

大规模集成数-模和模-数 转换器设计原理

赵保经 蒋建飞 编著

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了集成数-模和模-数转换器的结构类型、设计原理和构思技巧。

本书共十四章。前三章介绍了数-模和模-数转换器的基础知识；第四章论述了转换器中必需采用的各类晶体管的结构设计思想；第五至十一章分别讨论了集成数-模转换器的原理、组成单元(包括权电流发生电路、集成运算放大器、基准电压源及模拟电子开关等)、设计思想和误差分析；第十二至十四章介绍了集成模-数转换器的类别以及低、中、高速模-数转换器的结构设计。

本书可供从事数-模、模-数转换器研制工作的工程技术人员、科研人员阅读参考,也可作为大专院校有关专业师生的参考书。

大规模集成数-模和模-数 转换器设计原理

赵保经 蒋建飞 编著

责任编辑 魏 玲

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16
1986年9月第一次印刷 印张:25
印数:0001—3,800 字数:578,000

统一书号:15031·738

本社书号:4407·15-7

定价: 5.85 元

序 言

1977年,在电子计算机和集成电路领域,出现了两个引入瞩目的技术突破,即微处理机和单片集成数-模(D-A)转换器的研制成功。如果说,微处理机的问世标志着现代电子计算机开始长驱直入各个应用领域的话,那么集成化数-模和模-数(A-D)转换器进入工业生产阶段则为电子计算机的普及应用创造了良好的条件。这是因为当电子计算机一旦越出纯数学计算的范畴而进入象工业自动化控制等应用领域时,必须配备A-D和D-A转换器。

形象地说,当电子计算机“走”向实用领域时,A-D和D-A转换器犹如“影子”似地伴随着电子计算机,哪里有电子计算机,哪里就需要配备A-D和D-A转换器。六十年代末,售价低廉的集成化电子计算机已开始大量涌向市场,但与其配用的A-D与D-A转换器还停留在售价昂贵、制作费时的组件型(用分立元、器件组装)和混合型的生产阶段。随着电子计算机应用范围的迅速开拓,制作高性能、低成本的集成化A-D和D-A转换器就显得更为迫切了。

1971年以来,集成D-A和A-D转换器的设计理论及制作技术的发展速度几乎与微处理机的发展速度相等。多种类型的D-A与A-D转换器陆续问世,各种新的设计思想不断被提出,新的制作技术也层出不穷地涌现出来。鉴于这种情况,我们编写了这本书,试图比较系统和全面地阐明集成D-A和A-D转换器的结构类别、设计原理和构思技巧。

D-A和A-D转换器,特别是A-D转换器的结构和功能比较复杂,它们内部所包含的单元,既有模拟电路,也有数字电路。可以说,大规模集成A-D转换器在目前是模拟与数字两系统相互结合的典型产品之一。作为模拟-数字共存系统的D-A和A-D转换器的显著结构特点之一是MOS电路所占的比重正日益增长。除了原先转换器中的数字部分外,MOS电路已越来越多地被用来构成象模拟电子开关、基准电压源、运算放大器和权电流发生电路等组成转换器所必需的单元。MOS电路的低功耗、高输入阻抗和高集成度等特点,以及MOS电容的良好匹配特性,与双极型电路的高速度等优点巧妙配合、相辅相成,才形成了现时集成D-A和A-D转换器技术的持续进展局面。因此在本书中,有关MOS器件和MOS电路的内容,不能不占有一定的篇幅。

本书共分十四章。第一至三章介绍了有关D-A和A-D转换器的基础知识。第四章论述转换器中所必需采用的各类晶体管的结构设计思想。第五至十一章叙述集成D-A转换器的原理、组成单元、设计思想和误差分析,其中第六至九章分述权电流发生电路、集成运算放大器、基准电压源和模拟电子开关等构成D-A转换器(也包括A-D转换器)的单元组件;第十二至十四章分述集成A-D转换器的类别,以及低速、中速和高速A-D转换器的结构设计。

在编著本书时,作者虽力图将零星分散的有关集成D-A和A-D转换器的资料和知识予以归纳整理和循序渐进地、系统地阐明,但由于D-A和A-D转换器所涉及的面十分

广阔,其中各部分的内容又都有相当深度,限于篇幅,我们只能择要叙述,而对有些问题,也只能提示一下。本书每章末都附有参考文献,读者如欲进一步了解这方面的内容,可迳自查阅有关文献。

由于时间紧迫及作者水平所限,书中难免存在问题,衷心希望有关专家和广大读者予以指正。

赵保经 蒋建飞

1983年10月于上海

目 录

第一章 绪论	1
1.1 A-D 和 D-A 转换器在现代电子技术中的地位和作用	1
1.2 A-D 和 D-A 转换器的功能	2
1.3 集成 A-D 和 D-A 转换器的兴起和发展	5
1.4 集成 A-D 和 D-A 转换器的类别	6
1.5 集成 A-D 和 D-A 转换器的技术进展	8
参考文献	16
第二章 集成 A-D 和 D-A 转换器的主要术语和参数	17
2.1 常用基本术语	17
2.2 A-D 转换器的主要参数	26
2.3 D-A 转换器的主要参数	31
参考文献	33
第三章 数码转换与表示法	34
3.1 计数方法	34
3.2 数码转换基本法则	36
3.3 原码、补码与反码	43
3.4 集成 D-A 和 A-D 转换器中的数码表示	48
参考文献	53
第四章 集成 D-A 和 A-D 转换器中晶体管的设计	54
4.1 概述	54
4.2 集成 D-A 和 A-D 转换器中的双极型晶体管	54
4.3 集成 D-A 和 A-D 转换器中的 MOS 场效应晶体管	79
参考文献	92
第五章 集成 D-A 转换器的基本类型与工作原理	93
5.1 集成 D-A 转换器的基本类型	94
5.2 集成 D-A 转换器的原理和结构	94
5.3 权电阻网络集成 D-A 转换器的基本原理	95
5.4 权电容网络集成 D-A 转换器的基本原理	100
5.5 $R-2R$ 梯形电阻网络集成 D-A 转换器的基本原理	104
5.6 电阻网络改进型集成 D-A 转换器基本原理	110
5.7 电容网络改进型集成 D-A 转换器	122
5.8 具有电流源阵列的集成 D-A 转换器	126
5.9 串行集成 D-A 转换器	127
5.10 集成注入逻辑型 D-A 转换器	128
参考文献	130
第六章 集成 D-A 转换器中的权电流发生电路	131
6.1 集成电阻和集成电容	131

