

# 計算機組織與結構概論

Introduction to  
Computer Organization  
and Architecture

## 第一章 計算機系統概論

- 1.1 什麼是計算機
- 1.2 計算機的種類
- 1.3 計算機發展的歷史與沿革
- 1.4 摩爾（Moore）定律
- 1.5 計算機系統運作的架構
- 1.6 計算機硬體結構
- 1.7 指令集電腦的概念
- 1.8 近代計算機重要發展時間表

本著作含書附光碟之內容（不含 GPL 軟體），僅授權合法持有本書之讀者（包含個人及法人）非商業用途之使用，切勿置放在網路上播放或供人下載，除此之外，未經授權不得將全部或局部內容以任何形式重製、轉載、散佈或以其他任何形式、基於任何目的加以利用。

著作權所有 © 旗標出版股份有限公司

### 1.1 什麼是計算機

#### ✖ 計算機是：

- + 接受特定指令、並按照預先排定的方式或邏輯來執行這些指令的機器。
- + 實際運作時，電腦會接受一些資訊，然後用人們預先設計好的規則來處理，之後把結果輸出或儲存下來。

#### ✖ 電腦的兩大特性：

- + 精確
- + 快速

### 1.1 計算機的種類

#### ✖ 依適用範圍分類

#### ✖ 依所處理的資料型態分類

#### ✖ 依處理能量來分類

#### ✖ 依使用場合來分類

#### 1.2.1 依適用範圍分類

#### ✖ 通用型計算機（general purpose computer）

- + 一般人較熟知的「電腦」
- + 針對不同的工作或用途安裝所需要的軟體
- + 彈性大

#### ✖ 專用型計算機（special purpose computer）

- + 專為提供某種特殊功能而設計的計算機
- + 硬體、軟體都不能任意更動
- + 滿足特定的目的

## 1.1 計算機的種類

- ✖ 依適用範圍分類
- ✖ 依所處理的資料型態分類
- ✖ 依處理能量來分類
- ✖ 依使用場合來分類

## 1.2.2 依所處理的資料型態分類

- ✖ 數位式計算機 (digital computer)
  - + 處理經過數位化 (digitized) 的資料
- ✖ 類比式計算機 (analog computer)
  - + 處理未經數位化的連續性資料
- ✖ 混合式計算機 (hybrid computer)
  - + 綜合以上二種計算機 (即數位式計算機與類比式計算機) 之資料處理原理所設計的計算機

## 1.1 計算機的種類

- ✖ 依適用範圍分類
- ✖ 依所處理的資料型態分類
- ✖ 依處理能量來分類
- ✖ 依使用場合來分類

## 1.2.3 依處理能量來分類

- ✖ 超級電腦 (super computer)
  - + 速度要求極端嚴苛、資料量極其龐大的運算需求
  - + 價格超高、維持運作不易
  - + 『深藍』 (deep blue)、CRAY-2





### 1.2.3 依處理能量來分類

- ✖ 大型電腦或主機型電腦 (mainframe computer)
  - + 速度快、記憶容量極大、功能多
  - + 多半安置在機房，透過終端機或網路供多人使用
  - + 主機型電腦
- ✖ 中型電腦 (medium computer)
  - + 能量較大型電腦遜色，但也已具有相當強大的功能

### 1.2.3 依處理能量來分類

- ✖ 迷你型電腦 (mini computer)
  - + 小型電腦，規格上較中型電腦又小了一號
  - + HP3000、VAX-11、PDP-11
  - + 主要市場是小型企業或學術單位的實驗室
- ✖ 微電腦 (micro computer)
  - + 運算核心為一或多顆微處理器
  - + 一般人最常使用的電腦類型 (PC)，應用最廣、最經濟的一類
  - + 又可分為桌上型、筆記型、掌上型等



### 1.1 計算機的種類

- ✖ 依適用範圍分類
- ✖ 依所處理的資料型態分類
- ✖ 依處理能量來分類
- ✖ 依使用場合來分類

### 1.2.4 依使用場合來分類

- ✖ 伺服器 (server)
  - + 比較大型的電腦，可透過終端機或網路供多位使用者同時連線使用。
  - + 處理個人電腦所無法處理的龐大運算，或用來管理公用的軟硬體資源，並提供個別使用者所需要的服務。
  - + 這類電腦一般都安置在機房中，由專人負責維護與管理。

#### 1.2.4 依使用場合來分類

##### ✖ 桌上型電腦 (desktop computer)

- + 或稱為個人電腦，通常放在個人的工作環境中，使用者可以輕易地接觸到它的硬體，最常見就是在書桌或辦公桌上。
- + 不限於只能擺在桌上的電腦，事實上筆記型電腦也歸於此類。
- + 擁有獨立的系統，不僅可以單獨運作，也可以連上網路去分享更廣大的資源。

#### 1.2.4 依使用場合來分類

##### ✖ 嵌入式電腦 (embedded computer)

- + 為特殊目的所開發的一種電腦系統，通常裝設在某些裝置之中，用來控制這些裝置、或提供所需的服務。
- + 通常嵌入式電腦的體積較小，且不能任意更改其硬體架構或軟體系統。
- + 嵌入式電腦一般只做特定運算，所以它只要能加快該類運算的速度即可，而不會考慮額外的功能或效能。

#### 1.3 計算機發展的歷史與沿革

##### ✖ 電子計算機的起源—機械式的時代 (1642~1945)

##### ✖ 第一代計算機 — 真空管時代 (1946~1953)

##### ✖ 第二代計算機 — 電晶體時代 (1954~1965)

##### ✖ 第三代計算機 — 積體電路時代 (1965~1980)

##### ✖ 第四代計算機—VLSI超大型積體電路時代 (1980~????)

#### 1.3.1 電子計算機的起源—機械式的時代 (1642~1945)



查爾斯·巴貝奇



愛達女士



差分機



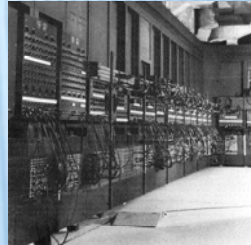
### 1.3.2 第一代計算機 — 真空管時代 (1946~1953)



真空管

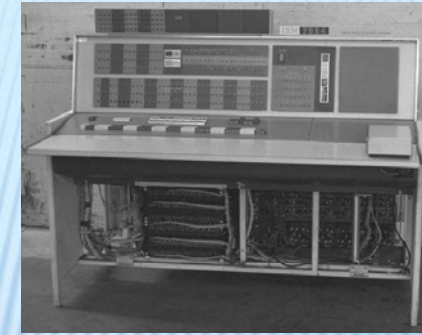


Eckert與Mauchly



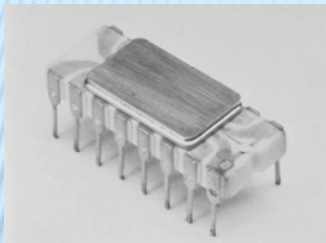
ENIAC計算機

### 1.3.3 第二代計算機 — 電晶體時代 (1954~1965)

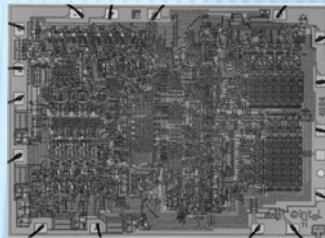


IBM在7094型計算機

### 1.3.4 第三代計算機 — 積體電路時代 (1965~1980)



Intel 4004處理器外觀

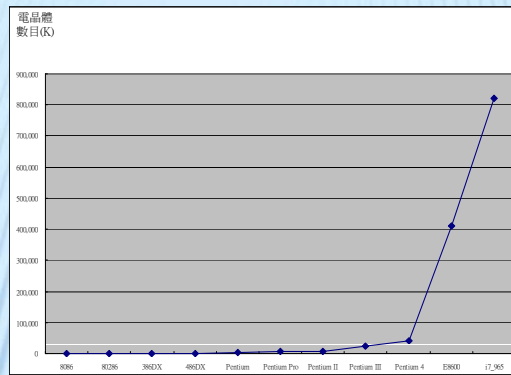


Intel 4004處理器顯微照像

### 1.3.5 第四代計算機 — VLSI超大型積體電路時代 (1980~????)

- ✖ 現今我們所看到的各種電腦處理器，通通都已經是VLSI時代之後的產品。
- ✖ 目前積體電路的發展已經進一步跨入了所謂奈米（nanometer）的時代。
- ✖ 更精密的製程、更小的晶片、更多的電晶體數量，必能夠帶給我們更強大且效率更高的處理器。

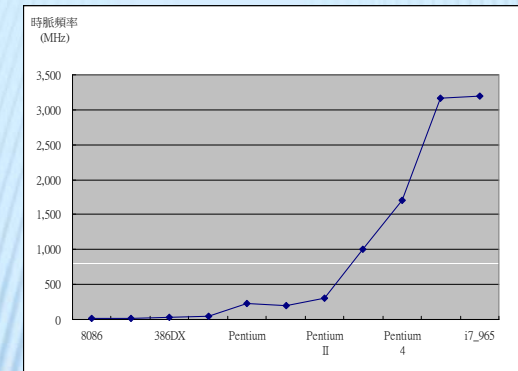
## 1.4 摩爾（Moore）定律



| Intel 處理器 | 8086 | 80286 | 386 DX | 486 DX | Pentium | Pentium Pro | Pentium II | Pentium III | Pentium 4 | E8600  | i7_965 |
|-----------|------|-------|--------|--------|---------|-------------|------------|-------------|-----------|--------|--------|
| 電晶體數目(K)  | 29   | 120   | 275    | 1180   | 3100    | 5500        | 7500       | 24000       | 42000     | 410000 | 820000 |

Intel處理器的電晶體數目

## 1.4 摩爾（Moore）定律



| Intel 處理器  | 8086 | 80286 | 386DX | 486DX | Pentium | Pentium Pro | Pentium II | Pentium III | Pentium 4 | E8600 | i7_965 |
|------------|------|-------|-------|-------|---------|-------------|------------|-------------|-----------|-------|--------|
| 時脈頻率 (MHz) | 10   | 12.5  | 33    | 50    | 233     | 200         | 300        | 1000        | 1700      | 3160  | 3200   |

Intel各世代晶片時脈成長過程

## 1.5 計算機系統運作的架構

- ✖ 通常電腦系統依照其作業的邏輯性，總共可以分為七種層次，每一層都可獨立用來完整描述電腦的功能或運作。
- ✖ 上一層或下一層之間有直接的對應關係：上層將所承接到的工作交付給下層去做，而下層則可實現上層所需的功能或運作。
- ✖ 任一層的變動卻不會影響到其上、下兩層的內容。這樣的設計特性稱之為階層（layer）法則。

### 1.5.1 七層架構的模型



計算機系統的七層架構



### 1.5.2 階層七：『使用者』層

- ✖ 使用者層是直接面對使用者的一個階層，也就是最接近「人」的階層。
- ✖ 使用者階層是整個計算機架構中最高階的，它提供方便的介面供人使用，所有指派的工作都是由使用者直接下達。
- ✖ 文字編輯器（text editor，如記事本）、文書處理器（word processor，如Word）、試算表（spreadsheet，如Excel）、資料庫系統（database system，如Access）...等。

### 1.5.3 階層六：『高階語言』層

- ✖ 高階語言是一種近似人類語言的計算機語言，其語言的邏輯也與人類的思維差不多，故使用「高階」來表示。
- ✖ 透過高階語言所撰寫的程式稱為原始程式碼（source code），電腦系統必須能精確地依照高階語言所下的每個指令來執行正確的動作。
- ✖ 一般人所熟悉的高階語言：
  - + C、C++、C#、Java、Visual Basic等。

### 1.5.4 階層五：『組合語言』層

- ✖ 更「接近」電腦的語言 - 組合語言（assembly language）。
- ✖ 程式師以高階語言寫好後，再透過一種稱做編譯器（compiler）的程式將原始程式碼翻譯為組合語言碼程式。
- ✖ 隨著計算機架構的不同、提供的基本運算不同，所使用的組合語言也不一樣，所以用來將高階語言轉換為組合語言的組譯器也因電腦機型而各不相同。
- ✖ 不同架構的計算機的組合語言程式彼此不具相容性（compatibility）。

### 1.5.5 階層四：『系統程式』層

- ✖ 系統程式層包含了：
  - + 直接控制計算機硬體的作業系統（operating system）。
  - + 將組合語言轉換為機器語言的組譯器（assembler）。
  - + 將機器語言程式連結（link）並載入（load）記憶體並管理其執行過程的程式。

### 1.5.6 階層三：『機器』層

- ✖ 所有機器指令所成的集合就稱為它的指令集（Instruction Set，IS）。
- ✖ 指令的種類多寡與格式會影響指令執行的週期（cycle）、指令格式（instruction format）的編碼，還有指令的定址模式（addressing mode）等等。

| 處理器類型         | 指令集版本  | 年代        |
|---------------|--|-----------|
| HP PA-RISC    | v1.1、v2.0  | 1986-1996 |
| SGI MIPS      | MIPS I、II、III、IV、V   | 1986-1996 |
| Sun Sparc     | v8、v9  | 1987-1995 |
| Digital Alpha | v1、v3  | 1992-1997 |
| Intel         | 8086、80286、...、Pentium、PentiumPro、Pentium II、III、IV、Intel 64、... | 1978-2000 |

各大硬體廠商所推行的指令集架構

### 1.5.7 階層二：『控制』層

- ✖ 透過控制電路的訊號，便可以指揮特定的硬體運算單元（function units，FU）來完成工作。
- ✖ 運算單元整體運作的協調是藉由CPU中的控制單元（control unit，CU）所完成。
- ✖ 控制單元可以靠硬體接線（hardwired），或是用微指令（micro instruction）寫成微程式（microprogram）的方式來實現。

### 1.5.8 階層一：『數位邏輯』層

- ✖ 在這個階層中所看到的，就是電腦處理器實際的基礎電路元件，它們是計算機最基本的單元。
  - + 電阻（resistor）、電容（capacitor）、接線（wire）、邏輯閘（logic gates）
- ✖ 計算機功能的多寡與強弱決定了電路的複雜程度。
- ✖ 電路是以數位邏輯（digital logic）的方式設計，期中的議題包含：
  - + 布林代數（Boolean algebra）
  - + 基本邏輯閘（fundamental logic gates）
  - + 組合邏輯（combinational logic）
  - + 序向邏輯（sequential logic）

### 1.6 計算機硬體結構

- ✖ 范紐曼（Von Neumann）架構
- ✖ 電腦的五大單元



范紐曼



### 1.6.1 范紐曼 (Von Neumann) 架構

#### ✖ 范紐曼架構的產生：

- + 最早的計算機中僅包含固定用途的程式。這些程式可能是用硬體直接架構出來的，除非重新設計，否則無法更改程式的功能。
- + 范紐曼首先提出把程式「內儲」在計算機中的構想。
- + 經由一套指令集的設計，讓程式變成一連串指令執行的過程。同時這些連串指令都和資料都一起儲存在計算機的記憶體中，於是程式也可以跟資料一樣輕易地修改，並在現有的硬體架構下執行。
- + 將指令當成資料的概念，促使了組合語言及其他更高階語言的誕生，而程式運用的彈性也相對的提高。

### 1.6.1 范紐曼 (Von Neumann) 架構

#### ✖ 范紐曼架構的問題與瓶頸：

- + 由於電腦所有的軟體與資料都儲存在記憶體中，萬一設計、修改程式時不小心犯了錯，很可能會導致本身的作業系統、程式、資料受到傷害。
- + 此外，因為范紐曼架構將CPU與記憶體分開，造成了所謂的范紐曼瓶頸 (Von Neumann bottleneck)。
- + 從記憶體取得資料或指令的速度通常較CPU處理的速度慢，所以當程式在執行過程中必須從記憶體去擷取資料時，便可能會影響到程式執行的整體效能。

### 1.6 計算機硬體結構

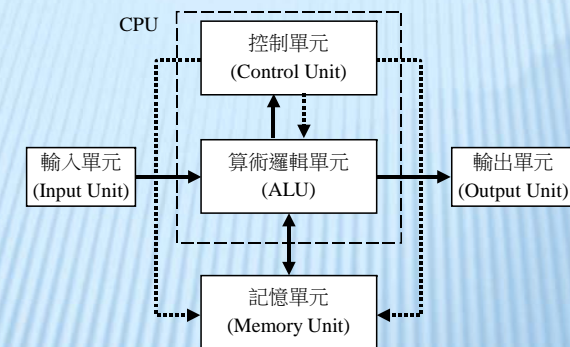
#### ✖ 范紐曼 (Von Neumann) 架構

#### ✖ 電腦的五大單元



范紐曼

### 1.6.2 電腦的五大單元



計算機的硬體五大單元

## 記憶單元 (Memory Unit)

- ✖ 記憶單元是電腦存放資料及程式的地方，所有CPU所需要的資料都由記憶體來提供，而處理的結果也都是先存回記憶體中。
- ✖ 除了可以任CPU隨機存取的主記憶體 (primary memory) 外，諸如磁碟或光碟機也算是記憶元件。這些儲存裝置又稱為輔助記憶體 (auxiliary memory) 或次要記憶體 (secondary memory)。

## 記憶單元 (Memory Unit)

- ✖ 主記憶體目前一般人則多直接以“記憶體”來稱呼。
- ✖ 主記憶體可看成是一串結構相同的連續儲存空間，每個空間都是靠位址 (address) 來辨識，每個位元組 (byte) 會對應到一個位址。
- ✖ 通常記憶體會以字組 (word) 為單位來存取，每個字組都有自己的位址，只要取得正確的位址，就能存取到所需要的資料。

## 輸入單元 (Input Unit)

- ✖ 電腦是供人們用來處理問題的工具，但是這些問題要交付給電腦來解決，必須先化為電腦可以判讀的數位資料來輸入，之後電腦才能進行各種運算或處理。
- ✖ 輸入單元的主要功能就是讀取外界的程式與資料，並將它們存入主記憶體。
- ✖ 常見的輸入設備有鍵盤、滑鼠、磁碟機與光碟機。
- ✖ 除此之外，還可以藉由掃描器、麥克風、鏡頭等聲光感應裝置來將多媒體訊號輸入給電腦。

## 算術邏輯單元 (Arithmetic & Logic Unit, ALU)

- ✖ 算術與邏輯單元是計算機中央處理器 (CPU) 的一部分，負責進行各種運算及處理資料。
- ✖ ALU最重要的兩項工作就是算術運算 (加減乘除) 與邏輯運算 (AND、OR、NOT)。
- ✖ ALU會搭配合多個同樣安置在CPU中，一種稱作暫存器 (register) 的高速記憶體來從事各種算術及邏輯運算，它們的存取速度與CPU其他單元同步，遠快於主記憶體，所以可以直接參與ALU的運算。



## 算術邏輯單元 (Arithmetic & Logic Unit, ALU)

- ✖ 由於ALU是真正處理資料的處所，而處理過程中的資料又都是透過暫存器來參與運算，所以ALU、暫存器、記憶體以及之間的資料傳輸管道又合稱為電腦的資料路徑 (data path)。
- ✖ 電腦運算能力的強弱、效能的高低、功能的多寡，幾乎都決定於資料路徑的安排。

## 輸出單元 (Output Unit)

- ✖ 輸出單元負責將中央處理單元的運算結果從主記憶體中取出，並以各種形式提供給使用者。
- ✖ 常見的輸出設備有外部儲存體 (磁碟、光碟等)、顯示器、印表機、喇叭、繪圖機、網路、以及其他更多樣化的設備。

## 控制單元 (Control Unit, CU)

- ✖ 控制單元是由分散在電腦內部各處的一堆控制電路所組成，負責電腦系統的指揮、協調、控制，還有指令的解碼。
- ✖ CU會依照程式指令的需要，產生各種時序訊號 (timing signal) 給各個單元，使每個單元能在正確的時間完成應該完成的工作，以正確實現各種電腦程式的執行。

## 1.7 指令集電腦的概念

- ✖ 指令集電腦 (Instruction Set Computer) 可分為：
  - + 精簡指令集電腦 (Reduced Instruction Set Computer, 簡稱為RISC)
  - + 複雜指令集電腦 (Complex Instruction Set Computer, 簡稱為CISC)




## 精簡指令集電腦 (RISC)

- ✖ 微處理器僅提供具有一些簡單基本運作功能的指令。
  - + 指令長度短、最佳化設計、高時脈頻率運作。
- ✖ 高階程式語言的每個指令都必須由許多簡單的機器指令組合而成，因此：
  - + 考驗著廠商及系統程式設計師的軟體（如編譯器）設計能力。
  - + 挑戰每個簡單指令的執行速度能比複雜指令提高多少倍。
- ✖ MIPS、ARM、IBM RS系列電腦、PowerPC。




## 複雜指令集電腦 (CISC)

- ✖ 微處理器硬體本身就提供具有強大運算功能的指令。
  - + 指令集豐富、複雜度各有不同、不易最佳化設計。
- ✖ 微處理器能提供豐富的指令集讓作業系統及應用程式使用，因此編譯程式的設計較為單純。
- ✖ Intel Pentium家族 CPU、IBM現代的大型主機。

## 1.8 近代計算機重要發展時間表




|               |   |   |
|---------------|---|---|
| 1946<br>(第一代) |  | ENIAC發明，主要以真空管製造，程式以開關的方式執行，每秒能執行5千個加／減法運算                              |
| 1949          |  | 英國劍橋Maurice Wilkes創造第一台具有內儲程式的計算機EDSAC，他同時也將次常式記錄在打孔帶上以供使用              |
| 1951          |  | 麻省理工學院開發出第一台數位文字、影像的計算機—Whirlwind。Whirlwind由4,500個電晶體組成、主記憶體大小為2048 位元組 |

## 1.8 近代計算機重要發展時間表

|      |   |  |
|------|---|--|
| 1951 |  | 麻省理工學院開發出第一台數位文字、影像的計算機—Whirlwind。Whirlwind由4,500個電晶體組成、主記憶體大小為2048 位元組  |
| 1951 |  | 第一台商用型計算機UNIVAC I開發成功，使用磁帶、印表機作為I/O介面，每秒可執行1,905個運算。UNIVAC I當時共銷售出46台，獲利美金1百萬元   |
| 1952 |  | John von Neumann開發出一套計算機邏輯和程式設計的標準—IAS，可以說是第一代計算機的代表。IAS推出之後，很快的在各地都有相相同架構的機型，例如Los Alamos科學實驗室的MANIAC、美國伊利諾州大學的ILLIAC、澳洲的SILLIAC等 |






## 1.8 近代計算機重要發展時間表

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| 1953          |  | IBM公司發行第一台電子計算機701。產品多半銷售給研究單位、航空公司、與美國聯邦政府 |
| 1954<br>(第二代) |  | 電晶體發明，此後計算機發展開始進入第二世代                       |
| 1959          |  | IBM 7090、7094是IBM公司將709成功「電晶體化」的商業版機型       |

## 1.8 近代計算機重要發展時間表

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| 1960          |  | 美國DEC公司開發出迷你電腦PDP-1   |
| 1960          |  | 美國國防部與許多電腦製造商共同發展出商業導向語言，COBOL。COBOL具有跨機器平台的特性，只需局部修改編譯器即可                                    |
| 1964<br>(第三代) |  | IBM推出System/360電腦，可以與40部周邊裝置同時作業。另外，BASIC語言也在這年發展成功，優點是簡單易學、便於使用。IBM推出的System/360電腦也是第三代電腦的典型 |

## 1.8 近代計算機重要發展時間表

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| 1971          |  | Intel推出第一顆處理器4004，4004有2,250個電晶體、每秒可執行60,000行指令的運算  |
| 1974<br>(第四代) |  | Intel發展出比從前都還要快的新型微處理器8008，Intel 8008可以定址到64 K位元組   |
| 1976          |  | Steve Wozniak和Steve Jobs兩人在美國舊金山開發出Apple I並創立Apple公司。一年後，該公司推出二代型機器—Apple II，它具有鍵盤、卡式磁帶、遊戲操作桿等I/O介面，是當年非常受歡迎的一款電腦 |

## 1.8 近代計算機重要發展時間表

|      |   |   |
|------|---|---|
| 1981 |  | IBM公司發行第一部個人電腦，採用Intel 8088微處理器，具4.77 MHz時脈頻率，採用Microsoft MS-DOS的作業系統 |
| 1987 |  | IBM推出具有3 1/2吋軟碟、VGA顯示的IBM PS/2電腦。該機型使用Intel 80386處理器，並可以用滑鼠作輸入控制      |