

Michael Clifford
应用工程师
ADI公司

Σ-Δ型ADC拓扑结构 基本原理：第二部分

in 分享至LinkedIn | 电子邮件

AD717x是ADI公司最新系列的精密Σ-Δ型ADC。该ADC系列是市场上第一个提供真正24位无噪声输出的转换器系列。AD717x器件可对噪声异常敏感的仪器仪表电路的动态范围最大化，支持降低或消除信号调理级中的前置放大器增益。这些器件还能高速运行，提供比以前更短的建立时间。由此可缩短控制环路对输入激励信号的响应时间，或通过更快的每通道吞吐速率来提高转换通道密度。

AD717x页面(analog.com)提供了完整系列的详细信息，包括有关AD7172-2、AD7175-2、AD7172-4、AD7173-8和AD7175-8的信息。这些精密ADC具有完全集成的模拟信号链，包括真轨到轨模拟输入和基准输入缓冲器。该系列提供多种输入通道数，不同器件可通过引脚对应方式升级为其他转换速度或更低噪声/功耗的器件。AD7175-2和AD7175-8提供最快的吞吐速率和最低的噪声。AD7177-2提供32位分辨率输出。AD7172和AD7173提供最低功耗选项。

AD7175-2具有一个非常有用的软件工具来帮助评估。Eval+是一个单一软件，可从ADI网站下载，用来在有或没有硬件的情况下

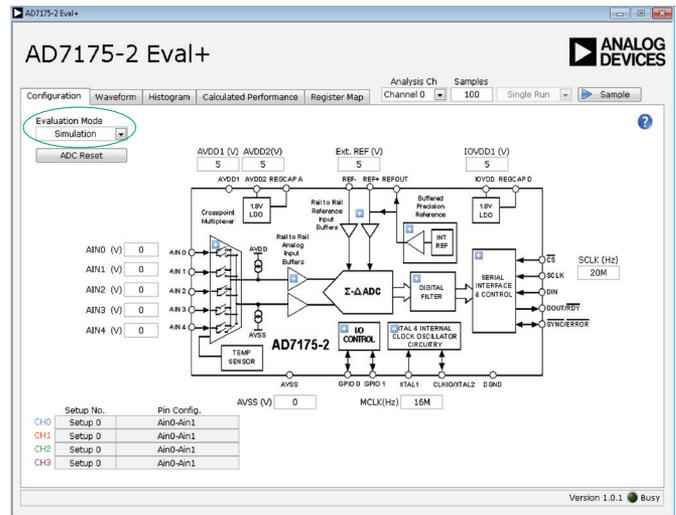


图2. AD7175-2 Eval+软件在功能模型评估模式下的配置选项卡。

配置、分析、选择ADC。该软件与硬件一起运行时，会像标准评估板那样工作。无硬件时，ADC的功能模型在后台运行，支持用户为其终端应用建立最佳工作配置。

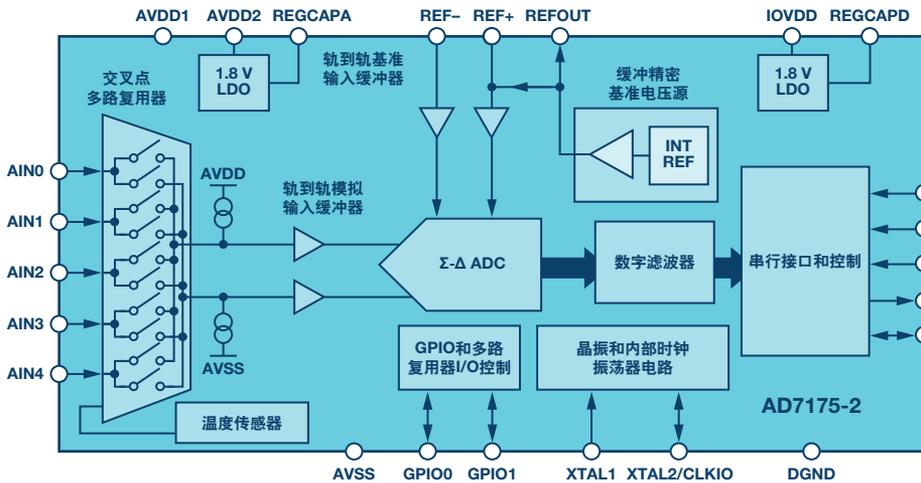


图1. AD7175x Σ-Δ ADC系列；AD7175-2框图和噪声性能。

无噪声p-p位数	输出数据速率
17.2	250 kSPS
17.8	2.5 kSPS
19.1	10 kSPS
19.9	2.5 kSPS
24	20 SPS

表1. AD717x系列概览，显示了可用的通道数选项和系列成员的引脚对应情况

AD717x系列				24引脚 TSSOP	5 × 5 32引脚	6 × 6 40引脚
	无噪声位数 (全速)	调制器 (mA)		-2	-4	-8
AD7175 250 kSPS	17.2	8.4	快速、低噪声、真轨到轨缓冲器、 5 V电源	●		●
AD7172 32 kSPS	17.2	1.5	低功耗、真轨到轨缓冲器、 5 V或3 V电源	●	●	
AD7176 250 kSPS	17.3	8	快速、低噪声、无缓冲、5 V电源	●		
AD7173 32 kSPS	17.5	1.5	低功耗、缓冲输入、5 V或3 V电源			●
AD7177 10 kSPS	19.1	8.4	快速、低噪声、32位真轨到轨缓冲器、 5 V电源	●		

消除 Σ - Δ ADC量化噪声：噪声和带宽考虑因素

使用AD7175 ADC来说明如何利用数字滤波消除 Σ - Δ 型ADC的量化噪声。关键在于噪声/输入带宽和建立时间的权衡分析。

图4显示了调制器原始噪声来源与AD7175器件从DC到F_{MOD}/2 (或4 MHz)的频率对数的关系。AD7175调制器以8 MHz (F_{MOD})的有效速率采样。调制器为MASH型，对调制器噪声提供80 dB/十倍频程的衰减速率。电路的热噪声决定了调制器噪声开始以斜坡变化之前频带内的噪底。从显示低噪底的曲线可以看出该ADC对低带宽信号的高动态范围能力。此动态范围以及AD7175降低噪底的能力可用于改善应用的灵敏度，这在采集低幅度信号时特别有用。

ADC的最低过采样比、数字滤波器阶数和转折频率都有助于确保量化噪声不是ADC噪声的限制因素。为了滤除噪声，滤波器的包络必须能够以足够大的滚降速率进行衰减，从而应对幅度量化噪声的增速。

AD7175的最低过采样比为 $\times 32$ ，在8 MHz F_{MOD}条件下，最大输出数据速率为250 kHz。

AD7175提供了多种不同类型的滤波器，可供用户选择。数字滤波器的工作原理是通过比较不同情况下的sinc5 + sinc1和sinc3滤波器来说明的。

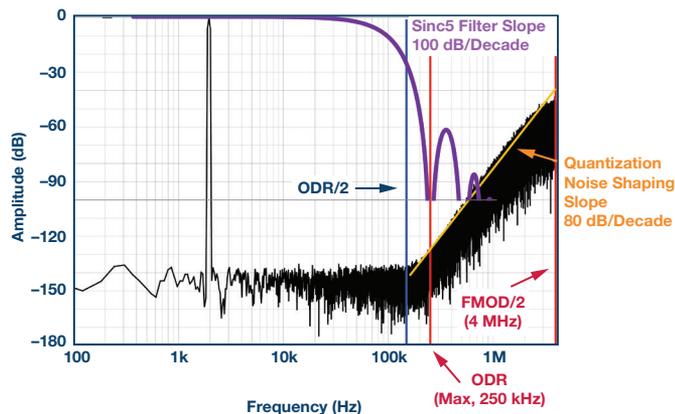


图3. AD7175调制器输出频谱DC至F_{MOD}/2，采用sinc5 + sinc1和32倍抽取(产生sinc5直流响应)。

在250 kHz ODR时，AD7175 sinc5 + sinc1可直接配置为sinc5，其-3 dB频率为 $\sim 0.2 \times \text{ODR}$ (50 kHz)。sinc5滤波器的衰减包络为-100 dB/十倍频程。这意味着sinc5滤波器的衰减和滚降速率足以消除调制器噪声，如图3所示。

