

学家约翰·纳皮尔（John Napier, 1550-1617）就是这小部分人中的一员，为了简化某些操作，他发明了对数。例如两个数乘积就可以简单地表示为其对数之和。因此，如果要得到两个数的乘积，可以采取以下步骤：首先在对数表中查出这两个数的值，然后将其值相加，最后在对数表中逆向搜寻出其乘积。

在随后的 400 年时间里，一些最伟大的思想家一直致力于建立对数表这项工作，与此同时，另外一些人则设计出一些小装置期望代替对数表。其中，一种带对数刻度的滑尺久负盛名，它由埃德蒙·甘特（Edmund Gunter, 1581-1626）发明，而威廉·奥特雷德（William Oughtred, 1574-1660）对其进行了改进。1976 年当克鲁夫&艾萨（Keuffel & Esser）公司将其制造的最后一个滑尺赠送给华盛顿史密森尼亚（Smithsonian）学院时，滑尺也就宣布退出了历史舞台，导致其退出的原因是手持计算器的出现。

纳皮尔发明了另外一种由刻在骨头、牛角、象牙上的数字条组成的乘法辅助器，称为纳皮尔骨架（Napier's Bones）。在 1620 年左右，威廉·斯奇卡（Wilhelm Schickard, 1592-1635）制造出了最早的机械计算器，它类似于已经初步具备了自动功能的纳皮尔骨架。由相互连接的车轮、齿轮以及水平仪组成的一种计算器几乎在同一时期出现，身为数学家以及哲学家的布莱兹·帕斯卡（Blaise Pascal, 1623-1662）和哥特福瑞德·武赫勒姆·范·莱布尼兹（Gottfried Wilhelm von Leibniz, 1646-1716）是这种机械计算器的两个最主要的发明者。

你一定对 8 位加法器以及能对多于 8 位的数进行运算的加法器中的进位过程记忆犹新，因为这实在是太烦琐了。起初，进位仅被看做是加法运算中的“一碟小菜”，但它却成了加法器的核心问题。换句话讲，尽管我们设计了一个除了进位功能以外其他功能都俱全的加法器，这样的器件离“大功告成”还是很远！

评价老式计算器的一个关键是其进位处理能否成功，例如帕斯卡的设计，他的进位机制禁止进行减法运算，在进行减法运算时，采用的是加上 9 的补数的方式（在第 13 章中介绍过）。直到 19 世纪后半叶，真正意义上的机械计算器才得以出现并为人们所使用。

约瑟夫·玛丽·杰奎德（Joseph Marie Jacquard, 1752-1834）发明的一种奇妙的自动织布机对计算的历史产生了深远的影响，其程度甚至不亚于其在纺织行业产生的影响。杰奎德织布机（大约于 1801 年出现）使用打孔的金属卡片（很像钢琴上面的金属卡片）控制织物上的图案。杰奎德使用了大约 1 万张卡片完成了一幅杰作，那就是用黑白线织

成的自画像。

在 18 世纪（直到 20 世纪 40 年代），计算机就好比一个以计算维持生计的人，而计算能力就好比计算机的生命线。在这个用天上星辰进行航海导航的时期，经常要用到对数表，而三角函数表对航海导航也非常重要。此外，如果你想要发表新数学表，就需要使用许多台计算机，让它们一起工作，最后将所有的结果汇总成一张表。当然，从初始计算到设置打印最终结果，每一个阶段都可能会出现意想不到的错误。



为了消除数学表中错误，英国数学家和经济学家查尔斯·巴贝芝（Charles Babbage, 1791-1871，见右图）勤奋工作，他和塞缪尔·莫尔斯（Samuel Morse）差不多是同时代的人。

在那个时期，数学表（例如对数表）并没有计算表中每一项的确切对数值，因为那样做将耗费太多时间。取而代之的方法是选择性的对数计算，即选取一些数字进行对数计算，而对于介于这些数字之间的数的对数则采用插补法进行填充，即差分法（differences），通过相对简单的计算求得结果。

大约在 1820 年，巴贝芝认为他可以设计制造一台可以自动建表，甚至可以自动设置打印类型的机器，这种机器可以完全消除上述错误。因此他设想出了差分机（Difference Engine），从本质上讲差分机是一个大型机械加法器。在差分机中，多位的十进制数通过可以啮合在 10 个不同位置的轮子表示，而负数用 10 的补数来表示。尽管早期一些模型表明巴贝芝的设计是完全可行的，而且他也获得了英国政府的一些资金支持（当然不是很多），但差分机却从来没有完成过，在 1833 年，巴贝芝放弃了这项工作。

