

## 简介

作者: Kristian Saxrud Bekken, Microchip Technology Inc.

单片机应用中一个常见的需求是以某种方式感知真实世界。这就需要在单片机的数字领域与现实世界的模拟领域之间架起桥梁。在大多数情况下，这通常通过传感器来实现，传感器将某种物理现象的大小转换为模拟电压，并将其引入单片机的某个引脚。最后，单片机中专门的部分——模数转换器（**ADC** 或 **A/D 转换器**）——会将该模拟电压转换为数字值，供单片机进一步处理。

大多数模拟传感器要么以单一模拟电压信号输出其测量值，要么以两个模拟电压信号之间的差值输出。这两种方式分别被称为单端信号和差分信号。

本白皮书将通过介绍单端和差分模拟信号的 **A/D** 转换，简要阐述这两种方式的主要优缺点，并列举常见应用及相关注意事项。

# 目录

简介.....1

1. 单端工作.....3

    1.1. 概述.....3

    1.2. 优缺点.....3

    1.3. 典型应用.....4

2. 差分工作.....5

    2.1. 概述.....5

    2.2. 优缺点.....6

    2.3. 典型应用.....7

3. 注意事项.....8

4. 版本历史.....9

Microchip信息.....10

    商标.....10

    法律声明.....10

    Microchip 器件代码保护功能.....11

# 1. 单端工作

## 1.1. 概述

最简单且应用最广泛的模拟传感器通常输出单端信号。这类传感器设计时需与单片机共用同一地线，并通过一根信号线输出以该公共地为参考的模拟电压测量值。所有基础型 ADC 都支持单端工作模式。

ADC 可以有不同的设计方式，完成一次模数转换所需的时间也会有所不同。但无论如何，最终结果都是模拟输入值的数字表示。这个数字值通常是一个介于 0 和  $2^n-1$  之间的整数，其中  $n$  是 ADC 的位数分辨率。整数值为 0 表示模拟电压等于地电位，而最大值 ( $2^n-1$ ) 则对应于 ADC 的电压参考 ( $V_{ref}$ )。电压参考定义了 ADC 的转换范围，对于单端输入来说，超过该电压参考的模拟输入仍会输出最大数字值，而低于地电位的输入则输出 0。在大多数情况下，ADC 的电压参考可以在地电位和单片机供电电压之间的不同电平中选择，以便在给定输入电压范围内尽可能充分利用 ADC 的分辨率。

例如，一个 12 位单端 ADC 的输出范围通常为 [0, 4095]。如果选定的  $V_{ref}$  为 2.0V，且模拟输入信号为 0.5V，则对应的数字值可按如下方式计算：

公式 1-1. 示例——12 位单端模数转换

$$\begin{aligned}\text{ADC Output} &= \left( \frac{\text{Input}}{V_{ref}} \right) \cdot \text{Total ADC Counts} \\ &= \left( \frac{0.5V}{2.0V} \right) \cdot 4096 \\ &= 1024\end{aligned}$$

## 1.2. 优缺点

在特定应用中，单端工作模式是否为最佳选择取决于具体需求。以下列出了这种方式的一些主要优点和缺点。

主要优点：

- 传感器和单片机均有非常低的成本
- 每个传感器只占用一个单片机模拟输入引脚
- 在大多数情况下，原理简单，易于使用
- 可选的传感器和单片机种类丰富

主要缺点：

- 对模拟信号路径上的噪声较为敏感
- 对单片机地线和参考电压上的共模噪声较为敏感
- 传感器与单片机之间的信号路径应尽量短，以减少噪声和地电位差异
- 可能需要额外的信号调理电路，增加成本并带来不希望的动态效应

### 1.3. 典型应用

市面上有多种类型的单端模拟传感器。在单片机应用中，最常见的一些使用场景包括：

- 用于测量角度或位置的电位器
- 光强度测量
- 红外和超声波距离测量
- 气体和空气质量测量

## 2. 差分工作

### 2.1. 概述

差分 ADC 测量的是两个输入端之间的电压差。在某些应用中，这一点至关重要，因为有些测量原理需要用两个输出信号来量化所关注的物理量。采用这种原理的传感器通常将其输出值以两个信号之间的电压差（即差分信号）的形式提供。还有一些传感器，虽然其测量本身产生的是单端信号，但为了增强抗干扰能力，也会输出差分信号。