相比之下，若更改为250 kHz ODR的sinc3，衰减和滚降速率将不足以消除调制器噪声。数据手册中的250 kHz和125 kHz ODR时的噪声数值说明了这一情况。只有将数据速率设置为62.5 kHz或更低，sinc3响应才能完全滤除ADC结果中的量化噪声。

除了滤除量化噪声以外，数字滤波器还能通过调整输入带宽来降低噪声。这是通过提高抽取率实现的。对于sinc5 + sinc1滤波器，提高过采样比意味着初始五阶sinc滤波器要进行均值计算。利用初始结果的均值，用户可以选择不同的输出数据速率、速度和带宽来改善噪声性能(如图5所示)，即先由sinc5再由sinc5 + sinc1求均值来改善噪声性能。对sinc5结果求均值会引入频率为输出数据速率及其倍数的一阶陷波，这些陷波会与sinc5总包络复合。sinc型滤波器中的陷波频率传统上是用来抑制已知频率的干扰信号，即通过把数据速率策略性地设置为与干扰频率重合。一个经典例子是50 Hz和60 Hz的工频抑制。

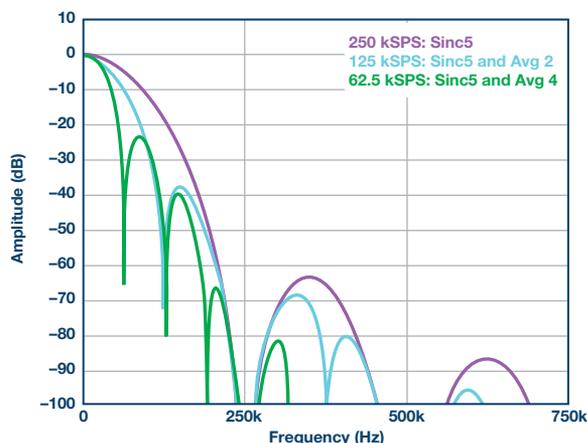


图4. AD7175-2 sinc5 + sinc1 滤波器：通过更改ADC抽取率来调整输入带宽。

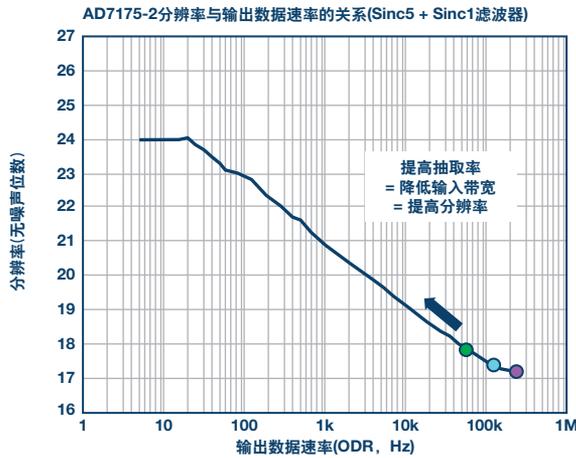
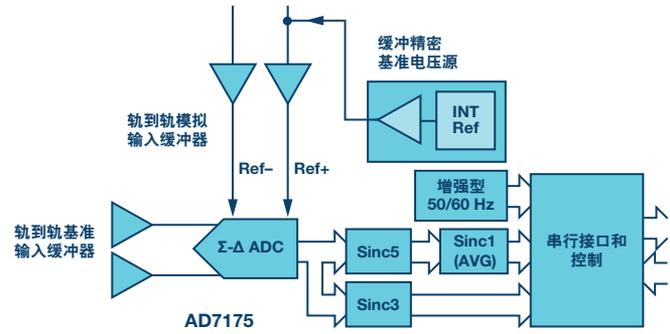


图5. AD7175-2 sinc5 + sinc1滤波器 - 噪声与ODR的关系。



sinc型滤波器是具有 $\sin(x)/x$ 剖面的移动平均滤波器，因此一般称其为sinc滤波器。该滤波器由一系列积分器、一个用作抽取率的开关和一系列微分器组成。它是一种有限脉冲响应(FIR)型滤波器。对于输入的阶跃变化，它表现出已知且有限的线性相位响应。深陷波发生在输出数据速率及其整数倍处，陷波内的信号会被衰减。

