

在电机驱动系统中使用 C2000 SDFM 实现 高精度采样

Brian Wang

North and West China

ABSTRACT

作为工业自动化系统的核心，伺服系统近年来得到了快速发展。机床、纺织机械等传统设备也随着伺服技术的普及得到了大幅性能提升，生产效率大大增加。随着制造业对高精度设备的需求不断提升，伺服系统得到了愈加广泛的应用，其应用范围也扩展到了半导体制造、机器人、高端装备制造等新兴行业。新兴的应用场景为伺服应用带来了新的机遇，但也为伺服系统性能带来了新的挑战。作为伺服控制系统最重要的采样信号，如何实现快速、准确的电流采样对提升伺服系统性能具有至关重要的作用。在众多方案中，sigma-delta 数字采样凭借其易隔离、高精度、抗干扰、温漂性能好等优点脱颖而出。为帮助用户方便地实现高性能 sigma-delta 采样，TI C2000 系列实时控制器中内置了 sigma-delta filter module(SDFM)。本文将介绍如何在基于 C2000 的电机控制系统中使用 sigma-delta modulator。

Contents

1	Sigma-delta 基本原理	2
2	C2000 SDFM 外设介绍	3
3	SDFM 模块配置示例	7
4	伺服控制系统中的 Sigma-delta 采样方案	9
5	参考文献	10

Figures

Figure 1.	1st-order Sigma Delta Filter	2
Figure 2.	AMC1306 噪声频域分布	3
Figure 3.	AMC1306 滤波器类型、OSR 与 ENOB 的关系	3
Figure 4.	SDFM 模块功能框图	4
Figure 5.	SDFM Data Filter 单元	5
Figure 6.	Sinc Filter 工作原理	5
Figure 7.	OSR 与数据移位的关系	6
Figure 8.	F280049 Launchpad Pin-map 图	7
Figure 9.	AMC3306 EVM	8
Figure 10.	采样结果波形	9
Figure 11.	TIDA-01455 框图	10

1 Sigma-delta 基本原理

如图为典型的一阶 sigma-delta 调制器，其基本组成包含一个积分器，一个 1-bit ADC 以及一个 1-bit DAC。该回路中，输入信号与 DAC 反馈信号做差，并送入积分环节当中。积分环节输出与一个给定的参考电压比较，通过 1-bit ADC 生成高或低的高频 1-bit 数字信号。该数字信号再经过反馈环节的 DAC 生成模拟信号作为输入信号的反馈，当环路趋于稳定，则数字输出的平均值将跟随模拟输入信号，从而达到将输入的模拟信号调制为数字信号的目的。

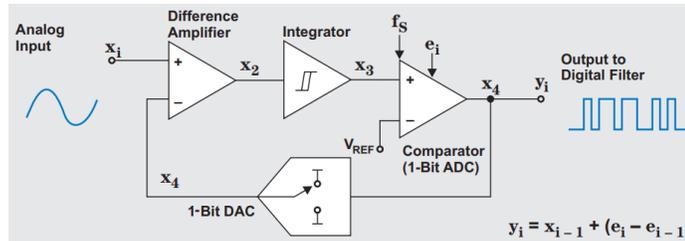


Figure 1. 1st-order Sigma Delta Filter

实际应用当中，Sigma-delta 调制器通常会工作在较高的采样频率范围内（常见 10Mhz 以上），因此也相应地带来了先天的优势：

更易实现隔离：目前高压电力电子设备普遍采用隔离型电流采样，特别是随着业界功能安全标准的普及，隔离采样也越发成为许多工业、汽车产品的首选方案。目前市面上主流电容、磁隔离技术，均是将信号调制成高频数字信号以通过隔离介质。以 TI 的电容隔离技术为例，信号通过高频调制技术以通过硅片上内建的高强度电容隔离层，以实现高强度的隔离等级。由于 Sigma-delta 调制技术先天输出出高频数字信号，因此非常适合应用于隔离型的采样器件当中。

