

## Application Note

## 了解 TIC12400-Q1 中的 ADC 输入漏电流和采样行为



Frank Qin

## 摘要

本应用手册介绍了当配置为 0mA 湿性电流模式时，在 TIC12400-Q1 多开关检测接口 (MSDI) 的 INx 引脚上观察到的输入漏电流和采样行为。文中结合内部 ADC 前端架构对底层原理进行分析，并给出可实现稳定、精准 ADC 测量的实用系统级设计准则。

## 内容

1 简介.....	2
2 片上 ADC 前端架构概述.....	2
3 了解数据表中的 $I_{LKG}$ 规格.....	3
3.1 关于 $\pm 110\mu A$ 规格的解释.....	3
3.2 漏电流由多路复用器激活且受时间限制.....	3
4 关于弱电压源的设计注意事项.....	5
4.1 弱电压源的定义.....	5
4.2 “采样峰值”机制.....	5
5 定量模型和误差估计.....	5
5.1 采样窗口期间的电压阶跃.....	5
5.2 具有高阻抗源的稳态偏移.....	6
6 设计缓解方法.....	7
6.1 方法 1：加强电压源.....	7
6.2 方法 2：外部 RC 补偿 (推荐).....	7
6.3 方法 3：静态偏移校准.....	7
7 总结.....	8
8 参考资料.....	8

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

TI 的 TIC12400-Q1 是一款高度集成的多开关检测接口 (MSDI)，广泛用于汽车车身控制模块 (BCM) 和分区控制模块 (ZCM)。它可通过可编程湿性电流源、片上比较器和 10 位 ADC 的组合来监测开关和传感器。凭借基于轮询的架构，主机 MCU 在开关扫描周期之间可保持低功耗睡眠状态，这是功耗敏感型汽车设计中的一个关键系统级优势。

片上 ADC 主要用于与电阻器编码的模拟开关配合使用，其中可编程的湿性电流流经外部电阻器网络并在 INx 引脚上产生成比例的电压。然而，在某些应用中，系统限制要求 INx 电压直接由无源电阻分压器、滑动式变阻器或类似的高阻抗源提供，并将 TIC12400-Q1 湿性电流配置为 0mA。在这些配置中，工程师观察到以下现象：

- ADC 转换结果的读取值高于预期的稳态输入电压
- INx 引脚上的窄电压尖峰与每个采样周期同步
- 提高了对外部 RC 滤波器元件 ( 连接到 INx 引脚 ) 的敏感度

本应用手册解释了在 TIC12400-Q1 内部 ADC 前端架构中得出这些观察结果的根本原因，提供了用于估算所产生测量误差的定量模型，并介绍了能够可靠地在此类配置中使用器件的实际缓解方法。

## 2 片上 ADC 前端架构概述

为了正确解释在 INx 引脚上观察到的现象，必须对内部信号链有基本的了解。图 2-1 展示了 TIC12400-Q1 的功能方框图，突出显示了 ADC 前端路径。

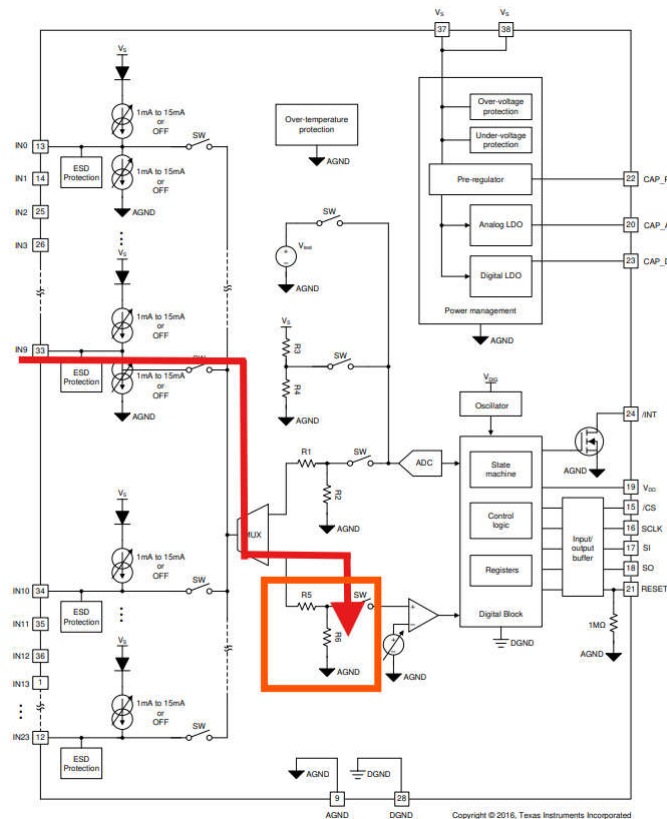


图 2-1. TIC12400-Q1 功能方框图 ( 突出显示了 ADC 前端信号路径 )

每个 INx 输入引脚均通过内部多路复用器 (MUX) 路由到 ADC 或比较器。在 ADC 信号路径上，内部电阻分压器将外部输入电压降低至与转换前的 ADC 输入范围兼容的电平。从这种结构可以看出几个重要的架构特性：

- 每当 INx 通道分配给 ADC 时，内部分压器就永久存在。无论采用怎样的湿性电流设置，它始终会在有源多路复用器窗口期间在 INx 引脚上形成负载。
- ADC 经过出厂校准，可以报告 INx 引脚上的电压，而不是内部分压节点处的电压。这意味着 6V 的满标量程对应于在 INx 引脚处测量的 ADC 代码 1023，这与 TIC12400-Q1 数据表中的转换公式一致。

- 在任何给定时间，在配置的采样窗口期间（ADC 模式为  $T_{ADC}$ ，比较器模式为  $T_{comp}$ ），只有一个  $INx$  通道连接到 ADC 或比较器。在该时间间隔内，所有其他通道与 ADC 或比较器保持断开状态。

### 3 了解数据表中的 $I_{LKG}$ 规格

TIC12400-Q1 数据表指定了在湿性电流配置为  $0mA$  时， $INx$  引脚处的输入漏电流 ( $I_{LKG}$ ) 高达  $\pm 110\mu A$ 。此规格经常被误解为  $INx$  引脚上持续存在的稳态直流漏电流。了解此规格实际代表的含义，对于正确设计外部接口电路至关重要。

#### 3.1 关于 $\pm 110\mu A$ 规格的解释

$\pm 110\mu A$   $I_{LKG}$  规格是一种最坏情况工况限值，涵盖所有生产单元的整个工作条件、电源电压、温度和内部器件状态。 $\pm$  符号表示电流可以沿任一方向流动（流入或流出  $INx$  引脚），具体取决于多路复用器连接通道时的内部节点电压。该值旨在限制外部电源可能需要提供或吸收的最大瞬态电流，不应被解释为典型或连续工作电流。

#### 3.2 漏电流由多路复用器激活且受时间限制

基准测量结果表明， $INx$  引脚上不会持续存在  $I_{LKG}$  电流。相反，仅当内部多路复用器将特定  $INx$  通道主动连接到 ADC 或比较器电路时，才会注入该通道。该瞬态持续时间在配置的采样窗口的持续时间内，当通道分配给 ADC 模式时约为  $T_{adc}$ ，而当分配给比较器模式时约为  $T_{comp}$ 。在这些窗口之外， $INx$  引脚与内部 ADC 前端电气隔离。

