

全球领先的高性能信号处理解决方案供应商



# 差分驱动**ADC**

## 第一部分



# 议题

## ◆ 第一部分

- 简介——为什么需要驱动器？
- 数据采集系统与误差概述
- 差分信号及其优势概述
- 转换器输入级
- 差分**ADC**驱动器架构

## ◆ 第二部分

- 将**ADC**驱动器规格与**ADC**规格相匹配
- 新型高速差分**ADC**驱动器
- 电流反馈与电压反馈架构
- 采用差分输入驱动高速转换器
- 如何设计单端端接输入**ADC**驱动器

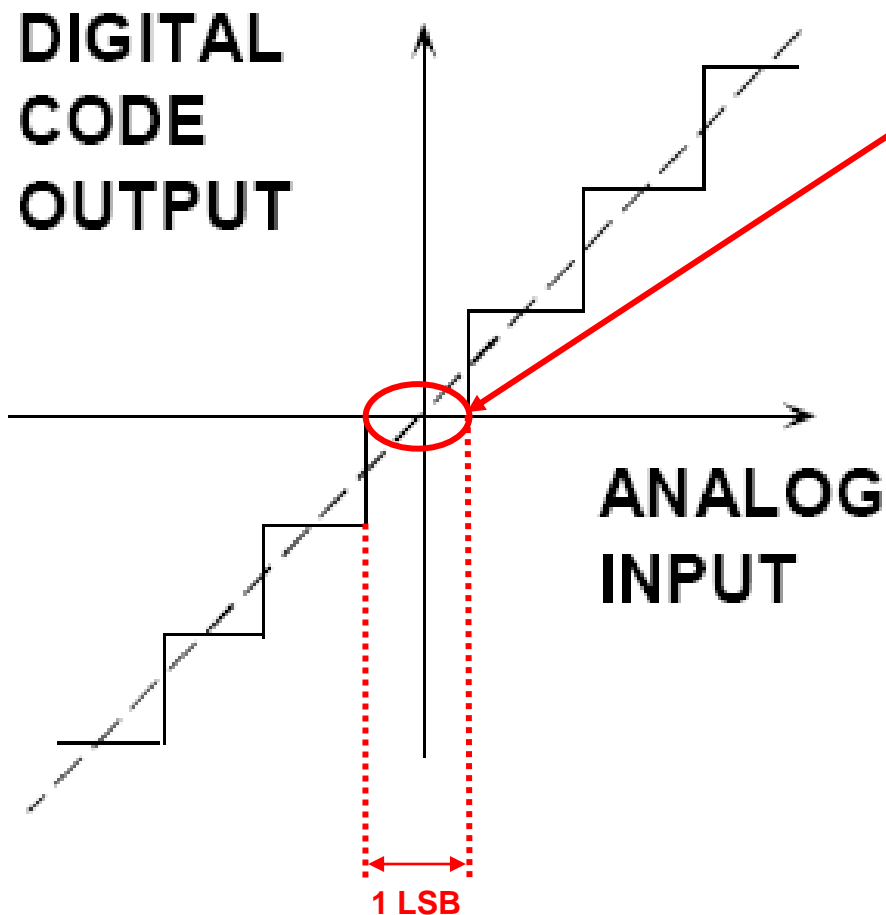


# 为什么需要驱动器？

- ◆ **ADC**输入在很多情况下与信号不太匹配
  - 大多数高性能**ADC**都有差分输入，但是许多信号都是单端的
  - 许多**ADC**输入使用都不太方便，需要进行缓冲
  - 通常需要进行增益和电平转换
- ◆ 为了优化总体系统性能，我们可以采用差分驱动器来使信号与**ADC**输入相匹配
- ◆ 大多数情况下，首先选择的是**ADC**，然后再选择合适的驱动器

# 数据采集系统与误差概述

## 理想ADC传递特性



**1 LSB (最低位) 以内的  
模拟误差  
不会出现在输出端**

- ◆ 主要模拟误差包括：
  - 积分电噪声
  - 谐波失真积
  - 建立时间误差
  - 我们将重点讨论上述误差
- ◆ 量化噪声也必须考虑
- ◆ **DNL**和采样抖动也会产生误差，但进行初选时通常无需考虑



# 数据采集系统与误差概述

## 基础知识与定义

- ◆ **ADC的位数定义为N，也称ADC 分辨率**
- ◆ **对于N位ADC，共有 $2^N$ 个编码，模拟范围为 $2^N$**
- ◆ **1 LSB是 $1/2^N$ 的满量程(FS)最高编码**
  - **满量程即“全部为1”的编码，通常比模拟输入满量程范围少1 LSB**
- ◆ **例如，14位ADC的LSB为 $1/2^{14} = 1/16384$  FS**
  - **$1/16384$  FS = 61 ppm FS**
- ◆ **假定满量程输入电压为2 V**
  - **$1$  LSB =  $2V/16384 = 122$   $\mu$ V 宽度**
- ◆ **从数学角度来看，通常LSB = q（量化级）**
- ◆ **选择ADC驱动器时，1 LSB的幅度(q)是一个重要考虑因素**



# 数据采集系统与误差概述

## ADC不理想

- ◆ **ADC**存在内部噪声，而且会产生谐波失真
- ◆ 需要确定相关的**ADC**和驱动器性能指标：
  - 信号带宽(**BW**)
  - 量化噪声、电器噪声，以及信号-量化噪声比
  - 谐波失真(**HD**)
  - 总谐波失真(**THD**)
  - 信纳比(**SINAD**)
  - 有效位数(**ENOB**)
  - 交调失真(**IMD**)以及三阶交调截点(**IP3**)
  - 建立时间
- ◆ 开始选择高速驱动器时，这些指标是需要考虑的最重要的技术规格
- ◆ 其它**ADC**技术规格（例如失调、单调性、**INL**、**DNL**等）在开始选择高速驱动器时通常不太重要



# 数据采集系统与误差概述

## ◆ 带宽

- 信号带宽很简单，但是性能合理的带宽通常远小于3 dB。

## ◆ ADC噪声有两种：

- 量化噪声和电噪声（热噪声、散粒噪声等）

$$RMS \text{ Quantization Error} = \frac{q}{\sqrt{12}}$$

- ◆ 对于满量程输入正弦波，可以看出对N位ADC来说，奈奎斯特带宽中以dB为单位的信号-量化噪声为：

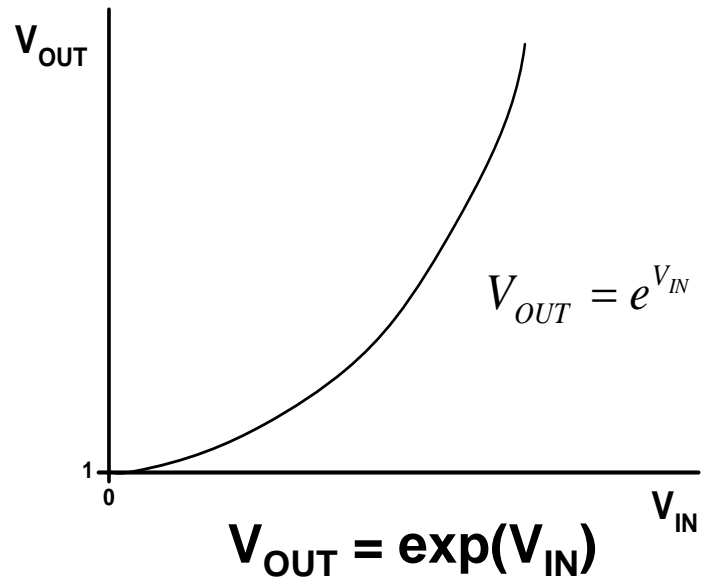
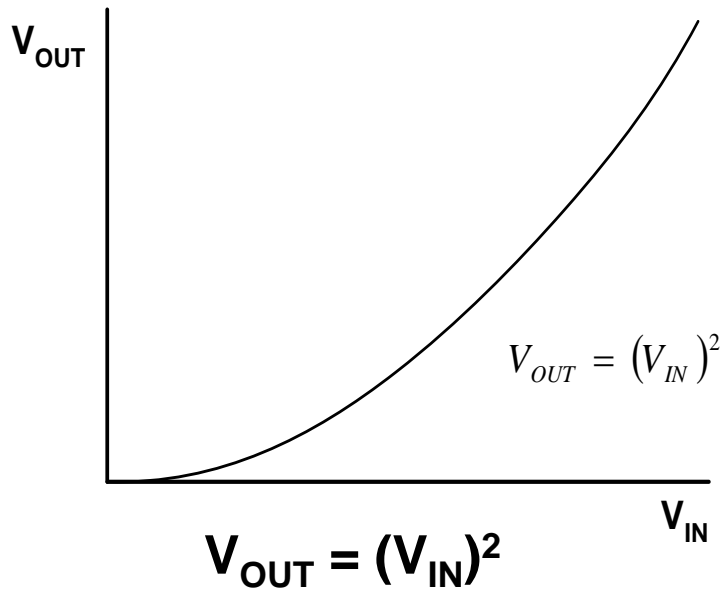
$$Signal - to - Quantization \text{ Noise Ratio (dB)} = 6.02 N + 1.76 \quad dB$$

- ◆ 量化噪声不可避免，该信号-量化噪声表示理想ADC的最佳信噪比
- ◆ 电噪声通过将ADC输入短路以及查看输出码直方图来测量，表示为 $LSB_{RMS}$

# 数据采集系统与误差概述

## 非线性器件特性与谐波失真(HD)

- ◆ 我们希望获得线性系统，但是没有器件呈现完美的线性
- ◆ 即便是连接器也存在非线性
- ◆ 严重非线性传递函数示例（1象限）：



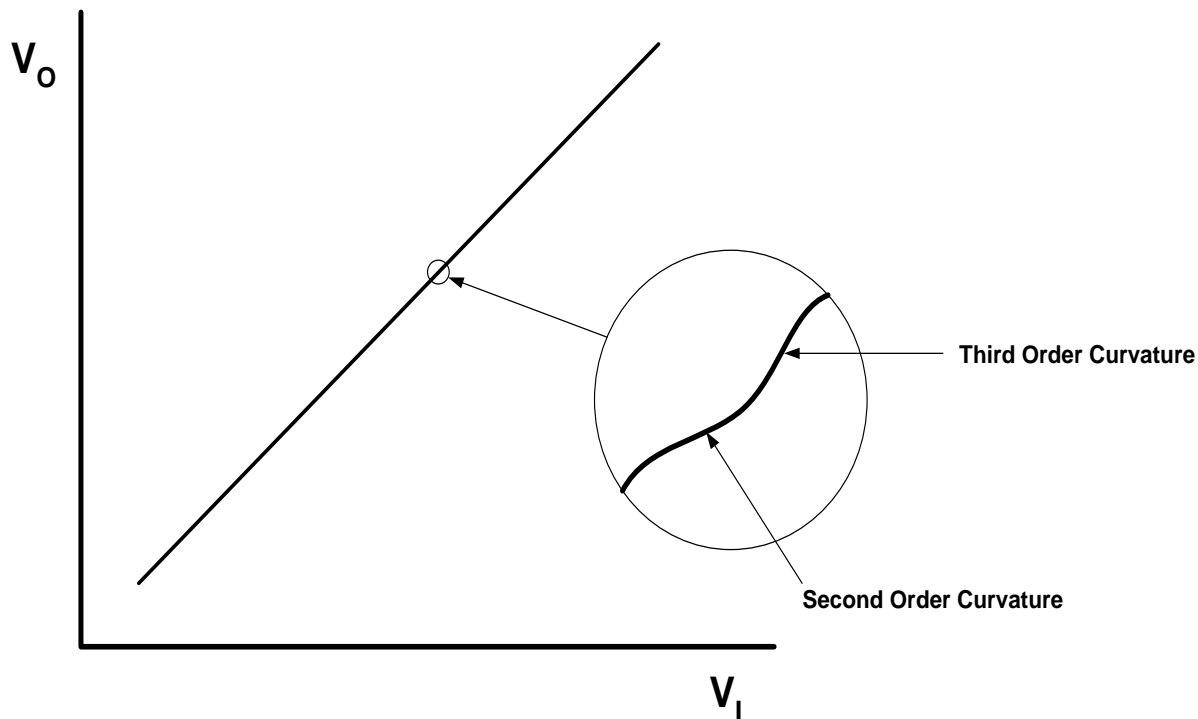
$$V_{OUT} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(V_{IN})^n}{n!} = 1 + V_{IN} + \frac{(V_{IN})^2}{2} + \frac{(V_{IN})^3}{6} + \dots$$



