

模-数和数-模转换器

顾忠樑 顾宗仁 编著

电子工业出版社

5
/1

TP245
LZL/1

模-数和数-模转换器

陆志梁 戎宗仁 编著



电子工业出版社

内 容 简 介

本书是收集了到1984年为止的国内外有关资料,结合作者的工作实践编写而成的。全书分为五章,较详细地介绍了转换器的发晨概况、种类、工作原理、术语定义以及动态和静态参数的测试方法,并列举了有关领域中应用实例数十种。此外,在附录中还提供了目前国内外最新的转换器电路性能资料数百例。本书在选材上具有先进性、系统性和实用性。特别适合于在计算机和数字通信领域中,从事设计和应用的科研人员、工程技术人员和大专院校师生参阅。也可作为举办微型机应用学习班的教材和自学教材。

JS257/06

模-数和数-模转换器

陆志梁 戎宗仁 编著

责任编辑:郭延龄

*

电子工业出版社出版 (北京海淀区万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京通县教育局印刷厂印刷

*

开本: 850×1168毫米1/32 印张: 9.75 字数: 241 千字

1988年3月第一版

1988年3月第一次印刷

印数: 1—000, 5000册定价 2.90元

ISBN7-5053-0178-0/TN85

序

随着计算机应用领域的日益广泛，尤其是近几年来随着微型电子计算机应用的兴起，在过程控制方面，数据采集是主要的技术之一，而将模拟量转换成数字量，或数字量转换成模拟量的模-数转换和数-模转换技术又是数据采集技术之核心。因此，正确地选择和应用模-数和数-模转换器对实现程序控制自动化有着重要的意义。

“模-数和数-模转换器”一书是一本较详尽地论述了模-数和数-模转换器方面有实用价值的著作，作者长期以来从事数据采集方面工作，积累了大量实际工作的经验，并多次参加制定我国有关模-数和数-模转换器方面的国家标准的讨论会。

本书着重从应用的角度论述了模-数和数-模转换器的国际标准和测量方法，除一般的理论公式推导外，还介绍了大量具有实用意义的设计线路，对近年来国外资料进行了综合整理，并结合作者的实践经验，向读者介绍了数百种国内外的模-数和数-模转换器的性能，供作参考，也是有价值的。

王守觉

前 言

模-数和数-模转换电路是电子技术领域里将模拟量转换成数字量、或数字量转换成模拟量所必需的接口电路。随着数字电路的普及,模-数和数-模转换电路也随之广泛应用。到七十年代,微处理机和微计算机的兴起对这种趋势进一步起着推波助澜的作用。后来,集成模数或数模转换电路的出现、发展及其价格不断下降,性能不断提高,功能日益增强,这些在七十年代初期是难以想像的。早期的转换原理在后来的新工艺和新技术的基础上,研制成新的转换电路,达到了前所未有的精度。但是,目前对于系统地介绍各种转换电路的工作原理和引入各种新工艺的应用,在有关资料方面,至今还是相当薄弱的。为此我们收集了1984年为止的国内外有关资料和我们自己工作中的一点体会编著成此书,希望对从事于模-数和数-模转换电路应用和设计工作的读者能起一点帮助作用。

本书共五章:第一章介绍转换电路的发展过程与现状,便于了解转换电路的概况。第二章是根据国际电工委员会(秘书处)828号文件,又增补了一些有关资料介绍转换电路各种术语的定义,便于读者对转换电路各项参数性能的定性认识。第三章介绍各种转换电路的工作原理,其中以集成转换器工作原理为主。第四章介绍了各种转换电路的测试方法,包括简单的和复杂的测试方法。第五章是转换电路在各个领域中的应用实例。此外,在附录A、B、C中还提供了到1984年为止的国内外集成转换器的主要性能资料,以供参考。

