

# 一种基于 DAG 图的异构可重构任务划分方法

郝水侠<sup>1,2,3</sup>, 曾国荪<sup>1,2</sup>, 谭一鸣<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 计算机科学与技术系, 上海 201804; 2. 国家高性能计算机工程技术中心同济分中心, 上海 201804;  
3. 徐州师范大学 数学科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为了实现高性能低功耗的计算, 以任务划分为研究对象, 提出了异构可重构计算的基本概念和形式化描述方法, 给出了基于异构计算任务和异构可重构体系结构相结合的异构可重构两种任务划分方法: 节点内部可重组及网络可重建的任务划分及算法, 最后验证了其任务划分方法的有效性.

**关键词:** 有向无环图(DAG); 异构计算任务; 可重构体系结构; 任务划分

**中图分类号:** TP 338

**文献标识码:** A

## A Method of Heterogeneous and Reconfigurable Task Partitioning Based on DAG

HAO Shuixia<sup>1,2,3</sup>, ZENG Guosun<sup>1,2</sup>, TAN Yiming<sup>1,2</sup>

(1. Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Tongji Branch, National Engineering & Technology Center of High Performance Computer, Shanghai 201804, China; 3. School of Mathematical Science, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to realize high-performance and low-power computing with task partitioning as the study object, the heterogeneous reconfigurable computing definition and its formal description were proposed and two task partitioning methods, intra-node recombined and network rebuild, were presented based on matching heterogeneous computing task with reconfigurable architecture. Then the algorithm was derived. Theoretical analysis and simulations prove the task-partitioning algorithm to be valid.

**Key words:** directed acyclic graph (DAG); heterogeneous computing task; reconfigurable architecture; task partitioning

异构可重构系统是目前高性能计算的最典型的模式. 例如, 美国 Cray 公司研制的“Jaguar”的 Cray XT5 超级计算机和我国研制的“天河一号”都是异构可重构系统的典型. 自 1989 年, Freund<sup>[1]</sup> 首先提出了异构优化理论, 开创了异构计算研究的先河. 1993 年, 陈等<sup>[2]</sup> 提出了异构优化选择理论, 讨论了不同代码段中异构代码在不同类型资源上的并发执行. 南加州福利亚大学 Khokhar 教授指出, 异构计算给求解“超级挑战问题”(如核爆炸模型、全球气象模型、DNA)提供了机会<sup>[3]</sup>. 随着宽带高速 internet 成为现实, 各大学, 研究所的高性能计算机连成一体实现“云计算”, 是异构计算切实可行的方式. 可重构计算是高性能计算研究的另一个热点, 自从 19 世纪 60 年代, 美国加州大学的 Estrin 等<sup>[4]</sup> 提出了可重构计算的概念, 奠定了可重构计算的基础. 70 年代末, Kartashev 等<sup>[5]</sup> 提出了动态可重构系统的概念, 真正意义上实现了系统能兼有硬件的效率和软件的灵活性. 90 年代末 Xilinx 公司开发出世界上第一个现场可编程门阵列(FPGA)之后, 可重构芯片在技术和商业上得到了足够的重视. 但是异构可重构计算的并行化编译仍然跟不上实际的需求, 挖掘程序的异构可重构特征是异构可重构计算提高性能的最大保障. 挖掘异构可重构特征关键是将计算任务合理地分配到相应的异构可重构计算系统上, 充分利用异构可重构特性. 任务划分是并行计算的首要步骤, 也是高效能计算设计的关键步骤, 任务划分策略的好坏直接影响到负载平衡性、通信复杂度、任务间的依赖性以及任务间的同步方式和同步频繁程度等. 因此研究异构可重构任务划分有着非常重要的意义.

收稿日期: 2010-09-08

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2009AA012201); 国家自然科学基金资助项目(61103068); NSFC-微软亚洲研究院联合资助项目(60970155); 教育部博士点基金项目(20090072110035); 上海市优秀学科带头人计划项目(10XD1404400); 高效能服务器和存储技术国家重点实验室开放基金项目(2009HSSA06).

