

WHITEPAPER · WP-001

別墅家庭影院声学白皮书

Villa Home Theater Acoustics White Paper

声学设计、施工与验收的工程化标准

出品 东莞市五点智能工程有限公司

品牌 五点智能影音 · WUDIAN

版本 V1.0

发布 2025 年

文档编号：WP-001 版本：v1.0 发布机构：五点智能影音 · 东莞市五点智能工程有限公司 发布日期：2025 年 4 月 适用范围：200 m² 以下别墅私人家庭影院声学设计与施工

本白皮书内容综合参考以下权威标准与文献：· CEDIA ANSI/CTA-2030-B 《Residential Systems Integration Design & Verification》 (2022) · CEDIA STD-003 《Acoustic Treatment & Room Design Guidelines》 (2022) · ITU-R BS.1116-3 《Methods for the Subjective Assessment of Small Impairments in Audio Systems》 (2015) · IEC 60268-21 《Sound System Equipment – Loudspeakers》 · Dolby Atmos Home Theater Design Guidelines v4.x · 清华大学建筑声学研究所《住宅室内声场评价研究》 · GB 50371-2006《厅堂扩声系统工程技术规范》

概述

家庭影院的终极体验，取决于声学设计质量，而非设备价格。一间经过精确声学处理的 25 m² 影音室，其沉浸感可以全面超越一间摆满百万级器材却未经声学处理的 50 m² 大厅。

本白皮书从物理声学原理出发，系统阐述别墅家庭影院在房间选址、比例设计、声学材料、低频控制、扩散处理五个层面的工程方法，并给出可量化的验收指标。所有参数均经过五点智能影音团队在东莞虎门 1300 m² 展厅及多个真实别墅项目中实测验证。

第一章 声学基础原理

1.1 声音在房间中的行为

声音在密闭空间内产生三种基本行为：

直达声 (Direct Sound) 从扬声器到听音位的第一路径声波，携带最完整的频率信息，是音色判断的基准。直达声到达时间越短、路径越纯净，音色还原越准确。

早期反射声 (Early Reflections) 直达声到达后 5~80 ms 内到达听音位的一次反射声，主要来自侧墙、天花板和地面。早期反射对声像宽度和空间感贡献最大，但过强的早期反射会模糊声像定位，导致“糊感”。

参考标准：ITU-R BS.1116-3 规定监听室侧墙早期反射衰减量应 ≥ 10 dB。

混响声 (Reverberation) 多次反射叠加形成的扩散声场，是房间“声音特征”的主要来源。混响时间 (RT60) 是描述混响的核心参数，定义为声压级衰减 60 dB 所需时间。

1.2 房间模式 (驻波)

低频声波在房间中形成驻波（Standing Waves / Room Modes），是家庭影院声学问题中最顽固的挑战。驻波在特定频率形成极端的声压极大值（加强）和极小值（抵消），导致：

- 听音位移动几十厘米，低音量感天壤之别
- 某些低频段极度加强（"轰声"、"嗡嗡声"）
- 某些低频段完全消失（"低音空洞"）

房间模式频率计算公式（Axial Mode）：

$$f = 344 \times n / (2 \times L)$$

其中：

- f = 模式频率（Hz）
- 344 = 声速（m/s，20° C 室温）
- n = 模式阶数（1, 2, 3...）
- L = 房间对应维度的长度（m）

示例：长度 7.5 m 的房间，一阶轴向模式频率 = $344 / (2 \times 7.5) = 22.9$ Hz，二阶 = 45.9 Hz，三阶 = 68.9 Hz

1.3 混响时间（RT60）目标值

根据 CEDIA STD-003 及 ITU-R BS.1116-3 的推荐，家庭影院不同应用场景的 RT60 目标值如下：

应用场景	500 Hz RT60 目标	备注
专业监听室	0.15 ~ 0.25 s	ITU-R BS.1116-3 规定
家庭影院参考级	0.20 ~ 0.35 s	CEDIA STD-003 推荐
家庭影院舒适级	0.30 ~ 0.50 s	大多数项目目标
家庭 KTV	0.40 ~ 0.60 s	保留适度混响增加歌唱感
客厅兼用	0.50 ~ 0.80 s	不过度压抑

重要原则：RT60 应在 250 Hz ~ 4 kHz 范围内保持基本平坦，低频（63 Hz、125 Hz）可略高于中频，但差值不应超过 0.15 s，否则低频"拖尾"会掩盖中高频细节。

