

德州仪器高性能模拟器件 在大学生创新设计中的应用与快速选型指南

黄争 编著

TI introduces 16-bit, dual-channel,
1 GSPS DAC family.



Small
9mm x 9mm
Package

 TEXAS INSTRUMENTS

Fastest Dual 14-bit ADC
by 66% at 250 MSPS



ADS62P49 with TSW1200EVM data capture card

 TEXAS INSTRUMENTS

德州仪器半导体技术（上海）有限公司大学计划部
2009 年 5 月

 TEXAS
INSTRUMENTS

前 言

作为世界领先的半导体产品供应商，TI 不仅在 DSP 的市场份额上有超过 65% 占有率的绝对优势；在模拟产品领域，TI 也一直占据出货量世界第一的位置。从上面一页我们可以看到 TI 拥有非常完整的模拟产品线，为大家从模拟到数字都提供全方位的完整解决方案。而本手册是针对中国大学中创新和科研应用的简化选型指南，帮助老师和同学们快速了解 TI 的模拟产品。需要提醒大家的是，这本手册仅仅涵盖了 TI 模拟产品的一小部分，如果您需要更为全面细致的选型帮助和技术文档，请访问 www.ti.com/analog 以获取运算放大器，数据转换器，电源管理，时钟，接口逻辑和 RF 等产品信息，访问 www.ti.com/mcu 以获得更多 MSP430 和 C2000 的产品信息。

本手册将分为以下几部分介绍 TI 的产品和在大学生电子设计竞赛中的一些解决方案：

第一章：结合一些实例，通过偏重直流和交流的不同应用分别介绍 TI 信号链产品；介绍 TI 的 AC/DC 和 DC/DC 电源产品；以及 MSP430 和 C2000 简介

第二章：介绍 TI Analog e-Lab 中的设计和仿真软件，特别是 SwitcherPro 和 TINA-TI；给出 TI 关于信号链，电源，MSP430 和 C2000 的应用笔记等技术文档索引；

第三章：介绍 TI 大学计划对中国大学的特殊支持：如何有效申请 TI 模拟芯片；特价小批量销售的相关细节；以及本手册中所介绍的芯片汇总。

古人云“授人予鱼不如授人予渔”。因此，与以前通过列举的方式介绍 TI 产品的方法有所不同，在本手册中将对 TI 的产品进行一些关于命名方式的探讨，并结合列举典型芯片的方式，帮助大家加深对 TI 产品的理解，从而在查找 TI 器件时能更容易的做到有的放矢，游刃有余。对于总结出的这些命名规则，不一定能做到 100% 的准确，这里只力求大方向准确即可，也请大家积极给我们反馈，帮助我们修正手册中的错漏。由于篇幅和时间有限，文中很多地方没有展开讨论，如果对文中点到既止的地方有所疑问，欢迎发邮件给 frank-huang@ti.com 讨论。如果您已经开始查阅大量的文献资料，请考虑成为一名模拟工程师。

本文中给出的芯片参考价格是 TI 网站上公布的千片售价，以美元为单位，这是为了让大家对 TI 大学计划针对学校电子大赛的特价小批量销售计划有一个初步的价格认识，但不保证这是最终的售价，最终价格请以 WPI 小批量销售网络上的为准。关于小批量销售的详情请查看第三章。

TI 中国大学计划 Frank Huang (黄争)

目 录

前言	1
第一章 TI 高性能模拟器件及 MCU 选型指南	1
1.1 TI 信号链产品简介与选型指南	1
1.1.1 TI 信号链产品概览	1
1.1.2 针对直流应用的信号链产品	2
1.1.2.1 精密运算放大器	4
1.1.2.2 差动、仪表与电流检测放大器	9
1.1.2.3 其他特殊功能的精密放大器	15
1.1.2.4 精密 ADC	19
1.1.2.5 精密 DAC	25
1.1.2.6 精密电压基准和电流基准	27
1.1.3 针对交流应用的信号链产品	29
1.1.3.1 高速宽带放大器	30
1.1.3.2 高速 ADC 和全差分放大器	38
1.1.3.3 电流引导型高速 DAC	46
1.1.3.4 其他高速器件	47
1.2 TI 电源产品简介与选型指南	55
1.2.1 AC/DC 和中间级 DC/DC 产品	56
1.2.1.1 PFC 电路	57
1.2.1.2 AC/DC 和中间级 DC/DC 的 PWM 功率控制器	59
1.2.2 POL DC/DC 线性稳压器	62
1.2.3 POL DC/DC 开关稳压器	72
1.2.3.1 电感式开关稳压器	72
1.2.3.2 电容式开关稳压器	79
1.2.3.3 LED 驱动电路	81
1.3 MSP430 简介与选型指南	88
1.4 C2000 简介与选型指南	91
第二章 模拟设计软件和应用笔记索引	96
2.1 信号链设计软件	96
2.2 POL 电源设计软件: SwitcherPro	97
2.3 TINA-TI: 运算放大器的稳定性判断	100
2.4 应用笔记索引	114
2.4.1 信号链应用笔记索引	114
2.4.2 电源类应用笔记索引	118
2.4.3 MSP430 应用笔记索引	126
2.4.4 C2000 应用笔记索引	129
第三章 快速获得 TI 高性能模拟器件	130
3.1 如何有效申请 TI 的免费样片	130
3.2 TI 小批量特惠销售渠道	133
3.3 本手册中的芯片汇总	142

第一章 TI 高性能模拟器件及 MCU 选型指南

在本章中，我们将着重介绍 TI 的信号链与电源产品；以及混合信号处理器 MSP430 和 C2000。

作为世界第一的模拟器件供应商，TI 拥有 3 万余种在生产的模拟产品。我们在本章中将撇开一些通用的型号不谈（如运放中的 LM324，uA741，电源中的 7805，LM317，1117 等），着重介绍 TI 的 HPA 产品（High Performance Analog，高性能模拟），即有 TI 特色的业界领先的模拟产品。