可正在那个时候，巴贝芝有了一个更好的想法，那就是解析机（Analytical Engine），他的后半生一直都在不断重复地设计与修改（其间还制作过几个小模型以及部分构件）这个机器，直到其生命的尽头。解析机是 19 世纪最接近于计算机的器件，在巴贝芝的设计中，解析机包含一个存储部件（类似于现在存储器的概念）和一个运算部件（类似于算术逻辑单元）。乘法可以通过重复的加法运算求解，同样的，除法可以通过重复的减法求解。

解析机最令人着迷的地方在于，可以使用改造的杰奎德织布机中的卡片来编程。正

如奥古斯塔·艾达·拜伦 (Augusta Ada Byron, 1815-1852), 即拉弗雷斯女伯爵对解析机的评价 (这句话出于她翻译的一篇由意大利数学家撰写的关于巴贝芝解析机的文章): “我们可以肯定地说, 正如杰奎德提花织布机织出了花瓣和树叶, 解析机编织出了代数的结构模型。”

巴贝芝大概是第一个意识到条件跳转在计算机中重要性的人, 关于这个问题, 奥古斯塔·艾达曾写下这样一段话 “操作循环 (cycle), 应该这样去理解:

它意味着某个操作集 (set of operations) 重复执行的次数不止一次。它的次数可以是仅仅两次或者是无限次, 但它们实际上都是组成操作集的操作被重复执行了。在很多实例的分析中, 我们经常会看到由一个或多个循环构成的重复组群 (recurring group), 也就是循环中包含的一个循环或者多个循环。”

尽管在 1853 年差分机最终由一对父子——乔治 (George) 和爱德华·舒尔茨 (Edvard Scheutz) 制造出来, 但已经被人们遗忘了好多年的巴贝芝设计的差分机, 直到 20 世纪 30 年代才因为人们开始探索 20 世纪计算机的起源时而重新被提起。那时, 巴贝芝所做的一些工作已经都被后来的技术超越, 除了超前的自动化观念, 他所做的工作对 20 世纪计算机工程来说几乎没有可以利用的。

计算史上另一个转折点源于美利坚合众国宪法第一条第二款。这一款其中要求每 10 年进行一次人口普查。1880 年的人口普查要求登记居民的年龄、性别以及国籍信息, 每一次人口普查的数据采集工作都要花费大约 7 年的时间。

人口普查局的官员们担心 1890 年的人口普查的数据采集和处理可能会花费 10 年以上的的时间, 因此他们研究了在工作中使用自动系统的可能性, 并选择了由赫尔曼·霍尔瑞斯 (Herman Hollerith, 1860-1929) 开发的机器, 他曾在 1880 年人口普查中进行过相关工作。

霍尔瑞斯的设计需要使用大小为 $6\frac{5}{8} \times 3\frac{1}{4}$ 寸马尼拉 (manila) 穿孔卡片 (尽管霍尔瑞斯不了解巴贝芝是怎样在解析机中利用卡片编制程序的, 但他对杰奎德织布机中如何使用卡片却非常熟悉)。卡片上的孔按 24 列每列 12 个位置排列, 共计 288 个位置。这些点代表了在人口普查中需要记录的一



个人的特征，人口普查工作人员通过在卡片适当的位置上打 1/4 英寸的方孔来标记上述的特征。

在读书时你可能会习惯性地想到二进制编码，而且你或许立刻会猜想，可以利用卡片上的 288 个穿孔来存储 288 位的信息，但是卡片的使用方式并非如此。

举例来说，在纯二进制系统中使用的人口普查卡片上应该有一个位置代表性别，在该位置穿孔则代表男性，不穿孔则代表女性（或与此相反）。但是在霍尔瑞斯设计的卡片中使用了两个位置代表性别，其中第一位置穿孔代表男性，另外一个位置穿孔代表女性。同样的，人口普查工作者通过两个穿孔来标识普查对象的年龄，第一个穿孔指定一个以 5 年为间隔的范围：如 0~4，5~9，10~14，等等。第二个穿孔则表示对象处于该年龄段（5 年）中的哪一年，即可推算出对象的准确年龄。对年龄进行编码共计需要 28 个打孔位置，而在纯二进制系统中只需要 7 个位置就可以对 0~127 的所有年龄进行编码。

霍尔瑞斯在记录人口普查信息时没有使用二进制系统是可以理解的：对于 1890 年人口普查工作者来说，将年龄转换为二进制数字，这个要求太高了。穿孔卡片系统不是完全的二进制系统，这里还有一个实际的原因，真正的二进制系统可以产生（几乎）所有孔都被打穿的情况，这将使得卡片极易碎裂，而且看上去也不美观。

