

中国科学院科学出版基金资助出版

信息科学技术学术著作丛书

免疫调度原理与应用

左兴权 莫宏伟 著



NLIC2970940792



科学出版社

信息科学技术学术著作丛书

免疫调度原理与应用

左兴权 莫宏伟 著



NLIC2970940792

科学出版社

北京

内 容 简 介

人工免疫系统作为一种新兴的计算智能,已被应用于很多领域。近几年来,基于人工免疫的调度方法发展很快,涌现出大量的研究成果。本书旨在全面总结免疫调度算法的最新成果,展现其发展动态,为各行业调度领域的研究人员提供借鉴和参考。本书共7章,首先介绍调度的基本概念和知识,然后分别介绍免疫遗传、克隆选择、疫苗抽取、免疫多智能体、混合免疫调度算法及其在加工制造、项目管理、交通运输、计算机、通信、发电、炼钢等领域中的应用情况。

本书适合大中专院校、科研院所从事人工智能、运筹学、自动化、计算机、通信、交通运输等相关领域的科研技术人员、高等学校教师、研究生、本科生的科研参考书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

免疫调度原理与应用/左兴权,莫宏伟著. —北京:科学出版社,2013

(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-038420-1

I. 免… II. ①左… ②莫… III. 免疫技术-应用-调度程序-研究
IV. TP315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 194397 号

责任编辑:魏英杰 杨向萍 / 责任校对:刘小梅

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年7月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年7月第一次印刷 印张:16

字数:302 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息科学技术学术著作丛书》序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起,悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展;如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的新动力;如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力? 这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台,将这些科技成就迅速转化为智力成果,将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术,微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术,数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业,低成本信息化和用信息技术提升传统产业,智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学,信息科学基础理论,信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性;体现出科学出版社“高层次、高质量、高水平”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版,能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

原中国科学院计算技术研究所所长



前 言

调度问题广泛存在于加工制造、交通运输、计算机、通信、发电、炼钢等领域。由于调度问题的复杂性、难以求解性以及应用的广泛性,其一直受到相关领域的学者和工程技术人员广泛关注和研究。历经半个多世纪的发展,调度问题的求解方法由 20 世纪五六十年代的精确算法,发展到七八十年代的启发式算法以及现代启发式算法(以遗传算法、模拟退火和禁忌搜索为代表)。从 20 世纪 90 年代开始,出现了一些新的现代启发式算法,包括微粒群算法、蚁群算法和人工免疫算法等。

人工免疫系统是 20 世纪 90 年代出现的一类基于人类免疫系统的计算智能方法。近十年来,人工免疫系统发展很快,已出现多种免疫模型和算法,被大量用于解决优化计算、数据分析、故障诊断、异常检测、模式识别、信息安全、自动控制和机器人协同等领域中的问题。在人工免疫系统的研究背景下,人们不断地探索基于人工免疫原理的调度算法(免疫调度算法)来更有效地解决各领域中的调度问题。相比其他现代启发式算法,免疫调度算法的特色在于算法的多样性,不同免疫调度算法间的差异性较大,这是由人类免疫机理的多样性所决定,也为调度问题的研究提供了多种启发和新颖的解决思路。

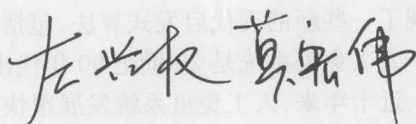
近几年来,国内外涌现出大量免疫调度算法的文献,出现了多种免疫调度算法,包括免疫遗传、克隆选择、疫苗抽取、免疫多智能体以及混合免疫调度算法等。本书旨在对免疫调度算法的最新研究成果进行归纳和总结,展现其最新的发展动态,为相关领域的研究人员提供借鉴和参考。

