

# 了解麦克风灵敏度

作者: Jerad Lewis

灵敏度, 即模拟输出电压或数字输出值与输入压力之比, 对任何麦克风来说都是一项关键指标。在输入已知的情况下, 从声域单元到电域单元的映射决定麦克风输出信号的幅度。

本文将探讨模拟麦克风与数字麦克风在灵敏度规格方面的差异, 如何根据具体应用选择灵敏度最佳的麦克风, 同时还会讨论为什么增加一位(或更多)数字增益可以增强麦克风信号。

## 模拟与数字

麦克风灵敏度一般在 94 dB 的声压级(SPL)(或者 1 帕(Pa)压力)下, 用 1 kHz 正弦波进行测量。麦克风在该输入激励下的模拟或数字输出信号幅度即是衡量麦克风灵敏度。该基准点只是麦克风的特性之一, 并不代表麦克风性能的全部。

模拟麦克风的灵敏度很简单, 不难理解。该指标一般表示为对数单位 dBV (相对于 1 V 的分贝数), 代表着给定 SPL 下输出信号的伏特数。对于模拟麦克风, 灵敏度(表示为线性单位 mV/Pa)可以用对数表示为分贝:

$$Sensitivity_{dBV} = 20 \times \log_{10} \left( \frac{Sensitivity_{mV/Pa}}{Output_{AREF}} \right)$$

其中  $Output_{AREF}$  为 1000 mV/Pa (1 V/Pa)参考输出比。

有了该信息和正确的前置放大器增益, 则可轻松将麦克风信号电平匹配至电路或系统其他部分的目标输入电平。图 1 显示了如何设置麦克风的峰值输出电压( $V_{MAX}$ ), 以匹配ADC的满量程输入电压( $V_{IN}$ ), 其增益为  $V_{IN}/V_{MAX}$ 。例如, 以 4 (12 dB)的增益, 可将一个最大输出电压为 0.25 V 的ADMP504匹配至一个满量程峰值输入电压为 1.0 V 的ADC。

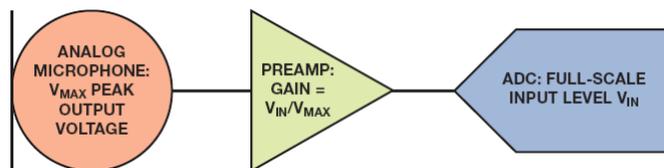


图 1. 模拟麦克风输入信号链, 以前置放大器使麦克风输出电平与 ADC 输入电平相匹配。

数字麦克风的灵敏度(单位为 dBFS, 相对于数字满量程的分贝数)则并非如此简单。单位的差异表明, 数字麦克风与模拟麦克风的灵敏度在定义上存在细微差异。对于提供电压输出的模拟麦克风, 输出信号大小的唯一限制实际上是系统电源电压的限制。虽然对多数设计来说并不实用, 但从物理本质上讲, 模拟麦克风完全可以拥有 20 dBV 的灵敏度, 其中用于基准电平输入信号的输出信号为 10 V。只要放大器、转换器和其他电路能支持所需的信号电平, 完全可以实现这一水平的灵敏度。

数字麦克风的灵敏度没有这样灵活, 而只取决于一个设计参数, 即最大声学输入。只要将满量程数字字映射到麦克风的最大声学输入(实际上, 这是唯一有用的映射), 则灵敏度一定是该最大声学信号与 94 dB SPL 参考信号之差。因此, 如果数字麦克风的最大 SPL 为 120 dB, 则其灵敏度为 -26 dBFS (94 dB - 120 dB)。除非将最大声学输入降低相同的量, 否则无法通过调整设计使给定声学输入的数字输出信号变得更高。

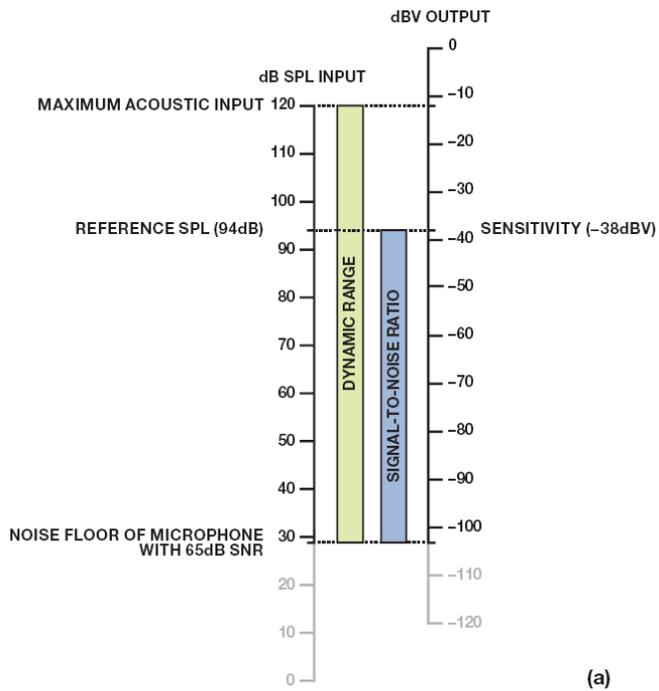
对于数字麦克风, 灵敏度表示为 94 dB SPL 输入所产生的输出占满量程输出的百分比。数字麦克风的换算公式为:

$$Sensitivity_{dBFS} = 20 \times \log_{10} \left( \frac{Sensitivity_{\%FS}}{Output_{DREF}} \right)$$

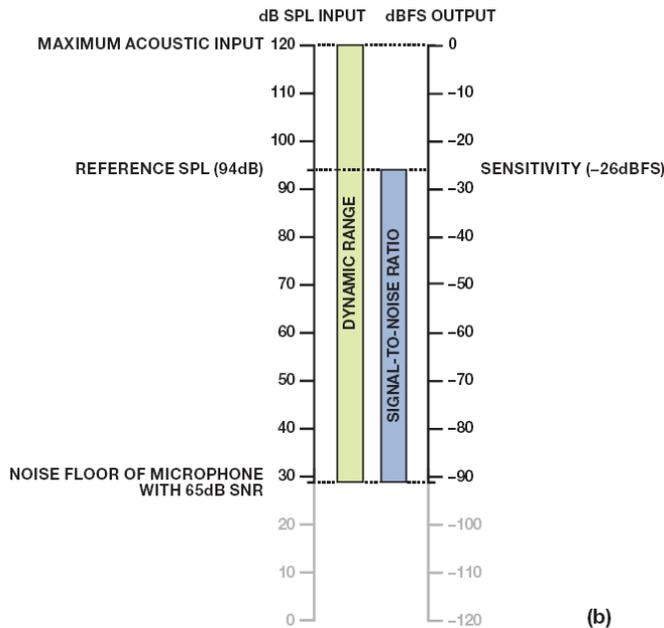
其中  $Output_{DREF}$  为满量程数字输出电平。

现在来比较最后一个非常难懂的地方, 数字和模拟麦克风在峰值电平和均方根电平的使用上并不一致。麦克风的声学输入电平(单位为 dB SPL)始终为均方根测量值, 与麦克风的类型无关。模拟麦克风的输出以 1 V rms 为参考, 因为均方根测量值更常用于比较模拟音频信号电平。然而, 数字麦克风的灵敏度和输出电平却表示为峰值电平, 因为它们是以满量程数字字(即峰值)为参考的。一般来说, 在配置可能依赖于精确信号电平的下游信号处理时, 必须记住用峰值电平指定数字麦克风输出的惯例。例如, 动态范围处理器(压缩器、限幅器和噪声门)通常基于均方根信号电平来设置阈值, 因此, 必须通过降低 dBFS 值从峰值到均方根值按比例调整数字麦克风的输出。对于正弦输入, 其均方根电平比峰值电平低 3 dB (即  $(FS/\sqrt{2})$  的对数测量); 对于更加复杂的信号来说, 均方根电平与峰值电平之间的差值可能与此不同。例如, ADMP421 (提供脉宽调制(PDM)数字输出的 MEMS 麦克风)的灵敏度为 -26 dBFS。一个 94 dB SPL 正弦输入信号将产生 -26 dBFS 的峰值输出电平, 或 -29 dBFS 的均方根电平。

由于数字麦克风和模拟麦克风的输出采用不同的单位, 因此, 对两类麦克风进行比较时可能会使人难以理解; 但二者在声域中却有一个共同的测量单位, SPL。一种麦克风可能为模拟电压输出, 另一种为调制 PDM 输出, 还一种为  $I^2S$  输出, 但它们的最大声学输入与信噪比(SNR, 即 94 dB SPL 参考电平与噪声电平之差)却是可以直接比较的。以声域而非输出格式为参考, 这两个规格为比较不同麦克风提供了一种便利的方式。图 2 显示了给定灵敏度下, 模拟麦克风和数字麦克风的声学输入信号与输出电平之间的关系。图 2(a)所示为 ADMP504 模拟麦克风, 其灵敏度为 -38 dBV, 信噪比为 65 dB。相对于左侧的 94 dB SPL 基准点改变灵敏度时, 结果会导致以下情况: 向上滑动 dBV 输出条将降低灵敏度, 向下滑动输出条则会提高灵敏度。