更易实现高精度：常见 sigma delta 调制器的时钟频率通常高达几十 Mhz，其频率远远高于被采样的电力电子系统中的模拟信号（例如电机相电流等），因此可以很容易实现高倍数的过采样，由此也带来了一系列好处。首先，较高的过采样率可以使采样的奈奎斯特频率远远高于信号频率，从而减少信号的混叠现象；此外，通过较高的过采样倍数，sigma-delta 调制器将量化噪声分布到了更高的频率上，减少了低频段的噪声分布，从而可以通过数字滤波器将更多的噪声滤除；在此基础上，可以发现对于输入信号积分器相当于一个低通滤波，而对于量化噪声信号，积分器则充当了一个高通滤波的作用。由此，在 sigma-delta 调制中，噪声在频域上将呈现类似“高通”分布的特性，即实现了“噪声整形”。

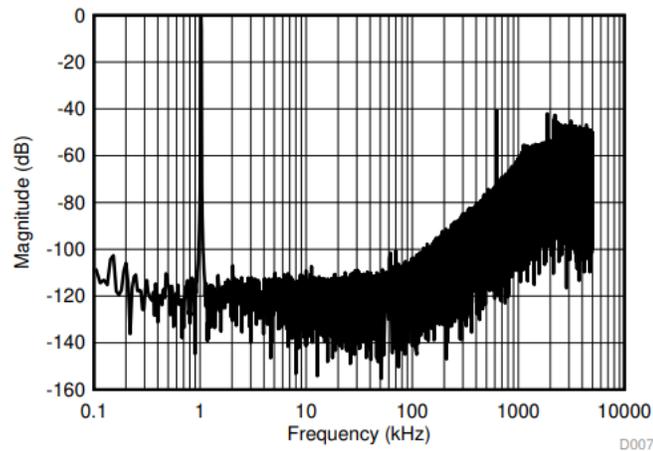


Figure 2. AMC1306 噪声频域分布

由此，配合后级的数字滤波器（Sinc 等低通滤波器），sigma-delta 调制可以有效滤除更多的高频噪声成分，从而提升信号的信噪比，达到更高的有效位数。以 TI 的 sigma-delta 调制器 AMC1306 为例，在采用 $OSR=256$ Sinc3 滤波器的情况下，可以达到 14 位以上的有效位数，较主流开环霍尔方案精度有很大提升。

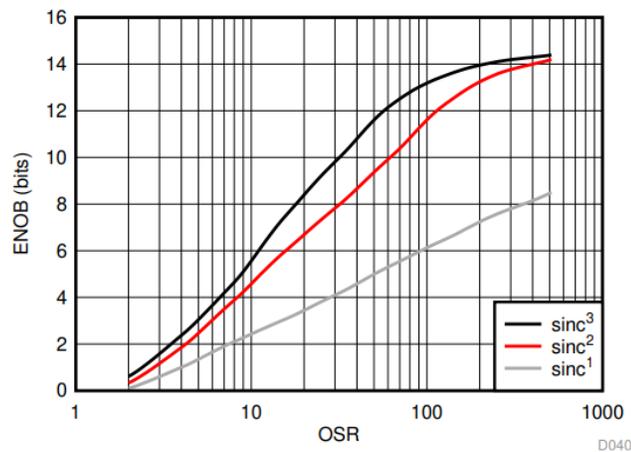


Figure 3. AMC1306 滤波器类型、OSR 与 ENOB 的关系

2 C2000 SDFM 外设介绍

在传统电机系统当中，由于 MCU 通常不集成 Sinc Filter 外设，又因为信号频率及采样频率都非常高，软件处理需要占用极大的软件资源。因此 Sigma-Delta 调制器通常配合 FPGA 或 CPLD 来进行使用，成本比较高，也需要专门的开发人员，因此此前多用于成本相对不敏感的高端伺服驱动产品当中。

作为定位高性能的实时控制 MCU，TI C2000 系列有多款产品针对电机控制应用集成了 Sigma Delta Filter Module(SDFM)，内置了多路 Sinc 型滤波器，可单芯片配合调制器实现 sigma-delta 隔离采样。

如图为 SDFM 模块基本功能框图。以 F280049 为例，SDFM 具有四路滤波器单元，每个单元又包含以下主要功能：

1. 输入控制单元：主要用于进行调制器输入信号时序模式选择，支持曼彻斯特编码；
2. 主滤波模块（数据滤波）：用于对调制器输入信号进行滤波得到采样结果，支持 sinc1-3 以及 SincFast 型滤波，最高 OSR=256；
3. 副滤波模块（比较滤波）：用于对调制器输入信号进行快速滤波并进行保护，内置高低限幅比较器，同样支持上述集中滤波器类型。但为了提高转换速度，最高 OSR=32。

