

数据转换器静态特性的重要性——千万别忽视基本特性!

作者: Walt Kester

简介

上世纪50、60年代,积分非线性度、差分非线性度、单调性、无失码、增益误差、失调误差、漂移等直流性能规格主要用于表示数据转换器的性能特性。在当时,这些规格数据就足够了,因为多数早期应用(PCM和雷达除外)都仅涉及工业测量和过程控制等应用中的直流或低频信号。到了70、80年代,随着微处理器和数字信号处理(DSP)技术的出现,为了满足更加复杂的信号处理应用的需要,转换器需要测定信噪比(SNR)、无杂散动态范围(SFDR)等动态性能规格。

现代的数据转换器应用覆盖从低频工业测量到宽带无线电接收器的整个频谱。虽然直流特性的重要性随着信号频率的增加而降低,但在许多应用中仍然占有重要地位。例如,在IF采样应用中,较大的增益和/或失调误差可能导致信号削波,从而降低SNR和SFDR性能。在要求匹配转换器的应用中,如交错、同步采样、I/Q信号处理等,各转换器之间的相对增益和失调相匹配显得至关重要。

本文旨在说明数据转换器的各项直流性能特性,便于读者了解ADC或DAC数据手册中相应部分的重要性。

数据转换器的分辨率和量化

需要注意的是,对于DAC和ADC来说,要么输入要么输出为数字信号,因此其信号具有量化性质。换言之,一个N位字代表了 2^N 种可能状态之一,因此,一个N位DAC(具有固定基准电压)只能有 2^N 个可能模拟输出,一个N位ADC只能有 2^N 个可能数字输出。如前所述,模拟信号一般为电压或电流。

数据转换器的分辨率有几种不同的表述方式:最低有效位(LSB)、满量程百万分率(ppm FS)、毫伏(mV)等。不同的器件(即使来自同一制造商)采用不同的特性规格方式,因此,转换器用户必须了解如何在不同规格间进行转换,才能对不同器件进行有意义的比较。各种分辨率的最低有效位大小如图1所示。

| RESOLUTION N | 2^N | VOLTAGE (10V FS) | ppm FS | % FS | dB FS |
|-----------------|------------|---------------------------|---------|----------|-------|
| 2-bit | 4 | 2.5 V | 250,000 | 25 | - 12 |
| 4-bit | 16 | 625 mV | 62,500 | 6.25 | - 24 |
| 6-bit | 64 | 156 mV | 15,625 | 1.56 | - 36 |
| 8-bit | 256 | 39.1 mV | 3,906 | 0.39 | - 48 |
| 10-bit | 1,024 | 9.77 mV (10 mV) | 977 | 0.098 | - 60 |
| 12-bit | 4,096 | 2.44 mV | 244 | 0.024 | - 72 |
| 14-bit | 16,384 | 610 μ V | 61 | 0.0061 | - 84 |
| 16-bit | 65,536 | 153 μ V | 15 | 0.0015 | - 96 |
| 18-bit | 262,144 | 38 μ V | 4 | 0.0004 | - 108 |
| 20-bit | 1,048,576 | 9.54 μ V (10 μ V) | 1 | 0.0001 | - 120 |
| 22-bit | 4,194,304 | 2.38 μ V | 0.24 | 0.000024 | - 132 |
| 24-bit | 16,777,216 | 596 nV* | 0.06 | 0.000006 | - 144 |

*600nV is the Johnson Noise in a 10kHz BW of a 2.2k Ω Resistor @ 25°C

Remember: 10-bits and 10V FS yields an LSB of 10mV, 1000ppm, or 0.1%.
All other values may be calculated by powers of 2.

