

原始方程模式多处理器的 并行计算方案设计及试验

矫梅燕

李国杰

林 洪

(安徽省气象科学研究所, 合肥 230061)

(中国科学技术大学, 合肥 230026)

提 要

本文介绍并行处理器(Transputer 芯片)的性能和特点, 及其对微机功能扩充上的应用。结合气象问题, 设计了五层原始方程数值预报模式的并行计算方案。经过试验, 计算速度明显提高, 结果正确可靠, 从而为省级气象部门的数值预报业务化及科学研究提供了一条有效途径。

关键词: 并行处理器; 并行计算; 数值预报模式。

一、引 言

近十多年来, 国内外对中尺度数值模式的研究发展较快, 考虑的物理过程也较复杂, 计算方案逐渐趋向于细网格化, 因此, 一般需要在高性能的大型机上实现。在目前的条件下, 国内省级气象部门尚不能顺利地投入数值预报工作, 特别是区域性的数值预报模式, 无法针对本省、本地区的地理特性和气候特征建立起地方性的数值预报系统。

近年来, 随着计算机科学技术的飞跃发展, 并行处理技术逐渐走向成熟并在实践中显示出极大优越性。由于并行计算机系统是在一台主机上有几个处理器同时工作, 可以大大节省计算时间, 很适合数值预报大计算量对计算时间的要求。在 IBM-PC 机上增加多处理器标准模块板, 形成并行计算系统, 可充分利用目前气象系统内部的现有资源, 从而, 为省级气象部门开展数值预报业务提供了可能。

对气象问题并行计算的研究是近年来才开始起步的。王宗皓^[1,2]考虑在某些方面大气是可分的, 而在某些方面又是不可分的情况, 作了算法上的理论研究, 但是, 利用并行计算机系统开展数值预报工作, 目前还不多见。本文介绍作者在中国科技大学的 Transputer 并行计算机系统上实现有限区域五层细网格原始方程模式并行化处理的设计思想及试验结果。

二、Transputer 并行系统结构和性能

Transputer(晶体计算机)是在单片上集成一个功能很强且价值便宜的处理机, 用多

1991年7月14日收到, 1993年11月22日收到修改稿。

个 Transputer 芯片即构成一个多处理机系统, 在性能上可以达到小型机直至中型、大型机的水平, 提供了实际上是无限制的处理能力。Transputer 板可插在 PC 箱内的空槽上, 使 PC 机升级, 构成“超级微机”。

Transputer 芯片采用精简子令系统(RISC)结构, 几乎不需要任何附加芯片。每个 Transputer 中包含有片上高速读写存储器(2K 或 4K), 并拥有 4 对通讯线路接口和两个定时器, 系统采用母基板结构, 以通讯链互连, 并可以构成多种网络结构(如图 1)。并行程序由多个“任务(Task)”构成, 这些任务可并行异步地执行, 通过通讯链实现。根据并行任务间的同步关系, 可选择适当的网络构造, 以提高并行程序的执行速度。

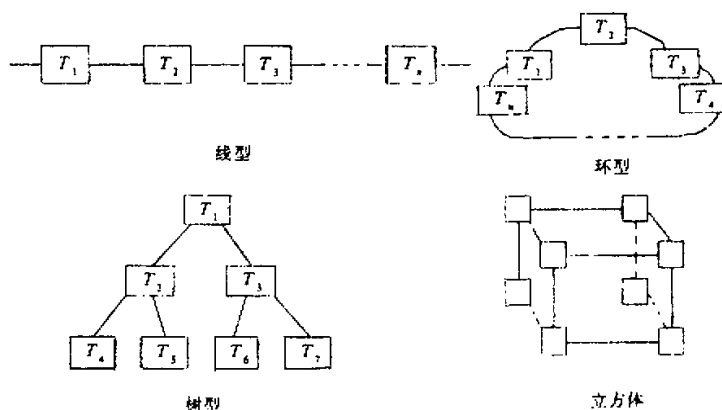


图 1 部分网络构造图式

三、模式简介及差分方程组

中国科学院大气物理所前几年发展的有限区域细网络原始方程模式是 σ 坐标下的五层模式^[3], 其在 p 坐标下的基本方程组如下:

$$\frac{du}{dt} - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + F_u, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} + F_v, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p}, \quad (3)$$

$$c_p \frac{dT}{dt} - \frac{RT}{p} \frac{dp}{dt} = L\dot{Q} + c_p F_T, \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{dq}{dt} = \dot{Q} + F_q, \quad (6)$$

式中符号均为气象上常用。

模式由动量方程、静力学方程、热量方程、连续方程和水汽方程构成复杂的流体动力学方程组, 并考虑了边界层水平湍流交换、地面摩擦应力以及大尺度凝结加热和积云对流加热等物理过程。

在总能量守恒的条件下构造模式的差分方程组, 差分取正方形水平网格, 空间差分和时间差分均采用中央差, 垂直方向上分为等距的五层。模式的差分方程组表示如下¹⁾:

$$\left(\frac{\partial p_s}{\partial t}\right)_{ij}^{(n)} = -m^2 \sum_k D_k^{(n)} / k, \quad D_k^{(n)} = \left[\left(\frac{p_s u}{m}\right)_x + \left(\frac{p_s v}{m}\right)_y \right]_{ij,k}^{(n)}, \quad (7)$$

$$W_{ij,k}^{(n)} - \frac{1}{2} = W_{ij,k}^{(n)} + \frac{1}{2} + dz \left(\frac{1}{m} \frac{\partial p_s}{\partial t} + m D_k \right)_{ij,k}^{(n)}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{p_s u}{m}\right)_{ij,k}^{(n+1)} &= \left(\frac{p_s u}{m}\right)_{ij,k}^{(n-1)} + 2dt \left\{ \left[\frac{p_s}{m} f(v - v_g) - AL(u) \right]^{(n)} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{p_s}{m} F_u\right)_{ij,k}^{(n-1)} \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{p_s v}{m}\right)_{ij,k}^{(n+1)} &= \left(\frac{p_s v}{m}\right)_{ij,k}^{(n-1)} + 2dt \left\{ \left[\frac{p_s}{m} f(u - u_g) - AL(v) \right]^{(n)} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{p_s}{m} F_v\right)_{ij,k}^{(n-1)} \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{p_s c_p T}{m}\right)_{ij,k}^{(n+1)} &= \left(\frac{p_s c_p T}{m}\right)_{ij,k}^{(n-1)} + 2dt \left\{ \left[\frac{1}{m} \frac{\partial p_s}{\partial t} (RT - H) + \frac{p_s}{m} f(uv_g - vu_g) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{p_s}{m} L\dot{Q} - AL(c_p T + H) \right]^{(n)} + \left(\frac{c_p p_s}{m} F_T\right)_{ij,k}^{(n-1)} \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{p_s q}{m}\right)_{ij,k}^{(n+1)} &= \left(\frac{p_s q}{m}\right)_{ij,k}^{(n-1)} + 2dt \left\{ \left[-AL(q) + \frac{p_s}{m} \dot{Q} \right]^{(n)} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{p_s}{m} F_q\right)_{ij,k}^{(n-1)} \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$AL(A) = m \left\{ \left[\left(\frac{p_s u}{m}\right)_x \overline{A} \right]_x + \left[\left(\frac{p_s v}{m}\right)_y \overline{A} \right]_y \right\} + \left(\frac{p_s \dot{\sigma}}{m} \overline{A}\right)_\sigma,$$

$$H = \varphi,$$

m 为地图放大系数。

该模式的积分范围为 30×24 个格点, 水平格距为 100 km, 积分时间步长为 3 min, 若对该模式作 24 小时的积分运算, 由以上差分方程组不难看出, 其积分计算量是相当可观的。我们曾在本所的 Dual-6800 高档微机上试运行该模式的 24 小时预报, 其计算时间几乎与预报同步, 可见其计算量远远不能满足需要。

1) 周晓平, 1980, 细网格天气预报模式说明, 中国科学院大气物理所单行本。

四、模式并行化处理的设计方案及试验结果

1. 并行化的设计方案

所谓并行化处理,就是要对模式的结构及正常算法作适当的改变,使其满足并行运算的要求。由于数值积分是以前一时刻的计算结果作为后一时步的初始场,这个特点决定了不可能对模式进行分时并行处理。又由于细网格模式的时间步长相对较短,若将积分区域划分成几个小区域进行并行运算,会大大增加数据通信量,其结果也不会使计算时间有很大的改善。但是,从模式的空间结构来看,由于模式在垂直方向上是相对独立的,从前面所列出的差分方程组中也能看到,在每个时间层上,模式的主要计算量都在水平面上进行,且垂直积分也只在相邻两层间进行,不需要进行整层的数据传送。由此可见,对模式进行分层并行化处理是可行的。因此,本文采用五个处理器即一块母板和四块子板的 Transputer 芯片进行并行计算,每个处理器上作一层的积分运算,垂直积分采用图 1 所示的线性数据通信网络结构,根据垂直积分的方向把数据传送至相邻的芯片,其数据传送的过程在下面的程序中列出(相应的原始程序在附录中列出):

(1) 根处理器上的执行程序

```
call f77_chan_out_word (W(I, J, K), jca)
call f77_chan_out_word (U2(I, J, K), jca)
call f77_chan_out_word (V2(I, J, K), jca)
call f77_chan_out_word (QT(I, J, K), jca)
call f77_chan_out_word (Q2(I, J, K), jca)
call f77_chan_in_word (tt1, ica)
..... (tt2...tt4 调用方式同上)
ALU2= W(I,J,1) * (U2(I,J,1)+tt1) * DZZ
ALV2= W(I,J,1) * (V2(I,J,1)+tt2) * DZZ
ALT2= W(I,J,1) * (QT(I,J,1)+tt3) * DZZ
ALQ2= W(I,J,1) * (Q2(I,J,1)+tt4) * DZZ
```

(2) 各子处理器上的执行程序

```
IF (K.NE.LM) GOTO 8820
call f77_chan_in_word (tt1, ica(0))
..... (tt2...tt5 调用方式同上)
ALU2=-tt1 * (tt2+U22) * DZZ
ALV2=-tt1 * (tt3+V22) * DZZ
ALT2=-tt1 * (tt4+QT2) * DZZ
ALQ2=-tt1 * (tt5+Q22) * DZZ
call f77_chan_out_word (U2(I, J, K), jca(0))
call f77_chan_out_word (V2(I, J, K), jca(0))
call f77_chan_out_word (QT(I, J, K), jca(0))
```

```

call f77_chan_out_word (Q2(I, J, K), jca(0))
GOTO 8825
8820 call f77_chan_out_word (W(I, J, K), jca(1))
call f77_chan_out_word (U2(I, J, K), jca(1))
call f77_chan_out_word (V2(I, J, K), jca(1))
call f77_chan_out_word (QT(I, J, K), jca(1))
call f77_chan_out_word (Q2(I, J, K), jca(1))
call f77_chan_in_word (tt5, ica(0))
..... (tt6...tt9 调用方式同上)
call f77_chan_in_word (tt1, ica(1))
..... (tt2...tt4 调用方式同上)
call f77_chan_out_word (U2(I, J, K), jca(0))
call f77_chan_out_word (V2(I, J, K), jca(0))
call f77_chan_out_word (QT(I, J, K), jca(0))
call f77_chan_out_word (Q2(I, J, K), jca(0))
ALU2 = (W1 * (tt1+U22)-tt5 * (U22+tt6)) * DZZ
ALV2 = (W1 * (tt2+V22)-tt5 * (V22+tt7)) * DZZ
ALT2 = (W1 * (tt3+QT2)-tt5 * (QT2+tt8)) * DZZ
ALQ2 = (W1 * (tt4+Q22)-tt5 * (Q22+tt9)) * DZZ
8825 continue

