

声学问题及其解决方案

(排练空间)

版本 1.2

Wenger®

您精彩演出的理想合作伙伴

为何选择本指南？

在这本《声学问题及其解决方案》指南中，我们将介绍音乐教育者在排练场所会遭遇哪些常见声学问题。本指南有助于确定问题，并说明可以采取哪些措施，帮助解决或尽量避免问题的发生。有些解决方案非常简单，大都需要一些投资，而遇到某些情况时，除翻新设施之外基本别无选择。但无论何种情况，我们都认为本指南有助于深入了解和评估音乐场所，避免对实际无效的补救措施投入时间和资金，并提供事实依据，帮助定位有效改善设施的切入点。

WENGER 配套读物

• 新建工程和翻新规划指南

Wenger 原版规划指南得到数千位音乐教育者、建筑师和管理者的广泛使用，为打造效果出色的音乐教育和演出场所设定一系列基本设施标准。即使并无计划新建工程，本指南也可以为了解布局、声学、储存和设备等问题奠定坚实基础。



作为 AIA/CES 注册提供商，Wenger 与美国建筑师协会继续教育系统长期保持合作关系。

• 小学规划指南

本指南讲解为小学教育打造常规音乐空间所需的基础知识。重点介绍何种空间具备适当的开放性，且便于简单快速的转换教学活动、更换方式方法和变换使用设备。

• 声学入门

Wenger《声学入门》是 Wenger 其他设施指南的配套文献。其本身也是一本优秀的参考工具书，能够帮助教育者深入了解哪些关键声学原理和定义会对其教学和演出场所产生影响。《入门》一书以通俗易懂的语言、图文并茂的方式讲解声学物理科学，帮助教育者、管理者和建筑师快速掌握相关知识。



致电联系 Wenger 采购以上指南读物。

本 WENGER 出版物由 M. DAVID EGAN 教授校审

他是 AIA 声学荣誉顾问以及克莱姆森大学建筑学院荣誉教授。35 年多以来，他一直担任南卡罗来纳州安德森森 Egan Acoustics 首席顾问。Egan 教授毕业于拉法耶特学院（理科学士）和麻省理工学院（理科硕士），曾经在杜兰大学、乔治亚理工学院、北卡罗来纳大学夏洛特分校以及华盛顿大学等知名学府任教。他是《Concepts in Architectural Acoustics》、《Concepts in Thermal Comfort》、《Concepts in Building Firesafety》和《Concepts in Architectural Lighting》（两版）等书作者。除顾问、教育和写作外，Egan 教授还是美国声学协会会员、全国声学顾问理事会成员以及大学建筑学院协会 (ACSA) 特聘教授。

以自身丰富经验为基础，广泛采纳读者意见，制定教育指南

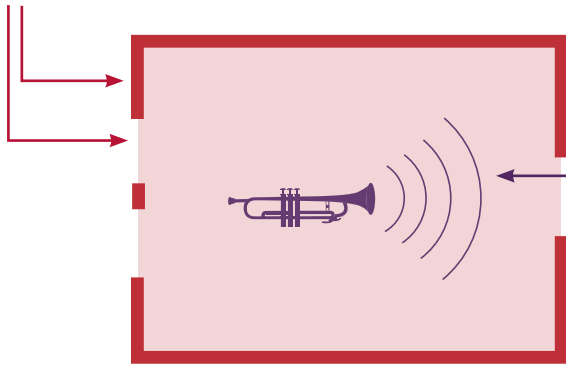
Wenger Corporation 始终坚持采用这种方式编写教育指南。在研究音乐教育和提供符合需求的解决方案方面，Wenger Corporation 有超过 54 年的丰富经验。就人员配备而言，在音乐教育和演出设施、声学、储存和设备领域内，我们有行业顶尖的专业人士。然后，我们广泛咨询真正的专家，即音乐教育者。历经 6,000 多次调查，数百次访谈和实地考察，我们将教育者日常面临的课题和问题定为重点关注对象。

Wenger 指南所述课题是多方合力完成，将自身专业知识与著名声学家、建筑师和设施规划师的意见和著作融会贯通，当然还采纳了各位音乐教育者的创新解决方案。北美各地学校众多，课题也随之变化多样。虽然具体设施和情况各不相同，但 Wenger 指南将为解决当前教育主体以及设施面临的许多问题找到切入点。我们坚持努力更新版本和课题，请致电联系 Wenger，获取音乐教育者及其教学和演出场所相关指南的最新列表。

四大声学关注领域

隔音

在此，我们为确定不想听到的噪声如何进入音乐场所，以及音乐对附近课堂和办公区可能有何干扰提供一些基本建议。我们说明如何处理通常即为此类问题根本原因的门窗、墙壁、地板、顶棚和通风管道。



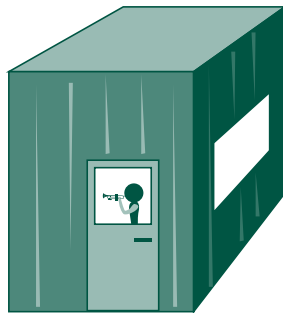
室内声学

本部分解决房间太吵、嗡嗡作响、哑点和回声等问题。说明房间大小、形状和表面材料各对室内声学有何影响，以及如何改进才能更准确地体现出排练室内乐声。



机械噪声

通风管道嘶嘶作响，压缩机组振动发声以及电灯镇流器发出杂音，这些都是音乐空间不想听到的噪声。在本部分，我们就如何在排练室内尽量降低此类噪声提供一些建议。



练习室声学

通过练习课，我们十分希望学生取得音乐进步，但练习室声学环境条件糟糕也是屡见不鲜。隔音和室内声学处理或模块化选件解决方案可以显著改善这些重要环境。

门窗.....	5
墙壁.....	7
顶棚和地板.....	9
房间太吵.....	13
房间嗡嗡作响、低音过重	15
回声和驻波.....	17
合奏效果不佳 — 难以听清	19
机械噪声.....	21
练习室范式.....	23
声学术语.....	25
参考文献.....	26
其他读物.....	26
查找声学顾问.....	26
其他 WENGER 教育和演出指南.....	26

声学家和专业人士

声学家和专业人士咨询指导不可

替代。他们的意见有助于确定声

学问题和了解适当的纠正措施。

在第 26 页，我们将提供一些联

系信息，以便于大家联系声学专

业人士，获取项目帮助。

大型排练室内隔音不佳

“楼内别处噪声进入排练室。”

“总有人提醒我，排练对附近教室和行政办公室造成干扰。”

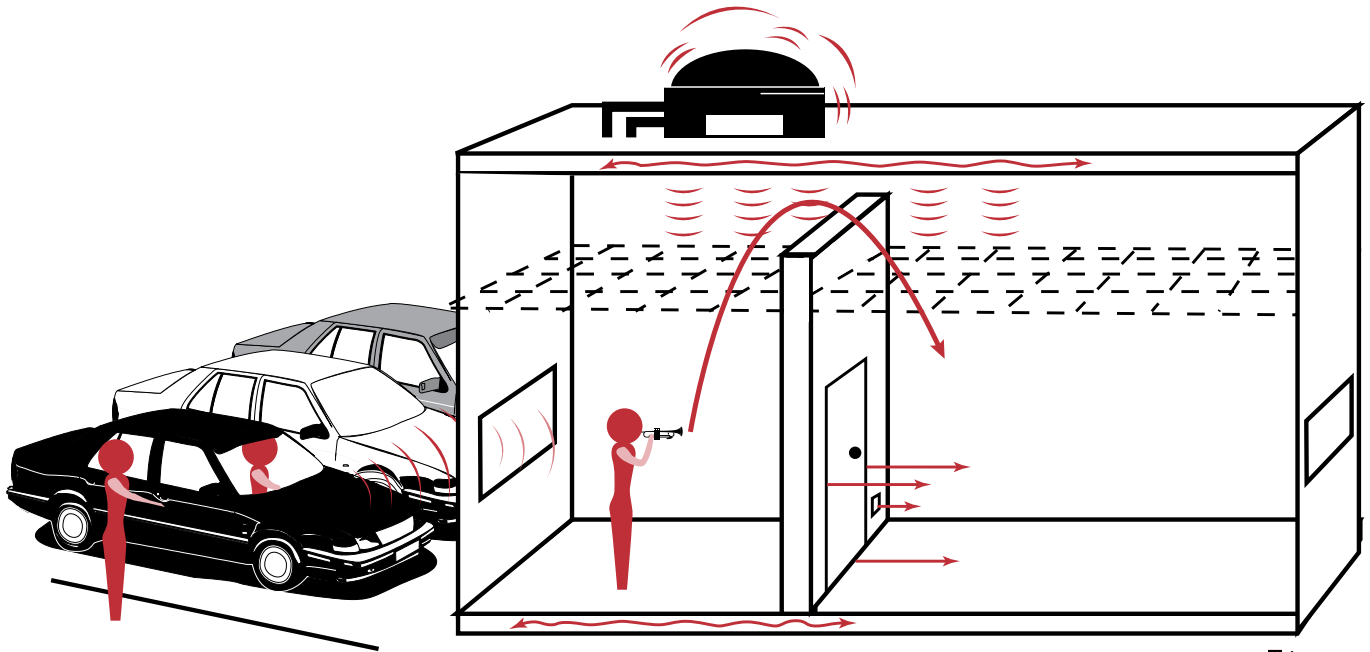
“合唱排练室与乐队排练室只有一墙之隔，饱受噪声问题困扰。”

“一打开空调，就能听到各种噪声，有节奏的尖锐刺耳声、电机轰鸣和冷凝器振动等等。”