全书共分七章。第 1 章介绍调度问题、调度算法、人工免疫系统及其应用进展,免疫调度算法框架及其分类。第 2 章介绍调度的一些基本概念,包括调度问题的常用模型(析取图模型、数学规划模型、仿真模型)、调度问题的分类及描述、调度解的类型、调度解的编码和解码。第 3 章介绍免疫遗传调度算法。调度问题的解空间非常庞大,求解过程中容易陷入局部最优。免疫遗传算法利用抗体多样性保持机理来避免算法陷入局部最优,利用免疫记忆机制来加快算法收敛。第 4 章介绍克隆选择调度算法。该类算法是基于适应性免疫应答中 B 细胞进化机理,包括选择、克隆和免疫应答等操作。第 5 章介绍其他形式的免疫调度算法,包括基于疫苗抽取的免疫调度算法、基于树枝细胞算法的调度异常检测、基于免疫智能体的任务分配等。免疫算法与其他算法混合可构造更优秀的算法,包括与调度规则、遗传算法、禁忌搜索、模拟退火、微粒群算法和蚁群算法等混合。第 6 章介绍免疫算法与其他算法构成的混合算法。第 7 章介绍免疫调度算法在各领域中的应用情况,

包括加工制造、项目管理、交通运输、计算机、通信、发电和炼钢等领域。

最后,感谢清华大学的吴澄院士,范玉顺教授,西安电子科技大学的焦李成教授,公茂果教授的大力支持,感谢 IBM T. J. Watson 研究中心的谭伟博士、哈尔滨工程大学的徐志丹博士在本书的部分内容研究及资料整理方面的工作。感谢国家自然科学基金项目(61075113; 60504028)、中央高校基本科研业务重大专项(HEUCFZ1209)、中央高校基本科研业务费项目(2009RC0208)和黑龙江省杰出青年基金项目(JC201212)的资助。

由于作者水平有限,本书难免存在不足和疏漏之处,诚请各位读者和专家批评指正。



于北京邮电大学 哈尔滨工程大学

2013年3月

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

前言

第 1 章 调度问题与免疫调度算法	1
1.1 调度问题和调度解	2
1.2 调度算法分类	3
1.2.1 数学规划方法	3
1.2.2 调度规则	4
1.2.3 基于邻域搜索的调度算法	8
1.2.4 进化算法	10
1.2.5 蚁群算法	11
1.2.6 微粒群算法	11
1.2.7 人工神经网络	12
1.3 人工免疫系统	12
1.3.1 免疫学中的基本概念	12
1.3.2 免疫系统的基本原理	15
1.3.3 人工免疫系统的应用	20
1.4 免疫调度算法	28
参考文献	30
第 2 章 调度模型、编码及分类	41
2.1 调度问题的模型	41
2.1.1 析取图模型	41
2.1.2 数学规划模型	48
2.1.3 仿真模型	49
2.2 调度问题的分类	52
2.2.1 单机调度问题	52
2.2.2 并行机调度问题	52
2.2.3 车间调度问题	53
2.3 调度问题的描述	55
2.3.1 三元组表示法	55
2.3.2 调度问题的数据	58

2.4 调度解的类型	59
2.4.1 可行调度	60
2.4.2 半活动调度	60
2.4.3 活动调度	61
2.4.4 非延迟调度	61
2.4.5 参数化活动调度	62
2.5 调度解的编码	63
2.5.1 基于工件的编码	64
2.5.2 基于操作的编码	64
2.5.3 基于优先级列表的编码	64
2.5.4 基于优先规则的编码	65
2.5.5 基于析取图的编码	66
2.5.6 基于完成时间的编码	67
2.5.7 基于机器的编码	67
2.5.8 基于随机键的编码	68
2.5.9 参数化活动调度编码	69
参考文献	71
第3章 免疫遗传调度算法	74
3.1 免疫遗传算法	74
3.1.1 抗体多样性表达	74
3.1.2 算法的步骤	75
3.2 用于 JSP 的免疫遗传算法	76
3.2.1 抗体和抗原的关系	77
3.2.2 抗体和抗原的交互进化	77
3.3 用于 HFSP 的免疫遗传算法	78
3.3.1 带有 SDST 的混合 FSP	78
3.3.2 免疫调度算法	80
3.4 用于 FMS 的免疫遗传算法	85
3.4.1 机器选择和操作分配问题	85
3.4.2 免疫调度算法	88
参考文献	90
第4章 克隆选择调度算法	91
4.1 克隆选择算法	91
4.1.1 用于模式识别问题	92
4.1.2 用于优化计算问题	92