第二章 房间选址与空间比例

2.1 选址原则

别墅影音室的选址直接决定项目的声学上限，建议优先级排序如下：

优先选择：

- 地下室（与外部振动隔离最佳，地面可做浮筑隔振）

- 一楼独立房间（结构传声路径短）
- 顶楼（上方无邻居楼板振动）

慎重选择：

- 楼中楼中间层（楼上楼下楼板振动双向干扰）
- 与卫生间共用隔墙（管道水声传递）
- 靠近空调主机或电梯井

应避免：

- 不规则多边形房间（声学处理复杂度几何级增加）
- 有圆形或弧形墙面的空间（聚焦反射，极难处理）
- 层高低于 2.6 m 的房间（低频处理空间严重不足）

2.2 最优房间比例

房间比例对驻波分布有决定性影响。以下三组比例被声学研究证明模式分布最均匀：

比例名称	高:宽:长	来源
EBU 比例	1 : 1.25 : 1.60	欧洲广播联盟推荐
LEDE 比例	1 : 1.28 : 1.54	Live-End Dead-End 设计
ITU 监听室比例	1 : 1.46 : 2.53	ITU-R BS.1116-3 推荐
五点推荐（别墅常见）	1 : 1.3 : 1.7	适合 3 m 层高别墅

实用转换（以 3.0 m 层高为基准）：

层高	推荐宽度	推荐长度	面积参考
3.0 m	3.9 m	5.1 m	约 20 m²
3.0 m	4.5 m	5.9 m	约 27 m²
3.2 m	4.8 m	6.4 m	约 31 m²
3.5 m	5.0 m	7.0 m	约 35 m²

五点影音工程经验：东莞、佛山、广州等华南别墅项目的层高多为 3.0 ~ 3.5 m，建议选择 25 ~ 35 m² 的房间。面积过大（>50 m²）在有限预算内很难达到满意的声学效果；面积过小（<15 m²）驻波模式密度不足，低频处理困难。

2.3 避免正方形比例

任何二维尺寸相同或成整数倍的房间，都会导致多阶驻波在同一频率叠加，产生极度严重的声染色。

绝对禁止：

- 正方形房间（长 = 宽）

- 正方形截面（宽 = 高）
- 任意两维之比为简单整数（如 3:6, 4:8）

第三章 隔声设计与施工

3.1 为什么隔声是第一优先级

很多业主按顺序理解：先买设备 → 再装修 → 最后加隔音棉。这是错误的。正确顺序是：隔声 → 声学处理 → 设备安装 → 校准。

隔声不足的影院有两个致命问题：

1. 低频泄漏干扰家人（别墅内其他房间均可听到影院低音）
2. 外部环境噪声渗入影院，破坏深夜安静场景的动态范围

3.2 隔声量（STC / Rw）指标要求

应用场景	建议隔声量	对应的夜间使用条件
基础家庭影院	STC 45 ~ 50	邻房可以正常睡眠
高性能家庭影院	STC 55 ~ 60	邻房完全听不到声音
家庭 KTV	STC 60 ~ 65	别墅外听不到声音
专业录音级	STC 70+	极端要求，成本极高

注：STC (Sound Transmission Class) 为美国标准，Rw (Weighted Sound Reduction Index) 为 ISO 标准，数值相近可相互参照。

3.3 声学双层墙施工规范

实现 STC 55+ 的标准别墅影院隔墙做法：

外层（原建筑墙体，通常为砖墙或混凝土）：不做处理，作为第一道屏障。

内层（新建轻钢龙骨隔墙）：

1. 75 mm 轻钢龙骨，不与原墙体直接接触（留 50 mm 空气层）
2. 龙骨底部垫 10 mm 橡胶减振垫（阻断固体传声）
3. 两侧各贴一层 15 mm 石膏板（双层更佳：两层 15 mm 错缝贴合）
4. 龙骨空腔内填充 75 mm 玻璃棉（容重 $\geq 48 \text{ kg/m}^3$ ）
5. 石膏板接缝处注声学密封胶（禁止任何缝隙）

门缝处理（最薄弱环节）：

- 使用声学门（STC ≥ 45 ），重量通常 $\geq 80 \text{ kg/m}^2$

- 门框四周贴海绵密封条
- 门底安装自动下降密封条 (door drop seal)
- 预算充足时建议做声闸 (声学缓冲间)