隔音不佳的表现

声音传播途径：

- 关闭的门窗
- 墙壁
- 顶棚和地板
- 暖通空调 (HVAC) 系统管道和通风口
- 缝隙和开口



门窗

为提供有效隔音，门需要做成实

心结构，而且质量要足够大。大

多数门厚度仅为 $1\frac{3}{4}$ " (44 mm)，

无法充分隔音。门框四周和门槛

上方还必须密封严实才能发挥隔

音效果。

窗户装配双隔音结构能够提供有

效隔音。最好能将窗格设计成不

同厚度并超过 $\frac{1}{4}$ " (6 mm)，使其

在不同频率产生共振。此外，

保留至少 2" (51 mm) 吸音气室

分隔窗格也能显著改善隔音。

可以敞开的窗户也应使用垫圈密

封严密。

▶ 门窗检查要点

- 检查基本结构是否有问题：
 - 门是否太薄？
 - 是否空心？
 - 门是否有百叶板？
 - 窗户是否采用单片窗格玻璃结构？
 - 玻璃厚度多少？
- 检查厚度：
 - 门框和窗框是否有密封和垫圈，或垫圈是否磨损、脱落或错位？通过夹纸关门或关窗检查密封。如果轻易便可拉出门框或窗框夹纸，基本感觉不到阻力，说明密封不严。如果在某些点感到气流或看到透光，说明此处也有问题。
- 检查门底密封条：
 - 门槛上方门底密封是否紧密？
 - 在此处，夹纸测试同样有效。
- 查阅建筑设计和施工文件，以确定设计是否已有门窗声学规范。务必遵守其中的规范。

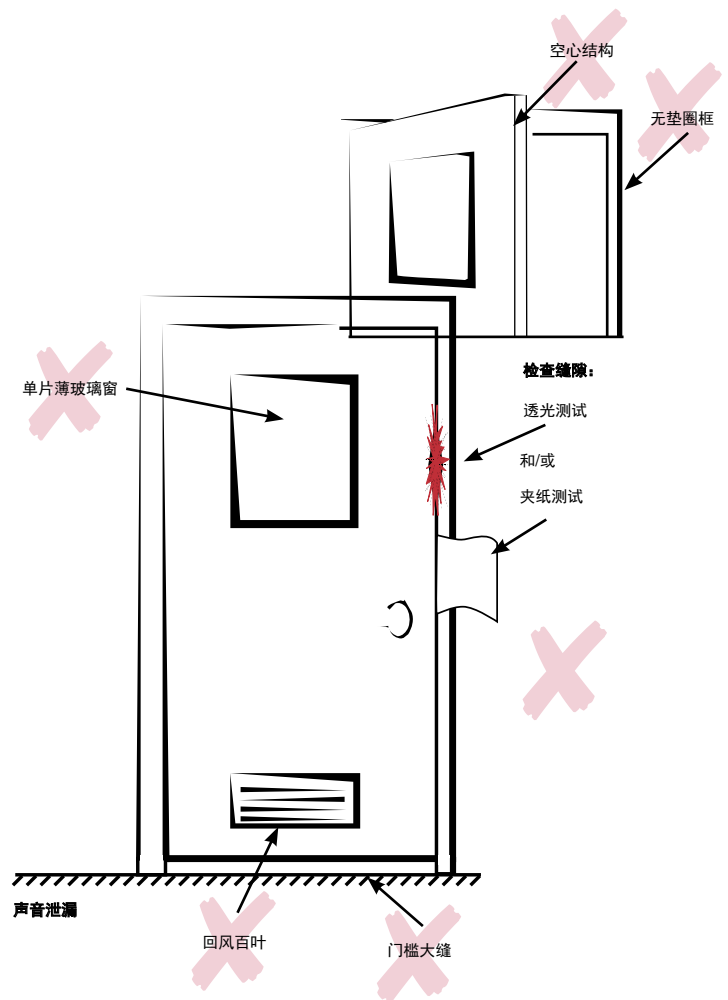


图 2

► 门窗解决方案

最佳 解决方案

如果门窗不隔音，则需要换用隔音产品（至少 STC 43 级，请参见术语表）。检查安装和密封是否正确。

- 结构不良的门可通过增加质量（双面加装 $\frac{3}{8}$ " (19 mm) 胶合板或金属板等材料）提高隔音能力。评估这对门锁、折页和门框有何影响。如果采用这种解决方案，建议聘用专业木匠施工。此外，还要评估这种方法与安装新门的相对成本。
- 若要消除单层玻璃窗格漏音，可以考虑在窗格上再加一层玻璃。注意使用至少 $\frac{1}{4}$ " (6 mm) 厚的玻璃，尽可能拉开两层玻璃的间距。确保改装不违反消防规范，同时也要比较这与安装新窗的相对成本。
- 如果门窗没有密封，或密封磨损或缺失，则要新加密封。磁性密封效果最好，但如果无法实行，则要确保选择氯丁橡胶等密实的柔性材料。关闭门窗后，密封应紧贴干净平整的表面并与其保持平齐。目标是实现气密连接。
- 许多门都有下拉式密封条，关门后贴住门槛。这种密封条经常错位，使用螺丝刀调整即可。如果没有密封条，则要适当加装。通常，他们由刷式密封盖和门槛封板组成。需要经常检查以确保对位正确。
- 安装松动的窗格需要重新安装玻璃或密封窗格以实现气密性。
- 评估对每扇门（特别是窗户）的需求。某些情况下，可以不用门窗。如果可以封死门窗，请务必确认是否符合建筑或消防规范。
- 在原来的门前再加一扇门，可提高门廊的隔音效果，这与酒店相邻客房之间常见的双门结构类似。最简单的情况是将门装入嵌壁或小凹口。这种方法同样需要咨询声学专业人士和木匠的意见。
- 如果门上有百叶，将其拆除并采用实心板封堵露出的开口，即可达到隔音效果。请务必咨询机械工程师或建筑维护主管，以确保回风循环不受阻断。

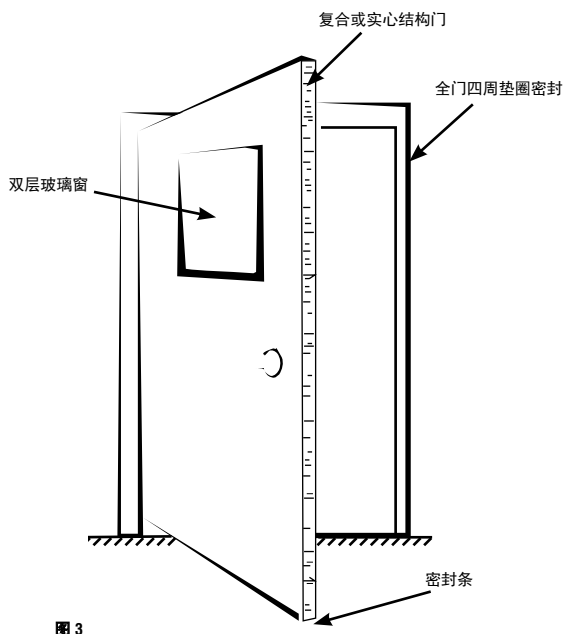


图 3

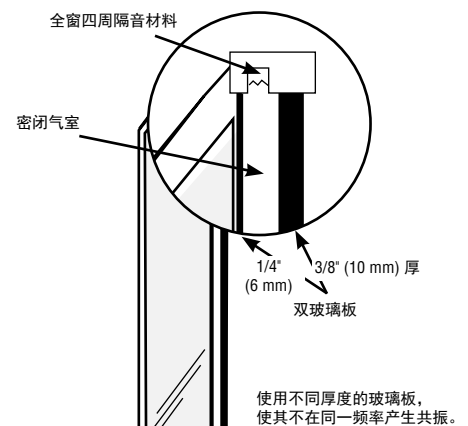


图 4

墙壁

虽然墙壁可以完全阻断视线，

但通常不能完全阻断声音。还要

记住，墙壁隔音的有效性容易受

到破坏。举例来说，一面 4' x 8'

(1219 X 2438 mm) 实心墙，如

果墙上有一个硬币大小的小孔，

隔音有效性就会降低 80%。需要

全面彻底检查才能确定出问题

的确切位置。需要重点关注的是

建筑内部墙壁，特别是与相邻教

室或办公空间的隔墙。为实现充

分隔音，墙壁需要非常厚重，

要有地板和顶棚盖板密封，

还要保留密闭气室和隔音空间。

► 墙壁检查点

- 首先检查墙壁。查找可见缝隙和开口。让人去墙壁另一侧发出噪声，由此确定问题位置。竭尽所能确定墙壁建筑材料。是否为水泥砖墙？一些轻质水泥砖孔隙很多，实际传声能力极强。如果采用木制或金属墙柱和单层石膏板，而没有隔音材料，则会产生很大的穿墙噪声（图 7）。
- 墙壁是否沿地板密封？如果发现声音或气流沿墙底传来，则需要进一步检查以确定地板填缝密封是否完善。可能需要拆下一小部分装饰或踢脚板。检查是否有缝隙，是否从另一侧透光。
- 是否从上方传来很大的声音？检查吊顶上方以确定墙壁是否延伸到屋顶板（图 5）。一般来说，如果房屋采用吊顶，墙壁不需要一直延伸到屋顶板，而应该延伸到上方结构并在此处进行密封。
- 检查墙上开孔的所有位置，例如开关板、电箱以及电话和数据插口等处。通常，这些开孔与墙壁另一侧房间直接连通，会对隔音造成严重影响。
- 查看墙上较大的开口，例如门窗和通风口。沿框架四周检查，以确定墙壁是否密封，框架、门槛或风口处是否紧密贴合。可能需要拆下一些装饰才能找到漏点。

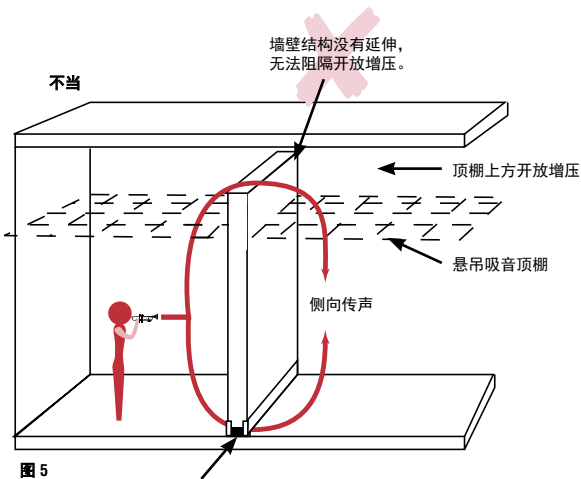


图 5

未在地板处密封，装饰或踢脚板掩盖缝隙。

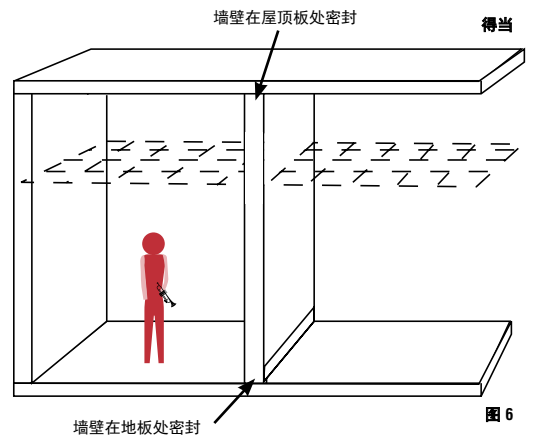


图 6

► 墙壁解决方案

最佳 解决方案

如果墙壁太薄，可以考虑再加一层墙壁，或拆除现有结构，重新建造正确的隔音墙（图 8）。拆墙重建的方法还能解决其他问题，例如可以加装隔音移位电箱和电缆线路。建议咨询声学专家，为重建墙壁制定适当规范。

