



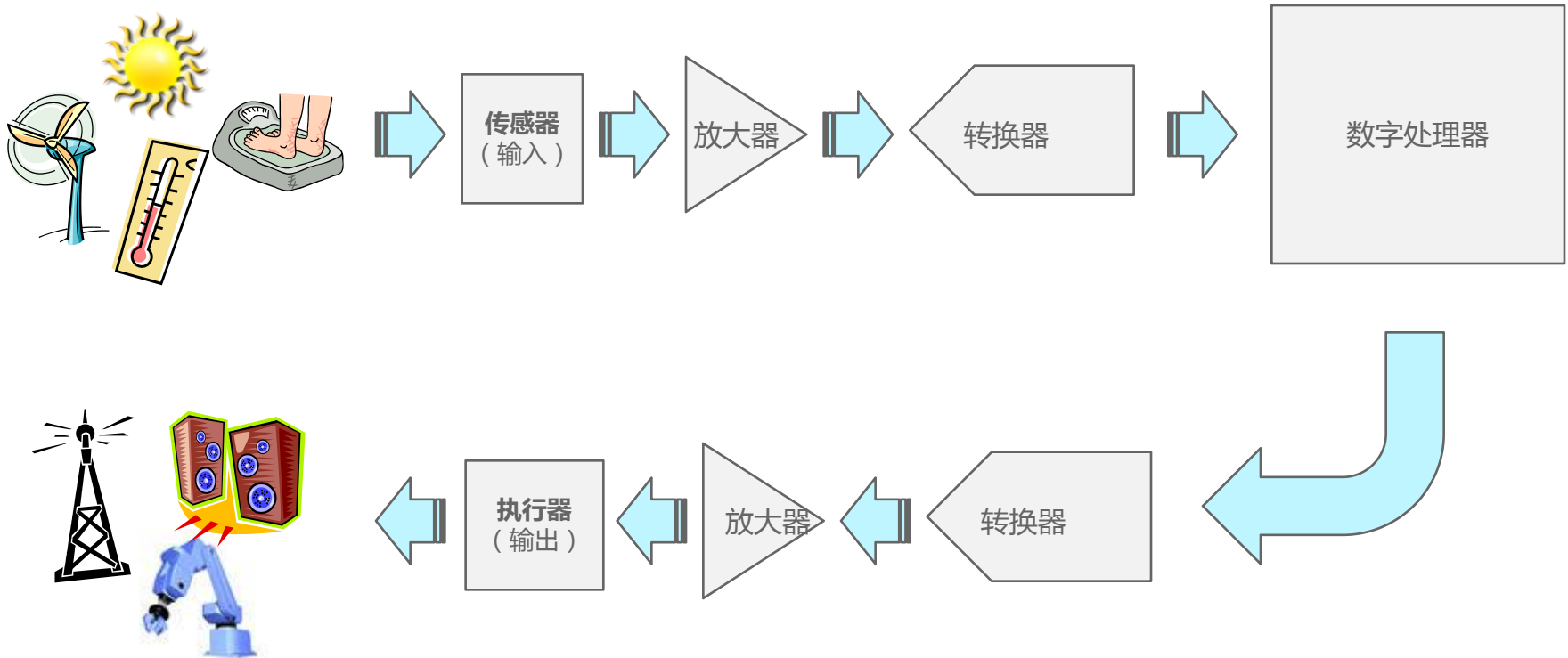
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

运算放大器基本原理

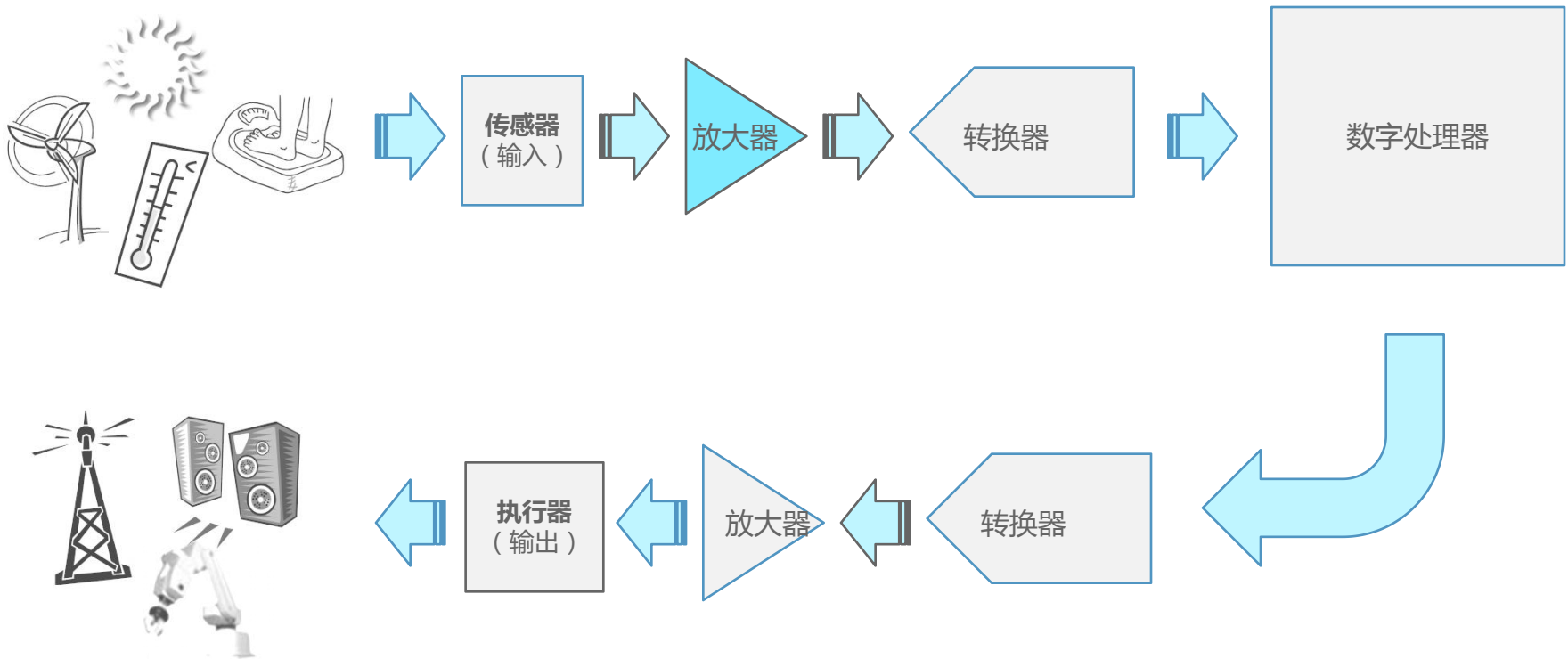
DAVID KRESS
技术营销总监



模拟转电子信号处理



模拟转电子信号处理



放大器和运算放大器

▶ 放大器

- 将低电平、高源阻抗信号转换成高电平、低源阻抗信号
- 运算放大器、功率放大器、射频放大器、仪表放大器等
- 多数复杂的放大器都是通过组合运算放大器构建的

▶ 运算放大器

- 三端器件（加电源）
- 将输入端的小信号在输出端放大成超大信号

运算放大器

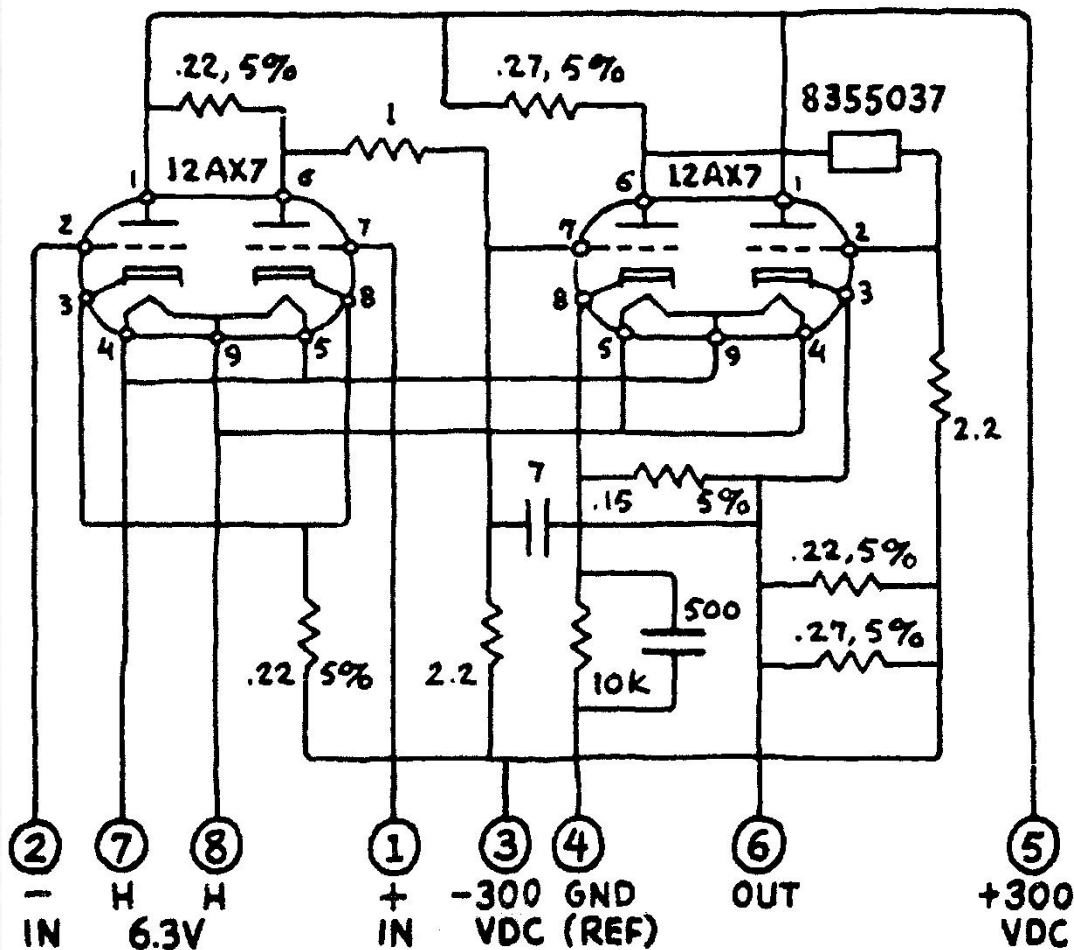
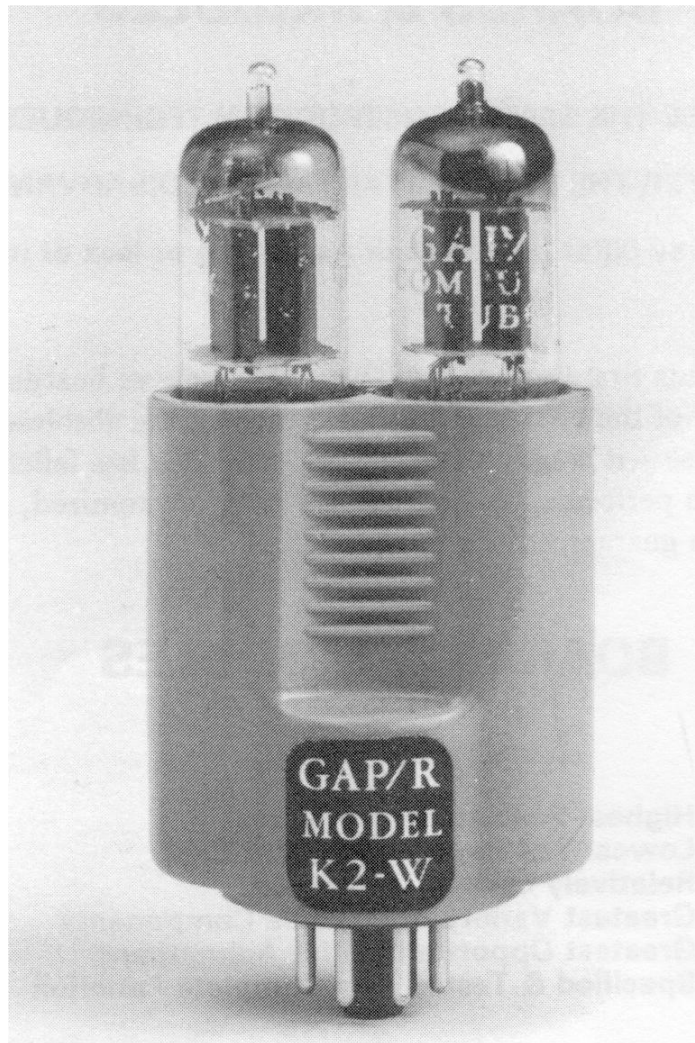
▶ 工作

- 运算放大器可以利用反馈网络以多种方式进行配置，以便对输入信号进行“运算”
- “运算”包括正/负增益、滤波、非线性传递函数、比较、求和、减法、基准电压缓冲、差分放大、积分、差分等

▶ 应用

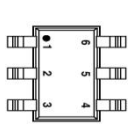
- 模拟设计的基本构建模块
- 传感器输入放大器
- 简单和复杂滤波器—抗混叠
- ADC驱动器

Philbrick Research于1953年推出的原始真空管运算放大器 — 使用+/- 300V电源

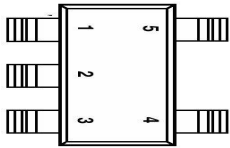


一些现代IC运算放大器封装的相对大小

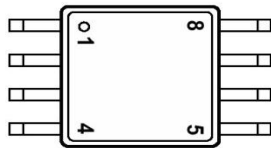
SC-70



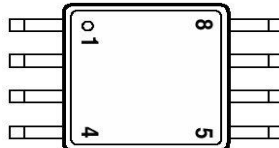
SOT-23



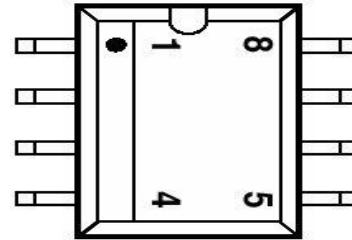
MSOP8



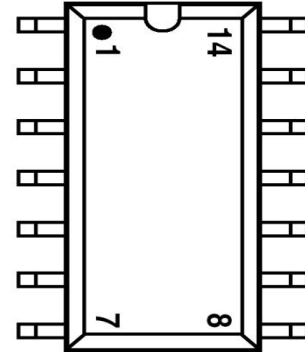
mSOIC



8-SOIC



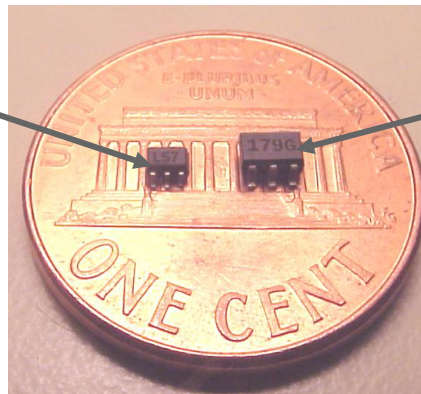
14-SOIC



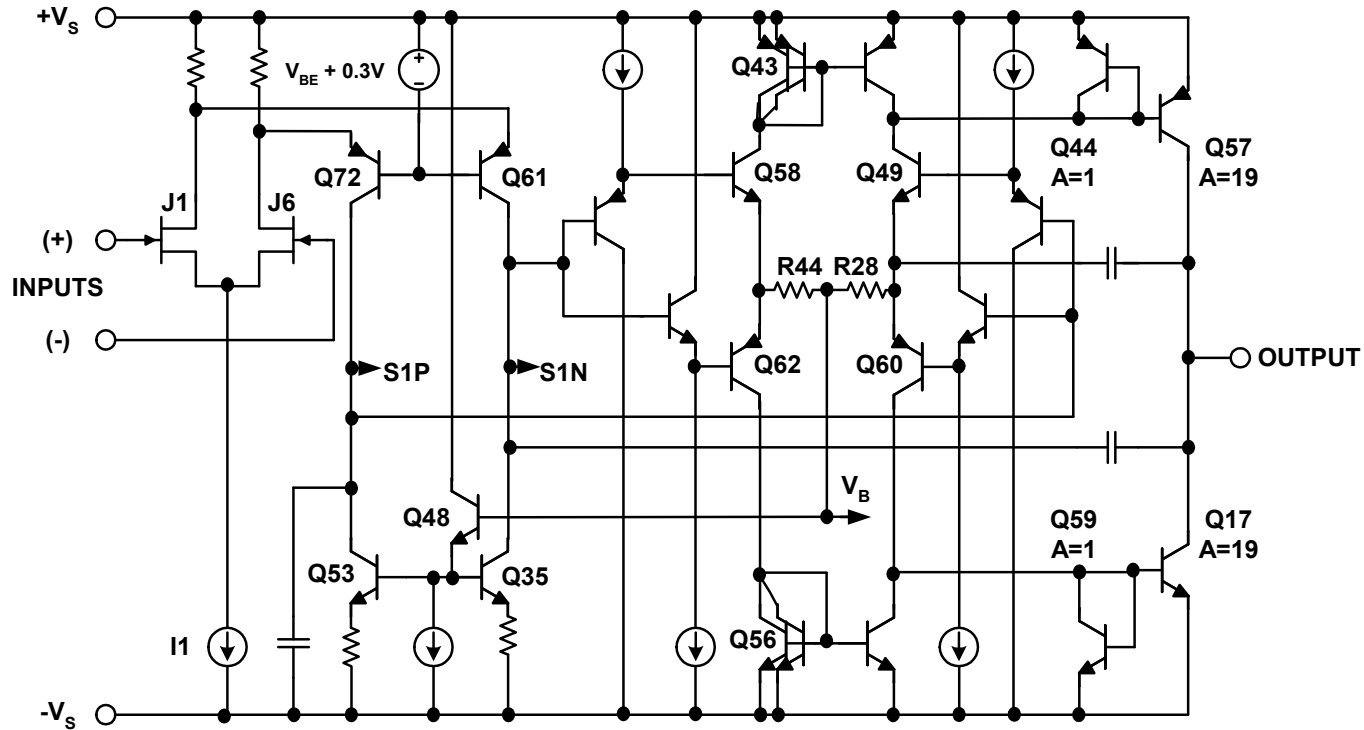
(以上所有封装的缩放比例相同)

