

# 航空发动机声衬结构的发展

## Progress of Aero Engine Acoustic Liner Structure

■ 马鹏蔚 王晗 范学领 / 西安交通大学 王奉明 / 中国航空发动机研究院  
侯乃先 / 中国航发商用航空发动机有限责任公司

声衬是一种能有效降低航空发动机噪声、减少飞机噪声排放的技术。现代飞机噪声排放的可持续发展要求不断提高，以及航空发动机技术的发展，导致噪声频谱发生变化，声衬性能也因此面临新的发展需求。

飞机在运行期间产生的噪声具有远距离传播的特性，因此会降低飞机的声隐身性能，制约军用飞机的作战能力。此外，飞机噪声还可能会对机组人员、乘客，以及居住或工作在机场附近的人产生不良影响，包括耳鸣、焦虑和听力损失等，因此，降低飞机的噪声是十分必要的。

发动机噪声是飞机噪声的主要来源，可以通过声衬结构进行控制。在发动机入口、壁面等部位放置声衬（见图1），可以有效提高发动机的声能耗散，降低噪声水平。随着大涵道比涡扇发动机的发展，风扇噪声成为了现代发动机主要的噪声来源之一<sup>[1]</sup>，如图2所示。风扇噪声主要由单音噪声和宽频噪声组成，单音噪声具

有高声压级和很窄的频带，而宽频噪声没有突出的声压级峰值，频谱较宽。这两类噪声的低频部分具有远距离传播、难以耗散的特点，同时还可能激发飞机结构的振动模态，导致结构损伤的增加，甚至引发灾难性故障。因此，声衬在宽频和低频降噪方面的能力显得至关重要。

根据噪声控制的方式，声衬可分为被动声衬和主动声衬两种类型。被动声衬是通过结构设计来实现在特定频率或频段下的噪声衰减。一旦设计确定，被动声衬的结构、材料和吸声频率将保持固定，不会随着噪声激励源的变化而改变。而主动声衬则利用主动控制算法等技术，使其能够自适应地改变共振条件，实现在噪声环境变化等情况下的降

噪效果。此外，超材料是一种人工设计的周期性或非周期性结构，由于其出色的亚波长吸声特性，成为声衬设计中备受关注的结构。

### 被动声衬

被动声衬利用结构或材料的阻抗条件吸收噪声。传统声衬主要采用微穿孔板-蜂窝空腔结构，是一种单自由度声衬，原理是利用亥姆霍兹共振吸收单频噪声。在传统的单自由度声衬基础上，逐渐发展出多自由度声衬、多空腔声衬、非局域声衬和泡沫金属声衬等多种被动声衬形式，以适应更广泛的噪声频率和环境需求。

