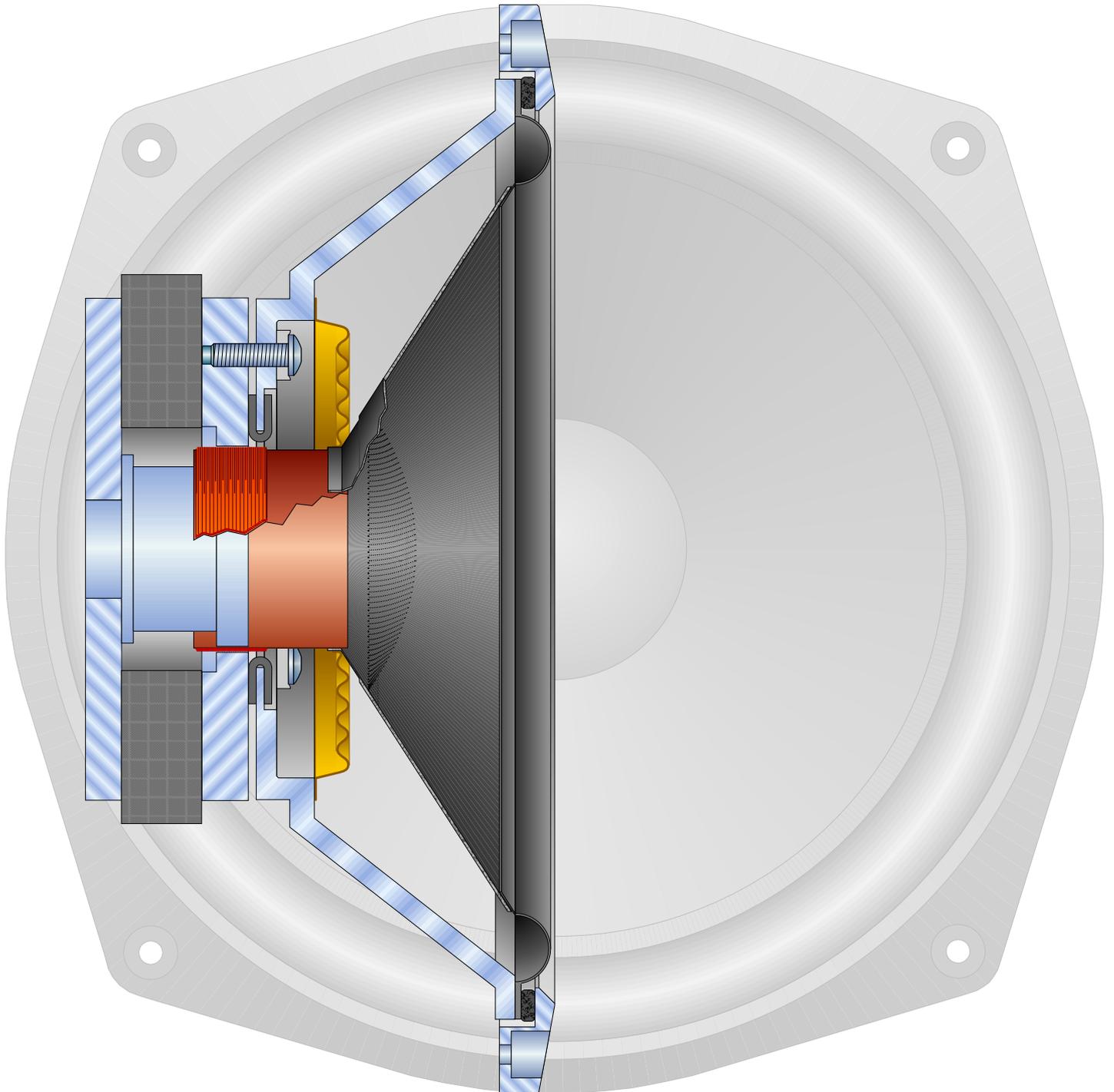


揚聲器與聲學外殼

簡要圖文說明揚聲器技術及其面臨的挑戰



2025.12

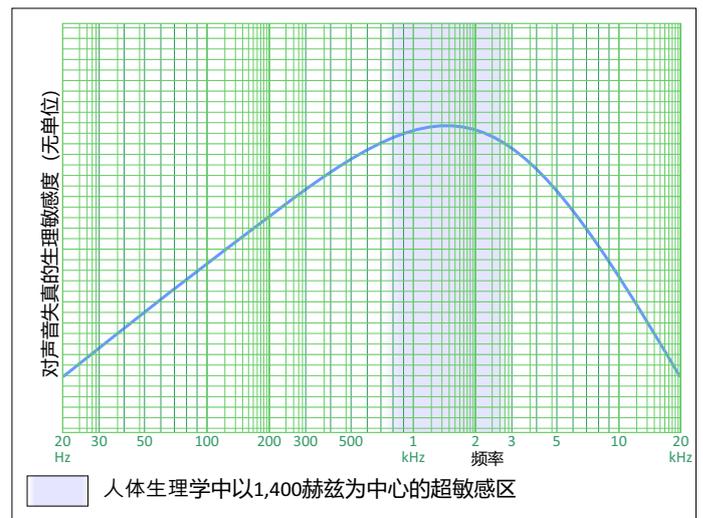
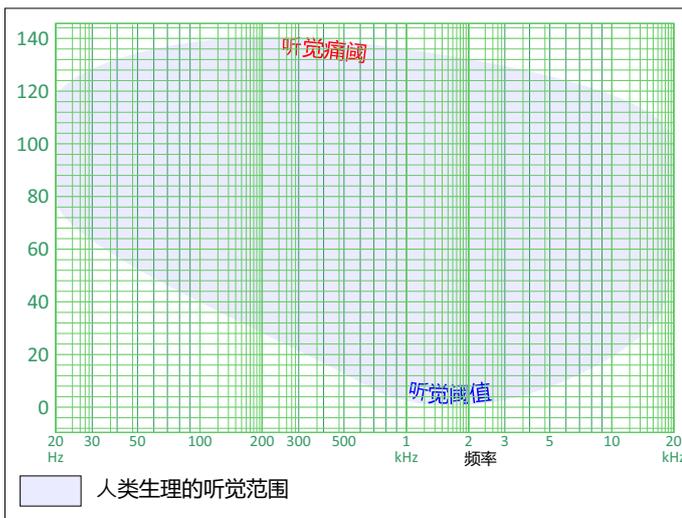
人體生理敏感度

人類生理敏感度是限制高保真音樂重現的所有因素的基礎。這種敏感度並非線性關係，無論是頻率還是振幅皆然。

在78至102分貝 (dB) 的範圍內，30歲的人仍能聽見20至20,000赫茲 (Hz) 的聲波訊號。隨著年齡增長，人們的耳朵對高頻聲音的敏感度會逐漸下降；年逾60歲後，12至14千赫 (kHz) 以上的頻率會逐漸減弱，但並非完全喪失聽力。

在音樂會上，這個年齡層的樂迷雖以同齡人的耳朵聆聽音樂，但其大腦的分析系統卻比多數二十歲年輕人更為優越。這種文化能力使他們懂得如何更精準地聆聽——即便實際聽力可能不如年輕人敏銳。

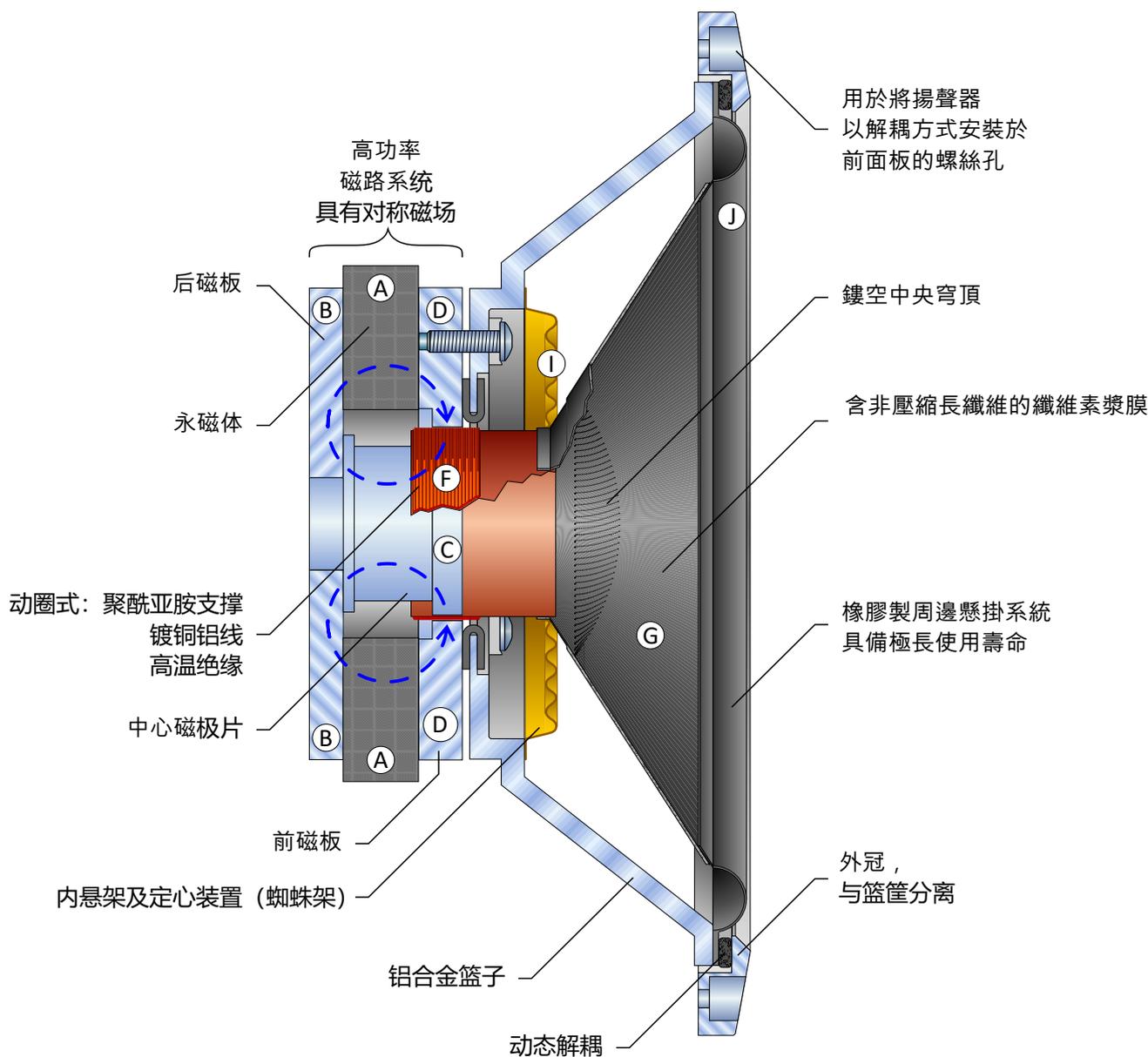
我們可以說，我們用耳朵聽，但用大腦聆聽。或者我們可以說——請原諒這個比喻——我們的耳朵就像硬件 (麥克風)，會隨著歲月老化；而我們的大腦則依靠持續更新的軟件運作，這些軟件是我們從文化中獲取的。



