



AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

## 传感器及其使用

DAVID KRESS  
技术营销总监  
ADI公司

2016年3月9日



# 历史

- ▶ 公元前5000年，埃及，重量测量证据
- ▶ 温标：
  - 1593 Galileo Galilei：水测温器
    - 差分温度检测
  - 1612 Santorio Santorio在测温器上设置了标度
  - Daniel Gabriel Fahrenheit 1714 ( 32F , 212F , 180等分 )
    - 第一只带标度的温度计，水银
  - Anders Celsius 1742 ( 0 , 100C , 100等分 )
  - Lord Kelvin 1848 ( 0K , 百分度等分 )
  - Warren Johnson 1883 -- 恒温器



现代测温器

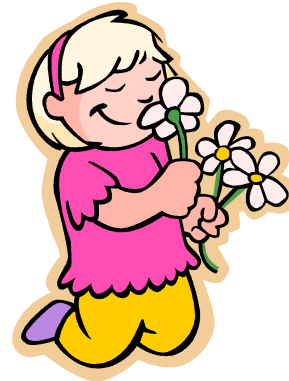
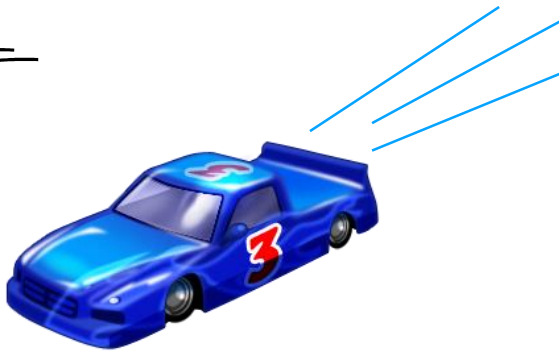
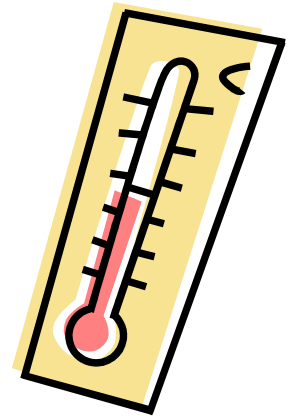
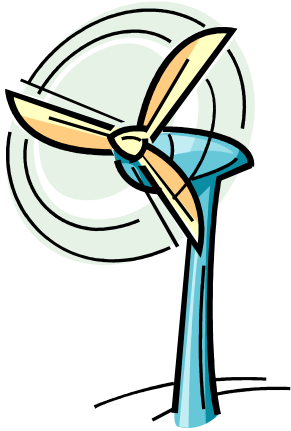


# 目标

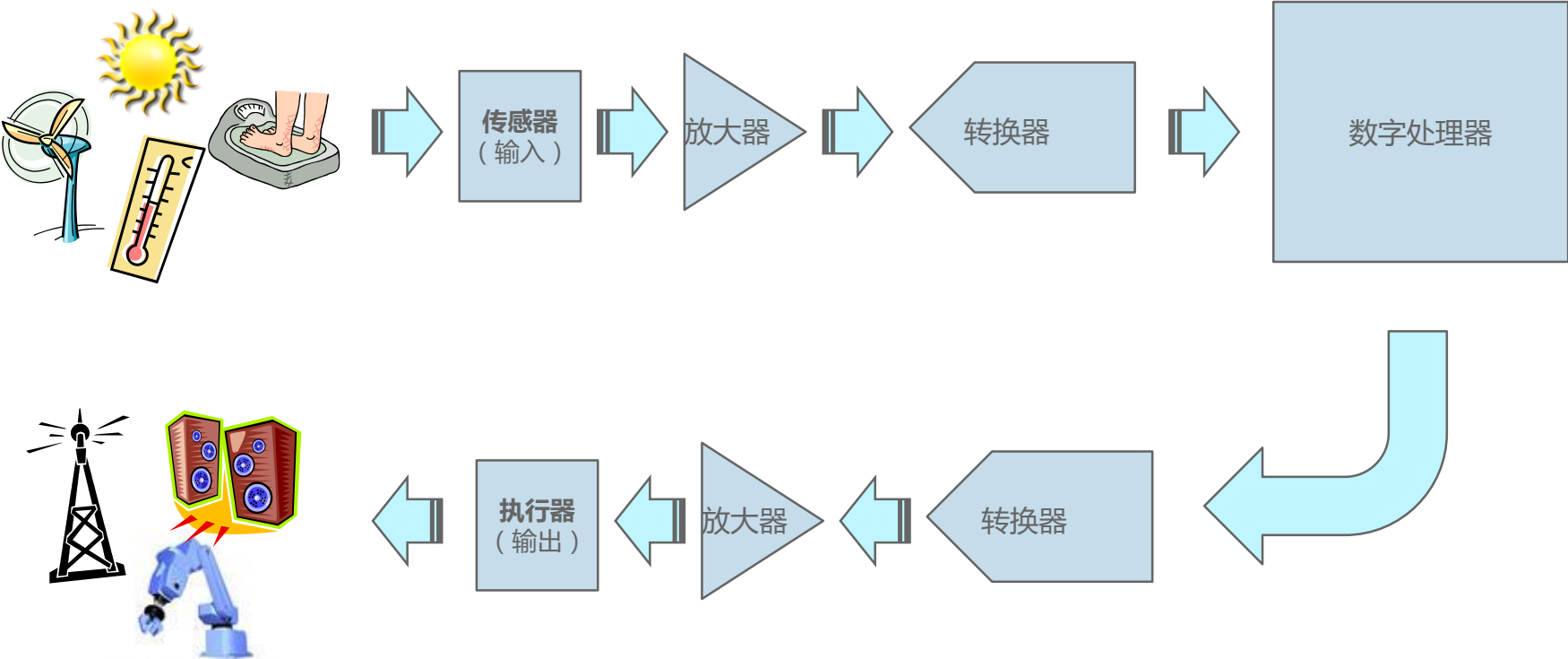
- ▶ 捕捉真实世界发生的事物
- ▶ 转化为有用的电子格式
- ▶ 分析、操控、存储并发送
- ▶ 送回真实世界



# 真实世界不是数字形式的

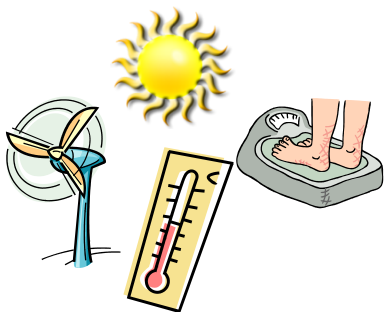


# 模拟转电子信号处理



# 传感器

模拟，而不是电子



传感器  
(输入)



放大器

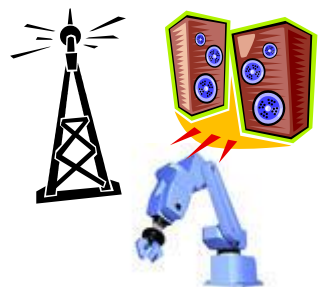


转换器



数字处理器

模拟和电子



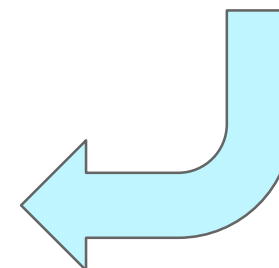
执行器  
(输出)



放大器



转换器



# 常用传感器

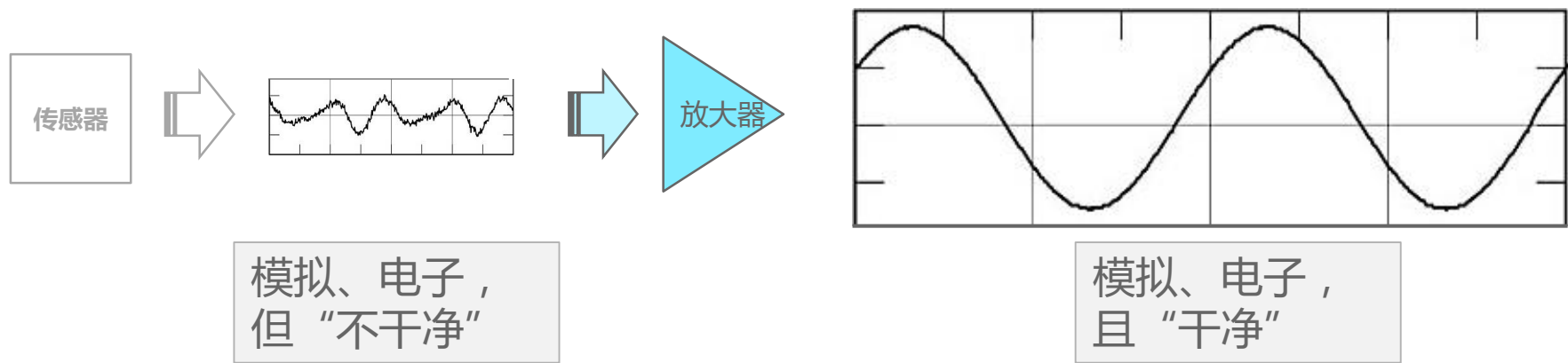


## 传感器类型

## 输出

热电偶	电压
光电二极管	电流
应变计	电阻
麦克风	电容
触摸按钮	电荷输出
天线	电感

# 传感器信号调理



- 将信号放大到抗噪声级别
- 降低源阻抗
- 线性化 (有时但并不总是)
- 滤波器
- 保护



# 设计硅传感器

- ▶ 传感器信号通常电平较低且容易受放大器连接上的噪声耦合影响
- ▶ 信号调理应该尽可能靠近传感器
  - 多芯片混合
  - 硅传感器与放大器/数据转换器位于同一芯片上
- ▶ 环境问题
  - 极端温度或振动
  - 传感器必须很小，以保证灵敏度
- ▶ 查找响应物理变量的硅属性
  - 电容、压力、温度变化

# 硅传感器

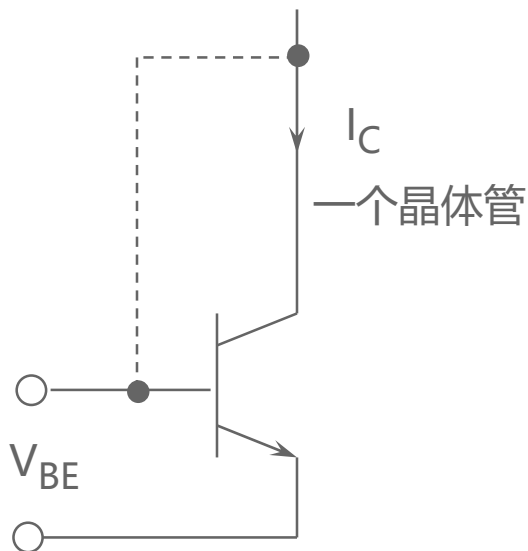


传感器类型	输出
温度	电压/电流
光电二极管	电流
应变计	电阻
麦克风	电容
旋转	电容
天线	RF -- 电感
加速度	电容

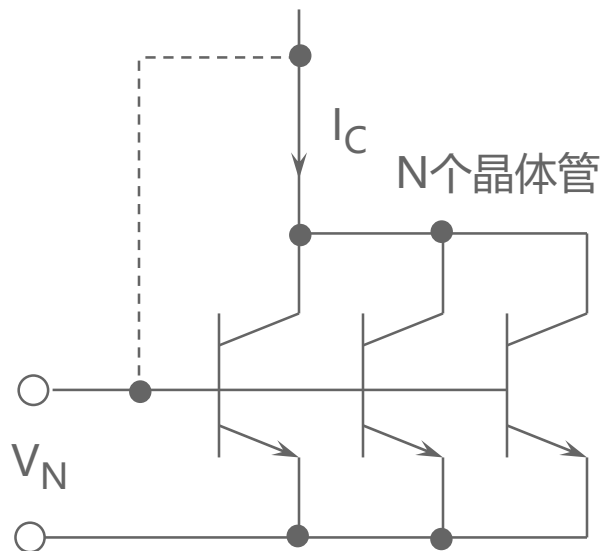
# 温度传感器类型

热电偶	RTD	热敏电阻	半导体
最宽范围： -184°C至+2300°C	范围： -200°C至 +850°C	范围： 0°C至+100°C	范围： -55°C至+150°C
高精度和高可靠性	线性度良好	线性度很差	线性度：1°C 精度：1°C
需要冷结补偿	需要激励	需要激励	需要激励
低电压输出	低成本	高灵敏度	10mV/K、20mV/K 或1μA/K典型输出

# 半导体温度传感器的基本关系



$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right)$$

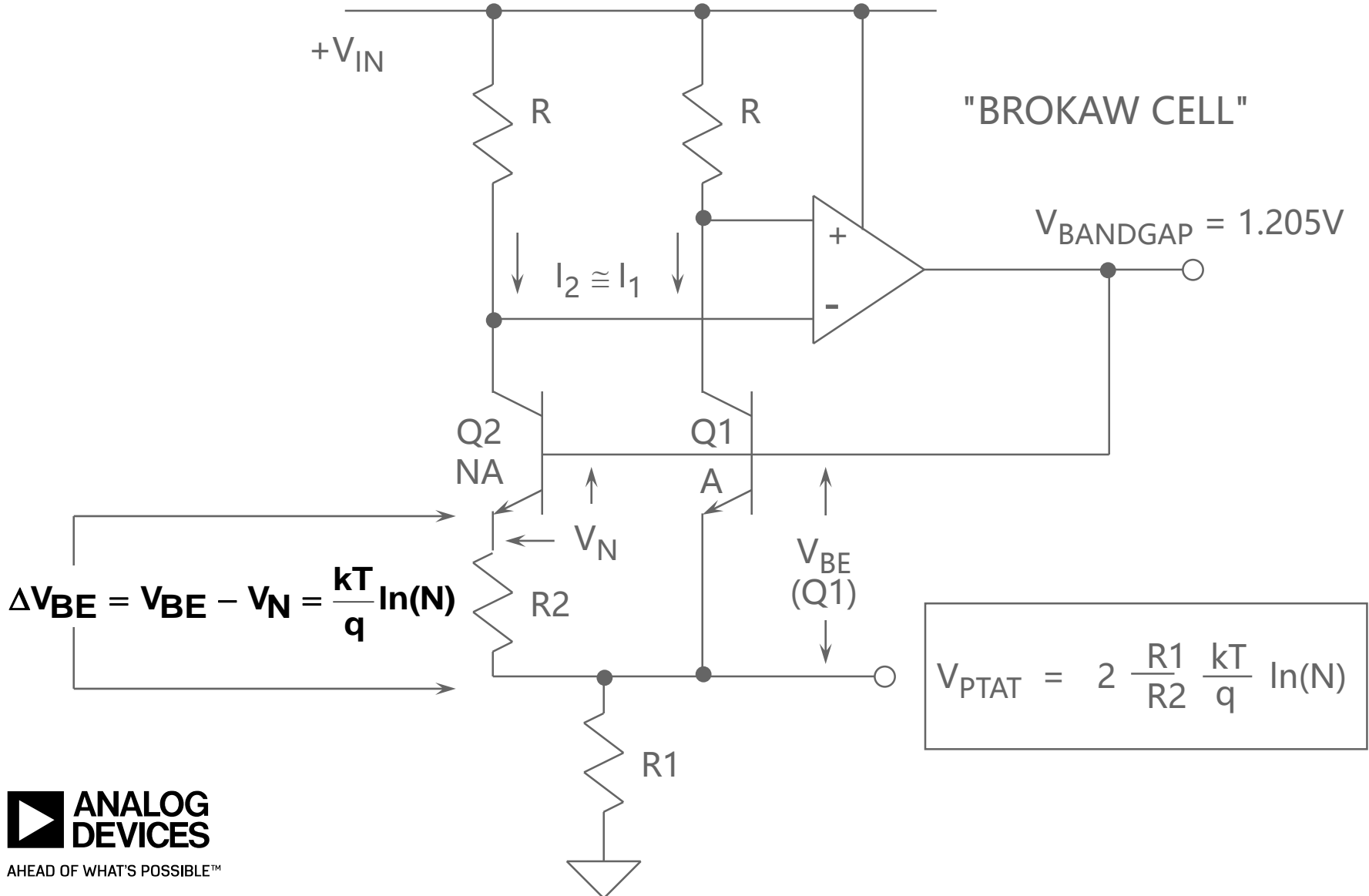


$$V_N = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_C}{N \cdot I_S}\right)$$