### 多自由度声衬与多空腔声衬

多自由度声衬通过将空腔分割

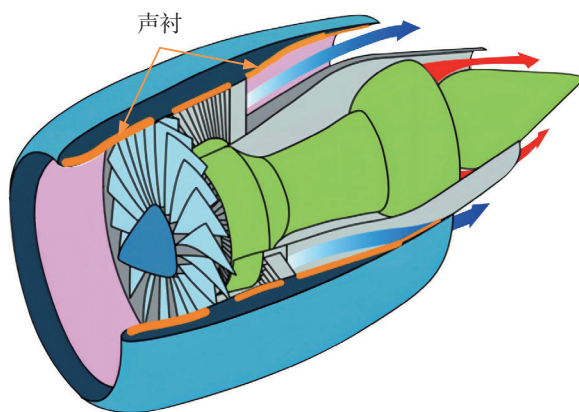


图1 声衬安装位置示意

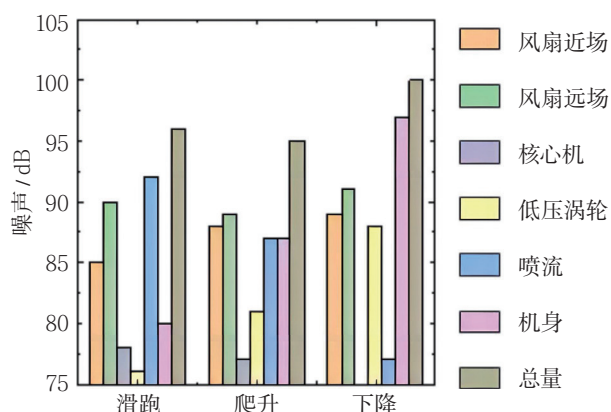


图2 飞机不同部位噪声贡献度<sup>[1]</sup>

为多层结构，引入多个自由度，从而实现多峰值降噪。其中，双自由度声衬主要在传统声衬的空腔内部放置穿孔板或隔膜，利用额外的空腔深度产生吸声峰值，从而实现宽频降噪设计，如图3所示。此外，隔板位置的变化会对双自由度声衬的消声性能产生重要影响：在保持声衬的总体积不变的情况下，通过调整隔板的位置，可以改变结构的共振频率，提高声衬的阻抗调节能力；当每个空腔内隔板的位置不一致时，会引入额外的自由度，有效地提高声衰减和拓宽吸声频带。在双自由度声衬的基础上，美国国家航空航天局（NASA）兰利研究中心采用在每个蜂窝单胞内铺设两层聚醚醚酮树脂隔膜的方法，制造了三自由度声衬<sup>[2]</sup>。在波音737MAX7飞机上开展的飞行测试中，该三自由度声衬在起飞、巡航和减速等不同飞行条件下，均实现了至少4 dB的噪声衰减效果。

多空腔声衬采用并联的方式将多个不同的共振腔耦合在一起，通过组合多个降噪频带，从而实现宽频降噪。多空腔声衬的不同空腔深度和不同腔体形状可以有效改变声衬内部的声分布和散射，最终实现有效吸声频率范围的偏移。北京航空航天大学结合等效源面法和传递矩阵法，设计声

衬的表面声阻抗，将蜂窝声衬的整个空腔分成若干长度或几何形状不一的子腔，在不增加声衬长度或深度的情况下提高了声衬的吸声带宽和低频吸声性能<sup>[3]</sup>。此外，在多空腔共振的情况下，声衬在正入射和掠射条件下的性能具有一定相似性。在这种条件下，正入射下的吸声系数峰值频率与掠射条件下的传递损失峰值频率非常接近。NASA将不同深度的四分之一波长共振器组合，并按周期排列，设计了一种宽频声衬，该声衬在1300 ~ 3000 Hz范围内表现出卓越的吸声性能<sup>[4]</sup>。美国航空航天学会（AIAA）通过有限元、试验等方法对空腔深度递减的声衬进行了大量研究<sup>[5]</sup>，分别利用立体光刻树脂和陶瓷基复合材料制成相同的空腔深度递减声衬。正入射和掠射的试验结果均表明，两种材料制造的声衬具有相似的宽频吸声性能，声衬结构的性能与材料的选取关系不大，主要与声衬本身结构的设计有关。AIAA还对弯曲空腔声衬（见图4）对多空腔声衬的降噪性的影响开展了研究，结果表明在保持一定声衰减性能的前提下，通过对空腔进行弯曲，能够将声衬的整体厚度从8.89 cm减少到6.63 cm，厚度降低了25.4%。

多自由度声衬和多空腔声衬均

采用硬壁将空腔隔开，具有局域反应特性。声波不能穿透腔体内壁，只能在单个腔体内沿壁面传播。声能量主要通过两种方式耗散：一是声波通过穿孔面板时热黏性损失提供的声阻；二是空腔产生额外的声抗。然而，它们之间存在一些关键差异。多自由度声衬采用串联的多层结构，通过多级共振产生多个吸声峰值，在较薄的厚度下实现出色的低频性能。但这种结构通常吸声带宽较窄、平均吸声系数低，宽频降噪性能差。多空腔声衬采用并联结构，将不同结构的吸声峰值组合在一起，实现更广泛的宽频吸声性能。然而，这也带来结构厚度较大的问题，两者的性能对比如图5所示。

### 非局域反应声衬

非局域反应声衬使用柔性材料或穿孔壁取代传统声衬空腔的硬壁。与局域反应声衬不同，非局域反应声衬的热黏性损失可以分散在柔性材料或穿孔壁中，而不仅仅集中在穿孔面板上。声波在非局域反应声衬内的传播方向可以与穿孔面板平行，从而在柔性材料壁或穿孔壁上产生额外的消声效果。穿孔壁的穿孔率对非局域反应声衬的降噪性能有着显著影响。通过调整穿孔率，可以在零和无穷大之间调节穿

