

电磁测量与仪表丛书

电磁测量数字化及其应用

淦君载 冯国华 王连弟 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了电磁测量的数字化及其应用。内容包括采用大规模集成电路芯片的各类 A/D 转换器的转换原理、内部结构、外部特性、电路连接,在此基础上进一步分析各种电路元件和参数,以及磁学中各种物理量、铁磁材料等的数字化测量方法。各章均以基本测量原理出发,结合具体电路进行分析,并着重考虑了新原理、新技术和新器件的应用。书中对一些主要电路环节进行了必要的理论推导和误差分析,以保证其系统性和完整性。

本书可供从事电磁测量技术及仪器制造方面的工程技术人员和高等院校有关专业师生参考。

电磁测量数字化及其应用

淦君载 冯国华 王连弟 编著

责任编辑:秦起佑、贾馨 责任校对:孙志筠

责任印制:张俊民 版式设计:张世琴

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $950 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $11^{1/8}$ ·字数 239 千字

1989年12月北京第一版·1989年12月北京第一次印刷

印数 00,001—1,6100·定价:10.70元

ISBN 7-111-01101-5/O·30

目 录

常用符号

绪论	1
第一章 电压的数字化测量	7
一、A/D转换器的性能指标	7
1. A/D转换的误差	7
2. 转换时间	8
3. 线性度	8
4. 差分非线性度	8
5. 分辨率	9
6. 常模抑制 (NMR)	9
7. 共模范围	9
8. 共模抑制(CMR)	9
9. 孔径时间	10
10. 输入电阻	10
11. 零电流	10
二、积分型A/D转换器	10
1. 双斜积分型A/D转换器	10
2. 具有零漂补偿的双斜积分原理	26
3. 四斜式A/D转换器	33
三、逐位逼近型A/D转换器	48
1. SA A/D的基本转换原理	49
2. 逐位逼近寄存器	51
3. SA A/D转换装置的考虑	55
4. 集成D/A+SAR的A/D转换器	57
5. 集成单片SA A/D转换器	61
6. 集成化数据采集系统	65
7. 高速A/D转换器	75
四、V—f转换型A/D转换器	78
1. 电压反馈型V—f转换	79
2. 定电荷复原型V—f转换	82
3. 混合封装式 V _I C模块	87

4. 单片集成VfC	93
5. $V-f$ 转换组成的A/D转换器	98
五、交流电压测量	109
1. 概述	109
2. 交流数字电压表的基本特性	111
3. 平均值响应的AC/DC转换器	116
4. 有效值响应的AC/DC转换器	121
5. 峰值电压测量	132
第二章 元件参数的数字化测量及应用	138
一、元件参数数字化测量原理与方法综述	138
1. 电流—电压法	138
2. 数字电桥法	146
3. 参数转换测量法	149
4. 微计算机智能参数测量仪,	150
5. 小结	155
二、直流电阻的数字化测量及应用	156
1. 运算放大器法欧姆—电压转换	156
2. 桥路放大器	157
3. 共地式运算放大器欧姆—电压转换器	162
4. 电位降法极小电阻的数字测量	166
5. 比率变换式电阻测量	175
6. 自动电桥法电阻(温度)数字测量	177
三、电容的数字化测量及应用	184
1. $C-T$ 型直接变换式数字电容表	186
2. $C-f$ 型直接变换式电容倒数测量	189
3. 半桥比率变换式电容(电感)测量	193
4. 数字式自动电容电桥	207
四、 Q 值的数字化测量	226
1. 衰减振荡法原理	227
2. 衰减振荡法数字式 Q 表	230
第三章 相位的数字化测量及应用	233
一、测量相位的意义	233
二、相位数字测量的基本原理	234
1. $\varphi-V$ (相位—电压)转换式	235
2. 相位—计数转换式	239
3. 锁相倍频式	245