# 数据采集系统与误差概述

## 非线性器件特性与谐波失真(HD)

- ◆ 理想放大器具备线性传递特性
  - $V_o = A_v(V_i)$
- ◆ 但是! 没有器件呈现完美的线性
- ◆ 一般非线性传递特性可通过幂级数来模拟
  - $V_o = \alpha_0 + \alpha_1(V_i) + \alpha_2(V_i)^2 + \alpha_3(V_i)^3 + \dots$



# 数据采集系统与误差概述

## 谐波失真(HD)概述

- ◆ 输入测试信号  $V_i = A\sin(\omega t)$
- ◆ 将 $V_i$ 代入幂级数（上一张幻灯片）：
  - $V_o = \alpha_0 + \alpha_1[A\sin(\omega t)] + \alpha_2[A\sin(\omega t)]^2 + \alpha_3[A\sin(\omega t)]^3 + \dots$
- ◆ 所需输出信号：
  - $\alpha_1[A\sin(\omega t)]$
- ◆ 二次谐波失真积：
  - $\alpha_2[A\sin(\omega t)]^2 = \alpha_2 A^2/2[1 - \cos(2\omega t)]$
  - 二次谐波失真积(HD2) @  $2\omega$ ，或其等价式：  $2f$
  - 注意由 $\alpha_2 A^2/2$ 项引起的直流电平变化
- ◆ 三次谐波失真积：
  - $\alpha_3[A\sin(\omega t)]^3 = \alpha_3 A^3/4[3\sin(\omega t) - \sin(3\omega t)]$
  - 三次谐波失真积(HD3) @  $3\omega$ ，或其等价式：  $3f$
  - 注意，直流电平无变化
- ◆ 偶次谐波失真会产生直流电平变化，奇次则不会

# 数据采集系统与误差概述

## 谐波失真(HD)概述

- ◆ **ADC**的总谐波失真通常针对前**5**个谐波而定义，所采用的测试信号接近满量程幅度

$$THD = \frac{\sqrt{[v_2(rms)]^2 + [v_3(rms)]^2 + [v_4(rms)]^2 + [v_5(rms)]^2 + [v_6(rms)]^2}}{v_1(rms)}$$

- ◆  $v_1$ 是输入测试信号和基波
- ◆  $v_2$ 至 $v_6$ 是前**5**个谐波
- ◆ 总谐波失真通常以百分比形式表示



# 数据采集系统与误差概述

- ◆ 总谐波失真 + 噪声(**THD + N**)平方和的平方根电噪声,  $v_n$ , 含总谐波失真

$$THD + N = \frac{\sqrt{[v_2(rms)]^2 + [v_3(rms)]^2 + [v_4(rms)]^2 + [v_5(rms)]^2 + [v_6(rms)]^2 + v_n^2}}{v_1(rms)}$$

- ◆ **1/(THD + N)**即信纳比, 或**SINAD**
- ◆ 信纳比定义时的噪声带宽与失真所用的相同

$$SINAD = \frac{1}{THD + N} \quad SINAD (dB) = 20 \text{Log} \left[ \frac{1}{THD + N} \right]$$

- ◆ 之前我们看到, 采用理想**N**位**ADC**能够实现的最佳信噪比为信号-量化噪声比:

$$\text{Signal - to - Quantization Noise Ratio (dB)} = 6.02 N + 1.76 \quad \text{dB}$$

- ◆ 如果替换为信纳比 (通过电噪声和失真计算), 可以用没有电噪声或失真的理想**n**位**ADC**的**有效位数(ENOB)**替代**N**

$$SINAD (dB) = 6.02 (ENOB) + 1.76 \quad \text{dB}$$

## 数据采集系统与误差概述

- ◆ 从这一信纳比定义开始，可以求出有效位数

$$SINAD (dB) = 6.02 (ENOB) + 1.76 \text{ dB}$$

$$ENOB = \frac{SINAD(dB) - 1.76 \text{ dB}}{6.02}$$

- ◆ 采用**AD9446BSVC-100**（**100 MSPS 16位转换器**）的示例
- ◆ 对于**30 MHz**、**3.2 V<sub>p-p</sub>**的差分输入信号，**SINAD = 80.4 dB**
  - 噪声在奈奎斯特带宽上积分得出

$$ENOB = \frac{80.4 \text{ dB} - 1.76 \text{ dB}}{6.02} \approx 13 \text{ Bits}$$

- ◆ 本例中，电噪声和总谐波失真会产生与**13位ADC**的量化噪声大致相同的误差幅度

# 数据采集系统与误差概述

## 双音交调失真(IMD)与IP3概述

- ◆ 双音交调失真测试中，有两个紧密相邻、幅度相等的信号音施加于器件输入：

- ◆  $V_i = A\sin(2\pi f_1 t) + A\sin(2\pi f_2 t)$

- ◆ 应用一般幂级数传递特征函数

- $V_o = \alpha_0 + \alpha_1[A\sin(2\pi f_1 t) + A\sin(2\pi f_2 t)] + \alpha_2[A\sin(2\pi f_1 t) + A\sin(2\pi f_2 t)]^2 + \alpha_3[A\sin(2\pi f_1 t) + A\sin(2\pi f_2 t)]^3 + \dots$