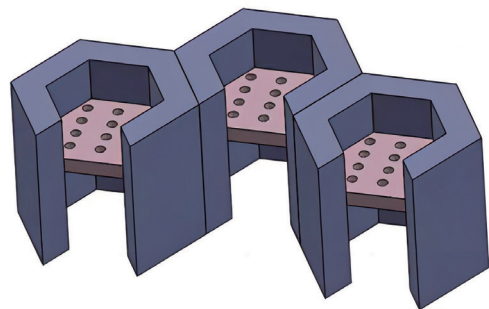


图3 双自由度声衬空腔结构

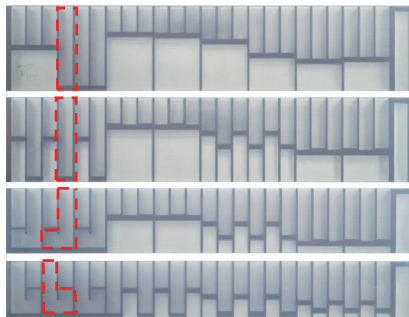


图4 弯曲空腔声衬<sup>[5]</sup>

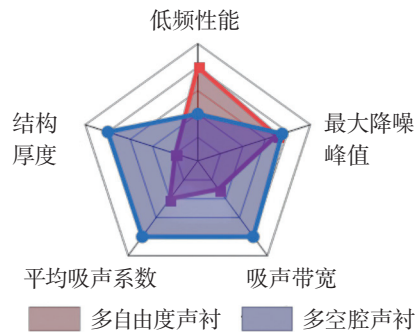


图5 多自由度和多空腔声衬性能对比

孔壁的声阻抗，从而改善声衬结构的宽频吸声性能。对于使用柔性材料代替不透声硬壁的非局域反应声衬，柔性材料的物理性质是影响其吸声性能的关键因素。例如，通过使用聚合物薄膜替代传统蜂窝结构中的部分刚性腔壁，其黏弹性导致额外的能量耗散，有效地拓宽了吸声频带。然而，气流对带有柔性壁非局域声衬的性能影响显著，随着气流马赫数的增加，降噪峰值明显降低。因此，需要进一步改进这类声衬的气动噪声降噪能力。

### 体声衬

体声衬主要使用块状吸声材料填充空腔，利用块状材料均匀分布的能量耗散实现宽频降噪效果。泡沫金属由于质量轻、刚性好等优点，是体声衬常用的填充材料。泡沫金属体声衬结构的薄型设计可方便地安装在靠近风扇转子的位置，有效节省了安装空间，如图6所示。带有环形凹槽的泡沫金属体声衬，可以降低入射动压，将气动性能损失从10%降至0.75%以下。同时，该声衬仍然能够保持2~3 dB的降噪效果，表现出良好的消声性能<sup>[6]</sup>。

### 对比分析

不同被动声衬的降噪频带有着明显区别，如表1所示。多空腔和非

表1 被动声衬的降噪频带

被动声衬类型	降噪频带
多自由度声衬	300 ~ 800 Hz
多空腔声衬	400 ~ 3500 Hz
非局域反应声衬	700 ~ 2700 Hz
体声衬	>1000 Hz

局域反应声衬吸声频带较宽，但非局域反应声衬的低频性能相对较差。多自由度声衬在低频性能上具有优势，但吸声频带较窄。泡沫金属体声衬的最大吸声峰值始终在1000 Hz以上，因此低频性能相对较差，与其他被动声衬相比存在局限。然而，由于泡沫金属体声衬具有质量轻、刚性好和易维护等优点，未来有望将其用于替代风扇易损部件和密封部件，降低发动机噪声的同时减少发动机的零部件数量和减轻质量，提高发动机性能。

### 主动声衬

主动声衬能够根据不同的噪声激励自适应地调整阻抗条件，改变共振频率，以适应飞机在起飞、巡航、减速和加速等不同工况下产生的多种频率噪声。根据调整的方式，主动声衬可分为机械制动声衬、电制