图 3-1 和图 3-2 分别显示了在 ADC 模式和比较器模式下，采样窗口期间  $INx$  引脚电压的示波器采集数据。在这两种情况下，湿性电流都设置为  $0mA$ ， $INx$  引脚上的电压偏移完全是由  $INx$  节点上的外部和寄生电容充电的瞬态多路复用器连接电流引起的。至关重要的是，在 ADC 和比较器配置之间切换，仅改变观察到的电压尖峰的脉冲宽度，而不改变其振幅，这证实了这种现象与多路复用器和内部 ADC 电路相关，而不是与任何外部湿性电流源相关。

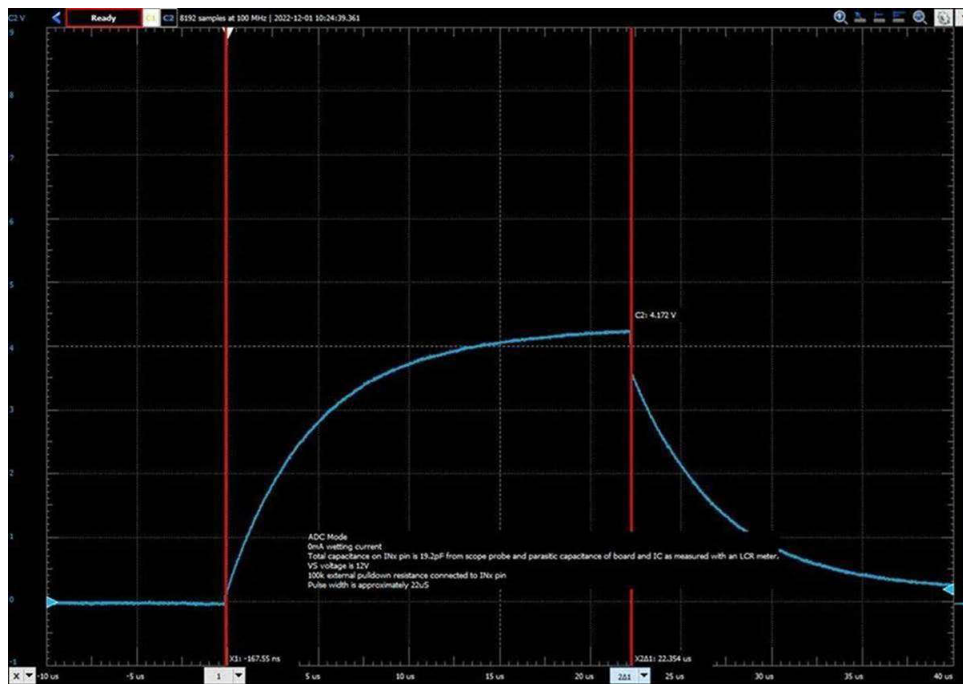


图 3-1. 采样窗口期间的  $INx$  引脚电压：ADC 模式

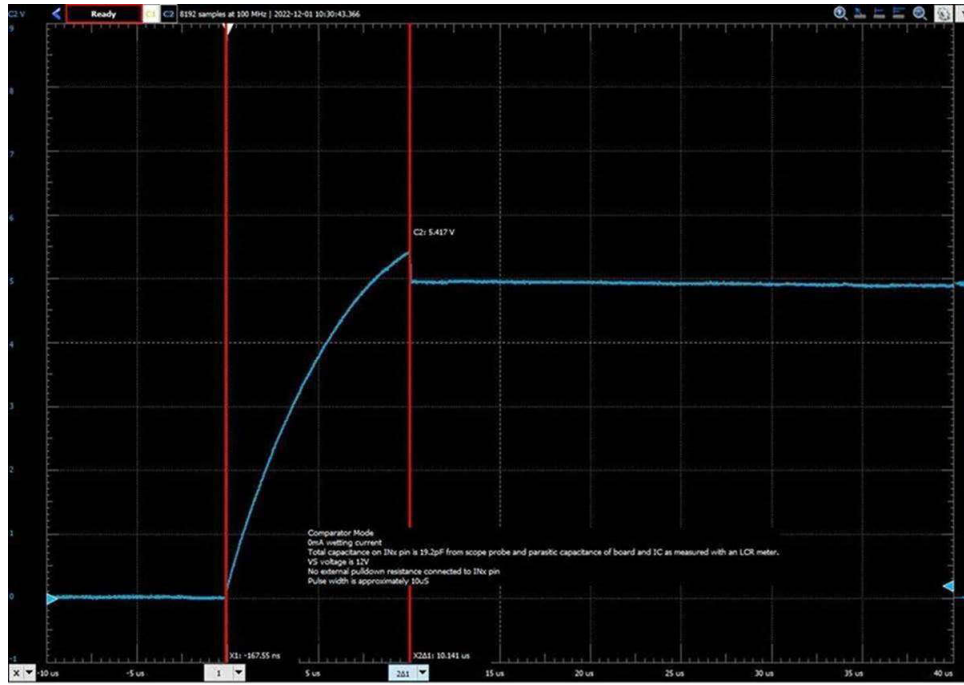


图 3-2. 采样窗口期间的 INx 引脚电压：比较器模式

## 4 关于弱电压源的设计注意事项

### 4.1 弱电压源的定义

在 TIC12400-Q1 ADC 输入中，弱电压源被定义为可以准确建立直流电压电平，但快速提供或吸收瞬态电流的能力有限的外部源。汽车 BCM 和 ZCM 应用中的常见示例包括：

- 无源电阻分压器网络（例如，源自电阻阶梯电路的电压基准）