- ◆ 大多数双音交调失真测试都包括达到3阶的项

- ◆ 会产生频率和与差积

- 可通过三角恒等式查看

- ◆ 双音交调失真测试的二阶积

- $2f_1, 2f_2, (f_2 + f_1), (f_2 - f_1)$

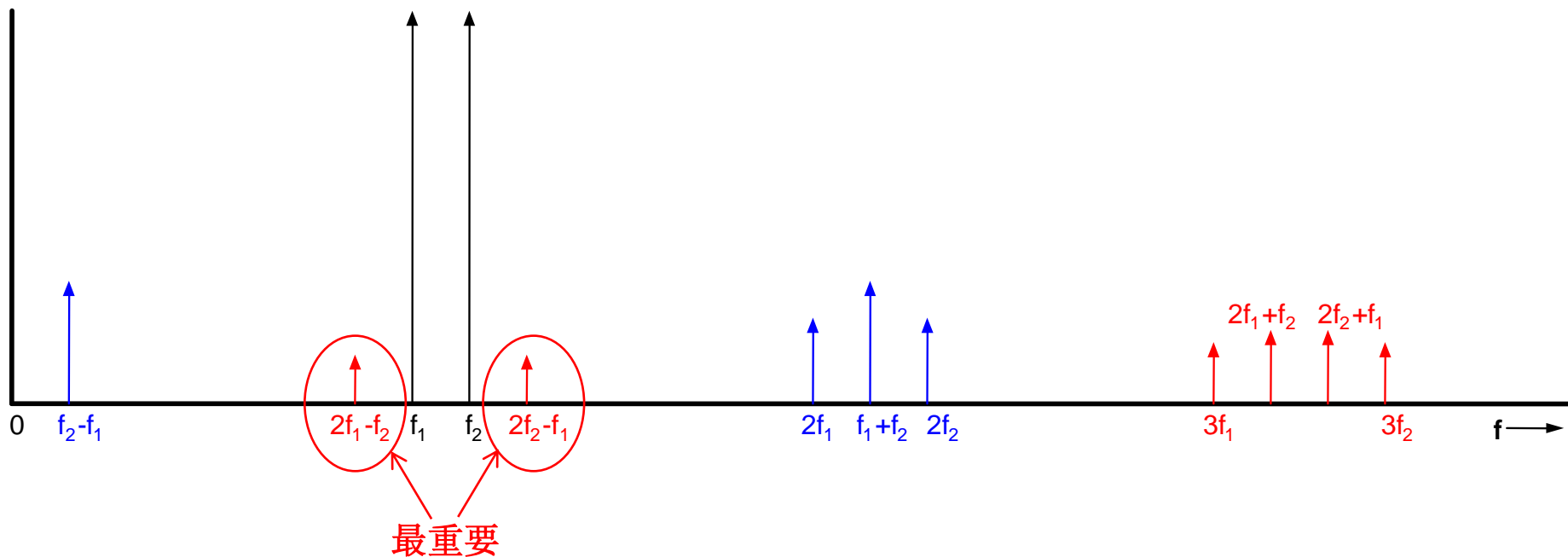
- ◆ 双音交调失真测试的三阶积

- $3f_1, 3f_2, (2f_2 + f_1), (2f_1 + f_2), (2f_2 - f_1), (2f_1 - f_2)$

# 数据采集系统与误差概述

## 双音交调失真(IMD)与IP3概述

- ◆ 三阶交调失真积中有两个通常最为重要，因为它们离两个测试音较近
  - $2f_1 - f_2$ 和 $2f_2 - f_1$



# 数据采集系统与误差概述

## 双音交调失真(IMD)与IP3概述

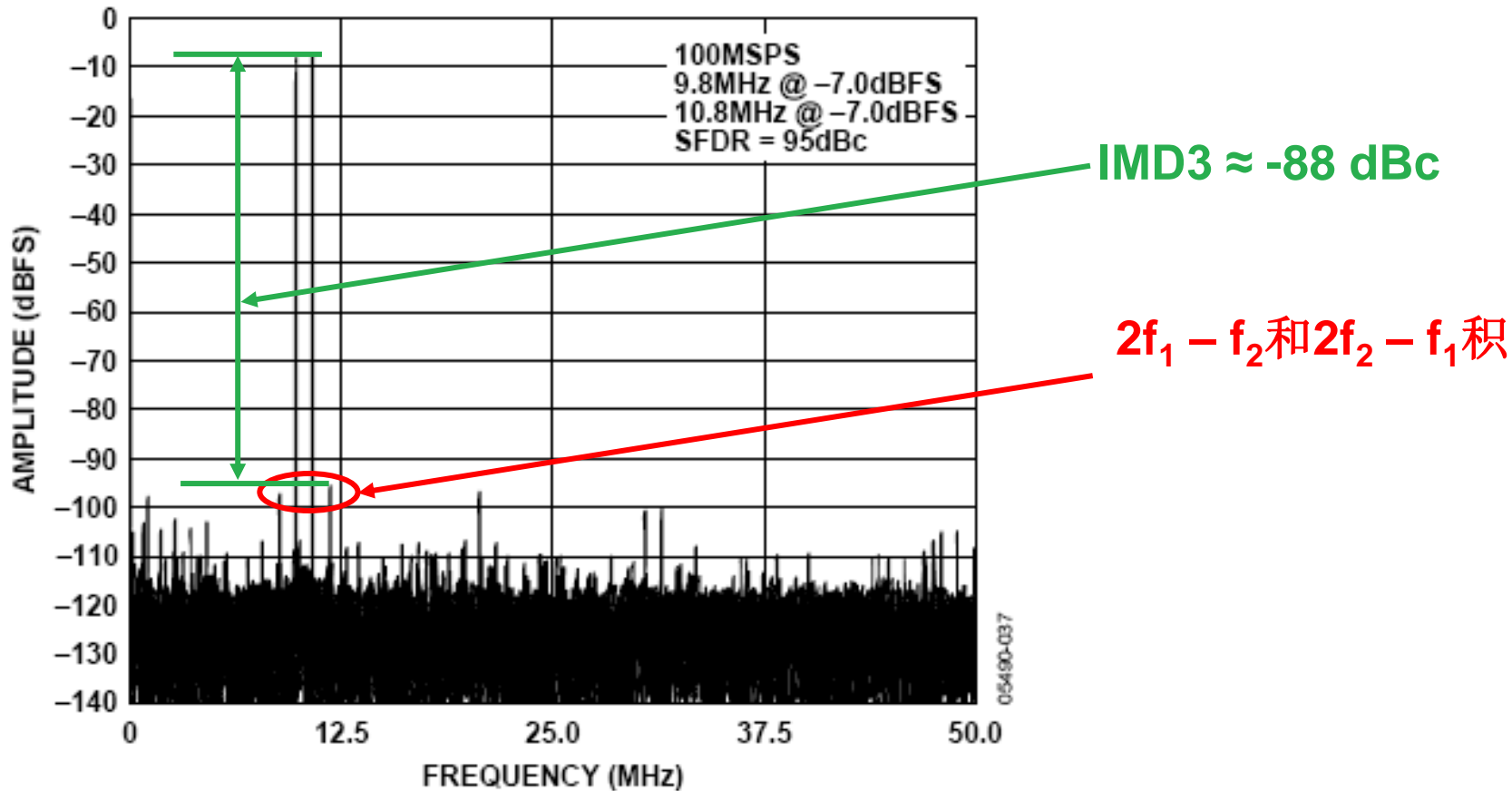
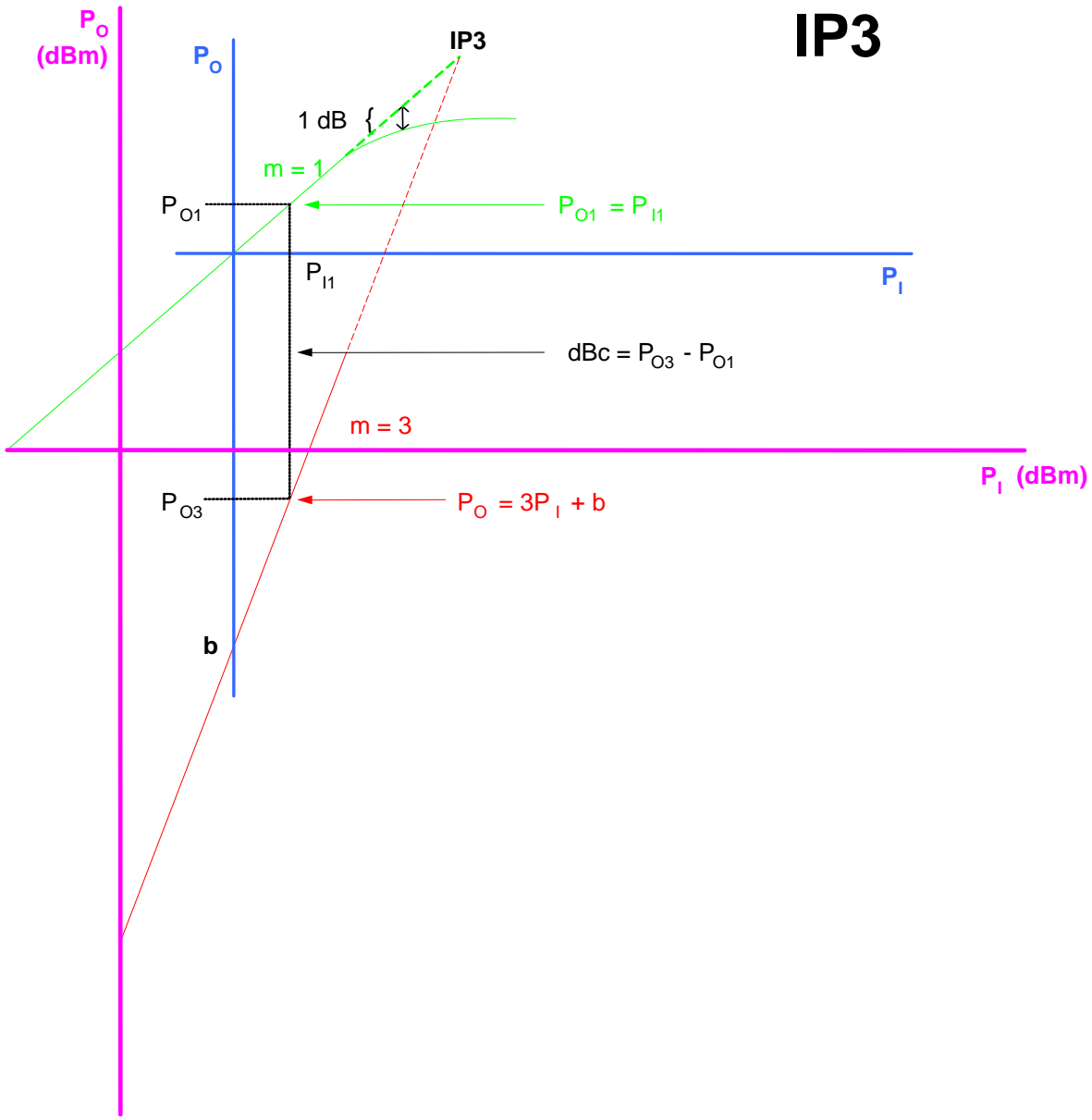


Figure 36. AD9446-100 64k Point Two-Tone FFT/100 MSPS/9.8 MHz, 10.8 MHz



# 数据采集系统与误差概述

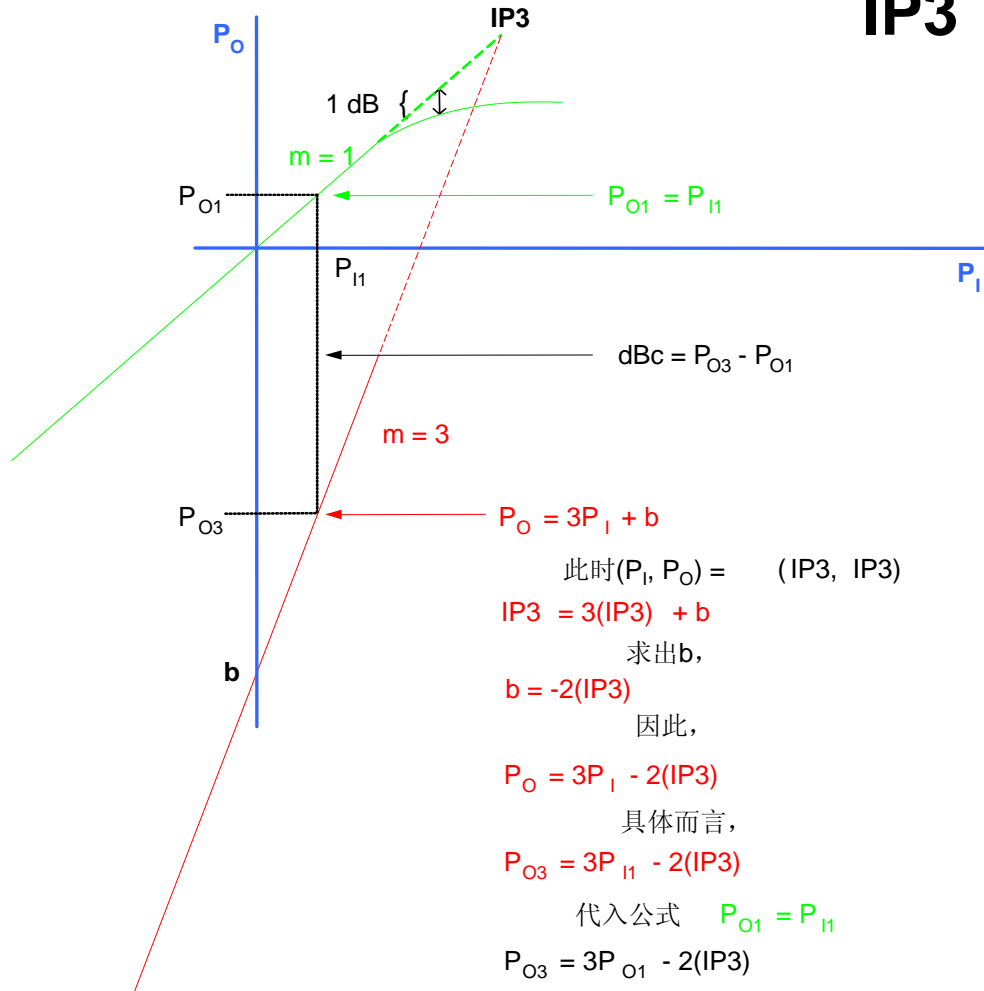
## IP3



# 数据采集系统与误差概述

## IP3

## 结论



此时( $P_i, P_o$ ) = ( $IP3, IP3$ )  
 $IP3 = 3(IP3) + b$   
 求出 $b$ ,  
 $b = -2(IP3)$   
 因此,  
 $P_o = 3P_i - 2(IP3)$   
 具体而言,  
 $P_{O3} = 3P_{I1} - 2(IP3)$   
 代入公式  $P_{O1} = P_{I1}$   
 $P_{O3} = 3P_{O1} - 2(IP3)$   
 整理公式,  
 $P_{O3} - P_{O1} = 2P_{O1} - 2(IP3) = 2(P_{O1} - IP3)$   
 最后,

$$dBc = 2(P_{O1} - IP3)$$

- ◆ 3阶双音交调失真积可以通过 **IP3**和 **$P_o$** 轻松计算得出
- **IMD dBc = 2( $P_o - IP3$ )**
- 例如:
  - ◆ **IP3 = +30 dBm**
  - ◆  **$P_o = -5$  dBm**
  - ◆ **IMD3积(-70 dBc)**
- **IP3越高越好**
- **功率电平参考单测试音**
- ◆ **输出功率电平为1 dB压缩点, 其中理想 $P_o/P_i$ 功率传递特性按1 dB压缩**
- **也可以折算到输入端**



## 数据采集系统与误差概述

### 将IP3数值应用于ADC和ADC驱动器

- ◆ 系统工程师希望了解哪些IP3适合ADC驱动器
- ◆ 大多数高频系统都在50  $\Omega$ 或75  $\Omega$ 的环境下工作
- ◆ 运算放大器是电压器件，但是IP3是一种功率规格，这就出现了问题
  - ADC驱动器驱动的负载远小于50  $\Omega$
- ◆ 从系统的角度来看，ADC驱动器和ADC之间驱动的实际负载并不重要
- ◆ 我们定义一个“虚构”但有用的IP3，基于输送至负载的输出功率（若负载为50  $\Omega$ ）。
- ◆ 这就是ADC驱动器数据手册中IP3的确定方法

# 数据采集系统与误差概述

## 建立时间

- ◆ 定义为器件输入应用理想阶跃函数和输出信号相对其最终值在给定误差内建立的时间间隔
- ◆ 通常定义为**0.1%**或**0.01%**误差的建立时间
- ◆ 高速驱动器上很难测量**0.01%**建立时间
  - 很难获得高质量、高速步进测试信号

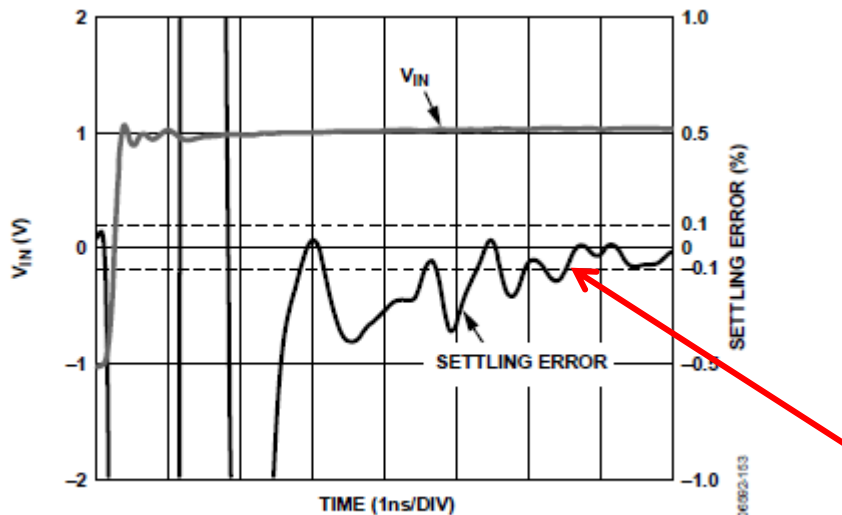
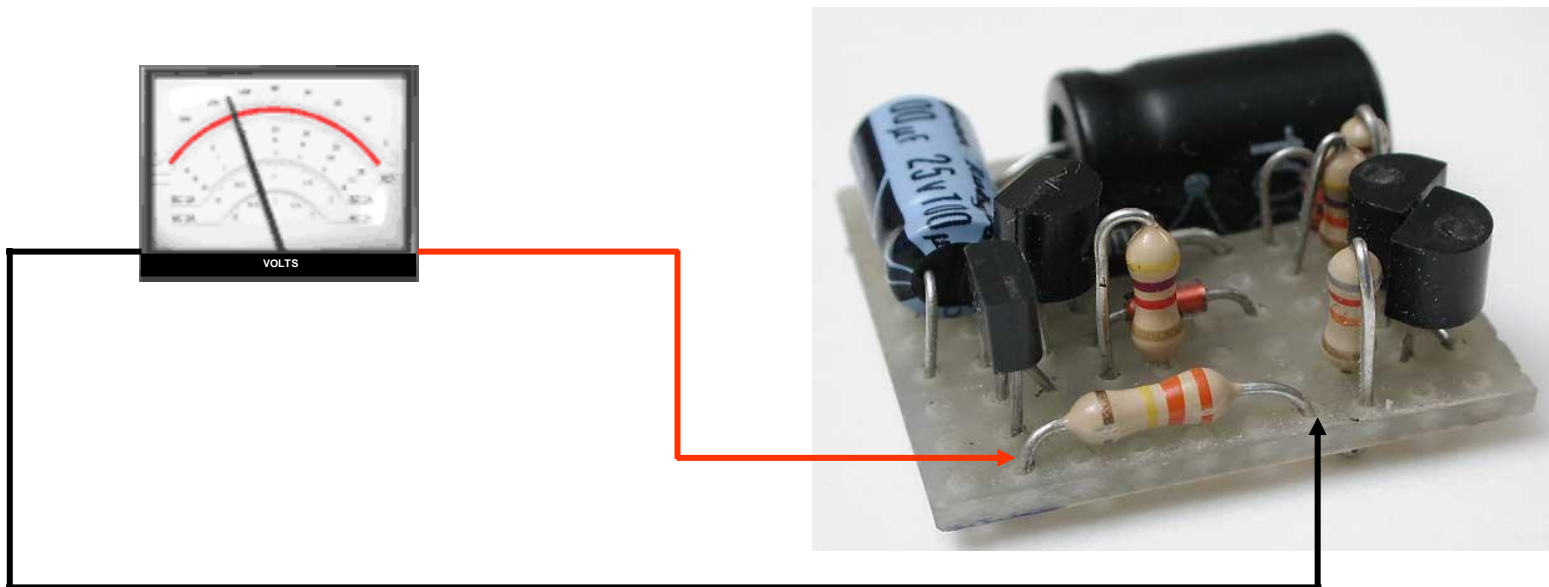


Figure 53. 0.1% Settling Time

**0.1%建立时间  $\approx$  6.5 nsec**

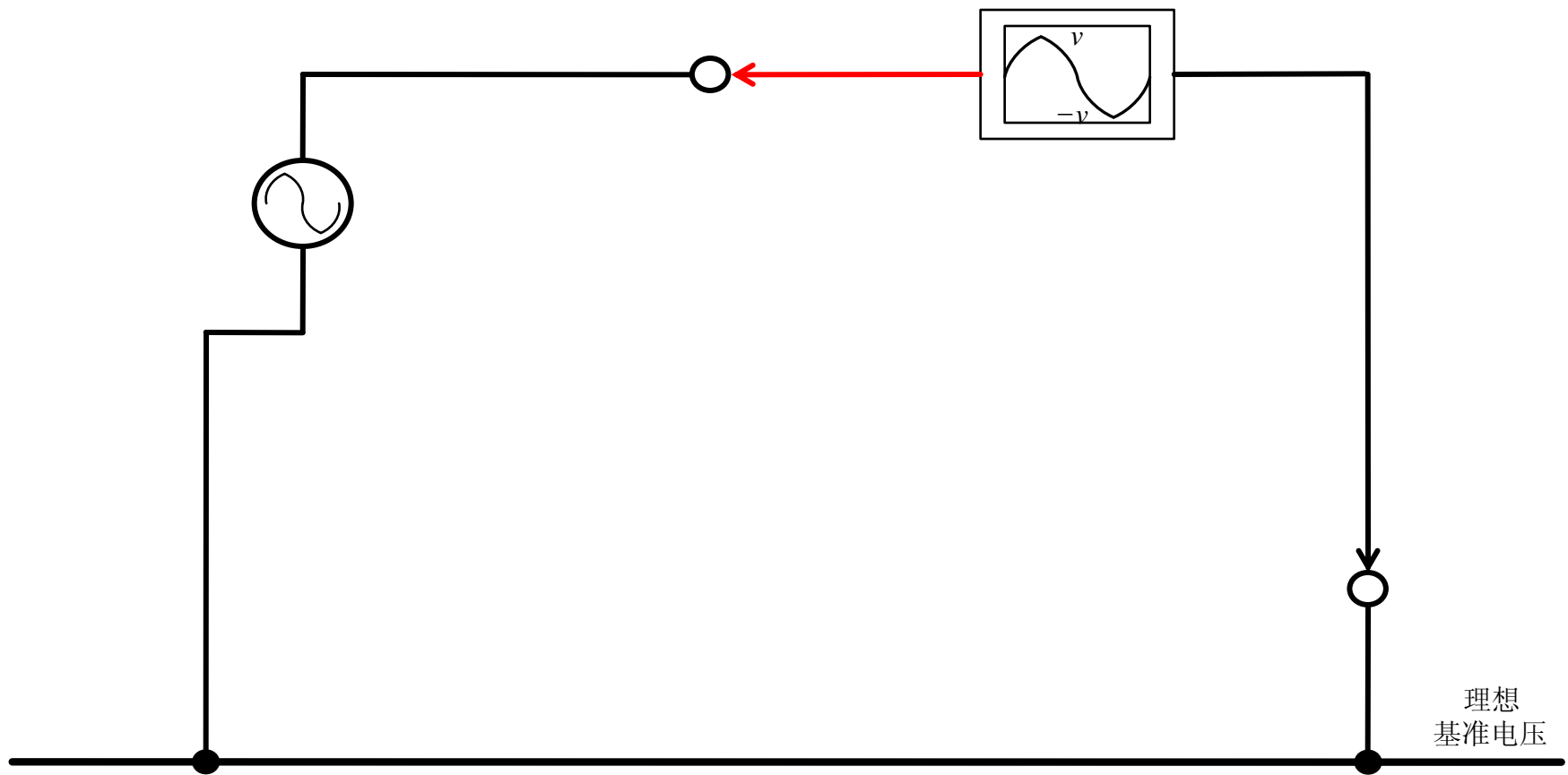
# 什么是差分信号？

- ◆ 所有电路电压都是两个导体之间的电位差  
因此，所有的信号电压都是“差分”电压。



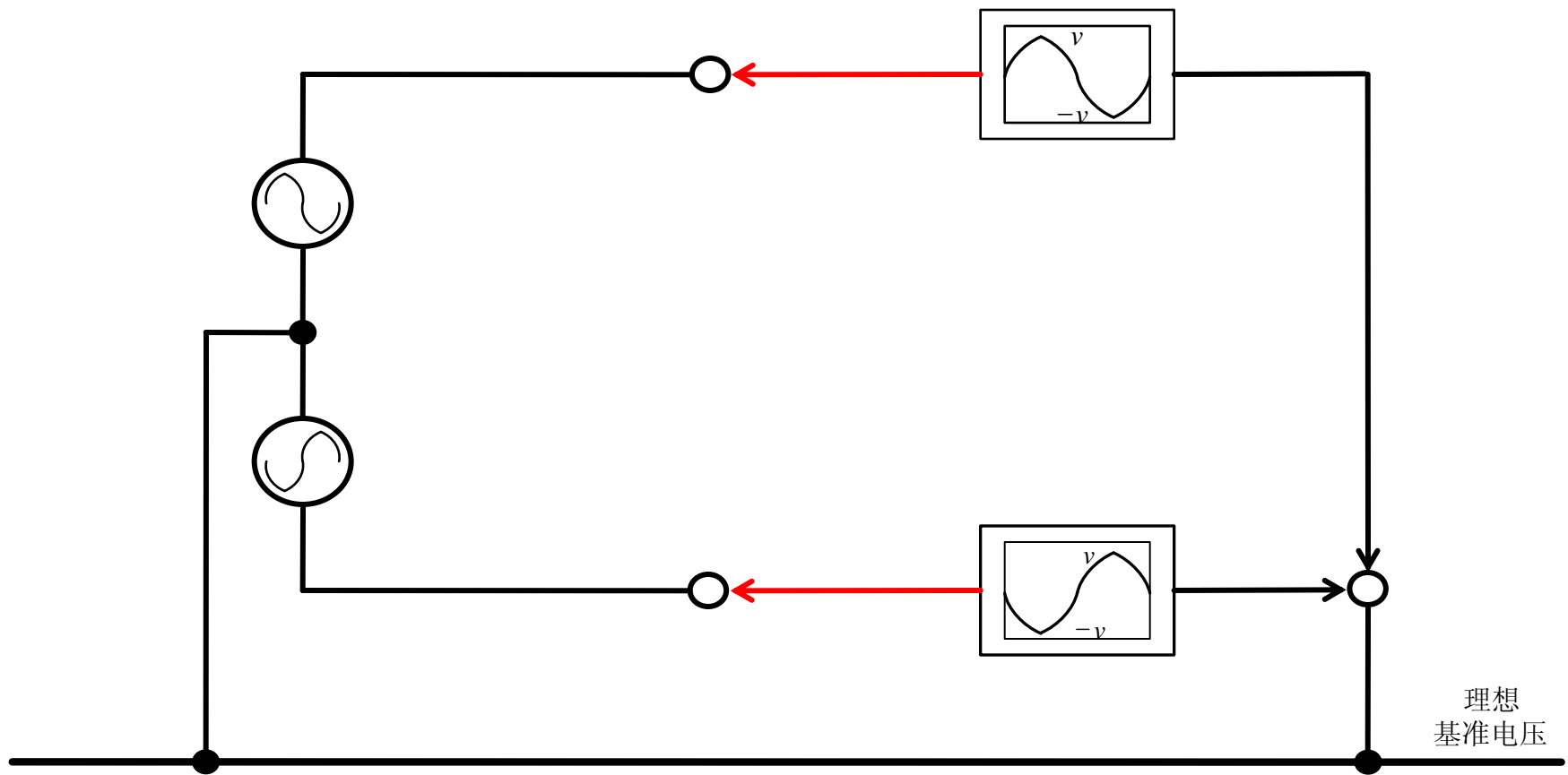
- ◆ 平衡信号是表述“差分信号”的一种更加准确的术语，  
但是术语差分通常属于传统说法。我们通常也使用  
差分，但也会互换使用这两个术语。

# 什么是差分信号？

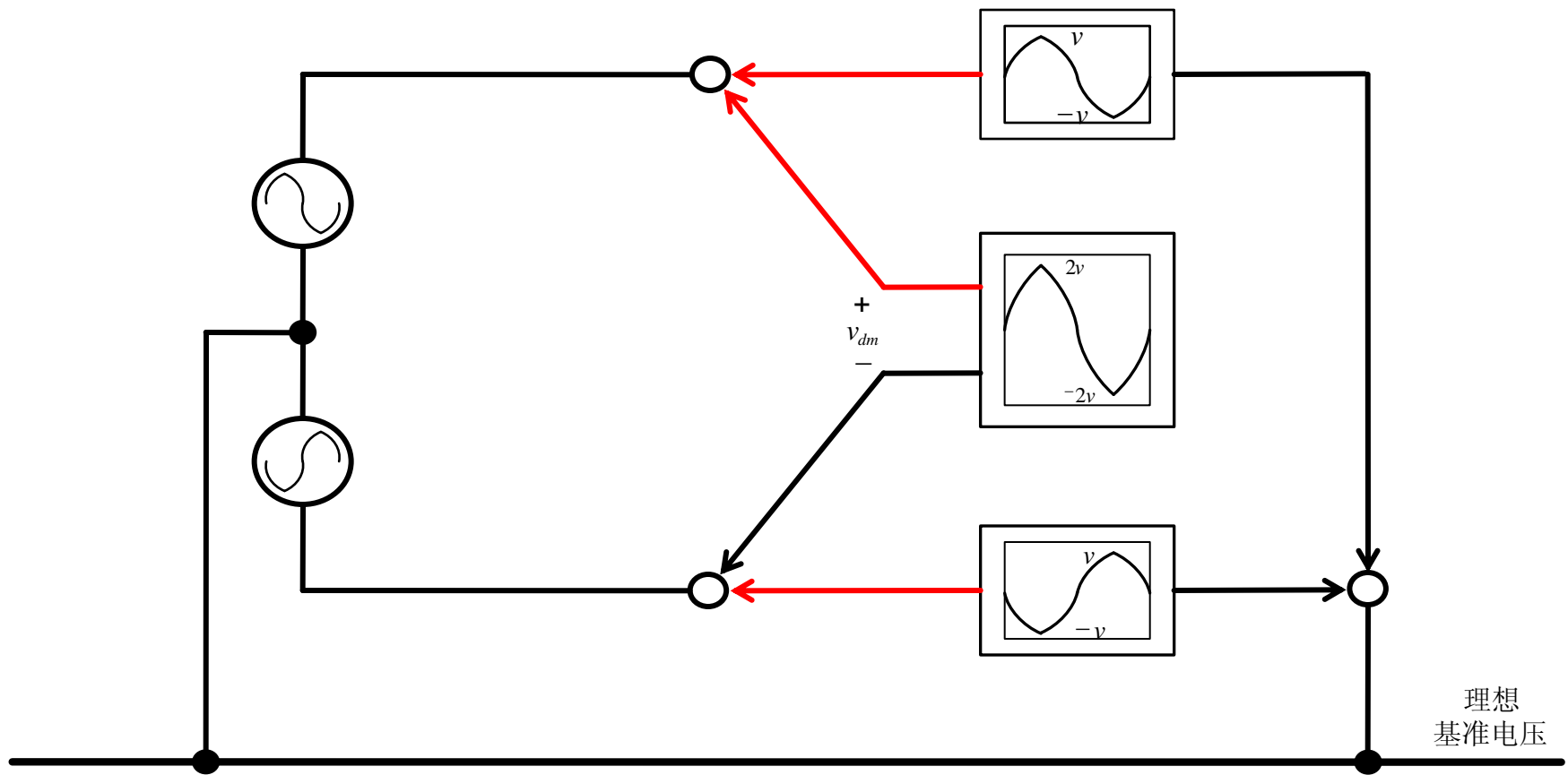


理想  
基准电压

# 什么是差分信号？

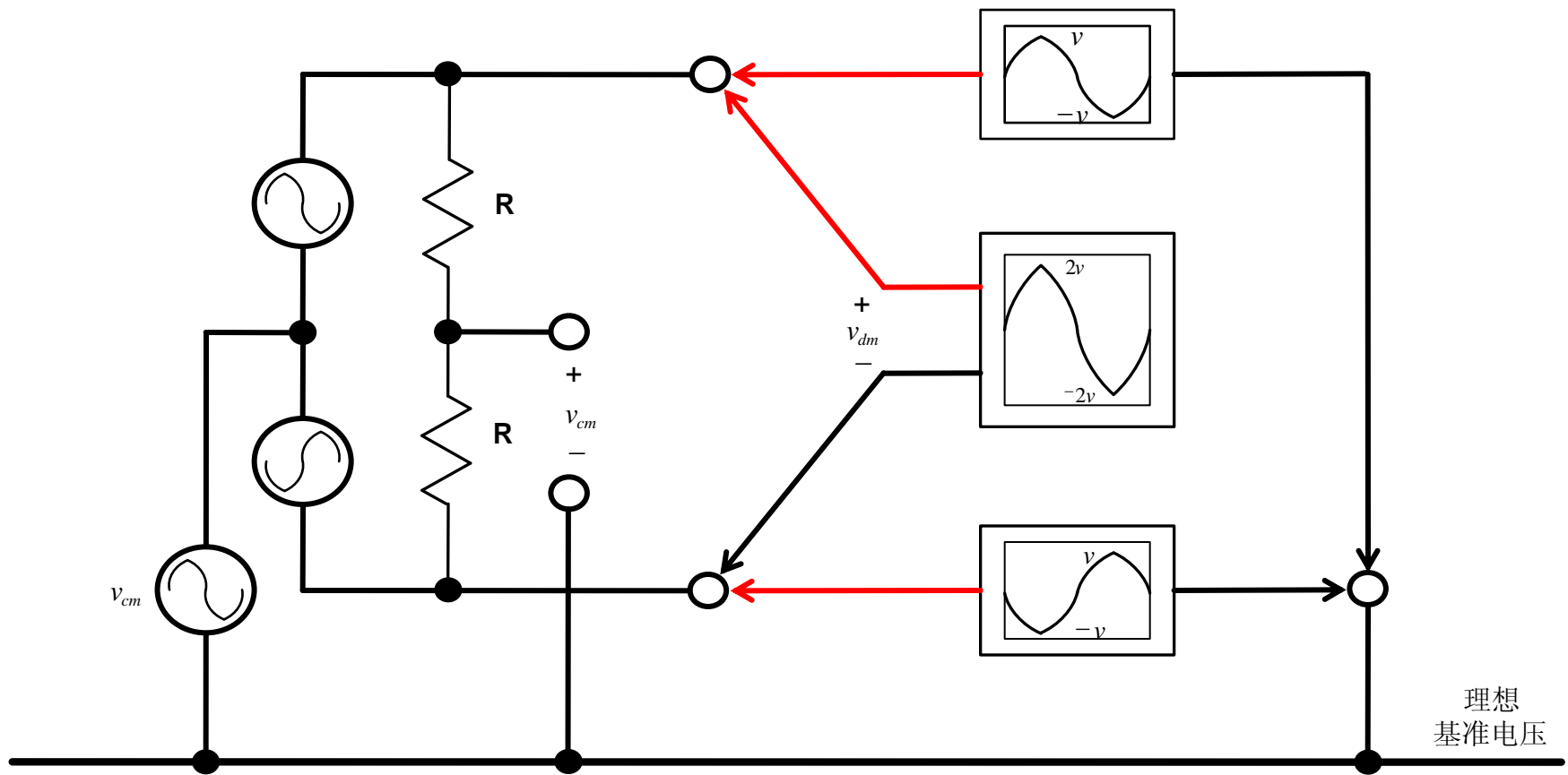


# 什么是差分信号？





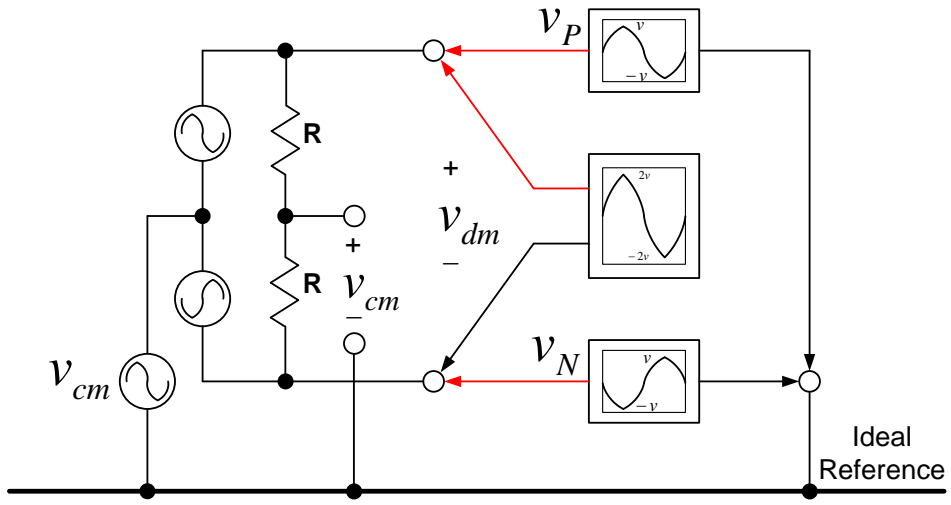
# 什么是差分信号？



◆ 注意，对给定电源电压而言，存在差分信号时，可以获得单端信号情况下两倍的幅度

# 要点及数学定义

- ◆ 差分电压是两个导体之间的电位差。
- ◆ 平衡信号采用两个相对同一基准电压具有相等幅度和相反极性的导体
- ◆ 术语平衡信号和差分信号通常可以互换使用。
- ◆ 对两个导体上的任何信号而言，无论平衡与否，信号都可以按右图定义，相对于同一基准电压（任意设定为0）。



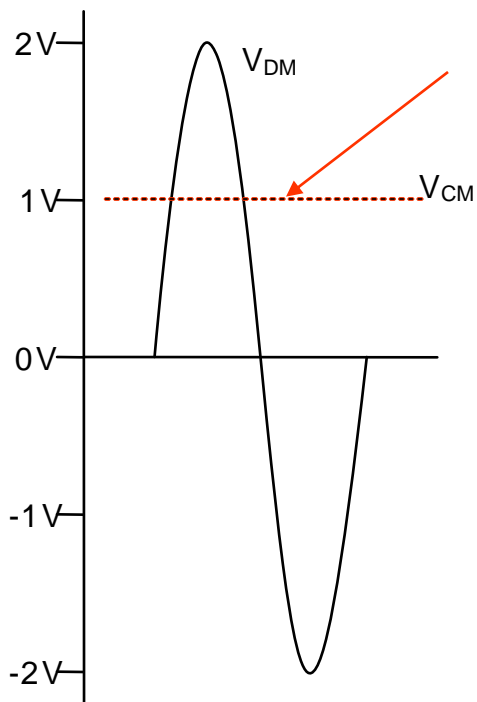
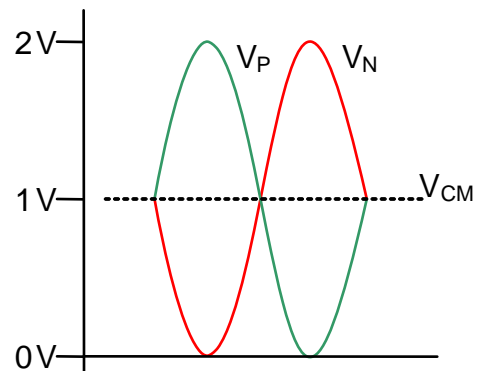
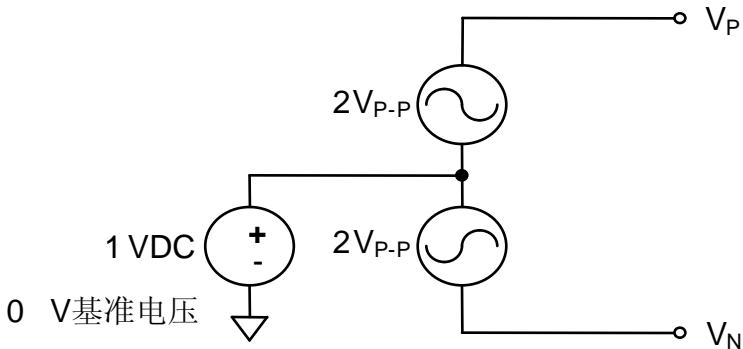
$$v_{dm} = v_P - v_N$$

$$v_{cm} = \frac{v_P + v_N}{2}$$

$$v_P = v_{cm} + \frac{v_{dm}}{2} \quad v_N = v_{cm} - \frac{v_{dm}}{2}$$

# 差模与共模信号示例

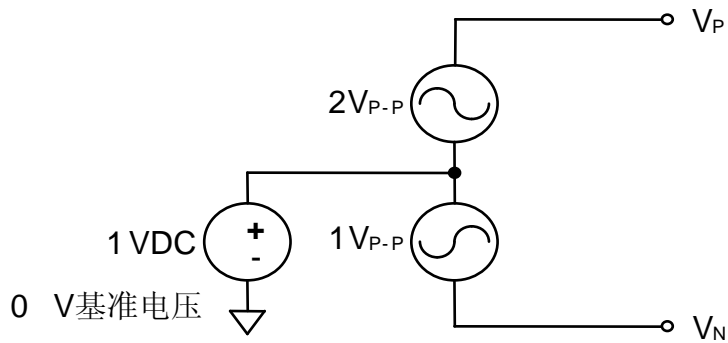
平衡信号



基本恒定的  
共模电压  
确保低电磁辐射

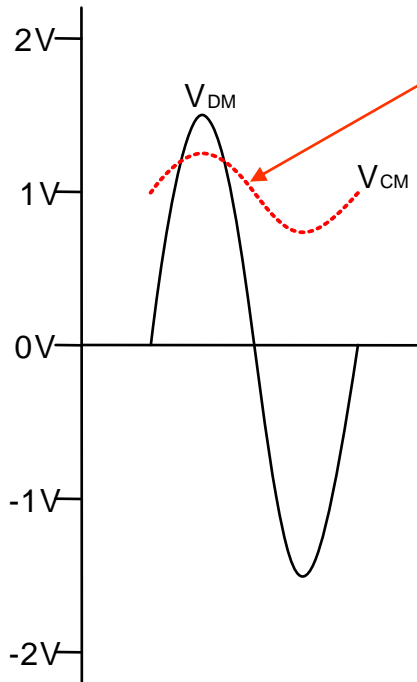
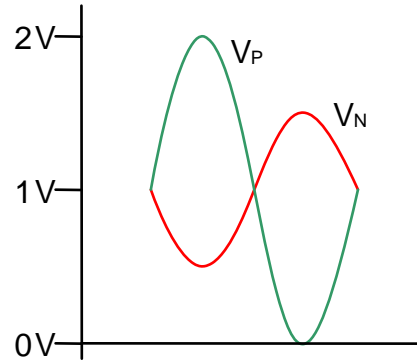
# 差模与共模信号示例

## 幅度失衡信号



共模信号  
也会因

$V_P$ 和 $V_N$ 之间的相位误差而产生。

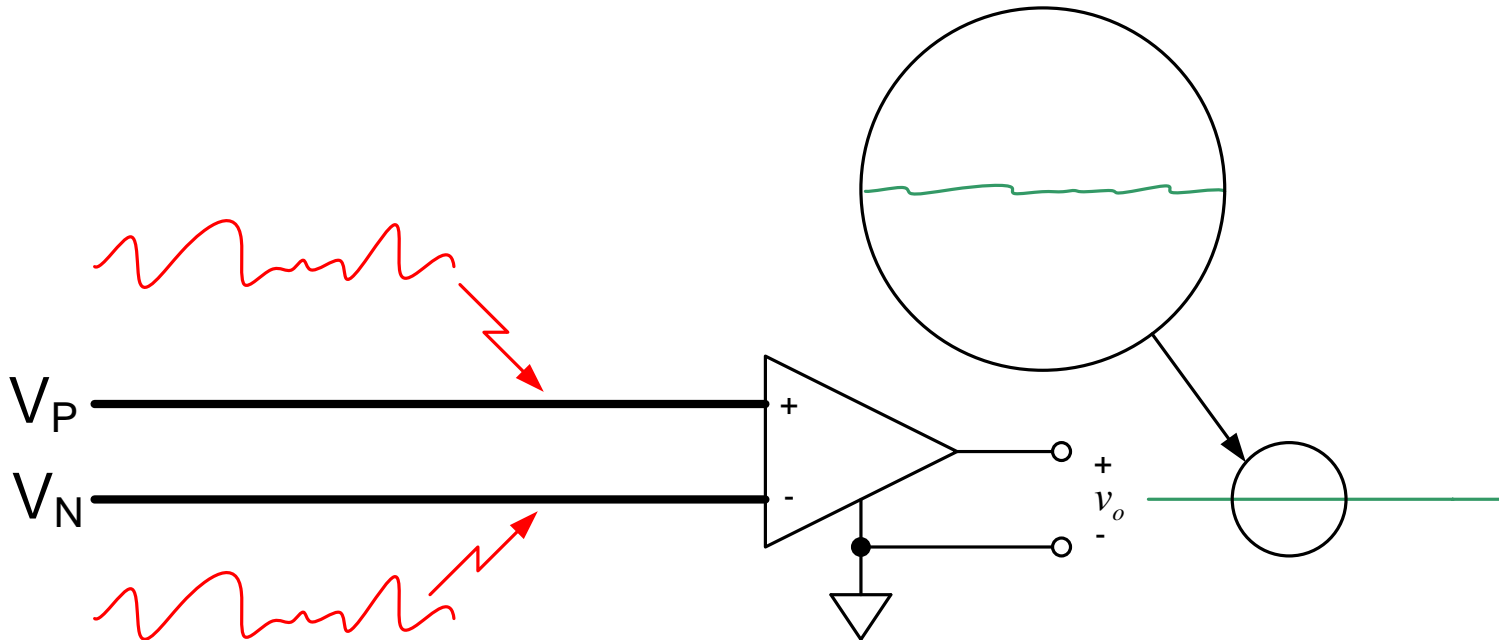


共模信号会  
引起电磁辐射

# 差分与单端电路中的耦合噪声特性对比

## 差分电路中的噪声特性

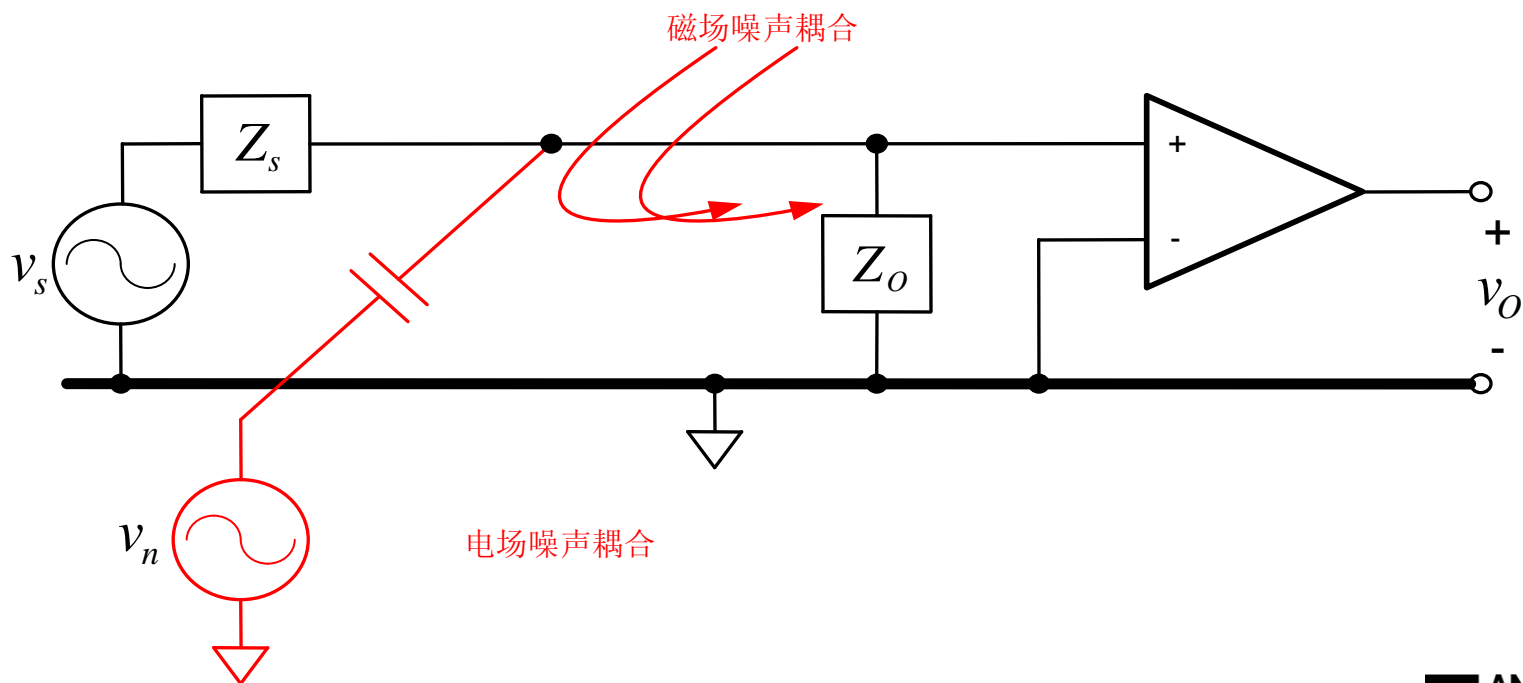
- ◆ 由于具有差分信号路径的两个导体相距很近，阻抗水平和环路区域极为相似，大多数噪声拾取为共模形式，会被具有良好共模抑制性能接收机所抑制。



# 差分与单端电路中的耦合噪声特性对比

## 单端电路中的噪声特性

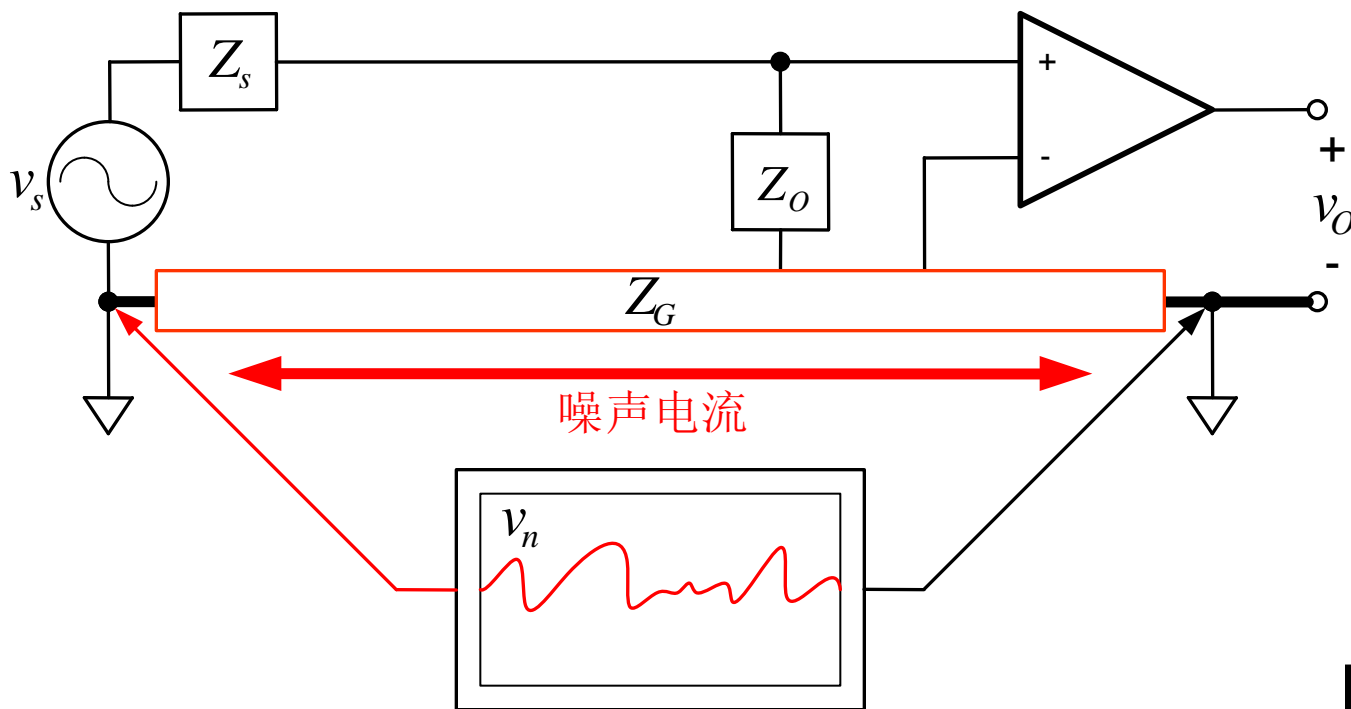
- ◆ 具有单端信号路径的两个导体  
阻抗水平不同，而且只有一个磁耦合环路。  
大多数电磁耦合噪声都在信号导体上拾取。



# 差分与单端电路中的耦合噪声特性对比

## 单端电路中的噪声特性（续）

- ◆ 噪声电流从不相关源流经接地网时，共用“接地”参考导体会发生偏移。因为接地系统阻抗有限，所以噪声电流会产生噪声电压。称为“公共阻抗耦合”。

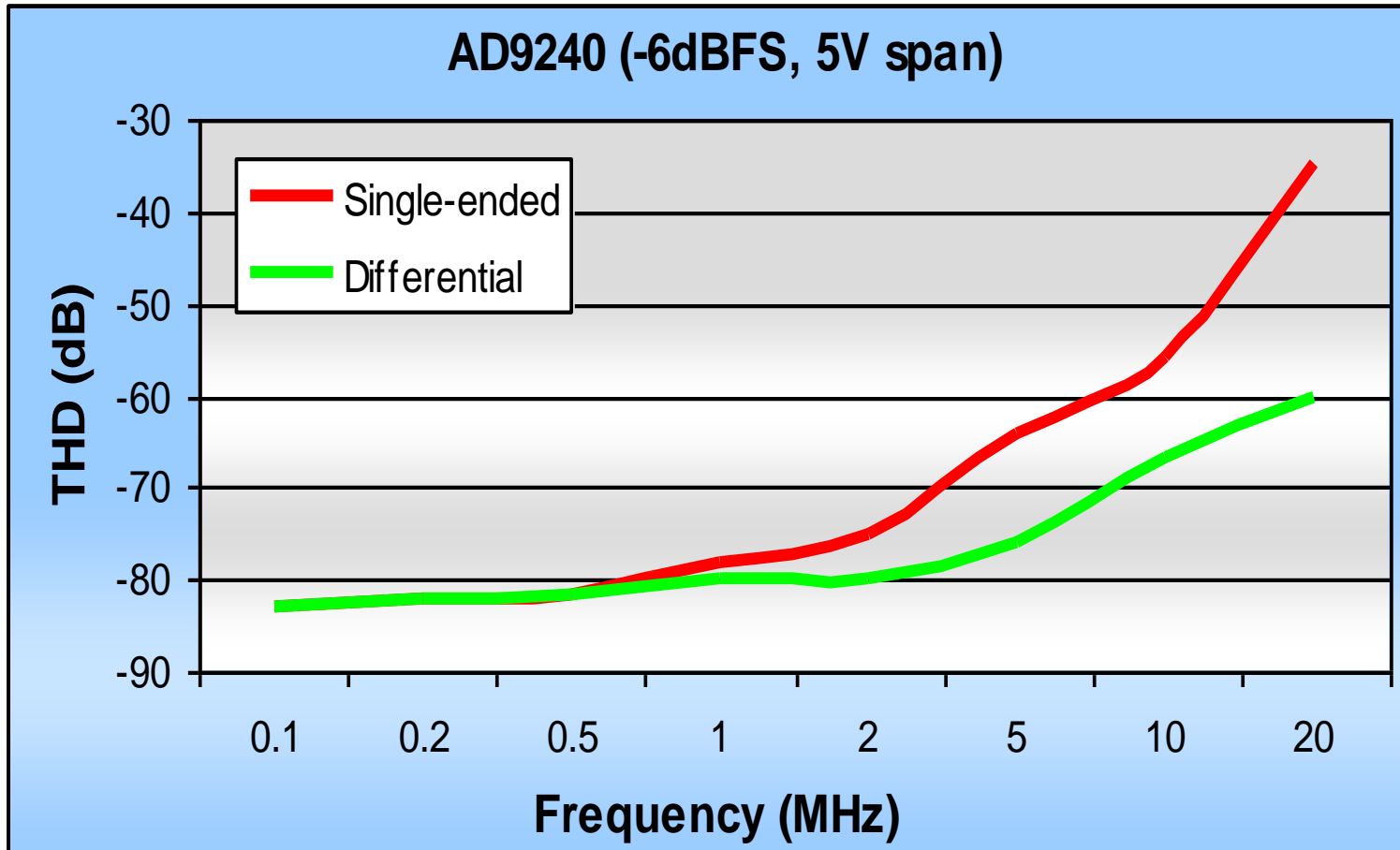


## 差分放大器的谐波失真

- ◆ 在某种程度上，偶次谐波失真积在差分驱动器输出端会表现为共模形式
- ◆ 如前所述，一般非线性传递特性可通过幂级数来模拟
  - $V_O = \alpha_0 + \alpha_1(V_i) + \alpha_2(V_i)^2 + \alpha_3(V_i)^3 + \dots$
- ◆ 如果假定每个输出的传递特性都大致相同，且输入和输出信号平衡，则：
  - $V_{OP} = \alpha_0 + \alpha_1(V_i) + \alpha_2(V_i)^2 + \alpha_3(V_i)^3 + \dots$
  - $V_{ON} = \alpha_0 + \alpha_1(-V_i) + \alpha_2(-V_i)^2 + \alpha_3(-V_i)^3 + \dots$
- ◆ 偶次项始终为相等的正值
- ◆ 奇次项极性始终相反
- ◆ 从输出端获得差值，偶次项减去，奇次项相互增强
- ◆ 偶次谐波失真未必小于奇次谐波失真，但在给定系统中，差分信号的偶次谐波失真比单端信号的小



# 差分输入对ADC的好处





## 使用差分信号利弊总结

### ◆ 优点

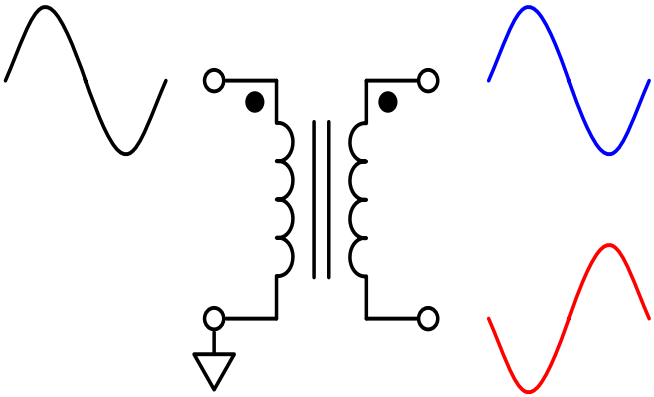
- 大多数电磁耦合噪声都是共模形式，会受到具有良好共模抑制性能的差分接收机的明显抑制。
- 由于采用平衡信号，辐射极低。每个导体的电场和磁场均大幅消除。
- 由于信号不共用接地导体，不存在公共阻抗噪声耦合。
- 由于两个导体均承载信号，和单端系统相比，动态范围增加了两倍。
- 有些偶次失真在放大器输出端表现为共模形式，可以受到抑制

### ◆ 缺点

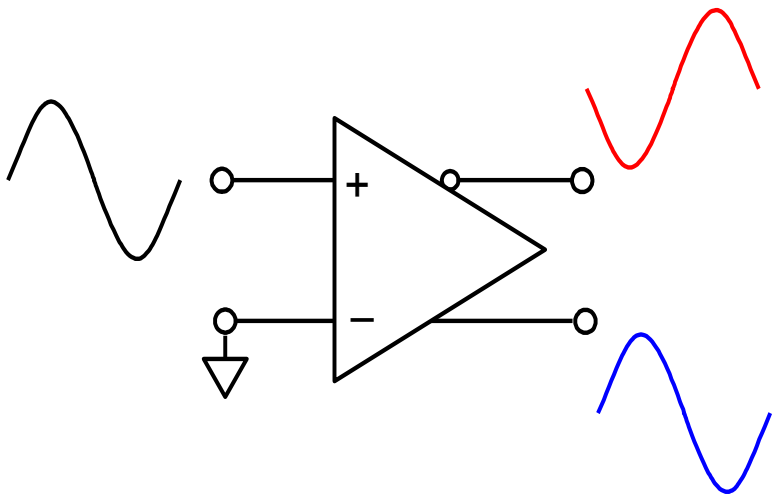
- 由于大多数系统采用带有接地参考的单端信号，差分信号可视为每个信号都需要一个额外导体。

# 差分信号——如何实现？

## ◆ 变压器



## ◆ 差分放大器





# 驱动器解决方案对比

## ◆ 单端转差分

### ● 变压器也有一席之地

#### ◆ 优势

- 理想情况下无噪声
- 失真极低
- 可在极高频率下工作
- 中心抽头变压器可以提供输出共模电压设置

#### ◆ 弊端

- 除传输线路巴伦外，只能采用交流耦合
- 通带一般不平坦
- 带宽有限
- 无反向隔离
- 可用的匝数比不多
- 通常需要射频放大器来驱动，会引起噪声和失真，且对电源有要求



# 驱动器解决方案对比

## ◆ 单端转差分（续）

### ● 完全差分放大器可提供极为灵活的解决方案：

#### ◆ 优势

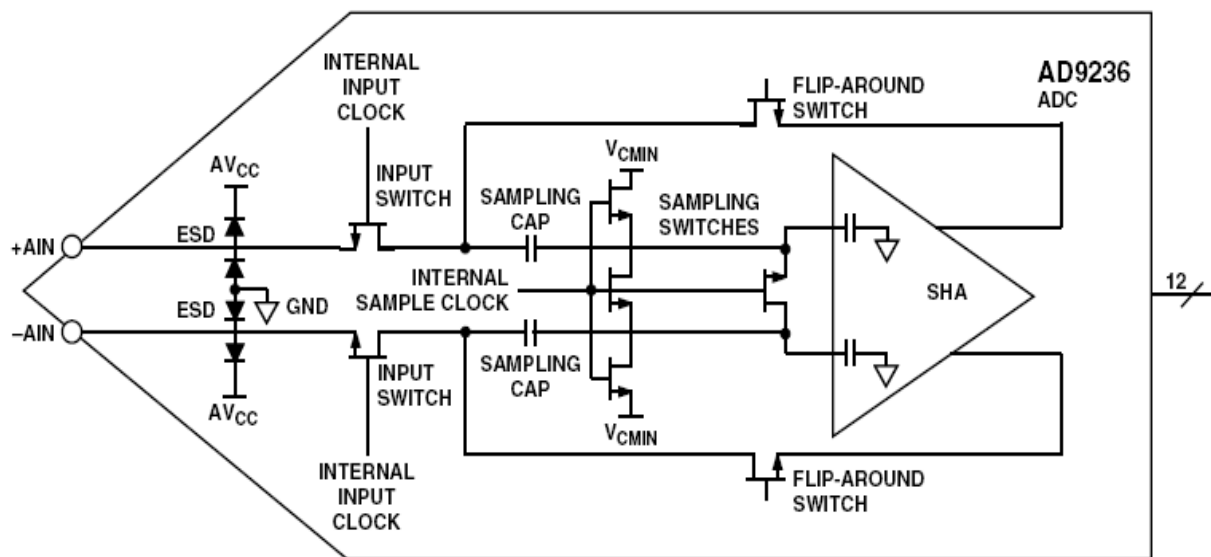
- 可以采用交流或直流耦合
- 通带极为平坦
- 可用带宽超过**100 MHz**，且仍在不断增加
- 提供缓冲和反向隔离
- 易于设置增益和输出共模电压

#### ◆ 弊端

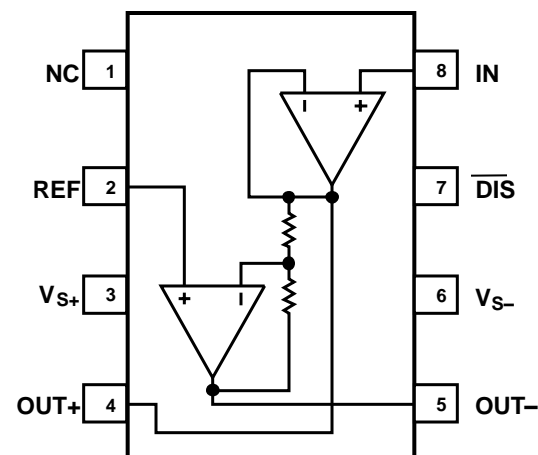
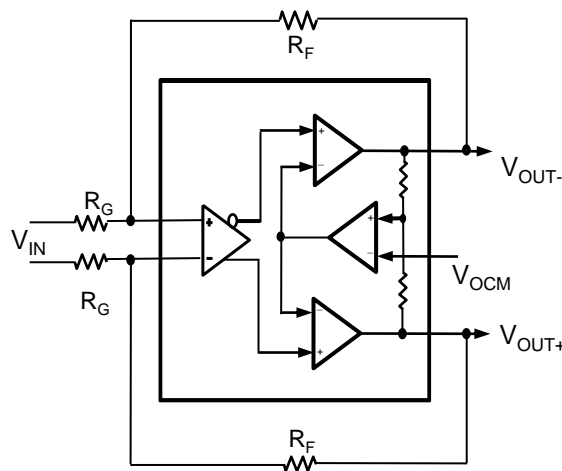
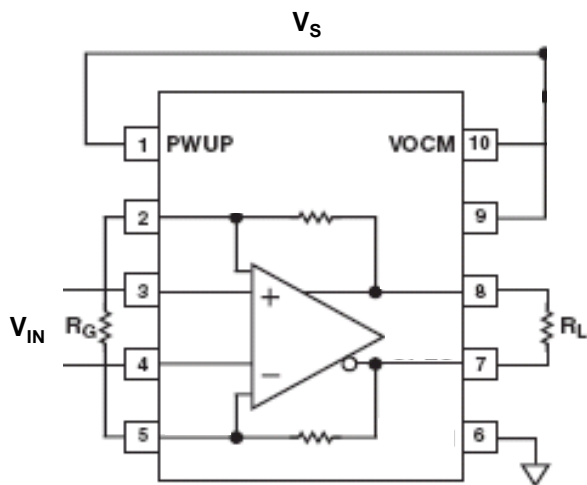
- 会引起噪声、失真、失调，还会增加建立时间
- 需要电源
- 在**3 dB**带宽中的部分范围内具有低失真

## 转换器输入级

- ◆ 大多数高性能及高速放大器都具有差分输入，内置差分采样保持放大器 (SHA)
- ◆ **SHA**可在发生转换时保持模拟电压
- ◆ 许多高速转换器的输入都直接连接到开关电容**SHA**，会在采样电容充放电时产生电流瞬变
- ◆ 具有取决于采样率的动态负载



# 差分ADC驱动器架构



## AD835x/ADA4960

- ◆ 最高速度时具有最佳失真性能
  - 高达**200MHz**
- ◆  $V_{OCM}$  引脚
- ◆ 仅限交流耦合
- ◆ 适合**IF**通信应用

## ADA493x/AD813x

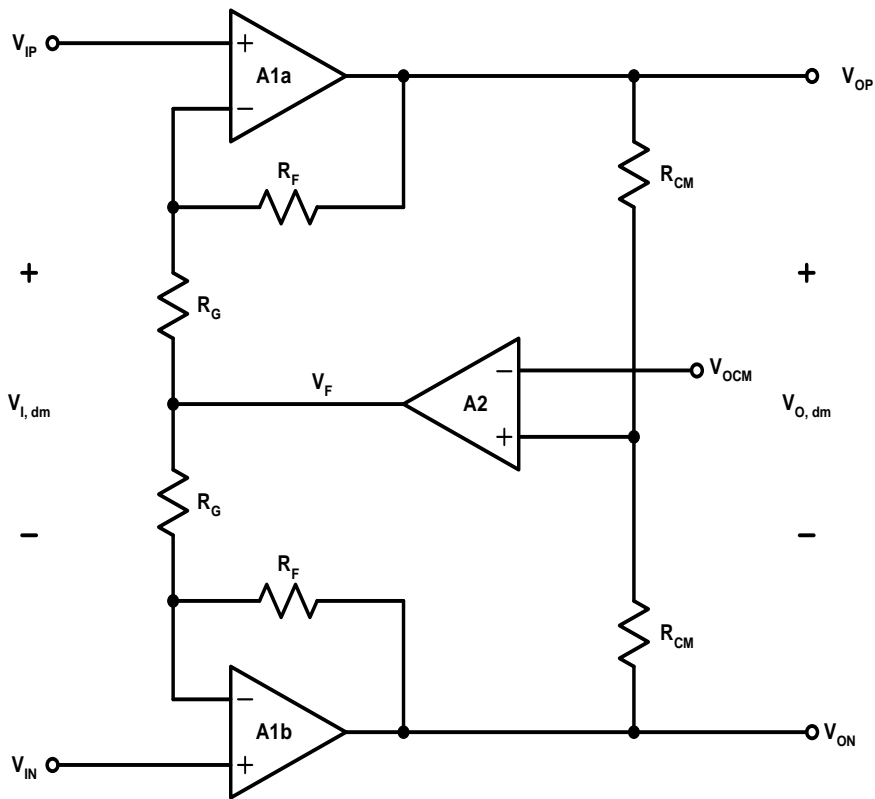
- ◆ 最佳失真
  - 高达**100 MHz**
- ◆ 独立 $V_{OCM}$  引脚
- ◆ 良好直流规格
- ◆ 适用于**高速通信与仪器仪表**

## ADA4922-1/4941-1

- ◆ 高分辨率 (**18位**)
- ◆ 噪声最低
- ◆ 功耗最低
- ◆ 良好直流规格
- ◆ 适用于**精密仪器仪表**

# 差分ADC驱动器架构

◆ 也可采用多运算放大器解决方案



- ◆ 仅限差分
- ◆ 必须注意稳定性
- ◆ 具有 $V_{OCM}$ 控制

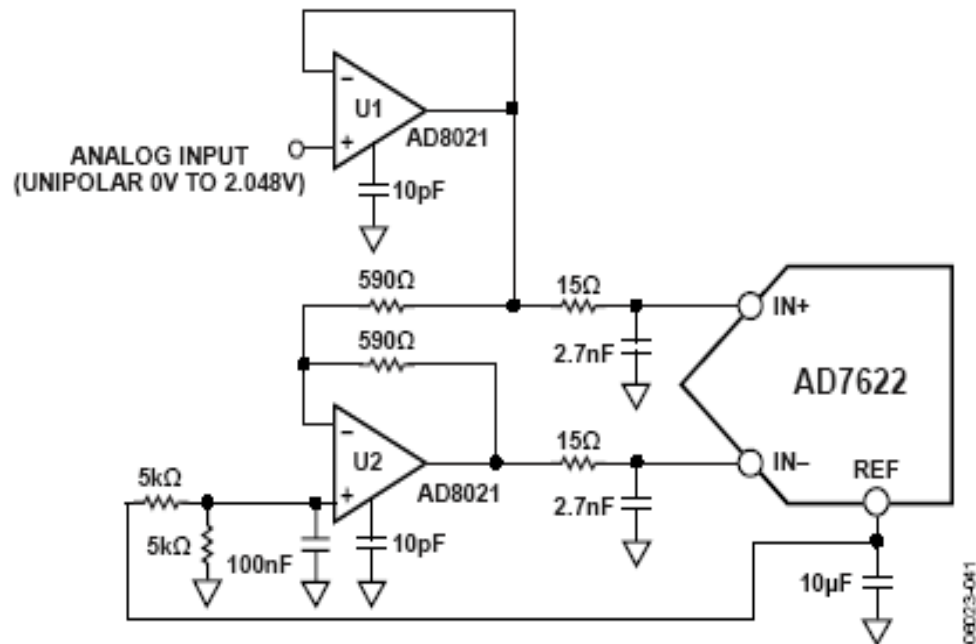
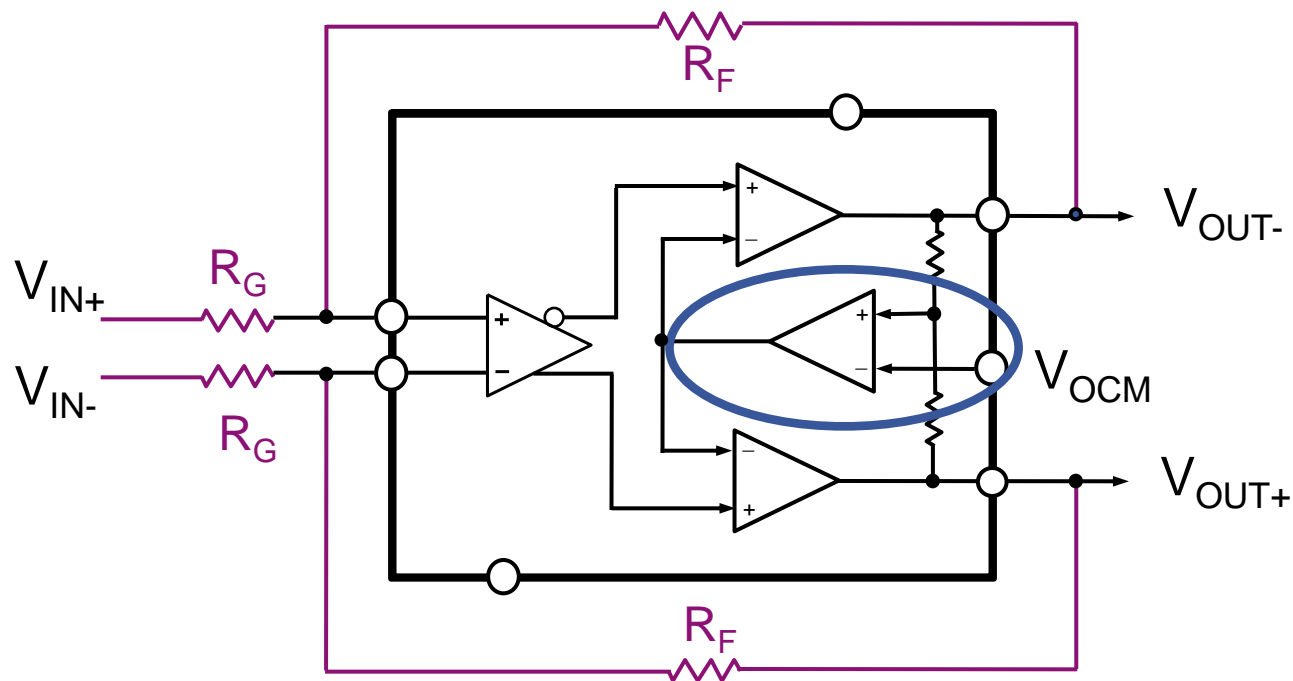


Figure 28. Single-Ended-to-Differential Driver Circuit (Internal Reference Buffer Used)

◆ 与ADA4941架构相同



# “AD8138”差分ADC驱动器架构



- ◆ 负反馈使输出共模电压等于 $V_{OCM}$
- ◆ 输出平衡由内部反馈环路控制，而非 $R_F/R_G$ 比
- ◆ 内部反馈环路允许应用具有不相等的 $R_F/R_G$ 比
- ◆ 差分增益为 $R_F/R_G$
- ◆ 我们将重点关注该架构



# “AD8138”差分ADC驱动器架构

- ◆ 所有老式AD8138型驱动器的输入端都有PNP电平转换器
- ◆ 电平转换器可将总输入共模电压降低约 $1V_{BE}$
- ◆ 电平转换在单电源、直流耦合和单端转差分应用中十分有利，该应用中共模输入电压会降至接近负供电轨
- ◆ 该特性使单电源放大器上可采用双极性输入
  - 我们将在第二部分中举例说明
- ◆ 并非所有差分驱动器都具有该特性

## ADA4939 范围集中


Input Capacitance	$(V_S = +5V)$	1	pF
Input Common-Mode Voltage		1.1	3.9
CMRR		-83	-77
$\Delta V_{OUT, dm} / \Delta V_{IN, cm}; \Delta V_{IN, cm} = \pm 1V$			

$\approx 1.1V$  (从各供电轨)

## ADA4937 范围可变

Input Capacitance	$(V_S = +5V)$	1	pF
Input Common-Mode Voltage		0.3 to 3.0	V
CMRR		-69	-80
$\Delta V_{OUT, dm} / \Delta V_{IN, cm}; \Delta V_{IN, cm} = \pm 1V$			

范围可变



# 谢谢!

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](mailto:china.support@analog.com)

ADI样片申请网址: <http://www.analog.com/zh/sample>

## MAKEADIFFERENCE