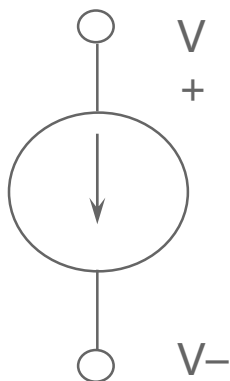
$$\Delta V_{BE} = V_{BE} - V_N = \frac{kT}{q} \ln(N)$$

与  $I_C$ 、 $I_S$  无关

# 经典带隙温度传感器



# 电流输出传感器：AD590、AD592、TMP17



AD592:TO-92封装

TMP17:SO-8封装

- ▶  $1\mu\text{A}/\text{K}$ 比例因子
- ▶ 标称输出电流@  $+25^\circ\text{C}$  :  $298.2\mu\text{A}$
- ▶ 工作电压范围：4V至30V
- ▶  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 最大误差（ $25^\circ\text{C}$ 时）， $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 误差（整个温度范围）  
 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 典型非线性(AD592CN)
- ▶  $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 最大误差（ $25^\circ\text{C}$ 时）， $\pm 3.5^\circ\text{C}$ 误差（整个温度范围）  
 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 典型非线性(TMP17F)
- ▶ AD590额定温度范围： $-55^\circ\text{C}$ 至 $+150^\circ\text{C}$
- ▶ AD592额定温度范围： $-25^\circ\text{C}$ 至 $+105^\circ\text{C}$
- ▶ TMP17额定温度范围： $-40^\circ\text{C}$ 至 $+105^\circ\text{C}$

# 模拟温度传感器

产品	精度 (最大值)	最高精度范围	工作温度范围	电源范围	最大电流	接口	封装
AD590	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$	$25^{\circ}\text{C}$ $-25^{\circ}\text{C}$ 至 $105^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C}$ 至 $150^{\circ}\text{C}$	4至30V	298uA	电流输出	TO-52、2引脚FP、SOIC、裸片
AD592	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$	$25^{\circ}\text{C}$ $-55^{\circ}\text{C}$ 至 $150^{\circ}\text{C}$	$-25^{\circ}\text{C}$ 至 $105^{\circ}\text{C}$	4至30V	298uA	电流输出	TO-92
TMP35	$\pm 2.0^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$ 至 $85^{\circ}\text{C}$ $-25^{\circ}\text{C}$ 至 $100^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C}$ 至 $150^{\circ}\text{C}$	2.7至5.5V	50uA	电压输出	TO-92、SOT23、SOIC
TMP36	$\pm 3.0^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$ 至 $125^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C}$ 至 $150^{\circ}\text{C}$	2.7V至5.5V	50uA	电压输出	TO-92、SOT23、SOIC
AD22100	$\pm 2.0^{\circ}\text{C}$	$-50^{\circ}\text{C}$ 至 $150^{\circ}\text{C}$	$-50^{\circ}\text{C}$ 至 $150^{\circ}\text{C}$	4至6.5V	650uA	电压输出	TO-92、SOIC、裸片
AD22103	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$ 至 $100^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$ 至 $100^{\circ}\text{C}$	2.7至3.6V	600uA	电压输出	TO-92、SOIC

# 数字温度传感器 全面产品组合，带精度选项

产品	精度 (最大值)	最高精度范围	接口	封装
ADT7420/7320	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C}$ 至 $85^{\circ}\text{C}$ $-20^{\circ}\text{C}$ 至 $105^{\circ}\text{C}$	I2C/SPI	LFCSP
ADT7410/7310	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$ 至 $105^{\circ}\text{C}$	I2C/SPI	SOIC
ADT75	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ (B级) $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (A级)	$0^{\circ}\text{C}$ 至 $85^{\circ}\text{C}$ $-25^{\circ}\text{C}$ 至 $100^{\circ}\text{C}$	I2C	MSOP、SOIC
ADT7301	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$ 至 $70^{\circ}\text{C}$	SPI	SOT23、MSOP
TMP05/6	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$ 至 $70^{\circ}\text{C}$	PWM	SC70, SOT23
AD7414/5	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$ 至 $70^{\circ}\text{C}$	I2C	SOT23,MSOP
ADT7302	$\pm 2^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$ 至 $70^{\circ}\text{C}$	SPI	SOT23,MSOP
TMP03/4	$\pm 4^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$ 至 $100^{\circ}\text{C}$	PWM	TO-92、SOIC、 TSSOP



# 热电偶

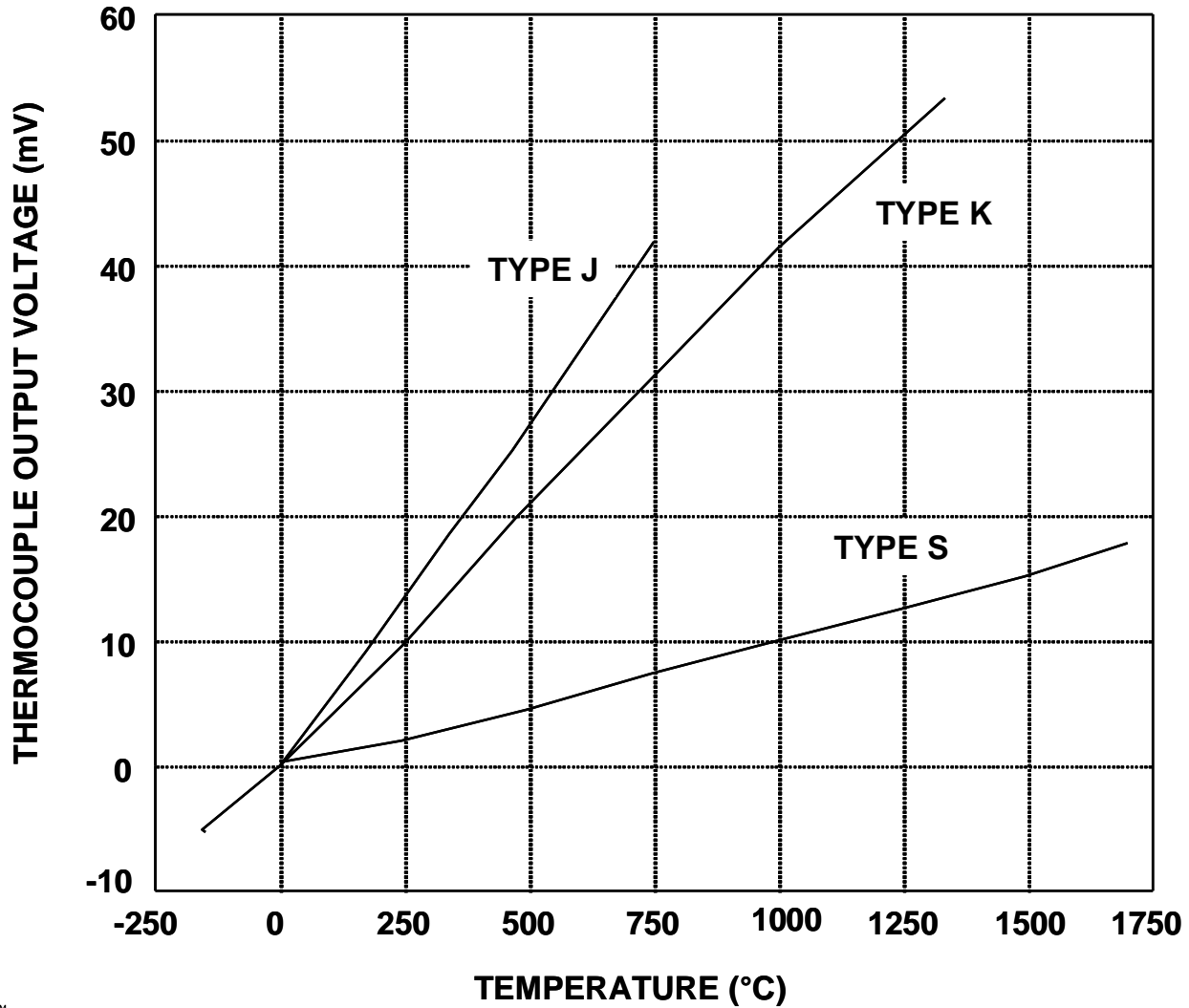
- ▶ 电平极低( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )
- ▶ 非线性
- ▶ 难以处理
- ▶ 导线需要绝缘
- ▶ 易受噪声影响
- ▶ 易损坏
- ▶ 最高温度范围  
对于接触传感器



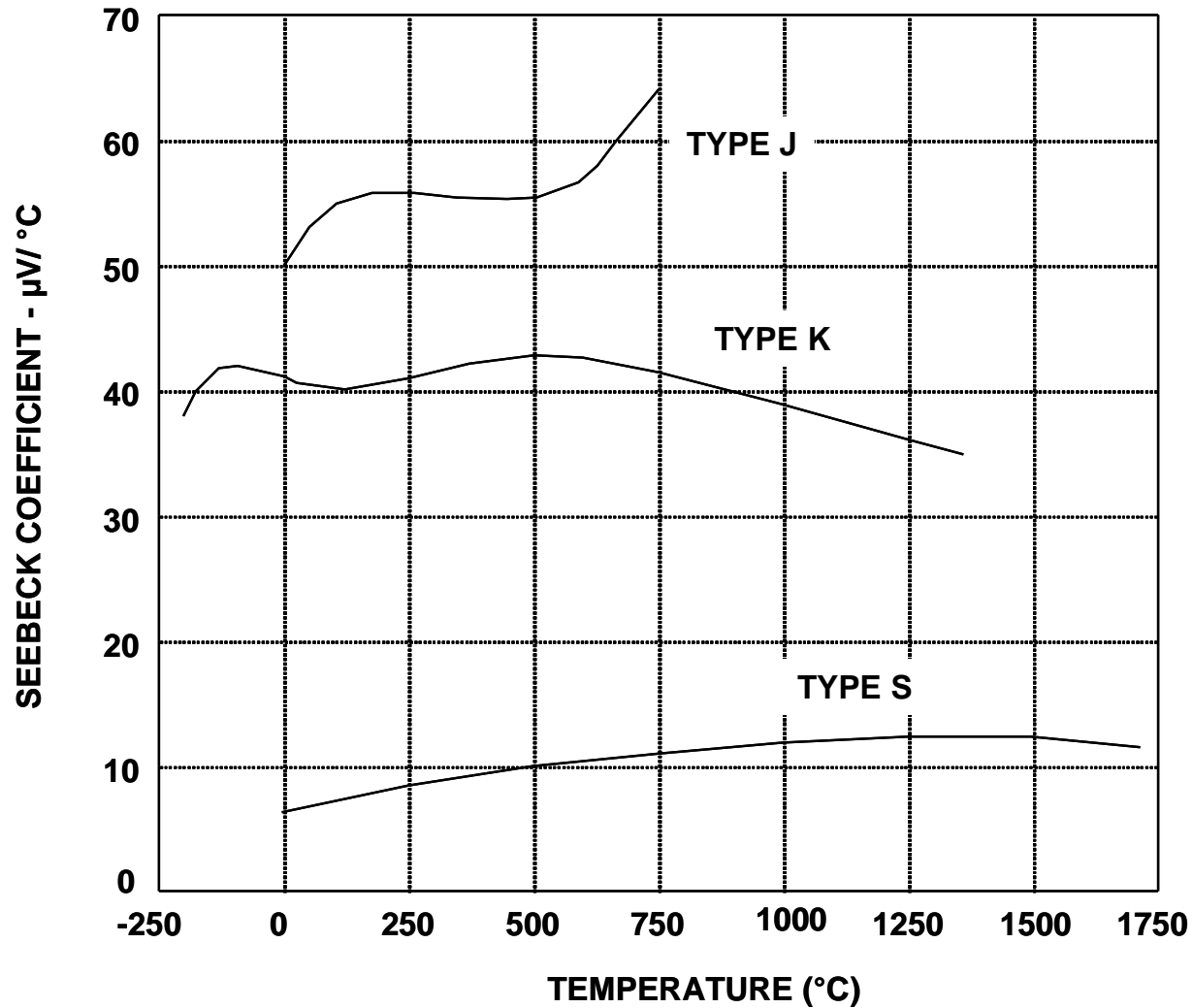
# 常见热电偶

结材料	典型有效范围 (°C)	标称灵敏度 ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )	ANSI标识
铂(6%)/铑-铂(30%)/铑	38至1800	7.7	B
钨(5%)/铼-钨(26%)/铼	0至2300	16	C
镍铬-康铜	0至982	76	E
铁-康铜	0至760	55	J
镍铬-镍铝	-184至1260	39	K
铂(13%)/铑-铂	0至1593	11.7	R
铂(10%)/铑-铂	0至1538	10.4	S
铜-康铜	-184至400	45	T

