

Application Note

如何测量运算放大器的总谐波失真和 THD + N 的基本原理



Chris Featherstone

摘要

本应用手册讨论了如何测量运算放大器的总谐波失真加噪声 (THD + N)、如何解读测量结果以及 THD + N 的基本原理。

内容

1 简介.....	3
2 违反线性工作范围.....	5
3 如何测量运算放大器的 THD + N.....	7
3.1 同相测量.....	8
3.2 反相测量.....	12
3.3 观察结果.....	16
3.4 解读 THD + N 曲线.....	17
4 总结.....	18
5 参考文献.....	19
6 附录.....	20

插图清单

图 1-1. 理想缓冲器放大器.....	3
图 1-2. 1V 峰值振幅 1kHz 正弦波的理想 FFT.....	3
图 1-3. 真实 FFT.....	4
图 2-1. 同相放大器.....	5
图 2-2. 测得的输出 FFT.....	5
图 2-3. 有削波输出的同相放大器.....	6
图 2-4. 测得的输出 FFT.....	6
图 3-1. 同相缓冲器失真测试电路.....	8
图 3-2. 运算放大器 THD + N 增益到高于失真分析仪本底噪声.....	8
图 3-3. 信号增益.....	9
图 3-4. THD + N 增益.....	10
图 3-5. 同相缓冲器失真测量：输出参考.....	11
图 3-6. 同相缓冲器 THD + N (%) 比与输出振幅间的关系.....	11
图 3-7. 反相失真测试电路.....	12
图 3-8. 反相信号增益.....	13
图 3-9. 反相 THD + N 增益.....	13
图 3-10. 反相失真测量：输出参考.....	14
图 3-11. 反相 THD + N (%) 比与输出幅度间的关系.....	15
图 3-12. 反相和同相 THD + N (dB).....	16
图 3-13. 解读 THD + N 比与输出幅度间关系曲线.....	17
图 6-1. 无 R_A 的环路参数.....	20
图 6-2. 有 R_A 的环路参数.....	21

表格清单

表 3-1. 测试电路和应用电路增益值.....	10
表 3-2. 测试电路和应用电路增益值.....	14

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

在理想放大器电路中，运算放大器可以准确输出目标信号，而不改变相位或波形形状。

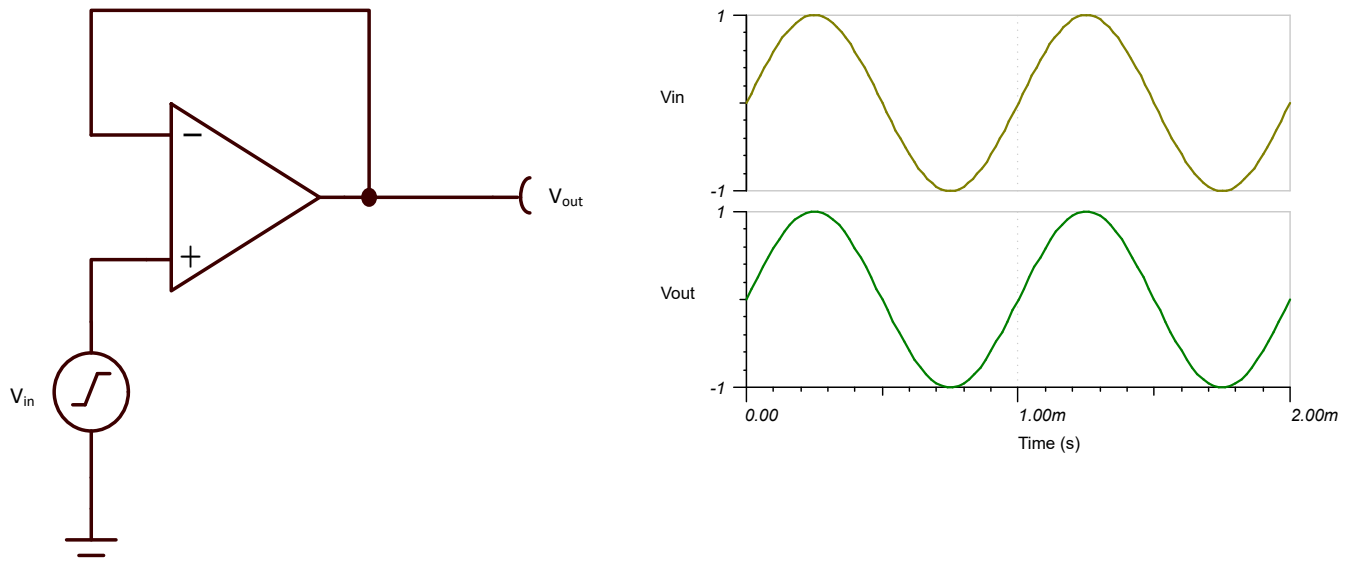


图 1-1. 理想缓冲器放大器

快速傅里叶变换 (FFT) 用于将信号转换为其频谱分量，并提供信号的频率信息。图 1-2 展示了理想放大器输出中峰值振幅为 1V 的纯 1kHz 正弦波的 FFT。FFT 仅显示基频而不显示噪声。这是理想情况。除了 1kHz 基频之外，FFT 也没有显示其他频率分量，这表明放大器没有使输入信号失真。

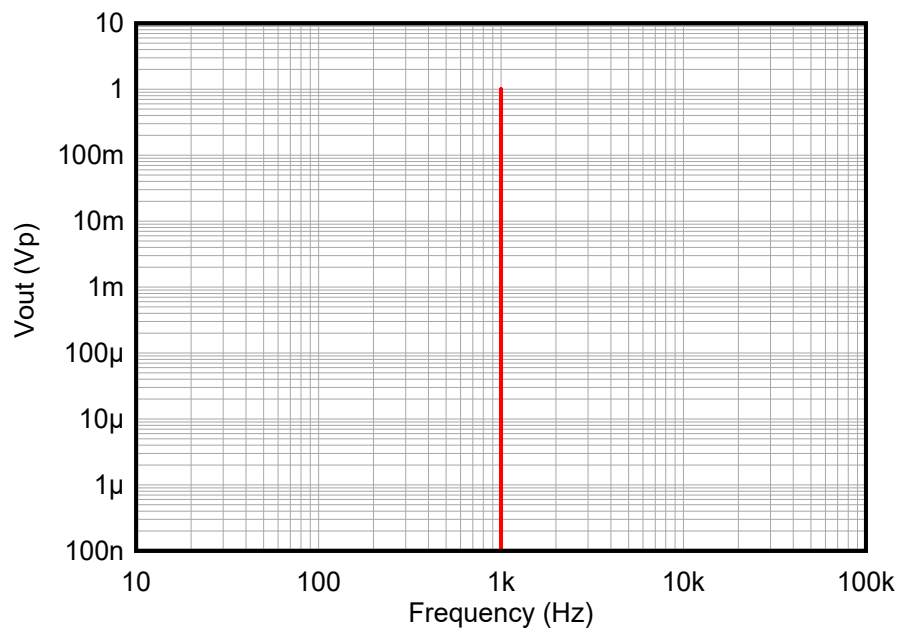


图 1-2. 1V 峰值振幅 1kHz 正弦波的理想 FFT

实际的放大器具有非线性特征和限制，它们会使输入信号失真，从而增加谐波和噪声，如图 1-3 中的 FFT 所示。FFT 是在配置为 1V/V 增益的放大器输出端进行的测量。Y 轴的单位为伏特均方根 (V_{RMS})。放大器的输入信号是幅度为 $6V_{RMS}$ 的 1kHz 正弦波。在图 1-3 中可以看到信号谐波，它们是 1kHz 基频的整数倍。信号谐波在 2kHz、3kHz 和 4kHz 突出显示，但高阶信号谐波在 10kHz 以下也能看到。测试设备和电路电源连接到 120VAC (交流电压) 60Hz 电源插座。FFT 中还包含 60Hz 电力线周期和 60Hz 整数倍的电力线频率。在音频电路中，60Hz 在耦合到信号链时通常被描述为听起来像嗡嗡声。

