IR from：

<https://www.openair.hosted.york.ac.uk/?page_id=459>

<https://www.openair.hosted.york.ac.uk/?page_id=494>

https://www.openair.hosted.york.ac.uk/?page\_id=502

Input from：<https://freesound.org/people/mudlogger/sounds/782949/>

IR原理：当你把多个脉冲响应（IR）“混合”在一起，其实是在合成一个新的、综合了各个空间特性的**线性时不变系统**（LTI 系统）的冲激响应。原理分两步来看：

**1. 脉冲响应（IR）与卷积的本质**

* **脉冲响应**：在声学上，IR 记录了一个空间或设备对“理想冲激声”（极短的爆破声、扫频信号…）的完整输出，包括直接声、早期反射、漫反射尾巴。
* **卷积操作**：把任意输入信号 x(t)x(t)x(t)（你的敲击声、DDSP 声景）与 IR h(t)h(t)h(t) 做卷积

y(t)=(x∗h)(t)=∫−∞∞x(τ) h(t−τ) dτ y(t) = (x \* h)(t) = \int\_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\,h(t - \tau)\,d\tauy(t)=(x∗h)(t)=∫−∞∞​x(τ)h(t−τ)dτ

就相当于让声音“发射”到那个空间里，并随着时间被空间反射、散射，最终形成带有“空间感”的输出。

**2. 混合多个 IR（平均法）的原理**

* 当你有多个不同空间的 IR，分别记作 h1(t),h2(t),…,hn(t)h\_1(t), h\_2(t), \dots, h\_n(t)h1​(t),h2​(t),…,hn​(t)，简单平均

hmix(t)=1n∑i=1nhi(t) h\_{\text{mix}}(t) = \frac{1}{n}\sum\_{i=1}^n h\_i(t)hmix​(t)=n1​i=1∑n​hi​(t)

就等价于构造了一个新的 LTI 系统，它在每个时间点的冲激响应是原各系统响应的“加权叠加”。

* 对任意输入 x(t)x(t)x(t) 做一次卷积

ymix(t)=x∗(1n∑ihi)=1n∑i(x∗hi)(t) y\_{\text{mix}}(t) = x \* \bigl(\tfrac1n\sum\_i h\_i\bigr) = \tfrac1n\sum\_i (x \* h\_i)(t)ymix​(t)=x∗(n1​i∑​hi​)=n1​i∑​(x∗hi​)(t)

因此就能**一次性**获得各个空间特性的**叠加效果**：声音含有大理石大厅的回声、洞穴的回环、教堂的混响尾巴……听感上像是在一个“超现实”的混合空间里。

**为什么听起来平滑统一？**

* 线性系统的**叠加性**：卷积对加法操作是可交换／可分配的，先平均再卷积，等同于分别卷积后再平均。
* 平均后的 IR 里，各个空间的早期反射和尾巴会在时间线上彼此叠加融合，消除了逐次进入不同空间的“阶梯式”变化，带来一个**整体而统一**的空间印象。

**拓展思考**

* **加权平均**：你可以给不同 IR 不同权重，例如 0.7\*h1 + 0.2\*h2 + 0.1\*h3，突出某个空间特性。
* **卷积链**：串联卷积相当于把空间排成队，声波先后穿过每个空间，尾音会越来越长、更分层；混合卷积则只做一次，尾音长度为各 IR 尾巴的平均长度。

**总结**：

* **混合 IR** = 构造了一个全新的“虚拟空间”冲激响应
* 对输入做一次卷积，就能一次性得到多重空间感的融合效果，且计算成本只比单一 IR 多一点。

这样，你就能灵活地把不同的洞穴、教堂、水下空间特性融合到一条声音里。