# 热电偶输出电压 J、K和S型热电偶

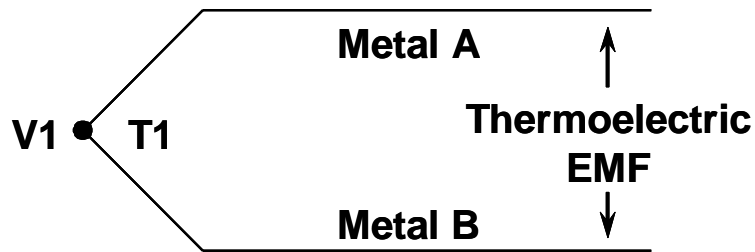


# 热电偶塞贝克系数与温度的关系

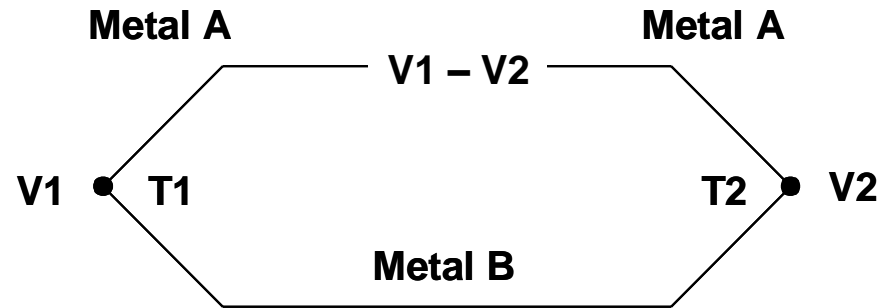


# 热电偶基础知识

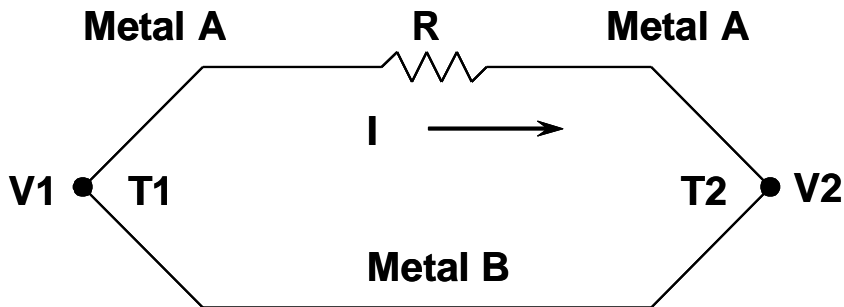
## A. THERMOELECTRIC VOLTAGE



## C. THERMOCOUPLE MEASUREMENT

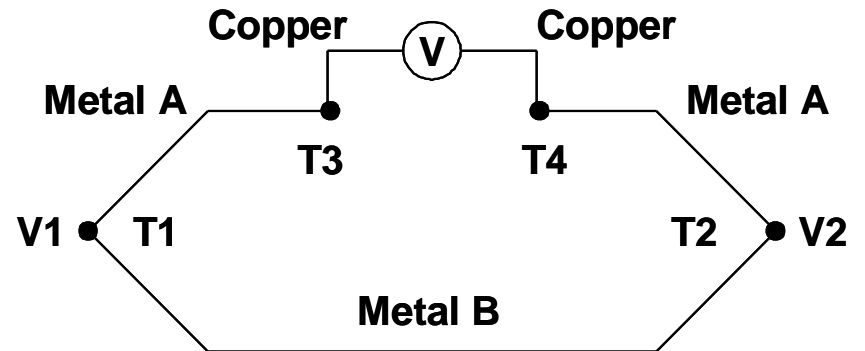


## B. THERMOCOUPLE



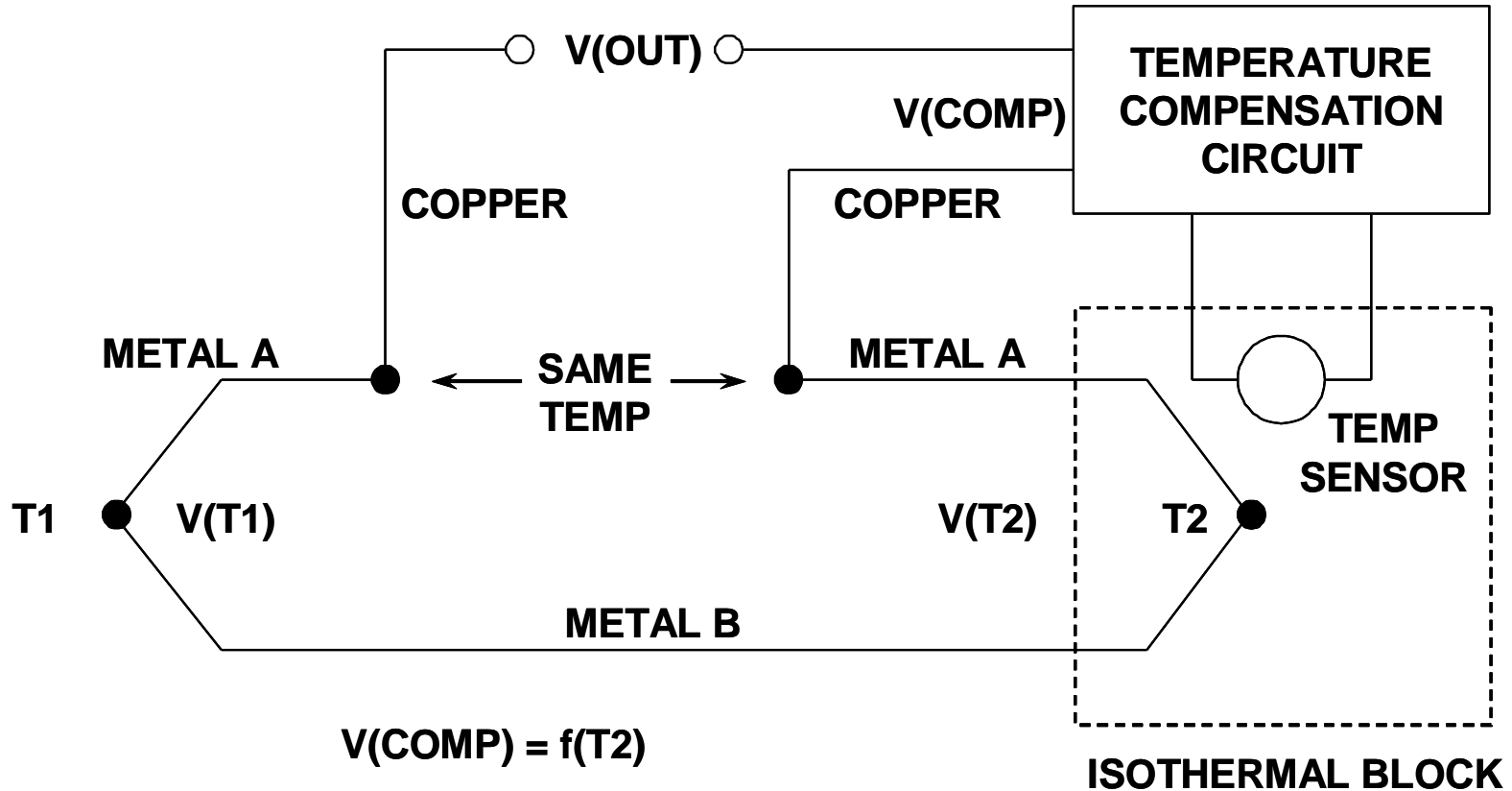
$R = \text{Total Circuit Resistance}$   
 $I = (V1 - V2) / R$

## D. THERMOCOUPLE MEASUREMENT



$V = V1 - V2, \text{ If } T3 = T4$

# 利用温度传感器进行冷结补偿



$$V(\text{COMP}) = f(T2)$$

$$V(\text{OUT}) = V(T1) - V(T2) + V(\text{COMP})$$

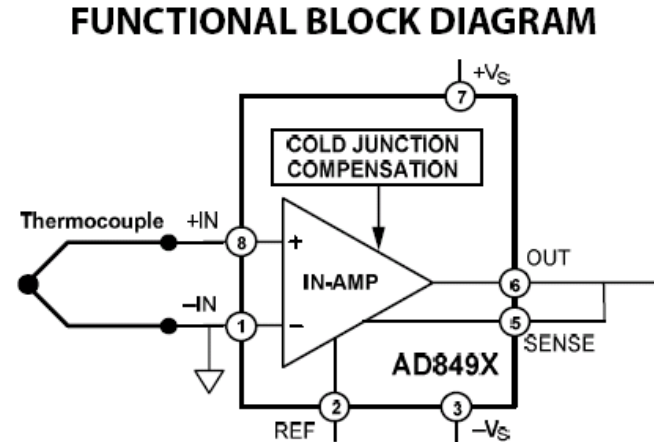
IF  $V(\text{COMP}) = V(T2) - V(0^\circ\text{C})$ , THEN

$$V(\text{OUT}) = V(T1) - V(0^\circ\text{C})$$

# 热电偶放大器

## AD849x产品特性和描述

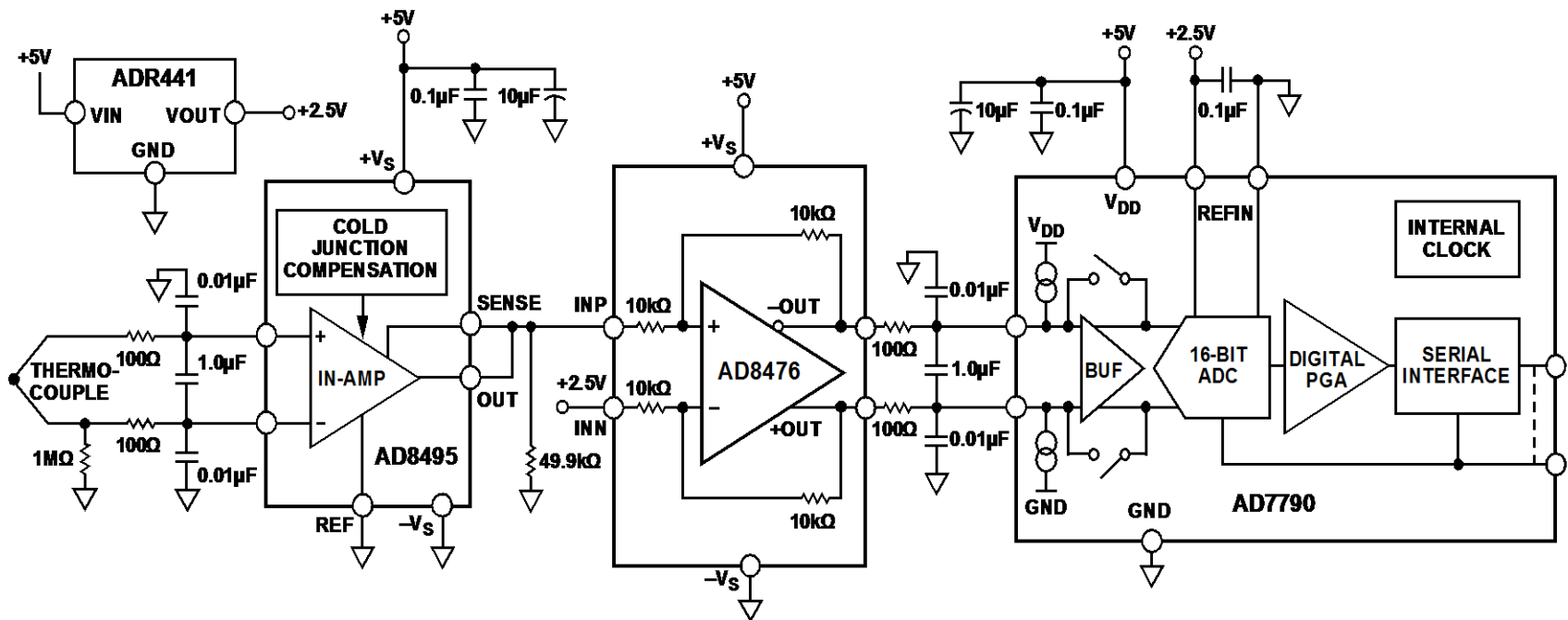
- ▶ 针对J和K型热电偶进行了**工厂调整**
- ▶ 通过校准实现高精度冷结补偿(CJC)
  - IC温度为25°C和60°C
- ▶ 输出电压为5mV/°C
  - 有源下拉电阻
  - 轨到轨输出摆幅
- ▶ 宽电源范围：+2.7V至+/-15V
- ▶ **低功耗** < 1mW (典型值)
- ▶ 封装——节省空间型MSOP-8无铅封装
- ▶ **低成本** < 1美元/片 (批量采购)
- ▶ **可在单电源供电时测量负温度**



产品型号	热电偶类型	优化温度范围	测量温度范围	初始精度
AD8494	J	0至50°C	J型全范围	±1°C和±3°C
AD8495	K	0至50°C	K型全范围	±1°C和±3°C
AD8496	J	25°C至100°C	J型全范围	±1.5°C和±3°C
AD8497	K	25°C至100°C	K型全范围	±1.5°C和±3°C

# 利用温度传感器进行冷结补偿的演示板-CN0271

- ▶ 图1.集成冷结补偿的K型热电偶测量系统（原理示意图：未显示所有连接）



10598-001

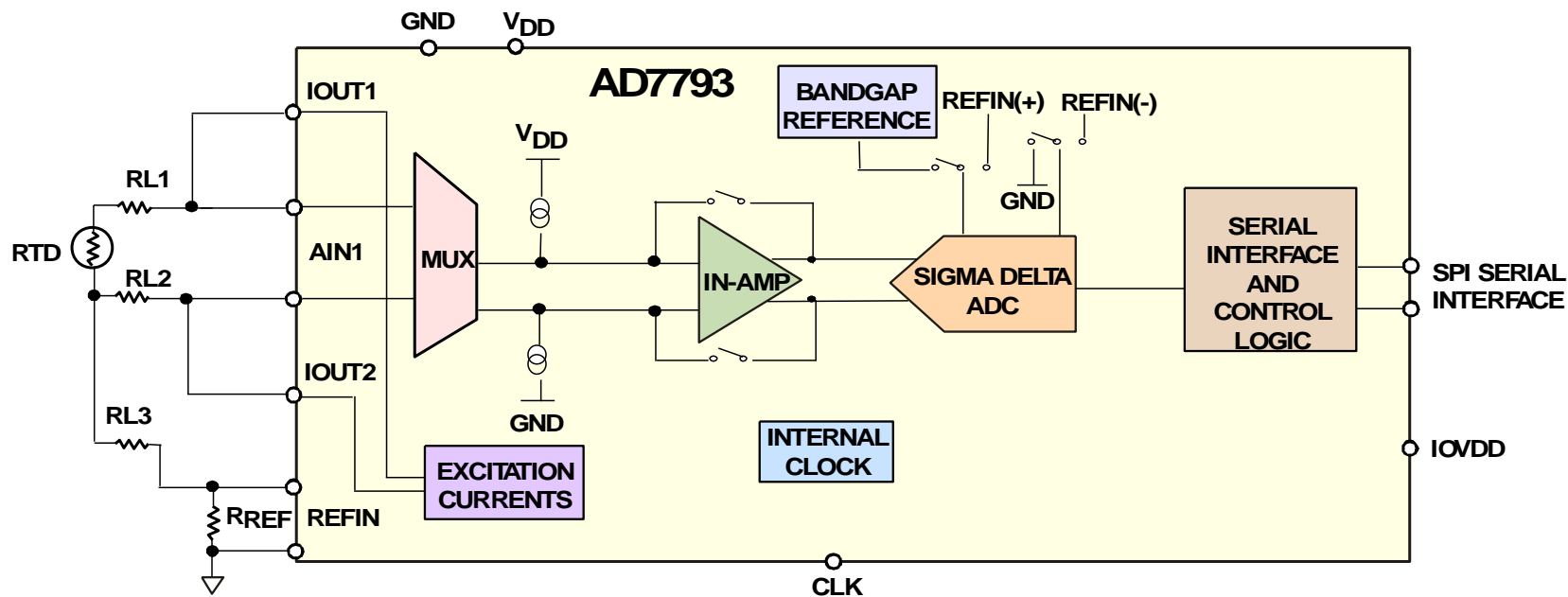


# 温度测量RTD传感器

## ▶ 主要应用优势

### – 三线式RTD

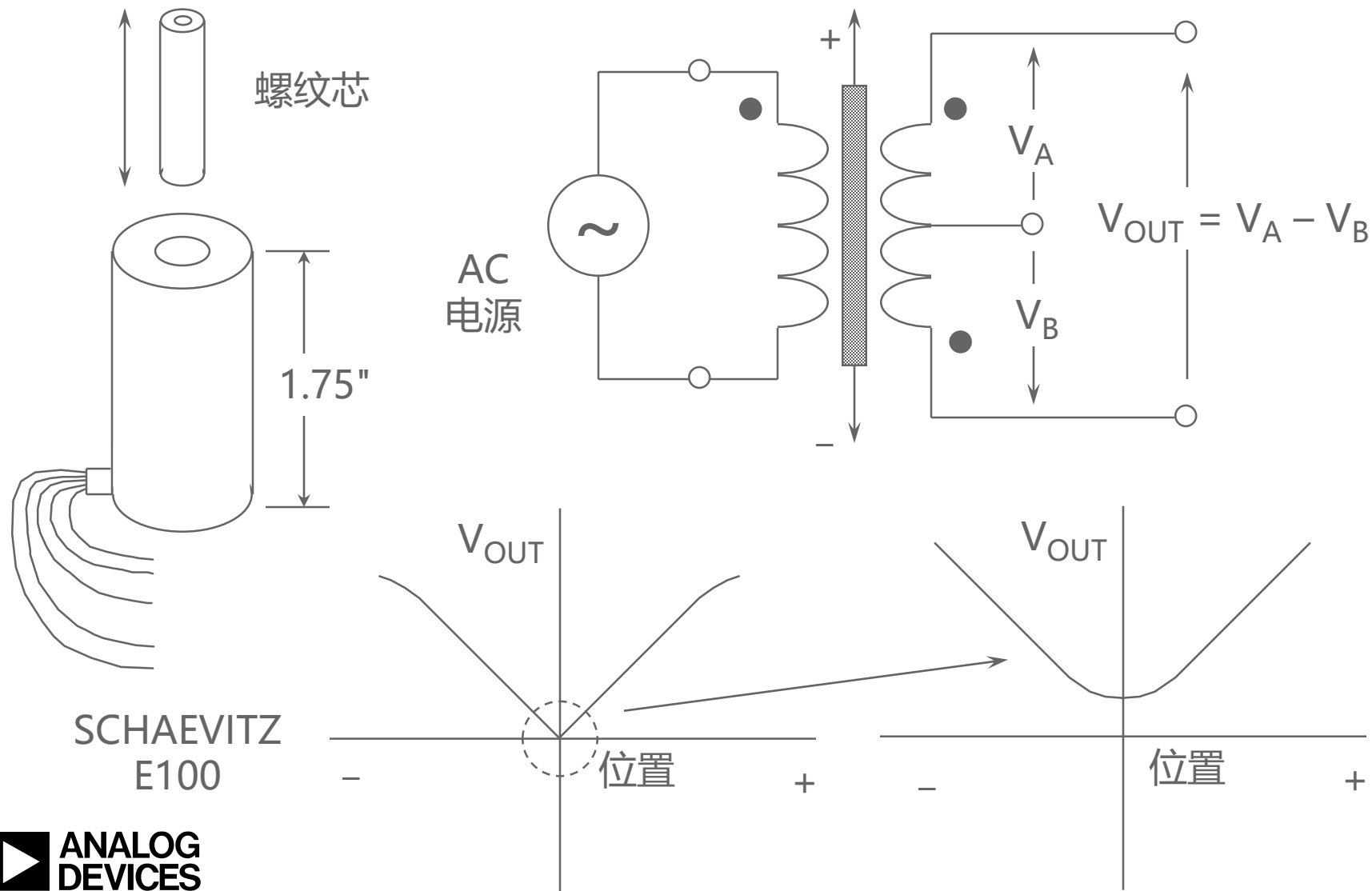
- 2个匹配激励电流
- 40 nV RMS (增益= 64)
- 比率式配置
- 50 Hz和60 Hz抑制(-75 dB)