本书在编写过程中，承童忆豹、盛卫群、丁如敏、胡维及弓继书等同志协助整理资料、绘制图表，孙祥义同志认真审校，在此表示衷心感谢。

陆志梁

戎宗仁

1985 年元月

目 录

第一章 模-数和数-模转换器的发展与现状.....	1
第二章 模-数和数-模转换器的术语、定义	8
2.1 一般性术语	8
2.1.1 模拟-数字转换器 (ADC).....	8
2.1.2 模拟-数字处理机 (Analogue to digital processor)	8
2.1.3 数字-模拟转换器 (DAC)	10
2.1.4 转换代码 (Conversion Code).....	10
2.1.5 台阶 (Step)	10
2.1.6 台阶中心值 (模-数转换器)	10
2.1.7 台阶值 (数-模转换器)	10
2.1.8 模-数转换器的标称台阶中心值.....	10
2.1.9 数-模转换器的标称台阶值	11
2.1.10 模-数转换器的台阶宽度	11
2.1.11 数-模转换器的台阶高度 (台阶量值).....	11
2.1.12 线性模-数转换器 (Linear ADC).....	11
2.1.13 线性数-模转换器 (Linear DAC).....	11
2.1.14 乘法数-模转换器	11
2.1.15 非线性模-数或数-模转换器 (Non-Linear ADC or DAC).....	12
2.1.16 压扩型数-模转换器 (Companding ADC)	12
2.1.17 理想直线 (Ideal straight line).....	12
2.1.18 满量程范围 (Full scale ranges).....	12
2.1.19 满量程 (Full scale)	13
2.1.20 量程零点 (Zero scale).....	13
2.1.21 标称满量程 (Nominal full scale value).....	14
2.1.22 失调点 (Offset point).....	16

2.1.23 增益点(Gain point)	15
2.2 静态特性.....	17
2.2.1 分辨力(Resolution)	17
2.2.2 数字分辨力(Numerical resolution)	17
2.2.3 模拟分辨力(Analogue resolution)	18
2.2.4 相对分辨力(Relative resolution).....	18
2.2.5 误差、精度(Errors Accuracy)	19
2.2.6 数-模转换器输出电流或输出电压的电源电压灵敏度	24
2.2.7 数-模转换器的电压或电流顺从性.....	25
2.2.8 用互补模拟输出的数-模转换器的满量程不对称性.....	25
2.3 动态特性	25
2.3.1 程控模-数转换器的转换速率.....	25
2.3.2 程控模-数转换器的转换时间.....	25
2.3.3 线性或乘法数-模转换器的数字动态特性.....	25
2.3.4 MDAC的基准动态特性	27
2.4 其他特性	28
2.4.1 模拟特性温度系数	28
2.4.2 精度的长期不稳定性	29
2.4.3 垫衬(Pedestal)	29
第三章 模-数和数-模转换器的工作原理	30
3.1 数-模转换器	30
3.1.1 权电阻数-模转换器.....	30
3.1.2 梯形电阻网络数-模转换器.....	31
3.1.3 乘法数-模转换器(MDAC).....	33
3.1.4 误差	33
3.1.5 与微机兼容的数-模转换器.....	35
3.1.6 语言合成器	37
3.2 模-数转换器	40
3.2.1 逐位逼近式模-数转换器.....	40
3.2.2 积分式模-数转换器.....	43
3.2.3 量化反馈式模-数转换器.....	46
3.3 其他数-模转换器	51

3.3.1	并行数-模转换器	51
3.3.2	斜坡截止式数-模转换器	51
3.3.3	脉宽式数-模转换器	51
3.3.4	串行循环式数-模转换器	52
3.3.5	并行位电流源数-模转换器	53
3.3.6	并行位电压源数-模转换器	54
3.3.7	并行位电导转换式数-模转换器	55
3.3.8	并行位串行分流转换式数-模转换器	55
3.4	其他模-数转换器	56
3.4.1	电荷衰减式模-数转换器	56
3.4.2	斜坡比较式模-数转换器	57
3.4.3	电压-速率式模-数转换器	58
3.4.4	电荷平衡式模-数转换器	58
3.4.5	双斜率模-数转换器	59
3.4.6	三斜率积分式模-数转换器	61
3.4.7	并行阈值模-数转换器	61
3.4.8	逐位逼近式模-数转换器	62
3.4.9	跟踪反馈式模-数转换器(增量调制器)	63
3.4.10	级联式模-数转换器	64
3.4.11	循环式模-数转换器	65
3.4.12	定相级联式模-数转换器	66
第四章	模-数和数-模转换器参数的测量方法	67
4.1	DAC静态误差的测量原理	67
4.2	DAC静态误差的测量方法	73
4.2.1	逐点测量法	73
4.2.2	位扫描测量法	75
4.2.3	三过渡态测量法	76
4.2.4	比较测量法	80
4.3	DAC动态参数的测量方法	82
4.3.1	满度建立时间的测量	82
4.3.2	1LSB的建立时间和“尖峰”的测量	84
4.4	ADC静态误差的测量原理	84