可以对人口普查的数据做统计分析或将其制作成表格（*tabulated*）。比如，你希望了解每一个人口普查行政区中居住着多少人，当然，人口的年龄段的分布也是一个比较令人感兴趣的信息。为了达到这些目的，霍尔瑞斯制造了制表机，它是组合了人工操作以及自动功能的半自动化工具。操作人员把一个有 288 个弹簧针的板子压到每一个卡片上，每一根弹簧针对应于卡片上的一个穿孔位置，当弹簧针与水银池中的水银接触时，形成通路，这个电路触发电磁体即可进行十进制计数。

霍尔瑞斯在卡片分类机上也使用了电磁体。例如，如果需要收集所统计的每一种职业中人员的年龄分布信息，首先需要将卡片按照职业进行分类，然后分别对每种职业中人员的年龄信息进行统计。分类机使用和制表机中一样的手压方式，不同之处在于分类机使用的电磁体可以将 26 个间隔区域中任意一个的舱口打开。操作者把对应的卡片通过舱口放入间隔区域，之后再手动关闭舱口。

在 1890 年人口普查中使用这种自动化技术的实验取得了令人瞩目的成就，在这个实

验中总共加工处理了超过 6200 万张卡片，数据量是 1880 年人口普查的两倍，但时间却只用了后者的三分之一，自此，霍尔瑞斯和他的发明闻名四海。1895 年，他还到访了莫斯科，俄国人欣喜地购买了他的设备，并于 1897 年将其首次应用在俄国人口普查中。

赫尔曼·霍尔瑞斯此后一发不可收拾。1896 年，他创办制表机公司（*Tabulating Machine Company*），租借并出售其穿孔卡片设备。到 1911 年，由于公司的合并，制表机公司更名为计算制表记录公司（*Computing-Tabulating-Recording Company*），或者叫做 C-T-R 公司。再到 1915 年，托马斯 J·华盛顿（*Thomas J. Watson, 1874-1956*）成为 C-T-R 公司的总裁，他在 1924 年将公司的名字更改为国际商业机器公司（*International Business Machines Corporation*），即 IBM。

到 1928 年，在 1890 年人口普查中最初使用的卡片逐渐演变为著名的 IBM 卡片，“do not spindle, fold, or mutilate”，这种卡片有 80 列 12 行，使用了将近 50 年，甚至在其后期，还有人把它们叫做霍尔瑞斯卡片。关于这些卡片的遗留问题将在第 20、21 和 24 章中进一步的讲述。

进入到 20 世纪之前，让我们重新审视一下 19 世纪这一百年。因为主题所限，本书更多的关注的是数字性质的发明，其中包括电报、盲人用点字法、巴贝芝机器，以及霍尔瑞斯卡片。而在与数字概念以及相关设备打交道时，你会发现整个世界皆为数字。但是，19 世纪的发现和发明确切的来讲不是数字的。实际上，通过感官所认识的大自然中只有很少一部分是数字的，更多的时候表现为不可分割的整体。

尽管霍尔瑞斯在他的制表机以及分类机中使用了继电器（*relays*），但是人们直到 20 世纪 30 年代中期才开始用继电器来构建计算机——它们最终被叫做机电化（*electromechanical*）计算机。在这些机器中使用的继电器不同于一般的电报继电器，后者主要作用是为了完善电话系统的路由控制。

早期的继电式计算机与上一章中的继电式计算机不是同一个概念（我们随后会学到，从 20 世纪 70 年代开始，这种继电式计算机依靠微处理器进行计算）。需要特别说明的一点，尽管现代计算机内部使用二进制数，但早期的继电式计算机并非如此。

我们的继电式计算机与早期的继电式计算机存在另外一个不同点，那就是在 20 世纪 30 年代，没有人能够疯狂到用继电器制造出 524,288 位的存储器！资金的花费、空间的

占用和能源的耗费使得制造如此大的存储器变得不大可能。可得到的极少存储器也只用来自来存储中间结果，而程序本身则存储在一些物理媒介上面，例如带穿孔的纸带。实际上，将代码和程序放入到存储器进行处理是后来发明的做法。

下面按时间顺序进行介绍，第一台继电式计算机由康拉德·楚泽（Conrad Zuse，1910–1995）制造，1935 年还是工科学生的他在其父母位于柏林的家中制造了这台机器。这台机器中使用了二进制数，但其早期的版本中使用的是机械存储器而非继电器。楚泽使用老式 35 毫米电影胶片进行穿孔，然后在上面编制程序。

1937 年，贝尔电话实验室（Bell Telephone Laboratories）的乔治·史提必兹（George Stibitz，1904–1995）将一对电话继电器带回了家中，并在他厨房的桌子上连接了一个 1 位加法器，后来他妻子将其称之为 K 机器（K 是厨房“kitchen”的头一个字母），这个实验促使 1939 年贝尔实验室中复数计算机的诞生。