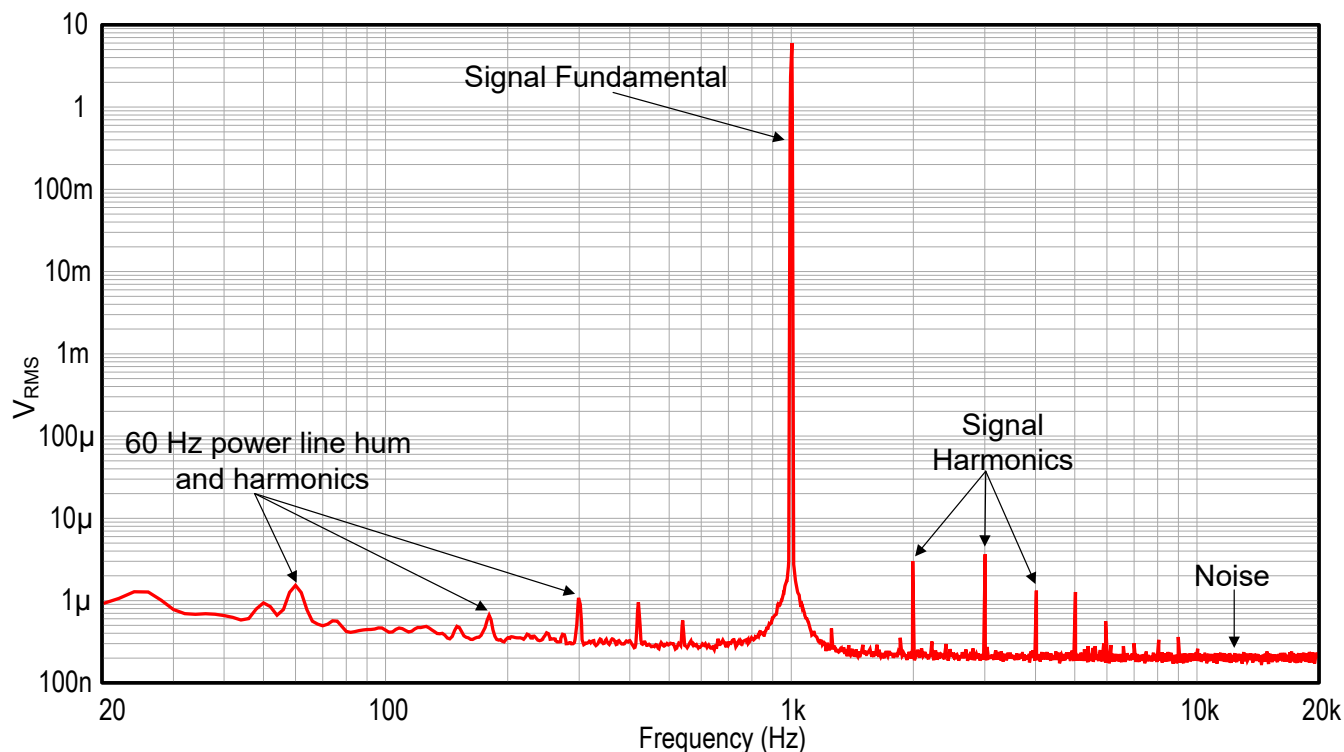


图 1-3. 真实 FFT

总谐波失真加噪声是一种测量值，可提供电路准确输出输入信号的能力的品质因数。THD + N 是音频系统中的一个重要测量值。具有低 THD + N 的音频系统可以更准确地表达音频的声音效果。方程式 1 通过数学方法展示了 THD + N 定义为谐波功率测量值总和与基频功率之比。

$$THD + N \left(\% \right) = 100\% \times \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} (V_i^2 + V_n^2)}{V_f^2}} \quad (1)$$

其中：

- V_i 基波第 i 次谐波的 RMS 电压 ($i=2,3,4,\dots$)
- V_n 电路的 RMS 噪声电压
- V_f 基波的 RMS 电压

2 违反线性工作范围

图 2-1 展示了采用同相放大器配置的应用电路。电路的增益为 $2 \frac{V}{V}$ 。所有条件都在 OPA1656 的线性工作区域内。

图 2-2 展示了与图 2-1 中所示输出信号对应的 FFT。图 2-2 中显示的谐波非常低，因此谐波失真非常低。

OPEN-LOOP GAIN		Test Conditions	Min	Max	Unit
A_{ol}	Open-loop voltage gain	$(V_-) + 1.3 \text{ V} \leq VO \leq (V_+) - 1.3 \text{ V}$ $R_L = 600 \Omega$	134	150	dB

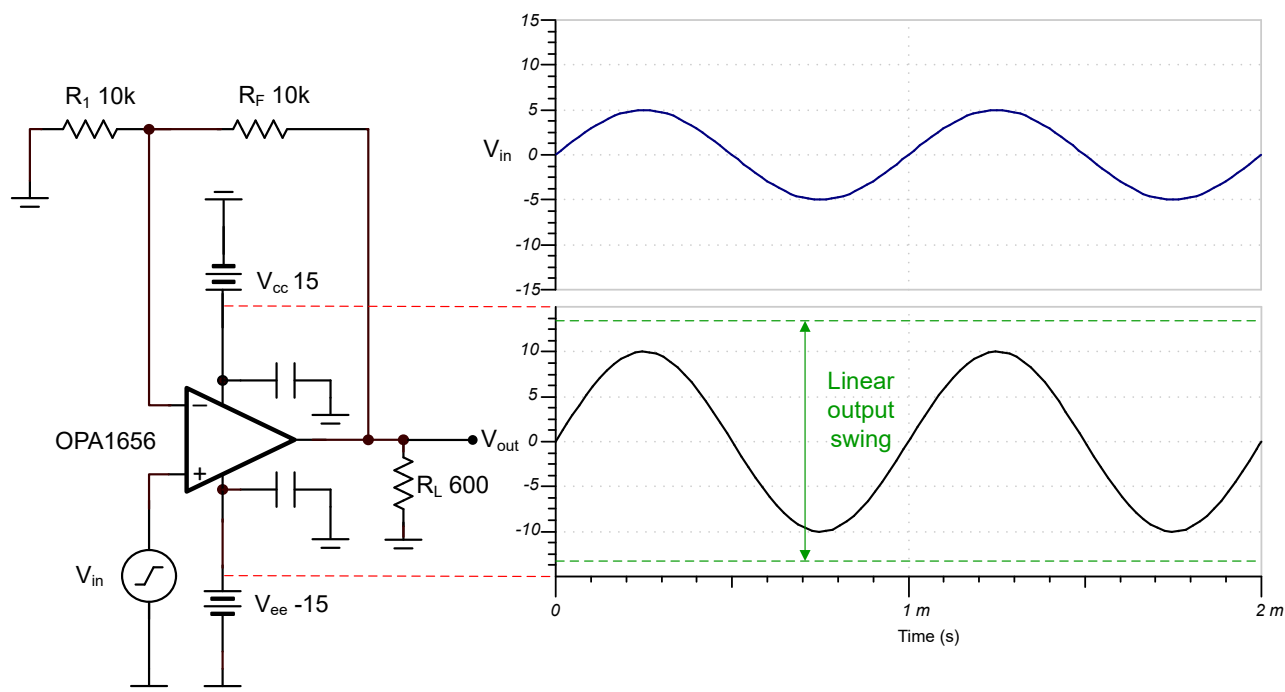


图 2-1. 同相放大器

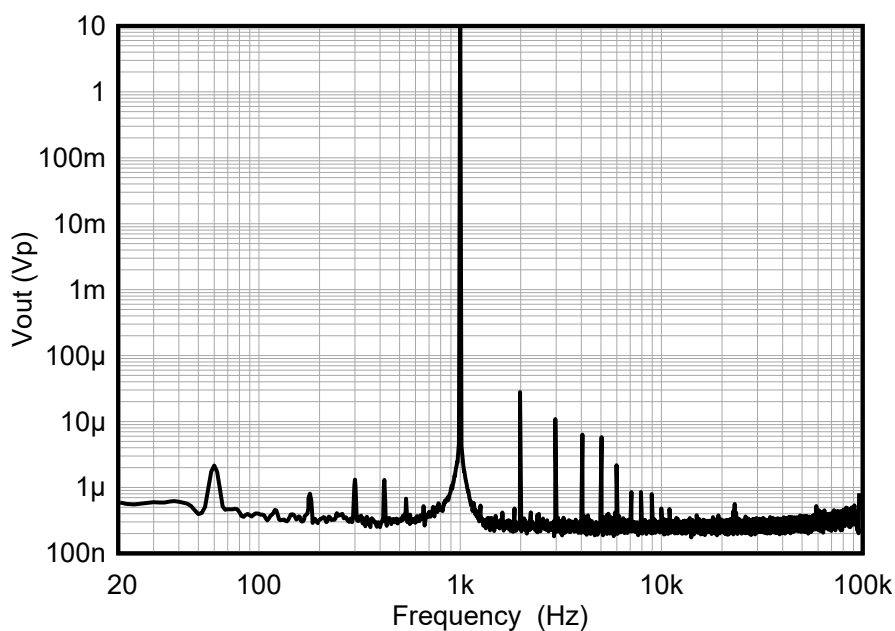


图 2-2. 测得的输出 FFT

违反任何放大器的线性输出电压摆幅都会大大增加失真。图 2-3 展示了一个违反 OPA1656 线性输出电压规范的示例。峰值为 7.5V 的信号

施加到输入端。电路的增益为 $2 \frac{V}{V}$ 。输出受电源电压限制，因此削波至 15V 以下。图 2-4 展示了测得的输出信号 FFT，并展示了在不满足线性工作条件时失真如何大幅增加。