4.5	ADC 静态误差的测量方法	81
4.5.1	逐点测量法	87
4.5.2	主过渡态法	90
4.5.3	比较法	93
4.6	ADC 动态参数测量方法	95
4.6.1	有效位法	95
4.6.2	差频法	96
4.6.3	ADC 转换时间的测量	97
4.7	采样保持放大器的动态参数及其测量方法	98
4.7.1	SHA 的动态参数	98
4.7.2	SIHA 的必要性	99
4.7.3	SHA 动态参数的测试方法	101
第五章	模-数和数-模转换器的应用	106
5.1	自动去除“皮重”	107
5.2	数-模转换器的位数扩展	108
5.3	数字式程控脉宽调制器	112
5.4	数控正弦波振荡器	112
5.5	数控滤波器	115
5.6	波形发生器	116
5.7	与总线兼容的数-模转换器典型接法	117
5.8	与 MC6800 微机接口	118
5.9	数字信号实时数-模转换	119
5.10	双斜率积分式数-模转换器在 CD(激光)唱片中的应用	121
5.11	精密数控基准电源	122
5.12	18 位高分辨力数-模转换器	123
5.13	光学文字符号识别机	125
5.14	视频信号的模-数转换	125
5.15	8 位 1 μ s 模-数转换器	127
5.16	微机接口电路之一	128
5.17	微机接口电路之二	130
5.18	频谱仪	130

5.19	多机接口电路之三	131
5.20	PCM数字式音频磁带的音频输入转换电路	133
5.21	4 $\frac{1}{2}$ -位数字式电压表	135
附录A	国产模-数和数-模转换器系列品种简介(单片集成电路)	137
附录B	国产模-数和数-模转换器系列品种简介(混合集成电路)	162
附录C	国外数-模和模-数转换器系列品种简介	216

第一章 模-数和数-模转换器的 发展与现状

1948年1月17日,卡布莱(R. I. Carbreyc)首先申请用循环式原理构成数-模转换器的专利^①,同年2月21日,奥立弗(B. M. Oliver)和香农(C. E. Shannon)申请用电荷耗尽(Charge run down)原理构成模-数转换器的专利^②,从而奠定了模-数和数-模转换技术的基础。以上两者都是为了解决PCM(脉冲编码调制)通信技术而研制的,而至今数字通信仍是转换技术的一个重要应用领域;五十年代又兴起计算机,特别是七十年代兴起微处理机和微计算机,进一步促进了转换技术的迅速发展。

五十年代开始,发表了各种有关模-数和数-模转换原理的文献、论文、报导、研制报告和专利,从此逐步形成了比较完整而自成体系的转换技术。

五十年代在波士顿展出第一台模-数转换设备,包括电源在内,设备重达68公斤,消耗功率约500瓦,造价约8千美元,其转换速度每秒5万次,精度0.05%。所用的有源元件是电子管。与今天的相比,第一代转换器已成为一个庞然大物。由于造价太高,当时也只生产了两千台左右。但这种转换器仍然是实现转换技术的先驱。

六十年代初,转换技术的一项重大进展是采用晶体管作为有

① 美国专利号2, 579, 302, 1951年12月18日发布

② 美国专利号2, 801, 281, 1957年7月30日发布

源元件的转换器，使体积和重量显著减小。六十年代中期，出现用薄膜、厚膜工艺制成的8位数-模转换器，这就是在基片上集成基准电源、运算放大器和模拟开关等，使转换器进入混合集成电路水平。当时因电阻网络还是外接的，使工作速度受到了很大限制。

七十年代初期，研制成功以四个模拟开关一组的集成“四元组”电流模拟开关(典型产品是AD550)和集成薄膜电阻，使转换器的精度和分辨力都有所提高。用四元组电流模拟开关和电阻网络、运算放大器等组成的转换器其精度和分辨力可达到12位。这一时期的集成转换器主要是用中、小规模集成电路组装的，到七十年代中期在硅片上研制成功薄膜电阻，并采用激光微调技术解决了电阻网络的精密跟踪问题后，使电阻网络才可能在小芯片上形成，并和混合集成电路封装在同一个管壳内；直至在硅片上直接制成电阻网络的单片集成电路出现后，才有了名符其实的集成转换器。随着各种新器件和新工艺的出现，转换器步入了大规模集成的年代。此后转换器的发展迅速，各种型号的器件纷纷出现。以美国模拟器件公司的产品为例，在1972年的产品目录中，供转换电路应用的集成电路产品只有2种单片模拟开关，1977年增至26种模-数和数-模转换器。到1982年，不包括模块(组件)和二次集成组件在内，模-数和数-模转换器的产品增至60种以上。以转换器为中心的各种配套产品如采样保持电路、模拟多路转换器、模拟开关、精密基准以及电压-频率或频率-电压转换器等更是品种繁多、丰富多彩。