同一时期，哈佛大学研究生霍华德·艾肯（Howard Aiken，1900–1973）要寻找做大量的重复计算的方法，而正是他的这一需求促使哈佛大学与 IBM 合作，并最终在 1943 年创造出一台自动连续可控计算机（Automated Sequence Controlled Calculator，ASCC），也就是闻名于世的 Harvard Mark I。这是第一台可以打印表格的数字计算机，它最终将查尔斯·巴贝芝的梦想付诸于现实。Mark II 是最大的继电式计算机，使用了 13,000 个继电器。哈佛大学计算机实验室当时的主任是艾肯，也正是他讲授了计算机科学的第一次课。

对于构造计算机来说，继电器不是最完美的设备，因为它们是机械性的，利用金属片的弯曲和伸直状态进行工作，而频繁的工作可能导致其断裂，另外如果接触点之间有污垢或者卡住纸屑，也会导致继电器失效。1947 年发生了一件著名的事故，人们从 Mark II 计算机的一个继电器中发现了一只飞蛾。格蕾丝·莫瑞·赫柏（Grace Murray Hopper，1906–1992）于 1944 加入了艾肯的团队，日后成为了计算机编程语言领域非常著名的人物。他将上面提到的那只飞蛾用带子绑在计算机日志（logbook）上，并在其边上注明“第一个被发现的有生命的 bug”。

真空管（vacuum tube）是一种可以替代继电器的元件，它是由约翰·安布罗斯·弗莱明（John Ambrose Fleming，1849–1945）和李·德·福雷斯特（Lee de Forest，1873–1961）在进行无线电通信连接研究时开发出来的。到 20 世纪 40 年代，真空管已经被广泛应用于放大电话信号，实际上，那时几乎每一个家庭都拥有一台带有发光二极管可控收音机，

它们能放大无线信号，并且把它们变成还原为人们能听见的声音。真空管同样可以通过连接成与门、或门、与非门，以及与或门——这一点很像继电器。

究竟是由继电器还是由真空管组成这些逻辑门并不重要，重要的是这些逻辑门可以被装配组合成加法器、选择器、解码器、触发器，以及计数器。不论真空管何时取代继电器，前面章节中讲述的关于基于继电器部件的一切同样是有效的。

真空管同样存在自身的问题，比如，价格昂贵、耗电量大，以及产生的热量太多。可是，其最大的问题是真空管最终会被烧坏，如同人活一世一样，是无法改变的事实。那时，拥有真空管收音机的人们习惯于定期更换真空管，而电话系统设计时有很多冗余的真空管，所以一个真空管的报废有时并不是什么大事（不管怎样，人们不会期待电话系统是完美无瑕的）。可是在计算机中，当一个真空管烧坏时并不可能立刻被检测到，此外，一台计算机拥有数量巨大的真空管，按统计学来分析，每隔几分钟就会烧坏一个。

用真空管取代继电器的最大好处在于真空管的状态可以在百万分之一秒（ μs ）内发生转变。真空管状态转变（开关的打开与关闭）的速度比继电器要快 1000 倍，继电器在其最好状态下状态的转变也需要 1ms，即千分之一秒。十分有趣的是在计算机的早期发展中，计算速度并不是主要考虑的问题，而这个时期的计算速度与从纸张或者电影胶片中读取程序的速度有关。由于当时的计算机都按照这种方式构建，因此采用真空管比继电器到底计算速度提升了多少，并不重要。

但是在 20 世纪 40 年代初期，新设计的计算机中真空管开始取代继电器。到 1945 年，真空管已经完全取代了继电器。虽然继电器计算机被称为电动机械计算机，但真空管是第一台电子计算机的基础。

在英国，巨像（Colossus）计算机（1943 年首次投入使用）用来破译德国名为“Enigma”代码生成器产生的代码，艾伦·M·图灵（Alan M. Turing, 1912–1954）为这个项目（以及英国后来几个的计算机项目）做出了巨大贡献，图灵撰写了两篇非常有影响的论文，这使他如今成为计算机领域的鼎鼎大名的人物。第一篇论文发表于 1937 年，首次提出了“可计算性”（computability）这个概念，用来分析哪些事情计算机可以做到，哪些做不到。他为计算机构想了一个抽象模型，这就是现在为人所熟知的图灵机（Turing Machine）。图灵第二篇非常有名的论文是关于人工智能的，在这篇论文中他介绍了一种测试机器智能的方法，即现在为人熟知的图灵测试法（Turing Test）。

在摩尔电子工程学院（宾夕法尼亚大学），J·普利斯普·埃克特（J. Presper Eckert, 1919-1995）和约翰·莫克利（John Mauchly, 1907-1980）设计了 ENIAC（Electronic Numerical Integrator and Computer，电子数字积分计算机），使用了 18,000 个真空管并最终在 1945 年底完成。按全部吨位算（大约 30 吨），ENIAC 是曾经（或许以后也是）制造出来的最大的计算机。到 1977 年，人们可以在 Radio Shack 买到速度更快的计算机。埃克特和莫克利想为计算机申请专利，可是却被竞争者约翰·V·安塔纳索夫（John V. Atanasoff, 1903-1995）干扰了，他更早一步设计了一台电子计算机，但它运行得并不顺畅。