第一作者: 郝水侠(1973—), 女, 副教授, 博士生, 主要研究方向为异构计算、可重构计算. E-mail: sxhao@xjnu.edu.cn

通讯作者: 曾国荪(1964—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为异构计算、信息安全. E-mail: gszeng@tongji.edu.cn

通常任务划分的方法有递归划分、功能划分、数据划分、探测性划分等,这些方法在宏观上解决了计算任务的显示划分.在微观上,常用方法有图划分、超图划分等.图划分方法有等分划分技术<sup>[6]</sup>,基于二分图的划分方法<sup>[7]</sup>和超图的任务划分方法<sup>[8]</sup>.另外还有基于多约束和多目标的任务划分方法<sup>[9]</sup>,它是前面几种方法的扩展.文献[10]提出不规则图的多级递归二分划分算法.文献[11]提出基于图的非均衡划分方法,利用了各个机器计算性能不同而将图划分为和机器性能成比例的几个子图.这些划分算法在不同侧面解决了同构或者异构处理器上任务的并行划分,但是大多数任务划分未考虑体系结构,即如何将异构应用程序与可重构计算系统结合的任务划分目前很少有研究,因此本文在研究异构可重构系统的基础上,提出节点内部可重组及网络可重建的任务划分方法.

## 1 问题描述

### 1.1 异构可重构的基本概念

在计算机系统中,异构性无处不在,主要体现在以下几个方面:计算机硬件平台的异构性、基础操作

系统的异构性、数据库管理系统的异构性、通信网络的异构性、应用程序和服务的异构性和信息的异构性.异构计算是应用任务存在异构和计算机系统存在异构的必然产物,是高性能并行计算发展的必然结果.

**定义 1** 异构计算,是指将性能和功能各异的计算机(如:个人机(PC)、工作站群、向量机、单指令多数据流(SIMD)、多指令多数据流(MIMD)计算机、中央处理器(CPU)、图形处理器(GPU)、可编程门阵列(FPGA)、数字信号处理器(DSP)、专用机(CELL)等)通过高速网络并以一定的耦合方式连成的并行计算环境,充分利用程序和部件的异构性,如图 1 所示,其各尽其能,合理分治,协同处理应用任务,实现高性能的过程.

**定义 2** 可重构计算,指在软件的控制下,利用系统中的可重用、可编程资源和器件,根据应用的需要重新构造一个新的计算平台,达到接近专用硬件设计的高性能.可重构计算的本质是利用可编程器件多次重新配置逻辑单元的功能和互连的特性,使系统兼具灵活性、高性能、高可靠、低功耗、低成本、易于升级等多种优良特性.具有可重构计算特征的系统称为可重构计算系统.

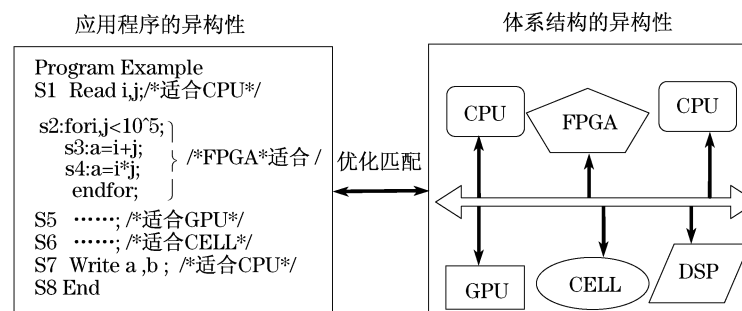


图 1 异构计算的异构性

Fig. 1 Heterogeneity of heterogeneous computing

在可重构计算系统中,硬件的结构配置信息可以像软件程序一样被动态调用或修改.通过可重构计算,一方面可以提高计算机的性能,使之能适应不同的要求;另一方面可以节省软硬件的开发费用,尽量使用已有的资源来构造新的系统,减少不必要的浪费.

**定义 3** 异构可重构计算,是指为了实现高性能计算,挖掘异构应用程序中异构特征,通过整合了通用处理器、可重构部件和加速部件的新型高性能计算机系统实现应用执行的高效能.系统具有计算部件可重构(reconfigure)、节点内部件可重组

(recombine)、互连网络乃至整机可重建(rebuild)三个特性.

### 1.2 异构可重构计算任务描述

异构可重构计算系统性能的高低,不仅仅与系统所构成硬件相关,而且与分配到计算系统上的计算任务紧密相关.若分配到计算系统上的计算任务与计算系统相匹配,则系统性能就能充分发挥,否则系统性能仅能发挥 5%~10%<sup>[12]</sup>.因此在进行任务划分时不仅仅需要考虑应用任务如何划分,且在应用任务划分时应考虑到相对应的体系结构.在任务划分之前,应该首先对计算任务进行描述和刻画.

**定义 4** 异构可重构的计算任务,可定义为异构可重构有向无环图 HR-DAG,用六元组表示,  $HR-DAG = (V, E, C, T, H, R)$ . 其中,  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  表示子任务集合,  $E = \{e_{ij}\}$  表示子任务间的偏序关系,  $C = \{c_0, c_1, \dots, c_n\}$  表示子任务的计算量集合,  $T = \{t_{ij}\}$  表示子任务的通信量集合,  $H = \{H_0, H_1, \dots, H_k\}$  表示子任务的异构代码特征集合,其值取  $\{0, 1, 2, 3\}$ , 0 代表通用 CPU, 1 代表 FPGA, 2 代表 GPU, 3 代表 DSP, 其序是根据代码中的频率高低来排序. 使用频率越高, 其标号越低.  $R = \{R_0, R_1, \dots, R_m\}$  表示子任务的重构代码特征集合. 其值为  $\{0, 1\}$ , 1 表示可以重构, 0 表示不能重构. 如图 2 所示, 每一个应用程序都可用 HR-DAG 来表示.

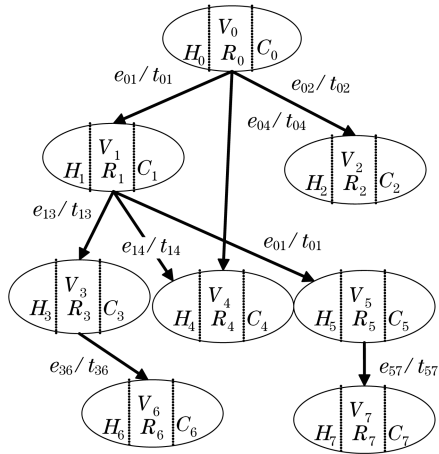


图 2 HR-DAG

Fig.2 HR-DAG

### 1.3 异构可重构体系结构描述

**定义 5** 异构可重构体系结构,指整合了通用处理器、可重构部件和加速部件,具有一定的拓扑结构的新型高性能计算机系统. 该体系结构具有重构特征,这种重构指系统具有计算部件可重构(reconfigure)、节点内部件可重组(recombine)、互连网络乃至整机可重建(rebuild)三个特性. 其中,每一个处理单元由一个处理器和本地存储单元组成. 因此,处理单元不共享内存,通信仅靠消息传递. 体系结构图用图  $P = (V_p, E_p, H, C, W)$  来表示. 其中: 节点  $V_p$  表示处理器的集合,  $N_p = |V_p|$  是处理器的个数;  $E_p$  是边的集合,表示处理器之间的通信关系;  $H$  表示处理器的特征,其值如同定义 4 中的  $H$  的值;  $C(p_i, p_j)$  表示单位时间内传输的通信代价量;  $W(p_i)$  为节点  $p_i$  单位时间内处理的计算代价. 如图 3 所示.

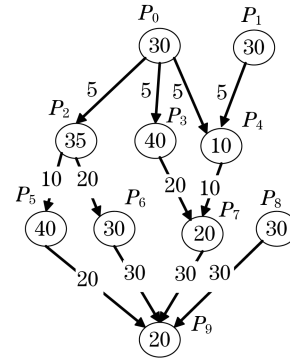


图 3 异构可重构体系结构图

Fig.3 Heterogeneous and reconfigure architecture

### 1.4 问题定义

基于 DAG 图的异构可重构的任务划分是把用 HR-DAG 描述的计算问题分割成具有不同异构特征子任务,再根据系统的异构可重构特征(计算部件可重构、节点内部件可重组、网络之间可重建),进行自适应,定制来调整系统适应计算任务的需求,共同优化系统,提高整个系统的效能. 由于计算部件可重构是关于 FPGA 专门的研究,故本文重点研究节点内部件可重组和网络之间可重建的任务划分方法.

## 2 基于 HR-DAG 图的异构可重构任务划分方法

异构可重构任务划分问题指在划分中根据划分中应用问题的功能、规模和结构,适当调整计算节点的形态、计算组件类型和数量、以及计算节点的连接关系等,以便达到高效能. 节点内部件可重组指划分时调整计算节点的类型及数量,若调整节点的连接关系是基于网络重建的划分方法.

### 2.1 节点内部件可重组的任务划分方法

节点内部件可重组,即划分过程中根据 HR-DAG 适当调整计算部件,使得处理器类型和数量符合用户要求. 它利用 HR 的异构特征初步任务划分,然后分析已有体系结构的计算类型和数量,逐步调整划分的子任务集,使得划分好的子任务集能最大化适应异构可重构体系结构. 在划分过程中,需要用到处理器的计算能力,初步划分策略,部件重组策略.

处理器的计算能力,采用文献[11]的计算方法,在异构环境中,单台处理机的计算能力(computing power, CP)是一个综合量,包括 I/O,内存读写,处理器,网络通信开销等. 所以,一个处理机的计算能力

可定义为:

$$C_P = \frac{\frac{f_{i/o}}{t_{i/o}} + \frac{f_{r/w}}{t_{r/w}} + \frac{f_{comp}}{t_{comp}} + \frac{f_{comm}}{t_{comm}}}{f_{i/o} + f_{r/w} + f_{comp} + f_{comm}}$$

其中:  $f_{i/o}$ ,  $f_{r/w}$ ,  $f_{comp}$ ,  $f_{comm}$  分别为 i/o, 内存读写, 计算, 通信操作的频率;  $t_{i/o}$ ,  $t_{r/w}$ ,  $t_{comp}$ ,  $t_{comm}$  分别为 i/o, 内存读写, 计算, 通信操作类型的平均执行时间, 可以由基准测试程序得到.

初步划分目的是将 HR-DAG 等分, 方法是寻找体系结构图的子图, 利用图同构或者子图同构的方法. 一般来说 HR-DAG 中的结点数远远大于体系结构图结点数.

分类策略是等分后的每个 HR-DAG 子图为目标对象, 将所有的计算子任务根据其异构特征将其分类, 形成不同子任务特征集  $\{V_0, V_1, V_2, V_3\}$ , 其中  $\cup V_i = V$  且  $V_i \cap V_j = \emptyset (i \neq j)$ . 进一步计算每个子任务集的计算量. 其计算量等于各个子任务集内子任务计算量和. 部件重组策略, 通过增加或者减少体系结构中的计算部件, 从而使得体系结构中处理器部件的计算能力和 HR-DAG 图中相应处理器特征的计算量成正比.

有了这些基本的策略, 其划分步骤如下:

步骤 1: 根据初步划分策略将计算任务图  $G$  形成若干个 HR-DAG 子图  $G_i$ , 使得每个 HR-DAG 子图的结点数和体系结构图中结点数大致相同. 令  $G' = \phi$ ;

步骤 2: 计算体系结构中每个计算部件的计算能力, 其方法如上所述, 并得出整个体系结构的处理器计算能力比;

步骤 3: 并行处理每个 HR-DAG 子图的任务划分. 对每个 HR-DAG 子图  $G_i$ :

步骤 3.1: 根据分类策略, 将  $G_i$  划分成 4 种不同特征的任务集. 并计算出每种特征子任务集的计算量.

步骤 3.2: 计算每个 HR-DAG 子图, 根据体系结构相应特征得到的子任务的计算量比例. 然后比较两种比例, 当两者比例相同时, 说明体系结构部件无需重组, HR-DAG 子图的划分结束, 并输出该子图  $G_i$ , 且  $G = G - G_i$ . 否则, 应用部件重组策略, 再比较两者比例是否相同, 若相同, 则结束该 HR-DAG 子图划分且输出划分结果, 否则将该 HR-DAG 子图  $G_i$  并入未划分的 HR-DAG 图  $G'$  中,  $G' = G' + G_i$ .

步骤 4: 若  $G = \phi$ , 则划分结束. 否则  $G = G'$ , 转步骤 1.

