

并行分布计算中的调度 算法理论与设计

朱福喜 何炎祥 编著

本书对调度算法进行了全面系统的分析,着重研究了一般DAG任务图的启发式调度算法、静态与动态相结合的混合调度算法以及面向AND/OR优先约束关系的调度问题,并探讨和提出了一些新颖的算法。



武汉大学学术丛书
WUHAN UNIVERSITY ACADEMIC LIBRARY

▶ 全国优秀出版社 ▶ 武汉大学出版社

TP301.6
26



武汉大学学术丛书

并行分布计算中的 调度算法理论与设计

朱福喜 何炎祥 编著

北方工业大学图书馆



00533247

武汉大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

并行分布计算中的调度算法理论与设计/朱福喜,何炎祥编著. —武汉:武汉大学出版社,2003.5

武汉大学学术丛书

ISBN 7-307-03921-4

I. 并… I. ①朱… ②何… III. ①并行算法—算法理论
②分布式计算机系统—算法理论 ③并行算法—算法设计 ④分
布式计算机系统—算法设计 IV. ①TP301.6 ②TP338.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第019335号

责任编辑:陈刚 责任校对:鄢春梅 版式设计:支笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:武汉市科普教育印刷厂

开本:850×1168 1/32 印张:6.75 字数:170千字 插页:3

版次:2003年5月第1版 2003年5月第1次印刷

ISBN 7-307-03921-4/TP·139 定价:14.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。



武汉大学
学术丛书

2



武汉大学学术丛书

主任委员	▶	侯杰昌		
副主任委员	▶	卓仁禧	胡德坤	
秘书长	▶	江建勤		
委员		(以姓氏笔画为序)		
	▶	丁俊萍	马费成	王秀珍
		文习山	邓大松	石兢
		龙泉明	宁津生	刘经南
		李文鑫	李德仁	杨弘远
		杨金忠	卓仁禧	易帆
		罗以澄	周云峰	周茂荣
		庞代文	胡德坤	侯杰昌
		施雨湘	郭齐勇	谈广鸣
		曾令良	樊明文	

内 容 提 要

并行分布计算是当前计算机科学的热点之一。调度算法是影响分布计算的关键因素,也是一个具有挑战性的课题。本书对这个领域里的相关问题进行了全面系统的分析,着重研究了一般 DAG 任务图的启发式调度算法、静态与动态相结合的混合调度算法以及面向 AND/OR 优先约束关系的调度问题,并探讨和提出了一些很新颖的算法,例如:充分考虑计算量、通信量和处理机计算能力的预分配算法;将分布式人工智能中的 Agent 技术应用于动态负载均衡的静态与动态混合调度的方法;在单机和多处理机上,对一般 AND/OR 优先约束关系的任务系统进行调度的启发式方法。本书力图反映调度算法方面的新观点、新思路、新成果,可供从事计算机科学学习和研究的大学生、研究生和科技工作者学习和参考。

前 言

计算机网络和 Internet 的迅速发展使得分布并行计算越来越流行。同时,由于微处理器性能迅速增强,新的快速网络不断出现,可移植的高可靠性通信软件的产生,使得基于网络的计算比起传统的多处理器计算更显得具有较好性能和实用价值,并成为并行分布计算的主流。所以,在过去的几年里,基于网络的计算对于解决无论是大型还是小型的科学计算问题都是非常流行的方法。目前已有许多利用计算机网络和 Internet 计算机资源进行分布计算的非常成功的项目,例如:

GIMP 项目利用 Internet 发现 MERSENNE 素数;

RSA FACTORING-BY-WEB 项目致力于破译 RSA 密码;

ZURICH 大学计算机科学系的 V. Sranmpen 利用 Internet 解决分子系列分析问题;

Bovine 项目成功破译 RC5 和 DES 密码,这项研究持续 250 天,互连的计算机的计算能力相当于 14 685 个 Intel Pentium Pro 200 或者 58 163 个 Intel Pentium II 的能力;

SETI @HOME 项目致力于将数以万计的 Internet 空闲 PC 资源用于寻找外星空间智能 (Seeking Extra Terrestrial Intelligence, SETI)。

这些例子表明,成千上万的散置的计算机可以通过 Internet 集聚在一起,形成一个基于 Internet 的超级计算机系统。它只是利用空闲的 CPU 时间,而不需要特别的成本就可以解决需要长时间计算的大型科学计算问题。

