隐声衣结构设计和实验研究新进展^{*}

胡文林 杨 军[†]

(中国科学院声学研究所 噪声与振动重点实验室、通信声学实验室 北京 100190)

摘要 隐声衣是一项使物体隐藏于声场的新技术,与传统吸声方式相比,隐声衣消除回波时不会在目标背后留下 声影区。隐声衣的物理实现是重点研究方向之一,利用具有特殊性质的材料或结构消除散射是获得隐声效果的主 要途径。文章综述了隐声衣研究在结构设计和实验方面的几项新发展。包括基于超常材料的隐声衣、基于温度递 度的隐声衣、应用反演设计方法的隐声衣、有源隐声衣等,主要介绍隐声衣机理和结构设计方面的新思想,以及 新型人工材料和人工结构在隐声衣研究中的应用。

关键词 隐声衣,超常材料,散射,有源控制

中图分类号:O424 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-310X(2013)02-0091-09

New development in structure design and experimental study of acoustic cloaking

HU Wenlin YANG Jun

(Key Laboratory of Noise and Vibration Research and Communication Acoustic Laboratory, Institution of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Acoustic cloaking is a new technique that makes objects undetectable acoustically by reducing the backscattering field without sound absorption. Scattering cancellation by using engineered materials and structures with novel properties is an important approach to realize the cloak physically. In this paper, we introduce the recent significant advances in structure design and experimental study of acoustic cloaking. The topic includes the research results of acoustic cloaking with metamaterial, acoustic cloaking by using multiple scattering method, acoustic cloaking based on temperature gradients, active acoustic cloaking and so on. Some theoretical ideas and design concepts of the cloak, and the application of artificial materials are introduced.

Key words Acoustic cloaking, Metamaterial, Scattering, Active control

1 引言

隐声衣(Acoustic cloaking)也称声斗篷,是近 年来国际上新兴的一个科学研究热点。它是一项使 物体藏匿于声场的新技术,其最初的设计理念是利 用一种特殊介质构造而成的壳体将物体完全覆盖, 通过设定壳体材料的物理参数,如密度和体积模量 等,人为构造一个扭曲的空间,使声波绕开被覆盖

²⁰¹²⁻¹²⁻⁰⁷ 收稿; 2013-01-10 定稿

^{*}中国科学院战略性先导专项(XDA06020201)资助

作者简介:胡文林 (1984-), 男, 天津市人, 博士研究生, 研究方向: 声超常材料和隐声衣。

杨军 (1968-), 男, 研究员, 博士生导师。

[「]通讯作者:杨军, E-mail: jyang@mail.ioa.ac.cn

区域而在这种材料中穿行而过。物体在隐声衣保护 下,既不产生散射,也不会有吸收留下的声影区。 理想情况下,声波越过隐声层及其保护区域后的状 态与直达声完全相同,声场不会发生改变,以目前 任何声学手段都无法发现被隐藏的物体。而且,由 于声波无法到达隐声层包覆的区域,因此这种隐声 衣本身有极强的隔声能力。

隐声衣的设想来源于"光波和电磁波斗篷"这 一类研究。2006 年, Pendry^[1]等人建立空间非线性 坐标变换和材料基本属性之间的联系,首次在理论 上证明了这一设想的可行性。此后,学者们尝试用 同样方法操纵其它形式的波, Cummer 和 Schurig^[2] 将流体中线性声波方程与 Maxwell 方程类比,首次 在理论上给出了圆柱形隐声衣的介质参数, Cummer^[3]和 Chen^[4]等人分别用不同方法在理论上 证明了完美球形隐声衣的存在。之后,学者们围绕 隐声机理、材料和可行性等关键问题取得大量研究 成果,并提出一些隐声衣设计新思想,相关内容在 综述文章^[5]中有所描述。本文就作者掌握的资料简 要综述隐声衣研究在理论和实验方面的几项新进 展,主要包括:基于超常材料(Metamaterial)的隐 声衣、基于反演设计方法的隐声衣、基于温度递度 的隐声衣、有源隐声衣等。