因此，就頻率而言，我們的生理敏感度並非線性關係，相差甚遠。在1,400赫茲左右存在一個超敏感區域。以1,400赫茲為中心、橫跨兩個八度的頻率範圍 (即700至2,800赫茲) 堪稱「神聖領域」，在此頻段中必須採取最嚴苛的措施，以消除聲音重現過程中的任何失真現象 (包括失真、衰減時間擴展及方向性誤差)。

因此，此頻率範圍要求盡可能從中音揚聲器出發，圍繞其設計聲學箱體。我們要求此揚聲器具備極精準的表現，同時須考量其作用範圍僅限於這兩個八度音域。為完整實現頻譜重現，聲學系統必須搭配低頻揚聲器 (低音喇叭) 與高頻揚聲器 (高音喇叭)。因此，高性能聲學箱體必須精確配置三組揚聲器 (不多不少)，方能構成真正的聲音重現系統。

揚聲器的工作原理



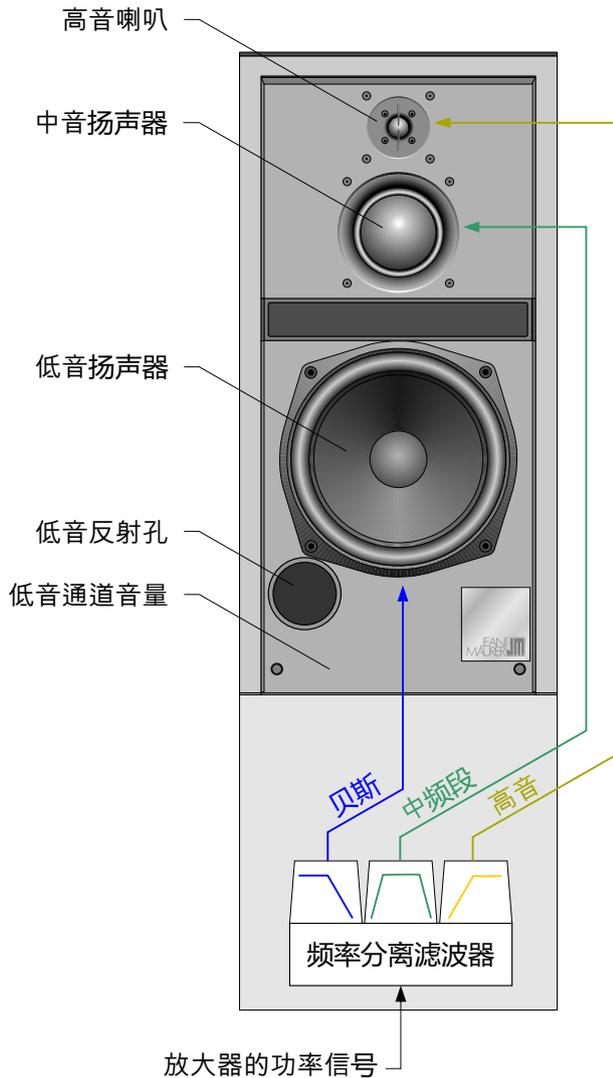
B245-5 低音換能器

磁路由圓形鐵氧體磁鐵A組成，後磁板B、中心磁芯C和前磁板D，產生一個非常強的磁場。位於D與C之間的狹窄環形槽內，該槽被稱為氣隙。動圈式揚聲器F與錐形膜G由懸掛件I和J懸掛，使線圈在氣隙中居中且不接觸兩側。

來自放大器的電流流經動圈，在氣隙中強磁場的作用下，推動膜向前或將其拉回，

取決於電流的方向。隨著電信號的節奏前後移動，（即麥克風捕捉到的聲音的電信號圖像，錄製期間），音樂以或多或少真實的保真度被重現。

声学罩的建造及功率负载的分布



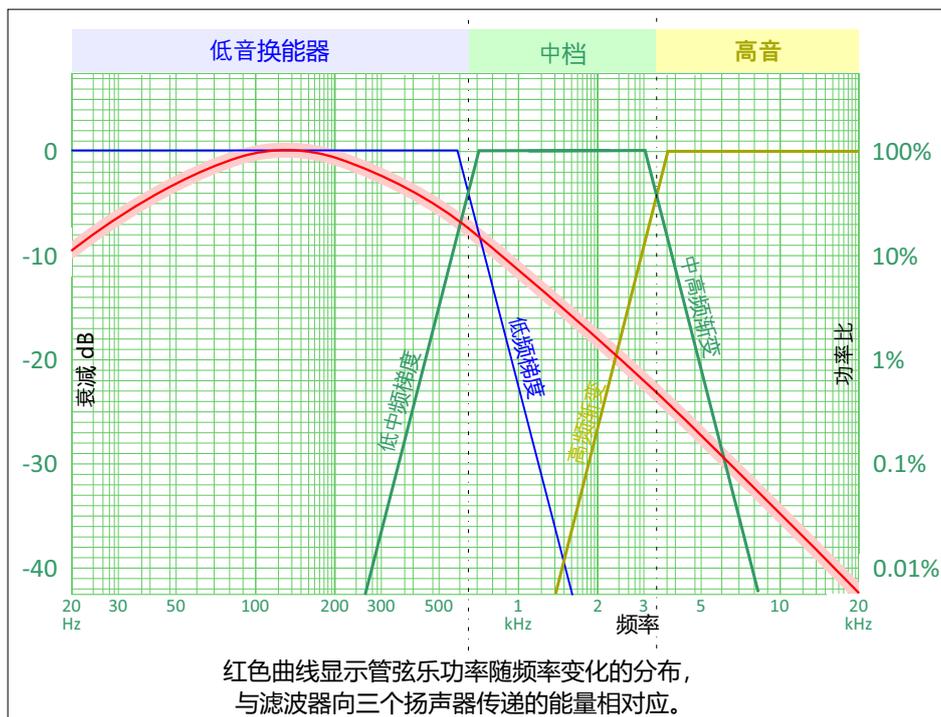
声学箱体由三组同等重要的元件构成，这些元件对整体高保真性能至关重要：

- 扬声器（或换能器）将功放的电信号转换为机械运动，从而产生声音
- 根据信号的频率成分，将电信号导向各个扬声器的滤波器
- 扬声器系统的箱体（或更准确地说，多个箱体）必须处理每个扬声器后方的声学信号（即由振膜在箱体内产生的声波）。此设计旨在确保后向声波不会干扰直接可听信号。

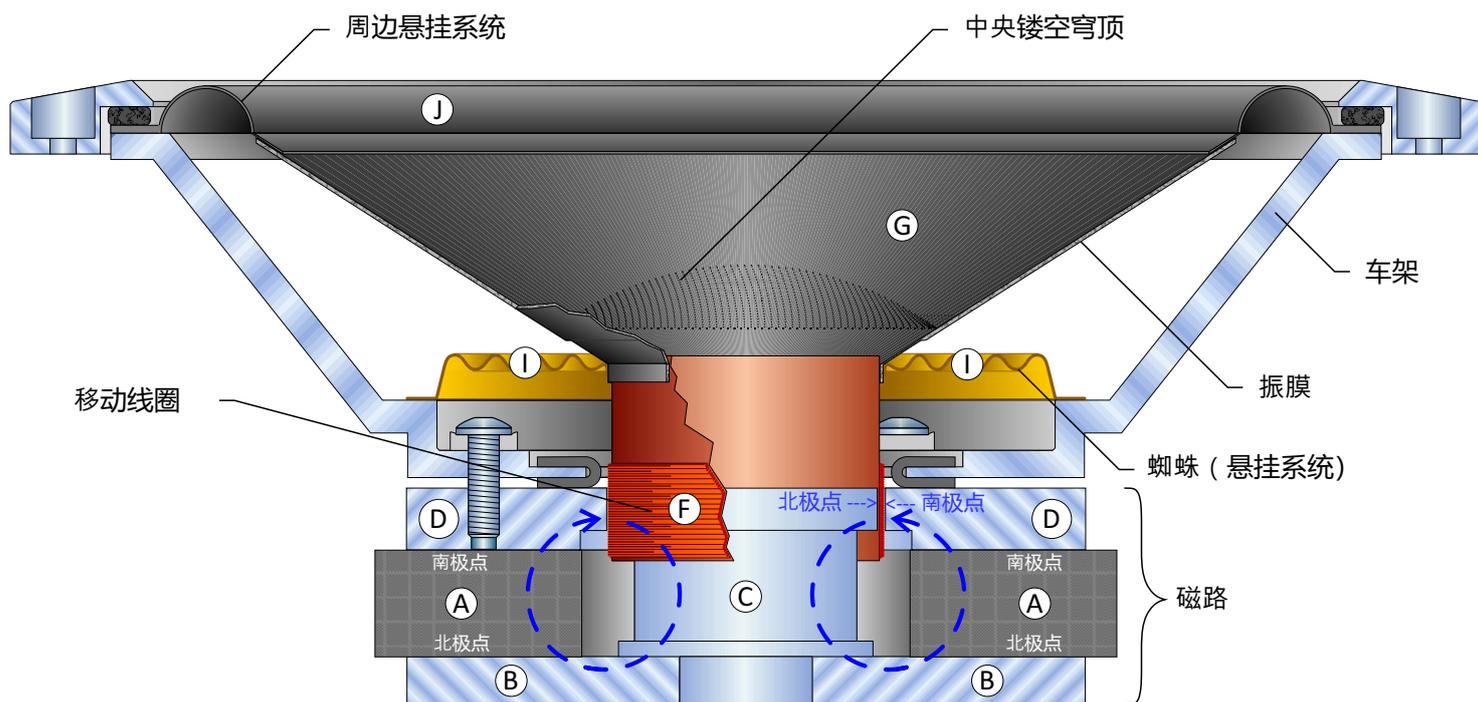
对于交响乐团而言，低音扬声器将再现大部分音乐能量（约80%），它负责塑造音乐声像的深度及其乐器声部的质感。

中频换能器必须实现最高保真度的还原，它负责确保音乐演绎的清晰度。

高频扬声器负责提供声学空间，其需要具备最高响应速度，以准确重现20千赫兹以上的信号。

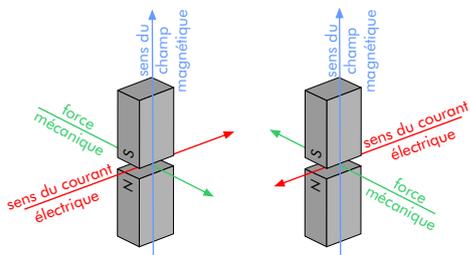


四个主要扬声器参数



力因子：B·l

该曲线对应于气隙
(位于C与D之间的圆形槽)
中的磁场，
乘以浸没于该磁场中的动圈绕组长度。



特斯拉*米 (T*m)

移动质量：m

(通常标记为Mms)
等于动圈 (F) 与振膜 (G)
质量之和 + 悬挂系统部分 (I+J)，
即处于运动状态的组件



克
(g)

悬挂柔韧性：C

(通常标记为Cms)
该值等于
周边悬挂系统弹性 (J)
与内部定位系统弹性 (I) 之和



毫米/牛顿
(mm/N)

表面积：S

对应于总辐射表面积，
即振膜表面积 (G)
+ 部分周边悬挂结构 (J)



$$S = \pi \cdot r^2$$

米²
(m²)

以及Redc——即动圈式扬声器的直流电阻 (F)

