

大尺寸三维超声振动系统的智能优化设计*

林基艳¹⁾²⁾ 孙姣夏¹⁾ 林书玉^{2)†}

1) (榆林学院, 榆林市大数据与智能决策重点实验室, 榆林 719000)

2) (陕西师范大学, 陕西省超声学重点实验室, 西安 710119)

(2024年1月2日收到; 2024年1月26日收到修改稿)

对大尺寸三维超声换能器系统的耦合振动进行有效控制, 优化系统的性能, 一直都是功率超声领域亟待解决的难题. 研究发现, 一些声子晶体槽、孔结构可以对大尺寸换能器系统的横向振动进行抑制, 提高系统振幅分布均匀度, 且可以通过改变声子晶体结构的配置参数人为地实现对大尺寸三维超声振动系统性能的调控. 但过多的设计参数必然会增加系统设计的复杂度, 且目前大尺寸三维超声换能器系统的优化设计依赖于经验试错法, 设计效率和成功率较低, 性能也无法保证. 研究引入同质位错、点缺陷结构对大尺寸三维超声振动系统进行优化设计, 并利用数据分析技术评价了同质位错、点缺陷结构的配置对系统辐射面的纵向位移振幅、振幅分布均匀度、辐射声功率、工作带宽等的影响规律, 建立了同质位错结构、近周期缺陷结构的结构参数——大尺寸超声换能器系统性能的预测模型, 实现了对大尺寸功率超声换能器系统的智能设计, 提高了设计效率和成功率, 降低了设计成本.

关键词: 耦合振动, 大尺寸三维超声振动系统, 同质位错, 点缺陷, 智能化设计

PACS: 43.40.+s, 43.35.+d, 43.38.+n, 63.20.D-

DOI: 10.7498/aps.73.20240006

1 引言

随着功率超声应用范围的不断扩大, 对超声振动系统性能的要求越来越高, 且在不同的应用场合, 对超声振动系统性能的要求也不同. 在超声加工、超声焊接等大功率超声处理及加工领域, 大尺寸三维超声振动系统得到了越来越广泛的应用. 但因三维超声振动系统的横向尺寸过大, 受耦合振动的影响, 在使用时不可避免地会出现能量损耗增大、辐射面的纵向位移振幅分布不均匀且较小等一系列问题, 严重影响超声处理及加工系统的工作效果^[1].

针对大尺寸三维超声振动系统的上述问题, 国内外的超声工作者们展开了积极的研究, 研究方案主要围绕大尺寸三维超声振动系统耦合振动的分

析、大尺寸三维超声振动系统耦合振动的控制、基于声子晶体结构的振动抑制方法三个方面展开.

1) 耦合振动的分析方法^[2-11]. 主要是利用表观弹性法、瑞利能量法、等效电路法等对大尺寸三维超声振动系统的耦合振动进行分析. 其中, 表观弹性法因其简单、物理意义明确等优点而得到了广泛的应用, 但利用其对形状相对复杂、开槽孔较多的大尺寸振动系统进行分析时, 计算过程会非常复杂, 甚至可能产生较大的误差.

2) 耦合振动的控制方法^[12-23]. 主要是利用开孔、开槽、开细缝、二次设计、附加弹性部件等方法对大尺寸三维超声振动系统的耦合振动进行控制.

3) 基于声子晶体结构的振动抑制方法^[24-27]. 主要是利用在大尺寸三维超声振动系统上设计的具有周期性结构的声子晶体的带隙, 实现对系统中横向振动的抑制和衰减.

* 国家自然科学基金 (批准号: 12174240, 12364057, 12004330) 和博士科研启动基金 (批准号: 22GK26) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sylin@snnu.edu.cn

虽然这些方法都能在一定程度上改善大尺寸三维超声振动系统的性能,但各有其局限性. 不仅对振动系统辐射面的位移振幅分布均匀性、纵向位移振幅的改善效果有限,且设计方法依赖于经验试错法,设计效率和成功率较低,性能也无法保证. 截至目前,对两个横向尺寸皆与其纵向尺寸可相比拟的大尺寸三维超声振动系统的研究较少,因此,为更好的推动大尺寸三维功率超声振动系统在实际工程领域的应用,亟需探索新的方法来对其耦合振动进行更有效地控制.

2 大尺寸三维功率超声振动系统

本论文以应用在超声塑料焊接领域的、以纵振为主的大尺寸三维长方体超声振动系统为例进行研究. 系统由夹心式纵向振动压电陶瓷换能器、复合变幅杆和两个横向尺寸 (X, Y 方向的尺寸) 皆与其纵向 (Z 方向) 尺寸可相比拟的大尺寸三维长方体工具头组成,工作频率设定在 20 kHz 附近,为实现谐振,三者均设计成一个半波长结构,系统结构如图 1 所示,各部分的材料和结构参数如表 1 所示. 超声能量沿图 1 的 Z 轴传播,利用仿真软件模拟系统的振动特性,得到如图 2 所示的振型图、图 3 所示的工具头辐射面以及辐射面上沿 X 方向

(平行于 X 方向的垂直中心线,见图 1(b))、 Y 方向的纵向相对位移振幅分布图 (平行于 Y 方向的垂直中心线,见图 1(c)).

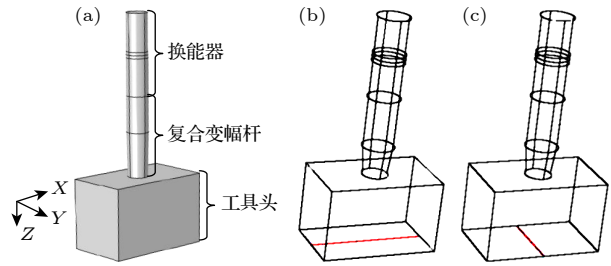


图 1 大尺寸三维长方体超声振动系统结构示意图及中心线位置

Fig. 1. Structural schematic diagram and centerline position of large-dimension 3D cube ultrasonic vibration system.

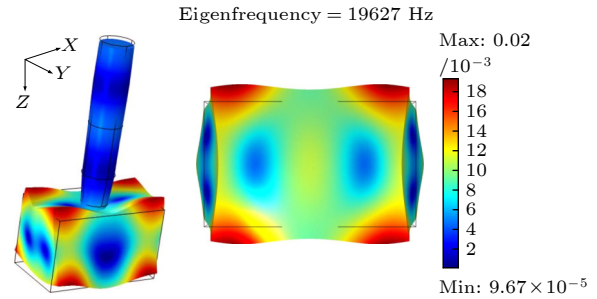


图 2 大尺寸三维超声振动系统振型图

Fig. 2. Modal diagram of large-dimension 3D ultrasonic vibration system.

表 1 系统的材料和结构参数表

Table 1. Material and structural parameter table of the system.

| 部件 | 材料属性 | 形状 | 大端半径(长)/mm | 小端半径(宽)/mm | 高度/mm |
|--------------|-------------------|-------|------------|------------|-------|
| 换能器前盖板 | Aluminum 6063-T83 | 等截面圆柱 | 25 | 25 | 56 |
| 换能器压电陶瓷片(两片) | PZT-4 | 等截面圆环 | 25 | 25 | 6 |
| 换能器后盖板 | Aluminum 6063-T83 | 等截面圆柱 | 25 | 25 | 56 |
| 复合变幅杆圆柱部分 | Aluminum 6063-T83 | 等截面圆柱 | 25 | 25 | 77 |
| 复合变幅杆圆锥部分 | Aluminum 6063-T83 | 圆锥 | 25 | 20 | 45 |
| 工具头 | Aluminum 6063-T83 | 长方体 | 180 | 106 | 111 |

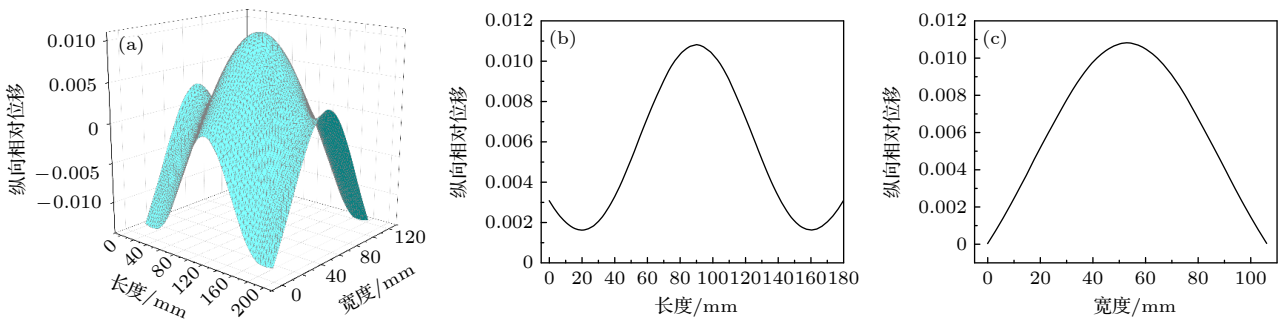


图 3 辐射面和辐射面长度 (X 方向) 和宽度 (Y 方向) 上的纵向相对位移振幅分布对比图

Fig. 3. Comparison diagram of longitudinal relative displacement amplitude distribution on the radiation surface and the length (X -direction) and width (Y -direction) of the radiation surface.