ENIAC 吸引了数学家约翰·冯·诺依曼（John von Neumann, 1903-1957）的眼球。从 1930 年开始，出生在匈牙利的冯·诺依曼就定居美国。作为一名令公众瞩目的人物，因其仅凭自己的大脑就能进行复杂的数学计算而闻名，冯·诺依曼当时是普林斯顿高级研究院的一名数学教授，研究范围很广，从量子力学到游戏应用，甚至到经济理论。



约翰·冯·诺依曼协助设计的 ENIAC 的后续产品 EDVAC（Electronic Discrete Variable Automatic Computer）。特别是在 1946 年与亚瑟·W·伯克斯（Arthur W. Burks）和 荷曼·哥斯廷（Herman H. Goldstine）共同执笔的题为“电子计算器件逻辑设计的初步分析及讨论（*Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument*）”的论文中，他描述了几个 EDVAC 比 ENIAC 更加先进的特点。EDVAC 的设计者们感觉到计算机内部中应当使用二进制数，而 ENIAC 使用的是十进制数。同时他们认为计算机中应当拥有尽可能大容量的存储器，这些存储器应该用来存储程序代码和程序执行中产生的数据（再说明一下，这些在 ENIAC 中都是不能实现的，对于 ENIAC 来说，编程不过是扳动开关和插拔电线的事情）。这些指令在存储器中是顺序存放的，而且可以由程序计数器进行寻址，但允许条件跳转。这就是著名的“存储程序概念”（stored-program concept）。

这些设计上的决策是计算机历史中非常重要的一个进化阶段，现在我们称之为“冯·诺依曼结构”。上一章中设计的计算机就是一个经典冯·诺依曼计算机。但是伴随着冯·诺依曼结构，又出现冯·诺依曼瓶颈（von Neumann bottleneck）。在冯·诺依曼计

算机中，为了执行指令通常需要花费大量的时间先将这些指令从存储器中取出来。我们仔细回忆一下，第 17 章中最后设计的计算机需要花费 3/4 的时间用来取指令。

在 EDVAC 的那个时期，考虑到成本效益，用真空管制造大容量存储器是不可行的，因此那时提出了一些临时的替代方案。其中一个成功的方案是“水银延迟线路存储器”（mercury delay line memory），它使用 5 英尺水银真空管，在管子的一端每隔 $1\mu\text{s}$ 向水银发送一个短脉冲，这些短脉冲大约需要 1ms 到达管子的另一端（可以如同检测声波一样检测到这些短脉冲，并折回开始端），因此一个水银管可以存储大约 1024 位的信息。

直到 20 世纪 50 年代中期人们才开发出了“磁芯存储器”（magnetic core memory）。众多的被磁化的金属环由电线串起来组成了磁芯存储器。每一个金属环可以存储 1 位信息。磁芯存储器沿用了很长一段时间才被别的技术取代，所以常常会听见老一辈程序员们把存储器的访问过程叫做“访问磁芯”。

20 世纪 40 年代，对计算机本质进行概念化设想的并非只有约翰·冯·诺依曼一人。

克劳德·香农（Claude Shannon，生于 1916 年）是另外一个非常有影响力的思想家。在第 11 章中讨论了他 1938 年的硕士论文，正是这篇文章确定了开关、继电器以及布尔代数之间的关系。在 1948 年为贝尔电话实验室工作期间，香农在 *Bell System Technical Journal* 上发表了一篇题为“通信过程中的代数理论”（*A Mathematical Theory of Communication*）的文章，在这篇文章中他不仅将“位”的概念介绍给了世界，更开创了一个新的研究领域，即著名的“信息论”（information theory）。信息论研究的是数字信息在有噪声（这些噪声通常阻止信息的通过）的情况下传输，以及如何弥补因噪声产生的损失。1949 年，他撰写了第一篇关于如何编程可以让计算机下棋的文章，1952 年他设计了一个通过继电器控制的机械鼠，它可以在一个迷宫中记住路径。骑单车、变戏法这些耍宝也使得香农在贝尔实验室声名鹊起。

诺伯特·韦纳（Norbert Wiener，1894–1964）从哈佛大学获得数学博士学位时只有 18 岁，其撰写的 *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and Machine*（1948 年）一书使他闻名于世。他使用新创词汇“控制论”（cybernetics：源于希腊语舵手）表示人类和动物的生物过程同计算机和机器人的机械原理之间的关系。大众文化中，人们普遍使用 cyber 作为前缀表示与计算机相关的一切，最著名的一个词，数百万台计算机通过因特网相连被称做“cyberspace”（网络空间），这个词源于计算机科幻小说作家威廉·吉