- 顶棚、地板以及窗框和门框四周密封也很重要，但在施工期间常被忽视。墙体缝隙大的有几英寸，小的只有零点几英寸，一般藏在装饰条后面。大的缝隙可以使用石膏板等密实材料填充，不要只用玻璃纤维填缝。而对于小的缝隙，唯一的解决办法就是硅胶填缝。
- 解决墙壁结构不当问题（图 5）对充分隔音至关重要。需要技术熟练的木匠将墙壁延伸到顶板并正确密封。也可以考虑使用塑料增压隔板。要确保所有工作都符合最新消防和建筑规范。
- 水平移位加隔音纤维的方法就可以解决穿墙电箱和电缆线路漏音问题。再次强调，务必雇用专业人士完成施工。建议电箱移位至少达到两英尺，以确保至少有一根墙柱分离电箱。

墙壁结构不当

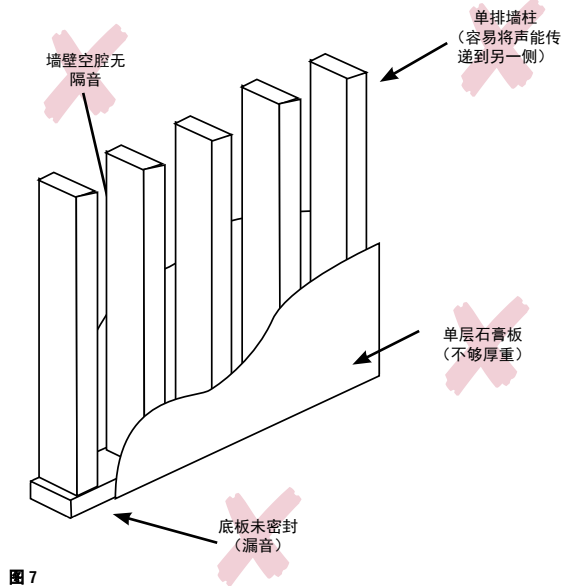


图 7

墙壁结构得当

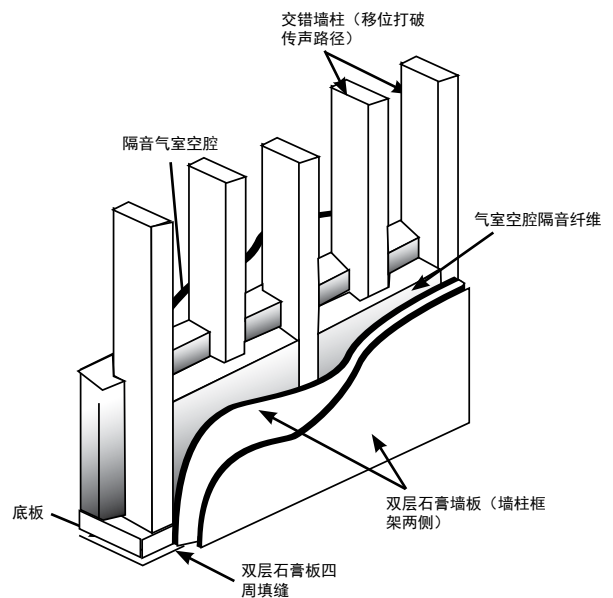


图 8

顶棚和地板

与墙壁一样，顶棚和地板也必

须足够厚重才能隔音。顶板顶棚

通常很薄，或采用波纹钢结构。

如果房间顶棚就是上一层房间

地板，则会大量传导声音。用于

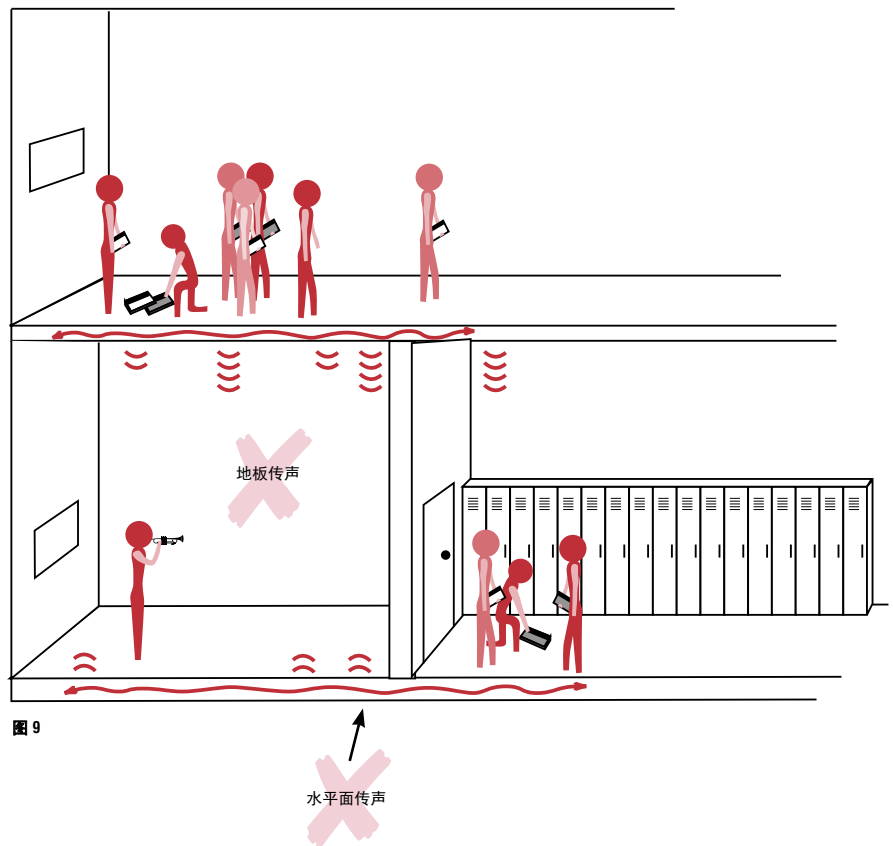
通风、电气和水暖的地板和顶棚

开孔也有可能造成问题，所以细

节一定要处理得当。

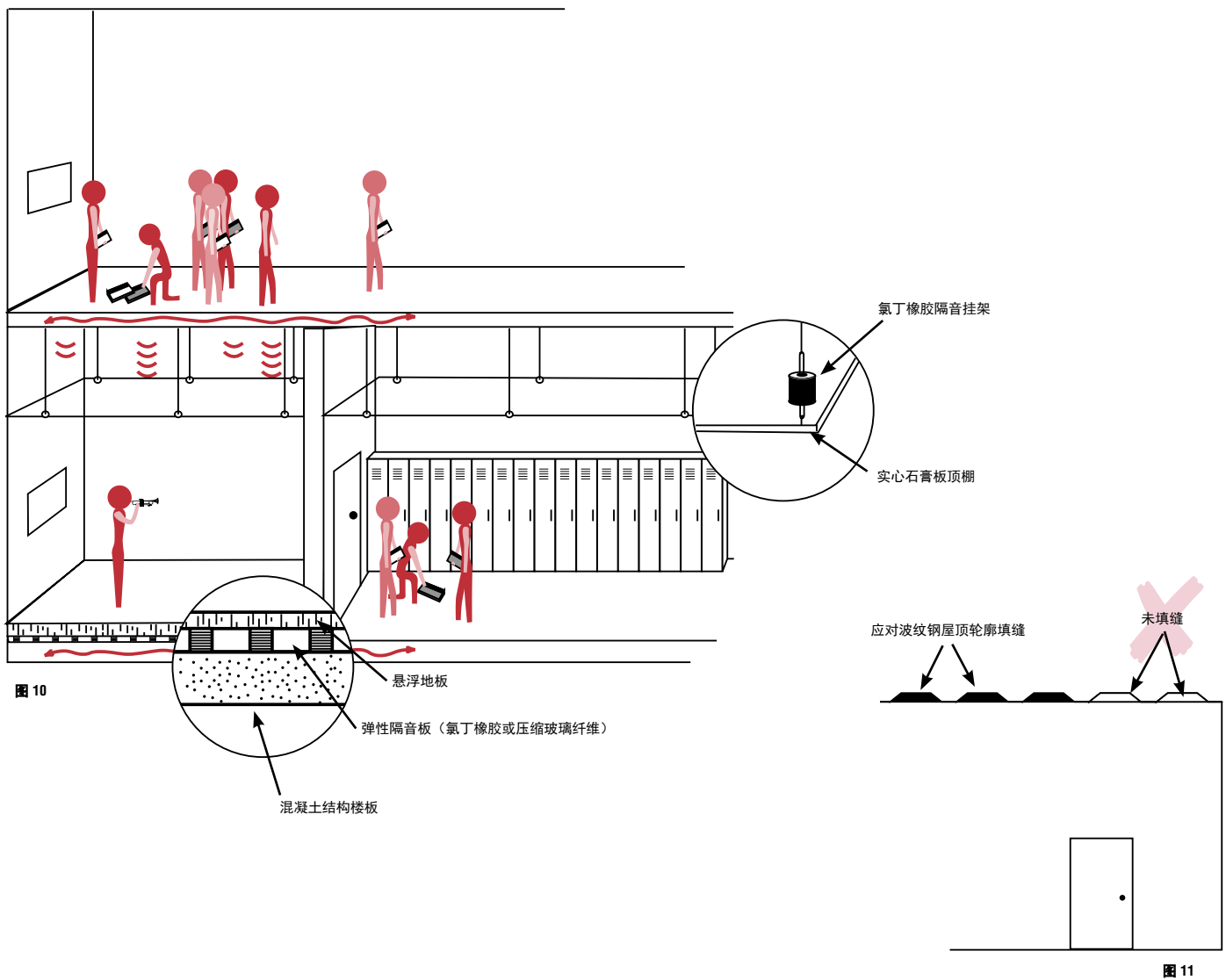
► 顶棚和地板检查点

- 检查顶棚结构。
 - a. 如果采用混凝土结构（图 9），可能会从上一层教室、相邻区域和建筑机械传来噪声，造成隔音问题。
 - b. 如果顶棚就是建筑物屋顶，并采用波纹钢结构，可能不够厚重，不足以隔音。
- 检查地板和顶棚是否有密封不当的墙缝和孔洞。检查电线导管、通风和水暖管道等是否有传声、透光或气流。



► 顶棚和地板解决方案

- 如果怀疑顶棚不够厚重，并且能听到像飞机或火车轰鸣一样的噪音，可以加装用声学挂架支撑的悬吊隔音顶棚（图 10），提高上方隔音性。请声学专家评估具体情况。
- 金属屋顶通常采用波纹钢结构，且无墙壁密封（图 11）。构架是另一个造成隔音问题的典型因素。确保房间公共开口密封正确。
- 如果遇到地板传声问题，可能需要考虑悬浮地板（图 10）。再次强调，这是成本高昂、工序复杂的解决方案，需要咨询声学专家或建筑师意见。
- 要封堵管道、导管和风口等处孔洞，可以采用石膏板或其他厚重的材料，并以声学密封剂填平四周接缝。



音乐室声学需要特别注意

大多数学校教室

都是为授课教育而设计。在声学

上，教室只需支持语言交流即可。

而音乐场所的要求恰恰相反，对教

室来说毫无问题的结构和处理，

如果作为音乐场所则会造成声学

问题。铺地毯并有 9' (2743 mm)

顶棚的正方形房间对英语课毫无

影响，但对音乐教育来说简直就是

灾难。我们经常发现，效果不佳的

音乐室如果不进行大规模重建，

根本达不到完美声学效果，但通常

可以适度改善。本部分重点介绍如

何确定音乐排练空间声学问题的根

本原因，并为相应改善措施提出一

些可行性建议。

排练室内声学问题

与大小、形状和表面有关

“房间太吵，每天耳鸣。”

“房间嗡嗡作响、低音过重。”

“室内很难听清，分辨不出声部，有些部分完全丢失。”

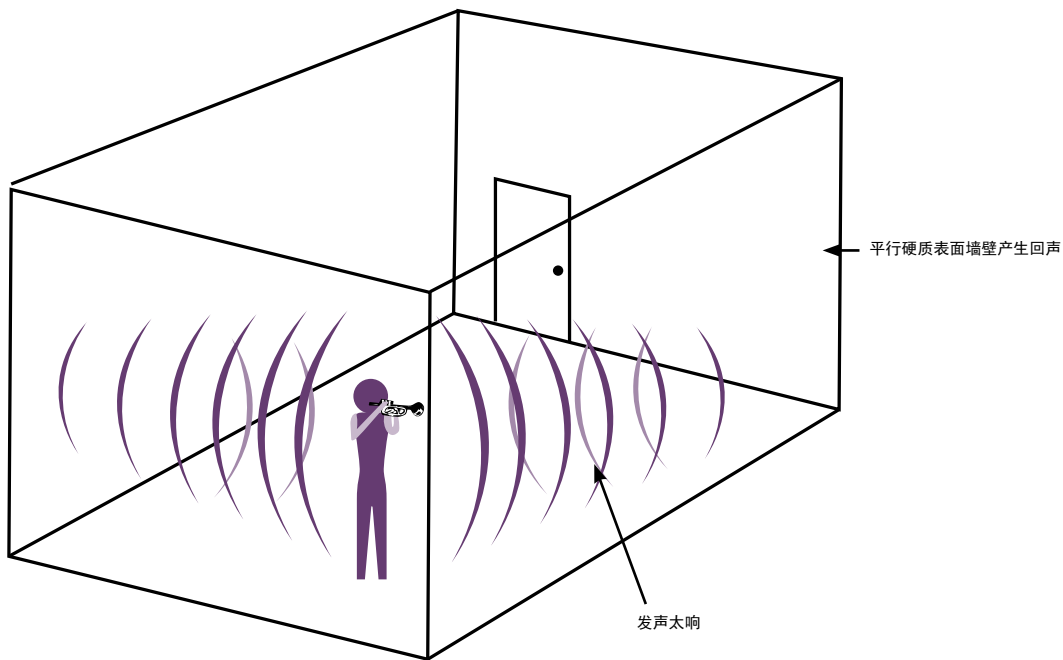
“回声有杂音，一些频段嗡嗡作响。”

“房间吸音太重，反射太少，哑点过多。”

室内声学问题

排练场所大小、形状和表面材料都分别在定义空间声学方面发挥重要作用。如果在室内听到噪声，可能存在多种问题。

- 房间太吵
- 房间嗡嗡作响、低音过重
- 回声、颤动和频率异常现象
- 难以听清：热点、哑点、声音浑浊和混响过大



房间太吵

房间太吵是排练室最常见的问题之一。

通常，这是由于房间太小，立方体积不够大。

室内硬质反射表面也可能导致响度过大。

硬质反射表面也可能导致响度过大。

过大。

应避免使用哪些材料

不使用薄帘、泡沫、地毯或吸音薄板。这些材料不具备大范围音乐吸音所需的物理性质。实际上，一旦采用这些材料，几乎可以确信，所造成的问题比能解决的问题更多。切记，对授课教室有效的解决方案可能对音乐场所无效。

▶ 房间太吵检查点

- 检查房间大小的主要衡量标准是立方体积，即平方英尺面积乘以顶棚高度（图 12）。即使房间看似很大，也要确保并非只是占地面积大，顶棚高度至少要达到 16'。参照 Wenger 经验法则（表 1）进行比较，确保将合奏组规模因素考虑在内。
- 评估室内表面。顶棚、地板和墙壁是否环绕硬质反射表面（图 13）？如果是，响度过大只是可能遇到的诸多问题之一（另请参见第 17 页回声和驻波）。

多大立方体积才够大？
经验法则

房间	班级规模	顶棚高度	典型占地面积	得出房间立方体积
合唱团排练	60-80 个学生	16-20' (4877-6096 mm)	1,800 平方英尺	28,800-36,000 立方英尺
乐队/管弦乐队排练	60-75 个学生	18-22' (5486-6706 mm)	2,500 平方英尺	45,000-55,000 立方英尺

表 1

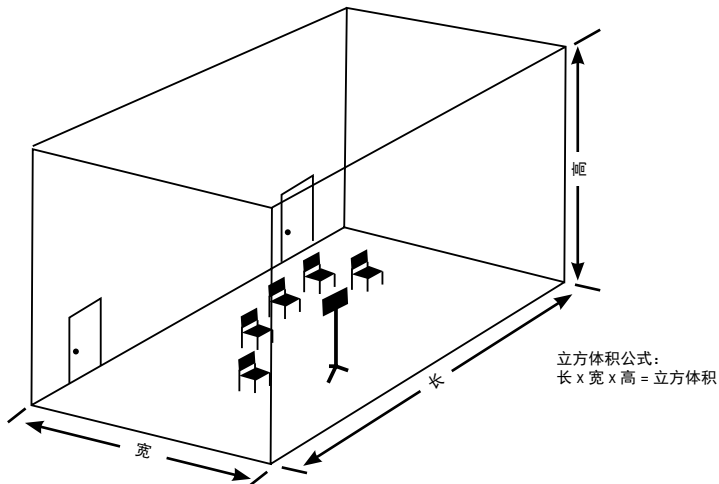


图 12

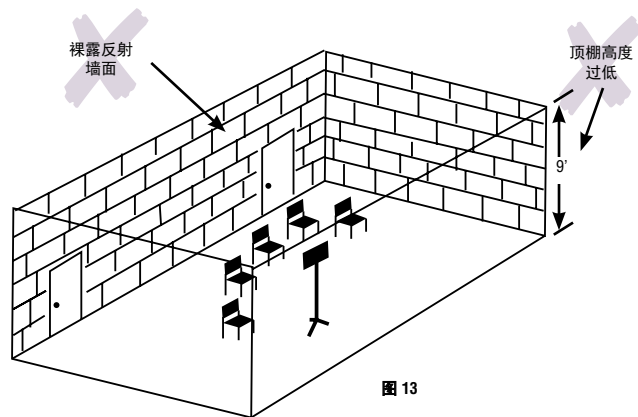


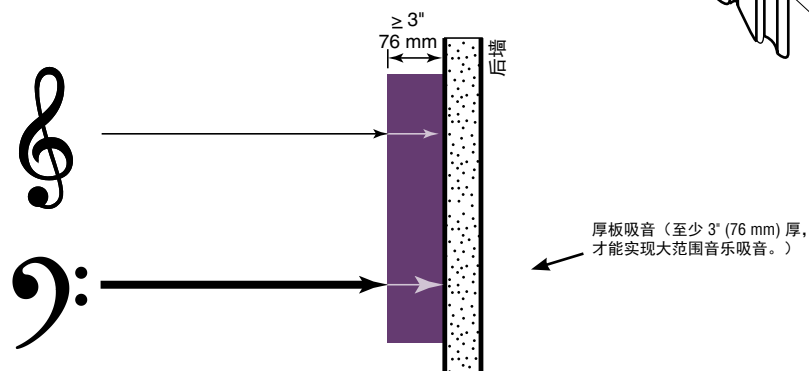
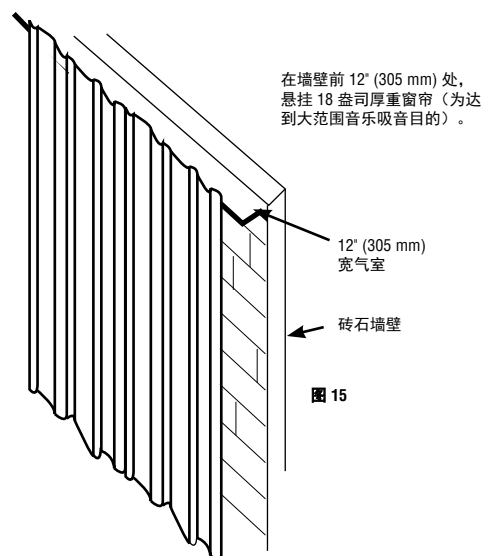
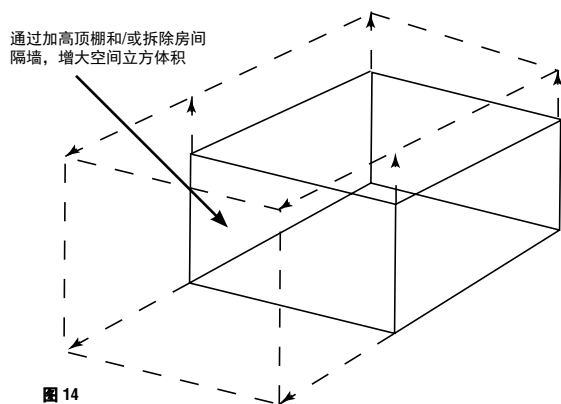
图 13