4.2 用于 JSP 的基于基因库的免疫调度算法	94
4.2.1 抗体的表达	94
4.2.2 免疫调度算法	94
4.3 用于 JSP 的多模态免疫调度算法	95
4.3.1 标识轻链	95
4.3.2 抗体亲和力	97
4.3.3 克隆扩增、超突变和选择	97
4.3.4 基因片段重组	98
4.3.5 抗体多样性	99
4.3.6 停止准则	100
4.4 用于 JSP 的田口免疫调度算法	101
4.4.1 群体初始化	101
4.4.2 克隆扩增和超突变	101
4.4.3 基于田口方法的重组	102
4.4.4 变异操作	103
4.4.5 田口免疫算法的步骤	103
4.5 用于柔性 JSP 的克隆选择调度算法	105
4.5.1 柔性 Job shop 调度问题	106
4.5.2 免疫调度算法	107
4.6 用于非等待 FSP 的心理学克隆选择调度算法	109
4.6.1 非等待流水线调度问题	110
4.6.2 马斯洛的需求层次理论	110
4.6.3 心理学克隆算法	111
4.6.4 用于非等待流水线调度问题	112
4.7 用于机器负载问题的免疫调度算法	113
4.7.1 机器负载问题	113
4.7.2 改进的免疫算法	116
4.7.3 用于机器负载问题	118
4.8 用于非等待 FSP 的多目标免疫调度算法	120
4.8.1 问题的优化目标	120
4.8.2 多目标免疫算法	120
4.9 用于 HFSP 的克隆选择调度算法	124
4.9.1 免疫调度算法	124
4.9.2 克隆选择	125
4.9.3 亲和力成熟	125

4.9.4	受体编辑	125
4.9.5	多步实验设计	126
4.10	用于置换 FSP 的克隆选择调度算法	127
4.10.1	带缓存的置换流水线调度问题	127
4.10.2	免疫调度算法	129
4.11	用于不确定 JSP 的变邻域免疫调度算法	130
4.11.1	不确定调度问题建模	130
4.11.2	不确定调度问题的优化	132
4.11.3	实验结果	137
4.12	用于公交车辆调度的克隆选择调度算法	142
4.12.1	公交车辆调度问题	143
4.12.2	西安市 43 路公交车辆的调度	144
4.12.3	南京市 1 路公交车辆的调度	152
4.13	小结	157
	参考文献	158
第 5 章	其他免疫调度算法	162
5.1	基于疫苗的免疫调度算法	162
5.1.1	免疫算法	162
5.1.2	免疫调度算法	163
5.2	基于树枝细胞算法的调度异常检测	166
5.2.1	实时嵌入系统的任务调度	166
5.2.2	基于 DCA 的调度异常检测	166
5.3	基于免疫智能体的分布系统任务分配	169
5.3.1	H 细胞和 S 细胞智能体	170
5.3.2	Hector 环境下的实现	170
5.4	基于免疫网络的机器人动态任务分配	171
5.5	小结	172
	参考文献	172
第 6 章	混合免疫调度算法	174
6.1	克隆选择与模拟退火的混合	174
6.1.1	机器可用性约束	174
6.1.2	人工免疫算法	175
6.2	免疫接种与模拟退火的混合	177
6.2.1	疫苗接种	178
6.2.2	免疫模拟退火算法	179

6.3 克隆选择与微粒群的混合	181
6.3.1 个体表达和初始化	181
6.3.2 微粒群调度算法	182
6.3.3 免疫调度算法	183
6.3.4 基于微粒群和克隆选择的混合算法	184
6.4 细胞自动机、遗传算法与人工免疫的混合	185
6.4.1 多处理器任务调度	185
6.4.2 细胞自动机	186
6.4.3 基于细胞自动机和遗传算法的调度	186
6.4.4 基于人工免疫系统的重调度	188
6.5 禁忌搜索与免疫算法的混合	189
6.5.1 基于 AIS 和 TS 的混合算法	190
6.5.2 AIS 的操作	191
6.5.3 TS 操作	192
6.5.4 实验结果	193
6.6 免疫算法与调度规则的混合	200
6.6.1 卷烟生产调度问题	200
6.6.2 调度问题的工作流仿真模型	205
6.6.3 调度算法	206
6.6.4 实验结果	211
6.7 小结	217
参考文献	217
第7章 免疫调度算法的应用	221
7.1 制造领域中的应用	221
7.1.1 Job shop 调度	221
7.1.2 Flow shop 调度	223
7.1.3 混合 Flow shop 调度	224
7.1.4 柔性制造车间调度	224
7.2 项目管理中的应用	225
7.3 交通领域中的应用	226
7.3.1 车辆路由问题	226
7.3.2 公交调度问题	227
7.4 计算机领域中的应用	227
7.4.1 多处理器的任务调度	227
7.4.2 分布式计算的任务分配	230

7.4.3 任务调度的异常检测	231
7.5 通信领域中的应用	231
7.6 发电厂中的应用	231
7.6.1 机组负荷分配	231
7.6.2 电厂经济调度	232
7.7 钢厂中的应用	232
7.8 水库管理中的应用	234
7.9 小结	234
参考文献	234

第 1 章 调度问题与免疫调度算法

调度问题广泛存在于很多领域中。在过去的几十年中,人们对各领域的调度问题进行了大量研究。从 20 世纪 50 年代起^[1-3],调度问题就受到应用数学、运筹学、工程技术等领域研究人员的重视^[4, 5],当时主要采用传统的最优化技术来解决简单调度问题,如分支定界、动态规划等算法。这类算法能够获得小规模调度问题的最优解,然而对于大规模调度问题,因为调度问题的 NP 性质,这类算法不能在合理的时间内得到大规模问题的最优解。

解决工程中的调度问题时,往往不苛求调度解的最优性,只需获得问题的次优解或满意解。因此,通常采用启发式算法(Heuristic),即近似算法来解决大规模调度问题。一种常用的启发式算法为调度规则(也称为优先级规则),其根据实际经验总结出若干规则来处理调度过程中的资源冲突问题,通过一次仿真得到一个可行的调度方案,因此又称为基于仿真的调度方法。该方法的优点是能快速获得调度问题的近似解,但解的质量不高,很难通过理论分析来判断解在多大程度上接近于最优解。

自 20 世纪 70 年代以来,人们倾向于采用基于自然或生物原理的现代启发式算法(meta-heuristic),又称智能优化算法来解决调度问题。20 世纪 70 年代,美国的 Holland 把生物进化中的适应性和优化机理引入到机器学习和优化计算领域,提出了遗传算法。80 年代,出现了模拟退火和禁忌搜索算法。90 年代,出现了微粒群算法、蚁群算法、差分进化和免疫算法等新的现代启发式算法。这些算法很快被用于解决各领域的调度问题,可用较少的时间代价获得较高质量的调度解^[6-8]。

利用免疫算法解决调度问题始于 20 世纪 90 年代。近几年来,随着人工免疫系统的发展,免疫调度算法被大量用于解决各类调度问题。人工免疫系统是借鉴免疫系统机制和理论免疫学发展起来的各种人工范例的统称。在人工免疫系统的背景下,人们借鉴免疫模型和算法来解决调度问题,设计了多种免疫调度算法^[9]。与遗传算法、模拟退火、微粒群算法和蚁群算法等算法相比,免疫调度算法的一个特点是其模型和算法具有较大的多样性,即各种算法间差异性较大,这源于人工免疫系统模型和算法的多样性。

本章首先介绍调度问题和调度解的概念,然后介绍常用的调度算法及其分类,接着介绍人工免疫系统及其在各领域中的应用现状,最后介绍免疫调度算法及其分类。

1.1 调度问题和调度解

调度问题存在于很多领域,包括生产制造过程、交通运输、电力系统、计算机系统、通信系统等。归结这些调度问题,可总结出其共同特点,即对于一系列的任务,调度问题是指在满足一定约束的条件下如何在任务执行过程中把资源合理地分配给这些任务,以使一项或多项性能指标最优。任务的执行需要资源,而资源是有限的,一个资源通常不能被多个任务同时使用,由此带来如何合理分配资源的问题,即调度问题。

