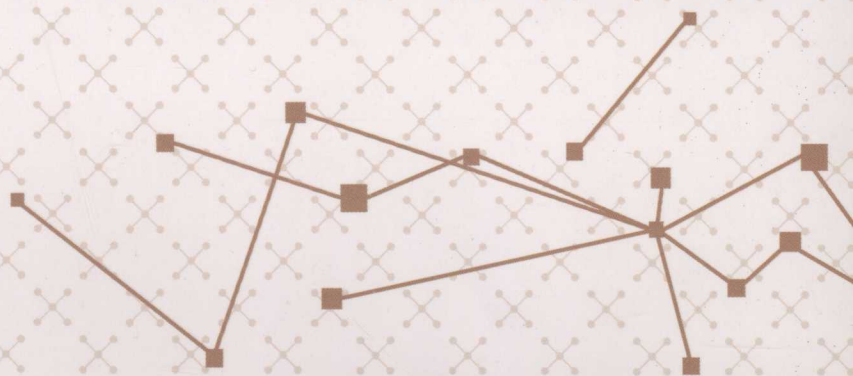




“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 *精品* 教材



10110111010001110101
101101110100011101

金 西 / 编著

数字集成电路设计

Digital Integrated Circuit Design

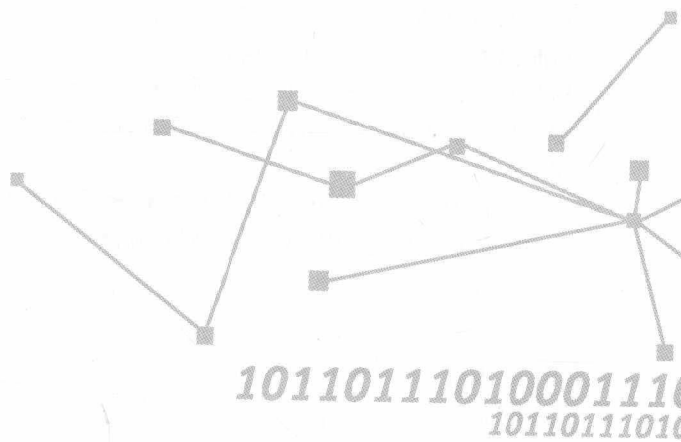
中国科学技术大学出版社

TN431.202
2014/1



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 **精品** 教材



金 西 / 编著

Digital Integrated Circuit Design

数字集成电路设计

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了数字集成电路的设计理论与技术,内容包括:数字集成电路的发展趋势、数字集成电路的设计流程、VHDL 和 Verilog 的数字集成电路描述、数字集成电路前端设计、可编程的数字集成电路测试平台、数字集成电路后端设计、数字集成电路的可靠性设计。本书既来源于工程实际又结合了多年的教学实践,书中数字集成电路的设计以 CPU 核等作为实例讲解,板级系统设计基于 Xilinx Vx 系列 FPGA 开发板进行,与数字集成电路有关的设计规范和验收标准、库单元设计、硬件测试环境的建立等以业界标准来组织设计实例和教学内容。同时,作者结合了诸如科学院先导专项中芯片设计及其在航天工程中的应用等积累多年的项目经验来编写本书,本着理实交融、学以致用原则,向从事数字集成电路设计的相关人员提供设计方法与实例。

本书可作为高等院校电子科学与技术、电子与信息工程、计算机科学与技术等专业的本科生或研究生教材,也可作为相关专业的教师、科研人员及数字集成电路设计工程师的学习参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

数字集成电路设计/金西编著. — 合肥:中国科学技术大学出版社,2013.8

(中国科学技术大学精品教材)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03298-1

I. 数… II. 金… III. 数字集成电路—电路设计—高等学校—教材 IV. TN431.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 193478 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

合肥市宏基印刷有限公司

全国新华书店经销

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:31 插页:2 字数:735 千

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—3000 册

定价:56.00 元

总 序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念和特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

五十周年校庆精品教材系列于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书50种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划。为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持。国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划。

1958年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。入选精品教材系列的绝大部分是基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、