4. 相关计数A/D转换式相位计	249
三、数字相位计典型环节分析	251
1. 通道放大电路	252
2. 鉴相器电路	256
3. 控制电路	258
四、相位的数字化测量在非电测量中的应用	260
1. 转矩的测量	260
2. 转子轴位置转角的测量	266
第四章 功率与电能的数字化测量	271
一、直流功率及电能的测量	271
1. 电压调频、电流调幅式	271
2. 时序电路构成的数字乘法器	275
二、交流功率的测量	281
1. 模拟乘法器瓦特表	281
2. 热敏电阻功率计	287
3. 多元差动热电偶交一直流功率转换	290
4. 时分割乘法器式 $P-V$ 转换	293
5. 三相功率和电能的测量	300
第五章 磁的数字化测量与铁磁材料的自动测量	304
一、磁通与磁场的数字化测量	305
1. 数字式磁通表	305
2. 霍尔效应场强计	306
3. 磁通门磁强计	311
4. 核磁共振法测量场强	321
二、磁性材料的测试	326
1. 爱泼斯坦数字铁损测量装置	327
2. 微型计算机控制的铁芯参数自动测配装置	331
3. 直流磁化特性的自动记录	337
参考文献	341

绪 论

在40年代以前，人们主要应用由电磁机构构成的测量装置去测量电磁参量，那些就是迄今还常常使用的各种指针式电表、电位差计、电桥、磁强计、磁通计等。

随着我国工农业生产、科学研究以及国防工业的飞速发展，在国民经济和科学技术的各个领域广泛地应用各种新技术成就，因此对电磁测量技术提出了更高的要求。机电式测量仪器、仪表，无论在测量精确度、灵敏度还是在测量速度等方面都不能满足生产过程对测量提出的多参数、远距离和动态测试的要求。因此，随动式电子电位差计、自动电桥等各种自动检测、自动记录及遥测仪表随之产生。

到50年代，随着电子技术、计算技术的发展，计算机工业兴起，尤其是60年代以后，由于集成工艺的发展取得成效，数字计算机的发展迅速，使它从单纯的数值计算扩展到自动控制、自动检测等技术领域中。我们都知道，数字计算机是利用数码进行运算的，而系统的控制和检测对象绝大多数是连续的物理量，比如，电磁参量，热工参量，力学参量等。客观事物的发展促使人们对连续量与离散量之间进行相互转换的研究，即模-数和数-模转换器的研究，前者是将模拟量转换成数字量；后者是其反变换，即将数字量转换成模拟量。例如，模-数转换器 (Analog-Digital Converter) 简称A/D转换器或ADC。数-模转换器 (Digital-Analog Converter) 简称D/A转换器或DAC。A/D转换器可以作为计算机的输入装置，它将电压或相应于电压刻度的其他电磁参量或温度、压力、流量等各种连续的物理量转换成数字量，提供计算机的输入信息。而D/A转换器可作为计算机系统的输出外围设备，它把计算机输出的数字信号转换为电压或电流等模拟信号，然后送入执行机构进行控制或调节。

“模-数”和“数-模”转换技术的发展，促进了数字式电压表的发展，各种转换原理的通用型或高精度的数字电压表大量涌现。简单地说，数字式电压表就是A/D转换器再附加数字显示装置。电压测量的数字化是与A/D转换器紧密相联的，其示意框图如图0-1所示，可以看出A/D转换器是数字电压表的核心，是数字化测量仪器的基础。

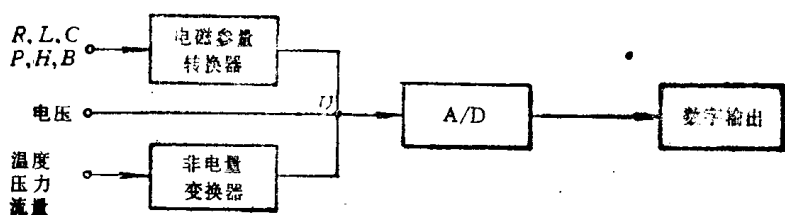


图0-1 数字式电压表示意图

近十多年来，复杂的A/D转换器电路已经集成在小小的芯片上，它的转换误差小、分辨率高、转换速度快，再加上功耗小、成本低、性能可靠，因此获得了广泛的应用。这种大规模集成A/D转换模块赋予数字化测量仪器、仪表无比的生命力，它将测量技术与计算机技术更紧密地结合起来，大大扩大了数字化测量技术的应用领域。