(a)



(b)

图 2. (a)将声学输入电平映射到电压输出电平（模拟麦克风）；  
(b)将声学输入电平映射到数字输出电平（数字麦克风）。

图 2(b)所示为ADMP521数字麦克风，其灵敏度为-26 dBFS，信噪比为 65 dB。该数字麦克风输入到输出电平映射示意图表明，调整该麦克风的灵敏度会破坏最大声学输入与满量程数字字之间的映射。与灵敏度相比，SNR、动态范围、电源抑制比、THD等规格能更好地显示麦克风的性能。

### 选择灵敏度和设置增益

高灵敏度麦克风并非始终优于低灵敏度麦克风。虽然灵敏度可以显示麦克风的特性，但不一定能体现麦克风的性能。麦克风噪声电平、削波点、失真和灵敏度之间的平衡决定了麦克风是否适用于特定应用。高灵敏度麦克风在模数转换之前需要的前置放大器增益可能较少，但其在削波前的裕量可能少于低灵敏度麦克风。

在手机等近场应用中，麦克风接近声源，灵敏度较高的麦克风更可能达到最大声学输入，产生削波现象，最后导致失真。另一方面，较高的灵敏度可能适合远场应用（如会议电话和安保摄像头），因为在这类应用中，随着麦克风与声源之间距离的增加，声音会被衰减。图 3 显示了麦克风与声源之间的距离会对 SPL 产生什么影响。与声源的距离每增加一倍，声学信号电平将下降 6 dB（一半）。

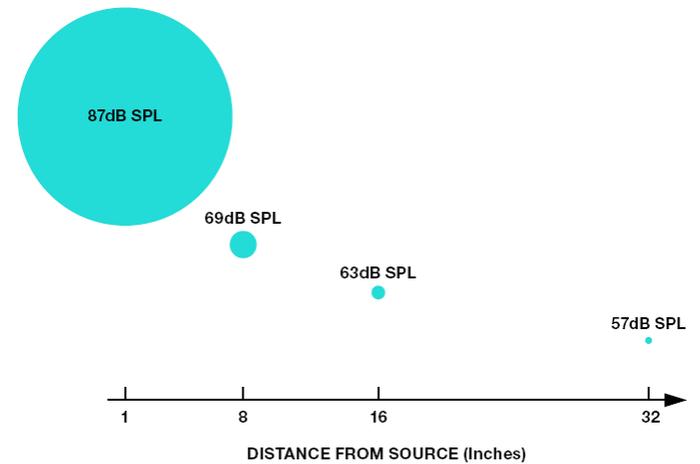


图 3. 随着与声源距离的增加，麦克风声压电平将下降。

作为参考，图 4 显示了各种声源的典型 SPL，从安静的录音棚（10 dB SPL 以下）到痛阈（130 dB SPL 以下），痛阈指声音给正常人带来痛苦的点。麦克风很少能整个覆盖——甚至大致覆盖——该范围，因此，针对所需的 SPL 范围选择正确的麦克风是一个重要的设计决定。应利用灵敏度规格，使麦克风在整个目标动态范围内的输出信号电平与音频信号链的常见信号电平相匹配。

