

本章目标

- 介绍电子学的发展简史
- 集成电路技术的开拓性进展
- 讨论电学信号的分类
- 回顾电路理论中重要的符号约定及主要概念
- 介绍电路分析中的容差分析方法
- 介绍本书中解决问题的方法

2017 年 11 月双极型晶体管发明 70 周年。1947 年 11 月 John Bardeen 和 Walter Brattain 在贝尔实验室发明了晶体管,这标志着半导体时代的开始(如图 1.1 和图 1.2 所示)。晶体管的发明及后续微电子的发展给现代社会带来了巨大的影响,这些影响超越了其他事件带来的变化,重塑了商业交易、机械设计、信息流通、战争及人类交流的方式,影响着人们生活的方方面面。



图 1.1 1948 年 John Bardeen 和 Walter Brattain 在 Brattain 的实验室(图片由阿尔卡特-朗讯提供)



图 1.2 第一个锗双极型晶体管(图片由阿尔卡特-朗讯提供)

在现代社会,电路与元器件是绝大多数设备的主要构成部件。本书将详细阐述这些电路与元器件的工作原理与设计方法。对有志于投身于下一代技术革命的学生而言,这些知识可以为他们从事高级设计工作打下坚实的基础。而对于那些希望在其他技术领域工作的学生来说,本书的知识内容将帮助他们理解微电子学。本书所涉及的技术知识将对他们选择研究领域产生持久影响,并让他们在各自所研究的技术领域充分利用微电子学技术知识。下面介绍晶体管的发展历史。

在发明晶体管数月之后,William Shockley 就提出了双极结型晶体管的工作原理。10 年后的 1956 年,Bardeen、Brattain 和 Shockley 3 人因发明晶体管而获得了诺贝尔物理学奖。

1948 年 6 月,贝尔实验室举行了一场隆重的新闻发布会,宣布了这一发明。1952 年,依据当时的法律,贝尔实验室将晶体管发明专利进行授权,使用该专利的公司需要支付 25 000 美元获得该专利的未来使用权。当时,固态组的另一名成员 Gordon Teal 离开了贝尔实验室,转到 Geophysical Services 公司从事晶体管研究工作,这就是后来的德州仪器(TI)。Gordon Teal 在 TI 开发出了第一个硅晶体管,随后 TI 推出了第一台全晶体管收音机。另一家早期获得晶体管授权的公司是 Tokyo Tsushin Kogyo,1955 年更名为索尼(Sony)。Sony 随后推出了一台晶体管收音机,并提出了营销策略,要让人们都拥有一台自己的收音机,从而打开了晶体管的消费市场。读者可以在参考文献[1,2]及其参考文献中找到以上史实,以及关于晶体管的其他报道。

在 1895 年,Marconi 进行了第一次无线传输,揭开了人类社会无线通信的序幕。几年后,人们发明了第一个电子放大器件——真空三极管。当时,电子学被简单地定义为电子器件的设计与应用,而如今,电子学深深地影响着人们的生活,已经渗透到人们生活的方方面面。从电子产品产值占世界上的国内生产总值(GDP)的比重上可以看出其影响之大,2012 年全球 GDP 大约为 72 万亿美元,其中 10% 直接来自于电子产品产值,见表 1.1^[3-5]。

表 1.1 世界电子市场规模

类 别	份额/%	类 别	份额/%
数据处理硬件	22	无源器件	7
数据处理软件与服务	17	计算机集成制造	5
专业电子产品	10	仪器	5
电信业	9	办公电子	3
消费电子	9	医疗电子	2
有源器件	9	汽车电子	2

人们通常认为电子设备就是电话、收音机、电视及音响设备等产品,但是在其他很多设备里面也会用到电子设备,比如真空吸尘器、洗衣机、冰箱等。在工业中电子设备也是无处不在的,世界强烈依赖数据处理系统维持运转。实际上,计算机工业的发展离不开计算机相关产品作为支撑,设计过程依赖于计算机辅助设计(CAD)系统,而制造业依赖于电子系统进行工艺控制,比如石油分馏、汽车轮胎生产、食品加工、发电等。

1.1 电子学发展简史：从真空管到巨大规模集成电路

大多数人的成长离不开电子产品,但人们常常熟视无睹,往往会忽视其在工业上短期内的飞速发展。20 世纪初,商业电子器件还未出现,直到 20 世纪 40 年代末期才发明了晶体管。20 世纪 50 年代末期,第一个双极型晶体管的商业应用激发了电子产业的飞速发展,1961 年便出现了集成电路(IC)。从那时开始,采用电子器件和电子技术的信号处理开始进入人们的生活,并交织在人们的日常生活中。

表 1.2 列出了电子学领域发展过程中的一些里程碑事件。20 世纪初,人们发明了第一个电子双端器件——二极管,标志着电子时代的到来。紧接着,1904 年 Fleming 发明了真空二极管,1906 年 Pickard 通过与硅晶体形成点接触制作出了二极管(从第 3 章的固态二极管介绍开始学习电子器件)。

表 1.2 电子学里程碑事件

年 份	事 件
1874	Ferdinand 发明了固态整流器
1884	美国电子工程师学会(AIEE)成立
1895	Marconi 成功实现了第一次无线电发射
1904	Fleming 发明了真空二极管——标志着电子时代的到来
1906	Pickard 发明固态点接触式二极管(硅)
1906	DeForest 发明真空三极管
1910—1911	“可靠”管问世
1912	无线电工程师学会(IRE)成立
1907—1927	第一个用二极管和三极管构成的无线电电路问世
1920	Armstrong 发明超外差接收机
1925	电视出现
1925	Lilienfeld 提交场效应器件专利申请书
1927—1936	多栅管问世
1933	Armstrong 发明了频率调制(FM)
1935	Heil 获得场效应器件英国专利
1940	第二次世界大战期间雷达得到发展; 电视小规模投入使用
1947	Bardeen, Brattain 和 Shockley 在贝尔实验室发明了双极型晶体管
1950	彩色电视问世
1952	Shockley 提出了单极场效应晶体管
1952	德州仪器开始商业生产硅双极型晶体管
1952	Ian Ross 和 George Dacey 实现结型场效应晶体管
1956	Bardeen, Brattain 和 Shockley 因发明双极型晶体管获得诺贝尔物理学奖
1958	德州仪器的 Kilby 和仙童半导体的 Noyce 与 Moore 同时发明集成电路
1961	仙童半导体研制成功第一个商用数字集成电路
1963	AIEE 和 IRE 合并成立电气电子工程师学会(IEEE)
1967	IEEE 国际固态电路会议(ISSCC)讨论了第一个 64 比特半导体随机存储器
1968	仙童半导体推出第一个商用 IC 运算放大器—— $\mu A709$
1970	IBM 公司的 Dennard 发明单晶体管动态存储器单元
1970	低损耗光纤问世
1971	4004 微处理器在 Intel 研制成功
1972	Intel 研制成功第一个 8 位微处理器——8008 微处理器
1974	第一款 1KB 存储器芯片投入商业使用
1974	8080 微处理器问世
1978	第一款 16 位微处理器推出
1984	MB 级别存储器芯片问世
1985	ISSCC 推出 Flash 存储器
1987	激光泵浦掺铒光纤放大器获得验证
1995	GB 容量存储器芯片研制成果在 ISSCC 会议上展示
2000	Alferov, Kilby 和 Kromer 共同获得诺贝尔物理学奖, 以表彰他们分别在光电子学、集成电路和异质结器件所做的贡献
2009	Kao, Boyle 和 Smith 共同获得了 2009 年诺贝尔物理学奖, Boyle 和 Smith 发明了电荷耦合器件 (CCD), Kao 因其在光纤通信所做的贡献获得了 1/2 奖金

Deforest 发明的真空三极管是电子学发展史上重要的里程碑。在真空二极管结构上增加第三端,可以使器件的输入端与输出端之间实现电学放大,并能保持良好的隔离性能。现在,硅基三极管已经成为了电子系统的基础。真空管制造过程中电路可靠性的提升,在随后几年迎来了基于三极管的众多发明,推进了电路的快速发展。放大器和振荡器的发明在很大程度上改善了无线电的发射与接收。Armstrong 公司在 1920 年发明了超外差接收机,在 1933 年发明了频率调制(FM)。第二次世界大战期间,得益于无线通信和雷达领域取得的突破,电子学得到了飞速发展。1930 年电视技术便得到验证,但直到 20 世纪 50 年代才开始普及。

1947 年,贝尔实验室的 Bardeen、Brattain 和 Shockley 发明了双极型晶体管^①,这是电子学历史上的重大事件。对于场效应器件,尽管 Lilienfeld 于 1925 年、Heil 于 1935 年、Shockley 于 1952 年分别提出自己的设想^[2],但限于当时的技术水平,并未实现商业化,但双极型晶体管快速实现了商业化。

到了 1958 年,德州仪器的 Kilby 和仙童半导体的 Noyce 与 Moore 几乎同时发明了集成电路,该发明带来的新技术已极大地改变了人们的生活。利用 IC 技术实现微型化,可以将功能复杂的电子电路小型化,从而获得高性能,并降低成本。集成电路技术具有许多优点,如可靠性更高、功耗更低、尺寸更小、质量更轻等。

2000 年,Jack St. Clair Kilby 分享了诺贝尔物理学奖,以表彰其发明的集成电路。笔者认为这件事情意义重大,因为他代表了电子工作者所获得的最高奖励。

我们大部分人用过个人计算机,其中包含了大量的集成电路,集成电路的影响在数字电路中最为突出,不同封装的集成电路如图 1.3(c)和(d)所示。例如,4GB 动态存储器芯片所含晶体管数量超过 40 亿个。128GB 的 Flash 存储器芯片使用多层存储技术在每个存储单元储存 2~3 位,单在存储器阵列中就具有超过 170 亿个晶体管,这还不包括地址译码及检测电路。如果采用分立的真空管(如图 1.3(a)所示)或者晶体管(如图 1.3(b)所示)实现这种存储器,这是不可能实现的(参见习题 9)。



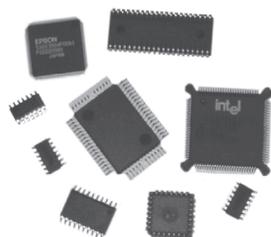
(a) 真空管



(b) 分立晶体管



(c) 双列直插封装(DIP)的集成电路



(d) 贴片封装的集成电路

图 1.3 电路比较(图片源自 1992 年 ARRL 的《无线电爱好者手册》)

① 晶体管(transistor)一词据说源于“transfer resistor”的缩写,是基于 MOS 晶体管的压控电阻特性。

图 1.4 和图 1.5 采用图示法展示了集成电路小型化的显著进展。存储器芯片及微处理器的复杂度随着时间呈指数增长。1970 年以来的 40 年间,微处理器芯片的晶体管数增长了 100 万倍,如图 1.4 所示。同样地,存储器密度也增长了超过 1000 万倍,从 1968 年的 64B 存储器芯片发展到 2009 年底的 4GB 存储器芯片。

集成电路商业化以来,其最小线宽或特征尺寸的持续降低使得集成电路的集成度不断增加,最小特征尺寸可以从集成电路的最小线宽进行定义,如图 1.5 所示。目前,世界上绝大多数的半导体实验室在研发深亚微米工艺,其特征尺寸都小于 25nm,不足人类头发直径的 1/5000。

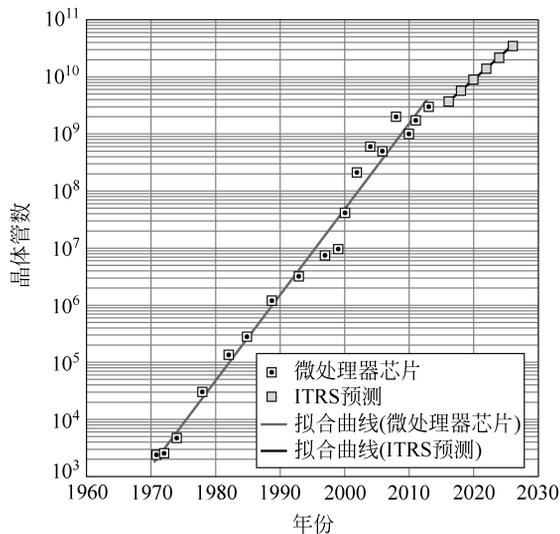


图 1.4 微处理器的复杂度随时间变化

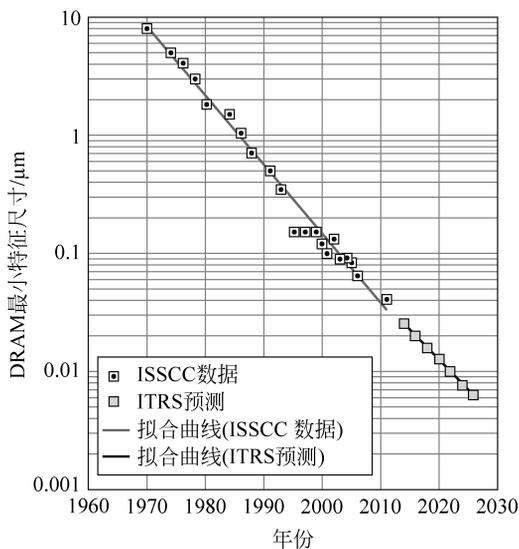


图 1.5 DRAM 特征尺寸随时间变化

随着特征尺寸的不断减小,形成了许多用以描述不同集成度的缩写词汇。集成电路出现之前,电子系统采用分立元件实现。在早期的集成电路中,器件数量小于 100 个的都称为小规模集成电路(SSI, Small-Scale Integration)。随着集成度的增加,逐渐发展成中规模集成电路(MSI, Medium-Scale Integration, 每个芯片包含 100~1000 个器件)、大规模集成电路(LSI, Large-Scale Integration, 每个芯片包含 $10^3 \sim 10^4$ 个器件)、超大规模集成电路(VLSI, Very-Large-Scale Integration, 每个芯片包含 $10^4 \sim 10^9$ 个器件)。现在人们的研究重点已经转移到巨大规模集成电路(GSI, Giga-Scale Integration, 每个芯片包含的器件超过 10^9 个)。

电子应用

手机的演变

集成电路工艺尺寸的等比例缩小改变着我们的日常生活。以手机为例,下图中描述了手机的发展演变。早期的移动电话体积庞大,人们只得使用一个很大的手机袋携带(因此形成了术语“bag phone”)。下一代是模拟电话,体积缩小很多,可以方便地拿在手里,但由于采用的是模拟通信技术,其电池使用时间较短。第三代和第四代采用了数字电话技术,手机体积得以大幅缩小,电池寿命显著提高。随着集成度的持续增长,手机上逐渐集成了许多附加功能,如相机、GPS、WiFi 等。



(a) 早期Uniden的“布袋”电话

(b) 诺基亚模拟手机

(c) 苹果iPhone手机

十年来手机的发展变化(图片源自 George Frey 及 Getty Image 图片库)

手机是混合信号集成电路应用的典型示例,这种电路将模拟信号电路和数字电路集成在同一个芯片中。在手机内部的集成电路芯片中,包含了模拟射频接收和发射电路、模数转换及数模转换器、CMOS 逻辑电路、存储器及电源变换电路。

1.2 电子学信号分类

电子器件处理的信号主要分成两大类,模拟信号(Analog signal)和数字信号(Digital signal)。模拟信号可以连续取值,用来表示连续变化的量,而单纯的数字信号只能取某些离散的值。接下来的两节将给出描述这两种信号类型的实例,同时介绍数/模和模/数转换的概念,这两种转换将架起数字和模拟信号系统交互的接口。

1.2.1 数字信号

数字电子通常处理的是二进制信号(Binary digital signal),或者说信号只能取两个分立电平值中的一个,如图 1.6 所示。二进制系统的状态可以用两个符号表示:逻辑 1 和逻辑 0。逻辑 1 对应一种电平,逻辑 0 对应另一种电平^①。这两个逻辑状态通常对应两个分立的电压值,使用 V_H 和 V_L 分别代表高低电平值,并对应于几个常用的电压范围。最初人们定义 $V_H=5V$ 及 $V_L=0V$ 作为标准,并延续了很多年,但由于功耗及半导体器件的限制,后来由低电压所取代。在现代许多类型的电子系统中, $V_H=3.3V$ 、 $1V$ 或者更低, $V_L=0V$ 。

然而,二进制电压可以为负值,甚至正负两种电压都存在。ECL 是一种高性能数字逻辑,ECL 中 $V_H=-0.8V$ 、 $V_L=-2.0V$ 。在早期计算机与外围设备通信连接采用的 RS-422 和 RS-232 标准中, $V_H=+12V$ 、 $V_L=-12V$ 。此外,图 1.6 所示的时变二进制信号也可以很好地表示电流值或者光学数字通信系统中沿光纤传输的光信号值。最新的 USB 及 Firewire 标准中又重新采用单一的电源正电压。

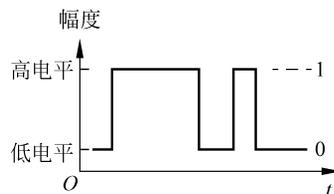


图 1.6 时变二进制信号

^① 这种设定有利于使用布尔代数。

《深入理解微电子电路设计——数字电子技术及应用》一书中讨论了采用不同半导体工艺设计一系列的数字电路,包括采用场效应管的 CMOS、NMOS 及 PMOS 逻辑,以及采用双极型晶体管的 TTL 和 ECL 系列电路。

1.2.2 模拟信号

尽管诸如电荷、电子自旋等许多量都是离散的,但从本质上来说物理世界是模拟的。人们视觉、听觉、嗅觉、味觉及触觉的感知都是模拟过程。模拟信号可以直接表示温度、湿度、压力、光照度及声音等信号,所有这些信号都可以取任意有限值。事实上,模拟信号与数字信号的分类很大程度上只是一种看法,如果我们将图 1.6 所示的数字信号用示波器去观察,可以发现信号在高电平与低电平之间是连续变化的,信号并不能在两种电平之间真正跳变。图 1.7(a)所示的时变电压或电流信号可以代表温度、流速、压力或者话筒连续的声频输出信号随时间的变化。一些模拟传感器输出电压信号的范围是 $0\sim 5\text{V}$ 或 $0\sim 10\text{V}$,其他一些传感器被设计成输出电流信号,电流信号的输出范围是 $4\sim 20\text{mA}$ 。在某些极端情况下信号传输借助于射频天线,传输的信号可以小到不足 $1\mu\text{V}$ 。

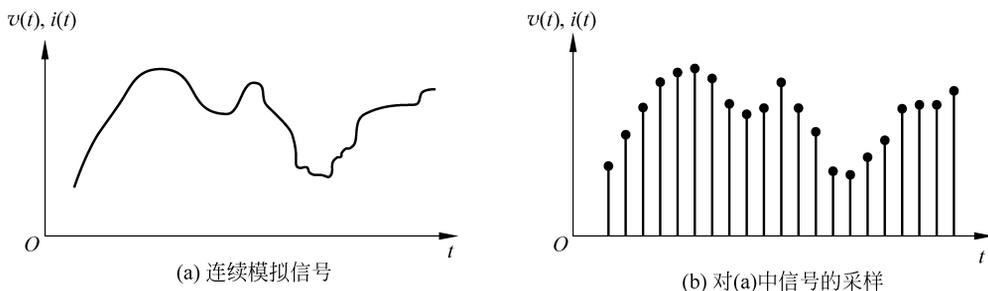


图 1.7 模拟信号

为了处理模拟信号中所携带的信息,需要用电路对信号的幅度、相位及频率进行有选择的调整。实际上,经常需要大幅增加信号的电压、电流及功率值。实现这些信号参数的调整需要借助不同形式的放大器来实现。

1.2.3 A/D 和 D/A 转换器——连接模拟与数字信号的桥梁

为了实现模拟系统与数字系统协同工作,需要实现模拟信号与数字信号之间的相互转换。要将模拟信号转换成数字信号,需要在不同时间点对模拟信号进行采样,将其幅度值量化成数字形式,如图 1.7(b)所示。量化值可以用二进制表示,也可以像数字万用表一样用十进制表示,实现这一转换的电路称为模/数(A/D)转换器,而实现将数字信号向模拟信号转换的电路称为数/模(D/A)转换器。

1. 数/模转换器

数/模转换器(Digital-to-Analog Converter)常称作 D/A 转换器,也称作 DAC,实现计算机系统的数字信号与现实世界的模拟信号之间的连接。D/A 转换器的输入为数字信号,一般为二进制形式,而输出为电压信号或电流信号,用于连续信号控制或模拟信息的显示。在图 1.8(a)所示的 D/A 转换器中,其输入是来自现实世界的 n 位二进制数 (b_1, b_2, \dots, b_n) ,输出可以看成该二进制数的分式形式乘以满量程的参考电压 V_{FS} 。因此,D/A 转换的数学运算式可以表示为

$$v_o = (b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \dots + b_n 2^{-n}) V_{\text{FS}}, \quad b_i \in [1, 0] \quad (1.1)$$

参考电压 V_{FS} 的取值一般为 1V 、 2V 、 5V 、 5.12V 和 10.24V 。输出端电压的最小变化出现在最低有效位

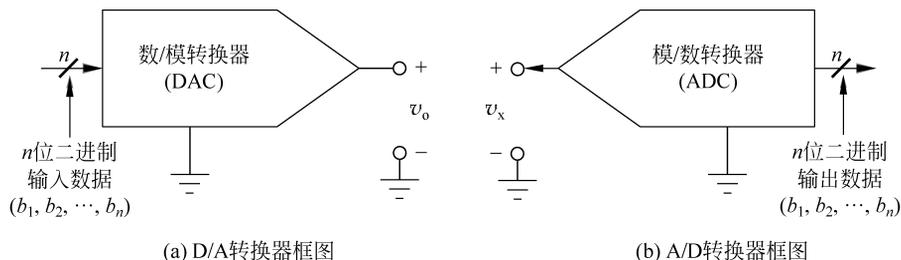


图 1.8 D/A 及 A/D 转换器的框图表示

(LSB) b_n 从 0 变化成 1 时,该最小分辨电压的取值可以表示为

$$V_{\text{LSB}} = 2^{-n} V_{\text{FS}} \quad (1.2)$$

式子另一端的 b_1 称作最高有效位(MSB),具有的权重为 V_{FS} 的一半。

转换器的分辨率一般定义为输入二进制数的有效位数(例如,分辨率为 8 位、10 位、12 位、14 位或 16 位等)。

练习: 已知一个 10 位 D/A 转换器的 $V_{\text{FS}} = 5.12\text{V}$,当输入二进制数为 1100010001 时,输出电压是多少? 最小分辨电压 V_{LSB} 是多少? 最高有效位(MSB)对应的电压权重是多少?

答案: 3.925V; 5mV; 2.56V。

2. 模/数转换器

模/数转换器(Analog-to-Digital Converter, 也称作 A/D 转换器或 ADC)用于把电路的模拟信号转换成数字信号。在图 1.8(b)中,A/D 转换器的输入信号是一个未知的连续模拟信号,该输入信号通常是一个输入电压 v_x ,A/D 转换器将该信号转化为计算机易于处理的 n 位二进制信号。该 n 位二进制数是表示未知输入电压与转换器满量程电压 V_{FS} 比值的二进制分式。

例如,理想 3 位 A/D 转换器的输入输出关系可以如图 1.9(a)所示。随着输入从 0 变化到满量程,输出编码从 000 逐级增加到 111^①。当输入电压变化小于 A/D 转换器的 1LSB 时,输出编码保持不变。

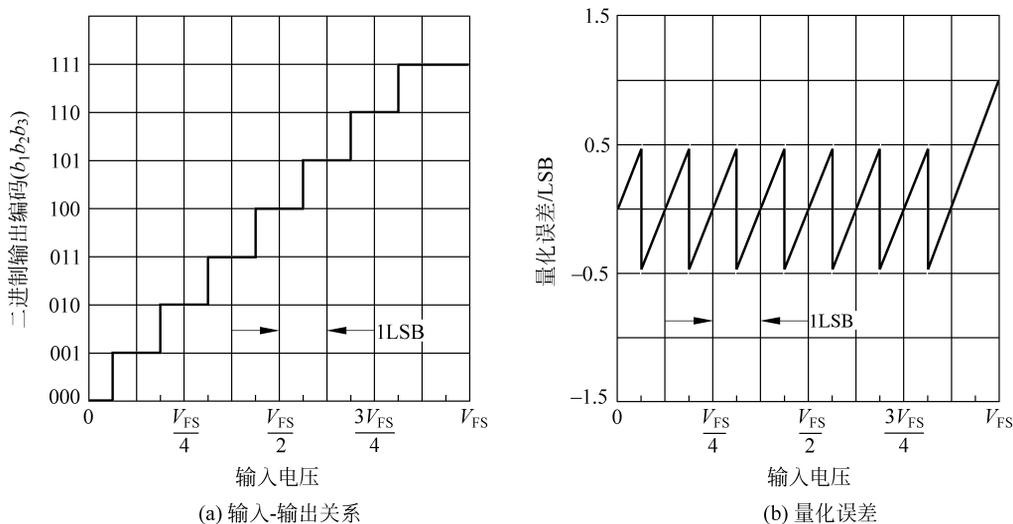


图 1.9 3 位 A/D 转换器

^① 可以这样理解,二进制小数点在数字编码的左侧,随着输出编码从 000 逐级变化到 111,二进制小数从 0.000 变化到 0.111。

因此,当输入电压增加时,输出编码与实际值相比会出现低估与高估现象,这一误差称为量化误差(Quantization error),该误差随输入信号的变化如图 1.9(b)所示。

对于给定的输出编码,我们仅能确定输入电压值是在 1LSB 量化区间的某处。例如,如果 3 位 A/D 转换器的输出编码为 100,该编码所对应的电压为 $\frac{V_{FS}}{2}$,而输入电压可以介于 $\frac{7V_{FS}}{16}$ 和 $\frac{9V_{FS}}{16}$ 之间,其变化范围为 $\frac{V_{FS}}{8}$ 或 1LSB。从数学角度来看,图 1.8(b)所示的 A/D 转换器电路选取二进制编码中各位的数值使得未知输入电压 v_x 与最相近的量化电压之间的量化误差 v_ϵ 最小:

$$v_\epsilon = |v_x - (b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \cdots + b_n 2^{-n})V_{FS}| \quad (1.3)$$

练习: 已知 8 位 A/D 转换器的 $V_{FS} = 5V$,当输入电压为 1.2V 时,该 A/D 转换器的输出编码是多少? 计算该 A/D 转换器 1LSB 所对应的电压范围。

答案: 00111101; 19.5mV。

1.3 符号约定

在许多电路中都需要处理电压和电流信号,既有直流形式,也有时变信号,为此需要定义系列标准符号来表示电路信号的不同部分。总量用小写字母和大写下标表示,如式(1.4)中的 v_T 和 i_T 。直流部分用大写字母和大写下标进行表示,如式(1.4)中的 V_{DC} 和 I_{DC} 。直流量的变化部分用小写字母和小写下标进行表示,如式(1.4)中的 v_{sig} 和 i_{sig} 。

$$v_T = V_{DC} + v_{sig} \quad \text{或} \quad i_T = I_{DC} + i_{sig} \quad (1.4)$$

例如,晶体管基极发射极的总电压 v_{BE} 和场效应管总的漏电流 i_D 可以写为

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \quad \text{和} \quad i_D = I_D + i_d \quad (1.5)$$

如果没有特别说明,描述给定电路的等式均采用固定单位,电压为伏特(V)、电流为安培(A)、电阻为欧姆(Ω)。例如,等式 $5V = (10\,000\Omega)I_1 + 0.6V$ 可以直接写为 $5 = (10\,000)I_1 + 0.6$ 。

保留第 4 种大/小写的组合,即大写字母和小写下标,如 V_{be} 和 I_d ,用于表示 1.5 节中定义的正弦信号向量幅值。

练习: 假定一个电路节点的电压可以表示为 $v_A = (5\sin 2000\pi t + 4 + 3\cos 1000\pi t)V$,请写出 V_A 和 v_a 。

答案: $v_A = 4V$; $v_a = (5\sin 2000\pi t + 3\cos 1000\pi t)V$

1. 电阻和电导表示

本书所有的电路中,电阻的符号均使用 R_x 或 r_x 表示,电阻的单位用 Ω 、k Ω 或 M Ω 等表示。然而在做电路分析时,有时使用电导更为方便。电导与电阻的关系如下

$$G_x = \frac{1}{R_x} \quad \text{和} \quad g_\pi = \frac{1}{r_\pi} \quad (1.6)$$

电导与电阻为倒数关系,电导 G_x 是电阻 R_x 的倒数,电导 g_π 是电阻 r_π 的倒数。电阻的单位使用 Ω 、k Ω 或 M Ω 等表示,而电导的单位为西门子(S)。

2. 受控源

在电子学中,受控源(Dependent source 或 Controlled source)使用十分广泛。图 1.10 中列出了 4 种受控源类型,图中用标准的菱形符号表示受控源。在本书中,压控电流源(Voltage-Controlled Current Source, VCCS)、流控电流源(Current-Controlled Current Source, CCCS)和压控电压源(Voltage-

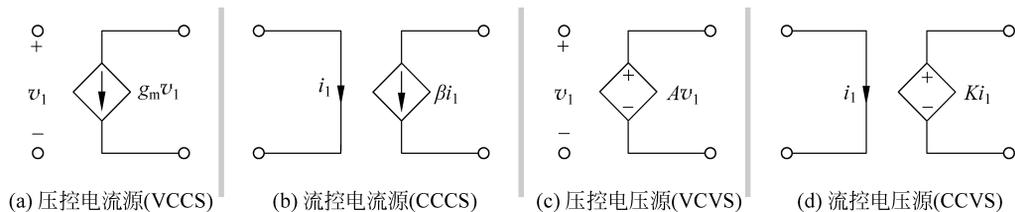


图 1.10 受控源

Controlled Voltage Source, VCVS) 常用于建模晶体管或放大器以及简化复杂电路, 而流控电压源 (Current-Controlled Voltage Source, CCVS) 则很少使用。

1.4 解决问题的方法

工程师最关心的就是如何解决实际的问题。工程师需要创造性地发现所面临问题的新的解决方法, 好的解决方案能够极大地促进问题的解决。下述示例中采用加粗字体给出的策略适用于从学生到企业工程师等职业生涯的所有阶段, 该方法可描述为下述的 9 个步骤:

- ① 尽可能清晰地将问题描述出来。
- ② 列出已知信息和数据。
- ③ 找出解决问题所必需的未知条件。
- ④ 列出自己的假设。在分析过程中还可能发现新的假设。
- ⑤ 在许多可能的备选方案中寻找问题的解决方案。
- ⑥ 为找到问题的解决方案进行详细分析。需要绘制电路图并标注变量作为分析的一部分。
- ⑦ 结果检验。问题是否得到解决? 数学分析是否正确? 是否找到了所有的未知条件? 所提假设是否成立? 所得的结果是否能通过简单的一致性检查?
- ⑧ 结果评价。方案是否现实? 是否成立? 如果不成立, 重复步骤④~⑦, 直至获得满意的解决方案。

⑨ 计算机辅助分析。对于结果分析来说, SPICE 及其他计算机分析工具十分有用。借助于这些工具可以验证所得到的结果是否满足问题需求。检查计算机结果与手工计算结果是否一致。

要想解决问题就必须了解问题的详细细节。前 4 个步骤都是为了将问题表述清楚, 也是解决问题过程中最重要的部分。在解决问题之前要尽力去理解、澄清和确定问题, 可以节省时间并少走弯路。

一开始, 问题的描述可能非常模糊, 需要尽可能理解问题的本质, 或者了解出题者的意图。为了更好地理解所提出的问题, 需要首先将已知或未知的信息都列出来。解决问题过程中的偏差通常是由于不能清楚地理解未知量。例如, 在电路分析中正确地绘制电路图及在电路图上明确标注电压和电流是十分重要的。

通常来说, 未知量会多于约束条件, 这就需要我们利用工程判断找到问题的解决方法。学习电子学的任务之一是能够利用所学知识在不同方案中进行选择, 为此, 通常需要通过近似或假设的方法来简化问题或者构建解决问题的基础条件。对于这些假设的陈述十分重要, 在后面需要检查这些假设的有效性。通过本书的学习, 读者有机会进行问题假设的实践。通常情况下, 读者可以通过假设来简化计算复杂度, 同时取得有用的结果。

精确理解题目中的已知信息、未知量, 并做出合理的假设, 不仅有助于更好地理解问题, 还能有助于

思考不同的解决方案。问题的解决方案看起来会有多种,需要从中选取最优的解决方案。人们看待问题的视角存在差异,很明显适用于某个人的方法对于另外一个人却不一定是最佳方案。选择最适合自己的解题方法。确定解决方案的时候,一定要考虑什么样的计算工具能够辅助问题的解决,包括 MATLAB、Mathcad、Spreadsheet、SPICE 及计算器等。

一旦搞清了问题、确定了解决方案,就可以进行所需的问题分析,进行问题的求解。在完成问题分析之后,需要对求解结果进行检查。还要解决以下这些问题,首先,所有未知量都找到了吗?结果有意义吗?结果是否一致?所得结果是否与求解问题时所做的假设一致?

接下来需要对结果进行评价。结果是否切实可行?例如,电压、电流及功率值是否合理?电路能否用真实的部件搭建获取合理的输出?当元器件有很大差异时,电路是否能完成规定的功能?电路的成本是否在规定之内?如果对结果不满意,需要对假设、解决方法进行修改,并尝试找到新的解决方案。在实际的电路设计中通常需要反复实验才能找到所需的最佳解决方案。在结果检查及问题验证中,SPICE 及其他计算工具是十分有用的。

本书对例题的求解过程将依据本节介绍的问题求解策略步骤讲解。尽管有些例题看起来非常简单,使用问题求解策略意义不大,但是随着问题越来越复杂,本节所介绍的问题求解策略的作用会越来越强大。

什么是合理数值?检查结果的主要目的是要判断结果是否合理,是否有意义。我们需要搞清楚什么样的数值是合理的。平时遇到的大多数固态元器件的工作电压范围是从小于 1V 的电池电压到 40~50V^①的高电压。典型的电源供电电压是 10~20V,常用的电阻值的范围是几欧姆(Ω)到数吉欧姆(G Ω)。

按照现有的直流电路常识,电路电压一般不会超过供电电压。例如,如果一个电路的供电电压是 +8~-5V,则所有直流电压的计算都是在 +8~-5V。另外,交流信号的最大值与最小值之差,也即交流信号的峰峰值^②不会超过 13V。对于 10V 的供电电压,通过一个 100 Ω 的电阻的最大电流是 100mA,通过一个 10M Ω 电阻的电流不超过 1 μ A。因此,在检查结果时要牢记以下原则:

① 通常情况下,电路的支流电压不能超过电源的供电电压。交流信号的峰峰值不能超过供电电压的最大值与最小值之差。

② 电路中的电流范围通常在微安(μ A)到 100 毫安(mA)之间。

1.5 电路理论的主要概念

电路的分析与设计需要用到很多基础电路理论的重要技术。在电路分析中,经常会用到基尔霍夫电压定律(KVL)和基尔霍夫电流定律(KCL)。有些情况下,电路的求解需要系统应用节点分析法(Nodal analysis)或网孔分析法(Mesh analysis)。分压与分流概念十分重要,在电路化简中经常会用到戴维南定理和诺顿定理。有源器件模型必然包含上节提到的受控源,我们需要熟练掌握受控源的各种形式。放大器电路分析通常使用双端口电路理论。第 10 章介绍完有关放大器知识之后将对双端口理论进行介绍。如果读者对刚才提到的概念不熟悉,则需要进行回顾。为了帮助大家回顾这些概念,下面将简要介绍这些重要的电路技术。

① 主要的例外出现在电力电子学领域,电压和电流要远超本文讨论的范围。

② 峰峰值指一个周期内信号最高值和最低值之间差的值,就是最大和最小之间的范围,它描述了信号值变化范围的大小。

1.5.1 分压和分流

分压(Voltage division)和分流(Current division)是非常重要的电路分析技术,可以直接从基本电路理论推导而来。这两种技术一直贯穿本书,理解它们各自的使用条件十分重要。接下来将给出两者的一些使用实例。

图 1.11(a)所示的是分压情况,电压 v_1 和电压 v_2 可以表示为

$$v_1 = i_i R_1 \quad \text{和} \quad v_2 = i_i R_2 \quad (1.7)$$

对单个环路应用 KVL,则有

$$v_i = v_1 + v_2 = i_i (R_1 + R_2) \quad \text{和} \quad i_i = \frac{v_i}{R_1 + R_2} \quad (1.8)$$

由式(1.7)和式(1.8)可以得到基本分压公式为

$$v_1 = v_i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{和} \quad v_2 = v_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.9)$$

代入图 1.11(a)中的电阻和电压值,则有

$$v_1 = 10\text{V} \frac{8\text{k}\Omega}{8\text{k}\Omega + 2\text{k}\Omega} = 8.00\text{V} \quad \text{和} \quad v_2 = 10\text{V} \frac{2\text{k}\Omega}{8\text{k}\Omega + 2\text{k}\Omega} = 2.00\text{V} \quad (1.10)$$

设计提示: 分压使用条件

注意,式(1.9)中的分压关系只能应用在流过两个电阻支路的电流相同的情况下。另外,如果将电阻替换为复数阻抗,并且电压表示为向量形式,上述公式依然正确。

$$V_1 = V_i \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad \text{和} \quad V_2 = V_i \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

分流公式也十分有用。在图 1.11(b)所示电路中,找到电流 i_1 和电流 i_2 ,在单节点应用 KCL 定律,则有

$$i_i = i_1 + i_2, \quad \text{其中} \quad i_1 = \frac{v_i}{R_1} \quad \text{和} \quad i_2 = \frac{v_i}{R_2} \quad (1.11)$$

求解可得

$$v_i = i_i \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = i_i \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = i_i (R_1 \parallel R_2) \quad (1.12)$$

其中, $R_1 \parallel R_2$ 表示电阻 R_1 和 R_2 的并联,由式(1.11)和式(1.12)可以推导出分流公式

$$i_1 = i_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{和} \quad i_2 = i_i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1.13)$$

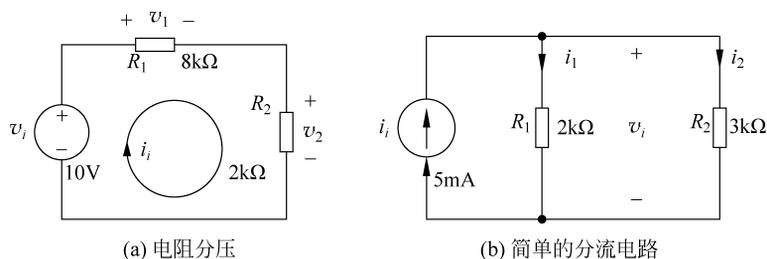


图 1.11 分压与分流电路

代入图 1.11(b)中的电阻和电流值,则有

$$i_1 = 5\text{mA} \frac{3\text{k}\Omega}{2\text{k}\Omega + 3\text{k}\Omega} = 3.00\text{mA} \quad \text{和} \quad i_2 = 5\text{mA} \frac{2\text{k}\Omega}{2\text{k}\Omega + 3\text{k}\Omega} = 2.00\text{mA}$$

设计提示: 分流使用条件

需要注意,式(1.9)中的分流关系只能应用在加在两个电阻上的电压值相同的情况下。另外,如果将电阻替换为复数阻抗并且电流表示为向量形式,上述公式依然正确。

$$I_1 = I_S \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{和} \quad I_2 = I_S \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

1.5.2 戴维南定理和诺顿定理

在这里,我们将回顾得出戴维南(Thévenin)和诺顿等效电路(Norton equivalent circuit)的方法,该等效电路包含一个受控源,如图 1.12(a)所示。由于虚线框内的线性电路只有两个端口,所以可以用戴维南等效电路或诺顿等效电路进行表示,如图 1.12(b)和图 1.12(c)所示。借助于戴维南和诺顿等效电路,可以将复杂电路简化成一个单源和等效电阻。我们用接下来的 4 个例子展示这两个重要的技术应用。

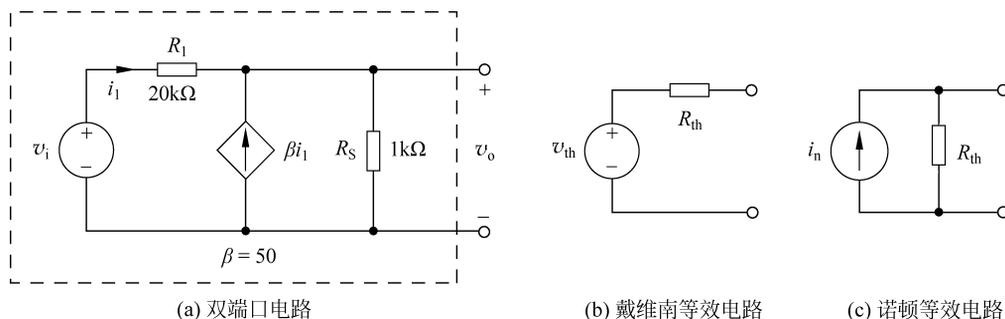


图 1.12 双端口电路及其等效电路

例 1.1 戴维南和诺顿等效电路

对于图 1.12(a)所示的电路,接下来练习找出戴维南和诺顿等效电路的方法。

问题: 找出图 1.12(a)所示电路的戴维南和诺顿等效表达式。

解:

已知量: 图 1.12(a)中的电路拓扑和电路数值。

未知量: 戴维南等效电压 v_{th} 、戴维南等效电阻 R_{th} 及诺顿等效电流 i_n 。

求解方法: 电压源 v_{th} 定义为电路端口的开路电压。 R_{th} 是将电路中所有独立源设为 0 时的端口等效电阻。电流源 i_n 表示输出端的短路电流,等于 V_{th}/R_{th} 。

假设: 无

分析: 首先需要计算出 v_{th} 的值,接着计算出 R_{th} 的值,最后再求取 i_n 的值。开路电压 v_{th} 可以在输出端应用 KCL 定理求得。

$$\beta i_1 = \frac{v_o - v_i}{R_1} + \frac{v_o}{R_S} = G_1(v_o - v_i) + G_S v_o \quad (1.14)$$

其中,根据 1.3 节关于电导的命名规则 $G_s=1/R_s$, 电流 i_1 可表示为

$$i_1 = G_1(v_i - v_o) \quad (1.15)$$

将式(1.15)代入式(1.14), 合并同类项可得

$$G_1(\beta + 1)v_i = [G_1(\beta + 1) + G_s]v_o \quad (1.16)$$

因此,戴维南等效输出电压为

$$v_o = \frac{G_1(\beta + 1)}{[G_1(\beta + 1) + G_s]}v_i = \frac{(\beta + 1)R_s}{[(\beta + 1)R_s + R_1]}v_i \quad (1.17)$$

其中,第二个公式可以通过第一个公式的分子和分母同时乘以 (R_1R_s) 获得。代入本例中的变量数值可得

$$v_o = \frac{(50 + 1)1\text{k}\Omega}{[(50 + 1)1\text{k}\Omega + 20\text{k}\Omega]}v_i = 0.718v_i \quad \text{和} \quad v_{th} = 0.718v_i \quad (1.18)$$

v_{th} 表示所有独立源设为 0 时输出端的等效电阻。为了求取戴维南等效电阻(Thévenin equivalent resistance) R_{th} , 首先要将电路中的独立源设置为 0, 同时保持所有受控源不变, 然后在电路端口上施加测试电压或电流源, 计算出相应的电流或电压。如图 1.13 所示, 将 v_i 设为 0 (将电路短路), 将电压源 v_x 施加到电路上, 则可以计算出 i_x , 因此可以计算出

$$R_{th} = \frac{v_x}{i_x} \quad (1.19)$$

$$i_x = -i_1 - \beta i_1 + G_s v_x, \quad \text{其中} \quad i_1 = -G_1 v_x \quad (1.20)$$

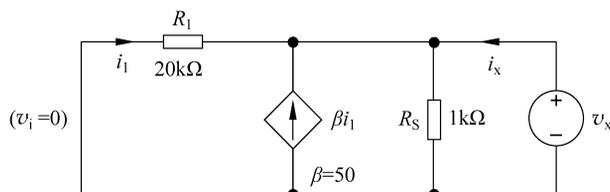


图 1.13 对电路施加测试源 v_x , 计算 R_{th}

化简及合并这两个表达式, 可得

$$i_x = [(\beta + 1)G_1 + G_s]v_x \quad \text{和} \quad R_{th} = \frac{v_x}{i_x} = \frac{1}{(\beta + 1)G_1 + G_s} \quad (1.21)$$

式(1.21)的分母是两个电导之和, 对应于两电阻并联情况。因此, 式(1.21)可以重新表示为

$$R_{th} = \frac{1}{(\beta + 1)G_1 + G_s} = \frac{R_s \frac{R_1}{(\beta + 1)}}{R_s + \frac{R_1}{(\beta + 1)}} = R_s \parallel \frac{R_1}{(\beta + 1)} \quad (1.22)$$

将本例中的数据代入式(1.22), 可得

$$R_{th} = R_s \parallel \frac{R_1}{(\beta + 1)} = 1\text{k}\Omega \parallel \frac{20\text{k}\Omega}{(50 + 1)} = 1\text{k}\Omega \parallel 392\Omega = 282\Omega \quad (1.23)$$

诺顿源 i_n 表示原始电路的短路电流。既然已经有了戴维南等效电路, 可以利用它来计算 i_n 。

$$i_n = \frac{v_{th}}{R_{th}} = \frac{0.718v_i}{282\Omega} = 2.55 \times 10^{-3}v_i$$

图 1.14 为例 1.1 根据图 1.12 所示电路计算出的戴维南和诺顿等效电路。

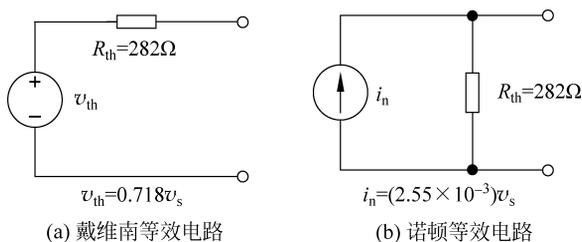


图 1.14 图 1.12(a)所示双端口电路的戴维南等效电路(a)和诺顿等效电路(b)

结果检查: 本例中计算了 3 个未知量,重新检查计算并验证结果的正确性。 v_{th} 的数量级与 v_i 相同,因此其结果不会异常的大,也不会异常的小。 R_{th} 的值不应出现大于输出端并联电阻 R_s 的情况,本例中 R_{th} 的值小于 $1k\Omega$,看起来比较合理。可以直接从原始电路计算 i_n 来进行二次检查,如果在图 1.12 中直接短路输出端,可以计算短路电流(参见例 1.2)为 $i_n = (\beta + 1)v_i/R_i = 2.55 \times 10^{-3}v_i$,与其他方法计算的结果相同。

例 1.2 诺顿等效电路

对包含一个受控源的电路练习找出的诺顿等效电路。

问题: 对图 1.12(a)所示的电路找出图 1.12(c)所示的诺顿等效电路。

解:

已知量: 图 1.12(a)中的电路拓扑和电路数值。

未知量: 诺顿等效电流 i_n 。

求解方法: 将电路输出短路,流出电路的电流即为诺顿等效电流。

假设: 无

分析: 图 1.15 所示的电路,输出电流为

$$i_n = i_1 + \beta i_1 \quad \text{和} \quad i_1 = v_i/R_1 \quad (1.24)$$

输出端短路使得流过电阻 R_s 的电流为 0。将式(1.24)中的两个式子合并,则有

$$i_n = (\beta + 1)G_1 v_i = \frac{(\beta + 1)}{R_1} v_i \quad (1.25)$$

或者

$$i_n = \frac{(50 + 1)}{20k\Omega} v_i = \frac{v_i}{392\Omega} = (2.55\text{mS})v_i \quad (1.26)$$

诺顿等效电路中的电阻在式(1.23)中已经求出,也等于 R_{th} 。

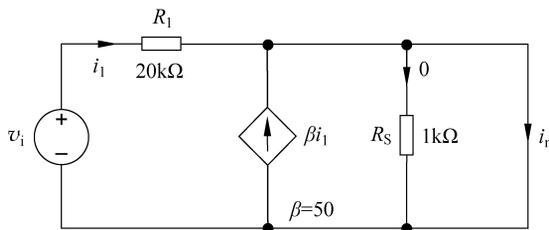


图 1.15 用于确定短路输出电流的电路

结果检查: 现在已经求解了诺顿等效电流。需要注意的是, $v_{th} = i_n R_{th}$ 这一结论可以用来检查计算。 $i_n R_{th} = (2.55\text{mS})v_s (282\Omega) = 0.719v_s$,这一结果在本例的舍入误差之内。

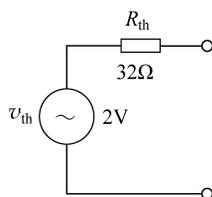
电子应用

播放器特性

耳机播放器是一种个人音乐播放器,是声频放大器的典型代表。传统的声频波段从 20Hz 到 20kHz,这是人耳能够听到的声音频率的上下限。

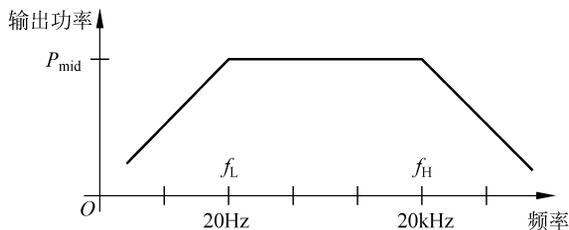


iPod



输出级戴维南等效电路

在 MP3 播放器或者计算机声卡中,Apple iPod 的伴音特性是高质量声频输出的代表,其声频输出可以用戴维南等效电路表示,其中 $v_{th}=2V$, $R_{th}=32\Omega$,同时向耳机的每个通道传递大约 15mW 的功率,并与 32Ω 的电阻匹配。在 20Hz~20kHz 的频率范围内,输出功率近似为常数。在下限截止频率(f_L)和上限截止频率(f_H)处,输出功率减少 3dB,在数值上减少一半。



声频放大器功率输出与频率之间的关系

放大器的失真特性也很重要,这通常是区分优劣声卡或 MP3 播放器的主要指标。优质的声频系统在全功率情况下,其全总谐波失真(THD)要小于 0.1%。

1.6 电子学信号的频谱

在电子工程中,傅里叶分析及傅里叶级数是非常强大的工具。根据傅里叶理论可知复杂信号实际上是由连续的正弦信号组成的,每一个正弦信号具有不同的幅度、频率和相位。信号的频谱代表了各频率信号的幅度和相位相对于频率的响应特性。

非周期性信号具有连续的频谱,其频谱范围十分广泛。例如,在一个很短时间内测量的电视信号的幅值如图 1.16 所示。电视信号的频率范围是 $0 \sim 4.5\text{MHz}$ ^①,其他类型的信号占据频谱的不同区域。表 1.3 列出了一些常用信号的频率范围。

与图 1.16 所示的联系信号相反,傅里叶级数分析表明,任意周期的信号存在与信号周期直接相关的分立的频点^②,如图 1.17 所示的方波信号。例如,图 1.17 中方波的幅度为 V_0 ,周期为 T ,用傅里叶级数可表示为

$$v(t) = V_{\text{DC}} + \frac{2V_0}{\pi} \left(\sin\omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots \right) \quad (1.27)$$

其中, $\omega_0 = 2\pi/T$ (rad/s) 是方波的一次谐波或基波频率(Fundamental radian frequency), $f_0 = 1/T$ (Hz) 称为信号的基频(Fundamental frequency), $2f_0$ 、 $3f_0$ 、 $4f_0$ 、 \dots 处的频率称为二次、三次、四次、 \dots 谐波(Harmonic frequency)。

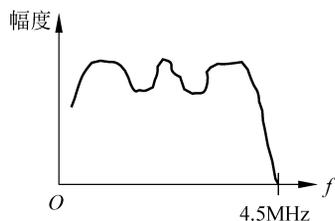


图 1.16 电视信号的频谱

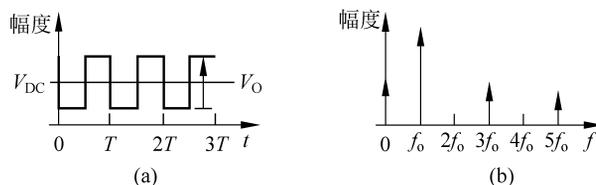


图 1.17 周期信号(a)和幅度谱(b)

表 1.3 常见信号的频率

类别	频率范围	类别	频率范围
声音	20Hz~20kHz	商业通信	450~470MHz
基带电视信号	0~4.5MHz	UHF 电视(14~69 频道)	470~806MHz
AM 声频广播	540~1600kHz	固定通信和移动通信	806~902MHz
高频通信	1.6~54MHz	模拟和数字蜂窝电话	928~960MHz
VHF 电视(2~6 频道)	54~88MHz	电话、个人通信及其他	1710~1990MHz
FM 无线电广播	88~108MHz	无线设备	2310~2690MHz
VHF 无线通信	108~174MHz	卫星电视	3.7~4.2GHz
VHF 电视(7~13 频道)	174~216MHz	无线设备	5.0~5.5GHz
海事及政府通信	216~450MHz		

1.7 放大器

线性放大器能够调节模拟信号的幅度和(或)相位特性,不改变信号的频率。虽然复杂信号有许多独立成分,但是正如 1.6 节中所讲到的那样,线性使我们可以根据叠加原理(Superposition principle)单独处理每个成分。

例如,假设图 1.18(a)中的放大器电压增益为 A ,输入正弦信号 v_i 的幅度、频率和相位分别为 V_i 、 ω_i

① 在信号传输之前,该信号与更高载波频率的信号结合。

② 实际上会有无限多这样的频点。

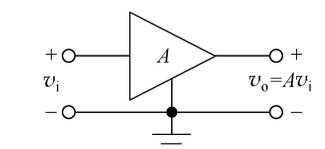
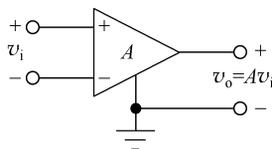
(a) 单端输入电压增益为 A 的放大器(b) 双端输入电压增益为 A 的差分放大器

图 1.18 放大器示例

和 ϕ ：

$$v_i = V_i \sin(\omega_i t + \phi) \quad (1.28)$$

对于线性放大器来说,对应的输出仍然是同频的正弦信号,但将具有不同的幅度和相位:

$$v_o = V_o \sin(\omega_i t + \phi + \theta) \quad (1.29)$$

采用相量(Phasor)表示,输入输出信号可以表示为

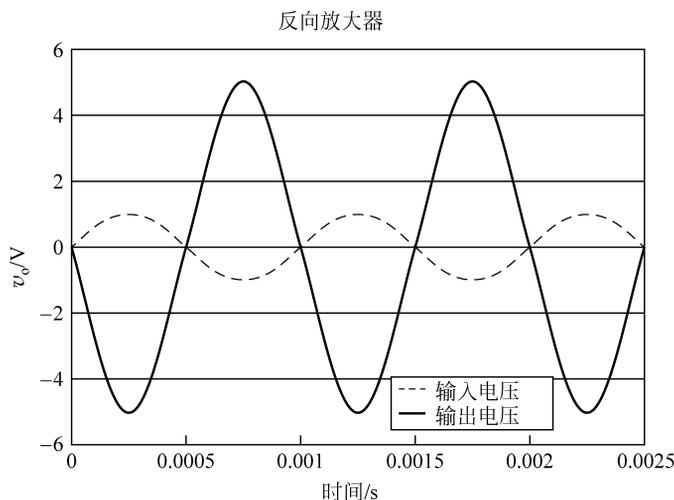
$$V_i = V_i \angle \phi \quad \text{和} \quad V_o = V_o \angle (\phi + \theta) \quad (1.30)$$

放大器的电压增益(Voltage gain)则可以用这些相量定义为

$$A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o \angle (\phi + \theta)}{V_i \angle \phi} = \frac{V_o}{V_i} \angle \theta \quad (1.31)$$

放大器的电压增益幅值等于 v_o/v_i ,相移为 θ 。通常情况下,电压增益的幅度和相位是频率的函数。除电压增益外,放大器还具有电流增益和功率增益,在第10章将对这些概念做进一步研究。

图 1.19 所示的曲线给出了增益 $A_v = -5$,输入电压 $v_i = 1 \sin 2000\pi t$ 的放大器的输入输出电压波形。在图中信号的增益及相移都能明显看出,信号的幅度增加了 5 倍,信号的相移为 180° (反相)。

图 1.19 增益 $A_v = -5$,输入电压 $v_i = 1 \sin 2000\pi t$ 的放大器的输入输出电压波形

需要注意信号的相角,在式(1.28)和式(1.29)中, ωt 、 ϕ 、 θ 的单位要求相同。 ωt 的单位为弧度时, ϕ 的单位也必须是弧度。然而,在电气工程类的图书中, ϕ 常常用角度表示,此时就需要读者分清变量的单位体系,并在进行数学计算前将角度转换为弧度。

练习: 已知放大器的输入输出电压可以表示为 $v_i = 0.001 \sin(2000\pi t)$ V 和 $v_o = -5 \cos(2000\pi t + 25^\circ)$ V,其中, v_i 和 v_o 的单位是伏特, t 的单位是秒。求该放大器的 v_i 、 v_o 和电压增益。

答案: $0.001 \angle 0^\circ$; $5 \angle -65^\circ$; $5000 \angle -65^\circ$ 。

1.7.1 理想运算放大器

运算放大器(Operational amplifier),是电路设计中的基本单元,在大多数电路入门课程中会介绍。本节将对理想运算放大器进行简单介绍,尽管不可能实现理想运算放大器,但它有助于我们快速理解给

定电路的基本行为,此外还可以在电路设计中用作基本电路模型。

在电路基础课程中讲过,运算放大器实际上是一个差分放大器,有正负两个信号电压输入端,如图 1.18(b)所示。假理想运算放大器的电压增益和输入阻抗为无穷大,由此可以得到用于分析包含理想运算放大器电路的两个特定假设:

- ① 输入端电压差为零,即 $v_- = v_+$ 。
- ② 输入端电流均为零。

假设应用——反相放大器

经典反相放大器(Inverting amplifier)电路将用于帮助我们重新分析采用运算放大器的电路。如图 1.20 所示,反相放大器电路中,运算放大器的正输入端接地,电阻 R_1 和 R_2 构成了反馈电路(Feedback network)的电阻,分别接在了运算放大器的信号源、反向输入端和放大器输出端之间的节点上。理想运算放大器用三角形符号表示,图中不标注增益 A 。

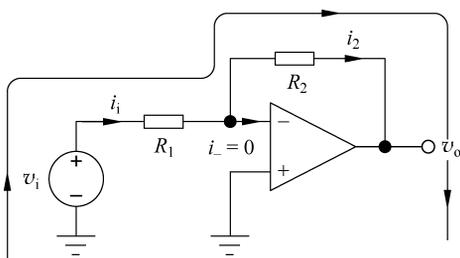


图 1.20 采用运算放大器的反相放大器

我们的目标是求出整个放大器的电压增益 A_v 。为了确定 A_v ,首先要找出 v_i 和 v_o 的关系。一种方法是写出图 1.20 所示的单回路的方程。

$$v_i - i_1 R_1 - i_2 R_2 - v_o = 0 \quad (1.32)$$

需要用 v_i 和 v_o 来表示 i_1 和 i_2 。在放大器的反相输入端应用 KCL,由假设②反相器输入端 i_- 电流为零,可知 i_2 一定与 i_1 相等,即

$$i_1 = i_2 \quad (1.33)$$

而电流 i_1 可以用 v_i 表示为

$$i_1 = \frac{v_i - v_-}{R_1} \quad (1.34)$$

其中 v_- 是运算放大器的反相输入端电压。假设①表明运算放大器两个输入端之间的电压差为零,因为正输入端接地,所以 v_- 等于 0。因此

$$i_1 = \frac{v_i}{R_1} \quad (1.35)$$

由式(1.32)~式(1.35)可得电压增益为

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (1.36)$$

对于式(1.36)有以下几点需要注意。电压增益为负,表明反相放大器输入信号和输出信号之间的相移为 180° 。此外,如果 $R_2 \geq R_1$ (绝大多数情况下),则增益值大于等于 1;但是如果 $R_2 < R_1$,则增益值小于 1。

图 1.20 所示的放大器电路,运算放大器的反相输入端具有与地相等的电势,电势为 0V,称为“虚

地”(Virtual ground)。理想运算放大器可调整输出电压,使 $v_- = 0$ 。

设计提示: 运算放大器电路的虚地

在上述电路中,尽管反相输入端呈现虚地,但它并没有与地直接相连(不存在对地的直接通路)。为了分析该电路而将反相输入端与地短路是一种常见的错误,必须加以避免。

练习: 假定在图 1.20 中放大器的增益为 -5 , $R_2 = 100\text{k}\Omega$, 求 R_1 。

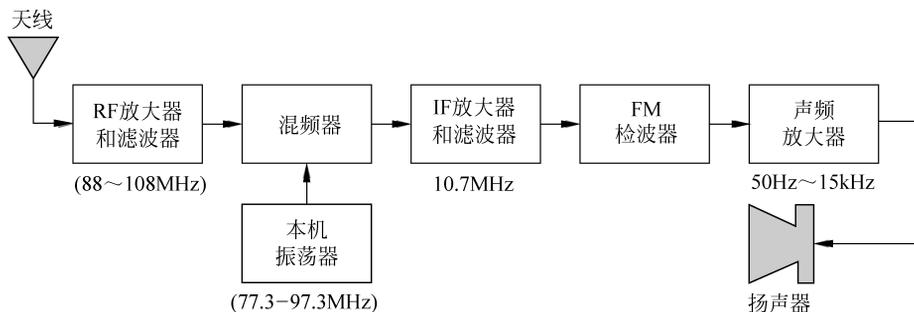
答案: $20\text{k}\Omega$ 。

电子应用

常见电子系统中的放大器——调频立体声收音机

调频收音机接收电路是电子系统中放大器应用的常见例子,下图给出了该接收电路的框图,里面包含多个放大器。天线信号极其微弱,通常为毫伏量级。信号幅度和能量经过射频(RF)放大器、中频(IF)放大器和声频放大器等 3 组放大器进行连续放大,在输出端可以驱动扬声器输出 100W 的声频信号,而天线接收到的原始信号功率仅仅为皮瓦量级。

本机振荡器是另一种特殊的放大器,它可以调节收音机接收器选择所需的电台,在第 12 章和第 15 章将对此进行详细介绍。混频器电路改变输入信号的频率,是线性时变电路的一个例子,在电路设计上十分依赖于线性放大器电路知识。FM 检波器可以由线性放大器或非线性放大器构成。第 10 章~第 17 章将详细说明线性放大器和振荡器的设计方法,以及所需的电路基础知识,便于读者理解更复杂的电路,如混频器、调幅器及检波器等。



FM收音机接收电路组成框图

1.7.2 放大器频率响应

放大器除了调节给定信号的电压、电流及功率外,还可以对不同频率范围的信号进行有选择性地处理。根据频率响应特性,放大器被分为不同的类型,图 1.21 给出了 5 种可能的类型:图 1.21(a)所示的是低通放大器(Low-pass amplifier),允许低于某一截止频率 f_H 的所有信号通过;图 1.21(b)所示的为高通放大器(High-pass amplifier),允许高于某一截止频率 f_L 的信号通过;图 1.21(c)所示的为带通放大器(Band-pass amplifier),它允许两个截止频率 f_H 和 f_L 之间的所有信号通过;图 1.21(d)所示的为带阻放大器(Band-reject amplifier),该放大器会阻止 f_H 和 f_L 之间的所有信号;最后,图 1.21(e)所示