6.2	梯形电阻网络的设计方程	144
6.3	集成电阻的端接方法	151
6.4	集成电阻的微调技术	155
6.5	基本电流发生电路的设计考虑	156
	参考文献	161
第七章	集成 D-A 转换器中的运算放大器	162
7.1	引言	162
7.2	基本特性和参数	166
7.3	设计考虑	173
	参考文献	194
第八章	集成 D-A 和 A-D 转换器中的基准电压源	195
8.1	双极型基准电压源	195
8.2	NMOS 基准电压源	210
8.3	CMOS 基准电压源	219
8.4	以多晶硅栅功函数差为基准的 MOS 基准电压源	222
	参考文献	226
第九章	集成 D-A 和 A-D 转换器中的模拟电子开关	227
9.1	基本类型	227
9.2	双极晶体管模拟开关结构与工作原理	230
9.3	结型场效应晶体管模拟开关的结构与工作原理	238
9.4	绝缘栅场效应晶体管模拟开关的结构与工作原理	241
9.5	用于模拟开关的器件特性	248
	参考文献	254
第十章	单片集成 D-A 转换器	255
10.1	单片集成 6 位 D-A 转换器	255
10.2	单片集成 8—10 位 D-A 转换器	260
10.3	单片集成 10 位 D-A 转换器	265
10.4	单片集成 12 位 D-A 转换器	276
10.5	单片集成 14 位 D-A 转换器	284
10.6	单片集成 16 位 D-A 转换器	289
	参考文献	290
第十一章	集成 D-A 转换器的误差分析	291
11.1	集成 D-A 转换器误差的一般描述	291
11.2	集成 D-A 转换器各基本组成单元的误差分量的估计	292
11.3	集成 D-A 转换器误差分析实例	296
11.4	集成 D-A 转换器对匹配精度的要求	299
	参考文献	301
第十二章	集成 A-D 转换器的类型和基本原理	302
12.1	按器件结构不同进行分类的 A-D 转换器	302
12.2	按设计原理不同进行分类的 A-D 转换器	303
12.3	按性能特点进行分类的 A-D 转换器	309
12.4	A-D 转换器的传递函数和量化与采样过程	310

参考文献	314
第十三章 低速集成 A-D 转换器	315
13.1 斜波式 A-D 转换器	315
13.2 单积分型 A-D 转换器	316
13.3 二重积分型(双积分型) A-D 转换器	317
13.4 四重积分型 A-D 转换器	325
13.5 完全补偿型(改进型)四重积分 A-D 转换器	328
13.6 五相积分型 A-D 转换器	330
13.7 δ 脉冲幅度调制型 A-D 转换器	331
13.8 电荷平衡型 A-D 转换器	334
13.9 量子化反馈型 A-D 转换器	335
13.10 二重平衡型 A-D 转换器	339
13.11 复合型 A-D 转换器	342
13.12 各种类型低速 A-D 转换器的比较	346
附录 低速 A-D 转换器产品实例	347
参考文献	354
第十四章 中、高速集成 A-D 转换器	356
14.1 逐次近似比较型 A-D 转换器的原理与特点	356
14.2 逐次近似比较型 A-D 转换器的分类	358
14.3 中速逐次近似比较型 A-D 转换器	362
14.4 高速逐次近似比较型 A-D 转换器	363
14.5 同时采用电阻和电容网络的电荷比较型 A-D 转换器	371
14.6 采用等值电容的电荷比较型 A-D 转换器	377
14.7 高速高分辨率 A-D 转换器设计实例	380
14.8 数字音频技术中使用的 16 位 A-D 转换器	387
参考文献	390

第一章 绪 论

1.1 A-D 和 D-A 转换器在现代电子技术中的地位和作用

(数字信号和模拟信号是两种性质迥然不同的信号,但在许多情况下我们要求将这两种信号彼此进行转换,即将所需要的数据由数字量转换成模拟量,或者反之,将模拟量转换成数字量。这时就需要借助 D-A 转换器和 A-D 转换器来实现上述数字量和模拟量之间的转换。)

电子式 D-A 和 A-D 转换器的发展历史最早可追溯到二次世界大战末期。那时,一门新的科学分支——信息论正在崛起,它预示了数字通信技术将得到迅速发展。这种新颖的通信技术的最大特点是信息以数字形式送出去,并以数字形式被接收下来。理论和实践都表明,这是一种可靠、经济、保密和方便的通信方法。显然,要实现数字通信,首先在发射端必须将所要传送的声音、图象等连续变化的模拟量转换成相应的、分离的数字量发送出去;而在接收端,还必须将所接收到的数字量还原成声音、图象等模拟量。为此人们开始研制和发展了 A-D 和 D-A 转换器。所以 A-D 和 D-A 转换器最早是应数字信息的传输需要而出现的。

但是 D-A 和 A-D 转换器真正的光辉年华还是从六十年代开始的。这也与电子计算机的日益普及应用有密切关系。从某种意义上说,A-D 和 D-A 转换器的命运是和电子计算机紧密相连的。它虽不是应电子计算机的需要而诞生,却是随着电子计算机的普及应用而蓬勃发展起来。