动声衬和偏流声衬。

### 机械制动声衬

机械制动声衬主要基于亥姆霍兹共振器结构，通过调整牵引结构等改变空腔的体积或孔口的直径，从而调节结构的声阻抗，实现自适应的共振频率偏移。一方面，改变空腔体积的方法通常以固定声衬结构的外壁，通过旋转或移动内胆的方式来实现，如图7所示，这种设计可以实现大约300 Hz的频率偏移<sup>[7]</sup>，在共振频率附近具有显著的降噪效果。另一方面，改变孔口直径可通过利用作动器、电机等动力装置旋转柱面实现。通过控制孔口的开关，可以实现一定程度的频率偏移，有效吸收不同频率的风机噪声。尽管机械制动声衬具备自适应噪声激励频率的消声能力，但通常需要额外的机械控制结构，使得结构相对复杂，体积较大。因此，缩小结构体积是机械制动声衬应用的主要挑战。此外，还需要确保控制结构的稳定性和控制算法的精度。

### 电制动声衬

电制动声衬利用压电材料等在电场作用下发生机械变形的特性，自适应改变结构的空腔体积、形状等，实现共振频率的偏移。将压电材料等制成薄膜，代替单自由度声衬的穿孔面板或双自由度结构中的隔板，可以构建电制动声衬结构。这些薄膜片在受到不同外部电压的激励时，会发生膨胀或压缩，从而改变共振频率。通过电场激活形状记忆聚合物，改变空腔的空间，也可以实现主动的降噪频率偏移。电制动声衬不需要庞大的体积和复杂的控制结构，却能够实现自适应的共振频率偏移，以吸收不同激励源

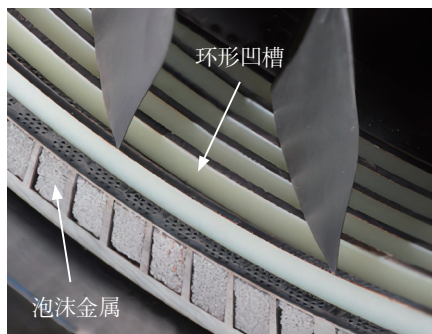


图6 泡沫金属体声衬<sup>[6]</sup>

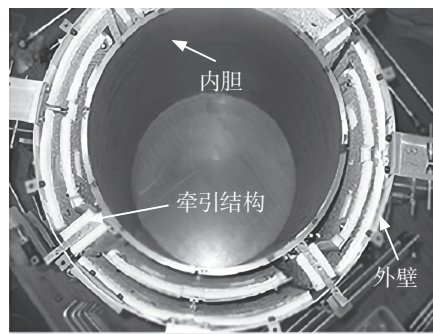


图7 机械制动声衬<sup>[7]</sup>

的噪声。然而，共振频率的偏移量通常较小，一般只能偏移几十赫[兹]，宽频降噪性能相对较弱。此外，电制动声衬还需要稳定的信号分析模块和高效的分析算法。

### 偏流声衬

偏流声衬通过引入额外的冷却气流到单自由度声衬空腔内，利用不同偏流速度调整声阻抗，从而实现降噪频段的自适应改变。随着偏流速度的增加，偏流声衬的声阻呈线性增加趋势，而声抗基本保持不变，从而提高宽频吸声性能。在双自由度声衬空腔中引入偏流，也可提高平均吸声系数，进一步增强宽频吸声性能。此外，在不同偏流速度下，结构参数对声阻抗的影响也会有所不同。例如，在高速偏流条件下，穿孔板厚度对声衬声阻抗的影响较小。另一种形式的偏流声衬是零质量流声衬。此方法在声衬空腔的后部安装扬声器，在空腔内产生激励声波以替代冷却气流。当空腔内的激励声波振幅足够大时，可以有效减少管道内部入射波的声压。当燃烧室内热释放率的波动与声压波动的相位接近时，会引发热声不稳定的现象<sup>[8]</sup>。偏流声衬可以有效抑制燃烧室内的热声不稳定性。增加偏流的流量可以显著提高对热声不稳定的抑制效果。

### 对比分析

图8对不同主动声衬的共振频率偏移量和结构复杂度进行了对比。虽然机械制动的主动声衬具有较大的共振频率偏移量和良好的宽频降噪性能，但其结构非常复杂，难以在实际应用中使用。相比之下，电制动的主动声衬采用了新型材料，结构相对简单，但其共振偏移量较