SC-70

SOT-23



AD823 JFET输入运算放大器的简化原理图



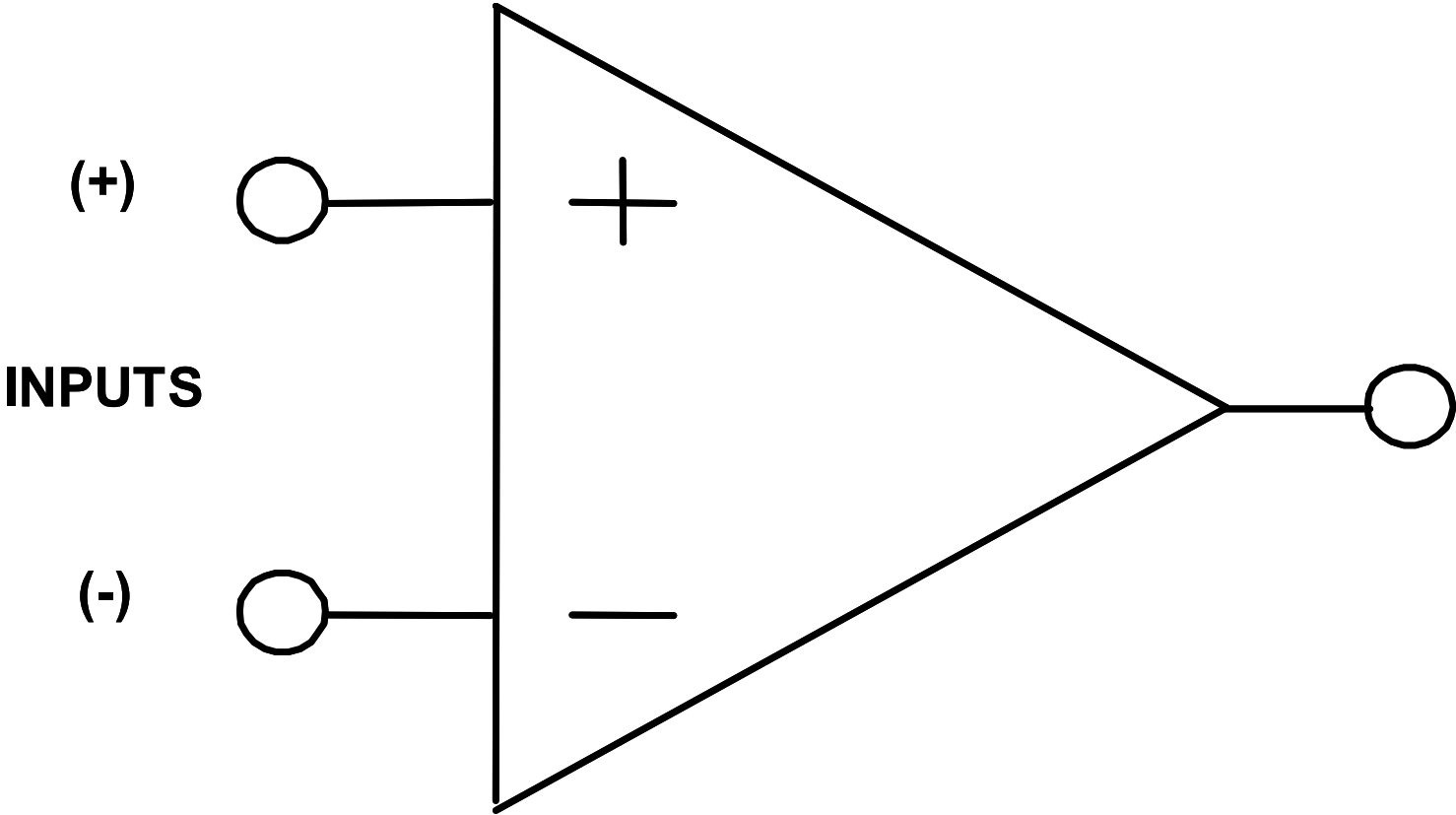
偏置电流 = 25pA (最大值) @ +25°C

输入失调电压 = 0.8mV (最大值, +25°C)

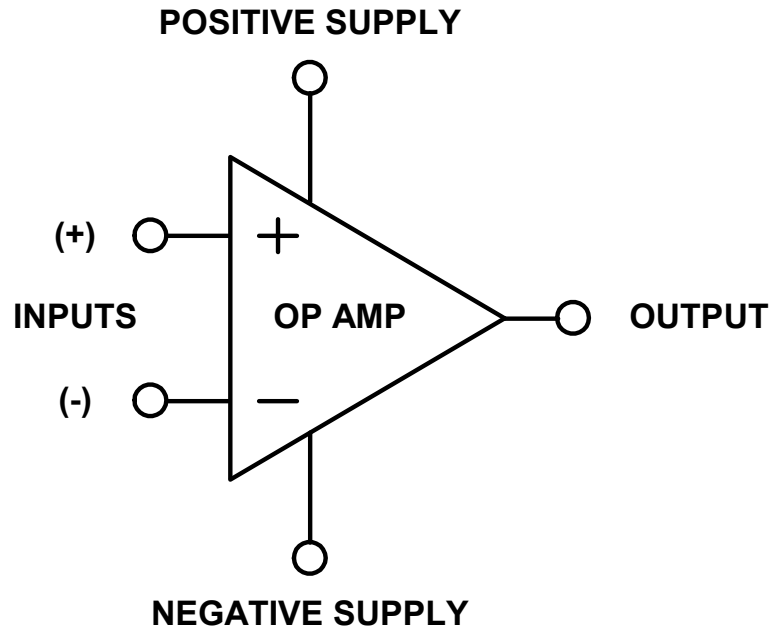
输入电压噪声 = 15nV/√Hz

输入电流噪声 = 1fA/√Hz

标准运算放大器符号



理想运算放大器及其特性



IDEAL OP AMP ATTRIBUTES:

- ◆ Infinite Differential Gain
- ◆ Zero Common Mode Gain
- ◆ Zero Offset Voltage
- ◆ Zero Bias Current

OP AMP INPUTS:

- ◆ High Input Impedance
- ◆ Low Bias Current
- ◆ Respond to Differential Mode Voltages
- ◆ Ignore Common Mode Voltages

OP AMP OUTPUT:

- ◆ Low Source Impedance

运算放大器电路设计

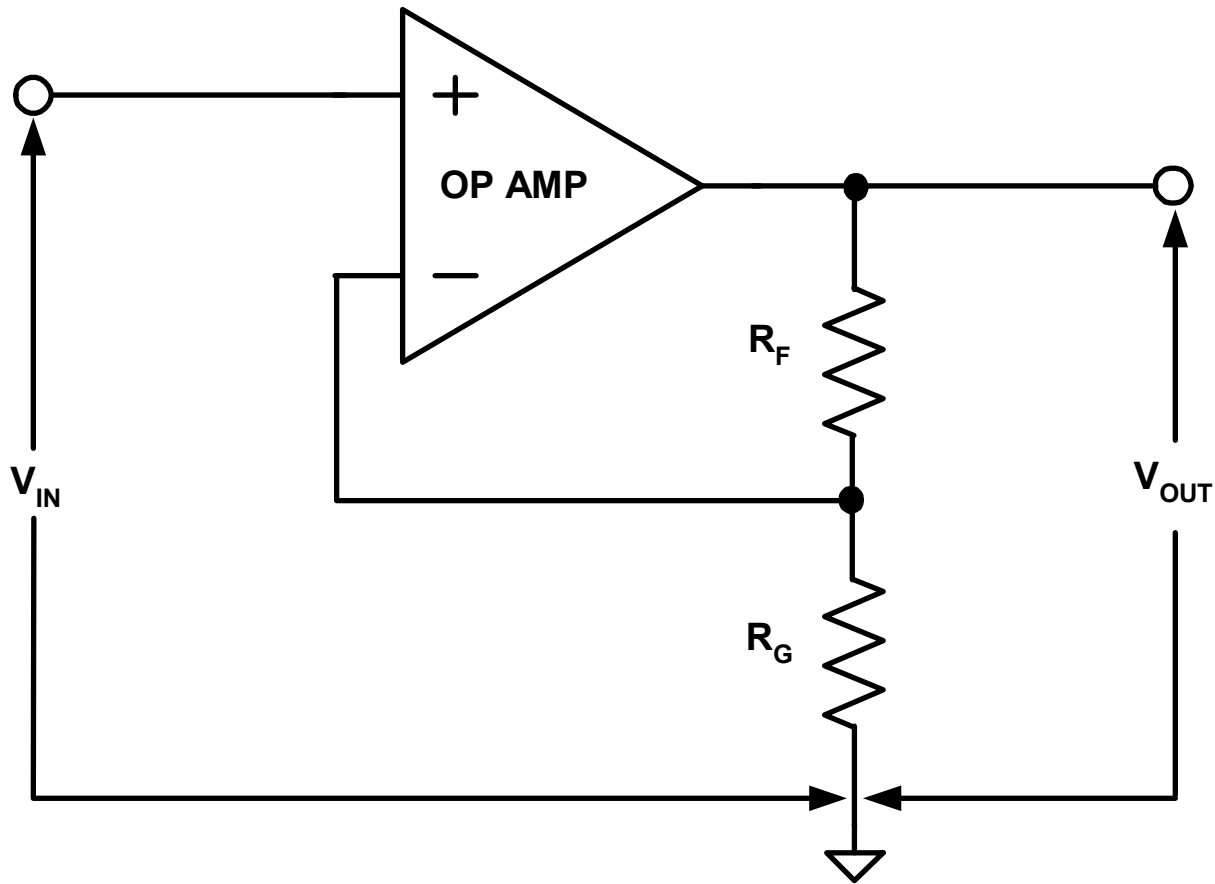
▶ 使用负反馈

- 输出信号或其一个受控部分反馈到负(-)输入端
- 运算放大器会调整输出信号，直至输入差值变为0

▶ 高增益示例

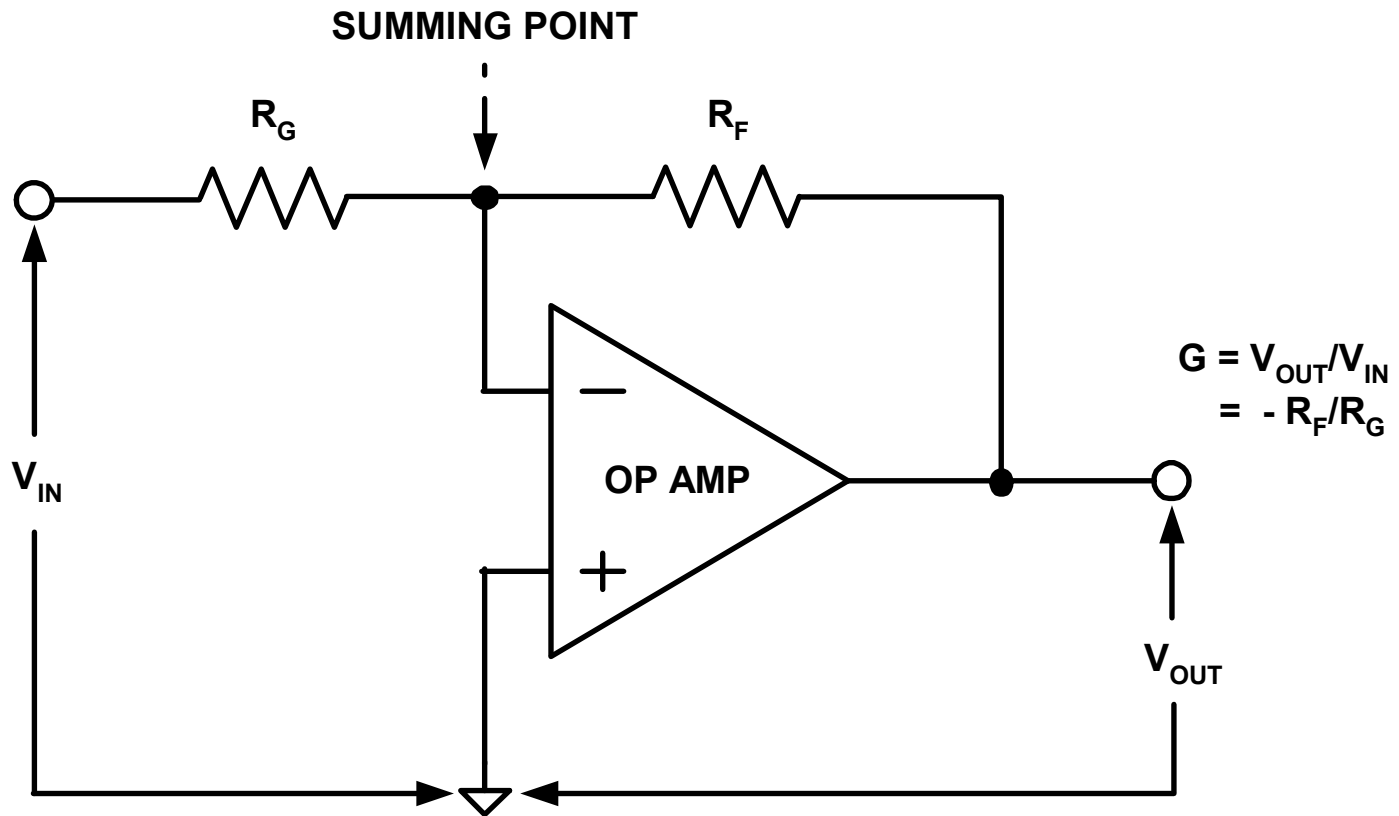
- 假设运算放大器增益为 10^6 （一百万）
- 将1 V信号施加于正输入端
- 反馈信号直接从输出端送至负输入端
- 输出将变为1 V (-1 μ V)
- 输入差值将是1 μ V

同相模式的运算放大器级



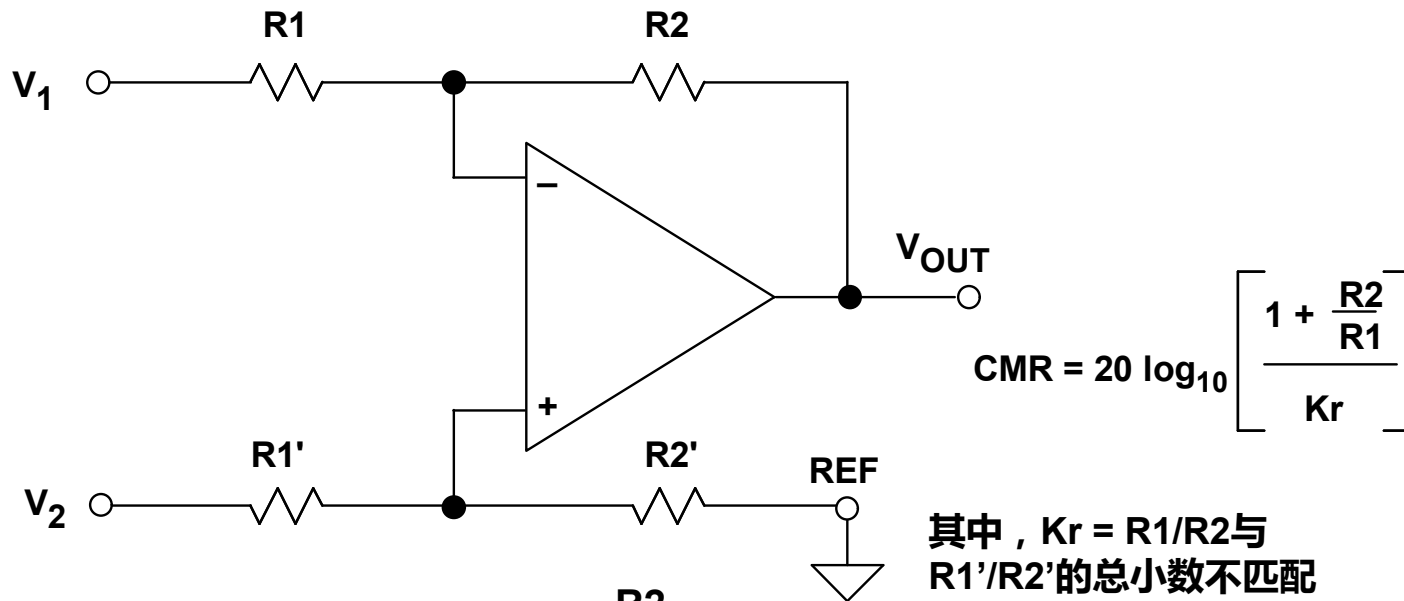
$$G = V_{OUT}/V_{IN} \\ = 1 + (R_F/R_G)$$