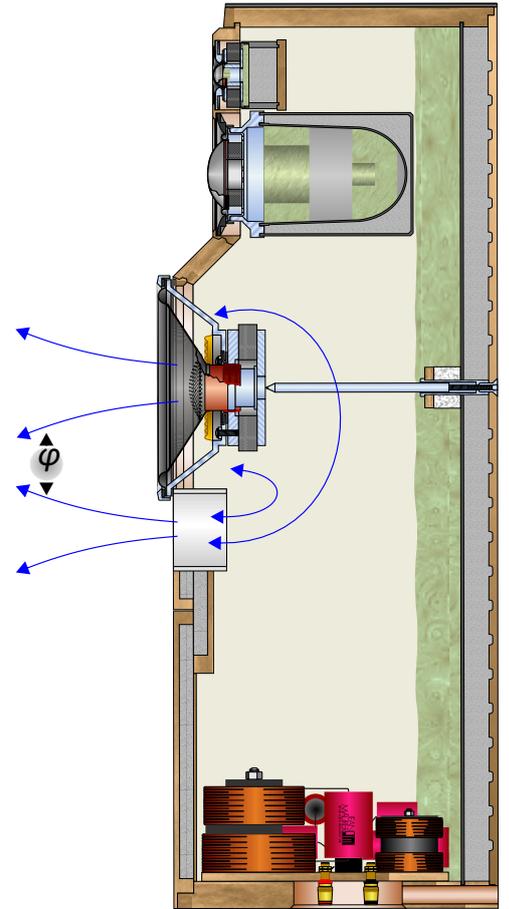
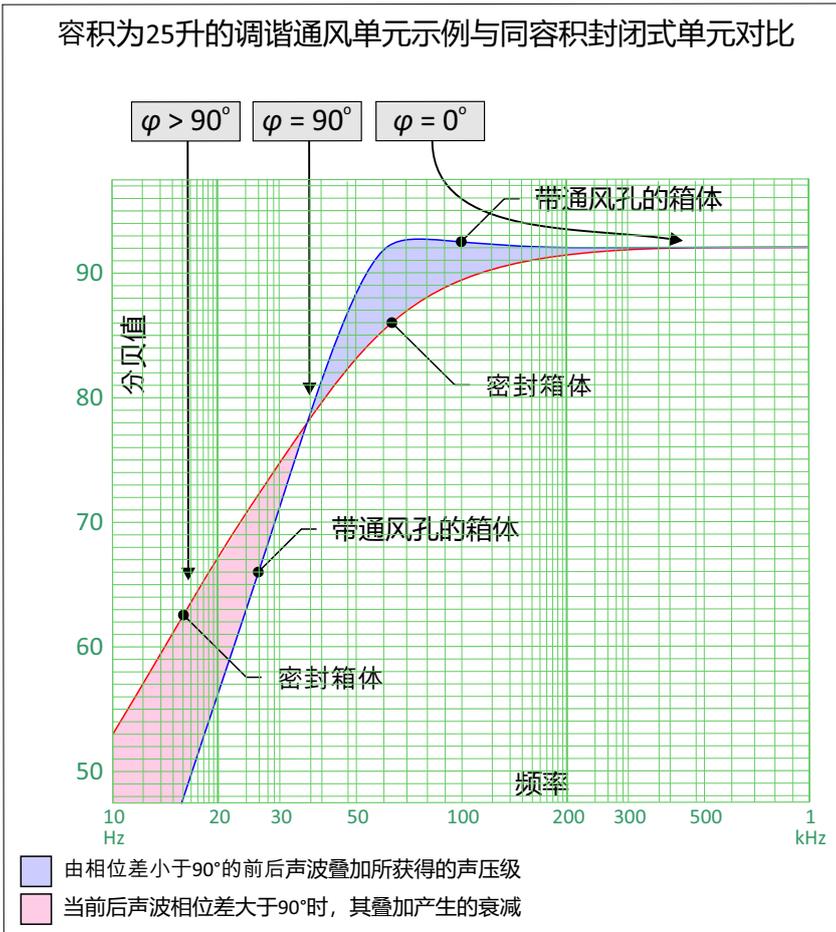
扬声器的性能与以下参数成正比：

在此方程中，顺应性 Cms 不参与作用。

$$\eta \approx \frac{S \cdot (B \cdot l)^2}{m^2 \cdot R_{edc}}$$

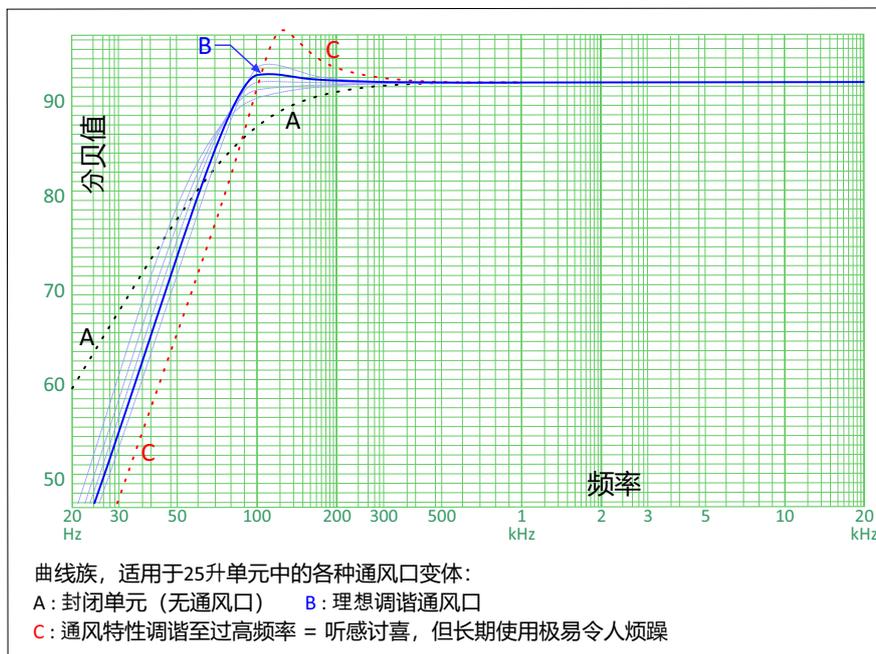
通过该公式，我们发现动圈质量与其值的平方成正比。例如，以动圈质量为33克的B245-5扬声器为例，若在制造动圈组件时浪费1克胶水，效率将降低6.15%（即0.52dB）。

通气孔调谐的箱体



对于极低频段，通气孔会将大量声能从箱体内部传导至外部。这种能量随频率升高而衰减，在250赫兹以上频率时几乎趋近于零。

相较于封闭式箱体，经过精密设计的倒相式低音反射箱体能够从低音单元后向声波中回收特定能量，将其以有利的相位关系导入聆听空间，同时衰减那些几乎不可闻且会损伤扬声器的极低频段。（这些信号源于不利的相位关系）。因此该系统能够实现低频响应的线性化。



低频再现的基本标准

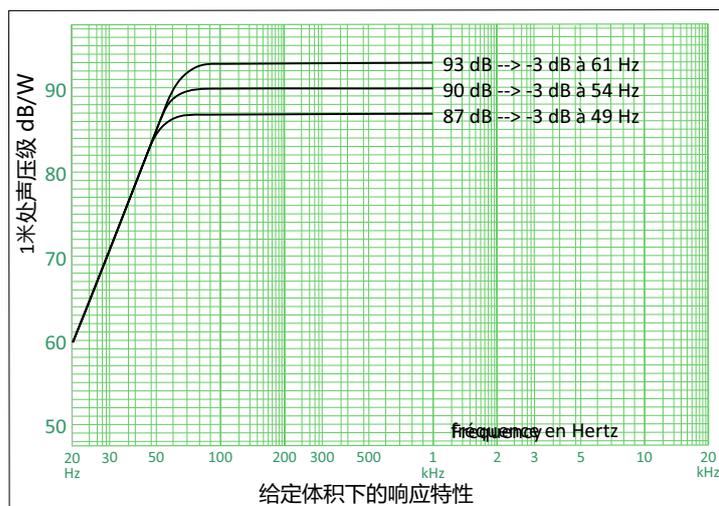
1 - 效率 (dB/W at 1m)

2 - 容积 (升) 与负载类型 (封闭容积、通风系统或无源负载)

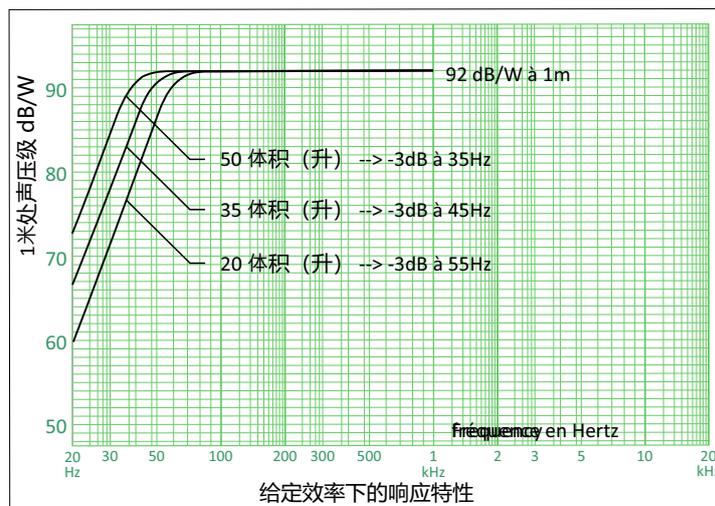
3 - 带宽 适用于极低频

这三项低频标准不得违背物理学基本定律，即：

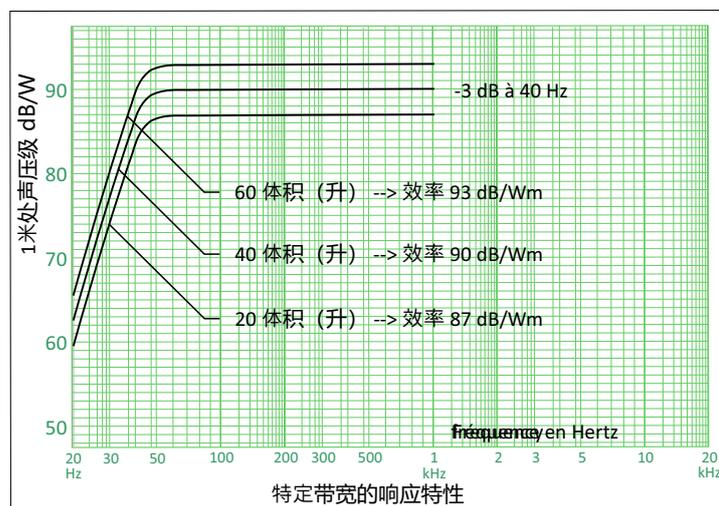
针对特定音量：效率与带宽被定义



针对特定效率：音量与带宽均已定义



针对特定带宽：效率与音量被定义



4 - 最大允许声级 (单位：分贝 dB)

5 - 其他音乐表现因素 (失真、衰减时间延展等)

6 - 可靠性 (在负载限制和老化方面)

