

不确定环境下的机器^调_度 问题研究

BUQUEDING HUANJING XIA DE JIQI DIAODU
WENTI YANJIU

聂玲 著



西南财经大学出版社
Southwestern University of Finance & Economics Press

不确定环境下的机器调度 问题研究

BUQUEDING HUANJING XIA DE JIQI DIAODU
WENTI YANJIU

聂玲 著



西南财经大学出版社
Southwest University of Finance & Economics Press

中国·成都

图书在版编目(CIP)数据

不确定环境下的机器调度问题研究/聂玲著. —成都:西南财经大学出版社,
2017. 12

ISBN 978 - 7 - 5504 - 3140 - 9

I. ①不… II. ①聂… III. ①生产调度—研究 IV. ①F273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 176101 号

不确定环境下的机器调度问题研究

聂玲 著

责任编辑:何春梅

助理编辑:王青杰

封面设计:何东琳设计工作室

责任印制:朱曼丽

出版发行	西南财经大学出版社(四川省成都市光华村街 55 号)
网 址	http://www.bookej.com
电子邮件	bookej@foxmail.com
邮政编码	610074
电 话	028 - 87353785 87352368
照 排	四川胜翔数码印务设计有限公司
印 刷	四川五洲彩印有限责任公司
成品尺寸	165mm × 230mm
印 张	12.25
字 数	185 千字
版 次	2017 年 12 月第 1 版
印 次	2017 年 12 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978 - 7 - 5504 - 3140 - 9
定 价	68.00 元

1. 版权所有,翻印必究。
2. 如有印刷、装订等差错,可向本社营销部调换。

前 言

制造企业将原料、劳动力、机器以及能量转化为产品。转化的效率决定企业能否在当今竞争日益激烈的市场环境下存活。机器调度，作为将生产计划转化为生产活动的最后一步，是生产成本与服务水平的主要决定因素。混乱的调度会造成资源的浪费，增加生产成本，降低企业的市场竞争力，还可能延误订单，使得顾客满意度下降，影响企业的未来发展。因此合理有效地安排机器调度对生产效率和生产控制极其重要。

在制造企业系统内的实际生产过程中，随着使用时间的持续增加，机器将会产生磨损、腐蚀等，如果不及时维护、更换，就会使机器快速衰退，以至于停机无法生产，导致企业需要付出额外的高昂停机成本，从而导致制造总成本增加，甚至可能因为停机而需要重新调整生产作业计划与派工，这样会进一步造成出货时间和交货时间延迟，使顾客的满意度降低，影响企业未来的发展。据资料统计，现代制造企业系统内，因故障维修和停机产生的损失费用已经占全部生产成本的 30%~40%。有些行业的维修费用已经跃居全部生产成本的第二位，甚至更高。一般制造企业的维护成本是由会计步骤确定的，它的额度通常占据总运营成本的大部分。在欧美发达国家，传统的维护成本在过去几十年内迅猛增加。20 世纪 80 年代，美国的制造企业花费在维护他们关键装置系统上

的成本就已经超过了 6 000 亿美元。而到了 20 世纪 90 年代,这一类的维护成本已经超过了 8 000 亿美元;在 21 世纪伊始,维护成本更是急剧上升至 1.2 万亿美元。相关数据表明,如果维护管理方法有效,这些维护成本的 $\frac{1}{3}$ 到 $\frac{1}{2}$ 是可以避免被浪费掉的。因此,采取有效的手段来保证机器正常运行是十分必要的。目前,制造企业系统内主要采取的措施是对机器实施维护管理,包括维修以及定期维护,以确保机器能够正常运行,从而降低或避免机器停机带来的损失,保证生产效率。

随着科技的发展和社会的进步,制造业的发展已经跨入了后大量生产时期。不同客户对产品的需求呈现出个性化和多样化的趋势,客户对产品的不同需求致使产品的更新速度加快,结构趋于复杂。因此,在组织新产品的生产调度时,因无法精确把握加工时间,只能通过类似的加工经验以及实际的加工状况,将产品的加工估计为在一定区间变化的模糊变量。例如,某电饭锅厂商常根据客户对锅的实际操作、饭菜味道等调整产品设计,因此,零件的成型周期(加工时间)变为一个模糊变量。目前,对于加工时间不确定的机器调度问题的研究,学者们一般都将加工时间视为随机变量。然而,如果将上述人类主观因素考虑进去,加工时间被理解为模糊的变量则更接近于生产实际。同时,在模糊模型中可以非常方便地计算出模糊变量迭加的联合隶属函数。而对于随机变量迭加的联合随机函数,只有当随机变量服从均匀分布时才容易计算得到,如果随机变量是其他分布时,则几乎无法计算。

因此,在广泛吸收和借鉴已有研究的基础上,本书以不确定理论为研究工具,对模糊环境下考虑维护时间的机器调度问题进行研究。全书

主体共分为六个部分,具体如下:

第一部分为导论,介绍了研究背景、考虑维护时间的机器调度问题与模糊环境下的机器调度问题的研究现状,然后通过文献综述对国内外的相关研究进行了总体评述,在此基础上提出了研究框架。

第二部分为理论基础,概述了研究所涉及的调度理论、模糊型不确定理论、可靠性理论以及智能算法基础知识。

第三部分针对模糊加工时间弹性维护的单机调度问题,采用威布尔分布函数描述机器在运行过程中发生故障的时间的随机性,推导了机器故障概率与故障发生时间之间的关系方程,引入带乐观-悲观指标的期望算子对模糊参数进行清晰化处理。根据模型的特点,本书设计了基于二进制编码与序列编码相结合的具有加权适应度的多目标遗传算法,并以某车桥厂为案例进行了计算分析。结果证明了模型和算法的优化的有效性。通过单独考虑维护计划与生产计划的比较,我们发现联合考虑维护计划与生产计划对提高制造企业的整体效率是可行和有效的。

第四部分针对模糊加工时间弹性维护的异序作业调度问题,运用模糊集的理论建立了相应的调度模型。针对该复杂模型,给出了基于化学反应算法和模拟退火搜索算法的混合智能算法的框架。由于此模型中存在模糊因素,因此对化学反应算法的四种基元反应做了相应的改进,同时增加了一种有效的交叉操作算子。单纯地依靠某一种算法,容易陷入局部最优。本部分在化学反应算法的局部搜索过程中加入模拟退火搜索算法,进一步提高了算法性能。通过分析某车桥厂车桥加工过程的案例的比较结果证明了化学反应-模拟退火搜索算法的寻优能力。大规模加

工时间模糊维护时间可调的异序作业车间调度问题的试验结果验证了算法求解大规模问题的能力。

第五部分针对模糊随机时间窗的单机调度问题,采用模糊随机变量来描述维护时间窗的模糊性与随机性,并综合考虑决策者对生产计划的加权完工时间和以及维护计划的时效性的双重目标。此问题是一个 NP 难的问题,无法用精确算法得出最优解。根据模型的特点,本书提出将 FFD 规则与加权最短加工时间优先 (WSPT) 规则相结合的改进全局-局部-临近点粒子群算法 (GLNPSO-ff)。通过单纯考虑模糊性与随机性的实例分析比较,我们发现综合考虑模糊随机更接近实际。通过传统遗传算法以及经典粒子群算法的比较,结果证明了 GLNPSO-ff 算法的有效性和科学性。

第六部分为结论与展望,首先针对本研究的主要结论进行了提炼,并对研究过程、研究工作、研究内容、研究结论等存在的不足进行思考和总结,其次对该课题的未来研究进行了展望。

本书的主要创新之处是:

(1) 本书联合考虑了机器调度问题中的模糊因素与维护因素。通过文献分析发现,偏向于模糊环境下的调度问题以及考虑维护时间的调度问题的研究居多。绝大部分单纯考虑模糊因素或者维护因素的机器调度问题难以在多项式时间内求得最优解,而综合这两个因素到同一个调度问题的求解难度更大,因此与此问题相关的文献也特别少。本书给出了三个综合考虑模糊性与机器维护的调度模型,并给出了相应的智能算法,为制造企业等决策者提供了解决办法。

(2) 本书综合研究了弹性维护计划与生产计划的联合优化模型。通过模糊加工时间弹性维护活动的单机调度问题, 模糊加工时间弹性维护活动的异序作业调度问题以及模糊随机维护时间窗的单机调度问题研究, 结果表明联合考虑生产计划与维护计划的调度优化更加符合制造企业的生产情况。

(3) 本书综合考虑了弹性维护时间窗的模糊性与随机性。随着机器的精益化, 对机器的维护与修理的维修工人的要求越来越高, 因此普通生产线上的工人往往无法完成机器的维护工作。这就要求机器的提供方派出专业的维修工人按照制订好的维护计划对机器实施维护。因此, 在维护时间窗的设置上同时存在随机性与不确定性。本书通过研究单机情形下的模糊随机维护时间窗问题, 给出了相应的优化算法以及优化结果, 表明考虑模糊随机的现象是十分必要的。

聂玲

2017 年 12 月

目 录

1 导论 / 1

1.1 研究背景 / 2

1.2 研究现状 / 13

1.2.1 模糊时间的机器调度问题 / 13

1.2.2 考虑维护时间的机器调度问题 / 22

1.3 研究思路 / 41

1.4 研究内容 / 43

2 理论基础 / 46

2.1 调度理论 / 46

2.2 模糊理论 / 48

2.3 智能算法 / 56

2.3.1 遗传算法 / 56

2.3.2 粒子群算法 / 60

2.3.3 化学反应算法 / 63

3 模糊加工时间弹性维护活动的单机调度问题 / 69

3.1 问题简介 / 70

3.2 模型构建 / 73

3.3 MOHGA 算法 / 80

3.3.1 编码方式 / 80

3.3.2 精英策略 / 82

3.3.3 交叉与变异 / 83

3.3.4 选择操作 / 86

3.3.5 总体流程 / 86

3.4 算例分析 / 88

3.4.1 算例描述 / 89

3.4.2 算法分析 / 97

3.5 小结 / 98

4 模糊加工时间弹性维护活动的异序作业调度问题 / 99

4.1 问题介绍 / 99

4.2 模型架构 / 102

4.3 CRO-SA 算法 / 106

4.3.1 基本操作 / 106

4.3.2 框架流程 / 115

4.4 算例解析 / 116

4.4.1 结果比较 / 119

4.4.2 算法评价 / 122

4.5 小结 / 123

5 模糊随机维护时间窗的单机调度问题 / 124

5.1 问题描述 / 125

5.2 模型创建 / 128

5.2.1 决策目标 / 129

5.2.2 模型约束 / 134

5.2.3 汇总模型 / 134

5.3 GLNPSO-ff 算法 / 135

5.3.1 更新机制 / 136

5.3.2 总体框架 / 139

5.4 算例剖析 / 140

5.4.1 典型算例 / 140

5.4.2 多数值比较 / 150

5.5 小结 / 153

6 结论与展望 / 154

6.1 主要工作 / 155

6.2 本书创新点 / 156

6.3 后续研究 / 158

参考文献 / 160

后记 / 184

1 导论

在当今快速变化的全球市场，为了减少工件的加工时间和保持高效准时的交货性能，所有的公司都面临越来越大的压力。因此，有效的机器调度是实现这些目标的关键。机器调度问题是一类典型的组合优化问题，不仅在制造企业有着广泛的实际意义，在公共事业管理、信息处理等方面也有着大量的应用。再加上由于机器调度问题与计算机科学理论以及离散组合数学的联系密切，因此不仅是运筹学，管理学、计算机科学以及工程学界也对机器调度问题给予了极大的关注。近几十年来，研究人员已经在机器调度技术方面取得了实质性的进步。然而，由于大多数机器调度问题是 NP 困难的，即完成解决方案的时间随着规模的增加呈指数增长，在有效时间内寻找到最佳的解决方案仍然是一个艰巨的任务。而且随着对经典的机器调度问题的深入研究，大量更具有实际应用背景的新型机器调度问题不断涌现。由于随着机器的使用时间持续增加，机器会产生磨损、腐蚀，进而导致机器快速衰退甚至停机。因此，对于制造企业的决策者而言，合理给机器安排维护计划是十分必要的。另外现实生产中普遍存在着不确定因素，这使得机器调度问题求解的难度大幅度增加，同时也使得传统机器调度理论与实际脱节。因此，如何在综合考虑不确定性的情况下合理安排生产计划与维护计划的机器调度问题，有着重要的现实意义。导论部分将介绍本书的研究背景，回顾机器调度问题、维护计划及模糊环境的研究进展，进而给出本书的研究思路和研究框架。

