

# 基于 TMS320F28377D 的 Sigma-Delta 采样分析

陈辉 章童

(成都卡诺普机器人技术股份有限公司 四川 成都 610052)

**摘要:** 为了满足电动机伺服控制中系统对精度日益增长的高要求, 电流采样是至关重要的环节之一, 电流采样的精度将直接影响到伺服系统的准确性与稳定性。Sigma-Delta 采样是目前最为常用的电流过采样方法之一, 其广泛用于需要高信号完整度和电气隔离的电动机驱动应用, 具有高信噪比的优点。本文从应用角度分析基于 TMS320F28377D 芯片的 Sigma-Delta 模块, 并讨论如何在电动机驱动中实现最佳性能。

**关键词:** 电流; 伺服系统; TMS320F28377D 芯片; Sigma-Delta 采样

## 1 Sigma-Delta 采样概述

Sigma-Delta 采样的工作原理是由差动器、积分器和比较器构成调制器, 它们一起构成一个反馈环路。调制器以大大高于模拟输入信号带宽的速率运行, 以便提供过采样。文献 [1] 模拟输入与反馈信号(误差信号)进行差动(Delta)比较。该比较产生的差动输出馈送到积分器(Sigma)中。然后将积分器的输出馈送到比较器中。比较器的输出同时将反馈信号(误差信号)传送到差动器, 而自身被馈送到数字滤波器中。

## 2 原理

### 2.1 Sigma Delta 滤波模块 (SDFM)

在 TMS320F28377D 中使用的 Sigma Delta 滤波模块 (SDFM) 是一种四通道数字滤波器, 专为电动机控制应用中的电流测量和位置解码而设计。每个输入通道可以接收 1 个独立的 delta-sigma ( $\Delta \Sigma$ ) 调制器比特流。比特流由 4 个独立可编程的数字抽取滤波器处理。

文献 [2] 中, 该滤波器集包括 1 个快速比较器 (二次滤波器), 用于进行过电流和欠电流监测的即时数字阈值比较, 以及过零检测。

文献 [3] 中, 每个 SDFM 模块有 8 个外部引脚, 支持不同的可配置调制器时钟模式, 每个 SDFM 模块有 4 个独立的、可配置的二次滤波器 (比较器) 单元, 以及 4 个独立的、可配置的主滤波器 (数据滤波器) 单元。数据滤波器输出可以用 16 位或 32 位表示,

数据滤波单元具有可编程模式 FIFO, 以减少中断开销, 可以将 PWMx.SOCA/SOCB 配置为在每个数据滤波器通道的基础上作为 SDSYNC 源, PWM 可用于为 sigma-delta 调制器生成调制器时钟。

SDFM 中的比较器和数据滤波器都以 SincN 滤波器为核心。文献 [4] 中, SincN 滤波器本质上是一个低通滤波器, 通过数字滤波和抽取将输入的比特流转换为数字数据。

文献 [5] 中, 这个经过滤波的数字数据代表输入到 sigma delta 调制器的模拟信号。简化的 SincN 架构由积分器和微分器以及 down-sampler 级联而成。

数据滤波器是一个可配置的 Sinc 滤波器, 它支持以下几种滤波类型: Sinc1、Sinc2、Sinc3 和 SincFast。数据过滤器 OSR (DOSR) 设置可以在 1 到 256 之间配置, 并且独立于比较器。数据滤波器的有效分辨率 (ENOB) 取决于数据滤波器类型、DOSR 和 Sigma-Delta 调制器频率。默认情况下, 未启用数据滤波器功能, 并设置 SDDFPARMx.FEN=1, 启用数据滤波器。

### 2.2 SDFM 同步模块

文献 [3] 中, 数据滤波器可以与 PWM 事件 (被称为 SDSYNC 事件) 同步。来自 PWM 模块的 SDSYNC 信号用于复位 DOSR 计数器, 可以通过设置 SDDFPARMx.SDSYNCEN 来启用。SDSYNC 输入只连接到主数据滤波器单元, 而不是比较器, SDSYNC 输入不会复位滤波器单元中的数据寄存器。

为了确保比较器滤波器不会采集这些不正确的样本, SDFM 比较器中断只有在提供足够的稳定时

间后才能使能。因此，只有在配置滤波器延迟后提供足够的时间，SDFM 比较器中断才能使能。这个延迟时间为滤波器的延迟加上 5 个时钟周期。

### 2.3 SDFM 模块滤波器延迟

以样本 / 秒表示的 Sinc 滤波器的数据速率可以通过公式 (1) 计算：

$$\text{Sinc滤波器的数据速率} = \frac{\text{调制器数据速率}}{\text{OSR}} \quad (1)$$

Sinc 滤波器的等待时间表示 Sinc 滤波器类型在启动时递送正确的滤波输出所花费的时间量。对于给定的滤波器类型，计算等待时间为：

$$\text{Sinc滤波器的等待时间} = \frac{\text{Sinc滤波器的指令}}{\text{Sinc滤波器的数据速率}} \quad (2)$$

例如：Sinc 滤波器类型为 Sinc3，调制器数据速率为 20MHz，OSR 为 256 时，则 Sinc 滤波器的数据速率 = 78.2K samples/sec，Sinc 滤波器延迟 = 38.4μs。

## 3 实验结果分析

由于 TMS320F28377D 的 Sigma-Delta 采样中不同的配置参数会导致不同的电流采样结果，根据不同的抽取率分别验证 256、200、128、100、80、64、32 抽取率下谐波种类与含量，并分别选取 2kW 与 400W 两种电动机测试高速与低速，实验使用对拖的方式。

### 3.1 大电动机低速

使用 2kW 电动机，利用磁粉作为负载端给定电流 0.42A 左右，驱动器设置速度模式，给定速度为 30r/min，具体谐波含量如图 1 所示。

2kW 电动机不同抽取率 3 倍电谐波含量、2kW 电动机不同抽取率 2 倍电谐波含量分别如图 2、图 3 所示。

由图 2、图 3 看出，在低速下，通过将抽取率降低

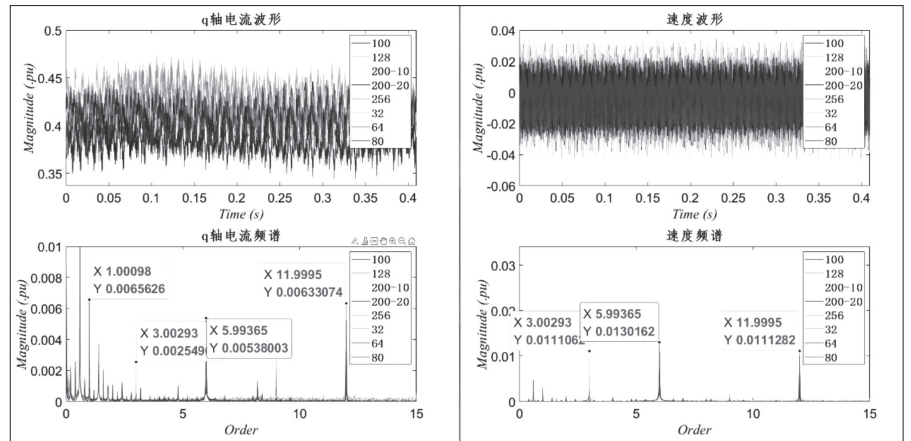


图 1 2kW 电动机谐波类

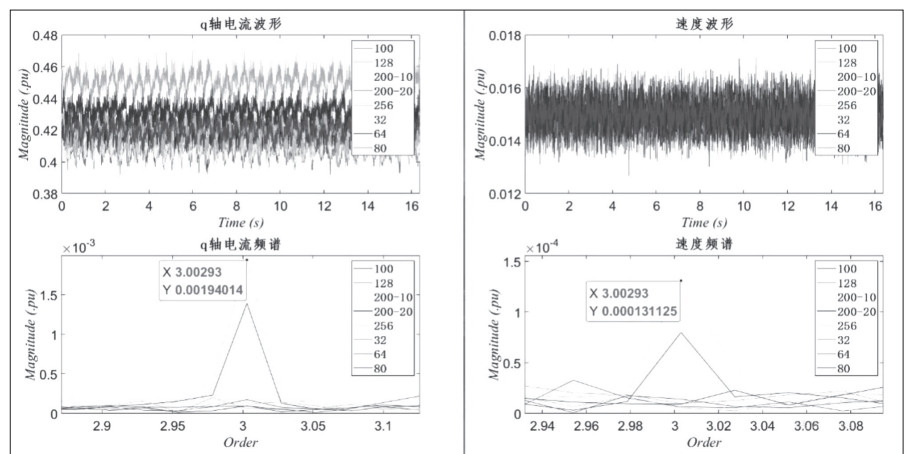


图 2 2kW 电动机不同抽取率 3 倍电谐波含量

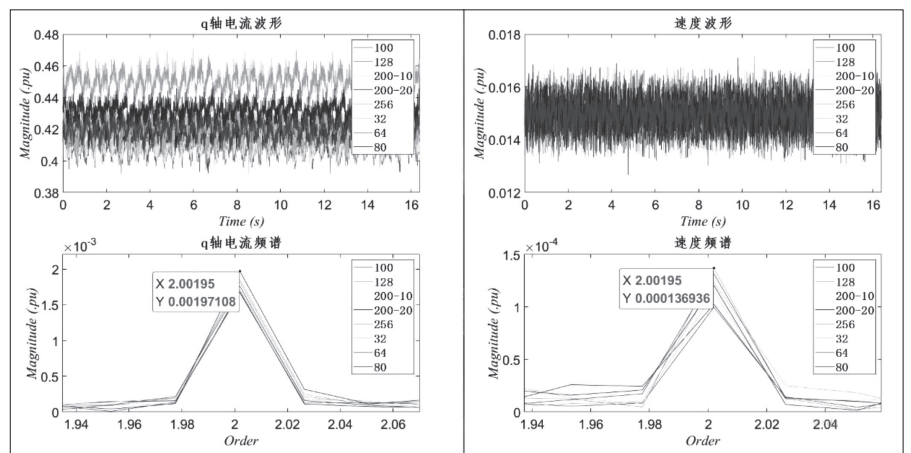


图 3 2kW 电动机不同抽取率 2 倍电谐波含量

可以压制 3 倍与 4 倍电频率谐波，设置抽取率在 128 以下采样谐波均较好，电流中 2 倍电谐波与采样无关。

### 3.2 小电动机高速

使用 400W 电动机，利用磁粉作为负载端给定电流 0.42A 左右，驱动器设置速度模式，给定速度为 2400r/min，具体谐波含量如图 4 所示。400W 电动

机不同抽取率3倍电谐波含量如图5所示。

由图5可知，在高速下，通过将抽取率降低可以压制3倍与9倍电频率谐波，设置抽取率在128以下采样谐波均较好。

### 4 谐波分析

#### 4.1 抽取率

使用抽取率100的时钟20MHz与使用抽取率200的时钟10MHz最后程序中的采样位置相同，对比采样参数配置同抽取率200的不同时钟10MHz与20MHz谐波含量区别，以及对比采样参数配置抽取率100的时钟20MHz与抽取率200的时钟10MHz谐波含量区别。相同抽取率不同时钟、相同滤波器延迟示意图分别如图6、图7所示。

由图6、图7分析可知，3倍电谐波与抽取率大小并无直接关系，配置不同抽取率导致滤波器延迟不同最终影响采样位置，原抽取率256采样点靠后，容易采到纹波导致引入较多种类谐波。

#### 4.2 同步与不同步

为了验证同步模式与非同步模式下谐波种类以及谐波含量的区别，设置CMPC=5000，在原来默认同步模式的基础上，更改SDDFPARMx.FILRESEN=0（即关闭同步），抽取率OSR也由原来256更改为100，即SDFM采样数据间隔时间由12.8μs更改到5us，利用DMA取出一个周期内20个数据点进行均值处理，然后对比两种谐波情况。同步采样d轴、q轴电流谐波，非同步采样d轴、q轴电流谐波相关数据分别如表1、表2所示。