2 基于超常材料的隐声衣实验进展及设计 新思想

完美隐声衣空间坐标映射关系如图 1 所示,半 径为 *R*₁的球形空间在虚拟空间中对应一个点,为保 持空间和物理场的连续性,一个包含着该区域的更 大球形空间被压缩成 *R*₁和 *R*₂之间环状区域,在外 部观察者眼中,半径 *R*₁球形区域只是一个点。这种 方法通过把真实坐标空间变换成虚拟空间,利用特 殊材料在真实空间中实现虚拟空间的声传播,从而 制造虚像。文献[2-4,6]等已经证明,按照坐标变换 方法求得隐声衣材料参数不是标量而是一个张量, 材料的密度和体积模量中至少有一个量具有强烈 各向异性并随空间位置快速变化,声超常材料是一种 新型人工结构,通过对传统材料进行加工组合,在 宏观系统中实现特殊的等效物理效果,如负密度、 模量、负折射、各向异性等,超常材料的等效物理 特性通常由结构加工组合方式决定。



图 1 球形隐声衣坐标变换映射关系剖面图

Zhang^[8]等人在牺牲部分效果的前提下首次实 现了实验室阶段的二维隐声衣。利用硬铝制成的传 输线结构(图2)使铜圆柱在水下躲过40~60kHz 声探测,且声波在材料内部传播时由吸声带来的损 失只有 6 dB/m。其核心思想是通过改变旁支管长度 实现各向异性等效密度,获得径向和切向不同的折 射率,实现声绕射。远场测量发现,覆盖隐声衣的 目标回波与前向散射对整个声场的扰动相比裸露 的刚性目标有明显下降。考虑到水声学中常用的目 标强度并不能完全体现出隐声衣的新奇特性, 文献 定义了可观测度系数,其数学表征为波阵面内不同 位置最大声压幅度差,体现了目标存在所导致的声 场不均匀性。此项研究也存在一些不足,可隐藏区 域半径为 13.5 mm, 而隐声衣外径达到 54.1 mm。 我们采用经典理论分析后发现,由于没有对传输线 阻抗进行修正,采用文献[8]中方法获得的实际等效 物理参数与设计参数相差很大。当短管长度小于管 口半径时,管口辐射引发的附加质量起主要作用, 单纯减小管道长度并不能有效降低等效密度。因 此,该隐声衣只在局部近似实现理论所需的材料参 数,若想提高隐声效果需要对材料做进一步改善。



图 2 文献[8]传输线式超常材料隐声衣

由于圆柱或圆球形隐声衣物理参数在靠近内 部边界处存在奇异性,有学者考虑调整坐标变换时 的映射关系,在理论上消除隐声材料的奇异值。如 果将真实空间中的一个洞(被隐藏区域)变换为虚 拟空间中的一条直线而不是一个点,物理参数的奇 异性将被消除^[9]。这种"毯"状隐声结构可用于隐 藏介质边界处的物体,在自由空间中,运用类似的 变换可以将目标伪装成其它形状。这类隐声结构目 的不在于隐藏物体的存在,而是替换目标的形态特 征,实现声学上的"拟态",Dupont 等人对拟态隐 声衣初步进行了数值分析^[10]。

Popa^[11]等人首先实现了二维声场中的隐声 毯。他们在地表隐藏了一块截面为三角形的棱柱 (图 3(a)),刚性边界凸起引发的声扩散大大降低。 当中心频率为3000 Hz的高斯脉冲从约45角度入射 到棱柱表面时,在竖直方向和与入射波对称的方向 产生强烈散射,覆盖隐声毯后,这两个方向的散射 减弱。在这项研究中,具备各向异性密度的声超常 材料由穿孔板组合成而(图3(b)),每个穿孔板单元 的尺寸为5mm,板厚1mm,间距4cm,穿孔直径 为 1.6 mm,长波条件下该结构体现出的沿板法向和 切向等效密度之比达到 4.6。由于理想隐声毯所需 的等效密度分量之一需要小于空气密度, 这在现阶 段难以实现,因此需要对结构进行弱化,使等效参 数进入可行范围内。由于所有的弱化隐声材料必须 满足主折射率约束条件,所以等效密度和等效体积 模量被整体性提高, 使隐声衣的外边界特性阻抗大 于空气特性阻抗,声散射不可避免。我们发现,在 可行材料参数范围内,外边界散射与隐声毯厚度相 关,隐声毯越薄密度的各向异性更强烈,隐声材料 本身散射越明显。该研究小组同时发表了水下二维 隐声毯研究成果,超常材料由泡沫铝、泡沫碳化硅、 钢板以及这些材料之间夹带的水复合而成, 隐声衣 底边长 3 m,高 1 m,在 1500 Hz 探测声场中能够 隐藏高度为 0.5 m 的凸起物^[12]。



图 3 文献[11]二维隐声毯

我们在空气中实现了一种隐藏物体几何信息 的隐声衣。通过覆盖在目标表面的特殊结构改变其 背向散射特性,使回波分布与平板反射相似,从而 在一定程度上欺骗回波探测系统^[13]。这种隐声衣如 图 4 所示,目标为自由空间中沿 z 轴方向无限伸长、



图 4 目标和隐声衣在 x-y 平面内投影示意图

截面为菱形的刚性四棱柱,蓝色区域为隐声衣,探测声波在 x-y 平面内传播。设真实空间坐标系为(x, y, z),对应的虚拟空间坐标系为(x', y', z'),因物体为中心对称结构,只给出第一象限映射关系^[11-12]:

$$x' = x, \qquad y' = \frac{c}{c-a} \left(-a + \frac{a}{b} x + y \right),$$
$$z' = w_z z, \qquad (1)$$

其中,实数w₂用来调整隐声衣弱化水平,使材料参 数进入可行范围内。考虑到隐声衣的几何体积和材 料的各向异性度是一对相互矛盾的量,我们在实验 室研究阶段对结构整体几何尺寸作出一定容让,尽 量减小隐声衣材料特性阻抗与环境流体阻抗的差 异。取 a = 6 cm, b = 18 cm, c = 18 cm, 设计的二 维隐声衣占用空间是目标物体的3倍,材料主轴方 向等效密度之比只有 2.6, 相对容易实现, 且等效 材料的阻抗与空气比较接近。弱化因子 w₂ = 0.54, 基于转换声学方法求得各向异性等效物理参数,这 些参数可用穿孔板与空气复合(图 5)而成的超常 材料实现。垂直于穿孔板方向,声传播受板的阻碍, 等效密度大于空气密度;平行于穿孔板方向,声传 播受板影响很小,等效密度接近空气密度。该结构 的等效体积模量与单元中固体填充率有关,等效剪 切模量为 0, 在超常材料的观测尺度上不存在剪切 形变,因此也被称为超常流体^[14-18]。调整孔径和板 厚可以控制等效参数,采用检索方法^[19],由行波 管中的反射和透射系数逆推出等效密度和体积模 量。在 1500~2200 Hz 范围内,我们选取的超常材 料晶格尺寸为 10 mm,穿孔板厚 1 mm,孔径 2.3 mm,实际等效物理参数与设计参数相对误差不 超过10%(图6),使得折射率在较宽频率范围内保 持稳定。整个隐声衣由11层这样的材料构成。



图 6 文献[13]超常材料的等效密度和体积模量

鉴于回波反射是声学目标探测的主要途径,为 检验隐声衣的有效性,我们在如图7所示波导中进 行实验,比较平板、刚性棱柱本身和覆盖隐声衣后 的反射声场分布。波导由两块有机玻璃板组成,四 边帖吸声材料,中间空气层厚度1cm。实验分两步 进行:首先考查待测物体表面反射在不同方位的分 布情况,如图8(a)所示,传声器在回波区域沿直 线移动,构成测量声阵列,平板长棱与波导短边平 行,棱柱截面的长对角线与波导短边平行、短对角 线指向声源方向;然后考查声波以不同角度入射到



图 7 文献[13]中实验采用的波导

物体表面时的回波状况,如图 8 (b),将传声器位 置固定在目标和声源连线上,目标绕自身 z 方向几 何轴线逆时针和顺时针各旋转 90°。



图 9 为待测目标反射的空间一频率分布。声波 入射到平板表面时,声源和目标中心连线位置(测 量点位移为 0) 反射声压最大,在±10°范围内能接 收到很强的反射声波,随着传声器向两侧移动,反 射声压逐渐下降(图 9(a))。声波入射到刚性四棱柱 侧面时,反射声场的空间分布趋势与平板有很大差 异,按照实验设置的方式,探测声波斜入射到棱柱 相邻的2个侧面,反射到法向另一侧,所以声源和 目标中心连线附近反射声压最小, 传声器向两侧移 动时接收到的反射声压逐渐上升(图 9(b)),当频率 升高时,声波对物体形状变化敏感性增强,图 9(a) 与图 9(b)反差更加明显。隐声衣改变了结构整体散 射,使反射声场再次集中于目标中心和声源连线区 域(图 9(c)),图 9(c)与图 9(a)所示的反射声场空 间-频率分布十分相似。由隐声衣的弱化和材料声吸 收导致差别只有 2 dB~5 dB。



图 10 为待测目标的回波一角度频率分布,图 中横坐标所示 0 度角对应各物体初始摆放角度。平

板回波图中呈现1个明显的峰值(图 10(a)),这对 应平板表面法向指向声源时的情况, 物体在 -10°~10°范围内旋转时, 传声器可以接收到十分强 烈的反射声波,在-20°~-10°和10°~20°范围内,回 波迅速减小,比反射峰值低约 10 dB,当平板旋转 至其它角度时, 回波下降超过 25 dB。在物体旋转 角度范围内,四棱柱的侧面有2次机会面向声源, 使传声器能够接收到较强回波的角度范围达到 -50°~50°,远大于平板。棱柱旋转到±28°附近时回 波声压达到最大,此时棱柱侧面法向刚好指向声 源,由于棱柱的几何反射面积比平板小,因而同一 频率下棱柱的回波峰值略小于平板(图 10(b))。棱 柱旋转至 0°附近时,回波声压较低,在两个峰之 间出现一个较为明显的谷。在棱柱外覆盖隐声衣 后,回波主要集中在在-20°~20°范围内,此区域内 反射声场随物体旋转角度的分布与平板较为接近



(图 10(c))。由于本文弱化隐声衣的声超常材料特性阻抗略高于空气,其旋转至大部分角度时会产生 微弱的回波反射,可以看到,由隐声衣自身造成的散射在±45°附近较强,但与回波峰值相比仍要小15 dB 以上。根据以上实验结果,可认为隐声衣对绝大部分角度入射的声波有效,能够在一定程度上改变目标散射特征,达到隐藏其几何信息的目的。

我们的另一项研究在空气中实现了针对三维 声场的隐声毯。文献[11-13]隐声方式只适用于特定 平面内传播的声场, 当探测声波传播方向不再局限 于和隐声毯纵剖面平行时,三维隐声毯能够在半自 由空间内隐藏刚性边界处的凸起物。设隐声毯高度 为目标物体高度2倍,按照三维空间的转换声学方 法^[4]计算隐声毯所需的等效物理参数。实验表明, 2500 Hz 探测声波入射到地面时,凸起物散射使反 射波形出现间断(图 11(b)),幅度明显小于相同测 量位置的光滑地面反射(图 11(a)),在凸起物表面 覆盖隐声毯后,反射波幅度和空间分布(图11(c)) 接近光滑地面反射。该隐声毯采用的超常材料单元 尺寸为 5 mm, 理论上当声波波长超过 5 cm (单元 边长 10 倍)时,均可将其视为等效流体单元。进 一步实验表明, 隐声毯在 1500~6500 Hz 范围内能 明显削弱地表凸起物产生的散射,使其表现出与光 滑地面反射及为相似的声场分布,从而达到在刚性 边界面上隐藏物体的目的。



图 11 声波斜入射条件下,某一时刻反射波形空间分布

隐声毯本身并不具备隔声性能,探测声波能够 穿透隐声毯介质到达其内部。为了实现隐声效果, 隐声毯内边界处必须衬有声学"绝对硬"材料构成 的反射面,这层"绝对硬"材料之下的可以隐藏任 何形状和介质的物体。探测声波入射到隐声衣介质 时,发生反常折射,能量传播方向与波矢方向分离。 以理想的二维隐声毯为例,沿目标物体高度方向入 射的声波,能量传播方向不发生改变,波矢偏转后 垂直于内边界面,入射到"绝对硬"内表面后发生 反射,反射波传播路径与入射波相同,方向相反; 沿水平方向入射的声波,能量传播方向与内边界平 行,波矢方向不变,声场能够无畸变地穿过隐声衣 覆盖的物体(图12)。

通过以往研究我们发现,在环境流体中嵌入

固体以改变其弹性性质,实现各向异性的超流体, 虽然可以近似满足特定结构和坐标变换方式隐声 衣的材料参数要求,但其自身存在一定局限性。 以嵌入物为穿孔板为例,改变板厚和穿孔率固然 能在一定范围内实现等效密度的各向异性,但低 频条件下,这种材料的等效折射率始终大于 1, 换言之,声波在这种超常材料中传播的速度总是 小于环境流体中的声速。现有研究表明,流体中 嵌入固体形成的等效超常流体或变截面波导管式 的传输线超常材料均无法在较宽频带内明显提高 等效声速。



上述所有隐声方式中,隐声材料所占空间均大 于目标物体本身体积,难以实现工程应用。Guild^[20] 等人提出了一种利用较薄隐声层隐藏大目标的设 想,此方法与空间坐标变换无关。该小组之前利用 等离子(Plasmonic)超常材料实现了首个三维波场 内的电磁斗篷,使一根 18 厘米长的圆柱管成功地 避开了 3.1 GHz 微波场的探测。他们将等离子斗篷 的设计方法推广到声场中,隐声材料的特性阻抗并 不需要与环境阻抗相匹配,且厚度仅为目标半径的 10 分之1。等离子体会引发与常规材料相反的散射 效应,设计得当可抵消目标物体产生的散射。仿真 研究表明,在特定频率下,等离子材料的散射声场 与目标散射声场干涉相消,远场总散射声压大幅下 降。构造等离子隐声衣的材料等效密度远小于环境 流体密度,因此要借助声超常材料来实现。

Munteanu 和 Chiroiu^[21]提出了一种利用周期性

材料制作隐声衣的设想。按照三分康托尔序列 (Triadic Cantor sequence)方式,用压电陶瓷和环 氧树脂构造周期性环状隐声层。经证明,该隐声衣 与通过非线性坐标变换求得的各向异性非均匀材 料隐声衣在数学上等效。

上述各种隐声方式均存在"双盲"问题。由于 声波无法进入隐声衣内部,被隐藏的物体同样无法 探知周围环境的变化,因此实现"非双盲"性能是 隐声衣研究的重点之一。Zhu^[22]等人在理论上提出 了一种独特的"超透镜"隐声衣设计思路(图13), 将虚拟空间(A+B)区域映射到真实空间(A'+B), 便会产生一个环形空洞(C+D),其中 A'为被隐藏 物体,B为周围环境介质。环形空洞可由互补的单 负均匀超常材料填充,以保持声场连续性。该小组 的进一步分析表明,这种隐声衣本质上是一个"超 透镜",当入射波到达隐声衣外表面时,通过隧穿 效应直达隐声衣内边界,然后便可无反射、无畸变 地通过被隐藏物体,最后隧穿过隐声材料与外场融 合。观测者无法察觉到被隐藏物体的存在,而该物 体却能够无失真地洞察周围的一切。



图 13 文献[22]互补介质隐声衣坐标映射示意图

3 基于温度递度的隐声衣设想

由于完美隐声衣材料具有连续变化、强各向异 性材料和奇异性等特点,实现起来异常困难,需要 以牺牲部分效果为代价进行简化。多项研究表明, 可以用厚度远小于波长的离散分层材料取代连续 渐变材料,基于毕奥流体理论用两层各向同性材料 可实现等效各向异性,适当调整坐标变换时的映射 关系能够消除物理参数奇异性,经过处理的弱化隐 声衣在理论上比完美隐声衣更为可行。但是,以上 简化方式并未从根本上解决隐声衣实现的难题。就 以坐标变换为基础的隐声衣问题而言,声线经由壳 体绕过目标后与直达声到达目标背后预期位置的

97

走时相同,才能保证声场不发生畸变。为使声线走 过比直达声更远的距离后不发生延时,隐声衣中的 声传播群速必须大于环境流体声速,相速不小于环 境流体声速。弱化处理不会改变隐声衣对折射率的 要求,切向等效声速依然需要大于环境流体中的声 速。按照之前的分析,单纯依靠结构的加工组合无 法在较宽频率范围内满足这一要求。

Garcia-Chocano^[23]等人在理论上提出了解决该 问题的一个方案。基于空气中声速与温度的关系, 加热或冷却空气可提高或降低声传播速度,通过调 节空气中嵌入固体的尺寸和空气温度控制不同位 置的声速。在仿真中,隐声衣由 20 层围绕成同心 环状的声子晶体构成(图 14),每个晶体单元由一 根细刚性圆柱和周边空气共同组成,晶格常数为目 标半径的10分之1。对不同层的圆柱交替加热或制 冷,使两个相邻同心层的等效密度变化趋势相反, 每两层材料组合,最终形成10个具有各向异性等 效密度的准渐变层,切向声速大于标准状况下的空 气声速,最内层切向声速可达到外部环境声速的10 倍以上。仿真结果表明,在一定频率范围内,覆盖 这种温度梯度材料的隐声衣可使目标回波强度明 显下降,但前向散射依然比较强。





4 基于反演设计方法的隐声衣

Chocano^[24]等人提出了设计隐声衣的另一种思路。他们没有采用文献^[2,6]等通过坐标变换求解等效

参数的方法,而是引入工程领域流行的反演设计方 法,以需要的声场分布为目标反求出隐声衣的结构 信息。被隐藏的目标是一个半径 11.25 cm 的刚性圆 柱,隐声衣则由分布在外径为 22.5 cm 环状区域内 的 120 个小圆柱组成,每个小圆柱半径为 15 mm。 假设入射平面波声场已知,采用多散射法,将目标 和小圆柱等所有散射物的组合体作为研究对象,声 传播过程视为一系列散射过程的叠加,可以计算出 求解域中的声场分布。以小圆柱所在位置为变量, 将远场所有角度散射声能最小化作为目标函数,采 用基因算法和模拟退火算法求出所有小圆柱的最 优布放位置(图 15)。平行波导内的实验表明,当 高斯波束沿 x 轴方向传播时, 整个结构在 3011 Hz 至 3111 Hz 范围内的可观测系数明显小于目标单独 存在时的情况,且几乎不存在声吸收。此频带内, 声波波长不足小圆柱直径的4倍,每个小圆柱本身 的散射不可忽略, 按照优化位置布放的小圆柱带产 生的散射可以抵消目标物体散射。然而,当声波入 射角度发生改变时,数值优化的环境条件被破坏, 隐声衣性能急剧下降。因此,这种隐声衣对声波频 率和入射角度有很强的选择性。



图 15 文献[24]基于反演设计方法的隐声衣剖面图, 蓝点为 组成隐声衣的小圆柱, 灰色区域为优化过程中小圆柱位置可 行域, *R*₀为目标区域半径

5 有源隐声衣设想

根据文献[2,4,6],隐声衣所需的超常材料物理 参数应随空间位置连续变化,且越靠近目标,物理 参数越极端。多项研究表明,声波导管内的弹性薄 膜在共振频率附近可以体现出负等效密度^[25-27],使 薄膜及周边流体的平均等效密度下降,从而提高波 导管内声传播的相速度,但是,这种共振式超常材 料能够产生有效负密度的频率范围非常小。考虑到 目前所有无源声超常材料无法在较宽的频段内完 全满足隐声要求,Akl 和 Baz^[28]提出了有源声超常 材料,用压电薄膜取代声学空腔中的纸膜(图 16)。 研究表明,可以通过控制压电材料振动的方式扩大 等效参数的变化范围,在更宽频带内实现负等效密 度,从而使隔膜和流体所构成的整个单元的平均密 度小于环境流体密度。该小组的另一项研究表明, 在波导管的共振旁支管中加入压电片,可以用类似 的方式调节等效体积模量^[29]。这种超常材料实现等 效参数的根本方式是振动主动控制,压电自感知材 料是反馈回路中的关键,充当着传感器和执行器双 重角色。



Vasquez^[30]等人提出了利用次级声源实现隐声的设想,该方法类似于空间中的声场有源控制,如 虚拟声屏障。对于已知的探测声场,如果能用有源 控制的方式,在不影响原声场的前提下,在目标附 近构造一个封闭的静区(图 17(a)),位于静区内的 目标物体不和声波发生作用,从而达到隐藏的目 的。作者用数学方式证明,在二维声场中,可以用 3 个理想点声源夹挤出所需要的静区(图 17(b)),



包含静区和点声源的更大区域内的声场不发生改 变。用这种方法构造出的静区的半径比静区中心到 点声源的距离小得多,因此只能实现相对较小目标 的隐藏,且声场确定不受干扰的范围是有限的。扩 大静区或有效隐声范围都会提高控制难度。

6 结论

文章综述了隐声衣研究在结构设计和实验方 面的新发展。重点介绍了基于超常材料隐声衣的研 究进展,二维隐声衣和隐声毯实验证实了应用声超 常材料可以实现部分隐声效果,等离子超常材料和 周期性复合材料被引入隐声衣研究,利用超透镜原 理实现非双盲隐声衣的设想被提出。介绍了利用温 度递度提高声速以满足隐声衣物理参数需求的设 想、综合运用反演设计和数值优化方法的单向隐声 衣实验成果以及采用有源超常材料或次级声源实 现隐声的设想。以声超常材料为代表的多种新型人 工材料和人工结构的发展,一定程度上促进了隐声 衣研究领域新成果的产生,也为人们提供了更多可 选择的隐声方式。

参考文献

- PENDRY J B, SCHURIG D, SMITH D R. Controlling electromagnetic fields[J]. Science, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [2] CUMMER S A, SCHURIG D. One path to acoustic cloaking[J]. New Journal of Physics, 2007, 9(3): 45-45.
- [3] CUMMER S A, POPA B-I, SCHURIG D, et al. Scattering theory derivation of a 3D acoustic cloaking shell[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(2): 024301.
- [4] CHEN H Y, CHAN C T. Acoustic cloaking in three dimensions using acoustic metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(18): 183518.
- [5] CHEN H, CHAN C T. Acoustic cloaking and transformation acoustics[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(11): 113001.
- [6] NORRIS A N. Acoustic cloaking theory[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2008, 464: 2411-2434.
- [7] LI J, CHAN C T. Double-negative acoustic metamaterial[J]. Physical Review E, 2004, 70(5): 055602.
- [8] ZHANG S, XIA C G, FANG N. Broadband acoustic cloak for ultrasound waves[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(2): 024301.
- [9] LI J, PENDRY J B. Hiding under the carpet a new strategy for cloaking[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(20): 203901.
- [10] DUPONT G, FARHAT M, DIATTA A, et al. Numerical analysis of three-dimensional acoustic cloaks and carpets[J]. Wave Motion, 2011,

48(6): 483-496.

- [11] POPA B-I, ZIGONEANU L, CUMMER S A. Experimental acoustic ground cloak in air[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(25): 253901.
- [12] POPA B-I, CUMMER S A. Homogeneous and compact acoustic ground cloaks[J]. Physical Review B, 2011, 83(22): 224304.
- [13] HU W, FAN Y, JI P, et al. An experimental acoustic cloak for generating virtual images[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(2): 024911.
- [14] PENDRY J B, LI J. An acoustic metafluid: Realizing a broadband acoustic cloak[J]. New Journal of Physics, 2008, 10(11): 115032.
- [15] NORRIS A N. Acoustic metafluids[J]. Journal of The Acoustical Society of America, 2009, 125(2): 839-849.
- [16] TORRENT D, SÁNCHEZ-DEHESA J. Sound scattering by anisotropic metafluids based on two-dimensional sonic crystals[J]. Physical Review B, 2009, 79(17).
- [17] SÁNCHEZ-DEHESA J, TORRENT D. Acoustic cloaking by metafluids[J]. 2010, 26: 119-126.
- [18] SMITH J D. Application of the method of asymptotic homogenization to an acoustic metafluid[C]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2011, 467(2135): 3318-3331.
- [19] FOKIN V, AMBATI M, SUN C, et al. Method for retrieving effective properties of locally resonant acoustic metamaterials[J]. Physical Review B, 2007, 76(14): 144302.
- [20] GUILD M D, HABERMAN M R, Alù A. Plasmonic cloaking and scattering cancelation for electromagnetic and acoustic waves[J]. Wave Motion, 2011, 48(6): 468-482.

- [21] MUNTEANU L, CHIROIU V. On three-dimensional spherical acoustic cloaking[J]. New Journal of Physics, 2011, 13(8): 083031.
- [22] ZHU X, LIANG B, KAN W, et al. Acoustic cloaking by a superlens with single-negative materials[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(1): 014301.
- [23] GARCÍA-CHOCANO V M, TORRENT D, SÁNCHEZ-DEHESA J. Reduced acoustic cloaks based on temperature gradients[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(8): 084103.
- [24] GARCÍA-CHOCANO V M, SANCHIS L, DÍAZ-RUBIO A, et al. Acoustic cloak for airborne sound by inverse design[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(7): 074102.
- [25] YANG Z, MEI J, YANG M, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(20).
- [26] BONGARD F, LISSEK H, MOSIG J. Acoustic transmission line metamaterial with negative/zero/positive refractive index[J]. Physical Review B, 2010, 82(9).
- [27] LEE S H, PARK C M, SEO Y M, et al. Reverse doppler effect of sound[J]. Physical Review Letters, 2010, 104: 054301.
- [28] AKL W, BAZ A. Analysis and experimental demonstration of an active acoustic metamaterial cell[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(4): 044505.
- [29] AKL W, BAZ A. Multi-cell active acoustic metamaterial with programmable bulk modulus[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(5): 541-556.
- [30] GUEVARA VASQUEZ F, MILTON G W, ONOFREI D. Exterior cloaking with active sources in two dimensional acoustics[J]. Wave Motion, 2011, 48(6): 515-524.