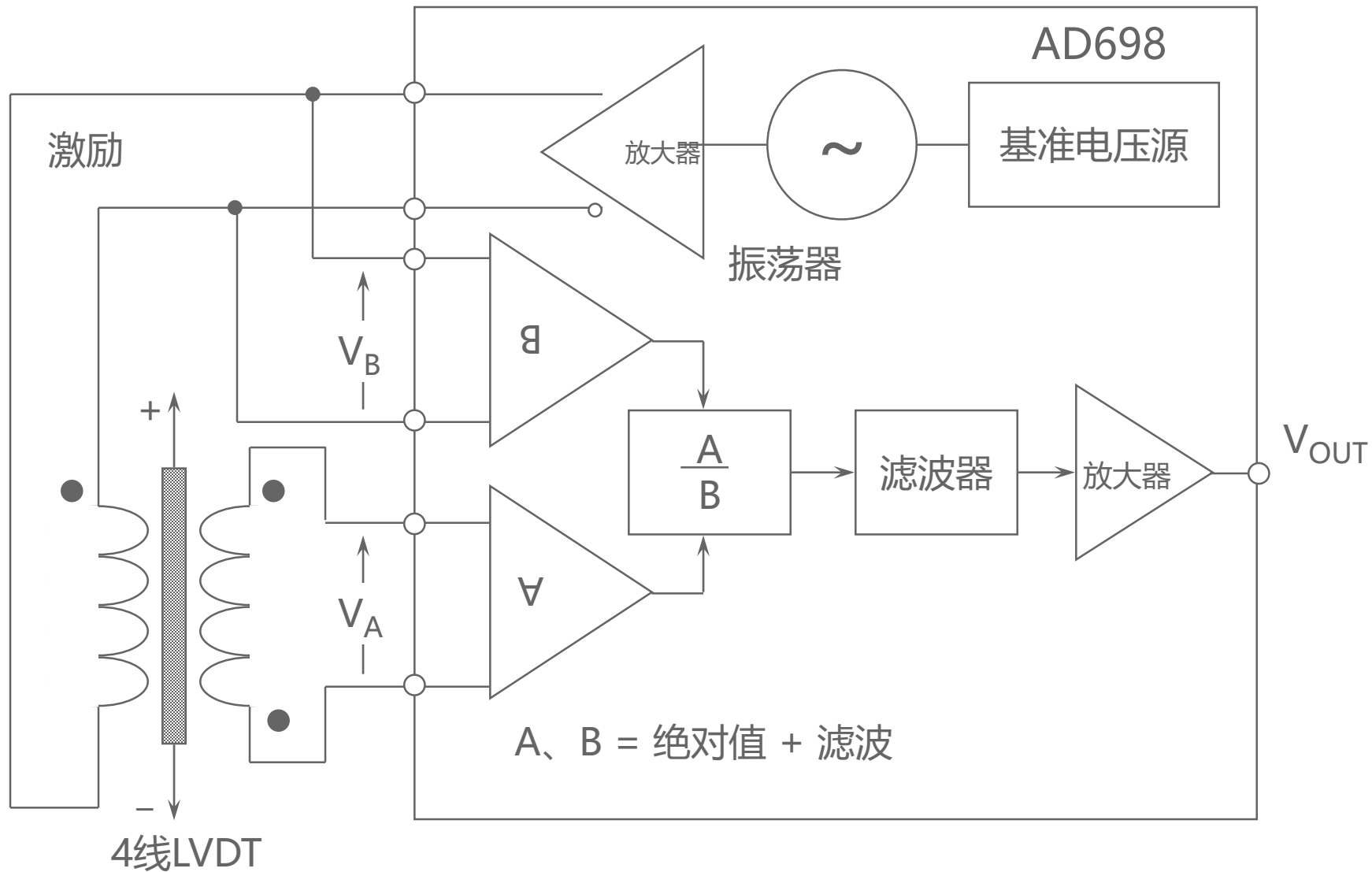
# 位置和运动传感器

- ▶ 线性位置：线性可变差分变压器(LVDT)
- ▶ 霍尔效应传感器
  - 近程检测器
- ▶ 旋转位置：
  - 光学旋转编码器
  - 自整角机和旋变器
  - 感应式传感器（线性和旋转位置）
  - AMR磁角度传感器
- ▶ 加速和倾斜：加速度计
- ▶ 陀螺仪

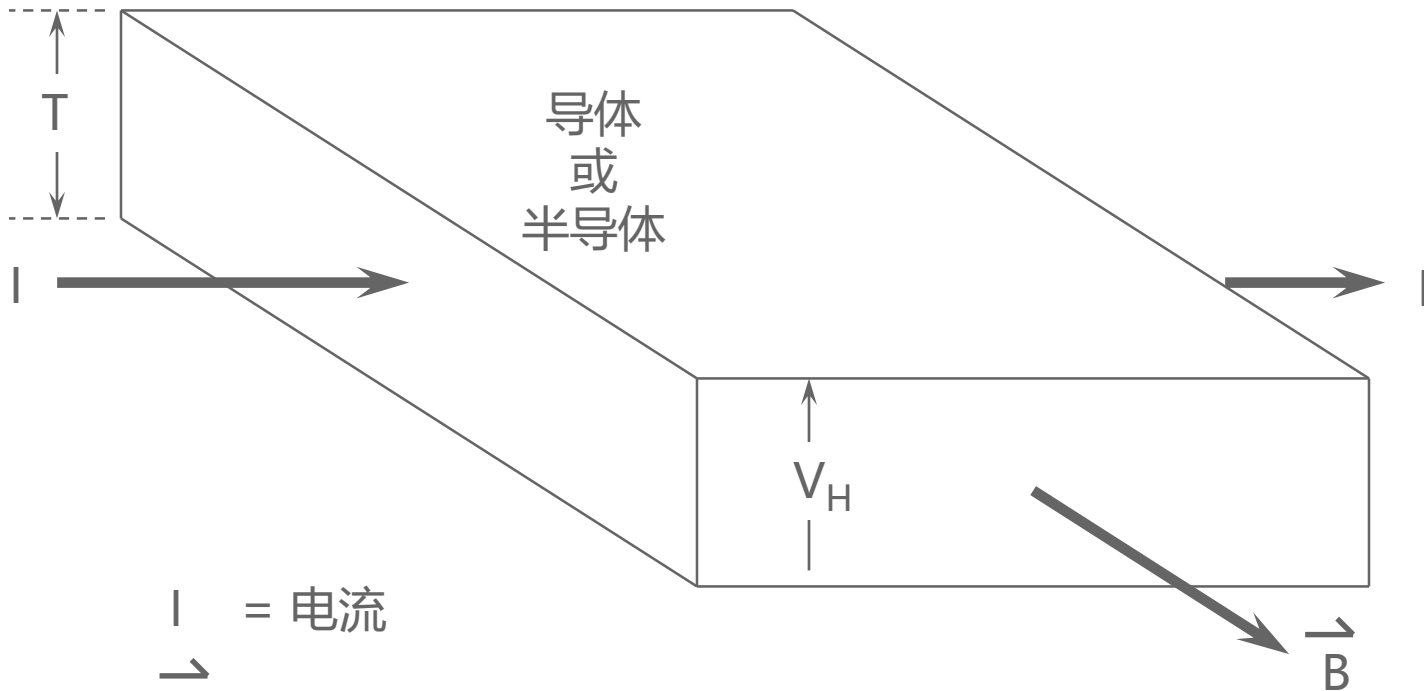
# LVDT - 线性可变差分变压器



# AD698 LVDT信号调理器 (简图)



# 霍尔效应传感器



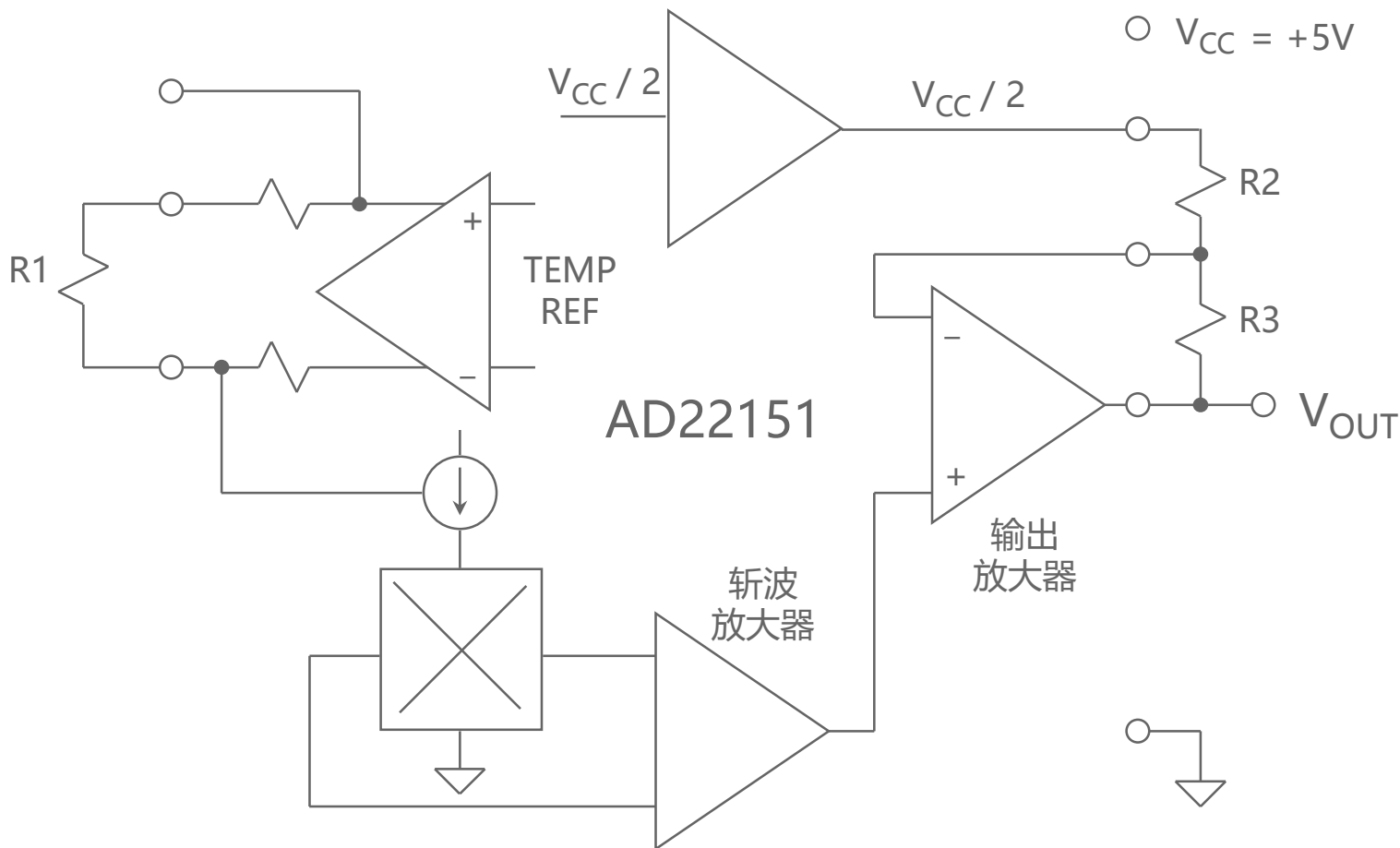
$I$  = 电流

$\vec{B}$  = 磁场

$T$  = 厚度

$V_H$  = 霍尔电压

# AD22151线性输出磁场传感器



$$V_{OUT} = \left[ 1 + \frac{R3}{R2} \right] \left[ 0.4\text{mV} \right] / \text{高斯}$$

