

第 1 章 电子系统：一个世纪的发展历程

电子系统塑造了我们的日常生活。家庭中有大量的电子产品：收音机、电视机、录像机、高保真音响、便携式摄像机、盒式录音机及 CD 唱机、电话应答机、微波炉及个人计算机。虽然不是很明显，但复杂的电子产品控制了我们大部分的生活，例如，微处理器控制着我们的汽车。我们使用的电话系统，其功能是用电子设备放大和传输话音信号。利用微波或光纤与卫星的结合，我们的交谈可以传遍整个世界。从一个机场到另一个机场的安全飞行依赖于电子雷达系统，电子传感器和计算机可以使现代喷气式飞机“飞”起来。现代医疗工作依靠非常复杂的电子诊断和监控系统。此外，如果没有电子通信及信息处理系统，商业和工业部门将无法工作。无处不在的显示器昭示着我们正处于一个新的电子世界。

电子学改善了我们的生活，但有时也使生活变得更糟糕。虽然我们一直与世界上发生的事情保持着不变的联系，但也处于难以想像的武器破坏力的危害之中，而武器的破坏力依赖于电子学的进步。不管是为了设计和使用电子系统，还是为了指引电子系统的发展方向，对电子学的理解都是必不可少的，这样它们才能服务于人类生活条件的改善。

有人说，要想前进，必须知道自己的位置。20 世纪是电子时代——直到 1900 年才出现现在称之为电子的器件。现代意义的术语“电子学”，直到 1930 年才开始使用 (Süsskind 1966)。本章作为介绍性章节，从对电子器件的简要概括开始，接着讨论了无线系统：无线电。电子器件首先在收音机中得到应用，1904 年发明了真空二极管，1906 年发明了三极管。不仅无线电通信比真空管的发明早将近 10 年，而且，20 世纪的前 10 年大部分系统都没有使用真空管。毫不夸张地说，真空管可以称为无线电通信的一场革命，它导致了连续发射信号和高灵敏度与选择性接收机的产生。随着真空管 1913 年在电话中的第一次应用，它就成了电话系统中的一个重要器件。真空管放大器和多路传输电路的使用，使长途电话业务得到了极大的扩展。20 世纪后半期出现的晶体管和集成电路使得发展数字系统成为可能。随着这种发展，电话交换和传输系统又一次得到显著的提高。

一方面，电子设备的发展依赖于基础物理学原理的知识：真空中电子的行为及其与其他物质间的相互作用。另一方面，需要不断地开发电子器件以满足认知的需求。电子器件的特征决定了哪些应用能够实现。1.4 节讨论的电视机，说明了电子设备的发展和专用集成电路之间的相互联系。模拟电视系统在 20 世纪 30 年代发展起来，在 40 年代后期进入商用。在 20 世纪剩余的时间里，电视都是基于这种模拟系统，惟一的进步是引入了彩色信息分载体。20 世纪末数字系统发展了起来，它与模拟系统完全不同，并与其不兼容。虽然从传输方面看数字系统效率更高，但是所需的信号处理非常复杂。如果没有 20 世纪 80 年代发展起来的、用于编码和解码的超大规模集成电路 (VLSI)，就不可能有数字电视。

电磁频谱 (1.5 节) 用于各种收音机、电视机及其他通信设备。虽然早期的雷达系统可以追溯到 20 世纪 30 年代，但是第二次世界大战促进了这项技术的快速发展。人们发明了能够传输和检测超高频信号 ($f > 1000 \text{ MHz}$) 的新电子器件。20 世纪 60 年代第一次发射的通信卫星也依赖于这种超高频 (微波) 器件。

数字电路导致了计算的革命。早期的计算机，直到 20 世纪 60 年代中期左右还依赖于真空管电

路。在今天看来，这些计算机不仅处理能力小，而且由于真空管可靠性的限制，频繁发生死机。固态器件不仅导致了可靠性的大幅度提高，而且使得拥有更高计算能力的机器成为可能。借助于超大规模集成电路，桌面计算机具有了 10 年前只有大型主机才能达到的计算能力。

不用说，除了这些讨论之外，电子器件和电路在许多其他应用中也已经很常见。功率电子学依赖于电子开关器件和电路。应用电子系统可以有效地完成频率电压转换以及交流变直流和直流变交流的转换。在医用电子学中，各种电子传感器电路与计算机系统一起发展起来，用来处理和显示数据。更进一步，电子系统，如心脏起搏器，已经很好地增进了机体的功能。依靠简单微处理器的电子传感和控制系统，其应用范围从可编程恒温器到汽车点火和燃料系统。涉及大规模计算能力的、更复杂的传感和控制系统已经应用于自动制造系统。虽然对这些的讨论及其应用已经超出了本章的范围，但应该认识到，不同的系统经常采用类似的电子器件和电路。为了理解最简单和最复杂的电子系统，有必要知道基本概念和本文主题。

1.1 电子器件：概述

约翰·安布罗斯·弗莱明爵士 (Pierce 1950; Shiers 1969) 在英国制造出热离子阀，又称真空管。该管依据所谓的爱迪生效应，电流由灯泡中的热灯丝产生。通过用热灯丝附近装有电极的灯泡进行的一系列试验，弗莱明推断出电流为阴极电荷所致。我们现在知道，电流是由于热灯丝发射的电子被电极收集形成的。在某种程度上，该电流只由电子产生，到电极的电流是单方向的；在高真空度的管子中，不会形成相应于正电荷运动的电流。

1.1.1 二极管

弗莱明阀包括一个热灯丝（相当于灯泡中炽热的灯丝），该灯丝由外加电池所产生的电流加热。发射的电子由灯丝周围的屏极收集（图 1.1）。尽管实际电流是由于电子从电极向屏极的移动产生的，但是屏极电流 i_p 习惯上为正值，因为电流定义为正电荷的假定移动方向。正的屏极电压吸引电子，所以电流增加，反之负的屏极电压排斥电子，产生极小的电流或零电流。这种非线性作用导致了电流只有一个方向（ $i_p \geq 0$ ）。对于有效正电压，排空良好的管电流基本为零。

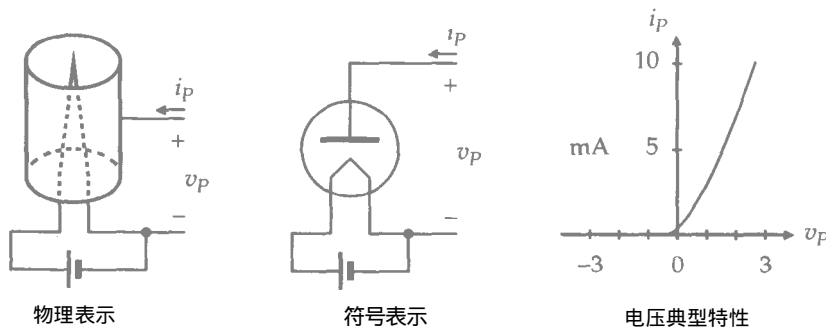


图 1.1 真空二极管及典型特性曲线

大约与弗莱明发明真空管的同时，Greenleaf W. Pickard 正在试验一种点接触型的半导体检波器 (Douglas 1981)。该器件可被看做现代固态器件的前身。除了 Pickard 制造的使用硅的检波器之外，

Henry H.C.Dunwoody 在 1906 年开发出了使用碳化硅的类似检波器。直到 20 世纪 50 年代引入面接触型结型半导体二极管以前，点接触型二极管得到了极大的应用。