布森（William Gibson）在 1984 年发表的小说 *Neuromancer* 中 “cyberpunk” 一词。

1948 年，埃克特与莫奇利（Eckert-Mauchly）计算机公司（后来成为雷明顿兰德公司一部分）开始开发第一台商用计算机——通用自动计算机，或者称为 UNIVAC。这台机器于 1951 年完成，此后就被送到了人口普查局。UNIVAC 在网络应用方面的首次亮相在哥伦比亚广播公司，它被用来预测 1952 年的总统选举结果。沃尔特·克朗凯特（Walter Cronkite）将 UNIVAC 称做 “electronic brain”（电脑）。同样是在 1952 年，IBM 发布了其第一个商用计算机系统，代号 701。

自此开始了漫长的公司和政府的计算历史。尽管这段历史很有趣，但我们要追踪另一段历史——如何缩减计算机成本和体积以及让其走入寻常百姓家，这开始于 1947 年一个鲜为人知的电子技术突破。

许多年以来，贝尔电话实验室是一个让天才们对他们感兴趣的一切事物进行研究的地方。非常幸运的是，他们其中的一些人对计算机有浓厚的兴趣。上面提到的乔治和香农就是在贝尔实验室工作时对早期的计算机发展做出了重大贡献。后来，在 20 世纪 70 年代，贝尔实验室成为很有影响的计算机操作系统 UNIX 和编程语言 C 的诞生地，我们将在下面章节中介绍。

当 AT&T（美国电话电报公司）正式将科学与技术的研究同其他的业务分割时，贝尔实验室内部结构发生了改变，在 1925 年 1 月 1 日成立了子公司。贝尔公司的最初目的是发展改良电话系统的相关技术，幸运的是在这种非常模糊的目标下可以做很多技术研究，但是对于电话系统而言，一个显而易见的长期目标是通过电线不失真的传播语音信号。

从 1912 年开始，贝尔系统致力于真空管放大器的研究，为了能让电话系统使用真空管，对其进行了相当数量的研究和设计方面的改进。尽管做了大量的工作，真空管仍然有许多必须改进的地方。真空管体积太大、耗能大，并且最终会烧毁，但是，它们在当时是唯一的选择。

1947 年 12 月 16 日，当贝尔实验室的两个物理学家约翰·巴丁（John Bardeen，1908-1991）和沃尔特·布兰坦（Walter Brattain，1902-1987）制作出另一种放大器时，所有的一切都发生了改变。这种新型的放大器用一块锗（一种半导体元素）平板和一条黄金薄片制成。一周之后，他们将这个东西演示给他们的老板威廉·肖克利（William

Shockley, 1910–1989)。这就是第一个“晶体管”(transistor)，它被一些人称为 20 世纪最重要的发明之一。

晶体管并不是凭空产生的。因为早在 8 年前，即 1939 年 12 月 29 日，肖克利在他的笔记本上写道“今天我突然想到，使用半导体来制作放大器从原理上讲比使用真空管更为可能。”在晶体管诞生后的几十年里，人们不断地完善它。1956 年肖克利、巴丁和布兰坦“因为他们在半导体上的研究以及晶体管效应的发现”获得了当年的诺贝尔物理学奖。

在本书的开始部分探讨了导体和绝缘体。导体因为它们可以有利于电流的通过而得名。铜、银以及金都是很好的导体，元素周期表中这三种元素同属一列并非巧合。

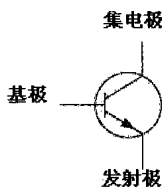
前面谈到过，原子中的电子分布在原子核外，并围绕原子核运动。这三种导体的共同特征是在原子核最外层都有一个单独的电子，而这个电子可以很容易地与原子中的其他电子剥离，因此可以自由移动形成电流。与导体对应的是绝缘体——比如橡胶和塑料——几乎不能导电。

锗元素和硅元素（以及一些化合物）被称为“半导体”(semiconductor)，之所以称为“半导体”并不是因为它们的导电性能是导体的一半，而是因为它们的导电系数可以通过多种方式操控。半导体的原子核在最外层有 4 个电子，是外层所能拥有的最大电子数目的一半。纯半导体中，原子之间形成稳定的化学键以及类似金刚石的结构。这种半导体不是良好的导体。

但是，半导体可以掺入一些杂质，即与某些杂质组合。一种类型的杂质称做 N 型（N 表示 negative）半导体，它们为原子之间的结合提供额外的电子。另外一种类型的杂质称做 P 型半导体。