根据

$$S_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (1)$$

可求得大尺寸三维长方体超声振动系统辐射端面纵向相对位移振幅平均值 $S_n = 0.00467$. 根据

$$U_n = \left\{ 1 - \frac{\max(\text{amplitude}) - \min(\text{amplitude})}{\max(\text{amplitude}) + \min(\text{amplitude})} \right\} \times 100\% \quad (2)$$

可求得辐射面纵向位移振幅分布均匀度 $U_n = 0.0426936\%$. 为了方便比较, 论文还求解了平行于 X, Y 方向的垂直中心线上的纵向相对位移振幅平均值和纵向位移振幅分布均匀度, 其中, 大尺寸三维长方体超声振动系统辐射端面长度、宽度方向上的纵向相对位移振幅平均值分别为 $S_{cn} = 0.00497$, $S_{kn} = 0.00624$. 辐射面长度、宽度方向上的纵向位移振幅分布均匀度分别为 $U_{cn} = 26.096\%$, $U_{kn} = 0.8001\%$.

从计算结果可以看出, 受泊松效应的影响, 大尺寸三维长方体超声振动系统产生了强烈的耦合振动, 不仅导致系统辐射面的纵向位移振幅很小, 而且振幅分布均匀度也很差. 为了对系统的横向振动进行有效地控制, 改善系统辐射面振幅分布均匀度, 增大输出端面的纵向位移振幅, 本研究利用同质位错和点缺陷结构对大尺寸三维长方体超声振动系统进行优化设计.

3 大尺寸三维功率超声振动系统的优化设计

3.1 同质位错结构的大尺寸三维超声振动系统的设计

同质位错^[28,29](位错是一种晶体结构上的拓扑缺陷)是一种在位错线两侧具有相同材料以及结构属性的晶体结构, 可分为横向位错(将位错线两边的所有散射体整体向左/右移动 $|\Delta x|/2$ 距离)和纵向位错(将位错线两边的所有散射体整体向上/下移动 $|\Delta y|/2$ 距离), 如图 4 所示. 研究表明, 引入同质横向位错结构, 可以使得带隙频率范围内的超声波沿位错通道传播, 从而出现声波导现象, 且可以通过对 Δx 的调节, 有针对性地调控超声波的传播行为和频带特征. 这就为大尺寸三维超声振动系统辐射面纵向位移振幅分布均匀度的改善提供了一种新的解决方案, 即在振动系统的工具头上设计同

质横向位错结构(沿大尺寸三维长方体工具头的 X 轴方向, 加工 4 个高度为 h , 宽度为 w , 槽中心与位错线距离分别为 l_2, l_3 的穿透性长方体空气槽, 沿大尺寸三维长方体工具头的 Y 轴方向, 加工 2 个高度为 h , 宽度为 w , 槽中心与位错线距离分别为 l_4 的穿透性长方体空气槽), 调节相邻直孔槽间的位错距离来人为控制传导模的位置, 通过将位错通道设置在位移偏小的位置, 来改善辐射面位移分布, 提高系统辐射面的振幅分布均匀度. 优化后的大尺寸三维长方体工具头模型以及各部分尺寸如图 5 所示.

在 COMSOL Multiphysics 中建立同质位错结构的大尺寸三维超声振动系统的模型, 计算模型的特征频率, 获得图 6 所示的系统振型图, 图 7 所示为工具头辐射面及辐射面沿 X, Y 方向的纵向位移振幅分布图(仍然选取两条垂直中心线).

由 (1) 式、(2) 式计算可知, 同质位错结构的大尺寸三维超声振动系统辐射面的纵向相对位移振幅平均值 $S_n = 0.00775$, 纵向位移振幅分布均匀度 $U_n = 87.8583\%$. 辐射面长度、宽度方向上的纵向相对位移振幅平均值分别为 $S_{cn} = 0.00726$, $S_{kn} = 0.00773$. 辐射面长度、宽度方向上纵向位移振幅分布均匀度分别为 $U_{cn} = 93.3646\%$, $U_{kn} = 92.5975\%$. 即

$$\begin{aligned} \frac{(S_n)_{\text{同质}}}{(S_n)_{\text{未优化}}} &\approx 1.6595, & \frac{(U_n)_{\text{同质}}}{(U_n)_{\text{未优化}}} &\approx 2057.8799, \\ \frac{(S_{cn})_{\text{同质}}}{(S_{cn})_{\text{未优化}}} &\approx 1.4608, & \frac{(S_{kn})_{\text{同质}}}{(S_{kn})_{\text{未优化}}} &\approx 1.2388, \\ \frac{(U_{cn})_{\text{同质}}}{(U_{cn})_{\text{未优化}}} &\approx 3.5778, & \frac{(U_{kn})_{\text{同质}}}{(U_{kn})_{\text{未优化}}} &\approx 115.7330. \end{aligned}$$

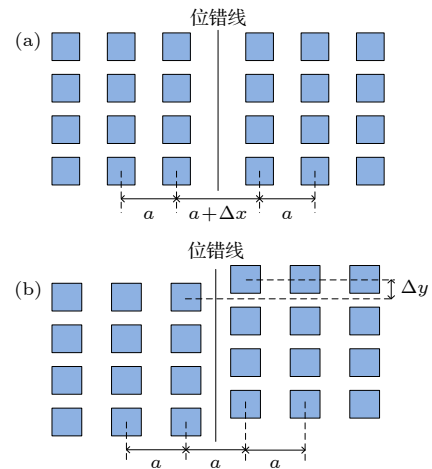


图 4 同质位错结构 (a) 横向位错结构; (b) 纵向位错结构
Fig. 4. Schematic diagram of dislocation defect: (a) Lateral dislocation structure; (b) longitudinal dislocation structure.

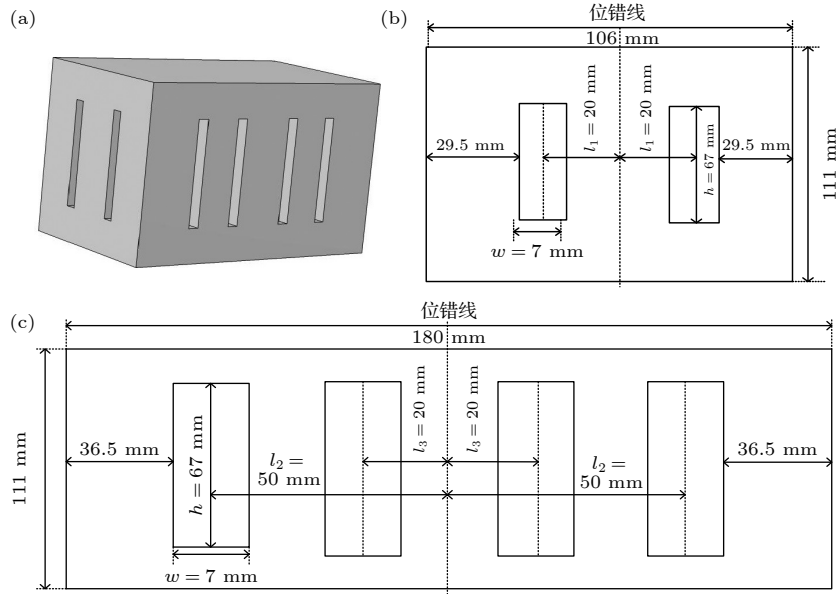


图 5 同质位错结构的工具头 (a) 模型图; (b) 工具头 YZ 面的各部分尺寸; (c) 工具头 XZ 面的各部分尺寸

Fig. 5. Tool heads with homogeneous dislocation structures: (a) Model diagram; (b) dimensions of each part of the YZ surface of the tool head; (c) dimensions of each part of the XZ surface of the tool head.

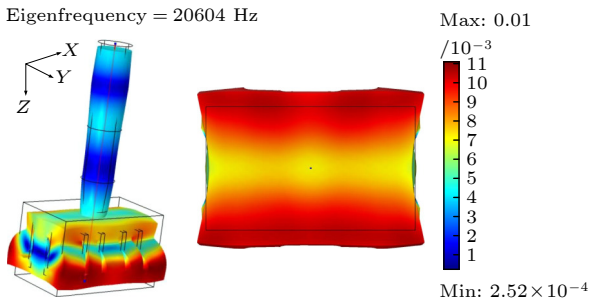


图 6 同质位错结构的大尺寸三维超声振动系统振型图
Fig. 6. Modal diagram of large-dimension 3D ultrasonic vibration system with homogeneous dislocation structure.

由图 7 和计算结果可以看出, 同质位错结构的大尺寸三维超声振动系统辐射面的纵向位移振幅分布均匀度得到了有效地改善, 但辐射面的纵向位移振幅的改善效果较小。

3.2 同质位错与点缺陷结构的大尺寸三维超声振动系统的设计

当声子晶体中存在点缺陷^[30,31](改变晶格中某个散射体的结构参数或移除完美周期结构中的某一散射体而形成的不完美周期结构)时, 会导致其带隙范围内缺陷态的出现, 引发声波的安德森局域化效应(带隙范围内声波的压强或位移等的分布在点缺陷处具有很好的局域性), 且点缺陷模式具有极高的品质因数, 能量损耗较低. 这又为大尺寸三维超声振动系统辐射面的纵向位移振幅分布均匀度和纵向位移振幅的改善提供了一种新思路, 将大尺寸三维超声振动系统的工具头设计成点缺陷结构, 利用构造的点缺陷模式, 获得极低的能量损耗(空气和基体 Al 6063-T83 的声阻抗差异较大, 向空气

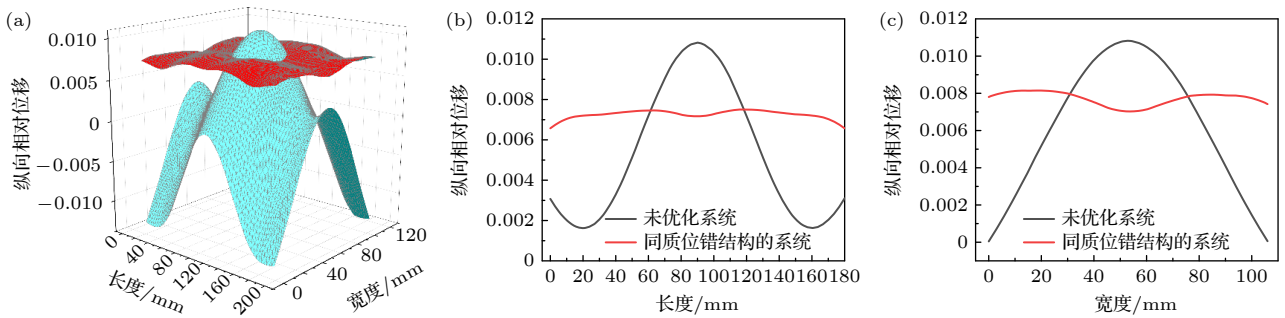


图 7 辐射面和辐射面长度(X方向)和宽度(Y方向)上的纵向相对位移振幅分布对比图

Fig. 7. Comparison diagram of longitudinal relative displacement amplitude distribution on the radiation surface and the length (X-direction) and width (Y-direction) of the radiation surface.