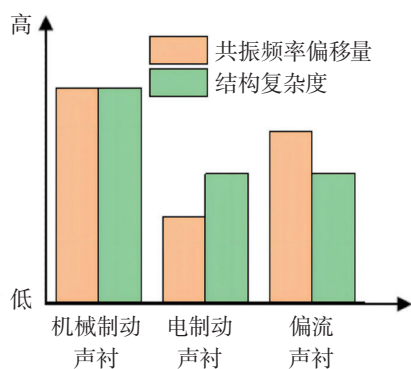


图8 主动声衬性能对比

小、共振频率低，通常适用于低频降噪。而偏流声衬则主要针对单自由度声衬结构进行改进，相比机械制动声衬，其结构较为简单，同时在宽频降噪性能上也优于电制动声衬，因此具有广泛的应用前景。

## 声学超材料在声衬中的应用

声学超材料是一种人工结构，由周期性或非周期性单元构成，能在亚波长尺度内操纵声波。例如，天津大学利用紧密束理论模型描述相邻声子晶体点缺陷间相互作用，并设计共振声子晶体，实现了声波亚波长引导<sup>[9]</sup>，还结合深度神经网络和遗传算法优化声学超表面，实现了高质量声全息重建。总体而言，声学超材料具有声负折射、声成像和声隐身等特殊性质。考虑到超材料的亚波长吸声特性与轻薄声衬的发展契合，因此超材料在声衬领域潜力巨大。

改进亥姆霍兹共振器是超材料声衬中常见的结构之一。亥姆霍兹共振腔与四分之一波长体积的单自由度声衬的结合，可以有效拓宽吸声频带。颈部延伸超材料通过延长亥姆霍兹共振器的颈部，有效增加了结构长度。这种设计能够在不改

变总体积的前提下，通过调节颈部结构的长度或宽度来调整声阻抗。将非均匀颈部延伸超材料并联，能够获得宽频声衬结构。该声衬在正入射和切向流条件下均表现出良好的吸声和降噪性能。在基于颈部延伸超材料的基础上，并联微穿孔板，还可以进一步扩展声衬的吸声频带，实现优异的宽频性能。此外，在不同切向流速下，基于颈部延伸的超材料声衬依然展现出了一定的宽频吸声性能。折叠结构是另一种超材料声衬结构，如图9所示。折叠单元结构的几何形状有助于增加声学有效传播路径长度，减少结构厚度。折叠超材料声衬的折叠腔室可以补偿穿孔内黏度引起的声抗<sup>[10]</sup>，实现阻抗匹配和完美吸收。因此，在无需增加整体声衬厚度的情况下，获得了显著的低频吸收带宽。将折叠超材料声衬与多孔材料结合，还可以进一步提升声衬的高频降噪性能。