对于信号链，我们将通过直流应用介绍 TI 的精密放大器和数据转换器；通过交流应用的例子介绍 TI 的宽带高速放大器和高速数据转换器。

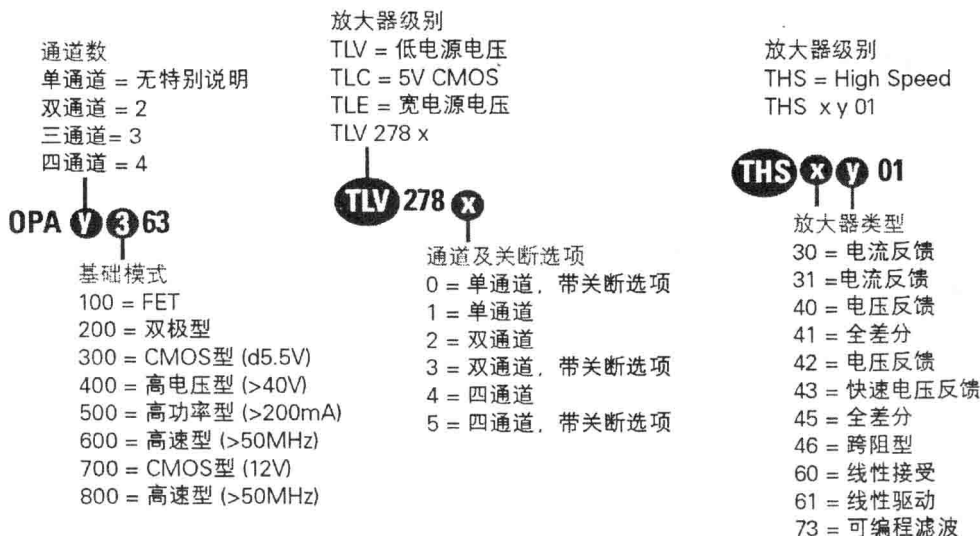
对于电源产品，我们将介绍 AC/DC 中的 PFC 电路和功率 PWM 控制器；介绍负载端供电中的低压差线性稳压器；开关管内置和外置的电感型 DC/DC 稳压器以及电容型 DC/DC 开关转换器；并将介绍 LED 驱动器的基本知识和 TI 相关器件。

1.1 TI 信号链产品简介与选型指南

1.1.1 TI 信号链产品概览

信号链产品，即指传感器，放大器与数据转换器组成的从模拟域到数字域的信号链路，TI 现在主要生产放大器和数据转换器。

其中放大器包括精密，高速，功率放大和特殊功能放大器四大部分：



TI 运算放大器概览

精密放大器，偏重时域测量，关注信号的直流精度，包括（所有的 y 代表通道数量和关断功能与否）：

- ◆ 精密运算放大器（以 Bipolar, JFET 和 CMOS 分类，含 OPAy2xx, OPAy1xx, OPAy3xx, OPAy7xx）

- ◆ 差动放大器 (INAy1xx)
- ◆ 仪表放大器 (INAy1xx, INAy3xx)
- ◆ 电流检测放大器 (INAy2xx/19x/16x/13x)
- ◆ 程控增益放大器 (PGA1xx)

高速放大器 (带宽大于 50MHz), 偏重频域分析, 关注信号的交流精度, 包括:

- ◆ 高速运算放大器 (以电压反馈和电流反馈型分类, 含 OPAy8xx, OPAy6xx, THS4xxx 和 THS3xxx)
- ◆ 全差分放大器 (THS45xx 和 OPA1632)
- ◆ 压控增益放大器 (VCA8xx)
- ◆ 内建低通滤波器的视频放大器 (THS73xx)

功率放大器, 能输出大电压或大电流, 驱动重负载, 包括:

- ◆ 功率运算放大器 (OPA4xx 和 OPA5xx)
- ◆ Class AB 音频功率放大器 (TPA6xx 和 TPA7xx)
- ◆ Class D 音频放大器 (TPA20xxx, TPA30xxx)
- ◆ DRVxxx: 功率 PWM 驱动器

特殊功能放大器:

- ◆ XTRxxx: 4-20mA 发射器; RCVxx: 4-20mA 接收器
- ◆ LOGxxx: 对数放大器
- ◆ IVCxxx: 积分放大器

数据转换器当然可分为 ADC 和 DAC, 并可进一步按照精密, 音频应用和高速来区分: 精密 ADC 和 DAC, 偏重时域测量, 关注信号的直流精度:

- ◆ 工业应用 Σ - Δ ADC (ADS1xxx)
- ◆ 绝大多数 SAR ADC (ADS7xxx 和 ADS8xxx)
- ◆ 通用 DAC (TLV56xx, DAC75xx, DAC85xx): V_{REF} 不包括地电平
- ◆ 乘法型和双极性 DAC (DAC78xx, DAC88xx): V_{REF} 包括地电平

音频 ADC、DAC 和 Codec: 纯粹的频域测量, 关注 20—20KHz 内的带通声音信号:

- ◆ PCM16xx 和 PCM17xx: 音频 Σ - Δ DAC
- ◆ PCM18xx 和 PCM42xx: 音频 Σ - Δ ADC
- ◆ TLV320AICxx: 音频 Σ - Δ Codec

高速 ADC 和 DAC (采样率大于 5MHz), 偏重频域测量, 关注信号的交流精度:

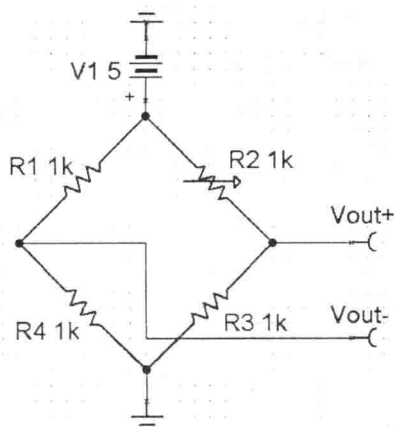
- ◆ 流水线型 ADC (Pipeline ADC): ADS5xxx, ADS6xxx, ADS8xx
- ◆ 少数高速 SAR ADC (ADS7xxx 和 ADS8xxx)
- ◆ 电流引导型 DAC (DAC56xx, DACy9xx)

接下来我们将针对几种不同的应用来介绍上述 TI 的信号链产品线。

1.1.2 针对直流应用的信号链产品

DC Applications, 即直流应用, 多指注重信号时域信息的应用。这类应用一般对变化缓慢的信号采样, 并且经常伴随着大共模电压抑制, 微弱信号放大和有源滤波方面的挑战。包括: 温度测量, 压力测量等对“直流电压或电流”测量的电路; 心电检测, 血氧血糖检测, 功率检测中的电压和电流测量等对“微弱低速交流信号”进行放大并测量的应用。

下面我们以一个压力传感器为例介绍 TI 针对直流应用的精密放大器和数据转换器。首先, 我们用惠斯通桥电阻网络来模拟实际的压力传感器 (实际上他们的基本工作原理也即如此)。



当 $R_1=R_2=R_3=R_4=1K$ 时,
 $V_{out+}=V_{out-}=2.5V$

当 $R_1=R_3=R_4=1K$,
 R_2 为可变电阻, $R_2=990$ 时:
 $V_{out+}=2.51V$, $V_{out-}=2.5V$;
即 $V_{CM}=2.5V$, $V_{DM}=0.01V$

图 1.1 惠斯通电桥原理

如图 1.1, 是一个最简单的惠斯通电桥, 4 个电阻臂中只有一个电阻是可变的, 比如将电阻型压力传感器放置在 R_2 的位置上。假如当没有压力施加在压力传感器上时, 其等效电阻 R_2 与 R_1 , R_2 和 R_3 是相等的 1K 欧姆, 这时电桥的两个差分输出引脚上的电压均为 $V_{out+}=V_{out-}=2.5V$, 即共模电压 $V_{CM}=2.5V$, 差模电压 $V_{DM}=0V$ 。设该传感器的满量程为 100 千克, 并按 -0.15 欧姆/千克的变化率变化, 当 100 千克的作用于传感器上时, R_2 将从 1K 欧姆变化为 985 欧姆, 使得 $V_{out+}=2.52V$, $V_{out-}=2.5V$, 即 $V_{CM}=2.5V$, $V_{DM}=20mV$ 。对我们有用的信号是 V_{DM} , 为了满足后端 ADC 的满量程输入, 比如 4.096V, 我们需要将 20mV 的信号放大 200 倍。这时如果不对 V_{CM} 进行抑制, 很明显地, $V_{CM} \times 200$ 将远远超过运放的电压限制, 使得运放饱和。所以, 我们将有两个重要任务, 抑制 V_{CM} 和对 V_{DM} 进行高倍数的放大。模拟信号的处理流程如下图:

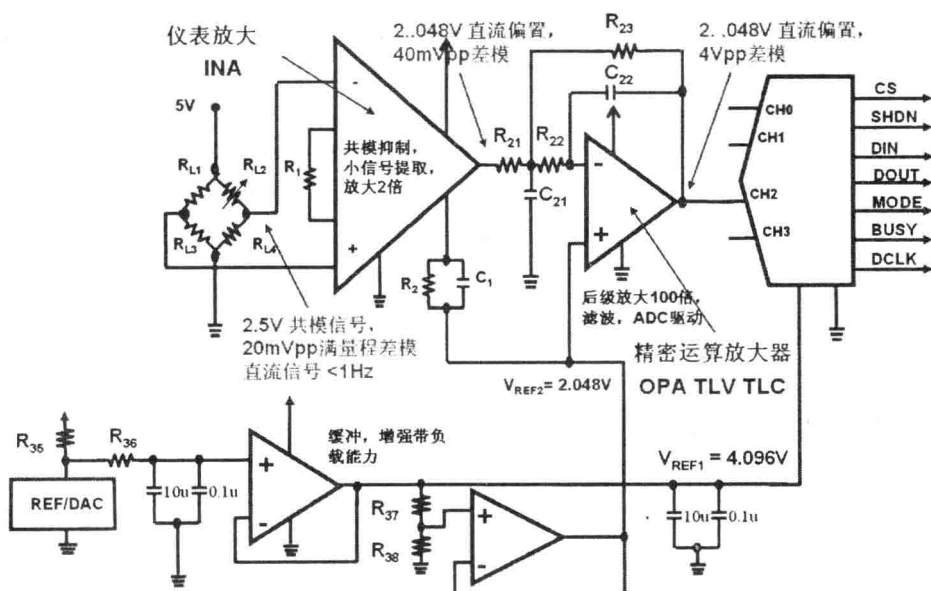


图 1.2 模拟信号链路

上图中, 我们使用仪表放大器 (Instrumentation Amplifier, INA) 进行共模电压的抑制和差模小信号的提前, 并放大 4 倍。在要求直流精度的场合, 我们通常不用 INA 进行主倍数放

大，因为 TI 有直流特性更好的后级运算放大器，比如自归零运放，进行大倍数的放大。

因为运算放大器是仪表放大器的基础，我们这里先讨论第二级的主放大器，并介绍一些关于运算放大器的直流指标和 TI 精密运放的产品。

1.1.2.1 精密运算放大器

这里我们先假设第一级仪表放大器已经很好地抑制了共模信号并将差模信号放大了 40mV，我们现在需要对这个差模信号放大 100 倍来满足 ADC 的满量程要求。由于放大倍数较大，即使 mV 级的失调信号也会带来较大的输出误差，甚至使运放输出级饱和。因此我们特别关注主运放的直流参数。决定运放直流精度的参数主要有三个：

1. 输入失调电压及其漂移
2. 输入偏置电流及其漂移
3. 运放的开环增益响应与增益带宽积

上述指标的定义可以在课本中查到，这里不再赘述。其中输入偏置电流和输入失调电压由运放的输入级工艺所决定。同时，运放的输入级工艺也决定了其他的一些参数，TI 的主要工艺有：

1. Bipolar（双极性）：分为高速和精密两种：

高速双极型放大器——当需求在最低的功耗下实现最高速度时，双极型技术能提供最优的性能。此类放大器优异的功率增益以最低的静态功耗实现了极高的输出功率及全功率带宽。

精密双极型放大器——在抑制因失调电压而产生误差的方面能力过人。此类放大器具有低失调电压、低温度漂移、高开环增益及高共模态抑制比。精密双极型运算放大器广泛的用于各种电源阻抗较低的，且要求放大倍数较大的应用中（诸如压力，温度测量）。

2. JFET（结型场效应管）：当信号源阻抗非常高时，FET 输入的放大器由于具有非常低的输入偏置电流，因而较之双极型输入的放大器来说具有更好的总体精度。如在高信号源阻抗的应用中采用了双极型放大器（例如，500M 欧探针），流经源阻抗的偏置电流所产生的失调、温度漂移及噪声，可导致回路实质性的失效。而当电路对低电流误差有需求时，场效应管放大器能提供非常低的偏置电流、低失调电流及高输入阻抗。但要小心的是 FET 型运放的偏置电流随温度升高而剧烈变化，温度每升高 10 度，偏置电流的大小就要翻倍。当应用的温度范围较宽时，要小心考虑这个要素。

3. CMOS（互补金属氧化物）：当设计的主要考虑因素为低电压及/或低功耗、卓越的速度与功耗比、轨至轨性能、低成本以及小外形封装时，可选择微小型封装的 CMOS 放大器，以达到最高的精度。特别是在手持式电池供电的应用中，CMOS 放大器的优势非常明显。另外，CMOS 放大器得益于工艺的灵活性，能加入一些很好的特性，比如：

