



“十三五”国家重点图书出版规划项目

排序与调度丛书 (二期)

鲁棒机器调度

王 冰 王晓智 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书面向不确定环境下离散制造企业的生产调度问题,系统阐述了不同类型鲁棒机器调度的概念、模型及其求解算法。书中用尽量通俗简洁的文字对大量概念给出了作者理解的定义,以方便读者快速了解相关领域。另外,书中既阐述了诸多传统鲁棒优化模型,也展示了作者提出的离散场景鲁棒优化新模型,探索了不同鲁棒优化模型在单机调度、并行机调度、流水车间调度和作业车间调度等典型机器调度问题中的应用。

本书可作为高等院校系统工程、工业工程、自动化、智能制造、计算机、机械工程、管理科学与工程、运筹学、供应链管理等专业师生的教材,也可作为汽车、半导体、智能制造等工业领域的调度人员、管理者和科技人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

鲁棒机器调度/王冰,王晓智著. —北京:清华大学出版社,2023.11

(排序与调度丛书.二期)

ISBN 978-7-302-64878-9

I. ①鲁… II. ①王… ②王… III. ①鲁棒控制 IV. ①TP273

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 215134 号

责任编辑:陈凯仁

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:16.5 字 数:303 千字

版 次:2023 年 12 月第 1 版 印 次:2023 年 12 月第 1 次印刷

定 价:109.00 元

产品编号:098290-01

《排序与调度丛书》编辑委员会

主 编

唐国春(上海第二工业大学)

副 主 编

万国华(上海交通大学)

沈吟东(华中科技大学)

吴贤毅(华东师范大学)

顾 问(按姓氏拼音排序,中英文分开排序)

韩继业(中国科学院数学与系统科学研究院)

林治勋(郑州大学)

秦裕瑗(武汉科技大学)

涂萃生(南开大学)

越民义(中国科学院数学与系统科学研究院)

Bo Chen(陈礴)(英国华威大学)

T. C. Edwin Cheng(郑大昭)(香港理工大学)

Nicholas G. Hall(美国俄亥俄州立大学)

Chung-Yee Lee(李忠义)(香港科技大学)

Michael Pinedo(美国纽约大学)

编 委(按姓氏拼音排序)

车阿大(西北工业大学)

陈志龙(美国马里兰大学)

高 亮(华中科技大学)

黄四民(清华大学)

李荣珩(湖南师范大学)

刘朝晖(华东理工大学)

谈之奕(浙江大学)

唐加福(东北财经大学)

唐立新(东北大学)

王 冰(上海大学)

王军强(西北工业大学)

张 峰(上海第二工业大学)

张玉忠(曲阜师范大学)

周支立(西安交通大学)

丛书序言

我知道排序问题是从 20 世纪 50 年代出版的一本名为 *Operations Research* (《运筹学》,可能是 1957 年出版)的书开始的。书中讲到了 S. M. 约翰逊(S. M. Johnson)的同顺序两台机器的排序问题并给出了解法。约翰逊的这一结果给我留下了深刻的印象。第一,这个问题是从实际生活中来的。第二,这个问题有一定的难度,约翰逊给出了完整的解答。第三,这个问题显然包含着许多可能的推广,因此蕴含了广阔的前景。在 1960 年左右,我在《英国运筹学》(季刊)(当时这是一份带有科普性质的刊物)上看到一篇文章,内容谈到三台机器的排序问题,但只涉及四个工件如何排序。这篇文章虽然很简单,但我也从中受到一些启发。我写了一篇讲稿,在中国科学院数学研究所里做了一次通俗报告。之后我就到安徽参加“四清”工作,不意所里将这份报告打印出来并寄了几份给我,我寄了一份给华罗庚教授,他对这方面的研究给予很大的支持。这是 20 世纪 60 年代前期的事,接下来便开始了“文化大革命”,倏忽十年。20 世纪 70 年代初我从“五七”干校回京,发现国外学者在排序问题方面已做了不少工作,并曾在 1966 年开了一次国际排序问题会议,出版了一本论文集 *Theory of Scheduling* (《排序理论》)。我与韩继业教授做了一些工作,也算得上是排序问题在我国的一个开始。想不到在秦裕琰、林诒勋、唐国春以及许多教授的努力下,跟随着国际的潮流,排序问题的理论和应用在我国得到了如此蓬勃的发展,真是可喜可贺!

众所周知,在计算机如此普及的今天,一门数学分支的发展必须与生产实际相结合,才称得上走上了健康的道路。一种复杂的工具从设计到生产,一项巨大复杂的工程从开始施工到完工后的处理,无不牵涉排序问题。因此,我认为排序理论的发展是没有止境的。我很少看小说,但近来我对一本名叫《约翰·克里斯托夫》的作品很感兴趣。这是罗曼·罗兰写的一本名著,实际上它是以贝多芬为背景的一本传记体小说。这里面提到贝多芬的祖父和父亲都是宫廷乐队指挥,当贝多芬的父亲发现他在音乐方面是个天才的时候,便想将他培养成一名优秀的钢琴师,让他到各地去表演,可以名利双收,所以强迫他勤学苦练。但贝多芬非常反感,他认为这样的作品显示不出人的气质。由于贝多芬有如此的感受,他才能谱出如《英雄交响曲》《第九交响曲》等深具人性的伟大

乐章。我想数学也是一样,只有在人类生产中体现它的威力的时候,才能显示出数学这门学科的光辉,也才能显示出作为一名数学家的骄傲。

任何一门学科,尤其是一门与生产实际有密切联系的学科,在其发展初期那些引发它成长的问题必然是相互分离的,甚至是互不相干的。但只要研究继续向前发展,一些问题便会综合趋于统一,处理问题的方法也会与日俱增、深入细致,可谓根深叶茂,蔚然成林。我们这套丛书已有数册正在撰写之中,主题纷呈,蔚为壮观。相信在不久以后会有不少新的著作出现,使我们的学科呈现一片欣欣向荣、繁花似锦的局面,则是鄙人所厚望于诸君者矣。

越民义

中国科学院数学与系统科学研究院

2019 年 4 月

前 言

生产制造可分两类：流程制造和离散制造。离散制造业中的生产调度也称为机器调度。实际调度环境存在各种各样的不确定性，确定性调度是对实际调度的理想化，而不确定性调度才反映了实际调度的本质。应用鲁棒优化方法处理的不确定性机器调度为鲁棒机器调度，其可理解和刻画机器调度的不确定性，并在调度方案的生成和执行过程中对不确定性进行容纳和反应，使调度系统具有面对复杂不确定环境的适应性和鲁棒性。

鲁棒机器调度是实现智能制造的重要保证。智能制造是当前中国制造业转型升级、提质增效的必由之路，其重要特征之一是不确定性制造。不确定性是制造系统环境信息和自身信息的固有特征，智能制造的本质是利用大数据、人工智能等先进技术捕捉、认识和控制制造系统中的不确定性，以使制造系统适应不断变化的外部环境，并在更多方位达到更高的优化目标。

在传统规模制造的背景下，同类产品被大规模制造，大量生产活动是反复进行的，所以适合用概率分布对不确定参数建模，随机调度是传统主流的不确定调度方法。然而随机调度方法会导致决策者对发生概率高的情况给予重点关注，而忽视小概率事件发生的风险。在智能制造背景下，小批量个性化定制产品代替大批量规模生产的同质化产品，产品的独特性带来生产调度的独特性。对于具有独特性质的决策，没有大量反复发生的条件，难以获得此类不确定事件发生的概率信息。某些事件虽然发生的概率小，但一旦发生，造成的后果可能会很严重，这样的小概率事件在智能制造中是不应该被忽视的。传统不确定调度方法在智能制造背景下表现出局限性，而鲁棒优化方法可为不确定生产调度提供新的有效方法。不确定环境下鲁棒优化方法的研究是调度与优化领域一个重要的课题，不仅具有重要的学术价值，更具有重要的现实意义。

本书面向离散制造，系统阐述不确定环境下鲁棒机器调度的概念、模型和算法，提出了鲁棒机器调度的狭义和广义两种概念。狭义概念与专业文献中鲁棒调度的含义相一致。广义概念可以囊括更广泛领域对鲁棒调度的应用，并把本书涉及的三种不确定调度模式统一在鲁棒机器调度的广义概念之下。本书将主动调度、反应调度和混合调度三种模式对不确定性的处理方法及其在机器

调度问题中的应用进行了系统阐述,有助于读者全面了解和把握不确定环境下调度与优化决策问题的有效处理方法。

主动调度模式下基于场景的鲁棒优化模型及其在机器调度问题中的应用是本书的核心内容。场景方法相对传统的随机优化是一种较新的不确定性建模方法,可以克服随机优化的不足和局限。本书对场景方法下经典的最坏场景模型和最大后悔模型及其在机器调度中的应用进行了阐述,有助于读者了解决策者极端风险厌恶偏向下的传统鲁棒优化方法。离散场景鲁棒优化模型是本书作者提出的一类新模型,该类模型反映决策者相对温和的风险厌恶偏向,所得鲁棒解的保守性得到改善,并可得到多层次风险厌恶偏向下的鲁棒解。本书对离散场景鲁棒优化相关概念和模型单独在第3章中阐述,有助于读者了解鲁棒优化的发展和更新。

现实中不同领域的很多优化与调度问题可以提炼为典型的机器调度模型,因此,本书阐述的鲁棒调度概念和方法无疑可以应用于除机器调度之外更广泛的组合优化问题。

本书内容除了归纳和介绍已有文献的研究成果,有大量内容来自作者及其研究团队的研究成果,这些内容分布在第2、3、5、7、8、10、11、12和13章中。本书所涉及的研究成果得到了作者主持和参与的多个国家自然科学基金面上项目(62173219、60874076、60274013)的资助。本书部分内容引用了国内外研究者的成果,在此表示诚挚的感谢!

在此,感谢清华大学出版社对“排序与调度丛书”出版的支持!感谢丛书主编唐国春教授的组织 and 协调工作!感谢丛书编委会和审稿专家在本书撰写过程中提出的宝贵意见!感谢华东师范大学吴贤毅教授对本书的审核工作!感谢上海交通大学席裕庚教授和谷寒雨副教授对本书作者科研工作的指导和帮助!此外,对参与了相关研究工作的研究生们在此一并表示感谢!

本书内容重点在主动模式鲁棒机器调度,这部分内容相对丰富。而反应模式及混合模式鲁棒机器调度部分内容相对粗浅,有待今后进一步的研究和补充。鉴于作者的研究和水平所限,本书内容难免存在不足甚至谬误之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

上海大学

2022年4月

目 录

第 1 章	机器调度概述	1
1.1	机器调度的基本概念	1
1.1.1	确定性机器调度	2
1.1.2	确定性机器调度的性能指标	3
1.1.3	不确定性机器调度	4
1.2	机器调度中的不确定性	5
1.2.1	不确定性的分类	5
1.2.2	不确定性的建模方法	6
1.3	不确定性机器调度的分类	6
1.3.1	随机机器调度	7
1.3.2	模糊机器调度	8
1.3.3	狭义鲁棒机器调度	8
1.4	不确定性机器调度的主要模式	9
1.4.1	主动模式调度	9
1.4.2	反应模式调度	10
1.4.3	混合模式调度	10
1.4.4	广义鲁棒机器调度	11
1.5	本章小结	11

第 1 篇 主动模式鲁棒机器调度

第 2 章	鲁棒离散优化理论基础	15
2.1	随机优化的局限	15
2.2	鲁棒优化的合理性和优势	17
2.3	场景方法	20
2.4	鲁棒优化的基本概念	22
2.5	鲁棒优化的主要模型	25

2.5.1	风险厌恶型鲁棒优化模型	26
2.5.2	风险中性型鲁棒优化模型	27
2.6	随机优化模型	31
2.6.1	均值模型和期望模型	32
2.6.2	期望方差模型	32
2.7	计算复杂性	33
2.8	本章小结	33
第 3 章	离散场景鲁棒优化新模型	35
3.1	单阶段坏场景集模型	35
3.1.1	阈值坏场景集惩罚模型	36
3.1.2	阈值坏场景集均值模型	37
3.1.3	数目坏场景集均值模型	38
3.2	两阶段阈值坏场景集模型	39
3.2.1	合理阈值	39
3.2.2	两阶段 PTM 框架	40
3.2.3	代理两阶段 PTM 框架	41
3.3	双目标鲁棒优化模型	43
3.4	本章小结	43
第 4 章	鲁棒机器调度算法基础	45
4.1	精确算法	45
4.1.1	分支定界算法	45
4.1.2	数学规划法	46
4.1.3	迭代松弛法	47
4.2	启发式算法	47
4.2.1	构造性启发式算法	47
4.2.2	邻域串行搜索算法	53
4.2.3	群智能并行搜索算法	56
4.3	多目标优化问题	60
4.3.1	多目标优化方法分类	60
4.3.2	多目标进化算法	60
4.4	混合算法	62
4.5	本章小结	63
第 5 章	鲁棒单机调度	64
5.1	确定性单机调度问题描述	64