电压是最基本的电参量，对电压的A/D转换是最直接的转换。其他的电磁参量或非电量的物理量都可以通过变换器变换为相应刻度的电压，再借助A/D转换器得到相应的数字等效值。因此，A/D转换器的研究是至关重要的。鉴于此，在电压的数字化测量（第一章）中，在结合介绍几种最常用的A/D转换器的转换原理的同时，着重介绍各种模块化的集成A/D转换器，它们的外部特性、接线、实际应用以及与微处理器的接口等，而不着重讨论高精度的数字电压表，这些内容已有专门的著作分析、讨论。

电气元件参数如电阻、电感、电容、Q值、损耗（ $\lg \delta$ ）等的测量，在科学计量领域中占有很重要的地位，这不仅因为它们

本身是电气测量技术领域中的重要参数，而且通过对它们的测量往往可以诱导出对其他许多物理量的精确测量。比如，借助于电参数式变换器可以将诸如压力、位移、应变、流量、温度、湿度等物理量变换成电阻、电容、电感等电参数，以往这类元件参数测量仪器多采用电桥法和谐振法，从测量原理上看可以实现高精度度测量，但操作复杂，测量速度慢，不能满足快速和动态的检测要求。数字化的测量方法能够克服这些缺点，在满足给定的测量精确度条件下，容易实现快速和自动化测量，它的基本测量原理仍是采用伏-安法、电桥法、参数转换法等。随着科学技术的发展，微处理器引入到仪器仪表中，大大扩展了仪器的功能，内附微处理器的自动阻抗电桥，就可以同时测量 R 、 L 、 C 、 $\lg \delta$ 和 Q 值等元件参数。

在相位测量中最广泛使用的是电动系或电磁系仪表，它们的测量速度慢，精确度低，而且受频率和波形的限制。以后，在数字频率计和A/D转换器的基础上，开始采用相位—电压转换式、相位—计数转换式和锁相倍频式的相位测量技术。近年来在电子技术和集成工艺基础上发展起来的数字传感器中，如角度数字编码器，同步器—分解器转换器等，都是利用相位的数字化测量来表征被检测对象。随着无线电定位、雷达、导航等系统的自动调节和振动分析等综合技术的发展，对相位测量的要求将越来越高。

功率的测量对提高产品质量、降低成本、节省能源有重大的经济意义。如有色冶金、化工、电镀、变流等使用大电流的工厂企业，都迫切需要对功率和电能进行准确的计量。传统的功率测量采用电动系仪表、热电或霍尔效应变换器。电能的测量采用电度表。直到六十年代才开始采用电子式功率计，其基本测量原理是采用电子乘法器将功率变为电压(P — V 转换)，再利用A/D转换器进行数字编码和信息输出。数字式功率计的特点是精确度较高，受外磁场干扰的影响小，频率响应较快，输出信息便于进一步处理等。

在电磁测量领域中，磁性测量在很长时期内较电测量的精确

度低得多，测量手段也十分贫乏。但是，近十多年来随着人们对磁现象的深入认识，使得磁学理论和磁性测量技术都得到很大发展。这是由于：一方面磁和电一样渗透到人们生活的各个方面，各个技术领域都与磁特性有关；另一方面磁性测量在某些情况下具有比电测量更优越的特性，它受温度、湿度、噪声等外界因素的影响小一些。磁性传感器的灵敏度较高，结构牢固，便于进行非接触式测量等。

最常用的磁性测量有两种方法：其一为电磁感应法，如磁电式磁通表、爱泼斯坦方圈装置等，可以测量磁滞回线、磁化曲线、磁感应强度、矫顽力等；其二为物质特性法，包括物质的半导体效应（磁阻效应、霍尔效应）、量子状态变化（核磁共振、塞曼效应）、约瑟夫逊效应等。利用物质特性的方法在磁测量领域中是有广阔发展前途的。

