2}{27\mu^3} Y_m(3\mu) & + \frac{(3 - \sigma)m^2}{27\mu^3} I_m(3\mu) & + \frac{(3 - \sigma)m^2}{27\mu^3} K_m(3\mu) \\
= 0 & & & (5)
\end{array}$$

(5)式中已取 $b = 3a$, 而 $\mu = Ka$. 由(5)式可解出 μ 值,进而可得 $f_{m,n}$ 的值为

$$f_{m,n} = \frac{\mu_{m,n}^2 \cdot h}{4\pi a^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{3\rho(1 - \sigma^2)}} \quad (6)$$

($m = 0, 1, 2, 3, \dots$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$)

式中 $\mu_{m,n}$ ——方程(5)的一系列根值. 下标 m 代表锯片振动时的节直径个数, n 为节圆个数(不包括 $r = \alpha$ 节圆).

当外加强迫力频率与锯片固有频率相吻合时,锯片发生共振,固有频率又称共振频率.

用微机算得(5)式的一系列根值 $\mu_{m,n}$ 如表1所示.

表1 $\mu_{m,n}$ 计算值(取 $\sigma = 0.28$)

m	n					
	0	1	2	3	4	5
0	0.901	2.287	3.891	5.471	7.047	8.622
1	0.898	2.334	3.922	5.495	7.067	8.638
2	0.981	2.475	4.018	5.569	7.127	8.689
3	1.239	2.703	4.177	5.692	7.227	8.773
4	1.580	3.000	4.398	5.864	7.367	8.891
5	1.941	3.345	4.674	6.082	7.546	9.042
6	2.304	3.720	4.996	6.345	7.762	9.225
7	2.665	4.109	5.353	6.647	8.015	9.440
8	3.023	4.502	5.734	6.984	8.303	9.687

用时间平均全息法拍下了圆锯片的静态振动模式^[4]. 图3为其实验装置示意图. 实验时圆锯片的安装方式与实用时相同. 激振器为电

磁非接触式, 由音频信号发生器输出的正弦电信号激励, 用计数式频率计监测其激振频率. He-Ne 激光经分束镜分为两束. 一束透过分束镜由全反镜反射, 经扩束、针孔滤波、透镜准直以小人射角照明振动锯片. 由锯片漫射的光照明锯片正前方的全息干版, 该光束称为物光束. 另一束由分束镜反射再经全反镜反射, 扩束照明全息干版, 该光束称为参考光束. 物光波与参考光波在全息干版处干涉, 曝光后的干版再经显影、定影处理, 即成全息图. 将该全息图放回原光路的全息干版处, 仅用原参考光波照明全息图, 则在原来锯片所在位置处(此时锯片已移去)可观察到锯片的三维象, 且在锯片上迭加了一组绚丽的明暗干涉条纹, 该干涉图案就是圆锯片对应于某一固有频率的振型图.

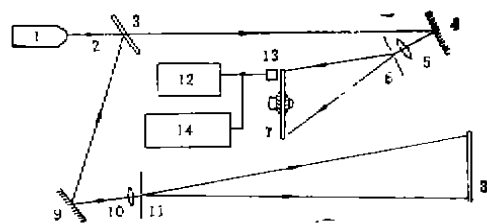


图3 时间平均全息法的实验装置示意图

1——He-Ne 激光; 2——激光束; 3——分束镜; 4——全反镜; 5——扩束镜; 6——针孔滤波; 7——透镜; 8——全息干版; 9——全反镜; 10——扩束镜; 11——针孔滤波; 12——音频振荡器; 13——激振器; 14——计数式频率计

表2 圆锯片固有频率 $f_{m,n}$ 实测值与计算值的比较

$f_{m,n}$	$f_{2,0}$	$f_{3,0}$	$f_{4,0}$	$f_{5,0}$	$f_{1,1}$	$f_{2,1}$	$f_{3,1}$	$f_{4,1}$	$f_{5,0}$	$f_{5,1}$	$f_{6,1}$	$f_{2,2}$	$f_{3,2}$	$f_{4,2}$	$f_{5,2}$	$f_{6,2}$
实测值 (Hz)	143	243	411	631	831	988	1208	1510	1552	1904	2372	2590	2853	2903	3188	3492
计算值 (Hz)	153	244	397	599	866	974	1161	1430	1452	1778	2199	2566	2773	2683	3074	3221
$\frac{\text{计算值}-\text{实测值}}{\text{实测值}} \times 100\%$	6.5	0.4	-3.5	-5.3	4.0	1.4	-4.0	-5.6	-6.9	-7.1	-7.9	-0.9	-2.9	-8.2	-3.7	-8.4

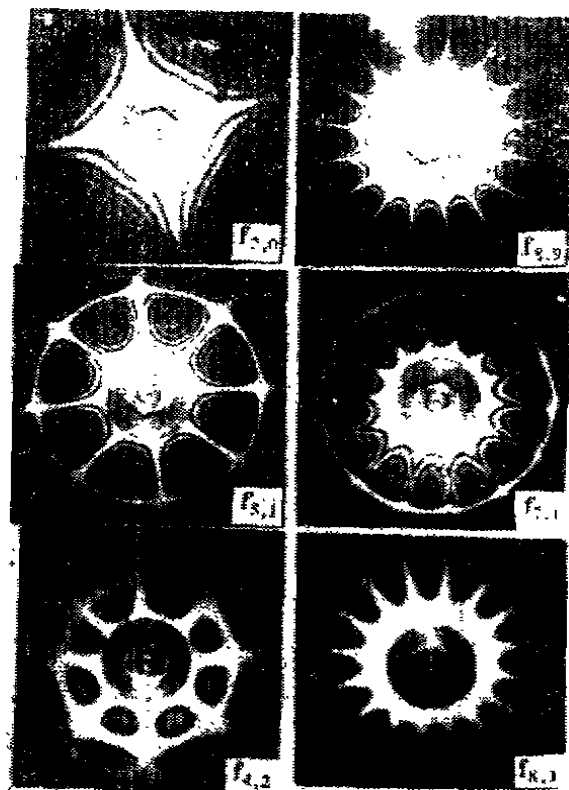


图4 用时间平均全息法摄得的圆锯片振型图

图4给出了实验中拍得的16种振型中的6幅照片。图案中最亮的线就是振动圆锯片的波节线，最亮的圆为波节圆。再现象上还清楚地显示了圆锯片在某固有频率下的等振幅线和腹点。基频 $f_{0,0}$ 模式照片由于固定支架共振而没有拍到。另外几个频率较低的振动模式亦难以测到。用(6)式对固有频率 $f_{m,n}$ 进行了计算，取 $a = 50 \text{ mm}$ ， $b = 150 \text{ mm}$ ， $h = 1.6 \text{ mm}$ ， $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ， $E = 21 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ， $\sigma = 0.28$ 。 $f_{m,n}$ 的实测值与计算值的比较结果见表2。它们符合良好，表明锯片振动的计算模型是合适的。

应用声学

由以上实验发现，在哨叫频率 3450 Hz 附近存在固有频率 $f_{8,1} = 3492 \text{ Hz}$ ，亦就是说当某一强迫力频率与 $f_{8,1}$ 固有频率相接近时，激发了锯片的横向谐振，从而产生哨叫声，使频谱具有明显的峰值特性。应该指出， $f_{8,1}$ 与哨叫声频率差异的原因是 $f_{8,1}$ 为锯片静态固有频率，而哨叫声频率则是锯片旋转时测得的。上述结论与文献[5]报道的引起“锯片共振的主要是8条或8条以上节直径、零节圆振动模式”、“有时亦有一个节圆再加上几条节直径的振动模式”的结论一致。文献[6]还得出这样的结论：转速在一定范围内改变时，某一共振频率（即固有频率）保持不变。这些结论均有力地说明了哨叫声来自于锯片横向共振，而具有宽带频谱特性的空气动力噪声只是激发锯片共振的外力。

下列一些实验现象亦证实了哨叫声来自锯片横向共振的结论。1. 尽管空气动力噪声依然存在，用胶合锯片可有效地抑制哨叫声，因为横向振动幅度大大地减小了。胶合锯片的固有频率亦大大地降低。两块厚 1.4 mm 锯片胶合而成的锯片实测的 $f_{8,1} = 2617 \text{ Hz}$ ，而厚 2.8 mm 的单锯片 $f_{8,1} = 4889 \text{ Hz}$ 。2. 在旋转锯片表面附近放置一块纤维板（俗称控噪板），尽量接近但不接触，由于干扰了作为强迫力的空气动力噪声，可抑制哨叫声。3. 对于表面平直度好的稍厚单锯片，由于降低了锯片本身的横向振动，亦可抑制哨叫声。