模-数和数-模转换器的工作原理、包括派生的工作原理甚多。但在目前，不是所有的工作原理均能用大规模集成电路工艺技术集成在同一硅片上的。某些早期公布的工作原理，如电荷平衡式(又称量化反馈式)模-数转换器，由于集成了自动调零电路，使双片式 $4\frac{1}{2}$ 位模-数转换器LD122/LD121A的精度能达到

0.005% ± 1个字。

就工艺而言，早期的转换器主要是采用双极型工艺制成的。七十年代后期，用CMOS工艺制成的转换器逐渐增加，近年来后者在单片集成电路领域内已占主导地位。虽然目前CMOS的速度和精度还不如双极型电路，但在集成度、功耗、以及价格等方面都是双极型转换器所不能比拟的。

在封装方面，集成转换器的封装形式有单片集成双列直插式、混合集成双列直插式、组件式（又称模块式）以及二次集成（中小规模集成电路连同分立元件组装在小型印刷电路板上）等几种形式。其中单片双列直插式体积最小，且价格低，但性能高的不多。二次集成式的转换器体积最大，价格也比采用其它封装形式的转换器高得多，其性能指标恰最好。

集成转换器在功能上的一个最大进展是与微处理机或微计算机的兼容能力。与微机兼容的转换器设有微机指令控制的内部逻辑电路，使转换器能在微机指令控制下进行转换。

随着电路集成度的提高，除了集成完整的基本型模-数和数模转换器外，一些以模-数和数-模转换器为基础的专用电路或系统在七十年代后期也开始出现。例如将非线性数-模转换器（译码器）和模-数转换器（编码器）集成在一起的编码译码器（CODEC）；以模-数转换器为基础的多路数据采集器件和过程控制系统（如AD7527）；以数-模转换器为基础的语言合成系统（如 μ PD7752）等。

当前集成转换器的主流是单片集成转换器和混合集成转换器两种。单片集成转换器又可分成双极型集成转换器和CMOS集成转换器两大类。

单片集成转换器的主要优点是成本低和可靠性高。用双极型工艺通常可以制成带有内部基准的高速、高精度12位数-模转换器（如AD565A），带有内部基准、比较器、三态缓冲器等电路

的完整的模-数转换器(如AD571),以及用Bi-FET(一种在同一硅片上集成双极型晶体管和结型场效应晶体管的工艺)可以制成分辨力高达BCD $4^{1/2}$ 位的积分式模-数转换器的模拟部分(模拟处理机LF13300)。用CMOS工艺制成的单片转换器由于集成度高,适用于逻辑电路较复杂的与微处理机兼容的转换器。用CMOS工艺制成的转换器大多数其转换速度低于用双极型工艺制成的转换器。但在蓝宝石衬底上用SOS-CMOS工艺制成的模-数转换器速度可高达几十毫微秒。若与同样速度、用其它工艺制成的转换器相比较,SOS-CMOS产品的价格还是比较低廉的。

用CMOS工艺还可以制成乘法型数-模转换器(MDAC)。这种转换器利用CMOS模拟开关的双向特性,使转换器能数控任何极性的基准电压,也就是说,既能用直流、也可用交流信号作基准源进行乘法运算。

用CMOS工艺制成模拟器件(如比较器)的性能不如双极型器件,因而制成的转换器其分辨力和精度受到一定的限制。

在硅片上用CMOS工艺制作基准源虽然已有报导,但制成的基准源的稳定度并不高,还不能用于10位以上的转换器。在此以前,人们往往避开这种矛盾,在电路设计方面采用另一途径解决了这个问题,这就是所谓“比率计式”模-数转换器,这种模-数转换器可以不用基准电源,只是动态范围不大。此外,还应考虑比较器的失调、输入噪声、以及增益稳定度对传递特性的影响。因此仅适用于精度不高的传感器(如半导体传感器)领域。这类产品由于电路简单、成本低,尚有一定发展前途。