非线性误差 = 0.1% FS

# ADA4571 AMR精密磁传感器

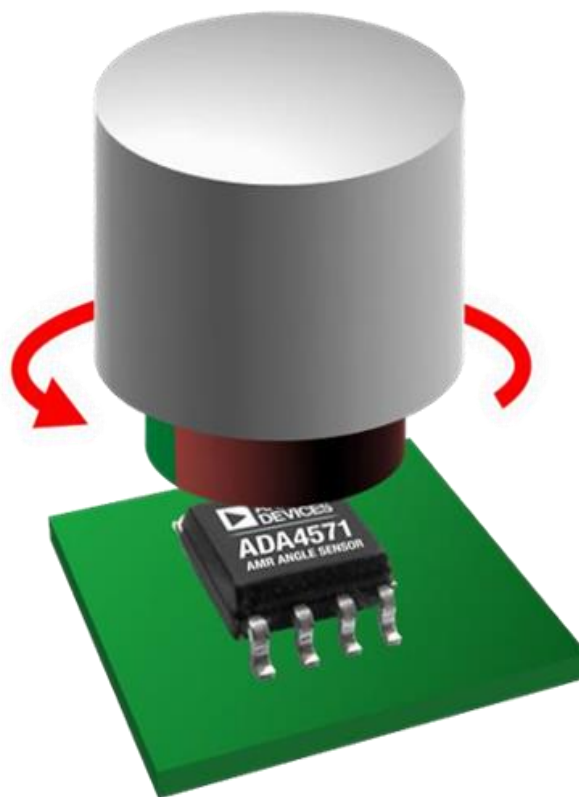
## 使用AMR

各向异性磁阻

电阻随磁场角度改变而变化

精度和速度性能优于霍尔效应传感器

使用更灵活，所需屏蔽更少



# ADA4571 – 高精度AMR角度传感器

角度精度 $0.5^\circ$ ，面积 $0.2\text{ cm}^2$

## ◆ 低角度误差

- 自由运行： $\pm 0.5^\circ$ （最大值）
- ◆ 启动： $\pm 0.5^\circ$ （典型值）

## ◆ 高速

- 50,000 RPM
- 低相位延迟 $2\mu\text{s}$

## ◆ 低功耗

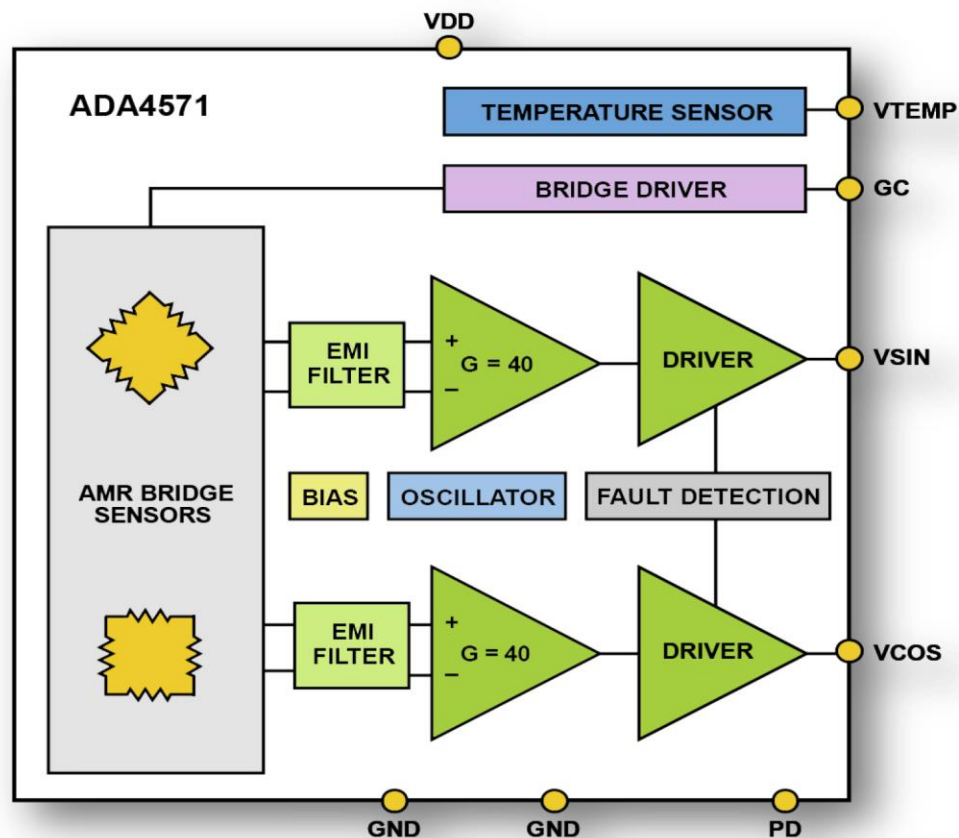
- 16mW（2.7V电源）

## ◆ 低噪声

- 500uVrms

## ◆ $40^\circ\text{C}$ 到 $150^\circ\text{C}$ 工作温度范围

## ◆ 小型8引脚SO封装

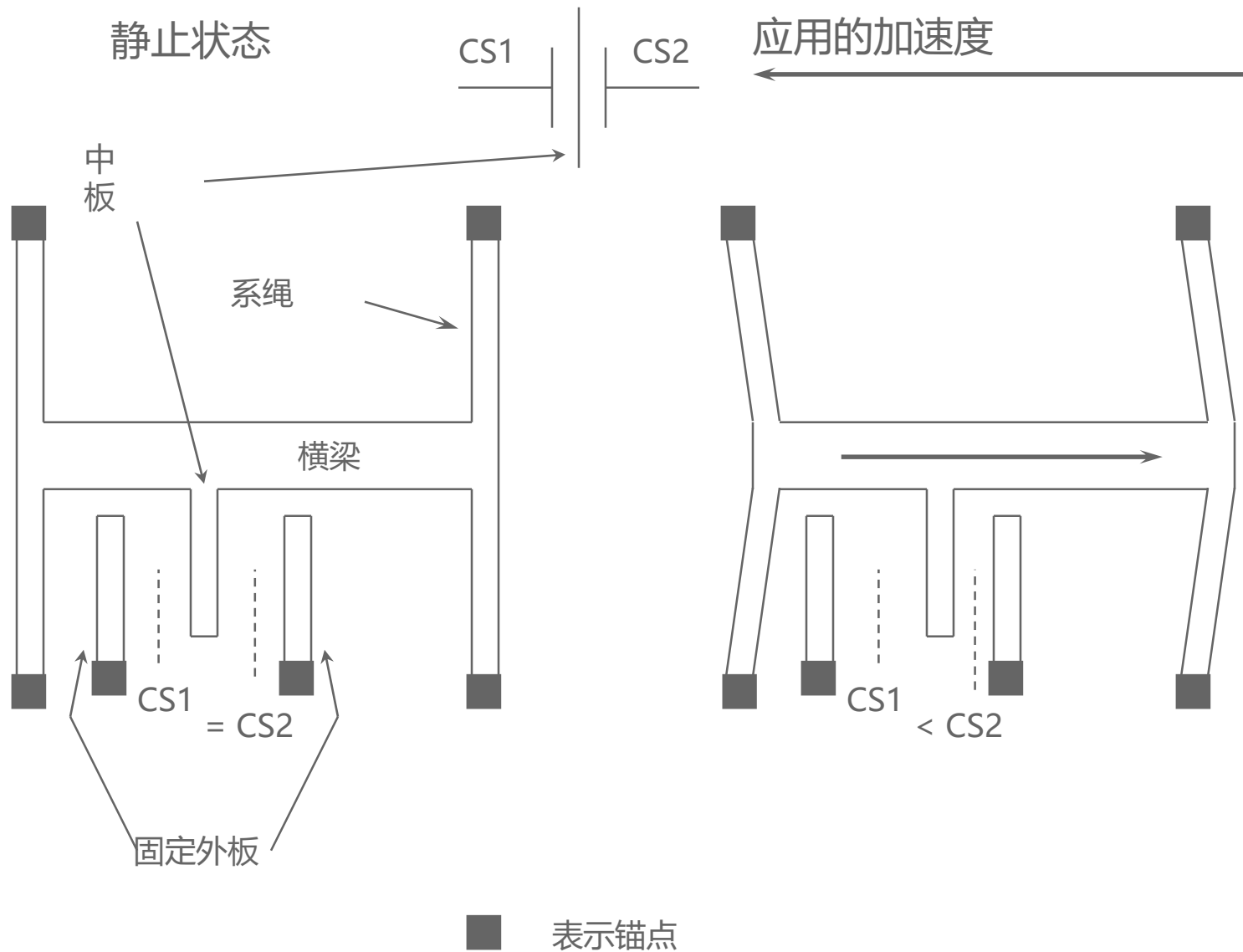




# 加速度计应用

- ▶ 倾斜
  - 汽车报警
  - 病人监护
  - 蜂窝电话
  - 视频游戏
- ▶ 惯性力
  - 笔记本电脑硬盘保护
  - 安全气囊碰撞传感器
  - 汽车导航系统
  - 电梯控制
- ▶ 冲击或振动
  - 机器监测
  - 振动台控制
- ▶ ADI加速度计满量程g范围：±0.5g至±480g
- ▶ ADI加速度计频率范围：DC至22kHz

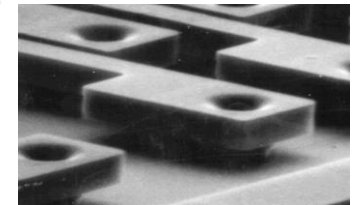
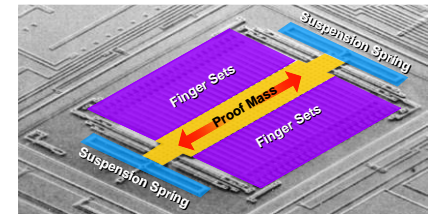
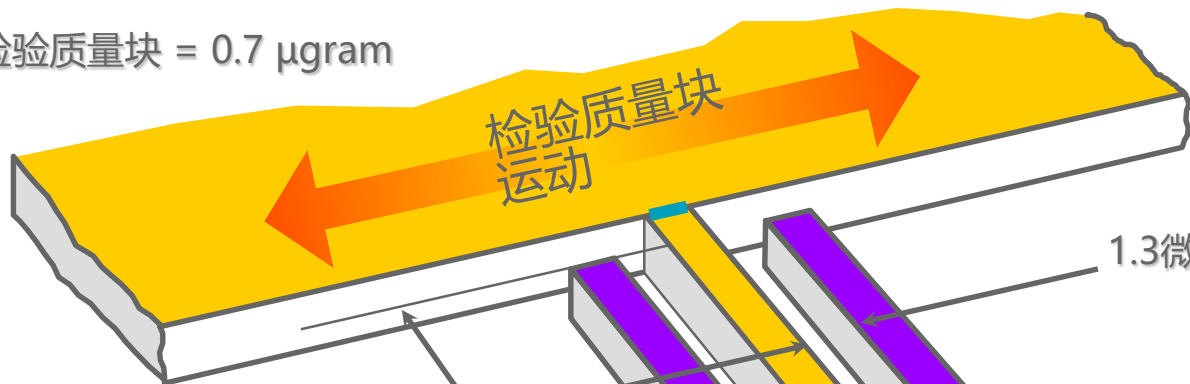
# ADXL系列微加工加速度计