反相模式的运算放大器级



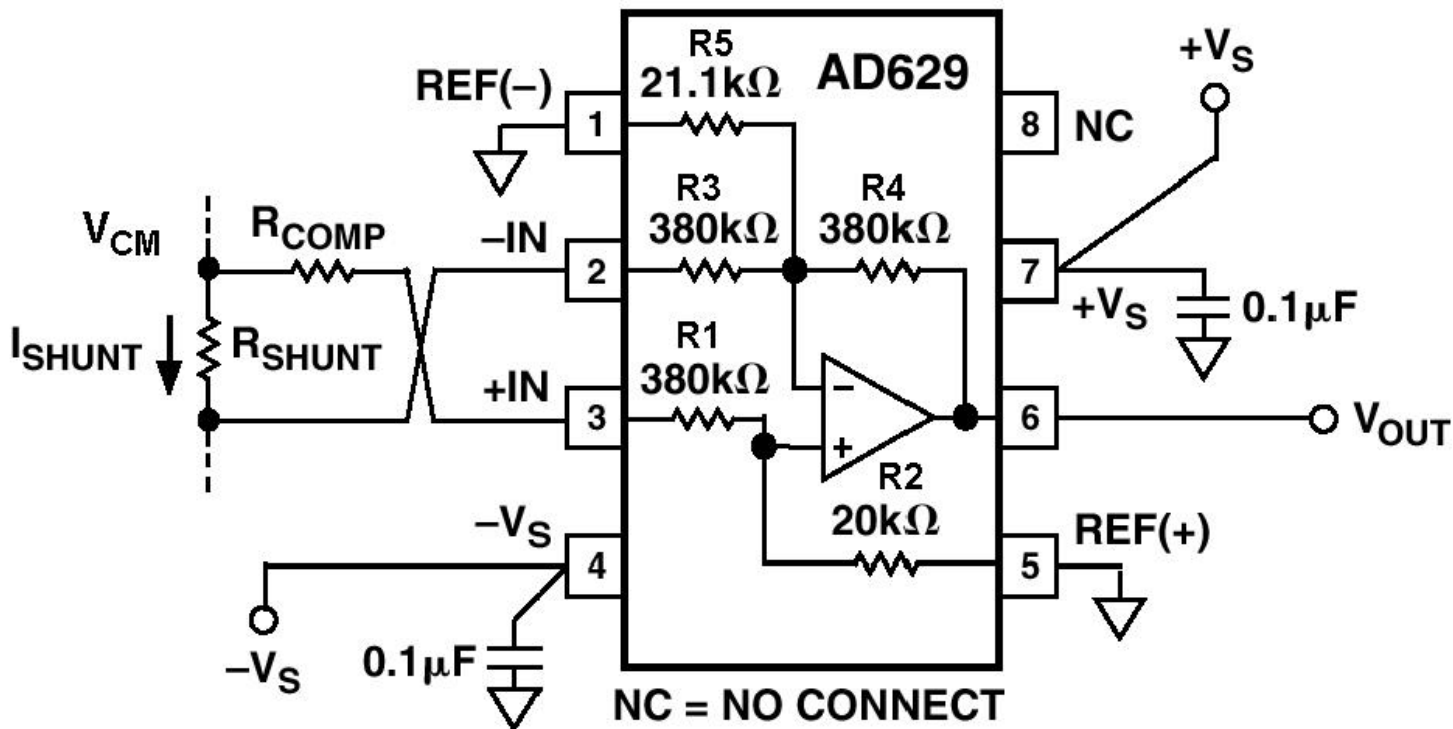
运算放大器减法器或差动放大器

这种配置中，两个输入引脚都有信号驱动



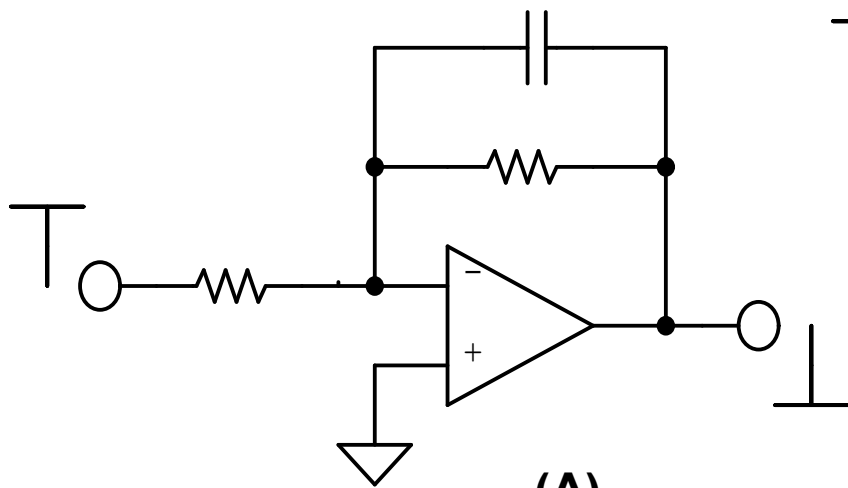
- $V_{OUT} = (V_2 - V_1) \frac{R2}{R1}$
- $\frac{R2}{R1} = \frac{R2'}{R1'}$ 对高CMR至关重要 H CMR
- 对源阻抗不平衡极端敏感 TO SOURCE IMPEDANCE IMBALANCE
- 0.1%总不匹配 $\approx 66\text{dB CMR}$ ($R1 = R2$ 时)

高共模电流检测 使用AD629差动放大器

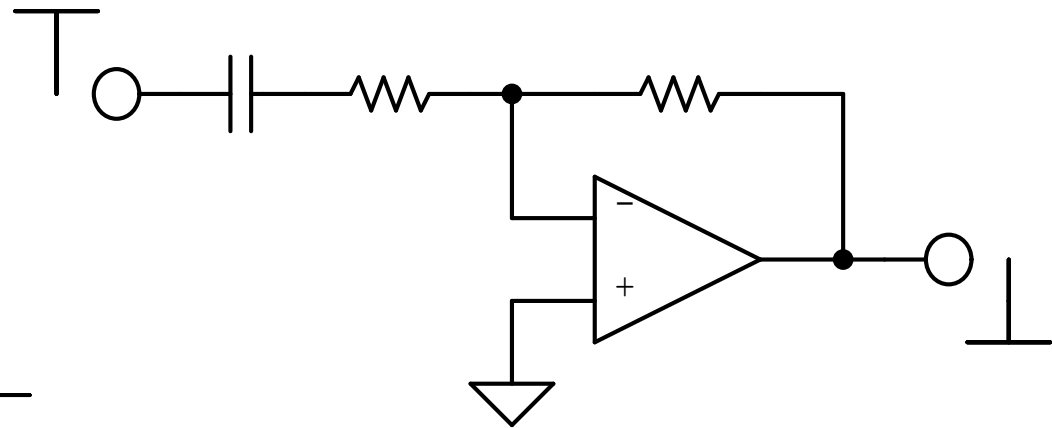


$$V_{CM} = \pm 270V \text{ for } V_S = \pm 15V$$

单极点运算放大器有源滤波器



(A)
LOWPASS



(B)
HIGHPASS

运算放大器的主要性能特性

▶ 带宽和压摆率

- 运算放大器的速度
- 带宽为运算放大器的最高工作频率
- 压摆率为输出的最大变化率
- 取决于所需信号频率和增益

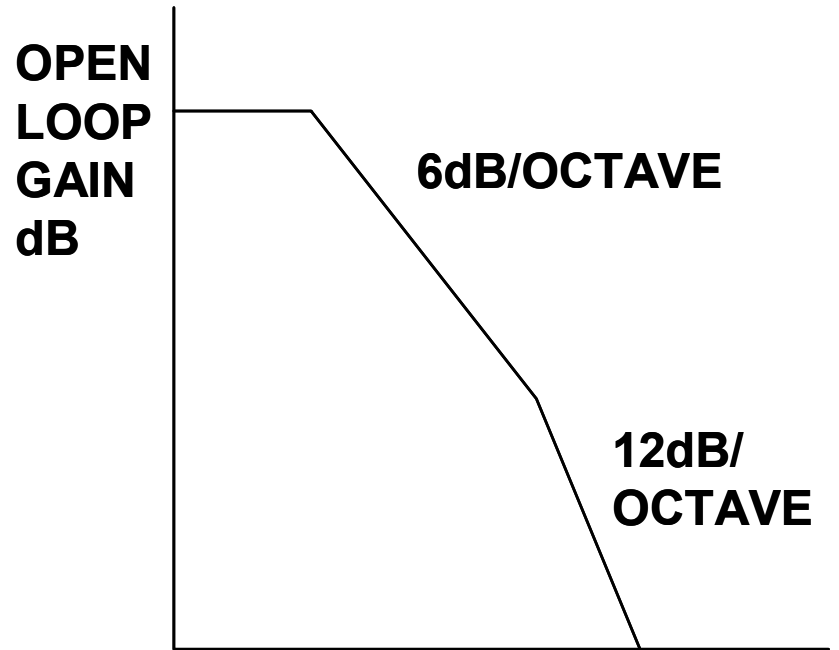
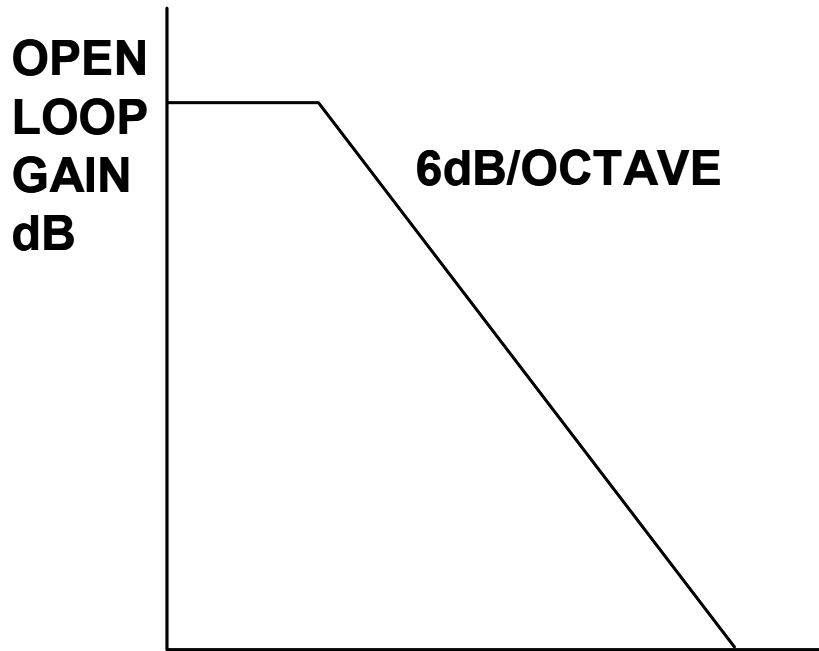
▶ 失调电压和电流

- 运算放大器的误差
- 决定测量精度

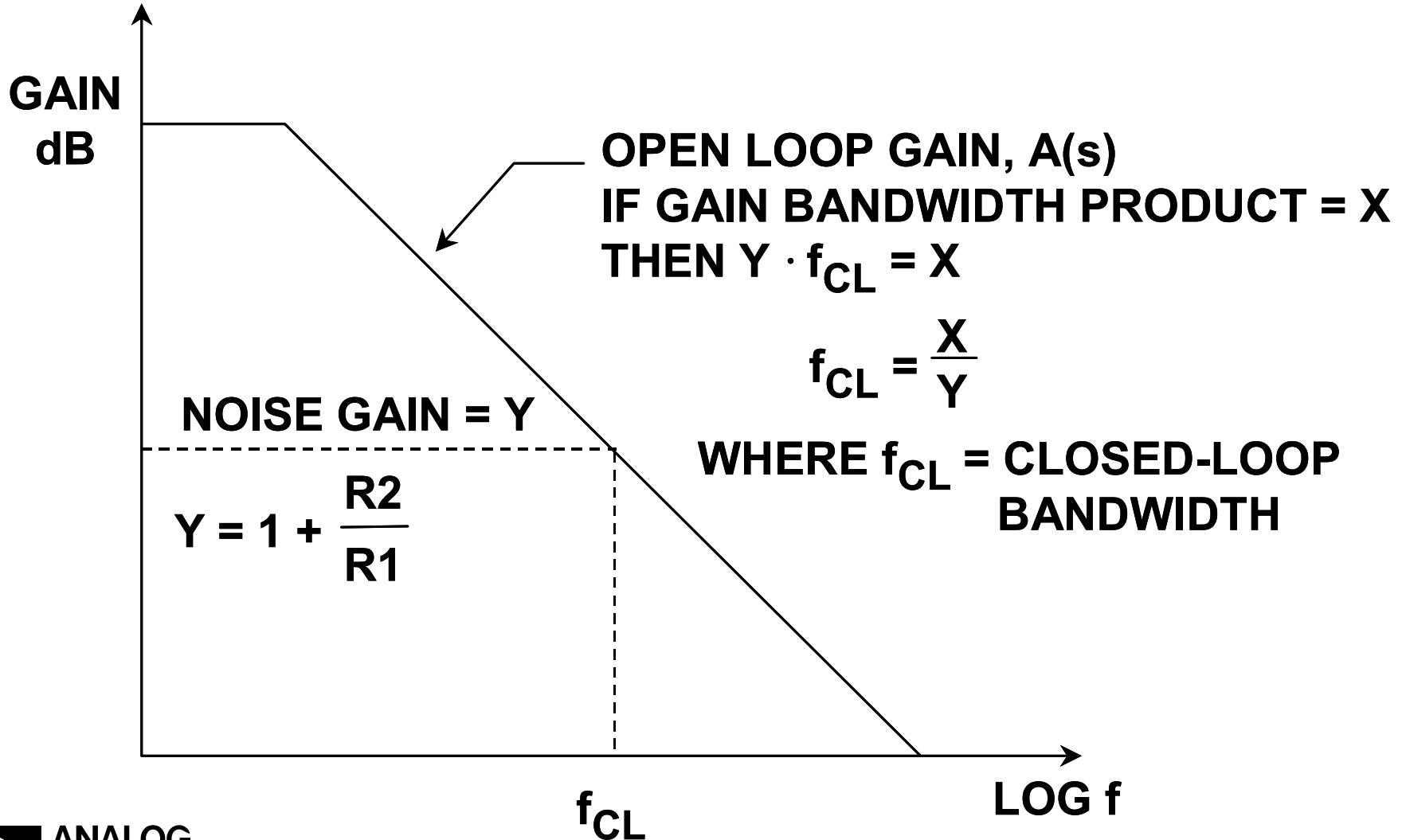
▶ 噪声

- 运算放大器噪声限制了在保真度良好的情况下可以放大的最小信号

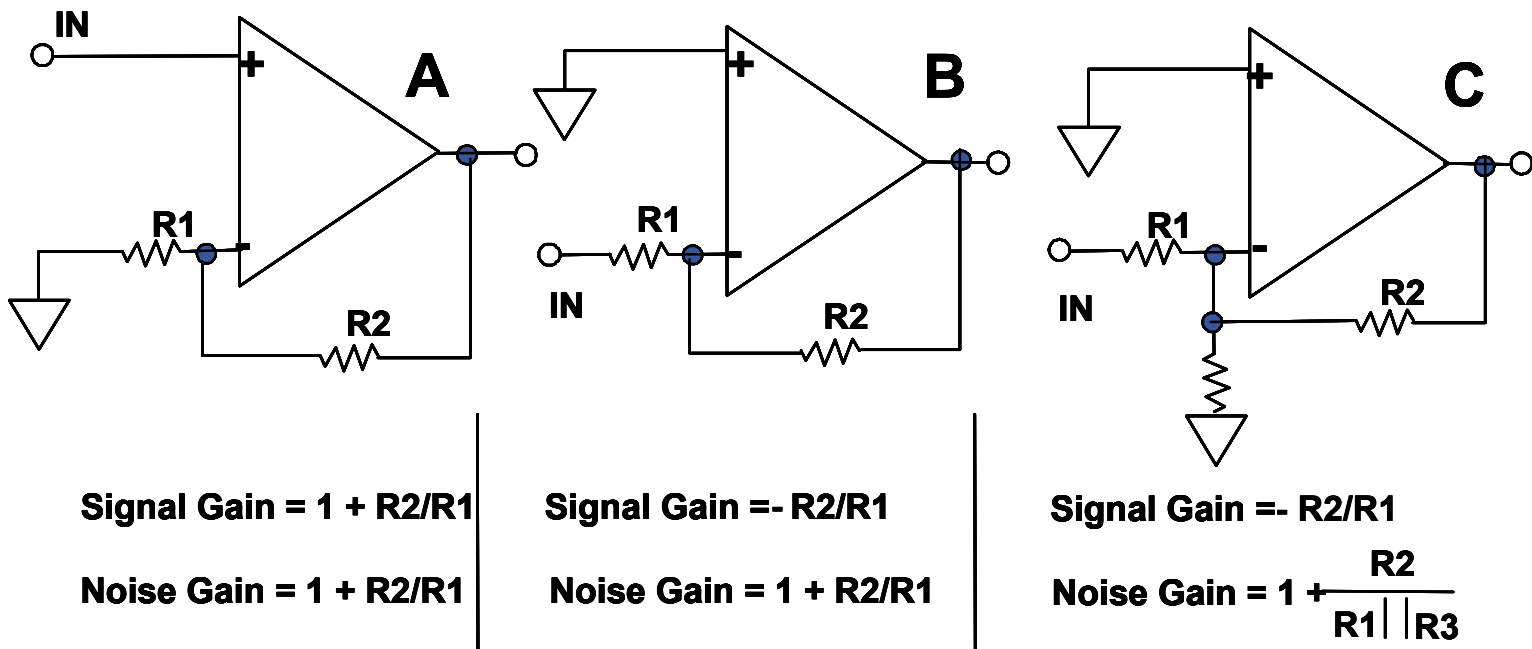
开环增益 (波特图)



增益带宽积



噪声增益

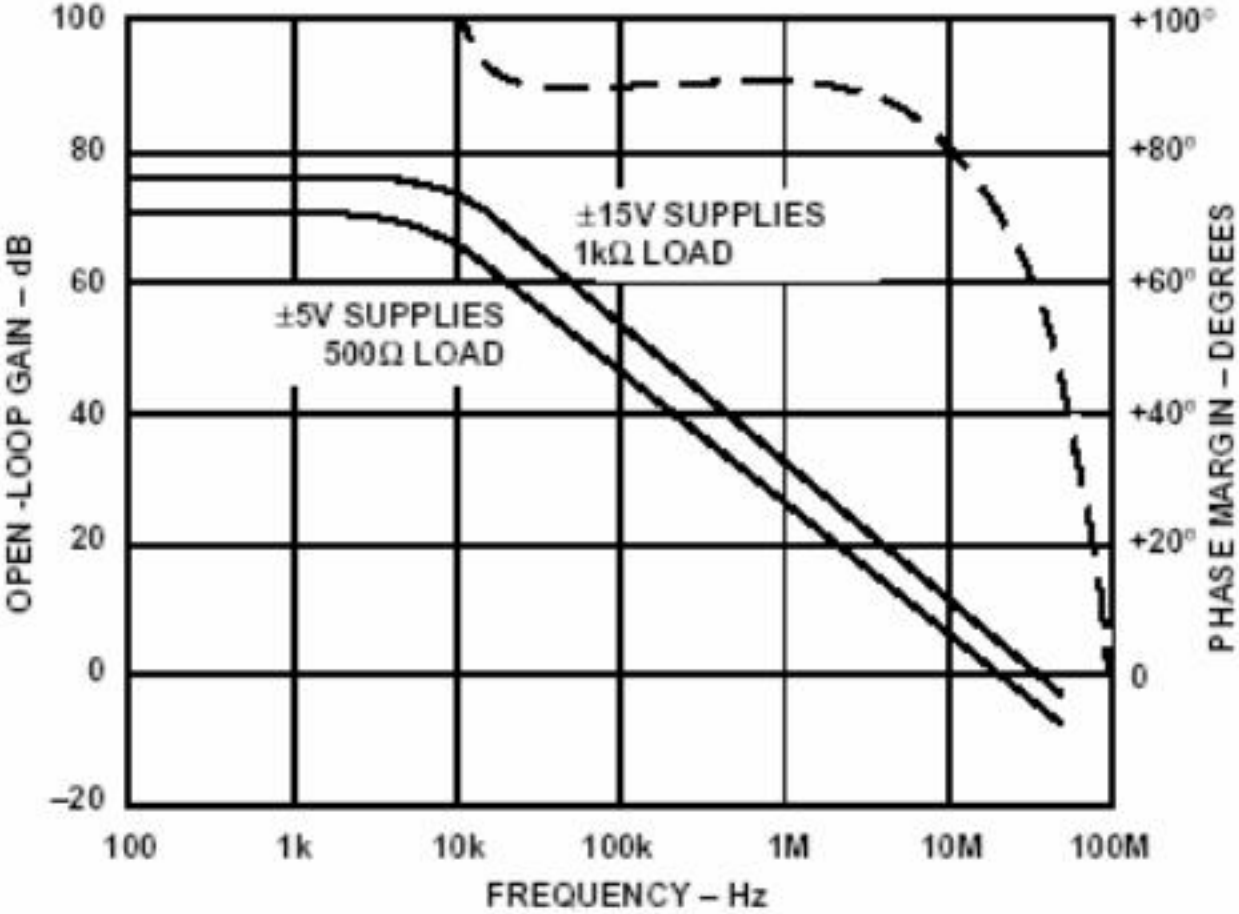


运算放大器的电压噪声和失调电压通过噪声增益反映到输出端。

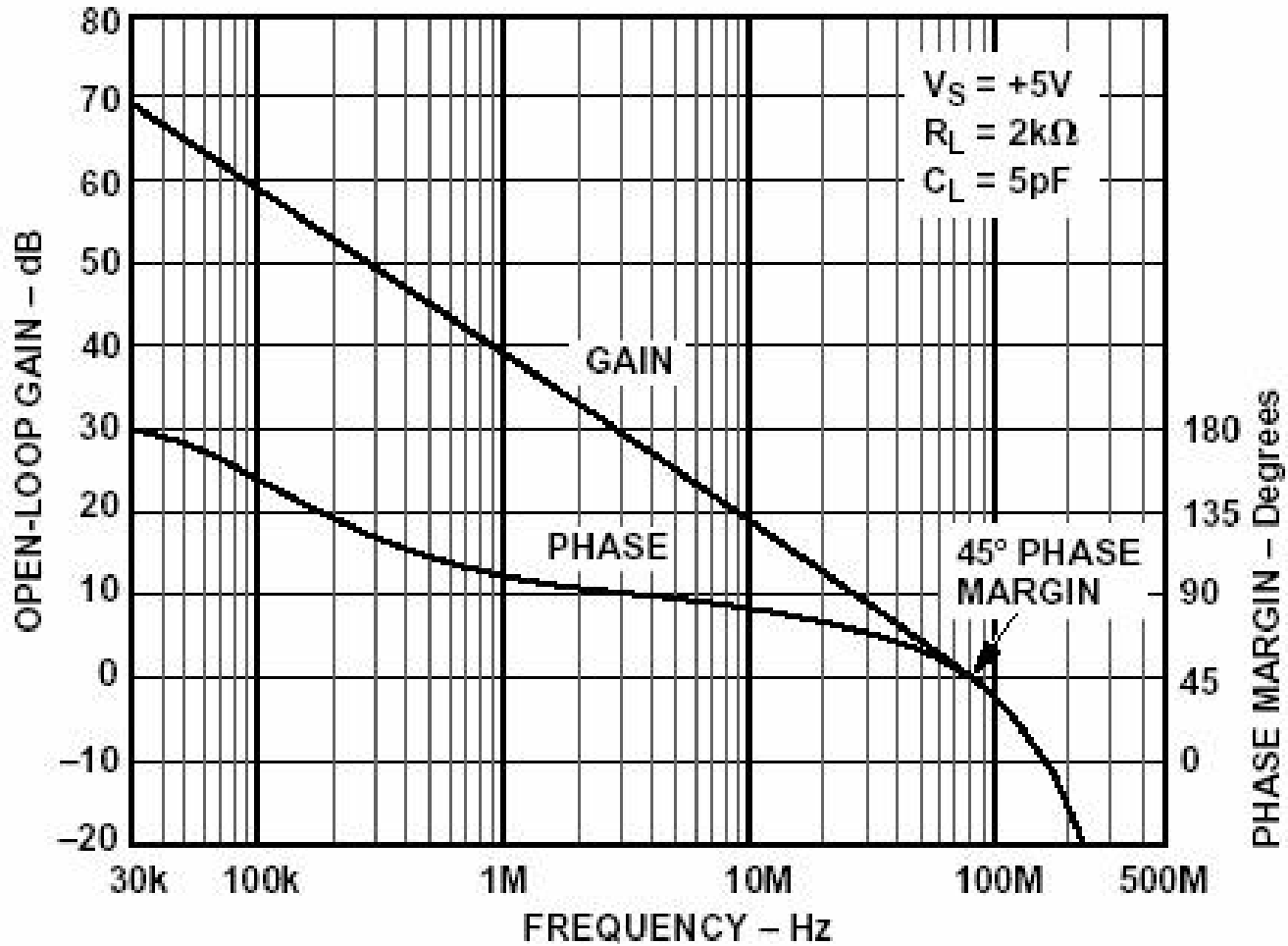
噪声增益（而非信号增益）与稳定性评估有关。

电路C的信号增益不变，但噪声增益更高，因此稳定性更好，噪声性能更差，输出失调电压更高。

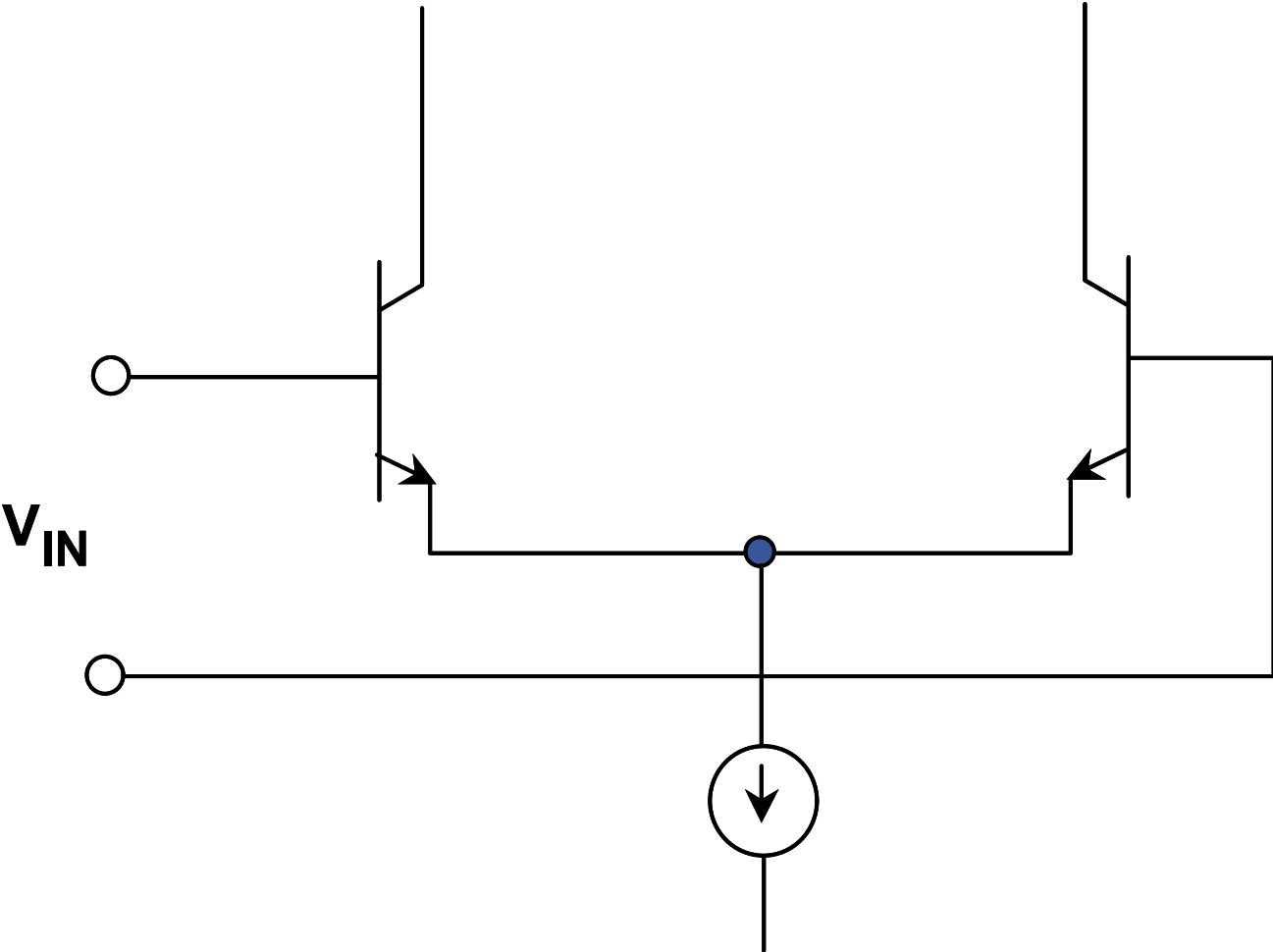
AD847开环增益



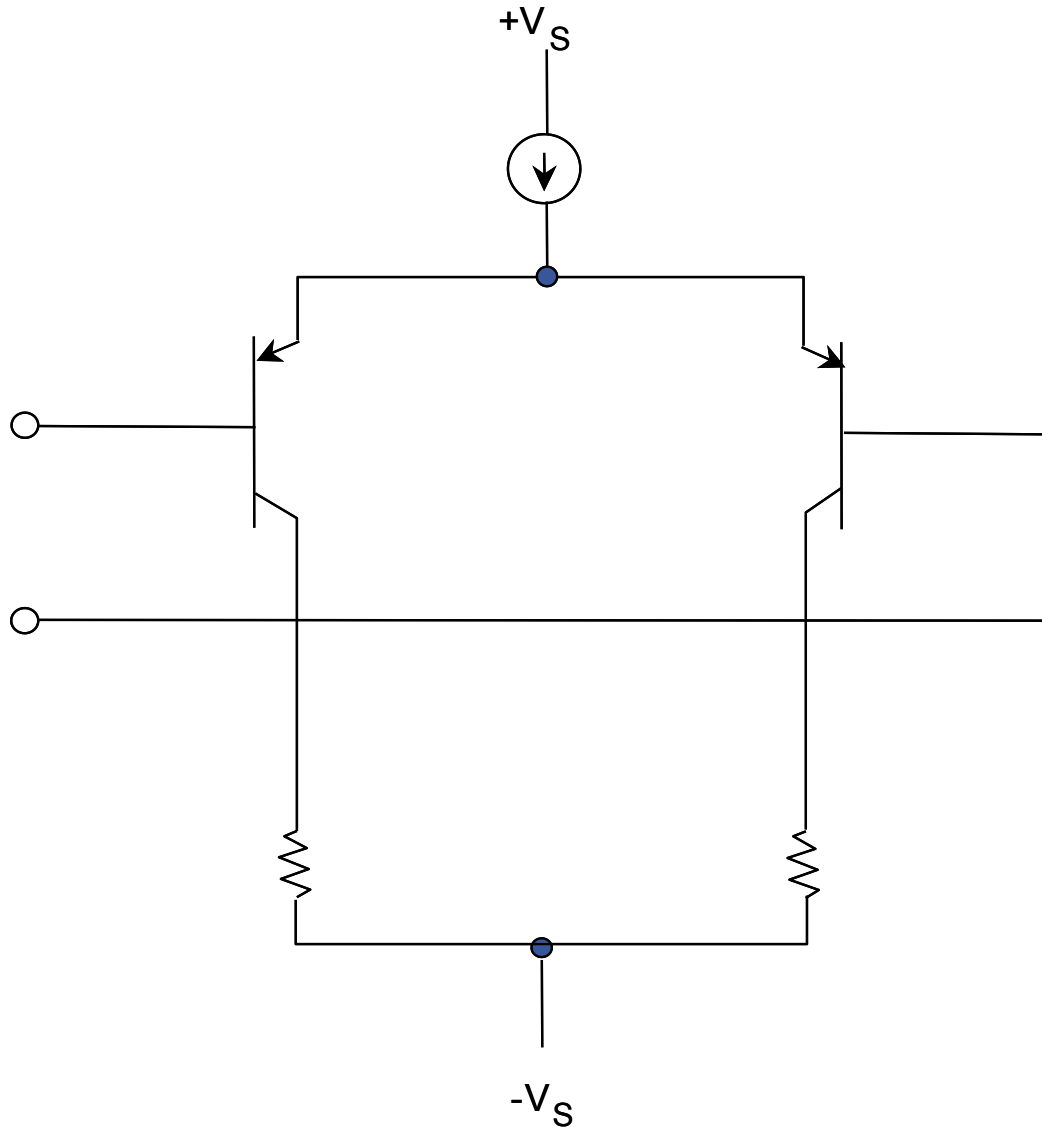
AD8051相位余量



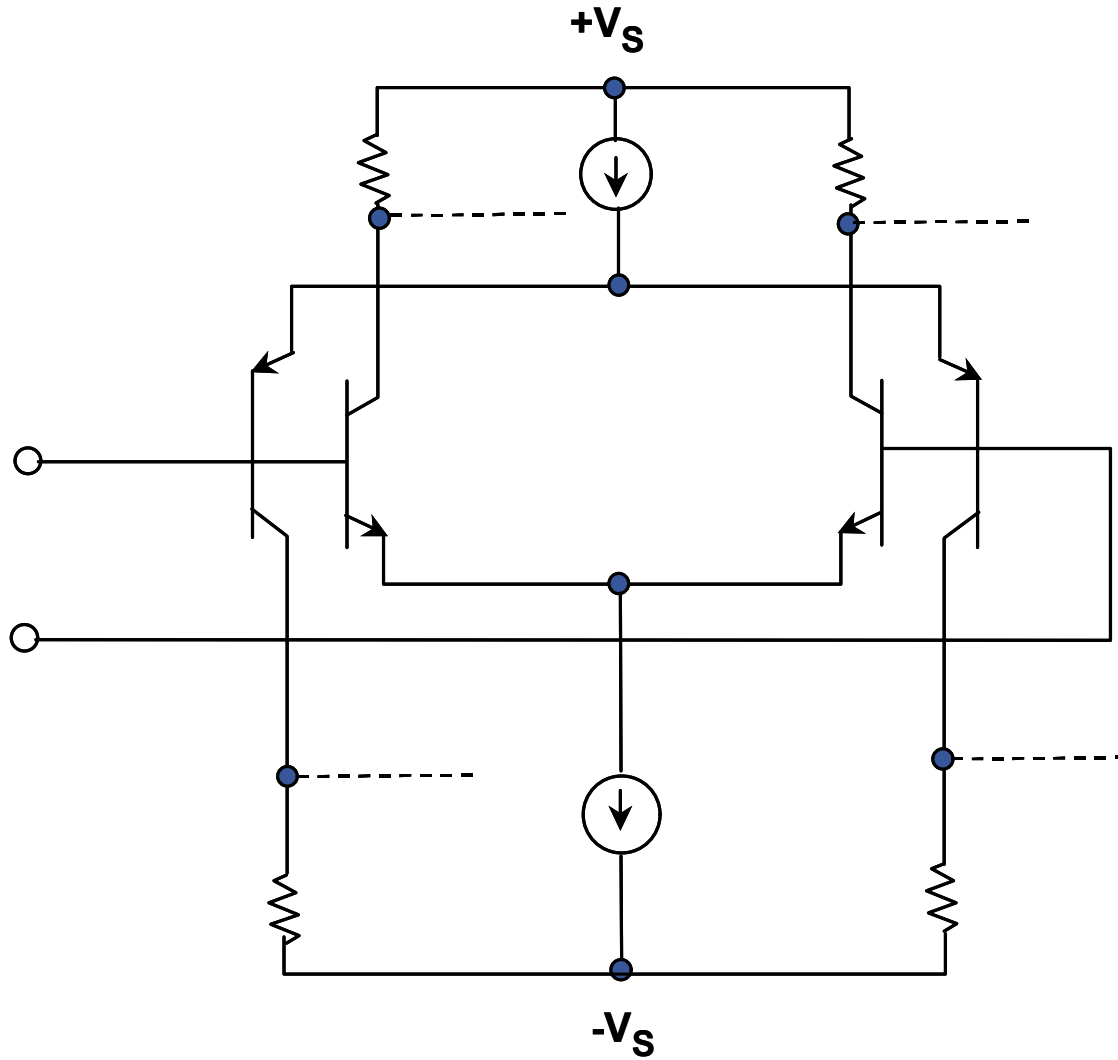
标准输入级 (差分对)



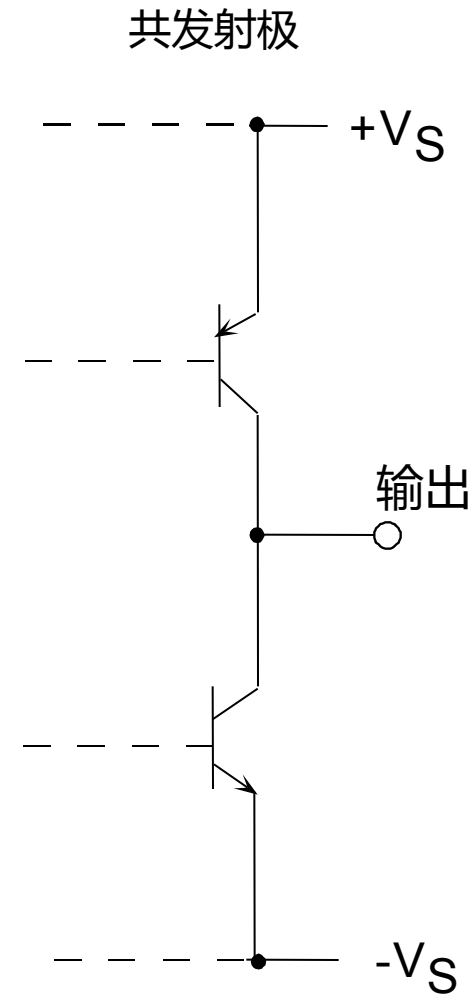
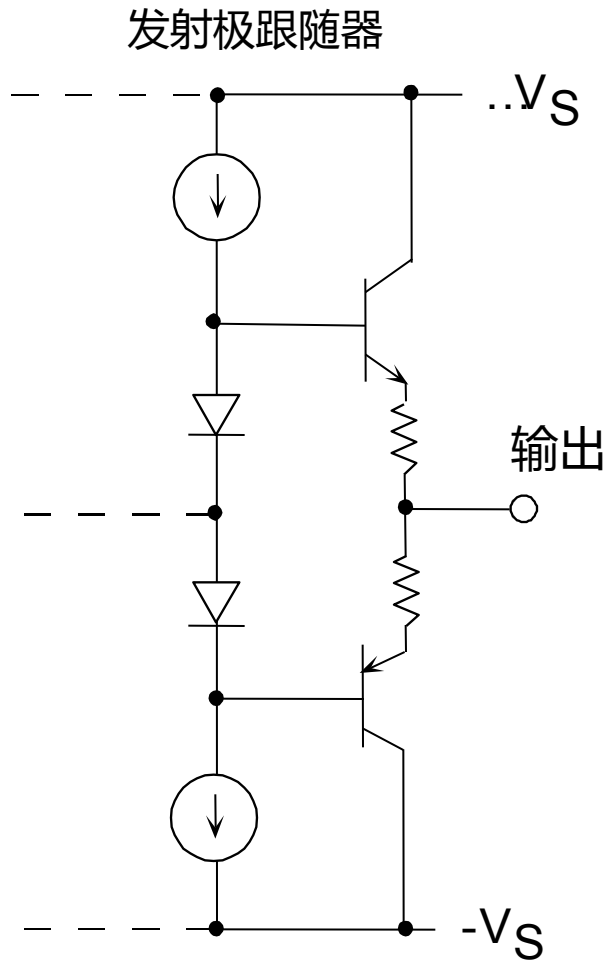
PNP输入级



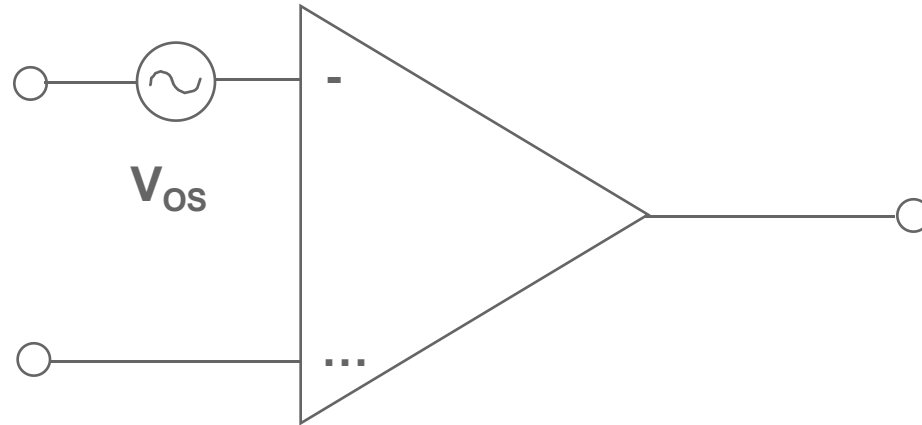
复合输入级



输出级。标准配置的发射极跟随器和“轨到轨”配置的共发射极

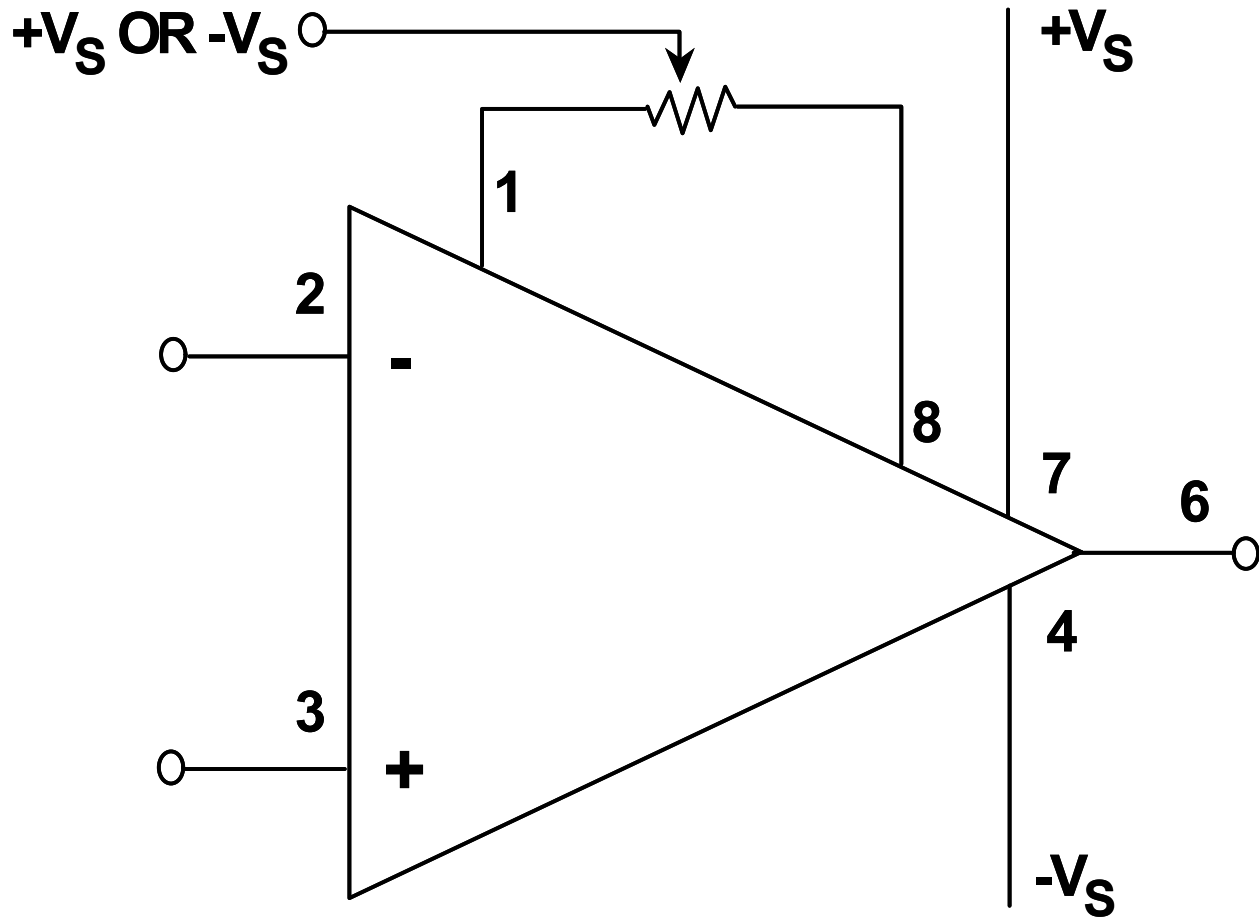


输入失调电压

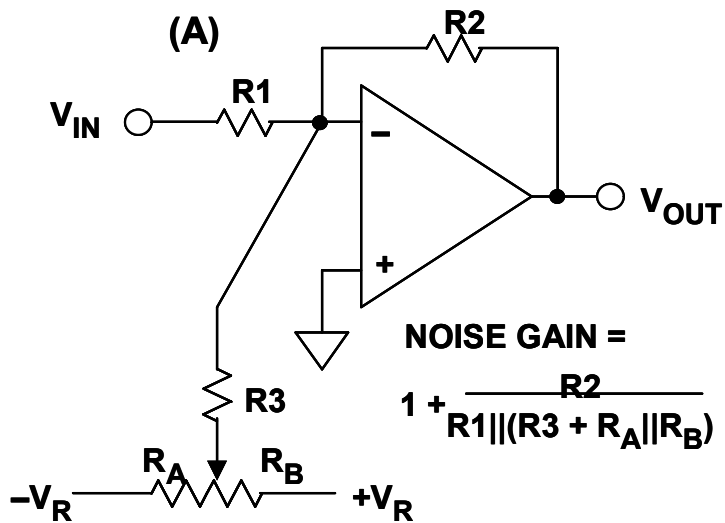


- ◆ 失调电压：须向运算放大器输入端施加以产生0输出的差分电压。
- ◆ 范围：
 - 零漂移斩波稳定运算放大器： $<1\mu\text{V}$
 - 通用精密运算放大器：50-500 μV
 - 最佳双极性运算放大器：10-25 μV
 - 最佳FET运算放大器：100-1,000 μV
 - 高速运算放大器：100-2,000 μV
 - 未调整CMOS运算放大器：5,000-50,000 μV
 - DigiTrim™ CMOS运算放大器： $<1,000\mu\text{V}$

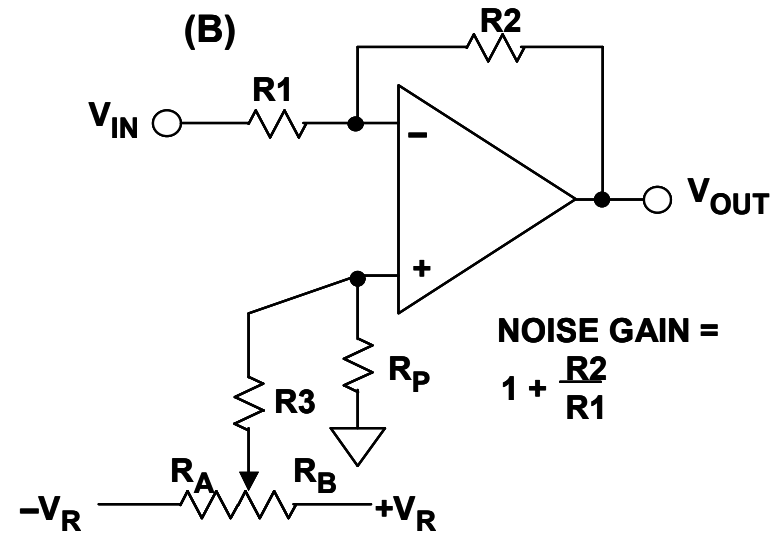
失调调整引脚



外部失调调整



$$V_{OUT} = -\frac{R2}{R1} V_{IN} \pm \underbrace{\frac{R2}{R3} V_R}_{\text{MAX OFFSET}}$$

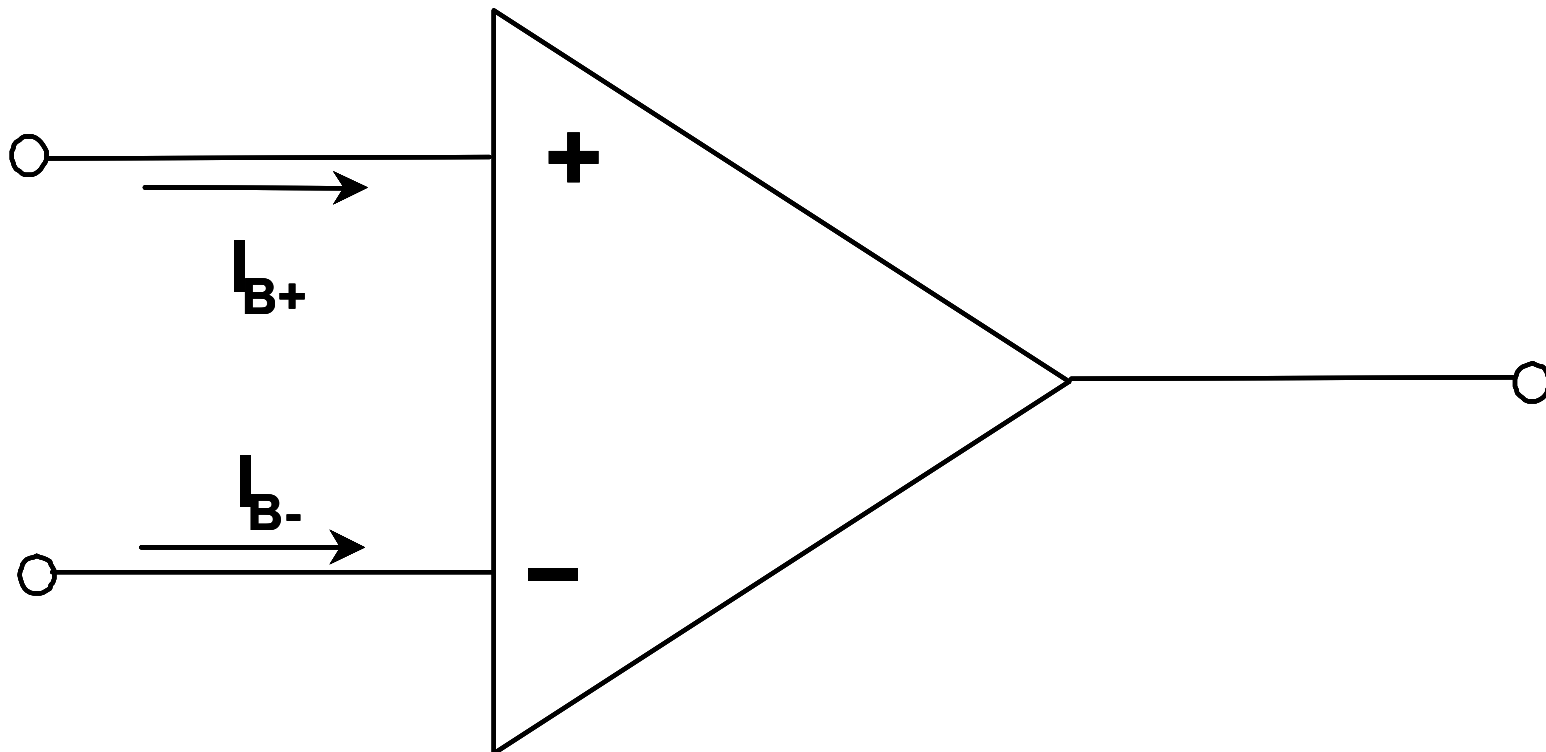


$$V_{OUT} = -\frac{R2}{R1} V_{IN} \pm \underbrace{\left[1 + \frac{R2}{R1} \right] \left[\frac{R_P}{R_P + R3} \right] V_R}_{\text{MAX OFFSET}}$$

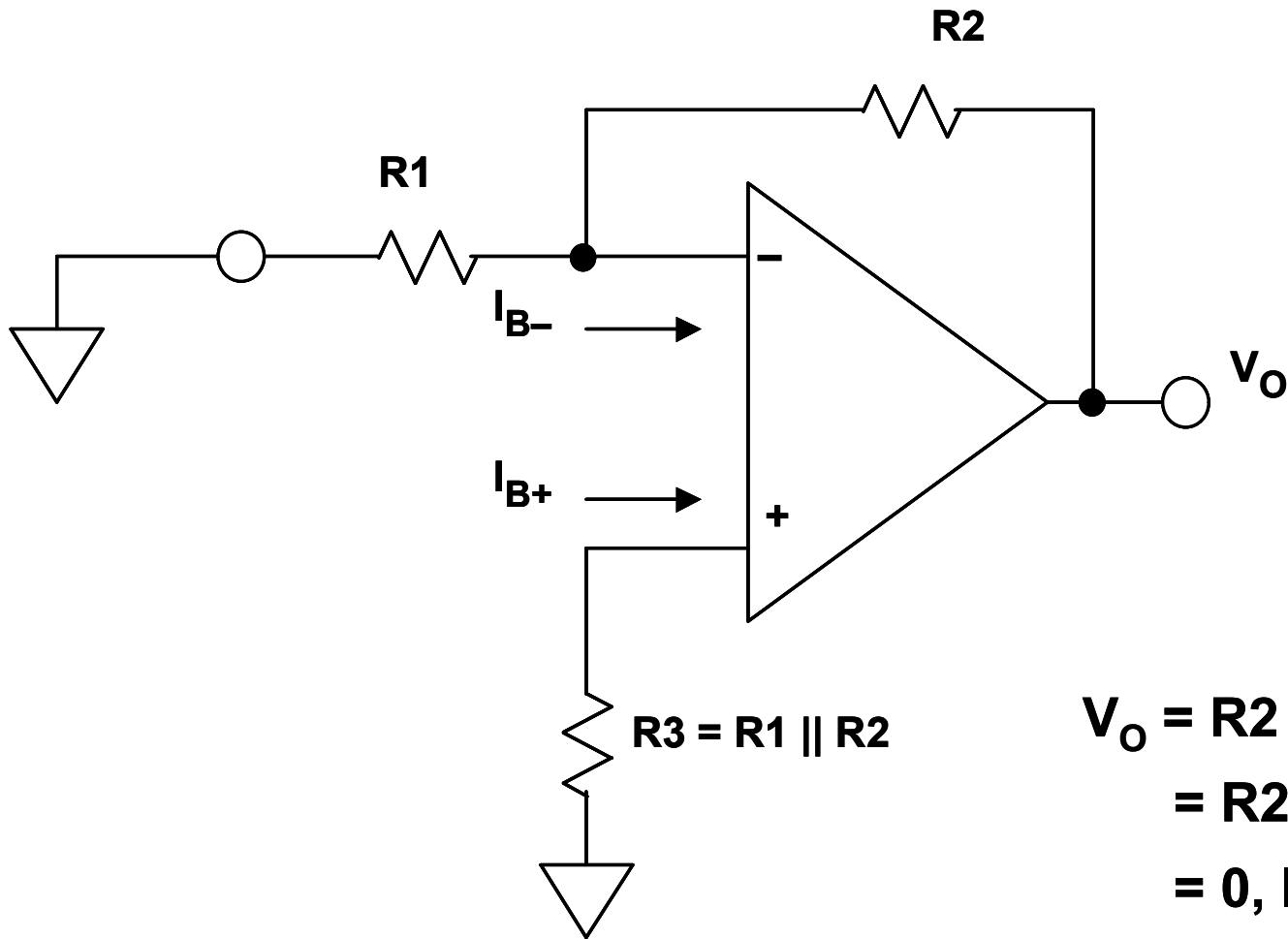
$$R_P = R1 || R2 \quad \text{IF } I_{B+} \approx I_{B-}$$

$$R_P \leq 50\Omega \quad \text{IF } I_{B+} \neq I_{B-}$$

输入偏置电流



偏置电流补偿



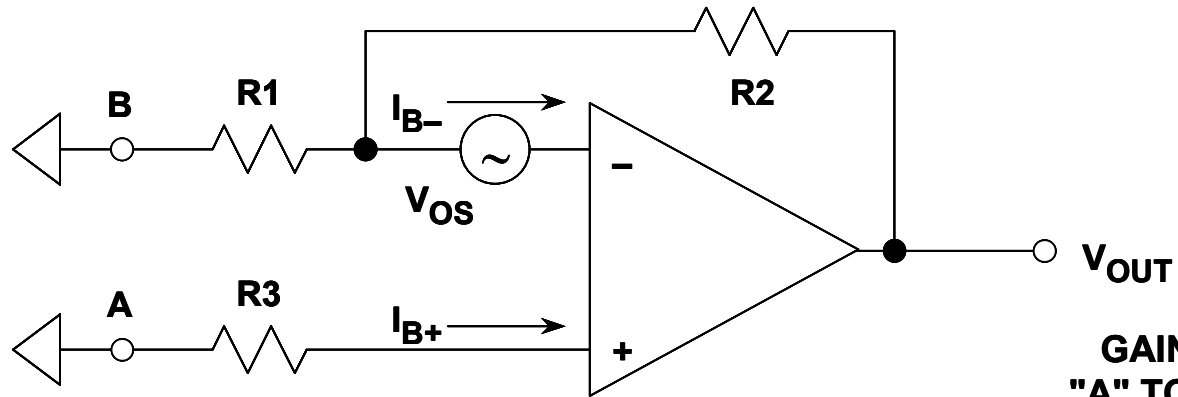
$$\begin{aligned} V_O &= R2 (I_{B-} - I_{B+}) \\ &= R2 I_{OS} \\ &= 0, \text{ IF } I_{B+} = I_{B-} \end{aligned}$$