▶ 房间太吵解决方案

最佳
解决方案

设法增大空间立方体积。有多种解决方式，例如拆除一部分吊顶。如果有封闭台阶，确定是否可以拆除，然后在平地或移动式开放台阶上排练，进而增大房间立方体积。拆除一面墙，增大房间体积（图 14）。无论采取何种方式增大立方体积，都要首先咨询声学专家。如果需要进行结构修改，则需要与建筑师合作协商。

- 如果空间太小，而且无法增大，则会在降低响度方面会受到限制。考虑转移排练位置，迁至设施内其他面积较大的场所。
- 拆除所有无用结构，尽量增大声学空间。挪走柜子、桌子和游行乐队设备等。
- 如果房间周围都是练习室，可以在无人使用时打开房门，增大排练室声学体积。
- 适当安装吸音镶板也可降低室内响度。要对很大频率范围都有效果，厚度至少要达到 3" (76 mm)（图 16）。吸音镶板也可用于处理多种其他声学问题，但是必须与扩散表面结合使用。咨询在声学镶板解决方案领域内具备丰富经验的声学专家或公司。
- 适当安装厚重窗帘也可吸音。在反射墙壁前大约 12" (305 mm) 处，以 100% 覆盖面积悬挂 18 盎司丝绒窗帘。这一集气室对增强窗帘低频吸收效果至关重要（图 15）。
- 如果实在别无他法，还可考虑通过分次排练和减少人数的方式降低声能。



房间嗡嗡作响、低音过重

有时，我们误以为房间太吵，

但其实真正问题在于低频过于

夸张，导致房间嗡嗡作响、低音

过重。这样房间内必定有某些材

料剔除了高频而不影响低频。

通常，这是因为表面处理不当。

简单来说，表面处理材料太薄，

就会吸收笛声和泛音等高频，

但其物理特性决定材料不会吸收

低频中音。因此，房间能吸收

高频，却会加重低频。

▶ 房间嗡嗡作响、低音过重检查点

- 检查房间立方体积，并与 Wenger 经验法则进行比对（第 13 页表 1）。
- 评估室内表面材料。嗡嗡作响通常是因为室内静音材料使用不当，例如墙面铺设挂毯、板条格形泡沫、吸收器镶板太薄、窗帘太薄和采用标准顶棚砖片等。这些都是剔除高频而不影响低频的问题材料。

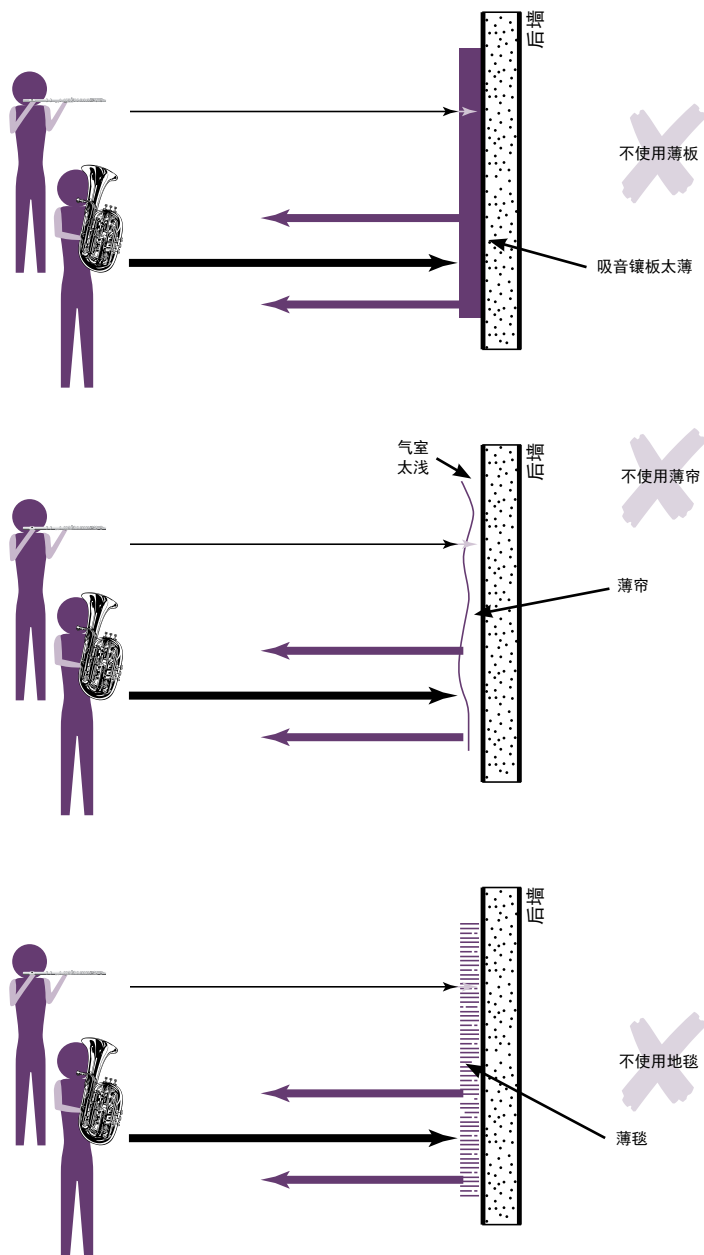


图 17

▶ 房间嗡嗡作响、低音过重问题的解决方案

- 拆掉单薄的窗帘和地毯（特别是墙上），换用在更大频率范围内有效吸音的材料。
- 加装至少 3" (76 mm) 厚吸音镶板。吸音镶板越厚，低频响度衰减越大。这种解决方案可能需要声学专业人士参与。
- 将反射顶棚砖片换为 1" (25 mm) 厚声学吸音（NRC 0.95 级或更高）玻璃纤维镶板（图 19）。切记，这些镶板上方预留空间越大，低频吸收效果越好。

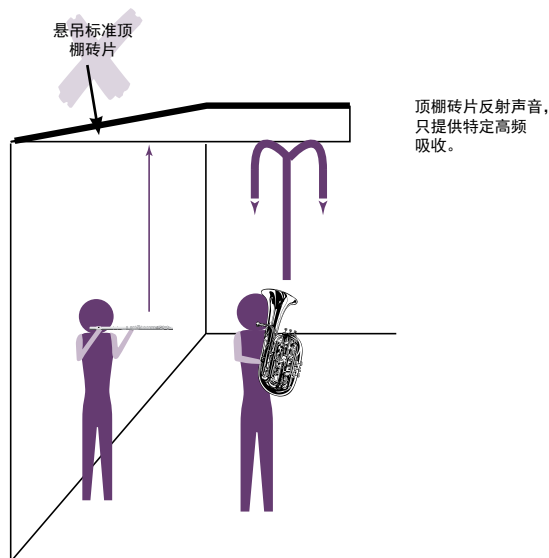


图 18

多孔吊顶可以将低频抑制在气室内，从而在很大频率范围内吸音。

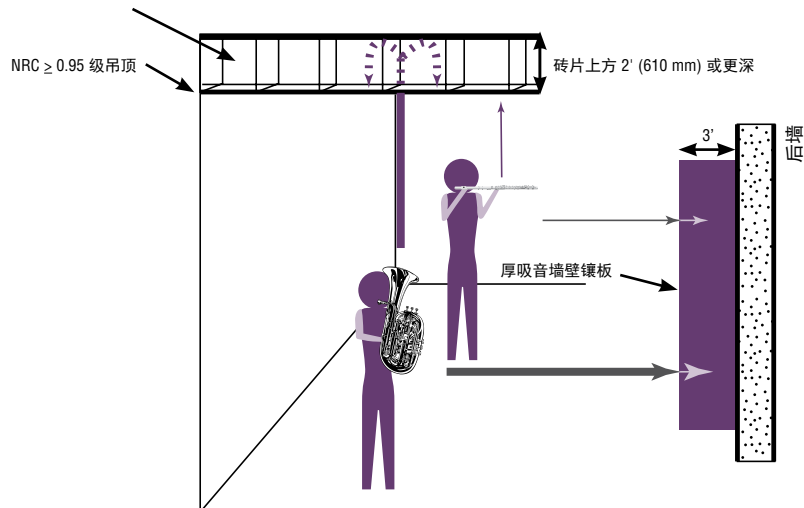


图 19

回声和驻波

房间形状和表面材料因素对多余回声

和驻波等频率异常现象影响作用最大。

未经处理的平行、平面反射表面（例如迎

面而立的砖墙或混凝土墙）通常就是问题

原因所在。切记，对于大多数房间，最大

的两个对立表面都是地板和顶棚。

保留地板未经处理

大多数情况下，实木或瓷砖地板的音乐声效最好。这种地板可为室内每一位音乐家提供快速的早期反射。地毯可以剔除高频反射，只提供特定反射。效果最令人满意的房间，通常房间地板不加处理，只对墙壁和顶棚进行声学处理。

► 回声和驻波检查点

- 检查房间形状。
 - a. 正方形房间回声和驻波问题最严重。
 - b. 长方形房间有较大面积反射墙壁，通常会产生敲击回声和颤动回声。
- 检查室内墙壁和顶棚表面。是否为砖块、混凝土、瓷砖、玻璃或其他平面反射材料？如果是，则需要进行处理。