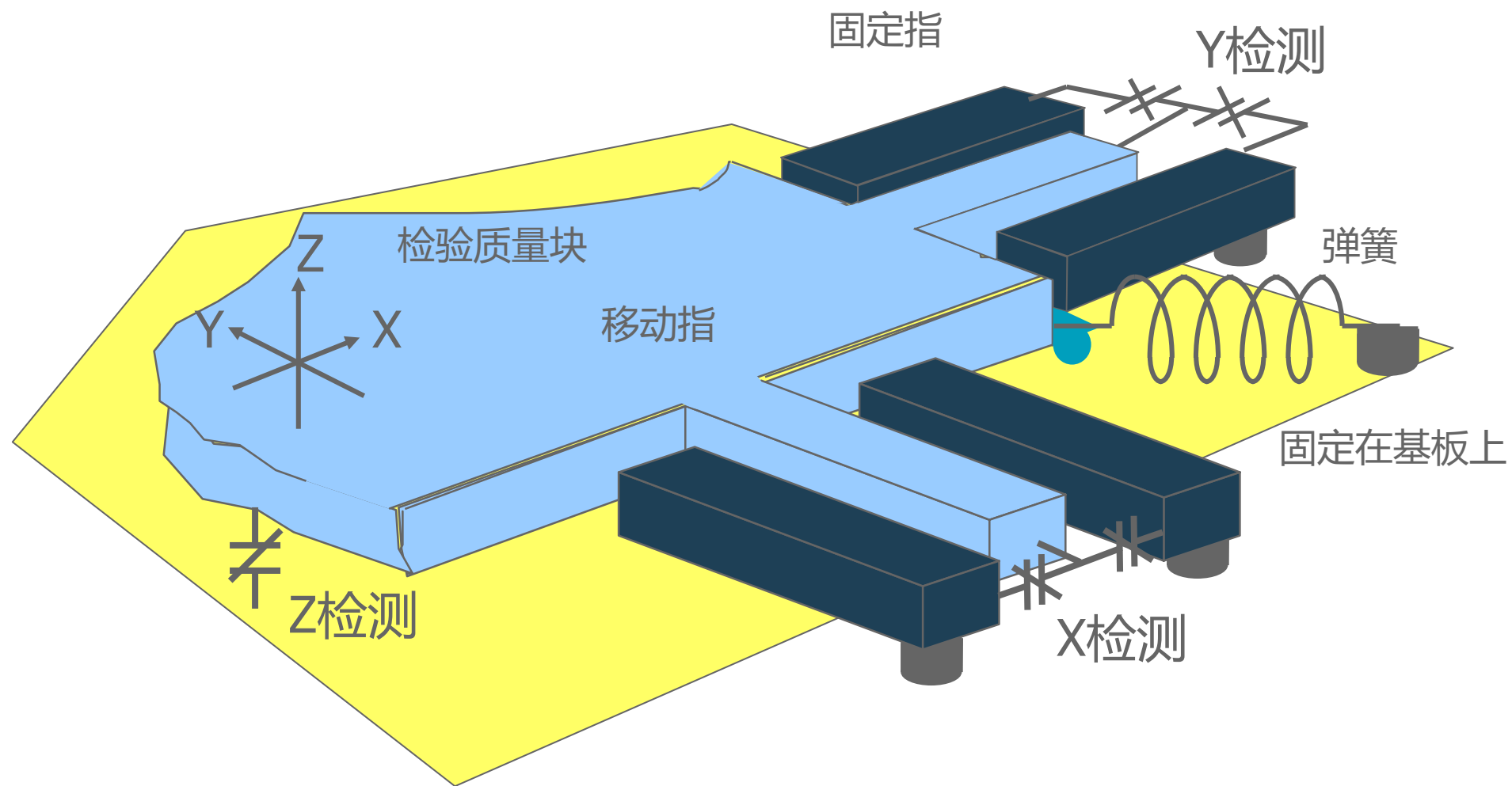
# iMEMS加速度计的工作原理

- ▶ 此图所示为单个指集
- ▶ 每个轴各有30个指集
- ▶ 整个指集的总电容为64 fF
- ▶ 位移发生变化时，差分电容也会发生变化

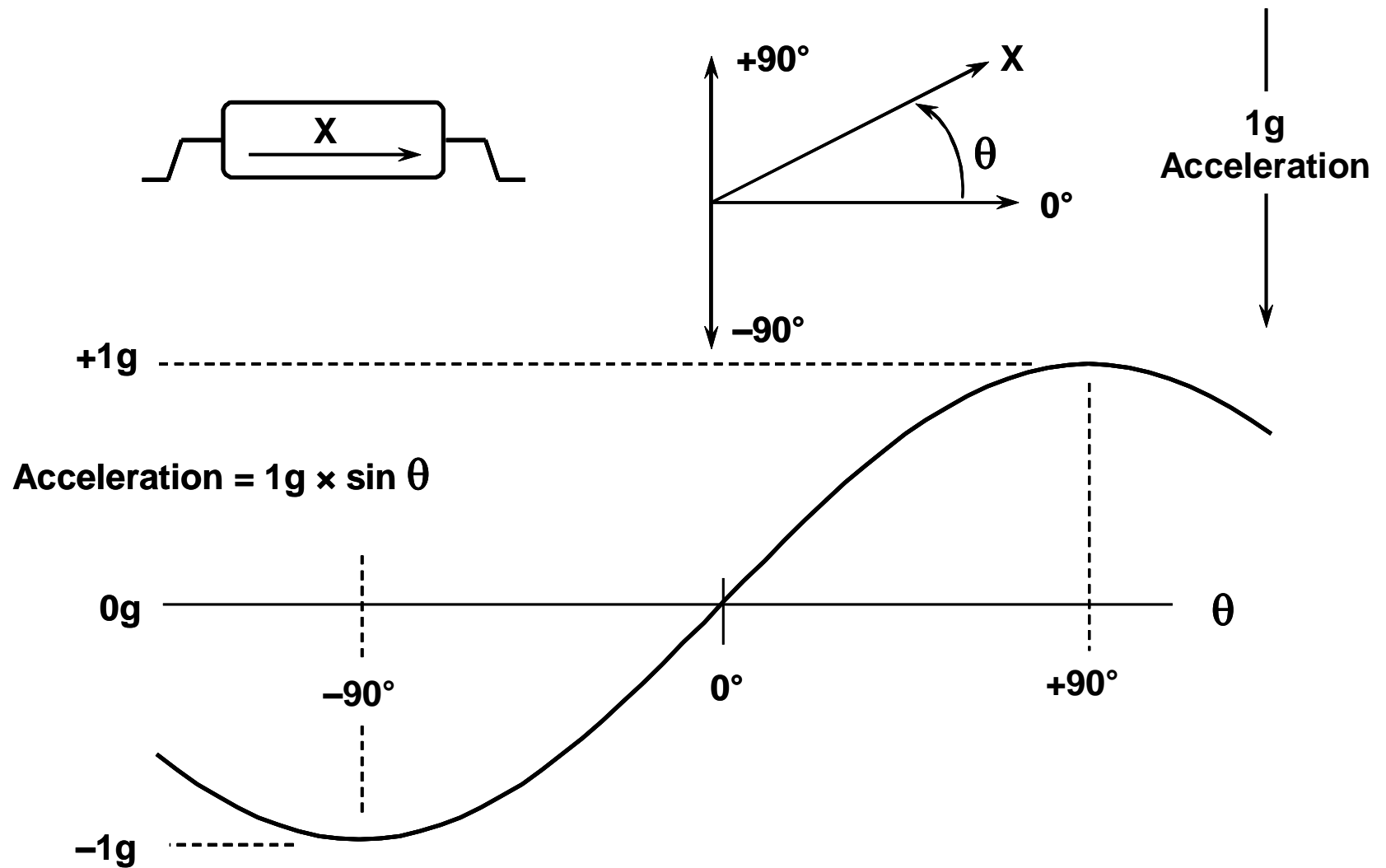
检验质量块 =  $0.7 \mu\text{gram}$



# 三轴加速度计机械系统

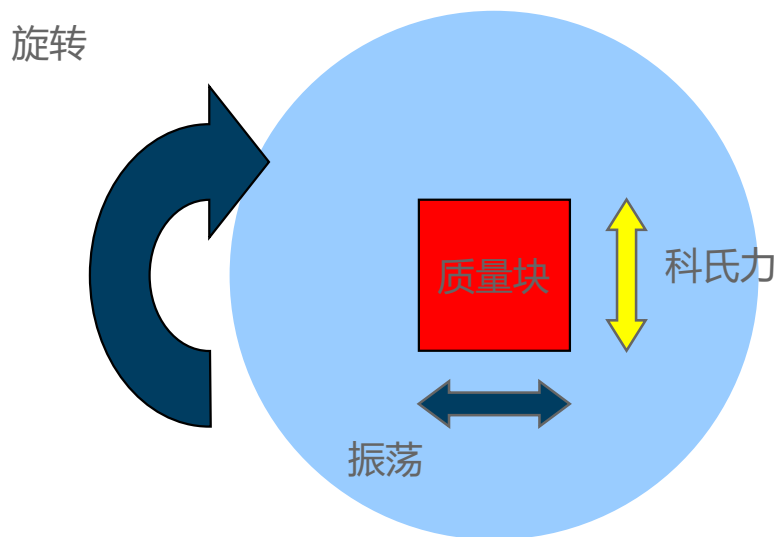


# 使用加速度计测量倾斜



# 陀螺仪工作原理

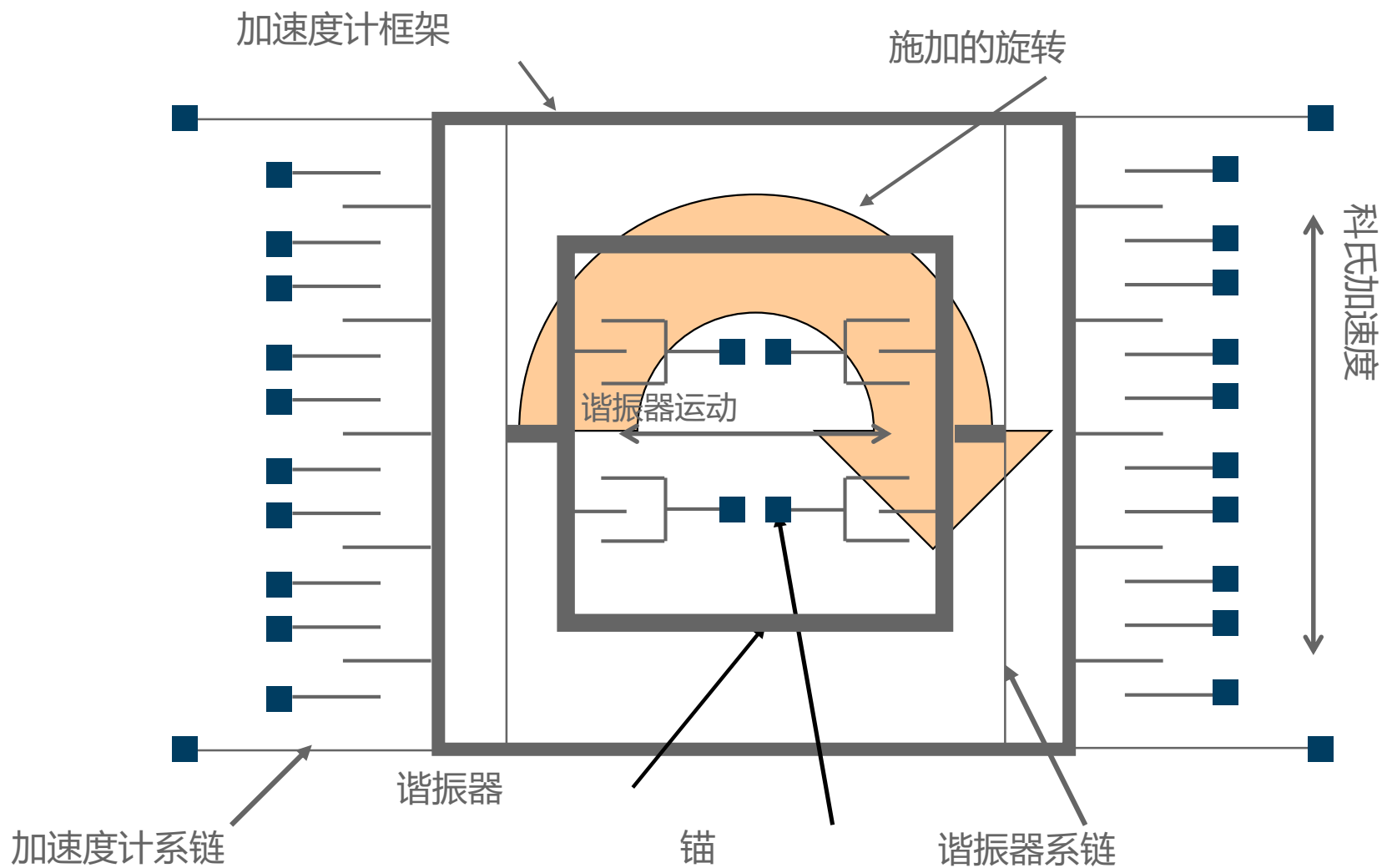
- ▶ 该器件如何测量角速率？
  - 通过测量科氏力
- ▶ 什么是科氏力？
  - 当物体做周期性运动（振荡或旋转）时，使该物体在周期性运动的正交平面上旋转会在另一正交方向上产生平移力。



# 陀螺仪工作原理

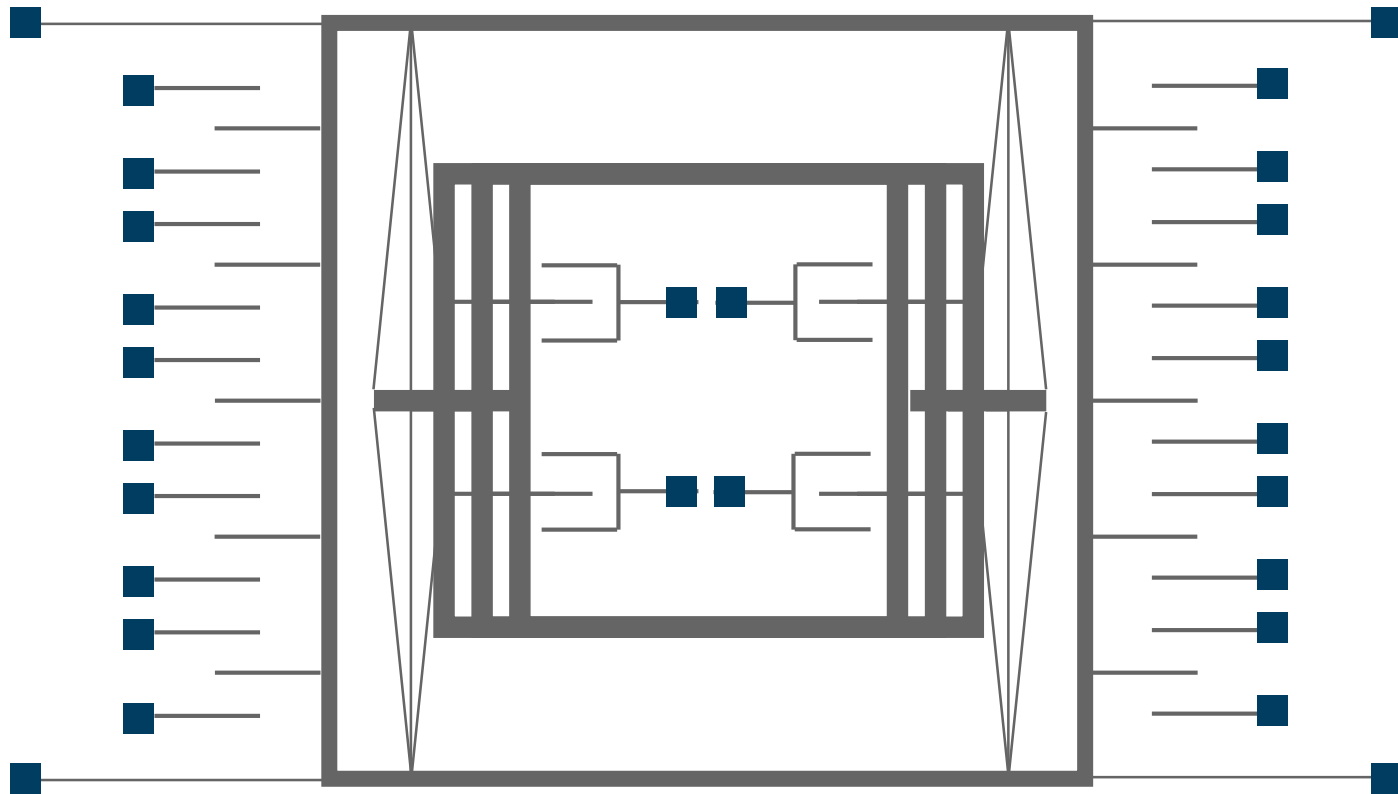
- ▶ 角速率由科氏加速度测量结果决定
  - 科氏加速度 =  $2 \times (\omega \times \text{质量块速度})$
  - $\omega$ 是施加的角速率( $\omega = 2 \pi f$ )
- ▶ 通过14 kHz共振结构施加的速度（周期性运动）快速耦合到加速度计框架
  - 科氏加速度与谐振器具有相同的频率和相位，因此可以抵消低速外部振动
- ▶ 该机械系统的结构与加速度计相似（微加工多晶硅）
- ▶ 信号调理（电压转换偏移）采用与加速度计类似的技术