的辐射小, 尤其当声波为高频声波时, 能量损耗几乎可以忽略不计), 有效改善大尺寸三维超声振动系统因耦合振动导致的能量损耗增大的问题. 且改变缺陷点的结构参数 (填充率、半径、旋转角度等), 可以人为地调控缺陷点位置的模场分布和振动相位, 从而进一步改善大尺寸三维超声振动系统辐射面纵向位移振幅分布均匀度和纵向位移振幅大小.

在大尺寸三维超声振动系统的工具头上加工 3 行 5 列与系统 Z 轴平行的、底半径为 r_1 、顶半径为 r_2 、高度为 h_1 的以正方形晶格排列的空气圆锥体孔, 并将 3×5 排列结构最中心的圆锥体孔 (图 8(a) 中红色圆圈标注的部分) 改为半径为 r_3 的圆柱体孔; 沿工具头的 X 轴方向, 加工 4 个高度为 h 、宽度为 w 、槽中心与位错线距离分别为 l_2, l_3 的穿透性长方体空气槽, 沿大尺寸三维长方体工具头

的 Y 轴方向, 加工 2 个高度为 h 、宽度为 w 、槽中心与位错线距离分别为 l_1 的穿透性长方体空气槽, 构造基于单点变形缺陷和同质位错结构的大尺寸三维超声振动系统 (换能器、复合变幅杆、工具头的材料和尺寸均保持不变), 优化后系统的结构模型和各部分的尺寸如图 8 所示. 利用 COMSOL Multiphysics 仿真得到的系统振型图如图 9 所示.

由 (1) 式、(2) 式计算可知, 同质位错与点缺陷结构的大尺寸三维超声振动系统辐射面上的纵向相对位移振幅平均值 $S_n = 0.0221$, 辐射面上的纵向位移振幅分布均匀度 $U_n = 92.5314\%$. 辐射面长度、宽度方向上的纵向相对位移振幅平均值分别为 $S_{cn} = 0.0217$, $S_{kn} = 0.0222$, 辐射面长度、宽度方向上的纵向位移振幅分布均匀度分别为 $U_{cn} = 98.6029\%$, $U_{kn} = 95.5901\%$. 即

$$\frac{(S_n)_{\text{同质和点缺陷}}}{(S_n)_{\text{未优化}}} \approx 4.7323, \quad \frac{(U_n)_{\text{同质和点缺陷}}}{(U_n)_{\text{未优化}}} \approx 2167.3366, \quad \frac{(S_n)_{\text{同质和点缺陷}}}{(S_n)_{\text{同质}}} \approx 2.8516, \quad \frac{(U_n)_{\text{同质和点缺陷}}}{(U_n)_{\text{同质}}} \approx 1.0532,$$

$$\frac{(S_{cn})_{\text{同质和点缺陷}}}{(S_{cn})_{\text{未优化}}} \approx 4.3662, \quad \frac{(S_{kn})_{\text{同质和点缺陷}}}{(S_{kn})_{\text{未优化}}} \approx 3.4688, \quad \frac{(S_{cn})_{\text{同质和点缺陷}}}{(S_{cn})_{\text{同质}}} \approx 2.9890, \quad \frac{(S_{kn})_{\text{同质和点缺陷}}}{(S_{kn})_{\text{同质}}} \approx 2.8719.$$

$$\frac{(U_{cn})_{\text{同质和点缺陷}}}{(U_{cn})_{\text{未优化}}} \approx 3.7785, \quad \frac{(U_{kn})_{\text{同质和点缺陷}}}{(U_{kn})_{\text{未优化}}} \approx 119.4726, \quad \frac{(U_{cn})_{\text{同质和点缺陷}}}{(U_{cn})_{\text{同质}}} \approx 1.0561, \quad \frac{(U_{kn})_{\text{同质和点缺陷}}}{(U_{kn})_{\text{同质}}} \approx 1.0323.$$

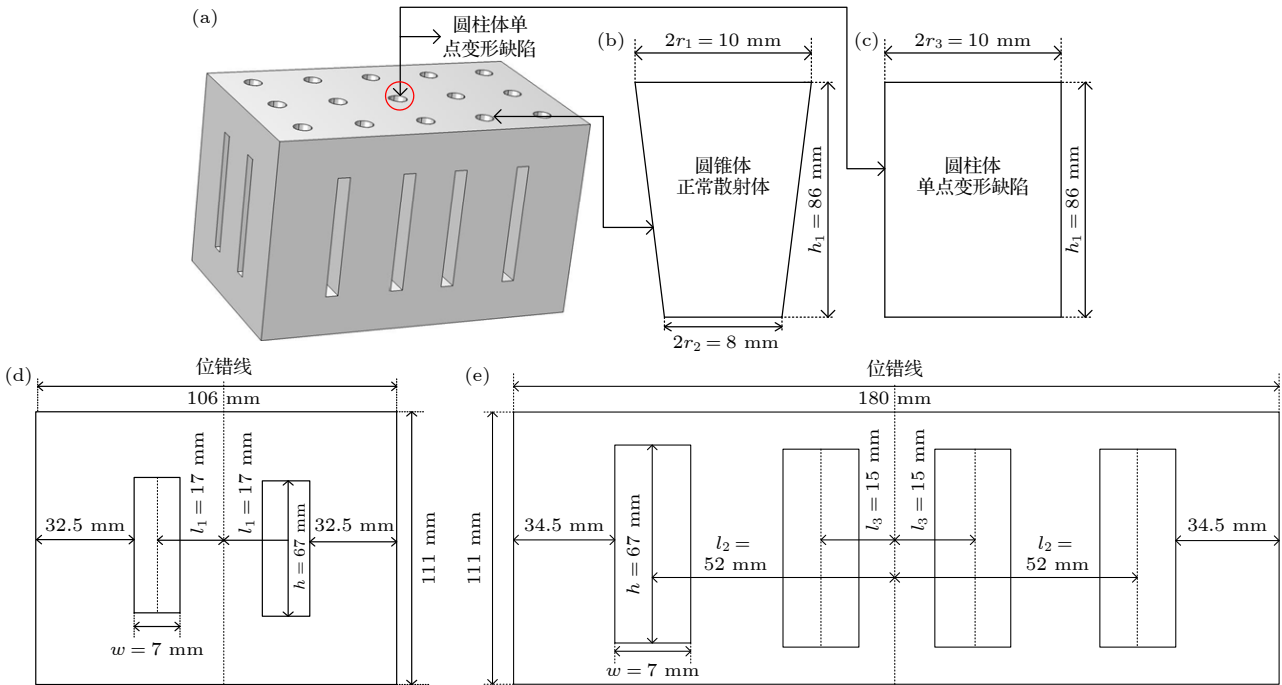


图 8 同质位错与点缺陷结构的工具头 (a) 模型图; (b) 空气圆锥体孔的尺寸; (c) 空气圆柱体孔的尺寸

Fig. 8. Tool heads with homogeneous dislocations and point defect structures: (a) Model diagram; (b) dimensions of air circular vertebral hole; (c) dimensions of air cylinder holes.

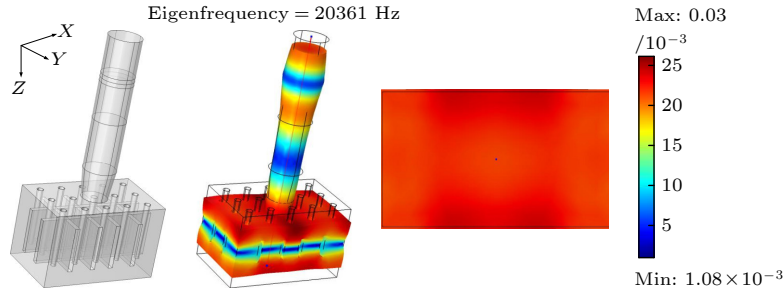


图9 同质位错与点缺陷结构的大尺寸三维超声振动系统振型图

Fig. 9. Modal diagram of large-dimension 3D ultrasonic vibration system with homogeneous dislocations and point defect structures.

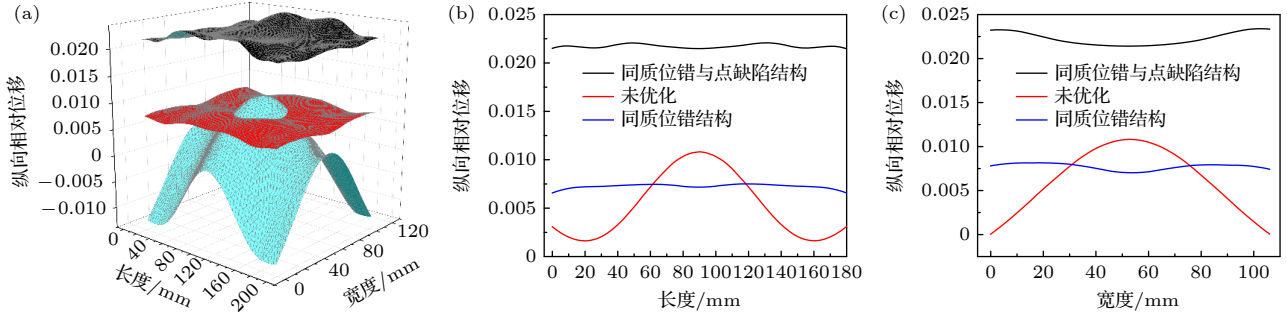


图10 辐射面和辐射面长度(X方向)和宽度(Y方向)上的纵向相对位移振幅分布对比图

Fig. 10. Comparison diagram of longitudinal relative displacement amplitude distribution on the radiation surface and the length (X-direction) and width (Y-direction) of the radiation surface.

由图10和计算结果可以明显看出,与未优化的大尺寸三维超声振动系统相比,同质位错与点缺陷结构的大尺寸三维超声振动系统辐射面的纵向相对位移和振幅分布均匀度均得到显著提升,说明受同质位错和点缺陷结构的影响,系统X和Y方向的横向振动均得到了有效的抑制,纵向振动模式更加单一,保证了系统的纵向工作效率.同时,能量的局域化效应和极低的能量损耗使系统辐射面的纵向位移振幅得到了大幅度增大,即优化设计方案达到了提高超声处理及加工系统性能的目的.

4 基于同质位错与点缺陷结构的系统的智能优化设计

可以通过改变同质位错和点缺陷的结构参数人为地控制位错通道的位置、声波局域化程度、缺陷态模式、振动模场分布等特性来实现对大尺寸三维超声振动系统性能的调控.但过多的同质位错结构和点缺陷结构的设计参数增加了设计的复杂性,严重制约了设计效率和设计质量的持续提高.因此,论文利用数据分析技术评价了长方体空气槽的高度 h ,宽度 w ,散射体空气圆锥体孔的高度 h_1 、单点变形缺陷圆柱体孔的半径 r_3 对大尺寸三维超声

振动系统性能指标(纵向谐振频率 f 、辐射面纵向相对位移振幅、辐射面位移振幅分布均匀度)的影响规律,建立了同质位错结构、近周期缺陷结构的结构参数-大尺寸超声换能器系统性能的预测模型,实现大尺寸功率超声换能器系统的智能设计,提高设计效率和成功率,降低设计成本.根据SPSS的分析结果,可以建立 h, w, h_1, r_3 对纵向谐振频率 f 、辐射面纵向相对位移振幅($x_{位移}, y_{位移}$)、辐射面位移振幅分布均匀度($x_{均匀度}, y_{均匀度}$)的关系模型:

$$f = A + Bx + Cx^2 + Dx^3, \quad (3)$$

其中, A, B, C, D 为常数, x 分别代表 w, r_3, h, h_1 .

当 x 为 w 时, A, B, C, D 分别为21987.899, -106.873, -25.220, 1.048,当 x 为 r_3 时, A, B, C, D 分别为20393.833, 5.910, -2.580, 0.131,当 x 为 h 时, A, B, C, D 分别为23761.086, -100.711, 0.756, 0,当 x 为 h_1 时, A, B, C, D 分别为20581.774, 15.980, -0.431, 0.0025.

$$x_{位移} = A + By + Cy^2 + Dy^3, \quad (4)$$

其中, A, B, C, D 为常数, y 分别代表 w, r_3, h, h_1 .

当 y 为 w 时, A, B, C, D 分别为8.899, -0.683, 0.346, -0.024,当 y 为 r_3 时, A, B, C, D 分别为13.256, -0.0826, 0.0196, -0.00424,当 y 为 h 时, $A,$

B, C, D 分别为 $-2.878, 0.528, -0.00441, 0$, 当 y 为 h_1 时, A, B, C, D 分别为 $6.147, 0.0490, 0.000719, -0.00000428$.

$$y_{\text{位移}} = A + Bz + Cz^2 + Dz^3, \quad (5)$$

其中, A, B, C, D 为常数, z 分别代表 w, r_3, h, h_1 .

当 z 为 w 时, A, B, C, D 分别为 $10.687, 0.316, 0.101, -0.0161$, 当 z 为 r_3 时, A, B, C, D 分别为 $13.993, -0.152, 0.0284, -0.00711$, 当 z 为 h 时, A, B, C, D 分别为 $9.220, 0.124, 0, -0.0000139$, 当 z 为 h_1 时, A, B, C, D 分别为 $6.179, 0.0803, 0, 0$.

$$x_{\text{均匀度}} = A + Bm + Cm^2 + Dm^3, \quad (6)$$

其中, A, B, C, D 为常数, m 分别代表 w, r_3, h, h_1 .

当 m 为 w 时, A, B, C, D 分别为 $60.434, 6.478, 0.622, -0.137$, 当 m 为 r_3 时, A, B, C, D 分别为 $100.911, -4.0582, 1.239, -0.108$, 当 m 为 h 时, A, B, C, D 分别为 $-86.416, 5.406, -0.0406, 0$, 当 m 为 h_1 时, A, B, C, D 分别为 $97.582, -0.318, 0.00745, -0.0000437$.

$$y_{\text{均匀度}} = A + Bn + Cn^2 + Dn^3, \quad (7)$$

其中, A, B, C, D 为常数, n 分别代表 w, r_3, h, h_1 .

当 n 为 w 时, A, B, C, D 分别为 $100.217, -6.363, 2.332, -0.215$, 当 n 为 r_3 时, A, B, C, D 分别为 $98.417, -3.146, 0.877, -0.0697$, 当 n 为 h 时, A, B, C, D 分别为 $-79.685, 4.804, -0.0328, 0$, 当 n 为 h_1 时, A, B, C, D 分别为 $96.291, -0.0259, 0.000540, -0.00000309$.

为验证预测模型的准确性, 图 11—图 14 显示了利用 COMSOL 仿真软件计算的长方体空气槽的高度 h , 宽度 w , 散射体空气圆锥体孔的高度 h_1 , 单点变形缺陷圆柱体孔的半径 r_3 对大尺寸三维超声振动系统性能指标 (纵向谐振频率、辐射面纵向

相对位移振幅、辐射面位移振幅分布均匀度) 的影响规律.

图 11 显示了长方体空气槽的高度 h 对大尺寸三维超声振动系统的谐振频率、辐射面纵向位移振幅、位移振幅分布均匀度的影响规律. 从图 11 可以看出, 当其他几何结构参数保持不变时, 随着长方体空气槽的高度 h 的增大, 系统谐振频率呈现先减小后增大的趋势. 随着长方体空气槽的高度 h 的增大, 辐射面的 Y 方向的纵向相对位移振幅整体呈现出先增大再减小然后增大的趋势, 辐射面的 X 方向的纵向相对位移振幅整体呈现先增大后减小再增大的趋势, 当 h 在 $55\text{—}60\text{ mm}, 66\text{—}72\text{ mm}$ 之间取值时, 系统辐射面的纵向相对位移振幅较大. 另外, 随着长方体空气槽的高度 h 的增大, 系统辐射面的纵向位移振幅分布均匀度也整体呈现出了先增大、后减小、接着增大、最后减小的趋势, 当 h 在 $66\text{—}71\text{ mm}$ 之间取值时, 系统辐射面的纵向位移振幅分布均匀度最佳. 因此, 综合考虑各个性能指标, 当长方体空气槽的高度 h 在 $66\text{—}71\text{ mm}$ 之间取值时, 同质位错与点缺陷结构的大尺寸三维超声振动系统的性能可达到较为理想的状态.

图 12 显示了长方体空气槽的宽度 w 对大尺寸三维超声振动系统的谐振频率、辐射面纵向位移振幅、位移振幅分布均匀度的影响规律. 从图 12 可以看出, 当其他几何结构参数保持不变时 (设置 $h = 67\text{ mm}$), 随着长方体空气槽的宽度 w 的增大, 系统谐振频率逐渐减小; 辐射面的 Y 方向的纵向相对位移振幅整体呈现出先减小后增大最后减小的趋势, 辐射面的 X 方向的纵向相对位移振幅整体呈现先增大后减小的趋势, 当 w 在 $6\text{—}9\text{ mm}$ 之间取值时, 系统辐射面的纵向相对位移振幅较大. 另外, 随着 w 的增大, 辐射面的 X 方向的纵向位移振幅分布均匀度整体呈现出先增大后减小的趋势,

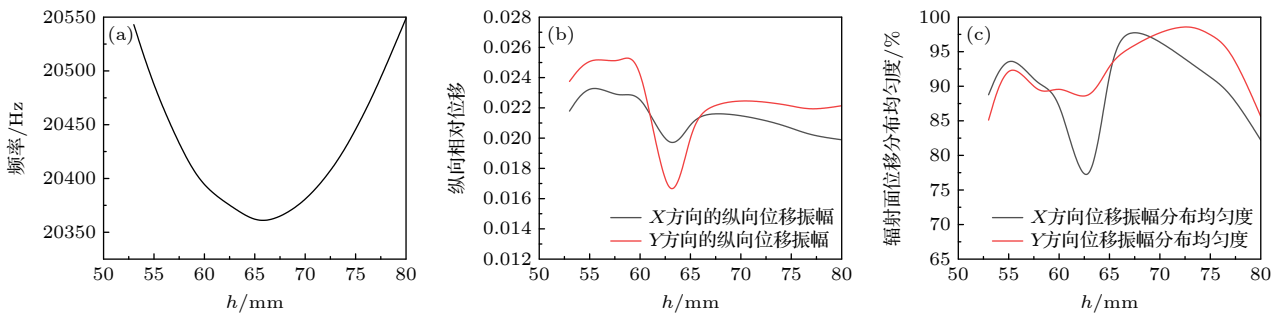


图 11 h 对系统性能的影响

Fig. 11. Influence of the parameter of h on the performance of the system.

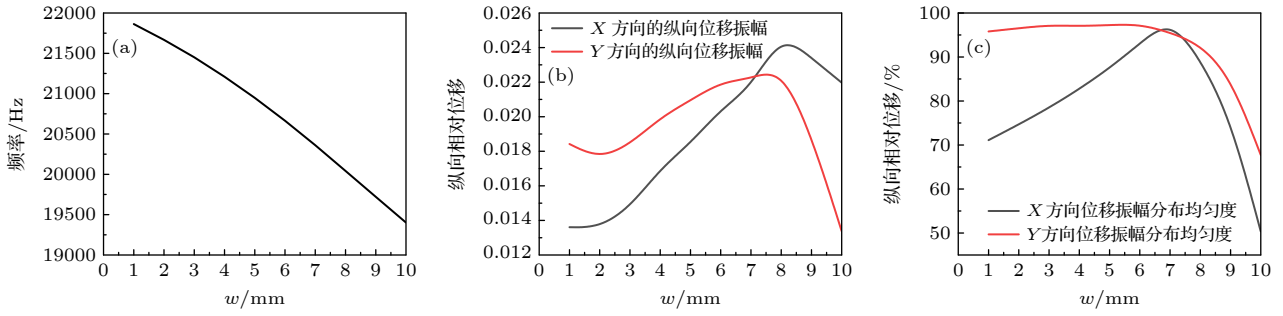


图 12 w 对系统性能的影响

Fig. 12. Influence of the parameter of w on the performance of the system.

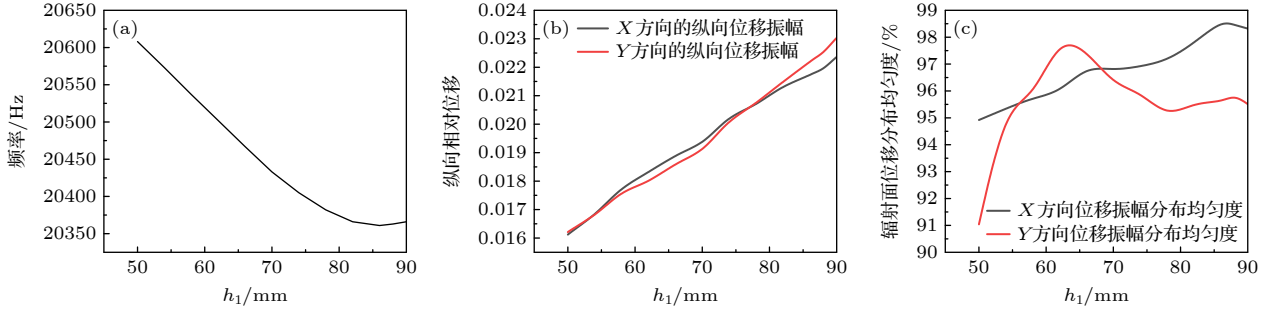


图 13 h_1 对系统性能的影响

Fig. 13. Influence of the parameter of h_1 on the performance of the system.

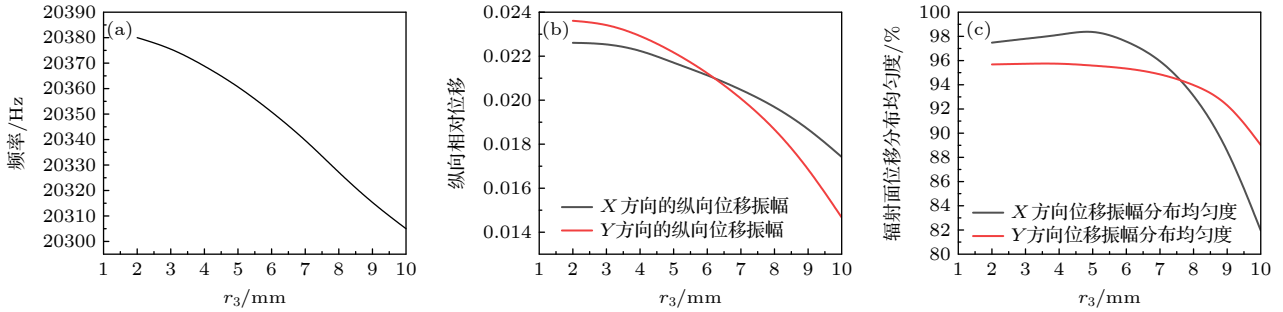


图 14 r_3 对系统性能的影响

Fig. 14. Influence of the parameter of r_3 on the performance of the system.

辐射面的 Y 方向的纵向位移振幅分布均匀度整体呈现不断减小的趋势, 当 w 在 5—8 mm 之间取值时, 系统辐射面的纵向位移振幅分布均匀度最佳. 因此, 综合考虑各个性能指标, 当长方体空气槽的宽度 w 在 6—8 mm 之间取值时, 同质位错与点缺陷结构的大尺寸三维超声振动系统的性能可达到较为理想的状态.

图 13 显示了散射体空气圆锥体孔的高度 h_1 对大尺寸三维超声振动系统的谐振频率、辐射面纵向相对位移振幅、位移振幅分布均匀度的影响规律. 从图 13 可以看出, 当其他几何结构参数保持不变时 (设置 $h = 67$ mm, $w = 7$ mm, $l_1 = 17$ mm, $l_2 = 52$ mm, $l_3 = 15$ mm), 随着 h_1 的增大, 系统谐振频率整体呈现先减小后增大的趋势;

辐射面的 X, Y 方向的纵向相对位移振幅整体呈现出不断增大的趋势. 另外, 随着 h_1 的增大, 辐射面的 X 方向的纵向位移振幅分布均匀度整体呈现出先增大后减小的趋势, 辐射面的 Y 方向的纵向位移振幅分布均匀度整体呈现先增大后减小, 接着增大最后减小的趋势. 综合考虑各个性能指标, 当 h_1 在 60—70 mm, 85—90 mm 之间取值时, 同质位错与点缺陷结构的大尺寸三维超声振动系统的性能可达到较为理想的状态.

图 14 显示了单点变形缺陷圆柱体孔的半径 r_3 对大尺寸三维超声振动系统的谐振频率、辐射面纵向位移振幅、位移振幅分布均匀度的影响规律. 从图 14 可以看出, 当其他几何结构参数保持不变时 (设置 $h = 67$ mm, $w = 7$ mm, $l_1 = 17$ mm,

$l_2 = 52 \text{ mm}$, $l_3 = 15 \text{ mm}$, $h_1 = 86 \text{ mm}$), 随着 r_3 的增大, 系统谐振频率整体呈现逐步减小的趋势; 辐射面的 X , Y 方向的纵向相对位移振幅整体呈现出不断减小的趋势. 另外, 随着 r_3 的增大, 辐射面的 X 方向的纵向位移振幅分布均匀度整体呈现出先增大后减小的趋势, 辐射面的 Y 方向的纵向位移振幅分布均匀度整体呈现不断减小的趋势. 综合考虑各个性能指标, 当 r_3 在 3—6 mm 之间取值时, 同质位错与点缺陷结构的大尺寸三维超声振动

系统的性能可达到较为理想的状态.

图 15 显示了利用数据分析技术预测的系统性能指标值与实测值的对比. 结果表明, 谐振频率的预测值和实测值的相对误差在 $\pm 1\%$ 的范围内, 取得了较高的精度.

从图 16 可以看出, 辐射面 X 方向的纵向相对位移振幅的预测值和实测值的相对误差在 $\pm 9\%$ 的范围内, 取得了较高的精度. 从图 17 可以看出, 辐射面 Y 方向的纵向相对位移振幅的预测值和实测

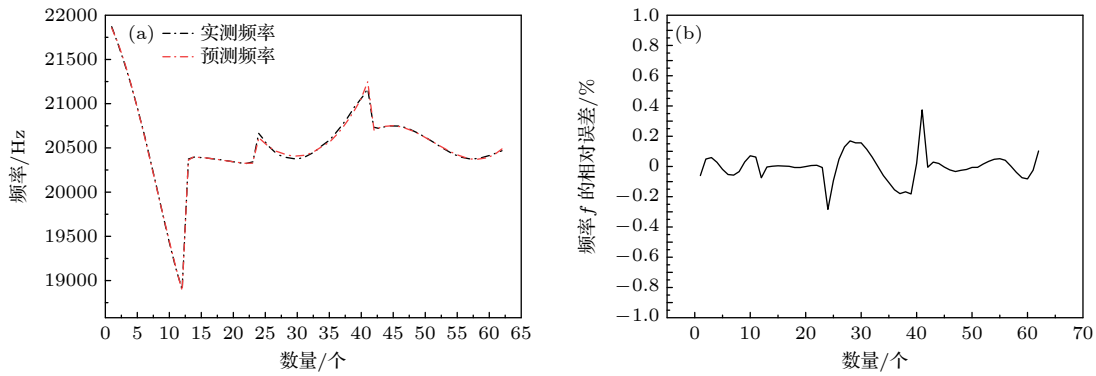


图 15 频率 f 的预测值和实测值的对比及相对误差

Fig. 15. Comparison and relative error between predicted and measured values of frequency f .

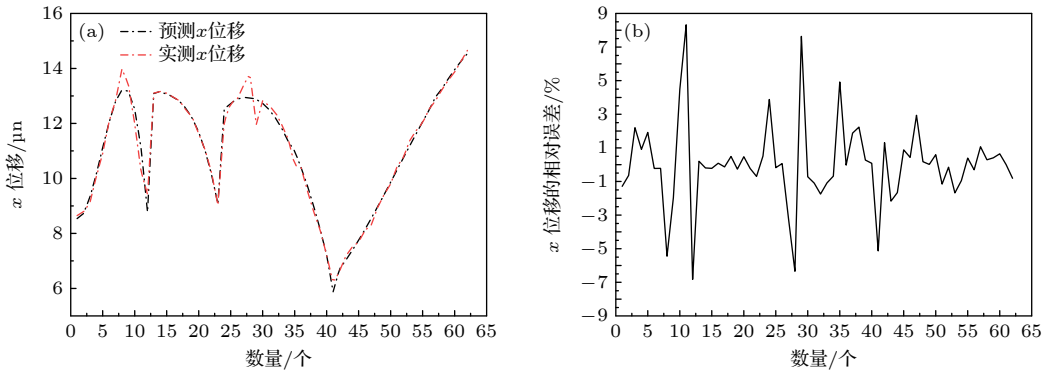


图 16 x 位移的预测值和实测值的对比及相对误差

Fig. 16. Comparison and relative error between predicted and measured values of x displacement.

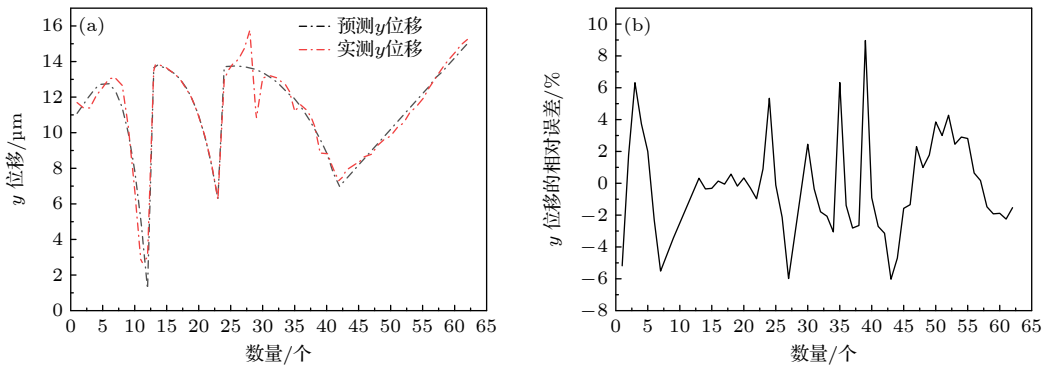


图 17 y 位移的预测值和实测值的对比及相对误差

Fig. 17. Comparison and relative error between predicted and measured values of y displacement.

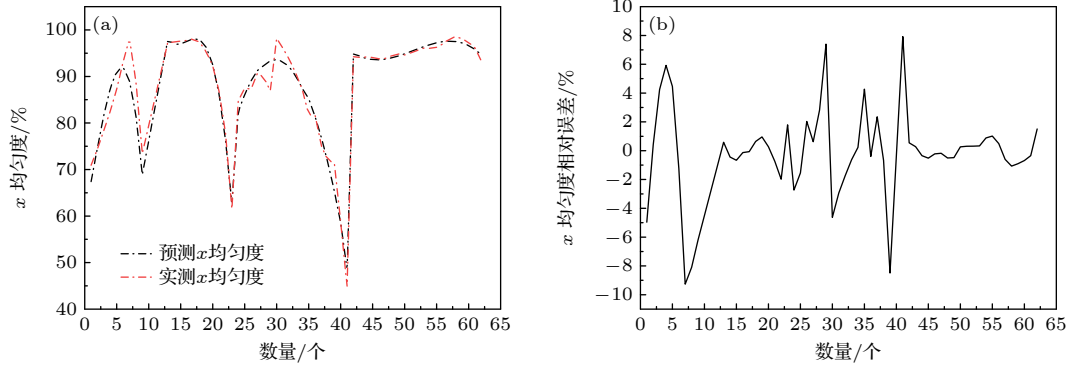


图 18 x 均匀度的预测值和实测值的对比及相对误差

Fig. 18. Comparison and relative error between predicted and measured values of x uniformity.

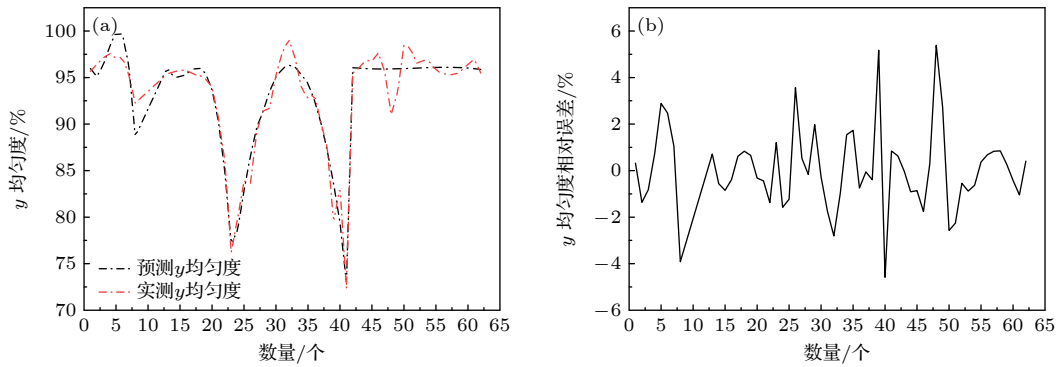


图 19 y 均匀度的预测值和实测值的对比及相对误差

Fig. 19. Comparison and relative error between predicted and measured values of y uniformity.

值的相对误差在 $\pm 10\%$ 的范围内,也取得了较高的精度.

从图 18 可以看出,辐射面 X 方向的纵向位移振幅分布均匀度的预测值和实测值的相对误差在 $\pm 10\%$ 的范围内,取得了较高的精度.从图 19 可以看出,辐射面 Y 方向纵向位移振幅分布均匀度的预测值和实测值的相对误差在 $\pm 6\%$ 的范围内,也取得了较高的精度.在极个别特殊点处,因为耦合作用的影响,存在较大的误差,因此剔除了极个别的异常数据,数据经过清洗后,蕴含的规律性更为明显,从而保证了采用经过清洗后建立的模型可以更好地反映出各个参数对换能器性能的影响规律.

5 实验验证

为了进一步验证设计的有效性,本文基于预测模型设计了基于同质位错与点缺陷结构的系统(根据模型预测结果,选取 $h = 67\text{ mm}$, $w = 7\text{ mm}$, $h_1 = 86\text{ mm}$, $r_3 = 5\text{ mm}$),另外,设计 YZ 平面槽中心

与位错线的距离 $l_1 = 17\text{ mm}$, XZ 平面槽中心与位错线的距离 $l_2 = 52\text{ mm}$, $l_3 = 15\text{ mm}$.为了进行比较分析,加工了一套未经优化的大尺寸三维超声振动系统,如图 20 所示.利用实验仪器分别对系统的输入电阻抗和辐射面振幅位移分布进行测试.

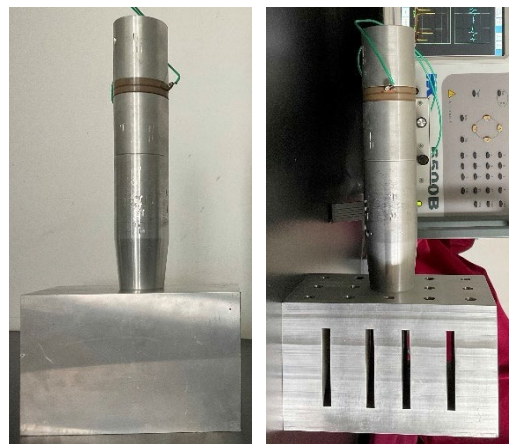


图 20 加工的两套系统的实物图

Fig. 20. Two sets of processed physical systems.

5.1 输入阻抗与谐振频率的实验验证

利用 6500 B 精密阻抗分析仪对未优化的大尺寸三维超声振动系统的导纳进行测试, 如图 21(a) 所示, 测量得到系统的纵向谐振频率为 19.789 kHz, 结果如图 21(b) 所示, 可以看出, 仿真求得的系统的纵向谐振频率约为 19.627 kHz. 将测试结果与利用 Comsol Multiphysics 仿真求得的结果 (图 21(c)) 进行比较, 二者的误差为 0.818637%, 符合度很高, 能够很好地满足工程应用的要求.

利用 6500 B 精密阻抗分析仪对同质位错与点缺陷结构的大尺寸三维超声振动系统的导纳进行测试, 如图 22(a) 所示. 测量得到系统的纵向谐振频率为 20.227 kHz, 结果见图 22(b), 从图 22(b) 可以看出, 仿真求得的系统的纵向谐振频率约为 20.361 kHz. 将测试结果与利用 Comsol Multiphysics 仿真求得的结果 (图 22(c)) 进行比较, 二者的误差为 0.662481%, 符合度很高, 能够很好地满足工程应用的要求.

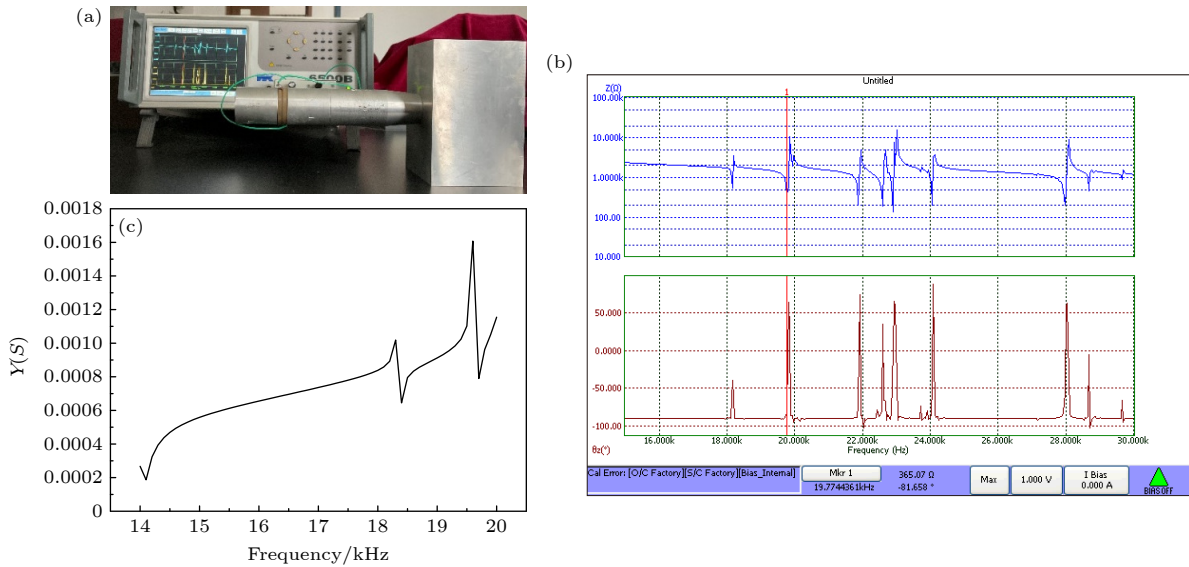


图 21 未优化系统的输入阻抗与谐振频率的测量与对比 (a) 测量过程; (b) 测量结果; (c) 仿真导纳曲线图
 Fig. 21. Measurement and comparison of input impedance and resonant frequency of unoptimized systems: (a) Measurement process; (b) measurement results; (c) simulation admittance curve.

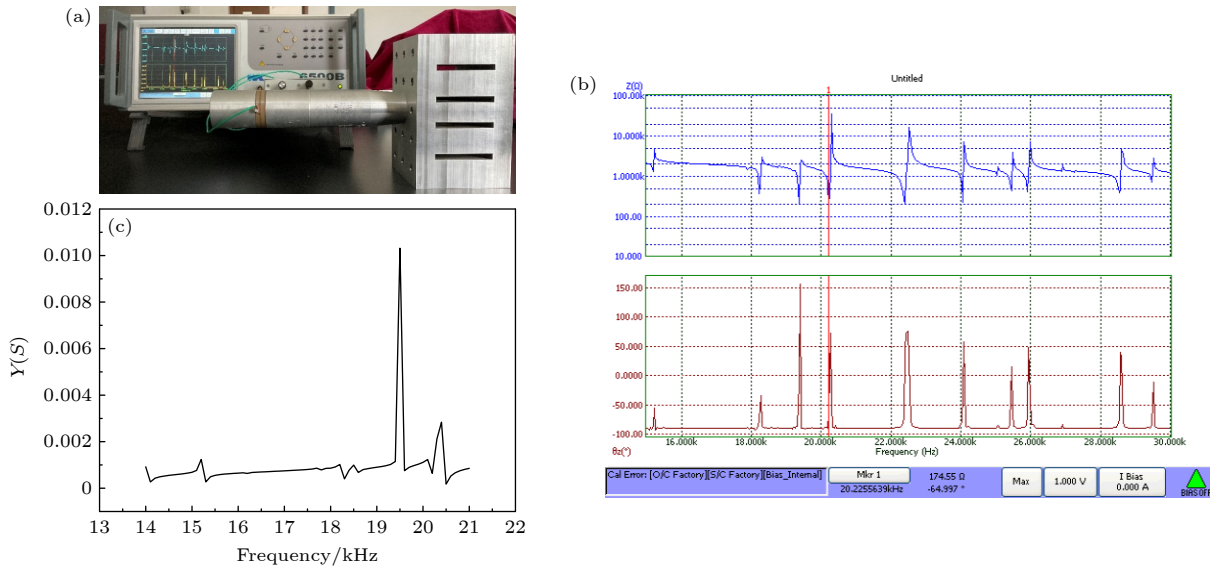


图 22 优化后系统的输入阻抗与谐振频率的测量与对比 (a) 测量过程; (b) 测量结果; (c) 仿真导纳曲线图
 Fig. 22. Measurement and comparison of input impedance and resonant frequency of the optimized system: (a) Measurement process; (b) measurement results; (c) simulation admittance curve.

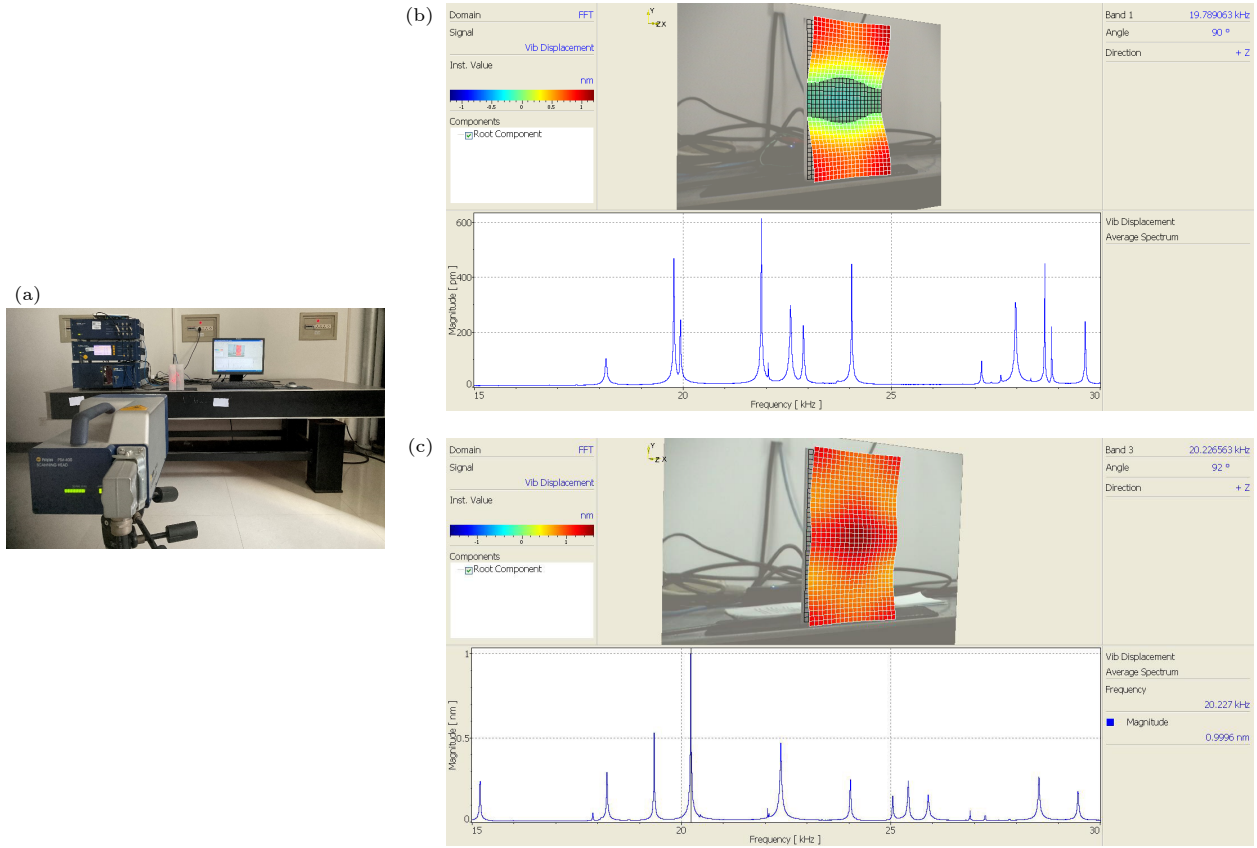


图 23 振幅分布的测量 (a) 测量过程; (b) 未优化系统的测量结果; (c) 优化后系统的测量结果

Fig. 23. Measurement of amplitude distribution: (a) Measurement process; (b) measurement results of non-optimized systems; (c) measurement results of the optimized system.

5.2 系统辐射面振幅分布的实验验证

使用 PSV-400 全场扫描式激光振动测量系统对未优化的系统和基于同质位错与点缺陷结构的系统的辐射面振幅分布进行测量验证 (如图 23(a) 所示), 测量结果分别如图 23(b), (c) 所示. 为了更加清晰直观地分析二者的振幅分布对比情况, 本文通过实验测得的辐射面振幅分布数据绘制出图 24

所示的辐射面位移振幅对比图.

从图 23 和图 24 可以看出, 基于同质位错与点缺陷结构的系统的辐射面振幅分布更加均匀, 且辐射面位移振幅得到了有效提升. 实验结果表明, 本文对大尺寸三维超声振动系统的优化是有效的.

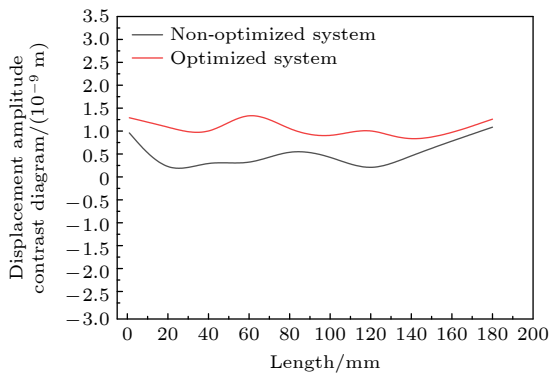


图 24 加工的两套系统的辐射面位移振幅对比图

Fig. 24. Displacement amplitude comparison diagram of the radiation surface of the two systems processed.

6 结 论

本文利用同质位错与点缺陷结构以及数据分析技术对大尺寸三维超声振动系统进行了智能优化设计, 给出了长方体空气槽的高度, 宽度, 散射体空气圆锥体孔的高度、单点变形缺陷圆柱体孔的半径等参数对大尺寸三维超声振动系统性能指标 (纵向谐振频率、辐射面纵向位移振幅、位移振幅分布均匀度) 的影响规律, 建立了同质位错结构、近周期缺陷结构的结构参数——大尺寸超声换能器系统性能的预测模型, 且验证表明, 模型可以达到较好的预测精度, 可以提高设计效率和成功率. 仿真和实验结果也表明, 同质位错与点缺陷结构可以很好地改善大尺寸三维超声振动系统的性能.

参考文献

- [1] Zhou G P, Liang M J, Wang J X 2004 *Tech. Acous.* **2004** 183 (in Chinese) [周光平, 梁明军, 王家宣 2004 声学技术 **2004** 183]
- [2] Mori E, Itoh K, Imamura A 1995 *J. Acous. Soc. Jpn.* **51** 455
- [3] Lin S 1995 *Appl. Acous.* **44** 249
- [4] Ren S C 1983 *Acta Acus.* **1** 152
- [5] Lin S 2009 *IEEE Trans. Ultra. Ferr. Freq. Cont.* **56** 1990.
- [6] Yu H P 1994 *Acous. Elec. Engi.* **1994** 9 (in Chinese) [俞宏沛 1994 声学与电子工程 **1994** 9]
- [7] Zhou L S 1993 *Acous. Elec. Engi.* **1993** 28 (in Chinese) [周利生 1993 声学与电子工程 **1993** 28]
- [8] Zhou L S 1993 *Acous. Elec. Engi.* **1993** 16 (in Chinese) [周利生 1993 声学与电子工程 **1993** 16]
- [9] Lin S Y, Zhang F C 1991 *J. Acous.* **1992** 451 (in Chinese) [林书玉, 张福成 1992 声学学报 **1992** 451]
- [10] Lin S Y, Zhang F C 1991 *Appl. Acous.* **1991** 10 (in Chinese) [林书玉, 张福成 1991 应用声学 **1991** 10]
- [11] Lin S Y, Zhang F C, Guo X W 1991 *J. Acous.* **1991** 91 (in Chinese) [林书玉, 张福成, 郭孝武 1991 声学学报 **1991** 91]
- [12] Lucas M, Smith A C 1997 *J. Vibr. Acous.* **119** 410
- [13] Cardoni A, Lucas M 2002 *Ultrasonics* **40** 365
- [14] Kumar R D, Rani M R, Elangovan S 2014 *Appl. Mech. Mater.* **592-594** 859
- [15] Yeon J L, Muhammad B S, Dong S P 2019 *MATEC Web Conf.* **257** 1
- [16] Adachi K, Ueha S 1990 *J. Acous. Soc. Am.* **87** 208
- [17] Thanh H N, Quang T Q, Cong L T 2017 *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **241** 1
- [18] Rani M R, Prakasan K, Rudramoorthy R 2014 *Int. J. Des.* **5** 344
- [19] Chen C D 1991 *Appl. Acous.* **10** 44 (in Chinese) [程存弟 1991 应用声学 **10** 44]
- [20] Lin S Y, Zhang F C 1992 *Tech. Acous.* **11** 24 (in Chinese) [林书玉, 张福成 1992 声学技术 **11** 24]
- [21] Liang Z F, Zhou G P, Mo X P, Zhang Y H, Li Z Z 2008 *Mech. Sci. Tech.* **27** 334 (in Chinese) [梁召峰, 周光平, 莫喜平, 张亦慧, 李正中 2008 机械科学与技术 **27** 334]
- [22] Liang Z F, Zhou G P, Mo X P, Zhang Y H, Li Z Z 2009 *Journal of Engineering Design* **16** 200 (in Chinese) [梁召峰, 周光平, 莫喜平, 李正中 2009 工程设计学报 **16** 200]
- [23] Chen Z, Guo J Z 2010 *Tech. Acous.* **29** 103 (in Chinese) [成桢, 郭建中 2010 声学技术 **29** 103]
- [24] Zhao T T, Lin S Y, Duan Y L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 024303 (in Chinese) [赵甜甜, 林书玉, 段祎林 2018 物理学报 **67** 024303]
- [25] Wang S, Lin S Y 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 173 (in Chinese) [王莎, 林书玉 2019 物理学报 **68** 173]
- [26] Wang S, Lin S Y 2019 *Ultrasonics* **99** 105954.
- [27] Lin J Y, Lin S Y 2020 *Crystals* **10** 1
- [28] Zhao Y C, Zhao F, Yuan L B 2006 *J. Harbin Eng. Univ.* **2006** 617 [赵言诚, 赵芳, 苑立波 2006 哈尔滨工程大学学报 **2006** 617]
- [29] Zhao F, Wan L B 2006 *Acta Phys. Sin.* **2** 517 [赵芳, 苑立波 2006 物理学报 **2** 517]
- [30] He J 2013 *Ph. D. Dissertation* (Kunming: Yunnan Normal University) (in Chinese) [何姣 2013 博士学位论文 (昆明: 云南师范大学)]
- [31] Wei Q, Cheng Y, Liu X J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 124301 (in Chinese) [魏琦, 程营, 刘晓峻 2011 物理学报 **60** 124301]

Intelligent optimization design of large-scale three-dimensional ultrasonic vibration system*

Lin Ji-Yan¹⁾²⁾ Sun Jiao-Xia¹⁾ Lin Shu-Yu^{2)†}

1) (*Yulin Key Laboratory of Big Data and Intelligent Decision, Yulin University, Yulin 719000, China*)

2) (*Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*)

(Received 2 January 2024; revised manuscript received 26 January 2024)

Abstract

Large-scale three-dimensional ultrasonic vibration systems are susceptible to the influence of coupled vibration, resulting in a series of problems such as increased energy loss, small longitudinal displacement amplitude of the radiation surface, and uneven distribution of longitudinal displacement amplitude, which can seriously affect the working efficiency of ultrasonic processing system. How to effectively control the coupled vibration of large-scale three-dimensional ultrasonic transducer systems and optimize their performance has become an urgent problem in the field of power ultrasound. The research has found that some phononic crystal slots and point defect structures can suppress the lateral vibration of large-scale transducer systems, improve the uniformity of system amplitude distribution, and artificially regulate the performance of large-scale three-dimensional ultrasonic vibration systems by changing the configuration parameters of phononic crystal structures. However, excessive design parameters will inevitably increase the complexity of system design, and, currently, the optimization design of large-scale three-dimensional ultrasonic transducer systems relies on empirical trial and error methods which has low design efficiency and low success rate, and cannot guarantee the system performance. Therefore, in the study, homogeneous dislocations and point defect structures are introduced to optimize the design of large-scale three-dimensional ultrasonic vibration systems. Data analysis techniques are used to evaluate the influences of the configuration of homogeneous dislocations and point defect structures on the longitudinal displacement amplitude, amplitude distribution uniformity, radiated sound power, working bandwidth of the system's radiation surface. And a predictive model for the performance of large-scale ultrasonic transducer system with homogeneous dislocation structure and near periodic defect structure is established, which can achieve intelligent design of large-scale power ultrasonic transducer system, improve design efficiency and success rate, and reduce the design cost.

Keywords: coupled vibration, large-scale three-dimensional ultrasonic vibration system, homogeneous dislocations, point defects, intelligent design

PACS: 43.40.+s, 43.35.+d, 43.38.+n, 63.20.D-

DOI: 10.7498/aps.73.20240006

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12174240, 12364057, 12004330) and the Doctoral Research Start-up Fund, China (Grant No. 22GK26).

† Corresponding author. E-mail: sylin@snnu.edu.cn

大尺寸三维超声振动系统的智能优化设计

林基艳 孙皎夏 林书玉

Intelligent optimization design of large-scale three-dimensional ultrasonic vibration system

Lin Ji-Yan Sun Jiao-Xia Lin Shu-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 084304 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240006>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

类声子晶体结构对超声塑料焊接工具横向振动的抑制

Suppression of lateral vibration in rectangular ultrasonic plastic welding tool based on phononic crystal structure

物理学报. 2018, 67(22): 224207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181150>

点缺陷调控: 宽禁带II族氧化物半导体的机遇与挑战

Point defects: key issues for II-oxides wide-bandgap semiconductors development

物理学报. 2019, 68(16): 167802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191043>

新型二维三组元压电声子晶体板的缺陷态及振动能量回收

Defect states and vibration energy recovery of novel two-dimensional piezoelectric phononic crystal plate

物理学报. 2019, 68(23): 234206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190260>

光声光谱仪用三维扩展光源光场整形系统设计及实验

Design and experiment of light field shaping system for three-dimensional extended light source used in photoacoustic spectrometer

物理学报. 2021, 70(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210691>

可移动三维主动减振系统及其在原子干涉重力仪上的应用

A mobile three-dimensional active vibration isolator and its application to cold atom interferometry

物理学报. 2019, 68(18): 183301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190443>

基于二维声子晶体的大尺寸夹心式换能器的优化设计

Optimal design of large-sized sandwich transducer based on two-dimensional phononic crystal

物理学报. 2019, 68(2): 024303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181955>