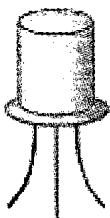
把一个 P 型半导体夹在两个 N 型半导体之间可以使之成为一个放大器。这就是著名的 NPN 晶体管，其三部分分别为集电极 (collector)、基极 (base)，以及发射极 (emitter)。

下面是 NPN 晶体管原理示意图。



在基极施加微小的电压就可以控制非常大的电压从集电极到发射极。如果在基极没有施加电压，那么晶体管将不起作用。

晶体管通常封装在直径为四分之一英寸的小金属罐中，并伸出三根金属线，外形如下图所示。



晶体管开创了固态电子器件的时代，即指晶体管不再需要真空而是使用固体制造，尤其是使用半导体以及当今最为常见的硅来制造。除了体积比真空管更小，晶体管需要的电量更小，产生的热量更少，而且持久耐用。随身携带一个真空管收音机是无法想象的一件事情。但晶体管收音机不同，它可以由一节电池供电，而且不会发烫。1954 年，对于一些幸运的人来说，或许在圣诞节早上打开礼物盒时能获得一件可以随身携带的晶体管收音机。德州仪器公司，半导体革命中一个非常重要的公司，制造了第一批可以随身携带的晶体管收音机。

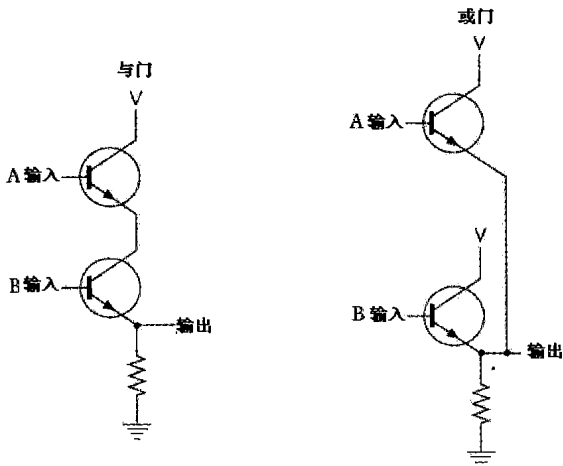
可是，晶体管真正的商业应用却始于助听器。为了纪念亚历山大·格雷厄姆·贝尔（Alexander Graham Bell）为聋人奉献毕生精力，AT&T 公司允许助听器制造商无偿使用晶体管技术。晶体管电视机诞生于 1960 年，到现在电子管的应用几乎已经消失了（可是，并非完全消失，一些高保真音响爱好者以及电子吉他弹奏者较热衷于电子管设备，他们更喜欢真空管放大器产生的音质）。

1956 年，肖克利离开了贝尔实验室成立了肖克利半导体实验室（Shockley Semiconductor Laboratories）。他回到了自己出生的地方，加利福尼亚帕罗奥图市。他的公司是第一个落户于该地区的大公司。其他的半导体和计算机公司立刻也在该地区建立基业，旧金山南部的这个地区现在被人称为硅谷（Silicon Valley）。

开发真空管的最初目的是为了放大电信号，但是它们同样可以应用在逻辑门的开关上，作用与晶体管一样。下面你将看到非常类似于继电器形式的由晶体管构造的与门。

只有当 A 和 B 输入同时为 1 时晶体管才可以导通电流，从而输出为 1。电阻的作用是预防短路。

按照下图右边的方式连接两个晶体管可以组成一个或门。在与门中，上端晶体管的发射极连接下端晶体管的集电极。在或门中，两个晶体管的集电极都与电压源连接，两个发射极相互连接。



使用继电器构造逻辑门以及其他的部件的方法对于晶体管同样也是有效的。继电器、真空管以及晶体管最初都是为了开发放大器设计的，但是通过相似方式连接可以组成逻辑门，而计算机则是由这些部件构成的。1956 年诞生了第一台晶体管计算机，随后的几年里，在新型计算机设计中电子管就被淘汰了。

有一个疑问：晶体管肯定可以使计算机更加可靠、体积更小以及需要的电量更少，但晶体管可以使计算机的结构变得更简单么？

答案是否定的。晶体管允许在更小的空间里安装更多的逻辑门，但是你还是要考虑这些组件之间的互连问题。把晶体管连接起来构造逻辑门，与把继电器和真空管连接起来构造逻辑门一样困难。在某些方面来看，这更加困难，因为晶体管更加小而且不容易被控制。如果你想用晶体管制造第 17 章中的计算机和 64 KB 的 RAM，设计工作的重要部分应当是构造某种可以放置所有部件的结构。而你的大部分的体力劳动是在数百万只晶体管之中连接数百万根线，这是很乏味的。

可是，我们已经发现晶体管的某些组合具有特定功能，可以重复利用。一对晶体管可以连接成门，而门常常可以连接成振荡器、加法器、选择器，以及解码器。振荡器可以组成多位锁存器或者 RAM 阵列。如果把晶体管预先连接成常见的构件，再用其来组装计算机会更加容易。