轨到轨输入、输出、或输入/输出：CMOS 放大器经常工作在单电源低电压的环境中，为了满足后端电路的动态范围要求（如 ADC 的满量程输入），我们通常希望运放的输出或输出的其中之一或两者都能达到或接近供电电源轨。所以轨到轨运放也称为满幅运放。TI 的大多数 CMOS 运放和一些 Bipolar 运放（如 OPA211）都具有轨到轨输出的特点，一些运

放的输入输出均可轨到轨。

自归零（Auto-Zero）和零温漂（Zero-Drift）技术：当在放大微小电压信号的时候，输入失调电压是一个很重要的参数，TI 的自归零和零温漂技术使得一些 CMOS 运放的输入失调电压达到一个新的高度，可以和最好的双极性运放媲美。它通过在运放内部放置另两个调零放大器来实时地测量和调节主放大器的输入失调电压，从而获得了极好的输入失调电压指标。比如 OPA335， V_{IO} 最大仅为 5 μ V，温漂更是低至 0.02 μ V/ $^{\circ}$ C。如果说过去的斩波调零技术是串行的话，自归零技术是并行的，因此 TI 的自归零放大器和过去的调零放大器相比，拥有更大的带宽（OPA335 的 GBW 为 2MHz）。同时通过在运放内部的信号链路上放置开关电容陷波器，有效地抑制了开关（测量和调节切换）的高频噪声，使得整流到 1/f 段的噪声非常的低。如 OPA333 在 0.1Hz 到 10Hz 间的电压噪声仅为 1.1 μ Vpp。

零交越失真（Zero-Crossover）技术：传统的轨到轨输入 CMOS 运放的输入级采用 PMOS 和 NMOS 对管使输入能摆动到正负电源轨。但其最大的缺点就是 PMOS 和 NMOS 不能完美匹配，导致在两者的结合处，会出现应共模抑制比下降导致的失调电压跳变。TI 的零交越失真技术采用内置充电泵产生电压偏置，使只使用一种 MOS 管就能完成轨到轨输入。这样，使得在整个共模电压范围内都保持优异的共模抑制比，从而保持非常高的精度。如 OPA365，非常适合用在 16 位精度的信号采集电路中。

4. Difet（绝缘隔离 FET）：TI 独有的 Difet 技术免除了结点隔离所需的下级结点二极管，从而设计出了超低输入泄漏的放大器，比如 OPA129 的最大输入偏置电流仅为 100fA。该绝缘隔离技术能够制作精度非常高的低噪声运算放大器。Difet 工艺还使寄生电容和输出晶体管饱和效应减至最小，从而改进带宽特性并获得了更宽的输出摆幅。但其工艺复杂导致价格偏贵，一般应用在高端的医疗和测试设备中。

采用不同工艺对运放参数的影响简要列表如下：

工艺	电源电压 (+/-电源轨之差) (V)	V_{IO} (max)	I_{IB} (max)	输入阻抗	其他 可能特性	TI 产品
Bipolar	宽	小(μ V)	偏大 (nA)	中等	R-R	OPA2xx
JFET	宽	偏大 (μ V to mV)	小(pA)	高		OPA1xx
CMOS	窄(<12V)	小(μ V)	小(pA)	高	R-R, 自归零	OPA3xx, OPA7xx
Difet	宽	小(μ V)	最小(fA, pA)	高		OPA637/627,OPA12x

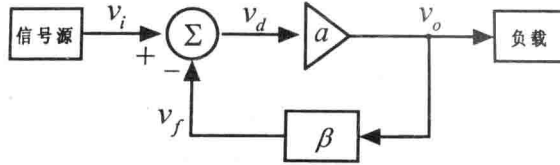
从上面的表中我们可以看到一些 TI 运放的命名惯例，更详细地，TI 的精密型运放有下面几类（所有的 y 代表通道数量和关断功能与否）：

- OPAy2xx, TLExxy: Bipolar, 精密, 微小输入失调电压, $GBW \leq 80$ MHz;
- OPAy1xx: FET, Difet, 精密, 高输入阻抗, 微小偏置电流, $GBW \leq 10$ MHz;
- OPA637, OPA627: Difet, 精密, 优秀的直流交流特性, $GBW \leq 80$ MHz;
- OPAy3xx: CMOS, ≤ 5.5 V, 精密, 直流特性出众, 低噪低功耗, $GBW \leq 200$ MHz;
- OPAy7xx: CMOS, ≤ 12 V; $GBW \leq 20$ MHz
- TLV/TLCxxy: CMOS, ≤ 16 V; $GBW \leq 10$ MHz; 针对低成本, 低频应用

我们推荐使用的 TI 的精密运算放大器有：

器件	电源电压 (V)	V _{IO} (uV) (max)	V _{IO} Drift (uV/C) (typ)	I _{IB} (pA) (max)	增益带宽积 (MHz)	CMRR (dB) (Min)	电压噪声@1KHz nV/√Hz	转换速率 V/uS	其他特点	价格 (美元) (片)	每整包所含芯片数
OPA134PA	5-36	2000	2	100	8	85	8	20	DIP,JFET	1	50
OPA2134PA	双通道版本的 OPA134, SoundPlus(TM) 高性能音频运算放大器									1.15	50
OPA4134UA	四通道版本的 OPA134, SoundPlus(TM) 高性能音频运算放大器									1.85	50
OPA827AID	8-36	150	1.5	50	22	114	4	28	JFET	5.75	75
OPA277PA	4-36	20	0.1	1000	1	130	8	0.8	DIP	0.85	50
OPA2277PA	双通道版本的 OPA277, 高精度运算放大器									1.65	50
OPA4277PA	四通道版本的 OPA277, 高精度运算放大器									3.85	25
OPA228PA	5-36	75	0.1	10000	33	120	3	10	DIP	1.1	50
OPA2228PA	双 OPA228, 高精度低噪声运算放大器, 增益大于 5 稳定								DIP	1.85	50
OPA4228PA	四 OPA228, 高精度低噪声运算放大器, 增益大于 5 稳定								DIP	4.05	25
OPA227PA	5-36	75	0.1	10000	8	120	3	2.3	DIP	1.1	50
OPA2227PA	双通道 OPA227, 高精度低噪声运算放大器, 单位增益稳定									1.85	50
OPA4227PA	四通道 OPA227, 高精度低噪声运算放大器, 单位增益稳定									4.05	25
OPA211AID	4.5-36	125	0.35	175000	45	114	1.1	27	R-R I/O	3.45	75
OPA340PA	2.7-5.5	500	2.5	10	5.5	80	25	6	R-R I/O, DIP	0.85	50
OPA2340PA	双通道 OPA227, MicroAmplifier 系列单电源轨至轨运算放大器									1.35	50
OPA333AID	1.8-5.5	10	0.02	200	0.35	106	55	0.16	R-R I/O 自归零	0.95	75
OPA2333AID	双通道 OPA333, 超高精度零漂移 CMOS 运算放大器									1.5	75
OPA335AID	2.7-5.5	5	0.05	200	2	110	50	1.6	R-R Out 自归零	1	75
OPA2335AID	双通道 OPA335, 最大漂移 0.05uV/C 的单电源自归零 CMOS 运算放大器									1.6	75
OPA365AID	2.2-5.5	500	1	10	50	100	5	25	R-R I/O	0.95	75
OPA2365AID	双通道 OPA365, 50MHz 低噪声零交越失真单电源轨至轨运算放大器									1.7	75
OPA727AIDGKT	4-12	250	0.3	100	20	86	23	30	R-R OUT	1.05	250
OPA727AID	双通道 OPA727, 12V, 20MHz 高精度 CMOS 运算放大器									1.55	75
OPA4727AIPW	四通道 OPA727, 12V, 20MHz 高精度 CMOS 运算放大器									2.5	90
OPA734AID	2.7-12	5	0.01	100	1.6	115	135	1.5	R-R,关断,自归零	1.6	75
TLV2460IP	4-6	2000	2	14000	6.4	66	11	1.6	R-R, DIP,关断	0.65	50
TLV2462IP	双通道低功耗轨至轨输入/输出运算放大器								无关断	0.85	50
TLV2463IN	双通道 TLV2460, 带关断的低功耗轨至轨输入/输出运算放大器								R-R, DIP,关断	0.9	25
TLV2465IN	四通道 TLV2460, 带关断的低功耗轨至轨输入/输出运算放大器								R-R, DIP,关断	1.15	25
TLC080IP	4.5-16	2000	1.2	50	10	80	8.5	16	DIP,关断	0.65	50
TLC082IP	双通道宽带高输出驱动单电源运算放大器								DIP,无关断	0.71	50
TLC083IN	双通道 TLC080, 带关断的宽带高输出驱动单电源运算放大器								DIP,关断	1	25
TLC085CN	四通道 TLC080, 带关断的宽带高输出驱动单电源运算放大器								DIP,关断	1.3	25

决定运放直流增益的参数中，最容易忽略的是开环增益这一点。现实运放的开环增益是有限的，这将导致实际的闭环增益与理想的闭环增益有误差：



下面我们以上图中的同相放大器的反馈框图为例，计算理想和实际的闭环误差：

理想的闭环增益 $=1/\beta$ ，($1/\beta$ 称为噪声增益，它与 GBW 决定运放的小信号带宽)

(注意对于反相放大器而言，进入反相端的电压实际等于信号源的 $V_i \times (1-\beta)$ ，因此反相放大器的理想闭环增益为 $1/\beta-1$)

$$\text{实际的闭环增益} = A_{cl} = v_o / v_i = \frac{a}{1 + a\beta} = \frac{A_{ol}}{1 + A_{ol}\beta}$$

$$(\text{反相放大器的实际闭环增益为: } A_{cl} = v_o / v_i = \frac{A_{ol}}{1 + A_{ol}\beta} - \frac{A_{ol}\beta}{1 + A_{ol}\beta})$$

只有当 $A_{ol}\beta$ 远大于 1 时，才能近似出同相放大器的 $A_{cl}=1/\beta$ 和反相放大器的 $A_{cl}=1/\beta-1$ ，比如可以计算得到当 A_{ol} 等于 100 倍 $1/\beta$ 时，同相放大器的 $A_{cl}=0.99 \times 1/\beta$ ，也就是说和我们的期望闭环增益有 1% 的误差。这就是我们为什么要选择高开环增益的运放和不建议单一运放放大倍数过大($1/\beta$ 过大， β 过小)的原因之一。

因此，在专注于直流精度的应用中，最好确保在感兴趣的带宽内（比如模拟低通滤波器 -3dB 转折频率 f_c 以内），运放的开环增益都大于 100 倍（40dB）的闭环增益，这样将确保输出误差小于 1% 倍 $V_{IN} \times \text{噪声增益 } 1/\beta$ （这样做同时还能增强有源滤波器的稳定性）。因为运放开环增益在主极点后依 -20dB/decade 的速率下降，所以这一条经验可以更直观地表述为：在专注直流精度的应用中，为确保输出误差小于 1% 倍 $V_{IN} \times \text{噪声增益 } 1/\beta$ ，运放的单位增益带宽应大于 100 倍 f_c 与噪声增益 $1/\beta$ 的乘积，即：

$$\text{GBW}_{\text{required}} > 100 \times f_c \times 1/\beta。$$

到这里，我们对 TI 的高精度运算放大器有了初步的认识，那么如何选择正确的高精度运算放大器？设计人员必须经常权衡彼此矛盾的尺寸、成本、性能等指标因素。即使是经验丰富的工程师也可能会为此而苦恼。不过按照下面的步骤，将会发现选择范围将很快的缩小至可掌控的少数几个。

1. 供电电源电压：电压范围和是否单电源供电；
2. 带宽：小信号通路时考虑运放的增益带宽积，并留有足够的开环增益；
3. 转换速率（压摆率）：大幅度信号通路时要充分考虑运放的压摆率；
4. 精度：虽然失调电压等误差可以软件校正，但尽量选用失调电压较小的运放会降低设计难度。当源阻抗或外部电阻网络阻值较大时，要考虑输入偏置电流的影响；同时，零温漂的放大器可以进一步降低宽温度应用范围里的系统调零的难度。
5. 噪声：失调可以在后端校正，噪声无法校正。当信号非常小时，要充分考虑运放的 $1/f$

电压噪声，宽带电压噪声系数 V_N ，带宽和电阻的热噪声。

6. 其他：轨到轨输入，功耗，静态电流和是否有关断功能经常也成为考虑的要素。

针对具体应用的具体选型方法见下表：

供电电压	设计要求	典型应用	推荐运放工艺	推荐 TI 产品家族
$V_S \leq 5V$	R-R, 低功耗, 精密, 小封装	便携, 电池供电	CMOS	OPA3xx, TLVxxxx
$V_S \leq 16V$	R-R, 低噪声, 低偏置电压, 精密, 小封装	工业	CMOS	OPA3xx, OPA7xx, TLCxxxx
$V_S \leq 36V$	低输入偏置电流, 高输入阻抗	工业, 测试设备, 高端音频	FET, Difet	OPA1xx, OPA627
$V_S \leq 44V$	低输入失调电压, 低温漂	工业, 测试设备, 高端音频	Bipolar	OPA2xx, TLExxxx

在图 1.2 的压力传感器的应用中，由于采用单电源供电，并放大倍数较大。我们可以选择 OPA333 或 OPA335 做为我们的主放大器。他们的自归零和零漂移特性将大大简化我们的模拟和数字部分的难题。同时，由于有用信号的频率极低，OPA333 和 OPA335 的带宽和开环响应能保证高放大倍速下的精度。

运放外部电阻究竟应该选什么范围？

可以分为精密应用和高速应用两个方面来考虑：

精密应用时，应选用 K 欧姆级的电阻：

1. 多数精密运放的输出电流驱动能力在数十毫安，难以带动百欧级以下的反馈电阻。
2. 功耗也是重要的原因，电阻越小， V^2/R 会导致更大的功耗，精密类应用常常是低功耗需求，而且减小功耗可以避免分离元件和运放发热从而可以减少温漂误差；
3. 在反相放大器和差分放大器中，要充分考虑运放和输入信号源的输入阻抗，。由于反馈电阻网络的作用，使得运放的输入阻抗降低，这时选择 10K 还是 100K 级的电阻要看输入源的阻抗。
4. 之所以双极型运放的电阻可选 10K，JFET 和 CMOS 型的可选 100K，主要是双极型运放的输入偏置电流比 JFET，CMOS 型的大（一般是 nA 与 pA 的差别），输入偏置电流与输入和反馈电阻作用后会产生失调电压；
5. 但是电阻不是越大越好，选择大的电阻，要小心其热噪声！电阻的热噪声经常成为精密运放电路的主要噪声来源。

高速应用时，一般选择 100 欧或 10 欧级的电阻，

1. 高速应用不能选择 K 欧级电阻的一个最主要原因是，输入和输出寄生电容和大电阻作用后会大大降低运放的带宽；甚至在反馈系数中引入低频（相对于高速运放的单位增益带宽而言）极点，使得运放不稳定！
2. 此时输入源阻抗一般是 50 欧姆，容易匹配；
3. 高速运放带负载能力强，百欧级及以下的反馈电阻通常不是问题。

1.1.2.2 差动、仪表与电流检测放大器

在上一节我们介绍了 TI 的高精度运算放大器，解决了主运放的选型。下面我们探讨如何在第一级进行共模信号的抑制。在上一节中介绍 TI 的产品指标时，我们看到运放也有共模抑制比这个指标，但是这个指标是针对开环而言的。在现实电路中，我们几乎不会使用开环状态下的运放，因为开环增益是如此的大，运放的输出是通常饱和的。所以，当外部反馈电阻网络加到运放电路中后，只有配置成差动放大器的运放电路才有共模抑制能力，这时电路的共模抑制比将主要被外部电阻网络所决定。主要的用以抑制共模信号的运放主要有三类：差动放大器，仪表放大器和电流检测放大器。下面介绍他们各自的特点和应用范围。

差动放大器

为了抑制输入引脚上的共模电压，方法很简单，就是让 $V_{out} = (V_{out+} - V_{out-}) \times \text{Gain}$ ，也就是基本放大电路中的差动放大器：

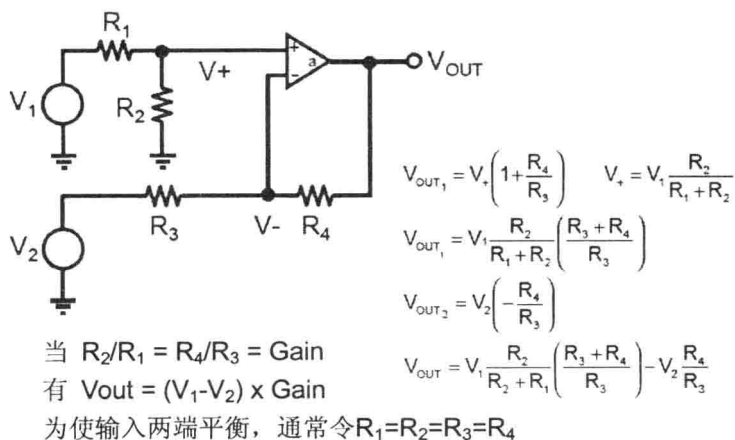


图 1.3 差动放大器

所以，我们可以用运算放大器和外部电阻网络自己搭建一个差动放大器，但是这样的话，电路的共模抑制比（CMRR，定义为差模的信号放大倍数比上共模信号的放大倍数）是被外部电阻网络所限制。假如 R_1, R_2, R_3, R_4 中仅有一只电阻有 0.1% 的误差，导入上面的公式可以得到 CMRR 将下降到 66dB；若误差为 1%，CMRR 将下降到 46dB。那么，我们在学校里通常能买到的电阻为多少误差呢？5%，这将使我们的共模抑制比更加“惨不忍睹”。上面的例子里， $V_{CM} = 2.5V$ ， $V_{DM} = 20mV$ ，即使我们将 $V_{CM} = 2.5V$ 减小到 1/1000，即 $CMRR = 60dB$ ， V_{CM} 仍将有 2.5mV， $20mV \times 200 + 2.5mV \times 100 = 4.25V$ ，将超出 ADC 的满量程输入范围。因此若使用差动放大器，我们需要更高的 CMRR。

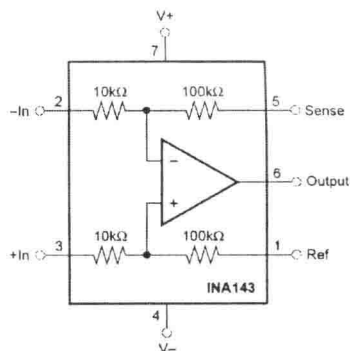


图 1.4 集成差动放大器：INA143

上面我们说到，自行搭建差动放大器很难做到 CMRR 达到 60dB 以上，而我们很多时候又需要大于 60dB 的 CMRR。因此 TI 推出的集成型差动放大器将电阻网络放在运放内部（如图 1.4，INA143 的简化结构），通过激光微调的方式使得电阻网络的匹配达到非常高的水平——使得差动放大器的 CMRR 在直流处轻易达到 80dB 以上，有的产品在直流处能接近 100dB。同时，由于 4 只电阻都在运放内部被激光微调，他们的温度漂移也一致，从而在很宽的温度范围内获得一致的 CMRR 性能。

设计差分放大器电路时，请注意 REF 脚，通过在其上添加一个电压它可以用来调整差分放大器的输出直流偏置，但请务必小心的是，需使用一个低输出阻抗的电压源（比如通过运放缓冲）驱动它，否则容易造成电阻网络的不匹配从而影响 CMRR。但现实的运放的输出电阻并不为理想的 0 欧姆，即使是闭环输出，也可能会高达数十欧姆，这很可能将降低差分放大器的 CMRR。

我们推荐使用的 TI 差动放大器有：

器件	电源电压 (+/-电源轨之差) (V)	带宽 (MHz)	V_{IO} (μ V) (max)	CMRR @ DC (dB) (min)	其他特点	每整包 所含 芯片数	价格 (美元) (单位:片)	封装
INA133UA	4.5-36	1.5	450	80	单位增益	100	1.15	SOIC
INA2133UA	双通道版本的 INA133，高速精密差动放大器					50	1.8	SOIC
INA143UA	4.5-36	0.15	250	86	增益=0.1 或 10	75	1.05	SOIC
INA2143UA	双通道版本的 INA143					50	1.7	SOIC
INA157UA	8-36	4	500	86	增益=0.5 或 2	75	1.05	SOIC
INA117KU	10 to 36	0.2	1000	86	$\pm 200V$ CMV Range	75	2.7	SOIC
INA137PA	8-36	4	1000	74	Audio, High Slew Rate	50	1.05	DIP
INA2137PA	双通道版本的 INA137，音频差动线路接收器，增益=2 或 1/2					25	1.7	DIP

集成差动放大器除了 CMRR 高的优点外，还有一些其他的优点，以 INA143 为例：

1. 增益配置可选，比如 10 倍（2，3 脚为输入）或 1/10 倍（5，1 脚为输入）
2. 差动放大器可以接收大大高于供电电压的输入共模电压，如供电为 $\pm 6V$ 电源供电时，增益为 1/10 时，可以承受 $\pm 55V$ 的输入共模电压而不被损坏。这是因为虽然器件的共模电压很高，但是被内部电阻网络分压后，最终进入运放同相和反相端的电压还是在允许的共模电压内。

3. 由于内部电阻网络匹配度高，可代替外部电阻网络，从而使得差动放大器成为增益误差非常小的放大器。可配置为加法器，同相/反相放大器，精密电流源等，请参考 INA143, INA133 的器件手册的第 9 页和第 10 页。
4. 差动放大器是仪表放大器的重要组成部分，如在 99 年的测量放大器一题中，虽然不允许使用仪表放大器成品，但是可以以差动放大器为核心，组建 CMRR 相当好的测量放大器。

当然，差动放大器也有其最大的弱点：由于电阻网络内置，使得其输入阻抗大大降低，比如当 3, 2 脚为输入时，其输入阻抗降低到 10K 欧姆，这对高源阻抗的应用相当不利，因为源阻抗的不匹配会造成差动放大器的 CMRR 降低。所以对于惠斯通电阻桥这种源阻抗通常为 K 欧姆量级的应用中，差动放大器是不适合的。我们需要增加差动放大器的输入阻抗。这就是仪表放大器。

仪表放大器

以三运放的仪表放大器为例，为了增加差动放大器的输入阻抗，我们在差动放大器的前面加入两个输入缓冲器作为第一级，并在第一级提供差分信号的增益（保持共模信号不变），在第二级（即差动放大器）提供第二次差分信号的增益，并抑制共模信号。这样差分信号可以被两级放大，因此仪表放大器的放大倍数可以相当大。同时，共模电压被抑制，由 CMRR 的定义，可以知道仪表放大器的 CMRR 可以比差动放大器更高，通常可以轻易超过 100dB，甚至达到 120dB。如图 1.5，是对三运放的仪表放大器的推导（差动放大器为单位增益），图 1.6 是对两运放仪表放大器的推导：

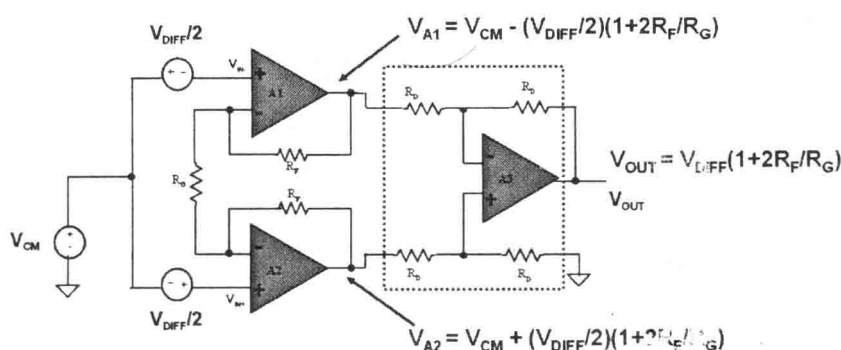
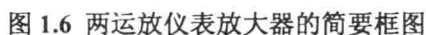


图 1.5 三运放仪表放大器的简要框图



器件	电源电压 (V)	Gain	CMRR @ DC (dB) (min)	带宽 (kHz) G=100	V _{IO} (uV) (max)	其他特点	每整包所含芯片数	价格 (美元) (单位:片)	封装
INA128PA	4.5-36	1-10K	120	200	60		50	3.05	DIP
INA2128UA	双通道版本的 INA128						49	4.9	SOIC
INA118P	2.7-36	1-10K	107	70	55		50	4.8	DIP
INA331AIDGKT	2.7-5.5	5-1K	90	2000	500	R-R OUT	250	1.25	MSOP
INA2331AIPWT	双通道版本的 INA331						250	1.95	TSSOP
INA333AIDGKT	1.8-5.5	1-1K	100	4	25	R-R I/O, 自归零	250	2	MSOP

The diagram shows the internal circuit of the INA333. It features three op-amp buffers, labeled A1, A2, and A3. Buffers A1 and A2 are configured as voltage followers with a gain of 1. Their non-inverting inputs are connected to the input signal V_{IN} through a 50kΩ resistor. Their inverting inputs are connected to the output of the other buffer. Buffer A3 is also configured as a voltage follower with a gain of 1. Its non-inverting input is connected to the output of buffer A2 through a 150kΩ resistor. Its inverting input is connected to the output of buffer A1 through a 150kΩ resistor. The output of buffer A3 is connected to the output terminal V_{OUT} . The circuit is powered by a 5V supply and a ground connection. The circuit is labeled INA333.

