

## IBM4381—P03型双CPU计算机实现NWP 模型的并行计算

王宗皓

(国家气象局卫星气象中心)

### 提 要

本文介绍数值天气预报(NWP)问题,用IBM4381—P03型计算机的两个CPU,实现气象物理模型 $x—y$ 方向“分解—联合”的自稳定差分格式的并行计算的初步情况:(1)4381-3型的CPU可按通常理解的分开任务方式实现并行计算,(2)MVS大型操作系统控制VS FORTRAN库中的MTF(Multitasking Facility)实行分开任务—并行处理—等待同步,从而实现NWP模型的并行运算,这在我国气象问题计算中还是第一次。今后卫星数据处理的新方案可用4381-3双CPU并行处理,老方案也可逐步变成并行计算,(3)并行加速达到1.3—1.5,尚未达到IBM公司的1.8加速水平,还有潜力可挖。

### 一、引 言

大气、海洋物理模型和气象卫星数据处理反演等模型,都是大数据量大计算量问题。在日常业务应用中,要求快速实时计算出要求的结果,因而又是高时效问题。近十年来,国外气象业务预报服务和气象科学研究部门,大多数应用亿次以上的计算机,如欧洲中期数值天气预报中心的CRAY-XMP计算机,美、英等国气象部门应用的CYBER-205计算机,都是亿次机、多处理机,具有并行计算能力。

1986年底,国家气象局卫星气象中心从美国买进3台IBM4381-P03(下面简称4381-3)型计算机组网,共享磁盘;4381-3型机都是双CPU处理机,16兆主存储器,32KB的高速缓冲存储器,处理机能力为4.7MIPS。4381-3机的每个CPU可接9个通道(0—8),每台机可接18个通道,其中有8个高速通道,数据传输率可达3MB/s。3台4381-3机共配有十几种上百台外部设备,其中有威斯康星大学McIDAS人机交互系统。整个3台4381-3系统配有3台IBM3380磁盘控制器,均与3台4381-3机的6个CPU相连接,使得3台主机共享48个盘卷。

操作系统采用多重虚拟存储MVS管理大型操作系统,具有批量处理和分时功能,以及资源管理、任务管理、数据管理、通讯管理、恢复管理、系统初始化等方面的功能<sup>[1]</sup>。

目前,并行计算机(多CPU机、向量机等)发展正在引起计算方法变革。并行机要用并

行算法,在并行机上用串行算法,效果差别很大,有时差别相当惊人。所以并行算法研究成为当前计算数学中的一支新兴学科。我们对气象模式计算和数据处理中若干典型计算数学问题,用双 CPU 进行一系列的并行算法试验。本文是初值问题的部分模拟并行计算结果,是理想场试验,不是实例预报,是同一模式的串行计算和并行计算时效比较研究。针对 4381-3 多任务并行处理结构和过程,介绍一种并行计算方案设计的基本思想,是算法比较简单、效果比较好的一种。

## 二、IBM 4381-P03 多任务并行处理

研究大气模式并行算法与所用的计算机并行运算指令处理功能和双 CPU 处理结构有密切关系,本节介绍 4381-3 的有关情况。

4381-3 的两个处理器是由两部分指令处理器组成,由单控制程序 (Single Control Program) 运行的每个处理器有各自的通道和高速缓冲器,共享处理器存储 (Processor Storage),有多道任务功能子程序 MTF (Multitasking Facility)。MTF 是 VS FORTRAN 库的组成部分。用 VS FORTRAN CALL 语句中适当的入口名,在主任务程序中访问 MTF,即可执行多道任务。在 VS FORTRAN 支持下,MTF 能将一道程序中的多个子任务 (Subtask) 分配到不同处理器去执行,使得各个具体任务 (task) 在主任务中和若干子任务中独立运行。这样大大减少执行程序需要的经过时间 (elapsed time)。MTF 有三个功能:

