

大學用書

PDP-11組合語言

劉振漢著



三民書局印行

PDP-11 組合語言

劉 振 漢 著

學歷：美國加州柏克萊大學計算機博士

現職：國立交通大學計算機研究所教授

三 民 書 局 印 行

中華民國七十年五月
中華民國七十二年三月
初版
修訂初版

PDP-11 組合語言

基本定價叁元壹角壹分

著者 劉振漢

發行人 劉振強

出版者 三民書局股份有限公司

印刷所 三民書局股份有限公司

臺北市重慶南路一段六十一號
郵政劃撥九九九八號

行政院新聞局登記證 版字第二〇〇二〇號

獻給雙親

劉興榮先生
林緞妹女士

序

自 70 年代初期 PDP-11 問世，而有迷你計算機(mini-computer)名詞出現。這十年間，PDP-11 機器成為迷你計算機的典範，討論迷你計算機的書籍無不以 PDP-11 為對象。

今日的 PDP-11 機型很多，大者可以和大型計算機(main frame)分庭抗禮，小者則與微計算機(micro-computer)為伍。而這一系列的機型固然提供使用者可以按其需要做其選擇，更重要的意義是：這些計算機上的指令是完全一致的，因此就很容易在大的機型上設計發展出程式，放入微電腦中使用，使得發展微電腦的應用變得很簡單。

要深入瞭解一種計算機，最首要的一件事，就是學習其組合語言。PDP-11 在臺灣約有 150 部，數目多於其他的迷你計算機。它的結構清楚易懂，因此在國外許許多多的學校在計算機結構(computer organization)的課裏都以 PDP-11 為材料。而 PDP-11 上的各種操作系統(operating system)也是研習的對象。國內工業技術研究院的電子研究所對 RSX-11M 和 UNIX 兩種操作系統都曾做過深入研究，毫無疑問的，PDP-11 是國內瞭解最深入的一部計算機。雖然如此，我們對計算機的瞭解還不够普遍，有待加強的地方很多很多。本書之作，希望能對這方面貢獻一點力量。

本書材料有部份是來自 DEC 公司的內部教材、Arthur Gill 的書(Machine and Assembly Language Programming of the PDP-11)和在美國時得到的其他教師的教材，這些約佔三分之一，其餘的三分之二是著者六年半使用和教學 PDP-11 的累積經驗和資料。

2 PDP-11 組合語言

本書的目標是要成為一本很完整的教科書。若時間不足無法教完全本時，著者的建議是將第六章的後部，第七、八兩章的全部省略，教師可以自行斟酌。而第九章則應詳加介紹，不得已時可將第 9-9 節省略。由第五章起，本書是以 QIO 方法做輸出入，如果所用的機器上無此，可以用高階語言做輸出入，或者先介紹第九章，直接寫指令做輸出入。

著者授組合語言課時，學生的學習熱忱，引發了作此書之心志。晨昏之際，構思、寫稿、改稿、校稿之餘，建功國校師生的弦歌笑語成了工作時的良伴，不可不於此誌謝。

劉振漢

1981年3月於新竹

PDP-11 組合語言 目次

第一章 數字系統

1-1	n 進位數字系統 (n-ary number system).....	1
1-2	八進位數字 (octal numbers).....	2
1-3	二進位的數字 (binary numbers)	3
1-4	十六進位的數字 (hexadecimal numbers)	5
1-5	含小數部份的 n 進位數字系統.....	8
	習 題.....	9

第二章 機器結構與資料儲存

2-1	記憶體 (main memory).....	11
2-2	中央處理機 (central processing unit).....	13
2-3	整數儲存形式 (representation of integers).....	15
2-4	整數的加減運算 (integer addition and subtraction).....	19
2-5	整數加減對 NZVC 的影響	22
2-6	實數的表示法 (representation of floating-point numbers).....	23
2-7	符號的表示法 (representation of characters).....	25
	習 題.....	26

