

圆形平面活塞式换能器的近场辐射特性的改善67

摘 要

平面活塞型超声换能器是长期来在超声检测以及其他超声应用技术中广泛采用的一种换能器类型。由于制作工艺简单，结构坚固，且又利用压电陶瓷的纵向机电耦合系数，因此具有良好的电声性能。然而，这种类型的换能器在媒质中产生的辐射声场，有其“先天性”的不足之处，在近场中无论平面活塞的频率和半径如何变化，轴上和沿径向上都呈现出极大和极小交替分布的干涉现象，因此我们有必要继续寻求更为理想的辐射形式。

本文分别设计和讨论了二种辐射形式的超声换能器：束控换能器和高斯换能器。在理论上讨论了这二种换能器的辐射声场分布、结构特点，并在实验中测量出了声场径向和轴向声压的相对值，从而验证了这两种换能器能有效的消除近场的零点，而且高斯换能器还能减少近场的起伏，同时也阐述了这两种换能器的缺陷和不足之处。

关键词：换能器，圆形平面活塞，近场，干涉，束控，高斯

Abstract

厦门大学博硕士论文摘要库

目录

中文摘要	1
英文摘要	2
目录	3
引言	5
第一部分：圆形平面活塞式换能器	7
一. 辐射声场的理论分析	7
二. 圆形平面活塞式换能器的近场特性	9
三. 圆形平面活塞辐射特性的理论曲线	12
四. 结论	19
第二部分：电极分割的束控换能器	20
一. 不同电极分割和束控系数换能器辐射声场的理论分析	21
二. 不同电极分割和束控系数的换能器辐射声场的理论曲线	25
三. 实例	33
四. 实验结果	39
五. 结论	42
第三部分：高斯型换能器	44
一. 声场的理论分析	44
二. 高斯型换能器表面振动按高斯函数分布的实现	55
三. 实例与实验结果	59
四. 结论	63

结束语64

参考文献65

致谢

厦门大学博硕士论文摘要库

圆形平面活塞式换能器的近场辐射特性的改善

引言

声学是一门渗透性很强的学科，很多学科中应用了声学的原理或技术，如水声学中的水下定位与通讯，超声医学中的超声成像，材料科学中的无损评估，农业中对某些种子的处理及声化学等，近年来随着科学技术的进步，使声学各分支迅速发展。声学的发展特别是声学技术发展需要换能器，因此人们对换能器的研究也提出了更高的要求。

圆形平面活塞式换能器由于制作工艺简单，结构坚固，且又利用压电陶瓷的纵向机电耦合系数（纵向机电耦合系数 k_{33} 达0.7以上）^[1]，即利用沿极化方向的伸缩振动，因此具有良好的电声性能。所以圆形平面活塞式换能器在超声检测以及其他声学应用技术中是广泛采用的一种换能器类型。

由换能器原理可知^[2]，对于圆形平面活塞式换能器的邻区判决为：

$$N = \frac{a^2}{\lambda} \quad (1)$$

当 $X > N$ 时为远场区（夫琅和费区），当 $X < N$ 时为近场区（菲涅尔区）。式中， λ 为声波波长， a 为声源半径， x 为至声源的距离。

因此，在超声检测以及其它声学应用中经常要利用声源的近场特性，例如在海底，由于海流的冲刷，泥沙也在运动。海底的变化和这些泥沙的运动有很大的关系。这是海洋沉积动力学的研究课题。为了测量这些泥沙的运动，可采用高频的声散射系统^[3]。在

离海底 2 米左右的架子上，使用高频超声换能器，向海底发射声波，声波碰到泥沙就会散射回来，根据各层散射的强度，可以测量泥沙的运动状况。由此可见，在海洋探测中，对于近距离，高分辨率的目标探测，合理地利用换能器的近场特性，可以达到良好的探测效果^{[4][5]}。因此，研究圆形活塞式换能器的近场辐射特性及探索改善其近场的辐射特性是声学应用技术的一个重要研究课题。

第一部分：圆形平面活塞式换能器

一. 辐射声场的理论分析

所谓的圆形平面活塞式换能器，是指一种平面圆形状的振子。当它沿平面法线方向振动时，其面上各点的振动速度和相位都是相同的。

在这里，我们考虑的是镶在无限大刚硬屏幕上的平面辐射器向半无限空间发射声波的情况(图 1)

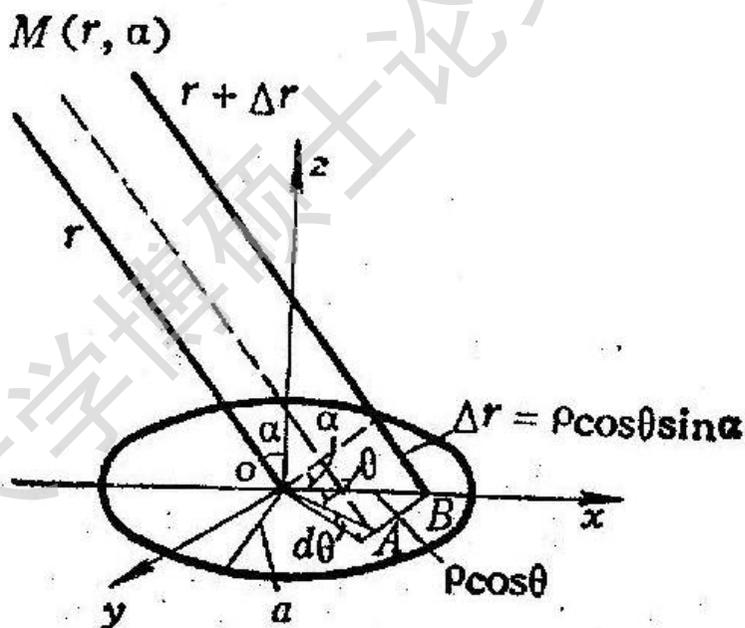


图 1. 圆形平面活塞辐射器坐标选取图

设活塞面振动速度均匀，其值 $u_0 e^{j\omega t}$ ，振动方向垂直于活塞面，声场中 M 点到活塞面中心距离为 r ，OM 声线与面的法线 OZ 的交角为 α 。因为圆形活塞辐射器具有中心对称形式，所以辐射场中的

速度势的分布是以面中心点的法线为对称轴的，因此取坐标 XOY 和活塞面的重合面的中心取为原点，由于场的对称性，M 点取在 XOZ 平面中，这并不影响结论的普遍性。由声学原理可知^[6]，在声场中距离圆形平面活塞中心为 r 的速度势为：

$$\Psi(r, \mathbf{a}, t) = \frac{u_0 S}{2\rho} e^{j(\omega t - kr)} \cdot \frac{2J_1(ka \sin \mathbf{a})}{ka \sin \mathbf{a}} \quad (2)$$

式中 J_1 为一阶贝塞尔函数， k 为波数， ω 为角频率， $S = \pi a^2$ 为圆形活塞的面积， \mathbf{a} 为声线 OM 与活塞法线 OZ 的夹角。

根据声压 P 与速度势的关系可以求出声场中任意一点 $M(r, \mathbf{a})$ 的声压，声压可表示成为

$$p(r, \mathbf{a}, t) = \rho_0 \frac{\partial \Psi}{\partial t} = j\omega \rho_0 \Psi = \frac{j\rho_0 \omega u_0 S}{2\rho} e^{j(\omega t - kr)} \cdot \frac{2J_1(ka \sin \mathbf{a})}{ka \sin \mathbf{a}} \quad (3)$$

式中 ρ_0 为介质的密度。

我们知道：一个半径 r_0 很小(半径很小是指辐射中主要是抗的作用)的半球辐射体在声场中的辐射声压为：

$$p = \frac{j\rho_0 \omega}{2\rho} Q e^{-j(\omega t - kr)} \quad (4)$$

其中 $Q = 2\rho_0 u_{0m}$ 为源强或容积速度。

从上式中我们可以看出：活塞辐射器的辐射声场和半球辐射

体的声场相类似，只是增加一个方向性因子，根据方向性函数的定义，我们可以求出圆形活塞方向性函数：

$$D(\mathbf{a}) = \frac{2J_1(ka \sin \mathbf{a})}{ka \sin \mathbf{a}} \quad (5)$$

二 圆形平面活塞式换能器的近场特性

圆形平面活塞声源的近场特性是指声源附近的声场分布规律。活塞不同部分所辐射的声波到达观测点时，其振幅与相位都不相同，形成较为复杂的干涉图形。计算这种声场在数学上比较困难，而且不能得到简单的解析表达式。为此，我们主要研究沿圆形平面活塞中心轴上的声场，了解轴上的声场规律，也可以预计偏离轴向位置上声场的一些规律。对于沿声源轴上声场的研究，在声学的实际问题中是十分重要的。

选取圆形活塞的中心为坐标原点，通过中心的轴线为 Z 轴，现计算轴线坐标为 Z 的位置上的声压，如图 2 所示。

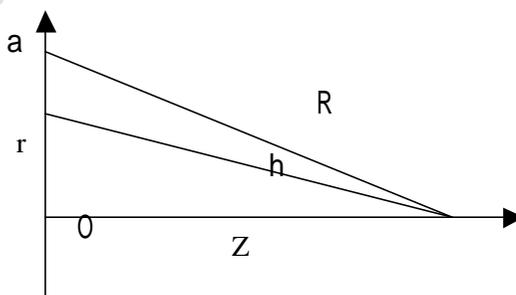


图 2 圆形活塞近场特性计算图

若在平面活塞上取一个内径为 r ，外径为 $r+dr$ 的环元，由于 dr 极其微小，因此，可以认为环元上所有的点到 Z 点的距离均为

$h = \sqrt{r^2 + Z^2}$ ，因此，环元上所有点源辐射的声波到达 Z 处时，其振幅相等相位相同，迭加起来就是环元 ds

在 Z 处产生的声压，它等于：

$$dp = j \frac{k \mathbf{r}_0 c_0}{2 \rho h} u e^{j(\omega t - kh)} ds \quad (6)$$

这里 $ds = 2\pi r dr$ 为环元面积， \mathbf{r}_0 为介质密度， c_0 为声速

将所有环元对声场的贡献迭加起来，也就是对 r 积分，即得 Z 处的总声压为

$$p(z, t) = j k \mathbf{r}_0 c_0 u e^{j\omega t} \int_0^a \frac{e^{-jkh}}{2 \rho h} 2\pi r dr \quad (7)$$

对于固定的 z 值，有 $2rdr = 2hdh$ 代入上式得：

$$\begin{aligned} p(z, t) &= j k \mathbf{r}_0 c_0 u e^{j\omega t} \int_Z^R e^{-jkh} dh \\ &= -\mathbf{r}_0 c_0 u e^{-j\omega t} e^{-jk \frac{R+Z}{2}} \left[e^{jk \frac{Z-R}{2}} - e^{-jk \frac{Z-R}{2}} \right] \\ &= 2 \mathbf{r}_0 c_0 u \sin \frac{k}{2} (R - Z) e^{j[\omega t - \frac{k}{2}(R+Z) + \frac{\pi}{2}]} \end{aligned}$$

式中 $R = \sqrt{a^2 + Z^2}$ 对于其中正弦函数部分取绝对值得

$\left| \sin \frac{k}{2} (R - Z) \right|$ ，用它可以描述圆形活塞轴上声压的振幅随离开活塞

中心的距离而变化的规律，即：

$$p(z, t) = 2 r_0 c_0 u \sin\left[\frac{k}{2}(\sqrt{z^2 + a^2} - z)\right]$$

(8)

$p_0 = r_0 c_0 u$ 为声源表面处的声压，因此，圆形平面活塞换能器轴向上的声压分布可写成：

$$p(z) = p_0 2 \sin\left[\frac{P}{l}(\sqrt{Z^2 + a^2} - Z)\right]$$

(9)

由 (9) 式可以看出，当 $\frac{P}{l}(\sqrt{Z^2 + a^2} - Z) = (2n+1)\pi/2$ 时，

($n=0,1,2, \dots$)，轴线上的声压呈极大值，对应于声压极大值的坐标为

$$Z_{\max} = \frac{4a^2 - l^2(2n+1)^2}{4l(2n+1)} \quad (10)$$

当 $\frac{P}{l}(\sqrt{Z^2 + a^2} - Z) = n\pi$ 时，($n=0,1,2, \dots$)，轴线上的声压呈极小值，对应于声压极小值的坐标为

$$Z_{\min} = \frac{a^2 - l^2 n^2}{2ln} \quad (11)$$

由式(9)可见，当 $a > l$ 时，则 $[\sqrt{z^2 + a^2} - z]$ 可能为若干个半波长，于是对应与不同 n 值，将会在轴向上出现声压极大值和极小值的交替分布。 n 的最大值对应于离法线面最近的极值，当 $n=0$

时，为最后一个声压极大值，若此点离声源的距离为 N ，则有：

$$\sqrt{N^2 + a^2} - N = \frac{l}{2} \quad \text{或} \quad N = \frac{a^2}{l} - \frac{l}{4}$$

说明最后一个最大值的位置是边缘声线和轴向声线相差 $\lambda/2$ ，超过此点后，活塞上任两个元波到达法线上声程差小于 $\lambda/2$ ，即不出现元波干涉现象，声压幅值变为单调减少，声场逐渐进入弗朗霍夫区。在此点附近，声压幅值变化很缓慢，类似于平面波，声压为 $p_m = 2r_0cu_0$

如果满足 $a \gg l$ ，则有

$$N = \frac{a^2}{l} \quad (12)$$

因此， N 通常定义为声强的近场距离。在近场内，声源轴线上的声压周期起伏。当距离大于 N 时，即进入远场区域，远场区的声束开始发散。平面活塞在近场所出现的声压振幅的起伏特征，在实际应用中应引起足够的重视。

三. 圆形平面活塞辐射特性的理论曲线

根据公式(3)圆形平面活塞换能器声场的辐射特性和公式(4)圆形平面活塞换能器近场特性可画出，当频率 $f = 2\text{MHz}$ ，活塞半径为为 1.5cm, 2cm 和频率 $f = 3\text{MHz}$ 活塞半径为为 1.5cm, 2cm 在水中发射时的轴向与径向声压分布图、轴向与径向声压分布等高图、声压在轴线上随距离变化图。

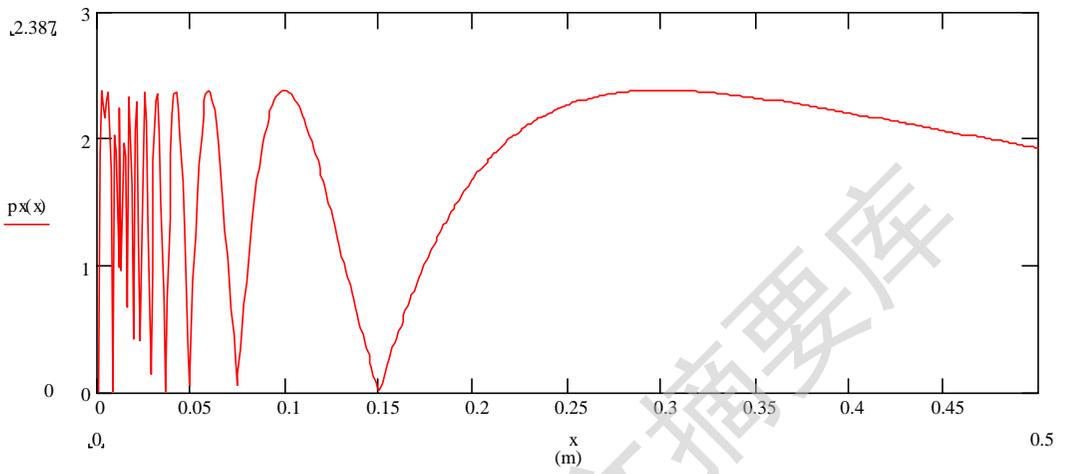


图3 $f=2\text{MHz}$, $a=1.5\text{cm}$ 声压在轴线上随距离变化图

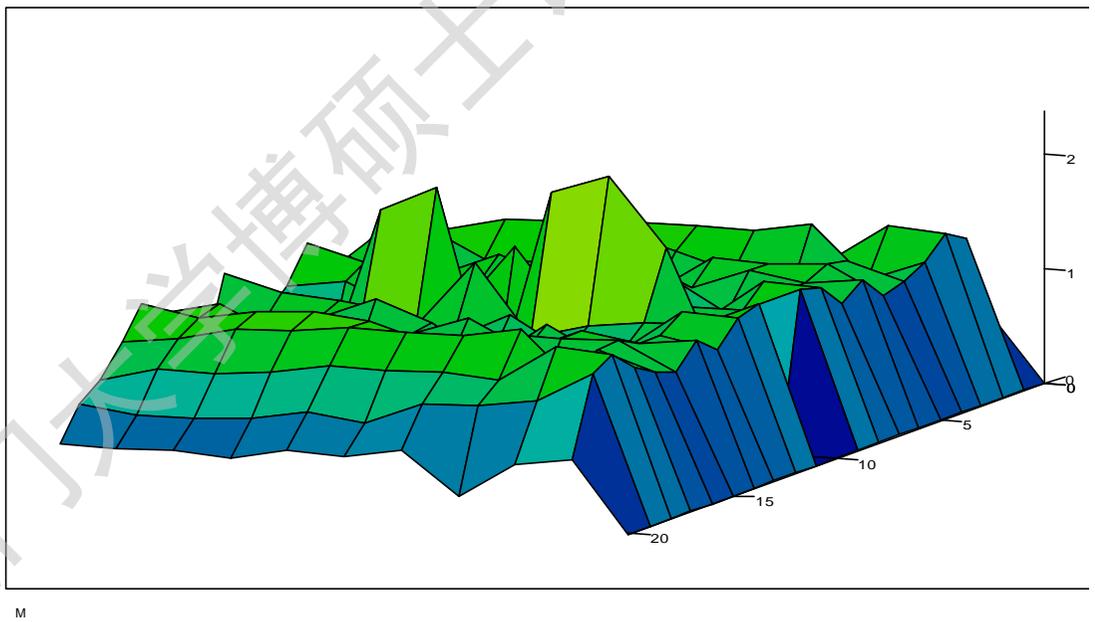


图4 $f=2\text{MHz}$, $a=1.5\text{cm}$ 轴向与径向声压分布图

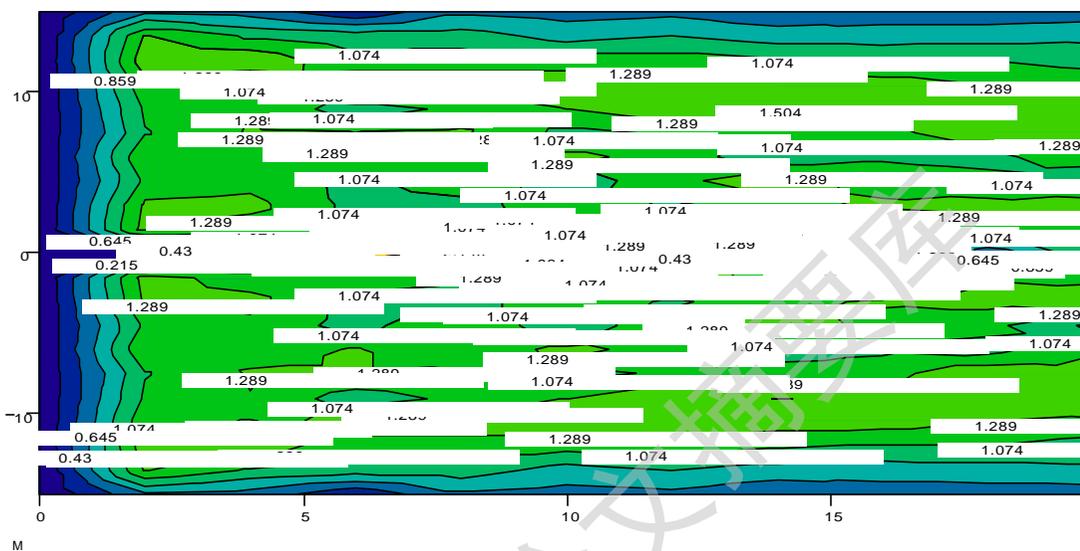


图 5 $f=2\text{MHz}$, $a=1.5\text{cm}$ 轴向与径向声压分布等高图

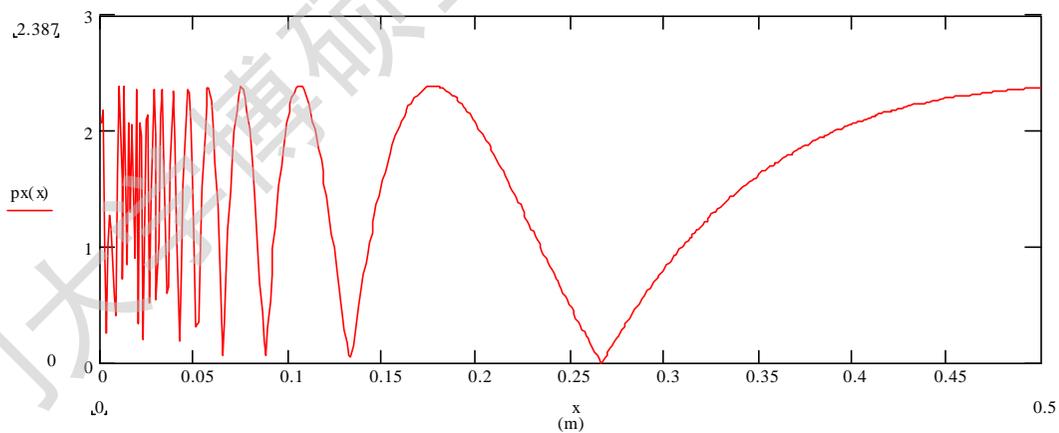


图 6 $f=2\text{MHz}$, $a=2\text{cm}$ 声压在轴线上随距离变化图

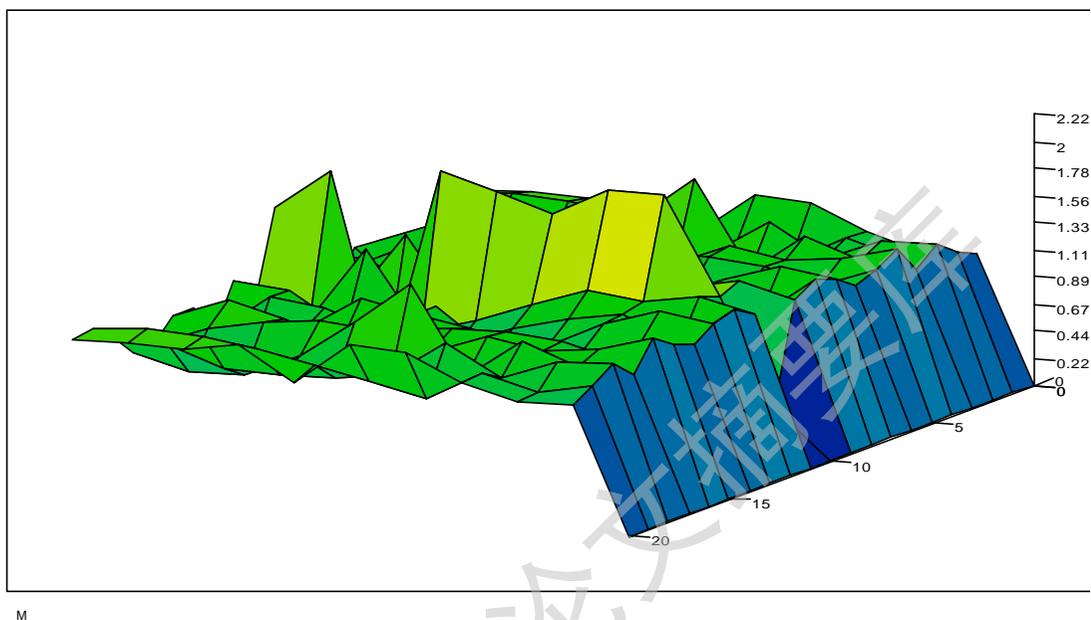


图 7 $f=2\text{MHz}$, $a=2\text{cm}$ 轴向与径向声压分布图

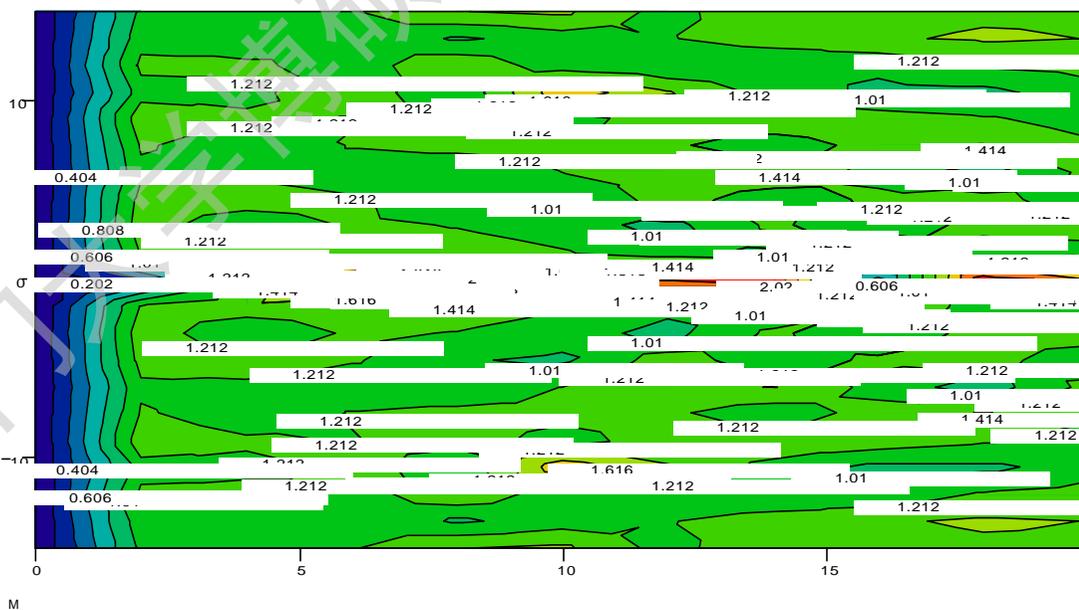


图 8 $f=2\text{MHz}$, $a=2\text{cm}$ 轴向与径向声压分布等高图

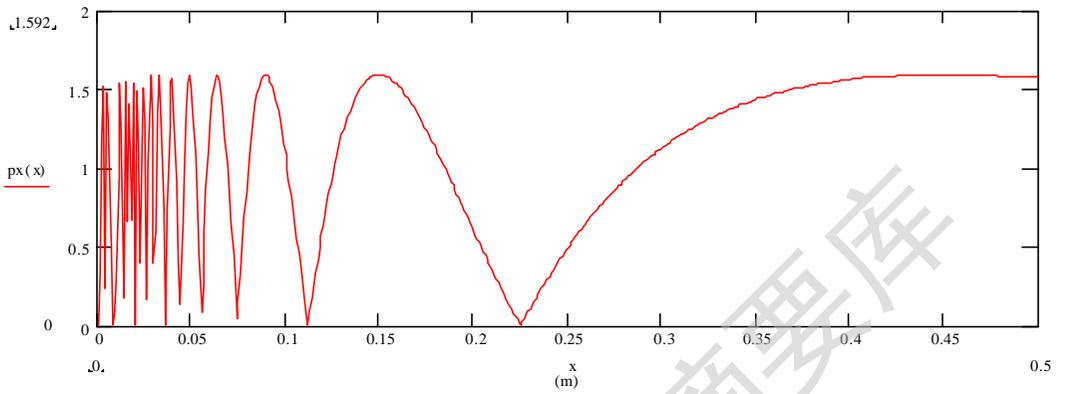


图9 $f=3\text{MHz}$, $a=1.5\text{cm}$ 声压在轴线上随距离变化图

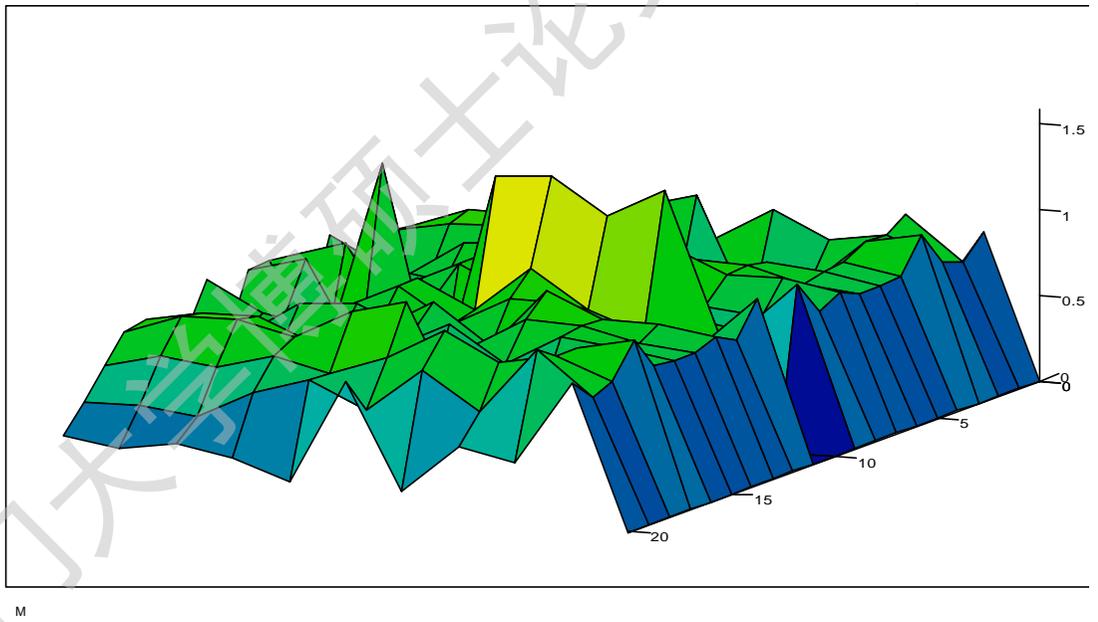


图10 $f=3\text{MHz}$, $a=1.5\text{cm}$ 轴向与径向声压分布图

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库