# 陀螺仪工作原理



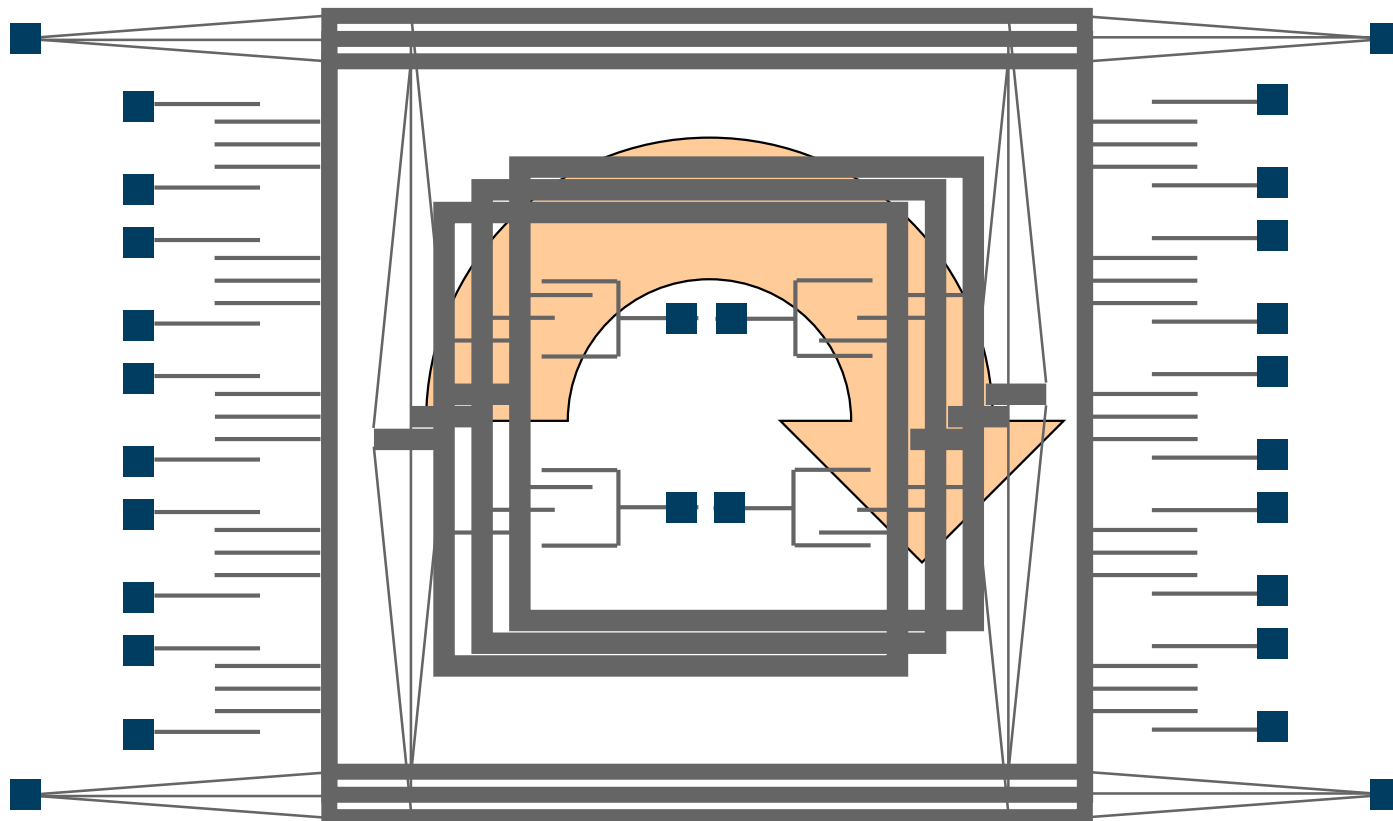


# 陀螺仪工作原理



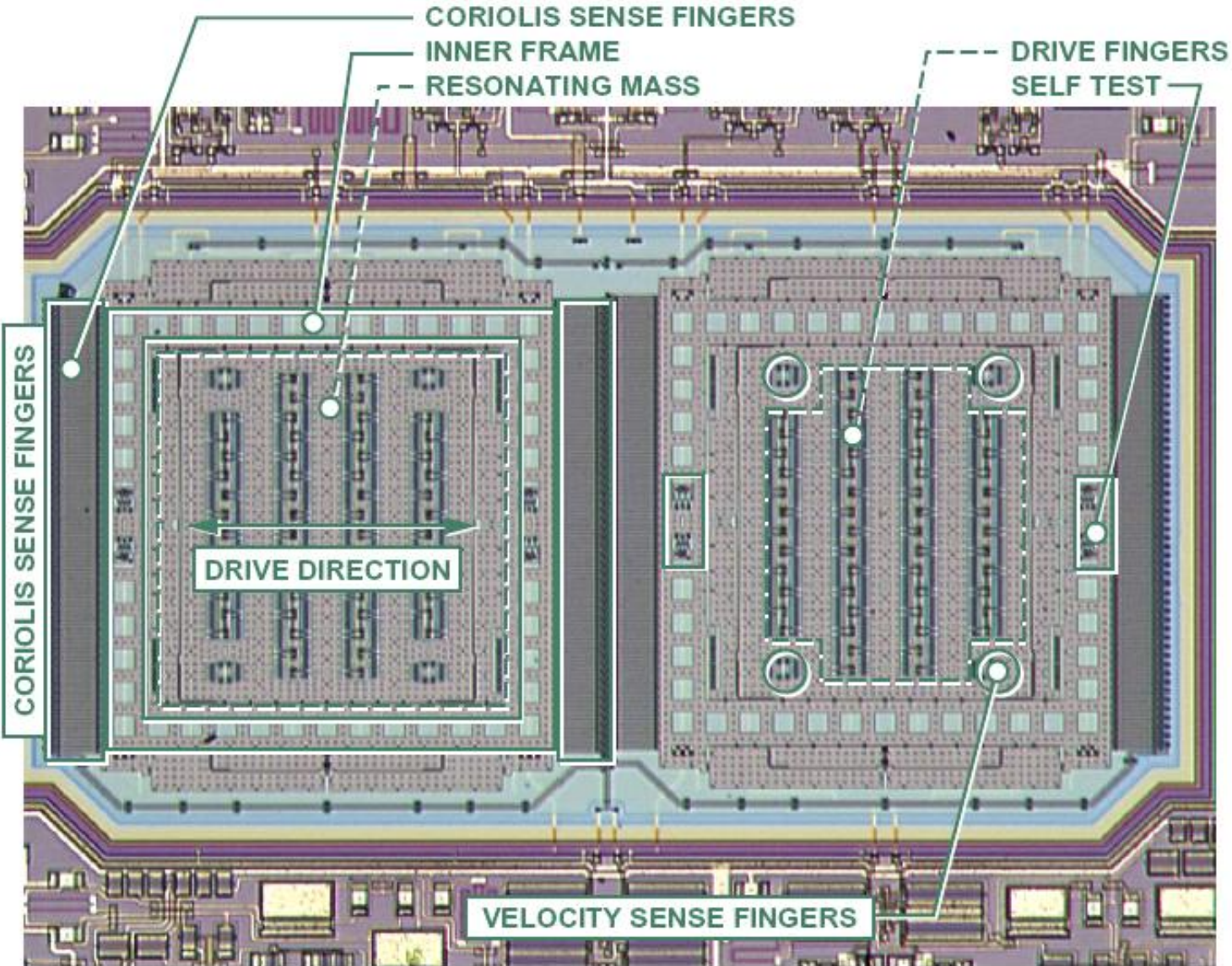
无旋转

# 陀螺仪工作原理

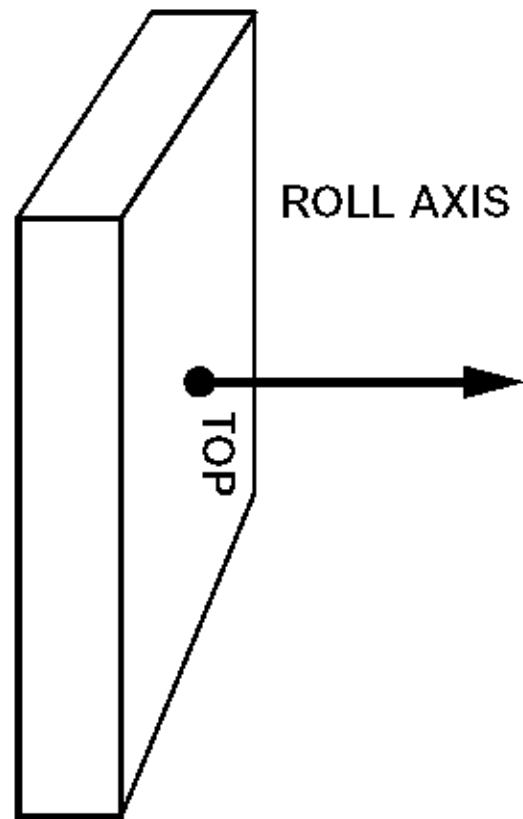
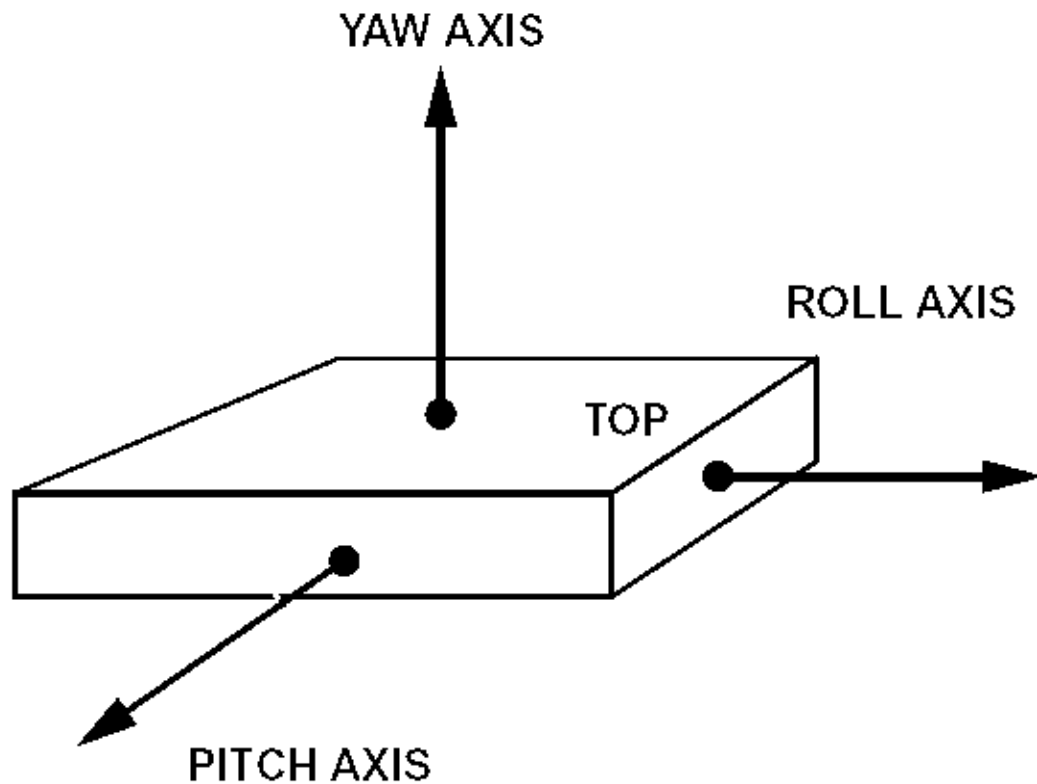


施加旋转

# 机械传感器照片



# 陀螺仪旋转灵敏度轴



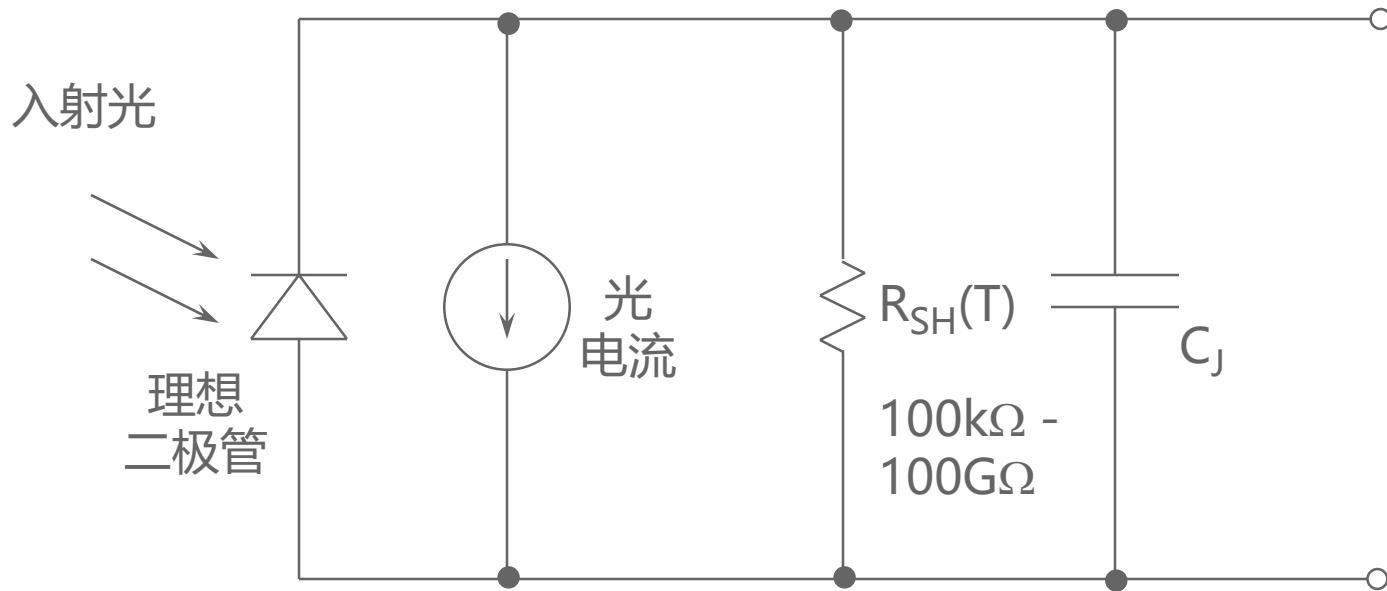
# 高阻抗传感器

- ▶ 光电二极管
- ▶ 压电传感器
  - 加速度计
  - 水听器
- ▶ 湿度监测仪
- ▶ pH监测仪
- ▶ 化学传感器
- ▶ 烟雾检测器
- ▶ 成像用电荷耦合器件和接触图像传感器

# 光电二极管应用

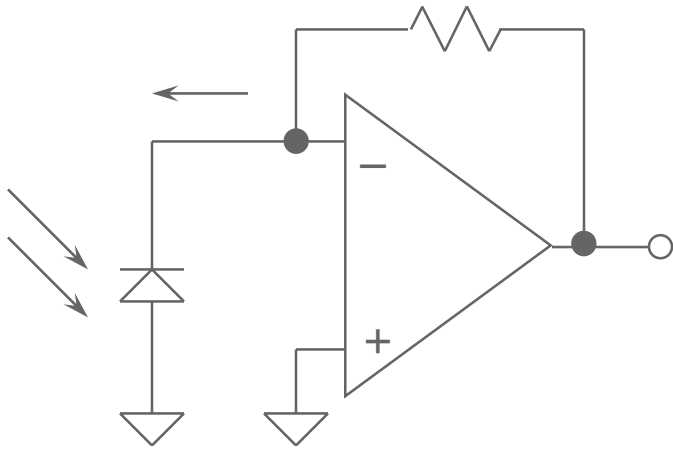
- ▶ 光学：测光仪、自动对焦、闪光灯控制
- ▶ 医疗：CAT扫描仪（X射线检测）、血液粒子分析仪
- ▶ 汽车：大灯变光器、暮光检测仪
- ▶ 通信：光纤接收器
- ▶ 工业：条码扫描仪、位置传感器、激光打印机

# 光电二极管等效电路



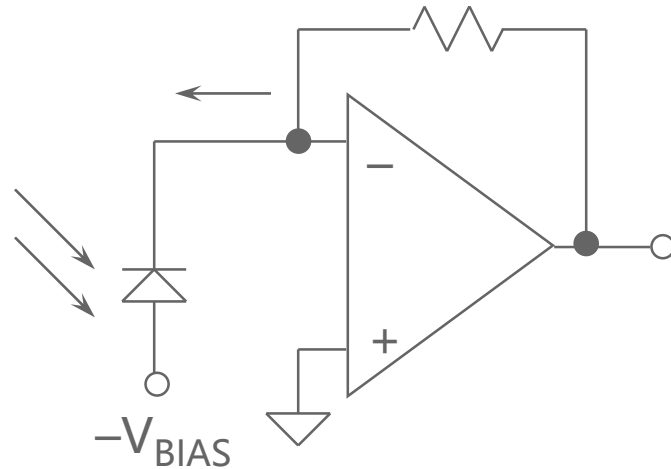
注意：温度每升高10°C， $R_{SH}$ 减半

# 光电二极管的工作模式



光伏

- ▶ 零偏置
- ▶ 无暗电流
- ▶ 线性
- ▶ 低噪声 (约翰逊)
- ▶ 精密应用



光导

- ▶ 反向偏置
- ▶ 有暗电流
- ▶ 非线性
- ▶ 较高噪声 (约翰逊+散粒)
- ▶ 高速应用



# 光电二极管规格

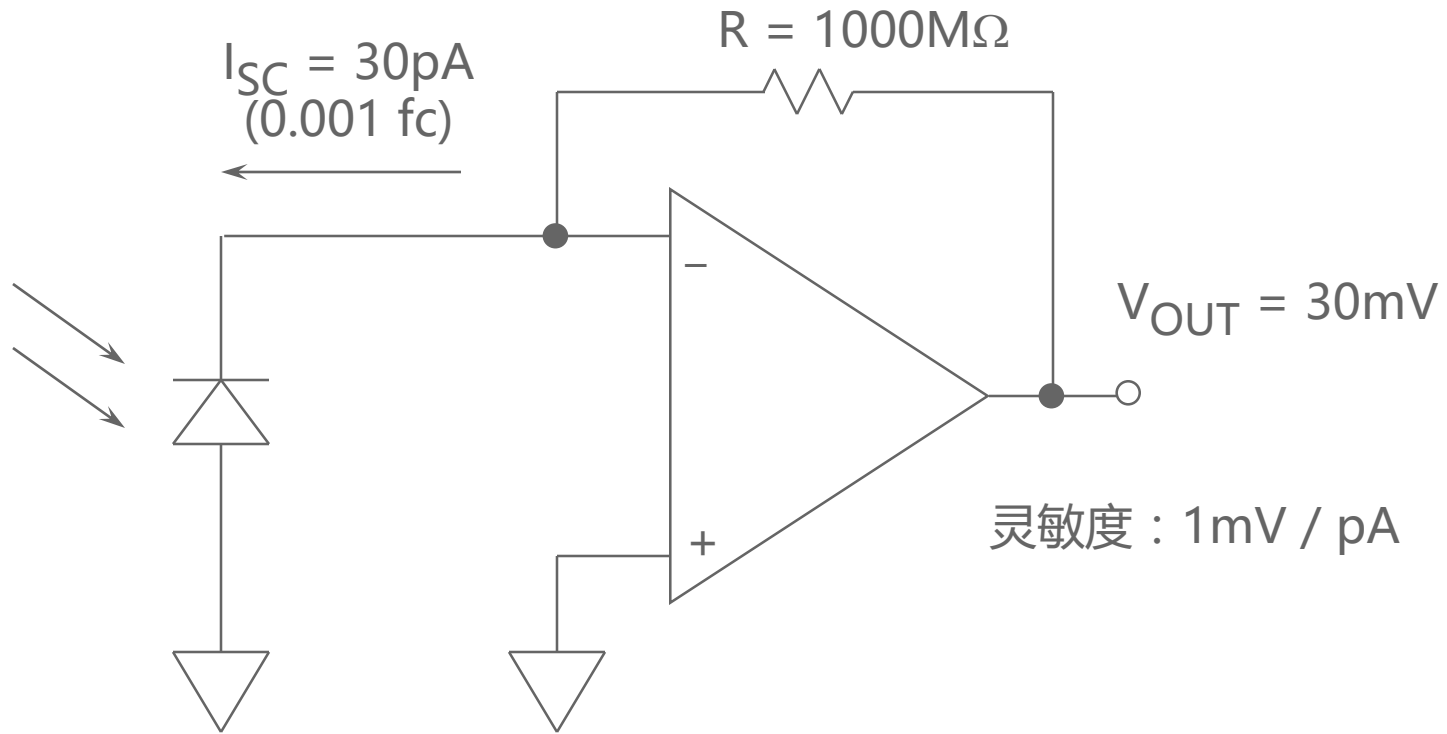
## 硅检测器产品型号SD-020-12-001

- ▶ 面积 :  $0.2\text{mm}^2$
- ▶ 电容 :  $50\text{pF}$
- ▶ 分流电阻 (  $25^\circ\text{C}$  ) :  $1000\text{M}\Omega$
- ▶ 最大线性输出电流 :  $40\mu\text{A}$
- ▶ 响应时间 :  $12\text{ns}$
- ▶ 光敏度 :  $0.03\mu\text{A}/\text{英尺烛光}(\text{fc})$