```

程序中 K 表示处理器序号。

图 2 为模式的空间层次结构及数据垂直传送示意。如果把模式的垂直分层从第一层到第五层规定为从上到下的方向, 那么, 根据垂直积分的计算过程, 在做第一层计算的根处理器上(CPU1), 只需向后方向的数据传送, 在第五层的子处理器上(CPU5), 只需向前方向的数据传送, 而做中间几层计算的子处理器则需做两个方向的数据传送。这样的并行化处理相当于把一个五层模式转变成了一层模式。不难看出, 其结果是会大大地节省计算时间的。

由上述可知, 模式的主要计算量是在积分部分。由于客观分析的计算是在积分运算前一次性完成的, 且计算量有限, 进行并行处理的意义不大, 同时也不必因并行计算而修改处理原始数据的程序。而模式中的一些物理过程的计算, 如大尺度凝结加热和边界层的物理过程, 因其计算都是在一个水平面上, 故可以很方便地进行分层并行计算。对

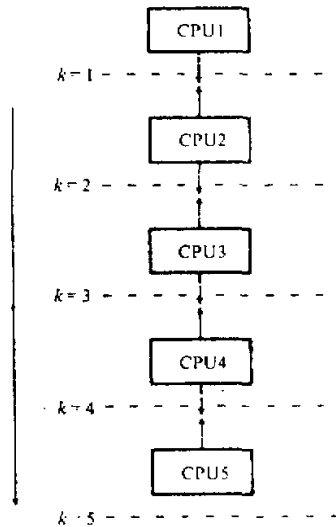


图 2 模式的空间层次结构及数据垂直传送示意图

于模式中总能量的计算以及积云对流参数化的计算等涉及到垂直数据交换的过程,则不便直接进行分层并行处理。由于在该模式中,积云对流参数化过程一般半小时计算一次;总能量的计算一般是一小时或更长的时间计算一次,其计算量相对较小,故本文暂时采用数据传送方式在根处理器上进行。

至于结果的输出,也需通过数据传送在根处理器上进行,因为,做为微机上的 Transputer 系统,一般不可能带多台终端设备。图 3 给出了并行化处理后的计算框图。其并行计算的流程是:在根处理器上的客观分析计算结束后,通过线性通信网络,将各层的初始场数据传送到相应的各个子板上进行积分计算,当满足图中判别框的时间判别时,再把各个子处理器上的数据送至根处理器上计算或输出。图中 T_1 为计算总能量的时间控制量, T_2 为计算对流凝结加热的时间控制量,根据模式的计算方案,一般一小时计算一次总能量,半小时计算一次对流凝结加热,若以 3 min 为一个时间步长,则 $T_1 = 20DT$, $T_2 = 10DT$, DT 为一个时间步长, T_3 为预报时间控制量,根据预报需要而定。