扬声器指向性的起源

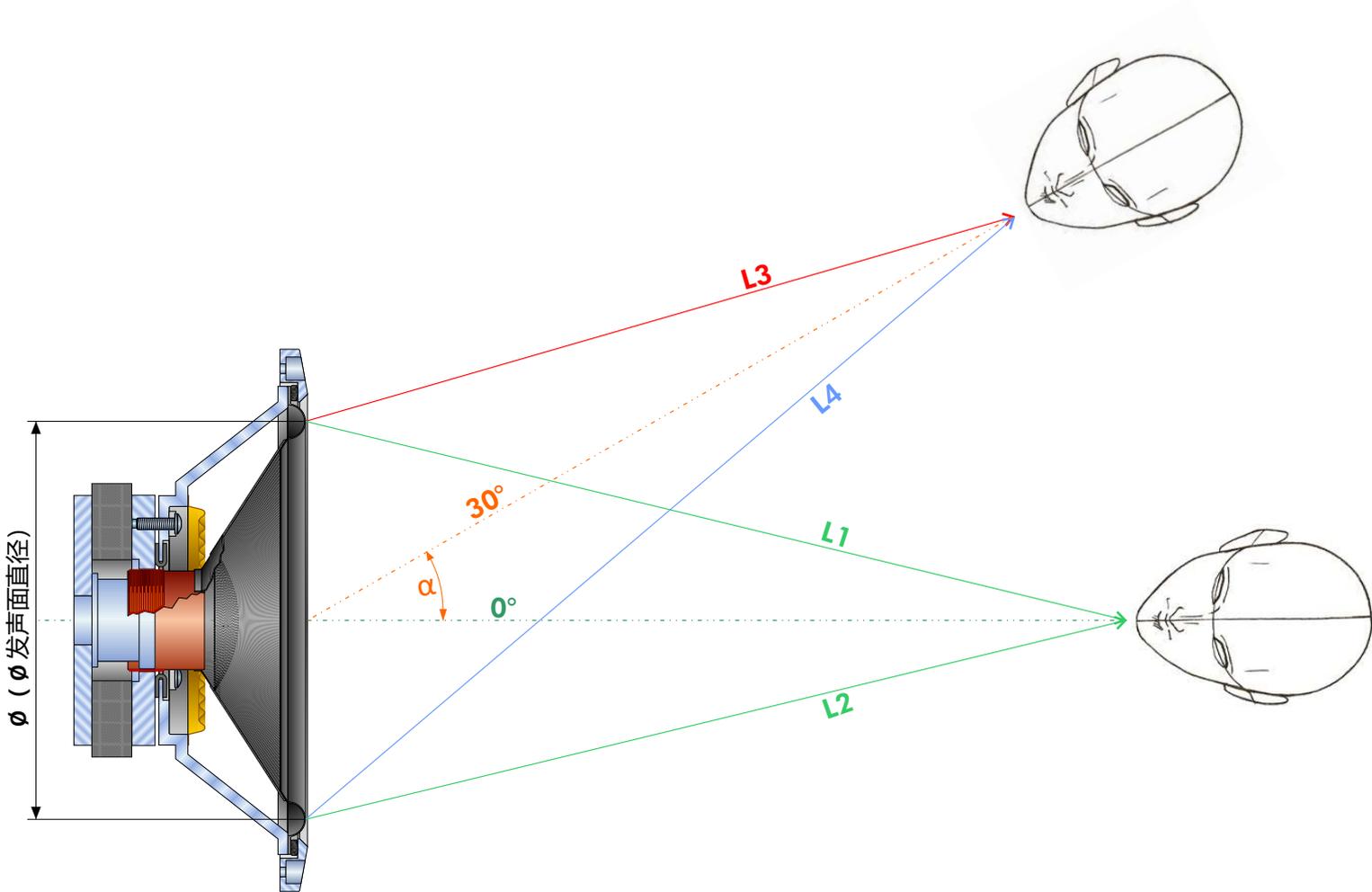
电声学：扬声器的指向性与三个参数相关：

1- 振膜尺寸（更精确地说，其发声部分），即直径 \varnothing （单位：米）

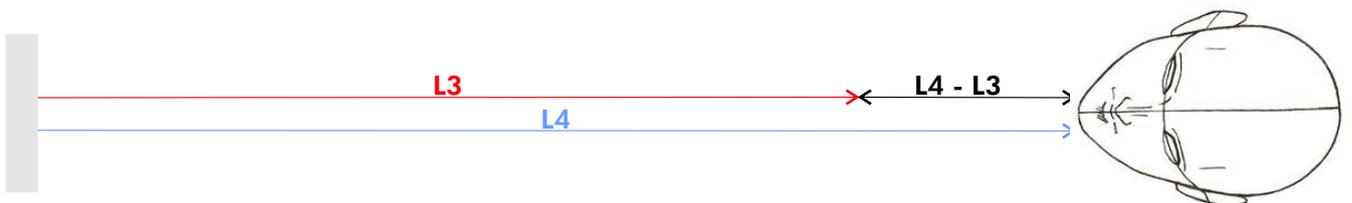
2- 频率F（单位：赫兹）

3- 听者相对于扬声器轴线的位置角： α （单位：度）

该现象需考虑空气中声速传播特性（ $V_{air}=344m/s$ ）。



指向性源于声波从振膜不同发声部位传播至听者的路径长度差异。



指向性详解

当听者位于扬声器轴线上时，距离L1和L2等效。振膜各部分发出的声音将同时抵达听者。

当听者如图所示处于偏角 $\alpha=30^\circ$ 的位置时，距离L3与L4并不相等。两者长度差（L4-L3）导致从最远距离（L4）传来的声信号相对于L3方向的声信号产生延迟。

在此，对于直径为20厘米的振膜和30度角度：

$$L4 - L3 = \frac{\varnothing \cdot \cos 30^\circ}{2} + \frac{\varnothing \cdot \sin 60^\circ}{2} = 0,1 \text{ m}$$

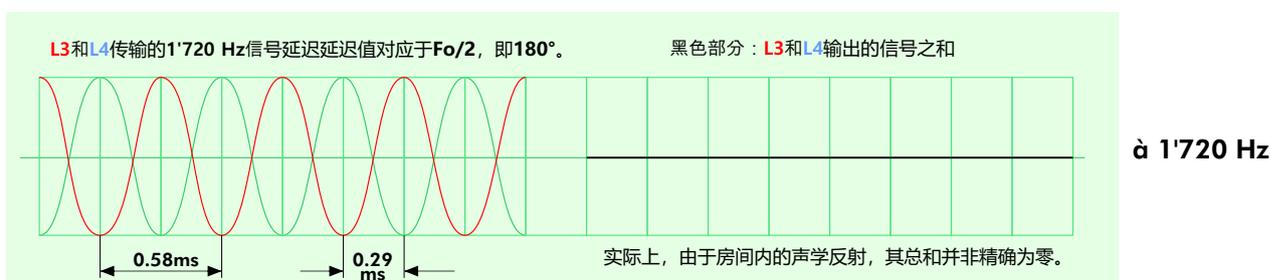
由0.1米长度差产生的延迟T等于：

$$T \text{ (s)} = \frac{L4 - L3 \text{ (m)}}{V_{\text{air}} \text{ (m/s)}} \quad \text{soit :} \quad T = \frac{0,1}{344} = 0,29 \text{ ms}$$

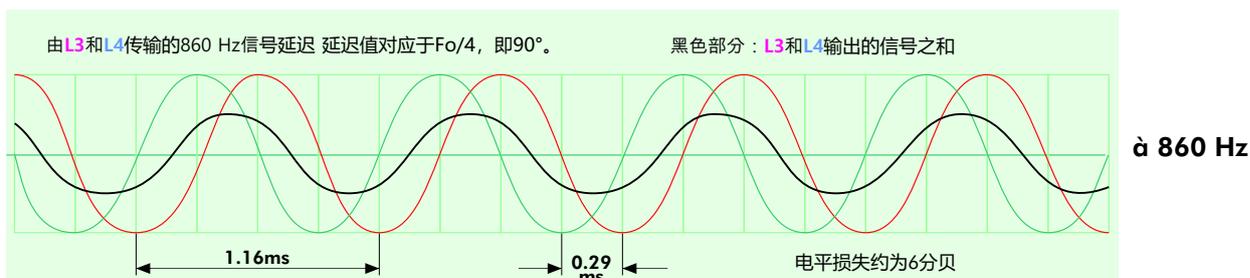
对应于0.1米波长的频率等于：

$$F_0 \text{ (Hz)} = \frac{V_{\text{air}} \text{ (m/s)}}{L4 - L3 \text{ (m)}} \quad \text{soit :} \quad F_0 = \frac{344}{0,1} = 3'440 \text{ Hz}$$

为重现1720赫兹频率（即 $F_0/2$ ），L3发出的信号将通过L4信号以 180° 相位差实现抵消。

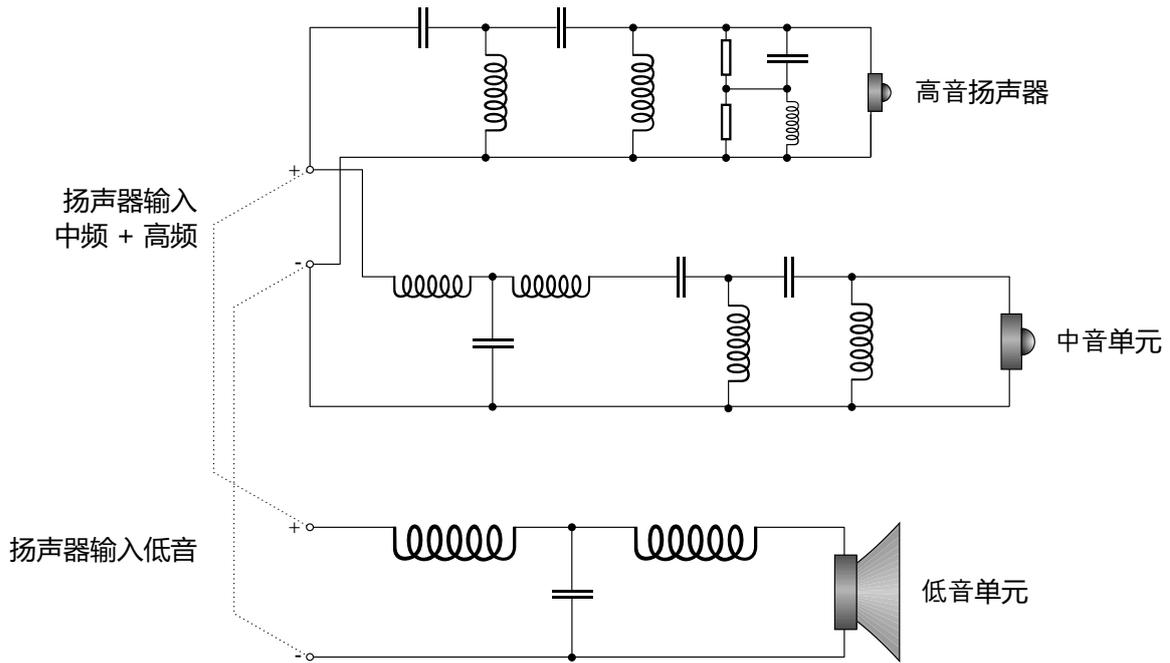


实际上，在频率为 $F_0/4$ （即本例中的860Hz）时，衰减现象显著。以本例为例，采用20厘米振膜和30度角度时，从860Hz起指向性已不容忽视。



扬声器的指向性图与音乐表现力无关，而是取决于其振膜尺寸：振膜越大，在特定频率范围内指向性越强。

传统LC分配滤波器

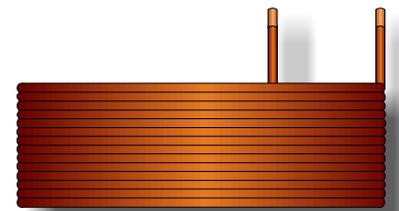
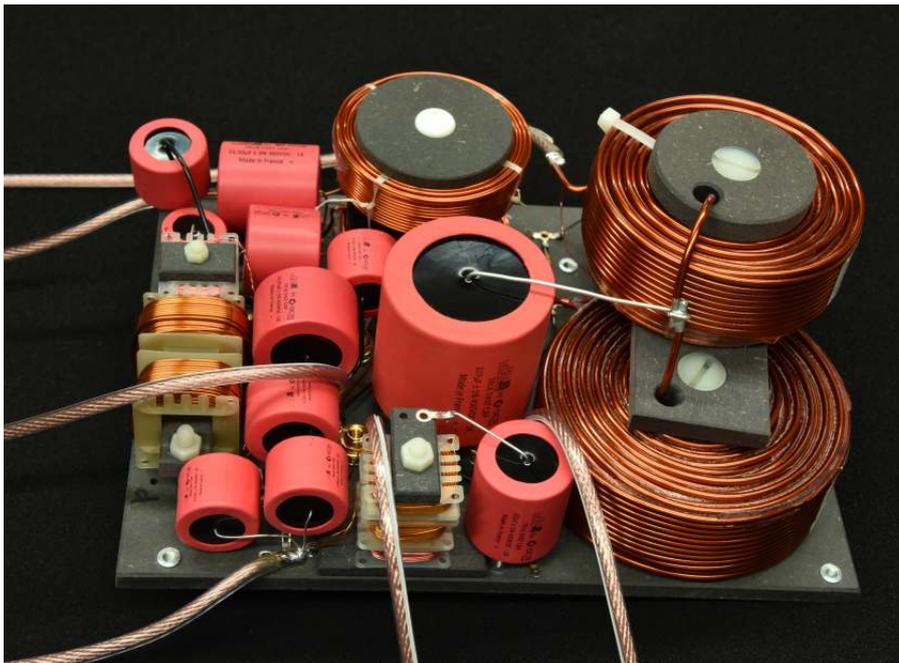


带通滤波器根据信号的频率成分，将来自放大器的信号传输至各个扬声器。

高性能无源滤波器凭借其陡峭的衰减梯度，相较于任何其他系统都具备决定性优势。

如果这种滤波器由许多没有磁芯的大截面铜电感器以及许多聚丙烯电容器组成，则这种滤波器是不饱和的、高度线性的，并且使用寿命非常长。

无源滤波器的组成部分及其构造



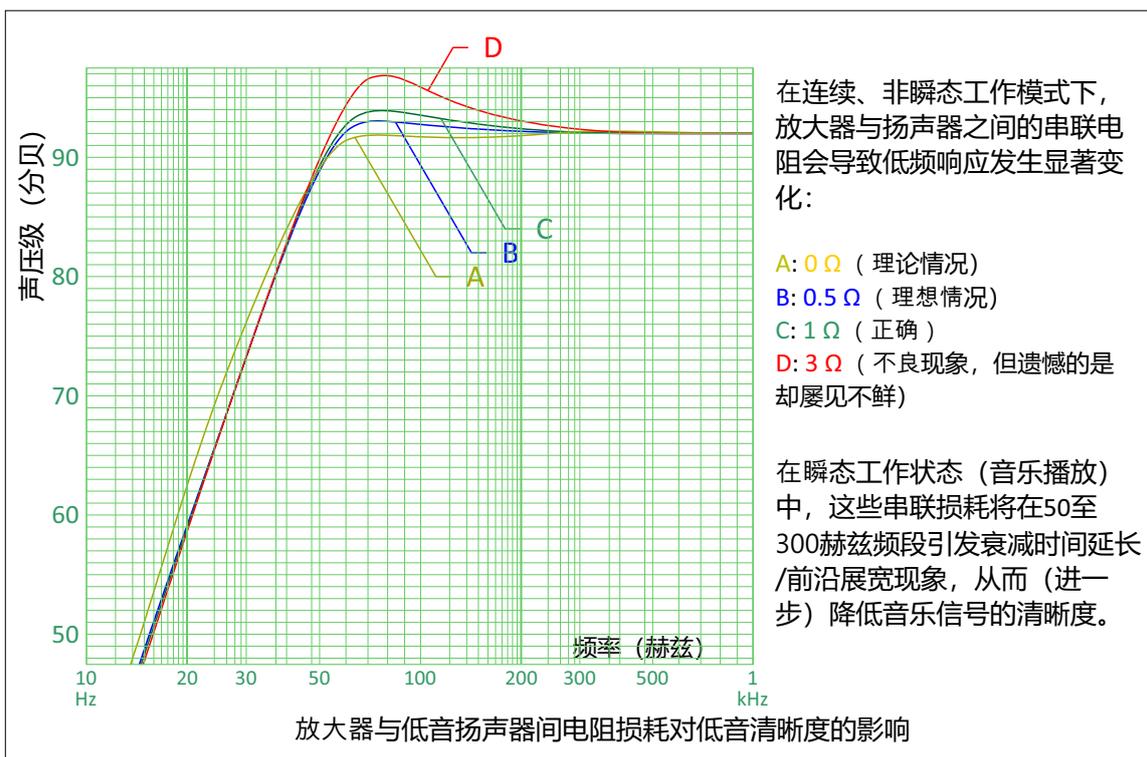
无铁芯自感绕组且截面极大：
1.68 mH - 0.11 Ω - 3 kg



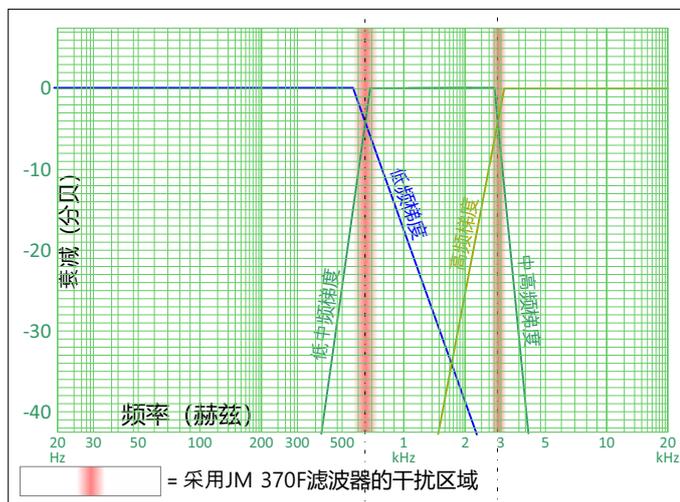
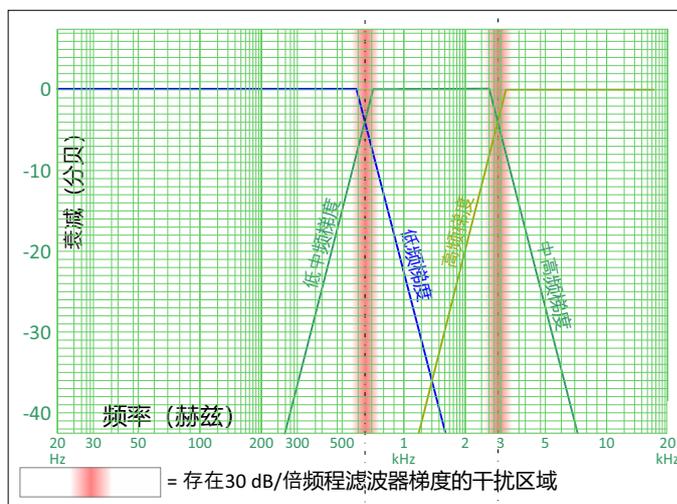
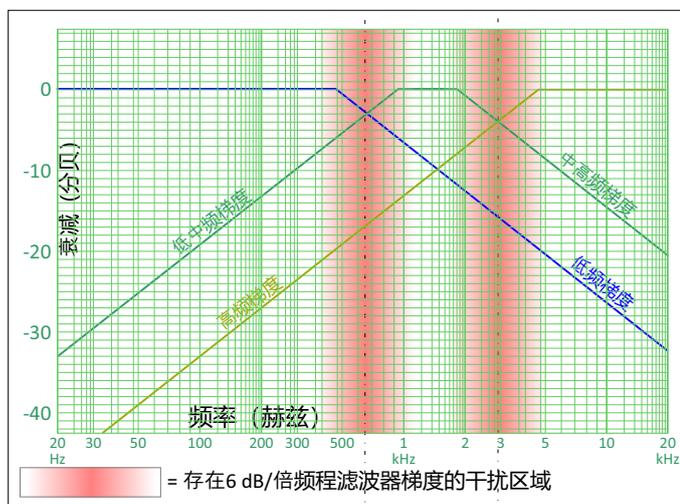
高稳定性聚丙烯电容器具有极快脉冲响应：
12.7 μ F - 3% - $\text{tg}\delta < 0,06\%$

具有陡峭衰减斜率和低串联损耗的分配滤波器，
线圈中心不包含化学电容器或磁芯；组件总重量为6.5千克。

带通滤波器的电阻损耗及其影响



滤波器斜率



滤波器的斜率决定了扬声器的共同工作区域。这些区域显然会受到一个换能器对另一个换能器产生干扰的影响，因为这些换能器在几何上存在偏移，在物理上也不相同。滤波器的斜率越快，这些重叠区域就越小。来自单个振膜的还原范围显然会更清晰。

扬声器和音箱的阻抗：一种极其复杂的负载，对放大器构成重大挑战

电阻器，如加热元件，属于简单负载。其所需电流取决于施加的电压。该电流将被完全消耗并转化为热能。无论施加何种形式的电压，此特性均成立。

交流电动机或扬声器将电能转化为机械运动，由于系统损耗，其效率存在一定程度的降低。损失的部分能量将转化为热量。转化为运动的部分能量对电压源呈现非电阻性但具有电抗性的负载。这意味着该电机或扬声器将要求比其消耗的电流更大的电流，并将剩余电流返还给电压源。这种回流能量称为反电动势（fcm）。

根据扬声器的不同，电流需求可能高达驱动振膜所需能量的7倍。这部分多余能量必须重新通过分频器和扬声器线缆，才能被放大器重新接收。多余能量的比例取决于电信号的内容（每个特定时刻频率和振幅的变化）。这可以称为动态余弦 φ （ $\cos f$ ）。

对于放大器而言，扬声器的负载带来了两大挑战：

- 1- 具备足够的电流供应能力，即以安培（A）而非瓦特（W）为单位。这种能力能确保功放不会在扬声器产生大电流需求时削平动态峰值。削波不仅听起来非常不悦耳，而且对扬声器本身的健康也很有害。
- 2- 具备良好的扬声器回流能量吸收能力（fcm）。若缺乏此能力，电流向扬声器方向的反弹将产生极具破坏性的回声效应，从而干扰音乐的立体感。动态低谷将淹没在这种能量回馈中，音乐细节将充满非常不悦耳的共振。放大器/扬声器系统再现的动态效果将变得很差。