以制造领域的车间调度问题为例,该问题可描述为有 n 个工件 $\{J_i\}_{i=1}^n$ 要在 m 台机器 $\{M_j\}_{j=1}^m$ 上加工,每个工件 J_i 有 n_i 个操作 $\{O_{ik}\}_{k=1}^{n_i}$,这些操作加工顺序一定且所需要的机器固定。调度就是要寻求每台机器上的操作的加工顺序以及每个操作的起始加工时间,以使某项性能指标最优。假设有 3 个工件要在 3 台机器上加工,第 1 个工件有 3 个操作 O_{11}, O_{12}, O_{13} ;第 2 个工件有 2 个操作 O_{21}, O_{22} ;第 3 个工件有 2 个操作 O_{31}, O_{32} 。每一个工件的加工需要满足工件加工约束,即只有前一个操作加工完毕才能加工后一个操作。每台机器在同一时间只能加工一个操作,且加工过程不允许中断。每个操作的加工时间和所需机器如表 1.1 所示。其中括号中的第一项表示操作的加工时间,第二项表示所需机器。

表 1.1 一个车间调度问题的工件和机器加工约束及加工时间

	工件 1	工件 2	工件 3
操作 1	(7, M_1)	(10, M_2)	(7, M_1)
操作 2	(12, M_2)	(17, M_1)	(22, M_2)
操作 3	(15, M_3)		

调度问题的解(即调度解)表示为每台机器上的各操作的加工顺序以及各操作的开始时间。调度解可用甘特图表示,图 1.1 为一个调度解的甘特图,给出了每台机器操作的加工排序以及每个操作的开始加工时间。由图 1.1 可以看出,该调度解满足工件加工约束和机器加工约束,是一个可行调度解。事实上,满足约束条件的可行调度解有很多,即使对于一个 10 工件 10 机器的车间调度问题,可行调度解的数量也是非常庞大的,要想获得针对某项性能指标最优的调度解,就需要借助某种算法,即调度算法。

图 1.1 所示的调度解的甘特图为面向机器的甘特图。此外,还可用面向工件的甘特图表示调度解,如图 1.2 所示,图中给出了各工件的操作在各机器上的加工情况。

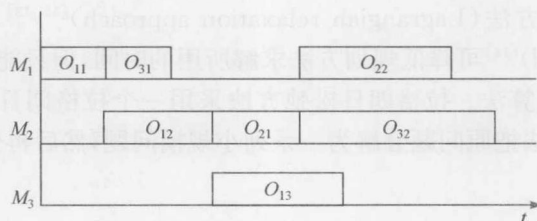


图 1.1 面向机器的甘特图

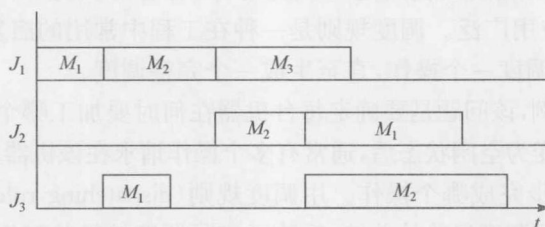


图 1.2 面向工件的甘特图

1.2 调度算法分类

一般来说,调度问题可行解的数目非常庞大,从中找到针对某项性能指标最优的调度解非常困难,不可能通过遍历所有可行解来寻找,因此需要借助某种算法来获取问题的最优或次优解,即调度算法。

调度算法可分为精确方法和启发式方法。精确方法采用传统的最优化技术,例如数学规划来获得调度问题的最优解。启发式方法又称为近似算法,可在短时间内得到问题的最优或次优解,但不能保证调度解的最优性。以下分类中,数学规划方法属于精确方法,其他为启发式方法。

1.2.1 数学规划方法

这类方法首先把调度问题建模为整数规划(integer programming)或混合整数规划(mixed integer programming)模型,然后采用分支定界算法(branch and bound algorithm)^[10]、优化软件包(如 CPLEX、Lingo)来获得最优解。这类方法能得到小规模调度问题的最优解。由于调度问题的 NP 性质,算法的计算时间将随着问题的规模呈指数增长。因此,当解决大规模调度问题时,算法的计算时间太长而在工程实际中无法接受^[11]。

拉格朗日松弛方法(Lagrangian relaxation approach)^[12, 13]和分解方法(decomposition method)^[14]可降低规划方法求解所用的时间,但只能得到问题的近似解,因此属于启发式算法。拉格朗日松弛方法采用一个拉格朗日乘子对约束条件进行松弛。分解方法把原问题分解为一系列小规模问题,然后再分别求解。

1.2.2 调度规则

工程中通常只需要调度问题的满意解,而不苟求解的最优性。启发式算法可在合理时间内生成大规模调度问题的次优解,具有容易实施、计算复杂性小的特点,因此在实际中应用广泛。调度规则是一种在工程中常用的启发式算法,其每次迭代按照优先规则调度一个操作,直至生成一个完整调度。