5.2	最坏场景鲁棒单机调度	65
5.2.1	最坏场景鲁棒单机调度模型	65
5.2.2	离散场景下的迭代松弛法	66
5.2.3	区间场景下的分支定界算法	68
5.3	最大后悔鲁棒单机调度	72
5.3.1	最大后悔模型	72
5.3.2	分支定界算法	74
5.3.3	启发式算法	76
5.4	数目坏场景集单机调度	77
5.4.1	2-NBS 单机调度模型	77
5.4.2	y -NBS 单机调度模型	80
5.4.3	NBS 鲁棒单机调度的分支定界算法	80
5.4.4	NBS 鲁棒单机调度的束搜索算法	82
5.5	仿真计算与分析	84
5.5.1	最坏场景模型与 2-NBS 模型所得鲁棒解的对比	84
5.5.2	分支定界算法与束搜索算法在小规模算例中的对比	85
5.5.3	束搜索算法在大规模算例中的求解结果	87
5.6	本章小结	88
第 6 章	鲁棒并行机调度	89
6.1	并行机调度的分类	89
6.2	最大后悔一致并行机调度	89
6.2.1	确定性一致并行机调度问题	89
6.2.2	最大后悔鲁棒一致并行机调度问题	90
6.2.3	问题性质	91
6.2.4	迭代松弛法	93
6.3	最大后悔异速并行机调度	95
6.3.1	确定性异速并行机调度问题	95
6.3.2	最大后悔鲁棒异速并行机调度问题	96
6.3.3	数学规划法	97
6.4	最坏场景无关并行机调度	99
6.4.1	确定性无关并行机调度问题	99
6.4.2	最坏场景鲁棒无关并行机调度模型	99
6.4.3	最坏场景邻域果蝇算法	100
6.4.4	仿真计算与分析	102

6.5	双目标鲁棒无关并行机调度	103
6.5.1	带有装夹时间的确定性无关并行机调度问题描述	103
6.5.2	双目标鲁棒无关并行机调度模型描述	104
6.5.3	学习场景邻域双目标果蝇算法	104
6.5.4	仿真计算与分析	108
6.6	本章小结	112
第7章	鲁棒流水车间调度	113
7.1	确定性置换流水车间调度问题	113
7.2	最大后悔置换流水车间调度	114
7.2.1	最大后悔置换流水车间调度模型	114
7.2.2	离散场景情形调度算法	115
7.2.3	区间场景情形调度算法	119
7.3	区间场景最坏场景流水车间调度	122
7.3.1	问题描述	122
7.3.2	两层和声搜索算法	123
7.3.3	仿真计算与分析	125
7.4	离散场景最坏场景流水车间调度	127
7.4.1	问题描述	127
7.4.2	混合和声搜索算法框架	127
7.4.3	基于场景邻域的局部搜索	128
7.4.4	仿真计算与分析	130
7.5	本章小结	131
第8章	鲁棒作业车间调度	133
8.1	确定性作业车间调度问题	133
8.2	阈值坏场景集作业车间调度	134
8.2.1	问题描述	134
8.2.2	阈值坏场景集优化模型	134
8.2.3	禁忌搜索算法	135
8.2.4	仿真计算与分析	139
8.3	两阶段阈值坏场景集作业车间调度	143
8.3.1	两阶段近似模型代理框架	143
8.3.2	近似模型代理求解框架的性质	147
8.3.3	仿真计算与分析	149
8.4	双目标鲁棒作业车间调度	151

8.4.1	模型描述	151
8.4.2	混合多目标进化算法	152
8.4.3	仿真计算与分析	154
8.5	本章小结	157

第 2 篇 反应模式鲁棒机器调度

第 9 章	反应模式机器调度的基本概念	161
9.1	反应模式机器调度的分类	161
9.2	完全反应式调度	162
9.3	重调度	163
9.3.1	右移重调度	164
9.3.2	完全重调度	164
9.3.3	部分重调度	164
9.3.4	重调度的稳定性	165
9.4	滚动时域调度	166
9.4.1	滚动时域调度的概念	166
9.4.2	滚动时域调度的性能分析	170
9.5	本章小结	171
第 10 章	工件动态到达的单机滚动时域调度	172
10.1	工件动态到达的单机调度	172
10.2	传统单机滚动时域调度	172
10.3	终端惩罚单机滚动时域调度	173
10.4	调度子问题的分支定界算法	175
10.4.1	剪枝规则	176
10.4.2	估算下界和上界	177
10.5	仿真计算与分析	178
10.6	本章小结	181
第 11 章	全局信息不全的单机两级滚动时域调度	182
11.1	初始虚拟调度	182
11.2	预测窗口内的预调度	183
11.3	基于预调度的滚动机制	185
11.4	滚动窗口内的局部调度	186
11.5	两级滚动调度的性能分析	187

11.5.1	预调度的全局性能分析	187
11.5.2	滚动调度的全局性能分析	189
11.6	仿真计算与分析	190
11.7	本章小结	193
第 12 章	随机机器故障下的单机重调度	194
12.1	问题描述	194
12.2	兼具效率和稳定性的重调度模型	194
12.3	一次机器故障下的部分重调度	196
12.3.1	部分重调度子问题的目标函数	196
12.3.2	部分重调度算法	197
12.4	多次机器故障下的滚动部分重调度	198
12.4.1	每次机器故障下的双目标部分重调度	198
12.4.2	多次机器故障下的滚动部分重调度	200
12.5	仿真计算与分析	203
12.6	本章小结	204

第 3 篇 混合模式鲁棒机器调度

第 13 章	混合模式鲁棒机器调度初步	207
13.1	混合模式鲁棒机器调度框架	207
13.2	随机机器故障下的单机预测调度	208
13.2.1	生成基础调度	209
13.2.2	生成预测调度	209
13.3	竞争工件到达时的混合模式流水车间调度	210
13.3.1	问题描述	211
13.3.2	主动预测阶段	211
13.3.3	被动反应阶段	213
13.4	仿真实验与结果分析	217
13.4.1	混合模式调度与主动模式调度的比较	218
13.4.2	混合模式调度与反应模式调度的比较	220
13.5	本章小结	221
参考文献		222
附录 英汉排序与调度词汇		238
索引		246