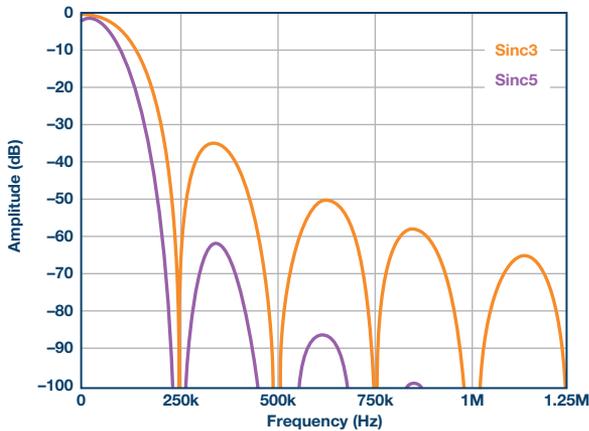


图6. 不同阶数sinc滤波器的频域比较: sinc5与sinc3。

图6比较了AD7175的三阶和五阶sinc滤波器，二者均以32倍抽取率运行。这种情况下，两个滤波器均以250 kHz的输出速率提供转换数据。滤波器的阶数决定滚降速率和-3 dB频率。sincP滤波器位于 $-P \times 20$ dB/十倍频程的频率响应包络之下。滚降越陡，-3 dB频率越低。不同阶数滤波器之间的主要区别在于滤波器建立时间，根据情况不同，其对终端测量应用的影响也不同。

滤波器建立时间

当数字滤波器处理来自 Σ - Δ 调制器的数据流的移动平均值时，存在一个相关的建立时间。该延迟对所有FIR滤波器是固定的，但对不同阶数的sinc滤波器，该延迟是不同的。通常用两项来描述该延迟：群延迟和建立时间。群延迟描述从输入端存在模拟信号到在数字输出端看到它的延迟时间。例如，对于单音正弦波，群延迟就是从模拟输入端存在该正弦波电压峰值到该峰值出现在数字输出端的时间差。

建立时间是指数字滤波器的全部均值时间。如果模拟输入端有一个阶跃，那么需要经过滤波器的完全建立时间，ADC的数据输出才与阶跃之前的输入无关。还可能存在其他延迟，如滤波器的计算时间等。对于AD7175系列，第一次转换会有较长的建立时间；由于初始计算周期为 $1/ODR$ ，离开待机状态后的建立也可能引起延迟。除滤波器建立时间之外的延迟可能依选择的转换器不同而异，因此，阅读ADC数据手册时应留心。

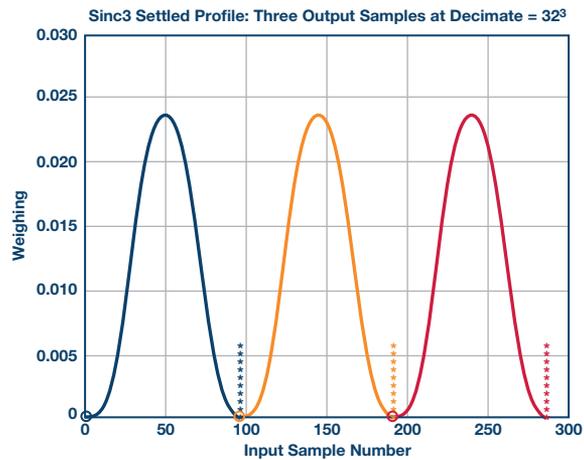
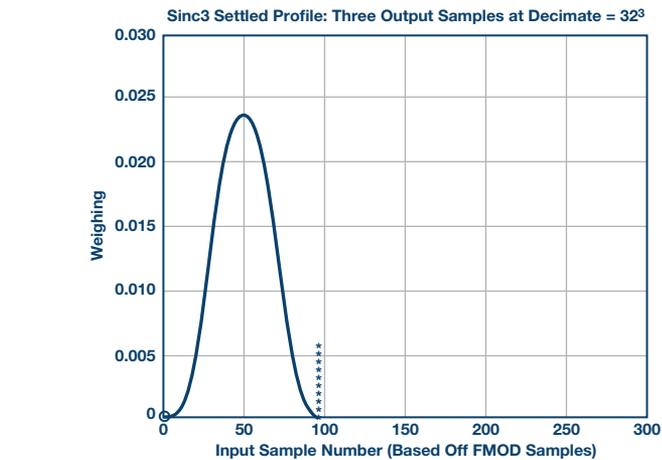


图8. 多路复用ADC、sinc3滤波器和三个转换周期—完全建立的数据。

通过比较单一 Σ - Δ ADC与多路复用 Σ - Δ ADC，可以更好地说明滤波器建立时间影响。数字滤波器的建立时间会严重影响多个输入通道循环转换的速率，因为要保持各通道的结果独立。

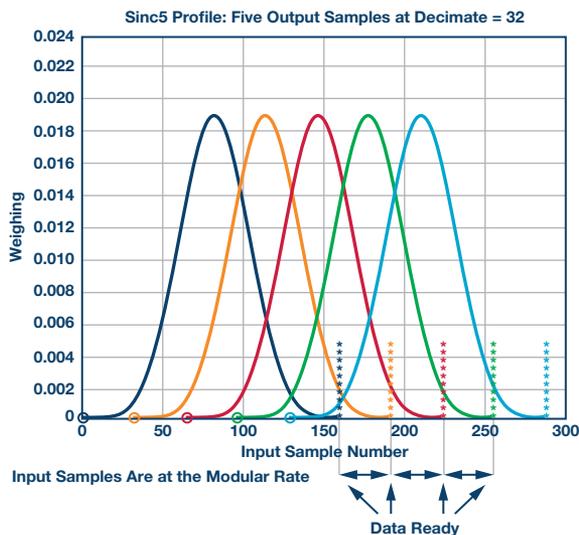


图7. 单一ADC输入、sinc5和五个转换输出周期。

为什么要等待完全建立时间之后才能给出独立结果？让我们看看采用单一输入源的单通道ADC的数字滤波。来自 Σ - Δ ADC调制器的数据以FMOD的速率传送到数字滤波器(如图5所示)，每个样本都通过移动平均滤波器。根据阶数和类型不同，滤波器在转换期间(由滤波器抽取率设置)内以不同方式衡量各样本，如图7所示。输入样本0和随后的样本是调制器在其每个时钟周期的离散输出结果。y轴表示数字滤波器衡量各样本而给出的权重比例。此权重的形状就是低通数字滤波器的时域表示。这种情况下的输出数据速率为250 kHz ($8 \text{ MHz}/32 = \text{FMOD}/\text{抽取率}$)。数据就绪信号(各种颜色的垂直虚线)之间的时间为4 μs 。ADC采用sinc5 + sinc1滤波器和32倍抽取率运行。在定义滤波器输出为调制器的模拟输入时，所有五个转换输出都有一定的重叠，因此，没有

输出是各自独立的。对于单一ADC输入，各转换结果共享调制器模拟输入，但滤波器以不同权重衡量各调制器输出。

对于多路复用输入情况，调制器产生的每个转换数据对各通道必须是独立的。必须经过滤波器的完全建立时间之后，多路复用器才能从一个模拟输入通道切换到另一个模拟输入通道。以sinc3型滤波器为例，使用32倍抽取率，一次转换的滤波器建立时间如图8(a)所示。一旦滤波器完全建立，数据输出便是先前96个调制器输出的加权平均值。这相当于12 μs 或三个周期的ADC输出数据速率。

图8(b)显示了多路复用情况的前三个样本，ADC输出的各样本均已完全建立。在任何样本之间，调制器输出都没有重叠。DRDY(垂直线)之间的时间所指示的复用速率由滤波器的建立时间决定。此速率在数据手册和性能曲线中常常是作为完全建立数据速率来描述。

对于sincP滤波器，滤波器的建立时间为滤波器阶数P乘以 $1/\text{ODR}$ 。对于以250 kHz ODR运行的sinc3滤波器，其建立时间为 $3 \times 1/250 \text{ kHz} = 12 \mu\text{s}$ 。作为比较，若使用sinc5滤波器，ODR同为250 kHz，则建立时间为 $5 \times (1/250 \text{ kHz}) = 20 \mu\text{s}$ 。