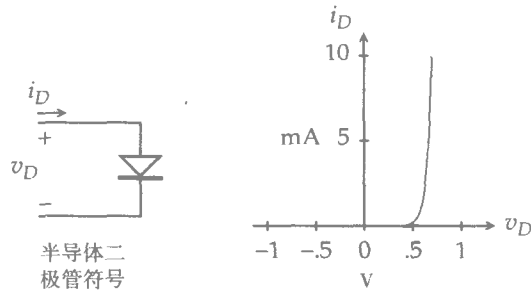


图 1.2 半导体二极管及典型特性曲线

与真空管一样，半导体二极管具有非线性特性（图 1.2）。二极管电流 i_D 随二极管电压 v_D 的增加而迅速增加（对于理想二极管，可以看出电流与电压成指数关系）。二极管的整流特性，即单向导电性，首先应用于无线信号的检波。检波问题推动了真空管和半导体二极管的发展。图 1.3 所示为使用典型调幅载波信号的基本无线电接收机。虽然早期通信系统的载波频率通常为 50 kHz 到 100 kHz 但是现在的无线广播波段包含了载波频率为 540 kHz 到 1600 kHz 的信号。对于开 - 关系统连续波或称 CW），载波信号被简单地固定为开和关以形成点和划线。而对于调幅（AM）载波信号的幅度随被调制信号的变化而变化。例如由话筒产生的声音信号。

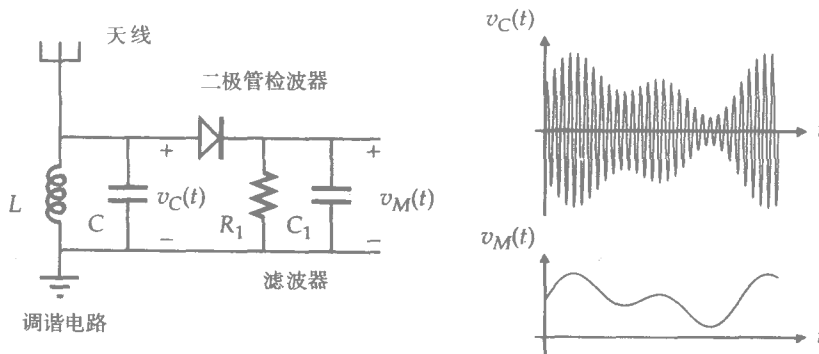


图 1.3 基本二极管无线电检波器

应该注意的是 载波频率的周期通常远小于被调制信号能感觉到的变化时间。在无线电接收机中 天线接收到的能量耦合到调谐电路 理想情况下 调谐电路去掉其他所有与载波频率不同的信号。接着用检波二极管把载波信号 $v_C(t)$ 转换为单极信号。如电路所示 电容 C_1 可以平滑检出信号。如果没有这个电容，信号将类似于 $v_C(t)$ 的上半部。

1.1.2 真空三极管

从影响来说，进入电子时代的第二个显著进步是，Lee De Forest 在弗莱明的真空二极管中加入了控制电极，或称栅极。这导致了真空三极管的产生。图 1.4 所示是它的实际器件示意图，因为有三个电极，所以被称为三极管。第三个电极，即栅极，是一个环绕在管中灯丝周围的笼子状金属结构。外加的栅极电位控制着管中的屏极电流。

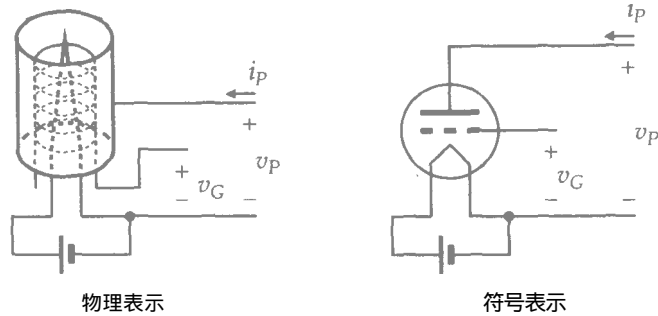


图 1.4 真空三极管

正常情况下，栅极处于负电位（相对于灯丝而言），这使得它倾向于排斥热灯丝发射出的电子。在给定屏极电压 v_p 的情况下（图 1.5），栅极电位越负，屏极电流越小。因为负的栅极电位排斥电子，所以栅极电流基本为零（在真空度不好的真空管中，因为电离的电子撞击空气分子而产生正离子，所以栅极会产生微小的电流。虽然 De Forest 的早期管子中栅极电流很明显，但后来真空度良好的管子中，栅极电流可忽略不计）。因为栅极电流基本为零，所以，栅极电路所消耗的功率接近于零。这里显示了真空三极管的价值，其栅极电压不仅控制着屏极电流和电压，而且控制所需的功率基本为零。它不是永动机（屏极电流需要电源），但是，对大部分应用来说，这是又一件好事！

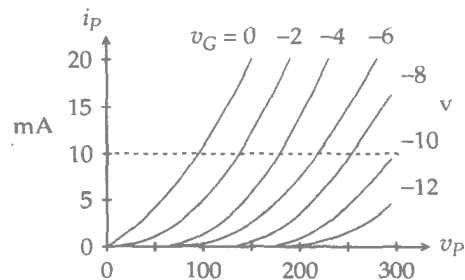


图 1.5 典型真空三极管的特性曲线

为了说明真空三极管的效用，考虑图 1.5 中的典型特征曲线，设管中灯丝和屏极间的直流电流为 10 mA ($i_p = 10 \text{ mA}$)。对于特殊值的栅极电压，屏极电压对应于栅极电压曲线与 10 mA 坐标线（图 1.5 中的虚线）的交点。例如，栅极电压为 -4 V 时，屏极电压为 180 V ，栅极电压为 -6 V 时，屏极电压为 220 V ，依次类推。这样就得到图 1.6 中的转移特性曲线。特别重要的是，栅极电压相对较小的变化会引起屏极电压相当大的变化。图 1.6 中特性曲线的斜率约为 -20 。这表明栅极电压变化 1 V 将引起屏极电压变化 -20 V 。负号表明增加引起减小。因此该电路的电压增益约为 20 。

De Forest 的第一个真空三极管用于检测无线电信号（代替图 1.3 中的二极管）最初将其称为振荡阀。然而，因为真空三极管既能检测无线电信号又具有放大能力，所以，该管很快得到广泛的应用，其中包括产生无线电信号。

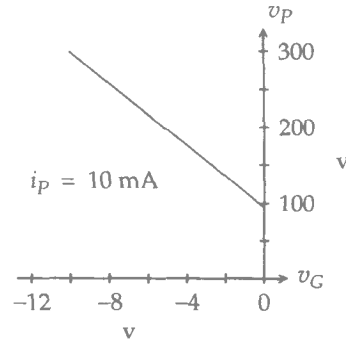


图 1.6 图 1.5 三极管的转移特性曲线

1.1.3 晶体管 and 集成电路

晶体管，作为固态器件，在大部分电子应用中代替了真空管，但不是全部。图 1.7 为现代金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）的代表符号和典型特性曲线。对该器件来说，自由电子由 MOSFET 半导体器件的源极（Source）流向其漏极（Drain）。与真空管栅极方式类似，自由电子形成的电流由 MOSFET 器件的门电位控制。和三极管栅极电流一样，门（Gate）电流基本为零。不过自由电子不是由热灯丝而是由掺杂半导体产生，因而成为一种更高效的器件。还有，典型 MOSFET 所需的电压电平远小于典型真空管电路。除 MOSFET 器件以外，双极结型晶体管 BJT 也广泛应用于现代电路中。在 1948 年点接触型晶体管发明后不久，就开发出了锗双极结型晶体管。随着 20 世纪 50 年代硅生产技术的发展，到 20 世纪 60 年代在大部分应用领域都有锗和硅晶体管取代真空管的趋势。然而，正是集成电路的出现对电子系统产生了最深远的影响，最初在一个半导体晶片上集成了十几个晶体管。有人把这种影响称为一场革命（Noyce 1977）。