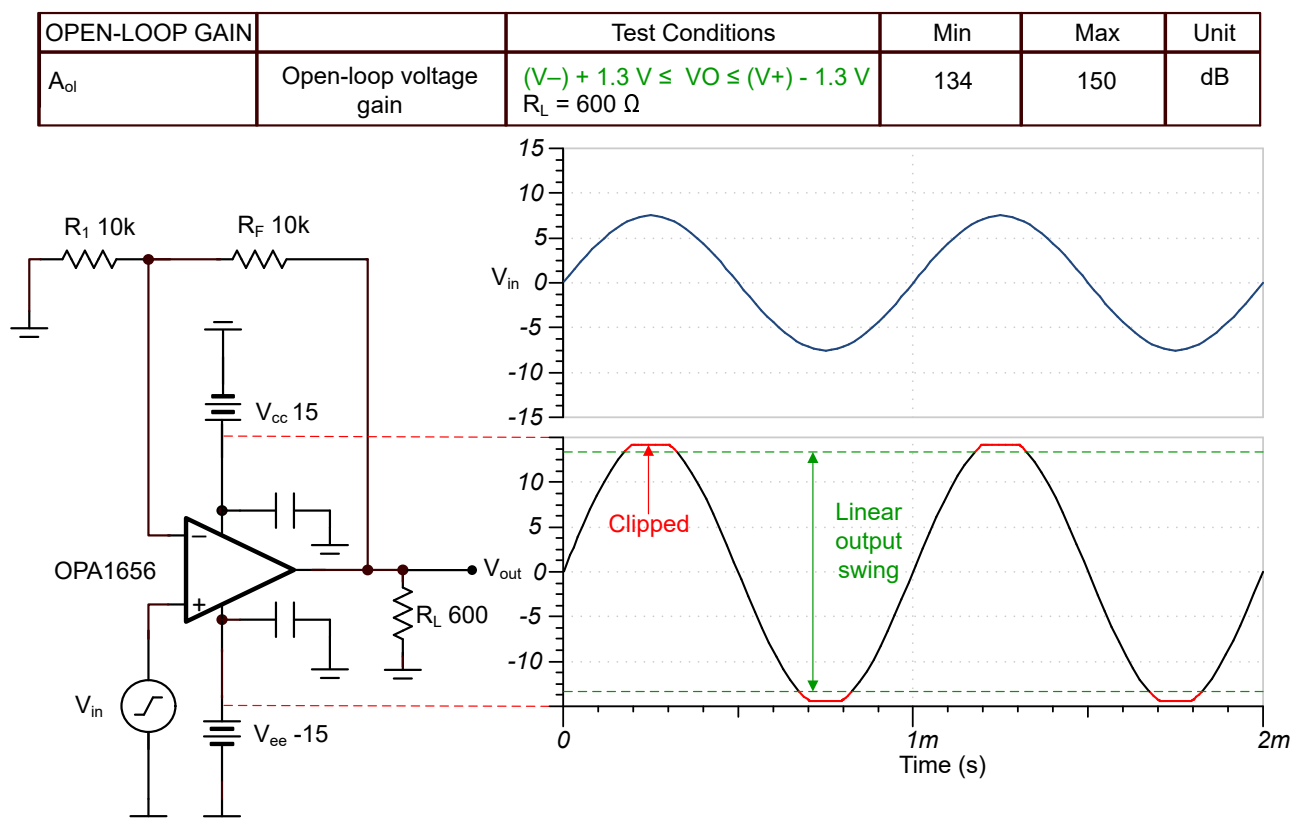


图 2-3. 有削波输出的同相放大器

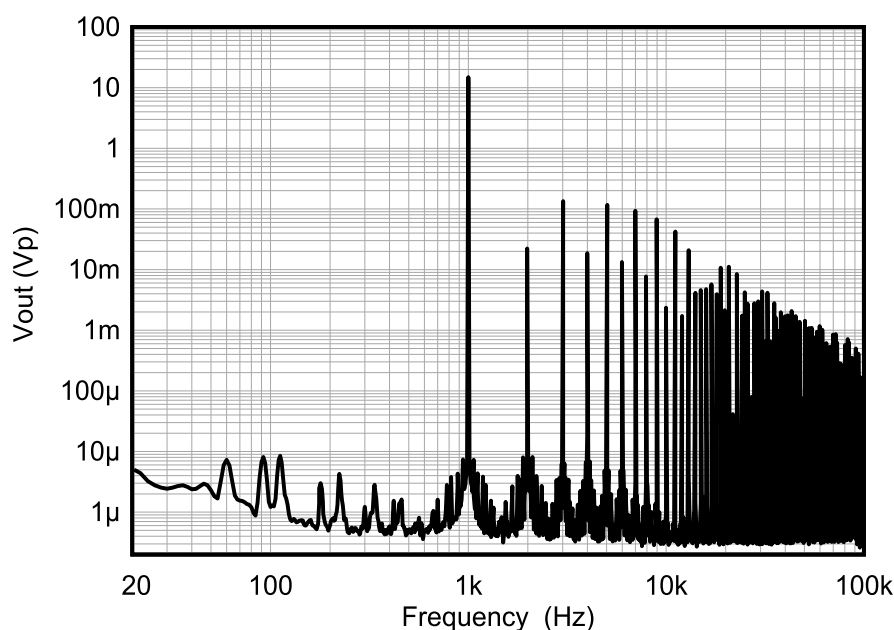


图 2-4. 测得的输出 FFT

3 如何测量运算放大器的 THD + N

运算放大器失真可视为一种内部误差源，可通过观察输入失调电压 V_{os} 的变化以及 V_{os} 的这些变化如何改变目标信号 V_{in} 来测量。放大器的 V_{os} 是反相输入和同相输入之间的差值。在放大器的线性区域内工作时， V_{os} 的波动很小。可直接或间接导致运算放大器输入 (V_{os}) 发生变化的示例包括但不限于温漂、共模和电源电压波动、压摆率以及开环增益 (A_{ol}) 下降。 A_{ol} 与频率相关。忽略 A_{ol} 频率相关性，[方程式 2](#) 展示了 V_{os} 、 V_{out} 和 A_{ol} 之间的关系。

$$A_{ol} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{os}} \quad (2)$$

[方程式 3](#) 可通过重新排列 [方程式 2](#) 得到。从[方程式 3](#) 中可以观察到两点， $\Delta V_{os} = 0V |_{A_{ol} \rightarrow \infty}$ 和

$\Delta V_{os} = \infty |_{A_{ol} \rightarrow 0}$ 。这些观察结果表明， A_{ol} 负责纠正放大器误差。具有高开环增益的器件产生的 V_{os} 误差较小。理论上，运算放大器的虚拟短路是指反相和同相端的电势相等，即使它们之间没有连接。以下各节在应用叠加原理时将使用 $\Delta V_{os} = 0V |_{A_{ol} \rightarrow \infty}$ 这一假设。

$$\Delta V_{os} = \frac{\Delta V_{out}}{A_{ol}} \quad (3)$$

TI 精密运算放大器产生的失真通常低于市售失真分析仪的测量限值。不过，可以使用特殊的测试电路来扩展测量功能。

[图 3-1](#) 展示了一个将运算放大器失真放大到比运算放大器正常产生的失真高出约 $101 \frac{V}{V}$ 倍 (约 40dB) 的电路。[图 3-2](#) 展示了 OPA1656 的 THD + N 低于失真分析仪的理论本底噪声。测试电路的目的是将运算放大器的 THD + N 增益到失真分析仪本底噪声之上，以测量运算放大器的真实性能。在原本标准同相缓冲器放大器配置中加入 R_A 会改变电路的反馈系数或噪声增益。闭环信号增益 A_{CL} 保持不变，但可用于纠错的反馈降低了 $101 \frac{V}{V}$ ，使分辨率提高了 $101 \frac{V}{V}$ 或 40dB。有关更多详细信息，请参阅[节 6](#)。请注意，应用于运算放大器的输入信号和负载与无 R_A 的传统反馈相同。改变噪声增益时，可以考虑放大器的增益带宽积 (GBW)。设计测试电路噪声增益时，可以使用实用指南。如果放大器 GBW 为 10MHz 或更高，则可以使用的噪声增益为 $101 \frac{V}{V}$ 。GBW 小于 10MHz 的放大器可以使用的噪声增益为 $11 \frac{V}{V}$ 。 R_A 值保持较小，以尽量减少对失真测量和外来热噪声的影响。