## 2.2 网络可重建的任务划分方法

网络之间重建是根据计算任务的结构特征来进行网络重新连接. 如果计算任务适合 Mesh、Ring、Torus、Tree 等其中之一结构, 则通过网络重建将体系结构互联为最适合其的结构. 以矩阵相乘为例, 如果用串行计算的方法, 其时间复杂度为  $O(n^3)$ ; 如果将处理器连接成 mesh 结构上设计矩阵相乘并行算法, 其时间复杂度为  $O(3n)$ ; 如果将处理器连接成 torus 结构上设计矩阵相乘并行算法, 时间复杂度为  $O(n)$ . 所以可以利用重构手段, 在进行矩阵相乘运算时将系统结构重构成 torus 结构. 假设处理器个数已经确定, 且拓扑结构可调整为以下几种类型, 这符合实际的做法. 典型的网络互联拓扑结构的特征参数见表 1<sup>[13]</sup>, 其中  $N$  代表节点个数,  $D$  表示直径,  $D_{ave}$  表示平均距离,  $P$  表示实际处理器个数.

表 1 典型的网络互联特征参数表

Tab.1 Typical networking features parameters

拓扑结构	度	直径	平均距离	等分带宽	$D (D_{ave}) @ P = 1024$
1 维线性阵列	2	$N - 1$	$N/3$	1	巨大
1 维环	2	$N/2$	$N/4$	2	
2 维网格	4	$2(N^{1/2} - 1)$	$2/3 N^{1/2}$	$N^{1/2}$	63 (21)
2 维圆环	4	$N^{1/2}$	$1/2 N^{1/2}$	$2N^{1/2}$	32 (16)
$k$ 维 $n$ 立方体	$2n$	$nk/2$	$nk/4$	$nk/4$	15 (7.5) @ $n = 3$
超立方体	$\log N$	$n$	$n/2$	$N/2$	10 (5)

结构特征相似: 结构特征指的典型网络互联的参数, 分别是顶点的度, 直径, 平均距离和等分带宽. 顶点的度指每个节点的平均的度 (有向图指平均入度和出度之和). 直径指任何两点之间通信距离最大的值, 或者可以说是任务两点之间最短路径当中最长的一条路径长度. 平均距离指所有节点对之间距离的平均值. 等分带宽指网络中存在通道的最小距离. 如果去掉这些通道, 则网络分成两个相等的非连接的节点集合<sup>[13]</sup>. 这里的结构特征相似指 HR-DAG 和体系结构图的结构特征相同或者相近. 相近指 4 个参数中有两个或者两个以上的相同. 为了叙述方便, 令  $G$  为 HR-DAG 图,  $G_i$  为 HR-DAG 的子图.  $G'$  表示划分后的子任务集.  $m, n$  分别为 HR-DAG 图和体系结构图节点的个数. 初始化  $i = 1, G' = \phi, j = m/n$ .

网络重建策略是调整体系结构之间的连接方式, 使得体系结构的特征和 HR-DAG 子图的统计出来的特征相同.

基于网络之间可重建的任务划分步骤:

步骤 1: 计算体系结构图中结构特征值. 其中结构特征值指顶点的度, 直径, 平均距离和等分带宽.

步骤 2: 若  $G$  为空或者  $j < m/2n$ , 则转步骤 3, 否则在  $G$  中寻找一个和体系结构图结点数相同的子图  $G_i$ .

步骤 2.1: 计算  $G_i$  的结构特征.

步骤 2.2: 若  $G_i$  的结构特征与体系结构图的结构特征相同或者相似, 则形成一个新的划分子集  $G_i$ , 且  $G = G - G_i$ ,  $G' = G' + G_i$  (将  $G_i$  合并到划分的子任务集中),  $i = i + 1$ . 转步骤 2.

步骤 2.3: 记录  $G_i$  的结构特征,  $j = j - 1$ .

步骤 3: 若  $j < m/2n$ , 表示找到的与体系结构结点相同的子图与体系结构特征不相似, 因此需要网络之间重建. 根据重建策略, 形成新的体系结构图, 转步骤 1.

步骤 4:  $G$  为空, 表示划分已经结束, 输出  $G'$ , 否则转步骤 2.