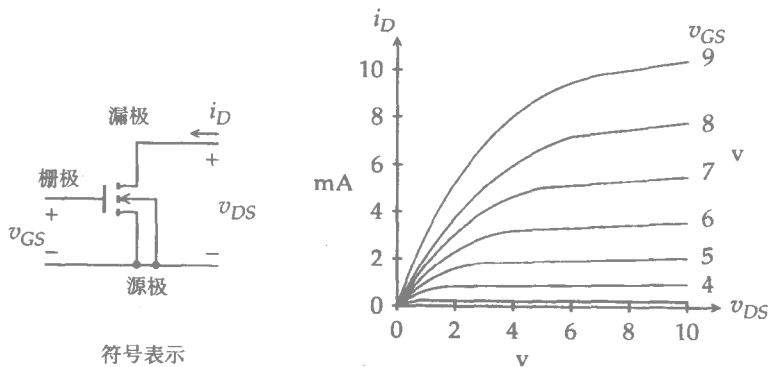


图 1.7 金属氧化物半导体场效应晶体管 MOSFET

真空管通常在一个玻璃封装中只包含一个、两个或者可能三个电子器件。这些电路一般放置在一个底盘上，底盘上有带弹簧的插座用于固定真空管。这使得真空管具有易替换性——出于频繁更换的需求。插座与其他器件之间的连接靠手工焊线完成。像电阻、电容这样的小器件经常直接用其引脚支撑以形成器件之间的连接。

即使是 20 世纪 50 年代出现的最早期的商用晶体管也比他们所取代的真空管更可靠。因此，晶体管可用导线与电路直接相连，而无需插座。这导致了印刷电路板的产生，印刷电路板是在酚基上

粘合铜箔导体。晶体管及其他器件直接置于印刷电路板上，与铜箔的电气连接由浸焊完成。因为晶体管比真空管小得多，而且消耗的功率相当少，这使更高的器件集成度成为可能。

批量生产迅速发展起来，在此过程中，一个半导体晶片上同时安装几个晶体管。然后把晶片切割为单个的晶体管，引出引脚。最后把晶体管按应用要求进行封装。在装配过程中，单个晶体管经过测试，去掉不合格品。随着生产技术的进步，高性能器件的产量大幅增加。

回顾过去，现在显然要问：为什么要把半导体晶片中的单个晶体管分离出来，为什么没有一种工艺使器件在电气上彼此隔离（而不是通过切割来分离它们），然后器件可以在半导体晶片上互相连接在一起，以形成我们现在所说的集成电路。这一想法在 20 世纪 50 年代末期得到了实现（Meindl 1977）事情往往就是这样，许多独立工作的人都参与到了最早期的集成电路开发之中。然而，人们常常把集成电路的“发明”归功于 Jack Kilby（Kilby 1976）。他在 1958 年演示了用锗晶体管手工装配的移相振荡器和触发器。电阻由合适的掺杂半导体组成，而电容则利用了反偏置的半导体结。该演示证明了这一想法的可行性，因而得到迅速的应用。

1.2 无线通信：新的时代

真空三极管最早应用于无线通信。它的发明者 Lee De Forest 把这个管自称为振荡阀——一种检测无线或收音机信号的器件（题外话，应该注意到 Lee De Forest 的自传题目是无线电之父，但这一称呼并没有得到广泛的认可）。电子器件和无线电的紧密联系是 20 世纪前半期特征。美国的有关专业组织是 1912 年成立的无线电工程师学会。直到 1963 年，该组织与电气工程师学会合并为电气与电子工程师学会（IEEE）的时候，“无线电”一词的命名才被取消。

麦克斯韦方程是电磁理论的核心，它为无线通信即无线电提供了基础。詹姆斯·克拉克·麦克斯韦在库仑、奥斯特、安培、亨利、法拉第和高斯等人工作的基础上提出了这一著名的方程。通过一系列的实验观察和理论推断，亨瑞·鲁道夫·赫兹证明了麦克斯韦方程的有效性。赫兹在 1892 年发表了第一篇关于电动力学文章“*Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*”（D. E. Jones 的英译文题目为电磁波）1894 年赫兹死后，Oliver Joseph Lodge 关于赫兹研究的演讲为更广泛的理解电磁原理提供了背景。Lodge 和 Ferdinand Braun 为谐振思想的发展做出了贡献，并说明了把发送和接收系统调谐为同一频率的重要性（Aitken 1976, Jolly 1975, Kurylo 和 Süsskind 1981, McNicol 1946）。与此同时，把麦克斯韦方程转化为现在的应用形式要归功于 Oliver Heaviside（Nahin 1988, 1990）。

早期电磁实验所遇到的难题是如何找到合适的高频信号检波器。早期的检波器是金属屑检波器，基本上是一个装满松散金属屑的小玻璃管。该器件依靠填充物的阻抗非线性特性工作。对于小电流，填充物阻抗很大，而对于大电流，填充物粘结在一起，使得阻抗变得很小。大电流过后，为了恢复高阻抗，需机械敲击粘结物。在接收端电磁信号产生的变化电流使金属屑粘结。这一结果可由与金属屑检波器相连的低压直流电路检测到。Edouard Branly 制造出许多不同的金属屑检波器，并且因为把金属屑检波器命名为无线电导体而成为第一个使用术语“无线电”（本文中）的人。

1895 年马可尼优化组装了合适的仪器，并证明了它可用于信号通信（Jolly 1972, Masini 1995）。因为意大利政府对他的新通信方式不感兴趣，马可尼来到英国，在这里得到英国邮政部的认可。马可尼认识到了无线电报的商业重要性，他申请了专利并创立了马可尼无线信号公司（Marconi Wireless Signal Company）技术进展十分迅速，1901 年就成功地发送了穿越大西洋的信号。

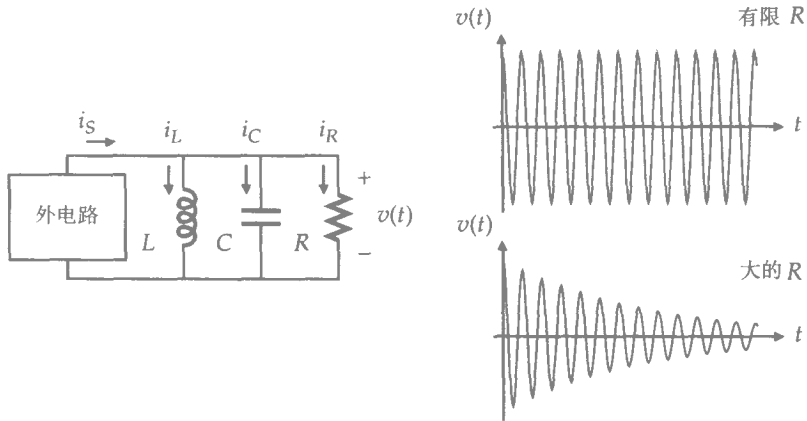


图 1.8 谐振电路

1.2.1 电子调谐

调谐是无线电通信的一个重要方面；即使电路在特定信号频率下实现最优响应。这一般可由图 1.8 所示的并联电感 - 电容电路来实现。电阻 R 是为了补偿电路损失（电感中的阻抗）和与电路相连的天线的能量辐射。早期的无线电发射是利用间隙放电产生的脉冲电流使电路开始电压振荡。考虑电路已经被启动且为零时的情况。这表明各器件的电流之和一定为零，如下式所示：

$$i_S(t) = i_L + i_C + i_R = 0$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int v \, dt, \quad i_C = C \frac{dv}{dt}, \quad i_R = \frac{v}{R} \quad (1.1)$$

这两个方程可以合并，再求微分得到信号的二阶微分方程：

$$\frac{1}{L} \int v \, dt + C \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R} = 0$$

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{LC} = 0 \quad (1.2)$$

对于没有损失的理想电路（ $R \rightarrow \infty$ ），微分方程的有效解为等幅振荡电压。如下所示：

$$v(t) = V_m \cos \omega_0 t, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.3)$$

这样，该无损失电路一旦被外加电流激活。其电压将无休止地振荡下去。

对于有损失的电路（ R 有限），将发生以下阻尼振荡：

$$v(t) = V_m e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} + \left(\frac{1}{2RC}\right)^2} \quad (1.4)$$

最早期的无线电发射使用放电脉冲电流。现代发射机（电台和电视台、民用波段收发机、蜂

窝电话等)基本上也是依据同样原理,但在每个振荡周期都用电子起振电路提供脉冲电流的电路除外。

在起振电流消失之后,电路是如何保持振荡的呢?为了回答这个问题,我们必须回忆一下电感和电容的储能特性。设 e_C 、 e_L 分别为电容和电感所存储的瞬间能量,则:

$$e_C = \frac{1}{2}Cv^2, \quad e_L = \frac{1}{2}Li^2 \quad (1.5)$$

考虑理想情况 ($R \rightarrow \infty$) 时电压幅值不变 (式 1.3), 则:

$$\begin{aligned} i_L &= \frac{1}{L} \int v dt = \frac{V_m}{\omega_0 L} \sin \omega_0 t \\ e_L &= \frac{1}{2} \frac{V_m^2}{\omega_0^2 L} \sin^2 \omega_0 t = \frac{1}{2} CV_m^2 \sin^2 \omega_0 t \quad \text{因为 } \frac{1}{\omega_0^2} = LC \end{aligned} \quad (1.6)$$

电路中总能量 $e_C + e_L$ 为定值:

$$e_C + e_L = \frac{1}{2} CV_m^2 = \frac{1}{2} \frac{V_m^2}{\omega_0^2 L} \quad (1.7)$$

可以看到,当电容存储能量为最大时,电感存储能量为零,反之亦然(图 1.9)。

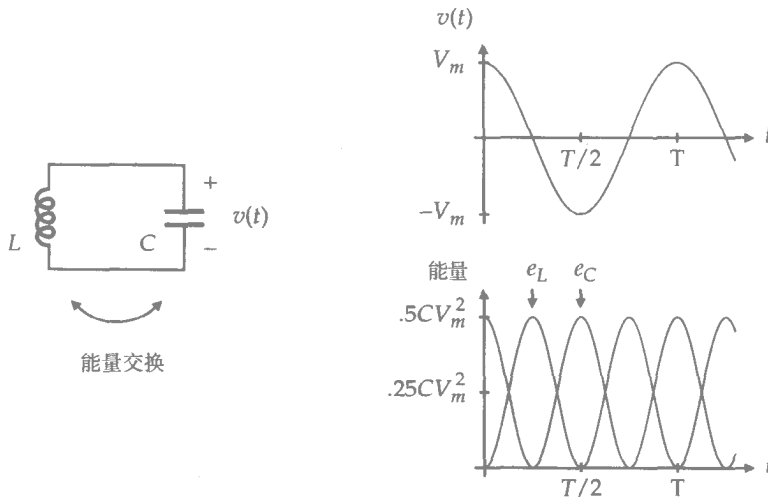


图 1.9 谐振电路的能量交换

实际上,电路中电容和电感的能量互相交换。对于有限阻值的电路来说,电能被电阻逐渐消耗;也就是,电能转换为热能(如果电阻为天线的等效结果,则辐射掉)。

1.2.2 真空管电路

随着真空管的发明,真空三极管得到极大的改进,大量的电子电路的开发大大地增进了管子的功效。1912年阿姆斯特朗再生式电路的发明及增加电路增益的正反馈的使用,增加了接收机的灵敏度。例如,利用阿姆斯特朗的再生原理,有可能只用一个真空管(或晶体管)就建立一个短波接

收机，并且能接收来自世界各地的信号。把这个电路修改一下也可以用于产生射频振荡，它可以代替依靠间隙放电或机械交流发电机的无线电发射机。

虽然阿姆斯特朗是第一个申请再生式电路专利的人，但专利立即受到 De Forest 的挑战。De Forest 声称他早在一一年以前就在实验室里发现了这一结果，尽管该电路的技术员简明手册入门“不是很好”。结果导致两位无线电先驱围绕专利合法性之争的终生仇恨。阿姆斯特朗最初取得了再生式电路的专利，并成功抵制了 De Forest 的挑战。然而，最终 De Forest 通过一直到美国最高法院的诉讼引得了胜利。尽管如此，人们普遍认为阿姆斯特朗是该电路发明者，历史纪录表明，对于该电路，阿姆斯特朗比 De Forest 理解得更好。1918年，无线电工程师 (IRE) 学会为表彰阿姆斯特朗再生式电路的发明，授予他一枚奖章。1934年，当阿姆斯特朗在与 De Forest 专利之争中失败后打算归还奖章时，IRE 董事会不但拒绝接受（一致决定），而且重申了他们最初的颁奖决定 (Lewis 1991)。

1.2.3 超外差式接收机

超外差式收音机是阿姆斯特朗无数发明中的一项。他早期的再生式接收机虽然灵敏但工作不稳定（经常突然出现振荡）。要求一个如图 1.8 所示并联谐振的调谐电路来选择需要的无线信号而去掉其他信号。另外，调谐电路还用来增加射频放大器的增益。为了对给定电路调谐，其电容、电阻二者之一或者两者都需改变。经常需要几个各自带有调谐电路的放大器。这样收音机调谐需要同时调整几个电路——每个电路都需要一个调谐旋钮。

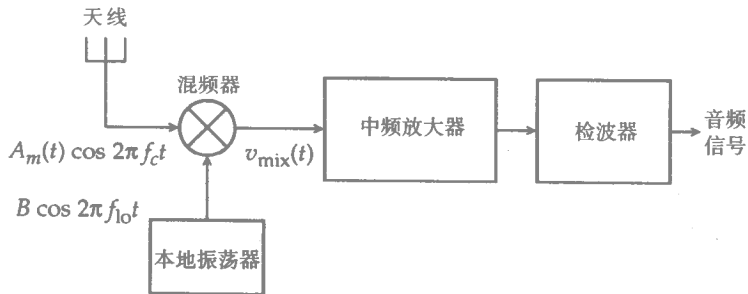


图 1.10 超外差式收音机

阿姆斯特朗认识到信号的载波频率可经过非线性混频过程（图 1.10）加以改变。考虑从天线系统接收调幅信号 $A_m(t)\cos 2\pi f_c t$ 的情况。还需要 A 接收机的本地振荡器产生第二个高频信号 $B\cos 2\pi f_{i0} t$ 。设最初时混频器产生的输出电压是由其两个输入（图 1.10 所示的标准乘法器）所致。表达式如下：

$$\begin{aligned} v_{\text{mix}}(t) &= A_m(t)\cos 2\pi f_c t \cdot B\cos 2\pi f_{i0} t \\ &= \frac{1}{2}A_m(t)B[\cos 2\pi(f_{i0} + f_c)t + \cos 2\pi(f_{i0} - f_c)t] \end{aligned} \quad (1.8)$$

以上结果由两角的余弦和差三角恒等式得到，如下：

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \beta) &= \cos\alpha \cos\beta - \sin\alpha \sin\beta \\ \cos(\alpha - \beta) &= \cos\alpha \cos\beta + \sin\alpha \sin\beta \\ \cos\alpha \cos\beta &= \frac{1}{2}[\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)] \end{aligned} \quad (1.9)$$

混频器的输出电压由两个信号组成，一个乘以 $\cos 2\pi(f_{i0} + f_c)t$ 而另一个乘以 $\cos 2\pi(f_{i0} - f_c)t$ 。这

是两个不同的调幅信号，一个的载波频率是 $f_{10} + f_c$ 而另一个则为 $f_{10} - f_c$ 。每个的振幅都与原始信号的振幅成比例，即 $A_m(t)$ 。

考虑典型的 AM 广播接收机的情况，它可以调谐接收到载波频率为 1350 kHz 的调幅信号。设其本地振荡器产生 1800 kHz 的信号。混频器的输出将包含两个调幅信号，其中一个的载波频率为 450 kHz 而另一个的载波频率为 2250 kHz。如果把中频放大器的频率调谐为 450 kHz 则载波频率为 450 kHz 的成分将被放大，而载波频率为 2250 kHz 的信号将被抑制。450 kHz 的信号在放大后将被检出，这样就得到与接收信号中调幅 $A_m(t)$ 相应的音频输出信号（一般需要由耦合电容得到的电平转换来恢复音频信号）

超外差式接收机有什么优点呢？再考虑一下把带有中频放大器的广播接收机调谐到固定的频率 450 kHz。接收机响应的信号载波频率依其本地振荡器的频率而定。要接收 550 kHz 的信号（广播波段的下限），要求本地振荡频率为 1000 kHz。这可以使混频器产生载波频率为 450 kHz 和 1550 kHz 的信号。450 kHz 的信号被放大，而 1550 kHz 的信号被抑制。要接收 1600 kHz 的信号（广播波段的上限），要求本地振荡器频率为 2050 kHz，这又使混频器输出频率为 450 kHz 和 2500 kHz 的信号。该接收机的优点就是可通过改变本地振荡器的频率（要求范围为 1000 kHz 到 2050 kHz）实现调谐。虽然电路的电感、电容二者之一或两者都需改变，但只需改变一个电路的共振频率。即使是混频器输入为调谐电路的改进型接收机，也要用带有单个调谐旋钮的机械跟踪系统来同时调谐两个电路。

1.3 电报和电话：广域连接

亚历山大·格瑞汉姆·贝尔 1876 年发明的电话比电子器件的出现早近 30 年（Bruce 1973, Sharlin 1963, Pupin 1926）。到 1906 年真空管发明的时候，电话已广泛应用于城市各地。在早期的通信系统（电报）的基础上断言了电话的应用。当贝尔在尝试发展一种多路传输系统，以在单根电报线上同时传输几个电报信号时，“误入歧途”从而发明了电话。然而把贝尔与电话联系在一起并非不合适，因为他、他的父亲和他的祖父都是受尊敬的演说家（雄辩家）。

1.3.1 电报

1837 年发明的莫尔斯电报系统建立在伏特、奥斯特和安培等人早期工作的基础之上。伏特（以其命名了电压单位）设计了第一块电池：由锌片和银片组成的“电化学堆”，锌片和银片之间用盐水泡过的布或纸隔开。奥斯特观察到电流产生磁场，安培建立了将磁场和电流联系在一起的数学理论。这导致了电磁响应器的发展，电磁响应器是电报接收机的基础。图 1.11 显示了一个基本的电报系统。莫尔斯的成功依赖于当时可用的电子器件，他用这些器件组装了一个电报系统。人们常常记住的他的最大贡献是，发送信号的二进制编码系统。有电流（键压下）对应开状态，无电流对应关状态。开周期被短和长的间隔打断，这就是我们现在称之为莫尔斯编码的点和划。

最初的莫尔斯电报系统使用的接收机包括一个由电磁铁控制的铅笔，可在移动的纸带上留下痕迹。电报操作员将根据这些标记译码，以恢复原始信息。而操作员很快就发现可以由听到的打印机声音直接对信息译码——不再需要标记带。为了优化译码，发展起来了电磁音响器，一种击键声与电磁铁活动状态对应，而另一种击键声与电磁铁的不活动状态对应，这样就把关到开的电流转换与开到关的电流转换区别开来。

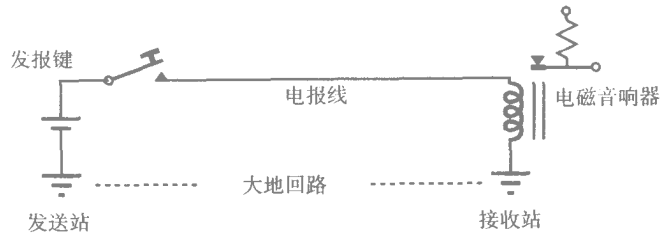


图 1.11 基本电报系统

美国的有线电报系统使用一种修正的编码——美国莫尔斯编码，而无线通信系统采用了该编码的第二版——国际莫尔斯编码，至今无线电业余爱好者及其他人在短波无线电通信中还在大量使用。在早期电报中使用的同样的开-关发送信号原理形成了今天现代光纤系统的基础。激光发射器发出的光（依次为开或关）通过光纤发送到接收端，即一个光敏二极管。不仅光纤系统的速度更高，而且电信号，如电话产生的电信号，可直接编码为开关信号。

1.3.2 基本电话系统

图 1.12 所示电话的工作原理与电报类似。话筒代替了按键用于电路电流的调制。贝尔最初使用的话筒包含一个振动膜，该振动膜与一根浸入酸性溶液中的探针相连。声波撞击振动膜引起探针运动，探针运动又引起电路阻抗的变化。而变化的阻抗导致了电路电流的变化。对于电报系统，接收端使用了电磁铁。不像电报系统那样由金属接触产生音响器中的咔嗒声，在电话系统中，使用了磁场控制的钢振动膜。永久性磁铁和因电话电路的变化电流而加强的电磁铁共同产生了该磁场。

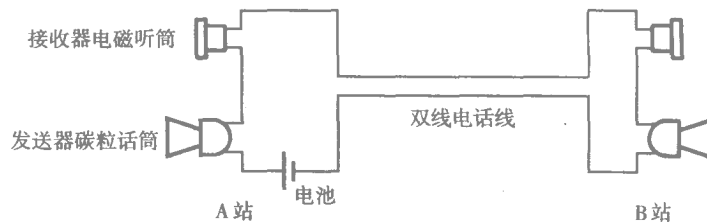


图 1.12 基本电话系统

很快就出现了用碳粒代替酸性溶液的改进型电话话筒。话筒中振动膜的运动引起了碳粒压力的变化，碳粒压力的变化又引起了阻抗变化。虽然已经发明了改进型的碳粒话筒，但这种类型的话筒自从第一次引入之后一直使用了 100 多年。

图 1.12 中的电路是双向的，有两个发送器和接收器，这样任何一方都可以在另一个接听的时候发送。为完善电话线路，使用了另一根线以代替电报系统中的大地回路。大地回路虽然用线少，但会导致错误和难以预料的结果。今天，所有的市话线路都采用了双线（例如，家用电话和电话局之间的线路）。使用双线线路，大大减少了由于不同电话线路之间的电磁耦合产生的干扰（串音）。

