

数 据 转 换 器

[英] G. B. 克莱顿 · 著

王 春 元 译

何 国 森 校

上海科学技术文献出版社

Data Converters

G. B. Clayton

First published 1982 by
THE MACMILLAN PRESS LTD

数 据 转 换 器

【英】G. B. 克莱顿 著

王春元 译

何国森 校

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海市武康路2号)

新华书店上海发行所发行
上海商务印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 9 字数 217,000

1985年7月第1版 1985年7月第1次印刷

印数: 1—14,800

书号: 15192·396 定价: 1.65 元

《科技新书目》94-123

序 言

超大规模集成电路的发展，掀起了使用数字处理技术的高潮，促使人们必须重视模拟和数字系统间接口部件的作用。数据转换器就是这种接口部件。它们虽曾被工程师一度认为昂贵而专门化的装置，而现在已经平凡无奇。它们可作为整体的功能单元，以模块形式或廉价的集成电路形式提供。对现代电子仪器技术感兴趣的人，都应该熟悉或了解这些器件的操作、能力和范围。本书拟提供这方面的基础知识。

本书前三章讨论数据转换器的操作原理。重点放在大量常用器件的共性原理上。给出一些具体器件及其引脚的方法，但只是为了说明原理，并为读者进行实验提供方便，有助于学习。对转换器件的实验研究，可使工程师实际了解器件的操作；也可使初次接触此新课程的学生，排除往往会遇到的学习障碍。

第四章和第五章综述转换器的应用范围。描述信号采样和数据采集系统的构成原理。对转换器工作要用到的一些其它功能器件，诸如多路开关和采样/保持器，也作了介绍。未对信号处理的原理作完整的推导，而使本书致力于讨论对数据采集系统的设计者和使用者感兴趣的最有现实意义的原理。有关转换器与微处理器连接上的考虑方法也有所讨论。

本书的最后一章，提出实际转换器应用实施步骤的建议。归纳数据转换器的术语，并解释了如何理解数据资料中的规格与如何估算误差。讨论了连接或装配数据转换系统时应遵循的要点。

本书概括了当前常用转换器件的种类，但并不企图对具体器件进行罗列或作详细比较。数据转换器件是处于爆发性发展的状况，读者应以器件制造厂发表的文献，作为现有品种最新信息的最可靠来源。本书目的是向读者介绍为理解制造厂发表的数据资料与应用方面所必要的基本知识。

本书的直接对象是从事实工作的电子工程师，他们以前只是纯模拟或者纯数字工程师，但现在发现他们必须进入两者结合领域。本书也可作为电子工程以及量测科学的学生使用数据转换器时的实际指导。本书所选取实际方法对于许多业余电子爱好者也是有用的资料。

自评练习列于各章之尾。提供了全部练习的解答。练习是为读者提供一种自评方法，以此加深其对本课程的理解。

J. Daves 夫人为本书打印手稿，D. McLuckey 帮助绘图，J. Anderson 帮助实验并连接本书中描述的一些系统，在此表示谢意。

G. B. 克莱顿

目 录

第一章 模拟到数字和数字到模拟的转换	(1)
1.1 转换器的用途	(1)
1.2 数字代码	(2)
1.3 转换关系	(5)
1.4 十进制代码	(8)
1.5 双极性代码	(10)
1.6 自评练习	(12)
第二章 数模转换器	(16)
2.1 DAC 功能的实现	(16)
2.2 模拟量的读出	(17)
2.3 $R-2R$ 梯形网络的使用	(19)
2.4 实际的 DAC	(23)
2.5 DAC 性能的测试	(24)
2.6 双极性编码的 DAC	(31)
2.7 DAC 上加入数字数据存贮寄存器	(37)
2.8 建立时间, 瞬变误差, 尖峰信号	(40)
2.9 自评练习	(43)
第三章 模数转换技术	(48)
3.1 反馈型 A/D 转换器	(48)
3.2 斜梯型 A/D 转换器	(49)
3.3 跟踪型 A/D 转换器	(52)
3.4 逐次逼近型 A/D 转换器	(58)

