arXiv:2601.00778v1 [physics.optics] 2 Jan 2026

通过边界阻抗工程实现单缝中的声学异常透射

J. Sumaya-Martinez和J. Mulia-Rodriguez,
UAEMex科学学院，墨西哥托卢卡

摘要

亚波长孔径中的声学异常透射（EAT）通常通过周期阵列或外部谐振元件实现。本文表明，通过引入一个或多个内部几何收缩结构，可以在单个孤立亚波长狭缝中实现强且可调谐的声学异常透射。这些收缩段充当声学阻抗变换器，可同时改变狭缝的有效声学长度及其与周围介质的耦合。借助数值模拟支持的一维传输线模型，我们表明，在超薄刚性板中，深亚波长波长下可实现接近 1 的透射率。多收缩段几何结构还会产生共振分裂和多峰透射光谱，揭示出一种声学与电磁超常透射现象所共有的普适性阻抗机制。

I. 引言

声波通过横向尺寸远小于波长的孔径时，其透射从根本上受到周围流体中的辐射场与孔径内支持的导模之间强烈阻抗失配的限制。因此，刚性板中的单个亚波长狭缝或孔通常透射较弱，即使孔径支持无截止平面模也是如此。然而，过去二十年来的研究表明，通过精心设计几何结构可以克服这一限制，从而产生异常声学透射 （EAT）；这与在穿孔金属屏中发现的异常光透射（EOT）现象十分相似 [4]。

在声学领域，人们已发现多种实现EAT的机制。亚波长孔径的周期阵列可支持集体共振和衍射介导效应，从而在特定频率下显著增强透射 [9, 5]。在相关结构中，孔径模态与类表面波场耦合，可增强透射并实现波束形成 [2]。另一种途径是在孔径内部或周围嵌入亥姆霍兹共振器或迷宫形／盘绕通道等谐振子结构，以调节有效阻抗和相位响应，从而在超薄结构中实现高透射 [7, 8]。最近，在经过设计的平台中，人们通过协同调控类法布里–珀罗共振与阻抗匹配，实现了巨量异常透射 [3]。

对这些观察结果的一种统一解释是：超常透射从本质上说是一个阻抗匹配 问题：当结构化孔径的输入阻抗与周围介质的辐射阻抗相匹配时，便会出现强透射。在均匀亚波长狭缝中，这一条件很难满足，因为狭缝内导模的特性阻抗与自由空间的特性阻抗相差很大。因此，现有的大多数策略都是间接实现阻抗匹配：要么利用需要周期结构的集体效应，要么采用会增加几何复杂度的外部谐振元件。

本文表明，通过对狭缝内部的阻抗进行设计，可以在单个孤立的亚波长狭缝中实现强且可调谐的异常透射。具体而言，我们引入一个或多个狭窄的内部收缩部（“脊”），使其充当声阻抗变换器。这些内部不连续结构同时 (i) 改变狭缝腔的有效声学长度，(ii) 变换狭缝入口处的输入阻抗，从而无需周期结构或外部谐振器，便能在远低于波长的尺度下实现接近全透射。借助数值模拟验证的一维传输线模型，我们展示了单峰异常透射；对于多个收缩部，还展示了耦合腔共振分裂和多峰光谱。

除了为超薄板中的异常透射提供紧凑实现途径外，本文提出的机制还凸显了阻抗变换在声学和电磁波系统中各种异常透射现象里的普适作用。

II. 理论模型

我们研究正入射平面声波与厚度为 h、带有一个沿横向不变的单个亚波长狭缝的刚性板相互作用的情形。当波长远大于狭缝宽度时，狭缝内只有基阶平面模态传播，因此该问题可建模为一维声学传输线 [6]。为单独考察其基本机制，我们忽略黏热损耗；这类损耗的主要影响是使共振变宽并降低峰值透射率，但不会改变下文讨论的阻抗变换图景。

A. 均匀狭缝作为参照

对于横截面积为 S_1的均匀狭缝，导模的波数为

$$k = \omega/c, \tag{1}$$

特性阻抗为

$$Z_1 = \rho c/S_1, \tag{2}$$

其中， ρ 和 c 分别表示背景流体的密度和声速。在简单的无损模型中，长度为 h 且末端接有辐射阻抗的均匀狭缝段，其输入阻抗可根据标准传输线关系表示。实际上，狭缝阻抗与外部辐射阻抗之间的强失配会导致耦合较弱、透射率较低，除非接近 Fabry–P´erot (FP) 条件 [1]。