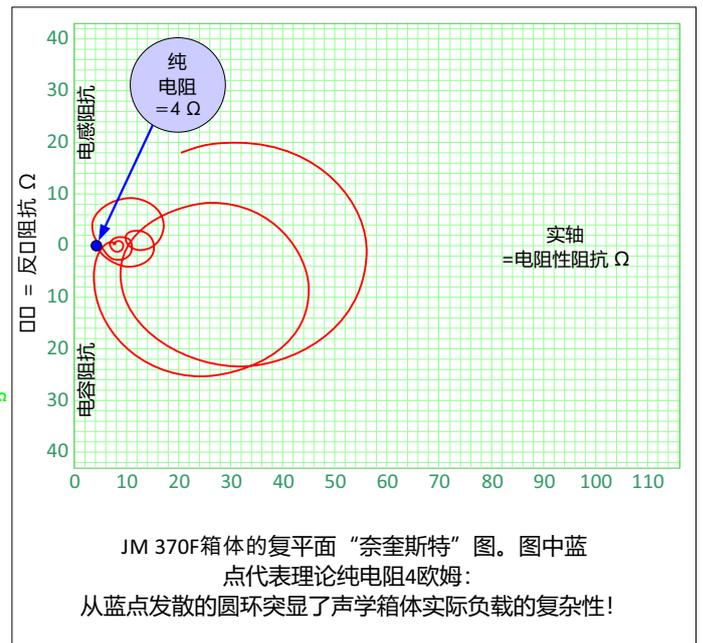
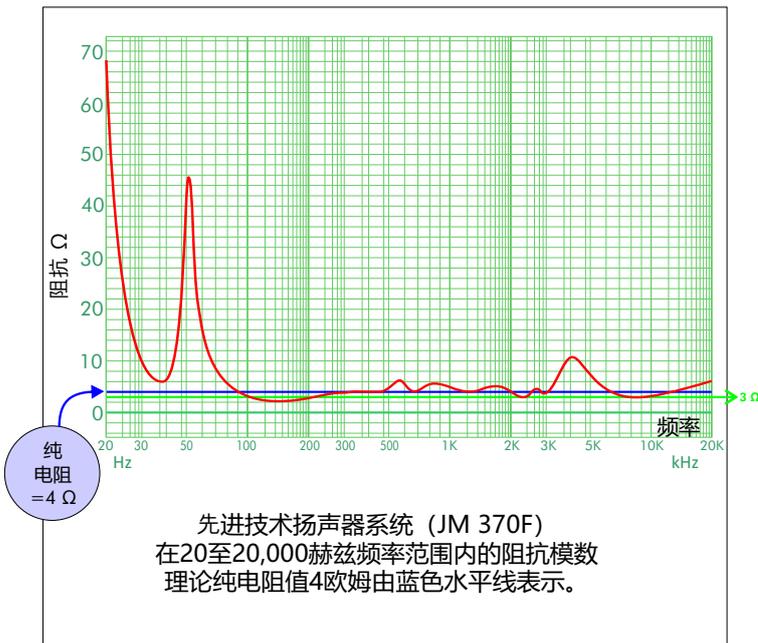
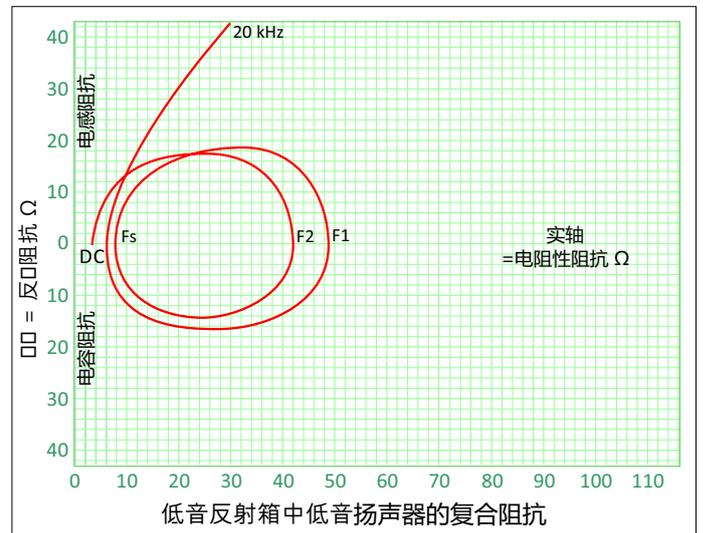
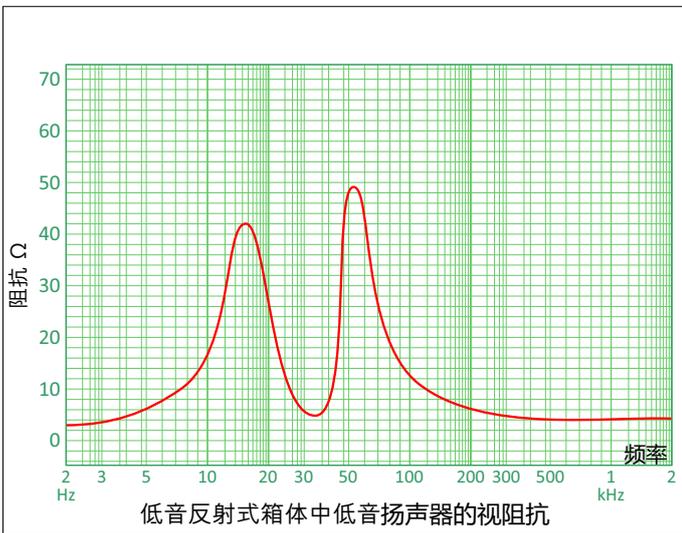
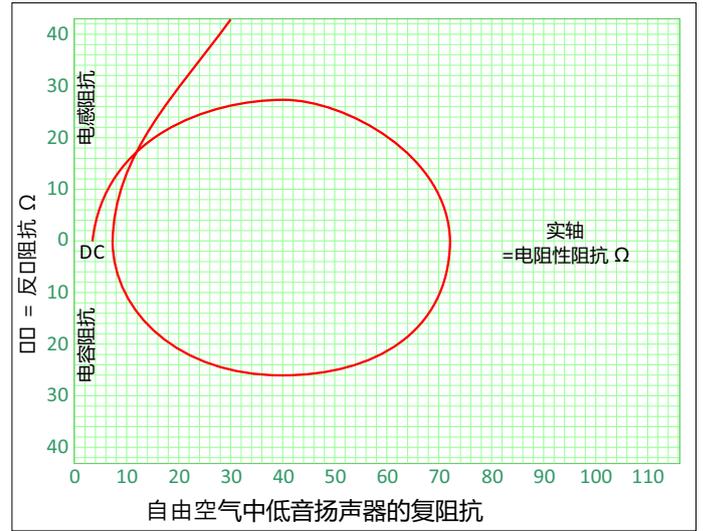
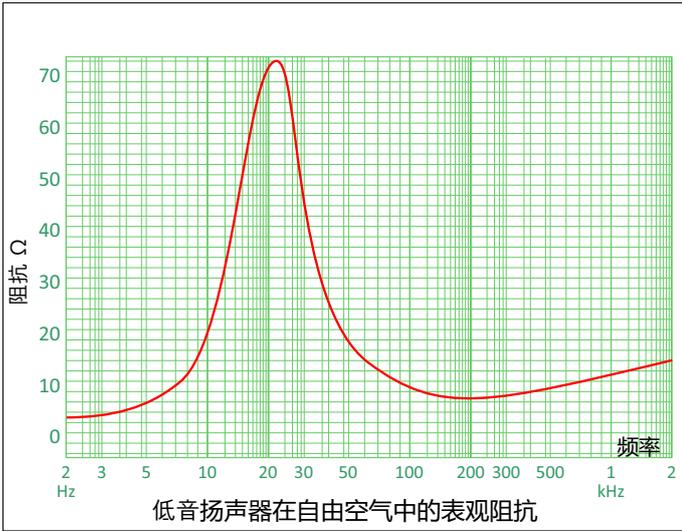
在晶体管放大器中，某些型号能够提供大电流。例如，它们能够承受2欧姆或更低的电阻负载，这正是其性能优异的明证。无法承受低于4欧姆负载的晶体管放大器应予以淘汰，因为其设计者未能理解扬声器负载的实际意义。

然而，电流反馈（fcm）在直接晶体管放大器输出端（即无输出变压器的情况下）会引发诸多问题。这种能量的重新吸收难以有效控制，其后果已在前文提及。

电子管放大器技术需要输出变压器，以使电子管的工作阻抗与扬声器的阻抗相匹配。这种元件体积庞大、重量沉重、成本高昂，且在追求卓越性能时既难研发又难制造。然而，只要精心设计，它对扬声器而言堪称福音。扬声器能够接收所需电流，并通过输出变压器高效地将能量回流。滤波器和扬声器线缆的低串联电阻也促进了能量向放大器的回流。

少数晶体管放大器配备输出变压器，其品质可接近优质电子管放大器。

扬声器和声学箱体的阻抗



扬声器的动态能量 = 动态杀手

音乐的动态范围由调制峰值与谷值之间的振幅差决定。准确地说，这是以分贝（dB）为单位表示的动态范围。

虽然再现动态峰值相对容易，但随之而来的动态谷值却截然不同，因为大量振动残余（机械和电气）会淹没低幅度的音乐信号。例如，交响乐团的录音动态范围通常达到60分贝，即功率比为1比1,000,000。这种功率差异在瞬间内就会被再现出来。

强音之后必然会产生杂质残留（箱体振动、电回声、膜片缓冲不良等），而此时本应重现的却是瞬间的静默或极微弱的音量（或单纯的动态凹陷）。这些持续不绝的信号也被称为“拖尾效应”。问题的核心在于所谓的“对静默的尊重”。

在扬声器中，声音过度延长的主要原因有三：

1- 每个扬声器的反电动势（f_{cem}）是与音乐电信号相反的寄生电流，由扬声器返回。该电流必须尽可能被放大器重新吸收。若吸收效果不佳，就会产生回声效应，类似于在山上面对岩壁时产生的回声。这种回响会使原始声音信息变得难以辨识。然而，晶体管无法有效吸收这种回流能量，导致能量反弹回扬声器，干扰动态范围。如果电子管放大器配备了优质的输出变压器，则其次级绕组能够高效地将这种寄生电流短路。