管线贯穿处理 (容易被忽略) :

- 所有穿墙管线 (电线管、空调管道) 穿孔处必须用矿棉 + 声学密封胶填堵
- 禁止强电弱电同一套管穿墙 (产生感应噪声)

3.4 浮筑楼板 (地面隔振)

别墅地下室影院或存在楼板撞击声问题时, 需要做浮筑楼板:

1. 原地面清洁找平
2. 铺设 25 mm 橡胶隔振垫 (动态刚度 $\leq 10 \text{ MN/m}^3$)
3. 铺设 0.2 mm 防潮膜 (防止混凝土水汽上渗)
4. 浇筑 100 mm 混凝土面层 (配筋, 不与四周墙体接触, 留 20 mm 缝隙)
5. 缝隙内填弹性密封胶

浮筑楼板可降低楼板撞击声 20 ~ 30 dB, 是彻底解决低频振动传递的唯一可靠方案。

第四章 声学材料与处理方案

4.1 三类声学材料的原理

吸声材料 (Absorber) 将声能转化为热能, 降低混响。代表材料: 玻璃棉、岩棉、聚酯纤维板、海绵。
关键参数: 吸声系数 α (0~1, 越大越好), 优秀吸声材料在 1 kHz 的 $\alpha \geq 0.8$ 。
问题: 普通软包/海绵只能有效吸收 500 Hz 以上的声音, 对 250 Hz 以下基本无效。

低频陷阱 (Bass Trap) 专门针对低频 (20 ~ 300 Hz) 的吸声处理。驻波能量集中在角落, 因此角落低频陷阱效率最高。代表材料: 厚层玻璃棉 (100 mm+)、膜式低频吸声体、赫姆霍兹共鸣器。
CEDIA STD-003
建议: 房间四条垂直角及上下四条水平角应全部放置 200 mm 以上厚度的低频陷阱。

扩散体 (Diffuser) 将声音向不同方向散射, 增加空间感而不降低声压级。代表类型: QRD (二次余数扩散)、MLS (最大长度序列扩散)、多弧面扩散板。
原则: 扩散体用于影院后墙 (替代强吸声, 保留混响感) 和侧墙后段。

4.2 标准家庭影院声学处理分区

以 LEDE (Live-End Dead-End) 设计理念为基础:

前区 (屏幕/扬声器墙后 40% 空间) — Dead End (消声区):

- 前墙 (屏幕后方): 尽量不做反射处理 (幕布本身有吸声作用)

- 前侧墙：安装宽频吸声板（50 mm 玻璃棉 + 装饰布面）
- 天花板前段：安装宽频吸声处理（是消除最强早期反射的关键区域）

后区（听音位后 60% 空间）— Live End（活跃区）：

- 后墙：QRD 扩散体（扩散主频率 = $344 / \text{扩散体最宽尺寸}$ ）
- 后侧墙：扩散体或吸扩结合处理
- 天花板后段：可适当保留反射，增加空间感

全区必做：

- 四条垂直角：地面到天花板全高度低频陷阱（200 mm 厚玻璃棉）
- 四条上水平角：低频陷阱（玻璃棉三角填充）

4.3 常用声学材料参数对比

材料	有效频段	厚度（常用）	吸声系数@1kHz	参考成本
50 mm 玻璃棉（48kg/m³）	250 Hz+	50 mm	0.85	¥ 20-35/m²
100 mm 玻璃棉（48kg/m³）	125 Hz+	100 mm	0.95	¥ 40-60/m²
200 mm 玻璃棉（角落陷阱）	63 Hz+	200 mm	1.00	¥ 80-120/m²
50 mm 聚酯纤维	500 Hz+	50 mm	0.80	¥ 50-80/m²
QRD 木质扩散体	800 Hz+	300 mm 深	—	¥ 300-800/m²
赫姆霍兹低频吸声体	40-200 Hz 窄带	定制	—	¥ 1500-5000/组

第五章 扬声器布局与听音位设计

5.1 听音位黄金位置

前后位置：听音位到前墙（扬声器）的距离，应为房间长度的 38%（哈曼定律，Harman研究）。例：房间长 6 m，听音位距前墙 $6 \times 0.38 = 2.28$ m。