2. 试验结果

我们曾将这个五层细网格模式在该计算机系统的单处理器上运行 24 小时的预报,其运行时间为 40 min,与在 Dual-6800 微机上的运行情况相比,这

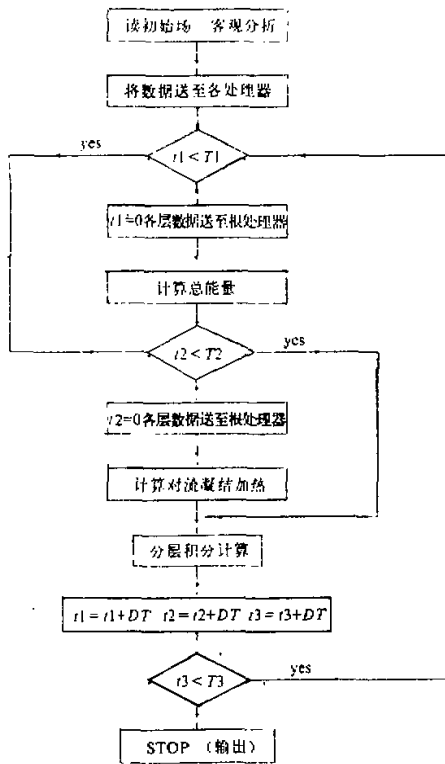


图 3 并行计算框图

这样的运行时间表明 Transputer 系统极大地提高了微机的运行速度,但是对业务预报而言,这样的运行时间是不能满足需要的,而将该模式并行处理后,使用五个处理器运行 24 小时预报,其运行时间为 596 s(约 10 min),并行运算的时间比单处理器提高了四倍多,这样的运行速度相当于一台大型计算机的计算能力。试验表明,利用并行化系统在微机上开展数值预报业务工作是完全可行的。图 4a 给出了并行处理后的 24 小时降水量预报图,与串程序的预报结果(图 4b 所示)完全相同,且雨区分布及雨带走向与实况也较一致。这个结果也表明,由于本文的并行处理只是对程序的结构做了调整,并未改变程序的算法和物理过程,因此,上述二个系统的运算结果理应相同或相近。

五、讨 论

利用多处理器计算数值预报模式的工作,目前还处于起步阶段。对于模式本身的算

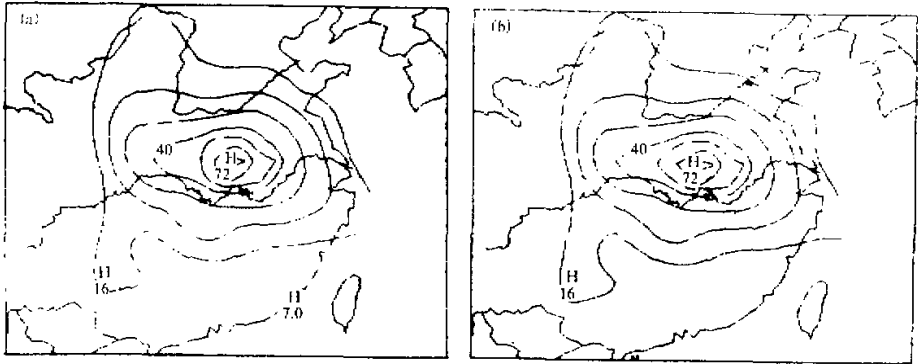


图4 24小时雨量预报图(1984年6月13日08时-14日08时)

(a)并行程序, (b)串行程序

法及并行程序的设计, 还有许多值得改进和完善的地方。由计算框图可见, 在作总能量和积云对流参数化的计算时, 需要进行数次数据通讯, 这是影响运行速度的一个主要因素, 如果能从算法上对程序本身及部分物理过程的计算作进一步的优化, 以减少数据通讯的次数, 会进一步提高计算速度。此外, 本文中并行系统的数据通讯采用的是简单的线性通讯网络, 若能根据程序的运行特点对通讯的结构作一些优化处理, 或许会提高通讯的速度, 缩短运行时间, 这些还有待于进一步的试验。

尽管本文所得到的试验结果是初步的。但它充分显示出利用多处理器开展数值预报工作的广阔前景。随着对并行计算的深入研究, 以及并行系统的进一步完善, 气象工作者将有可能在一般的机器上从事更复杂、更大计算量的数值预报工作。

参 考 文 献

- [1] 王宗皓, 1981, 天气分析预报系统工程的理论模式, 中期数值预报文集, 气象出版社。
- [2] 王宗皓等, 1982, 气象组装模式的编辑程序, 科学探索, 2, 1—14。
- [3] 周晓平等, 1984, 梅雨锋上中尺度低压发生的数值模拟实验, 大气科学, 8, No.4, 353—361。

Parallel Computation of the Primitive Equation Using Multiple Processors

Jiao Meiyang Li Guojie

(Anhui Meteorological Institute, Hefei 230061)

Lin Hong

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract

In this paper, the function and the property of multiple processors (transputer chip), and the ex-

panding of the function of a microcomputer with this extra parallel system are introduced. As one of applications of this technique, a parallel calculation program of five-level primitive equation model is designed. The experimental results prove that the numerical parallel computation can evidently speed up the integration of the numerical model. This test shows that it is possible to make numerical forecasts in the meteorological bureau at the provincial level.

Key words: multiple processors; parallel calculation; numerical model.

附录: 垂直积分部分的原始程序

```

IF(K.NE.1) GOTO 8819
ALU2 = W(I,J,1) * (U2(I,J,1)+U2(I,J,2)) * DZZ
ALV2 = W(I,J,1) * (V2(I,J,1)+V2(I,J,2)) * DZZ
ALT2 = W(I,J,1) * (QT(I,J,1)+QT(I,J,2)) * DZZ
ALQ2 = W(I,J,1) * (Q2(I,J,1)+Q2(I,J,2)) * DZZ
GOTO 8825
8819 IF(K.NE.LM) GOTO 8820
ALU2 = -W(I,J,K-1) * (U2(I,J,K-1)+U22) * DZZ
ALV2 = -W(I,J,K-1) * (V2(I,J,K-1)+V22) * DZZ
ALT2 = -W(I,J,K-1) * (QT(I,J,K-1)+QT2) * DZZ
ALQ2 = -W(I,J,K-1) * (Q2(I,J,K-1)+Q22) * DZZ
GOTO 8825
8820 ALU2 = (W1 * (U2(I,J,K+1)+U22) - W(I,J,K-1) * (U22+U2(I,J,K-1))) * DZZ
ALV2 = (W1 * (V2(I,J,K+1)+V22) - W(I,J,K-1) * (V22+V2(I,J,K-1))) * DZZ
ALT2 = (W1 * (QT(I,J,K+1)+QT2) - W(I,J,K-1) * (QT2+QT(I,J,K-1))) * DZZ
ALQ2 = (W1 * (Q2(I,J,K+1)+Q22) - W(I,J,K-1) * (Q22+Q2(I,J,K-1))) * DZZ
8825 UP1 = UP(I+1,J,K)+UP(I,J,K)
UP2 = UP(I,J,K)+UP(I-1,J,K)
VP1 = VP(I,J+1,K)+VP(I,J,K)
VP2 = VP(I,J,K)+VP(I,J-1,K)
ALU2 = (UP1 * (U2(I+1,J,K)+U22) - UP2 * (U22+U2(I-1,J,K)))
      + VP1 * (U2(I,J+1,K)+U22) - VP2 * (U22+U2(I,J-1,K))) * A11 + ALU2
ALV2 = (UP1 * (V2(I+1,J,K)+V22) - UP2 * (V22+V2(I-1,J,K)))
      + VP1 * (V2(I,J+1,K)+V22) - VP2 * (V22+V2(I,J-1,K))) * A11 + ALV2
ALT2 = (UP1 * (QT(I+1,J,K)+QT2) - UP2 * (QT2+QT(I-1,J,K)))
      + VP1 * (QT(I,J+1,K)+QT2) - VP2 * (QT2+QT(I,J-1,K))) * A11 + ALT2
ALQ2 = (UP1 * (Q2(I+1,J,K)+Q22) - UP2 * (Q22+Q2(I-1,J,K)))
      + VP1 * (Q2(I,J+1,K)+Q22) - VP2 * (Q22+Q2(I,J-1,K))) * A11 + ALQ2

```