图1: 量化: 最低有效位(LSB)的大小

理想数据转换器的传递函数

图2显示了一个3位单极DAC和一个3位单极ADC的理想传递特性。在DAC中，输入和输出都经过量化处理，其图形由8个点构成——虽然可以探讨这些点形成的直线，但必须记住，实际的传递特性并非直线，而是多个离散的点。

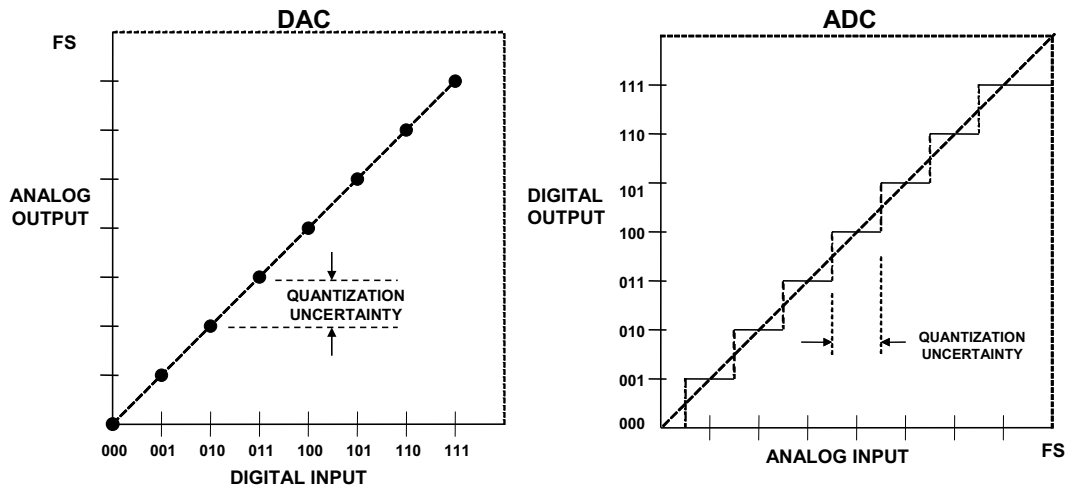


图2: 理想3位DAC和ADC的传递函数

ADC的输入为模拟性质，未经过量化处理，但其输出却具有量化属性。因此，传递特性由8个水平阶梯构成。在考虑ADC的失调、增益和线性度时，我们会关注这些阶梯中点的连线——通常称为**码中心**。

对于DAC和ADC，数字满量程（全“1”）相当于比模拟满量程(FS)低1个LSB。（理想）ADC转换发生在比零高 $\frac{1}{2}$ LSB时，其后，每增加1 LSB，就转换一次，直到比模拟满量程低 $\frac{1}{2}$ LSB时。由于ADC的模拟输入可以接受任何值，然而数字输出经量化处理，所以，实际模拟输入与数字输出的确切值之间可能存在最高 $\frac{1}{2}$ LSB的误差。这称之为**量化误差**或**量化不确定性**，如图2所示。在交流（采样）应用中，这种量化误差会导致**量化噪声**，其他文章对此有详细描述。

数据转换器有多种可能的数字编码方案：*直接二进制、偏移二进制、一的补码、二的补码、符号幅度、格雷码、BCD*等。由于本文主要探讨数据转换器相关的**模拟问题**，因此，我们将使用**二进制**和**偏移二进制**举例说明，而不考虑这些以及其他数字代码的优缺点。有关数据转换器编码的更多信息，请看参考文献1和2。

图2中的示例采用**单极转换器**，其模拟端口仅有单一极性。这属于最简单的类型，但**双极性转换器**一般在现实应用中更有效。双极性转换器分为两类：较简单的一类只是一种单极性转换器，负失调正好为1 MSB（许多转换器采用特别设计，可以根据需要开启或关闭该失调，从而可以当作单极性或双极性转换器使用）；另一类称为**符号幅度转换器**，更加复杂，具有N位幅度信息，另有一位相当于模拟信号的符号位。符号幅度DAC非常罕见，符号幅度ADC主要用于数字电压表(DVM)中。单极性、偏移二进制和符号幅度如图3所示。