可以通过将差分信号的两个输入分别连接到单端 ADC 的两个通道，依次采样并在软件中比较结果，来用基础的单端 ADC 测量差分信号。还有一些所谓的伪差分方法，但由于两个输入是在不同时间采样的，这些方法对动态共模噪声的抑制效果有限。在使用此类传感器时，支持差分工作的 ADC 是更优的选择，因为它能够直接将两个变化电压之间的差值转换为数字信号。

将差分模拟传感器连接到单片机时，差分对中的一个信号被定义为正输入，另一个被定义为负输入。根据定义，差分信号的数值是正输入相对于负输入的电压。每个信号的正负定义决定了差分信号的极性：当正输入大于负输入时，差分信号为正；当负输入大于正输入时，差分信号为负。

**注：**负差分信号并不意味着两个输入端中有任何一个出现负电压，因为这超出了大多数单片机的规范范围。它仅表示负输入端的电压高于正输入端。

在大多数应用中，差分信号对的每个信号电压通常都以单片机的地线为参考。但在某些场合，传感器的地线可能与单片机的地线是隔离的，这时需要特别注意信号的连接方式。

和单端模式类似，ADC 的电压参考 ( $V_{ref}$ ) 通常是可调的，用来设定可转换的输入电压范围。不过，在差分模式下，输入范围会同时覆盖正负方向。也就是说，差分电压等于  $-V_{ref}$  时，ADC 会输出最小值；差分电压等于  $V_{ref}$  时，ADC 会输出最大值。

对于有效模拟输入范围  $[-V_{ref}, V_{ref}]$ ，对应的数字值表示方式会因 ADC 不同而有所差异。常见的输出格式是带符号整数，范围为  $[-2^{n-1}, 2^{n-1}-1]$ ，其中  $n$  表示 ADC 的位数分辨率。具体的整数格式也可能不同，但最常用的是二进制补码表示法。

一个具有符号输出的 12 位差分 ADC，数字输出范围通常为  $[-2048, 2047]$ 。如果  $V_{ref}$  为 2.0V，模拟差分信号为 -0.5V，则对应的数字值可以按如下方式计算。需要注意的是，ADC 的总计数值会被一分为二，因为 4096 个可用计数值平均分布在零的两侧。

**公式 2-1. 示例——12 位差分模数转换（带符号输出）**

$$\begin{aligned} \text{ADC Output} &= \left( \frac{\text{Differential Input}}{V_{ref}} \right) \cdot \left( \frac{\text{Total ADC Counts}}{2} \right) \\ &= \left( \frac{-0.5V}{2.0V} \right) \cdot \frac{4096}{2} \\ &= -512 \end{aligned}$$

另一种常用的输出格式是直接二进制映射，采用无符号整数，范围为  $[0, 2^n - 1]$ ，其中  $n$  是 ADC 的位数分辨率。

典型的 12 位差分 ADC 的无符号输出范围为  $[0, 4095]$ 。如果  $V_{ref}$  为 2.0V，模拟差分信号为 -0.5V，则对应的数字值可以按如下方式计算。需要注意的是，为了使 0.0V 的输入对应于输出范围的中间值，会加上一个 2048 的偏移量。同时，4096 个可用计数值在加偏移前会平均分布在零的两侧。

**公式 2-2. 示例——12 位差分模数转换（无符号输出）**

$$\begin{aligned} \text{ADC Output} &= \left( \left( \frac{\text{Differential Output}}{V_{ref}} \right) \cdot \left( \frac{\text{Total ADC Counts}}{2} \right) \right) + \text{ADC Counts at Zero} \\ &= \left( \left( \frac{-0.5V}{2.0V} \right) \cdot \frac{4096}{2} \right) + 2048 \\ &= (-512) + 2048 \\ &= 1536 \end{aligned}$$

## 2.2. 优缺点

在对性能和可靠性要求更高的复杂环境中，差分模数转换通常会被优先选择，而不是更常见的单端方式。以下列出了差分模式的一些主要优点和缺点，可帮助判断特定应用是否需要采用差分方式。