使用对拖的方法测试，测试电

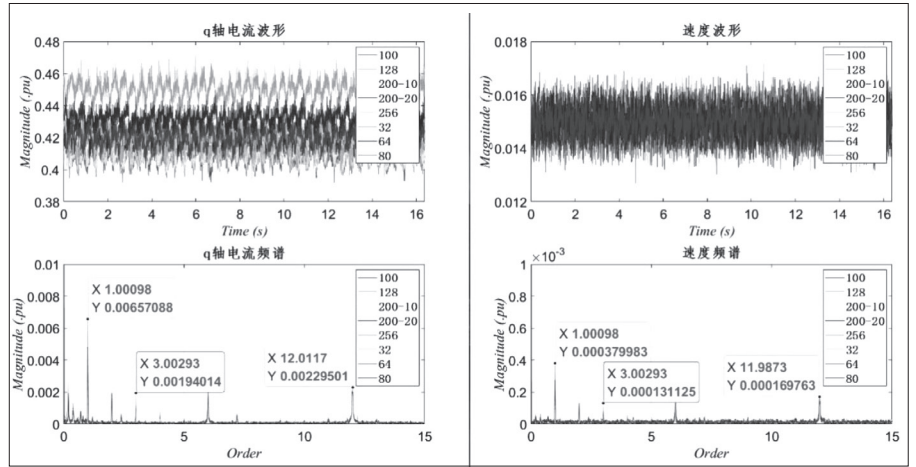


图4 400W电动机谐波类型

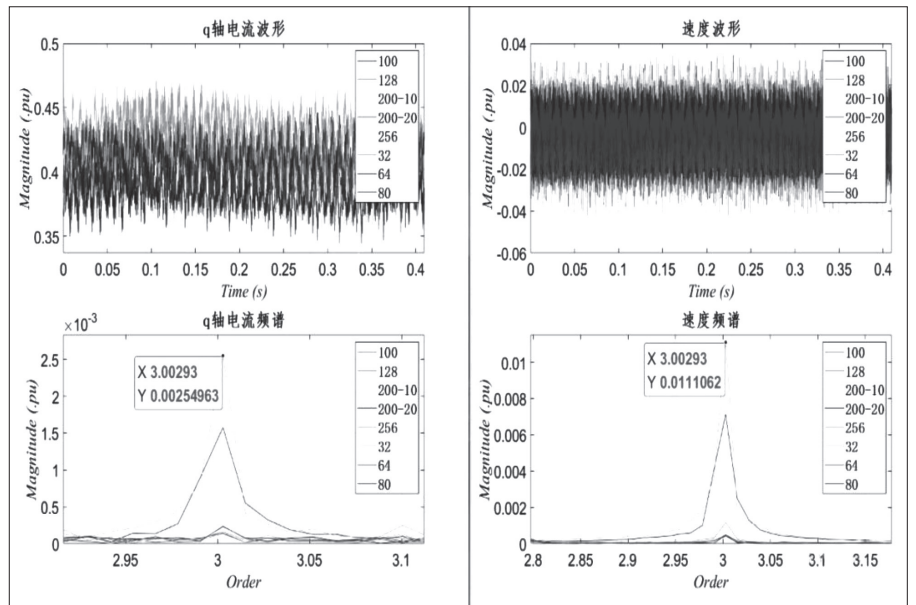


图5 400W电动机不同抽取率3倍电谐波含量

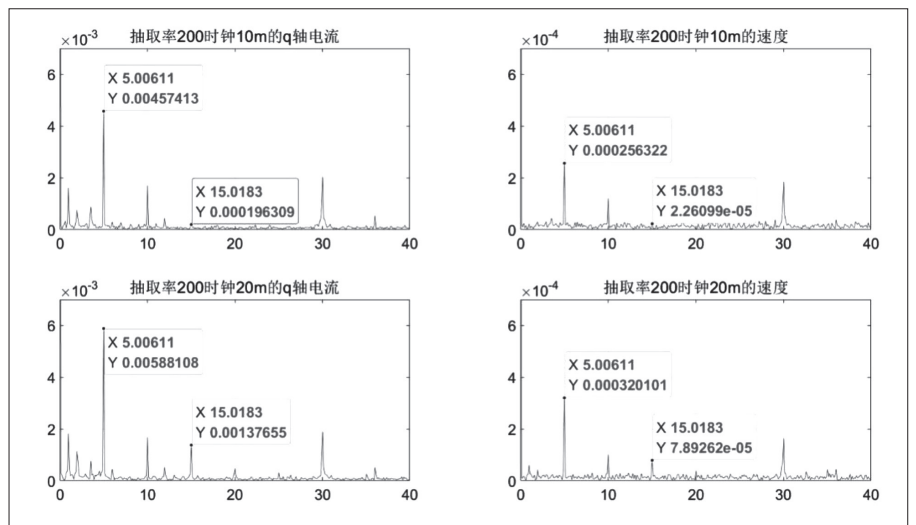


图6 相同抽取率不同时钟

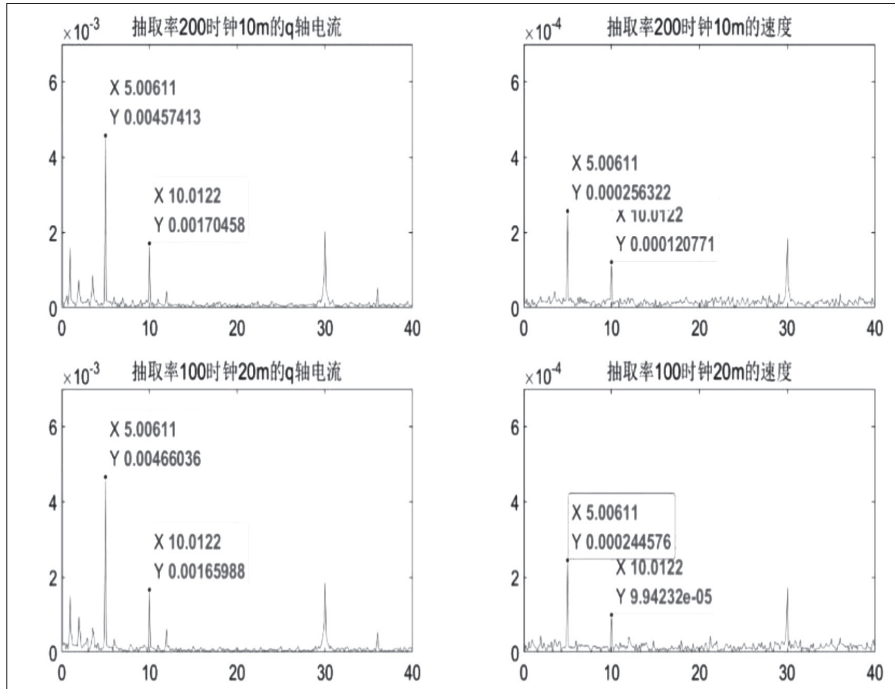


图7 相同滤波器延迟

表1 同步采样d轴、q轴电流谐波

机械谐波类型	15次	30次	40次
q轴电流	0.0087	0.0183	0.0014
d轴电流	0.0045	0.0100	0.0013

表2 非同步采样d轴、q轴电流谐波

机械谐波类型	15次	30次	40次
q轴电流	0.00068	0.0135	0.0055
d轴电流	0.00029	0.0086	0.0144

动机设置转速 3000r/min，被测电动机电流环模式设置为1倍额定电流，采集d轴、q轴电流进行FFT分析。

由表1、表2所示分析，非同步采样与同步采样相比在3倍电频率谐波上有一定的优化，但同时会带来更大的8倍电频率的谐波。

### 5 结语

由于不同的伺服应用中选择的PWM开关频率会不同，为了实现电流采样的最佳效果，需要有意地避开开关周期所带来的震荡及纹波，这是需要在满足采样精度的前提下，通过改变抽取率合理的调整采样位置，并根据需求选择同步与不同步的功能。这样可以有效避免引入新谐波，同时还原了电流的真实性，保证了伺服系统的准确与稳定。

### 参考文献:

[1] 李冬梅, 高文焕, 张鸿远, 等. 过采样Sigma delta调制器的研究与仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(07): 89-92.

[2] TMS320F28004x Microcontrollers Technical Reference Manual (Rev.D)[Z].

[3] TMS320F2837xD Dual-Core Microcontrollers Technical Reference Manual[Z].

[4] 马迅, 王尧, 孙宇凯. 应用过采样与噪声整形技术的sigma-delta ADC设计[J]. 中国集成电路, 2022, 31(04): 59-63.

[5] Sigma-Delta-Conversion-Used-For-Motor-Control\_cn-Jens Sorensen[Z].

作者简介: 陈辉(1979.04-), 男, 汉族, 四川绵阳人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 工业机器人控制系统设计; 章童(1997.08-), 男, 汉族, 四川乐山人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工业机器人控制系统设计。