- (1) 初始化 MTF 环境,
- (2) 安排执行若干并行子程序 (parallel subroutine),
- (3) 控制主任务程序与各个并行子程序的完成等待同步,即前者等待后者执行完,进行往后的计算。

下面介绍程序设计中调用 MTF 的办法和注意事项:

(1) 不调用 MTF,一个程序和它的全部子程序只能在一个处理器上执行;调用 MTF 情况下,程序可以并行执行,可以缩短程序的经过时间,提高处理器的使用效率,

(2) MTF 有两个过程: DSPTCH 和 SYNCRO。其中 DSPTCH 的作用是分权 (fork),使要执行的子任务从主任务中独立出来。而 SYNCRO 是同步等待语句,使主任务程序等待全部子任务完成后,再联合 (join) 执行往后的程序。VS FORTRAN 程序调用 DSPTCH 和 SYNCRO 的方式:

```
CALL DSPTCH (Subname [, arg1 [, arg2], ...])
```

```
CALL SYNCRO
```

(3) 实现并行处理,在 VS FORTRAN 程序中调用 DSPTCH 和 SYNCRO 之外,还需要在 JCL (作业控制语句) 中写入相应的 AUTOTASK Keyword,按主程序 (包括非并行子程序) 部分和并行程序部分,将程序输入,分别进行编译连接,装填成模块。

主程序编译连接:

```
//MTASKPGM EXEC FORTVCL, FVPOPT=3
```

```
//FORT.SYSIN DD DSN=USERPGM.FORTRAN(MASKPGM) DISP=SHR
```

```
//LKED.SYSLMOD DD DSN=USERPGM.LOAD, (MASKPGM) DISP=OLD
```

并行子程序的编译连接:

```
//SUBTASK EXEC FORTVCL,FVPOPT=3
//FORT.SYSIN DD DSN=USERPGM,FORTRAN (SUBTASK),DISP=SHR
//LKED.SYSLMOD DD DSN=USERPGM.LOAD(SUBTASK),DISP=OLD
//LKED.SYSIN DD * INCLUDE SYSLID
(VFEIS#)ENTRY VFEIS #
/*
```

VS FORTRAN 程序中,为了执行 MTF 附加 MVSJCL 语句:

```
//GO EXEC...,PARM='...AUTOTASK
(Loadmodname,Subtasks)'
//AUTOTASK DD DSN=user.dsn,DISP=SHR
//FTERRO 01 DD...
//FTERRO 02 DD...
//FTERRO ..DD...
//FTERRO nn DD...
```

其中 Loadmodname 是并行任务模块名,Subtasks 是并行子任务的数目;user.dsn 是并行任务模块所在的数据集名。

(4)MTF 只允许程序中出现一级并行,不允许有多级的并行;并行子任务的个数不受处理器个数的限制。

(5) 并行子任务中允许有 Print 和 Write 语句。

以上简单介绍 4381-3 机的并行处理的硬件和软件情况,以及编程中的规定等。但这不是全部,还有许多细节请参阅文献[2]和[3]。下面介绍气象模型方程中最简单的可作为评价数值试验的浅水波方程的并行计算方案设计和试验结果。

### 三、大气动力模式的“分解——联合”

大气动力模式作为数学物理初值问题,特别是斜压初始方程模式,实现并行计算的基础在于大气模式物理上的可分性和偶合性,利用多 CPU 并行计算机实现大气物理模式并行数值求解,基本问题是模式及其算法的分解、协调和综合(联合)<sup>[4][5]</sup>。这里先讨论北半球区域欧拉直角坐标系中的浅水波初始方程模式的“分解——联合”方案设计。浅水波正压大气运动模式,可以作实例天气预报,由于物理过程简单,现在已用物理考虑仔细的模式代替。但是作为气象问题算法检验模式,一直被人们采用。模式方程如下:

$$\begin{cases} W_t + AW_x + BW_y + FW = 0 \\ W(x, y, 0) = W_0(x, y) \\ 0 \leq t \leq T, -\infty < (x, y) < +\infty \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$W = \begin{pmatrix} u \\ v \\ 2c \end{pmatrix}, \quad c = \sqrt{gz}, \quad W_s = \begin{pmatrix} u_s \\ v_s \\ 2c_s \end{pmatrix}, \quad s = t, x, y.$$

$$A = \begin{pmatrix} u & 0 & c \\ 0 & u & 0 \\ c & 0 & u \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} v & 0 & 0 \\ 0 & v & c \\ 0 & c & v \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} 0 & -f & 0 \\ f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

我们称方程组(1)为“总体模式”。在  $F_1 + F_2 = F$  条件下,原则上可以任意分裂为下列形式的“分解模式”方程组:

$$\begin{cases} W_t + 2AW_x + 2F_1W = 0 \\ W(x, \hat{y}, 0) = W_0(x, \hat{y}) \\ 0 \leq t \leq T, -\infty < (x, \hat{y}) < +\infty, \end{cases} \quad (2)$$

和方程组:

$$\begin{cases} W_t + 2BW_y + 2F_2W = 0 \\ W(\hat{x}, y, 0) = W_0(\hat{x}, y) \\ 0 \leq t \leq T, -\infty < (\hat{x}, y) < +\infty, \end{cases} \quad (3)$$

考虑地转风压关系,取

$$F_1 = \begin{pmatrix} 0 & -f & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad F_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

由方程组(2),(3)和(1)得知,在同样的初始条件下,“分解模式”(2)和(3)中的第一式相加除2所得方程,就是“总体模式”(1)的第一式。这样在每步时间积分过程中,将求解方程组(2)交给一个处理器去完成;将求解(3)交给另一个处理器去完成。每积分一步,所得结果相加除2,作为下一步计算的初值,直到需要的积分结果。这相当于将一项计算任务按工作量相同的原则分开计算。比如将方程组(2)沿  $x$  轴方向的( $\hat{y}$ 看作参数)计算交 CPU<sub>1</sub>执行,计算结果表示为

$$W_{(i,j)}^{n+1} = W_{(i,j)}^n - \Delta t [2AW_x + 2F_1W]^n$$

将沿  $y$  轴方向( $\hat{x}$ 看作参数)的计算的方程组(3)交 CPU<sub>2</sub>执行,结果为

$$W_{(i,j)}^{n+1} = W_{(i,j)}^n - \Delta t [2BW_y + 2F_2W]^n$$

以上两式中初值,在每个  $(i, j)$  格点上是相等的:

$$W_{(i,j)}^n \equiv W_{(i,j)}^n = W_{(i,j)}^n$$

这样,形式上的两个值  $W_{(i,j)}^{n+1}$  和  $W_{(i,j)}^{n+1}$ ,实际上分别表示方程组(1)中第一式左边的两部分计算结果,也就是“总体模式”的一步积分值:

$$W_{(i,j)}^{n+1} = W_{(i,j)}^n - \Delta t [AW_x + BW_y + (F_1 + F_2)W]^n$$

此处  $\Delta t$  为积分时间步长。至于右端的时间步数是  $n$  还是  $n-1$ ,由计算用的差分格式稳定性决定。

类似地可以进行斜压初始方程模式的“分解——联合”并行计算<sup>[6]</sup>。以上给出模式分

解的一种  $x$  方向和  $y$  方向分解方式。模式的分解方式不是唯一的,有许多种分解方式,例如按快慢波分解<sup>[7,8]</sup>;按垂直结构分解<sup>[9]</sup>;粗细网格区域分解<sup>[9]</sup>,模式组装分解<sup>[10]</sup>等等。根据不同的物理考虑和所用的计算机条件,选择适当的“分解——联合”方案。

#### 四、模式分解的计算方法

这里提出应用的是一种形式上的条件稳定实际上无条件稳定的显式差分方法,见参考文献[6,11,12,13,14]。因为方程组(2)和(3)形式上由单向波方程构成,这里为简单起见,用单向波方程初值问题为例,介绍一种计算方法,对单向波方程

$$\begin{cases} u_t + au_x = 0 & a = a(x, t) \\ u(x, 0) = u(x) & u = u(x, t) \\ 0 \leq t \leq T, -\infty < x < +\infty \end{cases} \quad (4)$$

写出相应的一种显式两时间层的自稳定差分格式:

$$u_i^{n+1} = u_{j+sm}^n - \bar{U}[u_{j+sm}^n - u_{j+sm-1}^n] \quad (5)$$

式中  $m = \Delta t |a| / \Delta x$  的整数部分;  $\bar{U} = \Delta t |a| / \Delta x - m$  是  $\Delta t |a| / \Delta x$  的分数部分; 而

$$s = \begin{cases} +1, & \text{当 } a < 0 \\ -1, & \text{当 } a > 0 \end{cases}$$

$\Delta t, \Delta x$  分别表示时间和空间网格步长,  $n, j$  表示时间和空间格点序号。

#### 五、双 CPU 实现 NWP 模式并行计算的初步结果

本节叙述正压初始方程天气预报模式(1),用差分格式类型(5),分别在  $x$  方向和  $y$  方向分解——联合,实现双 CPU 并行计算的初步情况。计算用的  $c = \sqrt{g_z}$  初值采用 Haurwitz 波<sup>[15]</sup>:

$$\varphi = \varphi_0 + \Lambda^2 \delta(\theta) + \Lambda^2 \varepsilon(\theta) \cos(l\lambda) + \Lambda^2 \zeta(\theta) \cos(2l \cdot \lambda)$$

此处希腊字母表示的意义:

$$\delta(\theta) = \frac{1}{2} \omega (2\Omega + \omega) c_0^2 + \frac{1}{4} \kappa^2 c_0^{2l} [(l+1)c_0^2 + (2l^2 - l - 2) - 2l^2 c_0^{-2}]$$

$$\varepsilon(\theta) = \frac{2(\Omega + \omega)\kappa}{(l+1)(l+2)} c_0^2 [(l^2 + 2l + 2) - (l+1)^2 c_0^2]$$

$$\zeta(\theta) = \frac{1}{4} \kappa^2 c_0^{2l} [(l+1)c_0^2 - (l+2)]$$

式中  $c_0 = \cos\theta$ ,  $\theta$  表示纬度,  $\lambda$  经度,  $\Lambda$  地球半径,  $\Omega$  地球转动角速度,  $\omega, \kappa$  是参数,选取  $\omega = \kappa = 7.848 \times 10^{-6} s^{-1}$ ;  $l$  是纬向波数,取  $l = 4$ ;  $\varphi_0$  是平均位势高度,取为  $9.8 \times 5500 m^2 s^{-2}$ ; Haurwitz 波转动角速度

$$\psi = \frac{l(3+l)\omega - 2\Omega}{(1+l)(2+l)}$$

经过  $\Delta t$  时间后, Haurwitz 波转动一个角度  $\psi \Delta t$ , 而波形不改变; 又因其是方程组(1)的特

解,常用来检验数值计算的精确度和稳定性。 $u$  和  $v$  的初值依地转风压关系给出:

$$u = -\pi\varphi_y/f, \quad v = \pi\varphi_x/f$$

此处  $\pi$  为极射赤面投影放大系数,  $f$  为柯氏力系数。用上述初始场,在北半球区域赤道侧边界条件取固定条件:

$$u_i = v_i = \varphi_i = 0$$

计算区域覆盖北半球,格距  $\Delta x = \Delta y$  分别取为 381 公里和 190.5 公里,进行 48 小时预报试验,时间步长取 15 分钟、20 分钟和 30 分钟,都是计算稳定的,并保持 Haurwitz 波型不变(图略)。

在上述的计算问题条件下,用 4381-3 型计算机分别进行串行和并行计算,情况是:

(1) 串行计算 CPU 时间与同一问题双 CPU 并行计算的 CPU 时间之比为 1/3 至 1/2。亦即双 CPU 并行计算,达到原机串行计算的 1.3 到 1.5 倍的效用程度。4381-3 通过应用 MTF 可实现并行计算,确实提高使用时效,缩短程序执行时间,

(2) MTF 的时效在系统进入特权状态更能充分发挥其功能,

(3) 要事先设计并行算法,分解预报模式成为若干相对独立部分,各部分的计算量相当,使双 CPU 的同步等待时间越短越好。经过这次试验,我认为继续研究气象问题的并行算法是大有前途的。这里顺便提及模式方程(1)带有上述 Haurwitz 波初值,在银河 YH-1 向量计算机上进行并行计算的速度增长倍数达 3.1,取得显著时效<sup>[15]</sup>,这说明研究多 CPU 向量机的并行算法更大有前途。

## 参 考 文 献

- [1] 郭庆雪,《风云一号》气象卫星中央处理系统软件维护管理设计方案,国家气象局卫星气象中心印,1987.
- [2] IBM, VS FORTRAN Language and Library Reference, Program Numbers: 5748-F03 (Compiler and Library) 5748-LM3 (Library only) Release 4.1 SC26-4119-1, 1969.
- [3] 蒋波、王宗皓, IBM4381(3)双 CPU 机并行处理功能开发利用, 卫星气象中心印, 1988.
- [4] 王宗皓、吴津生, 基于联机运算的大气模式设计及其算法的探讨, 《中期数值天气预报文集》, 气象出版社, 1982.
- [5] 王宗皓, 天气分析预报系统工程理论模型, 同上.
- [6] 王宗皓, 大气动力初始方程组的一种数值积分方法, 气象学报, 39, 3, 1981.
- [7] 董双林、吴津生、王宗皓, Hough 函数的计算, 气象学报, 39, 1, 1981.
- [8] 陈于湘、王宗皓, 应用经验正交函数作梅雨天气形势预告试验, 大气科学, 6, 1, 1982.
- [9] 王宗皓, 数值天气预报系统工程(讲义), 中国科技大学研究生院印, 1979.
- [10] 赵昭妍、黄克涛、何猛省、许明浩、王宗皓, 组装模式的个例预报试验, 科学探索学报, 1, 2, 1981.
- [11] 王宗皓, 天气预报方程自稳定浮动分裂显式算法, 同[4].
- [12] 王宗皓, 预报方程差分格式构造方法, 气象学报, 35, 4, 1965.
- [13] 王宗皓, 若干显式差分格式的浮动算法, 科学探索学报, 1, 1, 1981.
- [14] 王宗皓, 天气方程初值问题的浮动算法, 科学通报, 26, 8, 1981.
- [15] 蒋波, YH-1 计算机的并行计算实验, 卫星气象中心印, 1988.

## IMPLEMENTATION OF THE PARALLEL ALGORITHM FOR THE NWP MODEL WITH IBM4381—P03 DUAL CPU

Wang Zonghao

(*Satellite Meteorology Center, SMA*)

### Abstract

This paper presents the parallel algorithm experimental results on numerical weather prediction, which have been carried out by using the dual CPU computer system consisting of three IBM 4381-P03 installed at SMC/SMA, Beijing. According to the x- and y- coordinate directive decomposition (fork)-composition (join), the IBM 4381-P03 dual CPU have executed the calculation of the model difference scheme which is conditionally stable in form but nonconditionally stable in fact. The preliminary experiment results show: (1) IBM 4381-P03 with dual CPU can execute parallel algorithm in a common separate task way. (2) MVS grand operating system controls the Multi-tasking Facility (MTF) in the VS FORTRAN library to execute the decomposing task — parallel processing — waiting synchronization, to carry out the parallel algorithm. It is the first time to calculate NWP model in parallel way in China. From now on, we may execute step by step the parallel algorithm on the NWP and on the satellite informations processing. (3) In our estimation, a speed-up ratio of the parallel programming for the initial value problem is about 1.3 to 1.5, but not reaches the 1.8 level of the IBM yet. So it is worth to further exploit potentialities of the dual CPU.