3.5	实际的逐次逼近型 A/D 转换系统·····	(62)
3.6	逐次逼近型 A/D 转换器的转换时间·····	(71)
3.7	逐次逼近型转换器中加入输出数字存贮寄存器 ·····	(73)
3.8	用于 A/D 转换的积分技术·····	(75)
3.9	双积分型 A/D 转换·····	(75)
3.10	量化-反馈型 A/D 转换 ·····	(80)
3.11	并行 A/D 转换·····	(85)
3.12	比值计的 A/D 转换·····	(87)
3.13	A/D 转换技术的比较 ·····	(92)
3.14	自评练习 ·····	(94)
第四章	数模转换器的应用 ·····	(98)
4.1	数字可编程的电压源和电流源 ·····	(98)
4.2	数字增益控制 ·····	(104)
4.3	数字变量对模拟变量的算术运算 ·····	(110)
4.4	数字标度设定(偏移调零) ·····	(124)
4.5	频率的数字控制 ·····	(127)
4.6	线性锯齿波的数字控制 ·····	(132)
4.7	函数关系的发生 ·····	(134)
4.8	模拟波形的数字发生 ·····	(135)
4.9	自评练习 ·····	(138)
第五章	模拟信号的数字处理 ·····	(141)
5.1	采样原理 ·····	(141)
5.2	采样和数字化, 量化噪声·····	(144)
5.3	采样和数字化的实际实施方法 ·····	(148)
5.4	用逐次逼近型转换器进行采样和数字化 ·····	(152)
5.5	非线性编码 ·····	(155)

5.6	模拟信号采样和数字化的应用	(164)
5.7	数据采集系统中的转换器	(175)
5.8	数据采集系统的特性	(181)
5.9	转换器与微处理器连接	(187)
5.10	自评练习	(197)
第六章	实际考虑的问题	(201)
6.1	设计步骤	(202)
6.2	应用的目标	(202)
6.3	器件的选择	(205)
6.4	了解转换器的性能规格	(207)
6.5	理想的转换功能	(208)
6.6	误差的规格	(213)
6.7	动态响应参数	(226)
6.8	精度	(226)
6.9	转换器的使用	(244)
6.10	自评练习	(250)
参考文献		(253)
自评练习答案		(255)

第一章 模拟到数字和数字 到模拟的转换

1.1 转换器的用途

在科学家和工程师所研究的许多现实系统中, 系统的参数是连续变化的量(模拟变量)。在采用电子量测技术的情况下, 数据是以传感器电输出信号那样的模拟形式取得的。要对模拟数据进行处理、操作和存贮, 使用纯模拟的电子系统是完全可能的。负反馈技术能够使模拟系统十分精确地工作^[1]。然而, 由于高精度的模拟数据难以读出、记录和解译, 纯模拟系统的精度常常不便于使用。而且, 当涉及到大量模拟数据的时候, 数据的分析与存贮要花费极大的工作量。

数字的电子系统可以做到处理快速而精确, 且操作和存贮的数据量可很大。廉价的数字微处理器系统的出现已急剧地降低了实施数字数据处理的费用。以前由于经济上的缘故, 认为不能推广应用电子数字技术的领域, 微处理器已使之成为可能。不过, 数字电路只能操作数字的数据, 科学家要想利用数字技术的能力必须首先将模拟的数据转换为数字的形式。所谓“模数转换器”(ADC)的系统可以实现上述功能, 而称为“数模转换器”(DAC)的系统则实现相反的转换, 即将数字数据转换为模拟形式。ADC和DAC为模拟系统与数字系统之间提供了必要的基本接口。ADC可使数字系统从外界的模拟系统取得信息, 数字系统就能很快处理与分析这些信息。DAC可将这种分析结果回送给模拟系统, 调整或控制其动作。

ADC 和 DAC 并非新器件,只是不久以前它们的价格颇为昂贵,一直被认为是设备中相当专门化的部分。廉价的单片 IC (集成电路)转换器件的出现改变了这种情况:它们可使通用范围较广的信号处理技术为量测科学家经济地所利用,只要他们愿意花费一些时间去熟悉最新的器件及其功能,下述的材料可作为这种熟悉训练的入门。