这种设想由英国物理学家杰里佛（Geoffrey Dummer，生于 1909 年）在 1952 年 5 月的一次演讲中提出，他说：“我希望展望未来，”，接下来他提出了以下观点：

“随着晶体管的出现以及半导体研究的广泛开展，现在也许可以设想将来会出现不采用连线而是由固体块组成的电子设备。这种固体块可能由绝缘层、导体层、整流层以及放大层四个层次组成，将不同层次的隔离区连接起来即可实现电子功能。”

然而，真正可以使用的产品还需要再等上几年。

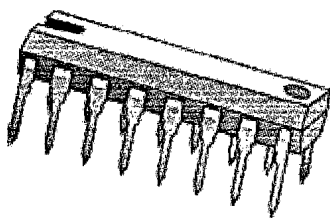
1958 年 7 月，德州仪器公司的杰克·基尔比（Jack Kilby，生于 1923 年）想到了一个可以在一块硅片制造出多个晶体管、电阻和其他电子元件的方法，而他并不知道杰里佛预言。6 个月过后，也就是 1959 年 1 月，罗伯特·诺依斯（Robert Noyce，1927–1990）也想到了类似的方法。诺依斯起初是为肖克利半导体实验室工作，但在 1957 年，他与其他 7 位科学家离开了肖克利半导体实验室创办了仙童（Fairchild）半导体公司。

在技术的发展史中，同时产生一项发明是较常见的，这可能超出了人们的想象。尽管基尔比比诺依斯早 6 个月发明了这种设备，而且德州仪器公司先于仙童公司申请专利，但却是诺依斯首先获得了专利。因此产生了法律上的纠纷，但过了 10 年后，问题才得到令双方都满意的解决。尽管基尔比和诺依斯并没有在一起共事，但今天他们俩被称为集成电路，或者叫做 IC（更通俗的说法是芯片）的共同发明者。

集成电路需要经过非常复杂的工艺流程才可以制造出来，包括将硅片分层，然后非常精确地掺入杂质以及蚀刻不同的区域形成微小组件。开发一种新的集成电路尽管很昂贵，但可以大量生产中获得效益——产量越大，价格就越便宜。

实际上，硅片是薄而且易碎的，因此它必须被安全地封装起来，这样不仅可以起到保护作用，还可以为芯片内部的部件与其他芯片之间的连接提供某种便利。集成电路有几种不同的封装方式，但最为常见的是采用矩形塑料双排直插式（或称为 DIP），提供 14、

16 或者 40 个管脚。



上图是一个有 16 个管脚的芯片。将芯片上的凹槽朝左放置（如图），用 1 到 16 对管脚进行编号，从左下角开始，环绕到右端，依次为 1~16，16 号管脚位于左边最上端。管脚之间的距离正好是 1/10 英寸。

纵观 20 世纪 60 年代，太空项目以及军备竞赛推动了早期的集成电路市场的发展。在民用方面，第一台用集成电路构造的商品是极点公司（Zenith）在 1964 年出售的助听器。1971 年，德州仪器公司开始出售第一批便携计算器，同年，脉冲星公司（Pulsar）出售了第一块电子手表（电子手表中的集成电路当然不是刚才图示的例子那样的）。随后其他利用了集成电路的产品陆续出现。

1965 年，戈登·E·摩尔（Gordon E. Moore，当时在仙童公司工作，后来成为英特尔公司的合伙创办人）发现从 1959 年以后，技术在以这样一种方式发展：同一块芯片上可以集成的晶体管的数目每年翻一倍。他预测这种趋势将会持续。真实的发展速度比摩尔的发现稍慢一些，因此摩尔定律（最终命名）被修正为：每 18 个月同一块芯片上集成晶体管数目就会翻一倍。这仍是一个令人吃惊的速度，它解释了为什么刚刚过了几年就家用计算机好像已经过时了。一些人相信直到 2015 年摩尔定律仍然有效。

发展的早期，人们常常谈论小规模集成电路（small-scale integration），即 SSI，指那些逻辑门小少 10 个的芯片；中规模集成电路（medium-scale integration），即 MSI（包含 10 到 100 个逻辑门）；大规模集成电路（large-scale integration），即 LSI（包含 100 到 5000 个逻辑门）。随后的术语为特大规模集成电路（very-large-scale integration），即 VLSI（包含 5000 到 50,000 个逻辑门）；超大规模集成电路（super-large-scale integration），即 SLSI（包含 50,000 到 100,000 个逻辑门）；超特大规模集成电路（ultra-large-scale integration，超过 100,000 个逻辑门）。

本章的剩余部分以及下一章，我想将时间停留在 20 世纪 70 年代中期，此时正是第