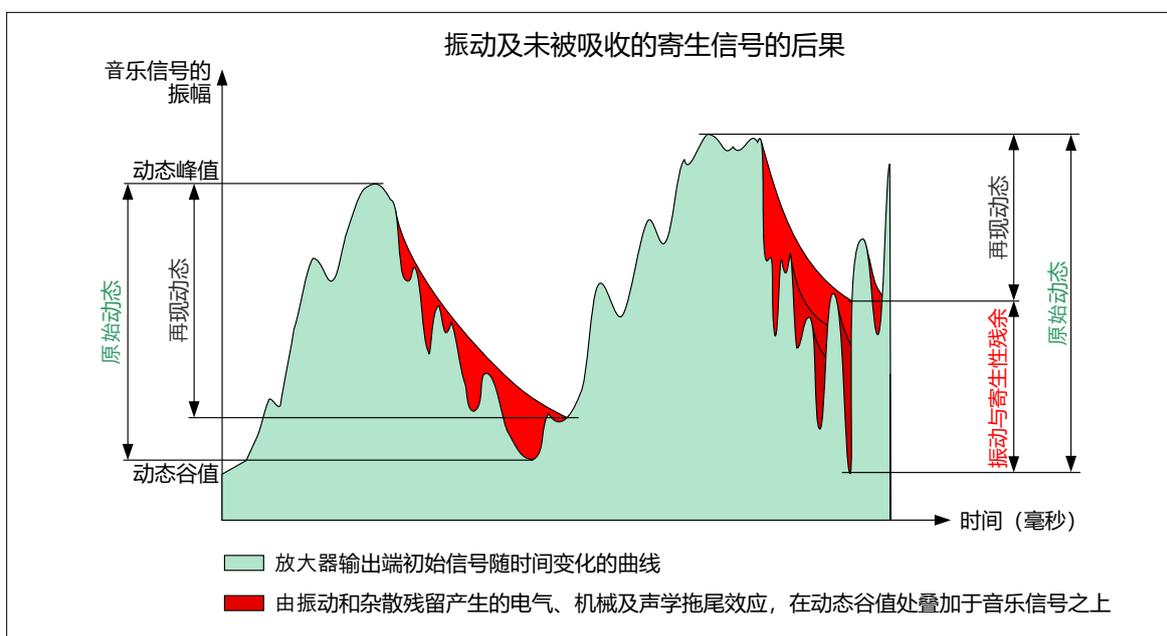
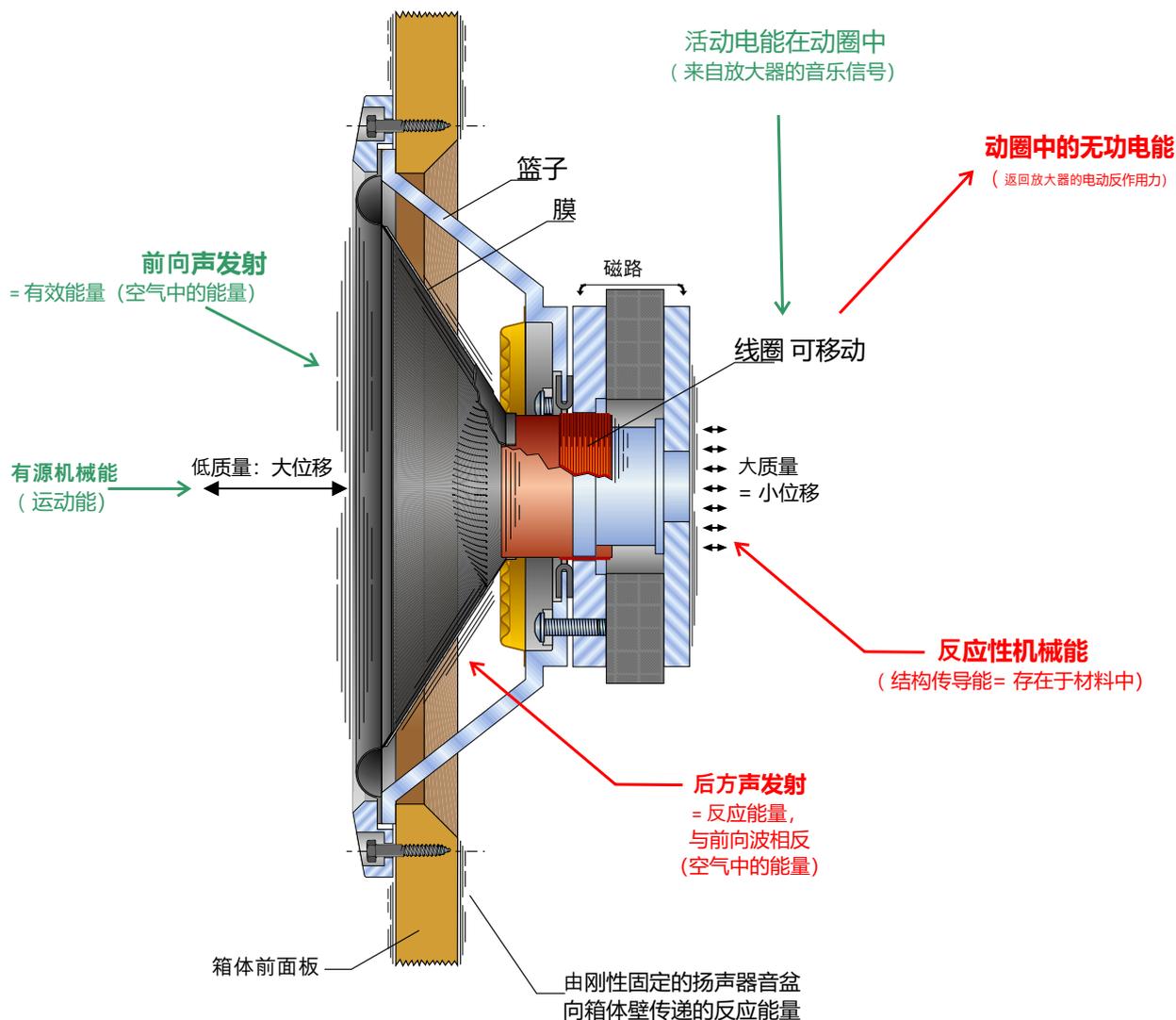
2- 由移动部件（动圈和振膜）的运动以及附近空气质量引起的机械反应能量，会产生一种寄生残余现象。这正是扬声器本身产生的机械振动。为消除这种振动，扬声器盆框的分支将振动传递至音箱外壳，并以延迟和严重变形的效果激发音箱的各个面。

在Jean Maurer音箱中，这些不同残余物被石英砂吸收，这主要得益于预紧杆，该杆将低音单元电机动态连接至具有极低共振频率的双层砂背板。盆架也与箱体前板动态分离。对于中音和高音扬声器，则由嵌入双层外壳中的沙子完成这项工作。

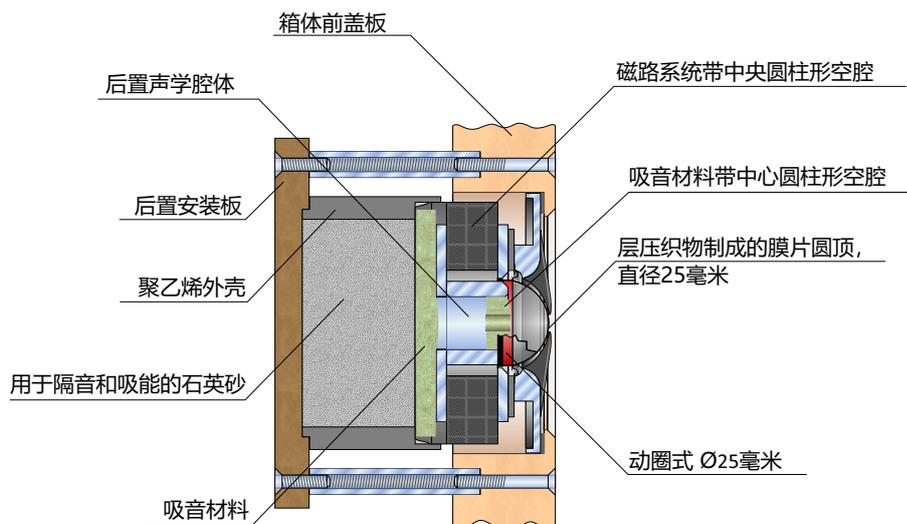
3- 扬声器振膜的运动产生前向声波与反向后向声波。后向声波作为众人皆知的唯一有害信号形式，被矿物棉吸收。该信号的一部分被低音反射孔重新拾取，以实现低频响应的线性化。

相较于前两种反应性能量形式，这种形式在保持静音方面最不易引发控制问题。若扬声器箱体具有极高的惰性（即低共振特性），则能呈现出良好的音乐立体感。箱体双背板内填充的石英砂，以及JM 370F型号侧板和两个前板内填充的石英砂，对实现这一效果起到了重要作用。