# 光电二极管的短路电流与光强度的关系（光伏模式）

环境	照度(fc)	短路电流
直射阳光	1000	30 $\mu$ A
阴天	100	3 $\mu$ A
黄昏	1	0.03 $\mu$ A
月圆之夜	0.1	3000pA
晴朗夜晚/无月光	0.001	30pA

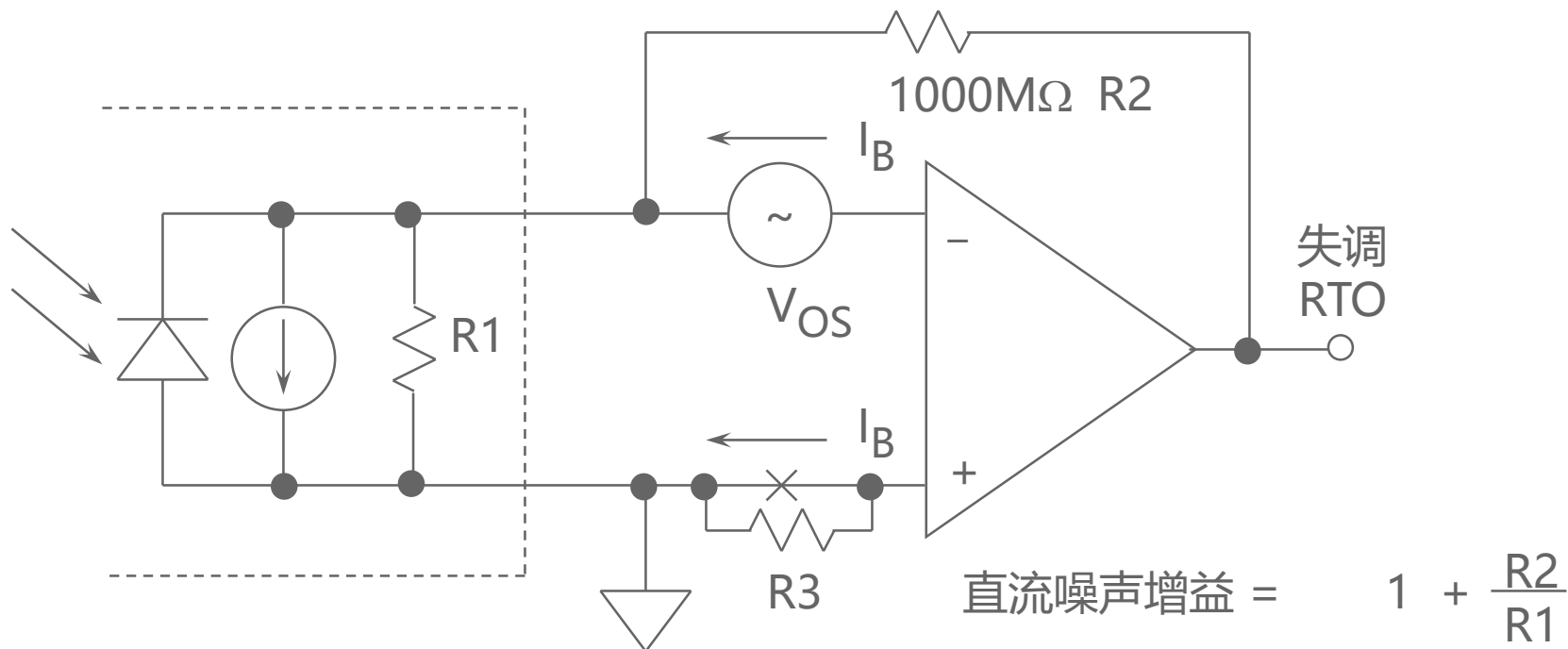
# 电流电压转换器（简图）



# 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 <sub>B</sub> 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

# 前置放大器直流失调误差



- 温度每升高 $10^\circ\text{C}$ ， $I_B$ 翻倍
- $R_1 = 1000M\Omega$  (  $25^\circ\text{C}$ ，二极管分流电阻 )
- 温度每升高 $10^\circ\text{C}$ ， $R_1$ 减半
- $R_3$ 抵消电阻无效

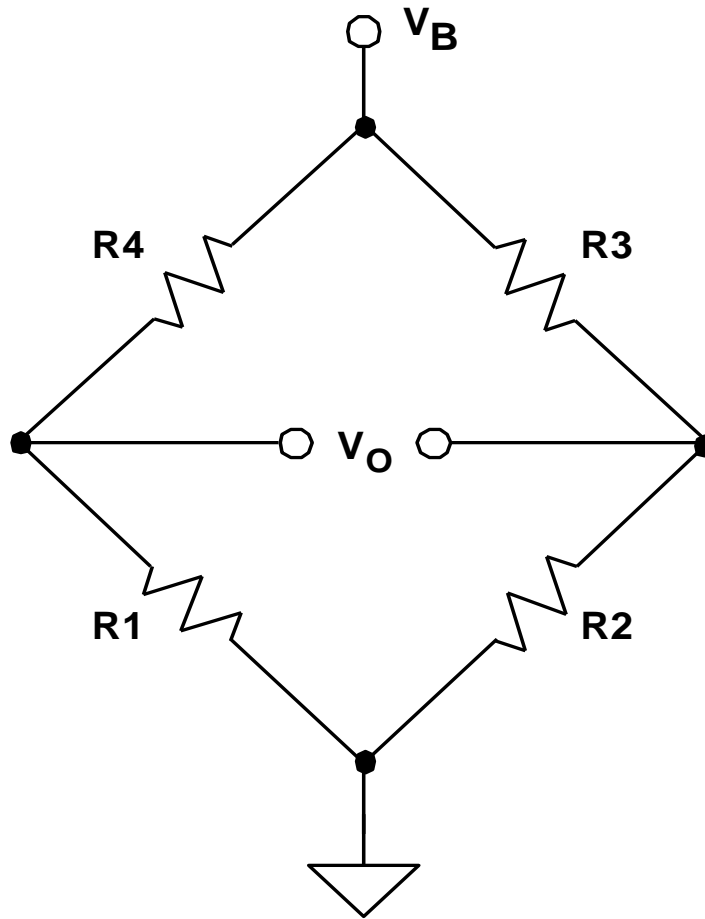
# 典型光电二极管电路 性能总结

- ▶ 输出失调误差 (  $0^{\circ}\text{C}$  至  $+70^{\circ}\text{C}$  ) : 33mV
- ▶ 输出灵敏度 : 1mV / pA
- ▶ 输出光敏度 : 30V / 英尺烛光
- ▶  $+25^{\circ}\text{C}$  时的总输出噪声 : 28.5 $\mu\text{V}$  RMS
- ▶  $+25^{\circ}\text{C}$  时的总噪声 RTI : 44fA RMS , 或 26.4pA p-p
- ▶  $R_2 = 1000\text{M}\Omega$  时的范围 : 0.001 至 0.33 英尺烛光
- ▶ 带宽 : 16Hz

# 电桥电路中使用的传感器电阻 涵盖非常宽动态范围

- ▶ 应变计 120W、 350W、 3500W
- ▶ 电子秤称重传感器 350W - 3500W
- ▶ 压力传感器 350W - 3500W
- ▶ 相对湿度 100kW - 10MW
- ▶ 电阻温度测量器(RTD) 100W、 1000W
- ▶ 热敏电阻 100W - 10MW

# 当侧臂电阻之比一致时，惠斯通电桥产生“Null”输出



THE WHEATSTONE BRIDGE:

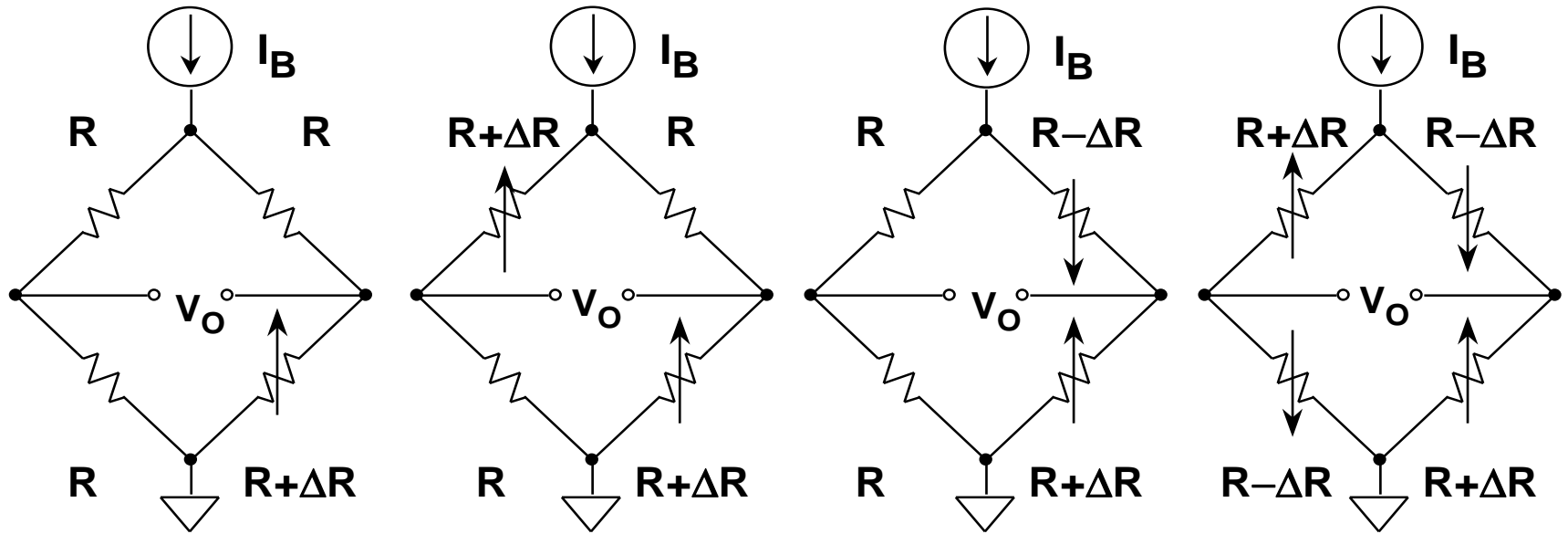
$$V_O = V_B \frac{R1}{R1 + R4} - \frac{R2}{R2 + R3} V_B$$

AT BALANCE,

$$V_O = 0 \text{ if } \frac{R1}{R4} = \frac{R2}{R3}$$



根据有源元件数量，恒流驱动桥配置的输出电压灵敏度和线性度会有所不同

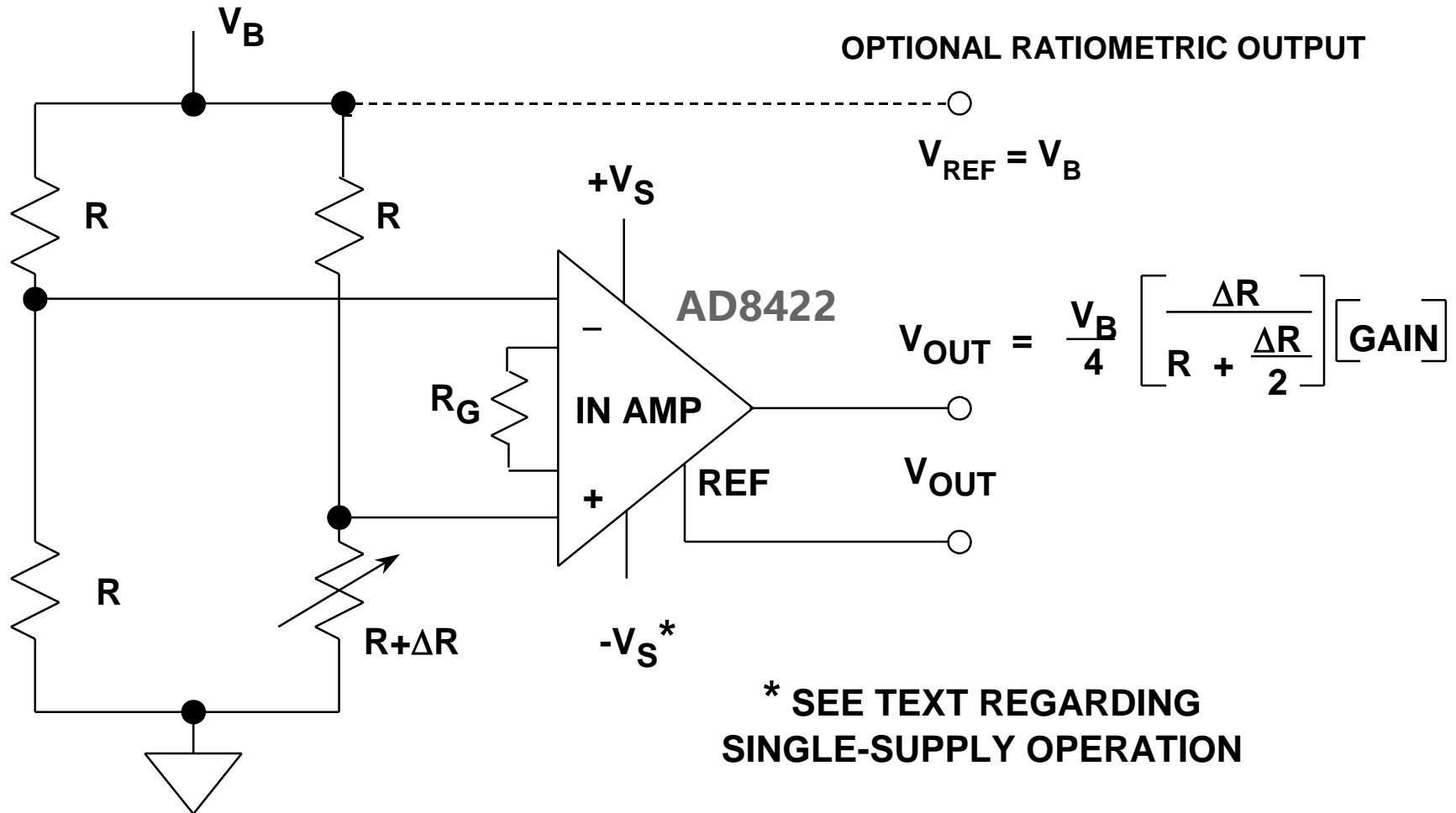


$$V_O: \frac{I_B R}{4} \left[ \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{4}} \right] \quad \frac{I_B}{2} \left[ \Delta R \right] \quad \frac{I_B}{2} \left[ \Delta R \right] \quad I_B \left[ \Delta R \right]$$

Linearity Error: 0.25%/%, 0, 0, 0

(A) Single-Element Varying (B) Two-Element Varying (1) (C) Two-Element Varying (2) (D) All-Element Varying

通常，电桥放大的首选方式是采用仪表放大器提供稳定增益和高CMR



# 内容回顾

- ▶ 传感器是信号源
- ▶ 传感器信号通常电平较低且难以检测
- ▶ 信号调理是实现高性能的关键所在
- ▶ 硅传感器集成信号调理功能
- ▶ 应用不断要求提高精度
- ▶ 带有移动硅元件的运动传感器是所有市场领域的驱动系统

# 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](mailto:china.support@analog.com)
- ▶ ADI样片申请网址：  
<http://www.analog.com/zh/sample>