近年来“非磁量的磁测法”兴起，对磁测量提出一系列前所未有的新课题。与此同时，物理学的近代成就，如约瑟夫逊效应、法拉第效应、光泵、核磁共振、电子顺磁共振等又给磁测量提高精确度提供了极大的可能性，数字化测量技术与微型计算机配合为实现这些高精度测量提供了必要的手段。

由于科学技术的发展，人们对客观事物的认识逐渐从宏观深入到微观世界。因此，被测电磁量向两极发展的程度更加明显。例如，极大的电流、极小的电压、极高的阻抗、极低的频率、极强或极弱的磁场，极大或极小的电容等。将电磁基准所保存的单位值传递到很远的两个极端，而又保持很高的准确性是很困难的。因此，建立这些极大或极小值的标准装置是电磁计量科学的一项迫切任务。近代物理、集成工艺和微型计算机的发展，有助于将电磁测量技术提高到一个新水平。

测量的本质是以体现单位值的标准量与被测量进行比较，并获得两者比值的数字结果的过程，电磁测量技术也不例外。对于一个完整的测量装置一般需要具备六种基本测量器件，它们是：标准量具；差值检出器；变换器；调节机构；信息处理单元；测

量结果的输出和显示。这六种基本测量器件的相互关系如图 0-2 所示。但并非每一个电磁测量装置都必须具备，在不同的测量方法下，“比较”可以是同时或异时的；不经变换或经过变换的；简单的或组合式的；自动进行或人工调节的；需要数据处理或不需要处理的等等。装置实现了数字化，不仅便于对信息进行复杂的数据处理，而且还便于信息的远距离传送，将测量扩展到遥测的领域。

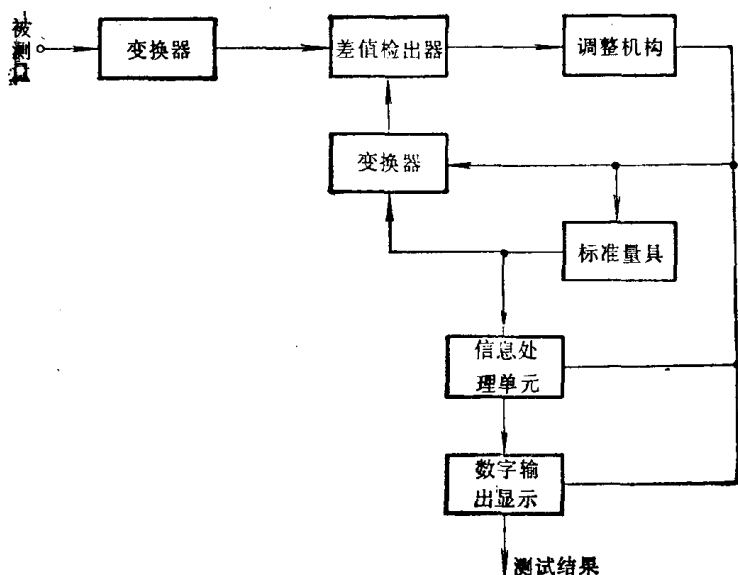


图0-2 基本测量器件相互关系图

回顾电磁测量技术这二、三十年的发展，由于组成测量装置基本器件的变化很大，尤其是电子技术，集成工艺的发展，使基本测量器件的面目全新，多数器件逐渐向数字化、自动化、集成化发展，远非以往机电式测量器件可相比拟。由于它们的发展使得电量及电气元件参数的精密测量提高了一个或两个数量级。

磁测量也向两极扩展，现在能够测量的磁场强度范围宽达

$10^{-10} \sim 10^0 \text{ T}$ ，精密磁测量的误差也降低到 10^{-6} 左右。至于非电量的电测技术，由于数字测量技术的发展，涌现出许多新的测量方法，其应用范围已扩展到各个工业部门和科学研究单位。电测方法的优越性是无可置疑的，因为“电”与其他能量形式之间的转换最易实现，而且转换的精确度较高。目前，各类非电量的传感器正在向小型化、固态化、数字化、集成化方向迅速发展，新原理、新器件不断涌现，这将使电磁测量技术十分灵活地应用于各个领域，在生产和科学研究中发挥更大的作用。

第一章 电压的数字化测量

电压是表征电的物理特性的基本参量之一。对电压的度量已经有一百多年的历史。近三、四十年来，由于电子技术、计算技术的发展和计算机的推广应用，对测量技术，特别是电压的数字化测量技术提出了新的要求，要求为计算机提供输入信息。模—数转换器，简称A/D转换器或ADC，是电压的数字化和数字化测量的核心，它直接关系到被转换电压的精确度、分辨率和转换速度。另一方面，各个领域非电量的物理参量，如温度、压力、流量、应变……，或其他的电参量，如电阻、电容、相位、功率……，都可以变换成电压的形式，借助于A/D转换器得到等效的数字值，为计算机提供输入信息。因此，A/D转换技术是数字化测量技术的基础，得到非常广泛的应用。

在本章将结合电压的数字化测量技术，首先介绍A/D转换器的性能指标，然后着重讨论各种类型的A/D转换的转换原理、组成、特点，并分析几种用集成模块组成的数字电压表。

一、A/D转换器的性能指标

1. A/D转换的误差

误差是A/D转换器最主要的技术指标，它的大小是设计或选用A/D转换器的出发点。A/D转换器误差分模拟误差和数字误差两大部分。

(1) 模拟误差

从模拟量进入A/D转换器到变成相应的数码输出，对于各种不同的转换原理，将有不同的输入与输出表达式。在表达式中所含的各有关元件或部件的参数，都有一定的误差存在，还有一些环节虽不表现在表达式中，但实际参加了转换过程，它们的误差也将影响转换结果，如放大器的漂移、电源波动、工作环境的变

化等。将上述因素产生的误差综合，就是转换器的模拟误差。

(2) 数字误差

将模拟量变为数字量总有一个最小的数字分度单位，这就构成量子化误差，它决定于最低有效位所对应的电压值。假如，输入电压的值恰在数字分层的地方，则转换器没有量子化误差。若输入信号正好在末位的两个分层数的中间，则其误差应为末位的 $\pm \frac{1}{2}$ 个字的电压值，即为量子化误差的最大可能值。

2. 转换时间

是指完成一次转换所需要的时间，即从输入信号的采样指令开始到数据转换完成的瞬时为止的时间。一个较复杂的A/D转换器的转换时间包括：多路传输器的切换时间；缓冲放大器的建立时间；采样时间；实际转换时间；存入缓冲器所需要的时间或执行串一并转换所需的时间。对于逐位逼近型转换器，这个时间范围一般为1~400 μ s。最通用的12位A/D转换器，如AD572，它的转换时间约为25 μ s。

3. 线性度

转换器的线性误差是指某输入模拟信号相对于一条理想直线的偏差，它反映转换器是否能均匀地反映输入模拟量的特性。因此，线性度的好坏直接影响转换器误差的大小。在实际应用中应该对转换器进行增益调整和偏置补偿，以减小线性误差。

4. 差分非线性度

在转换器中差分非线性误差是在数字输入或输出的整个范围内，描述两相邻数字量瞬变而引起模拟量值的改变情况。如果每一瞬变等效于它的邻近值（即1个最低有效位），则差分非线性度为零；反之，如果一次瞬变不等于它的邻近值而大于最低有效位的值，则对D/A转换器而言，它将是非单调的。对A/D转换器而言，在转换过程中将会丢码。指标要求在25℃时，规定最大的差分非线性误差为 $\pm \frac{1}{2}$ 最低有效位。

5. 分辨率

是指转换器所能分辨的被测信号的最小值。一般地说,漂移、噪声、器件的死区等都是限制转换器分辨率的主要因素。分辨率又影响转换器精确度的提高。

6. 常模抑制(NMR)

常模干扰是指叠加在被测信号电压上的交流干扰,无论它是从信号源引入或是从输入线感应引入的,这种干扰都是串联在测量回路中,当它超过数字电压表的抑制能力时,示数将不稳定而产生测量误差。