NEGLECTING V_{OS}

低偏置电流精密BiFET运算放大器 (静电计级)

产品型号	Vos最大值	TC Vos最大值	I ^B 最大值	峰峰值噪声	封装
ADA4530-1	50μV	0.5μV/°C	20fA	4μV p-p	SOIC
ADA4665	1mV	3μV/°C	100fA	3μV p-p	SOIC
AD8603	50μV	1μV/°C	200fA	2.5μV p-p	TSOT
AD8661	30μV	3μV/°C	300fA	2.5μV p-p	LFSCP

总失调电压计算



$$\text{GAIN FROM "B" TO OUTPUT} = -\frac{R2}{R1}$$

$$\text{GAIN FROM "A" TO OUTPUT} =$$

$$\text{NOISE GAIN} =$$

$$\text{NG} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

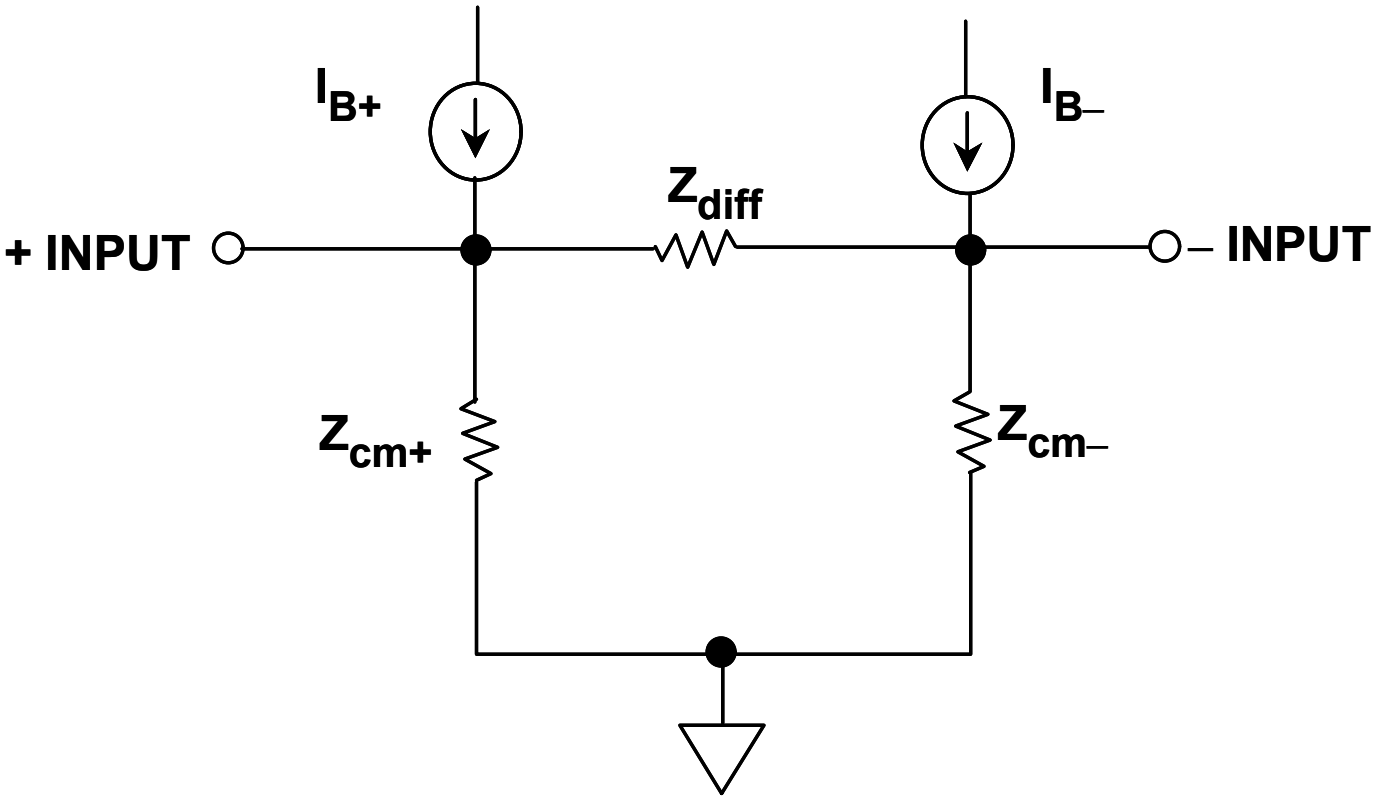
$$\text{OFFSET (RTO)} = V_{OS} \left[1 + \frac{R2}{R1} \right] + I_{B+} \cdot R3 \left[1 + \frac{R2}{R1} \right] - I_{B-} \cdot R2$$

$$\text{OFFSET (RTI)} = V_{OS} + I_{B+} \cdot R3 - I_{B-} \left[\frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} \right]$$

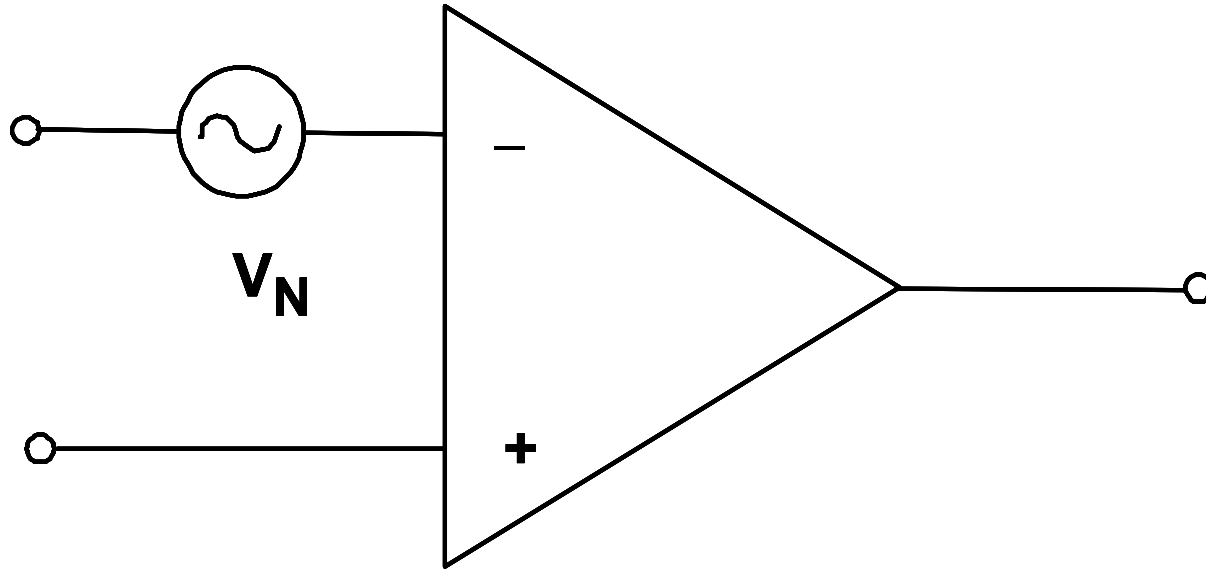
FOR BIAS CURRENT CANCELLATION:

$$\text{OFFSET (RTI)} = V_{OS} \quad \text{IF } I_{B+} = I_{B-} \quad \text{AND } R3 = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}$$

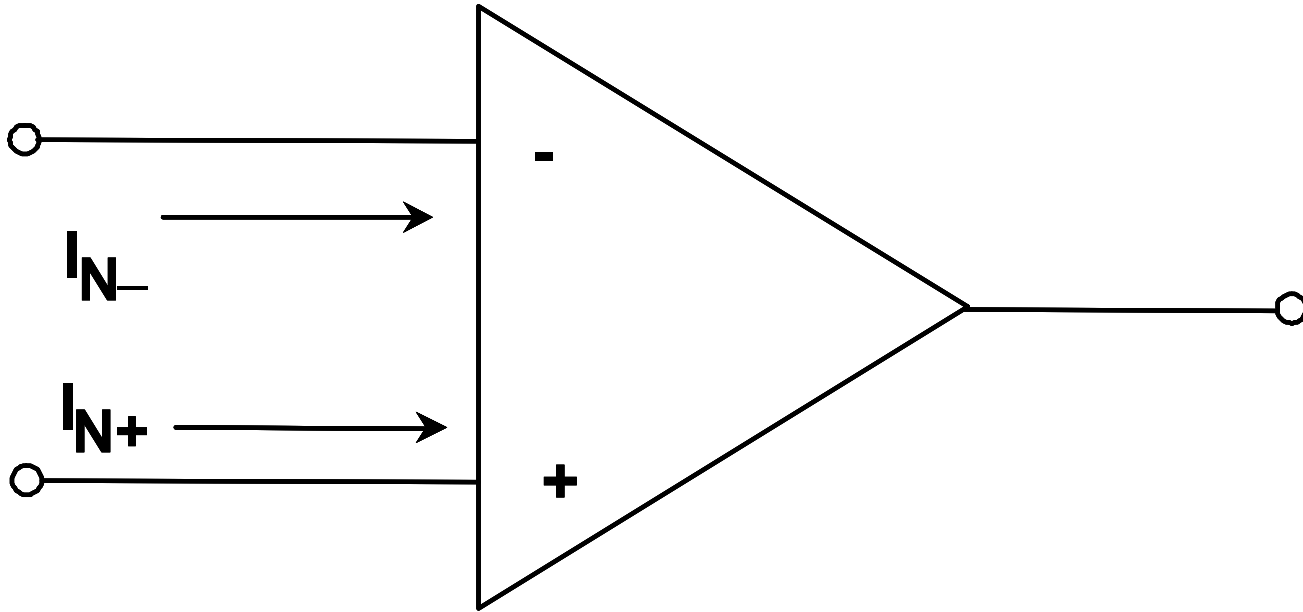
输入阻抗



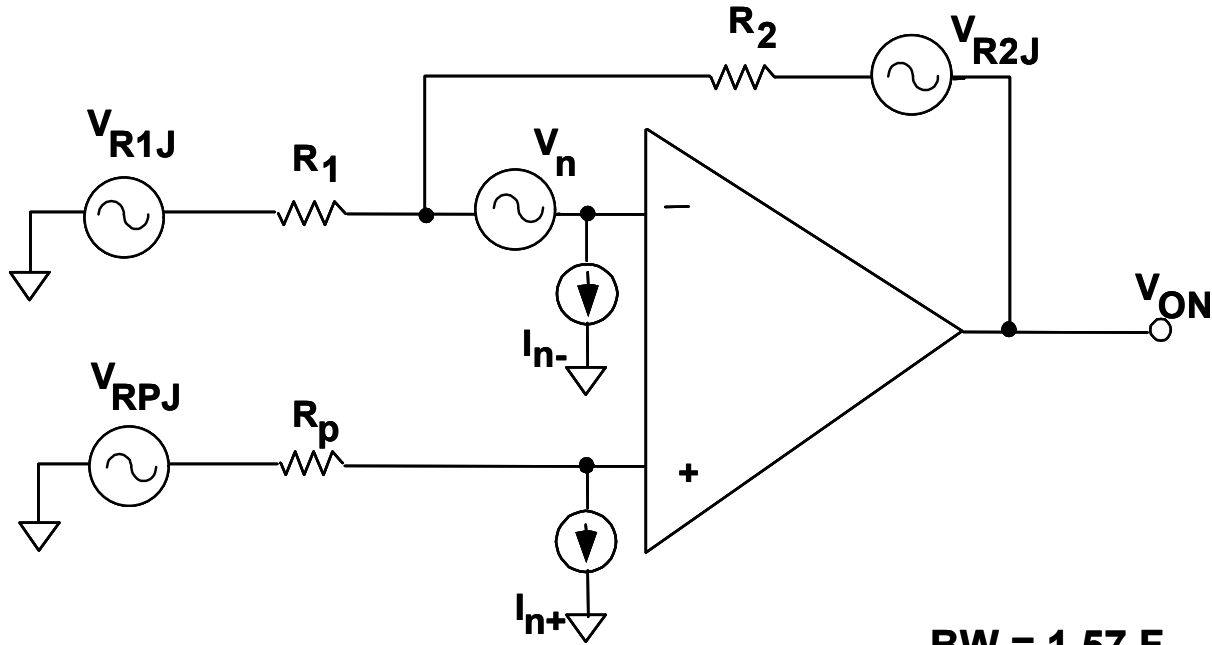
电压噪声



电流噪声



总噪声计算

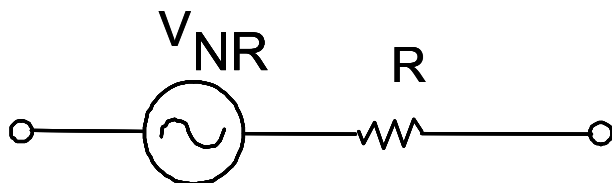


$$BW = 1.57 F_{CL}$$

F_{CL} = CLOSED LOOP BANDWIDTH

$$V_{ON} = \sqrt{BW} \sqrt{[(I_{n-}^2)R_2^2] [NG] + [(I_{n+}^2)R_p^2] [NG] + V_n^2 [NG] + 4kTR_2 [NG-1] + 4kTR_1 [NG-1] + 4kTR_p [NG]}$$

电阻噪声



- u 所有电阻都有 $V_{NR} = \sqrt{4kTBR}$ 的电压噪声
- u $T = \text{绝对温度} = T (^{\circ}\text{C}) + 273.15$
- u $B = \text{带宽(Hz)}$
- u $k = \text{玻尔兹曼常数}(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})$
- u 1000Ω 电阻产生的噪声为 $4 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ (25°C 时)

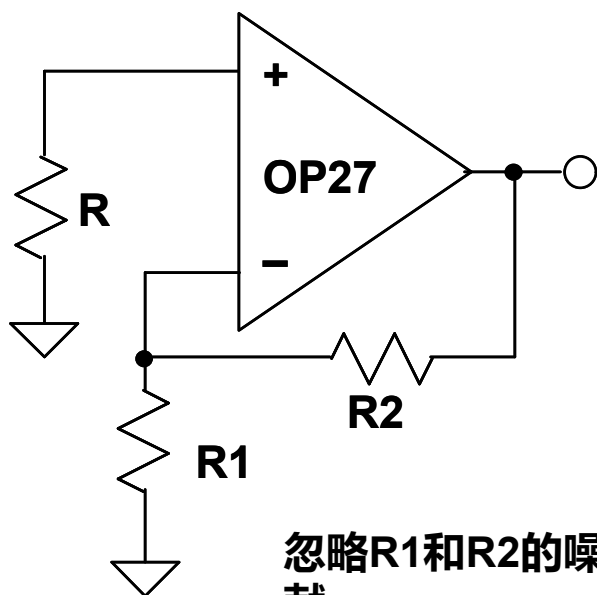
主噪声源取决于输入阻抗

示例：OP27

电压噪声 = $3\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}$

电流噪声 = $1\text{pA} / \sqrt{\text{Hz}}$

$T = 25^\circ\text{C}$

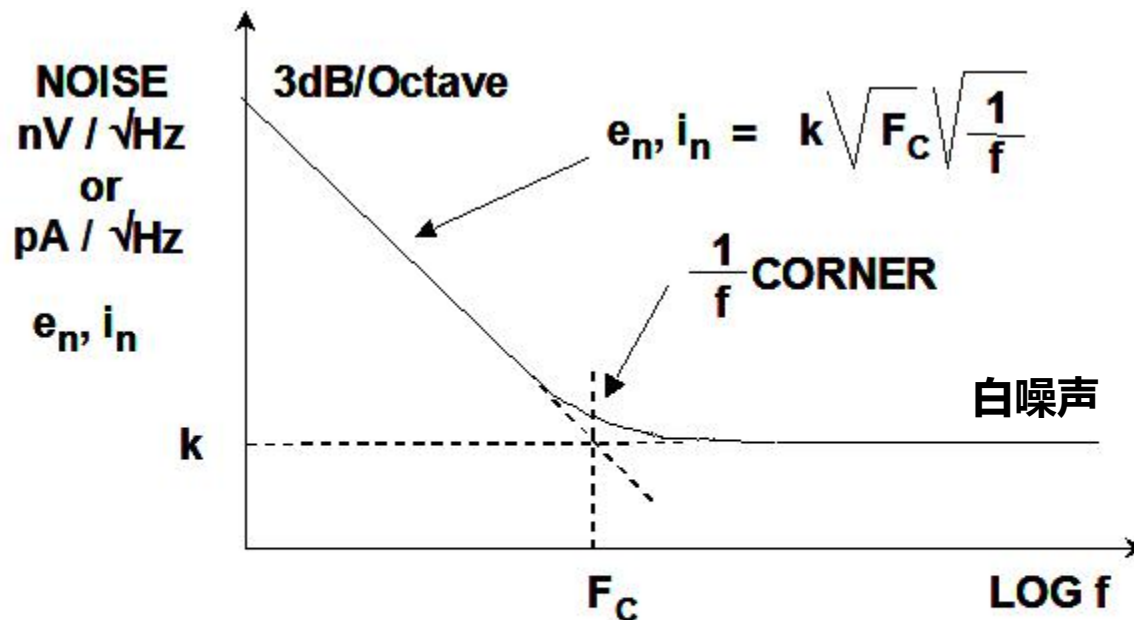


来源 FROM	R值		
	0	3kΩ	300kΩ
放大器电压噪声 VOLTAGE NOISE	3	3	3
流入R的放大器电流 噪声 FLOWING IN R	0	3	300
R的约翰逊噪声 NOISE OF R	0	7	70

RTI噪声($\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}$)

主噪声源突出显示

1/f噪声带宽



- ▶ 1/f转折频率是运算放大器性能的品质因数（越低越好）
- ▶ 典型范围：2Hz至2kHz
- ▶ 电压噪声和电流噪声不一定具有相同的1/f转折频率

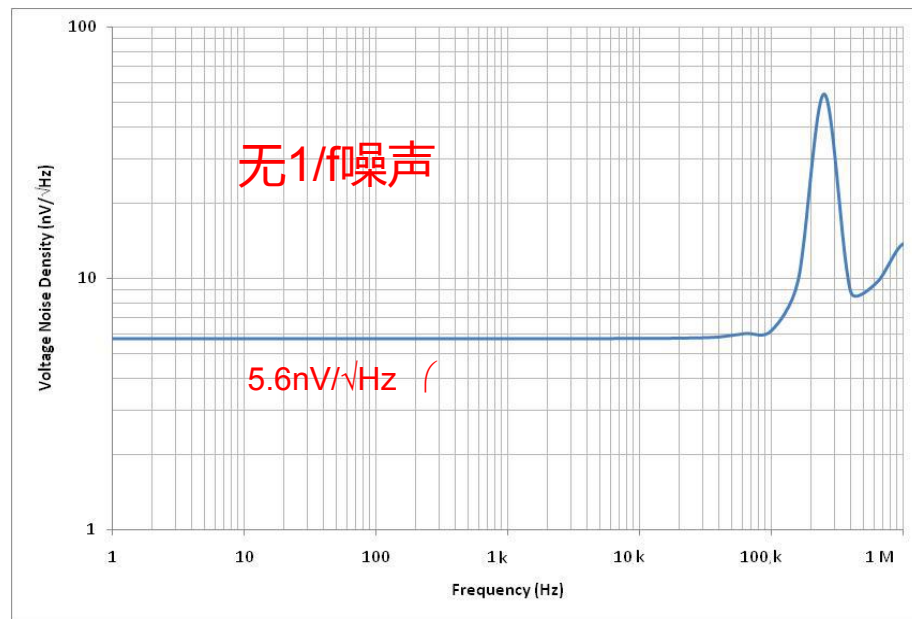
ADA4528-x 全球最精确的运算放大器低噪声零漂移放大器

▶ 主要特性

- 最低噪声零漂移放大器
 - 5.6 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 本底噪声
 - 无1/f噪声
- 高直流精度
 - 低失调电压：2.5 μV (最大值)
 - 低失调电压漂移：0.015 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (最大值)
- 轨到轨输入/输出
- 工作电压：2.2 V至5.5 V

▶ 应用

- 传感器应用
- 温度测量
- 电子秤
- 医疗仪器
- 电池供电仪表

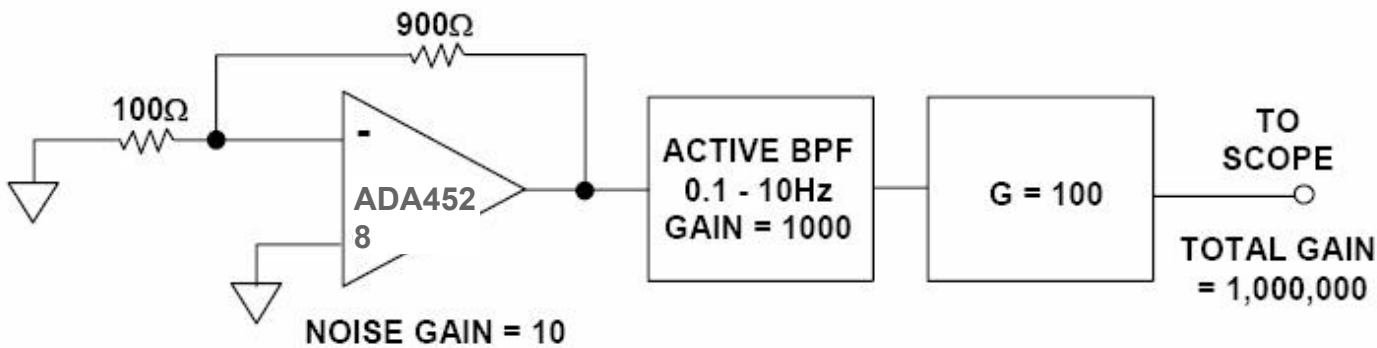
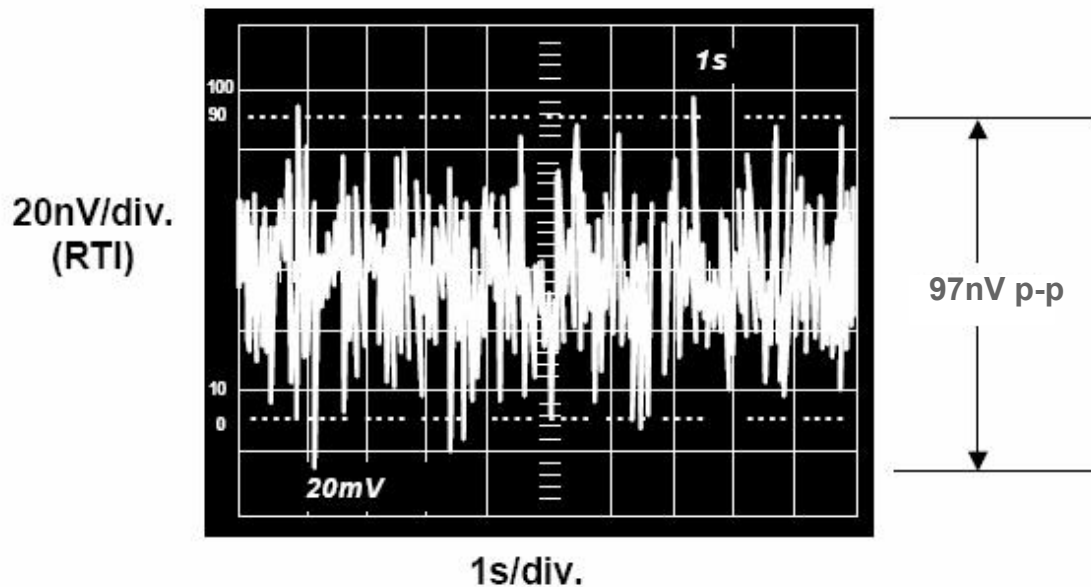


均方根与峰峰值电压比较图

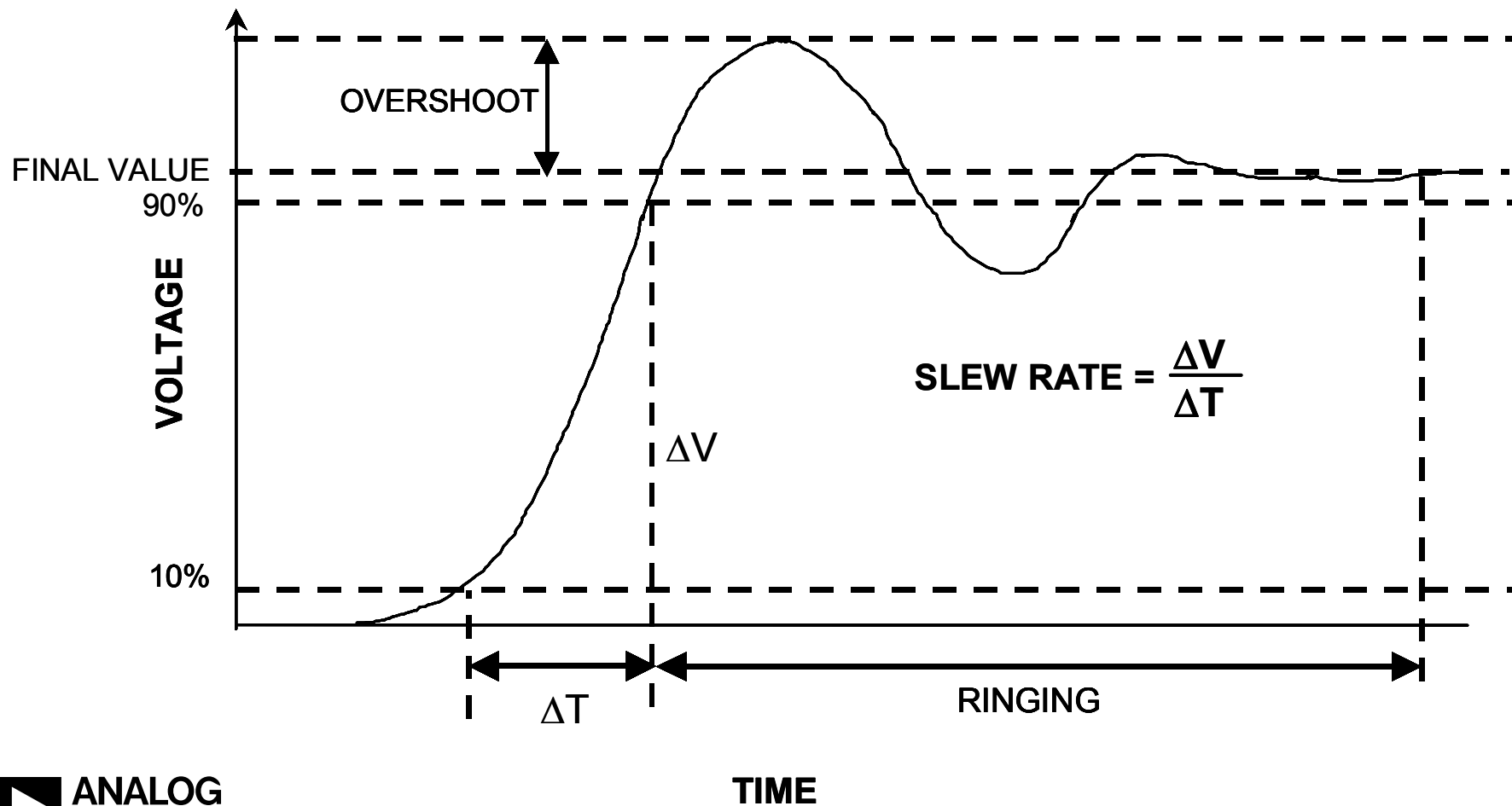
Nominal Peak-to-Peak	% of the Time Noise will Exceed Nominal Peak-to-Peak Value
$2 \times \text{rms}$	32%
$3 \times \text{rms}$	13%
$4 \times \text{rms}$	4.6%
$5 \times \text{rms}$	1.2%
$6 \times \text{rms}$	0.27%
$6.6 \times \text{rms}^{**}$	0.10%
$7 \times \text{rms}$	0.046%
$8 \times \text{rms}$	0.006%

****Most often used conversion factor is 6.6**

0.1 Hz至 10 Hz带宽ADA4528的峰峰值噪声



压摆率



压摆率和全功率带宽

压摆率 = 运算放大器输出电压的最大变化速率

范围：数伏/ μs 至数千伏/ μs

对于正弦波， $V_{\text{out}} = V_p \sin 2\pi f t$

$$dV/dt = 2\pi f V_p \cos 2\pi f t$$

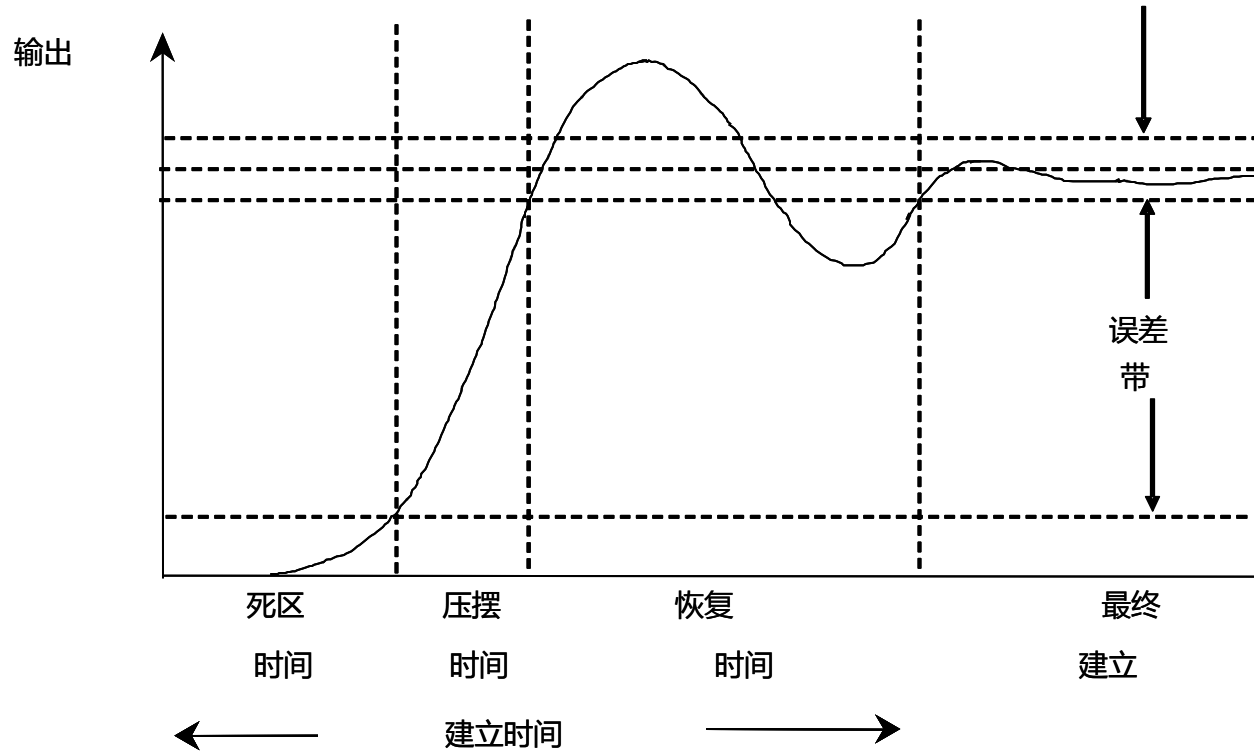
$$(dV/dt)_{\text{max}} = 2\pi f V_p$$

If $2 V_p =$ 运算放大器的全输出范围，则

$$\text{压摆率} = (dV/dt)_{\text{max}} = 2\pi * \text{FPBW} * V_p$$

$$\text{FPBW} = \text{压摆率} / 2\pi V_p$$

建立时间

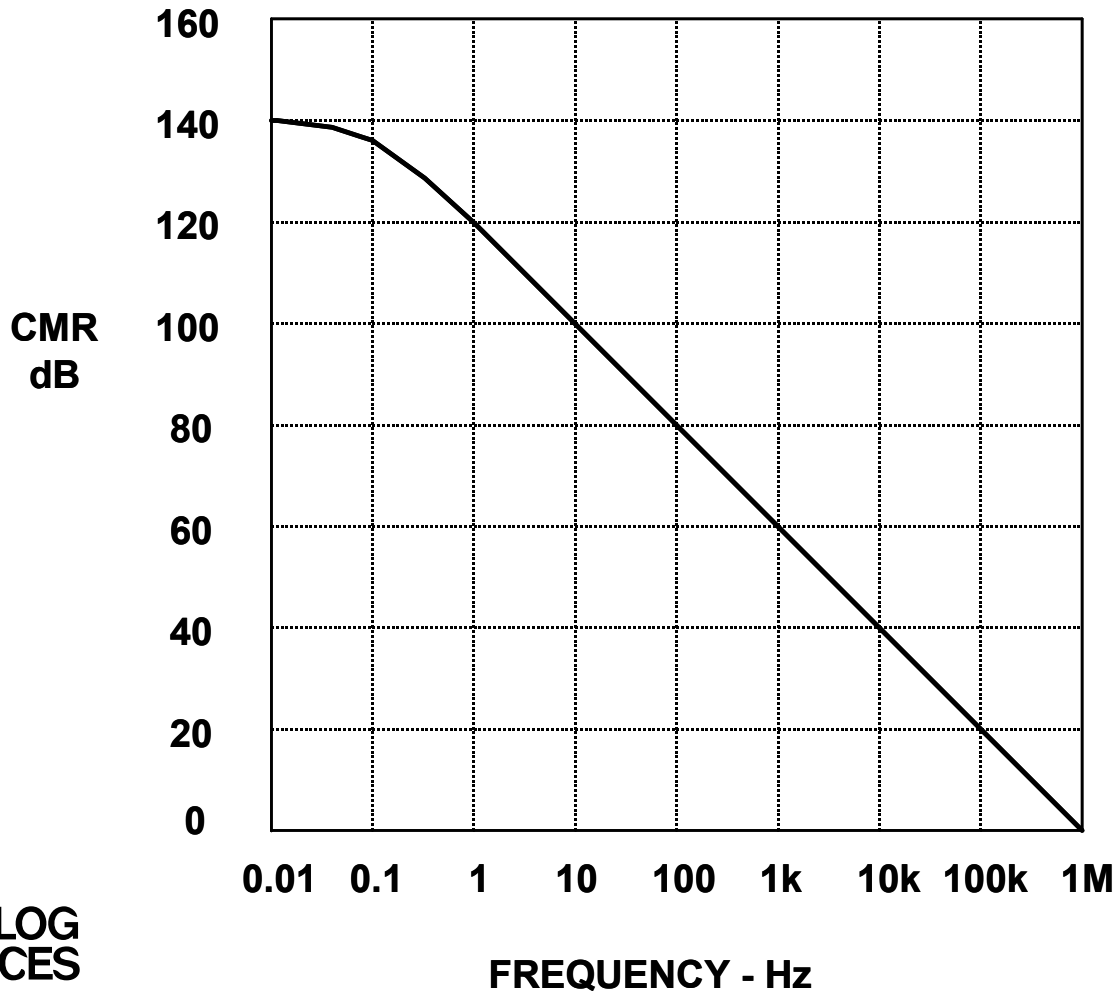


误差带通常定义为步长百分比，0.1%、0.05%、0.01%等。

建立时间是非线性的，相比建立到0.1%所需的时间，建立到0.01%所需的时间可能长达30倍之久。

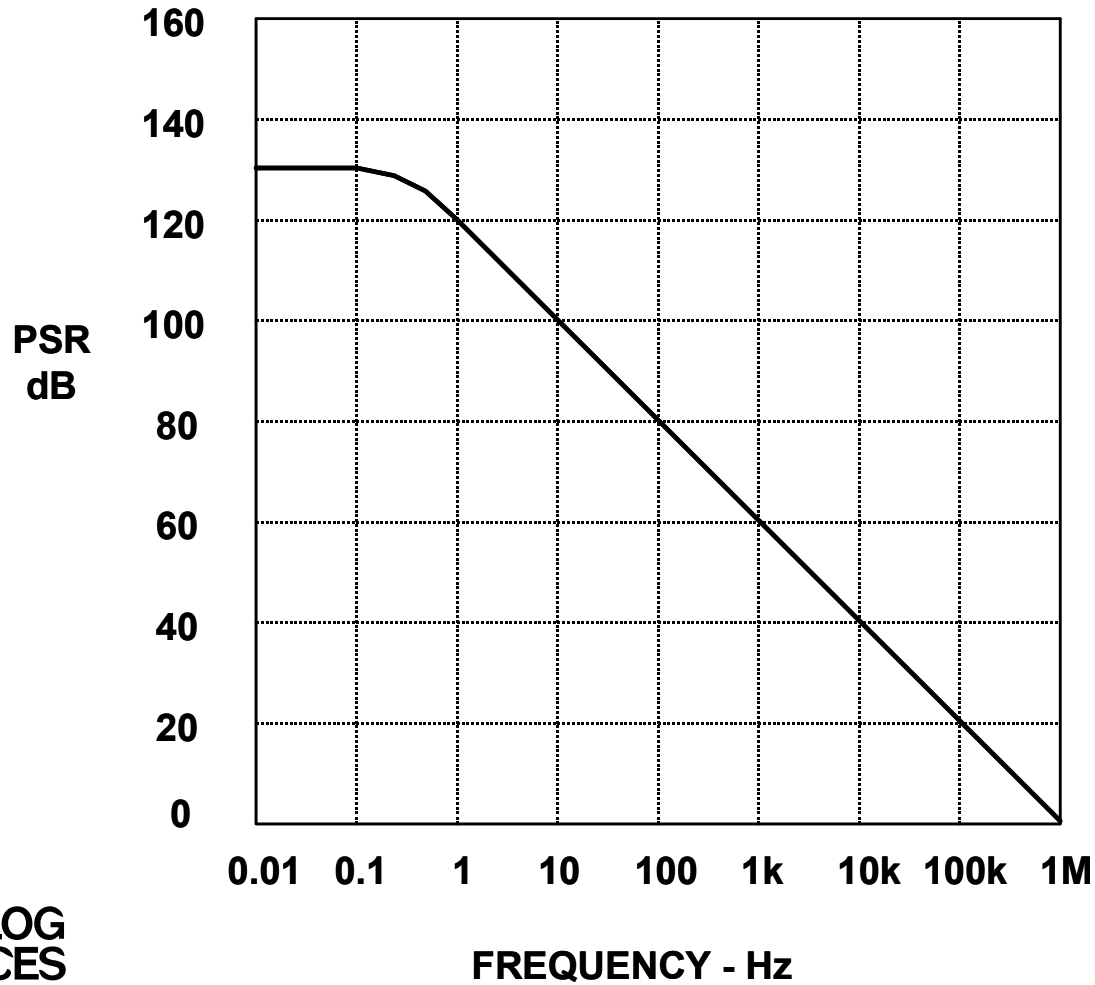
制造商往往选择使运算放大器，看似性能优良的误差带。

OP177的共模抑制比



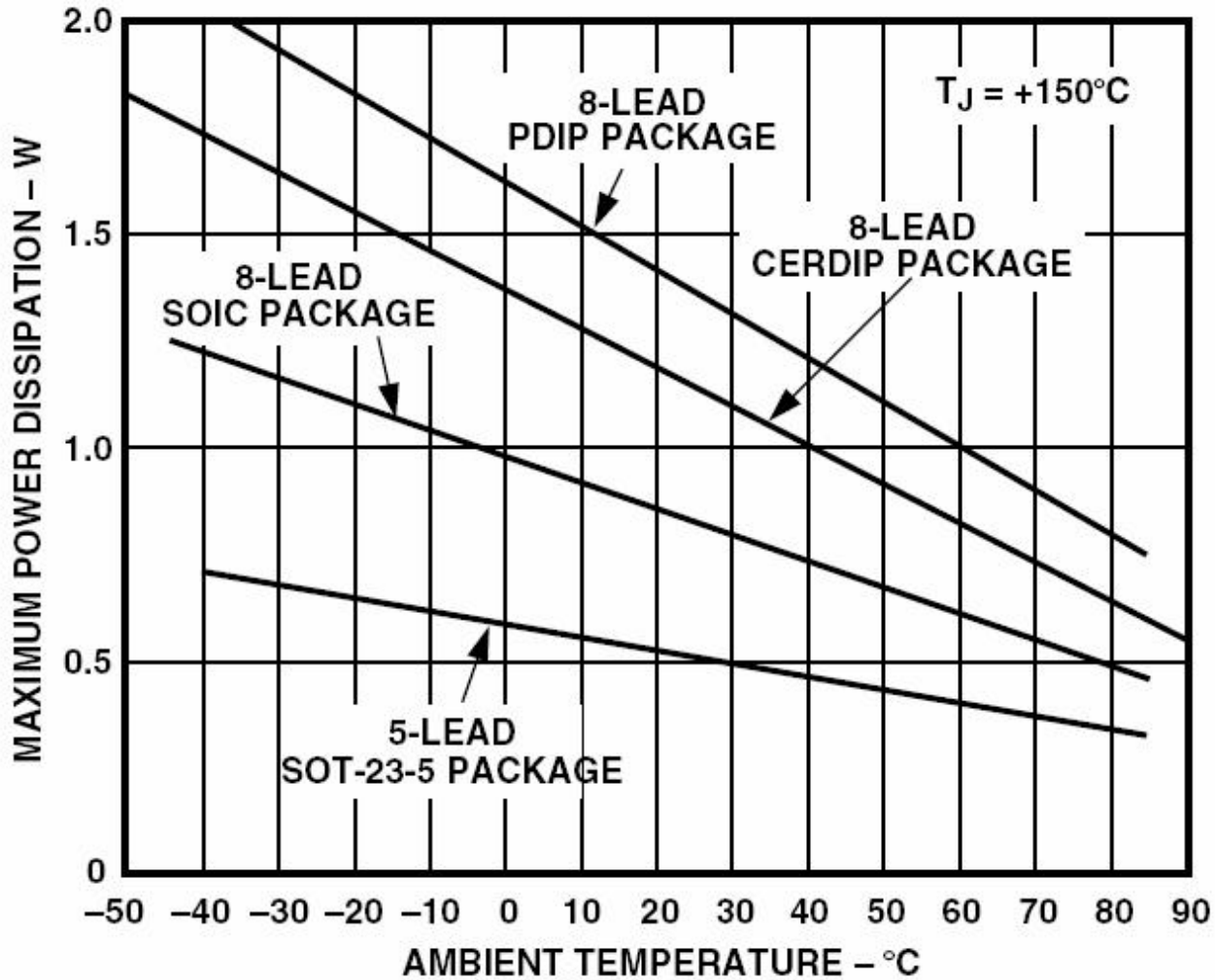
$$\text{CMR} = 20 \log_{10} \text{CMRR}$$

电源抑制比

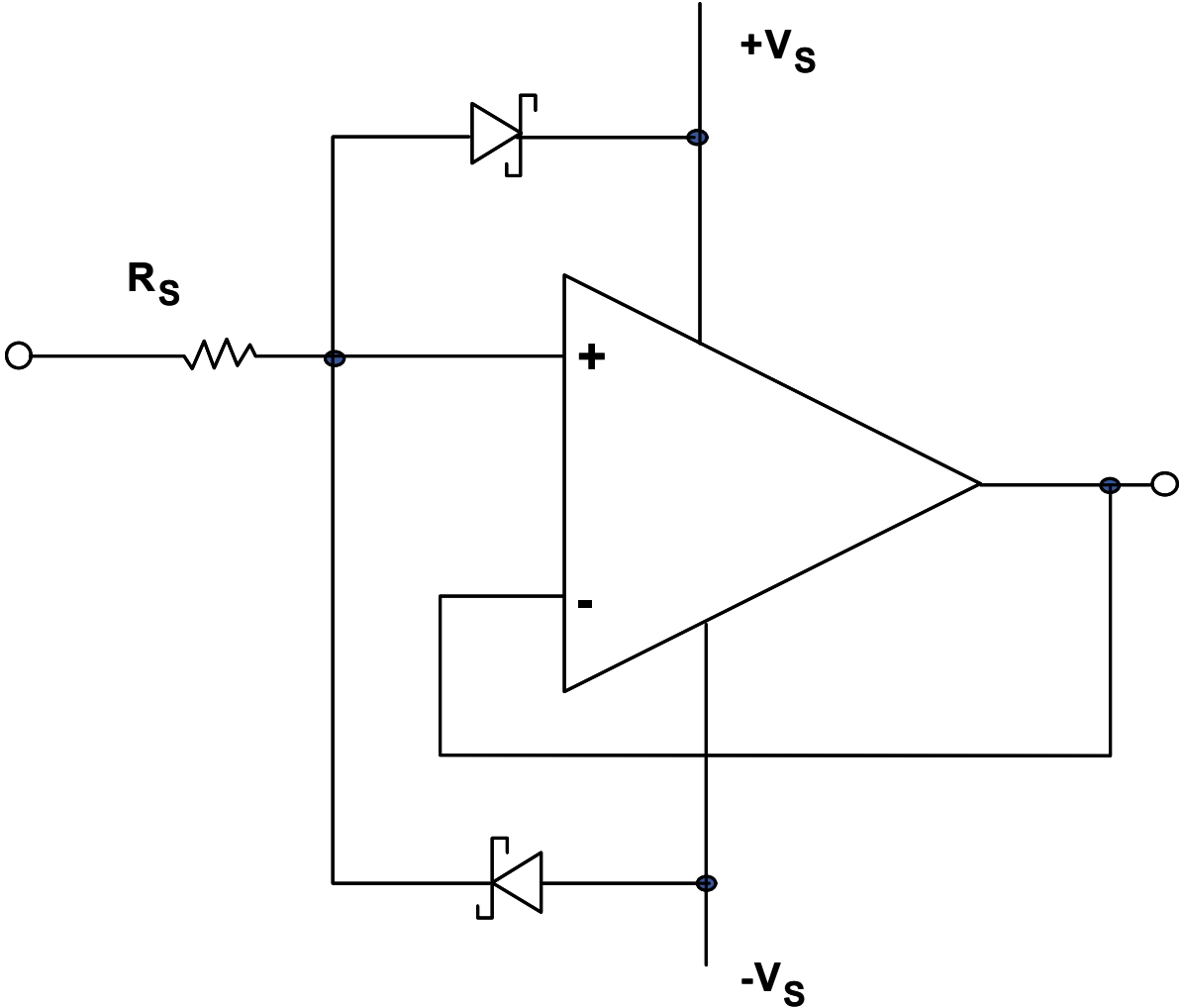


$$\text{PSR} = 20 \log_{10} \text{PSRR}$$

最大功率图 (来自AD8001)



输入保护



典型绝对最大额定值

绝对最大额定值¹

电源电压	12.6 V
内部功耗 ²	
塑料DIP封装(N)	3 W
小型封装(R)	0.9 W
SOT-23-5封装(RT)	0.5 W
输入电压（共模）	$\pm V_S$
差分输入电压	± 1.2 V
输出短路持续时间	
见功率降额曲线存储温度范围NR	-65°C至+125°C
工作温度范围（A级）	-40°C至+85°C
引脚温度范围（焊接，10秒）	+300°C

注释

¹超出上述绝对最大额定值可能会导致器件永久性损坏。这只是额定最值，不表示在这些条件下或者在任何其它超出本技术规范操作章节中所示规格的条件下，器件能够正常工作。长期在绝对最大额定值条件下工作会影响器件的可靠性。

²规格针对自由空气中的器件而言：

8引脚塑料DIP封装： $\theta_{JA} = 90^\circ\text{C/W}$

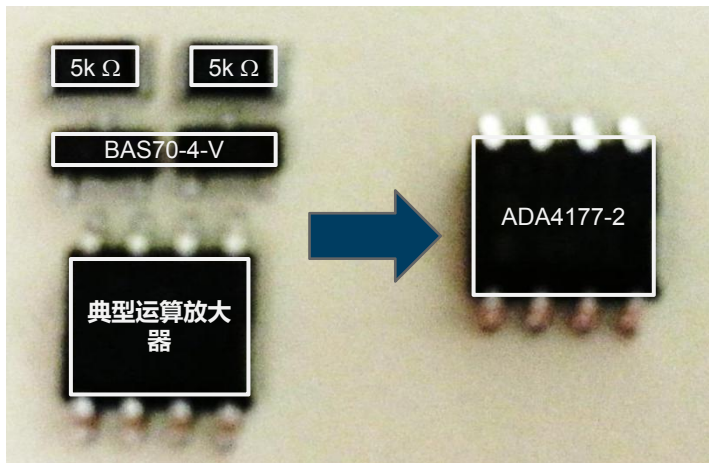
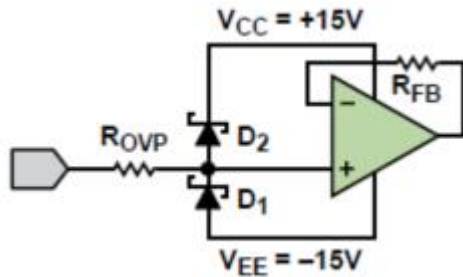
8引脚SOIC封装： $\theta_{JA} = 155^\circ\text{C/W}$

8引脚Cerdip封装： $\theta_{JA} = 110^\circ\text{C/W}$

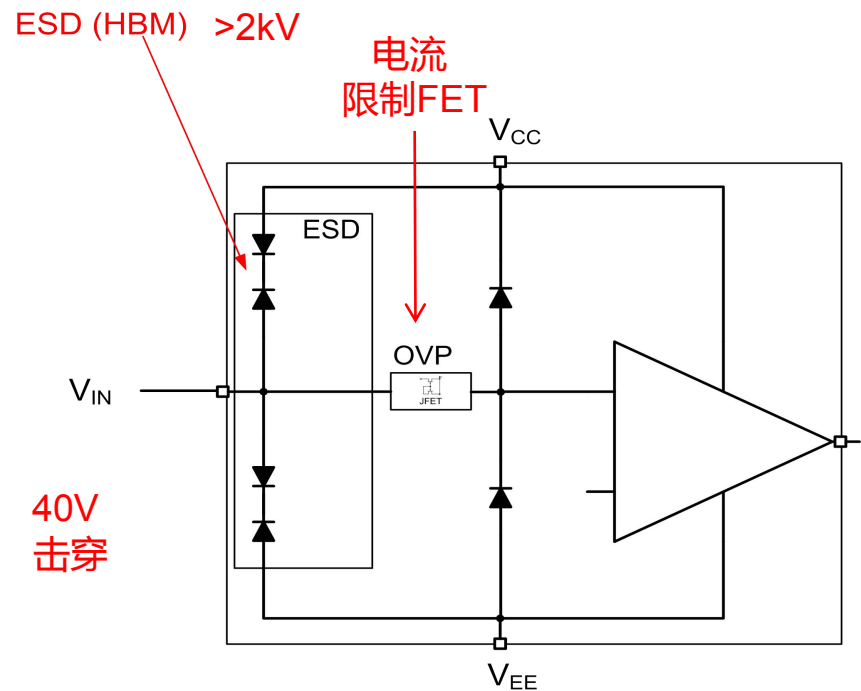
8引脚SOT-23-5封装： $\theta_{JA} = 260^\circ\text{C/W}$

过压保护 – 分立与集成

外部解决方案



集成解决方案



单电源运算放大器

◆ 单电源优势：

- 更低功耗
- 电池供电的便携式设备
- 仅需一个电压

◆ 设计利弊：

- 较小的信号摆幅会提高对失调电压、偏置电流、有限开环增益、噪声等引起的误差的敏感性
- 通常须共享高噪声数字电源
- 需要轨到轨输入和输出以提高信号摆幅
- 精度低于最好的双电源运算放大器，但不是所有应用都要求高精度
- 许多运算放大器指定单电源，但没有轨到轨输入或输出

谢谢观看！

- ▶ ADI中国地区技术支持热线：4006 100 006
- ▶ ADI中国地区技术支持信箱：
china.support@analog.com
- ▶ ADI样片申请网址：
<http://www.analog.com/zh/sample>