

高等学校试用教材

数字化测量技术

上册

哈尔滨工业大学尤德斐 主编

机械工业出版社

编者的话

本书是根据1978年4月在天津召开的一机部高等院校对口专业教材会议的精神及1978年7月在哈尔滨召开的电磁测量技术及仪表制造专业教学大纲审定会所通过的教学大纲编写的。

鉴于过去电磁测量技术及仪表制造专业原设的《数字式仪表》课程偏重于典型数字仪表的讲解,缺乏系统性,因此,参加本书大纲讨论的有关院校代表一致认为应改变这种教学方法,将数字式仪表中的各种部件归纳分类,加强理论分析及误差计算,进而介绍数字化测试系统的初步知识,将本课程改名为《数字化测量技术》。

全书共分四篇,分上、下两册出版。上册有一、二两篇:第一篇为基本电子模拟部件,内容包括集成运算放大器及其在测量线路中的应用,模拟电压切换开关及斩波器,模拟电压比较器,参考电压源等;第二篇为数字逻辑设计基础知识,内容包括组合逻辑设计,时序逻辑设计,显示器及译码器,典型数字频率计的介绍等。下册有三、四两篇:第三篇介绍各种数-模及模-数转换器,以及为扩展应用所需的各种模-模转换器,并对干扰的抑制和整机误差的分析与综合作了较详细的讨论;第四篇详细介绍了我国生产的数据采集装置的整体设计思想及其主要部件。全书最后对微处理器在测量中的应用及通用仪表接口作为附录进行了简单介绍。

本书可做为高等院校电磁测量技术及仪表制造专业的试用教材。也可供从事本专业工作的工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工业大学尤德斐同志主编。参加编写的有哈尔滨工业大学涂君载、王连弟、罗远瑜三位同志,上海工业大学陆慧珠同志,复旦大学郭健民同志。上海工业大学夏雪生同志担任主审,对全书作了仔细的审阅,并提出了许多宝贵的修改意见。在编写过程中还得到了上海电工仪器研究所,上海电表厂,哈尔滨电表研究所,北京无线电实验仪器厂及上海工业大学等单位的大力支持和帮助,对此表示深切的谢意。

一九七九年七月二日

目 录

序论	1
第一篇 基本电子模拟部件	
第一章 集成运算放大器	7
§ 1-1 集成运算放大器的基本概念	7
§ 1-2 反相型电路与加法运算器	10
§ 1-3 同相型电路和跟随器	14
§ 1-4 差动型电路与减法运算器	18
§ 1-5 运算放大器的失调和漂移	20
§ 1-6 积分运算器	27
§ 1-7 运算放大器的稳定性和相位补偿	36
§ 1-8 运算放大器的频率响应峰值、阶跃响应和摆率	47
第二章 模拟电压切换开关与斩波器	63
§ 2-1 概述	63
§ 2-2 双极型晶体管模拟开关	64
§ 2-3 结型场效应管模拟开关	77
§ 2-4 MOS型场效应管模拟开关	84
§ 2-5 斩波器	89
第三章 模拟电压比较器	95
§ 3-1 概述	95
§ 3-2 模拟电压比较器的特性参数	95
§ 3-3 差值放大器比较器	96
§ 3-4 线性集成运算放大器构成的比较器	102
§ 3-5 电容记忆周期校正式比较器	109
第四章 参考电压源	112
§ 4-1 概述	112
§ 4-2 齐纳二极管	112
§ 4-3 齐纳管参考电压源及误差分析	115
§ 4-4 齐纳参考电压源的设计举例	121
第五章 集成运算放大器在测量线路中的应用	126
§ 5-1 低漂移放大器	126
§ 5-2 电桥放大器	130
§ 5-3 模拟信号变换放大器	133
§ 5-4 线性检波器和绝对值放大器	142
§ 5-5 二极管函数产生器	146

§ 5-6 对数和反对数放大器	155
§ 5-7 模拟乘法器和除法器	160

第二篇 数字逻辑设计基础知识

第六章 组合逻辑设计	167
§ 6-1 数制与编码	167
§ 6-2 逻辑代数简述	173
§ 6-3 逻辑表达式	175
§ 6-4 组合逻辑设计	182
第七章 时序电路	188
§ 7-1 触发器	189
§ 7-2 计数器	196
§ 7-3 特殊计数器	202
§ 7-4 系数乘法器	214
§ 7-5 寄存器	224
§ 7-6 时序电路的设计和分析	227
§ 7-7 时序电路分析与设计举例	240
§ 7-8 利用 ROM 和 PLA 进行逻辑设计	245
第八章 显示器和译码器	253
§ 8-1 数字显示器	253
§ 8-2 译码器	258
第九章 数字频率计	265
§ 9-1 数字频率计的工作原理	265
§ 9-2 数字频率计的测量误差	271
§ 9-3 数字频率计整机举例	275
§ 9-4 数字频率计的发展动态	291

序 论

(一) 数字化测量技术的特点、地位及发展

数字化测量技术的基本内容是将连续的被测物理量先转换成相应的量子化了的断续量,然后予以数字编码,进而传输、存贮、显示或打印。原则上说对各种物理量都存在着这种处理的可能性,但最方便的还是电量,特别是直流电压和频率两者易于数字化,其它物理量则可通过各种传感器或转换器变换成直流电压或频率后再对它进行数字化测量。

第一台数字式电压表出现于五十年代初。这种仪表之所以出现,一方面由于电子计算机的应用逐渐推广到系统的自动控制及实验研究的领域,提出了将各种被观测量或被控制量转换成数码的要求,即为了实时控制及数据处理的需要;另一方面,也正是电子计算机的发展,带动了脉冲数字电路技术的进步,为数字化仪表的出现提供了条件,所以数字化测量仪表的产生与发展是和电子计算机的发展密切相关的,今后,也还会这样。