- 滑动流变器用作位置传感器
- 未主动进行缓冲的高阻抗传感器或换能器输出

这些电源可以准确地建立直流电压，但无法快速吸收或提供瞬态电流。当源阻抗较低时（如在主动驱动的输出中），多路复用器连接电流引起的瞬态会被快速吸收，对 ADC 读数的影响可以忽略不计。不过，当源阻抗较高时，电压偏差会持续一段时间，该时间可能与 ADC 转换窗口重叠，从而在测量结果中引入系统偏移。

### 4.2 “采样峰值”机制

当内部多路复用器选择 INx 通道时，内部分压器和 ADC 前端电路会突然连接到 INx 引脚。在采样窗口（ $T_{\text{adc}}$  或  $T_{\text{comp}}$ ）期间，高达  $I_{\text{LKG}}$  限制的漏电流会注入 INx 节点处的总电容。该总电容（ $C_{\text{IN}}$ ）包括 PCB 布线和 TIC12400-Q1 引脚的寄生电容，以及有意添加到节点的任何外部滤波电容器。在采样窗口结束时，多路复用器会断开内部前端，并且存储的电荷通过外部源阻抗（ $R_{\text{EXT}}$ ）放电回到由外部网络定义的稳态电压。图 4 显示了在多个轮询周期内，在 INx 引脚上测得的窄电压尖峰。