用常模抑制比(NMRR)来表征仪器对常模干扰的抑制能力,它是常模干扰电压的峰值 U_{sm} 与电压表示数值产生的最大误差 ΔU_m 之比,并取对数来表示。常模抑制能力的数学表达式为:

$$NMR = 20 \lg \frac{U_{sm}}{\Delta U_m} (\text{dB})$$

如果干扰信号是缓慢变化的,那是难以从测量线路中消除的,只能从根本上消除其产生的原因,好在一般干扰信号变化都较快,因此可采用输入滤波器或积分技术加以抑制。

50Hz工频电压是最常见的常模干扰信号,由于它在一个周期内的平均值等于零,因此,积分型电压表的采样周期如果设定为工频干扰周期的整数倍,则干扰电压对测量结果的影响将等于零。

7. 共模范围

共模抑制通常随输入信号摆动范围的大小变化,输入信号的大小由共模电压与差动电压之和来决定。共模范围是指在维持规定的共模抑制情况下总的输入电压范围。例如,共模信号是 $\pm 5\text{V}$,差动信号也是 $\pm 5\text{V}$,则共模范围为 $\pm 10\text{V}$ 。

8. 共模抑制(CMR)

是指转换器对于同时加在两个输入端的电压影响的抑制能力,通常用共模抑制比表示。如 $CMRR=10^5$,或表示为 $CMR=120\text{dB}$ 。它意味着某一转换器承受 10V 共模电压时,等效于输入端有 $10\mu\text{V}$ 的差动输入误差信号。

9. 孔径时间

在转换过程中 t_i 瞬时的信号经 Δt 之后才被转换器读出, Δt 这段时间称孔径时间或采样时间, 它对转换器的动态精度有很大的影响。A/D转换中的动态误差是一个复杂的多变量函数, 变量中最重要的是采样时间和采样频率, 因此, 当被转换信号是时间函数时, 为了减小动态误差, 必须设置采样—保持电路。

10. 输入电阻

输入电阻是指输入电压与此电压引起的输入电流之比:

$$R_i = \frac{U_i}{I_i}$$

提高转换器的输入电阻可以减小被测信号源内阻引起的误差。在高精确度A/D转换中需接入前置放大器, 以提高输入电阻, 从而减小源阻抗引起的误差。

11. 零电流

理想的A/D转换器是一个无源器件, 但实际上, 当输入接地时在输入端仍有电流流动, 其方向可流入或流出, 此电流称为零电流, 它意味着转换器对被测信号源而言是一个有源网络。输入零电流流过信号源, 在源阻抗上产生压降, 直接叠加在被测信号上而造成误差, 当零电流一定时, 源阻抗增大, 此误差亦增加。

当电路及结构一定时, 零电流基本上是一个定值(不考虑温度变化影响), 它与被测量无关, 可视为一恒流源, 因此可预知其对测量的影响而设法加以补偿。

二、积分型A/D转换器

1. 双斜积分型A/D转换器

双斜A/D转换器是基于积分转换原理工作的。这种A/D转换器自从1965年问世以后, 在工程实践中表现出独特的优点, 因此, 得到迅速的推广和使用。以后, 相继出现了多种改进的积分型A/D转换器和复合的积分型A/D转换器。

(1) 基本转换原理

积分型A/D转换器的核心部件是积分器。在转换过程中首先接入模拟输入电压 U_i ，对 U_i 进行定时积分。然后，在同一个积分器的输入端换接反极性的基准电压 U_R ，对 U_R 进行定值的反向积分。通过两次积分，将输入电压 U_i 转换成与其成正比的时间间隔，此时间间隔可以很简便地用脉冲计数法精确地测出，从而获得数字化的转换结果。所以，一次转换过程中主要包括两个阶段：一是对 U_i 进行定时积分的采样阶段；二是对定值的 U_R 进行反向积分的比较阶段。简单的作用原理图如图1-1所示。转换过程中积分器的输出波形如图1-2所示。

