

使用 AMC1301 实现高精度、免校准信号隔离器

John, Xu

North China OEM Team

ABSTRACT

基于新型 Sigma-Delta 调制技术、电容隔离技术以及高精度差分放大器技术，本文给出了一个新颖的、极为精简、高精度的信号隔离方案。依靠高精度 IC 及两只 0.1%精密电阻，本方案无需校准即可保证 0.5%的精度，可灵活应用于生产过程各种现场仪表的配电、隔离、信号分配、适配等等，可有效提高过程控制系统的可靠性。

Contents

1.	简介.....	2
2.	电容隔离与 Sigma-Delta 调制.....	3
3.	0/4~20mA 信号隔离器工作原理.....	4
4.	误差分析.....	5
5.	频率响应.....	6
6.	性能测试.....	6
7.	应用.....	Error! Bookmark not defined.
8.	结论.....	Error! Bookmark not defined.
9.	参考文献:	7

Figures

Figure 1. PLC 与外接仪表示意图.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 2. 基于电容隔离和 Sigma-Delta 调制技术的新型隔离放大器....	Error! Bookmark not defined.
Figure 3. 0/4~20mA 输入/输出信号隔离器原理图.....	4
Figure 4. 误差曲线.....	6

Tables

Table 1. 图 3 电路误差分析.....	5
Table 2. Fluk 725 过程校验仪实测数据.....	6

1. 简介

生产过程监视和控制系统中包含了大量各色各样的传感器、变送器、仪表、控制器及执行机构。需要采集和处理的过程信号从小至毫伏级的微弱信号，到数十伏的大信号，乃至高达数千伏、数百安培的强电信号。如何在设备之间稳定、可靠地传递信号，同时保持信号的完整性，是维持整个系统稳定、可靠、精准运行的关键。

要使信号完整传送，理想化的情况是所有设备、仪表中的信号有一个共同的参考点，也即共有一个“地”。进一步讲，所有设备、仪表的信号的参考点之间电位差为“零”。但在实际环境中，这一点几乎是不可能的。在工业现场，各种过程仪表和控制器往往分布在数千米范围内。这种情况下，即使将各个设备的“地”用导线连起来也难以保证它们之间电位差为“零”。这个电位差在地线环路上形成环路电流，这往往是导致信号质量变差、通道间串扰、甚至导致设备损坏的根源。

显然，解决这个问题最好的办法是切断地环路。在两个不同参考点的系统间传递信号，就必须采用某种形式的隔离技术。目前，最常见的技术是以光、磁或位移电流的方式在隔离层间传递信号。大部分 PLC、DCS 控制器、IPC 中，都已普遍采用隔离技术，将现场信号的地回路与控制器内部的参考地隔离开来。但是，出于成本或 PCB 尺寸方面的考虑，很多控制器仅实现了系统地与现场地的隔离，现场信号路与路之间并未隔离。当其与多个现场仪表相连时，仍然会存在地环路的问题，不能完全杜绝地环路干扰。例如，在图 1.所示的基于 PLC 的控制系统中，有两个现场仪表向 PLC 传送信号，PLC 向两台现场设备/仪表发出信号。在实际工程应用中经常发现，PLC 的八个输入通道每个单独接入现场仪表均正常，一旦接入两个或多于两个外部信号时，显示数字乱跳，故障无法排除。或者在输出通道上，单独连接执行器均能正常工作，一旦同时接入显示仪表，PLC 就无法正常操作执行器。究其原因，发现 PLC 的数据采集板八个通道共用一个 12 位 A/D，经过变换后，通过光耦与主机隔离，八个通道输入之间并没有隔离。输出通道也采用类似设计。这样，当有多台设备、仪表接入通道时，它们的地通过数据采集板 PCB 连接在一起，形成地环路，一旦不同设备的地之间存在干扰信号，就会在地环路上形成环路电流，直接干扰到正常的信号。经采用信号隔离器后，所有问题迎刃而解。正是由于这个原因，在很多工程应用中，无论控制器是否隔离，均要求采用独立的信号隔离器对每通道输入、输出信号进行隔离。

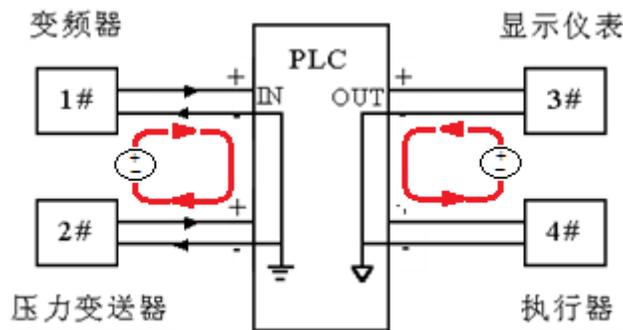


Figure 1. PLC 与外接仪表示意图

过程信号大部分是近乎直流的缓变信号。少数情况是将传感器输出的微弱信号直接通过电缆传到控制器，更多情况是将传感器与变送器集成于一体放置在现场指定地点，输出的是标准的 4-20mA 或 0-5V/10V 信号。无论哪种情况，不失真地隔离这种缓变模拟信号都不是一件容易的事情。早期的信号隔离器采用变压器隔离方式。这种方式电路复杂，工艺要求高，成本高。另一种方式是利用光电耦合器进行隔离。但光电耦合器对于温度较为敏感，很难实现高精度信号隔离。近些年，电容隔离技术日臻完善，其以二氧化硅（SiO₂）为绝缘介质，以位移电流（displacement current）为媒介传递信号，性能更加稳定，寿命更长，带宽更宽，非常适合于工业现场这种恶劣环境下的信号隔离。本文就利用这种隔离技术实现了一个高精度、低成本的模拟信号隔离方案。

2. 电容隔离与 Sigma-Delta 调制

无论是变压器隔离还是电容隔离，都只能传输一定频率范围的信号，无法直接传输直流和缓变的信号，而这正是大部分过程信号所在的频率范围，显见的办法是调制。首先将缓变的模拟信号调制到适合隔离层传输的频率范围，经隔离传输到二次侧后再进行解调，还原出和一次侧尽量一致的模拟信号。传统的隔离放大器中一般采用频率调制、幅度调制或脉冲宽度调制，电路工艺很复杂，器件的成本非常高。本设计采用的隔离器件采用 Sigma-Delta 调制技术，大幅度降低了隔离器件的成本。同时，这种 Sigma-Delta 调制技术所固有的噪声成形（Noise Shaping）能力，通过高速调制，将电路自身所引入的噪声搬移到远离有效信号的高频端。经过二次侧解调及滤波重建后，将能够还原出更高精度、更低噪声的信号。图 3 就是本方案采用的一种基于电容隔离和 Sigma-Delta 调制技术的隔离放大器及其内部框图。

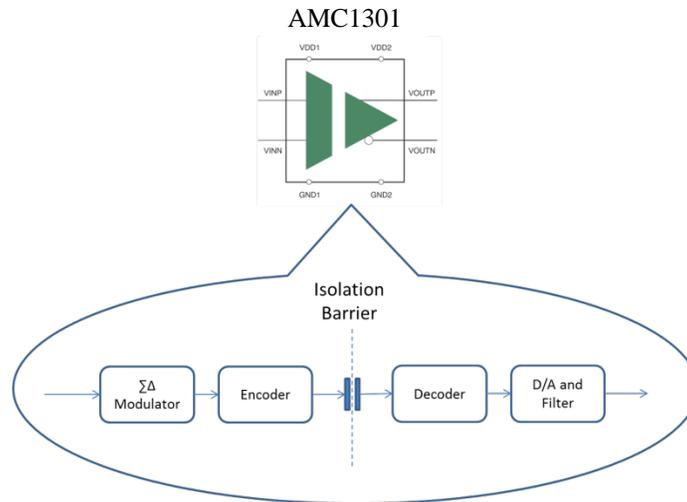


Figure 2. 基于电容隔离和 Sigma-Delta 调制技术的新型隔离放大器

3. 0/4~20mA 信号隔离器工作原理

过程控制系统中的仪表或变送器大多采用 0/4~20mA 电流环接口，PLC/DCS 控制器的模拟输入大多也接收电流环信号。因此，0/4~20mA 输入/输出的信号隔离器、分配器是过程现场应用最为广泛的。图 4 是基于 AMC1301 电容隔离放大器设计的一个 0/4~20mA 输入/输出信号隔离器原理图。

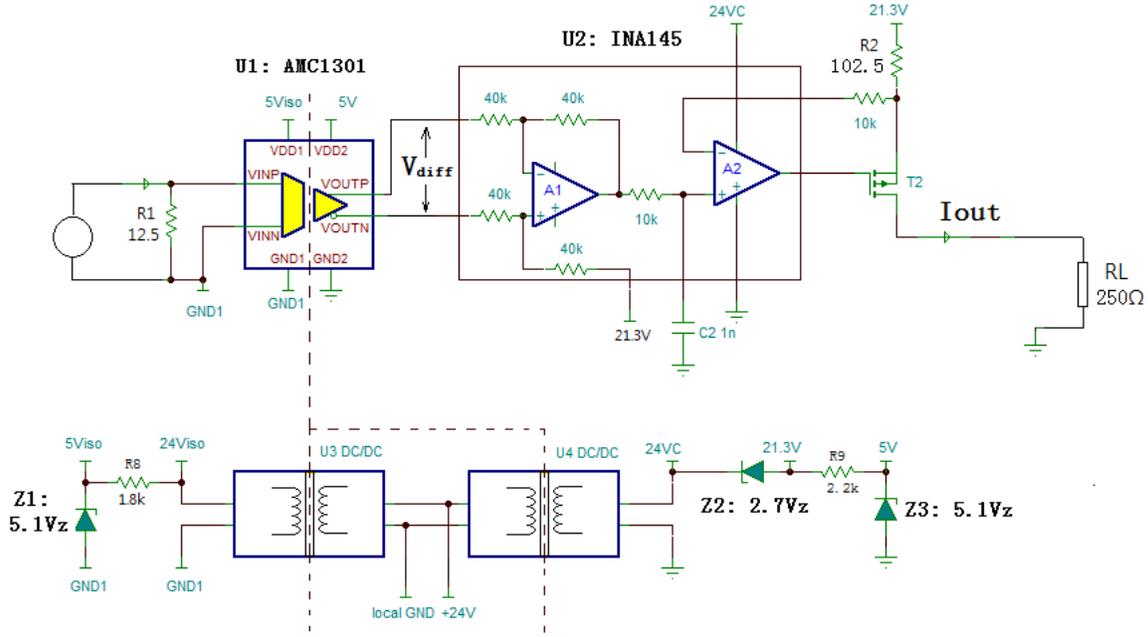


Figure 3. 0/4~20mA 输入/输出信号隔离器原理图

此方案采用两片 IC (U1: AMC1301 和 U2: INA145) 分别完成信号隔离和输出电流环驱动。采用两片 0.5W/1W 隔离 DC/DC 分别为输入和输出侧提供隔离供电，从而实现输入、输出及本地供电之间的三重隔离。

信号隔离采用 AMC1301。这种放大器通常用于高压、大功率电路中进行电流采样，其高精度用于 20mA 电流环信号的采样/隔离也非常合适。输入电流 I_{source} 经采样电阻 $R1$ (12.5Ω) 转换为电压信号，此电压信号经 AMC1301 隔离、放大后在二次侧输出差分电压 $V_{diff} = I_{source} * R1 * G1$ ，其中 $G1=8.2$ ，为 AMC1301 的增益。

INA145 为集成了一个差分放大器和一个运放的仪表放大器。利用其中的差分放大器将 AMC1301 输出的差分信号转换为单端信号。运放配合外部的一只 MOSFET 实现 V/I 转换及电流环驱动。采用这种集成的仪表放大器而非通用运放的好处是，用于配置增益的电阻全部集成于芯片上，可以实现很高的匹配精度和温度稳定性，这样无需支付高精密电阻的成本，而能实现高精度，有助于免去麻烦的校准过程。整个电路只需两只精密电阻 ($R1$ 和 $R2$)。INA145 中的放大器 A1 将 AMC1301 输出的差分信号 V_{diff} 放大 $G2$ 倍 ($G2=1$)，同时，将其转换为以 21.3V 为参考的单端信号。这个单端信号经低通滤波后送入 A2 进行 V/I 转换。V/I 转换电路以同一个 21.3V 电压为参考，因此，这个参考电压的误差在这一级被抵消，不会传递到输出。输出电流表达式为：

$$I_{out} = I_{source} * \frac{R1}{R2} * G1 * G2$$

其中， $G2=1$ ，我们只要选取：

$$G1 = \frac{R2}{R1}$$

即可得到 $I_{out}=I_{source}$ ，实现 1:1 的隔离输出。

关于供电，这种隔离器在现场应用时通常采用本地的 24V 作为电源，同时要求所谓的“三重隔离”：输入与输出隔离，同时，本地电源要与输入和输出隔离。因此，采用两个隔离的 DC/DC 分别为输入侧和输出侧电路供电。考虑到降低成本也可以采用同一变压器上的两个隔离绕组来分别产生两组隔离电源。AMC1301 的输入/输出侧各需一个 5V 供电，由于所需电流很小，只需用一只 5V 左右的齐纳管（Z1，Z3）稳出 5V 作为电源即可。21.3V 参考电压只是为了匹配放大器的输入/输出范围而设，对于精度没有要求，只需选择一只 $Vz>2V$ 的齐纳管，由电源电压降低 Vz 作为电路的参考点。此参考电位是随着电源电压浮动的，由于在电流环驱动电路中采用了同一参考电位，其变化量在此相抵消，不会影响电流输出的精度。因此，电路中的两个 DC/DC 可以采用廉价的非稳压型电路或模块。

4. 误差分析

此电路的误差主要有三类：零点偏差、满度误差、非线性误差以及它们的温漂。零点偏差主要来自隔离放大器和差分放大器的失调电压；满度误差来自于两个放大器的增益误差及电阻值的偏差；非线性误差的主要来源是两个放大器的非线性。表 1 详细列出了各个误差源（误差数据均按照数据手册中的最大值计算）及其温度系数，以及依平方和方式求出的零点偏差总和、满度偏差总和及非线性偏差总和，以及综合各种偏差得到的未校准总误差（TUE）。由表中数据可见，隔离放大器 AMC1301 是各种误差的主要来源。若电阻 R1、R2 采用 0.1% 精密电阻，无需任何校准，此电路就可实现 0.5% 以内的精度。如需更高的精度，就需要进行校准了。

Table 1. 图 3 电路误差分析。

误差源	失调误差 (%FS)	增益误差 (%FS)	非线性误差 (&FS)
AMC1301	0.08	0.3	0.03
INA145	0.05	0.1	0.005
R1	~0	0.1	~0
R2	~0	0.1	~0
total error	0.1	0.35	0.03
温度系数	12ppm/°C	80ppm/°C	~0
未校准总误差 (%FS)	0.4		
温度系数	<100ppm		

5. 频率响应

隔离放大器 AMC1301 内的调制电路会产生一定的噪声，若不加以限制，会降低系统的动态范围。前面提到过，AMC1301 内的 Sigma-Delta 调制器将大部分噪声推移到高频段，因此，采用一个简单的低通滤波器就很容易将噪声降下来。根据手册给出的噪声谱，噪声功率集中在 20kHz 以上。另外一个需要考虑的因素是，某些 4-20mA 信号中叠加有 2kHz~3kHz 的 HART 信号，隔离器应能使这个信号无衰减地通过。基于以上两方面的考虑，本设计中将滤波器截止频率设定在 16kHz。图 4 中的 1nF 电容 C2 和 INA145 中的 10k 电阻即构成一阶 16kHz 低通滤波器。AMC1301 和 INA145 的带宽均远高于此值（高一个十倍频程以上），因此，信号通道的带宽主要取决于 C2。

6. 性能测试

利用 Fluk 725 过程校验仪对基于图 4 电路的 0~20mA 隔离器进行实测，测量在室温环境下进行。用 Fluk 725 校验仪产生 0~20mA 信号接入电路输入端，输出端产生的 0~20mA 信号接回校验仪测量输出电流。两者偏差相对于 20mA 满量程计算相对误差。表 1 给出了实测数据及每个测量点的相对误差，图 1 为误差曲线。

Table 2. Fluk 725 过程校验仪实测数据

Isource (mA)	0.000	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000
Iout (mA)	0.001	0.997	1.997	2.998	3.999	4.999	6.000	7.001
Error (%FS)	0.005	-0.015	-0.015	-0.010	-0.005	-0.005	0.000	0.005
8.000	9.000	10.000	11.000	12.000	13.000	14.000	15.000	16.000
8.002	9.003	10.002	11.002	12.001	13.001	14.000	14.999	15.998
0.010	0.015	0.010	0.010	0.005	0.005	0.000	-0.005	-0.010
17.000	18.000	19.000	20.000	21.000	22.000	23.000	24.000	
16.997	17.996	18.995	19.992	20.994	21.990	22.985	23.977	
-0.015	-0.020	-0.025	-0.040	-0.030	-0.050	-0.075	-0.115	

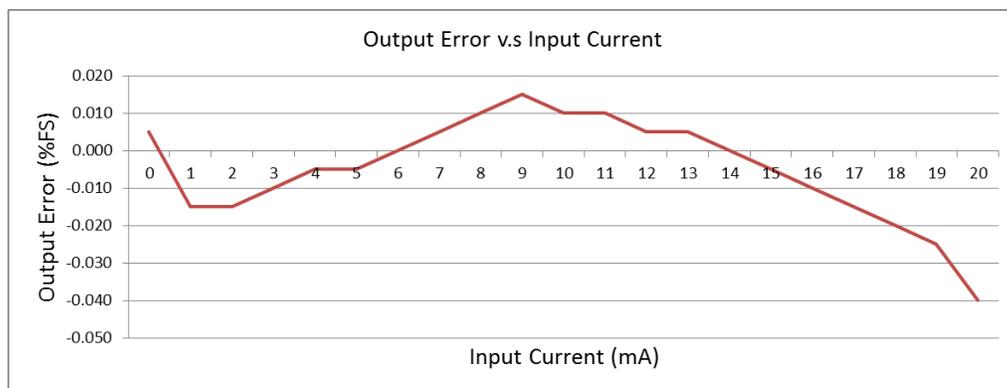


Figure 4. 误差曲线。

由实测数据可以看出，经过校准后，此设计具有非常高的精度。0~20mA 内最大误差仅有 0.04%，远优于 0.4%的计算误差和 0.5%的设计目标。

7. 应用

此方案设计非常简单，信号处理电路仅仅用到两片 IC（AMC1301 和 INA145），影响信号精度的电阻仅有两个（R1 和 R2）。但精度非常高（获益于高精度隔离放大器和差分放大器，以及极少的外围电路），应用非常灵活。输入端口既可连接 3 线/4 线制变送器，也可连接二线制变送器，同时还可为二线制变送器配电；输出端口既可连接接收四线制电流输入的 PLC/DCS 控制器，也可连接具有配电功能的二线制输入端口。同时，由于其输入电阻非常小，仅有 12.4 欧姆，简单地将其串入电流环即可实现信号分配，仅给信号源增加了 12.4 欧姆负载。

8. 结论

信号隔离器，工程应用中有时称为信号隔离端子、信号分配器等，被广泛应用于工程实践中，用以解决地环路干扰、信号隔离分配、隔离配电、端口适配等等。工程上大多购买商品化的模块来解决信号隔离的需求。这种模块价格昂贵、性能参差不齐，有些还需要进行现场校准。本文介绍的这个免校准、高精度信号隔离方案能够以极低的成本替代昂贵的信号隔离模块，降低工程费用。

9. 参考文献

1. “Isolation Technologies for Reliable Industrial Measurements”, <http://www.ni.com/white-paper/3546/en/>, National Instruments.
2. “Application of Full Galvanic Isolated Terminal in Industrial Field”, <http://www.wisdom.bj.cn/service/a.asp>, Wisdom Technology Pte Ltd.
3. AMC1301 datasheet, (sbas667d)
4. INA145 datasheet, (sbos120)

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。您就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默认的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司