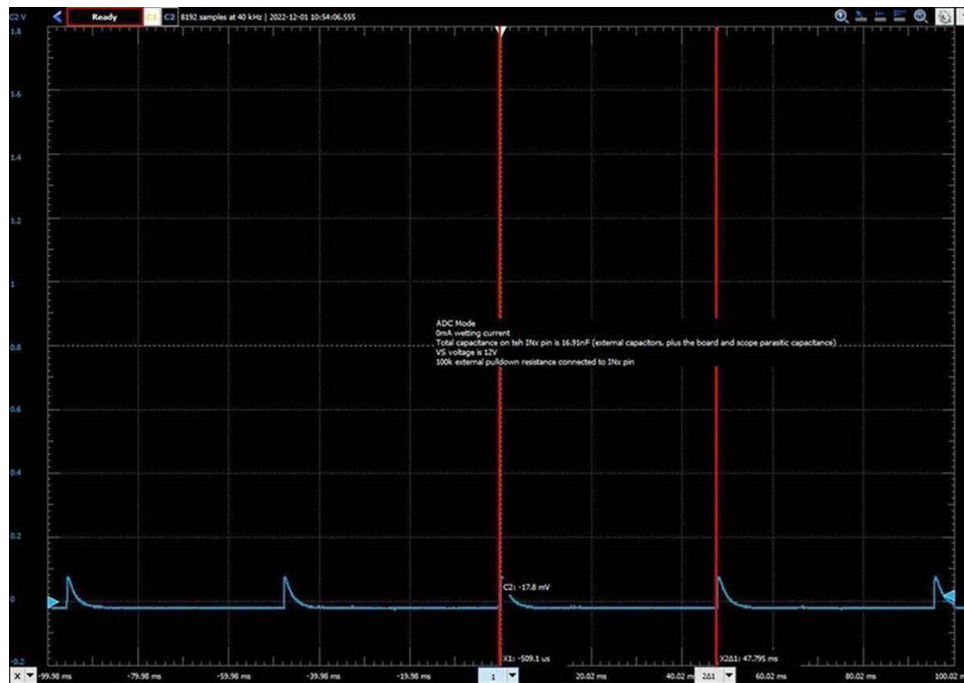


图 4-1. 轮询周期内的重复 INx 电压尖峰 — ADC 模式

由于泄漏电流注入在每个轮询事件中始终发生，并且  $R_{\text{EXT}} \times C_{\text{IN}}$  放电时间常数相对于轮询间隔可能较长，因此 INx 节点可能无法在下一个采样事件之前完全恢复到其稳态电压。这会导致准静态直流偏移叠加在真实的输入电压上。

## 5 定量模型和误差估计

多路复用器连接瞬态引入的电压偏差可以使用基本的 RC 充电原理进行分析估算。虽然该模型做出了简化假设，但它为系统设计裕度分析提供了有用的一阶估算。

### 5.1 采样窗口期间的电压阶跃

在采样窗口期间，漏电流  $I_{\text{LKG}}$  对 INx 引脚处的总电容  $C_{\text{IN}}$  充电。生成的电压步长可通过以下公式近似得出：

$$\Delta V \approx \frac{I_{LKG} \cdot T_{sample}}{C_{IN}} \quad (1)$$

其中  $I_{LKG}$  是漏电流 ( 高达  $\pm 110\mu A$  ) ,  $T_{sample}$  为配置的  $T_{adc}$  或  $T_{comp}$  ,  $C_{IN}$  是  $INx$  节点处的总电容。公式 1 表明, 在给定的漏电流和采样持续时间内, 增加  $C_{IN}$  可直接减少  $\Delta V$ 。

## 5.2 具有高阻抗源的稳态偏移

如果  $R_{EXT} \times C_{IN}$  放电时间常数相对于轮询周期  $T_{POLL}$  较长, 则  $INx$  节点不会在连续采样事件之间完全放电。每个连续的采样事件都会在前一个电荷完全耗散之前将电荷添加到节点, 从而导致节点电压累积到高于真实源极电压的准静态偏移量处。由于漏电流幅度和采样时序都是确定性的且可重复的, 因此该偏移是系统性的, 在整个测量周期内它是恒定的, 因此可以进行表征和补偿。通过考虑每个样本的注入和每个轮询周期的放电之间的电荷平衡, 可以估算稳态直流偏移。

## 6 设计缓解方法

有三种互补方法可用于管理 0mA 湿性电流应用中多路复用器连接瞬态泄漏的影响。具体的选择取决于系统成本限制、允许的 PCB 面积及所需的测量精度。

### 6.1 方法 1：加强电压源

最直接的方法是降低 INx 引脚处的戴维南源阻抗，这样在采样窗口期间注入的瞬态电流就不会产生明显的电压偏移。放置在无源网络和 INx 引脚之间的低阻抗缓冲放大器提供主动驱动的低阻抗源，可以提供或吸收  $I_{LKG}$  瞬态电流，而不会在 INx 节点处出现任何可测量的偏差。此方法完全消除了采样尖峰和相关偏移，并且无需额外校准。代价是 BOM 成本增加，PCB 面积增加，并且在所有工作模式（包括 TIC12400-Q1 轮询处于活动状态的低功耗睡眠状态）下都需要为缓冲器供电。

### 6.2 方法 2：外部 RC 补偿（推荐）

一种更具成本效益的方法是直接在 INx 引脚上添加外部电容。根据公式 1，增大  $C_{IN}$  会按比例减小电压阶跃  $\Delta V$ 。基准测量证实，15nF 或更大的电容器会显著衰减尖峰振幅，并且进一步增加电容会继续降低影响。如果需要，可以添加一个并联下拉电阻器来控制节点放电行为并防止轮询周期之间的电荷累积（基于相对于  $T_{POLL}$  的  $R_{EXT} \times C_{IN}$  时间常数）。设计人员必须确保由  $R_{EXT}$  和  $C_{IN}$  形成的 RC 时间常数不会将信号稳定速度减慢到损害开关状态检测速度的水平，并且电容器漏电流与被测信号相比可以忽略不计。

### 6.3 方法 3：静态偏移校准

如果 RC 补偿后的残留偏移仍高于所需的精度阈值，则由于偏移的系统性质，适合采用工厂校准或现场校准。由于漏电流和时序是具有确定性的，因此产生的偏移  $\Delta V_{offset}$  在整个测量周期内是恒定的且可重复的。因此，校正后的 ADC 结果可通过以下公式得出：

$$V_{corrected} = V_{ADC} - \Delta V_{offset} \quad (2)$$

基准测量和仿真相关性表明，当在代表性工作条件下在系统层面对  $\Delta V_{offset}$  进行表征时，总剩余误差可以在整个工作电压范围内降至 1% 以下。除了无源信号网络中已经存在的元件之外，这种方法不需要额外的硬件元件，因此非常适合无法添加缓冲放大器的成本敏感型设计。

## 7 总结

TIC12400-Q1 数据表中针对 0mA 湿性电流模式规定的最大为  $\pm 110\mu\text{A}$  的输入漏电流 ( $I_{\text{LKG}}$ )，是一项涵盖所有工作条件、电源电压、温度及器件内部状态的最坏工况限值。它不是 INx 引脚上存在的持续直流电流。台架测试验证表明，该漏电流仅在每次 ADC 或比较器测量对应的多路选择器短暂有效采样窗口期间产生，且其持续时间由设定的采样时间 ( $T_{\text{adc}}$  或  $T_{\text{comp}}$ ) 直接决定。

当施加到 INx 引脚的外部电压来自高阻抗源 (例如无源电阻分压器或滑动变阻器) 时，此瞬态漏电流会为 INx 节点上的电容充电，并产生与每个轮询事件同步的窄电压尖峰。如果 RC 放电时间常数相对于轮询周期较长，准静态偏移可能会在 INx 节点上累积，从而导致 ADC 报告的值高于真正的稳态输入电压。由于这种行为完全是确定性的且可重复的，因此可通过以下一种或多种系统级方法有效管理：使用低阻抗缓冲器增强外部电压源；根据公式 1 添加适当的外部电容以减少瞬态电压阶跃；或将残余失调表征为静态，可校准误差。考虑到这些设计注意事项，TIC12400-Q1 可以在各种汽车 BCM 和 ZCM 应用中使用无源信号源可靠地执行模拟电压检测。

## 8 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[TIC12400-Q1 适用于汽车系统，具有集成式 ADC 和可调湿性电流的 24 路输入多开关检测接口 \(MSDI\)](#)，数据表。
2. 德州仪器 (TI)，[配置 TIC12400-Q1 多开关检测接口 \(MSDI\) 的步骤](#)，应用手册。
3. 德州仪器 (TI)，[车身控制模块资源让设计更高效、更可靠](#)，技术文章。

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月