在同一滤波单元中，主副滤波单元功能完全独立，可分别配置各自工作参数，可以根据实际引用来灵活配置。

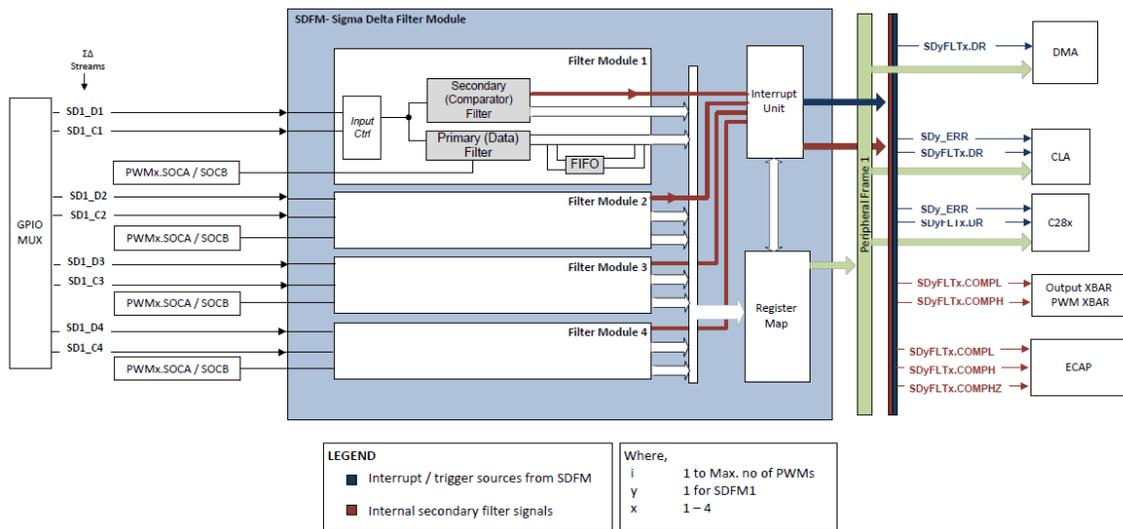


Figure 4. SDFM 模块功能框图

下图为滤波单元的框图，主要包含以下几个部分：

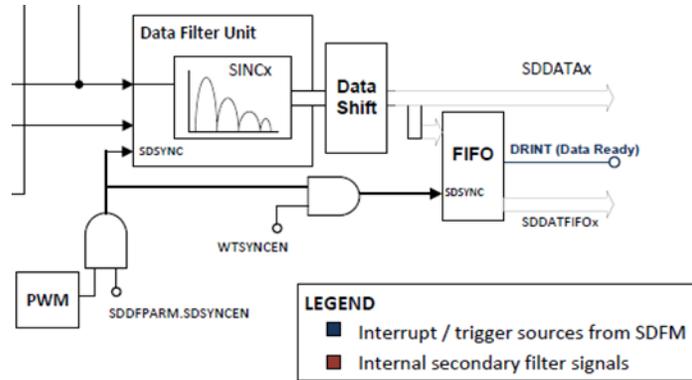


Figure 5. SDFM Data Filter 单元

- 1) Data filter unit: 数据滤波部分，是滤波单元的核心，通过内置 Sinc 滤波器将输入的 data stream 转换成数字结果；
- 2) SDSYNC 同步功能：滤波器可以由 PWM SOC 事件同步。同步发生后，滤波器内部的 OSR counter 将会被清 0，从而保证多路 SDFM 模块之间的同步，或满足特定的采样时序要求（避开开关瞬间的波动等）。可通过 SDSYNCEX.SYNCESEL 选择同步源；
- 3) 数据 FIFO：由于 SDFM 常常工作在 10M 以上的频率上，相应地也在以较高的频率产生转换结果。为了适应较大的数据量，数据滤波器中内置了 16 级 FIFO。实际应用中通常配置 SDFM 在收到指定数量（SDFIFOCTLx.FFIL）的采样结果后触发 data ready 中断，以读取采样结果并进行环路计算。