近似的通道切换速率为ODR除以滤波器阶数，也就是 $\text{ODR}/3$ (对于sinc3滤波器)或 $\text{ODR}/5$ (对于sinc5滤波器)。对于直接sinc滤波器，这是很显然的。对于sinc5 + sinc1型滤波器，需要增加一个步骤。AD7175系列ADC允许选择不同类型的滤波器。下一部分将介绍不同类型滤波器之间的区别，并提供一个例子来说明如何计算各种情况下的建立时间。

现在看看多路复用情况下的建立时间。在过程控制和工厂自动化中，典型的模拟输入模块会有一个前端调理，用以将 $\pm 10 \text{ V}$ 输入调整到AD7175-8的输入范围内。然后，AD7175-8会复用各通道，按顺序转换各输入或输入对。完成所有通道转换的时间取决于所用的滤波器和通道数目。

下例对使用sinc3滤波器和使用sinc5 + sinc1滤波器进行了比较,二者配置为相同的输出数据速率,我们会看到建立时间计算的对比和方法。用户可以选择AD7175-8的这两个滤波器选项。

a. 使用sinc3滤波器, 62.5 kHz ODR 计算建立时间。

AD7175 sinc3: ODR = 62.5 kHz

建立时间 = $3 \times (1/62.5 \text{ kHz}) = 48 \mu\text{s}$ 。

通道开关速率 = $1/48 \mu\text{s} = 20.833 \text{ kHz}$

b. 使用sinc5 + sinc1滤波器, 62.5 kHz ODR 计算建立时间。

AD7175 sinc5 + sinc1: ODR = 62.5 kHz

注意有两个部分。sinc5滤波器在4 μs 窗口上求均值(FMOD = 8 MHz),因此它以250 kHz的速率将数据传送到均值模块。

1. sinc5的建立时间 = $5 \times 1/250 \text{ kHz} = 20 \mu\text{s}$ 。

这提供均值计算的第一个样本。

sinc1的建立, 均值滤波器。

对于ODR = 62.5 kHz, 250 kHz数据流四次求均值。

用于均值计算的剩余三个样本的建立

时间为 $3 \times 1/250 \text{ kHz} = 12 \mu\text{s}$ 。

总建立时间 = $20 \mu\text{s} + 12 \mu\text{s} = 32 \mu\text{s}$,

通道开关速率 = $1/32 \mu\text{s} = 31.25 \text{ kHz}$ 。

注意: 对于sinc5 + sinc1滤波器, 当数据速率为10 kSPS及以下时, ADC具有单周期建立特性。这意味着ADC的建立时间为 $1/ODR$ 。

表2显示了采用设置(a)和(b)的4通道多路复用测量的比较。使用sinc5 + sinc1滤波器可提高每通道采样速率, 说明较短建立时间有优势。注意: 这个经验法则仅适用于转换器, 若各路输入之前有模拟预调理电路, 并且其时间常数比ADC要长, 那么起主导作用的将是最差情况建立时间。

表2显示了比较结果:

表2. 对于一个4通道多路复用系统(例如采用AD7175-8), Sinc5 + Sinc1与Sinc3滤波器的每通道数据速率比较

滤波器类型	ODR (kHz)	每通道建立时间 (μs)	转换四个通道的时间 (μs)	每通道数据速率 (kHz)
Sinc5 + sinc1	62.5	32	128	7.8125
Sinc3	62.5	48	192	5.208

以上就是对 Σ - Δ 型ADC的简要介绍—围绕调制器的原理, 数字滤波的概念和例子, 以及其在测量系统内对噪声、建立时间的影响和一些连锁效应。

参考文献

“用于DSP应用的ADC”系列: ADI公司, Newnes, 第一版, 2002年。

作者简介

Michael Clifford是ADI公司位于爱尔兰的线性与精密技术部门的应用工程师, 从事精密ADC工作, 主要涉及 Σ - Δ 型转换器。

作者感谢ADI公司的Adrian Sherry、Colin Lyden和Walt Kester对本文的支持。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区, 与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答, 或参与讨论。

ezchina.analog.com



全球总部

One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部

上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司

深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210 室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司

北京市海淀区
上地东路 5-2 号
京蒙高科大厦 5 层
邮编: 100085
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司

湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路 889 号光谷国际广场
写字楼 B 座 2403-2405 室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA3205sc-0-4/16

analog.com/cn