该划分方法和文献[11]相比, 不仅仅考虑了处理器的异构特征, 也考虑了可重构的体系结构特征, 更加符合目前高性能发展的体系结构特征.

### 3 实验与性能分析

本实验的平台是由澳大利亚墨尔本大学开发的网格模拟器 GridSim5.0 进行实验, 与其他模拟工具相比, GridSim 能够模拟建立分布的网格异构资源及网络连接, 能够模拟生成随机任务关系图及体系结构, 任务图相关参数包括: 任务节点个数, 计算任务量, 任务间依赖关系及通信量; 网络环境相关参数包括: 网络拓扑环境、资源类型、异构率, 能力级及个数.

实验通过构建不同的体系结构来建立异构可重构环境, 并根据模拟生成任务关系图, 建立任务实体. 根据不同的划分方法, 使用相同调度策略将子任务调度到不同应用的资源实体上进行计算, 实验结果通过连接代价、调度长度及算法运行时间进行评价. 实验中, 针对不同的任务数生成任务关系图进行任务调度, 得到不同任务数情况下的算法运行时间及平均调度长度, 实验结果见表 2. 表中  $n$  代表节点个数,  $s$  代表计算任务量的最大值,  $r$  代表平均分支数,  $e$  代表通信量的最大数.  $C_{con}$  表示连接代价,  $L_{ms}$  表示调度长度,  $T$  表示运行时间.

表 2 在不同的划分策略下连接代价、调度长度和运行时间

Tab.2 Connection cost, makespan and runtime of different partition-strategies

编号	参数设置 {n s r e}	Max-min 划分法			节点内重构			网络之间重组		
		$C_{con}$	$L_{ms}$	$T$	$C_{con}$	$L_{ms}$	$T$	$C_{con}$	$L_{ms}$	$T$
1	{20 20 4 10}	10.4	0.9	0.03	10.5	0.6	0.04	11.3	0.5	0.05
2	{40 20 4 10}	24.2	1.3	0.05	26.7	1.1	0.06	29.2	1.0	0.055
3	{60 20 4 10}	42.3	3.5	0.11	45.2	3.2	0.12	49.2	2.1	0.13
4	{80 20 4 10}	66.3	7.8	0.20	68.3	5.6	0.20	70.2	3.2	0.22
5	{100 20 4 10}	86.4	8.0	0.42	90.2	7.1	0.41	96.2	5.6	0.40
6	{20 40 4 20}	18.3	1.8	0.04	21.2	1.2	0.03	23.1	1.0	0.33
7	{40 40 4 20}	40.4	2.5	0.06	46.8	2.0	0.055	57.6	1.9	0.06
8	{60 40 4 20}	83.5	6.9	0.13	93.1	6.1	0.10	113.2	3.8	0.12
9	{80 40 4 20}	134.3	14.0	0.30	137.4	10.0	0.29	169.2	6.0	0.29
10	{100 40 4 20}	175.3	16.0	0.45	180.5	13.9	0.32	227.5	10.1	0.46

实验结果表明, 在当计算任务 HR-DAG 图中结点较少, 且任务量和通信量不大时, 节点内重构和网络重组和 Max-min 划分方法只是降低了调度长度的大小, 整体运行时间都是增大. 但是随着结点数、结点任务量和通信量的增大, 节点内重构划分方法不仅使得调度长度的数目减少, 而且运行时间也有所降低. 网络之间重组的任务划分方法使得整体时间有所降低, 但效果没有节点内重构明显. 当任务划分结构接近标准结构如 Mesh, Ring, Hybercube, Torus, Tree 等结构时, 基于网络可重构任务划分的

执行时间会大大减少. 如果划分后形成的结构找不到和其匹配的体系结构时, 重新进行任务划分和体系结构的调整使得使得计算任务执行时间大大减少, 当然也会带来不必要的额外开销. 因此在基于异构可重构的任务划分时可以根据不同情况考虑计算节点的重组或网络的重建.

### 4 结语

提出了异构可重构计算的概念, 并在此基础上

给出了 HR-DAG 图、异构可重构体系结构的形式化定义,为高效能计算提供了理论基础,另外利用应用程序的异构特征并结合节点内部件可重组和网络可重建对 HR-DAG 实现了任务划分.这种任务划分方法可以应用到目前的高效能计算及相应的应用问题中,为异构可重构环境中的并行任务划分提供了理论支持,对于类似问题的其他领域应用也具有一定的参考价值.但在探索异构应用程序 DAG 图和体系结构之间的相似性尚有不足,这是今后研究的重点.