使用工作站和个人计算机进行分布并行处理、以低成本完成大型科学计算虽然是一个非常具有发展前景的途径,但同时也提出了大量富于挑战性的课题,调度就是其中的一个很重要的问题。它的根本问题是,当一个并行程序实现一组任务后,就需要将它们合理或优化地分配到分布系统中的处理单元。如果这个问题得不到解决,则有可能导致分布计算效率低下,更有甚者,有可能造成其效率不如单机计算,乃至计算失败。因此,调度问题是分布计算的瓶颈问题之一。

调度问题对绝大多数应用来说是 NP-完全的,只有少数高度简化的领域才不是 NP-完全的。由于调度问题研究的艰巨性,摆在人们面前还有许多问题没有解决。因而,本书在这个领域里进行了一些有益的尝试。本书分析调度中的主要问题,详细讨论了当前大量已有的调度算法,提出若干新的调度算法改善调度系统的性能,并对某些特定问题领域的调度问题,提出了一套完整的算法,较好地解决该领域的调度问题。

本书首先涉及的是静态调度问题。有很大一类科学计算问题都可以用静态调度来完成,因此,对静态调度算法进一步发掘也是非常有意义的。近年来,分布式人工智能迅速发展,将分布式人工智能的一些较为成熟的技术应用于分布计算不失为一个很新颖的想法。Agent 技术作为分布式人工智能的一个较有代表性的技术,具有非常好的应用前景。就 Agent 技术所具有的特性来说,用它来解决动态调度中的一些问题是很有潜力的。因此,本书在这方面也作了一些有益的探讨,并将我们提出的预分配调度算法与基于 Agent 的动态分配算法相结合,形成一个实用的混合调度算法。

本书最后研究了具有 AND/OR 优先约束关系的任务调度问题。AND/OR 调度问题是一个非常普遍的问题,它具有广泛的应用背景。例如,作业规划、程序的数据流分析、AI 启发式搜索、资源管理、实时系统设计等。本书给出该问题的基本定义,证明了

AND/OR 调度模型涵盖了一些其他调度模型,同时也研究了 AND/OR 调度问题时间复杂性问题,提出了一个改进的 AND/OR 图的传递闭包算法和多个对 AND/OR 任务系统进行调度的启发式算法。这些启发式算法对具有 IN - TREE 优先约束关系的可跳过的 AND/OR 任务系统能够提供性能保障。最后用模拟方法对算法进行测试,比较这一类算法的质量和执行时间,并作出评价。

本书是在博士论文“启发式混合调度和面向 AND/OR 约束的调度算法研究”的基础上修改、充实而成的,同时增加了一些较新的研究成果。

本书的形成和出版首先要感谢中船 709 所的王振宇教授、软件工程国家重点实验室康立山教授、武汉大学计算机学院张焕国教授的大力推荐,同时也感谢他们对我的指导。

感谢武汉大学计算机学院的陈世鸿教授、吴产乐教授对本书的编写提出的建设性的意见、许多有价值的建议,使我从中学到了大量宝贵的知识。

感谢武汉大学计算机学院的陈莘萌教授、李元香教授、毋国庆教授以及华中理工大学的卢炎生教授对作者编写本书给予的指导与鼓励。

感谢美国 Seton Hall 大学的 Kennth Hoffman 教授和 Wachenut Bert 教授,我在美国一年的学术访问期间,二位教授为我的研究提供了宝贵资料和试验环境,并在百忙之中抽空与我进行讨论,对我的工作予以肯定,使我增强了研究的信心,受益匪浅!

感谢武汉大学计算机学院傅建明博士、微软中国研究院研究员张黔博士、贝尔中国研究院金涛博士,他们为我的研究提供了宝贵资料,与他们的交谈使得我有很大的收获。

此外,武汉大学计算机学院的许多老师和研究生、武汉大学科技部、武汉大学出版社、武汉大学出版社电子出版部给予了很多鼓

励和大力支持。书中还引用了许多国内外同行的研究成果,谨此一并致谢。

书中不妥甚至谬误之处,恳请同行们赐教。

朱福喜

2002 年 10 月于武昌珞珈山



中国当代哲学问题探索
中国辩证法史稿（第一卷）
德国古典哲学逻辑进程（修订版）
毛泽东哲学分支学科研究
哲学研究方法论
改革开放的社会学研究
邓小平哲学研究
社会认识方法论
康德黑格尔哲学研究
人文社会科学哲学
中国共产党解放和发展生产力思想研究
思想政治教育有效性研究
政治文明论

国际经济法概论
国际私法
国际组织法
国际条约法
国际强行法与国际公共政策
比较外资法
比较民法学
犯罪通论
刑罚通论
中国刑事政策学
中国冲突法研究
中国与国际私法统一化进程（修订版）
比较宪法学
人民代表大会制度的理论与实践
国际民商新秩序的理论建构
中国涉外经济法律问题新探
良法论
国际私法（冲突法篇）（修订版）
比较刑法原理
担保物权法比较研究

当代西方经济学说（上、下）
唐代人口问题研究
非农化及城镇化理论与实践
马克思经济学手稿研究
西方利润理论研究
西方经济发展思想史
宏观市场营销研究
经济运行机制与宏观调控体系
三峡工程移民与库区发展研究
21世纪长江三峡库区的协调与可持续发展
经济全球化条件下的世界金融危机研究
中国跨世纪的改革与发展
中国特色的社会保障道路探索
发展经济学的新发展
跨国公司海外直接投资研究
利益冲突与制度变迁



中日战争史
中苏外交关系研究(1931~1945)
汗简注释
国民军史
中国俸禄制度史
斯坦因所获吐鲁番文书研究
敦煌吐鲁番文书初探(二编)
十五十六世纪东西方历史初学集(续编)
清代军费研究
魏晋南北朝隋唐史三论
湖北考古发现与研究
德国资本主义发展史
法国文明史
李鸿章思想体系研究
唐长孺社会文化史论丛
殷墟文化研究

随机分析学基础

流形的拓扑学

环论

近代鞅论

秩与 Banach 空间几何学

现代偏微分方程引论

算子函数论

随机分形引论

随机过程论

平面弹性复变方法(第二版)

光纤孤子理论基础

Banach 空间结构理论

电磁波传播原理

计算固体物理学

电磁理论中的并矢格林函数

穆斯堡尔效应与晶格动力学

植物进化生物学

广义遗传学的探索

水稻雄性不育生物学

植物逆境细胞及生理学

输卵管生殖生理与临床

Agent 和多 Agent 系统的设计与应用

因特网信息资源深层开发与利用研究

并行计算机程序设计导论

• 并行分布计算中的调度算法理论与设计

水文非线性系统理论与方法

拱坝 CAD 的理论及实践

河流泥沙灾害及其防治

地球重力场逼近理论与中国 2000 似大地水准面的确定

文言小说高峰的回归

文坛是非辩

评康熙文字学

中国戏曲文化概论(修订版)

法国小说论

宋代女性文学

《古尊宿语录》代词助词研究

社会主义文艺学

文言小学审美发展史

海外汉学研究

《文心雕龙》义疏

选择·接受·转化

中国印刷术的起源

现代情报学理论

信息经济学

中国古籍编撰史

目 录

第一章 概 论	1
1.1 调度问题研究的背景和意义	1
1.1.1 分布计算的新途径	1
1.1.2 调度问题在分布计算中所处的地位	4
1.2 调度问题的定义和分类	4
1.2.1 调度问题的定义	4
1.2.2 调度问题的分类	5
1.3 调度问题的研究进展	7
1.3.1 调度问题的研究动态	7
1.3.2 调度技术的研究进展	8
1.4 调度问题的主要难点及解决途径	10
1.5 本书的组织	11
第二章 调度的基本问题及相关技术	14
2.1 调度问题	14
2.1.1 调度模型	14
2.1.2 DAG 的产生	15
2.1.3 分布模型	15
2.1.4 调度	16
2.1.5 计算时间和通信时间	17
2.2 通信模型	18
2.2.1 考虑通信的完成时间	18