以车间调度为例,该问题是要确定每台机器在何时要加工哪个工件。当一台机器完成一个操作而变为空闲状态后,通常有多个操作请求在该机器上加工。此时,需要决定该机器下一步完成哪个操作。用调度规则(dispatching rules)可做出这一决策。调度规则是实际调度经验的总结,反映了实际调度的经验知识。调度规则为等待加工的工件分配优先级,再根据优先级进行决策,因此也称为优先规则(priority rules)^[15]。

调度规则可针对静态调度环境来事先生成一个调度。此时,需要利用仿真来模拟各工件在机器上的加工过程。在仿真过程中,利用调度规则决定机器应加工的工件。仿真结束后,得到各机器上各操作的开始加工时间,生成一个调度解。调度规则也适合于解决动态调度问题^[16]。静态调度问题在开始加工之前,所有工件均已到达。对于动态调度问题,在加工过程中,工件按给定时间到达或随机到达。调度规则不需要复杂的计算,其时间开销小,但不易获得高质量的调度解,只能得到满意的调度解。

Panwalker 和 Iskander^[17]总结了 133 个调度规则,这些调度规则可分为不同类型。根据确定工件优先级的信息局部性和全局性,分为局部规则和全局规则。当某一机器空闲,多个工件需要该机器加工,局部规则只考虑等待工件的特性来确定工件的优先级,而全局规则除了工件信息之外,还要考虑其他工件信息或车间信息。根据工件的优先级是否随时间变化,局部规则可进一步分为时间无关的规则和时间相关的规则。时间无关的规则是指工件的优先规则一经确定就不再随时间改变。时间相关的规则是指工件的优先级在调度过程中需要重新计算,优先级随着时间变化。

1. 调度规则的分类及举例

(1) 局部调度规则

① 时间无关的规则。

随机属性

RANDOM, FCFS, FASFS

工件加工属性

SPT, LPT, LWKR, MWKR, FOPNR, GOPNR, TWORK

工件交货期属性

DD, ODD

② 时间相关的规则。

ALL, SL, CR, ALL/OPN, S/OPN, S/WKR, S/ALL, OSL, OCR

(2) 全局调度规则。

NINQ, WINQ, XWINQ

以上列举的规则的含义如下:

① RANDOM(random priority), 给定操作的优先级为一个 $[0, 1]$ 均匀分布的随机值, 选取优先级最小的操作先加工。

② FCFS(first come, first served), 先到等待队列的操作先加工(即先到先服务)。操作 O_{ij} 的优先级为其直接工件前继操作 $O_{i,j-1}$ 的完成时间 $C_{i,j-1}$ 。

③ FASFS(first arrival at shop, first served), 先到车间的工件先加工(即先到车间先服务)。工件 J_i 的优先级为其到达时间 r_i 。

④ SPT(shortest processing time), 具有最短加工时间的操作先加工。操作 O_{ij} 的优先级为其加工时间 p_{ij} 。

⑤ LPT(longest processing time), 具有最长加工时间的操作先加工。操作 O_{ij} 的优先级为 $-p_{ij}$ 。

⑥ LWKR(least work remaining), 剩余操作的总加工时间最短的工件先加工。操作 O_{ij} 的优先级为 $\sum_{q=j}^{n_i} p_{iq}$, 其中 n_i 为工件 J_i 包含的操作数目。

⑦ MWKR(most work remaining), 剩余操作的总加工时间最长的工件先加工。操作 O_{ij} 的优先级为 $-\sum_{q=j}^{n_i} p_{iq}$ 。

⑧ FOPNR(fewest number of operations remaining), 剩余操作数目最小的工件先加工。操作 O_{ij} 的优先级为 $n_i - j + 1$ 。

⑨ GOPNR(greatest number of operations remaining), 剩余操作数目最大的工件先加工。操作 O_{ij} 的优先级为 $-(n_i - j + 1)$ 。

⑩ TWORK(greatest total work), 总加工时间最大的工件先加工。工件 J_i 的优先级为 $\sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}$ 。

⑪ DD(earliest due-date), 具有最早交货期的工件先加工。工件 J_i 的优先级