转换器的发展是如此之快,往往在其达到完备以前就陷于陈旧。我们与其介绍一些常用的器件,还不如着重于一般通用的转换技术原理。具体的 IC 器件也要有所涉及,但只是便于联系实际线路进行讨论,使读者能进行实验估算,在这类学习的训练中“亲手”实践是最好的方法。不过不要认为书中所提到的器件是仅有的品种,也不要认为是“最好”的(从价格/性能的观点看)品种。要为特定的应用选择“最好”的转换器,只有全面了解制造厂的最新产品指南以后才能做到,本书就是为读者在这方面作准备的。

1.2 数 字 代 码

要理解 ADC 或 DAC 的操作,必须对数字数的表示方法有所了解。在电子系统中,数字数是用固定电平之有或无表示的,所采用的数基本上均为二进制。每个信息单位,或称为“位”,有两种可能的状态之一:一种状态称为“断开”、非或 0;另一种状态称为“导通”、是或 1。两种状态用两种电平表示:产生于数字电路的输出端,或者作用于数字电路的输入端。若干电平的组合称为“字”,它们以并行方式同时在一组输入端上或同时在一组输出端上出现;也可以串行方式(按时间的顺序)在单个输入端或单个输出端上出现。

串行数字数据的传送与并行数字数据传送之间的差别如图

1.1 图解所示。串行传送中,时间顺序上首先出现的位称为“最高有效位”(MSB);最后出现的位称为“最低有效位”(LSB)。串行字的各位以相同的时间周期出现在传输线上。并行传送中,各位由不同的传输线传送,其有效位的次序必须有所指定。串行数据传送具有经济而简单的优点(它只要一根传输线),但是速度较慢。并行数据传送的优点是速度较快,各位是同时传送与处理的。串行传送中,信息每次传送一位,传送一个字的时间与字长(字中的位数)有关。

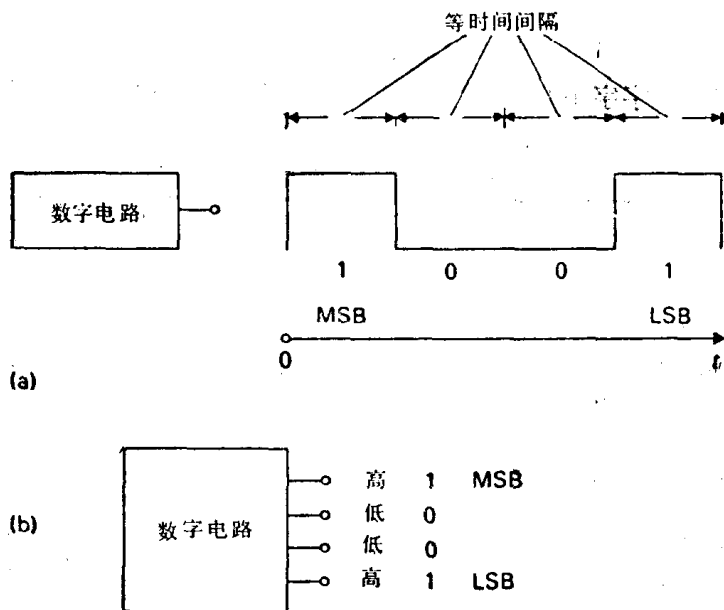


图 1.1 对字 1001 作串行和并行的数字数据传送

(a) 串行 4 位数字字; (b) 并行 4 位数字字

由位的序列可组成各种不同字的数目,显然与序列中的位数有关。譬如, 2 位可以组成 4 个不同的字; 3 位可组成 8 个字; 4 位可组成 16 个字; n 位可组成 2^n 个字。若用一个数字的

字代表一个数,则必须要用代码,以定义每个字与数之间的一一对应关系。当然可能随意定义一种代码,不过最通用的代码是“自然二进制”。在自然二进制代码中,数字字每一位所带的权或者倍数为2的乘方。乘方的值取决于字中位的位置。现考虑数字字1001,若此字用自然二进制代码表示一个数,则有:

位		权	
MSB			LSB
2^3	2^2	2^1	2^0
1	0	0	1

故 $1 \times 2^0 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^3 = 9$

因此,数字字1001代表了相当于十进制数9的自然二进制数

表 1.1 小数二进制代码

十 进 制 分 数	二进制小数	MSB ($\times 1/2$)	第2位 ($\times 1/4$)	第3位 ($\times 1/8$)	第4位 ($\times 1/16$)
0	0.0000	0	0	0	0
$1/16 = 2^{-4}$ (LSB)	0.0001	0	0	0	1
$2/16 = 1/8$	0.0010	0	0	1	0
$3/16 = 1/8 + 1/16$	0.0011	0	0	1	1
$4/16 = 1/4$	0.0100	0	1	0	0
$5/16 = 1/4 + 1/16$	0.0101	0	1	0	1
$6/16 = 1/4 + 1/8$	0.0110	0	1	1	0
$7/16 = 1/4 + 1/8 + 1/16$	0.0111	0	1	1	1
$8/16 = 1/2$ (MSB)	0.1000	1	0	0	0
$9/16 = 1/2 + 1/16$	0.1001	1	0	0	1
$10/16 = 1/2 + 1/8$	0.1010	1	0	1	0
$11/16 = 1/2 + 1/8 + 1/16$	0.1011	1	0	1	1
$12/16 = 1/2 + 1/4$	0.1100	1	1	0	0
$13/16 = 1/2 + 1/4 + 1/16$	0.1101	1	1	0	1
$14/16 = 1/2 + 1/4 + 1/8$	0.1110	1	1	1	0
$15/16 = 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16$	0.1111	1	1	1	1

1001。

转换器的应用中适宜于用小数代码，每个数字字用以表示满量程的几分之几。在 ADC 中，满量程是指模拟输入电压的最大值；在 DAC 中，则是模拟输出的最大值。 n 位自然二进制的小数代码中，MSB（第 1 位）赋有权 $2^{-1}\left(\frac{1}{2}\right)$ ，而 LSB（第 n 位）赋有权 2^{-n} 。与具体自然二进制小数字相当的十进制分数，只要将非零位的权相加即可求得。表 1.1 所示的例子，表示了 16 个十进制分数可用 4 位二进制小数代表。请注意：在使用自然二进制小数代码的转换器中， n 位全为 1 的数字字相当于满量程的 $1-2^{-n}$ ，即比满量程少一个 LSB。

1.3 转换关系

理想转换器中输入与输出之间所存在的关系可以用图解说明。图 1.2 给出了一个例子：假定使用的是自然二进制代码；且为了简化起见，只考虑了 3 位转换。对 3 位 DAC 数字输入可取 8 种不同的状态，产生 8 种不同的模拟输出信号，范围为从 0 到满量程的 $\frac{7}{8}$ 。无其它电平可以存在，图形[图 1.2(a)]呈一直线。要注意：DAC 产生的最大输出信号总是比标称的满量程少一个 LSB。

作用于 ADC 的模拟输入信号应该可取满量程以下的所有值，但是在 3 位转换器中只可能有 8 种不同状态的数字输出字。必须将模拟输入值的连续区划分(量化)为 8 个离散区间，如图 1.2(b)所示。在一定区间内的所有模拟输入值产生相同的数字输出字，而此数字输出字取值为区间中心模拟值的数字输出。数字输出的转变可以认为发生在模拟输入值等于区间中心值两侧