B. 单个内部缩窄段

我们引入一个长度为 d 、面积为 $S_2 < S_1$ 的内部收缩段，其阻抗为

$$Z_2 = \rho c/S_2 > Z_1. \tag{3}$$

结构化狭缝由各均匀段的传递矩阵级联描述，

$$\mathbf{T}_j = \begin{pmatrix} \cos(k\ell_j) & iZ_j \sin(k\ell_j) \\ iZ_j^{-1} \sin(k\ell_j) & \cos(k\ell_j) \end{pmatrix}, \tag{4}$$

其中 (ℓ_j, Z_j) 分别表示第 j 段的长度和阻抗。由总传递矩阵可得到输入阻抗 Z_{in} 和透射功率系数。

尽管完整表达式较为繁复，但在亚波长区间内，物理图像十分清晰：收缩部起到阻抗变换器的作用，并引入有效长度修正。取领先阶近似，法布里-珀罗条件偏移为

$$k\,(h + \Delta h_{\text{eff}}) \approx n\pi, \tag{5}$$

有效长度增量按以下规律变化

$$\Delta h_{\text{eff}} \sim d\left(\frac{Z_2}{Z_1} - 1\right), \tag{6}$$

这解释了数值光谱中观察到的红移。同时，阻抗不连续性会改变入口阻抗；对于单个阶梯阻抗段，其紧凑近似为

$$Z_{\text{in}} \approx Z_1 \frac{Z_2 + iZ_1 \tan(kd)}{Z_1 + iZ_2 \tan(kd)}. \tag{7}$$

当 Z_{in} 接近共振时周围介质的辐射阻抗，便有可能实现强透射。

C. 多个收缩部

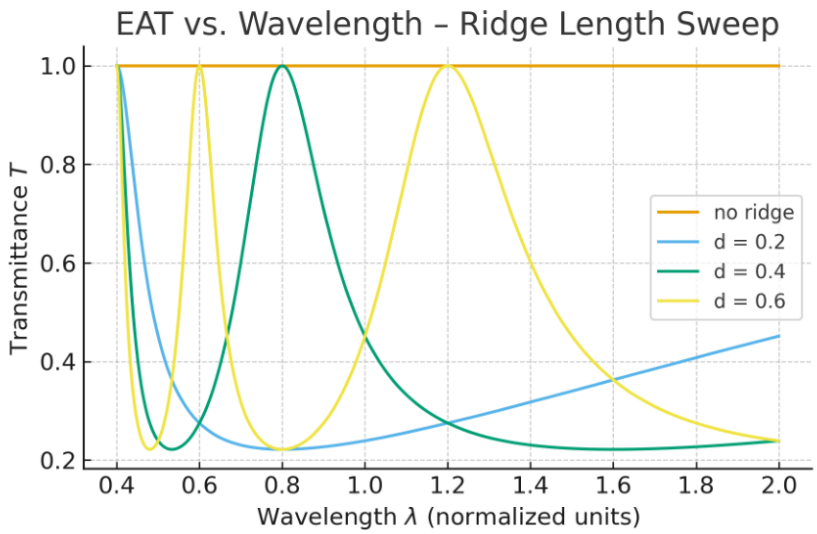
该形式可直接扩展至多个收缩部，从而产生级联阻抗变换和耦合腔行为。如第III节所示，由均匀段分隔的两个收缩部会产生共振分裂，这是杂化腔模的典型特征。

III. 数值结果

我们总结了采用一维透射线模型对包含一个或多个内部收缩部的刚性狭缝进行参数扫描所获得的代表性结果。板厚 h用作参考长度，波长归一化为 λ/h。

A. 单个内部收缩部：脊长

图1展示了在固定阻抗对比 $Z_2/Z_1 = 4$下，不同脊长 d/h 对应的功率透射率 T 随归一化波长变化的关系。均匀狭缝情形（$d = 0$）的透射较弱且几乎保持平坦，这与强烈的阻抗失配相符。引入有限收缩段会产生显著的异常透射峰，并且该峰随d/h增大而红移，这与第II节讨论的有效长度修正一致。对于中等脊长，峰值透射率接近1，表明阻抗匹配效果良好。



[t]

图 1：单个亚波长狭缝含有一个长度为 d的内部收缩部时，功率透射率 T 随归一化波长 λ/h 的变化曲线。各曲线对应固定阻抗对比 $Z_2/Z_1 = 4$下的若干d/h 值。均匀狭缝（$d = 0$）的透射较弱，而有限长度的收缩部会产生显著的异常透射峰；随着 d/h增大，该峰因声学腔长有效增加而发生红移。

B. 单个内部收缩段：阻抗对比

图2展示了在固定脊长 $d/h = 0.4$下改变阻抗对比 Z_2/Z_1 的影响。适中的阻抗对比会产生尖锐且透射率高的峰，而阻抗对比过大则会因阻抗不连续处的反射增强而降低峰值透射率。随着 Z_2/Z_1 增大，共振位置也向更长波长方向移动，这与高阻抗段内部相位累积增加相符。

[t]

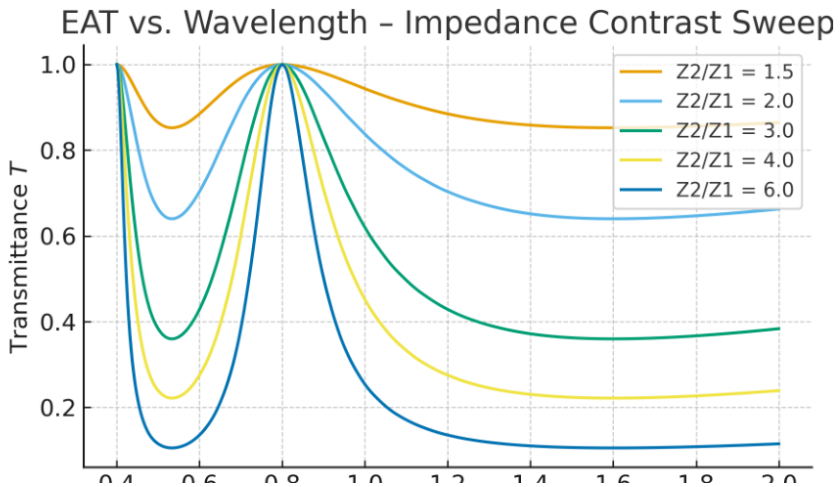


图2：固定长度为 $d/h = 0.4$的单个内部收缩部的功率透射率 T 随归一化波长 λ/h 的变化，其中阻抗对比 Z_2/Z_1各不相同。适度的阻抗对比会产生尖锐且高透射率的共振，而阻抗对比过大则会因阻抗不连续处的反射增强而降低峰值透射率。

C. 两个内部收缩部：间距与模式劈裂

图3展示了双脊结构的光谱，该结构由两个长度为 $d/h = 0.2$ 的相同收缩段组成，中间由长度为 s/h 的中央段隔开。当间距为零时，两个脊表现为一个更长的收缩段，并产生单个异常透射峰。随着间距增大，共振分裂为两个峰，这是耦合腔杂化的典型特征。重要的是，

高透射率得以保持，表明阻抗匹配机制在多重共振构型中依然成立。

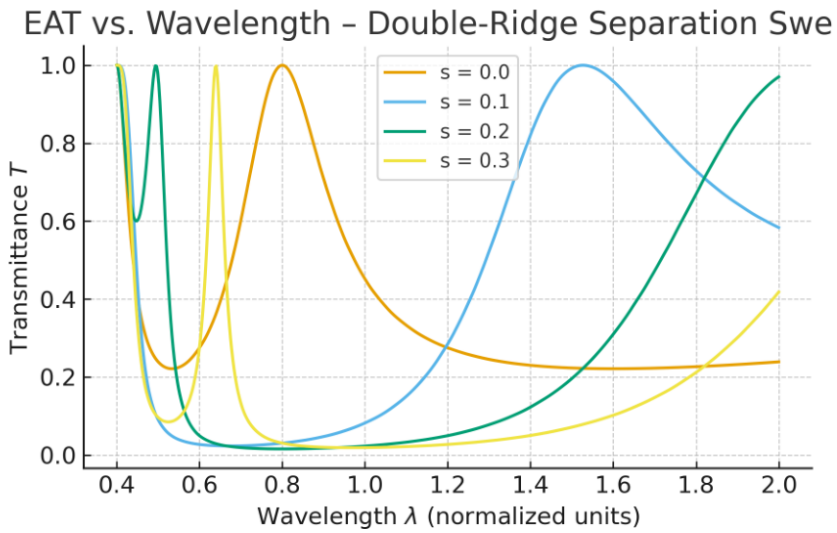


Figure 3: Transmittance spectra for double-ridge structures with two identical constrictions of length $d/h = 0.2$ and varying separation s/h.

[t]

图3：功率透射率 T 随归一化波长 λ/h的变化，针对的是包含两个长度相同的内部收缩部的亚波长狭缝，这两个收缩部的长度为 $d/h = 0.2$ ，间距为s。当 $s = 0$ 时，系统表现为一个更长的收缩段，并支持一个超常透射峰。增大 s 会导致共振分裂，这是耦合腔行为的典型特征。

IV. 讨论

结果证实，单个亚波长狭缝中的内部收缩部可通过分布式阻抗变换和有效长度修正，为实现声学异常透射提供稳健且可调的途径。当横向尺寸远小于波长，使高阶模态处于倏逝状态时，一维模型有效。实际应用中，黏热损耗会降低极窄收缩段的峰值透射率，但预计所预测的趋势仍将保持——共振随 d 或 Z_2/Z_1发生红移，多收缩段几何结构中则出现共振分裂。

与基于阵列的声学异常透射 [9, 5], 相比，本文所述机制本质上是局部的，无需周期结构或表面波耦合。与基于亥姆霍兹共振器或盘绕结构的超薄设计 [7, 8], 相比，这些共振仍具有法布里–珀´罗特特征，同时通过狭缝内部的阶梯阻抗变换器实现强阻抗匹配。这种阻抗视角也阐明了其与金属屏中的增强透射之间的密切类比 [4, 10], ：增强透射同样可以通过结构化孔径中的共振隧穿和阻抗匹配来解释。

从设计角度来看，内部阻抗结构设计使超薄刚性板中的紧凑型窄带或多频带声透射器件成为可能。通过控制收缩段的数量、长度和间距，可以设计出从单个尖锐峰到适用于多频滤波和传感的分裂共振的各种透射光谱。

V. 结论

我们证明，通过引入充当声阻抗变换器的内部几何收缩结构，可以在单个孤立亚波长狭缝中实现声学异常透射。传输线框架表明，收缩段同时能够：（i）增加狭缝腔的有效声学长度；（ii）将入口阻抗变换至接近周围介质的辐射阻抗，从而使超薄刚性板在远小于波长的波长下实现近乎完全透射。多个收缩段会自然地产生耦合腔模态分裂和多峰异常透射谱。研究结果揭示了一种普适的基于阻抗的机制，将声学异常透射与结构化孔径中的电磁增强透射联系起来，并为紧凑型声学滤波器、传感器和阻抗匹配界面提供了一种简单的实现途径。

作者声明

利益冲突

作者声明　　声明，就本文的发表而言不存在利益冲突　　.

数据可用性

支持本研究结论的数据可在提出合理请求后向通讯作者获取。

参考文献

[1] J. Christensen、L. Martin-Moreno 和 F. J. Garc´ıa-Vidal。亚波长孔径中的共振声传输理论。《*Physical Review Letters*》，101(1):014301，2008 年。doi: 10.1103/PhysRevLett.101.014301。

[2] J. Christensen 等。单孔径中的增强声传输和准直效应。《*Physical Review B*》，81:174104，2010 年。doi: 10.1103/PhysRevB.81.174104。

[3] T. Devaux 等。声波通过单个亚波长狭缝的超常透射。《*Science Advances*》，6(??):aay8507，2020 年。doi: 10.1126/sciadv.aay8507。

[4] T. W. Ebbesen、H. J. Lezec、H. F. Ghaemi、T. Thio 和 P. A. Wolff。亚波长孔阵列中的异常光透射。《*Nature*》，391:667–669，1998 年。doi: 10.1038/ 35570。

[5] H. Estrada、P. Candelas、A. Uris、F. Belmar、F. Meseguer 和 F. J. Garc´ıa de Abajo。亚波长孔阵列穿孔板的声透射：刚性固体模型。《*Wave Motion*》，48(3):235–242，2011。doi: 10.1016/j.wavemoti.2010.10.004。

[6] L. E. Kinsler、A. R. Frey、A. B.Coppens 和 J. V. Sanders。《声学基础》。John Wiley & Sons，第四版，2000。

[7] V. Koju 和 W. M. Robertson。亥姆霍兹共振器介导的声学异常透射。《*AIP Advances*》，4(7):077132，2014。doi: 10.1063/1.4890613。

[8] B. Liang 等. 通过空间卷曲利用超薄声学超材料实现声学异常透射. 《*Applied Physics Letters*》, 103:063509, 2013. doi: 10.1063/1.4817925.

[9] M.-H. Lu、X.-K. Liu、L. Feng、J. Li、C.-P. Huang、Y.-F. Chen、Y.-Y. Zhu、S.-N. Zhu 和 N.-B.

Ming。通过具有极窄孔径的一维光栅实现声学异常透射。《*Physical Review Letters*》，99(17):174301，2007年。doi: 10.1103/PhysRevLett.99.174301。

[10] L. Mart´ín-Moreno、F. J. Garc´ıa-Vidal、H. J. Lezec、K. M. Pellerin、T. Thio、J. B. Pendry 和 T. W. Ebbesen。《亚波长孔阵列的异常光学透射理论》。《*Physical Review Letters*》，86(6):1114–1117，2001年。doi: 10.1103/PhysRevLett.86.1114。