前 言

自集成电路发明至今 50 多年来,数字集成电路迅速向着更高集成度、超小型化、高性能、高可靠性的方向发展,数字集成电路设计也多次跨越了“不可能再发展了吧”;而对于今天的中国,每年上千亿美元的集成电路进口额主要用于购买数字集成电路,这是压在每一个中国集成电路设计从业者心中的巨石。中国科学技术大学物理学院的研究者在纳米器件的机理、自旋电子学、量子点等方面已逐步走向国际研究的高端,而 SoC 设计室也凝聚了一批志在数字集成电路设计的青年学子,他们默默无闻却充满着激情,努力学习,积极实践,从事向量浮点处理器、Xilinx Vx 系列开发板、高性能多核处理器及外围 IP 开发。

本书以数字集成电路设计人员应学习的知识为主线,结合编著者的教学和项目实践及多年积累的资料编写而成,目的是使每一个学生了解超深亚微米时代数字集成电路的设计方法和所用到的 EDA 工具,为他们走上社会进入专业的电子技术类公司后,能胜任各种电子产品集成化的实际设计工作打下坚实的基础。本书主要内容包括:数字集成电路系统的发展趋势、数字集成电路设计流程、VHDL 和 Verilog 的数字集成电路描述、数字集成电路前端设计、可编程的数字集成电路测试平台、数字集成电路后端设计、数字集成电路可靠性设计。本书以 CPU 核等进行实例讲解,板级测试基于 Xilinx Vx 系列 FPGA 开发板进行,设计规范和验收标准、库单元设计、硬件测试环境建立及应用均以业界标准来组织设计实例和教学内容。

中国科学技术大学 SoC 设计室成立以来,杜学亮博士、负超博士、孙岩博士、贺承浩博士、张鑫硕士、孙一硕士、郑伟硕士、冯为硕士、胡群超硕士、赵占祥硕士、曹玉斌硕士等都为本书的研究体系和内容提供了有益成果;在读博士生项天、彭波、屈直、吴安,在读硕士生李强、王天祺、董家宁以及做 SoC 方向本科毕业论文的同学等学习了本课程并上机验证了部分程序,在此对他们一并表示衷心的感谢。本书编写过程中还参考及学习了十多本国内外有关数字系统设计的教材以及大量网络上的资料,受益颇丰,除在本书的参考文献中列出外,也在此向各位作者致以深深的感谢。

有关本书的技术指导和建议请发邮件至 jinxi@ustc.edu.cn,关于 SoC 设计室的新动态和本书相关内容的浏览请浏览 <http://blog.sina.com.cn/soc01>。

金 西

2013 年 7 月 31 日

目 次

总序	(i)
前言	(iii)
第 1 章 集成电路发展与数字集成电路概论	(1)
1.1 集成电路的回顾	(1)
1.1.1 数字集成电路溯源	(1)
1.1.2 电子设计发展阶段	(8)
1.1.3 计算机在集成电路设计发展阶段的作用	(11)
1.1.4 人才、工具和库	(11)
1.2 纳米时代的数字集成电路设计策略	(13)
1.2.1 数字集成电路设计的要求	(14)
1.2.2 核高基助力集成电路芯片设计	(15)
1.2.3 设计自动化	(17)
1.3 数字集成电路的设计方法	(19)
1.3.1 自顶向下设计流程	(19)
1.3.2 自底向上设计流程	(20)
1.3.3 正向设计和逆向设计	(20)
1.3.4 著名公司推荐的设计流程	(21)
1.4 数字集成电路设计的学习方法	(22)
1.4.1 选用合适的 EDA 工具	(22)
1.4.2 了解和适应集成电路设计产业	(23)
1.5 数字集成电路设计的项目管理	(26)
1.5.1 可靠性设计	(26)
1.5.2 代码版本管理 SVN	(29)
1.5.3 代码质量 nLint	(29)
第 2 章 数字集成电路设计基础	(30)
2.1 数字集成电路的基本电路	(30)
2.1.1 数字集成电路分类与特点	(31)
2.1.2 各类数字集成电路的性能指标	(33)
2.1.3 CMOS 基本门电路的分类与扩展	(35)

