

航天电子技术与应用前沿
丛书主编·吉峰

星载嵌入式计算机 技术与应用

朱新忠  编著

SPACECRAFT EMBEDDED
COMPUTER
TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS



上海科学技术出版社

航天电子技术与应用前沿

星载嵌入式计算机技术与应用

朱新忠 等 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

航天作为当今世界最具挑战性和广泛带动性的高技术领域之一,是国家综合实力和重要地位的重要体现。“航天电子技术与应用前沿”丛书基于“十二五”“十三五”国家重点研发计划项目等,全面、系统反映了航天电子领域的前沿研究和关键核心技术。

本书首先介绍了星载嵌入式计算机的发展历程和基本概念,然后重点介绍了星载嵌入式计算机的体系架构技术、处理器最小系统、总线技术、电路与元器件技术、电源与接地设计技术、高可靠 FPGA 设计、软件技术、抗辐加固技术及其应用,并在最后给出星载嵌入式计算机的发展趋势与展望。本书弥补了市场同类书空白,堪称“业内宇航计算机领域中具有可操作性、强工程性、全方位性的指导性图书”,其出版具有一定的价值和意义。

本书融合了星载嵌入式计算机的理论基础和作者长期工作中总结的经验,在理论性和实践性方面都具有较高的指导价值。本书可以作为嵌入式计算机和电子系统研究设计人员的参考书,也可以作为相关领域的入门培训教程。

图书在版编目(CIP)数据

星载嵌入式计算机技术与应用 / 朱新忠等编著. --
上海: 上海科学技术出版社, 2023. 3
(航天电子技术与应用前沿)
ISBN 978-7-5478-6056-4

I. ①星… II. ①朱… III. ①人造卫星—微型计算机
IV. ①V423. 4

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第034463号

星载嵌入式计算机技术与应用

朱新忠 等 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F)

邮政编码 201101 www.sstp.cn

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 21

字数 480 千字

2023年3月第1版 2023年3月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-6056-4/V·38

定价: 170.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向印刷厂联系调换

丛书编委会

主 编 吉 峰

副 主 编 秦 琨 朱新忠 陆文斌

编 委 (按姓氏笔画排序)

于守江	王 锦	王茂森	王欣怡	王宝欣
王嘉颖	韦 杰	叶 舟	叶 曦	吕振彬
朱剑辉	刘 奎	刘世劫	许康恒	孙泽渝
苏嘉玮	李 森	李东宁	李彤琛	李曙光
肖斯雨	吴振广	吴毅杰	邱 源	邱 睿
何志敏	汪庆武	沈 奇	张 灏	张新伟
陈大吾	欧阳尚荣	罗 铿	侍述海	金玉红
周 雷	赵春雷	赵婵娟	荀 找	胡 浩
俞 彬	姚庆璐	姚崇斌	原浩娟	徐安祺
奚玉鼎	凌 云	高 虹	郭一帆	黄凯旋
黄家鹏	董彧焘	辜 鹏	程利甫	蔡凤燕
缪依展				

本书编委会

主 编 朱新忠

副 主 编 邱 源 王茂森 程利甫

编 委 (按姓氏笔画排序)

王敏琪 韦 杰 朱剑辉 刘 奎

孙泽渝 苏嘉玮 李 森 肖斯雨

吴振广 何志敏 沈 奇 胡 浩

缪依展

前 言

星载嵌入式计算机是指装备于卫星平台上的嵌入式计算设备,是各类航天器的核心设备之一,直接影响着航天飞行器的性能。同时,由于其不可维修且长时间处于太空极端温度及辐射环境中,星载嵌入式计算机对于可靠性要求极高。星载嵌入式计算机的主要任务包括卫星和航天飞行器的综合管理和姿态控制,接收遥控命令和数据注入,对各类数据进行及时处理和传送,监视卫星和航天飞行器的运行状态并进行故障诊断,等等。随着空间技术的发展,一方面,航天飞行器的功能日趋多样化,除了传统的通信、导航和遥感等应用外,还包括载人航天、深空探测等;另一方面,航天器也开始由大卫星向组成星座或星网的小卫星、微小卫星及微纳卫星发展。为了适应这些发展,星载嵌入式计算机技术也经历了重大变化。但与此同时,目前我国在这一领域仍然缺少完整、翔实且结合实际工程的相关著作。

本书写作团队来自上海航天电子通讯设备研究所(简称“804所”)。804所是从事宇航型号用星载计算机、测控通信等分系统及各类电子产品研发、制造和系统集成的专业技术研究所,主要承担我国气象系列、雷达系列、光学和科学实验系列、深空探测系列等卫星星载计算机所涉及的研发工作。本书写作团队在航天领域深耕多年,亲身经历了大量型号任务的星载计算机方案论证、设备研制、测试验证和在轨运维工作,具有扎实的理论功底和丰富的实践经验。在本书编写过程中,团队立足基本理论知识,充分融合长期型号工作实践中使用的方法和案例,力图做到深入浅出、完整呈现星载计算机的所有环节。本书既可作为我国航天事业蓬勃兴旺的记录,也使得这些重要的知识能够更好地传承与发展。

航天是一项大系统工程,任何一个成功的型号研制背后都是无数人的努力和奉献。本书作者曾与各单位的许多专家共事过,书中的不少知识都是来自他们,受限于篇幅无法将这些专家全部列出,在此一并致以最诚挚的谢意。

本书不仅是作者对于实际工作的总结,也包含了对前沿技术的研究心得,旨在全面反

映我国在星载嵌入式计算机领域的先进水平。本书可以作为从事航天计算机和电子系统设计研究人员的参考用书,也可作为相关领域的入门教材。

星载嵌入式计算机涉及领域众多,因作者水平有限,书中可能存在不少疏漏和谬误之处,敬请各位读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 星载计算机概述	001
1.1.1 计算机发展史	001
1.1.2 星载计算机发展历程	007
1.1.3 体系结构的发展历程	010
1.2 星载计算机概念	011
1.2.1 功能定义	011
1.2.2 主要特点	011
1.2.3 分类与功能	014
1.2.4 基本组成	014
1.2.5 性能指标	016
1.3 本书内容安排	018
第 2 章 体系架构技术	019
2.1 系统架构概述	019
2.1.1 基本概念	019
2.1.2 系统架构分类	020
2.2 系统架构特征	021
2.2.1 模块化	021
2.2.2 开放式	025
2.2.3 冗余	030
2.3 典型架构应用	035
2.3.1 应用卫星	035
2.3.2 深空探测	036
2.3.3 微纳卫星	037

第 3 章 处理器最小系统	039
3.1 星载计算机处理器概述	039
3.1.1 国内外处理器发展情况	039
3.1.2 计算机指令集及其系列产品概述	040
3.2 1750A 系列处理器技术	043
3.2.1 1750A 体系架构发展历程	043
3.2.2 1750A 体系架构简介	044
3.2.3 典型的 1750A 系列处理器	044
3.2.4 技术特征	047
3.3 SPARC 系列处理器技术	049
3.3.1 SPARC 体系发展历程	049
3.3.2 SPARC 体系架构特点	050
3.3.3 典型的 SPARC 系列处理器	051
3.3.4 技术特征	053
3.4 PowerPC 系列处理器技术	056
3.4.1 PowerPC 体系发展历程	056
3.4.2 PowerPC 体系架构特点	057
3.4.3 典型的 PowerPC 处理器	057
3.4.4 技术特征	058
3.5 ARM 系列处理器技术	060
3.5.1 ARM 体系发展历程	060
3.5.2 ARM 体系架构特点	060
3.5.3 典型的 ARM 处理器	062
3.5.4 技术特征	066
3.6 MIPS 系列处理器技术	068
3.6.1 MIPS 体系架构发展历程	068
3.6.2 MIPS 体系架构简介	069
3.6.3 典型的 MIPS 系列处理器	069
3.6.4 技术特征	070
3.7 X86 系列处理器技术	072
3.7.1 X86 体系架构发展历程	072
3.7.2 X86 体系架构简介	072
3.7.3 典型的 X86 系列处理器	073
3.7.4 技术特征	073
3.8 RISC-V 系列处理器技术	075
3.8.1 RISC-V 体系架构发展历程	075

3.8.2	RISC-V 体系架构简介	076
3.8.3	典型的 RISC-V 系列处理器	077
3.8.4	技术特征	078
3.9	处理系统存储技术	080
3.9.1	非易失性程序存储器设计与应用	080
3.9.2	Flash 型数据存储器设计与应用	081
3.9.3	SRAM 型数据存储器设计与应用	082
3.9.4	SDRAM 型数据存储器设计与应用	082
第 4 章	总线技术	084
4.1	总线概述	084
4.2	总线分类	085
4.2.1	按功能划分	085
4.2.2	按传输方式划分	086
4.3	星载计算机总线设计	086
4.3.1	1553B 总线	087
4.3.2	CAN 总线	092
4.3.3	SpaceWire 总线	097
4.3.4	PCI-Express 总线	102
4.3.5	RapidIO 总线	105
4.3.6	其他总线	109
第 5 章	接口电路技术	119
5.1	接口电路需求	119
5.1.1	接口电路功能需求	119
5.1.2	接口电路隔离需求	120
5.2	接口电路功能分类	120
5.2.1	供电接口	120
5.2.2	模拟量采集与发送接口	121
5.2.3	数字量采集与发送接口	121
5.2.4	驱动接口	122
5.2.5	其他高可靠接口	122
5.3	接口电路设计	123
5.3.1	供电接口	123
5.3.2	模拟量采集与发送接口	125
5.3.3	数字量采集与发送接口	130

5.3.4	驱动接口	142
5.3.5	其他高可靠接口	144
5.4	典型应用	147
第 6 章	电源与地设计	150
6.1	电源系统概述	150
6.1.1	能量的来源	150
6.1.2	系统的定义	151
6.1.3	系统的供电	151
6.2	系统拓扑	153
6.2.1	电源信号定义	153
6.2.2	电源转换方式	154
6.2.3	电源转换拓扑	157
6.3	电源接地技术	158
6.3.1	接地的定义	158
6.3.2	接地的作用	158
6.3.3	接地的方式	159
6.3.4	接地的要求	160
6.4	电源可靠性与安全性	163
6.4.1	可靠性设计	163
6.4.2	安全性设计	166
6.5	电磁兼容性设计技术	166
6.5.1	电磁兼容性设计	167
6.5.2	电磁兼容性试验	170
6.6	电源稳定性	173
6.6.1	浪涌抑制	173
6.6.2	纹波抑制	175
6.7	电源损耗与噪声	176
6.8	电源器件特性	177
6.8.1	开关电源	177
6.8.2	线性稳压器	179
第 7 章	星载计算机 FPGA 设计	182
7.1	星载计算机 FPGA 概述	182
7.1.1	星载计算机 FPGA 系列及体系架构	182
7.1.2	星载计算机 FPGA 器件使用流程	186

7.1.3	FPGA 开发软件	187
7.1.4	FPGA 开发硬件	188
7.2	星载计算机 FPGA 需求分析与选型参考	189
7.2.1	需求分析	189
7.2.2	设计预估	190
7.2.3	选型参考	191
7.3	星载计算机 FPGA 设计与实现	194
7.3.1	FPGA 典型开发流程	194
7.3.2	FPGA 硬件设计	196
7.3.3	FPGA 逻辑设计	200
7.3.4	FPGA 可靠性设计	204
7.3.5	几种常见类型的 FPGA 设计要点	206
7.3.6	FPGA 在轨上注重构	207
7.4	星载计算机 FPGA 设计的新趋势	208
7.4.1	SOPC 开发	208
7.4.2	HLS 开发	209
第 8 章	软件技术	211
8.1	星载计算机软件简介	211
8.1.1	星载计算机软件分类	211
8.1.2	星载计算机软件的发展	212
8.2	星载计算机单机软件设计	214
8.2.1	软件顶层设计	214
8.2.2	软件功能设计	217
8.2.3	软件外部接口设计	222
8.2.4	软件可靠性与安全性设计	224
8.3	星载嵌入式操作系统	228
8.3.1	操作系统简史	228
8.3.2	操作系统软件架构	230
8.3.3	操作系统可靠性设计	241
8.3.4	操作系统功能应用	249
第 9 章	元器件应用与抗辐射加固技术	255
9.1	元器件选用	255
9.1.1	元器件选择要求	255
9.1.2	元器件应用要求	260

9.2	抗辐射加固技术	260
9.2.1	空间辐射环境	261
9.2.2	常见辐射效应	264
9.2.3	芯片级辐射效应及加固技术	270
9.2.4	系统级抗辐射加固设计	274
9.2.5	电子系统抗辐射加固设计量化评估技术	279
第 10 章	发展趋势与展望	281
10.1	体系架构发展	281
10.1.1	“云-边-端协同”架构	281
10.1.2	软件定义系统架构	283
10.1.3	感存算一体化架构	286
10.1.4	新型信息系统架构	286
10.2	元器件发展	287
10.2.1	多芯并行	288
10.2.2	片上系统与系统级封装	290
10.2.3	软件定义无线电	291
10.2.4	人工智能芯片	292
10.3	软件发展	295
10.3.1	智能信息处理	295
10.3.2	智能数据管理	296
10.3.3	卫星网络安全	297
10.3.4	网络化操作系统	298
10.3.5	综合化软件系统	299
10.3.6	混合异构算力	300
10.4	应用展望	302
10.4.1	卫星组网通信	302
10.4.2	在轨图像处理	303
10.4.3	自主健康管理	305
10.4.4	量子计算机	306
10.4.5	数字计算机 MBSE	308
10.4.6	智能人机交互	309
10.4.7	空间防御	310
	参考文献	313

第 1 章

绪 论

随着航天事业的蓬勃发展,成千上万颗卫星和探测器从地球被发射到外太空。作为这些飞行器的“大脑”,星载计算机是它们内部重要的组成部分。得益于半导体技术的迅猛发展,星载计算机也呈现出日新月异的变化。本章将就星载计算机的发展历程和基本概念进行介绍,使读者对星载计算机具有初步认识,并为后续内容做铺垫。

1.1 星载计算机概述

1.1.1 计算机发展史

18 世纪,工业革命开始,法国纺织工人鲁修为便于转换纺织图样,在织布机上套上穿孔纸带,以此达到仅需手工进料的半自动化生产。1801 年,法国人雅卡尔发明提花织布机,利用打孔卡控制织花图样,与前者不同的是,这部织布机变更连串的卡片,无须更动机械设计,堪称可编程化机器的里程碑。

1936 年 11 月 12 日,阿兰·麦席森·图灵(Alan Mathison Turing;简称“阿兰·图灵”)发表了计算机理论的奠基性论文《论可计算数及其在判定问题中的应用》(*On Computable Numbers, with Application to the Entscheidungs Problem*)。在论文中,阿兰·图灵阐明了现代计算机理论,从理论上定义了现代通用计算机、可计算性等重要概念,故被认为是“计算机科学之父”(图 1-1、图 1-2)。

1945 年 6 月,冯·诺依曼提出了在数字计算机内部的存储器中存放程序的概念(stored program concept),这是所有现代电子计算机的模板,被称为“冯·诺依曼结构”(图 1-3),按这一结构设计的电脑称为存储程序计算机(stored program computer),又称为通用计算机。

在电子计算机的发展过程中,电子元器件的变更起到了决定性作用,它是计算机换代的主要标志,其发展过程划分为电子管、晶体管、集成电路以及大规模集成电路 4 个阶段,这 4 个阶段对应的计算机分别被称为第一代至第四代计算机。

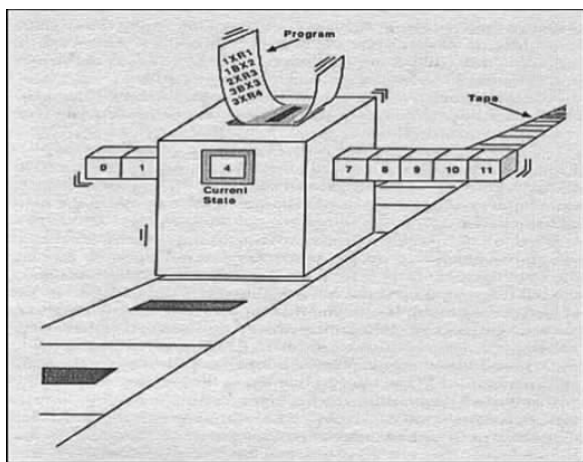


图 1-1 图灵机

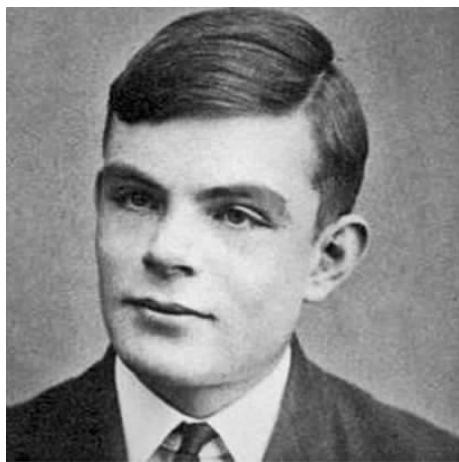


图 1-2 阿兰·图灵

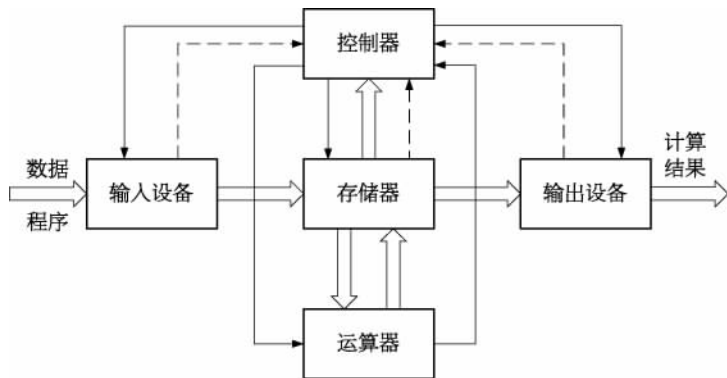


图 1-3 冯·诺依曼结构

1) 第一代电子管计算机(1946—1958年)

1946年2月,美国宾夕法尼亚大学成功研制了世界上第一台电子管计算机——电子数字积分计算机(electronic numerical integrator and calculator, ENIAC;中文名“埃尼阿克”),这是美国奥伯特武器试验场为了满足计算火炮弹道、编制设计表的需要于1943年6月与联邦政府签订10万美元的合同后而研制的。ENIAC完成后未能赶上第二次世界大战,但被洛斯阿拉莫斯(Los Alamos)国家实验室用于计算原子弹爆炸的突变问题,后来又曾被用于阿伯丁的空军试验场,一直运行到1955年10月才停止工作。ENIAC的诞生揭开了人类科技的新纪元,也是人们所称的第三次科技革命(信息革命)的开端。ENIAC和其研制者之一莫奇利如图1-4所示。

中国的计算机制造工业起步于20世纪50年代中期。1957年下半年,由中国科学院计算技术研究所和北京有线电厂(原738厂)在消化吸收的基础上正式开始了计算机的研制工作。1958年6月,该电子计算机安装调试,8月1日该机可以表演短程序运行,标志

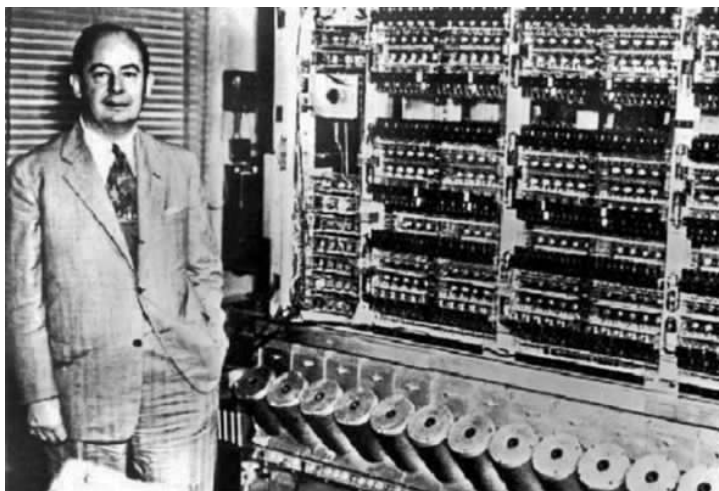


图 1-4 世界上第一台电子管计算机 ENIAC 和其研制者之一莫奇利

着中国第一台电子计算机诞生。为纪念这个日子,该机定名为八一型数字电子计算机,后改名为 103 型计算机(即 DJS-1 型)(图 1-5)。

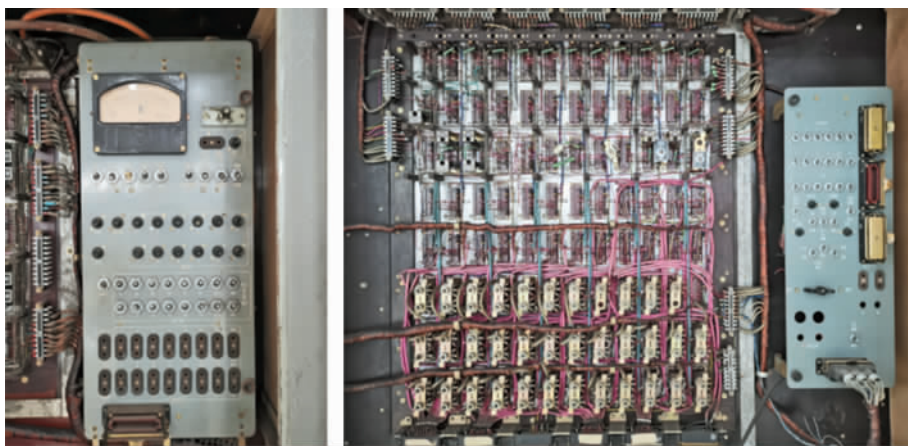


图 1-5 DJS-1 型通用数字电子计算机

第一代电子计算机的一个特点是操作指令为特定任务而编制,每种机器有各自不同的机器语言,功能受到限制,速度也慢;另一个明显特征是使用真空电子管和磁鼓存储数据。机器的总体结构以运算器为中心。运算速度为每秒几千次到几万次,内存容量仅为 1 000~4 000 byte(字节),主要用于军事和科学研究。

2) 第二代晶体管计算机(1958—1964 年)

1948 年 7 月 1 日,美国《纽约时报》用 8 个句子的篇幅,公布了贝尔实验室肖克莱、巴丁、布拉顿发明晶体管的消息。它就像 8 颗重磅炸弹,在电脑领域引发一场“晶体管革命”,电子计算机从此大步跨进第二代的门槛。1960 年,出现了一些成功应用于商业

领域、大学和政府部门的第二代计算机。代表机型为 IBM 公司的 IBM 7090 晶体管计算机(图 1-6)和 CDC 公司的 CDC 1604 计算机。在这一时期出现了更高级的 COBOL (common business oriented language)和 FORTRAN(formula translator)等语言,它们以单词、语句和数学公式代替了二进制机器码,使计算机编程更容易。



图 1-6 IBM 7090 晶体管计算机

中国在研制第一代电子管计算机的同时,已开始研制晶体管计算机。我国第一台大型晶体管计算机(称为“109 乙机”)从 1958 年起在中国科学院计算技术研究所开始酝酿启动。经过两年的努力,109 厂就提供了机器所需的全部晶体管(109 乙机共使用 2 万多只晶体管、3 万多只二极管)。对 109 乙机加以改进后,两年后又推出“109 丙机”。109 丙机为用户运行了 15 年,有效算题时间 10 万 h 以上,在中国两弹试验中发挥了重要作用,被用户誉为“功勋机”。

第二代晶体管计算机的发明大大促进了计算机的发展,晶体管代替电子管,电子设备体积减小,但速度更快、功耗更低、性能更稳定。首先使用晶体管技术的是早期的超级计算机,主要用于原子科学的大量数据处理和企业商务。

3) 第三代集成电路计算机(1964—1971 年)

第二代晶体管计算机中的晶体管比起电子管是一个明显的进步,但晶体管会产生大量热量,这会损害计算机内部的敏感部分。1958 年发明的集成电路(integrated circuit, IC),将三种电子元件结合到一片小小的硅片上,使计算机体积更小、功耗更低、速度更快。十几个乃至数百个电子组件组成的逻辑电路已经可以创建在几平方毫米大的单晶硅片上,它们组成的小规模集成电路(small-scale integration, SSI)代替了分立组件。多道系统和分时系统于此时出现,它们成为操作系统诞生的标志。图 1-7 所示为 IBM 360 集成电路计算机。