除了无线电应用以外，早期的真空三极管还用于长途电话的中继放大。由于绝缘和线路损失，电话信号会衰减，也就是信号随电话线距离的增加而减弱。在真空管放大器出现以前，使用机械式的放大器，他由一对固定的电话接收机和碳粒话筒组成。遗憾的是，电话信号严重失真。真空三极管放大器在 1913 年首次用做电话转发器，它是解决延长长途电话距离问题的理想方式。1915 年第

一次横贯美国大陆的电话线使用了真空三极管放大器，尽管已经储存了一套机械式放大器（Fagen 1975）。

1.3.3 模拟电话信号

图 1.12 中的基本电话系统是一个模拟系统，因为电路中的电压差在规定范围内可以取任意值。电路电压的变化与话筒产生的音频信号一致。这与信号仅靠电压开关状态的电报系统不同。

频谱（spectrum）是模拟信号的重要特性（图 1.13）。正弦信号只有一个频率成分，即周期频率，而非正弦周期信号有一个基频成分和一系列谐波成分。每个频率成分的幅值和相位与信号的周期波形有关：信号变化越快，谐波幅值越大。从信息的角度看，周期信号不是很令人感兴趣，因为只要“看到”了信号的一个周期就“看到”了它的全部。非周期话音信号的频谱是连续的。由于电话系统中不可避免的或人为的电气限制，使电话信号的频谱受到限制。以美国系统为例，大约 300 Hz 到 3400 Hz 的频谱得到利用，此范围以外的频率成分被过滤掉。

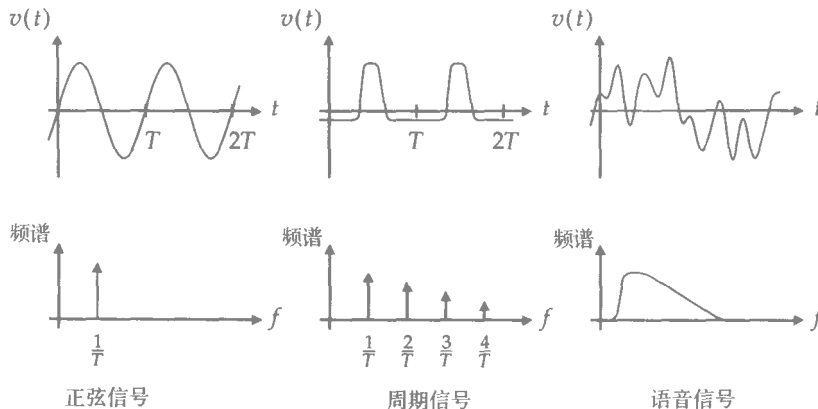


图 1.13 幅值与频谱相关的时域信号

电子系统，如放大器，必须能够响应信号所需的全部频率成分。由于信号可认为是由多个正弦信号组成（根据周期信号的傅里叶级数表示和非周期信号的傅里叶变换），所以，可以设计一个电子系统来真实重现正弦信号。而且，通常用正弦信号来测试，操作说明书也按正弦信号给出。对于图 1.13 所示的语音信号，电子系统必须对信号频谱有一致的频率响应，并能够在没有明显失真的情况下使响应达到给定的幅值范围。

通常，用户电话和市话交换台之间使用一对专线连接。如果用户呼叫同一交换台内的另一用户，可通过电话局的交换设备直接建立连接。直到 20 世纪 70 年代，交换工作主要通过机械定位触点实现。如果用户呼叫其他交换台的用户，例如其他城市的人，则需要电话局之间建立连接。根据环境的不同，到达最终目的地之前还可能需中间的交换连接。除信号放大之外，电子系统还用于电话信号的多路传输。一对电话线，或其他类型的传输系统，常常同时传输多路电话信号。在数字电话电路出现以前，这通过转化各电话信号的频谱来完成（图 1.14）。这个过程类似于无线电系统中用高频载波来“运载”低频调制信号。这里的调制信号是各个电话信号。在美国，真空管和真空管电路早期的大部分改进都归功于贝尔电话实验室（Fagen 1975）。这样，早期电话和无线系统是同时、并行发展。

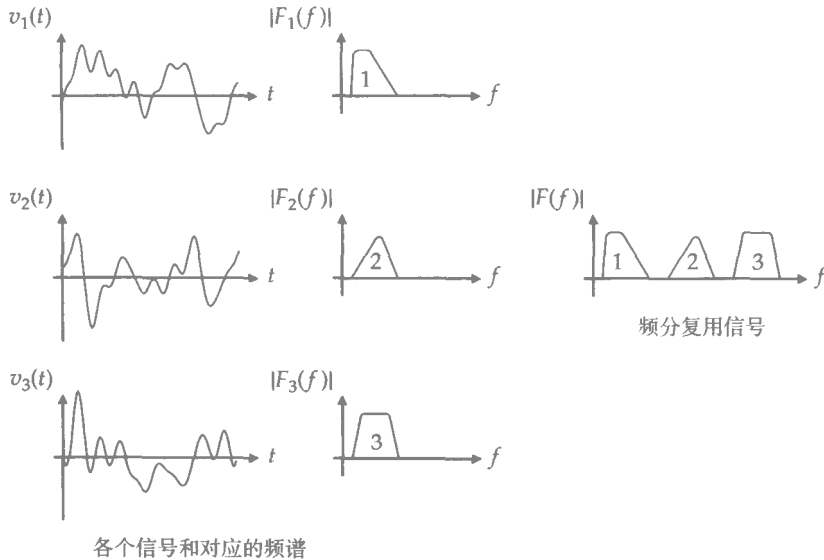


图 1.14 电话信号的频分复用

1.3.4 数字电话系统

尽管电话用户和电话局之间仍广泛采用模拟连接，但数字信号已用于交换台内并在各电话局之间传送电话信号。各电话局使用模数和数模转换器与用户连接。利用数字信号，可以很容易实现完全由电子方式来完成交换，从而可消除使用机械活动触点所造成的不稳定连接。随着专用集成电路的发展，现在全电子数字电话系统已经普遍使用。

如图 1.15 所示，采样 (sample) 过程用于模拟信号到数字信号的转换。美国电话系统每秒钟采样 8000 次，也就是说，每 $125 \mu\text{s}$ 作一次电话信号采样。采样的结果是一系列代表模拟信号的幅值。可以看出，如果采样速率至少为模拟信号最高频率的 2 倍，则采样信号包含了原始模拟信号的所有信息；也就是说，可以通过采样信号无误地重现原始模拟信号。

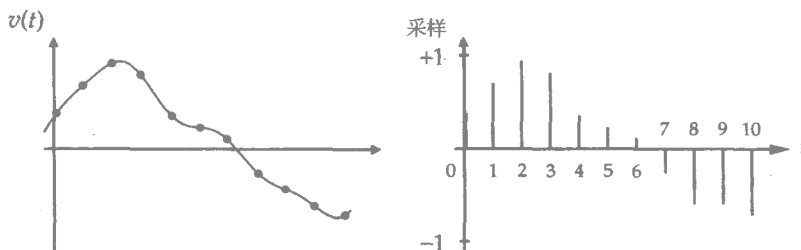


图 1.15 电话信号的采样

在美国电话系统中，采样信号的幅值转换为 8 位二进制 (binary) 数。图 1.15 中采样信号的规格化范围 ± 1 被分成 256 (28 个) 离散值，每个采样取其最接近的值。用一系列不均匀的值来合理地保存高和低的信号。图 1.16 为图 1.15 中信号的数字表示。因为每个采样用 8 位 (bit) 来表示，所以，这 8 位必须压缩到 $125 \mu\text{s}$ ($1/8000 \text{ s}$) 采样间隔之内。这使得每位的有效时间间隔为 $15.625 \mu\text{s}$ ，