$$G = 1 + \left[\frac{100k\Omega}{R_{20}} \right]$$

图 1.7 INA333 内部概图

首先，INA333 是一个自归零的仪表放大器，和前面提到的运算放大器的自归零技术一样，INA333 通过比如斩波稳定等方法使其输入失调电压（最大 25 μ V）及其漂移（0.1 μ V/ $^{\circ}$ C）非常的低；第二，INA333 是一个轨到轨输入输出的放大器；第三，内建的射频干扰滤波器可以有效减少空中电磁波对仪表放大器输入级的影响（手机信号，FM 电台信号无时无刻不存在我们周围，特别是当输入走线或导线较长时，会产生天线效应将射频信号引入到 INA333 的输入级。虽然这些高频干扰由于 INA333 带宽的限制不会以高频信号的形式达到输出端，但它们会被运放输入级整流形成直流噪声，对于需要放大微弱信号的仪表放大器来说应该尽量消除这种噪声）；最后，REF 引脚可以使输出含有一个固定的直流偏置，如 2.5V，方便后端运放或 ADC 电路的设计，同样地，使用一个低阻抗电压源驱动它！

仪表放大器的缺点在于其不够灵活，使用方法单一，同时由于信号直接接入缓冲运放的输入端，导致输入共模信号的范围较窄，即使具有轨到轨输入的特点，也只能达到供电电源电压附近。

回顾图 1.2 的例子，我们这里可以选择 INA333 来进行第一级放大并提供共模电压抑制，然后配合 OPA333 进行第二级放大：

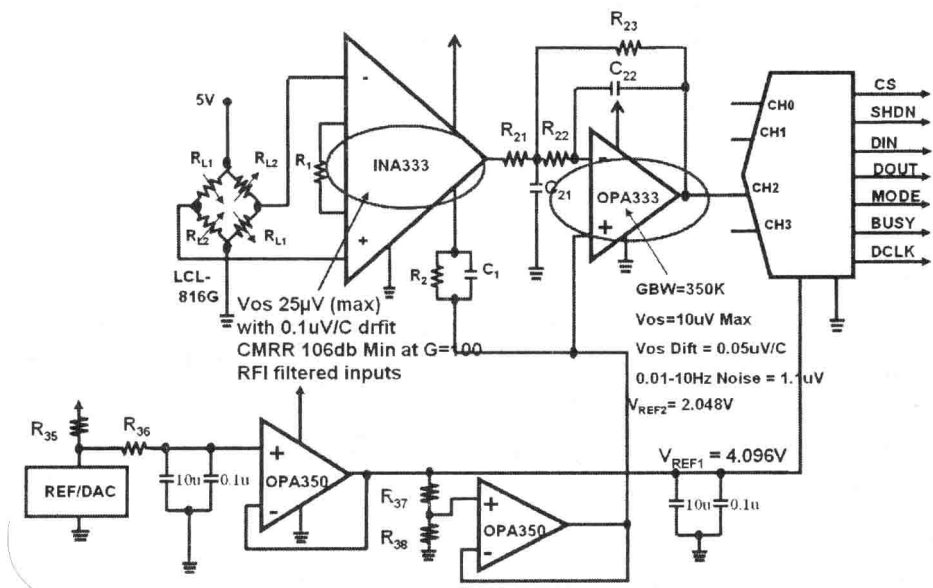


图 1.8 仪表放大器和精密运放的选择

仪表放大器虽然能很好地抑制共模信号并具有高输入阻抗，但是它对付不了高共模电压的情况，比如共模电压高于电源轨，这种应用情况最常见的就是高侧电流检测，它在大电流的电源系统中系统中应用得非常广泛，比如电机和电脑的供电系统，以及对短路断路保护要求得非常严格的地方。在这些应用中，通常会有高达几十伏的共模电压，这时差动放大器是一种选择，比如使用 G=0.1 的差动放大器将共模电压衰减 10 倍使之进入放大器的允许共模电压内，但同时也将有用的差模信号衰减了 10 倍，这对抗噪和后端放大提出了更高的要求。这时就有一种新的放大器：电流检测放大器，他的主要特点就是在 5V 供电时也能抑制高达 80V 的共模电压，而并不会衰减有用的差模信号。要了解这种放大器，先要理解什么是电流检测

电流检测放大器

所谓电流检测，就是通过测量置于电流路径上的电阻上的压降来监视电流的电路（尽管存在着其它技术，例如磁相关技术，但这里的讨论仅限于并联电阻电流测量）。并联电阻测量电流的方法主要有两种，高侧和低侧。低侧测量方法直接简单,它通过在 A 点处测量电流经过置于负载和地之间的电阻时所产生的压降来检测电流（参见图 1.9）

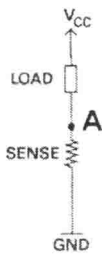


图 1.9： 负载与地之间的感应电阻

低侧电流测量的特点就是直接简便，只需一个运算放大器便可完成测量，且非常准确：

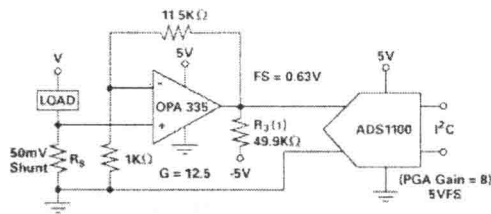


图 1.10： 使用 TI OPA335 进行低侧电流感应

但其在接地路径上加入了阻值，这非常不利，因为流入地平面的电流将在感应电阻上产生电压，这个电压将以地平面噪声的形式出现在系统的所有地节点上。由于数字电路在 0, 1 间切换，导致电流将是动态的，这将在地平面上形成高频噪声，影响模拟部分的精度甚至引起数字部分的误动作。

所以若能接受地平面的噪声，低侧电流测量是最简单最好的方法。若不能接受，我们可以选择高侧电流测量。

高侧电流测量技术通过测量 A 点和 B 点间电流经过置于电源和负载间的电阻时所产生的压降来测量电流（参见图 1.11）

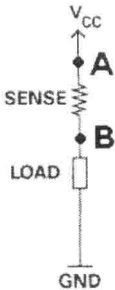


图 1.11： 电源和负载之间的感应电阻

高侧电流检测器的优势和低侧相比非常明显，它直接连接至电源，并且可以检测所有的下行故障以及触发适当的更正措施，并且不会产生额外的接地干扰。但它对信号调理提出了更高的要求，因为一般我们选择 10m 欧以下的电阻做为感应电阻，这样在感应电阻上不会产生大的压降，从而减少对后端系统的影响同时减少无用功率消耗，这样的话，在 AB 间会有一个 mV 级的差模电压，同时在 AB 点处存在等于 Vcc 的共模电压。所以我们需要