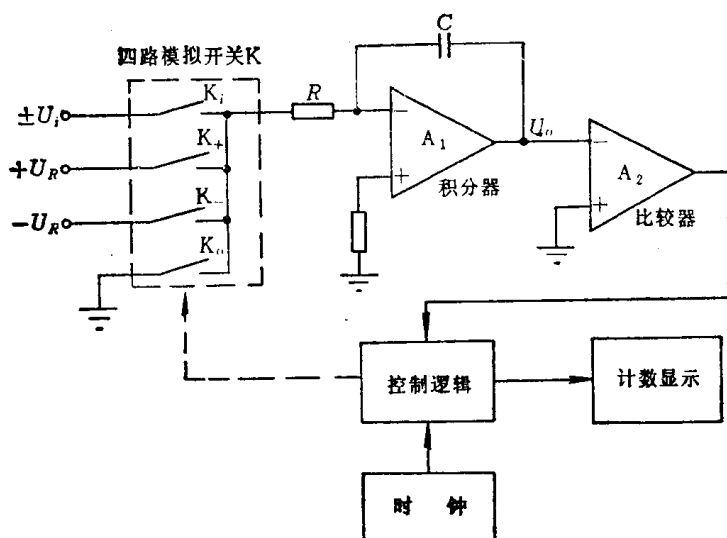


图1-1 双斜积分型A/D转换器的作用原理框图

图中，由电阻 R 、电容 C 和放大器 A_1 组成积分器。 A_2 为比较器。 K 为四路模拟切换开关，它在逻辑控制单元的控制下，任何瞬间只有一路开关接通。

在初始条件下设 K_0 接通，积分器输入端接地，其输出电压 U_o 等于零，这是转换前的初始工作状态。

在 T_1 采样期内，开关 K_1 接通，输入电压 U_i 接入，积分器对 U_i 积分。

$$U_o = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} U_i dt = U_{o1}$$

$$\therefore U_{o1} = -\frac{T_1}{RC} \bar{U}_i \dots\dots\dots (1-1)$$

其中

$$\bar{U}_i = \frac{1}{T_1} \int_{t_1}^{t_2} U_i dt$$

式中, $\bar{U}_i$ 为输入电压 U_i 在 T_1 时间内的平均值; T_1 为采样时间, 是一个确定的值。

在 T_2 比较期内, K_+ 或 K_- 接通, 积分器对一个与 U_i 极性相反的基准电压 U_R 进行积分, 积分器输出电压的斜变方向与采样期相反, 直到积分器输出电压返零。

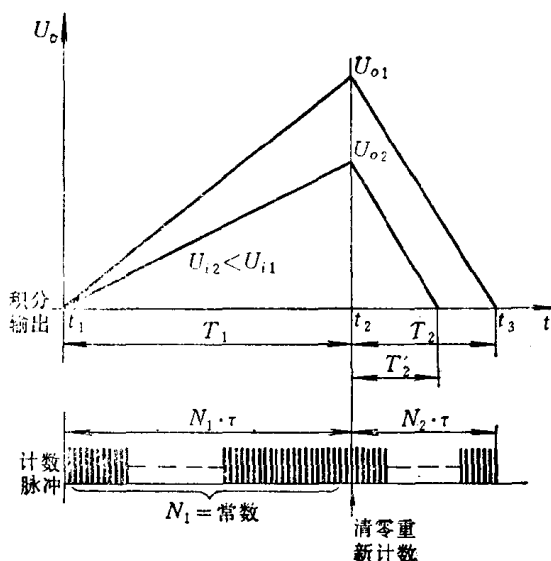


图1-2 转换过程中积分器的输出波形

即

$$U_o = U_{o1} - \frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_3} U_R dt = 0$$

$$U_{o1} - \frac{T_2}{RC} U_R = 0$$

$$U_{o1} = \frac{T_2}{RC} U_R \quad (1-2)$$

比较式(1-1)和式(1-2)可得:

$$T_2 = -\frac{T_1}{U_R} \bar{U}_i \quad (1-3)$$

从式(1-3)可以看出, 时间间隔 T_2 与输入电压 U_i 在 T_1 时间内的平均值成正比, 从图1-2可看出, 当 U_i 减小, 定时采样后的积