即每秒钟 64 000 位。虽然要求数字信号比其所代表的模拟信号要有更高的传输速率，但是它只需传输开 - 关状态信息。

需要两条数字信号通道用于电话线路的两个方向。利用电子逻辑电路来实现这些信号的“交换”。现代数字电话局在本质上就是一个有大量输入和输出线路的专用计算机。高效的现代电话传输系统采用了数字信号的时分复用。代表信号采样的 8 位 (bit) 数字信号的传输时间缩短了。如果时间缩短 50%，经过类似修改的第二个信号的各位可以插入第一个信号的各位之间，在传输系统的终端，不同时间间隔产生的信号可以被分离出来。

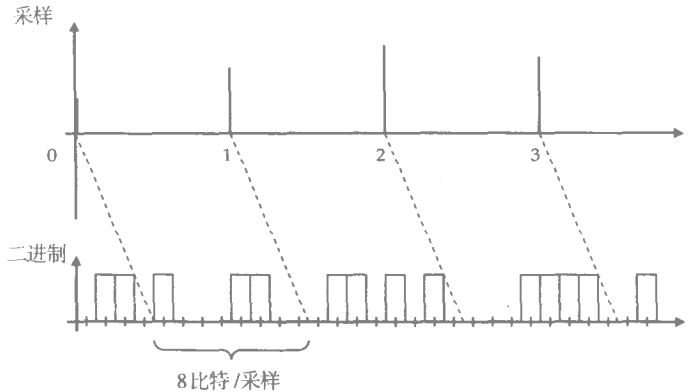


图 1.16 从采样幅值到二进制编码信号的转换。为显示清楚扩大了时间尺度

典型的初级时分复用系统组合了 24 个数字电话信号。合成信号的一帧由表示每个信号采样的 8 位 (共 192 位) 加上标识该帧的 1 位组成。若标志位采用开关序列 (开表示一帧, 关表示下一帧等), 那么在时分复用系统的接收端可以很容易地识别一帧的开始。因此, 时分复用的 24 个电话信号所有位的传输速率为每秒 1 540 000 位 ($193 \times 8000/s$)。像光纤传输线这样更大容量的系统, 初级组可以合成为高级组, 高级组与类似的高级组又可以合成为超高级组。现代大容量系统的传输速率可以高达每秒 10 亿比特。容量为每秒 10 亿比特的系统中, 同时通话可以超过 15 000 个。其他的数字编码信号, 如电视信号, 可以与电话信号一起时分复用。

1.4 电视：时间相关的可视图象

尽管直到 20 世纪 50 年代商用电视广播才开始普及, 但对电视基础的研究最初始于 20 世纪 20 年代 (Abramson 1987, Fink 1952, Fisher 和 Fisher 1996, Zworykin 和 Morton 1940) 曾进行了两种方案的尝试: 用一套旋转扫描盘片的机械系统和纯电子系统。但只有电子系统被证明是成功的。Vladimir K. Zworykin 是第一个电视摄像管 - 映像管的发明者, 他对早期的电视发展做出了很大贡献。虽然 20 世纪 30 年代后期就已经演示了几种电视系统, 但直到第二次世界大战后美国才开始商用广播。

和声波相比, 从光学图像到电信号的转换要复杂的多。如图 1.12 所示的电话系统中, 话筒产生变化的电压和电流。电压 (或电流) 的变化与作用在话筒膜片上的声波所引起的空气压力变化成比例。因此, 如果 $p(t)$ 为压力的变化, 则话筒电压 $u(t)$ 与 $p(t)$ 成比例, 即:

$$\text{音频信号: } u(t) \propto p(t) \quad (1.10)$$

电话或收音机系统只需传输该时域电压的复制品。

图像除了与时间有关外还与空间有关。因此，其亮度是三个元素的函数：

$$\text{图像函数: } b(x, y, t) \quad (1.11)$$

如图 1.17 所示，处理空间相关信号的一种方法是把图像分割成一系列离散的元素。每个元素由其行坐标 m 和列坐标 n 及其与时间相关的亮度 $b_{mn}(t)$ 确定。对于每个元素，电压可表示如下：

$$\begin{aligned} v_{11}(t) &\propto b_{11}(t) \\ &\vdots \\ v_{mn}(t) &\propto b_{mn}(t) \\ &\vdots \\ v_{MN}(t) &\propto b_{MN}(t) \end{aligned} \quad (1.12)$$

因此总共需要 $M \times N$ 个离散的电压。因为标准分辨率电视图像有大约 350 000 个元素（像素），所以这需要许多与时间相关的电压信号。该方案不仅不可行，而且完全不需要。

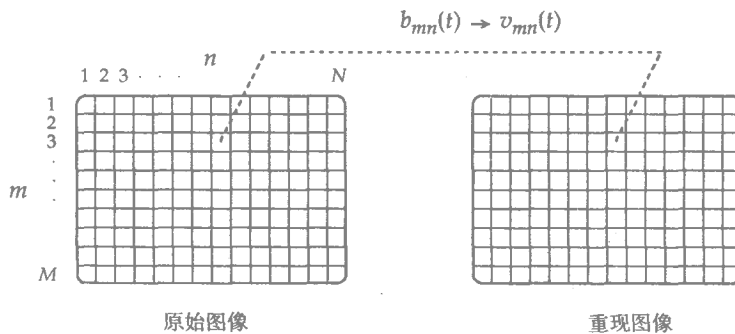


图 1.17 视频图像分割为一组有限元素

如方程 1.12 所示，并不需要各图像元素即时的时间关系。动画（20 世纪初出现在商业中）依靠机械投影过程实现。单个图片投影之后当电影向下一图片前进时会出现黑屏。这样看到的是连续的静态图像，常用的速率是每秒 24 个图片。特殊元素的亮度变化不是连续的，而是从一帧到另一帧的离散变化。因此，此系统的图像元素每秒只需 24 个亮度值。虽然这一过程不能提供原始图像的精确复制品，但从观察者的角度看，这已经足够了。更高的图像投影速率一般并不能明显提高视觉效果。

1.4.1 模拟电视

因为用离散时间元素重现图像元素已被认可。所以，可用扫描过程来实现单个元素亮度的连续传输。假设一亮度检测器扫过要传输的图像。对于对应于从左到右运动的静态扫描线，图 1.18 中的 a 到 b ，亮度保持恒定不变（白）。当检测器到达迹线的终点（图像右边界）时，迅速回到图像的左边。在折回过程中，亮度信号 $b(t)$ 被设为黑（图 1.18 中的零信号值）。下一个扫描迹线中， c 到

d 亮度值发生变化，迹线的中间部分与图像外框的浅灰色相一致。总之，每条扫描迹线都得到随时间变化的不同亮度图案。

虽然为了叙述清楚，图 1.18 只画出了 10 条扫描线，但高质量的电视图像显然需要更多的扫描线。北美系统使用的扫描场由 262.5 条扫描线组成。其中只有大约 240 条扫描线形成了图像的可视部分；其他的在垂直折回的时候产生。在第一个扫描场的扫描线之间落下第二个 262.5 条扫描线（该扫描过程称为隔行扫描）整个图像帧由 525 条扫描线组成，并在 $1/30\text{ s}$ 之内完成。因此水平扫描速率为每秒 15 750 条线（ $30\text{ 帧/秒} \times 525\text{ 线/帧}$ ）这样每条线的扫描及其折回大约需要 $63.5\ \mu\text{s}$ 。因为图像亮度在一条扫描线中可能从亮到暗变化多次，所以扫描信号 $b(t)$ 的变化可能非常快。