扬声器的主动能量和被动能量



中频与高频换能器：两个内置于低音单元箱体的腔体



高音箱体，配备TD 25-4换能器

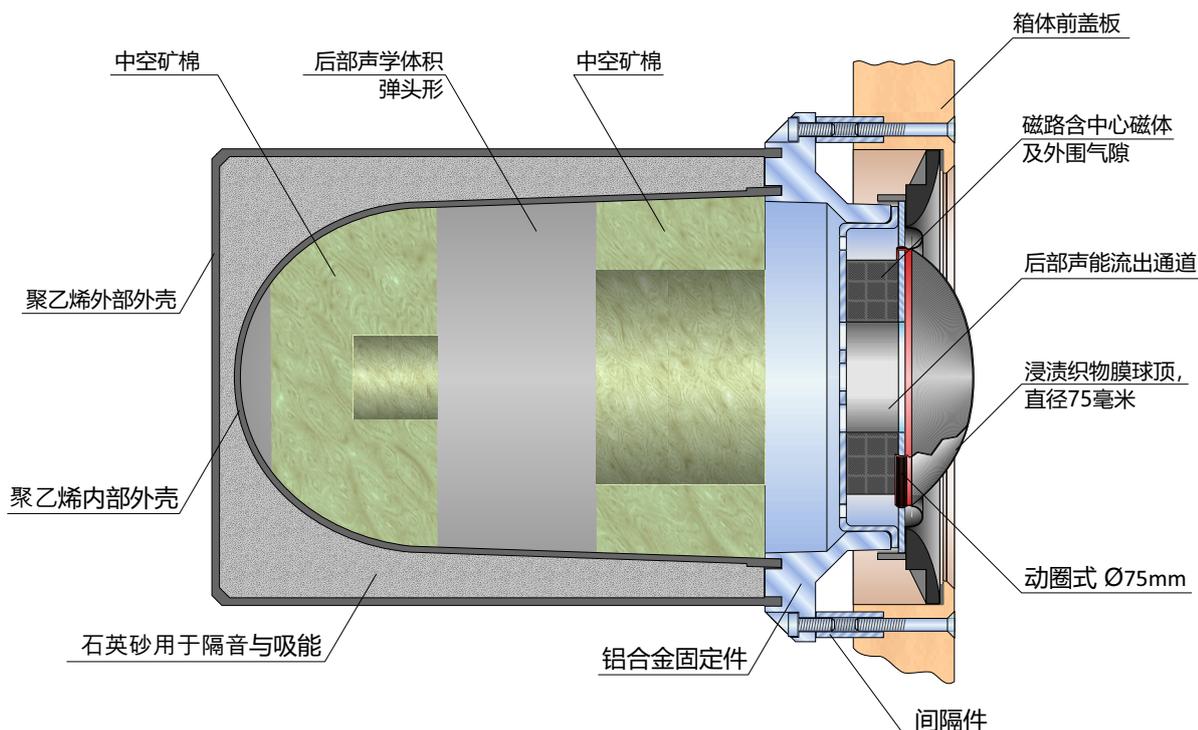
每个扬声器（或换能器）都会产生声波的前波和后波。

扬声器的后向能量在任何情况下都不得与其他扬声器的后向能量混合，因为这会严重干扰邻近振膜的运动，从而造成不可接受的声音污染风险。

低频能量也可能导致中频或高频换能器移动部件发生机械性损坏，这种风险同样真实存在。

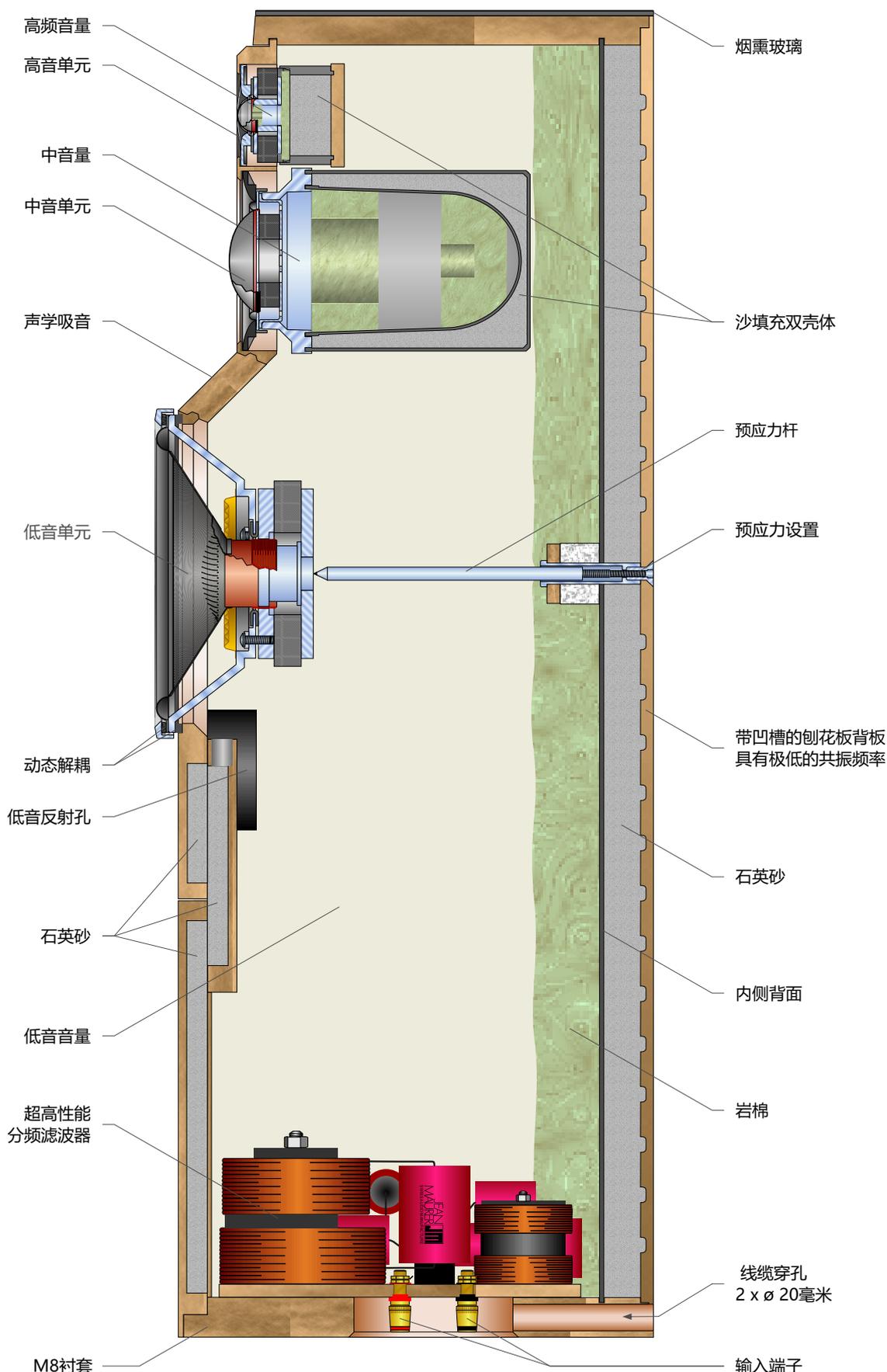
这两条通道（中频和低频）的反应能量也必须认真对待。

在这两种情况下，石英砂的质量将稳定它们，正如扬声器后部用于低音的沙子所做的那样。

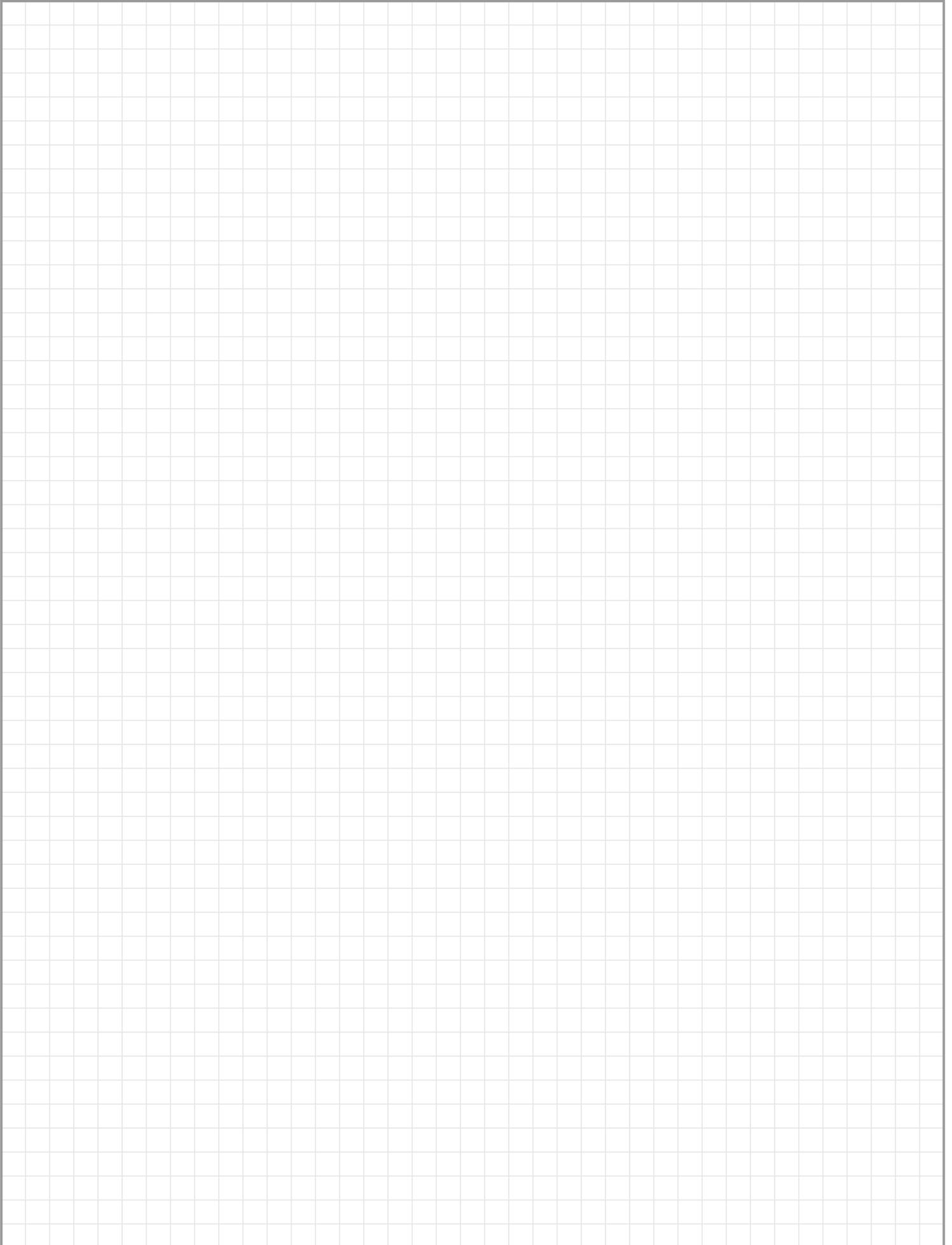


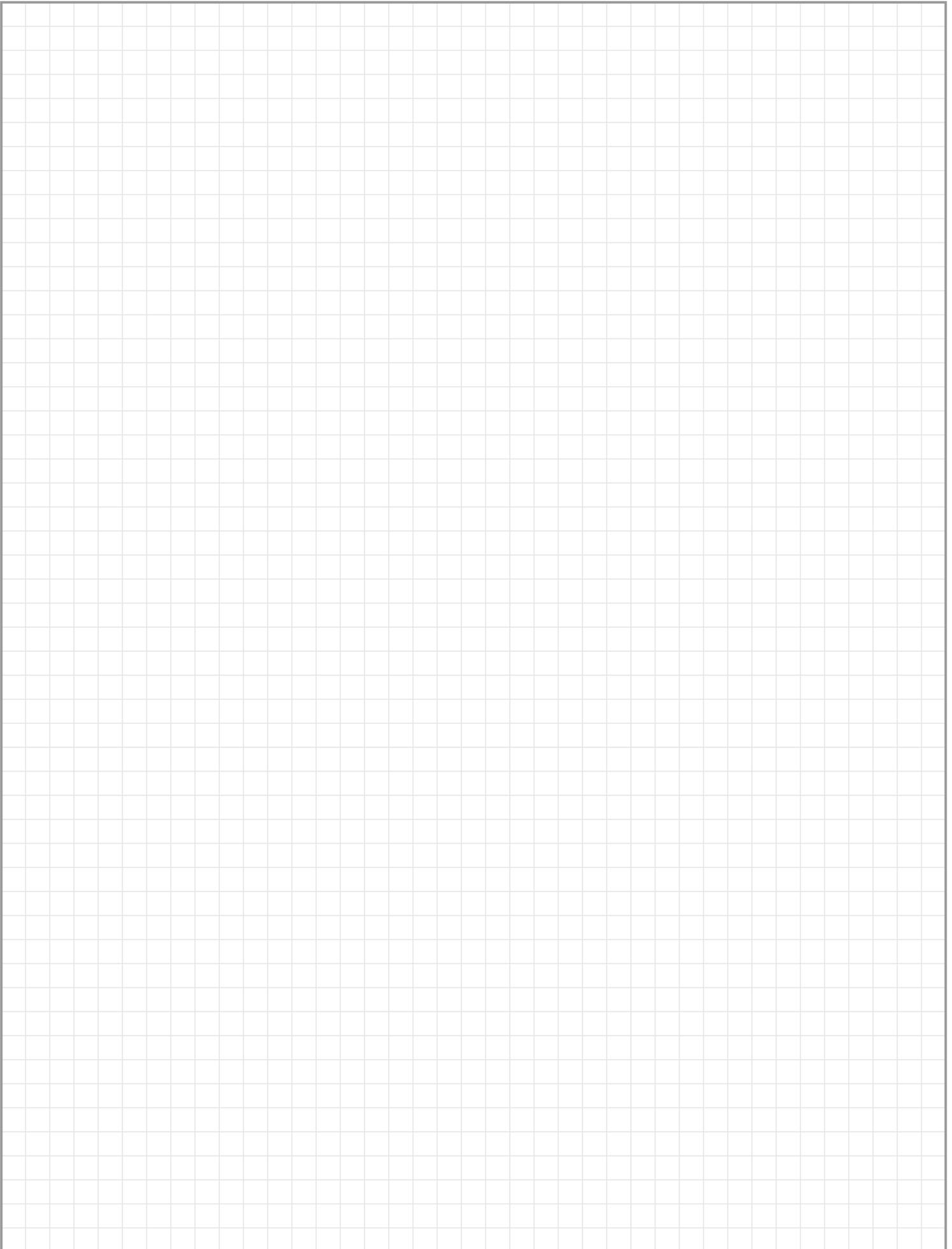
中音扬声器，配备MD75-3换能器

能量吸收型扬声器箱体



JM 370F 声学箱体剖面图





Swiss manufacturer
of exceptional loudspeakers
and tube amplifiers

www.jeanmaurer.ch

Jean Maurer Swiss Audio Manufacture SA
Rue du Chêne 17
CH-1170 Aubonne

+41 21 808 50 60 | info@jeanmaurer.ch | www.jeanmaurer.ch