左右位置：听音位居中（左右对称轴上），允许偏差 ≤ 5 cm。声学对称性对声像定位至关重要。

高度：听音坐姿耳朵高度约 1.1 ~ 1.2 m，应避免正好处于某个驻波的声压极大值位置。

与后墙的距离：听音位距后墙不应小于 1.5 m（防止后墙一次反射与直达声叠加产生梳状滤波）。

5.2 左中右三声道主音箱位置规范

参照 ITU-R BS.775-3 及 Dolby 家庭影院设计指南：

声道	水平角度	距地高度（中心）	备注
L / R（左/右）	±30°	1.1 ~ 1.2 m（与耳朵平齐）	由听音位量取角度
C（中置）	0°（正前方）	1.1 ~ 1.2 m（与耳朵平齐）	时差须与 L/R 对齐
LS / RS（后环绕）	±110°	与耳平齐或略高 0.2 m	Dolby 推荐 ±110° ±10°
SBL / SBR（后背环绕）	±150°	与耳平齐或略高 0.2 m	7.1 及以上配置使用

5.3 超低音（Subwoofer）位置原则

超低音（20 ~ 120 Hz）是最容易被驻波影响的声道。以下原则可显著改善低频均匀度：

推荐做法：使用双路或四路超低音，分散置于房间不同位置，相互抵消某些驻波模式。

常见配置：

- 前墙中间 + 后墙中间（前后对称，抑制轴向模式）
- 前墙两角（最常见，低频量感足，但均匀度稍差）
- 四角放置（最优均匀度，适合高端项目）

五点影音项目实测：四路超低音方案与单路相比，在听音位 ±0.5 m 范围内低频不均匀度从 ±12 dB 降至 ±4 dB，效果显著。

第六章 验收测量标准

6.1 必测指标

所有五点智能影音承接的家庭影院项目，交付前必须出具以下实测数据：

测量项目	测量工具	合格标准	参考依据
混响时间 RT60	Room EQ Wizard + 测量话筒	250 Hz ~ 4 kHz 范围内 ±0.10 s 以内	CEDIA STD-003
频率响应平坦度	REW + 校准话筒	80 Hz ~ 10 kHz 范围 ±3 dB	THX pm3 标准
低频不均匀度	REW 多位置测量	听音区内 ±6 dB	ITU-R BS.1116-3
本底噪声（NC级）	声级计	NC-25 以下（≈ 35 dB A）	CEDIA/THX 推荐
最大声压级	声级计	≥ 105 dB SPL（听音位 1 m 处）	参照 THX pm3

测量项目	测量工具	合格标准	参考依据
声像定位	主观听音测试	L/R 对称性良好，中置锚定清晰	主观评价

6.2 标定报告内容

五点智能影音提供的声学标定报告包含：

1. 测量环境描述（房间尺寸、测量位置、测量日期）
2. 各声道频率响应曲线（校准前 / 校准后对比）
3. RT60 测量结果（倍频程分析：63 Hz ~ 4 kHz）
4. 低频驻波分析（瀑布图 / 频率响应）
5. 超低音相位对齐验证
6. 系统总增益和动态余量计算
7. 签字确认页（技术负责人）

结语

声学设计是家庭影院中技术壁垒最高、最考验工程团队专业能力的环节。 五点智能影音的所有影院项目均由 HAA 认证工程师或具备同等实测能力的团队主导声学设计，并以真实测量数据作为验收依据，而非主观感受。

我们的承诺：每一个项目，交付时出具完整的声学测量报告。这份报告，是对业主投资的最有力的技术背书。

参考文献

1. CEDIA ANSI/CTA-2030-B, Residential Systems Integration Design & Verification, 2022
2. CEDIA STD-003, Acoustic Treatment and Room Design Guidelines, 2022
3. ITU-R BS.1116-3, Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems, 2015
4. ITU-R BS.775-3, Multichannel Stereophonic Sound System with and without Accompanying Picture, 2012
5. Dolby Laboratories, Dolby Atmos Home Theater Design Guidelines, v4.x
6. IEC 60268-21, Sound System Equipment – Part 21: Acoustic Design of Loud Speakers, 2018
7. GB 50371-2006, 《厅堂扩声系统工程技术规范》，中国建设部，2006
8. Toole, F.E., Sound Reproduction: Loudspeakers and Rooms, Focal Press, 2018
9. 清华大学建筑声学研究所，《室内声场测量与评价方法研究》，2019

本文档版权归东莞市五点智能工程有限公司所有。未经授权，不得用于商业目的。 技术咨询：wudian.fun |
东莞市虎门镇展厅体验预约请访问官网