第三章 指令格式和實效位址

3-1 指令的格式	29
3-2 程式的執行	31
3-3 基本表位法 (basic addressing modes)	33
3-3-1 Register mode	35
3-3-2 Autoincrement mode	37
3-3-3 Autodecrement mode	38
3-3-4 Index mode	39
3-3-5 Deferred modes	41
3-4 引伸表位法	44
3-4-1 Immediate addressing	44
3-4-2 Relative addressing	47
3-4-3 Relative deferred	50
3-4-4 Absolute addressing	51
3-5 轉位指令 (branch instructions)	52
3-6 其它指令格式	55
習題	56

第四章 程式的寫法

4-1 常數表示法和現址表示法	61
4-2 組合語言格式	62
4-3 組合指引	63
4-4 機器指令	68

4-5 程式舉例.....	79
習 題.....	83

第五章 副程式和資料輸出入

5-1 疊的用法.....	87
5-2 共用疊.....	90
5-3 副程式.....	91
5-4 據數的傳送 (argument transfer).....	94
5-5 呼用慣例 (calling convention).....	100
5-6 程式元(program unit) 和共用名稱 (global symbol).....	104
5-7 資料輸出入(Data Input/Output).....	107
5-7-1 用高階語言做輸出入.....	107
5-7-2 用 Q IO做輸出入.....	112
5-8 輸出入副程式.....	115
5-9 程式舉例.....	119
習 題.....	124

第六章 程 式 範 例

6-1 IMAGE 程式.....	129
6-2 自用副程式 (recursive subroutine)	135
6-2-1 階層函數之例.....	136
6-2-2 Fibonacci.....	140
6-3 移塔問題.....	142

4 PDP-11 組合語言

6-4 二叉樹問題.....	146
習題.....	152

第七章 算術運算

7-1 兩種比較數值的方法.....	155
7-2 INTEGER*4 整數.....	157
7-3 高準整數.....	159
習題.....	164

第八章 組合與連結

8-1 組合、連結、放入過程.....	167
8-2 組合 (assembly).....	169
8-2-1 第一遍 (pass one).....	170
8-2-2 第二遍 (pass two).....	172
8-3 連結 (linking).....	179
8-3-1 建立名稱總表.....	182
8-3-2 安置機器碼.....	184
8-3-3 解決共用名稱.....	185
習題.....	187

第九章 系統程式

9-1 輸出入累計器 (I/O registers)	190
----------------------------------	-----

9-2	探查式輸出入 (polling I/O)	191
9-3	中斷機能 (interrupt mechanism)	197
9-4	中斷式輸出入 (interrupt I/O)	200
9-5	優先次序 (priority)	202
9-6	石英鐘的中斷 (clock interrupt)	207
9-7	落陷 (trap)	216
9-8	應用落陷的例子	220
9-9	T 爻元和偵錯器 (T bit and debugger)	222
	習 題	227

第十章 巨指令及其它

10-1	巨指令 (macro instruction)	235
10-2	標號的處理	242
10-3	REPT-IRP 和 IRPC 指引	244
	習 題	246
	部份題解	
	附錄 A	261
	附錄 B	265
	索 引	167

第一章 數字系統

要能瞭解計算機，首先必須對計算機的常用表示方法有所瞭解。其中很基本的一項就是計算機所用的「數字系統」。在計算機中經常會用到 2 進位、8 進位、16 進位等數字系統，本章裏介紹這些數字系統。

1-1 n 進位數字系統 (n -ary number system)

雖然我們都已根深蒂固地習慣了十進位數字系統，但我們也知道一些其它的數字系統，只是沒有特別去留意它們罷了。日常中會遇到的非十進位系統有(1) 英制的長度在呎與吋間為 12 進位，1 呎 = 12 吋；(2) 英制的重量單位為 16 進位，1 磅 = 16 盎司；(3) 時間為 60 進位，1 小時 = 60 分，1 分鐘 = 60 秒。

在做算術運算時，必須留意進位單位，才能得正確的結果；例如 5 時 42 分 30 秒 + 2 時 29 分 53 秒，其和應為 8 時 12 分 23 秒，我們做的是 60 進位系統的算術運算。

一個 n 進位數字系統中的數字，其所代表的數值可以用下式表示：

2 PDP-11 組合語言

$$\begin{aligned}(d_m d_{m-1} \cdots d_1 d_0)_n &= d_m \times n^m + d_{m-1} \times n^{m-1} + \cdots + d_1 \times n^1 + d_0 \times n^0 \\ &= \sum_{i=0}^m d_i \times n^i\end{aligned}$$

在此 $d_i (0 \leq i \leq m)$ 必須是介於 0 和 $n-1$ 的數字 (含 0 和 $n-1$)。 (X)_n 用來表示一個 n 進位的數, 有時括弧省略不用。

例如一個十進位的數字 53492, 其代表的數值為

$$(53492)_{10} = 5 \times 10^4 + 3 \times 10^3 + 4 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 2 \times 10^0$$

而一個 6 進位的數字 245305, 其代表的數值為

$$(245305)_6 = 2 \times 6^5 + 4 \times 6^4 + 5 \times 6^3 + 3 \times 6^2 + 0 \times 6^1 + 5 \times 6^0$$

1-2 八進位數字 (octal numbers)

八進位數字是計算機中常用的數字表示方法, 要將一個八進位數字轉換成十進位數字, 可以用其定義, 例如 3274_8 轉換成十進位數字可以如下式

$$\begin{aligned}3274_8 &= 3 \times 8^3 + 2 \times 8^2 + 7 \times 8^1 + 4 \times 8^0 \\ &= 3 \times 512 + 2 \times 64 + 7 \times 8 + 4 \\ &= 1536 + 128 + 56 + 4 \\ &= 1724_{10}\end{aligned}$$

反過來如果要把一個十進位數字轉換成八進位數字, 則可以將此十進位數字用 8 連除, 所得的餘數即為八進位的各個位數。例如 6429_{10} 的八進位表示法可以用下式求:

$$\begin{array}{r}
 8 \overline{) 6429} \quad 5 \\
 \underline{803} \quad 3 \\
 \underline{100} \quad 4 \\
 \underline{12} \quad 4 \\
 \underline{1} \quad 1 \\
 0
 \end{array}$$

在此式中左邊為除數，中間為被除數和商，右邊為餘數。連除至商變 0 為止，而餘數相連所得 14435_8 即為 6429_{10} 的八進位表示法。

這種用除法來求一個數的表示方法的原理很簡單，假設要表示的數為 X ，而求八進位的表示法為 $d_n d_{n-1} \cdots d_1 d_0$ ，則

$$\begin{aligned}
 X &= (d_n d_{n-1} \cdots d_1 d_0)_8 \\
 &= d_n \times 8^n + d_{n-1} \times 8^{n-1} + \cdots + d_1 \times 8 + d_0
 \end{aligned}$$

因此 X 除以 8 所得商必為 $d_n \times 8^{n-1} + d_{n-1} \times 8^{n-2} + \cdots + d_1$ ，而餘數必為 d_0 ，將此商再除以 8，必得餘數為 d_1 。因此證明「將一個數用 8 連續除，得餘數為 $d_0, d_1, \cdots, d_n$ 則 $(d_n d_{n-1} \cdots d_1 d_0)_8$ 即為此數的八進位表示法」。這方法當然不限於八進位，也可適用於 n 進位的數。

1-3 二進位的數字 (binary numbers)

在計算機中也常用到二進位的數字，一個二進位的數字一定是由 0 和 1 兩符號所構成，二進位數字和十進位數字之間之轉換，仍舊是用乘法和除法來做。

$$\begin{aligned}
 \text{〔例 1〕 } 101100101_2 &= 1 \times 2^8 + 0 \times 2^7 + 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 \\
 &\quad + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 256 + 64 + 32 + 4 + 1 \\
 &= 357_{10}
 \end{aligned}$$

〔例 2〕 求 247_{10} 的二進位表示法

$$\begin{array}{r|l}
 2 & 247 & 1 \\
 \hline
 & 123 & 1 \\
 & \hline
 & 61 & 1 \\
 & \hline
 & 30 & 0 \\
 & \hline
 & 15 & 1 \\
 & \hline
 & 7 & 1 \\
 & \hline
 & 3 & 1 \\
 & \hline
 & 1 & 1 \\
 & \hline
 & 0 &
 \end{array}$$

所以 $247_{10} = 11110111_2$

二進位和八進位的轉換較容易，因為

$$\begin{aligned}
 x &= (d_m d_{m-1} \dots d_2 d_1 d_0)_8 \\
 &= d_m \times 8^m + d_{m-1} \times 8^{m-1} + \dots + d_3 \times 8^3 + d_2 \times 8^2 + d_1 \times 8^1 + d_0 \times 8^0 \\
 &= (d_{m2} \times 2^2 + d_{m1} \times 2^1 + d_{m0} \times 2^0) \times 2^{3m} + \dots \\
 &\quad + (d_{12} \times 2^2 + d_{11} \times 2^1 + d_{10} \times 2^0) \times 2^0 \\
 &= d_{m2} \times 2^{3m+2} + d_{m1} \times 2^{3m+1} + d_{m0} \times 2^{3m} + \dots \\
 &\quad + d_{12} \times 2^2 + d_{11} \times 2^1 + d_{10} \times 2^0
 \end{aligned}$$

因此，我們可以將八進位數的每 1 位數化成二進位的 3 位數，或反方向轉換，很容易地做轉換。

下面是八進位和二進位轉換表：

八進位	二進位
0	0 0 0
1	0 0 1
2	0 1 0
3	0 1 1
4	1 0 0
5	1 0 1
6	1 1 0
7	1 1 1

〔例 3〕 要將 32407_8 轉換成二進位數，可以將 3 化爲 011，2 化爲 010，4 化爲 100，0 化爲 000，7 化爲 111，而得

$$32407_8 = 011010100000111_2 \text{ (最左邊的 0 可省略)}$$

相反地，要將 10110111001_2 化爲八進位數，可以將它由右邊起每三位數合成一八進位的數字，即 001 化成 1，111 化成 7，110 化成 6，10 化成 2，而得

$$10110111001_2 = 2671_8$$

1-4 十六進位的數字 (hexadecimal numbers)

在 PDP-11 機器中很少用到十六進位的數字，但在其它機器中用得很多，仍應熟習一下。

在 n -進位的數字中，每一位數的值可以是 0 到 $n-1$ 之間的值，因此十六進位數字中每一位數應可在 0 和 15 之間。爲避免用兩個符號表示一個位數，在十六進位中的習慣是以 A, B, C, D, E, F，分別表示 10, 11, 12, 13, 14, 15。因此

$$2AC64_{16} = 2 \times 16^4 + 10 \times 16^3 + 12 \times 16^2 + 6 \times 16^1 + 4 \times 16^0$$

〔例 4〕

(a) 將 43629_{10} 轉換成十六進位的數

$$\begin{array}{r} 16 \overline{) 43629} \quad 13 \text{ (D)} \\ \underline{2726} \quad 6 \\ \underline{170} \quad 10 \text{ (A)} \\ \underline{10} \quad 10 \text{ (A)} \\ 0 \end{array}$$

因此 $43629_{10} = AA6D_{16}$ (b) 將 2543_7 轉換成十六進位的數

$$\begin{aligned} 2543_7 &= 2 \times 7^3 + 5 \times 7^2 + 4 \times 7^1 + 3 \times 7^0 \\ &= 686 + 245 + 28 + 3 \\ &= 962_{10} \end{aligned}$$

$$\begin{array}{r} 16 \overline{) 962} \quad 2 \\ \underline{60} \quad 12 \text{ (C)} \\ 3 \end{array}$$

 $\therefore 2543_7 = 3C2_{16}$ (c) 將 $2B47_{16}$ 化成八進位 (參看下面 16 進位和二進位對照表)

$$\begin{aligned} 2B47_{16} &= 0010101101000111_2 \\ &= 25507_8 \end{aligned}$$

下面是十六進位和二進位轉換表: