

GOTOP

計算機結構(上冊)

計量接近

COMPUTER ARCHITECTURE
A
QUANTITATIVE APPROACH



JOHN L HENNESSY
&
DAVID A PATTERSON

賴飛熊 譯

正式獲得 Morgan Kaufmann 出版社授權中文地區獨家發行

計算機結構

(上冊)

計量接近

JOHN L HENNESSY & DAVID A PATTERSON

賴飛鵬 譯



碁峯資訊股份有限公司 印行

碁峯資訊股份有限公司已聘任本律師為常年
法律顧問，如有侵害其著作權、信用名譽權
利及其他一切法益者，本律師當依法保障之



林 天 平 律 師

國立中央圖書館出版品預行編目資料

計算機結構；計量接近／John L. Hennessy
David A. Patterson 著；賴飛熊編譯，台北市；
碁峯資訊，1991 [民80]

冊；公分，

譯自：Computer architecture

參考書目：面

含索引

ISBN 957-641-072-X (上冊；平裝)

1.電腦.....設計

471.52

80001072

電腦結構系列叢書

CE001

編 著 賴飛熊

發行人 廖文良

發行所 碁 峯 資 訊 股 份 有 限 公 司

台北市南港路三段50巷20號2樓

電話／ (02) 788-2408

傳真／ (02) 788-1031

印刷所 建 發 彩 色 印 刷 有 限 公 司

台北縣中和市中山路二段366巷13號

版 次 1991年4月初版

1991年11月二版

劃 撥 帳戶／碁峯資訊股份有限公司

帳號／14244383

定 價 NT\$ 360 HK\$ US\$

出版登記證：局版台業字第4869號

版權所有 翻印必究



註冊商標

底下這些註冊商標是下面這些機構所擁有的財產。

Trademarks

The following trademarks are the property of the following organizations:

Alliant is a trademark of Alliant Computers.

AMD 29000 is a trademark of AMD.

TeX is a trademark of American Mathematical Society.

AMI 6502 is a trademark of AMI.

Apple I, Apple II, and Macintosh are trademarks of Apple Computer, Inc.

ZS-1 is a trademark of Astronautics.

UNIX and UNIX F77 are trademarks of AT&T Bell Laboratories.

Turbo C is a trademark of Borland International.

The Cosmic Cube is a trademark of California Institute of Technology.

Warp, C.mmp, and Cm* are trademarks of Carnegie-Mellon University.

CP3100 is a trademark of Conner Peripherals.

CDC 6600, CDC 7600, CDC STAR-100, CYBER-180, CYBER 180/990, and CYBER-205 are trademarks of Control Data Corporation.

Convex, C-1, C-2, and C series are trademarks of Convex.

CRAY-3 is a trademark of Cray Computer Corporation.

CRAY-1, CRAY-1S, CRAY-2, CRAY X-MP, CRAY X-MP/416, CRAY Y-MP, CFT77 V3.0, CFT, and CFT2 V1.3a are trademarks of Cray Research.

Cydra 5 is a trademark of Cydrome.

CY7C601, 7C601, 7C604, and 7C157 are trademarks of Cypress Semiconductor.

Nova is a trademark of Data General Corporation.

HEP is a trademark of Denelcor.

CVAX, DEC, DECsystem, DECstation, DECstation 3100, DECsystem 10/20, fort, LP11, Massbus, MicroVAX-I, MicroVAX-II, PDP-8, PDP-10, PDP-11, RS-11M/IAS, Unibus, Ultrix, Ultrix 3.0, VAX, VAXstation, VAXstation 2000, VAXstation 3100, VAX-11, VAX-11/780, VAX-11/785, VAX Model 730, Model 750, Model 780, VAX 8600, VAX 8700, VAX 8800, VS FORTRAN V2.4, and VMS are trademarks of Digital Equipment Corporation.

BINAC is a trademark of Eckert-Mauchly Computer Corporation.

Multimax is a trademark of Encore Computers.

ETA 10 is a trademark of the ETA Corporation.

SYMBOL is a trademark of Fairchild Corporation.

Pegasus is a trademark of Ferranti, Ltd.

Ferrari and Testarossa are trademarks of Ferrari Motors.

AP-120B is a trademark of Floating Point Systems.

Ford and Escort are trademarks of Ford Motor Co.

Gnu C Compiler is a trademark of Free Software Foundation.

M2361A, Super Eagle, VP100, and VP200 are trademarks of Fujitsu Corporation.

Chevrolet and Corvette are trademarks of General Motors Corporation.

HP Precision Architecture, HP 850, HP 3000, HP 3000/70, Apollo DN 300, Apollo DN 10000, and Precision are trademarks of Hewlett-Packard Company.

S810, S810/200, and S820 are trademarks of Hitachi Corporation.

Hyundai and Excel are trademarks of the Hyundai Corporation.

432, 960 CA, 4004, 8008, 8080, 8086, 8087, 8088, 80186, 80286, 80386, 80486, iAPX 432, i860, Intel, Multibus, Multibus II, and Intel Hypercube are trademarks of Intel Corporation.

Inmos and Transputer are trademarks of Inmos.

Clipper C100 is a trademark of Intergraph.

IBM, 360, 360/30, 360/40, 360/50, 360/65, 360/85, 360/91, 370, 370/135, 370/138, 370/145, 370/155, 370/158, 370/165, 370/168, 370-XA, ESA/370, System/360, System/370, 701, 704, 709, 801, 3033, 3080, 3080 series, 3080 VF, 3081, 3090, 3090/100, 3090/200, 3090/400,

3090/600, 3090/600S, 3090 VF, 3330, 3380, 3380D, 3380 Disk Model AK4, 3380I, 3390, 3880-23, 3990, 7030, 7090, 7094, IBM FORTRAN, ISAM, MVS, IBM PC, IBM PC-AT, PL.8, RT-PC, SAGE, Stretch, IBM SVS, Vector Facility, and VM are trademarks of International Business Machines Corporation.

FutureBus is a trademark of the Institute of Electrical and Electronic Engineers.

Lamborghini and Countach are trademarks of Nuova Automobili Ferruccio Lamborghini, SPA.

Lotus 1-2-3 is a trademark of Lotus Development Corporation.

MB8909 is a trademark of LSI Logic.

NuBus is a trademark of Massachusetts Institute of Technology.

Miata and Mazda are trademarks of Mazda.

MASM, Microsoft Macro Assembler, MS DOS, MS DOS 3.1, and OS/2 are trademarks of Microsoft Corporation.

MIPS, MIPS 120, MIPS/120A, M/500, M/1000, RC6230, RC6280, R2000, R2000A, R2010, R3000, and R3010 are trademarks of MIPS Computer Company.

Delta Series 8608, System V/88 R32V1, VME bus, 6809, 68000, 68010, 68020, 68030, 68882, 88000, 88000 1.8.4m14, 88100, and 88200 are trademarks of Motorola Corporation.

Multiflow is a trademark of Multiflow Corporation.

National 32032 and 32x32 are trademarks of National Semiconductor Corporation.

Ncube is a trademark of Ncube Corporation.

SX/2, SX/3, and FORTRAN 77/SX V.040 are trademarks of NEC Information Systems.

NYU Ultracomputer is a trademark of New York University.

VAST-2 v.2.21 is a trademark of Pacific Sierra.

Wren IV, Imprimis, Sabre, Sabre 97209, and IPI-2 are trademarks of Seagate Corporation.

Sequent, Balance 800, Balance 21000, and Symmetry are trademarks of Sequent Computers.

Silicon Graphics 4D/60, 4D/240, and Silicon Graphics 4D Series are trademarks of Silicon Graphics.

Stellar GS 1000, Stardent-1500, and Ardent Titan-1 are trademarks of Stardent.

Sun 2, Sun 3, Sun 3/75, Sun 3/260, Sun 3/280, Sun 4, Sun 4/110; Sun 4/260, Sun 4/280, SunOS 4.0.3c, Sun 1.2 FORTRAN compiler, SPARC, and SPARCstation 1 are trademarks of Sun Microsystems.

Synapse N+1 is a trademark of Synapse.

Tandem and Cyclone are trademarks of Tandem Computers.

TI 8847 and TI ASC are trademarks of Texas Instruments Corporation.

Connection Machine and CM-2 are trademarks of Thinking Machines.

Burroughs 6500, B5000, B5500, D-machine, UNIVAC, UNIVAC I, UNIVAC 1103 are trademarks of UNISYS.

Spice and 4.2 BSD UNIX are trademarks of University of California, Berkeley.

Illiac, Illiac IV, and Cedar are trademarks of University of Illinois.

Ada is a trademark of the U.S. Government (Ada Joint Program Office).

Weitek 3364, Weitek 1167, WTL 3110, and WTL 3170 are trademarks of Weitek Computers.

Alto, Ethernet, PARC, Palo Alto Research Center, Smalltalk, and Xerox are trademarks of Xerox Corporation.

Z-80 is a trademark of Zilog.

引言

C. Gordon Bell

我很榮幸爲這本具有里程碑意義的好書寫個引言。

作者們所作的貢獻已經超過 Thomas 在微積分以及 Samuelson 在經濟學上的貢獻。他們已經爲計算機結構及設計提供了一本最具決定性的課本及參考書。爲了增進計算學的發展，我敦促出版商們能撤回有關這方面的書籍，使得新一代的結構師/工程師能儘速出現。這本書不會消除半導體公司的微理機的複雜度和錯誤，但是它可以促進其教育工程師使得他們能設計出更好的微處理機。

本書提供了分析單處理機所需的重要工具。它告訴實作工程師科技如何隨著時間產生變化並提供他們設計時所要的經驗常數。它引導設計者作功能上的考慮，在這點上和從前設計者，想把一串結構都集中於單一的設計比起來，應該算是一種較受歡迎的差別。

作者們在各類型機器中選出最重要的一種作爲分析和比較的標準：大型機器 (IBM 360) 迷你級 (DEC VAX) 以及微電腦/PC 級 (Intel 80x86)。利用這個基礎，他們指出未來的主流是較簡單的管線式和平行處理機。這些新的技術被視爲在教學上有用的 (DLX) 處理機的變型，而且其也很可能實現的。作者們由測量每個時計週期完成的工作 (平行性) 和每一工作所要花的時間 (效率及延遲) 來強調這和技術無關。這些方法將可能在新的結構和平行性方面增進研究的品質。

因此，對於從事於計算機結構或硬體工作的人，包括結構設計師，晶片和計算機系統工程師及編譯器和作業系統工程師而言，了解本書是有必要的。對於專為管線和向量電腦撰寫程式的軟體工程師特別有用。管理人員和行銷人員了解本書中各章的誤謬及陷阱也會受益良多。很多計算機——有時候，整個公司——的失敗可以歸因於工程師疏於計算機的微妙處。

開始的前兩章由量度和了解價格/效能來說明計算機設計中最精華之處。這些概念將應用在指令集結構以及它是如何被測量的情形。此兩章討論處理機的實作，並且包括有關設計管線以及向量處理機的技巧。後面的章節也將討論記憶體架構以及往往被忽略的輸入/輸出。最後一章列出和機器有關的機會與問題以及未來的方向。現在我們需要他們寫一本有關如何設計這些機器的書。

這本書為其它的立下了典範，而且在可預見的未來不致於被取代，原因是作者們所具有的領悟力、經驗、風格及獨特性。由於他們在 RISC 上的研究（RISC 這個字是 Patterson 造的）刺激了計算機結構的重大改變。他們在大學的研究促成了 MIPS 和 Sun Microsystems 的產品發展，並建立了 1990 年代重要的計算機結構。他們已完成分析，評估取捨，致力於編譯器和作業系統，而且看到他們的機器在實用中大展雄風。更重要的是，身為教授，他們知道這本書的教法是正確的（他們經由史無前例的 Beta 測試課程請教他人的意見）。我知道它將是計算機系統上十年內最好的書。也許它最偉大的成就將是激勵其它偉大的結構師和高階系統的設計者

(資料庫、通訊系統、語言及作業系統) 在他們的領域裡寫出類似的書。

我從此書得到許多快樂也學到不少東西，相信你也會如此。

— C. Gordon Bell

中文版序

我們一直努力的方向是：讓學生及研究人員有中文的書可看。

吳麟之，楊繼堯，林世岳，康仁財，周應欽，吳學晃，和賴飛羅共同完成本書，祇是其中各人貢獻有別。

誠懇歡迎將本書中錯誤不當之處寄台大電機/資訊系賴飛羅，謝謝。

賴飛羅 1991,2 月

序

我在 1962 年開始用這樣的章節順序寫一本書，但很快地我發現對主題深入的探討遠較輕輕帶過來得重要。所造成的篇幅意味著每章本身包含足夠的材料可以作為一個學期的課程，所以必須分冊出版．．．

Donald Knuth, The Art of Computer Programming.

第一冊之序 (1968)

為什麼我們寫這本書

歡迎來閱讀這本書！我們非常高興有機會與你溝通！在計算機結構中很多令人振奮事物發生，但我們覺得目前的材料不足於使人了解這些。這不是一個不能工作的紙機器的悲慘科學。不！它是個敏銳智慧興趣的訓練方法，需要在市場和成本/效能之間取得平衡，常常導致輝煌的失敗和某些顯著的成功。看到數以千計的人在使用你設計的機器，此種興奮是無以倫比的。

我們寫這本書的主要用意是要幫助人們改變他們學習計算機結構的方式。我們相信這個領域已經從僅傳授定義和歷史的資訊變成可以從真實的例子和測定中學習。

我們認為這本書除了適合作為計算機結構的教科書，也可以當作職業工程師與計算機設計師的入門書或參考書。這本書使用一種方式使得計算機結構不再神秘難悟——它強調在成本/效能上的取捨作量化的接近。這並不意味著一個過度的形式方法，而只是一個根據於良好工程設計的簡單方法。為了達成這個目標，我們收集了很多實際機器的資料，如此讀者可以了解設計上定性及定量方面的取捨。這種解決方式有一大部分可以在每章最後的問題集之中找到，且同時在本書所附的軟體之中也有。這些習題長久以來已經成為科學及工程教育的核心。

隨著教授計算機結構定量基礎的出現，我們覺得這個領域具有潛力可以成為其它學科嚴謹的定量基礎。

主題的選擇與組織

我們對主題的選擇很審慎，因為在這個領域有許多有趣的觀念。我們並不想對目前實際上或文獻上的每一種結構作完整的調查，而是選擇那些最可能被應用在任何新機器上的計算機結構核心觀念。在做這此決定時，一個主要的標準是強調那些已經被詳細地以定量方式討論過的項目。例如，我們在最後一章以前將重點放在單一處理機上，而祇在最後一章描述以匯流排為導向，共用記憶體的多處理機。這一類的計算機結構與我們的標準祇有少許的吻合，但我們相信它的數量將增加許多。

直到最近這一類的結構才開始被以量化的方式研究，要是再早一些時間，甚至這個也不會被包含在內。雖然大型的平行處理機在未來非常

重要，但我們覺得在任何實作工程師嘗試去建造任何組織上更好的計算機以前，對於單一處理機設計原理有紮實的基礎是必要的，尤其是建造一個包括多個單一處理機的機器。

熟悉我們研究主題的讀者可能會認為本書只提到精簡指令集電腦。這是對本書內容的一種錯誤判斷。我們希望在這本書中所提到的設計原理和量化資料會限制結構風格的討論於“更快”或“更便宜”的術語，而不是像以前的辯論。

我們所選擇的材料在一致的結構下延展，在每章裡都是遵照這種方式。解釋完一章中的觀念之後，我們用“綜合”這一節來說明在實際機器上這些觀念是如何地結合運用。接著有一節稱為“謬誤與陷阱”是用來使讀者從其它人的錯誤中學習。我們會展示那些有時就算你知道但也難避免的常見誤解及結構上的陷阱。每一章都是以“結論”然後接著“歷史展望及參考文獻”來作結尾，後者試著對每一章裡的觀念証明其來源，並說明這些發明的歷史背景，展示電腦設計的人類戲劇。它同時也提供計算機結構的學生想要從事研究的參考文獻。假如時間允許的話，我們推薦你讀一些在這幾節中提到的有關這個領域的經典之作。能從這些開創者口中聽到這些觀念是愉快又具教育性的。每一章後面都有習題，總共超過 200 個習題，從祇須一分鐘的複習題到一學期的專題。

稍為看一下目錄即可知道各章無論深度與份量都不同。例如在前面幾章，爲了使大家能有共同的術語及背景，我們有較多的基礎材料。在和同事談論時我們發現有關讀者的背景，他們能夠吸收新材料的速度，甚至這些觀念應依何種次序被介紹等，其中意見都有很大的差別。我們假設讀者熟悉邏輯設計而且接觸過至少一種指令集，同時具備基本的軟體概念。各章的進度並不相同，前半部的步伐較爲溫和。組織上決定的形成是依照書評者的建議。最後組織的選定是只要小部分的修改就能適合大多數的課程（除了 Berkeley 和 Stanford 之外）！根據你的目標，我們有三種研讀的方式：

介紹性程度：1,2,3,4,5,6.1-6.5,8.1-8.5,9.1-9.5,10 章及附錄 A.1-A.3。

中間程度：1,2,3,4,5,6.1-6.6,6.9-6.12,8.1-8.7,8.9-8.12,9,10 章及附錄 A 和 E.(跳過 A.9 除法)

高等程度：研讀每個部分，但第 3 及第 5 章，9.3-9.4 節與附錄 A.1-A.2 爲複習部分，可大略瀏覽。

嗯！這幾章並沒有唯一最好的次序。討論指令集之前（第 3.4 章）最好能知道管線（第 6 章），但是要在不了解管線處理的整個指令集之前要了解是有困難的。我們自己在這材料以前的版本中也曾試過不同的次序，每一種都有其長處。因此，這些材料是以它能用許多方式研讀下寫成的，在 18 個學校中成功地以不同章節次序的 Beta 測試課程中，這種組織方式證明它有足夠的彈性。某些課程摘要出現於教師手冊裡。這裡

唯一的限制是某些章必須要按照以下的次序：

第 1, 2 章

第 3, 4 章

第 5, 6, 7 章

第 8, 9 章

讀者應該由第 1, 2 章讀起，而到第 10 章結束，其它的可以任何的次序研讀。唯一的條件是如果你在讀第 3, 4 章之前，先讀完第 5, 6, 7 章，你應該先略過 4.5 節，因為在這節所提到的 DLX 指令集是用來說明在那 3 章裡所用到的觀念。有關 DLX 簡潔的描述及硬體描述符號可以在封面裡頭找到。(我們選擇修改過的 C 語言作為硬體描述語言，因為它很簡潔，而且懂得這種語言的人很多，以及並沒有那一種在書本中的共同描述語言可以稱得上是必備的。)

我們力勸每個人都研讀第 1, 2 章。即使對初學者而言，第一章也很容易懂，可以很快地唸完。它提出可以作為引導後面章節取捨所要用的許多重要原理。很少人會略過第 2 章效能那一節，但有些人可能想省略成本這一節而直接到後面幾章的“技術性問題”。千萬不要這樣。計算機設計幾乎總是要在成本和效能之間取得平衡，而很少人了解價格和成本之間的關係，或者如何在減少效能損失的原則下，降低價格和成本 10%。第二章中有關成本那一節所奠定的基礎使得成本/效能成為本書後半部所有取捨的根據。但是從另外角度來看，有些主題留著當作參

考文獻或許更好。如果本書是作為一門課的部分教材使用，講課時可以展示在計算機設計上做決策時該如何使用這些章節裡的資料。第 4 章或許就是最好的例子。依你的背景而定，可能你已經熟悉這些材料的某些部分，但我們試著在每個主題中加入一些新的口味。例如，第 5 章的微程式那一節對大多數人祇是個複習，但是有關控制上中斷產生的重大影響的描述，可能在其它書中很少見。

我們也投注特別的心力使得此書能吸引實務工程師及較先進的研究生的興趣。較深入的主題可以在以下找到：

管線在第 6 章 (6.7 和 6.8 節，幾乎佔了本章的一半)

向量在第 7 章 (整章)

記憶體階層設計在第 8 章 (8.8 節大約佔了第 8 章的 1/3)

未來的方向在第十章 (10.7 節大約佔了第 10 章的 1/4)

限於時間壓力的讀者可能想要略過某些章節。為了讓省略簡便一些，第 6，8 章的”綜合與更深入的主題無關。

你可能已經注意到有關浮點數的討論是放在附錄 A 而非某一章。由於它和其它材料無關，我們的做法是根據調查有相當大百分比的讀者在其它地方接觸過浮點數，因而我們將它放在附錄裡。其它的附錄是為計算機專業人士和習題的參考而收錄的。附錄 B 包含了三種有名的機器：

the IBM 360，Intel 8086，和 the DEC VAX 的指令。集附錄 C 和 D 提供這些機器加上 DLX 在真實程式上的指令混合。根據指令頻率或時間頻率而測量得到。附錄 E 則提供了數種最新的結構更詳細的比較。

作業，計劃和軟體

教材中有選擇性也在習題部分反應出來。每個問題的括弧 (< 章、節 >) 表示主要和回答問題有關的本文那一節。我們希望藉此幫助讀者避開他們並未讀到的章節的習題，同時也提供複習的來源。我們採用 Donald Knuth 評估習題的技巧。這種技巧評估一個問題該花多少心力：

[10] 1 分鐘 (研讀即了解)

[20] 15-20 分鐘完成全部的答案

[25] 1 個小時寫完全部的答案

[30] 短的程式計劃：少於 1 整天的程式時間

[40] 重要的程式計劃：2 個星期的時間

[50] 學期專題 (2-4 星期，由兩人完成)

[討論] 與其它對計算機結構有興趣的人討論的主題。

爲了使本書在大學課程中更易於使用，本書也附帶教師手冊及軟體。軟體是一捲 UNIX tar 磁帶，裡面包含基準程式，快取記憶體追蹤程式，快取記憶體與指令模擬器，以及一個編譯器。有興趣的讀者可以經由 Internet 從 max.Stanford.eda 以不具名的 FTP 方式取得這個軟體。這個拷貝也可與 Morgan Kaufmann 聯繫取得，電話是 (415)578-9911 (複製及處理費用將算在訂貨費中)。

結論

你可能在一段文章中看到雄性的形容詞或代名詞，由於英文中並沒有性別——中性的代名詞或形容詞，因此我們發現自己在選擇使用標準的稱呼，一致性地使用陽性詞類，交替地使用陰性、陽性的詞類，或者文法上不通的第三人稱複數之間，處於非常無奈的地位。我們試著去減少這個問題發生的次數，但是當使用代名詞是無可避免時，我們將會在各章之中交替性別的使用。我們的經驗是這樣的處理方式不會傷到任何人，不像標準的作法那樣會傷人。

如果你讀了底下感謝一節，你會發現我們盡力地在改正錯誤。由於一本書會經歷多次印刷，我們有機會做更多的訂正。如果你發現任何依然存在的錯誤時，請以電子郵件 (bugs2 @vsop.stanford.edu) 或以低級技術郵件寫上在版權頁上的地址和出版商聯繫。第一個報告錯誤的人將可得到 \$1.00 獎金。

最後，本書不平常的是作者名字並沒有嚴格的排列次序。在本書裡及廣告上，大約有一半的次數你會見到 Hennessy 和 Patterson，而在另一半的次數是 Patterson 和 Hennessy。你甚至會在 Book in Print 著書目錄的出版品上看到這兩種列印方式。（當我們參考這本書時，將交替作者的次序。）這樣反映出這本書真實的合作本質：在一起時，我們腦力激盪研究觀念和表現的方式，然後個別地寫出這些章節的一半，並且各自評論對方的草稿。（事實上，到最後頁數的計算，發現兩人竟然寫了相同的頁數！）除了以含糊的方式加以隱藏之外，我們想不出任何公平的方法來反映這種真正的合作——一種可能對某些作者有幫助但是使得圖書管理員迷惑的行為，因此，對於你將讀到的內容，我們共同負起一樣的責任。

John Hennessy David Patterson 1 月,1990