在早期,人们利用电子计算机的快速万算能力单独地在实验室中进行数学运算。但后来当要求电子计算机冲破实验室的范畴去解决各类实际问题时,马上就碰到模拟量和数字量之间的转换问题。这是因为根据“自然不能突变”的法则,在自然界中,几乎所有变量,如电流、电压、电阻、压力、流量、温度、功率、厚度、长度、距离、速度、重量、光强、时间……等等,包括电、磁、光、热、声和机械等方面的所有变量,从本质上来说,都是以连续可变的模拟量形式出现的。然而数字电子计算机只能识别数字量和仅能对数字量进行处理,因此电子计算机的推广普及应用问题首先归结为如何获得高性能和低售价的 A-D 与 D-A 转换器。

尽管数字电子计算机仅能进行算术运算(或逻辑运算),也就是从本质上来说只能解决纯数学问题,但一旦配备 A-D 与 D-A 转换器后,它就能“随心所欲”地被用来解决各种各样的实际问题,大至控制导弹和飞船的飞行和进行水利大坝的最佳坡度设计,小至家庭烹调菜肴的最佳火候选取。这是因为在自然界或日常生活中,各种过程或现象虽然千差万别,但是当人们用数学关系式表示它们时,却呈现出惊人的相同。如钟摆的摆动与电磁振动有共同的数学表达式,船舶在波浪起伏的大海中摇荡和太阳系中各星球在太阳引力下运动的数学方程表达式几乎完全一致。再有,当地震发生时,地球地壳的振动和宇宙

间大恒星的晃动也可用同一数学方程来表达。还有我们生活中碰到的各种互不关连的现象,在数学领域中,它们也都不分彼此地联系在一起了。

因此,任何过程,不管如何复杂,只要弄清了该过程的物理实质,人们总可以用一些代数方程、微积分方程或其他复杂的数学关系式将该过程表达和描述出来。当配上 A-D 和 D-A 转换器后,也就可以通过电子计算机进行一定顺序的算术运算或逻辑运算,进而达到分析和控制该过程的目的,或找出正确的答案。所以随着人们愈来愈广泛地利用电子计算机来处理大量数据,A-D 和 D-A 转换器的重要性也愈加突出了。

当然,除了进行数据处理外,电子计算机也大大地促进了数字信息传输技术的发展,赋予数字通信以新的生命力,从而愈来愈多的电报、电话、电视和广播采用数字化通信方式。这也进一步衬托出 A-D 和 D-A 转换器的重要性。

在其他电子系统中,A-D 和 D-A 转换器的重要作用也日益显示出来。特别是在数字化仪表系统中,A-D 和 D-A 转换器正以它们自己特有的功能发挥着作用。此外,在计量、摄影、自动显示、疾病自动诊断和各种检测控制系统中,都少不了 A-D 和 D-A 转换器。

1.2 A-D 和 D-A 转换器的功能

A-D 转换器的功能就是能将连续变化的模拟量转变成相应的多位数字量。

如有一个随时间 t 改变的模拟量(如声音、图象等) $x(t)$ [见图 1-1(a)],经过 A-D 转

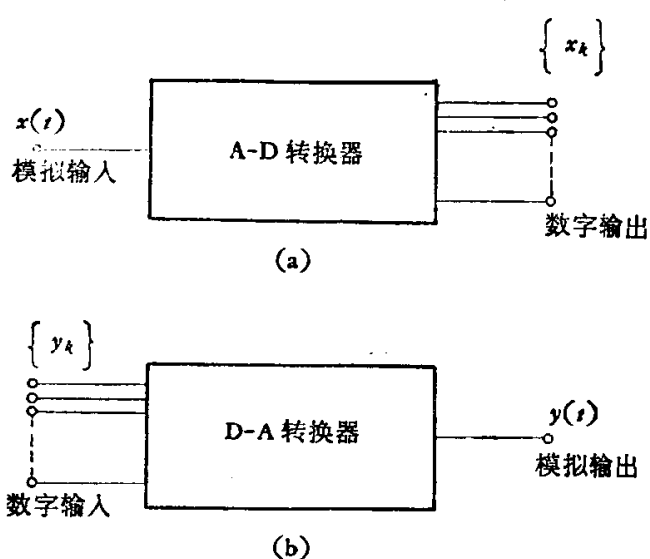


图 1-1 A-D 和 D-A 转换器原理框图

换器后,就被转换成离散的、具有一定位数的一串数字量 x_k 。即在 A-D 转换器的输出端可得到一组与 $x(t)$ 相对应的具有预定位数的数字代码 x_k 。

由于实际存在的模拟量,除了电学模拟量(如电流、电压、电阻等)外,还包括声、光、磁、热、机械等各个方面非电的物理模拟量,所以在进行 A-D 转换之前,必须对它们进行“归一化”,即把各类物理模拟量转换成相应的电学模拟量,通常转换成电压或电流。这一过程常称为“换能”过程。担任这个任务的器件就是换能器,或叫传感器。人们称这个转换

为 A-A 转换。所以从广义来说,A-D 转换过程分为两个步骤:先是 A-A 转换,“归一”到电学量;再由 A-D 转换器将电学量转换为数字量。这里以及本书下面所提及的 A-D 转换器是指狭义的 A-D 转换器,即其功能仅是将电学模拟量转换为数字量。

与 A-D 转换器的功能相反,D-A 转换器能将一组具有一定位数的数字代码 y_k 转换为与 y_k 唯一对应的模拟量(模拟电压或电流) $y(t)$, [图 1-1(b)]。