作为 SDFM 的核心，data filter unit 内置了 Sinc 型滤波器。作为一种低通型数字抽取滤波器，Sinc 滤波器非常适合处理 sigma-delta 调制器的数字输出，以滤除被搬移到高频段的噪声。而根据 Sinc 滤波级数的不同，又可以分为 Sinc1-Sinc3 以及 SincFast 等不同类型。滤波器将调制器输入的数据流按照给定的过采样率（OSR）进行滤波，其基本原理可以通过以下这组示意图进行说明：

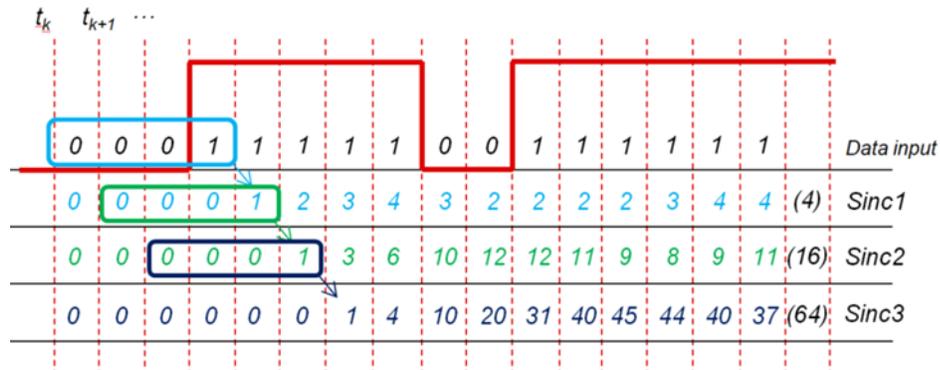


Figure 6. Sinc Filter 工作原理

以 OSR=4 为例，可以看到随着过采样率以及 Sinc 滤波的级数提高，最终得到的数字结果将拥有更大的范围，相应的，对于固定的模拟量程来说，可以获得更大的分辨率。但与此同时也带来了两个问题：

1) 采样延迟: Sinc 滤波器级数越高, 则单次采样涉及的数据点数就越多。同样以 OSR=4 为例, Sinc1/2/3 单次采样实际上分别用到了前 4/8/12 个数据点; 若过采样率 OSR=8, 则采样点个数上升到 8/16/24 个。在时钟频率固定的情况下, 采样率的升高和 sinc 滤波器级数的增加都将带来更大的采样延迟。

假设调制器速率为 10M, 在 Sinc3 滤波器, OSR=256 的情况下采样延迟为:

$$f_{\text{delay}} = \text{Data-rate}/\text{OSR}/\text{Sinc-filter-order} = 10\text{M}/256/3 = 76.92\mu\text{s}$$

而如果 OSR=32, 采样延迟将降低到:

$$f_{\text{delay}} = \text{Data-rate}/\text{OSR}/\text{Sinc-filter-order} = 10\text{M}/32/3 = 9.615\mu\text{s}$$

因此实际应用中, 应当在采样精度和采样延迟之间进行折中。

2) 结果处理: 随着滤波器阶数和 OSR 的不断提高, filter 滤波结果的最大值也会不断增加。数据滤波器的结果数据为 26bit 有符号整数, 但在默认情况下 (SDDPARMx.DR=0), 数据滤波器输出将以 16bit 数形式输出。因此需要配置 SDDPARMx.SH 寄存器将滤波器结果进行移位, 以正确用 16bit 表示。移位位数和 OSR 的关系如下:

OSR	SINC1	SINC2	SINCFAST	SINC3
1 to 31	0	0	0	0
32 to 40	0	0	0	1
41 to 50	0	0	0	2
51 to 63	0	0	0	3
64 to 80	0	0	0	4
81 to 101	0	0	0	5
102 to 127	0	0	0	6
128 to 161	0	0	1	7
162 to 181	0	0	1	8
182 to 203	0	1	2	8
204 to 255	0	1	2	9
256	0	2	3	10

Figure 7. OSR 与数据移位的关系

自 F28338 起, C2000 产品系列也对 SDFM 模块进行了改进, 外设的基本功能和工作原理均保持一致, 但对此前的一些问题进行了修复, 两代 SDFM 的主要改进和区别如下:

功能	Type 1/2	Type 0
GPIO 口滤波	ASYNCR	ASYNCR 或三次滤波
输入信号同步	SDCLK/SDDATA 支持同步(Type 2)	不支持同步
输入信号模式	仅支持 Mode 0 输入模式(Type 2)	支持 Mode 0/1/2/3 输入模式
输入时钟源	SDFM1 时钟可以内部复用到所有滤波模块, 无需外部连接(Type 2)	各模块必须使用各自的时钟, 如果需要共用要将外部 PIN 连在一起。
SDSYNCR 事件	任意 PWM 都可以同步 SDFM	仅 PWM11/12 可以同步 SDFM
数据滤波器	新增了 16*32bit FIFO	无 FIFO

中断事件	重点优化了中断路径： 为每个 SDFM 的数据 ready 设置了 4 个专门的中断路径，并把 SDFM 的中断独立了出来，大大优化了中断响应的灵活性	每个 SDFM 仅有一个中断源，且不区分是数据 ready 还是数据错误。
支持型号	Type 1 F28003X, F2838X, F28P65 Type 2:F280049	F2807x, F2837X

Type 2 SDFM 对使用影响最为明显的取消了对输入逻辑 Mode 1/2/3 的支持，实际应用中不同供应商的调制器可能采用不同的时序规范（IEEE802.3, G.E.Thomas 等）。例如 TI 的 AMC1306 就采用了与 TI C2000 Mode 0 相反的时序逻辑（下降沿锁存），该问题可以通过使能 C2000 GPIO 内置的反相逻辑来解决。设计中也要注意仔细核对调制器时序的 Hold-time 等关键指标，以保证 C2000 能够正确采样到可靠的结果。

3 SDFM 模块配置示例

下面以 F28004x 系列的 SDFM 例程为例进行修改，使用 TI C2000 F280049 开发板及 TI 最近内置隔离电源的 AMC3306 评估板介绍如何进行 SDFM 的配置：

如图为 F280049 开发板 PIN-OUT 示意图：

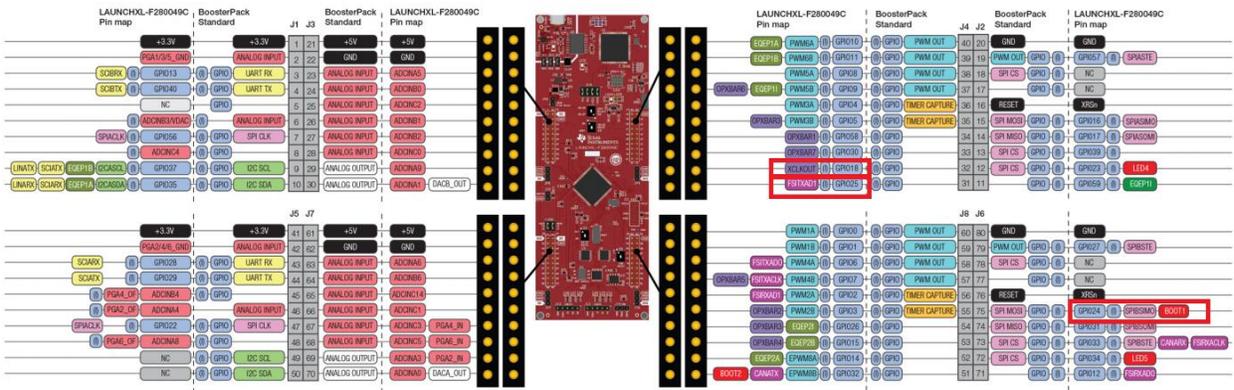


Figure 8. F280049 Launchpad Pin-map 图

在该开发板上我们需要使用以下资源（已在图中标红）：

PIN	Mux	Function
GPIO18	XCLKOUT	将内部 CLK 输出至 GPIO18 作为 sigma-delta 采样时钟源
GPIO24	SDFM_Data1	SDFM1 Data In
GPIO25	SDFM_Clock1	SDFM1 CLK In
3.3V	/	AMC3306 电源
GND	/	GND

如图为 TI 最新 Sigma-delta 调制器产品 AMC3306，与此前的调制器产品相比，该产品最大的特点在于内置了隔离 DC/DC，仅需在副边单侧供电 3.3V/5V 即可正常工作，省去了此前的外置 DC/DC。在成本和 BOM 复杂度上有着明显的改进。