3.1 同相测量

图 3-1 展示了用于测量同相缓冲器放大器配置的 THD + N 的测试电路。放大器的输入信号 V_{in} 由发生器输出提供。输入失调电压 V_{os} 和输入电压噪声 V_n 是运算放大器内部的串联误差源。 V_{os} 和 V_n 始终指同相端，并且被放大器配置的噪声增益放大。提到 THD + N 测量时，噪声增益有时称为失真增益或 THD + N 增益，且不等于信号增益。

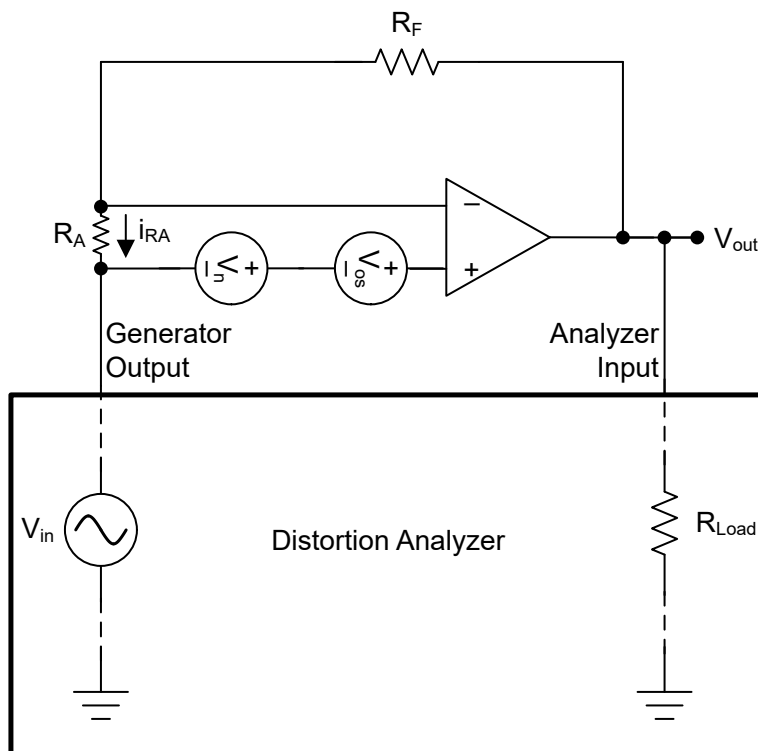


图 3-1. 同相缓冲器失真测试电路

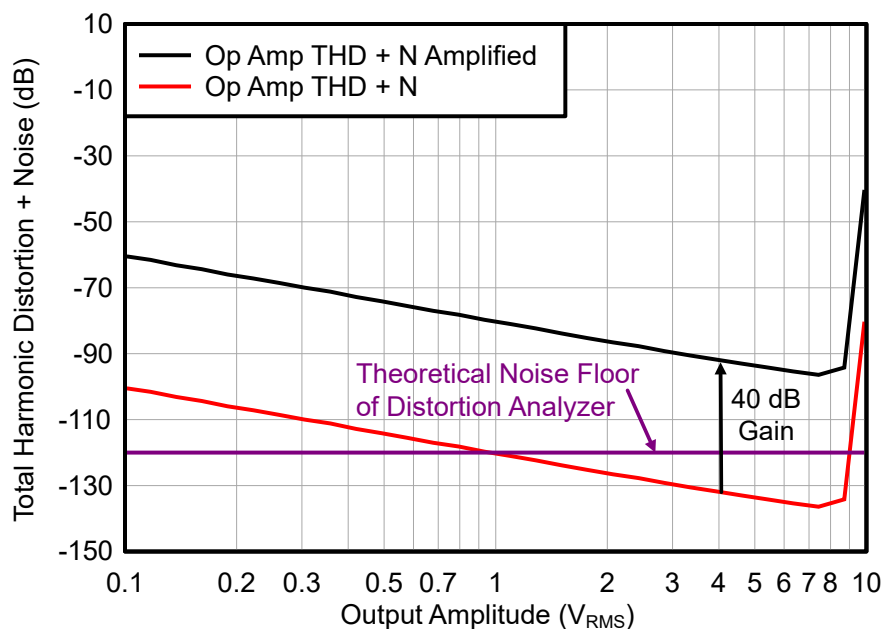


图 3-2. 运算放大器 THD + N 增益到高于失真分析仪本底噪声

叠加用于推导出信号增益和失真增益的单独公式。假设输入失调电压 $V_{os} = 0V$ ，噪声电压 $V_n = 0V$ ，电流 $i_{RA} = 0A$ ，则图 3-1 所示的放大器配置可视为缓冲器，如图 3-3 所示。因此，信号增益为 $1 \frac{V}{V}$ ，输出电压等于输入电压，如方程式 4 所述。移除电阻 R_A 时，假定虚拟短路的概念。应用虚拟短路的概念时，反相端和同相端上的电阻 R_A 两端的电势相等，因此 $i_{RA} = 0A$ ， R_A 被视为开路。

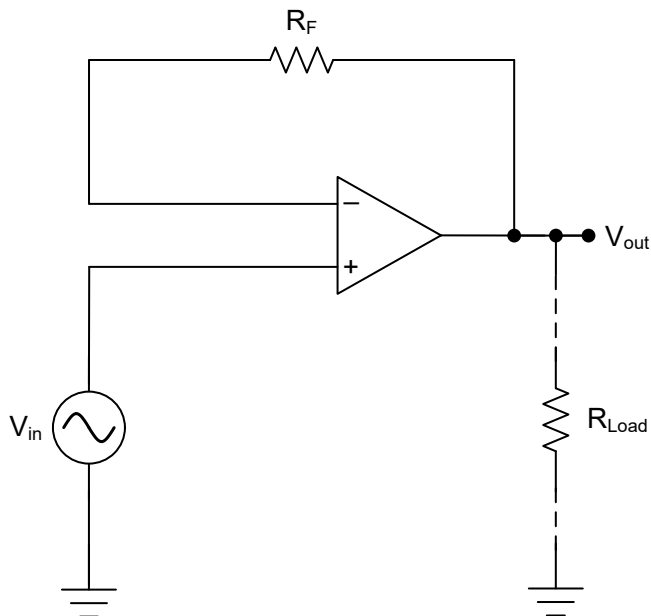


图 3-3. 信号增益

$$V_{out} = V_{in} \quad (4)$$

假设放大器的输入信号 $V_{in} = 0V$ ，则该放大器可视为在同相端施加电压 $V_{os} + V_n$ 的标准同相放大器，如图 3-4 所示。因此，输出端会出现 $V_{os} + V_n$ ，按照我们熟悉的同相增益公式（即 1 加上电阻 R_F 与电阻 R_A 之比）进行放大。方程式 5 描述了 THD + N 增益。

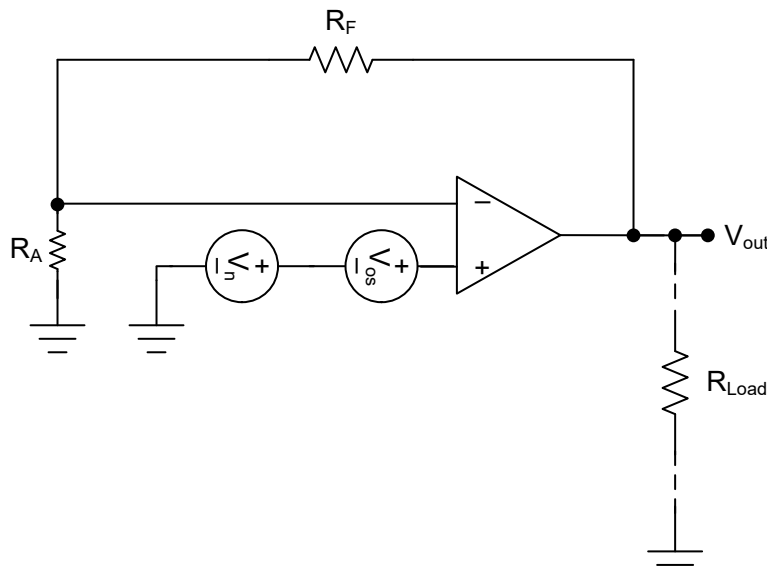


图 3-4. THD + N 增益

$$V_{out} = (V_{os} + V_n) \left(\frac{R_F}{R_A} + 1 \right) \quad (5)$$

在图 3-1 所示测试电路的输出上观察到的信号是 V_{in} 、 V_n 和 V_{os} 的放大组合。将方程式 4 与方程式 5 相结合，得出方程式 6，即图 3-1 所示测试电路的最终增益公式。

$$V_{out} = V_{in} + (V_{os} + V_n) \left(\frac{R_F}{R_A} + 1 \right) \quad (6)$$