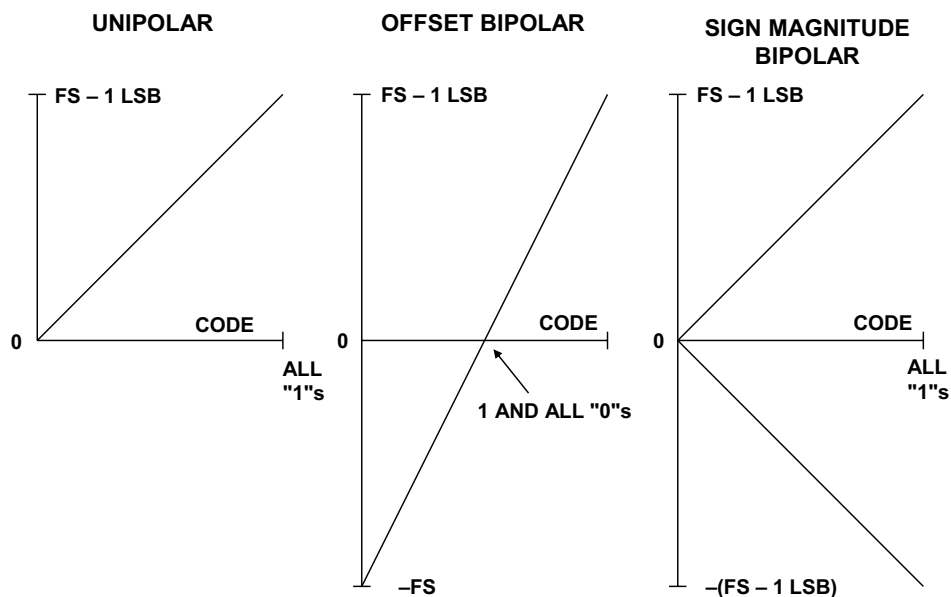


图3：单极性和双极性转换器

数据转换器的增益和失调误差

数据转换器的四项直流误差为失调误差、增益误差和两种线性度误差（差分 and 积分）。失调误差和增益误差类似于放大器中的失调误差和增益误差，如图4所示，图中为双极性输入范围。（尽管失调误差和零误差在放大器和单极性数据转换器中相等，但在双极性转换器中并不相等，必须仔细区别。）

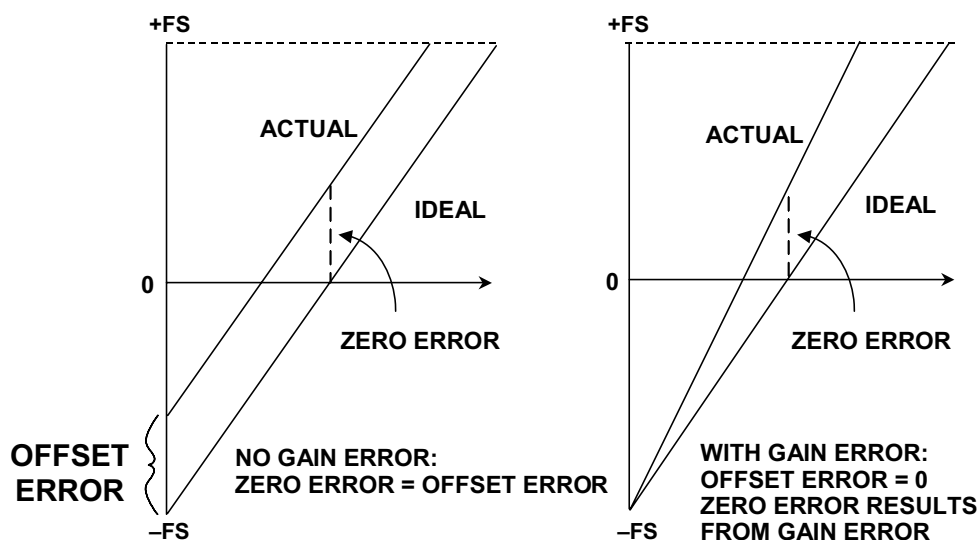


图4：双极性数据转换器失调误差和增益误差

DAC和ADC的传递特性可以表示为由 $D = K + GA$ 得到的直线，其中， D 为数字码， A 为模拟信号， K 和 G 为常数。在单极性转换器中， K 的理想值为0；在失调双极性转换器中，该值为 -1 MSB。失调误差为 K 的实际值与理想值之差。

增益误差为 G 与其理想值之差，一般表示为两者之间的百分比差，不过也可定义为满量程下增益误差对总误差的贡献（单位： mV 或LSB）。通常情况下，数据转换器的用户可以调整这些误差。但请注意，放大器失调在零输入下调整，增益在近满量程下调整。双极性数据转换器的调整算法比较复杂。

数据转换器的线性度误差

转换器的积分线性度误差也类似于放大器的线性度误差，定义为转换器的实际传递特性与直线间的最大偏差，一般表示为满量程的百分比（但也可以LSB为单位）。对于ADC，最常用的做法是穿过代码中点或码中心画一条直线。选择直线有两种常用方法：端点法和最佳直线法，如图5所示。

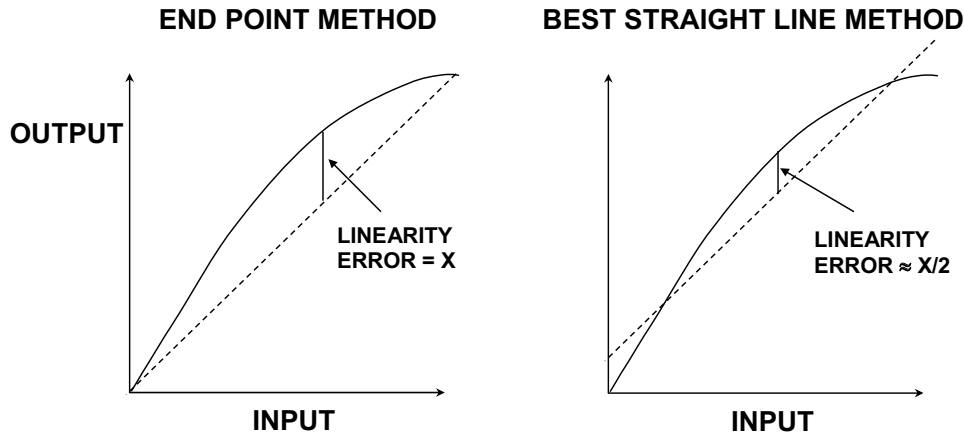


图5: 积分线性度误差的测量方法 (两张图均为同一转换器)

在端点系统中，以通过原点和满量程点的直线为基础测量偏差（增益调整后）。对于数据转换器测量和控制应用，这是最有用的积分线性度测量方法（因为误差预算取决于与理想传递特性的偏差，而非某个随意的“最佳拟合”），也是ADI公司通常使用的方法。

然而，最佳直线法确实能够对交流应用的失真作出更好的预测，同时会使数据手册上的“线性度误差值”降低。最佳拟合直线是基于标准曲线拟合方法，通过器件的传递特性画成，最大偏差即基于该直线测得。一般来说，利用这种方法测得的积分线性度误差仅为端点法所测值的50%。可见，这种方法非常适合编制漂亮的数据手册，但对误差预算分析并不适用。对于交流应用，标定失真比直流线性度更有效，因此，很少需要用最佳直线法来定义转换器的线性度。

转换器的另一种非线性度为差分非线性度(DNL)。该项指标与转换器码转换的线性度有关。理想情况下，数字码每变化1 LSB，相当于模拟信号变化1 LSB。在DAC中，数字码每变化1 LSB会导致模拟输出正好变化1 LSB；而在ADC中，模拟输入变化1 LSB，数字转换将从一个进入下一个。差分线性度误差定义为整个传递函数与理想值1 LSB之间的任意最大偏差（或LSB变化）。

当相当于1 LSB数字变化的模拟信号变化量超过或不足1 LSB时，即存在DNL误差。转换器的DNL误差通常定义为在转换器整个范围的任何转换点的最大DNL。图6所示为DAC和ADC的非理想传递函数以及DNL误差的影响。

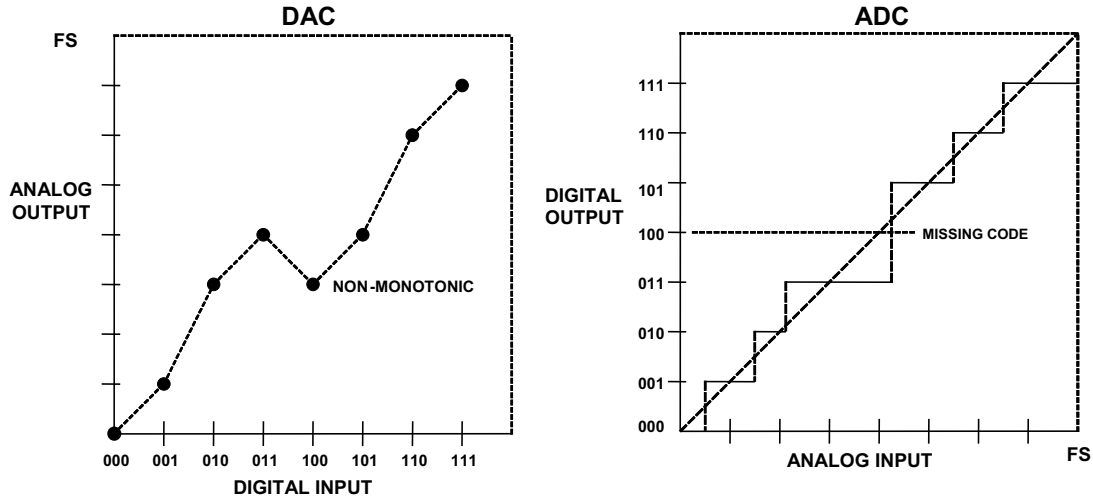


图6: 非理想3位DAC和ADC的传递函数

有关DAC DNL的详细分析见图7。如果DAC的DNL在任何转换点均小于 -1 LSB，则该DAC具有非单调性，即其传递特性含有一个或多个局部最大值或最小值。DNL大于 $+1$ LSB时，不会导致非单调性，但仍然不理想。在许多DAC应用中（尤其是在非单调性可能使负反馈变成正反馈的闭环系统中），DAC的单调性非常重要。DAC单调性通常在数据手册中有明确规定，然而，如果DNL保证低于 1 LSB（即 $|DNL| \leq 1$ LSB），则该器件一定具有单调性，即使未明确指出。

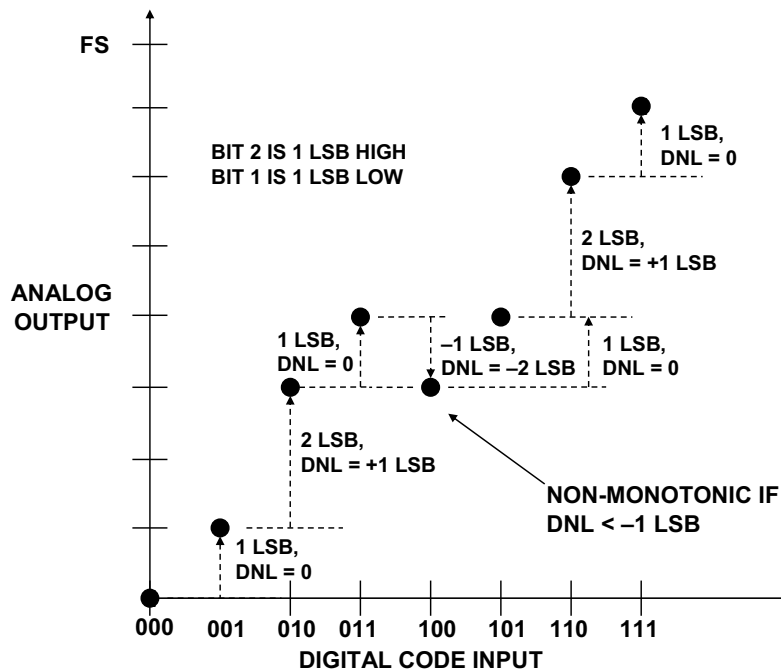


图7: DAC差分非线性度详情

图8更加详细地描述了ADC的DNL。ADC可以为非单调，但ADC中过量的DNL通常会导致失码。就像DAC须避免非单调性一样，ADC必须避免失码。同样， $DNL < -1 \text{ LSB}$ 时会导致失码。

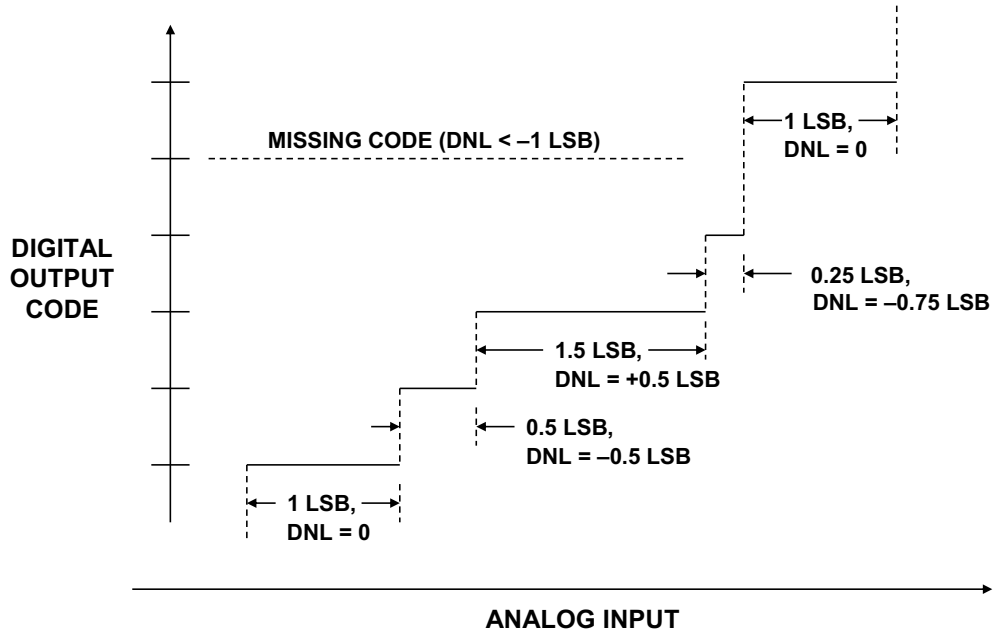


图8: ADC差分非线性度详情

ADC不但可能存在失码，而且可能具有非单调性，如图9所示。与DAC的情况一样，这会导致严重问题，尤其是在伺服应用中。

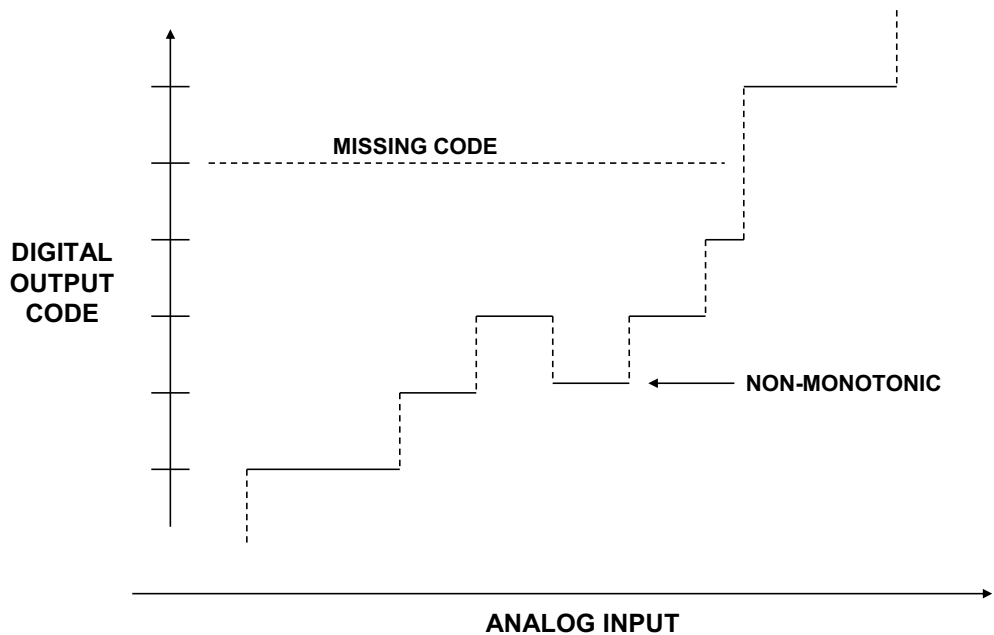


图9: ADC失码及非单调性

DAC中不能存在失码——每个数字输入字都会产生相应的模拟输出。但DAC可能为非单调性，我们前面已提到过这一点。在直接二进制DAC中，最可能产生非单调性条件的地方是两个码之间的半量程点：011...11和100...00。如果这里具有产生非单调性条件，一般是因为DAC未得到正确校准或调整。内置非单调性DAC的逐次逼近ADC一般会产生失码但保持单调。然而，ADC有可能变成非单调——同样取决于具体的转换架构。图9显示同时具备非单调性和失码两种特性的ADC的传递函数。

采用分级架构的ADC将输入范围粗略分成多段，每段再分成更小的段——最后得到最终码。该过程详见本书第4章。调整不当的分级ADC可能在分级点表现出非单调性、宽码或失码，分别如图10A、图10B和图10C所示。这类ADC应进行调整，这样因老化或温度导致的漂移在敏感点产生宽码，而不是非单调性或失码。

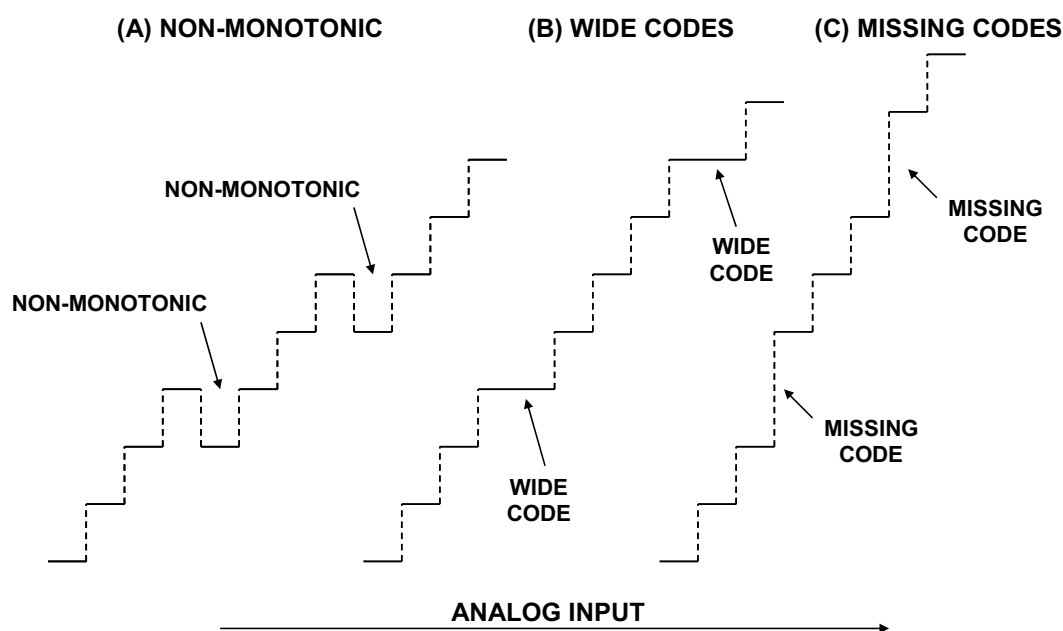


图10：调整不当的分级ADC相关误差

定义失码比定义非单调性更难。所有ADC本身均存在一定的转换噪声问题，如图11所示（将其想像为DVM最后一位数的相邻值之间的跳动）。随着分辨率和带宽逐渐变高，导致转换噪声的输入范围可能达到甚至超过1 LSB。高分辨率宽带ADC一般存在内部噪声源，可能反射到输入，作为有效输入噪声，与信号相混合。这种噪声，尤其是与负DNL误差相结合后，可能使某些（甚至所有）码在整个输入范围内均存在转换噪声。因而，有些码可能没有相应的输入来确保该码为输出，虽然有些输入有时可能会产生该码。

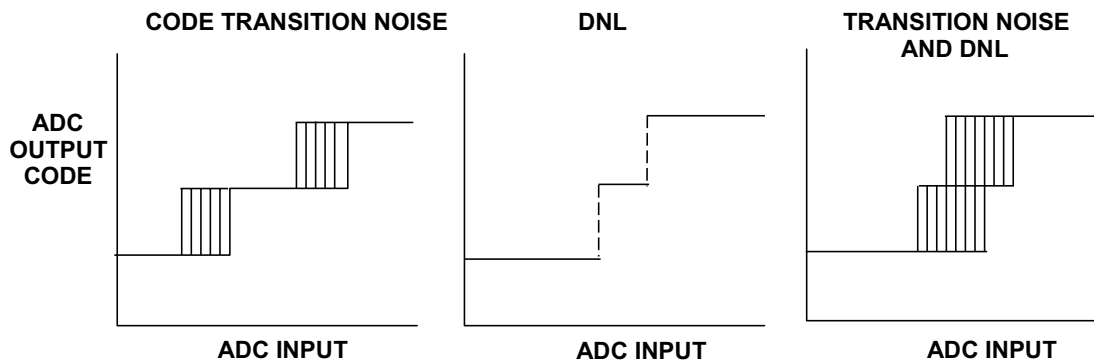


图11：码转换噪声与DNL的组合效应

对于低分辨率ADC，可以将无失码定义为转换噪声与DNL的组合，由其保证所有码均一定量（可能为0.2 LSB）的无噪声码。然而，在现代 Σ - Δ ADC所实现的极高分辨率下，这是无法实现的，即使是在低分辨率的宽带宽采样ADC中也无法实现。这些情况下，制造商必须以某些其他方式定义噪声电平和分辨率。到底采样哪种方法并不重要，但数据手册必须明确指出所用方法及预期性能。有关有效输入噪声的详细讨论，请看参考文献2和3。

参考文献：

1. Dan Sheingold, *Analog-Digital Conversion Handbook, 3rd Edition*, Analog Devices and Prentice-Hall, 1986, ISBN-0-13-032848-0. (the defining and classic book on data conversion).
2. Walt Kester, *Analog-Digital Conversion*, Analog Devices, 2004, ISBN 0-916550-27-3, Chapter 2 and 5. Also available as [The Data Conversion Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7841-0, Chapters 2 and 5.
3. Walt Kester, "The Good, the Bad, and the Ugly Aspects of ADC Input Noise: Is No Noise Good Noise?" [Tutorial MT-004](#), Analog Devices.

Copyright 2009, Analog Devices, Inc. All rights reserved. Analog Devices assumes no responsibility for customer product design or the use or application of customers' products or for any infringements of patents or rights of others which may result from Analog Devices assistance. All trademarks and logos are property of their respective holders. Information furnished by Analog Devices applications and development tools engineers is believed to be accurate and reliable, however no responsibility is assumed by Analog Devices regarding technical accuracy and topicality of the content provided in Analog Devices Tutorials.