2.2.2	从 Gantt 图得到完成时间	19
2.3	调度问题的复杂性	20
2.3.1	不考虑通信时间的调度问题的复杂性	21
2.3.2	考虑通信时间的调度问题的复杂性	23
2.4	启发式调度及其相关问题	24
2.4.1	并行性与通信时间	25
2.4.2	并行粒度和数据的局部性	26
2.4.3	非确定性	27
2.4.4	基于优先级的调度	28
2.4.5	启发式方法中的任务聚族	29
2.4.6	任务复制	30
2.5	具有 AND/OR 优先约束关系的调度问题	31
2.6	小结	32
第三章	任务分配问题	33
3.1	任务分配模型	34
3.2	影响系统性能的因素	36
3.3	基于图论的分配算法	37
3.3.1	两个处理机上的优化分配	37
3.3.2	多处理机之间的优化分配	38
3.4	0-1 规划策略	41
3.5	“合一-阈值”启发式分配算法	43
3.6	改进的启发式算法	47
3.7	基于遗传算法和模拟退火算法的任务分配策略	53
3.7.1	遗传算法(Genetic Algorithm)	53
3.7.2	模拟退火算法(Simulated Annealing)	54
3.7.3	基于遗传算法和模拟退火算法的任务分配算法	55
3.8	小结	59

第四章 启发式表调度算法	60
4.1 表调度的基本方法	60
4.2 BNP 的表调度算法	63
4.2.1 ISH 算法	64
4.2.2 MCP 算法	65
4.2.3 ETF 算法	67
4.3 APN 的表调度算法	68
4.3.1 信息的路由问题	68
4.3.2 MH 算法	69
4.3.3 DLS 算法	70
4.4 冒泡迁移算法	73
4.4.1 将启发式信息作为选择参数	73
4.4.2 调度策略	75
4.4.3 算法描述	77
4.4.4 复杂性分析	79
4.5 小结	81
第五章 负载均衡与智能调度	82
5.1 负载均衡问题	82
5.1.1 概述	82
5.1.2 负载均衡算法分类	83
5.1.3 负载均衡策略	84
5.2 负载均衡算法及其策略	86
5.2.1 发送者主动算法	86
5.2.2 接收者主动算法	87
5.2.3 双向主动算法	88
5.2.4 梯度模型	88
5.2.5 接收者主动的渗透算法	89
5.2.6 预约策略	90

5.2.7 投标策略	90
5.2.8 广播策略	90
5.3 智能型任务调度算法	90
5.3.1 任务调度中的知识及其表示	91
5.3.2 任务调度程序的结构	92
5.3.3 任务调度算法的实现	94
5.4 小结	95
第六章 启发式混合调度算法	96
6.1 负载均衡模型	96
6.2 分布模型	97
6.3 分布并行的实现模型	99
6.3.1 实现分布计算的 Agent	99
6.3.2 并行应用框架	102
6.3.3 任务模型	105
6.4 调度策略与算法	108
6.4.1 调度策略	108
6.4.2 族分配算法	109
6.4.3 族内分配算法	111
6.4.4 动态分配算法	111
6.5 示例与分析	112
6.6 小结	117
第七章 具有 AND/OR 优先约束关系的调度问题	118
7.1 AND/OR 调度问题的定义	118
7.1.1 定义和术语	118
7.1.2 等价问题及形式化	122
7.2 其他调度问题之间的关系	124
7.2.1 限时修改 (Deadline Modification)	124

7.2.2 优先约束修改 (Precedence Constraint Modification)	125
7.3 AND/OR 调度问题的时间复杂性	126
7.4 AND/OR 图的传递闭包	130
7.4.1 AND/OR 图的传递闭包的定义	130
7.4.2 算法描述	131
7.4.3 加速算法的实现	135
7.5 小结	137
 第八章 AND/OR 优先约束调度问题的近似算法	138
8.1 图搜索距离定理	139
8.2 减少完成时间的调度方法	146
8.2.1 IN-TREE 结构	146
8.2.2 具有 IN-TREE 结构的可跳过任务系统的调度	148
8.2.3 应用实例	150
8.3 小结	154
 第九章 可跳过的 AND/OR 任务系统的启发式方法	155
9.1 抽象集覆盖启发式方法	155
9.1.1 CLJ 启发式方法	156
9.1.2 删除式启发式方法 DCLJ	157
9.1.3 冗余删除法 RDM	157
9.1.4 基于独立数删除方法 INBDM	158
9.1.5 利用集覆盖算法进行 AND/OR 任务系统调度的 抽象过程	159
9.2 单处理机上的启发式方法	160
9.2.1 DCLJ 算法的进一步描述	160
9.2.2 RDM 算法的进一步描述	165
9.2.3 其他算法和改进算法	166