典型的同相缓冲器应用电路不包括附加电阻 R_A 。电阻 R_A 添加到测试电路中用于提供额外的增益，从而克服信号分析仪的测量限制。表 3-1 为电阻 R_F 和 R_A 分配值，得出测试电路和应用电路的增益值。分配表 3-1 中的电阻值时，THD + N 增益为 $101 \frac{V}{V}$ （有附加 R_A 电阻）。在典型的同相缓冲器电路中， $R_A = \infty$ ，或者换句话说就是不存在，且 THD + N 增益为 $1 \frac{V}{V}$ 。因此， R_A 额外增加了 $101 \frac{V}{V}$ 或大约 40dB 的失真增益。

表 3-1. 测试电路和应用电路增益值

条件	信号增益	THD + N 增益	R_F	R_A
有 R_A 的信号和 THD + N 增益	$1 \frac{V}{V}$	$101 \frac{V}{V}$	10k Ω	100 Ω
无 R_A 的信号和 THD + N 增益	$1 \frac{V}{V}$	$1 \frac{V}{V}$	10k Ω	∞

图 3-5 展示了测得的 OPA1656 的 THD + N 比，单位为分贝。从测试电路测量值中减去 40dB，代表同相缓冲器电路的实际运算放大器 THD + N。对于本应用手册中进行的测量，失真分析仪的测量带宽为 80kHz。

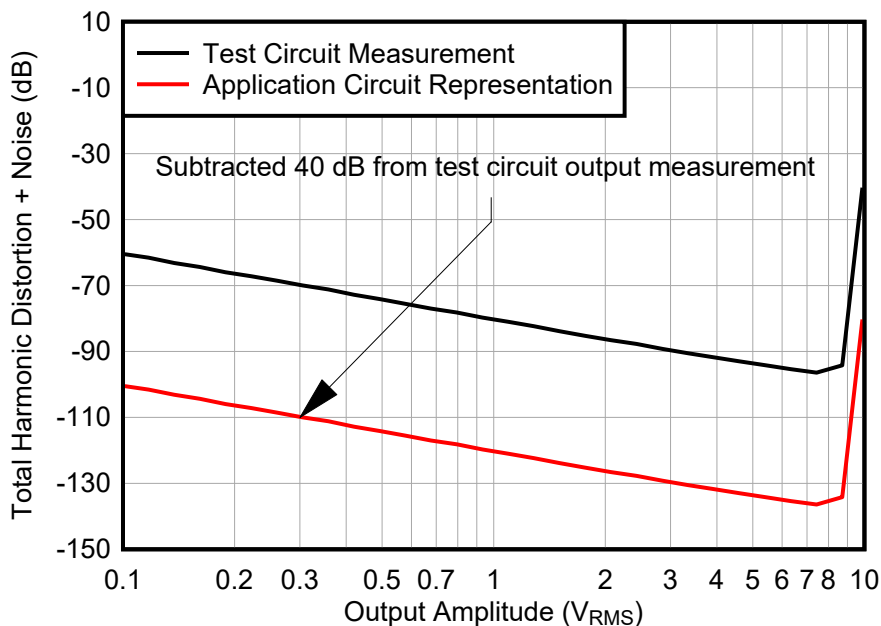


图 3-5. 同相缓冲器失真测量：输出参考

放大器数据表通常以百分比的形式表示 THD + N 比。方程式 7 用于将测量的 THD + N 比从 dB 转换为百分比。

$$THD + N \left(\% \right) = 100 \times 10^{\frac{THD + N (dB)}{20}} \quad (7)$$

图 3-6 展示了常见同相缓冲器配置的 THD + N (%) 比与输出振幅 (V_{RMS}) 间的关系。当输出振幅从 $0.1V_{RMS}$ 扫至 $10V_{RMS}$ 时，对 1kHz 和 20kHz 频率进行了两次独立测量。

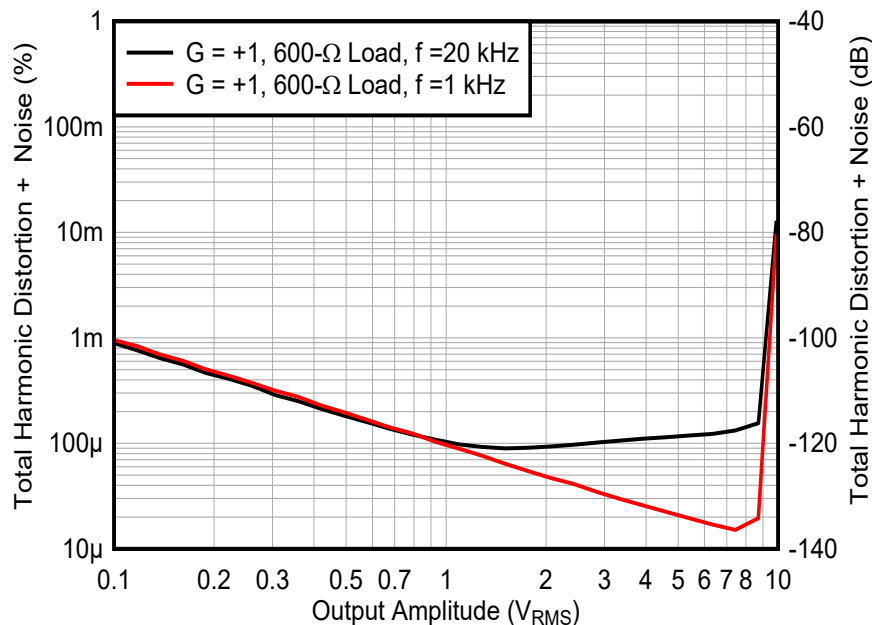


图 3-6. 同相缓冲器 THD + N (%) 比与输出振幅间的关系

3.2 反相测量

图 3-7 展示了用于测量反相放大器配置的 THD + N 的测试电路。放大器的输入信号 V_{in} 由发生器输出提供。输入失调电压 V_{os} 和输入电压噪声 V_n 是运算放大器内部的串联误差源。 V_{os} 和 V_n 始终指同相端，并且均被放大器配置的噪声增益放大。

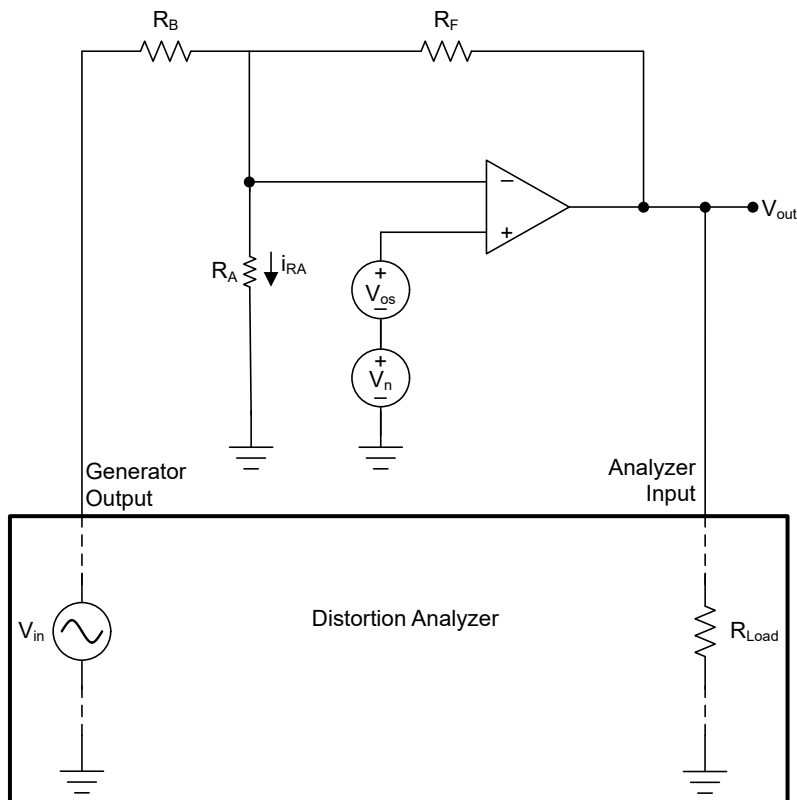


图 3-7. 反相失真测试电路

叠加用于推导反相失真测试电路的信号增益和失真增益的单独公式，如图 3-7 所示。假设输入失调电压 $V_{os} = 0V$ ，噪声电压 $V_n = 0V$ ，电流 $i_{RA} = 0A$ ，则图 3-7 所示的放大器配置可视为标准反相放大器配置，如图 3-8 所示。信号增益幅度由电阻 R_F 与电阻 R_B 之比确定。方程式 8 表示反相失真测试电路的信号增益。移除电阻 R_A 时，假定虚拟短路的概念。应用虚拟短路的概念时，反相端和同相端上的电阻 R_A 两端的电势相等，因此 $i_{RA} = 0A$ ， R_A 被视为开路。