采用MOS工艺制作电路的集成度远高于采用双极型工艺制作电路的集成度。八十年代初期,在集成数-模转换器的基础上同时集成专用电路(如数控电位器AD7525、音频衰减器AD7110等)、小系统(如过程控制数-模转换器AD7525、带先进先出堆

栈的数-模转换器AD 7544等)和语言合成器等单片转换器开始陆续出现。尽管目前全世界集成电路总产量中上述集成电路所占的百分数不大,由于这类电路的应用日渐增多,特别是语言合成器目前正处于萌芽状态,相信在这方面的发展将会越来越快。

如上所述,用单片集成转换器具有较多优点,是未来发展方向。但是,目前在制造时受到难以克服的限制,因而采用单片集成不得不牺牲转换器的分辨力和精度等主要指标,不然就采用别的技术途径。到1983年为止,混合集成转换器的最高分辨力:数-模转换器是18位(如AD1138),模-数转换器是16位(如MN5290)。而至今单片数-模转换器还没有超过13位精度的(如AD7546)。

早期的混合集成转换器是由封装在一个外壳内的若干芯片组成,例如12位模-数转换器ADC80共用11片芯片,体积也较大。以后,采用了CMOS工艺和薄膜电阻网络(在陶瓷基片上淀积薄膜电阻网络),芯片数减至3片。由于混合集成工艺的灵活性,不受单片集成工艺相互制约的影响,使混合集成转换器的性能优于单片集成转换器。

混合集成转换器的速度虽然高过单片集成转换器,而稳定时间达到亚微秒水平的是在1979年,到1983年为止,4、6、8位数-模转换器的稳定时间分别是4、6和8 ns(MN0405 MN0605和MN0805)。12位模-数转换器MN5245的最大转换时间已达1 μ s。

混合集成转换器的另一个优点是分辨力和精度均高于单片集成转换器。以MN5290为例,转换时间为40 μ s,最大线性误差不超过 $\pm 0.003\%$,其它型号的16位模-数转换器除转换时间不同外,最大非线性误差也都控制在这一范围内,如ADC1140为35 μ s, MN5282为50 μ s, ADC76为15 μ s等。

在与微处理器兼容方面,由于集成的规模愈来愈大,几年前

在小型印刷电路板上采用二次集成技术制备的混合式的又与微处理机兼容的转换器，今日已缩小成一块集成电路。例如10位数-模转换器MN3040在印刷电路板上二次集成了输入锁存器、基准源和运算放大器。而AD390是在一个外壳内集成了四个与微处理机兼容的12位数-模转换器，每一数-模转换器均有二级输入数据锁存器和一个用作求和电路的运算放大器，四路合用一个内部基准源。内部基准源的温度系数为 $3\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ ，如需更高的稳定度，可以外接高稳定基准源。几项主要参数如下：

	MN3040	AD390
分辨力	10	12
精度	$\pm 0.4\% (0-+70^{\circ}\text{C})$	0.012%
稳定时间	$5\mu\text{s}$	$4\mu\text{s}$
输出电压	$\pm 10\text{V}$	$\pm 10\text{V}$
输出电流	$\pm 4\text{mA}$	$\pm 5\text{mA}$

转换器进入系统水平的另一个标志是集成数据采集单元(DAU)又称数据采集器(DAD)。

数据采集单元到目前为止已发展了多种系列，从单片CMOS集成的4、6和8位通用数据采集器(ADC0844、ADC0808、ADC0816)到双片式数据采集系统AD364，后者用两片集成电路组成：其中一片是集成采-保电路、多路转换器、差分放大器、通道地址寄存器和控制逻辑等电路；另一片是一个完整模-数转换电路，包括内部时钟、10V精密基准源、比较器、以及总线接口电路等。转换器字长12位，非线性误差不大于 $\pm 0.012\%$ 。由于受封装引出脚数目的限制，通道数一般不超过单端16通道，对集成度更高、功能更强的数据采集系统(指小系统)，往往采用模块式封装。

用模块式制成的转换器是所有转换器中性能最好的一种。其主要缺点是体积大，而且受工艺上的限制，实现工业化大生产的自动化程度不高，因而产品价格高。目前它在集成电路产品中所