三、低噪声木工圆锯机

我们曾分别采用胶合锯片和通常的平直单锯片，均可抑制哨叫声。除此以外，对圆锯机身的降噪、减振措施主要有以下几点。

1. 锯轴

木工圆锯机的锯轴旋转速度很高,一般都在 3000 转/min 以上,且当锯片切削时还受到一定的力,因此锯轴的悬臂长度及锯轴的平衡就显得十分重要。如果锯轴的悬臂过长、锯轴的平衡不好,均容易引起振动。当振动传到锯片及其他构件上,势必会产生较大的噪声。因此,我们在设计时尽量缩短锯轴的悬臂长度,同时对锯轴的动平衡作了较高的要求,还对锯片夹盘作了较高的静平衡校正。

2. 电动机装置

木工圆锯机上的电动机通常都采用刚性连接,即电动机安装在直接置于地上的圆锯机机身上,这样当马达高速旋转时引起的振动通过机身而产生噪声。为了改进电动机的安装,我们将电动机吊空,并在与机身之间采用柔性连接,即在连接处垫有阻尼材料,有效地减小了由电动机振动产生的噪声。同时还采用新型的 V 型胶带,用这种胶带只需一根就可以传递 4kW 功率,避免了由于几根胶带的长短不一引起振动而产生的噪声。电动机装置的结构见图 5。

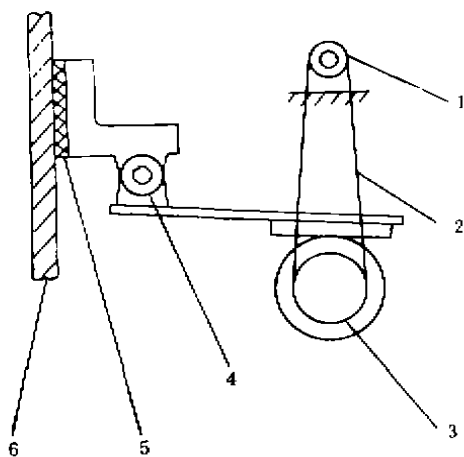


图 5 电动机装置示意图

1——锯轴； 2——V 型胶带； 3——电动机； 4——铰链；
5——阻尼材料； 6——机身

3. 隔声罩式的机身

圆锯机在运转时,除旋转锯片外轴承和电动机均会产生一定的噪声,并直接向四周传播。为此,我们在工作台下部用铁板焊接成隔声罩

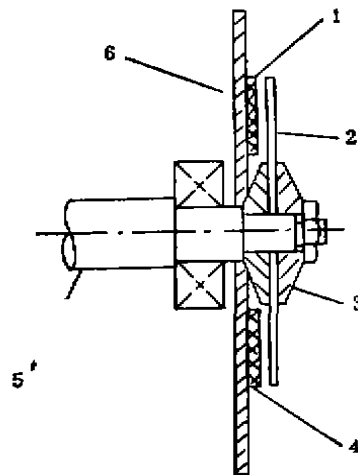


图 6 机身粘贴吸声材料示意图

1——吸声材料； 2——锯片； 3——夹盘； 4——吸声材料； 5——锯轴； 6——机身

式的机身进行全封闭,将机械结构全部安装在里面。这样可有效地降低电动机、轴承等的运转噪声,还可部分降低锯片的运转噪声。而且,圆锯机的外形亦较为别致。同时我们还在机身的门上贴以阻尼材料,有效降低由于机械振动而引起门振动辐射的噪声。

4. 机身贴毛毡

当锯片使用一段时间、使表面平整度变得很差时,要有效抑制哨叫声,根据文献[3]只要在锯片附近平行地贴上一块毛毡(或其他吸声材料),以干扰作为强迫力的空气动力噪声。我们的经验,粘贴方式要求不高,此材料宜尽量贴近锯片。结构示意图见图 6。

按照国标 GB3770-83《木工机床噪声声功率级的测定》对该机进行了测量。用的是 $\phi 300\text{mm}$ 、厚 2.8mm 的 100 三角齿锯片。测得的结果为:当线速度为 47.1m/s 时空载平均噪声级为 63.5dBA;锯切木材时操作者耳朵处的有载噪声约为 77dBA。于 1986 年 12 月由轻工业部机械局召开并委托上海市二轻局主持了该机的鉴定会,鉴定意见为:该机的噪声指标达到了国际、国内先进水平,可以组织小批量试生产。该机还获得了 1986 年度上海市经委颁发的优秀新产品二等奖。

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。