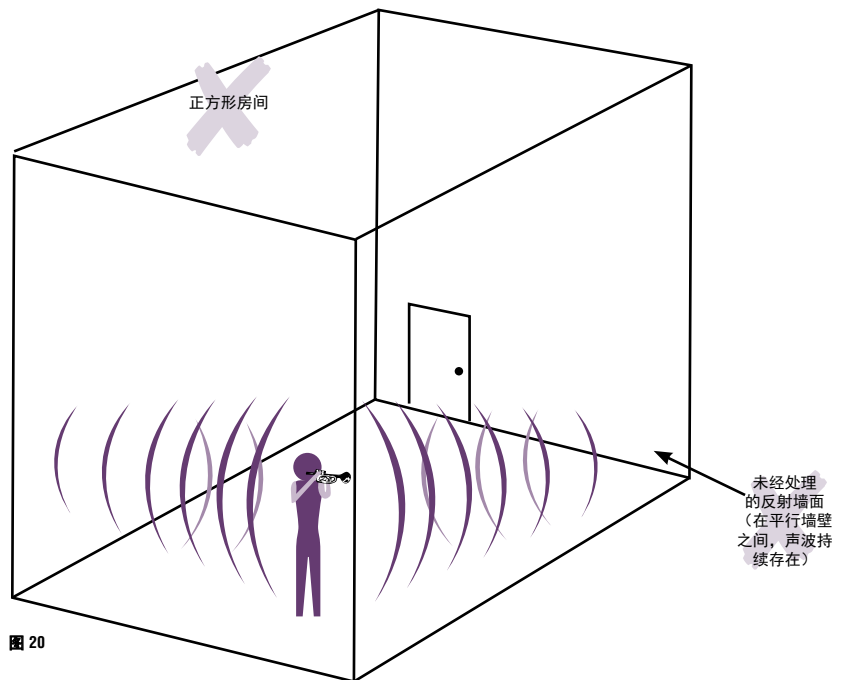


图 20

► 回声和驻波解决方案

- 主要目标是尽量减少室内表面之间的平行反射路径。最好通过扩散与吸收处理结合使用，来实现这一目标。这种处理非常简单，特别适合处理墙壁和顶棚。再次强调，建议咨询排练室声学和处理解决方案领域具备丰富经验的专业人士。
- 如果要处理大面积玻璃表面，可以为窗户加挂厚重的丝绒窗帘。
- 墙壁可以呈八字形或成角度，但要发挥作用，就必须有两个平面，例如锯齿形墙壁也要从地板到顶棚倾斜。需要咨询声学专家。

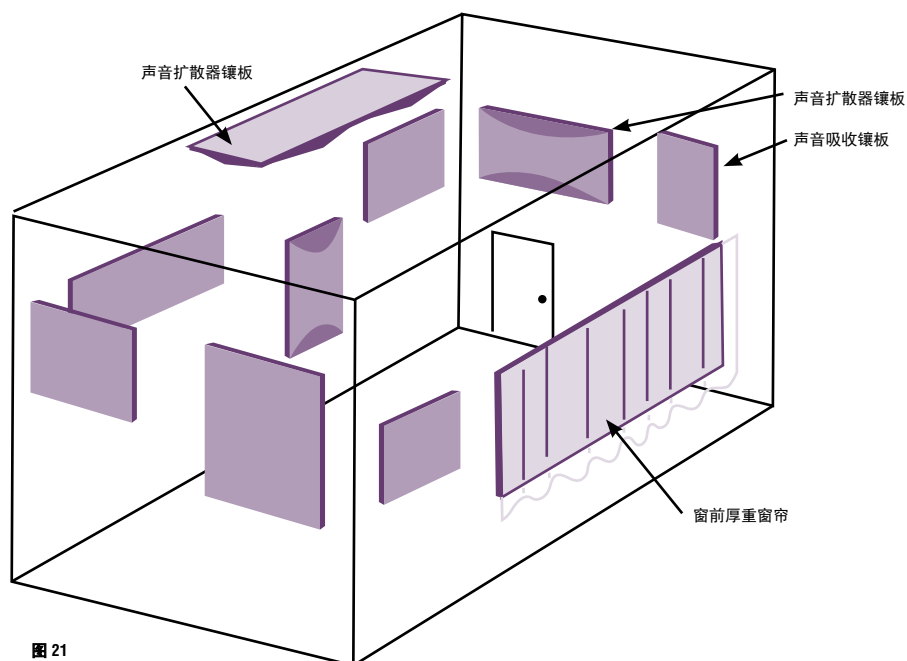
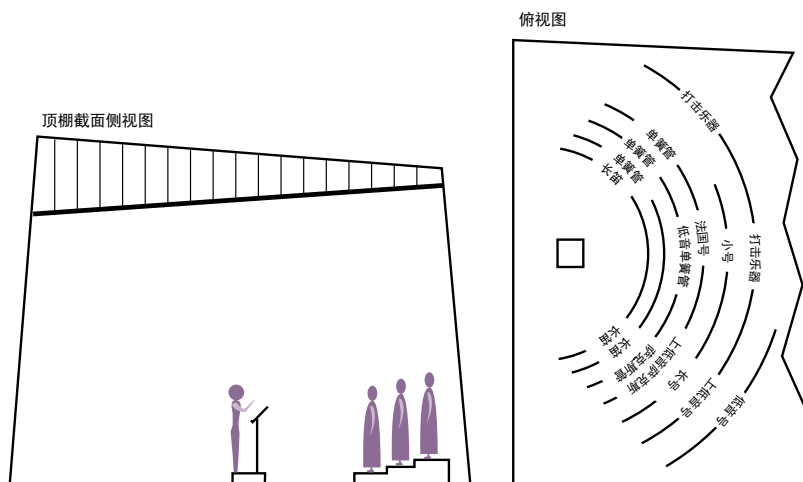


图 21

理想结构采用不平行倾斜墙壁。由于成本高昂且工序复杂繁琐，这种结构通常使人望而生畏。



合奏效果不佳 — 难以听清

可以用“难以听清”来形容的房间通常在房间形状和室内处理方面存在明显的问题。热点、哑点、混响过大、缺乏清晰度或这些问题叠加组合，将使合奏过程变得异常艰难。通过适当混合吸收和扩散两种效应，一般可以解决这些问题。如果室内难以听清的原因是噪声干扰，可以参见“隔音”部分（第 5-10 页）和“机械噪声”部分（第 21-22 页）内容寻找解决方案。

吸收与扩散相辅相成。

有吸收处理，但缺乏适当扩散的情况屡见不鲜。一定要了解，要让音乐空间支持鉴定聆听，吸收性与扩散性必须相互发生作用。虽然适当吸收能够平衡频率动态范围和控制响度，但也必须有扩散才能分散混合音乐声。在音乐排练室领域内具备丰富经验的声学顾问可以提供相关建议，在吸收与扩散之间找到适当的平衡点。

▶ 合奏效果不佳 — 难以听清检查点

- 这些问题通常是诸多可变因素共同作用的结果，难以确定哪些具体根源可以解决。最好能够重点确定哪些声音能在室内听到，哪些不能。确保全面彻底的检查，以对室内各处声学效果间的差异进行评估。
- 务必注意房间形状。凹面顶棚和曲面墙壁会聚集声能，进而产生热点和哑点（图 23）。
- 表面材料会起到关键作用。
 - a. 如果室内有大量地毯、帷幕和/或镶板，会导致吸音过度，进而在室内产生很多哑点。
 - b. 反之，缺乏吸音则会造成室内混响过大。
- 没有反射扩散表面的房间几乎无一例外会导致合奏效果变差。

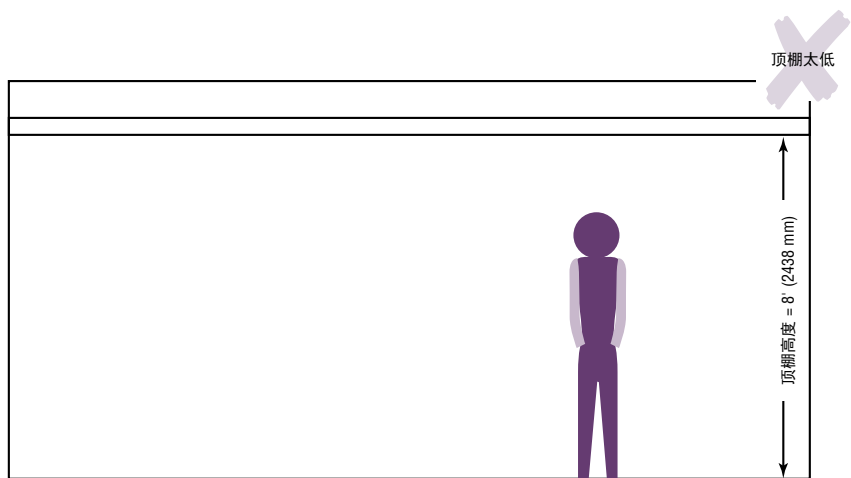


图 22

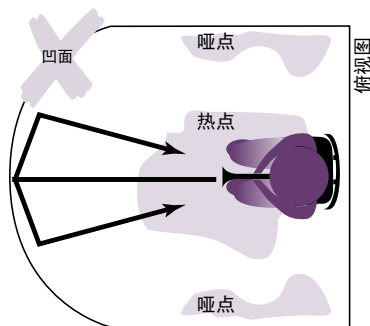


图 23

► 合奏效果不佳 — 难以听清声音的解决方案

最佳 解决方案

咨询排练室声学领域经验丰富的声学顾问来评估房间效果。解决方案应当平衡墙壁和顶棚的吸收和扩散效应（图 24）。务必使用对很大频率范围都有效的适当材料。

- 如果结构顶板距离地面高度不足 10' (3048 mm)（图 22），则需要着手寻找新房间。如此低的顶棚无法实现适当扩散，达不到理想合奏效果。
- 声学顾问有可能要修正一些不恰当的室内处理，请做好准备。例如，如果墙面铺设挂毯，可能需要拆掉。现有悬吊顶棚镶板也可能需要改动。
- 对合奏效果产生影响的另一大因素是混响时间，它可以为音乐空间带来良好的临场感。要为音乐家提供临场感，空间必须足够大，让主声和返回耳中的反射之间产生足够的延迟，以便人耳处理声音信息。对于这种空间，音乐家常用“能在室内远处听到声音”来形容。有关既有利于音乐演出又不造成过大声音混淆的空间参数，请参见表 2，查阅 Wenger 混响时间准则。咨询经过培训的声学专业人士，有助于评估音乐场所的混响。
- 确保按照声学顾问的特定指示进行适当处理。

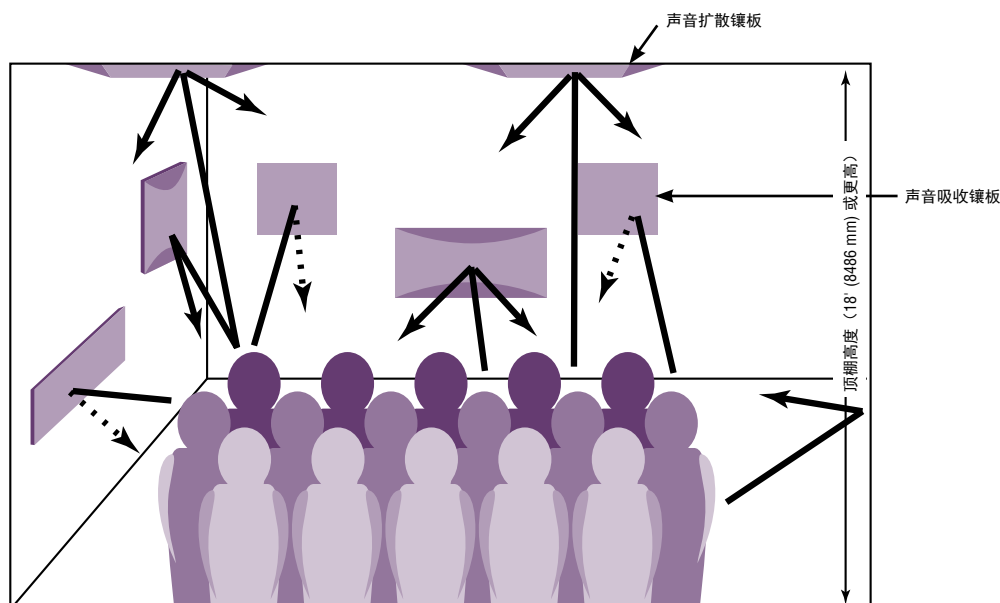


图 24

建议混响时间	
房间	混响时间
合唱团排练	最长 1.3 秒
乐队/管弦乐队排练	0.8 - 1.0 秒

表 2

机械噪声

很多种建筑系统和设备都会为室

内环境带来多余噪声。最严重的

是暖通空调 (HVAC) 系统。

但在音乐室内，照明系统和室内

电器，甚至饮水喷头压缩机都能

产生噪音。它们不仅对音乐声造

成干扰，而且还会掩蔽某些音乐

频率，使听众很难或根本无法听

到某些声音。经过适当的隔音

处理，通常可以降低或消除多余

的机械噪声。

机械噪声问题

“室内通风口的嘶嘶声产生白噪声，让我很难听清音乐的细微之处。”

“大楼空调机组就在音乐室楼上。”

“通风管道传递供暖系统噪声，从锅炉房发出的刺耳噪音和杂音听得特别清楚，就像从隔壁传来的一样。”

▶ 机械噪声检查要点

- 是否听到出风口嘶嘶作响？这通常是由于开口过小和/或格栅晒网（例如冲孔金属网）过密，限制了空气流动（图 27）。
- 如果 HVAC 系统机房与音乐室太近甚至相邻，可能受到压缩机噪声和振动干扰。找到设备所在位置，例如屋顶、室外地面或地下室等处。如果设备隔音不当，就会直接通过建筑结构低频传声（图 25）。
- 注意听通风口是否有声音。如果 HVAC 设备距离较远，但仍能听到压缩机噪声和刺耳的杂音，则说明通风管道向室内传递噪声。如果通过通风口能听到相邻房间的声音，同样说明管道传递噪声。
- 通常，轴承和皮带磨损、欠缺润滑，甚至配风系统不平衡，都能产生噪声。确保定期维护 HVAC 设备。
- 电灯是否有杂音？变压器和老式（机电）荧光灯镇流器会产生一种掩蔽音乐声的非常特别的蜂鸣噪声。确保镇流器达到低噪声输出等级。

► 机械噪声解决方案

- 切记，与同等大小普通教室相比，音乐室需要将近两倍的换气率，因为演奏音乐非常消耗体能。因此，通风口要大，要有敞开式格栅（图 28）。与建筑工程师合作，共同解决通风口过小和格栅筛网过密问题。
- 如果 HVAC 系统机房与音乐室距离过近，最好的解决方法是将机房迁至别处。如果不可行，则需要联系声学专业人士，确定安装何种隔音装置能够解决问题。通常，弹簧和氯丁橡胶隔音装置可使设备“脱离”周围结构（图 26）。
- 使用吸音内衬和挡板（称为“消音器”），可使传声管道静音。这方面同样需要声学专业人士和建筑工程师的帮助。
- 尖锐刺耳的噪音和杂音通常表示 HVAC 系统需要维护。可以询问建筑工程师，是否能通过润滑、换新轴承和皮带或其他相关处理方式实现系统静音。
- 消除电灯变压器和镇流器噪声非常容易，而且有助节能。噪音等级为“A”的电子镇流器静音效果更好，且能耗更低。与建筑工程师合作，更新照明系统。

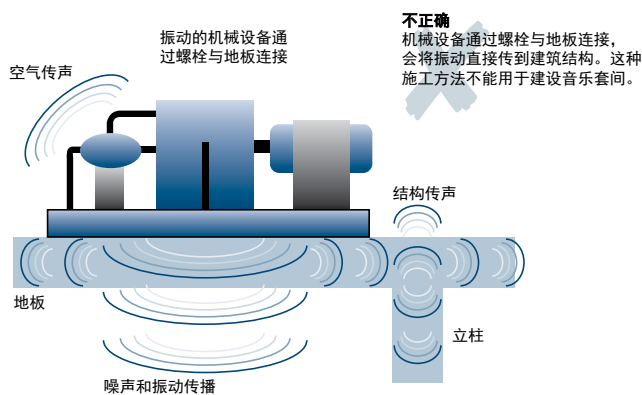


图 25

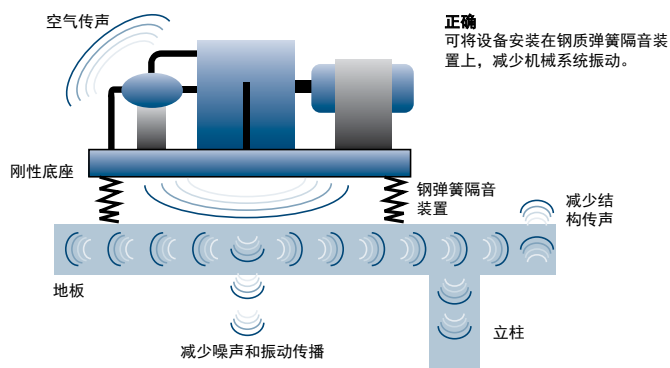


图 26

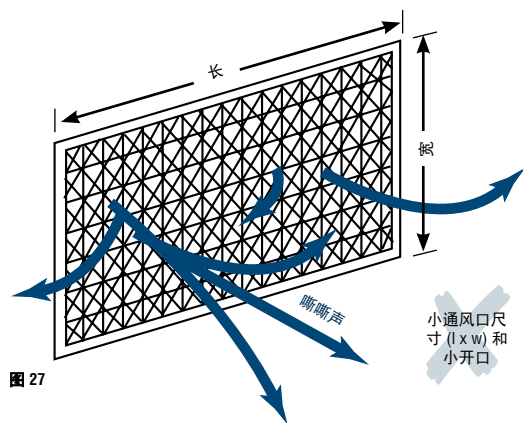


图 27

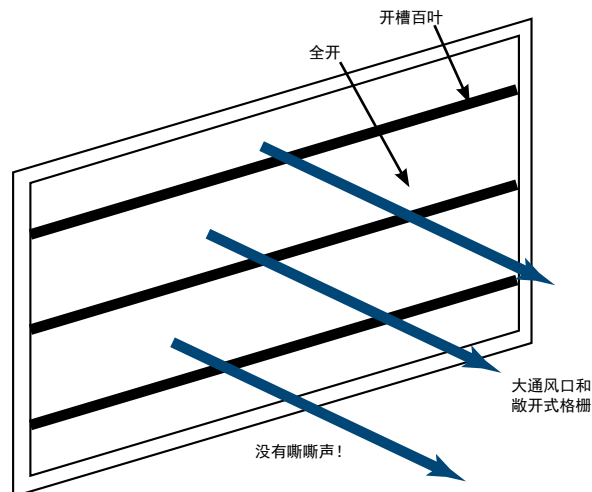


图 28

练习室范式

与大型排练室一样，效果良好的练习室必须隔音，而且必须提供支持音乐的室内声学设计。遗憾的是，练习室是效果最差的音乐空间之一，因为它违背优质声学设计的首要原则：立方体积太小，不能充分消散内部产生的声能。效果最好的练习室应有大量吸音设计，能在很大频率范围内实现室内声音的均衡。而大量吸音会不可避免地导致房间声学非常枯燥。虽然枯燥空间适合练习音乐基本技术手法，但在声学方面，音乐家的理想演出环境却与此恰恰相反。

主动声学技术

主动声学利用电子计算机技术和数字信号处理，对环境进行声学处理。这一尖端技术主要用于打造虚拟声学空间，在世界各地迅速得到广泛采用，只需一按即可将效果不佳的音乐环境变为极佳环境。在音乐练习室内，主动声学已经改变实践范式，现在即使在衣帽间大小的练习室内，也可重建世界级音乐厅一般的声学支持环境。主动声学也可用于处理大型排练室，这种方法不仅能提供多种多样的声学选择，而且无需翻新或建造即可解决多种声学问题。

练习室声学问题

“因为不隔音，练习室常年弃用，一间练习室用来存放糖果，其他练习室则用来存放游行乐队设备。”

“我们有好几间相连的练习室，但两个使用房间中间总需要留出一间空闲，只有这样才能控制声音。”

“我们对加厚门板和隔音墙投入了大量资金，但从乐队排练室仍可清清楚楚地听到练习室声音。”

▶ 练习室问题检查要点

- 建议咨询声学专业人士帮您评估练习室。
- 评估隔音。练习室是否有声音泄漏？让人在室内演奏乐器，如有可能则确定出现问题的位置，密切注意门窗、电箱、通风管道和墙壁。大多数建筑内练习室通常都有多处问题，可能很难彻底查清。请参阅第 3-10 页，其中所述各项规则适用于检查门上垫圈、墙壁结构和密封顶棚等多个项目。
- 评估室内声学效果。房间是否有任何吸音处理？如果没有，练习室内的硬质反射表面会使此类小型场所的声学性质更加复杂。因为练习室立方体积非常有限，通常会导致多种声学问题叠加。最常见的是练习室太吵，低音频率过重。还有可能发现，听众难以听清所预期的所有音质。其中一部分原因是，反射回声太快，耳朵来不及分辨声音的关键组成部分。
- 评估 HVAC 和电气系统噪声。注意其他可能的问题，例如通风管道噪声、HVAC 系统，或电灯镇流器杂音。请参阅第 21-22 页内容，其中更全面的说明了诊断和解决多余机械噪声的相关问题。

▶ 练习室解决方案

最佳 解决方案

练习室需要隔音，但确保良好隔音所需结构形式非常复杂且成本高昂。为确保练习室正常发挥作用，最好换用预制模块化解决方案（图 29）。在隔音门和结构方面投入时间和资金的情况屡见不鲜，切莫因为忽视小细节（例如穿墙电箱），致使工程达不到理想效果。鉴于此，将预制解决方案的隔音保证与位置调整功能结合应用，方能确保投资项目物有所值、经久可靠。

- 您可以通过向声学专业人士咨询，提高建筑内练习室的隔音质量。通常，这要采用很多与上文第 3-10 页所述相同的措施。墙壁需要采用隔音技术施工建造（第 8 页图 8），并且地板和顶棚处要进行适当密封（第 7 页图 6）。门窗需要正确施工建造并加垫圈（第 6 页图 3 和图 4）。
- 如果在通风管道内加装吸音内衬，并通过主管道分别对各房间实行中央送风（图 31），那么管道本身就能提供最佳隔音效果。
- 如果恰好练习室隔音效果良好，那么改善室内声学的最佳方法就是加装大量厚实的吸音材料。练习室经验法则为，用 3" (76 mm) 厚纤维吸音材料覆盖超过 30% 的房间表面积。这会产生在声学上比较枯燥的空间，但至少可实现很大频率范围的均衡吸音。
- 主动声学处理（图 30）是解决练习室声学问题的另一途径，也为音乐家提供一键变换的虚拟音乐环境。这种解决方案以数字信号处理和计算机模型为基础，为声学空间提供音乐支持。为使这种处理发挥作用，房间首先需要大量应用吸音材料。

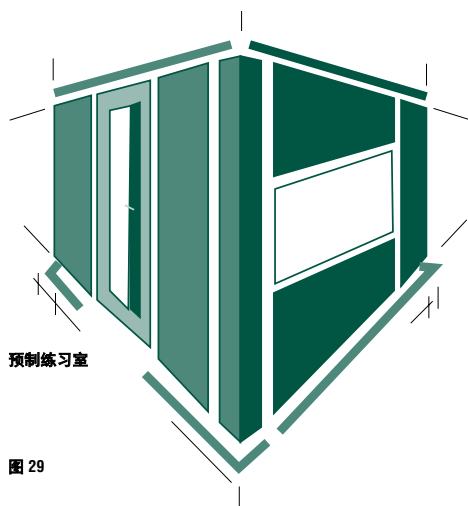


图 29

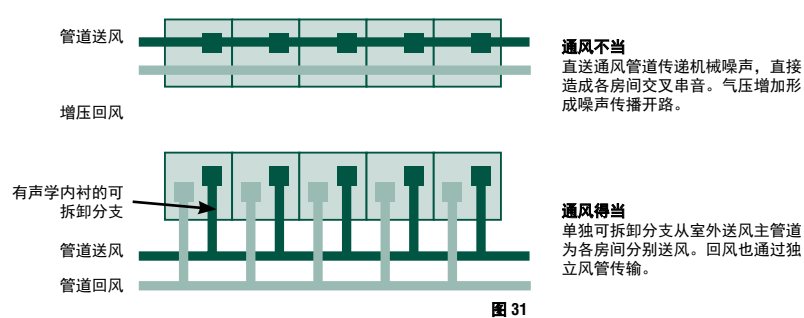
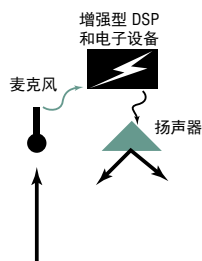


图 31



主动声学
以墙壁和顶棚吸音板为基础，主动声学使用扬声器、麦克风和数字信号处理 (DSP) 模拟练习和演出声学环境。

图 30

其他声学术语

主动声学：

又称电子架构或“虚拟声学”。使用电子设备（例如麦克风、扬声器和数字信号处理器）增强空间自然声学效果。良好的主动声学效果还要倚仗正确的室内被动声学处理。

回声：

在听到声源发出的直达声后，物质表面又将声波反射到听众耳中，此时即产生回声。例如，在舞台上吹号，礼堂后墙反射会产生分散回声。虽然吸收器和扩散器均有助于消除这种回声，但一般首选扩散器，因为它能保留更多声能。

颤动回声：

在声源位于平行的声音反射表面之间时，就会产生颤动回声。效果是长时间的嘈杂声音。例如，在未经处理的室内，敲击小军鼓边缘就会产生明显的颤动回声。

掩蔽：

在多余的噪音与音乐家分辨相似或更高音乐声的能力发生冲突或对其造成妨碍时，即产生掩蔽。例如，供气管道送风发出的“嘶嘶”声噪音，便可掩蔽乐声。

NC：

噪声标准：表示背景噪声等级的单个量化数字。NC 越低，空间越安静。

被动声学：

这一术语是指，使用架构（非电子）设计，并对物质表面进行声学处理，以打造声学空间。被动声学主要分为吸收方式和扩散方式，例如几何形状的墙壁和顶棚及其声学镶板等元素就属于被动声学范畴。

反射：

声的硬质表面反射类似于光的镜面反射。例如，如果没有声学罩和舞台上镶板等反射表面，声能可能在达到观众位置之前便已消散或被吸收。

传声路径：

空气传播：声音通过空气传播，遇到屏障后传到另一侧。

STC：

传声等级：单个数字评级系统，描述结构元素（即墙壁和门窗等）隔音程度。通常，STC 等级最能代表结构对语音的隔音能力。STC 数越大（实验室测量），结构元素隔音效果越好。

结构/侧向传声：

通过与声源直接接触传声，例如与室内风管连接的空气压缩机与地板接触的钢琴支脚。

NIC：

隔音等级：与 STC 类似，但考虑房间周围结构所有组成部分。
NIC 越高，房间隔音效果越好。

NRC：

降噪系数：单个数字，描述 250Hz、500Hz、1kHz 和 2kHz 倍频带平均吸收量（以完美吸收百分比为测量单位）。用于语音范围时，它可比较准确地估计吸收，但在用于音乐应用时价值有限，因为忽略 176Hz 以下和 2825Hz 以上频率。

参考文献

《Architectural Acoustics》，作者：M. David Egan；1988年，出版社：McGraw-Hill；ISBN: 0-07-019111-5

《Architectural Acoustics》，作者：M. David Egan；2007年，出版社：J. Ross Publishing；ISBN: 13: 978-1932159783

《Architectural Acoustics:

Principles and Practice》；编辑：William J. Cavanaugh 和 Joseph A. Wilkes；1999年，出版社：John Wiley & Sons, Inc.；ISBN: 0-471-30682-7

《Acoustics》，作者：Charles M. Salter Associates, Inc.；1998年，出版社：William Stout Publishers；ISBN: 0-9651144-6-5

Wenger 《中学音乐设施规划指南》

其他读物

《Architectural Acoustics:

Principles and Design》，作者：Madan Mehta、James Johnson 和 Jorge Rocafort；1999年，出版社：Prentice-Hall, Inc.；ISBN: 0-13-793795-4

《Acoustics and Noise Control Handbook for Architects and Builders》，

作者：Leland K. Irvine 和 Roy L. Richards；1998年，出版社：Krieger Publishing Company；ISBN: 0-89464-922-1

《Auditorium Acoustics and Architectural Design》，作者：Michael Barron；1993年，出版社：E & FN Spon；ISBN: 0-442-31623-2

《Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture》（第二版），作者：Leo Beranek；2004年，出版社：Springer-Verlag；ISBN: 0-387-95524-0

《Sound System Engineering》（第二版），作者：Don Davis 和 Carolyn Davis；1992年，出版社：Howard Sams & Co.；ISBN: 0-672-21857-7

《Music and Concert Hall Acoustics》，编辑：Yoichi Ando 和 Dennis Noson；1997年，出版社：Academic Press Limited；ISBN: 0-12-059555-9

《Architectural Acoustics》，作者：Marshall Long；2006年，出版社：Elsevier Academic Press；ISBN 10: 0-12-455551-9

《The Acoustics of Performance Halls》，作者：J. Christopher Jaffe；2010年，出版社：W.W. Norton Company, Inc.；ISBN: 978-0-393-73255-9

《Deaf Architects & Blind Acousticians?

A Guide to the Principles of Sound Design》，作者：Robert E. Apfel；1998年，出版社：Apple Enterprises Press；ISBN: 0-9663331-0-1

查找声学顾问和专业人士

联系： 美国全国声学顾问委员会 (NCAC)
9100 Purdue Road, Suite 200
Indianapolis, IN 46268
(317) 328-0642 传真: (317) 328-4629
网站: www.ncac.com

联系： Wenger Corporation
555 Park Drive
P.O. Box 448
Owatonna, MN 55060-0448
1-800-733-0393 传真: (507) 455-4258
网站: www.wengercorp.com

其他 WENGER 教育和演出指南

中学音乐设施规划指南

音乐设施规划指南

小学规划指南

声学入门

排练空间声学问题及其解决方案

演出空间规划指南



© 2018 Wenger Corporation
USA/2-18/200/WLT0153D



WENGER CORPORATION 电话 800.4WENGER (493-6437) 全球 +1.507.455.4100 | 部件与服务 800.887.7145 | 加拿大办事处 800.268.0148 | wengercorp.com
555 Park Drive, PO Box 448 | Owatonna | MN 55060-0448

JR CLANCY 电话 800.836.1885 全球 +1.315.451.3440 | jrclancy.com | 7041 Interstate Island Road | Syracuse | NY 13209-9713

GEARBOSS 电话 800.493.6437 | 电子邮件 gearboss@wengercorp.com | gearboss.com | 555 Park Drive, PO Box 448 | Owatonna | MN 55060-0448