因此,就功能来说,A-D 转换器具有编码功能,而 D-A 转换器具有译码的功能。

图 1-2 清楚地示出了 A-D 和 D-A 转换器在信息数字处理系统中所完成的功能。此

图也表明了 A-D 和 D-A 转换器与数字电子计算机三者之间在数字信息处理中的相互关系。

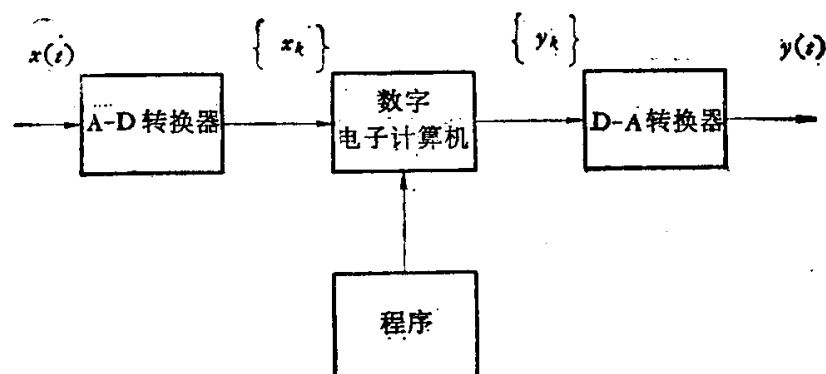


图 1-2 数字信息处理原理

输入的模拟量 $x(t)$ 是已经过换能器的电学模拟量，也正是人们借助电子计算机所要处理的对象，如经话筒输出的声波、地震记录波、心电图波、雷达波、石油层的勘探记录信号、图象电信号等，它们大多是时间 t 的连续函数（连续波形）。当 $x(t)$ 经 A-D 转换器送出一串数字量 $\{x_k\}$ 以后，就被输入到数字电子计算机中。数字电子计算机根据已经贮存在计算机中的程序对 $\{x_k\}$ 进行处理（运算），结果从计算机得到一串输出数 $\{y_k\}$ 。这里放在计算机中的程序则是根据各种特定的数字信息处理的要求而事先编排好的；信息对象不同，程序也不同。例如用于电子线路分析的程序是电子线路计算机辅助分析程序；用于地震波处理的则是地震资料处理程序。这些程序，即是平时人们常说的所谓“软件”。

一般说来，人们总希望能够很快地对信息处理的结果作出判断，并能和未处理前的信息进行对比。所以在数字电子计算机完成了图 1-2 所示的由 $\{x_k\}$ 到 $\{y_k\}$ 的处理过程以后，得到的 $\{y_k\}$ 并不是我们所需的最终结果。我们还必须把它返回到呈现时间 t 的连续函数形式，即把 $\{y_k\}$ 转换成 $y(t)$ 。这一过程是靠图 1-2 中的 D-A 转换器来完成的。所以数字电子计算机必须通过 A-D 和 D-A 转换器作桥梁，才能对模拟量进行处理。

如果我们把图 1-2 所示的数字信息处理的框图改画成图 1-3 的形式，则 A-D 和 D-A 的桥梁或媒介功能将显得更直观了。这里的模拟量是所要处理的对象，数字量即是一连串数字，电子计算机则是处理数字信息的工具。如果我们把 A-D 和 D-A 转换器看作是一个总的系统，用虚线框住，则这个系统人们常称它为“耦合系统”。

还需要进一步指出的是，在数字量和模拟量的处理过程中，人们所采用的方法也是不同的。比如模拟量，对它可以进行并行处理，而数字量一般只作串行处理。由于这个特

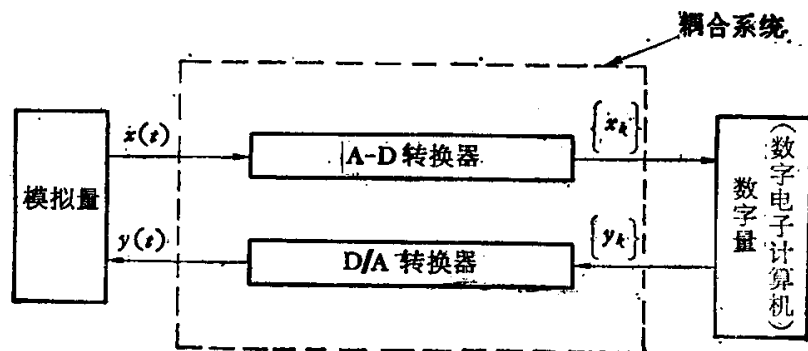


图 1-3 模拟-数字耦合系统框图

点,就要求在耦合系统中增设许多新的部件,它们主要有多路传输器,数字同步装置,信号分离装置,模拟同步装置和定时、控制、程序等装置。所以一个可供实际应用的数字信息处理系统(或者是模拟-数字耦合系统)必须具备图 1-4 中所示的各类部件。下面我们进一步说明这些部件的功能。

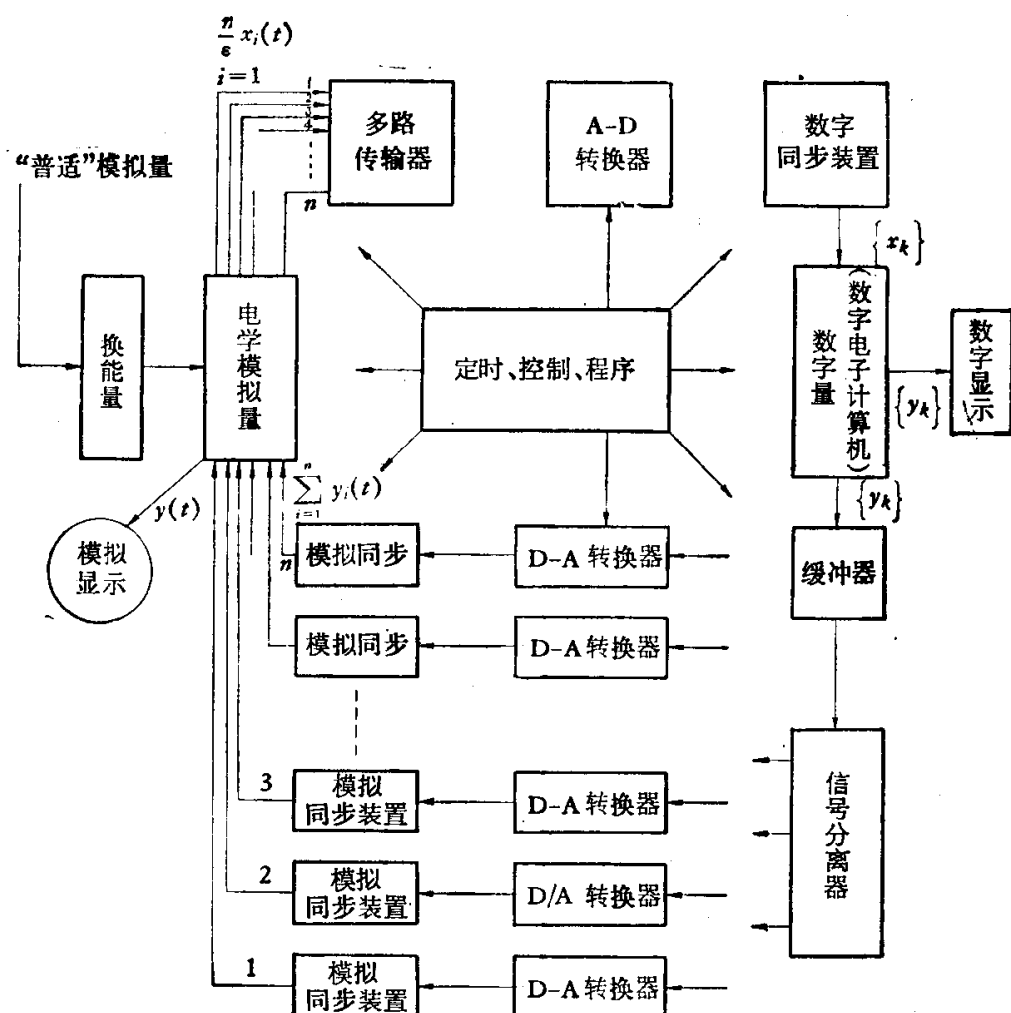


图 1-4 数字信息处理系统详细框图

(1) 多路传输器

注意到模拟部分可以同时并行取出模拟信息,而数字部分必须逐次进行串行工作,就有必要设置多路传输器。多路传输器的任务就是通过开关的依次切换,将所输入的每一个模拟量依次分别加到 A-D 转换器上。显然,多路传输器具有将并行输出的模拟量变换为串行输出模拟量的功能。

(2) A-D 转换器

前已指出,A-D 转换器的任务是将模拟量转换成数字量。在这里,具体地说,A-D 转换器的输出就是与多路传输器中被选中的模拟量相对应的一些二进制代码。通常输出的每一位都以“0”或“1”的形式传送给输出寄存器阵列。

(3) 数字同步位置

数字同步装置是 A-D 转换器和数字电子计算机之间的缓冲器。由于数字电子计算机是遵循时钟脉冲工作的,它不能随时接受 A-D 转换器的输出,缓冲器就是使 A-D 转换器的输出与数字电子计算机的时钟脉冲保持同步的装置。

(4) 信号分离器

信号分离器是多路传输器的逆过程装置。它将串行输出的数字信号转换成并行输出的数字信号。这些并行输出的数字信号分别加到 D-A 转换器的输入端。信号分离器的输入是一个有记忆数字信号能力的寄存器。整个装置就是由一些能将输入到寄存器的信息内容依次送往 D-A 转换器中去的输出寄存器群组成。

(5) D-A 转换器

D-A 转换器的任务是将数字量转换成模拟量。具体地说, D-A 转换器就是将输入的二进制(当然也可以是其他进制, 但一般多是二进制)的数字信号转换成与之对应的模拟信号装置。显然, 在本系统中, 各 D-A 转换器是以并行的方式工作的。

(6) 模拟同步装置

模拟同步装置实质上是一个采样-保持装置。它的任务是使受数字量控制的 D-A 转换器的模拟输出能够与图中换能器输出的电学模拟量始终保持同步。

图 1-4 中“普适模拟量”系指除电学模拟量以外的其他所有物理模拟量。“定时”、“控制”、“程序”系指起控制作用的时钟脉冲或软件。换能器是将普适模拟量归一化为电学模拟量的装置(即前面提到的 A-A 装置); 常见的换能器有话筒和热敏、光敏、光电、压电等元件或器件。

1.3 集成 A-D 和 D-A 转换器的兴起和发展

自本世纪初以来, 电子器件经历了从电子管、晶件管到集成电路的发展过程, 电子计算机也随之由电子管型发展到晶件管型, 再从晶体管型发展到集成电路型。与电子计算机相同, 早期的电子式 A-D 和 D-A 转换器也是采用电子管组装的。进入五十年代中期以后, 才逐渐转向晶体管型 A-D 和 D-A 转换器。

从六十年代中期开始, 构成 A-D 和 D-A 转换器的主要功能单元电路——如运算放大器、基准电压源、电压比较器、电阻网络、模拟电子开关和逻辑控制电路等已陆续实现集成化, 特别是集成化运算放大器已开始进入大规模工业生产阶段。在此基础上人们逐渐摒弃了全部由分立元、器件组装 A-D 和 D-A 转换器的传统方法, 开始选用某些现成的具有某一种单一功能的集成电路——如集成化运算放大器、逻辑集成电路、集成电压比较器或集成基准电压源等集成电路单元, 并外加一些必要的元、器件, 来组装 A-D 和 D-A 转换器。这种结构形式的 A-D 和 D-A 转换器, 与完全用分立元、器件组装的转换器相比, 在一定程度上简化了组装结构。

无论是完全由分立元、器件组装的 A-D 和 D-A 转换器, 还是由集成电路单元附加许多分立元、器件组装的转换器, 两者都称为组件型转换器。其中, 前者被人们称为第一代组件型 A-D 和 D-A 转换器, 而后者被称为第二代组件型转换器。显然, 第二代组件型转换器是全集成化 A-D 和 D-A 转换器的先声。现在国产的许多 A-D 和 D-A 转换器多属于第二代组件型产品。

在第二代组件型 A-D 和 D-A 转换器发展的同时, 出现了混合集成电路型转换器(简称混合型集成转换器)。与其他许多混合型模拟集成电路一样, 混合型集成转换器是把分立的晶体管(或者单片集成的具有基本功能的单元电路, 或者是单片集成的低位转换器)

粘贴在绝缘衬底上,再通过薄膜或厚膜技术,在同一绝缘衬底上制作电阻、电容和金属互连线,从而构成具有完整功能的转换器。常见的混合型集成转换器都是采用薄膜技术构成的。现在,国产 8—12 位中、高速 A-D 转换器就属于薄膜混合型集成 A-D 转换器。

显然,随着集成工艺的日臻成熟和转换器结构设计的不断进展,混合型集成 A-D 和 D-A 转换器中所包含的集成电路的比重也逐渐上升。开始时,转换器中所包含的器件都是分立的晶体管,元件(如电阻、电容)几乎全部采用薄膜或厚膜工艺制作的。后来逐渐引入单片式集成运算放大器等集成电路;接着,单片低位集成化转换器也被引用到混合型集成高位 A-D 和 D-A 转换器中(由单片低位集成化转换器连同由薄膜工艺所形成的元件,即可构成高位 A-D 或 D-A 转换器)。

1971 年诞生了第一块单片式高位集成化 D-A 转换器[转换器中,所有元、器件都被制作(集成)在单块芯片上],这标志着集成 A-D 和 D-A 转换器完全进入工业生产新阶段。此后,在国际上,集成 A-D 和 D-A 转换器几乎以与微处理机相等同的发展速度急速地取得进展和技术突破。与组件型或混合型转换器相比,单片式集成转换器具有生产成本低和容易获得良好温度特性的优点,免除了旷时费资的对分立元、器件的精挑细拣工作。因此没过多久,单片式集成化转换器就成为 A-D 和 D-A 转换器的主流。

诚然,单片式集成 A-D 和 D-A 转换器的出现,反映了集成工艺和半导体制作技术的进步;然而,另一方面,由于单片式集成转换器日益显示出的优越性,更激起了人们对它的进一步探求热情,从而大大促进了集成工艺和半导体制作技术向纵深发展。特别是集成 A-D 和 D-A 转换器内部,既含有模拟集成电路,又包括逻辑集成电路,因此通过单片式集成 A-D 和 D-A 转换器的制作,在设计技巧以及工艺技术方面,使模拟集成电路和数字集成电路彼此融合在一起,为模拟与数字系统的进一步结合开创了良好的先例。

1.4 集成 A-D 和 D-A 转换器的类别

如果我们将上述第二代组件型 A-D 和 D-A 转换器也归入集成化转换器一栏,那么从工艺结构方面来划分,可将 A-D 和 D-A 转换器分为组件型、混合型和单片式三大类。

按照转换器内部所包含的有源器件——晶体管——的结构类型不同,又可将单片式集成转换器分为全双极型、全 MOS 型和双极-MOS 相容型三种。

全双极型转换器内部所包含的逻辑电路有的采用高速 ECL 集成电路,也有的采用高集成度的 I²L 电路。

以低功耗作为特征的 CMOS 型转换器是全 MOS 型转换器的主流产品。此外,NMOS 型转换器近几年来也在迅速发展;市场上还可见到一些 PMOS 型转换器。

当前正在兴起的双极-MOS 相容型转换器(尤其是相容型 A-D 转换器)给 A-D 和 D-A 转换器注入了新的活力。它综合了双极和 MOS 器件两者的性能和结构优点,使转换器在性能、集成度和价格诸方面达到比较理想的均衡结果。

当然,如果从应用领域来划分的话,我们一般可将 A-D 和 D-A 转换器划分为下述的低速、中速和高速三大类:

7 { 低速: 模—数转换时间 1—100 ms;
中速: 模—数转换时间 5—100 ms;

高速：模—数转换时间 20—100 ns。

低速 A-D 和 D-A 转换器适用于一般工业系统(如对压力、温度、流量等量的检测和控制),以及数字化仪器、仪表中。中速 A-D 和 D-A 转换器多用于工业中多通道控制系统和声音(语言)-数字量之间的转换系统。高速 A-D 和 D-A 转换器则适用于雷达、数字通信和数据处理系统。显然,这种以速度或应用范围作为转换器的分类标准并不能衬托出集成 A-D 和 D-A 转换器的特点,因为这种分类方法对于完全由分立元、器件组装的转

表 1-1 单片式双极型与 MOS 型转换器中器件、部件*的性能比较

		双 极 型	全 MOS 型
		(性能或指标)	
无源器件	未调整精度 长期稳定性	~0.2% ~0.01%	~0.1% ~0.01%
	微调方法	齐纳烧毁调节; Ni-Cr 烧毁调节;激光微调大片	多晶硅熔烧,电可编程只读寄存器 或激光微调大片
	制造工艺	采用扩散、离子注入、 薄膜淀积等方法制作电 阻	采用扩散、离子注入、薄膜淀积等方法 制作电阻,同时制造 MOS 电容
模拟开关		采用电流型	采用电流型或电压型(或电荷型)
放大器和比较器	电压增益	80—100 dB	60—80dB
	频率补偿	内补偿	内补偿
	直流漂移(未微调)	~1mV	~20mV
	增益-带宽乘积	1—10MHz	1—10MHz
	音频下噪声(均方根值)	0.1—10 μ V	10—100 μ V
	动态范围	120—140dB	80—100dB
	每个放大器的芯片面积	400—1000mil ²	150—500mil ²
基准电压源	结构原理	带隙型,齐纳二极管型	$V_{FB}-V_{T0}$ 型,齐纳二极管型
	温度系数(未微调)	50—100 ppm/°C	10—20ppm/°C
	长期稳定性	0.1%	0.1%
抽样-保持电路	结 构	复 杂	简 单
D-A 转换器	结 构	简 单	简 单
单片滤波器	结 构	频率锁定	开关电容器,电荷耦合器件或存贮群 器件
数字与模拟电 路的相容性		I ² L + 模拟 ECL + 模拟	NMOS CMOS
A-D 或 D-A 转换器	最大优点	低噪声、大电流和电压 兼容性 有丰富的设计经验,实 践证明,有好的稳定性。 可以在-55—+125°C温 度范围工作	低成本,有市售滤波器与之匹配 与微处理机、存贮器兼容。存在较大 技术潜力

* 器件：在这里电阻、电容等为无源器件,晶体管为有源器件
部件：指能完成一定功能的集成电路单元电路

换器也同样适用。本书中,我们将注重于转换器的工艺结构类别,以突出集成转换器区别于一般转换器的特点。

各种类别的 A-D 和 D-A 转换器都各有其内在的性能特点和适用范围。即使以第二代组件型转换器(由分立元、器件和集成电路单元共同组成的转换器)来说,虽然作为全集成化转换器的先声,它很早就被研制了出来,但至今仍未丧失其应用价值。这是因为这种转换器的设计和制作的自由度很大。人们可以根据需要任意选用成熟的元件、器件和单功能集成电路商品——如运算放大器、电压比较器和某些逻辑单元电路,以求得最佳的设计方案和制作效果。因此在设计和制作中,不必受制于集成工艺所能达到的水平。这就是为什么高精度和多功能 A-D 和 D-A 转换器中,第二代组件型转换器现在仍占有重要地位的缘由。目前这种组件型转换器的最高精度(分辨率)已达到 18 位以上。当然,生产的低效率和高成本是这类转换器的主要弊病,由此也决定了这类转换器不可能成为普及的大宗商品。

正如其他混合集成电路一样,混合型集成 A-D 和 D-A 转换器在许多方面,是为了弥补单片式集成电路的不足而发展起来的。它的集成度和设计制作的自由度介于组件型和单片式转换器之间。在高精度和多功能方面,它仍有一定的发展前景。

单片式集成转换器是当前 A-D 和 D-A 转换器的主要产品,其制作技术也已成为 A-D 和 D-A 转换器制作技术发展的主流。随着集成技术的不断发展,单片式集成 A-D 和 D-A 转换器的品种呈现着蓬勃发展的新形势;它的高集成度和低生产成本正迎合了转换器普及应用的需要。特别是单片式相容型 A-D 和 D-A 转换器的发展,更引人注目,因为它兼有双极型和 MOS 型两种器件的优点。单片式集成转换器的位数也不断增加,由早期的 4 位、6 位发展到 12 位,现在最高的已达到 14 位。

在单片式集成 A-D 和 D-A 转换器中,双极型与 MOS 型两大类转换器都各有其性能优点,也各有其适用对象。因此,很难对它们作出明确的判断结论。当前,两者正处于并驾齐驱的发展阶段。为了比较清楚地了解两者内部所包含的元件、器件和功能单元电路的性能指标、结构特点以及工艺制作难易程度,我们列出了性能比较表(表 1-1)。

表 1-2 列出了 12 位的单片式集成双极型和 CMOS 型 D-A 转换器的性能和参数指标,以资比较(分别选取有代表性的双极型产品 AM 6012 和 CMOS 型转换器 AD 7541)。

1.5 集成 A-D 和 D-A 转换器的技术进展

自 1971 年首批单片式集成 D-A 转换器商品出现于市场后,A-D 和 D-A 转换器技术一直以惊人的速度持续发展;一方面,许多传统的半导体工艺技术和器件纷纷被引用到 A-D 和 D-A 转换器的制作中,另一方面为研制集成 A-D 和 D-A 转换器而新发展起来的工艺方法和设计技巧又被应用到其他半导体器件或集成电路的制作中。

由于集成 A-D 和 D-A 转换器的内部既包括模拟电路,又含有数字电路,因此在发展数字-模拟两者相结合的集成电路产品时,它很自然地成为领头产品。

到目前为止,双极型与 MOS 型器件(或集成电路)仍是半导体领域内并行发展的两大分支。如何将双极型器件(或电路)的高速度和 MOS 型器件(或电路)的低功耗与高集成度巧妙配合使用,并统一在一个电路系统内,曾是许多专业设计师们十分关注的问题,而

集成 A-D 和 D-A 转换器在这方面已迈出了可喜的第一步。近几年来,各种类型的双极-MOS 相容型集成 A-D 和 D-A 转换器不断涌现。可以预计,今后在这方面将会取得更惊人的突破。

单片式集成 A-D 和 D-A 转换器现在正朝下述四个方向急速发展。

(1) 扩大位数和提高速度

表 1-2 12 位单片集成双极型和 CMOS 型 D-A 转换器性能比较

工艺结构 产品型号 参 数	双 极 型	CMOS 型
	AM 6012	AD 7541
分 辨 率	12 位	12 位
微分非线性度	$\pm 0.012/\pm 0.025\%$	未规定
非线性度	$\pm 0.05\%$	$\pm 0.012/\pm 0.024\%$
满刻度温度系数	$\pm 20/\pm 40\text{ppm}/^\circ\text{C}$	未规定
零刻度误差	$\pm 0.05/\pm 0.1\text{LSB}$	$\pm 0.8\text{LSB}$
到 $\pm\frac{1}{2}\text{LSB}$ 的置定时间	450ns	1 μs
传输延迟	60ns	未规定
输出电压一致性	+10—-5V	0V
满刻度电流	4mA	1mA
输出电容	25pF	200 pF
电源灵敏度	$\pm 0.001\%/90$	$\pm 0.02\%/90$
满刻度的电源范围	+5, -12—+18V	仅 $\pm 15\text{V}$
要求的电源	2	1
功 耗	3.2mW	40mW
输 出	微分、互补 对所有码, R_o (输出电阻)皆高 对所有码, C_o (输出电容)恒定不变 一致性高 无锁闭 运放不需调零	微分,互补 R_o 低,随码而变 C_o 随码而变——需要运放作相位比较器 无一致性 输出端需肖特基管箝位 运放需要调零
电源变化	线性度和增益误差与电源无关	线性度和增益误差对电源变化敏感
参考输入	2 位组倍乘 可得高阻抗输入	4 位组倍乘 低阻抗输入
输出范围	灵活——外接两个匹配电阻	10V 参考,10V 满刻度,包括输出电阻和参考电阻
逻辑阈值	可 调	固 定
可靠性	无需静电保护	要有抗静电处理

12 位单片式 A-D 转换器已成为大宗商品;具有更高分辨率的单片式 A-D 转换器正在研制中,这既有赖于工艺控制精度的提高,又借助于结构设计的改进。

转换器高的转换速度一直是人们所追逐的重要技术指标。为此人们发展了象并行比

较型结构的 A-D 转换器,其转换时间可高达到几十毫微秒。应该说,转换速度主要决定于转换器的结构设计和内部器件类型,而不是有待于制作工艺的完善。

(2) 提高集成度

在提高集成度方面,譬如将多通道 A-D 转换器中的倍增器、缓冲锁存器、电压基准源、电压比较器、电流或电压放大器等单元电路统统集成在一块芯片上;除了扩大位数以提高转换器的集成度外,今后单片式集成 A-D 和 D-A 转换器完全有可能超越单纯的数-模转换功能,而逐步发展成为复杂的数据采集系统和输入-输出装置(现在组件型和混合型转换器已有这种产品)。

(3) 与微处理机兼容

力求在不附加逻辑电路(或只需外加很少逻辑电路)的前提下,使单片式 A-D 和 D-A 转换器直接与微处理机配合使用。

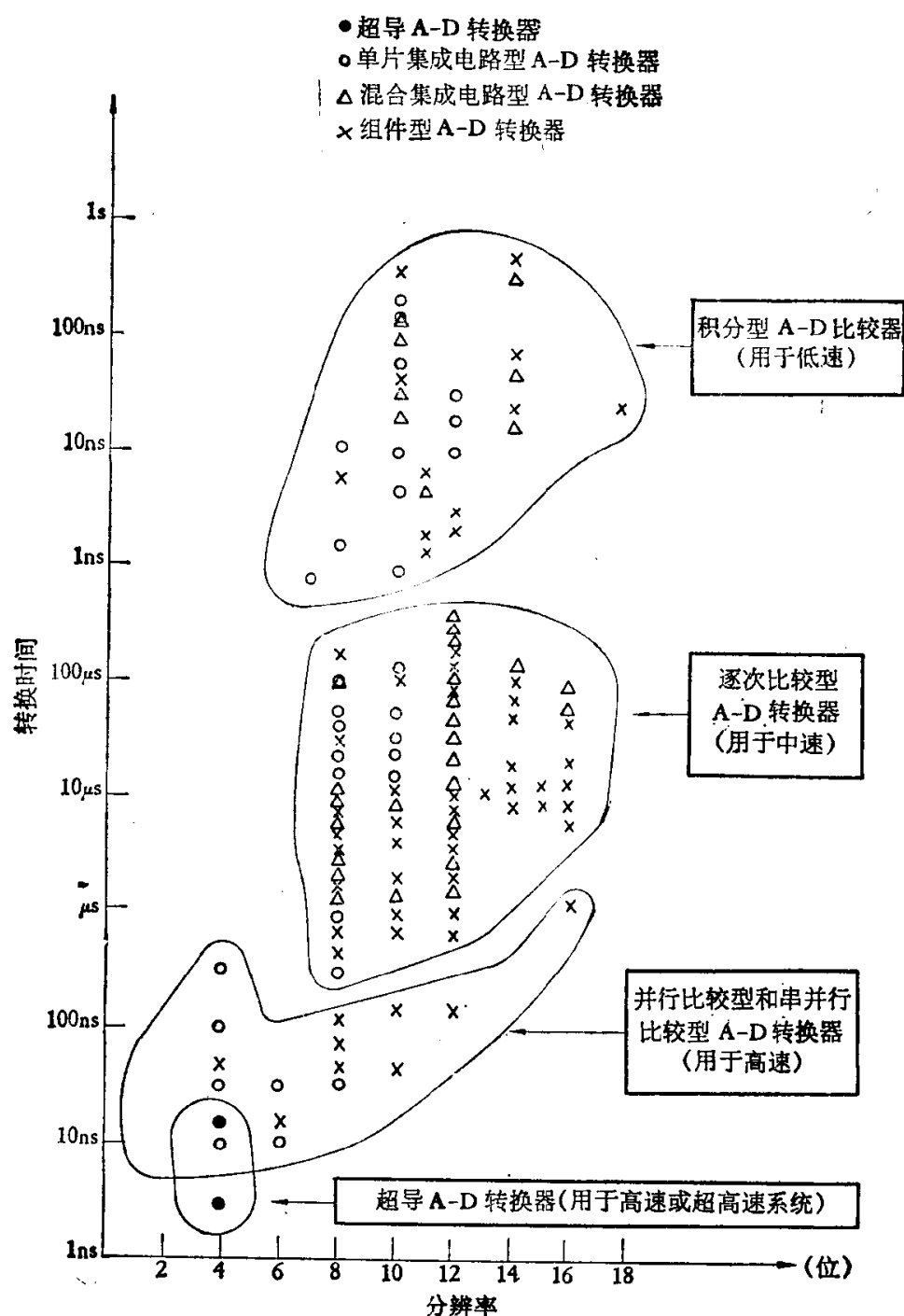


图 1-5 几种主要类型的集成化 A-D 转换器的优值分布情况