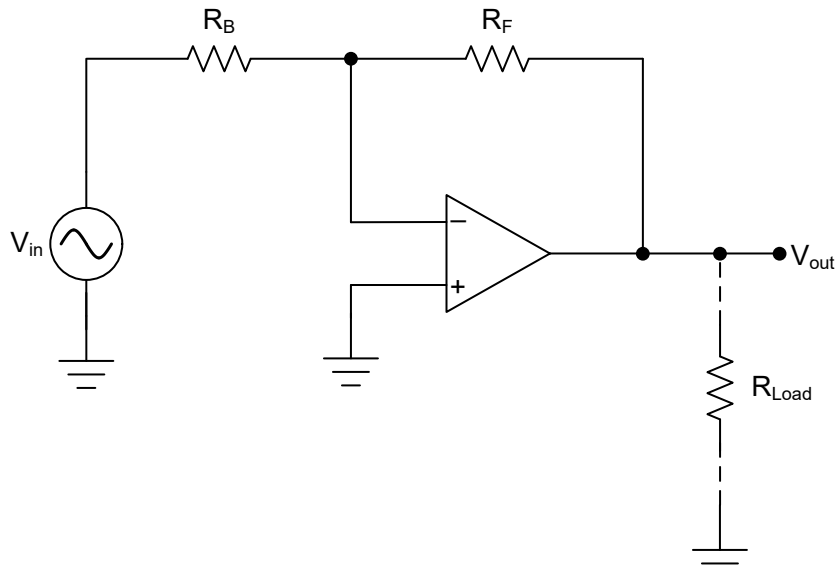


图 3-8. 反相信号增益

$$V_{out} = -V_{in} \times \frac{R_F}{R_B} \quad (8)$$

图 3-9 表示 THD + N 增益电路。假设 $V_{in} = 0V$ ，电阻 R_A 和 R_B 并联。该放大器可以看作是添加了电阻 R_A 的标准同相放大器。电压 $V_{os} + V_n$ 施加在同相端上。输出端会出现 $V_{os} + V_n$ ，按照我们熟悉的同相增益公式（即 1 加上电阻 R_F 与 $R_A || R_B$ 之比）进行增益。方程式 9 表示反相失真测试电路的 THD + N 增益。

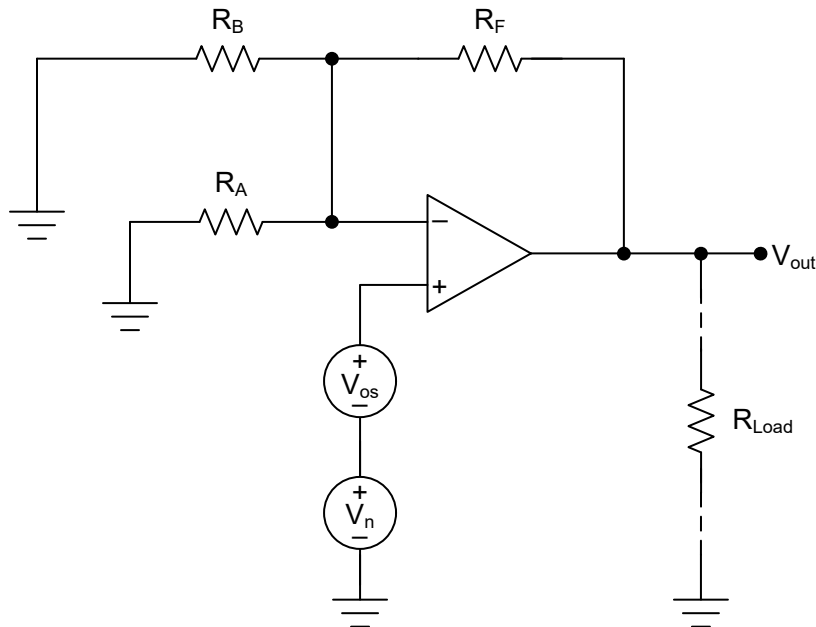


图 3-9. 反相 THD + N 增益

$$V_{out} = (V_{os} + V_n) \left(\frac{R_F}{R_A || R_B} + 1 \right) \quad (9)$$

方程式 10 可通过展开 方程式 9 得到。

$$V_{out} = (V_{os} + V_n) \left(\frac{R_F}{R_A} + \frac{R_F}{R_B} + 1 \right) \quad (10)$$

在图 3-7 所示测试电路的输出上观察到的信号是 V_{in} 、 V_n 和 V_{os} 的放大组合，表示为 方程式 11。方程式 11 表示图 3-7 所示反相失真测试电路的最终增益公式。

$$V_{out} = -V_{in} \times \frac{R_F}{R_B} + (V_{os} + V_n) \left(\frac{R_F}{R_A} + \frac{R_F}{R_B} + 1 \right) \quad (11)$$

典型的反相电路不包括附加电阻 R_A 。电阻 R_A 添加到测试电路中用于提供额外的增益，从而克服信号分析仪的测量限制。表 3-2 为电阻 R_F 、 R_A 和 R_B 分配值，并计算测试电路和应用电路的相关增益值。分配表 3-2 中的电阻值时，THD + N 增益为 $102 \frac{V}{V}$ （有附加电阻 R_A ）。在常见的反相应用电路中， $R_A = \infty$ ，或者换句话说就是不存在，且

THD + N 增益为 $2 \frac{V}{V}$ 。因此， R_A 额外增加了 $51 \frac{V}{V}$ 或大约 34dB 的失真增益。

表 3-2. 测试电路和应用电路增益值

条件	信号增益	THD + N 增益	R_F	R_A	R_B
有 R_A 的信号和 THD + N 增益	$-1 \frac{V}{V}$	$102 \frac{V}{V}$	10k Ω	100 Ω	10k Ω
无 R_A 的信号和 THD + N 增益	$-1 \frac{V}{V}$	$2 \frac{V}{V}$	10k Ω	∞	10k Ω

图 3-10 展示了测得的 OPA1656 的 THD + N 比，单位为分贝。从测试电路测量值中减去 34dB，代表典型反相电路中看到的实际运算放大器 THD + N。失真分析仪的测量带宽为 80kHz。

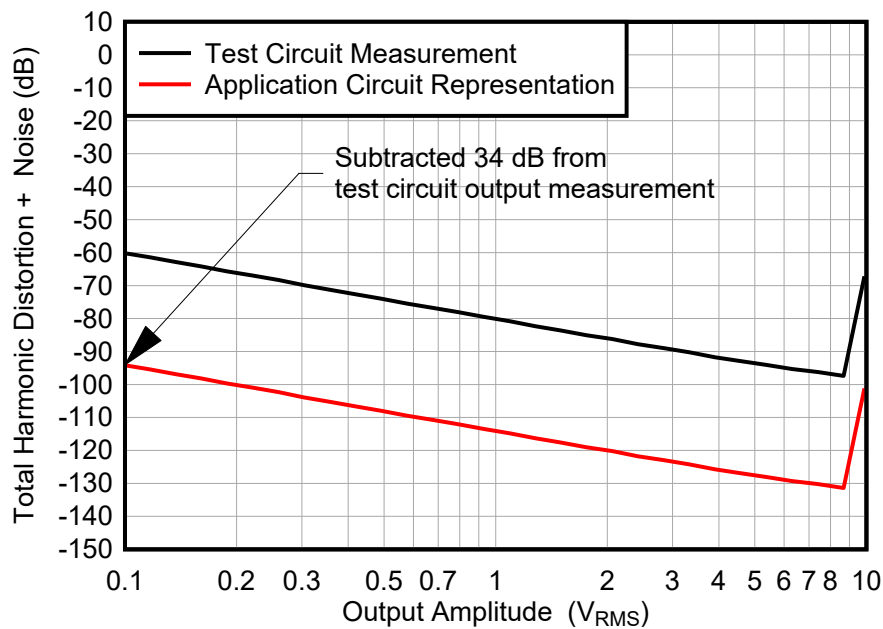


图 3-10. 反相失真测量：输出参考

图 3-11 展示了常见反相应用电路的 THD + N (%) 比与输出振幅 (V_{RMS}) 间的关系。当输出振幅从 $0.1V_{\text{RMS}}$ 扫至 $10V_{\text{RMS}}$ 时，对 1kHz 和 20kHz 频率进行了两次独立测量。

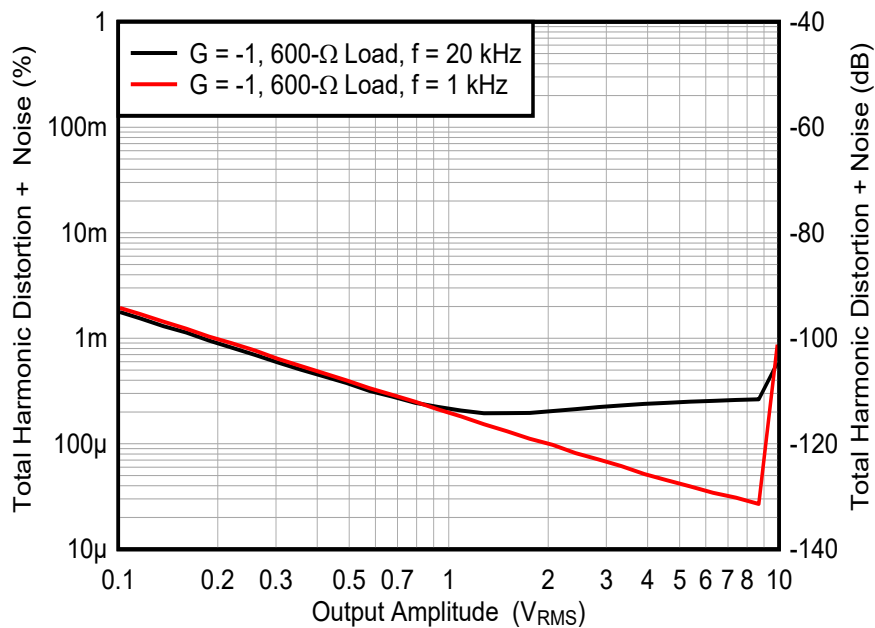


图 3-11. 反相 THD + N (%) 比与输出幅度间的关系

3.3 观察结果

可以在反相和同相应用电路之间观察到重要情况。在同相配置中， V_{in} 、 V_n 和 V_{os} 均应用于同相端，信号增益等于噪声增益。在反相配置中，信号施加到反相端，而 V_n 和 V_{os} 施加到同相端。反相配置中的信号增益不等于噪声增益。分配表 3-1 和表 3-2 中的电阻值时，同相和反相配置的 THD + N 增益差系数 $2 \frac{V}{V}$ (6dB)。图 3-12 展示了这两次测量之间 6dB 的差值。当反相配置的信号增益与同相配置的信号增益相同时，输出参考 THD + N 测量值总是更差。尽管 THD + N 更差，但反相配置的优势是同相端固定为直流电势，如图 3-8 所示并提供固定共模电压。当运算放大器具有低 CMRR 时，这将为反相配置带来 CMRR 优势。

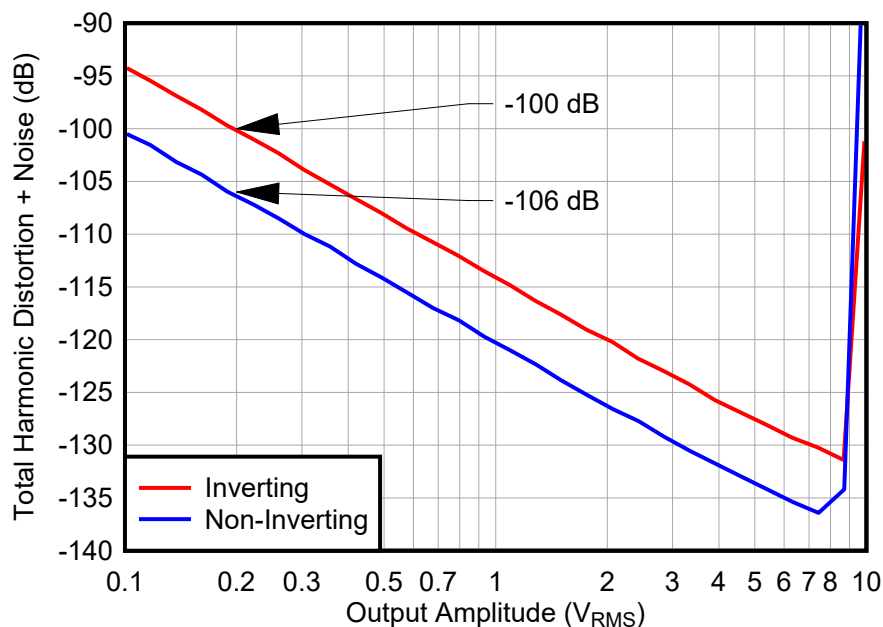


图 3-12. 反相和同相 THD + N (dB)

3.4 解读 THD + N 曲线

图 3-13 展示了构成 THD + N 比与输出振幅间关系曲线的三个分量。分别为噪声主导区域、失真主导区域以及两者之间的过渡区域。图中展示了对应于 THD + N 与输出振幅间关系曲线上三个点的三个 FFT 测量值。当输出振幅为 $100\text{mV}_{\text{RMS}}$ 时，FFT 显示基音为 20kHz ，谐波位于运算放大器的本底噪声中，且不明显。这表示曲线的噪声主导区域。谐波随着输出幅度的增加而增加，变得大于运算放大器的本底噪声。 6V_{RMS} 和 10V_{RMS} 输出幅值的 FFT 直观地显示了这些谐波。

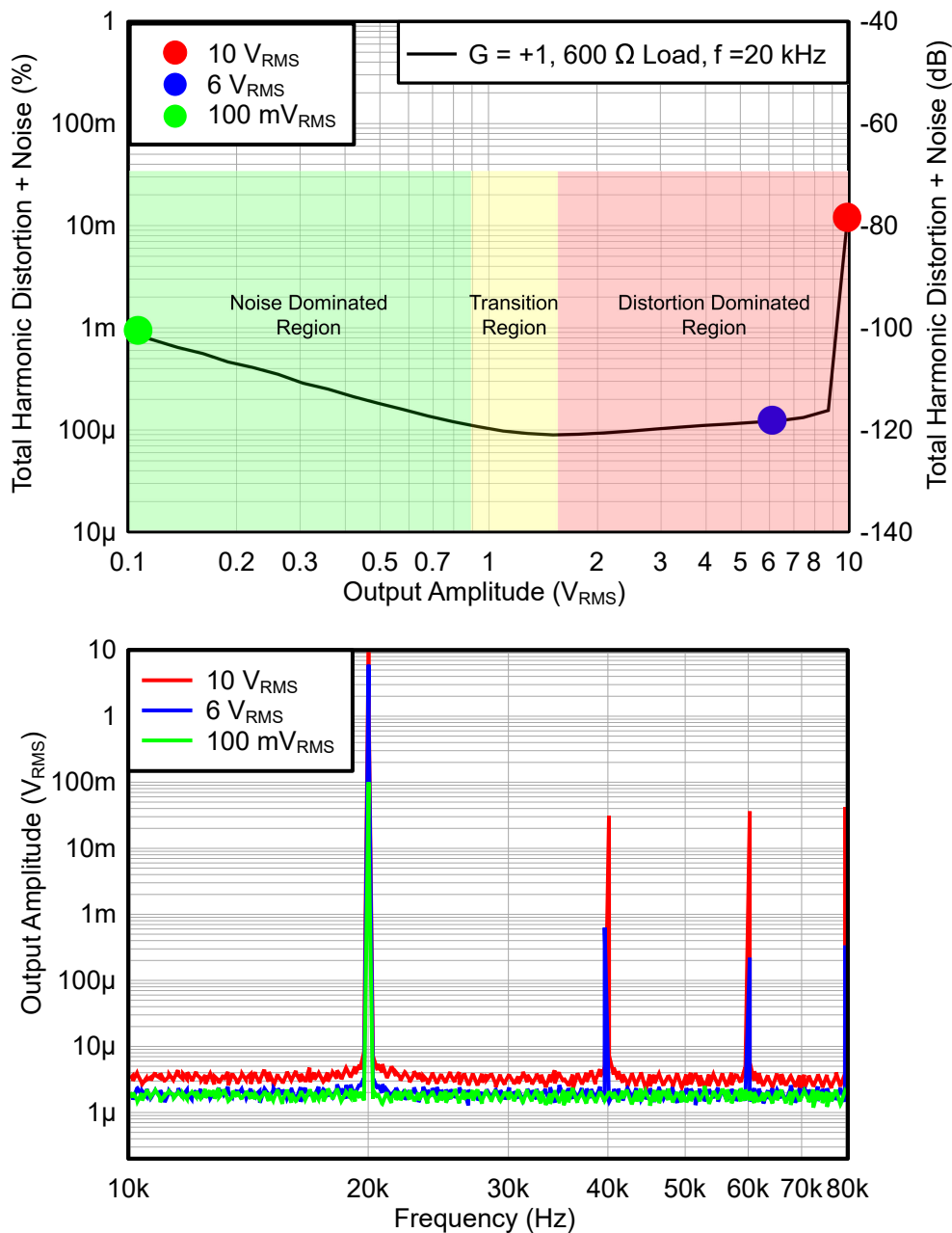


图 3-13. 解读 THD + N 比与输出幅度间关系曲线

4 总结

总谐波失真加噪声 (THD + N) 是一个很大的课题，给电源、音频、仪表放大等许多应用带来了挑战。运算放大器通常是更大系统中的一个组成部分，会增加整体 THD + N。德州仪器 (TI) 音频运算放大器 (如 OPA1656) 具有极低的 THD + N，是设计需要超低总谐波失真加噪声的信号链时的理想选择。