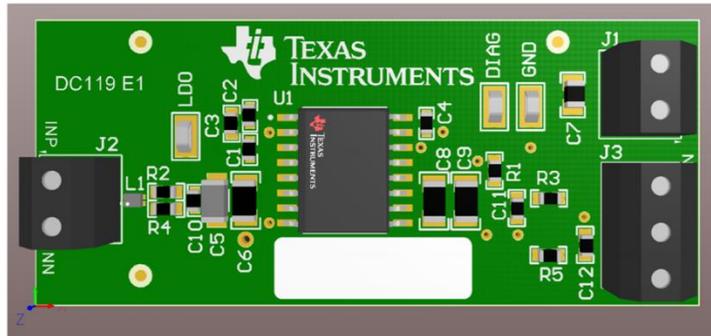


Figure 9. AMC3306 EVM

该板需要进行以下几路接线：

Connector	Connection	Function
J1	VDD-> 3.3V GND-> GND	二次侧单电源供电
J2	INP->Shunt INN->Shunt	差分输入被测信号
J3	DOUT->GPIO24 GPIO18->CLKIN CLKIN->GPIO25	Modulator 数据、时钟信号连接

软件配置过程:

本文以 C2000ware 中自带的 `sdfm_ex5_filter_sync_fifo_cpuread` 例程为基础提供了适合 C2000 Launchpad+ AMC3306 EVM 的评估 firmware。例程源码可通过文末附件获得，以下是软件主要的 SDFM 配置过程：

Step	Description	Functions
1	选择 GPIO MUX 为 SDFM，设置反相或滤波(optional)	<code>configureSDFMPins();</code>
2	根据 Modulator 选型设置 SDFM 模块的输入 Mode。	<code>SDFM_setupModulatorClock();</code>
3	比较器单元配置，设置 Filter type, OSR, HLT/LLT value。	<code>SDFM_configComparator();</code>
4	滤波单元配置，设置 Filter type, OSR, 数据格式以及移位位数。	<code>SDFM_configDataFilter();</code>
5	使能 FIFO 并设置 FIFO 中断级数	<code>SDFM_setFIFOInterruptLevel();</code> <code>SDFM_enableFIFOBuffer();</code>

6	使能 FIFO 中断、比较器中断 (optional)	SDFM_enableInterrupt();
---	-----------------------------	-------------------------

Type 1 SDFM 的配置过程与 Type 0 基本相同，需要注意在初始化过程中需要将 SDFM Type 配置为 Type 1 才能是完整的 Type 1 功能特性

```
SysCtl_configureType(SYSCTL_SDFMTYPE, 0, 1);
```

测试结果:

在输入侧给定 180mV 峰值正弦波，使用 SDFM Sinc3 Filter, OSR=256 连续采样 1024 个点，使用 CCS Graph 功能得到如下测试结果:

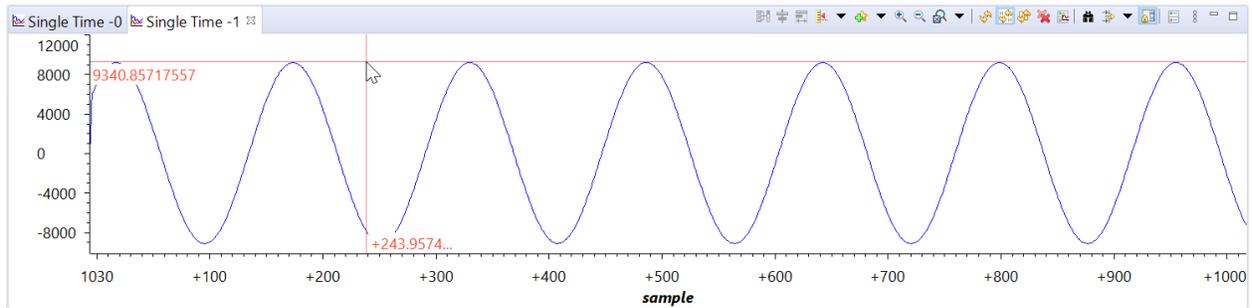


Figure 10. 采样结果波形

序号	结果值	转换值 (mV)									
1	264	5.15625	11	3828	74.76563	21	6790	132.6172	31	8680	169.5313
2	632	12.34375	12	4160	81.25	22	7034	137.3828	32	8796	171.7969
3	998	19.49219	13	4485	87.59766	23	7266	141.9141	33	8898	173.7891
4	1362	26.60156	14	4804	93.82813	24	7487	146.2305	34	8986	175.5078
5	1726	33.71094	15	5115	99.90234	25	7697	150.332	35	9059	176.9336
6	2087	40.76172	16	5416	105.7813	26	7893	154.1602	36	9118	178.0859
7	2444	47.73438	17	5710	111.5234	27	8077	157.7539	37	9162	178.9453
8	2797	54.62891	18	5996	117.1094	28	8248	161.0938	38	9193	179.5508
9	3146	61.44531	19	6271	122.4805	29	8404	164.1406	39	9208	179.8438
10	3490	68.16406	20	6535	127.6367	30	8549	166.9727	40	9208	179.8438

可以看到，最终采样结果的峰值为 179.84，与给定的 180mV 误差不足 0.1%。该结果是在飞线测量，且没有经过误差校正的情况下获得的，可见 sigma-delta 采样方案在高精度采样方面的明显优势。

4 伺服控制系统中的 Sigma-delta 采样方案

针对伺服系统中的隔离电压、电流采样需求，TI 也提供了诸多方案及参考设计。其中 TIDA-01455 是专门针对新一代高性能高压、高频伺服系统需求定制的参考设计方案，其方案整体情况如图:

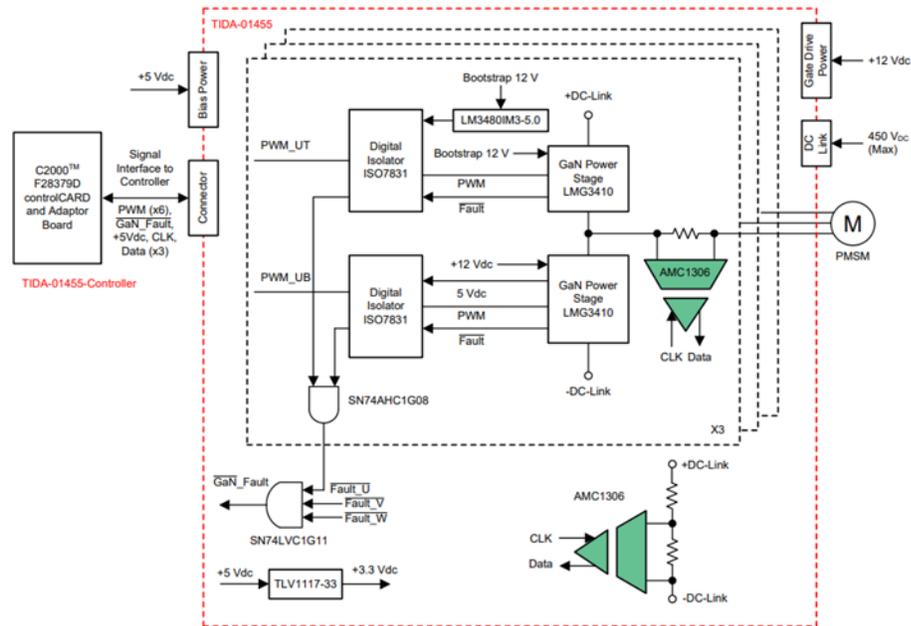


Figure 11. TIDA-01455 框图

方案使用 TI C2000 系列 F28379D 作为主控芯片，其控制信号通过 ISO7831 8kV 数字隔离器送入功率级。功率器件选用了 TI 600V 高性能 GaN FET LMG3410，该产品创新性地集成了驱动、保护等功能，能够在超小体积下支持高性能高效率电机驱动器的设计。在电流和电压采样上，选择了 AMC1306 Sigma-Delta 调制器作为隔离采样方案，其输出 F28379D 内置的 SDFM 模块，从而省去了 FPGA，实现单芯片高精度采样。该参考设计可工作在最高 450V 直流电压的应用场景中，覆盖了诸多工业伺服、变频器的使用场景，对于实际工作中的产品开发具有很强的参考意义。

5 参考文献

1. *Live Firmware Update Without Device Reset on C2000™ MCUs* (SPRUIU9B)
2. *AMC3306M25 Datasheet* (SBAS996B)
3. *TMS320F28004x Real-Time Microcontrollers Technical Reference Manual (Rev. F)* (SPRUI33F)

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司