1.1 研究背景

调度问题起源于第二次世界大战,隶属于组合优化问题,有着广泛的实际应用背景,例如工程技术、管理科学、计算机科学等。早期的调度问题主要来自机器制造行业,但是在现如今的实际生活中,也有着许许多多的抽象化的调度问题。例如,病人看病问题中,病人便是“工件”,医生就是“机器”^①。此时调度理论中的“机器”和“工件”就从“车床”“螺丝”等具体事物中抽象出来的,是一种抽象的概念。同样调度理论中的“机器”可以是机场跑道、医生、计算机 CPU、数控机床等;相应地,“工件”就是降落的飞机、病人、计算机终端、零件等。

在调度理论的发展历程中,生产调度问题分为现代机器调度问题(modern machine scheduling problem)和经典机器调度问题(classical machine scheduling problem)。

1993 年, Lawler 和 Lenstra 等通过对比分析,总结出了经典机器调度问题的 4 个基本假设^②。具体内容如下:

(1) 资源的类型。机器是加工工件所需要的一种资源。在经典机器调度问题中,必须假设一台机器在任何时刻最多只能加工一个工件;同时还须假设,一个工件在任何时刻至多在一台机器上被加工。

(2) 确定性。在经典机器调度问题中,必须假设决定调度问题的一个实例的所有(输入)参数都是事先知道的和完全确定的。

^① 唐国春. 排序论基本概念综述 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, 29(4): 1-11.

^② Lawler E L, Lenstra J K, Kan A H R, et al. Sequencing and scheduling: Algorithms and complexity [J]. Handbooks in Operations Research and Management Science, 1993, 4: 445-522.

(3) 可运算性。经典机器调度问题是在可以运算的基础上研究调度问题,对于工件的交货期如何确定以及机器与配备机器如何购置等在技术上可能发生的问题没有加以考虑。

(4) 单目标和正则性。在经典机器调度问题中,假设调度问题的目标函数是关于工件完工时间的非降函数(即正则性),并且目的是单个目标函数的最小化(即单目标性)。

针对经典机器调度问题假设的局限性,Brucker 和 Werner 提出了现代机器调度这一新的定义,也称之为新型机器调度(new classes of scheduling problems)^①。在确定性这一假设上突破的有可控调度、随机调度以及模糊调度等。作为经典机器调度单目标和正则性基本假设的突破,有准时调度、多目标调度和窗时调度等。本书讨论的是模糊环境下考虑维护时间的机器调度问题,考虑了实际应用中相关不确定情况和因素,突破了经典机器调度问题中确定性与单目标性的假设。

1. 模糊调度问题

随着科技的发展和社会的进步,制造业的发展已经跨入了后大量生产(post mass production)时期。不同客户对产品的需求呈现出个性化和多样化的趋势,客户对产品的不同需求致使产品的更新速度加快,结构也趋于复杂。因此,在新产品的生产调度时,无法精确把握加工时间,只能通过类似的加工经验以及实际的加工状况,将产品的加工估计为在一定区间变化的模糊变量。例如,某电饭锅厂商常根据客户对锅的实际操作、饭菜味道等调整产品设计,因此,零件的成型周期(加工时间)变成了一个模糊变量。目前,对于加工时间不确定的机器调度问题的研究,学者们一般都将加工时间视为随机变量。然而,如果将上述主观因素考虑进去,加工时间被理解为模糊的变量则更接近于生产实际。同时,在模糊模型中可以非常方便地计算出模糊变量迭加的联合隶属函

^① Brucker P, Werner F. Complexity of shop-scheduling problems with fixed number of jobs: a survey [J]. Mathematical Methods of Operations Research 2007, 65 (3): 461-481.

数。而对于随机变量迭加的联合随机函数,只有当随机变量服从均匀分布时才容易计算得到,如果随机变量是其他分布时,则几乎无法计算。

20 世纪 70 年代,Prade 最早将模糊集理论应用到调度问题中^①。随后学者们将模糊数学规划引入调度领域,由此便产生了调度领域的一个新的分支——模糊调度。随着模糊数学的发展以及模糊数学规划思想在调度领域的成功应用,有关模糊交货期、模糊加工时间的模糊调度问题已成为研究的热点。迄今为止,研究者们就模糊环境下的调度问题开展了许多研究^②。从现有的文献来看,有关流水车间的模糊调度问题研究得较多,但也主要集中于模糊交货期方面,而关于模糊加工时间的研究却较少。吴悦、汪定伟研究了加工时间为模糊区间数的单机提前/拖期调度问题^③;王成尧等研究了多个工件迭加的联合隶属函数所对应的性质,并根据这些性质研究了一种单机模糊加工时间的调度模型^④;唐国春就模糊加工时间排序问题的性质进行了研究^⑤;王成尧、汪定伟研究了单机模糊加工时间下最迟开工时间调度问题,并针对特殊情况给出了问题的最优解,对一般情况给出了一个最优解的必要条件^⑥;F. Lin 研究了模糊加工时间下的单件作业车间调度问题,他的主要工作是对确定型单件作业车间调度问题的模糊化进行研究^⑦;Wang 等研究了模糊加

① Prade H. Using fuzzy set theory in a scheduling problem: a case study [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1979, 2 (2): 153-165.

② Lam S, Cai X. Single machine scheduling with nonlinear lateness cost functions and fuzzy due dates [J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 2002, 3 (3): 307-316.

③ 吴悦,汪定伟. 用模拟退火法解任务的加工时间为模糊区间数的单机提前/拖期调度问题 [J]. 信息与控制, 1998, 27 (5): 394-400.

④ 王成尧,高麟,汪定伟. 模糊加工时间调度问题的研究 [J]. 系统工程学报, 1999, 14 (3): 238-242.

⑤ 唐国春. 排序,经典排序和新型排序 [J]. 数学理论与应用, 1999, 19 (3): 16-21.

⑥ 王成尧,汪定伟. 单机模糊加工时间下最迟开工时间调度问题 [J]. 控制与决策, 2000, 15 (1): 71-74.

⑦ Lin F. A job-shop scheduling problem with fuzzy processing times [J]. Computational Science, 2001, 409-418.

工时间下准备时间的单机调度问题^①；Peng 和 Liu 研究了模糊加工时间下的并行机调度问题^②。就目前来看，有关模糊加工时间的调度问题大部分还只是停留在描述性研究阶段。在不确定环境中，除了工件的加工时间不确定外，工件的工期、加工能力、机器环境等也可以用模糊变量来描述^③，如图 1-1 所示。时间参数有模糊加工时间和模糊工期，决策变量有模糊开始时间和模糊完工时间，对目标函数的评价有模糊时间表长的积分值、不确定性、期望值以及满意度。本书考虑的便是模糊加工时间的机器调度问题。在实际生产中，一个工件在机器上的加工时间往往具有一定的模糊性。比如，工件的加工时间可能不是刚好 25 分钟，而是“25 分钟左右”，并且决策者知道，工件的加工时间不大于 23 分钟或者不小于 27 分钟的情况是不存在的。此时，决策者便可以用三角模糊数 (23, 25, 27) 来近似表示这个工件“25 分钟左右”的加工时间^④。

2. 考虑维护时间的机器调度问题

在制造企业系统内的实际生产过程中，随着使用时间的持续增加，机器将会产生磨损、腐蚀等。如果不及时维护、更换，机器便很容易快速衰退，以至于停机无法生产，导致企业需要付出额外的高昂停机成本，从而使制造总成本增加，甚至可能因为停机而需要重新调整生产作业计划与派工，这样进一步造成出货时间、交货时间延迟，使得顾客的

① Wang C, Wang D, Ip w, et al. The single machine ready time scheduling problem with fuzzy processing times [J]. Fuzzy sets and systems, 2002, 127 (2): 117-129.

② Peng J, Liu B. Parallel machine scheduling models with fuzzy processing times [J]. Information Sciences, 2004, 166 (1): 49-66.

③ Mok P, Kwong C, Wong W K. Optimisation of fault-tolerant fabric-cutting schedules using genetic algorithms and fuzzy set theory [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177 (3): 1876-1893.

④ 唐国春. 排序, 经典排序和新型排序 [J]. 数学理论与应用, 1999, 19 (3): 16-21.

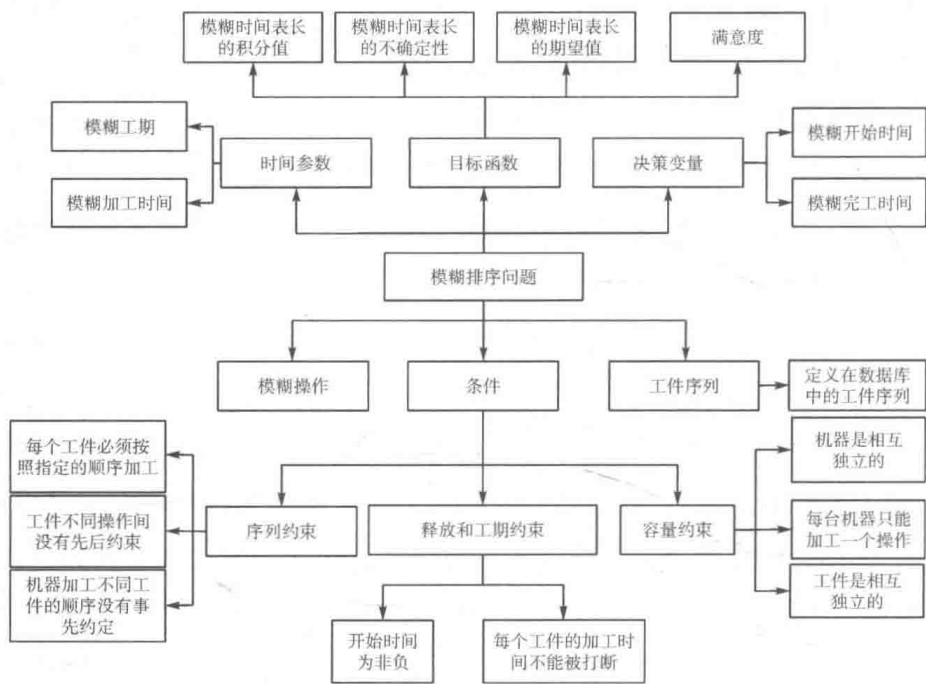


图 1-1 模糊环境下的机器调度问题分类

满意度降低，影响企业未来的发展^①。据资料统计，现代制造企业系统内，因故障维修和停机产生的损失费用已经占全部生产成本的 30% ~ 40%。甚至有些行业的维修费用已经跃居全部生产成本的第二位，甚至更高^②。一般制造企业的维护成本是由会计步骤确定的，它的额度通常占据总运营成本的大部分。在欧美发达国家，传统的维护成本在过去几十年内迅猛增加。20 世纪 80 年代，美国的制造企业花费在维护他们关键装置系统上的成本就已经超过了 6 000 亿美元。而到了 20 世纪 90 年代，这一类的维护成本已经超过了 8 000 亿美元；在 21 世纪伊始，维护成本更是急剧上升至 1.2 万亿美元。相关数据表明，如果维护管理方

① Pan'E, Liao W, Zhuo M. Periodic preventive maintenance policy with infinite time and limit of reliability based on health index [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2010, 15: 231-235.

② 希胜. 以可靠性为中心的维修决策模型 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.