

# 大话 计算机

计算机系统  
底层架构原理极限剖析

冬瓜哥◎著



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

现代计算机系统的软硬件架构十分复杂，是所有 IT 相关技术的根源。本书尝试从原始的零认知状态开始，逐步从最基础的数字电路一直介绍到计算机操作系统以及人工智能。本书用通俗的语言、恰到好处的疑问、符合原生态认知思维的切入点，来帮助读者洞悉整个计算机底层世界。本书在写作上遵循“先介绍原因，后思考，然后介绍解决方案，最终提炼抽象成概念”的原则。全书脉络清晰，带领读者重走作者的认知之路。本书集科普、专业为一体，用通俗详尽的语言、图表、模型来描述专业知识。

本书内容涵盖以下学科领域：计算机体系结构、计算机组成原理、计算机操作系统原理、计算机图形学、高性能计算机集群、计算加速、计算机存储系统、计算机网络、机器学习等。

本书共分为 12 章。第 1 章介绍数字计算机的设计思路，制作一个按键计算器，在这个过程中逐步理解数字计算机底层原理。第 2 章在第 1 章的基础上，改造按键计算器，实现能够按照编好的程序自动计算，并介绍对应的处理器内部架构概念。第 3 章介绍电子计算机的发展史，包括芯片制造等内容。第 4 章介绍流水线相关知识，包括流水线、分支预测、乱序执行、超标量等内容。第 5 章介绍计算机程序架构，理解单个、多个程序如何在处理器上编译、链接并最终运行的过程。第 6 章介绍缓存以及多处理器并行执行系统的体系结构，包括互联架构、缓存一致性架构的原理和实现。第 7 章介绍计算机 I/O 基本原理，包括 PCIe、USB、SAS 三大 I/O 体系。第 8 章介绍计算机是如何处理声音和图像的，包括 3D 渲染和图形加速原理架构和实现。第 9 章介绍大规模并行计算、超级计算机原理和架构，以及可编程逻辑器件（如 FPGA 等）的原理和架构。第 10 章介绍现代计算机操作系统基本原理和架构，包括内存管理、任务调度、中断管理、时间管理等架构原理。第 11 章介绍现代计算机形态和生态体系，包括计算、网络、存储方面的实际计算机产品和生态。第 12 章介绍机器学习和人工智能底层原理和架构实现。

本书适合所有 IT 行业从业者阅读，包括计算机（PC/服务器/手机/嵌入式）软硬件及云计算/大数据/人工智能等领域的研发、架构师、项目经理、产品经理、销售、售前。本书也同样适合广大高中生科普之用，另外计算机相关专业本科生、硕士生、博士生同样可以从本书中获取与课程教材截然不同的丰富营养。

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

大话计算机：计算机系统底层架构原理极限剖析 / 冬瓜哥著. — 北京：清华大学出版社，2019  
ISBN 978-7-302-52647-6

I. ①大… II. ①冬… III. ①计算机系统—基本知识 IV. ①TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 045444 号

责任编辑：栾大成  
封面设计：杨玉芳  
版式设计：方加青  
责任校对：徐俊伟  
责任印制：杨 艳

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编：100084

社总机：010-62770175

邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈：010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者：北京亿浓世纪彩色印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：188mm×260mm

印 张：96.25

字 数：3546 千字

(附海报 11 张)

版 次：2019 年 5 月第 1 版

印 次：2019 年 5 月第 1 次印刷

定 价：598.00 元 (全三册)

产品编号：082577-01

# 前言

各位读者朋友，欢迎阅读本书，开启计算机内部奇妙世界的旅程。本书完全从零开始介绍计算机是如何运行的，从基本的电路一直介绍到操作系统内核再到机器学习与人工智能。但是本书并不会像大众科普读物那样点到为止，而是要层层剥开计算机体系中的每一层，一直到看透为止，达到从入门到精通的效果。

**本书特点如下。**

1. 绝对从初学者角度出发，看了不迷茫、不撕书、不会骂作者（我也不想被人骂）。
2. 介绍事物绝对庖丁解牛，轻易不留“坑”，不得已留了则必填。
3. 带着思考来写作，促发读者思考；问题导向，带着解决问题过程来写。
4. 事物之间带有前因后果关联，而不是孤立地介绍，整本书从第一页到最后一页有一条清晰的因果脉络。
5. 全局框架和局部细节兼顾，大而全，深而细，就像一部精美的游戏，宏观场景震撼，局部细节惊艳！
6. 覆盖面极广，涵盖多个领域关键知识：数字电路、模拟电路、计算机体系结构、计算机组成原理、操作系统原理、计算机图形学、高性能计算机集群/超级计算机、信号与系统、存储系统、网络/通信系统、机器学习与人工智能等。
7. 随便点选任何一页的任何一段，都是精彩和拥有丰富细节的内容。
8. 注重大框架的建立，让读者阅后成竹在胸。
9. 便于自学，看文字就像是在聆听作者当面讲授。
10. 图片细节丰富，带有事物运行的流程，其过程是动态的而不是静态的。

具有高中以上学历者就可以阅读本书。本书可作为家长赠予正值高中阶段孩子的礼物，或许能够让他们不再在网海中虚度光阴。本书也可以作为高中、技校、大学、科研院所的教材或教学参考书。当然，本书也非常适合于正在或者即将从事IT领域工作的广大工程师、架构师、开发人员、项目管理人员、运维/系统/网络管理员、销售/售前/售后人员等阅读。

在此，冬瓜哥郑重建议读者们从头阅读本书，而最好不要跳跃式阅读，因为本书与传统写作方式不同。本书的内容一脉相承，前面内容是后面内容的铺垫，这种符合事物发展规律的脉络式写作方式，就像小说中的剧情一样，要从头看才能体会出其中更深刻的含义和精髓。

比如，在第1章中，冬瓜哥会回答“计算机如何计算 $1+1=2$ ”这个问题，并带领大家制作一个能够进行基本数学运算的示意计算器。在制作过程中，会遇到各种困难和问题，并最终一一解决。在解决的过程中，读者将会感受到数字电路的精妙之处，对数字电路的运行产生深刻认知，并最终迫切地要求：为何不制作一个能够按照指令自动进行累积计算的计算器呢？于是便开启了CPU之旅，进入第2章。至于后面的剧情如何跌宕起伏、宏伟壮观，就等待读者自己去体会吧！

**在本书的写作过程中得到了各路江湖豪杰的帮助，在此鄙人由衷表示感谢。**

首先要感谢PMC-Sierra（后被Microsemi收购，Microsemi又被Microchip收购）公司，进入该公司让我得以从更深的层面了解了计算机底层的各种技术。感谢我的导师前PMC-Sierra公司Fellow廖恒博士对鄙人的指导和引领。

其次要感谢前同事汪利文以及深圳市科力锐科技有限公司创始人之一张勇（@VxD），这两位大侠在本书写作过程中向鄙人提供了关键的、长时间的、颇具耐心的帮助，在一些深奥问题上，他们忍受了鄙人长期的刨根问底，有些问题他们无法现场回答，便亲自考证研究、研读源代码，并最终得出结论。我想，只有具有同样钻研精神的人才会这样做。其中年长鄙人7岁的汪兄是老骥伏枥的典范，他超越了年龄的壁垒在各种前沿技术领

域长期潜心研究，是不可多得的人才。在表示感谢的同时，也对这两位大侠表示钦佩和崇敬！或许正是因为这些前辈们深知学习过程的不易，才会如此耐心的帮助鄙人。

还要感谢网友@三郎在模拟电子技术方面予以的指导。感谢网友@Perr、@钓客、@Reborn、@抠出式linux、@Linux入门等群友的帮助，他们的帮助大大加速了本书第10章的写作进程。

还要感谢网友@去流浪、@豆包、张一中对鄙人相关知识的点拨。感谢中科院计算所的包云岗老师，以及时任阿里云高性能计算负责人、中国计算机学会理事的何万青老师的帮助。感谢@破布、@子濠两位同学在处理器体系结构方面的点拨。感谢中存超为的沈杰在数字电路底层方面对鄙人的点拨。感谢刘羽、黄家明两位大侠分别在MPI编程、BIOS/ACPI方面对鄙人的点拨。感谢刘震在模拟电子和PCB设计制造方面相关知识的点拨。感谢光子算数（北京）有限责任公司的白冰博士在模拟光学计算方面的知识传授。

还要再次感谢导师廖恒博士在本书即将完成时为我开启了一道新的大门并作为指路人，这直接导致本书第12章在一个半月的时间内的速成，这也了却了我长期的一桩心愿，同时也顺带解决了之前长期困扰我的关于信号均衡器底层原理的问题，我那时候根本不知道信号均衡器中的权重其实也是通过训练来得出的，之前一直卡在“每个Tap的权重到底是怎么确定的”这个问题上不出来，也浪费了很多时间去追踪。在本章写作期间，感谢蔡卫光、王海彬、雷霆、蒋传遐四位大侠在机器学习的上层框架、加速器架构方面提供的帮助。

最后，感谢本书编辑也是我的老朋友栾大成以及清华大学出版社参与本书出版的全体工作人员的努力，以精湛、迅速、高效的出版技术和流程控制为本书打造了优秀的展现，并最终促其诞生。

由于冬瓜哥是一个半路出家的门外汉，书中定有不少自以为是、飘飘然、不知所云、混淆、错误、含糊不清之处，迫切希望各位读者能够指出这些错误，再版时一并修正。

本书的部分图片来自于互联网，原始出处不详，如有侵权，请通过下列方式联系作者。本书极个别图片包含英文注释，未作完整翻译的图片都是示意图，不看注释即可了解图片意图，保留英文注释是为了给有能力的朋友们刨根问底，请读者体谅，如有疑问，请到冬瓜哥公众号交流。

作者联系方式如下：

QQ/E-mail: 122567712@qq.com

微信公众号：大话计算机、大话存储

新浪微博：@冬瓜哥大话计算机和存储

知乎ID：冬瓜哥。知乎专栏：大话计算机、大话存储



此外，冬瓜哥也为广大读者创建了《大话计算机》书友会QQ群：361934810。大家可以加入本群畅所欲言，共同提高。

# 序 一

收到《大话计算机》的书稿，有半尺高的厚厚一沓，而本书作者却只有冬瓜哥一人。我心里不由得暗想，到底是一种怎样的力量驱动着他完成这样的壮举？

打开来读，他的文字带我走过一个个章节，一直翻到了最后一章，感觉就像自己温习了一遍大学本科的课程，还有从业二十年来看过的许多专业书籍、科研文献、设计文档。纵观市面上所有计算机图书，能在一本书中说清楚计算机工程（Computer Engineering）的方方面面的关键点的，目前只有冬瓜哥的这本《大话计算机》了。

我一方面感念他创作了这样一部娓娓动听的学科指南，一方面也不禁感慨万千。回想当年，自己求学的路上并没有这样一位能把事情的来龙去脉掰开道明的指路人，因此也走了不少的弯路。现在可好了，无论你是从业已久的专家，还是刚入门的学子，相信此书都能做到开卷有益：或为你指明学习的道路，或为你增添对周边领域的知识。

计算机工程并不是一门十分深奥的科学系统理论，而是许许多多实践经验和知识的累积。每个领域的工程师或研究者可谓人数众多，就像住在公寓楼里的居民，对自己家里的种种自然是深入了解，但对楼上楼下的公寓里有什么往往不清楚。在《大话计算机》中，冬瓜哥就像把计算机这所大楼里的每个楼层都给你导游了一遍，还穿插了每个楼层里发生过的趣事和人物的来龙去脉。因此枯燥晦涩的技术细节变得引人入胜。

冬瓜哥对技术的描述方式格外通俗、细腻。阅读时就好比作者为读者打开了他的私人博物馆，而由收藏主人亲自展示每一个藏品的精妙机关，再把当初苦心寻访藏品并终于纳入囊中，欣赏、研究、把玩的故事向你孜孜道来。其中扑面而来的喜悦，只有同道中人才能体会。

作者多年的追求探索，不光是加深自身领悟，还为了和更多人分享和传承。工程师们承担了造新物的使命，要看清这无比复杂的知识世界十分不易。而作者冬瓜哥帮我们梳理了经纬全局，把知识的珠子串成了项链。作者寂寞孤独的打磨着他的终极作品，其中辛酸苦闷，只有经历过的人才能理解。而如今，这件艺术品终于大功告成，正犹如花费多年设计的芯片流片测试成功之后的喜悦一般。

完成这件最后的艺术品雕琢，整个计算机博物馆，就此剪彩全面开张！

感激冬瓜哥的这份情怀，为大家贡献了这本佳作！

廖恒 博士，现任海思半导体公司首席科学家。曾就读清华大学、普林斯顿大学。曾为PMC-Sierra公司 Fellow，曾参与T10 SAS 标准制定工作，并担任存储部门总架构师，设计了SAS Expander、RAID控制器、HBA控制器等芯片的核心架构。

## 序 二

计算机被称为20世纪最伟大的发明之一。1946年诞生的第一台电子计算机ENIAC，是一个每秒能运行5000次、重达30吨的庞然大物。如今计算机变得无处不在，以至于人们大大低估了它的复杂性——今天一部几百克的普通手机包含了上百亿个晶体管，性能比ENIAC快上百万倍，上面运行的操作系统、微信、支付宝等各类软件代码达到上亿行！

现代计算机内部极其复杂，我一直认为也许没有人能讲清楚它工作起来的每一个细节。记得多年前有这么一道研究生入学面试题：“播放幻灯片时，按下一个空格键到屏幕显示下一页，请问这个过程计算机做了什么？”大多数参加面试的学生都答不上来。但是有一天看到冬瓜哥的《大话计算机》时，我第一反应是意识到自己错了。这本初稿将近1500页的恢宏巨作，约500个章节，涵盖了处理器流水线、缓存、内存、并行计算、网络、声卡、GPU、操作系统，甚至包括半导体制造工艺等，每一章节都是深入浅出。不同于一般的教材，这本书采用诙谐幽默的笔法与图文并茂的形式向读者揭示计算机内部各个部件的工作原理，并穿插着技术背后的种种名人轶事，读来生动活泼、引人入胜。这像是一部小说，更像是一本百科全书，按图索骥，总能找到你想了解的知识点。

全书历时四年才完成，足见冬瓜哥对计算机系统的挚爱和坚持，而这正是当下中国计算机界最稀缺的精神与情怀，尤其在计算机应用特别是人工智能大行其道的今天。中国计算机界面临着严重的“头重脚轻”问题，计算机系统硬件、基础软件方向的从业人员远少于计算机应用方向。这既有资本追逐风口的原因，也有社会导向不当的问题，更是各界对计算机系统价值认识不足的体现。当人们提出某种新算法提升了几倍乃至几十倍的性能时，却可能未曾意识到了解计算机系统底层原理的程序员写出的矩阵乘法程序的执行速度可以是普通程序员的60 000倍；也可能未曾意识到复制一个新算法比复制一种商业模式还要快，对企业来说已无竞争力可言。因此，要将新算法转化为核心竞争力，别无他法，只有将其融入系统中！事实上，一个好系统往往集成了几十种甚至上百种算法，往往需数年时间解决成百上千个问题，不断打磨优化而成。这样的系统，即使别人想复制也需时日摸索，因而才能成为企业核心竞争力。设计与实现类似的系统，所需的正是冬瓜哥在此书中传递的那种融会贯通的系统能力以及创造此书过程中的那种执着坚毅的耐力。

冬瓜哥的成名之作《大话存储》是很多人关于存储领域的启蒙读物。如今《大话计算机》大功告成，期待他再次掀起一轮计算机系统领域的“启蒙运动”。

包云岗，中科院计算所研究员，先进计算机系统研究中心主任，中国科学院大学岗位教授

## 序 三

“因为，山在那里”——四年磨一剑的刺猬  
——冬瓜哥《大话计算机》序

咖啡厅的门开了，清秀瘦高（相对于我而言）背着个双肩包的技术男笑着和我打招呼，打开双肩包，是一本A4纸版面、两块砖头厚的《大话计算机》，1500页，写了四年——这是我和冬瓜哥认识四年多来的第一次见面。看到这本书，想起《明朝那些事》作者当年明月说支持他写完7册书的力量，是想等到孩子长大，有一天可以向孩子和自己证明曾经坚持到超越了自己的极限。是什么支持冬瓜哥写完这本从电控开关到操作系统的计算机系统底层架构极限作品呢？

和冬瓜哥相识在2014年，那时我在英特尔从支持Xeon Phi转到Lustre并行文件系统，很多时候出差去做现场交付搭建并行存储，拉杆箱里都放着冬瓜哥那两本《大话存储》。虽然很多时候可能只需要偶尔看一两页，然后去网上查资料，但这就是一本全面系统的“技术百科全书”的价值——这种价值在眼前这本《大话计算机》中得到了同样的发扬。那些年冬瓜哥给我发E-mail，问我关于处理器和HPC相关的底层问题，开始和他隔空讨论一些技术问题，通过在英特尔查一些内部公开材料，解答他那些特硬核的问题。当时我以为他从存储角度出发好奇来学习一下处理器底层架构，现在想起，我竟见证了他写这本书的长征第一步。那时候我恰好帮出版社审阅万木杨的《大话处理器》，四年后冬瓜哥找我给他的书写序，还以为是类似的技术博客连载，没想到是一个追求极致的技术匠人，四年里兢兢业业，悬梁刺股的呕心沥血之作，心生惭愧。

在我快20年的技术职业生涯里，无论在摩托罗拉还是英特尔，深入参与过很多技术项目，包括天河2号这样的工程。但是每当回望，总是多多少少有“过宝山而空返”的遗憾——为了完成产品或项目的支持，总有没能深究的技术细节，匆匆跳到下一个要解决的问题。于是在别人眼里的专家，最明白一路走来留下了多少知识的空隙——冬瓜哥写这本书的初心，就是从计算机最基础的与非门电路开始，修炼铁指寸劲的功夫，从最基础的电路写起，到计算器的实现（这和英特尔4000芯片组起源于支持日本Busicom计算器何其相似），然后开始讲信息和信号，深入到滤波器原理，逐渐进化到完整计算器的实现细节，跳到程序控制的计算机，其后进入半导体原理，展开到制造工艺和存储器、流水线和机器码的世界。整本书的结构，恰恰体现了自底向上的技术进化，这在布莱恩·阿瑟的《技术的本质》中有清晰的表达——每一项技术都是自身组件技术的组合。讨巧的写法是自顶向下，从抽象到具体，而这本书采取了不讨巧的自底向上“全部具体”的写法，每一个范畴，都采取自顶向下直接深入硬件细节的深度，没有一分敷衍。我想有心的读者，如能随着这本书笔路蓝缕地扫下来，会极大减轻留下技术空隙的遗憾。

我曾问冬瓜哥，整本书，还有任何一个角落你觉得有没钻清楚的吗？他认真想了想，说有一个地方，在第7章网络通信底层，一个模拟信号的模型问题，其他的都吃透了。这个细节，让我想起他在大学里如何喜欢并自学存储（他是学化学出身），干掉一个个堡垒，最终凭着写《大话存储》成为一个什么方向都能够钻到“极限”的高人。这本书还有一个亮点，就是所有繁杂的原理图，都是冬瓜哥自己用PowerPoint画的，所以技术圈说这是“PPT技术绘图指南”，在没有分层功能的PPT上绘制出这些细致的原理图，难度和耐心可想而知，自认为没有这种功夫。想起2015年刚开始写各自的公众号不久，我还夸过他是第一个“不在乎形式”而直接用手绘原理图照片写公众号的24K技术男——那时候，他已经在为这本技术巨著添砖加瓦。

对于技术作者，也可以采用以赛亚·伯林对学者的划分，刺猬只知道一件大事，而狐狸知道许多小事——冬瓜哥像一只四年磨一剑的刺猬。这本书从任何一章读下去，知识的密度都足够扎实，读的时候，有一种和他一起脚踏实地攀登高峰的感觉——这回答了第一段的疑问，是什么让冬瓜哥在繁忙和喧嚣的工作和技术圈里，写下这本干货满满的大部头？

“因为，山在那里。”，登山者说。

何万青 博士 阿里云高性能计算负责人，资深技术专家，中国计算机学会理事，中国计算机学会YOCSEF前副主席，中国计算机学会高专委理事

## 序 四

还记得2015年的春夏之际，我与冬瓜哥见面讨论存储技术，偶然了解到他正在写一本新书，也就是我现在向大家推荐的《大话计算机》。冬瓜哥向我展示了还未完成的第一章的文稿，同时也感叹了写作时遇到的各种困难。现在回想起来，已不记得当时冬瓜哥感叹的是什么，但是，印象很深的是冬瓜哥决心完成本书的坚定信念，以及对该书内容质量的信心。

计算机是一个复杂的系统，包括硬件、操作系统和应用软件三大部分，可从不同视角进行解读。作为科班计算机专业毕业的研究者，我所了解的计算机教材主要从理论的角度讲述计算机的各种知识，描述方法较为抽象和晦涩，多数并没有从初学者的角度去引人入胜的描写。如果没有优秀的老师辅导，通常都难以理解和掌握。

我也是《深入理解计算机系统》一书的两位译者之一，该书从程序员的角度观察计算机如何响应和支持程序代码的运行，其内容主要关注操作系统和应用软件层。读者需要写程序或运行程序，并试图通过分析程序的输出和行为，理解计算机的工作方式。但是，这种形式较为粗略，许多计算机的细节，尤其是全局框架的来龙去脉却并没有涉及。而《大话计算机》一书无论是在内容的深度、广度还是通俗度上，都超越了同时代的同类著作。我在翻看本书稿件时，心情是非常激动的。

我眼中的冬瓜哥是一位跨学科的江湖奇才。他在《大话计算机》一书里，从计算机入门者的角度出发，以自问自答、问题导向的方式，剖析了计算机的底层，以图片加文字的方式生动地描绘了计算机的各个部件的最新工作细节和原理，帮助读者透彻地理解现代计算机的工作方式，扎实地掌握相关知识。阅读本书的过程，俨然就像一位老师在给一个对计算机完全不懂的人从零开始，事无巨细，循循善诱，循序渐进的讲授过程。冬瓜哥能够清晰地切中要害，深知初学者的思维阻碍在哪里，然后一针见血地打通初学者的任督二脉。所谓茅塞顿开，醍醐灌顶，也就是如此感觉吧。

本书可谓开创了计算机图书内容组织、知识结构、写作方式的先河。其水平可以与世界级计算机顶级著作并驾齐驱，甚至在很多方面超越了所有之前的著作。我国在计算机产业落后国外多年，尤其是在芯片设计制造等底层产业领域。如今，有此一书，我感到非常欣慰。本书定会成为我国今后很长一段时间内的计算机顶级科普著作以及百科全书，也定能为我国计算机产业的发展产生积极和深远的影响。

所以，我强烈地向大家推荐《大话计算机》一书。本书尤其适合计算机入门者和程序员阅读，即使对于专业的计算机学生和研究者，也可以获得大量有别于陈旧教材的新鲜内容。

雷迎春 达沃时代 CTO，《深入理解计算机系统》图书译者之一

## 序 五

虽早知冬瓜哥在写这样一本书，但收到了初稿后还是被震住了！不仅仅因为它的沉甸甸；不仅仅因为它内容的涉猎之广，几乎涵盖信息技术领域中计算、网络/传输、存储三大分支的绝大多数工程领域；不仅仅因为它的通俗易懂，深入浅出，条理清晰，架构严谨；也不仅仅因为它的老少皆宜，能让我这个20余年的工程师豁然开朗，也能让我上初中的儿子读得乐在其中。

最震撼我的是它活脱的“动”。从每一个知识点，体现着作者的思索，追逐，甚至迷茫，焦虑，以致顿悟的全过程，而不只是结果的呈现；也体现着书者对读者的孜孜不倦，俨然一个老师在你眼前讲解。这种“动”还体现在书中很多的插图中，我甚至不相信这是冬瓜哥使用PowerPoint制作出来的，让我对我的Visio、CAD技能和存在感产生了深深的怀疑。图中带有每一步运行的指示，都标了序号，让读者可以跟随图中的序号走完所有流程，一目了然。借助于该书的全彩印刷，在介绍CPU流水线时，作者采用了不同颜色来表示流水线中不同指令的不同步骤的执行过程，看后让人茅塞顿开。我之前虽然在很多体系结构书籍中看到过对CPU流水线的介绍，但是没有任何一本书能够在一张图中把这些步骤的并行性的本质用动态的方法表达得如此淋漓尽致。

我仿佛看到了冬瓜哥数年如一日的冥思，苦学，发呆，书写，否定……在灯下，在路上，在用餐时……我也想起当冬瓜哥在开启一个本来不熟悉的知识点时，开始我还能和他谈论一二，但很快会发现我如果不深入学习，就无法继续交流了。足见冬瓜哥对技术刨根问底，冥思苦想和追逐到极致，恨不得追逐和阐述到宇宙起源的工匠精神。

所谓“师者，传道授业解惑”的三个层面，这本书当是“传道”之典范。相信本书可以让身为IT从业者的你对所从事的领域进行重新全面的深入理解和升华，也可以让青少年们燃起对科学技术的浓浓兴趣，在中华民族伟大复兴的过程中播下星星之火。

值得收藏！

前PMC-Sierra 技术支持经理 汪利文

## 序 六

当年我看游戏《半条命：反恐精英》的二三百万行源代码时，有同事说，网传看完就只剩下半条命了。当我看到冬瓜哥这本《大话计算机》时，瞬间感觉我看完这本书可能也只剩下半条命了。并不是因为这本书的难度摧残大脑，相反，这完全是另一种感觉，它太通俗了，把事物的关系、流程、架构讲得太清晰了，信息量太大了，看完之后就是身体被掏空感。因为，我发现自己这么多年习得的仅有的一点点计算机方面的绝招、秘密在这本书里竟然一点不落的都有，而且还通俗易懂，让我瞬间感觉之前自己耗费在学习计算机上的时间，简直成了浪费人生。如果当年能够看到这本书，不知道能省下多少时间，少走多少弯路，而我现在可能会走得更远，看得更远。遗憾！

这本书知识面之广令人惊讶！从数字电路原理到简单的数值计算器，从电子管到数字集成电路，从半导体物理与器件到硅集成电路工艺基础，从FPGA到CPU到GPU，从片间总线到PCI-E总线到USB总线，从SAS接口到SCSI协议，从以太网设备到多媒体设备，从文本显示到VGA到3D渲染，从实模式到保护模式，从分页到内存管理，从OSI七层标准模型到文件系统。大量的从电子到芯片到工艺到总线到接口到操作系统到驱动的干货。

这本书知识面之深令人感到不可思议！从乱序执行、分支预测到CPU缓存一致性，从PIO到UDMA，从PCI配置空间到MSI，从点阵到矢量，从GDT到TLB，从IRQ到LAPIC到IDT，从SCSI的INQUIRY到READ CAPACITY，各种无法描述的高深干货。更重要的是，这本书还从计算机发展历史上，剖析了计算机技术发展的起点及设计思路，能让人的大脑更容易地建立起完整计算机体系和模型。阅读时不禁拍案惊奇，这是何等的奇迹，需要作者付出多少心血来凝结！

这是计算机领域的一本巨作，在市场上很难觅得一本能如此翔实讲解整个计算机体系的工作原理的书籍。不管是在校的大学生，还是一线的“攻城狮”，在书中总能找到他们感兴趣的知识点，快速领悟计算机体系里面各个组件的设计精髓。这本书像各种芯片手册、协议规范、接口文档一样，值得放在床头柜上，每天睡前看半小时，疗效远大于各种鸡汤。每看一遍，总有更多不同的收获。

冬瓜哥为这本书连续4年奋战，每天写作到凌晨，仔细推敲每个逻辑和流程。有时在三四点还能看到他的留言。这种苦心孤诣的工匠精神非常值得学习。如若我等都像冬瓜哥这样勤奋研究，中国的计算机底层产业哪能没有希望？

深圳市科力锐科技有限公司创始人之一 张勇

## 序 七

认识冬瓜哥多年，一开始只认为他是国内存储领域的专家，但是一直到这本书的出现，我真的不知道也未曾想到，他对计算机底层技术掌握的深度和广度竟然能到如此地步，这是我从业以来第一次看到如此全面而且深刻的计算机底层技术图书，我的兴奋已经超出了语言所表达出来的程度。国内外类似图书我也都曾阅读过，包括大部头偏学术化的美系图书，科普程度更高的日系图书，以及更接近工程化的国内图书，但是没有任何一本能够达到本书的广度和深度、体系化和通俗度。更何况，本书是冬瓜哥单枪匹马完成的，这更令人无法想象，不可能的任务！有句话说，说出10句容易，但是写出一句来要困难得多，而要写出精彩的一句，更是难上加难，不仅需要你对事物整体和内部细节了然于胸，更需要你可以从该事物的任何一个角度切入之后都可以把事物说得清楚，也就是做到“问不倒”的程度。更关键的是，你不仅需要了解该事物本身，你还必须了解该事物在更大框架内与其他事物之间的关联关系、因果作用流程，而能够做到上述火候的人，才能写出真正专业、通俗、深刻的东西来。

本书阅读起来有种让人持续看下去的动力，也就是所谓带入感，而这是市面上绝大多数图书不具备的。书中针对每个知识点的描述都体现着冬瓜哥的工匠精神，解释到极致，很多章节让人一读便有醍醐灌顶、茅塞顿开之感，备受启发。我作为在行业内从业多年的IT人，自诩对Windows操作系统内核了如指掌，而且自感对计算机底层原理也是信手拈来，但是看了冬瓜哥的书才发现，我之前对计算机的理解太过肤浅，很多东西根本就没有理解透彻，甚至根本没去想过竟然底层是这样实现的，有种相逢恨晚的感觉，读此书的过程，犹如武侠片中直接接受对方的功力传送一般，让我感觉瞬间提升了好几级的段位。

也只有冬瓜哥这种通俗细致到极致的讲解方式能让读者在不用花费大量精力去揣摩作者到底要表达什么的前提下，顺畅地打通大脑回路形成知识积累。

更让我感到瞠目结舌的是，冬瓜哥在本书写作的四年期间，还“顺手”写出了《大话存储后传》一书，我赶紧订购了一本，发现该书也是一种非常独特的存在，其对存储系统、计算机系统的描述也达到了空前的高度。四年，两本书，书乃是神书，人，也称得上为奇人！他做到了常人不可能也根本无法想象的事情，功力了得！

无论你是初学者还是资深从业者，我都推荐你来读一读，这是一本纯粹的计算机百科全书，你可以将它作为床头书收藏，用一分的时间得到十分的收益。初学者读此书，更是能节省你多年的摸索和积累过程。资深者读此书，更是感觉从此可以在计算机底层世界腾云驾雾，自由翱翔。本书是中国IT行业的骄傲！

@去流浪 内核开发者



# 目 录

## 开篇 苦想计算机——以使用者的名义

## 第1章 电控开关——计算机世界的基石

1.1 十余年的迷惑	4
1.2 从 $1+1=2$ 说起	4
1.2.1 用电路实现 $1+1=2$	6
1.2.2 或门	6
1.2.3 与门	7
1.2.4 非门和与非门	7
1.2.5 异或门	7
1.2.6 1位加法器	8
1.2.7 全手动1位加法机	10
1.2.8 实现多位加法器	10
1.2.9 电路的时延	13
1.2.10 新世界的新规律	13
1.2.11 先行/并行进位	14
1.2.12 电路化简和变换	15
1.3 我们需要真正可用的计算器	16
1.3.1 产生记忆	17
1.3.2 解决按键问题	18
1.3.3 数学的懵懂	22
1.3.4 第一次理解数学	25
1.3.5 第一次理解语义	27
1.3.6 七段显示数码管	30
1.3.7 野路子乘法器	31
1.3.8 科班乘法器	35
1.3.9 数据交换器Crossbar	36
1.3.10 多媒体声光按键转码器	39
1.3.11 第一次驾驭时间	41
1.4 信息与信号	44
1.4.1 录制和回放	44
1.4.2 振动和信号	49
1.4.3 低通滤波	52
1.4.4 高通滤波	56
1.4.5 带通滤波	59
1.4.6 带阻滤波	59

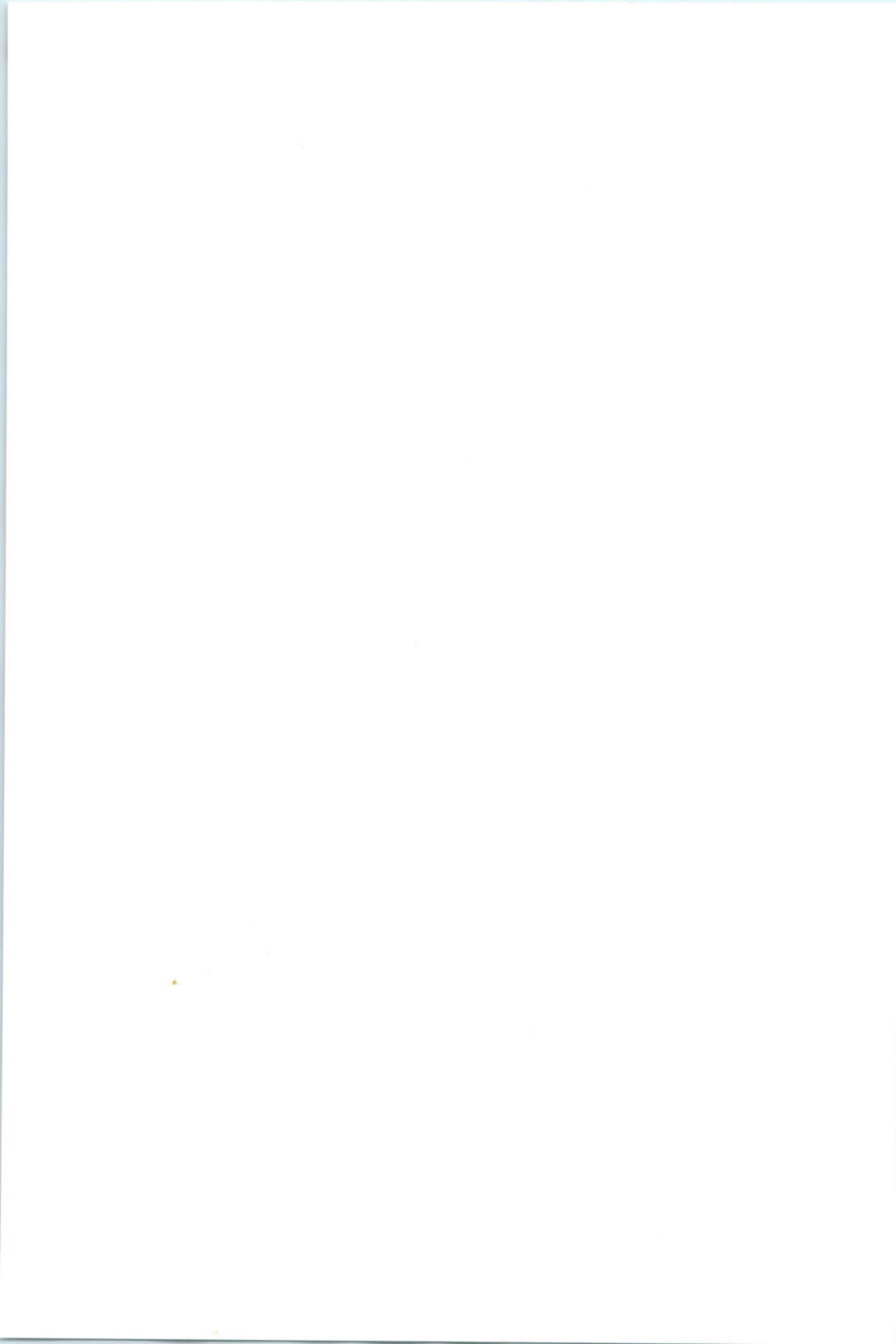
1.4.7 傅里叶变换	59
1.4.8 波动与电磁波	60
1.4.9 载波、调制与频分复用	62
1.5 完整的计算器	68
1.5.1 用时序控制增强用户体验	69
1.5.2 用MUX来实现Crossbar	71
1.5.3 奇妙的FIFO队列	73
1.5.4 同步/异步FIFO	76
1.5.5 全局共享FIFO	77
1.5.6 多路仲裁	78
1.5.7 交换矩阵	79
1.5.8 时序问题的产生与触发器	84
1.5.9 擒纵机构与触发器	86
1.5.10 擒纵机构与晶振	87
1.5.11 Serdes与MUX/DEMUX	90
1.5.12 计算离不开数据传递	90
1.5.13 几个专业概念的由来	91
1.5.13.1 输入设备	91
1.5.13.2 输出设备	91
1.5.13.3 计算单元/运算器	91
1.5.13.4 控制单元和传递通路	91
1.5.13.5 反馈	91
1.5.13.6 运算/计算	94
1.5.13.7 数据通路和控制通路	94
1.5.13.8 组合逻辑和时序逻辑	94
1.5.13.9 寄存器/Latch/触发器/锁存器	94
1.5.13.10 存储器	94
1.5.13.11 地址/指针	95
1.5.13.12 写使能信号	95
1.6 多功能计算器	95
算术逻辑单元	96

## 第2章 解脱人手——程序控制计算机

2.1 从累积计算说起	98
2.2 自动执行	101
2.2.1 将操作方式的描述转化为指令	102

2.2.2	实现那只鱿鱼——控制通路及部件	104
2.2.3	动起来吧！——时序通路及部件	108
2.2.4	半自动执行！——你得推着它跑	112
2.2.5	全自动受控执行！——不用扬鞭自奋蹄！	113
2.2.6	NOOP指令	115
2.2.7	利用边沿型触发器搭建电路	116
2.2.8	分步图解指令的执行过程	121
2.2.9	判断和跳转	123
2.2.10	再见，章鱼先生！	126
2.3	更高效的执行程序	128
2.3.1	利用循环缩减程序尺寸	128
2.3.2	实现更多方便的指令	131
2.3.3	多时钟周期指令	133
2.3.4	微指令和微码	136
2.3.5	全局地址空间	138
2.3.6	多端口存储器	138
2.3.7	多级缓存与CPU	139
2.3.8	数据遍布各处	142
2.3.9	降低数据操作粒度	145
2.3.10	取指令/数据缓冲加速	147
<b>第3章 开关的进化——从机械到芯片</b>		
3.1	从薄铁片到机械计算机	150
3.1.1	算盘和计算尺	150
3.1.2	不可编程手动机械十进制计算机	151
3.1.3	可编程自动机械十进制计算机	152
3.1.4	可编程自动电动机械二进制计算机	156
3.1.5	可编程自动全电动二进制计算机	162
3.2	电子管时代	166
3.2.1	二极电子管	166
3.2.2	三极电子管	170
3.2.3	AM广播革命	172
3.2.4	电子管计算机	174
3.2.5	石头会唱歌	177
3.3	固态革命——晶体管	179
3.3.1	P/N结与晶体管	181
3.3.2	场效应管(FET)	183
3.3.3	MOSFET	185
3.3.4	cMOS	186
3.3.5	晶体管计算机	187
3.4	制造工艺革命——集成电路	190
3.4.1	量产晶体管	190
3.4.2	跟冬瓜哥学做P/N结蛋糕	192
3.4.3	提升集成度	196
3.4.4	芯片内的深邃世界	197
3.4.5	cMOS集成电路工艺概述	200
3.4.6	cMOS工艺步骤概述	203
3.4.7	cMOS工艺详细步骤	206
3.4.7.1	热氧化	207
3.4.7.2	氮化硅积淀	207
3.4.7.3	浅槽隔离蚀刻	208
3.4.7.4	pMOS和nMOS生成	209
3.4.7.5	触点电极的生成	213
3.4.7.6	通孔和支撑柱(via)的生成	214
3.4.7.7	第一层导线连接	216
3.4.7.8	第二层导线连接	216
3.4.7.9	表面钝化	217
3.4.8	半导体工艺的瓶颈	220
3.4.8.1	寄生电容	220
3.4.8.2	静态/动态功耗	221
3.4.8.3	栅氧厚度和High-K材料	222
3.4.8.4	导线连接和Low-K材料	222
3.4.8.5	驱动能力及时延	222
3.4.8.6	时钟树	224
3.4.9	集成电路计算机	224
3.4.10	微处理器计算机	227
3.4.11	暴力拆解奔三CPU	230
3.5	存储器：不得不说的故事	232
3.5.1	机械存储器	233
3.5.1.1	声波/扭力波延迟线 (Delay Line)	233
3.5.1.2	磁鼓存储器(Drum)	234
3.5.1.3	磁芯存储器(Core)	235
3.5.2	电子存储器	238
3.5.2.1	静态随机存储器(SRAM)	238
3.5.2.2	动态随机存储器(DRAM)	241
3.5.2.3	Flash闪存	246
3.5.2.4	只读存储器(ROM)	248
3.5.3	光存储器	248
3.5.3.1	光盘是如何存储数据的	248
3.5.3.2	压盘与刻盘的区别	250
3.5.3.3	光盘表面微观结构	250
3.5.3.4	多层记录	251
3.5.3.5	激光头的秘密	251
3.5.3.6	蓝光光盘简介	252
3.5.4	不同器件担任不同角色	253
3.5.4.1	寄存器和缓存	253
3.5.4.2	主运行内存/主存	253
3.5.4.3	Scratchpad RAM	254
3.5.4.4	内容寻址内存CAM/TCAM	254
3.5.4.5	外存	257
<b>第4章 电路执行过程的进化——流水线、分支预测、乱序执行与多发射</b>		
4.1	大话流水线	260
4.1.1	不高兴的译码器	260
4.1.2	思索流水线	263
4.1.2.1	流水线的本质是并发	263

4.1.2.2 不同时延的步骤混杂	264	5.3.3 浮点数的二进制表示	344
4.1.2.3 大话队列	266	5.3.3.1 二进制浮点数转十进制小数	344
4.1.2.4 流水线的应用及优化	268	5.3.3.2 十进制小数转二进制浮点数	345
4.2 优化流水线	270	5.3.3.3 负指数和0的表示	346
4.2.1 拆分慢速步骤	270	5.3.3.4 无穷与非规格化数的表示	346
4.2.2 放置多份慢速部分	272	5.3.4 浮点数运算挺费劲	347
4.2.3 加入缓冲队列	273	5.3.5 浮点数的C语言声明	349
4.2.4 图解五级流水线指令执行过程	273	5.3.6 十六进制表示法	349
4.3 流水线冒险	273	5.4 程控多媒体计算机	350
4.3.1 访问冲突与流水线阻塞	278	5.4.1 键盘是前提	350
4.3.2 数据依赖与数据前递	281	5.4.2 搜索并显示	351
4.3.3 跳转冒险与分支预测	285	5.4.3 实现简易计算器	354
4.4 指令的动态调度	293	5.4.4 录入和保存	355
4.4.1 结构相关与寄存器重命名	293	5.4.5 简易文件系统	356
4.4.2 保留站与乱序执行	295	5.4.6 计时/定时	360
4.4.3 分步图解乱序执行	297	5.4.7 发声控制	367
4.4.4 重排序缓冲与指令顺序提交	319	5.4.8 图像显示	369
4.5 物理并行执行	320	5.4.9 网络聊天	372
4.5.1 超标量和多发射	320	5.5 程序社会	376
4.5.2 VLIW超长指令字	322	5.5.1 函数和调用	377
4.5.3 SIMD单指令多数据	322	5.5.2 设备驱动程序	381
4.6 小结	326	5.5.3 函数之间的联络站	388
		5.5.4 库和链接	397
		5.5.4.1 静态库和静态链接	399
		5.5.4.2 头文件	404
		5.5.4.3 API和SDK	406
		5.5.4.4 动态库和动态链接	409
		5.5.4.5 库文件/可执行文件的格式	410
		5.5.5 程序的执行和退出	412
		5.5.5.1 初步解决地址问题	413
		5.5.5.2 更好的人机交互方式	413
		5.5.5.3 程序的退出	414
		5.5.5.4 使用外部设备和内存	416
		5.5.6 多程序并发执行	417
		5.5.6.1 利用时钟中断来切换线程	418
		5.5.6.2 更广泛地使用中断	421
		5.5.6.3 虚拟地址空间与分页	421
		5.5.6.4 虚拟与现实的边界——系统调用	426
		5.5.7 呼唤操作系统	428
<b>第5章 程序世界——从机器码到操作系统</b>			
5.1 基本的数据结构	330		
5.1.1 数组	330		
5.1.2 数据类型与ASCII码	331		
5.1.3 结构体	333		
5.1.4 数据怎么摆放很重要	333		
5.2 高级语言	335		
5.2.1 简单的声明和赋值	335		
5.2.2 编译和编译器	336		
5.2.3 向编译器描述数据的编排方式	337		
5.2.4 高级语言编程小试牛刀	339		
5.2.5 人脑编译忆苦思甜	341		
5.3 浮点数及浮点运算	342		
5.3.1 数值范围和精度	342		
5.3.2 浮点数的用处和表示方法	343		



开篇

# 苦想计算机

以使用者的名义