2.2 典型的组合逻辑电路设计	(38)
2.2.1 实现不带“非”的组合逻辑	(38)
2.2.2 半加器和同或电路设计	(39)
2.2.3 加法器电路设计	(41)
2.2.4 算术逻辑运算模块	(43)
2.2.5 译码器和编码器	(43)
2.2.6 传输门逻辑电路	(44)
2.2.7 多路选择器	(45)
2.3 典型的时序逻辑电路	(47)
2.3.1 时序逻辑电路基础	(47)
2.3.2 双稳态电路	(48)
2.3.3 CMOS 触发器	(49)
2.3.4 同步时序电路和异步时序电路	(51)
2.3.5 预充-求值的动态 CMOS 电路	(51)
2.3.6 多米诺 CMOS 电路	(53)
2.3.7 时钟 CMOS 电路	(55)
2.4 微处理器的设计	(56)
2.4.1 微处理器设计与专用集成电路设计	(56)
2.4.2 微处理器设计的发展	(57)
2.4.3 简单微处理器的设计	(59)
2.4.4 系统级的微处理器设计方法	(60)
2.4.5 可配置处理器对设计方法学的新要求	(62)
第3章 硬件描述语言 VHDL	(63)
3.1 VHDL 简介	(63)
3.1.1 VHDL 的特点	(64)
3.1.2 VHDL 的新发展	(65)
3.2 VHDL 程序的基本结构	(65)
3.2.1 VHDL 程序的基本单元与构成	(65)
3.2.2 包、配置和库	(71)
3.2.3 微处理器的设计实例	(76)
3.3 VHDL 的基本数据类型和操作符	(79)
3.3.1 数的类型和数的字面值	(79)
3.3.2 对象和分类	(80)
3.3.3 数据类型	(81)
3.3.4 运算操作符	(84)

3.4	VHDL 结构体的描述方式	(85)
3.4.1	顺序描述语句	(86)
3.4.2	并发描述语句	(89)
3.5	Active_VHDL 上机准备	(92)
3.5.1	Active_VHDL 的安装与启动	(92)
3.5.2	EditPlus 安装使用	(93)
3.5.3	熟悉 Active_VHDL 的集成环境	(93)
3.5.4	Active_VHDL 自带范例的调试流程	(94)
3.5.5	VHDL 激励信号	(95)
3.5.6	Active_VHDL 中测试基准自动生成流程	(95)
3.5.7	半加器的波形分析	(97)
3.6	基本逻辑电路的 VHDL 实现	(98)
3.6.1	组合逻辑电路设计	(99)
3.6.2	时序逻辑电路设计	(103)
3.7	Active_VHDL 上机实践	(110)
3.7.1	VHDL 数字电路的文本描述、编译与仿真上机实验	(110)
3.7.2	交通灯控制器	(111)
3.7.3	基于 CPLD 实现交通灯控制器	(120)
3.8	交通灯控制器开发实例	(136)
3.8.1	设计规范和步骤	(136)
3.8.2	设计描述	(137)
3.8.3	VHDL 描述	(138)
3.8.4	验证方案	(145)
3.8.5	把 TLC 和 TLC_Test 配置在一起	(146)
3.8.6	预定义数据类型 BIT	(148)
3.8.7	用新的数据类型改写成 TLC 的电路描述	(149)
3.8.8	其他综合调试工作	(150)
第 4 章	硬件描述语言 Verilog HDL	(152)
4.1	Verilog HDL 和 VHDL 的比较	(152)
4.2	Verilog HDL 简介	(153)
4.2.1	Verilog HDL 的特点	(153)
4.2.2	Verilog HDL 模块组成单元	(154)
4.2.3	Verilog-2001 标准加入的内容	(156)
4.3	Verilog HDL 的词法	(162)
4.3.1	空白符和注释	(162)

5.3.2	8 位 RISC 微处理器的结构	(232)
5.3.3	8 位 RISC 微处理器的前端设计	(243)
5.4	VFP-A 及其寄存器的前端设计	(258)
5.4.1	VFP-A 设计及验证	(258)
5.4.2	寄存器详细设计	(265)
5.4.3	寄存器堆	(274)
5.5	ALU 的前端设计	(284)
5.5.1	ALU 简介	(284)
5.5.2	ALU 内部模块	(286)
5.5.3	ALU 接口信号	(286)
5.5.4	ALU 指令列表	(287)
5.5.5	ALU 的实现	(288)
第 6 章	数字集成电路的 FPGA 设计	(294)
6.1	FPGA 简介	(294)
6.1.1	面向 20 nm 的 FPGA	(294)
6.1.2	FPGA 和 ASIC 设计的区别	(295)
6.1.3	FPGA 与 CPLD 的区别	(297)
6.2	PCB 板级系统项目分析	(297)
6.2.1	印刷电路板简介	(297)
6.2.2	PCB 设计软件 Protel	(300)
6.2.3	PCB 的项目管理	(301)
6.2.4	高速 PCB 设计规则	(303)
6.3	入门级开发板的设计实例	(305)
6.3.1	MAX7000S 开发板的设计	(306)
6.3.2	下载和配置方式	(318)
6.3.3	X2S200 开发板的设计简介	(324)
6.3.4	EP3C16E144 开发板设计	(325)
6.4	Virtex 开发板的设计	(335)
6.4.1	Virtex FPGA 开发板简介	(335)
6.4.2	Virtex 开发板调试流程	(341)
6.5	Virtex-6 双子星开发板的设计	(346)
6.5.1	双子星 PCB 级的设计	(347)
6.5.2	PCB 的信号完整性考虑	(354)
6.5.3	互联接口的设计	(359)
6.5.4	双子星布线及算法	(362)

- 8.1.6 降额标准 (451)
- 8.1.7 信号完整性 (451)
- 8.2 空间辐照环境下的 FPGA 可靠性设计技术 (452)
 - 8.2.1 单粒子效应 (452)
 - 8.2.2 Xilinx 的三模冗余 (454)
 - 8.2.3 抗辐射加固 SRAM 设计 (454)
- 8.3 测试向量的生成 (455)
 - 8.3.1 测试的基本概念 (455)
 - 8.3.2 故障仿真 (458)
 - 8.3.3 测试生成的过程 (459)
 - 8.3.4 测试流程 (460)
- 8.4 可测试性设计 (461)
 - 8.4.1 可测试性设计初步 (461)
 - 8.4.2 可测试性设计与结构测试 (465)
 - 8.4.3 软硬件系统可测试性设计 (468)
 - 8.4.4 包含嵌入式模块的可测试性设计 (472)
- 8.5 数字集成电路的测试与物理仿真 (474)
 - 8.5.1 物理仿真的方法 (474)
 - 8.5.2 芯片的 FPGA 物理仿真方法 (476)
 - 8.5.3 混合的物理仿真 (476)
- 附录 (480)
 - 附录 1 Synopsys 推荐设计流程 (480)
 - 附录 2 VHDL 上机作业模板 (481)
 - 附录 3 可靠性设计分析流程示例 (482)
- 参考文献 (483)

第 1 章 集成电路发展与数字集成电路概论

集成电路从 20 世纪 60 年代开始,经历了小规模(SSI)、中规模(MSI)、大规模(LSI)、超大规模(VLSI)、甚大规模(ULSI)、极大规模集成电路(GLSI)阶段。1958 年设计出来的第一块集成电路只有 4 个晶体管,而到 GLSI 阶段能制作包含 10^9 个晶体管以上的单个芯片,并构成一个完整的数字系统或数模混合的电子系统。

本章将介绍集成电路的诞生、集成电路设计的发展历史、纳米时代的数字集成电路设计策略、数字集成电路设计的流程及其项目管理。

1.1 集成电路的回顾

以集成电路作为关键支撑的数字技术已经渗透到我们生活的方方面面,数字化地球、数字化家庭已逐步成为现实,我们周围可以发现无数个数字硬件产品:智能电视、电话、电脑等。

1.1.1 数字集成电路溯源

1. 计算机的发展与集成电路诞生

虽然从第一台电子计算机问世至今,只有短短 60 多年的历史,但计算机的渊源可以追溯到 2000 年以前,那时,古代中国人民已发明算盘用以计算,这是人类借助于工具进行数字计算的开端。算盘已经具备了将要计算的数拨打到算盘上(输入)、按口诀进行计算(运算)、中间计算结果立即显示在算盘(存储)、通过人手指可拨动算盘珠(控制)、最终结果显示在算盘上(输出)这五个功能,所以古老的中国算盘已经具备了现代冯·诺依曼结构计算机的五大要素。

欧洲文艺复兴时期,随着航海及工业的大发展,对计算需求不断扩大。1594 年,纳皮尔发明了对数,成功地将乘(除)法计算转换成加(减)法计算,1620 年,甘特发明了计算尺。这些早期的计算工具以及所用的思想为近代数字计算机的发展奠定了基础。人们又认为,现代计算机的前身最早可追溯到法国的帕斯卡(1623~1662),他根据齿轮啮合的原理,在 1642 年建造了第一台机械式计算机,使用每转满十圈进一位的十进制。但十进制有十种状态,实现起来显然很麻烦。直到莱布尼茨(1646~1716)发明了二进制才比较好地解决了计算机的进制问题。广为流传的观点认为他受中国阴阳八卦的启发才发明了二进制,但根据考证是

他发明了二进制后才发现八卦可以用他的二进制来解释。在古代中国,阴阳八卦理论盛行一时,用一条实线来代表阳爻,即二进制中的“1”,而将一条实线中间断开来代表阴爻,即二进制中的“0”。八卦中“乾”是三条实线即 111,为二进制中的“7”,而“坤”是三条中间断开的实线即 000,为二进制中的“0”。这样八卦中八种状态用二进制数可依次表示出来,即 0~7 的二进制表示。莱布尼茨是和牛顿齐名的微积分大师,他发明的二进制和乘数论为计算机发展奠定了理论基础,这些研究逐渐深入并被作为盖吉斯(Daniel D. Gajski)发明的 Y 图描述的起点,它涵盖了数字集成电路设计中的行为域、结构域和物理域,如图 1.1 所示。

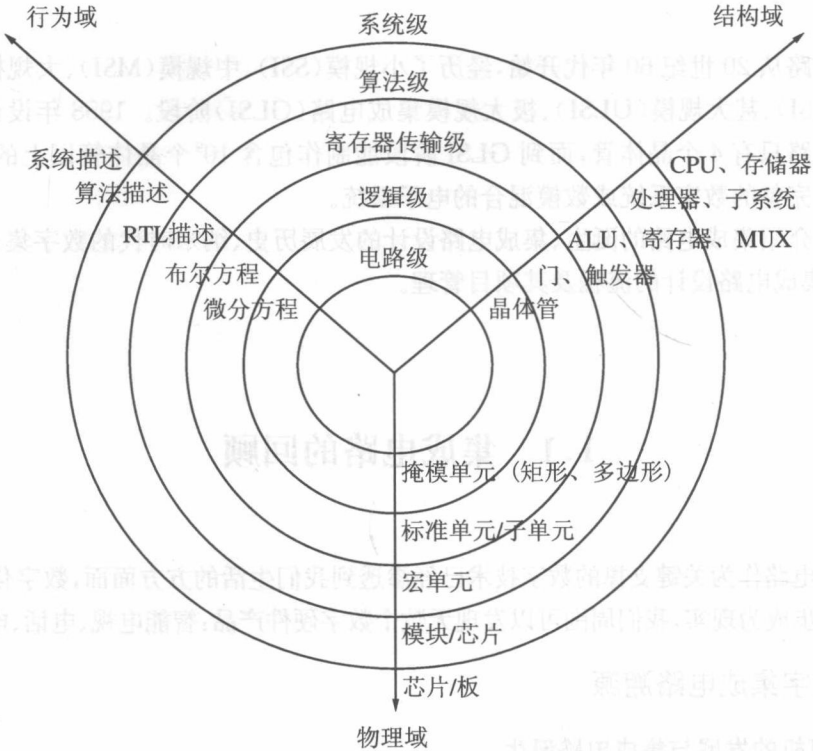


图 1.1 数字电路描述的 Y 图

沿着 Y 图中的射线看去,我们可以追寻数字电路发展的每个层次、阶段的成果,而其中最重要的贡献当属查尔斯·巴贝奇(1792~1871,见图 1.2)的研究。他在 1822 年完成了利用多项式差分规律进行演算的“差分机”模型,这是在电子计算机诞生前,人类创造计算工具过程中最重要的实践。在得不到经费支持的情况下,巴贝奇变卖家产维持研究,直到 1834 年完成了分析机的设计。为此,他发明了穿孔机、Ada 语言等。他在分析机中使用了寄存数据装置,并将其称为“堆栈”,设置了从“堆栈”取数进行运算“工场”,并能控制操作顺序、选择所需数据和输出结果的装置。但非常可惜的是,几十年后该成果才被进一步认识和研究应用。换句话说,巴贝奇以一己之力完成了超前几十年的近代数字计算机发明。令人欣慰的是,他所提出来的“堆栈”、Ada 语言(Ada 是为纪念巴贝奇女助手爱达·拜伦而命名的,她是英国诗人拜伦的独生女,也是世界上第一位程序员)等在今天的计算机中还在广泛地使用。

世界上第一台电子计算机埃尼亚克(Eniac)诞生于 1946 年 2 月 14 日。它由 18800 个

真空电子管构成,重 30 吨,有两层楼那么高,占地 170 平方米,耗电 174 千瓦,每秒钟可完成 5000 次加减运算或 400 次乘法运算,比人工计算快 20 万倍。因为埃尼亚克采用的器件是真空电子管,而 18800 个真空电子管每个都有小手电筒般大小,当埃尼亚克一开机,就有 20 个工程师围着它转,以便及时更换那些过热的电子管,大约每 15 分钟就有一个真空电子管失效。因此,以真空电子管为主要器件的第一代计算机风行了十几年就被淘汰了,而解决像埃尼亚克那样巨大的功耗及可靠性问题是后来集成电路不断发展的巨大动力。

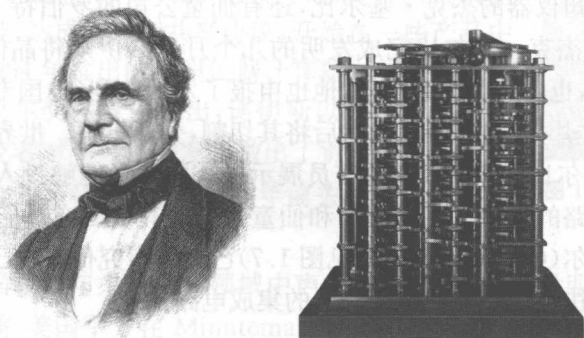


图 1.2 查尔斯·巴贝奇和他发明的差分机

在图 1.3 中,美国科学家威廉·肖克莱(坐中间者)和他的同事约翰·巴丁(左边站立者)、巴尔登·布莱廷在 1947 年底,研制出如图 1.4 所示的人类历史上第一只晶体管,三人在 1956 年分享了诺贝尔物理学奖。晶体管的体积是电子管的几十分之一,消耗功率为它的万分之一,而性能远远超过了真空三极管,它推动了雷达和计算机技术的发展,标志着电子设备固体化的开始。晶体管诞生后,首先在电话设备和助听器中使用;逐渐地,晶体管在任何有插座或电池的东西中都能发挥作用了。第一代真空管计算机也很快过渡到了第二代晶体管计算机(1959~1964)。

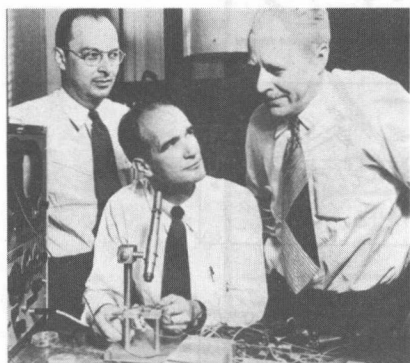


图 1.3 晶体管发明人

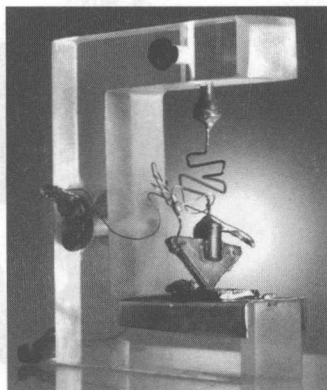


图 1.4 点接触晶体管试验装置

2. 集成电路的发明与应用

即使有了晶体管、电阻、电容等长寿命的元器件,但要将它们组装在印制电路板上,是通过焊接来进行电的连接的,所以焊接部分的可靠程度成为左右计算机寿命的主要因素。作为德州仪器的新员工,杰克·基尔比(Jack Kilby,见图 1.5)没有假期,在同事们休假时,他

