



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京市高等教育精品教材立项项目

普通高等院校
计算机专业(本科)实用教程系列

操作系统实用教程

(第三版)

任爱华 王 雷 罗晓峰 阮 利 编著



清华大学出版社

普通高等院校计算机专业（本科）实用教程系列

操作系统实用教程（第三版）

任爱华 王 雷 罗晓峰 阮 利 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书着重讲述操作系统的概念和设计原理,旨在说明为什么要有操作系统,操作系统是如何构成的,以及操作系统是如何设计的。全书共分9章。第1章概论,介绍操作系统的定义、发展、现状以及它在计算机系统中的作用。第2章介绍操作系统用户接口,即用户使用操作系统的界面。第3章至第7章主要讨论操作系统的基本概念和设计原理,包括进程管理、并发程序设计、存储管理、设备管理、文件管理以及磁盘管理等内容。在阐述基本概念和设计原理的基础上,为了使学生对操作系统有一个整体概念,了解每部分功能的需求,通常都从问题的提出开始,进入到对具体操作系统原理的介绍,然后利用实例操作系统的相关部分有针对性地进行介绍。第8章和第9章介绍操作系统的较深入的内容。各章均附有一定数量的习题。

本书可作为普通高等院校计算机专业的教材或教学参考书,也可作为计算机软件人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

操作系统实用教程/任爱华等编著. —3版. —北京:清华大学出版社,2010.12
(普通高等院校计算机专业(本科)实用教程系列)

ISBN 978-7-302-24360-1

I. ①操… II. ①任… III. ①操作系统—高等学校—教材 IV. ①TP316

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第253097号

责任编辑:郑寅堃 王冰飞

责任校对:焦丽丽

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市漂源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:29.25 字 数:700千字

版 次:2010年12月第3版 印 次:2010年12月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:43.00元

产品编号:027199-01

普通高等院校计算机专业（本科）实用教程系列

编 委 会

主 任 孙家广（清华大学教授，中国工程院院士）

成 员 （按姓氏笔画为序）

王玉龙（北方工业大学教授）

艾德才（天津大学教授）

刘 云（北京交通大学教授）

任爱华（北京航空航天大学教授）

杨旭东（北京邮电大学副教授）

张海藩（北京信息工程学院教授）

徐孝凯（中央广播电视大学教授）

耿祥义（大连交通大学教授）

徐培忠（清华大学出版社编审）

樊孝忠（北京理工大学教授）

丛书策划 徐培忠 徐孝凯

序 言

时光更迭，历史嬗递。中国经济以令世人惊叹的持续高速发展驶入了一个新的世纪，一个新的千年。世纪之初，以微电子、计算机、软件和通信技术为主导的信息技术革命给我们生存的社会所带来的变化令人目不暇接。软件是优化我国产业结构、加速传统产业改造和用信息化带动工业化的基础产业，是体现国家竞争力的战略性产业，是从事知识的提炼、总结、深化和应用的高智型产业；软件关系到国家的安全，是保证我国政治独立、文化不受侵蚀的重要因素；软件也是促进其他学科发展和提升的基础学科；软件作为 20 世纪人类文明进步的最伟大成果之一，代表了先进文化的前进方向。美国政府早在 1992 年“国家关键技术”一文中提出“美国在软件开发和应用上所处的传统领先地位是信息技术及其他重要领域竞争能力的一个关键因素”，“一个成熟的软件制造业的发展是满足商业与国防对复杂程序日益增长的要求所必需的”，“在很多国家关键技术中，软件是关键的、起推动作用（或阻碍作用）的因素”。在 1999 年 1 月美国总统信息技术顾问委员会的报告“21 世纪的信息技术”中指出“从台式计算机、电话系统到股市，我们的经济与社会越来越依赖于软件”，“软件研究为基础研究方面最优先发展的领域”。而软件人才的缺乏和激烈竞争是当前国际的共性问题。各国、各企业都对培养、引进软件人才采取了特殊政策与措施。

为了满足社会对软件人才的需要，为了让更多的人可以更快地学到实用的软件理论、技术与方法，我们编著了《普通高等院校计算机专业（本科）实用教程系列》。本套丛书面向普通高等院校学生，以培养面向 21 世纪计算机专业应用人才（以软件工程师为主）为目标，以简明实用、便于自学，反映计算机技术最新发展和应用为特色，具体归纳为以下几点。

1. 讲透基本理论、基本原理、方法和技术，在写法上力求叙述详细，算法具体，通俗易懂，便于自学。

2. 理论结合实际。计算机是一门实践性很强的科学，丛书贯彻从实践中来到实践中去的原则，许多技术以理论结合实例进行讲解，便于学习理解。

3. 本丛书形成完整的体系，每本教材既有相对独立性，又有相互衔接和呼应，为总的培养目标服务。

4. 每本教材都配以习题和实验，在各教学阶段安排课程设计或大作业，培养学生的实战能力与创新精神。习题和实验可以制作成光盘。

为了适应计算机科学技术的发展，本系列教材将本着与时俱进的精神不断修订更新，及时推出第二版、第三版……

新世纪曙光激人向上，催人奋进。江泽民同志在十五届五中全会上的讲话：“大力推进国民经济和社会信息化，是覆盖现代化建设全局的战略举措。以信息化带动工业化，发挥后发优势，实现社会生产力的跨越式发展”，指明了我国信息界前进的方向。21 世纪日趋开放的国策与更加迅速发展的科技会托起祖国更加辉煌灿烂的明天。

孙家广
2004 年 1 月

前 言

在计算机网络迅速发展的今天，计算机技术不断地更新和完善，无论是硬件还是软件的发展都会在计算机操作系统的设计技术与使用风格上得到体现。因此，计算机操作系统的教材应该体现出这些变化，保证操作系统的教学内容的新颖性，使学生了解操作系统的过去，更好地理解操作系统的现在与未来。

操作系统在计算机用户与计算机硬件之间起着桥梁作用，其目的就是为用户提供一个可以方便有效地执行程序和使用计算机的环境，它在整个计算机系统软件中处于核心地位。从操作系统自身角度讲，它不仅很好地体现了在计算机日益发展中的软件研究成果，而且也能体现计算机的硬件技术发展及计算机系统结构的发展成果。从计算机用户角度讲，学习使用计算机实际上就是熟悉使用操作系统所提供的用户界面环境。每台计算机都必须安装操作系统，有的甚至不止安装一套。普通用户只需了解操作系统的外部功能，而无须了解其内部实现细节，因此，操作系统如何实现这些功能对用户来说无关紧要。此时，操作系统被看作是“黑盒子”，因为用户读不到，或读不懂操作系统的源代码，仅需要了解它的外部接口。但是，对于计算机专业的学生，掌握计算机技术不仅要求会操作计算机，还要利用计算机去开发各种软件，解决复杂的应用问题。学习操作系统的设计与实现原理，是计算机软件专业的学生全面地了解和掌握系统软件、一般软件设计方法和技术的必不可少的综合课程，也是了解计算机硬件和软件如何衔接的必经之路。所以，操作系统是计算机专业教学中重要的环节之一。然而，操作系统毕竟是所有软件中最复杂的，编制这样的系统涉及的知识面广，需要程序员既有扎实的软件基础知识，又非常了解系统的硬件接口，难度相当大。目前在常用的计算机上都已经有了主流操作系统，所以大多数软件人员参与编制实际操作系统的机会和经历并不多。为此，学习该课程会有两大难处：一是原理抽象；二是操作系统实验与实际的操作系统开发经常是脱节的。本书针对这两大难点，从应用出发，适度地介绍操作系统的基本原理和概念，并提供了相应的实践环节来加深对原理及应用的理解与结合。

作为计算机专业大学本科生教材，本书根据国内使用计算机的情况，在内容上力图具有一定的先进性和较大的适应性。遵循这一原则，在编写中着重讲述原理、概念和实例。

本书的特点之一是简明实用，以操作系统整体构架为指南，采用自顶向下方式的操作系统教学法，使学生尽早熟悉操作系统整体构架并建立起整体概念。这样能够使学生首先在概念上了解本课程的需求是什么，应该提供什么样的技术支持，从而带动学习原理的积极性。

本书的特点之二是提供操作系统实验用的全部 C 语言源程序，并以 Linux 为例，教练操作系统实验，与本教材配套的有《操作系统实用教程（第三版）实验指导》一书，提供了在 Linux 和 Windows 两种操作系统环境下的实验题和指导内容。

Linux 的出现既是计算机网络发展的产物，也是用户对编写自己的操作系统愿望的体现。本书采用 Linux 作为实例，主要因为 Linux 是自由软件，即开源软件，可以得到全部的 C 语言源程序代码，运行在 PC 上，硬件条件要求低。

全书共分 9 章。第 1 章阐述什么是操作系统，操作系统的发展和形成过程，以及操作系统的现状和它在计算机系统中的作用。第 2 章介绍操作系统用户接口，主要介绍 Linux 的系统调用和 shell 命令解释程序的开发，并且介绍 Linux 的安装与使用。第 3 章至第 7 章主要讨论操作系统的基本原理和概念，包括进程管理、并发程序设计、存储管理、设备管理、文件管理以及磁盘管理等内容。在阐述基本原理和概念的基础上，为了使学生对操作系统建立一个整体概念，对所学知识能融会贯通，每章都有问题的提出以及对 Linux 相应部分的介绍。第 8 章介绍有关操作系统的安全和保密方面的内容。第 9 章介绍的内容包括多媒体系统、多处理机系统、分布式系统、实时系统等。本书各章均附有一定数量的习题，以帮助学生进一步理解各章内容，并为教师免费提供习题答案和教学用讲稿 PPT 文件。

本课程的参考教学时数为 48 学时，实验为 60 学时，在阅读本书之前，学生应具有程序设计、计算机组织和系统结构方面的知识。如果学生已熟悉 Linux 的使用，则可跳过第 2 章 Linux 命令部分。

本书的第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章由任爱华执笔，林仕鼎提供了第 3 章的 Linux 部分的原始稿件，王雷针对第 4 章进行了重新编排和修改，第 5 章的 Linux 原理部分的原始稿件由焦晖提供，罗晓峰针对此进行了审阅和补充；第 6 章由罗晓峰对原始稿件进行了整理，阮利对此进行了审阅和修改，其 Linux 原理部分的原始稿件由张茂林提供；第 7 章由王雷执笔；第 8 章由罗晓峰提供原始稿件，由阮利针对本章进行了重新编写并统稿；第 9 章由杜悦冬提供了集群系统实例 LSF，王雷重新编写；附录 A 由王博编写；附录 B 的 RTLlinux 部分由李鹏撰写，PVM 部分由石宏义撰写；附录 C 由黄虹撰写。全书由任爱华进行统一修改、审校并统稿。限于编者水平，错误和不妥之处在所难免，恳请有识之士批评指正。

任爱华于北京

2010.9

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 计算机与操作系统	1
1.1.1 计算机发展简介	1
1.1.2 操作系统的发展	5
1.1.3 存储程序式计算机的结构和特点	20
1.2 操作系统的基本概念	22
1.2.1 操作系统的定义及其在计算机系统中的地位	22
1.2.2 操作系统的功能	24
1.2.3 操作系统的特性及其应解决的基本问题	26
1.3 操作系统的总体框架	29
1.3.1 计算机系统的层次划分	29
1.3.2 操作系统提供的抽象计算环境	31
1.3.3 操作系统的总体结构	32
1.3.4 支撑操作系统的知识框架	43
1.4 从不同角度刻画操作系统	43
1.4.1 用户观点	43
1.4.2 资源管理观点	44
1.4.3 进程观点	45
1.4.4 模块分层观点	46
1.5 安全操作系统	47
1.5.1 主要的安全评价准则	47
1.5.2 可信计算机系统安全评价准则 TCSEC	49
1.5.3 安全标准应用分析	51
1.6 小结	52
1.7 习题	53
第 2 章 操作系统接口	55
2.1 概述	55
2.1.1 系统调用	55
2.1.2 shell 命令及其解释程序	60
2.2 Linux 的安装	70
2.2.1 安装前的准备	70

2.2.2	建立硬盘分区	71
2.2.3	安装类型	72
2.2.4	安装过程	73
2.2.5	操作系统的安装概念	73
2.3	Linux 的使用	74
2.3.1	使用常识	74
2.3.2	文件操作命令	75
2.3.3	文本编辑命令	83
2.3.4	shell 的特殊字符	86
2.3.5	进程控制命令	90
2.3.6	网络配置和网络应用工具	92
2.3.7	联机帮助	96
2.4	系统管理	96
2.4.1	超级用户	97
2.4.2	用户和用户组管理	97
2.4.3	文件系统管理	100
2.4.4	Linux 源代码文件安置的目录结构	104
2.5	小结	104
2.6	习题	104
第 3 章	进程机制与并发程序设计	106
3.1	概述	106
3.2	进程的基本概念	107
3.2.1	计算机执行程序的最基本方式——单道程序的执行	107
3.2.2	多个程序驻留内存——多个程序依次顺序执行	107
3.2.3	进程的概念和结构——多个程序并发执行	107
3.2.4	进程的定义	110
3.3	进程的状态和进程控制块	112
3.3.1	进程的状态及状态转化	112
3.3.2	进程控制块	114
3.4	进程控制	115
3.4.1	原语	115
3.4.2	进程控制原语	116
3.5	线程的基本概念	116
3.5.1	线程的引入	117
3.5.2	线程与进程的比较	117
3.6	进程调度	118
3.6.1	进程调度的职能	118
3.6.2	进程调度算法	119

3.6.3	调度时的进程状态图	122
3.7	进程通信	123
3.7.1	临界资源和临界区	123
3.7.2	进程的通信方式之一——同步与互斥	123
3.7.3	两个经典的同步/互斥问题	126
3.7.4	结构化的同步/互斥机制——管程	129
3.7.5	进程的通信方式之二——消息缓冲	131
3.8	死锁	133
3.8.1	死锁的原因和必要条件	133
3.8.2	预防死锁	135
3.8.3	发现死锁	138
3.8.4	解除死锁	139
3.9	Linux 中的进程	141
3.9.1	Linux 进程控制块 PCB 简介	141
3.9.2	进程的创建	147
3.9.3	进程调度	149
3.9.4	进程的退出与消亡	151
3.9.5	相关的系统调用	151
3.9.6	信号	153
3.9.7	信号量与 PV 操作	155
3.9.8	等待队列	156
3.9.9	管道	157
3.9.10	Linux 内核体系结构	158
3.10	并发程序设计实例	159
3.11	小结	161
3.12	习题	161
第 4 章	存储管理	162
4.1	概述	162
4.2	存储体系	162
4.3	存储管理的功能	163
4.4	分区存储管理	167
4.4.1	固定式分区	167
4.4.2	可变式分区	168
4.4.3	分区管理方案的优缺点	173
4.5	页式存储管理	173
4.5.1	基本思想	173
4.5.2	地址转换	174
4.5.3	页式存储管理的优缺点	178

4.6	段式存储管理	179
4.6.1	段式存储管理技术的提出	179
4.6.2	段式地址转换	179
4.7	段页式存储管理	180
4.8	覆盖与交换技术	182
4.8.1	覆盖技术	182
4.8.2	交换技术	183
4.9	虚拟存储管理	184
4.9.1	局部性原理	184
4.9.2	虚拟页式存储管理	186
4.10	用户编程中的内存管理实例分析	192
4.11	Linux 内存管理概述	196
4.11.1	基本思想	196
4.11.2	Linux 中的页表	196
4.11.3	内存的分配和释放	198
4.11.4	内存映射和需求分页	199
4.11.5	内存交换	201
4.11.6	页目录和页表的数据结构表示	201
4.12	小结	202
4.13	习题	203
第 5 章	输入/输出系统	204
5.1	概述	204
5.2	I/O 硬件	204
5.2.1	循环等待（忙等待）	206
5.2.2	中断	207
5.2.3	直接内存访问	211
5.2.4	通道	214
5.2.5	I/O 硬件小结	215
5.3	I/O 软件	216
5.3.1	应用程序的 I/O 接口	216
5.3.2	内核 I/O 子系统	221
5.3.3	把 I/O 请求转换为硬件操作	227
5.3.4	流	229
5.3.5	性能	230
5.3.6	设备分配	233
5.3.7	I/O 进程控制	236
5.4	Linux 输入/输出系统概述	238
5.4.1	简介	238

5.4.2	Linux 输入/输出的过程	238
5.4.3	Linux 设备管理基础	239
5.4.4	Linux 的中断处理	243
5.4.5	设备驱动程序的框架	244
5.4.6	并口打印设备驱动程序	247
5.4.7	Linux 输入/输出实现层次及数据结构	250
5.5	小结	251
5.6	习题	253
第 6 章	文件系统	255
6.1	概述	255
6.2	文件系统的概念	255
6.2.1	文件	255
6.2.2	目录	258
6.2.3	文件系统	260
6.3	实现文件	262
6.3.1	文件的结构	262
6.3.2	文件的组成和文件控制块	265
6.3.3	文件共享机制	267
6.3.4	活动文件表和活动符号名表	268
6.3.5	文件的存取方法	270
6.3.6	文件的使用与控制	270
6.4	实现目录	272
6.4.1	单级目录结构	272
6.4.2	两级目录结构	273
6.4.3	多级目录结构	273
6.5	磁盘空间管理	276
6.5.1	空闲盘区链	276
6.5.2	空闲盘区目录	276
6.5.3	位示图	276
6.6	文件系统的结构和工作流程	277
6.6.1	文件系统的层次结构	277
6.6.2	文件系统的工作流程	280
6.7	文件系统的安全性和保护机制	281
6.7.1	文件存取控制矩阵	282
6.7.2	文件存取控制表	282
6.7.3	用户权限表	283
6.7.4	文件口令	283
6.7.5	文件加密	283

6.8	Linux 文件系统	284
6.8.1	虚拟文件系统	284
6.8.2	ext2 文件系统	290
6.8.3	Linux 文件系统管理	294
6.8.4	Linux 系统调用	297
6.8.5	Linux 文件系统的数据结构	304
6.9	小结	306
6.10	习题	307
第 7 章	磁盘存储管理	308
7.1	概述	308
7.2	磁盘结构	308
7.2.1	磁盘	308
7.2.2	磁盘种类	309
7.2.3	磁盘访问时间	309
7.3	磁盘调度	310
7.3.1	先来先服务 (FCFS)	311
7.3.2	最短寻道时间优先 (SSTF)	311
7.3.3	各种扫描算法	311
7.3.4	磁盘调度算法的选择	313
7.4	磁盘格式化	313
7.5	廉价冗余磁盘阵列	314
7.5.1	利用冗余技术提高可靠性	314
7.5.2	利用并行提高性能	315
7.5.3	RAID 层次	316
7.6	高速缓存管理	320
7.6.1	磁盘高速缓存的形式	320
7.6.2	数据交付	321
7.6.3	置换算法	321
7.6.4	周期性写回磁盘	322
7.6.5	提高磁盘 I/O 速度的其他方法	322
7.7	存储可靠性的实现	323
7.8	小结	324
7.9	习题	324
第 8 章	系统安全	325
8.1	概述	325
8.2	安全问题	325
8.2.1	程序威胁	327

8.2.2	系统和网络威胁	335
8.3	保护机制	339
8.3.1	保护的原则	339
8.3.2	保护域	340
8.3.3	访问矩阵	343
8.3.4	访问矩阵的实现	346
8.3.5	访问控制	348
8.3.6	访问权的撤销	348
8.3.7	基于能力的系统	350
8.3.8	基于语言的保护	351
8.4	加密技术	355
8.4.1	加密	356
8.4.2	加密技术的实现	361
8.4.3	SSL 的加密机制	363
8.5	用户认证	364
8.5.1	密码	364
8.5.2	密码的缺点	365
8.5.3	加密的密码	366
8.5.4	一次性密码	366
8.5.5	生物计量方法	367
8.6	安全防御	368
8.6.1	安全策略	368
8.6.2	漏洞评估	368
8.6.3	入侵检测	369
8.6.4	病毒防护	371
8.6.5	防火墙	372
8.6.6	审查、记账和记录	373
8.7	计算机安全分类	374
8.8	Windows XP 的安全特性	375
8.9	小结	376
8.10	习题	377
第 9 章	其他类型操作系统	379
9.1	多媒体系统	379
9.1.1	BeOS 操作系统	379
9.1.2	Windows XP Media Center Edition	381
9.2	多处理机系统	383

9.2.1 多处理机	383
9.2.2 集群系统	388
9.2.3 分布式系统	392
9.3 实时操作系统	396
9.3.1 实时系统简介	396
9.3.2 实时操作系统简介	397
9.3.3 实例介绍	400
9.4 小结	402
9.5 习题	403
附录	404
附录 A Linux 常用命令	404
A.1 常用文件和目录操作命令	404
A.2 文件压缩和文档命令	409
A.3 文件系统命令	410
A.4 DOS 兼容命令	411
A.5 系统状态命令	412
A.6 用户管理命令	413
A.7 网络服务的用户命令	414
A.8 网络管理员命令	415
A.9 进程管理命令	416
A.10 自动任务命令	417
A.11 高效命令	418
A.12 shell 命令	418
A.13 打印命令	419
附录 B 操作系统实例	419
B.1 实时操作系统 RTLinux	419
B.1.1 简介	419
B.1.2 RTLinux 安装	423
B.1.3 编写 RTLinux 程序	425
B.2 集群及 PVM	428
B.2.1 集群的概念	428
B.2.2 PVM 的产生和发展	428
B.2.3 PVM 的特点	428
B.2.4 PVM 的系统组成	429
B.2.5 PVM 的安装和使用	430
附录 C 云计算与 Google App Engine	431

C.1	网格计算与云计算	431
C.2	Google App Engine	433
C.2.1	Google App Engine 引言	433
C.2.2	Google App Engine 的使用	433
C.3	Google App Engine 开发环境的安装	434
C.3.1	安装 SDK	434
C.3.2	创建一个 GAE 账户	439
C.4	使用 Google App Engine 的开发实例	441
参考文献		447

第1章 概 论

现代电子计算机技术的飞速发展，离不开人类科技知识的积累，离不开许许多多热衷于此并呕心沥血的科学家们的探索。正是这一代代人的知识积累才构筑了今天的“信息大厦”。本章将介绍计算机的发展以及与之密切相关的操作系统的发展简史，虽然不可能很详细地描述这一辉煌历程，但我们同样可以从中感受到科技发展的艰辛及科学技术的巨大推动力。

操作系统是配置在计算机硬件平台上的第一层软件，是一组系统软件。一个新的操作系统往往汇集了计算机发展中一些传统的研究成果和技术，以及当代计算机的科研成果。操作系统课是计算机专业高年级学生的必修课程，是学生在学习了计算机的基础知识及计算机语言之后需要跨越的一个新的重要台阶。通过对操作系统的学习，学生可以从对计算机的基本了解上升到对整体系统的软件和硬件体系的了解。操作系统始终是计算机科学与工程的一个重要研究领域。

1.1 计算机与操作系统

1.1.1 计算机发展简介

1. 机械计算机时代

早在欧洲的中世纪（约公元 600—1500 年），人们就开始了有关计算机器的探索。这一思想火花经过很多科学家的传承，引导人类步入了机械计算机研究的时代。由于当时的科技总体水平所限，大多数研究都失败了。拓荒者的命运就是往往见不到丰硕的果实，不过当后人在享用这些硕果的时候，应该了解前人的艰辛。

在 1614 年，苏格兰人 John Napier（1550—1617）发明了一种可以进行四则运算和方根运算的装置。此后，经历了三百多年的岁月，人们一直在机械计算机的研制上进行着探索。终于在 1840 年前后，出现了第一台对现代计算机的产生有着重要影响的机器——英国人 Charles Babbage（1792—1871）设计的差分机和分析机，其设计理论的超前性，类似于百年之后才出现的电子计算机，特别是利用卡片记录程序与数据，然后输入给计算机的技术，在电子计算机时代的输入/输出（I/O）中也曾采用过。作为电子计算机基础的二进制代数学，早在 1848 年，便由英国数学家 George Boole 创立，提前近一个世纪为现代二进制的电子计算机铺平了道路。