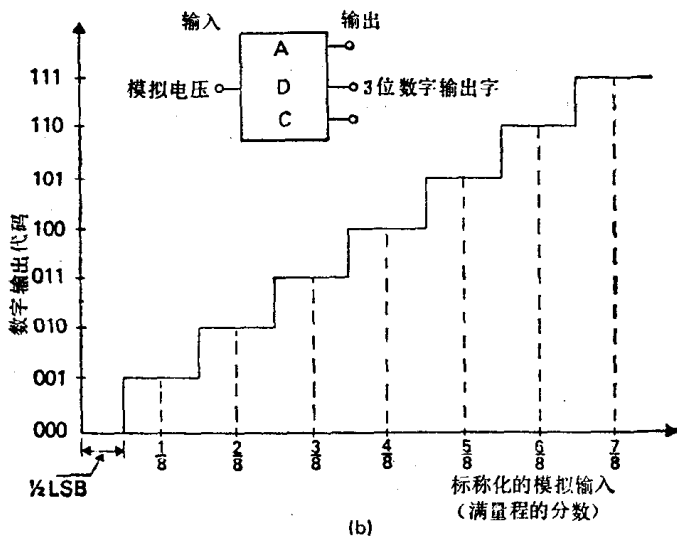
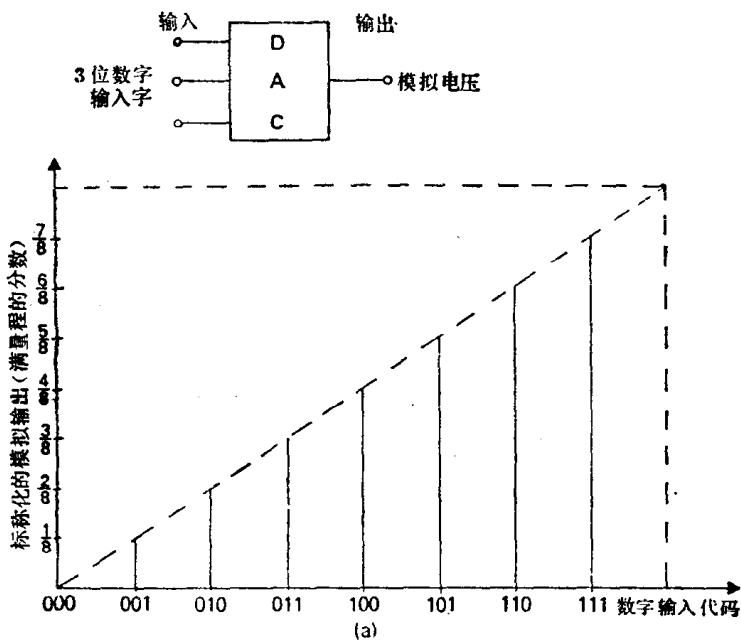


图 1.2 3 位转换器采用自然二进制代码的理想转换关系
(a) 理想的 3 位 DAC; (b) 理想的 3 位 ADC

$\pm \frac{1}{2}$ LSB 处。由于量化的需要,在任何模数转换器中均存在着固有不定性(量化不定性),其值为数字输出的 $\pm \frac{1}{2}$ LSB。

设想转换器位数增加时理想转换器的关系形式。位数越多,最低有效位的权越小,理论上转换过程就相应会有较高的分辨率和精度。任何转换方式都有实际的困难,即实际转换器在精度上达不到理论分辨率的极限。为了方便起见,将实际转换器的误差处理方法延到以后章节(见第六章)中讨论。

必须记住,自然二进制只是许多种可能的数字代码之一。在有些转换器的应用中,采用另一些代码则更为方便。自然二进制代码中,在计数序列的许多阶段要求若干位同时改变状态。例如,从表 1.1 的 4 位自然二进制代码中可以看到,十进制分数在

表 1.2 4 位二进制代码与格兰码比较

十 进 制 分 数	格 兰 码	二 进 制 代 码
0	0000	0000
1/16	0001	0001
2/16	0011	0010
3/16	0010	0011
4/16	0110	0100
5/16	0111	0101
6/16	0101	0110
7/16	0100	0111
8/16	1100	1000
9/16	1101	1001
10/16	1111	1010
11/16	1110	1011
12/16	1010	1100
13/16	1011	1101
14/16	1001	1110
15/16	1000	1111

7/16 和 8/16 之间转变时,所有 4 位必须同时改变状态。显然,对于采用此种代码的实际转换器,若处于转变的 MSB 略超前于其它较低有效位改变了状态,则代码在一个短时间内是很乱的。有些转换器采用了所谓“格兰码”(Gray code),以消除出现此种不正确中间代码的可能性。

格兰码是二进制代码,其中相邻代码之间的转变每次只涉及到一位改变状态。格兰码中,位的位置并不表示权,但此代码的每一个数字仍旧代表模拟范围内的特定区间。表 1.2 列出了 4 位自然二进制码与格兰码的比较。