第 1 章 机器调度概述

生产调度(production scheduling)需要在一定的时间内分配可用的生产资源及有效地排布生产任务,以优化某些指定的性能指标^[1]。

生产调度是对制造企业生产活动的预先安排和计划,是生产制造体系的重要组成部分,也是生产制造系统实现自动化生产的核心。有效地改善生产调度水平能确保企业生产制造活动高效稳定地运行,充分地利用生产资源并提高实际生产效率,实现经济效益的最大化,进而提高企业在市场经济中的竞争力。

1.1 机器调度的基本概念

制造企业的生产制造可分两类:流程制造和离散制造^[2]。流程制造利用连续性的或生产流水线的形式生产产品。离散制造的产品则往往由多个零件经过一系列并不连续的工序加工装配而成,加工此类产品的企业称为离散制造型企业。例如,火箭、飞机、武器装备、船舶、电子设备、机床、汽车等制造企业都属于离散制造型企业。

定义 1-1 离散式生产也称车间任务型生产。离散制造业生产调度所涉及的主要生产资源是机器,因而离散制造业中的生产调度也称为机器调度(machine scheduling),又因为机器调度通常以生产车间为底层基本生产单元,所以也常称其为车间调度^[3]。

处于生产环节的底层车间调度在企业管理中起着核心和关键的作用。车间作为企业组织生产的基本单元,也成为了对生产调度环节进行研究建模的基本单元。就生产方式而言,生产调度问题可分为开环车间(open shop)型和闭环车间(closed shop)型^[3]。此处讨论的机器调度问题是一种开环车间调度,也称为工件排序问题^[4]。

实际上,机器调度可以是对更广泛领域排序问题的抽象。“机器”可以是加工工件或者完成任务所需要的处理机(processor),也可以是数控机床、计算机CPU(中央处理器)、医生、机场跑道、港口等。而“工件”作为被加工的对象或者是要完成的任务,可以是零件、计算机终端、病人、降落的飞机和进港的轮船等。

Graham 等^[5]把机器调度定义为在一组机器上加工一个工件集合的排序,以优化(最小化或最大化)预先定义的目标函数。

机器调度问题涉及的变量皆为离散变量,在数学上属于组合优化问题^[6-7],具有高度复杂性^[8-9],所以对机器调度问题的研究不仅对离散型制造企业具有重要的实际意义,还具有重要的学术价值。

早期机器调度问题的研究内容大多局限于确定性的理想生产环境,但在实际生产中又必须考虑各种不确定性,这也是机器调度问题高度复杂性的体现。

1.1.1 确定性机器调度

如果机器调度是在所有信息已知且确定不变的环境下进行的,那么这样的调度问题及其调度方法称为确定性机器调度(deterministic machine scheduling)。

典型的确定性机器调度问题可以描述如下:要在 m 台机器(machine)上加工 n 个工件(job),机器以 $M_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 表示,工件以 $J_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示。工件 J_i 有到达时间(release time)(以 r_i 表示)、交货期(due date)(以 d_i 表示)等参数,也有一定的工艺约束(precedence relation)的要求。一个工件在某台机器上一个连续时间区间内的一次加工称为一个操作(operation)。一个工件可由多个操作组成,不同的操作可被分配给不同的机器。工件 J_i 被分配到机器 M_j 上进行操作(以 O_{ij} 表示),操作 O_{ij} 有一定的加工时间(processing time)(以 p_{ij} 表示)。如果在一个操作的连续加工时间中是不允许被其他操作打断的,即其他操作不允许抢占正在进行操作的机器,那么这样的加工过程称为非抢占式(non-preemptive)调度,否则称为抢占式(preemptive)调度。在给定的一个机器调度系统中,一个调度解就是把需要加工的每个工件分配到一台或多台机器的一个或多个时间区间进行加工的一个安排方案,其可以优化某个或某几个性能指标。调度解是由所有工件到需要加工的机器上进行加工的起始加工时间的组合,实际上等价于各台机器需要加工的工件操作的一组排序(sequence),所以调度问题也称为排序(sequencing)问题^[10]。

就计算复杂性来说,大多数确定性机器调度问题属于 NP-hard 问题。

定义 1-2 一般情况下,满足下列约束的操作排序称为可行调度(feasible scheduling)。

- (1) 工件只有在到达之后才能被加工。
- (2) 一个时刻一台机器最多只能加工一个工件。
- (3) 一个工件在一个时刻最多只能被一台机器加工。
- (4) 加工过程中不允许机器被抢占。
- (5) 工件的加工次序需要满足工艺约束。

定义 1-3 在可行的加工顺序中,各工序都按最早可能开(完)工时间安排的作业计划称为半活动调度(semi-active scheduling)^[11]。

定义 1-4 任何一台机器的每段空闲时间都不足以加工一道可加工工序的可行调度称为活动调度(active scheduling)^[11]。

定义 1-5 如果一个可行调度在有工件等待加工时没有机器是空闲的(假设机器不会空闲而使操作等待),则称这样的可行调度为非延迟调度(non-delay scheduling)^[11]。

定义 1-2~定义 1-5 之间的关系如图 1-1 所示^[11]。

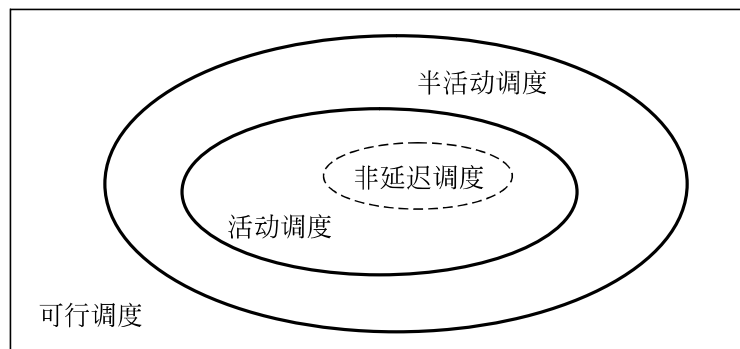


图 1-1 调度基本概念及关系

1.1.2 确定性机器调度的性能指标

如果把机器看作生产系统的固有结构,把待加工工件看作生产系统的输入,则机器调度系统中的参数可分为结构参数和控制参数两类,结构参数是系统的内部(固有)参数,而控制参数则为系统外部(输入)参数。

结构参数包括机器台数、机器准备时间、机器可供使用的时长、工艺约束等;控制参数包括工件个数、工件到达时间、工件上各操作的加工时间、工序之间的准备时间、工件交货期等。

确定性机器调度的性能指标是表征机器调度系统性能的度量,在传统机器调度问题中其往往体现为与工件的加工完成时间有关的费用(cost)指标。提高机器调度系统的性能本质上是降低费用值,因而费用指标下的机器调度问题是最小化(minimize)问题。

设工件 J_i 的完成时间为 C_i ,与之相关的费用为 $f_i(C_i)$,则调度问题的费用指标有两大类,分别为瓶颈费用与总费用^[11]。

瓶颈费用指标的一般表达式为 $f_{\max}(C) = \max\{f_i(C_i) \mid i=1,2,\dots,n\}$ 。

总费用指标的一般表达式为 $\sum f_i(C) = \sum_{i=1}^n f_i(C_i)$ 。

最常用的瓶颈费用性能指标为最大完工时间 (makespan) $C_{\max} = \max\{C_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 。

最常用的总费用性能指标为总流程时间 (total flow time) $TFT = \sum_{i=1}^n C_i$ 。

在工件有交货期要求的情形下, 如果工件 J_i 的完成时间 C_i 大于交货期 d_i , 则工件 J_i 延迟, 延迟量 (tardiness) 为 $T_i = C_i - d_i$; 如果工件 J_i 的完成时间 C_i 小于交货期 d_i , 则工件 J_i 提前, 提前量 (earliness) 为 $E_i = d_i - C_i$ 。

与交货期有关的瓶颈类性能指标为最大延迟时间 (maximum tardiness) $L_{\max} = \max\{T_i \mid 1 \leq i \leq n\}$ 。

与交货期有关的总费用类性能指标有总延误时间 $\sum_{i=1}^n T_i$ 或者总加权延误时间 $\sum_{i=1}^n w_i T_i$ 、总加权提前/延误时间和 $\sum_{i=1}^n (\alpha_i E_i + \beta_i T_i)$ 。

以 $U_i = \begin{cases} 0, & C_i \leq d_i \\ 1, & C_i > d_i \end{cases}$ 表示工件的单位误工 (unit tardy), 则有如下性能指

标: 总误工工件个数 $\sum_{i=1}^n U_i$ 。

以时间费用为性能的确定性机器调度的最优解至少是一个半活动调度。在一定费用指标下按照各台机器需要加工的工件操作的最优排序生成的半活动调度是最优调度 (解)。

现实中不同领域的很多离散优化问题可以提炼为典型的机器调度模型, 机器调度的概念和方法无疑可以应用于更广泛的组合优化问题^[12]。

1.1.3 不确定性机器调度

在绝大多数情况下, 确定性机器调度环境仅仅是对实际制造环境的一种理想的简化^[13]。实际生产环境具有复杂多变的动态特性, 存在各种各样的不确定性^[14-16], 忽视这些不确定性得到的生产调度方案在实践中往往不能令人满意^[17]。

关于“不确定性” (uncertainty), Balasubramanian^[18] 给出的定义是对一个过程或者参数缺乏准确的知识或预测。大多数情况下, “不确定性”和“不确定因素” (uncertain factor) 具有相同的含义。Zimmermann^[19] 把不确定因素的起因概括为六种情况: 信息的缺失、信息复杂性、证据彼此冲突、语言描述的模糊性、工程测量误差和信息的可信度。

定义 1-6 调度环境存在不确定因素情况下的机器调度问题和调度方法称为不确定性机器调度 (uncertain machine scheduling)。

1.2 机器调度中的不确定性

不确定性机器调度就是要考虑机器调度环境中实际存在的各种不确定因素,如机器故障、加工时间不确定、紧急工件到达、原料供应变动等。不确定因素的存在使由各种确定性模型和方法得到的优化调度方案性能指标降低甚至不再可行。因此,对决策者来说,在处理机器调度问题时,必须考虑并处理生产过程中存在的不确定因素^[17]。

1.2.1 不确定性的分类

针对机器调度环境中的不确定因素,可以从不同角度进行分类。Subrahmanyam 等^[20]将不确定因素分为短期不确定因素和长期不确定因素。短期不确定因素是指在短时间内改变系统状态的因素,包括取消订单或插入紧急订单、工件加工时间变化、设备故障等;长期不确定因素是指在长时间内影响生产系统的因素,包括技术和工艺变化、市场行情变化(如价格波动、用户需求变化)等。

按照不确定因素的关联,Ouelhadj 等^[21]将不确定性的形式分为两类,即资源相关的不确定性和工件相关的不确定性。资源相关的不确定性形式主要有机器故障、操作人员变动、工具不可用、负载限制、材料短缺或材料到达时间延迟以及材料存在缺陷等。工件相关的不确定性形式主要有工件到达时间的不确定、加急工件的插入、工件的取消、交货期的改变、工件提前或延期到达、工件优先权的改变以及工件加工时间的改变等。

按照不确定性的来源,生产过程中的不确定性可以分为四类^[22-25]:系统固有的不确定性、生产过程中产生的不确定性、外部环境中的不确定性和离散的不确定性。

基于可预测性,不确定性可分为完全不可知,对未来猜想的不确定性以及已知的不确定性^[26]。其中完全不可知和对未来猜想的不确定性称为不可预测的不确定性,也称为扰动;已知的不确定性称为可预测的不确定性^[27]。

不确定性不是偶然的、暂时的、偏离深思熟虑的长期计划,而是技术和商业环境的基本结构特征^[28]。处理不确定性和在不确定性下做决策的最好方法是接受不确定性,努力理解和描述不确定性,最后使不确定性成为决策推理的一部分^[29]。鲁棒优化是在不确定性存在时决策的一种有效方法,本书正是基于此前提阐述不确定性机器调度的鲁棒优化方法。

1.2.2 不确定性的建模方法

不确定调度的建立首先依赖不确定性的建模方式,即不确定性的描述方式。对可预测的不确定性,常用的建模方法有概率分布法、模糊分析法、场景方法等^[30]。

最经典的不确定性建模工具是概率分布法。概率分布法可以在重复发生场合描述不确定性的统计规律。对以概率分布刻画的不确定性进行处理的方法为随机优化法^[31-35]。

模糊分析法是处理不确定性的另一个方法,其用模糊数及模糊隶属度函数描述不确定性^[36-42],对不确定性进行处理的方法基于模糊理论。

对不确定性建模使用概率分布法和模糊分析法时必须知道概率分布或者模糊隶属度函数,在许多情况下可以同类不确定事件反复发生的历史数据或经验知识为基础获得这两个参数。如果没有历史数据或者不确定事件只是偶然发生和无法预测的,无法预知其有关属性参数,这时场景方法将是一种合适的选项。

场景集合是一种区别于概率分布和模糊隶属度函数的不确定性建模工具。场景方法是在不确定因素的发生概率或可能性信息完全(或部分)未知时对不确定因素建模的方法。在场景方法中,不确定性参数使用离散值或连续区间场景来描述,因而场景的描述通常有离散场景和区间场景两种形式^[28]。有关场景方法对不确定性的建模将在第2章详加阐述。

1.3 不确定性机器调度的分类

对不确定性机器调度的分类可从不同的角度进行。Herroelen 等^[14]在项目调度范畴列出了不确定调度的五个分支:反应调度(reactive scheduling)、随机调度(stochastic scheduling)、模糊调度(fuzzy scheduling)、鲁棒调度(robust scheduling)和灵敏度分析(sensitivity analysis)。Hazir 等^[15]沿用了这五个分支,然而划分这五个分支时并没有采用一致的分类角度,例如,反应调度和鲁棒调度是从处理不确定性时机角度考虑的两个分支,随机调度和模糊调度是从不确定性建模工具角度考虑的两个分支,灵敏度分析则是一种专门的不确定参数分析工具。Aytug 等^[16]在生产调度范畴把不确定调度分成三类:完全反应调度(completely reactive scheduling)、鲁棒调度(robust scheduling)和预测反应调度(predictive-reactive scheduling),这是一种从处理不确定性时机角度所做的分类。

上述分类都把鲁棒调度限定为在不确定因素发生之前主动进行的一种调度方法,所以也称为主动调度,而在不确定因素发生之后被动进行的调度方法则称为反应调度。从字面上看,鲁棒调度的内涵可以是关注系统鲁棒性(robustness)的调度问题和方法。但作为理论研究领域的一个专业术语,早期鲁棒调度被局限为与反应调度相区别的一种不确定调度方法,其外延并不包含反应调度方法,可以理解为一种狭义的“鲁棒调度”概念。

随着不确定调度在理论和实践中越来越受到关注,“鲁棒调度”一词被广泛应用,其外延也得到扩展。“鲁棒调度”是基于鲁棒优化(robust optimization)理论的优化方法。很多情况下,“鲁棒调度”被用来表示在不确定环境下追求系统鲁棒性(robustness)的各种调度方法,这里“鲁棒调度”已经超出了早期限定的主动调度范畴,很多反应式的不确定性调度方法也被冠以“鲁棒调度”,可以理解为一种广义的“鲁棒调度”概念。

回到机器调度,这里按照不同的分类角度给出对不确定性机器调度的相关分类,并给出狭义和广义两种“鲁棒机器调度”的概念。

对不确定因素考虑时机的不同会带来不确定调度方法及其内容的一系列不同,我们把与考虑不确定因素时机相关的不确定调度方法和内容统称为“不确定因素的处理模式”。

按照对不确定因素处理模式的不同,不确定性机器调度可分为主动模式机器调度、反应模式机器调度和混合模式机器调度。

某些文献把不确定机器调度称为动态调度(dynamic scheduling)^[43-44],表示调度环境中存在动态不确定因素,是与调度环境中信息全部已知且不变的静态调度(static scheduling)相对而言的。

需要指出的是,在9.1节把动态调度限定为遭遇不可预测的不确定因素(扰动)时的反应模式调度,所以本书把动态机器调度看作不确定机器调度中的一种模式,而不是等同于涵盖全部模式的不确定性机器调度。

在主动模式机器调度中,按照不确定性的建模工具不同又可将其分为随机机器调度、模糊机器调度和狭义鲁棒机器调度三类。

1.3.1 随机机器调度

定义 1-7 如果不确定因素可以用概率分布来描述,并且不确定性机器调度建立在随机优化理论之上,这时的不确定性机器调度称为随机机器调度(stochastic machine scheduling)。

随机优化理论从发生频率的角度用概率分布对不确定性进行预测描述。随机调度方法以系统的期望性能为调度目标建立期望模型,以概率论为理论基

础,所得到的解提供了一种平均意义上的不确定度量,这对于系统在一个时期内反复发生的不确定参数更有意义,期望性能常被作为调度系统在不确定环境下的优化性度量。

随机调度已经成为不确定调度研究领域的一个重要分支^[31-32]。基于概率的主动模式调度可从统计角度给出一种不确定环境下的优化调度方案,适用于频繁发生或大概率发生的不确定因素以及对鲁棒性有较高均值要求的调度环境^[33-35]。但由于实际不确定因素的偶然性存在,统计意义下的调度方案在实际中一次实现时性能和鲁棒性反而可能很差。

1.3.2 模糊机器调度

定义 1-8 如果不确定因素由模糊隶属度函数来描述,并将不确定性机器调度建立在模糊数学理论之上,这时的不确定性机器调度称为模糊机器调度(fuzzy machine scheduling)。

模糊数学理论可从所属关系的可能程度上由模糊隶属函数对不确定性进行预测和描述。模糊机器调度的调度目标多种多样,与刻画不确定因素的模糊隶属度函数的种类有关,例如,三角模糊数和梯形模糊数下的调度目标可以不同^[36]。

近年来,模糊理论在不确定调度中的应用越来越受到重视^[37-42],基于模糊理论的模糊调度能从可能性的角度给出一种不确定环境下的优化调度方案。

1.3.3 狭义鲁棒机器调度

在不确定决策的实践中,“鲁棒”一词有系统面对不确定性的健壮之意。鲁棒性在不同场合的不同决策模型中可以有各种不同的定义,存在着从不同角度对鲁棒性的度量^[30]。在不确定决策的理论上,鲁棒优化理论在近几十年备受关注^[28,45]。作为鲁棒优化理论在机器调度领域的应用,鲁棒机器调度从理论到实践得到迅速发展^[46]。

当从不确定建模工具的角度与随机机器调度和模糊机器调度并列时,可以将鲁棒机器调度从狭义角度定义如下。

定义 1-9 当不确定因素由场景方法描述时,不确定性机器调度基于鲁棒离散优化理论而建立,这种不确定性机器调度以主动的模式把改善不确定调度的鲁棒性作为其显性目标,称为狭义的鲁棒机器调度(robust machine scheduling in a narrow sense)。

随机机器调度、模糊机器调度都是在不确定因素发生前进行的主动调度^[47],因而与这两类不确定性机器调度并列的“鲁棒机器调度”也采用传统的

狭义“鲁棒调度”概念^[48],限定为一种主动调度。

1.4 不确定性机器调度的主要模式

主动调度、反应调度和混合调度这三类机器调度模式都以提升调度鲁棒性为显性或隐性目标。以鲁棒性为显性目标见于定量优化调度鲁棒性,以鲁棒性为隐性目标见于定性优化调度鲁棒性。所以,从广义的角度看,三种调度模式都以改善调度的鲁棒性为目标,因而三种模式的机器调度都可以被看作鲁棒机器调度。

1.4.1 主动模式调度

如果在不确定因素发生之前考虑,首先需要对不确定性预测和建模,在产生初始调度方案时需要基于决策者的主观偏向建立调度目标,然后建立调度模型并求解,所得到的主动调度方案在被实际执行后得到执行调度。

当可以对调度系统输入参数的不确定性以一定方式进行预测和建模描述时,对不确定性的处理通常采用主动模式调度。它是在不确定性真正发生前生成调度方案,通过主动采取的保护措施保障调度系统遭遇不确定性后仍能保持好的系统性能^[49-50]。

定义 1-10 主动模式调度(proactive-mode scheduling)也称为主动调度(proactive scheduling),其通过对不确定性进行预测和建模,并在此基础上建立调度模型,生成调度方案。

主动调度是在不确定因素发生前主动地采用防患于未然的预防技术,以降低不确定性带来的风险为调度目标生成调度方案。

主动模式调度的特征是在不确定性发生之前生成调度方案时就考虑可预测的不确定性,与不确定性建模工具无关,所以,随机机器调度、模糊机器调度和鲁棒机器调度都可以是主动模式调度。

按照采用的鲁棒度量不同,主动模式调度又分为预测调度和鲁棒调度两种,这是特别定义的两狭义主动模式调度。

1.4.1.1 预测调度

定义 1-11 预测调度(predictable scheduling)是针对可预测的不确定性用基于冗余的技术产生调度方案的主动模式调度,其目的在于使调度方案在不确定事件发生后实际执行时具有好的鲁棒性。

预测调度考虑了未来可能发生的不确定因素,在初始调度中预留了一定的

冗余以吸收和消化调度执行中遭遇的不确定性,尽量保持调度方案的稳定性。预测调度对调度鲁棒性的度量称为预测度(predictivity)^[51-53],是一种方案鲁棒(见定义 2-10)。

1.4.1.2 鲁棒调度

鲁棒调度一词超出了机器调度范畴,应用较为广泛^[14],并不限于定义 1-9 所规定的场景方法下的不确定调度,这里给出下面的定义以使其与大多数文献所表达的鲁棒调度内涵一致或接近。

定义 1-12 鲁棒调度(robust scheduling)是针对可预测的不确定因素,以定量优化鲁棒性为目标产生调度方案的主动模式调度,其目的在于使调度性能具有抵御不确定风险的鲁棒性。

鲁棒调度概念的多样性还体现在鲁棒调度目标的多样性方面。应用最多的鲁棒调度目标关注由不确定性带来的在最坏情况下调度性能下降的风险,基于 min-max 模型而建立。与预测调度不同,鲁棒调度中的鲁棒度量通常采用性能鲁棒(见定义 2-11)。

定义 1-9 所定义的狭义鲁棒机器调度属于定义 1-12 鲁棒调度的范畴,但定义 1-12 的鲁棒调度概念的内涵比定义 1-9 的更具有一般性,外延比定义 1-9 的更广泛。定义 1-12 的鲁棒调度并不局限于场景方法对不确定性建模^[23,33-35,37]。

1.4.2 反应模式调度

定义 1-13 反应模式调度(reactive-mode scheduling)是面对不可预测的不确定因素(扰动)时处理调度的模式,由于扰动是不可预测的,处理调度时只能在扰动发生后被动的反应,力求实现的调度具有好的鲁棒性。

动态调度是一种反应调度^[43-44]。在初始调度生成时,反应调度不考虑不确定因素,只在初始调度遭遇到扰动时进行亡羊补牢的操作,重新安排未执行的调度方案,因而也称为重调度。重调度的鲁棒度量采用稳定性(stability)概念,故其也是一种方案鲁棒。

反应模式调度在不确定因素发生之后才对其进行处理,因为这些不确定因素已经发生,所以当然不再需要预测和建模。

反应模式调度可分为完全反应式调度、重调度和滚动时域调度三种类型。这三种类型的定义将在第 9 章给出。

1.4.3 混合模式调度

定义 1-14 混合模式调度(hybrid-mode scheduling)是主动模式调度与反

应模式调度的混合,其既包含主动调度阶段,也包含反应调度阶段,既可以在不确定因素发生之前考虑可预测的不确定因素并生成初始调度方案以进行主动调度,也可以在调度执行中被动地对遭遇到的不可预测的不确定性进行重调度。

文献中应用广泛的预测反应调度(predictive-reactive scheduling)就是混合模式调度,即基于对未来不确定性因素的预测模型生成的预测调度。在实际执行过程中,一旦扰动发生就会更新调度以响应扰动。

主动模式调度、反应模式调度和混合模式调度是从处理不确定性的时机角度对不确定调度的划分,这种划分与不确定因素的建模工具无关。例如,随机机器调度可以是主动模式调度、反应模式调度,也可以是混合模式调度。

1.4.4 广义鲁棒机器调度

定义 1-15 主动模式调度、反应模式调度和混合模式调度在处理不确定性机器调度时都遵从接受不确定性,努力理解和描述不确定性的前提,并以主动或被动、显性或隐性地改善调度的鲁棒性为目标,统称为广义鲁棒机器调度(robust machine scheduling in a broad sense)。

定义 1-15 的广义“鲁棒机器调度”概念是对定义 1-9 的狭义概念外延的扩展,定义 1-9 的狭义鲁棒机器调度只是定义 1-15 的广义鲁棒机器调度中的一种类型。

本书定义“鲁棒机器调度”狭义概念的初衷是为了使本书概念与该领域部分早期相关文献中术语“robust scheduling”的含义保持一致性,尽量减少初入该领域的研究者可能产生的混淆和迷惑。

本书书名“鲁棒机器调度”一词采用的是定义 1-15 的广义概念。广义的“鲁棒机器调度”对狭义的“鲁棒机器调度”在概念的外延上进行了扩展,前者不仅仅局限于一种主动模式,而是对考虑不确定性追求调度鲁棒性的所有处理模式的统称。定义广义“鲁棒机器调度”的动机一方面是希望得到更广泛领域研究者和实践者的接受和采纳,另一方面,也是希望把本书涉及的主动模式调度、反应模式调度和混合模式调度三种不确定性机器调度模式统一在“鲁棒机器调度”这一概念下。因而本书内容包含了三部分:主动模式鲁棒机器调度、反应模式鲁棒机器调度和混合模式鲁棒机器调度。

1.5 本章小结

本章从机器调度的基本概念出发,阐述了机器调度中的不确定性来源和不确定性建模方法;在不同角度下给出了不确定性机器调度的分类及相关定义。

本章对“鲁棒机器调度”这一概念给出了狭义和广义两种含义,一方面与传统“鲁棒调度”概念的含义保持一致性,另一方面,通过扩展概念的外延将不同模式的不确定性机器调度统一在“鲁棒机器调度”这一概念之下,也把现实应用中使用不严格的“鲁棒调度”一词统一在广义的概念之下。

本书后续章节中,第 2~8 章为第 1 篇,阐述主动模式鲁棒机器调度;第 9~12 章为第 2 篇,阐述反应模式鲁棒机器调度;第 13 章为第 3 篇,阐述混合模式鲁棒机器调度。

第 1 篇 主动模式鲁棒机器调度

在第 2~8 章主动模式鲁棒机器调度中,采用定义 1-9 的狭义鲁棒机器调度概念内涵,阐述鲁棒单机调度、鲁棒并行机调度、鲁棒流水车间调度和鲁棒作业车间调度。上述主动模式鲁棒机器调度皆基于场景方法对不确定性进行预测和建模。下文先对基于场景的鲁棒离散优化的理论基础进行阐述。

第2章 鲁棒离散优化理论基础

在不确定性可以被预知的条件下,可以对不确定性建模,对不确定因素采用主动模式进行处理是提高调度鲁棒性的最有效方式。狭义鲁棒调度就是一种主动模式调度。主动模式机器调度是本书要阐述的核心内容。

Murvey 等^[54]最早面向大规模工程系统提出了鲁棒优化的概念和方法,给出了不同类型不确定参数下模型鲁棒和解鲁棒的概念。此后,场景方法在鲁棒调度中得到广泛应用^[55-56]。Kouvelis 等^[28]基于场景方法建立了鲁棒离散优化的基础理论,该理论在包括机器调度在内的多种组合优化问题中得到了应用^[53]。

本章将从场景方法的建立动机和合理性出发,阐述基于场景的鲁棒优化基本概念和相关主要模型,以此作为鲁棒离散优化的理论基础。

2.1 随机优化的局限

Kouvelis 等^[28]将传统决策方法分为三类:确定型方法(deterministic approach)、随机优化法(stochastic approach)和鲁棒优化方法(robustness approach)。在只有单一目标的确定性情况下,在决策和结果之间不存在机会因素,可使用确定型优化来选择使目标函数最优的决策。在风险情况下,决策和结果之间的联系是概率表达,通常可以使用随机优化法来优化单个目标的期望值。当由于缺乏关于自然随机状态的完整知识而导致支持决策模型的相当大的输入数据的不确定性,在这种不确定环境下,Kouvelis 等^[28]提出了基于场景的鲁棒优化方法。

随机优化法是一种应用广泛的不确定型决策方法,但其存在明显不足之处。

(1)难以处理缺乏不确定事件发生概率信息的情况。

对某些不确定型决策,其结果很难得到不确定事件的发生概率。例如,在博弈决策中,一个决策的结果可能取决于与自身目标冲突的竞争对手的同时或随后的决策,还有一些决策的结果取决于不可重复的未来外部事件,估计这些事件的概率往往是不可靠的。虽然可以采用传统决策方法,通过对概率的主观

估计采用随机优化法处理这种不确定型决策,也可以使用对最可能或预期的未来场景的主观估计将这种不确定型决策转换为确定型决策,然后解决最终的确定型优化问题,然而,如果未来某些方面真的不可知,那么即使是在概率的意义上也未可知,这时插入概率概念可能并不是解决不确定型决策的目的。研究文献中丰富的证据表明,对输入数据出现重大不确定性的决策模型,确定型决策和随机优化都不能准确表达决策者的目的。

(2)以期望性能为决策目标的单一化难以传达决策者对不确定性风险的厌恶偏向。

随机优化法确实能够识别未来可能实现的多个数据实例。但是,在将数据实例提供给决策模型之前,必须先向决策者询问实现这些实例概率值的显式信息。然后,决策模型通常会利用假设的概率分布尝试生成一个决策,该决策可将期望的性能度量最大化(或最小化)。

不确定性的存在会给决策结果带来风险,具有风险厌恶偏向的决策者往往希望通过合理地设置决策目标来对冲风险,但随机优化法只能单一化地以期望性能为决策目标,无法传递决策者多种角度和不同程度的风险厌恶偏向。

对于机器调度问题,随机优化法的局限性除了体现在实际中有时很难获得不确定参数的概率分布以外,还会在表达和实现决策者面对不确定性的抗风险偏向时显得无能为力,即随机调度模型仅关注体现系统优化性的期望性能,对体现系统在风险情况下性能下降的能力则往往缺乏关注。

(3)多个不确定因素同时存在时的独立性假设与实际偏离太远。

在许多情况下,由于可解决性和其他技术原因,特别是当输入数据中存在多个不确定因素时,随机优化法对这些因素之间的分配独立性进行了假设,在将可能的数据实例、概率信息和相关假设输入到决策模型后,将生成一个“随机最优”决策。

在概率分布假设下决策的“随机最优性”存在一些传统解释。一种解释是长期最优性:如果决策者不得不反复做同样的决定,并且数据实例是从假设的概率分布中随机抽取出来的,那么从长远来看,反复做这个决定可以获得最大的性能。另一种解释是预期的输入数据实例最优性:决策者按照建议的概率对不同数据实例生成输入数据场景,根据分配的概率对各种数据实例应用权重,然后将它们组合成一个期望值的数据实例。对于这个期望的输入数据实例,随机优化模型可以生成最优决策。

对于机器调度问题,随机优化法需要以所有工件的处理时间概率分布为优化依据,需要以各工件的处理时间概率分布具有分配独立性为前提。Kouvelis等^[28]指出,随机优化将迫使决策者为各种未来可能的数据实例分配概率。对