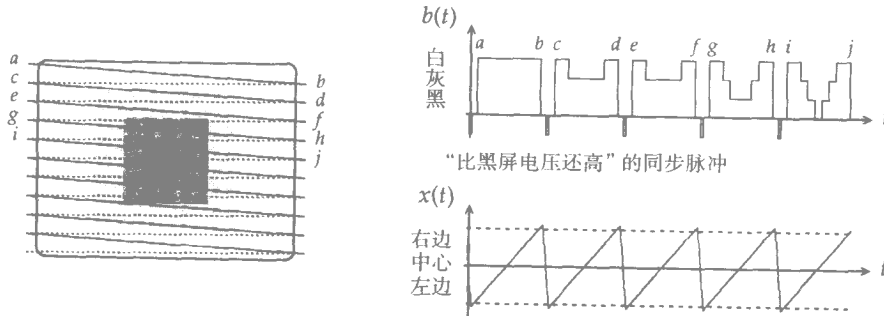


图 1.18 视频扫描及相应视频信号

1.4.2 阴极射线管显像器

对于电子视频系统，亮度转换为变化的电压。除亮度信号外，信号中还要加入同步脉冲（比黑屏电压还高）。该脉冲控制着接收器的扫描发生器，接收器用于重现图像。1929 年，Zworykin 演示了一个全电子接收的电视显像管。除了彩色特征之外，1929 年的这项发明具有了现代电视显像管和计算机监视器的所有基本特征。电视显示器是 1897 年 Ferdinand Braun 发明的阴极射线管的后代产品（Kurylo 和 Süsskind 1981）。尽管 Braun 因其无线电发明的贡献与马可尼一起共享了 1909 年的诺贝尔物理奖，但他最被人们纪念的还是他以前的这一发明（在德国，阴极射线管被称为 Braunsche Röhre）。该管的依据是当用电子束轰击屏幕时，屏幕发出可见光（图 1.19）。电子束用于写屏幕，也就是说，重现产生视频信号的扫描线。

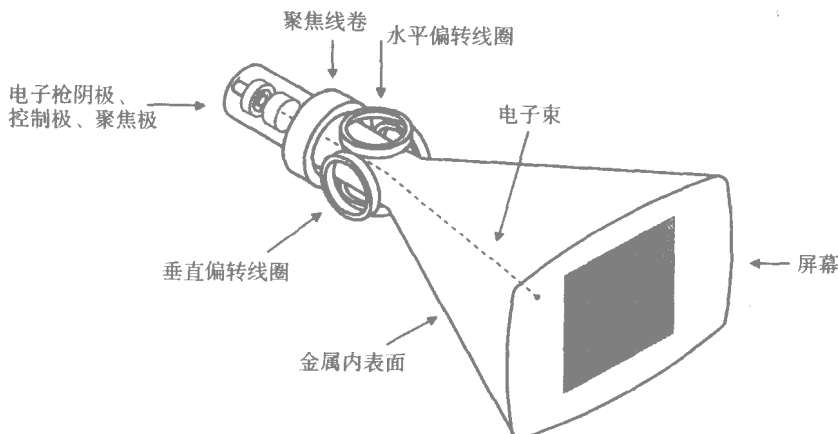


图 1.19 具有磁聚焦和偏转的单色阴极射线显像管

热电阻加热的阴极是电子源。通过一系列电极组成的电子枪后，电子被加速并由外部聚焦线圈产生的轴向磁场聚焦为一直径很小的电子束。通过电子枪这一区域后，电子束被连接在阴极和显像管金属内表面之间的 10 000 到 30 000V 的阳极电位进一步加速。通过与电子枪阴极相邻的控制极的电位变化，引起电子束电流及其产生的光斑亮度发生变化。为了写屏幕，也就是说，发出用于产生视频信号的扫描线，电子束需要适当的偏转。尽管电场或磁场的偏转可实现此功能，但电视显像管使用了一系列由外部线圈产生的垂直相交的磁场(模拟示波器使用了一系列由内部偏转片产生的电场)。这两个轴向相交的线圈，一个在管子之上，另一个在管子之下，产生一垂直磁场。因为电子束具有轴向速度，所以电子将受到一个水平力($\mathbf{F} = -e\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ 叉乘关系)由于该力的结果 电子束的水平偏转与线圈的电流成比例。水平轴向的线圈产生水平磁场，它又使电子束产生垂直偏转。因此，即时的光斑位置依赖于即时的线圈电流值，而光斑的亮度取决于控制极的电压。

当电子束在屏幕上移动的时候，电子束电流及磷光亮度随着视频亮度信号相应改变。同步脉冲用于控制振荡器以产生合适的偏转电流。在一给定的瞬时，电子束只产生一个光斑。然而，由于荧光粉的残留，在电子束移走之后，屏幕继续发光。而且观察者的视觉暂留也给人造成了一种连续时间完整图像的印象。

彩色电视显像管采用三个独立的电子束，打出不同的荧光粉以产生红、绿、蓝三种基本颜色。常用的有两种系统。在三角型管子中，电子枪排列对齐，这样它们的轴线在管子中线附近形成了一个三角形而在同轴管子中 电子枪与和管子轴线一致的中心枪“绿”成一条水平线。两种系统采用的显像管都带有一个距屏幕约 1cm 的内部金属掩体。该掩体限制每个电子束只打出一个彩色荧光。

图 1.20 为三角型彩色电视显像管。其中有其颜色通孔掩体和三个荧光点的详图。管子中的三个电子束，每个的亮度都与一种基本颜色相对应，它们同时被加速、聚焦及通过电极和线圈偏转。这些在图中没有画出。电子束排列成恰好聚焦到掩体通孔的面上。在通过掩体时，每个电子束被限定为在屏幕的内表面只打出一种荧光。这样，这三个荧光点(三个一组)发出与基本颜色相应的亮度。因为这些荧光点彼此相距非常近(约 0.1mm 之内)，所以看到的是一个彩色发光。为控制每个电子束的电流，需要三种视频信号，每种代表一种基本颜色。同轴管子采用三个在同一水平面上的并行电子枪，还有带有垂直槽的掩体，该掩体与具有竖荧光纹的屏幕相邻。

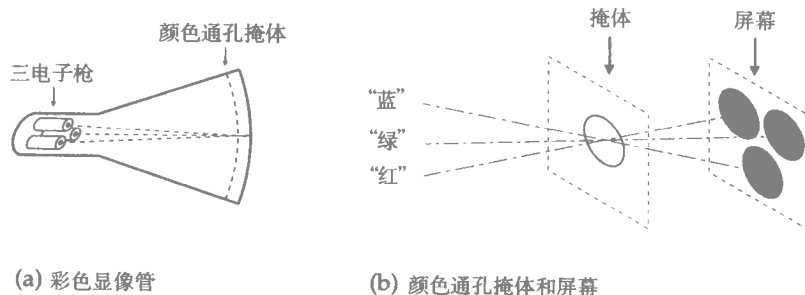


图 1.20 详细说明颜色通孔掩体和荧光的三角形彩色电视显像管

1.4.3 摄像机设备

随着 1923 年 Zworykin 显像管的发明，发展起来了无数的摄像设备(Hashimoto, Yamamoto 及 Asaida 1995, Weimer 1976)。映像管依赖于碱金属的电子光电效应。可见光的光子波长范围为