1.4 十进制代码

数字电路使用了二进制的运算方式,只能处理以二进制形式编码的数据。然而,大多数人只熟悉十进制运算。为了克服这个问题,直接与人交互作用的系统与仪器常采用另一种数字代码,将十进制的数以二进制形式编码。数字电压表通常提供十进制显示。它们所采用的 ADC 就是用了十进制代码。数字计算器的用户向计算器输入十进制数,计算器则要将数编码为二进制形式,用二进制运算方式进行计算,并将计算结果返回到十进制形式,提供显示。

十进制数制用了 10 个数字 0, 1, 2, ..., 9。若要将十进制的数编码为二进制形式,每个数字必须用单独的数字字状态表示。组成 10 个不同的数字字,所需的最少位数为 4。一个 4 位字有 16 种可能的状态,其中任意 10 个原则上都能用来表示十进制数制中的 10 个数字。代码的可能种数为

$$16 \times 15 \times 14 \times 13 \times 12 \times 11 \times 10 \times 9 \times 8 \times 7 = \frac{16!}{6!} = 2.9 \times 10^{10}$$

约 30 千兆种可能性,并不需要记得这么多种,只用到有限几种

十进制代码。但确实应提出这样的问题：“为什么不能标准化成一种十进制代码？”以不同方法编码可使常用的数字器件在进行数据处理时，较为方便和有效，这是各种代码发展的原因。

表 1.3 所示的例子是用于转换器的两种十进制代码。8.4.2.1 码是十进制代码，在 A/D 转换器中用得很普遍，通常简称为“二—十进制” (BCD)，因为位的位置权与自然二进制的数制相同。请注意：4 位位组的高端 6 个状态未用到，舍去即可。有些转换器用的是 2.4.2.1 码，其 MSB 位置上位的权为 2，而不是常用的 8。此代码的优点是以全“1”代表(满量程 - LSB)，D/A 转换器用了此种代码后所需电阻的阻值范围较小(见第二章)。

设计成可提供十进制读出的 A/D 转换器，每位输出数字要用到一个二进制的 4 位位组。表 1.4 作为例子列出 0 到 0.99 一些十进制小数的 BCD 编码。请注意：可提供 2 位十进制数字输出的 A/D 转换器中，在输出端出现的信息为 LSB 时，对应的模拟输入幅度为满量程的 0.01。对于 8 位二进制编码的转换

表 1.3 8.4.2.1 和 2.4.2.1 十进制代码

十 进 制 数	8.4.2.1 BCD ($\times 8$) ($\times 4$) ($\times 2$) ($\times 1$)				2.4.2.1 BCD ($\times 2$) ($\times 4$) ($\times 2$) ($\times 1$)			
0				0000				0000
1				0001				0001
2				0010				0010
3				0011				0011
4				0100				0100
5				0101				0101
6				0110				0110
7				0111				0111
8				1000				1110
9				1001				1111

表 1.4 2 位数字 BCD 权举例

十进制小数	二—十进制代码	
	最高有效位组($\times 1/10$) $\times 8 \times 4 \times 2 \times 1$	第 2 位组($\times 1/100$) $\times 8 \times 4 \times 2 \times 1$
$0.00=0.00+0.00$	0000	0000
$0.01=0.00+0.01$	0000	0001
$0.02=0.00+0.02$	0000	0010
$0.03=0.00+0.03$	0000	0011
⋮		
$0.09=0.00+0.09$	0000	1001
$0.10=0.10+0.00$	0001	0000
$0.11=0.10+0.01$	0001	0001
⋮		
$0.30=0.30+0.00$	0011	0000
⋮		
$0.90=0.90+0.00$	1001	0000
$0.91=0.90+0.01$	1001	0001
⋮		
$0.98=0.90+0.08$	1001	1000
$0.99=0.90+0.09$	1001	1001

器, LSB 的幅度是满量程的 $1/(16 \times 16) = 0.0039$ 。从某种意义上说, BOD 是浪费的,因为它只用了 4 位位组 16 种可能状态中的 10 种,一个 BCD 4 位位组提供的分辨率只是自然二进制 4 位位组的 $10/16$ 。

1.5 双极性代码

到现在为止,所讨论的转换器代码已经使标称化的模拟变量幅度(满量程的几分之几)与数字字建立了关系,但尚未考虑模拟信号的极性。为了使用双极性模拟信号的转换,已经设计了许多种代码。在这些双极性代码中,使得数字字所带有的信