5 参考文献

- 德州仪器 (TI) , [OPA165x 超低噪声、低失真、FET 输入、Burr-Brown™ 音频运算放大器](#) 数据表。

6 附录

图 6-1 展示了图 3-3 中标准同相缓冲器放大器的环路参数，不含电阻 R_A 。反馈系数 β 和 THD + N 增益均为 0dB。环路增益 $A_{OL} + \beta = A_{OL}$

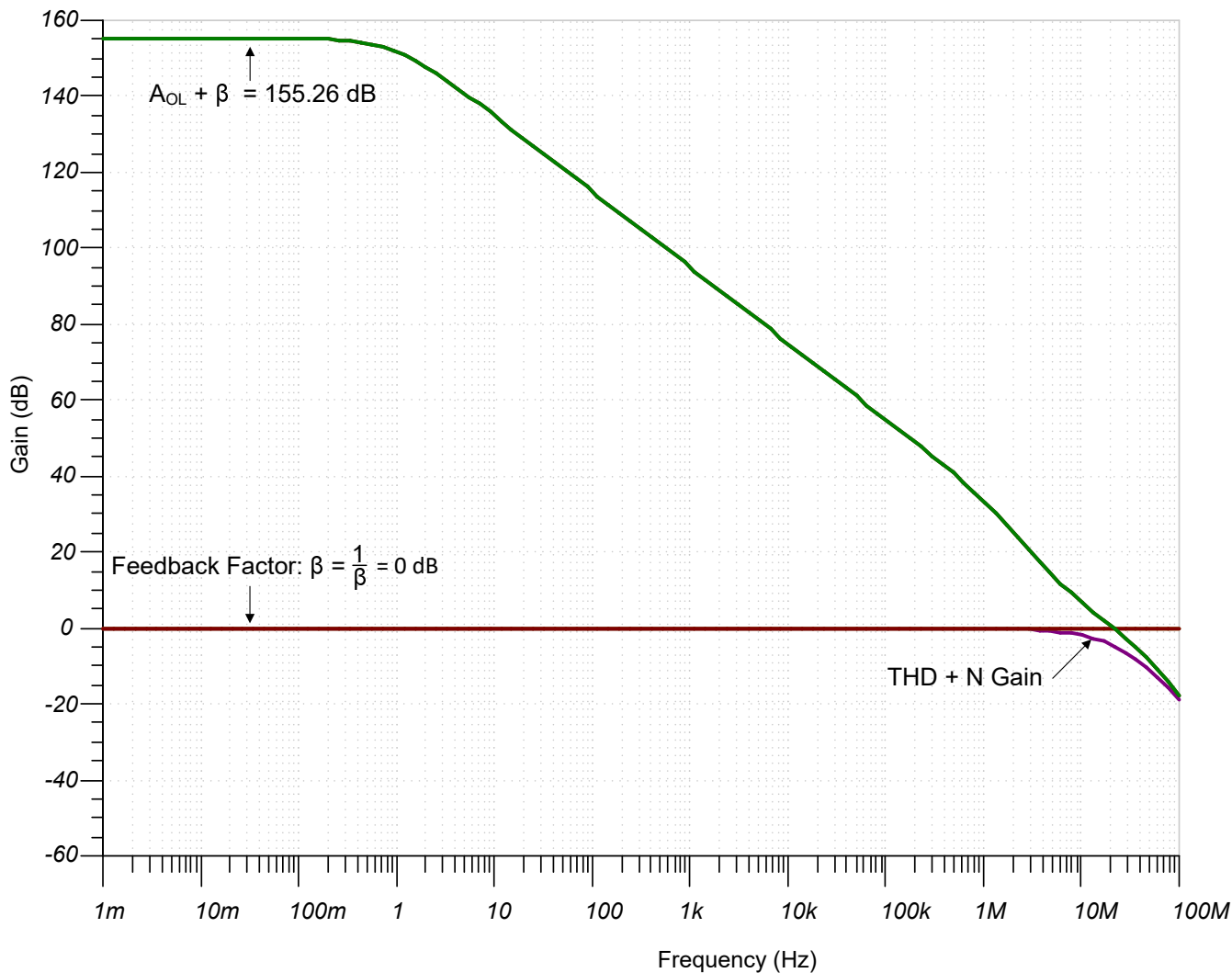


图 6-1. 无 R_A 的环路参数

在原本标准的同相缓冲器放大器配置中加入 R_A ，会改变电路的反馈系数或 THD + N 增益。闭环信号增益 A_{CL} 保持不变，但可用于纠错的反馈降低了 $101 \frac{V}{V}$ ，使分辨率提高了 $101 \frac{V}{V}$ 或 40dB。图 6-2 展示了加入电阻 R_A 后的环路参数。反馈系数 β 降低了 40dB，THD + N 增益增加了 40dB。环路增益 $A_{OL} + \beta$ 降低了 40dB。

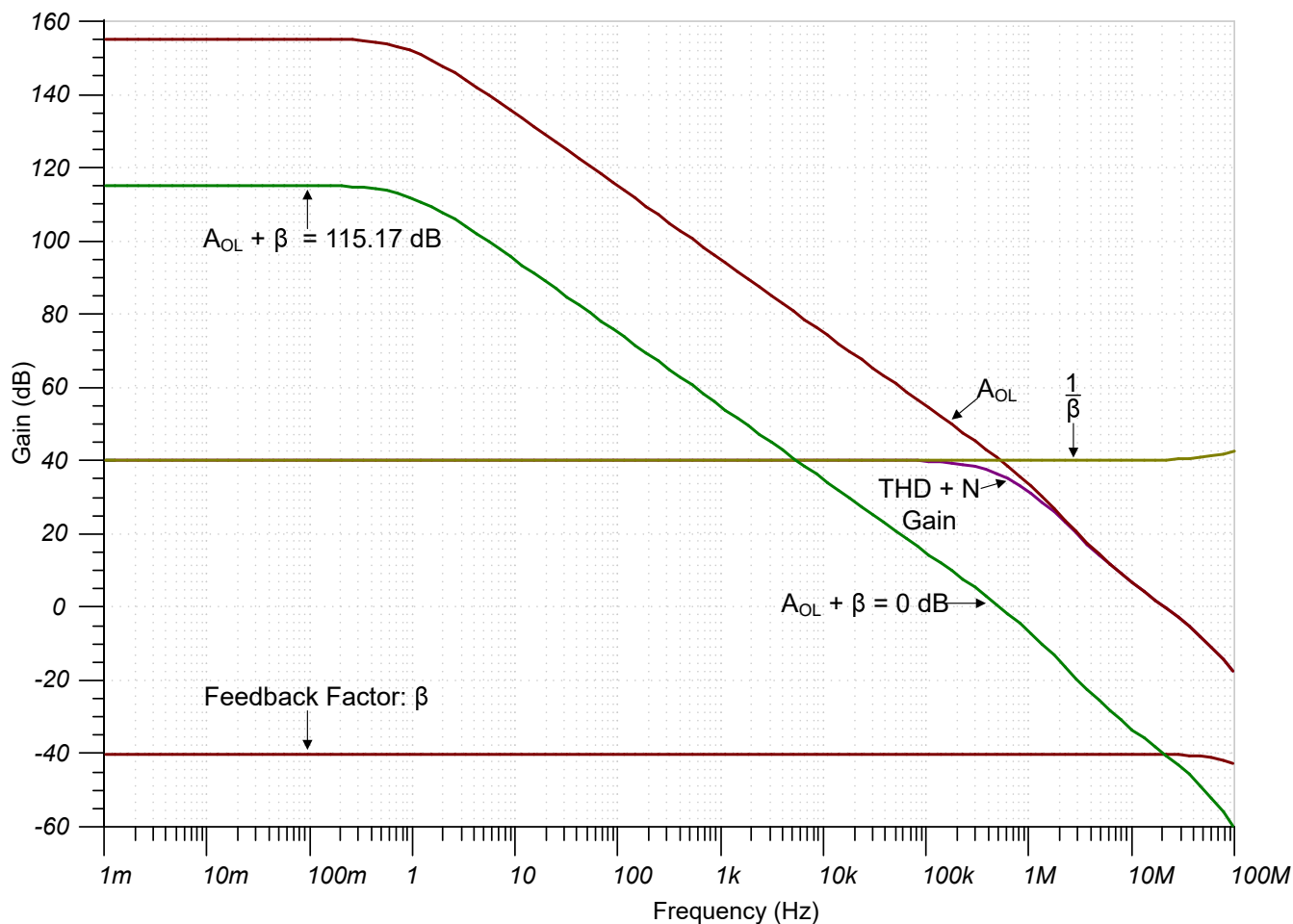


图 6-2. 有 R_A 的环路参数

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司