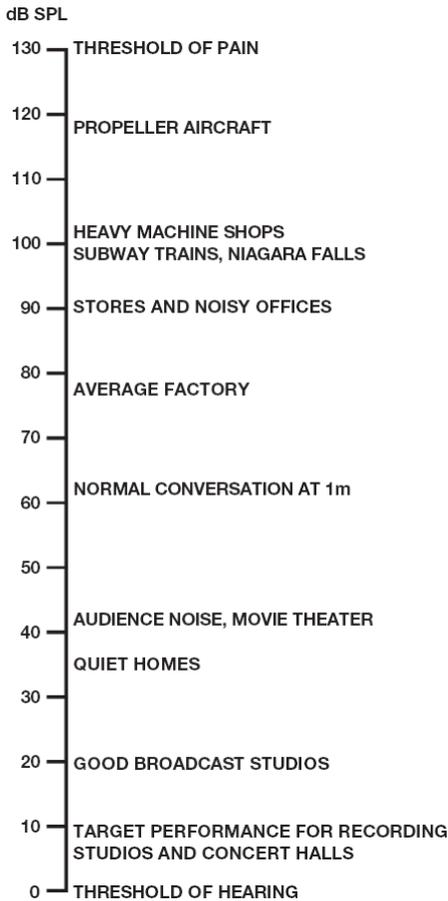


图 4. 各种声源的声压电平。<sup>1</sup>

模拟麦克风的灵敏度范围较宽。有些动态麦克风的灵敏度可能低至-70 dBV。有些电容麦克风模块集成前置放大器，因而具有极高的灵敏度，达到-18 dBV。多数模拟驻极体麦克风和 MEMS 麦克风的灵敏度在-46 dBV 至-35 dBV (5.0 mV/Pa 至 17.8 mV/Pa) 之间。这种水平代表着本底噪声 (ADMP504 和 ADMP521 MEMS 麦克风可能低至 29 dB SPL) 与最大声学输入 (典型值约为 120 dB SPL) 之间的良好折衷。模拟麦克风的灵敏度可以在前置放大器电路中调节，该电路通常与传感器元件一起集成在封装中。

尽管数字麦克风的灵敏度似乎缺乏灵活性，但可通过数字处理器中的增益轻松调节麦克风信号的电平。对于数字增益，只要处理器的位数足以完全表示原始麦克风信号的动态范围，就不会导致信号的噪声电平降低。在模拟设计中，每个增益级都会向信号中引入一些噪声；需要系统设计师来保证每个增益级的噪声足够低，以避免其注入噪声而降低音频信号。例如，我们可以看看 ADMP441，这是一款数字(I<sup>2</sup>S)输出麦克风，最大 SPL 为 120 dB (灵敏度为-26 dBFS)，等效输入噪声为 33 dB SPL (61 dB SNR)。该麦克风的动态范围为其能可靠重现的最大信号 (最大 SPL) 与最小信号 (本底噪声) 之间的差值 (ADMP441 为：120 dB - 33 dB = 87 dB)。该动态范围可用一个 15 位数据字再现。当数字字中的数据发生 1 位移位时，信号电平会出现 6 dB 移位。因此，即便是动态范围为 98 dB 的 16 位音频处理器也可使用 11 dB 的增益或衰减，而不会影响原始动态范围。请

注意，在许多处理器中，数字麦克风的最大声学输入被映射到 DSP 的内部满量程电平。在这种情况下，增加任意增益都会使动态范围等量下降，进而降低系统的削波点。以 ADMP441 为例，在一个满量程以上无裕量的处理器中，增加 4 dB 的增益会导致系统对 116 dB SPL 的信号削波。

图 5 所示为一个数字麦克风，其提供 I<sup>2</sup>S 或 PDM 输出并直接 与一个 DSP 相连。在该信号链中，不需要使用中间增益级，因为麦克风的峰值输出电平已经与 DSP 的满量程输入字相匹配。

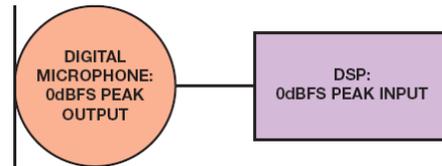


图 5. 直接 与一个 DSP 相连的数字麦克风输入信号链。

## 结束语

本文说明了如何理解麦克风的灵敏度规格，如何将其应用到系统的增益级中，同时解释了虽然灵敏度与 SNR 相关，但并不像 SNR 一样可以体现麦克风的质量的原因所在。无论是用模拟麦克风还是用数字 MEMS 麦克风进行设计，本文都有助于设计师选择最适合具体应用的麦克风，从而发挥麦克风的最大潜能。

诚挚邀请各位访问 [EngineerZone](http://www.analog.com/Community/ADICompanyCommunity) 上的 ADI 公司社区，就麦克风灵敏度发表高见。

## 参考文献

- “Designing with MEMS Microphones.” [http://ez.analog.com/community/ask\\_the\\_expert/archived/mems-microphones](http://ez.analog.com/community/ask_the_expert/archived/mems-microphones).
- Lewis, Jerad. *AN-1112 Application Note. Microphone Specifications Explained*. Analog Devices, 2011.
- “MEMS Microphones.” <http://www.analog.com/zh/audiovideo-products/mems-microphones/products/index.html>.

<sup>1</sup>John Eargle, “The Microphone Book,” Elsevier/Focal Press, 2004.

## 作者简介

**Jerad Lewis** [[jerad.lewis@analog.com](mailto:jerad.lewis@analog.com)] 是 ADI 公司的一名 MEMS 麦克风应用工程师。他毕业于宾州大学，获得电气工程学士学位，并于 2001 年加盟公司。之后，Jerad 一直负责为各种音频 IC 提供支持，包括 SigmaDSP、转换器和 MEMS 麦克风。他目前在宾州大学攻读工学硕士学位。