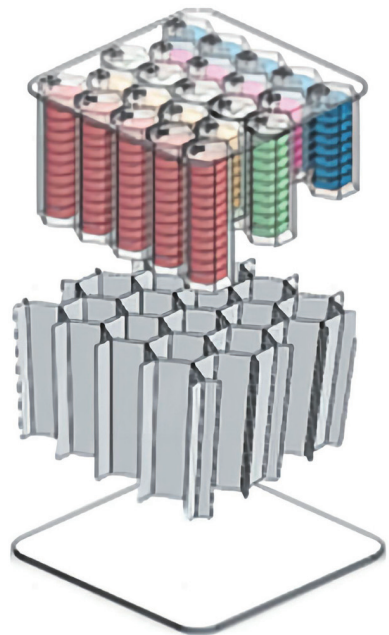


图9 折叠超材料声衬<sup>[10]</sup>

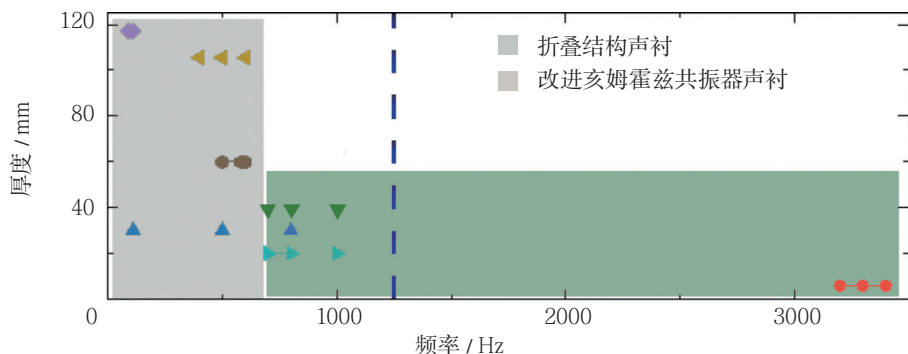


图10 超材料声衬的厚度与适用频率

超材料声衬在吸声频率和结构厚度方面的情况如图10所示。从图中可观察到,目前对于超材料声衬的研究主要集中在频率小于1250Hz的低频声波控制,并且结构厚度通常明显小于吸收频率的波长。与传统的主动和被动声衬相比,超材料声衬有结构轻薄化的优势,有使声衬轻质化、小型化的应用潜力。然而,超材料声衬的结构通常相对复杂,实现成熟的制造工艺仍然是限制其应用的主要挑战。

## 结束语

声衬是降低航空发动机噪声、提升飞机舒适性以及保护人员健康的关键结构之一。传统声衬吸声频带窄、吸收低频噪声需要厚重结构,无法满足航空发动机的宽频和低频降噪需求。新型被动声衬和主动声衬的不断发展,以及超材料技术在声衬设计中的不断应用,实现了良好的低频和宽频吸声性能。然而,当前声衬技术的应用仍然存在一些挑战。首先,声衬可能会受到高温、压力和撞击等恶劣环境的影响,声衬一般由聚合物和普通金属材料制造,较弱的耐高温性能限制了其在高温环境的应用。其次,声衬壁厚较薄,在压力和冲击下可能导致结

构被破坏。因此研究具有承载能力的声衬是必要的,此外,与光滑表面相比,气流经过声衬表面会产生额外的阻力,增加燃油消耗,因此减小声衬阻力,降低对航空发动机性能的干扰,对提高航空发动机的效率具有重要意义。

航空动力

(马鹏蔚,西安交通大学,博士研究生,主要从事航空发动机声衬设计、声学超材料设计与吸声性能研究)

## 参考文献

- [1] JONES M G, SIMON F, RONCEN R. Broadband and low-frequency acoustic liner investigations at NASA and ONERA [J]. AIAA J, 2022, 60(4): 2481-500.
- [2] NARK D M, JONES M G. Design of an advanced inlet liner for the quiet technology demonstrator [C]. The 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2019.
- [3] JING X, WANG X, SUN X. Broadband acoustic liner based on the mechanism of multiple cavity resonance [J]. AIAA J, 2007, 45(10): 2429-37.
- [4] HOWERTON B, JONES M, BUCKLEY J. Development and

validation of an interactive liner design and impedance modeling tool [C]. The 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (33rd AIAA Aeroacoustics Conference), 2012.

- [5] JONES M G, NARK D M, WATSON W R, et al. Variable-depth liner evaluation using two NASA flow ducts [C]. The 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2017.
- [6] BOZAK R, HUGHES C, BUCKLEY J. The aerodynamic performance of an over-the-rotor liner with circumferential grooves on a high bypass ratio turbofan rotor [M]. GT2013-95114: NASA Technical Report, 2013.
- [7] KOBAYASHI H, KOH M, OZAKI S, et al. Newly-developed adaptive noise absorption control technology for high speed fan noise reduction [J]. Int J C-Mech Sy, 2006, 49(3): 703-12.
- [8] 莫长彩,徐亮亮,王思睿,等.带加热偏流的声衬对热声不稳定性的控制方法[J].航空动力学报, 2019,34(7):1510-1518.
- [9] MA T, LI X, TANG X, et al. Three-dimensional acoustic circuits with coupled resonators in phononic crystals [J]. J Sound Vib, 2022, 536: 117115.
- [10] CHAMBERS A T, MANIMALA J M, JONES M G. Design and optimization of 3D folded-core acoustic liners for enhanced low-frequency performance [J]. AIAA J, 2020, 58(1): 206-18.