主要优点：

- 如果正负输入线缠绕或并行布线，能够抑制信号路径上的噪声，因为噪声会同时影响两个信号，从而被抵消
- 能够抑制单片机地线和参考电压上的共模噪声，因为相同的噪声对差分信号没有影响
- 与单端模式相比，动态范围加倍，因为允许的输入范围以 0V 为中心对称，而不是仅限于正值
- 对于微小电压信号也能有良好性能，因其具备强大的抗噪能力
- 通过将传感器地线连接到差分对的负输入端，也可用于测量单端信号
- 与使用运算放大器将差分信号转换为单端信号相比，差分 ADC 可实现端到端的差分信号采集，集成度更高，可靠性更强
- 如果传感器输出的是带有较大直流偏置的小单端信号，差分 ADC 可通过将相应的直流电压接到一个差分输入端，并设置合适的电压参考，从而更充分利用分辨率；而单端 ADC 则需要设置足够大的电压参考以覆盖直流偏置和实际信号

主要缺点：

- 支持差分输出的传感器和单片机通常价格较高，难以找到非常低价的产品
- 每个传感器需要占用两个单片机输入引脚，而单端方式只需一个
- 连接和使用相对更复杂
- 市面上原生支持差分输出的传感器种类较少，选择有限

## 2.3. 典型应用

以下是一些常见采用差分信号和差分转换的单片机应用场景：

- 热电偶温度测量
- 应变计力传感
- 电阻桥压力测量
- 适用于有电磁和射频噪声的环境
- 需要传感器与单片机之间长距离信号传输的应用
- 电流测量

### 3. 注意事项

在任何类型的模数转换过程中，模拟信号中总会存在一定程度的噪声。在评估输入信号的最大动态范围时，需要考虑可能的噪声幅度。如果输入信号（包括噪声）超过了 ADC 的电压参考，输出会饱和，导致信息丢失。如果超过了单片机允许的引脚电压范围，甚至可能对单片机造成损害。

当使用具有可配置电压参考的 ADC 时，为了更好地利用分辨率，应评估包含噪声在内的输入信号最大动态范围，并选择一个尽量贴合该范围的参考电压，避免限制信号范围。

无论是单端还是差分转换，最终结果的大小都是输入信号幅度与参考电压的比值。因此，不仅信号本身的噪声，单片机地线和 ADC 电压参考上的噪声也会影响转换结果。

模拟信号路径越短，通常受到的噪声干扰越小，这对单端信号尤其重要。

带有差分 ADC 的单片机并不一定允许总输入范围达到  $-V_{CC}$  到  $V_{CC}$ 。请确保所选的电压参考在允许的引脚电压范围内。如果 ADC 同时支持单端和差分模式，电压参考接近  $V_{CC}$  在单端模式下可能是允许的，但在差分模式下可能超出规范。

如果差分传感器与单片机之间是电气隔离的，信号可能会带有超出单片机额定范围的直流电压。



## 4. 版本历史

文档版本	日期	备注
A	08/2019	本文档的初始版本

## Microchip 信息

### 商标

“Microchip”的名称和徽标组合、“M”徽标及其他名称、徽标和品牌均为 Microchip Technology Incorporated 或其关联公司和/或子公司在美国和/或其他国家或地区的注册商标或商标（“Microchip 商标”）。有关 Microchip 商标的信息，可访问 <https://www.microchip.com/en-us/about/legal-information/microchip-trademarks>。

ISBN: 979-8-3371-2419-3

### 法律声明

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物及其提供的信息仅适用于 Microchip 产品，包括设计、测试以及将 Microchip 产品集成到您的应用中。以其他方式使用这些信息都将被视为违反条款。本出版物中的器件应用信息仅为您提供便利，将来可能会发生更新。您须自行确保应用符合您的规范。如需额外的支持，请联系当地的 Microchip 销售办事处，或访问 [www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-services](http://www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-services)。

Microchip “按原样”提供这些信息。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或附带的损失、损害或任何类型的开销，Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔，Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额（如有）。如果将 Microchip 器件用于生命维持和/或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中以其他方式转让任何许可证。

### Microchip 器件代码保护功能

请注意以下有关 Microchip 产品代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术规范。
- Microchip 确信：在按照操作规范正常使用的情况下，Microchip 系列产品非常安全。
- Microchip 重视并积极保护其知识产权。任何试图破坏 Microchip 产品代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案（Digital Millennium Copyright Act）》并予以严禁。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。