相对其它测量仪表,数字式仪表具有测量精度高、灵敏度高、测量速度快、读数客观、测量自动化及将测量结果以数码形式输出等一系列优点。

因此,数字式电压表问世之后,就不仅作为模拟量-数字量转换之用,而且被应用于更广泛的测量技术领域,使电测技术的水平大大提高了一步。它已经取代并正在进一步取代各种传统的模拟式电工仪器与仪表,成为正在发展中的全新的测量仪表的方向。

当然这些优点并不是一开始就完全形成的。第一台数字电压表是电子管式的,技术指标很低,也难以提高。1958年又从另一途径制成了类似自动电位差计式的数字电压表,它采用了逐位切换、逐位比较的办法,以继电器及步进选择器等代替了原来用电子管作的切换开关及逻辑电路,做到了四位数字显示,误差小于0.5%,但速度较低,一次测量约需0.5~3秒,要求驱动功率大、寿命短,因而没有得到很大的发展。

晶体管代替了电子管之后,数字仪表获得了飞速的发展。用晶体管制成了性能良好、漂移很小的运算放大器、快速而又误差很小的切换开关、各种复杂的逻辑电路及计数器、高稳定度的低压基准源等等,使人们可以做出体积不大、性能优良、足以与高精度电工仪器相抗衡的许多数字式仪表,包括电压表、繁用表、相位表、电桥、频率计等等,同时各种快速的每秒转换次数高达几万次至几十万次的模-数及数-模转换器也创制出来了。

七十年代以来,随着半导体器件集成化程度的不断提高,数字式仪表的发展又进入了一个新阶段。高集成度的小型化数字仪表,特别是盘式数字仪表不仅准确可靠,而且价格低廉,如果说六十年代的数字式仪表主要在实验室中应用,那么现在的数字式仪表已经扩大到几乎一切测量领域及生产现场。不只是测量电量,而且在测量诸如长度、重量、温度、流量、压力、振动、冲击、扭矩、磁场……时,人们也乐于应用一个读数方便、指示准确的数字式表头来显示测量的结果。另一方面生产过程自动控制系统中越来越多地采用计算机多级控制,为了自动检测被控参量并获得数码以输入计算机,微型固体化的模-数及数-模转换器也得到大量的应用。

近年来,数字化测量技术的一个新的发展方向是数字化测量系统。以前在晶体管的基础上曾经制成得到广泛应用的多路巡回检测装置。这种装置可以对几十点甚至上千点的参数进行自动的、按规定次序的测量、显示、越限报警及存贮、打印。这种装置曾对电站、化工厂、冶金工业的生产过程自动化作出过贡献,近年来这种装置已经通过功能组件化而实现了标准化与通用化,性能与功能都得到了较大的提高。随着计算机应用的发展,在大型的科学实验装置上已普遍采用计算机按一定程序控制测量过程,并对测量结果进行数据处理,于是产生了如何以标准化了的通用仪表接口将无数不同的仪表与各种不同的电子计算机联机的问题,近年已经发展了CAMAK及IE E488两种国际上推荐的通用仪表接口系统。它们都采用总线制应答工作方式,用它们将各类仪表与计算机配合,可以构成十分复杂的自动化测量系统,当然这样的系统必然是数字化了的。

最近由于微处理机的出现,数字化测量技术的发展又有了更先进的远景,使其性能出现了革命性的变化:

(1) 程控操作 装有微处理机的所谓智能仪器可以根据操作人员通过功能按键送来的指令按预先存贮的操作程序自动完成测量工作。当仪器出现故障时还可以自动寻找代用方案,迅速投入备用部件,大大提高了仪器的可靠性指标。

(2) 自校准 可以根据机内或机外的基准,随时进行自校,并记忆仪器的系统误差,然后在测量阶段自动从测量结果中扣除系统误差。这就使仪器仪表可以在采用低档元件的情况下保证较高的准确度,并可降低对一般元件稳定性的要求,从而降低了精密数字式仪表的成本。

(3) 自诊断故障 智能仪器可以利用微处理机的逻辑功能自动诊断故障所在的部位,给出必要的显示,从而缩短维修时间,提高了仪器的使用率。

(4) 计算与处理 智能仪器还可以对测量数据进行运算和处理,例如通过多次自动测量同一参数,取其平均值作为测量结果,从而减弱随机误差影响,提高测量的精度。又如进行线性化或非线性标度变换,多参数测量结果按某一公式运算获得所需测量参数的结果等。

(5) 接口方便 智能仪器可以利用微处理机的重编数据格式的能力,以较多的软件和较少的硬件来提高与其它仪器的接口性能。

我国第一台数字式电压表于1958年在上海制成,到1965年试制成功了一批精度较高的全晶体管式的电压表及频率计,近年来数字仪表的生产有了很大的发展,不仅成批生产了使用中规模集成电路的电压表、频率计、相位表、万用表、功率表、欧姆表等等,而且数字式盘用表也有了系列化产品,复式采样的高精度数字电压表也已初步制成。另外功能组件化的数据采集装置及通用仪表接口系统也都试制成功,标志着我国数字化测量技术达到了接近现代的水平。随着工农业及国防技术的发展,对数字化测量技术的要求越来越高,可以预期数字化测量技术将有一个高速度的发展。

(二) 数字化测量仪器的结构框图及主要技术指标

数字式测量仪表的通用结构框图示于图0-1中。

各种被测量一般都先经过被测量-直流电压变换器变换为直流电压,然后由直流电压-频率转换器变换成相应的频率量 f ,再由计数器在单位时间内测定週波数而获得频率的量值,最后存贮所得週波数、经译码后显示为相当于被测量的数字值。由图可见,直流电压也可以