### 参考文献:

- [1] Freund R F. Optimal selection theory for superconcurrency [C]// Proceedings of Conference on Supercomputing. New York: ACM, 1989: 699 - 703.
- [2] Chen S, Eshaghian M, Khokhar A, et al. A selection theory and methodology for heterogeneous supercomputing [C] // Proceedings of Workshop on Heterogeneous Processing. Los Alamitos: IEEE CS Press, 1993: 15 - 22.
- [3] Khokhar A, Prasanna V K, Shaaban M E. Heterogeneous computing: challenges and opportunities[J]. Computer, 1993, 26(6): 18.
- [4] Estrin G, Bussell B, Turn R, et al. Parallel processing in a restructure computer system [J]. IEEE Transactions on Electronic Computers, 1963, 12(5): 747.
- [5] Kartashev S I, Kartashev S P. A multicomputer system with dynamic architecture [J]. IEEE Transactions on Computers, 1979, 28(10): 704.
- [6] Bruce H, Tamara G. Graph partitioning models for parallel computing[J]. Parallel Computing, 2000, 26(1): 1519.
- [7] Selvakumaran N, George K. Multiobjective hypergraph partitioning algorithms for cut and maximum subdomain-degree minimization[J]. IEEE Transactions on Computer Aided Design of Intergrated Circuits and System, 2006, 25(3): 504.
- [8] Hendrickson B, Kolda T G. Partitioning nonsquare and nonsymmetric matrices for parallel processing [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2000(21): 2048.
- [9] Catalyurek U V, Aykanat C. Hypergraph-partitioning based decomposing for parallel sparsematrix vector multiplication[J]. IEEE Transactions on Parallel Distribution System, 1999, 10(5): 673.
- [10] Karypis G, Kumar V. Multilevel k-way partitioning scheme for irregular graphs[J]. Journal of Parallel Distribution Computer, 1998, 48(1): 96.
- [11] 沈铁伟, 曾国荪. 异构计算中一种图的非均衡划分算法[J]. 计算机科学, 2006, 33(6): 260.  
SHEN Yiwei, ZENG Guosun. An unbalancing partitioning scheme for graphs in heterogeneous computing[J]. Computer Science, 2006, 33(6): 260.
- [12] 王铁然. 分布式主存系统上自动数据和计算分解的相关研究[D]. 北京: 中国科学院计算技术研究所, 2006.  
WANG Yiran. Research on automatic data and computation decomposition on distributed-memory systems [D]. Beijing: Institute of Computing Technology Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [13] 杨晓东, 陆松, 牟胜梅. 并行计算体系结构技术与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
YANG Xiaodong, LU Song, MOU Shengmei. Parallel computing architecture technology and analysis [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [1] LUO Xin. Study of diagnosis method and system for health condition of highway tunnel [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.
- [2] 姜松湖, 关宝树. 铁路隧道病害诊断专家系统[J]. 隧道与地下工程, 1992, 12: 44.  
JIANG Songhu, GUAN Baoshu. Railway tunnel damage expert system[J]. Tunnel and Underground Structure, 1992, 12: 44.
- [3] 刘海京. 公路隧道健康诊断计算模型研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.  
LIU Haijing. Study on mechanical and numerical method for road tunnel diagnosis[D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.
- [4] Lee J S, Choi I Y, Lee H U, et al. Damage identification of a tunnel liner based on deformation data [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(1): 73.
- [5] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994.  
CAI Wen. Matter element model and its application [M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 1994.
- [6] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. 山东大学学报, 2004, 39(2): 25.  
ZHANG Xiaoping. The definition of product about fuzzy comprehensive evaluation methods based on closeness [J]. Journal of Shandong University, 2004, 39(2): 25.
- [7] 胥彝, 王华牢, 夏才初. 盾构隧道结构病害状态综合评价方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 201.  
XU Ben, WANG Hualao, XIA Caichu. Study on comprehensive evaluation of shield tunnel structural deflections [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 201.

### (上接第 1615 页)