

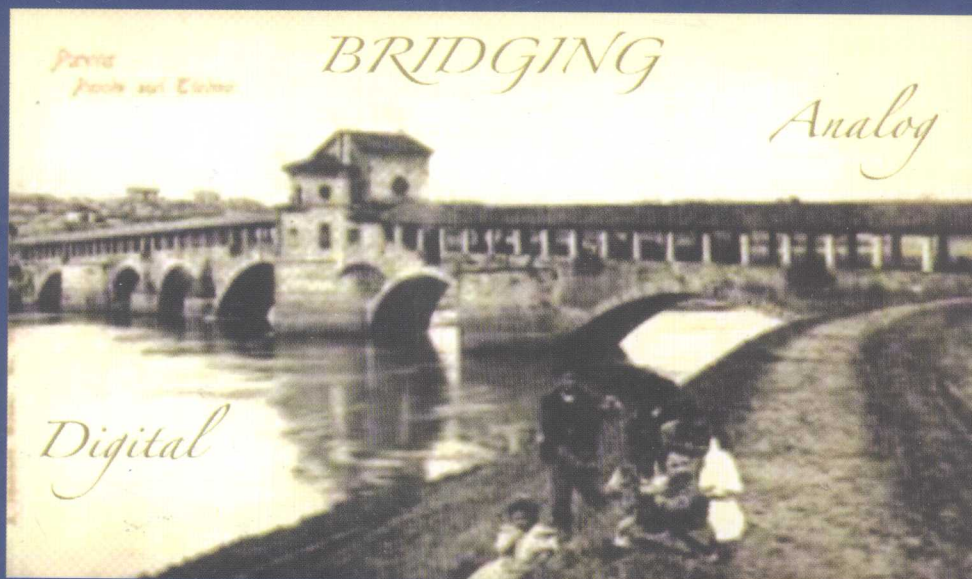
Franco Maloberti

 Springer

数据转换器

Data Converters

[意] 佛朗哥·马洛贝蒂 著
程 军 陈贵灿 等 译



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

013058902

TP335

17

Data Converters

数 据 转 换 器

〔意〕 佛朗哥·马洛贝蒂 著
Franco Maloberti

University of Pavia, Italy

程 军 陈贵灿 等 译



西安交通大学出版社



北航

C1665329

TP335
17

013328303

Translation from the English language edition:

Data Converters by Franco Maloberti

© 2007 Springer

Springer is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

陕西省版权局著作权合同登记号 图字 25-2010-098 号

图书在版编目(CIP)数据

数据转换器/(意)马洛贝蒂(Maloberti,F.)著;程军,陈贵灿等译.——西安:西安交通大学出版社,2013.7

ISBN 978-7-5605-5213-2

I. ①数… II. ①马… ②程… ③陈… III. ①数-模转换器-研究生-教材 IV. ①TP335

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 090666 号

书 名	数据转换器
著 者	〔意〕佛朗哥·马洛贝蒂
译 者	程军 陈贵灿等

出版发行	西安交通大学出版社
地 址	西安市兴庆南路 10 号交大出版大厦(邮编:700048)
网 址	http://www.xjtupress.com
电 话	(029)82668357 82667874(发行部)
	(029)82668315 82669096(总编办)
传 真	(029)82669097
印 刷	陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本	787mm×1092mm 1/16	印 张	25.625
印 数	0001~3500 册	字 数	454 千字
版次印次	2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷		
书 号	ISBN 978-7-5605-5213-2/TP·579		
定 价	58.00 元		

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

译者的话

数据转换器,包括 ADC 和 DAC,是连接模拟信号和数字信号的桥梁,在数字电路和数字信号处理技术高速发展的今天,集成电路中的数据转换器正越来越显现出其重要性,因为自然界的信号本质上是模拟的。数据转换器的性能通常是 SoC 系统的瓶颈,其性能的高低往往决定了一个电子信息处理系统的性能。近年来,数据转换器电路技术发展迅速,传统结构的 ADC 和 DAC 不断向深亚微米和低电压、低功耗发展,新的技术如数字校准、时间交错、连续时间 $\Sigma\Delta$ 调制、电荷域 ADC 等技术的出现,不断推动数据转换器向更高速、更高精度和更低的功耗方向发展。

本书全面介绍了数据转换器的技术规范、体系结构、电路设计和性能测试,融合了模拟信号处理和数字信号处理的相关知识。本书不仅介绍了数据转换器电路方面的内容,更富有特色的是,在行为级对数据转换器进行了建模和定量分析验证,使得读者可以站在比较高的层面来权衡数据转换器电路设计中性能指标的折中,这是以往的数据转换器教科书所缺乏的内容。本书曾用在美国得克萨斯 A&M 大学、得克萨斯大学和意大利的帕维亚大学作为教材,书中的例题和习题大量使用了 Matlab 和 Simulink 行为级的模型作为仿真验证工具。本书可作为微电子技术和相关专业的高年级本科生和研究生的教科书,也可作为集成电路设计的工程师和科研工作者的参考书。

本书由程军组织翻译和审校。全书共 9 章,程军翻译了前言和第 2、8、9 章,陈贵灿翻译了第 1 章和第 4 章,王红

义翻译了第3章和第5章,张鸿翻译了第6章和第7章。全书由程军和陈贵灿统稿和初审。中译本对原书中一些排校等方面的错误进行了纠正(在修改处加译者注或右上角加星号*)。西安交通大学出版社的赵丽平编审在组织筹备和编辑工作中给予了很大的帮助和支持,在此深表感谢。

由于译者水平和经验所限,译文中难免有错误与不当之处,敬请广大读者批语指出。

译者

2013年5月

于西安交通大学微电子学系

前言

本书的目的是为了帮助学生、工程师和科学家设计和使用数据转换器,这些数据转换器可以是单独的芯片,也可以是用在数模混合集成电路(IC)中的一部分。若用于教学,本书每章都包含许多习题,作为课文内容的实际应用。此外,该书还收录许多例题和插图,概述了研究主题的关键方面。

本书的内容大量是来自给大学讲授的数据转换器课程,这些大学包括位于学院站的得克萨斯 A&M 大学、位于得克萨斯和达拉斯的大学以及近期在意大利帕维亚大学的课程。选修该课程的学生需要模拟电路设计和版图的知识,并熟悉晶体管的工作原理。

该书包含九章。第 1 章涉及正确理解和设计数据转换器的基础知识,通过讲授数据转换器的理论含意,使读者意识到研究数据转换器所使用的近似方法的限制。此外,本章还回顾了用于分析和表征采样数据系统的数学工具。

第 2 章帮助读者正确理解数据转换器的规格参数。本章相应地(suitably)介绍了数据转换器的一般信息、特点以及静态和动态工作极限,这些能帮助读者对已有的器件进行评价和比较,确定新器件的规格参数。本章还对厂商提供的规格中使用到的技术术语进行了明确定义。

第 3 章在考虑电压和电流基准源基本要求之前研究了奈奎斯特率数模转换器的架构,接着讨论了基于电阻和基于电容的数模转换器架构,最后,本章对电流舵数模转换器架构进行了研究,该架构采用单位电流源阵列或者二进制

权重电流源阵列,对电流进行切换得到数模转换功能,并在最后简要提及了其他特殊的架构。

第4章涉及奈奎斯特率模数转换器的架构、特点和限制。开始介绍的是全并行架构的ADC,只需要一个时钟周期就可以完成转换,接着是两步转换方案,需要至少两个时钟周期才能完成转换。然后讨论了折叠插值的方法,在研究流水线结构之前,本章还分析讨论了时间交错和逐次逼近算法。最后考虑用于特殊要求的一些技术。

本书假定读者是熟悉基本模拟电路的特点和设计技术,但还是有些特殊功能的电路没有在模拟电路课程中详细介绍。为此,第5章集中研究数据转换器相关的电路,从采样保持(S&H)电路开始,或是双极工艺或者是CMOS工艺实现的。之后是时钟增强技术,可以在非常低的电源电压下增强(或者是使之成为可能)MOS晶体管的开关导通。然后分析了折叠系统中用于电流和电压输入的电路技术。因为许多结构中用到了V-I转换器,本章回顾了一般的V-I转换的原理。最后介绍了用于控制数据转换器的交叠和不交叠相位时钟的产生方法。

由于不需要精确的工艺就可以达到高的分辨率,过采样转换器在现代混合模数系统中越来越重要了。过采样技术在本书中分两章讨论,第6章从简单的过采样方法开始研究过采样的基本理论。然后讨论通过速度和分辨率的适当折中,从噪声整形和过采样中可以获得的益处。该章回顾了基本原理,出于学习的目的,通过研究一阶和二阶 $\Sigma\Delta$ 调制器的结构给出了调制器的基本原理,这些基本原理在随后的第7章用于更高阶的调制器。除了单级结构外,第7章研究了通常称为MASH(多级噪声整形)的级联调制器的方案。然后,在讨论带通 $\Sigma\Delta$ 调制器的实现之前,对前面研究过的采样数据 $\Sigma\Delta$ 调制器的连续时间版本进行了讨论,最后简要讨论了 $\Sigma\Delta$ DAC。

第8章涉及提高数据转换器性能的数字技术。当精度和元件匹配的要求比工艺能够提供的精度和匹配更高时,就需要使用数字技术校准或者修正转换器的结构。因此,各种增强转换器预期性能的方法大大帮助了数据转换器设

计者。该章研究了误差测量方法,这样使得误差可以在模拟域或者数字域得到校正或者校准。这些方法或者是在线的(转换器可以不间断工作),或者是离线的,有一段时间用于误差测量和校准。该章还研究了通过元件的动态平均技术提高频谱性能的校正技术。

第9章讨论数据转换器的测试和性能描述所使用的方法。本章从测试DNL和INL的静态方法开始,之后讨论动态性能的测试,也就是稳定时间(settling time)、毛刺和谐波失真(distortion)。该章还讨论了静态ADC的测试。本章研究不同类型输入的柱状图方法、谐波失真和互调的测试技术。还讨论了在提取器件性能规格参数中如何使用正弦波和FFT。

本书的一个特点是在提供的许多例题中广泛使用了行为模型。我们相信,通过对结果的数字验证,或者对于数字转换器而言,使用适当精确的模型定量验证其行为和性能,会大大加快学习过程。对电路设计者而言,进行Spice仿真是非常重要的,但对于数据转换器,使用更高级的模型是有价值的。本书采用Matlab和Simulink(MathWork公司)作为行为仿真的基础。所有例题文件均可在网站上下载,更多信息请访问<http://ims.unipv.it>。我感谢许多完成行为仿真工作和仔细阅读手稿的学生,他们中有爱德华·多博尼佐尼(Edoardo Bonizzoni),马西米利亚诺·贝罗尼(Massimiliano Belloni),克里斯蒂娜·德拉菲奥雷(Cristina Della Fiore),伊万诺·加尔迪(Ivano Galdi),我特别感谢尼尔·邓肯(Niall Duncan)的出色工作,他审阅了整本书的技术内容,改进了书写风格。

本书的材料深受我与皮耶罗马尔·科瓦蒂(Piero Malcovati)交往的影响,我感谢他对本书的贡献。

意大利帕维亚,2007

弗朗哥·马洛贝蒂(Franco Maloberti)

目录

译者的话

前言

第 1 章 背景知识与基础	(001)
1.1 理想的数据转换器	(001)
1.2 采样	(002)
1.2.1 欠采样(Undersampling)	(009)
1.2.2 采样时间的抖动	(010)
1.3 幅度的量化	(014)
1.3.1 量化噪声	(015)
1.3.2 量化噪声的性质	(016)
1.4 kT/C 噪声	(020)
1.5 离散与快速傅里叶变换	(022)
1.5.1 加窗	(023)
1.6 编码方案	(028)
1.7 D/A 转换器	(030)
1.7.1 理想的重建	(030)
1.7.2 实际的重建	(031)
1.8 $\mathcal{Z}$ 变换	(034)
参考文献	(040)
第 2 章 数据转换器规格	(041)
2.1 数据转换器类别	(041)
2.2 工作条件	(042)
2.3 转换器性能参数	(043)
2.3.1 基本特性参数	(043)

2.4	静态性能参数	(045)
2.5	动态性能参数	(052)
2.6	数字和开关性能参数	(064)
	参考文献	(066)
第3章	奈奎斯特率数模转换器	(067)
3.1	概述	(067)
3.1.1	DAC 的应用	(068)
3.1.2	电压和电流基准	(069)
3.2	转换器的类型	(070)
3.3	电阻型架构	(071)
3.3.1	电阻分压器	(072)
3.3.2	X-Y 选择	(073)
3.3.3	输出电压的建立	(074)
3.3.4	分段架构	(077)
3.3.5	失配的影响	(078)
3.3.6	修正与校准	(081)
3.3.7	数字电位器	(084)
3.3.8	R-2R 梯形网络 DAC	(084)
3.3.9	毛刺消除	(091)
3.4	电容型架构	(092)
3.4.1	电容分压 DAC	(093)
3.4.2	容性 MDAC	(096)
3.4.3	翻转式 MDAC	(097)
3.4.4	电容-电阻混合型 DAC	(098)
3.5	电流源型架构	(099)
3.5.1	基本工作原理	(099)
3.5.2	单位电流产生器	(101)
3.5.3	单位电流源选择的随机失配	(105)
3.5.4	电流源选择方案	(106)
3.5.5	电流切换和分段	(108)
3.5.6	电流源切换	(112)
3.6	其它架构	(114)
	参考文献	(121)

第4章 奈奎斯特率模数转换器	(124)
4.1 引言	(124)
4.2 定时的精确性	(126)
4.2.1 亚稳态误差	(128)
4.3 全闪速转换器	(129)
4.3.1 参考电压	(130)
4.3.2 比较器的失调	(132)
4.3.3 失调的自动调零	(134)
4.3.4 实际的限制	(137)
4.4 子分区法和两步法的转换器	(138)
4.4.1 精度要求	(140)
4.4.2 作为非线性过程的两步转换	(145)
4.5 折叠与内插	(146)
4.5.1 双重折叠	(147)
4.5.2 插值	(148)
4.5.3 闪速转换器中使用插值	(149)
4.5.4 折叠结构中使用插值	(150)
4.5.5 插值用于提高线性度	(151)
4.6 时间交错转换器	(154)
4.6.1 精度要求	(155)
4.7 逐次逼近转换器	(158)
4.7.1 误差与误差校正	(159)
4.7.2 电荷再分配	(162)
4.8 流水线转换器	(163)
4.8.1 精度要求	(166)
4.8.2 数字校正	(167)
4.8.3 动态性能	(173)
4.8.4 采样数据的余量产生器	(176)
4.9 其他结构	(177)
4.9.1 循环(或算法)转换器	(177)
4.9.2 积分转换器	(178)
4.9.3 电压-频率转换器	(180)
参考文献	(183)

第 5 章 数据转换器电路	(185)
5.1 采样-保持电路	(185)
5.2 二极管桥式采样-保持电路	(186)
5.2.1 二极管桥的缺点	(187)
5.2.2 改进的二极管桥	(188)
5.3 开关射极跟随器	(188)
5.3.1 电路实现	(190)
5.3.2 双极型互补采样-保持电路	(191)
5.4 双极型采样-保持电路的特点	(192)
5.5 CMOS 采样-保持电路	(196)
5.5.1 时钟馈通	(198)
5.5.2 时钟馈通补偿	(199)
5.5.3 两级 OTA 构成的跟踪-保持(T&H)电路	(200)
5.5.4 CMOS 采样-保持(S&H)电路中虚拟地的使用	(202)
5.5.5 噪声分析	(203)
5.6 低电源电压下的 CMOS 开关	(208)
5.6.1 开关自举电路	(209)
5.7 折叠放大器	(212)
5.7.1 电流折叠	(212)
5.7.2 电压折叠	(213)
5.8 电压-电流转换器	(214)
5.9 时钟产生	(218)
参考文献	(220)
第 6 章 过采样和低阶 $\Sigma\Delta$ 调制器	(222)
6.1 概述	(222)
6.1.1 Δ 和 $\Sigma\Delta$ 调制	(223)
6.2 噪声整形	(224)
6.3 一阶调制器	(226)
6.3.1 直观看法	(230)
6.3.2 1 位量化的使用	(231)
6.4 二阶调制器	(233)
6.5 电路设计问题	(234)

6.5.1	失调	(235)
6.5.2	运算放大器有限增益	(235)
6.5.3	运放的有限带宽	(238)
6.5.4	有限的运算放大器压摆率	(239)
6.5.5	ADC 的非理想特性	(241)
6.5.6	DAC 的非理想特性	(242)
6.6	结构设计问题	(242)
6.6.1	积分器的动态范围	(242)
6.6.2	动态范围优化	(247)
6.6.3	数据采样电路的实现	(253)
6.6.4	噪声分析	(254)
6.6.5	量化误差与抖动(dither)	(258)
6.6.6	1 位和多位量化器	(260)
	参考文献	(264)

第 7 章 高阶 $\Sigma\Delta$ ADC、连续时间 $\Sigma\Delta$ ADC 和 $\Sigma\Delta$ DAC

		(266)
7.1	信噪比(SNR)增强技术	(266)
7.2	高阶噪声整形	(268)
7.2.1	单级结构	(270)
7.2.2	稳定性分析	(272)
7.2.3	加权反馈求和	(273)
7.2.4	具有局部反馈的调制器	(276)
7.2.5	带分布式反馈的积分器链	(278)
7.2.6	级联 $\Sigma\Delta$ 调制器	(279)
7.2.7	MASH 的动态范围	(282)
7.3	连续时间 $\Sigma\Delta$ 调制器	(286)
7.3.1	采样保持电路的局限性	(287)
7.3.2	连续时间调制器的实现	(289)
7.3.3	根据等价的采样数据调制器设计连续时间调制器	(292)
7.4	带通 $\Sigma\Delta$ 调制器	(295)
7.4.1	N 路径时间交织的结构	(298)
7.4.2	NTF 的合成	(302)
7.5	过采样 DAC	(304)

7.5.1	1 位 DAC	(305)
7.5.2	双归零 DAC	(308)
	参考文献	(313)
第 8 章	数字增强技术	(316)
8.1	简介	(316)
8.2	误差测量	(317)
8.3	元件的修正(Trimming)	(318)
8.4	前台校准	(320)
8.5	后台校准	(323)
8.5.1	时间交织转换器中的增益和失调	(325)
8.5.2	无冗余硬件的失调校准	(326)
8.6	动态匹配	(329)
8.6.1	蝶形随机化(Butterfly Randomization)	(331)
8.6.2	各体层面的平均	(336)
8.6.3	数据加权平均	(339)
8.7	抽取与插值	(344)
8.7.1	抽取	(345)
8.7.2	内插	(348)
	参考文献	(352)
第 9 章	D/A 和 A/D 转换器测试	(355)
9.1	概述	(355)
9.2	测试板	(356)
9.3	质量和可靠性测试	(359)
9.4	数据处理	(360)
9.4.1	最佳拟合曲线(Best-fit-line)	(360)
9.4.2	正弦波拟合	(361)
9.4.3	直方图法	(362)
9.5	DAC 静态测试	(366)
9.5.1	转换曲线测试	(367)
9.5.2	误差叠加(Superposition of Errors)	(367)
9.5.3	非线性误差	(368)
9.6	DAC 动态测试	(369)

9.6.1	频谱特性	(369)
9.6.2	转换时间	(370)
9.6.3	毛刺能量	(372)
9.7	ADC 静态测试	(373)
9.7.1	数字码边沿测量	(374)
9.8	ADC 动态测试	(376)
9.8.1	时间域参数	(376)
9.8.2	提高正弦波的频谱纯度	(377)
9.8.3	孔径不确定性测量	(379)
9.8.4	稳定时间(settling-time)测量	(381)
9.8.5	FFT 测试的使用	(381)
	参考文献	(384)
	索引	(385)

第 1 章

背景知识与基础^{1①}

本章我们将讨论必要的背景知识,以便正确地理解和设计数据转换器。在电子电路中,数据转换器是模拟和数字世界之间的接口。从概念上讲,数据转换器对信号进行转换:从连续时间和连续的幅值转换为离散时间和量化幅值;反之亦然。从本质上讲,这种转换是一种非线性变换。我们将看到,这些数据转换会影响信号的频谱,有时可能会修改信号的信息内容。因此,熟悉数据转换的理论意义,并意识到在研究数据转换器中所使用近似方法的限制是十分重要的。此外,为分析和表征采样数据系统将使用一些数学工具,关于这些工具的适当知识是必要的。

1.1 理想的数据转换器

模拟到数字(A/D)或数字到模拟转换器(D/A)的基本操作可以分解成顺序的简单基本步骤。图 1.1(a)把 A/D 转换器表示为四个功能的级联:连续时间抗混叠滤波、采样、量化和数据编码。在接下来的几节我们将研究:连续时间滤波器为什么是必要的,采样和量化对信号会产生什么样的影响。最后,我们将讨论在数字域表示信号的几种不同的编码方案。

D/A 转换器实现两个基本功能:一是码转换阶段,把数字输入转换成等价的模拟信号;另一个是对模拟信号的重建。我们将看到,重建的作用是去除采样数据模拟信号的高频成分。如图 1.1(b)所示,重建信号用两个步骤完成:采样与保持和紧跟着的一个低通重建滤波器。我们将在本章的稍后几节研究 D/A 功能的有关特性。

① 此数字为原版书页码,以下类推。

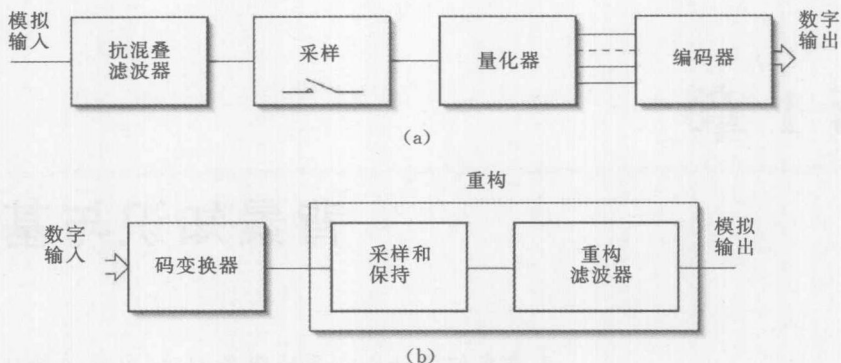


图 1.1 A/D 转换器(a)和 D/A 转换器(b)的基本功能框图

1.2 采样

采样器把一个连续时间信号转换成其采样数据的等效。理想情况下,采样器产生一个 δ 函数(译者注:即单位冲激函数)的序列,序列中每个 δ 函数的值等于相应采样时间的信号幅度。对于周期为 T 的均匀采样,采样器的输出为

$$x^*(t) = x^*(nt) = \sum x(t)\delta(t - nT) \quad (1.1)$$

图 1.2 显示了一个连续时间信号的波形和由此产生的采样的数据信号。正如式(1.1)描述的,该采样数据的形式是通过加权 δ 函数进行叠加得到的。然而,实际的电路不能产生 δ 函数,而是产生一定持续时间的脉冲,该脉冲的幅值等于输入信号在采样时刻的值。不管脉冲的形状和持续时间如何,该脉冲只是用来表示在准确的采样时间(nT)的输入。

式(1.1)概述了采样操作中固有的非线性:输入信号与 δ 函数序列相乘(注意,乘法是一种非线性操作)。因此,如图 1.3 所示,对信号进行采样相当于该信号与 δ 序列的混频。

3

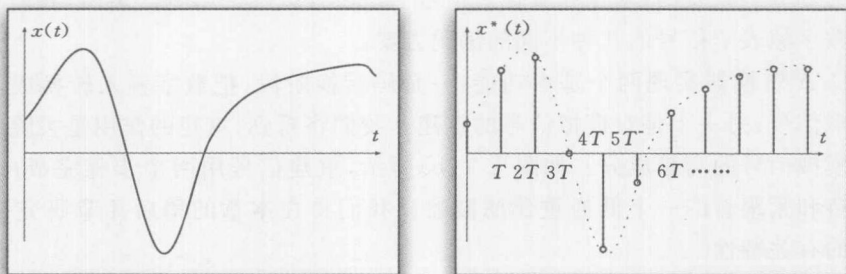


图 1.2 连续时间信号(左)和采样数据表示(右)