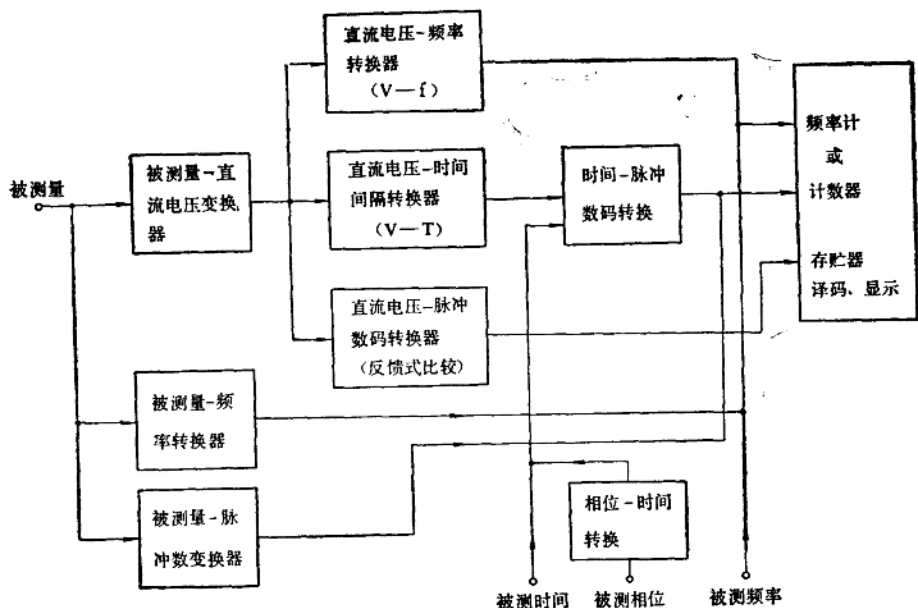


图 0-1 数字化测量仪表的通用结构框图

被转换成相应的时间间隔 T ，然后又经过一次时间间隔-电脉冲数码的转换，而进入存储器，最后被译码、显示。另有一类则为将一个可编码的可变直流电压与被测直流电压相比较，其过程和用直流电位差计测量直流电压相似，在最终平衡时获得代表可变直流电压的编码量，经译码后显示出来。现有的各种数字直流电压表的原理大体都可以归纳为以上三类，当然也出现了某些复合以上二种方式的类型、或某些派生的型式，但它们的基本构思还是这一些。

有一些物理量可直接变换成相应频率，如弦式张力计，谐振式电容测微计、涡轮流量计等，它们的输出频率可直接由频率计测定而读数。

还有一类物理量可直接变换成相应的脉冲数，如光栅式测微计、激光干涉仪等，它们的输出脉冲数可直接由计数器计测而读数。

至于时间量，其中包括频率和相位，更是容易实现数字化测量，这在图0-1中已一目了然，这里不多说了。

至于一台具体数字式仪表的内部结构框图当然要复杂得多，并且各种不同原理的仪表框图也有相当大的差别，这在以后的章节中将要分别详述。但一般来说下面列举的一些部件总是存在的：衰减器、切换开关、前置放大器、基准电压源、某一种模-数或数-模转换器、标准的时标发生器（时标又称钟频）、计数、译码、显示器、控制逻辑电路等。它们之间的一般关系示于图0-2中。这虽是非常简单的示意图，并不能完全表达准确的关系，但有助于了解仪表的基本组成部分及其结构。

数字式仪表种类很多，难以一一列举其技术指标，现以用得最多的数字式电压表为例，列出其主要性能示于表0-1中。

表中只列入了显示位数、灵敏度、误差三项指标，除此之外，还有：

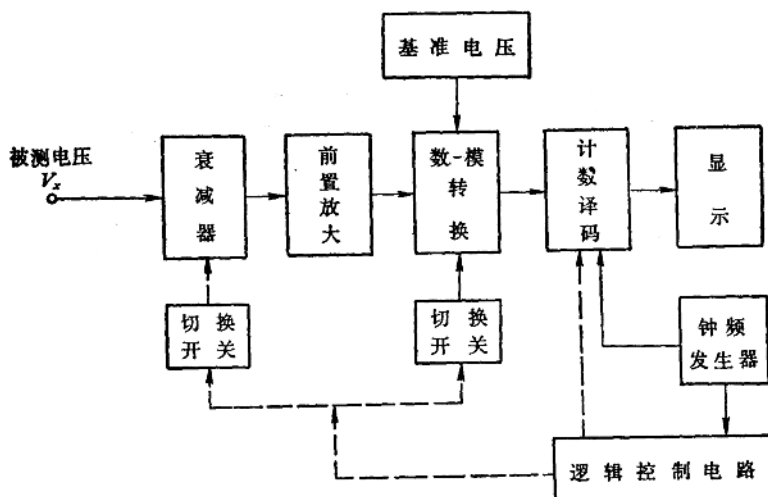


图0-2 数字电压表简单框图

表0-1 数字电压表的性能等级表

性能等级	显示位数	灵敏度	误差
A	109999~1299999	10 μ V, 1 μ V, 0.1 μ V, 0.01 μ V	读数的0.006%~0.0004% + 满度的0.0004%
B	12000~599999	100 μ V, 10 μ V, 1 μ V, 0.1 μ V	读数的0.005%~0.01% + 满度的0.0004%
C	9999~12000	100 μ V, 10 μ V,	读数的0.02%~0.1% + 满度的0.02%
D	3000~6000	1mV, 100 μ V, 10 μ V	读数的0.05%~0.1% + 满度的0.05%
E	999~2000	10mV, 1mV, 100 μ V, 10 μ V	读数的0.1~0.2% + 满度的0.1%
F (盘用表)	1999~9999	同上	读数的1%~0.05% + 满度的0.02%~0.5%

输入阻抗：一般优于1M Ω ，高精度表优于1000M Ω ，

测量速度：每秒几次到几十次不等，复式采样的高精度表一般需一秒或几秒一次。

串态干扰抑制比：30dB~80dB不等。

共态干扰抑制比：80dB~140dB不等。

辅助功能有自动量程切换、自动极性显示、数字值BCD编码输出等等。

近年来在数字式仪表基础上发展起来的数字式自动测试系统一般地具有图 0-3 所示的框图结构。这种测试系统可以完成以下操作过程：将测试仪器与设备连接成测量电路，将被测件接入测试端，向被测件提供测试用的激励信号（如果被测量本身具有能量如电压，则不需激励），控制测量过程，处理测量数据，记录与显示测量结果。在图中，自动程序控制设备单元可以是较简单的程控器，也可以是计算机（小型机或微处理机），其作用是执行程控、运算、存贮、逻辑等功能；电源单元用来供给有源被测件所需的功率；激励源视被测件不同可以是振荡器、函数发生器、直流电压源、脉冲电压源等，其作用是供给被测件激励信号（例

如给被测电阻通以电流），数字化测量仪表可以是交直流数字电压表、数字欧姆表、数字相位计，数字功率计，频率计或计数器等，用来测量被测件对激励信号的响应，电路开关与转换单元是开关与其它零件的组合，通过它的动作组成并变换测量电路，对信号加以分配与转

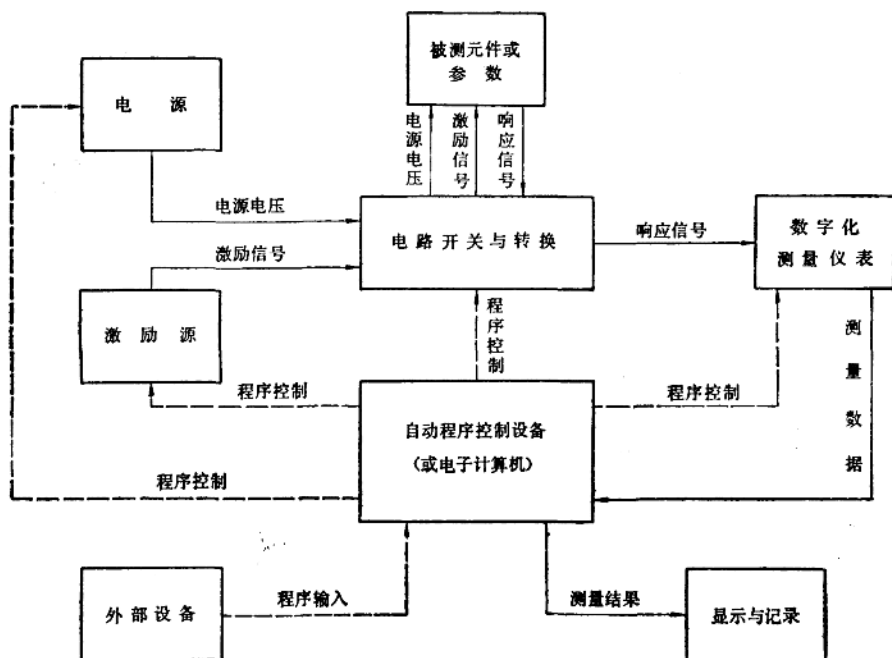


图0-3 自动测试系统原理框图

接，使之符合特定的测试要求；显示与记录单元可以是曲线记录仪，以规定的格式显示并记录下来；外部设备为电传打字机、纸带穿孔与阅读机，外存储器等。这个系统的工作过程如下：

- (1) 利用外部设备编制测试程序或输入事先编制的程序；
- (2) 程控设备按测试程序逐条发出操作指令；
- (3) 进行系统的自校准；
- (4) 各单元按指令进行动作；
- (5) 给出测量结果。对于有电子计算机或数据处理装置的系统，将测量数据加以集中处理，给出结果，或将结果与规定指标进行比较，作出判断、发出通报信息；
- (6) 转入下一次测试或根据测试结果的情况转入另一程序。

在自动测试系统的工作过程中，人们可以通过控制台外部设备与记录显示设备等了解测试的运行情况，并在必要时介入测试，发出必要的指令，完成自动系统不能进行的辅助工作。

(三) 数字化测量技术的课程内容

数字化测量技术的特点和内容已如上述，为了使读者具备比较系统的知识，能够针对具

体的测量任务，自行设计或选用数字式测量仪表及测量系统，本课程将介绍以下四方面的基本知识：

（1）基本电子模拟部件，其中包括集成运算放大器、模拟电压切换开关与斩波器，模拟电压比较器、参考电压源集成运算放大器在测量线路中的应用等。这些内容将在一般晶体管电子学基础上进一步详细讨论用于数字化测量技术的各种放大器，切换开关，基准电压源等。因为尽管是数字化测量，但真正决定测量精度及仪表其它性能的主要还是这些模拟部件的性能。

（2）数字逻辑设计基本知识，其中包括组合逻辑设计，时序逻辑电路设计，显示器和译码器，数字式频率计等。这些知识对于设计一台数字式测量装置是必不可少的。这里的频率计既是一种数字式仪表，又常常是其它数字式测量仪器中不可缺少的重要部件，用它作为例子来说明数字逻辑电路的设计与应用，可增进读者对逻辑电路基础知识的进一步理解。

以上两部分是数字化测量技术的电路基础。

（3）数-模转换器和模-数转换器，其中包括数-模转换器，模-数转换器，模-数转换中的干扰的抑制，模-模转换器，数字化测量仪表的误差分析与综合五个章节。这一部分是数字化测量技术的主要内容。

（4）自动检测装置，包括模拟多路测量和数据采集装置两部分。这里将详细介绍国内已经生产的比较先进的数据采集装置，使学习者能在前三部分的基础上熟悉复杂的数字化测量装置的结构原理及设计思想。

在本书的最后还有两篇附录：微处理机及其在测量中应用的简单介绍和 IEE488 仪表接口系统简单介绍。这是两个重要的发展方向，我国正处在试制推广阶段，值得引起普遍的关注

第一篇 基本电子模拟部件

连续变化的物理量称为模拟量。电平是连续的或以无限小的阶跃量改变的电压或电流信号，叫做电子模拟信号。与电子模拟信号的传输，处理有关的电路单元，称做电子模拟部件。

在工程实践中，测量所面对的绝大部分物理量属于模拟量，而且大部分传感器的输出和大部分执行元件的输入也都是电子模拟信号。因此，电子模拟部件是数字化测量系统中经常遇到的重要组成部分。

要介绍所有的电子模拟部件是不可能的，本篇只涉及在数字化测量技术中最常用到的基本电子模拟部件，即集成运算放大器，模拟电压切换开关及斩波器，模拟电压比较器，参考电压源以及集成运算放大器在测量电路中的应用。

第一章 集成运算放大器

§ 1-1 集成运算放大器的基本概念

所谓模拟运算器，是指能够实现对电子模拟信号进行某种计算功能的部件。

由电阻，电容等无源器件可以构成简单的运算网络，但其运算结果的粗糙程度使之很难在实际中付诸使用。然而，在无源运算网络中加入一个放大器并构成深度的负反馈闭环，运算精度就出现了质的飞跃，从而获得了非常广泛的应用。这种放大器目前已集成为单片式结构，并且不断而迅速地发展出种类繁多的系列产品。

(一) 运算放大器的基本特点

具备如下三个基本特点的放大器可称为运算放大器。

1. 运算放大器的输出电压正比于两个输入电压之差，即 $V_o = A(V_1 - V_2)$ 。也就是说它是具有三个端子输入、两个端子输出、其中一个端子做为输入和输出公用的一种放大器。这个放大器只放大两个输入信号的差值，而对它们的共模分量应有很强的抑制能力。

2. 运算放大器的频带可宽可窄，但频带的下限必须从直流开始。

3. 运算放大器不但能工作在零频率，而且要求其直流放大倍数必须充分大，这一点非常重要。

(二) 运算放大器的构成基础和引出端子

基于下述原因，现代集成运算放大器均以差动放大电路为基础。

1. 双端输入单端输出的直接耦合差动放大电路具有上述运算放大器的基本特点。

2. 差动放大电路可以少用乃至不用电容元件，而且可以避免使用高值电阻，因此便于集

成化。

3. 差动放大电路的特性不完全决定于电路中电阻的阻值, 而往往取决于电阻的对称性和阻值比, 集成工艺恰好易于保证电阻比的高精度。

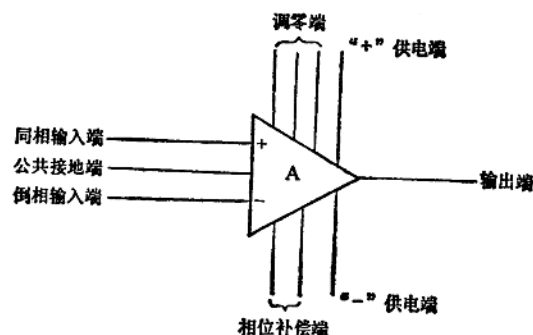


图1-1 集成运算放大器的引出端子

4. 在单片集成电路中, 一对晶体管在同一硅片上非常靠近, 而且受到同样条件的处理, 因此特性几乎完全相同, 这就充分发挥了差动放大电路漂移小、共模抑制能力强等特长。

以差动放大电路为基础的现代集成运算放大器, 通常有如图 1-1 所示的引出端子。

实际产品中由于内部具体电路的差异, 所给出的调零端和相位补偿端的数目可能不同, 但供这些用途的引出端子是必备的。

(三) 集成运算放大器的主要技术指标及含意

1. 开环电压增益 G_{oi}

运算放大器在没有任何外部反馈情况下的差动电压放大倍数记作 A_d , 如用对数表示称开环电压增益, 即 $G_{oi} = 20 \lg A_d$ 。

2. 输入失调电压 V_{os}

运算放大器两输入端都接地并把调零端子短路时, 由于制造上的不对称总有一定的电压输出, 称为失调输出电压 V_{off} , 把它向放大器的输入端折算, 即除以差动放大倍数 A_d , 称为输入失调电压 $V_{os} = V_{off}/A_d$ 。实际的 V_{os} 可正可负, 但我们只对绝对值感兴趣, 希望它越小越好, 一般为毫伏级。

3. 输入失调电流 I_{os}

运算放大器两输入端都接地时总有某些电流流入或流出, 实质上它们是差分输入级的偏置电流 I_{b1} 和 I_{b2} 。 I_{b1} 和 I_{b2} 之差称输入失调电流 $I_{os} = I_{b1} - I_{b2}$ 。 I_{os} 越大说明输入级两晶体管的特性越不对称, 当然也希望它越小越好, 一般为微安级。

4. 输入偏置电流 I_B

输入偏置电流是指输入信号为零时两个输入端静态基极电流的平均值 $I_B = (I_{b1} + I_{b2})/2$, 因此可以说 I_B 是两基极电流的共模分量, 两输入失调电流 I_{os} 则是它们的差模分量。

输入偏置电流的大小主要决定于第一级晶体管的质量, 若 β 小则 I_B 大, 而 I_B 大一般 I_{os} 也大, 所以希望它小好。实际应用中必须充分注意 I_B 的影响, 因为不管信号源怎样, I_B 总要流过去, 在信号源内阻较大时会形成相当大的附加电压输入。

5. 输入失调电压温度系数 $\Delta V_{os}/\Delta T$

单位温度变化引起的输入失调电压的变化量称输入失调电压温度系数。

6. 输入失调电流温度系数 $\Delta I_{os}/\Delta T$

单位温度变化引起的输入失调电流的变化量称输入失调电流温度系数。

$\Delta V_{os}/\Delta T$ 和 $\Delta I_{os}/\Delta T$ 是衡量运算放大器温度稳定性的主要参数。

7. 电源电压灵敏系数 $PSRR$

电源电压灵敏系数是指电源电压变化引起输入失调电压变化的系数, 也称为电源电压抑制比。 $\Delta V_{oi}/\Delta V_{cc}$ 称正电源电压抑制比 $PSRR^+$, $\Delta V_{oi}/\Delta V_{ee}$ 称负电源电压抑制比 $PSRR^-$ 。

8. 共模电压增益 G_{cm}

共模电压放大倍数 A_{cm} 是指放大器的两输入端加入极性相同大小相等的信号时, 输出端(对地)输出电压与输入电压之比, 写成分贝式称共模电压增益: $G_{cm} = 20\lg A_{cm}$

放大器两输入端分别加入 V_1 和 V_2 时, 我们把 $\frac{V_1 + V_2}{2}$ 称做共模输入电压 V_{cm} , 这是同时

作用在两输入端上大小相等方向相同的信号。此时差模输入信号为 $+\frac{V_1 - V_2}{2}$ 和 $-\frac{V_1 - V_2}{2}$,

它们分别作用在两输入端上, 大小相等但方向相反。

9. 共模抑制比 $CMRR$

共模抑制比反映了放大器对共模输入电压的抑制能力。其定义为放大器差动放大倍数 A_d 和共模放大倍数 A_{cm} 之比, 写成分贝式为: $CMRR = 20\lg A_d/A_{cm}$

10. 输出电阻 R_o

输出电阻 R_o 是指运算放大器不接负载时输出端对地的电阻。

11. 输入电阻 R_i

输入电阻一般是指差动输入电阻。由于在直流情况下难于把零电流的影响分开, 所以 R_i 通常是在交流 (1kHz) 小信号情况下测得的。

12. 共模电压范围

共模电压范围是指不影响放大器正常工作的输入端允许施加的同相电压范围, 当运算放大器工作在同相放大状态, 特别是作跟随器应用时要特别注意这个问题。

13. 最大输出电压 V_{opp}

最大输出电压是指运算放大器失真的最大输出幅度, 一般用峰-峰值来表示。有时也称动态输出范围。

14. 电压摆率

电压摆率是指输出电压随时间变化快慢的一种尺度通常以 $V/\mu s$ 来衡量, 在运算放大器中小信号响应和大信号响应是不同的, 电压摆率用来衡量大信号作用下放大器的瞬态响应。

15. 单位带宽

单位带宽是指运算放大器的增益随工作频率升高而降低直到增益为 0 dB 时的频率。有时也称特征频率。

16. -3 dB 带宽

指工作频率升高放大倍数下降, 直到增益由原来的低频值下降 3 dB 那一点的频率。

17. 放大器功耗 P_o

放大器的功耗是指在静态时所消耗的电源功率。

(四) 运算放大器的应用范围

随着工艺水平的提高, 集成运算放大器的性能就更加完善, 它的应用范围由原来只做运算器而扩展到其它领域, 如脉冲电压发生器、波形发生器、有源滤波器、采样保持器、比较器、检波器以及各种转换器、稳压器、电流源等方面。在控制系统, 如测量仪器, 通讯设

备, 电子计算机等整个电子技术领域, 也都获得了广泛的应用。

§ 1-2 反相型电路与加法运算器

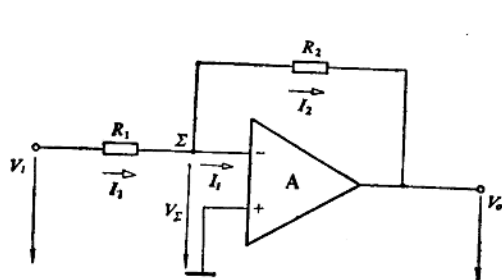


图1-2 反相型放大电路

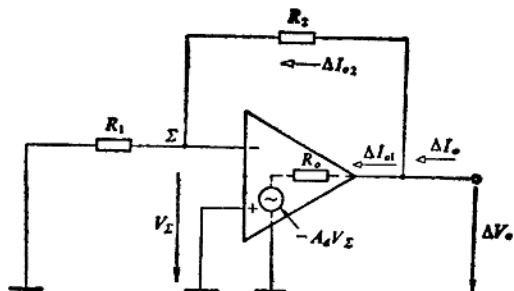


图1-3 求 R_{of} 的电路

(一) 反相型放大电路与加法运算器

反相型放大电路如图1-2所示, 是电压并联负反馈结构。若反馈足够深, 可认为误差电流 $I_i \rightarrow 0$, 相加点 Σ 的电位是虚“地”, 即 $V_z \rightarrow 0$ 。

于是 $I_1 \approx I_2$, 即 $\frac{V_i - V_z}{R_1} \approx \frac{V_z - V_o}{R_2}$

$$\text{得} \quad \frac{V_o}{V_i} \approx -\frac{R_2}{R_1} \quad (1-1)$$

因此, 反相型电路也称倒相比例运算器。

(二) 反相型电路的输出电阻

闭环输出电阻 R_{of} 的定义为输入信号短路时, 在输出端上作用以电压 ΔV_o , 该电压与由其所引起的输出端电流的变化 ΔI_o 之比, 即 $R_{of} = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_o} \Big|_{V_i=0}$ 。参看图1-3, R_o 为放大器本身的开环输出电阻, 相关电压源 $-A_d V_z$ 反映了放大器的放大作用, 按照图1-3有如下关系式:

$$V_z = \Delta V_o \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\Delta I_o = \Delta I_{o1} + \Delta I_{o2}$$

$$\text{其中} \quad \Delta I_{o1} = \frac{\Delta V_o - (-A_d V_z)}{R_o} = \Delta V_o \frac{1 + A_d \frac{R_1}{R_1 + R_2}}{R_o} = \Delta V_o \frac{1 + A_d F_b}{R_o}$$

这里 $F_b = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 为反馈系数。

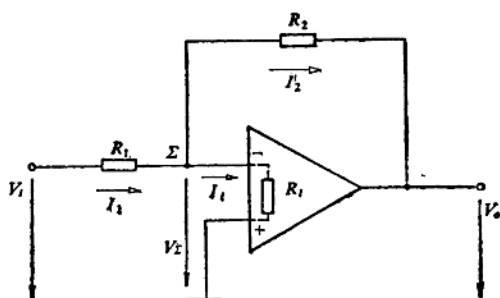
$$\Delta I_{o2} = \frac{\Delta V_o - V_z}{R_2} = \Delta V_o \frac{F_b}{R_1}$$

$$\text{得} \quad R_{of} = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_{o1} + \Delta I_{o2}} = \frac{R_o}{1 + A_d F_b + \frac{R_2}{R_1} F_b} \quad (1-2)$$

若 $R_o \ll R_1$

$$\text{则} \quad R_{of} \approx \frac{R_o}{1 + A_d F_b} \quad (1-3)$$

深度负反馈时, 由于 $(1 + A_d F_b) \gg 1$, 则 R_{of} 降至很小值表现出很强的负载能力。

图1-4 求 R_{if} 的电路

(三) 反相型电路的输入电阻 R_{if} 与密勒效应

输入电阻在数值上等于输入电压与由输入电压引起的输入电流之比, 即 $R_{if} = \frac{V_i}{I_1}$, 参

看图 1-4。其中

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 + I_i = \frac{V_i - V_o}{R_2} + \frac{V_i}{R_i} \\ &= V_i \frac{R_i + A_d R_i + R_2}{R_2 R_i} \end{aligned}$$

$$\text{所以 } V_o = I_1 \frac{R_2 R_i}{R_i + A_d R_i + R_2}$$

$$\text{由于 } V_i = I_1 R_1 + V_o = I_1 R_1 + I_1 \frac{R_2 R_i}{R_i + A_d R_i + R_2}$$

$$\text{得 } R_{if} = \frac{V_i}{I_1} = R_1 + \frac{R_i R_2}{R_i + A_d R_i + R_2} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明当 $A_d \rightarrow \infty$ 时, $R_{if} \approx R_1$ 。改写式 (1-4) 可发现更清晰的物理意义

$$R_{if} = R_1 + \frac{R_i R_2}{R_i + A_d R_i + R_2} = R_1 + \frac{\frac{R_2}{1 + A_d} R_i}{\frac{R_2}{1 + A_d} + R_i} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 表示一个电阻串、并联网络的总电阻, 如图 1-5 所示, 这就是反相型电路的等效输入回路。其中 R_1 和 R_i 是显然存在的, 第三只电阻反映了跨接于放大器输入和输出端上的反馈电阻 R_2 对输入回路的影响。这种把反馈电阻 R_2 除以 $(1 + A_d)$ 后向放大器输入端的等效折算, 称为密勒效应。运用密勒效应不但能立即写出闭环输入电阻的表达式, 而且可使负反馈放大器的许多电路计算得到简化。

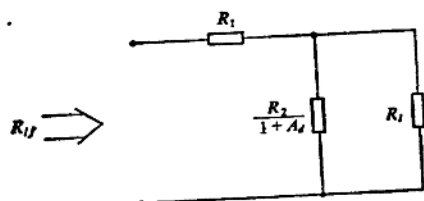


图1-5 反相型电路的等效输入回路

(四) 反相型电路的运算精度

运算放大器的非理想因素会给结果带来误差。首先考虑有限差动放大倍数 A_d 和有限输入电阻 R_i 的影响, 应用密勒效应, 画出如图 1-6 所示的等效电路, 由图可得

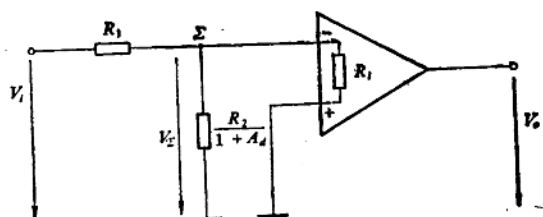


图1-6 反相型放大器的等效电路

$$\begin{aligned} V_o &= -A_d V_\Sigma = -\frac{A_d V_i \frac{R_i R_2 / (1 + A_d)}{R_i + R_2 / (1 + A_d)}}{R_1 + \frac{R_i R_2 / (1 + A_d)}{R_i + R_2 / (1 + A_d)}} \\ &= -V_i \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_d} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_i} \right)} \right) \end{aligned}$$

或写成闭环放大倍数的形式

$$\begin{aligned}
 A_f = \frac{V_o}{V_i} &= -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_d} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_i} \right)} \right) \\
 &= -\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{\frac{1}{A_d} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_i} \right)}{1 + \frac{1}{A_d} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_i} \right)} \right) \quad (1-6)
 \end{aligned}$$

式(1-6)右面第一项是理想结果,第二项则是由于 A_d 和 R_i 不为无穷大而引起的绝对误差。绝对误差与理想结果的比值为相对误差,用 γ 来表示

$$\gamma = \frac{\frac{1}{A_d} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_i} \right)}{1 + \frac{1}{A_d} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_i} \right)} \quad (1-7)$$

如果只考虑 A_d 的影响,即令 $R_i \rightarrow \infty$

$$\text{得 } \gamma = \frac{\frac{1}{A_d} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}{1 + \frac{1}{A_d} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)} = \frac{\frac{1}{A_d} \frac{R_1 + R_2}{R_1}}{1 + \frac{1}{A_d} \frac{R_1 + R_2}{R_1}} = \frac{\frac{1}{A_d F_b}}{1 + \frac{1}{A_d F_b}} \quad (1-8)$$

可见 γ 也和 $1 + A_d F_b$ 这一因子有关, A_d 越大,反馈越深,运算的精度也就越高。

为了消除平均输入基流 I_B 所造成的附加偏移输出误差,须在同相输入端与地之间串接平衡电阻 $R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ (在 § 1-5 中说明)。另外,放大器开环输出电阻 R_o 、负载电阻 R_L

等也要影响运算的精度。

下面同时考虑 A_d 、 R_i 、 R_o 、 R_L 以及 R_B 的影响,利用图 1-7c 求解闭环放大倍数的表达式。图 1-7c 是把反相型电路 1-7a 画成等效电路 1-7b,再运用电源等效变换原理而得到的。

由图 1-7c 可知,

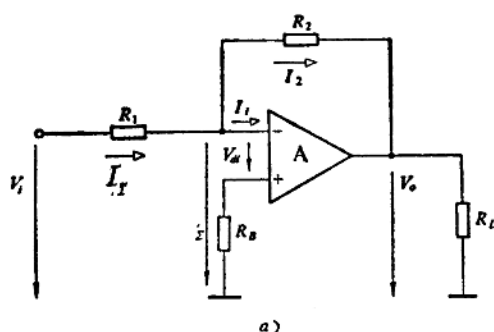
$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{V_i - V_z}{R_1} \\
 I_2 &= \frac{V_z - V_o}{R_2} \\
 V_z &= (R_i + R_B) (I_1 - I_2) \\
 &= (R_i + R_B) \left(\frac{V_i - V_z}{R_1} - \frac{V_z - V_o}{R_2} \right)
 \end{aligned}$$

整理后得

$$\left(1 + \frac{R_i + R_B}{R_1} + \frac{R_i + R_B}{R_2} \right) V_z = \frac{R_i + R_B}{R_1} V_i + \frac{R_i + R_B}{R_2} V_o$$

又由图 1-7c 可知

$$V_o = -A'_d V_{di} + I_2 R_o'$$



$$V_{di} = \frac{R_i}{R_i + R_1} V_z$$

$$V_o = -\frac{A'_d R_i V_z}{R_i + R_B} + \frac{R'_o}{R_2} (V_z - V_o)$$

整理后得

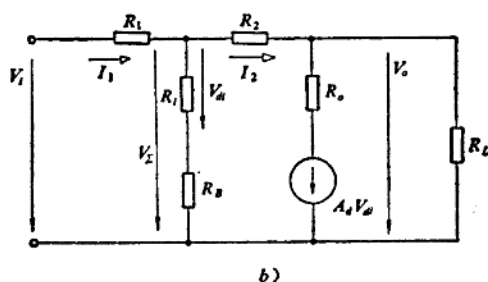
$$V_z = \frac{1 + \frac{R'_o}{R_2}}{\frac{R'_o}{R_2} - \frac{A'_d R_i}{R_i + R_B}} V_o$$

因此

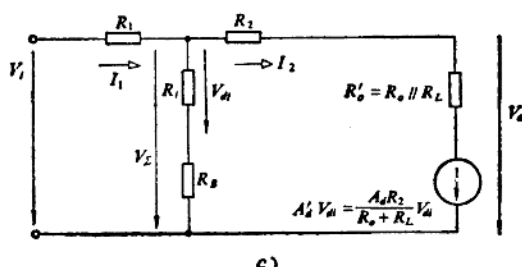
$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{R_i + R_B}{R_1} + \frac{R_i + R_o}{R_2}\right) \left(\frac{1 + \frac{R'_o}{R_2}}{\frac{R'_o}{R_2} - \frac{A'_d R_i}{R_i + R_B}}\right) V_o \\ &= \frac{R_i + R_B}{R_1} V_i + \frac{R_i + R_B}{R_2} V_o \end{aligned}$$

移项合并得

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\left(1 + \frac{R_i + R_B}{R_1} + \frac{R_i + R_B}{R_2}\right) \left(1 + \frac{R'_o}{R_2}\right)}{\frac{R'_o}{R_2} - \frac{A'_d R_i}{R_i + R_B}} \right. \\ & \left. - \frac{R_i + R_B}{R_2} \right] V_o = \frac{R_i + R_B}{R_1} V_i \end{aligned}$$



b)



c)

图1-7 反相型放大器及其等效电路

闭环放大倍数为

$$\begin{aligned} A_i = \frac{V_o}{V_i} &= \frac{\frac{R_i + R_B}{R_1}}{\left(1 + \frac{R_i + R_B}{R_1} + \frac{R_i + R_B}{R_2}\right) \left(1 + \frac{R'_o}{R_2}\right) - \frac{R_i + R_B}{R_2}} \\ &= \frac{\frac{R_i + R_B}{R_1} \left(\frac{R'_o}{R_2} - \frac{A'_d R_i}{R_i + R_B}\right)}{1 + \frac{R_i + R_B}{R_1} + \frac{R_i + R_B}{R_2} + \frac{R'_o}{R_2} + \frac{A'_d R_i}{R_2} + \frac{R'_o}{R_2} \left(\frac{R_i + R_B}{R_1}\right)} \end{aligned}$$

在分子中提出 $\left(-\frac{R_2}{R_1}\right)$ 便得最后表达式: