

鲁棒性项目调度 模型与方法研究

MODELS AND METHODS FOR
ROBUST PROJECT SCHEDULING PROBLEMS

张静文 著

机械工业出版社
A MACHINE PRESS



鲁棒性项目调度模型与方法研究

MODELS AND METHODS FOR ROBUST PROJECT SCHEDULING PROBLEMS

张静文 著



机械工业出版社

本书凝聚了作者近年来在不确定性项目调度优化方面的主要研究工作,从多个方面对鲁棒性项目调度问题展开了深入探索。主要包括:基于时差效用函数的双目标资源约束型鲁棒性项目调度问题、基于鲁棒性目标的关键链项目调度新方法、随机资源受限的鲁棒性项目调度问题、不确定情形下项目进展过程的财务状态评估方法等新的研究问题。本书对所研究的每种问题都构建了优化模型并设计了相应的求解算法,而且通过大规模数值仿真测试验证了多个模型及算法的有效性。从实践操作角度,详细地探究了如何构建大规模数值仿真实验的相关问题,进而以求解资源约束型项目调度问题的遗传算法为载体,研究了基于面向对象技术实现算法的程序设计思路及代码编写。此外,本书将理论与方法的阐述相结合,对某些新的模型和求解方法选择了典型的数值实例进行说明,以增加理论与实践的结合。

本书既可作为管理科学与工程、工商管理、工程管理及其他相关专业的博士生、硕士生以及项目管理专业人员开展理论研究的参考用书,也可作为从事项目管理实践工作人员的决策指导用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

鲁棒性项目调度模型与方法研究 / 张静文著. —北京:
机械工业出版社, 2017. 2
ISBN 978 - 7 - 111 - 56153 - 8

I. ①鲁… II. ①张… III. ①鲁棒控制-项目管理-研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 033633 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘鑫佳 张继光 责任编辑: 刘鑫佳 张继光 韩效杰

封面设计: 路恩中 责任校对: 张 薇

责任印制: 李 飞

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2017 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14.5 印张 · 272 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 56153 - 8

定价: 39.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010 - 88361066

读者购书热线: 010 - 68326294

010 - 88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

本书所著的部分研究内容受到国家自然科学基金（编号 71572148）、航空科学基金（编号 2015ZG53080）、中国博士后科学基金特别资助（编号 2016T90947）和中国博士后科学基金面上项目（编号 2015M580875）、陕西省自然科学基金（编号 2015JM7368）的资助。

前言

随着我国政府倡导的“一带一路”基础设施建设先行战略规划出台和亚洲基础设施投资银行的开业，沿线国家将迎来新一轮的投资热潮。在此背景下中国企业“走出去”的规模和力度将突飞猛进，相伴而生的项目机遇蓝海时代也即将到来，而科学高效的项目管理方式将助力中国企业把握“一带一路”的发展契机。此外，随着我国城镇化发展进程的加快，各类投资项目尤其是建设投资必将成为引领中国经济未来十几年持续稳定增长的重要引擎。如何把握内外部的机遇与挑战，探索新型合作模式并有效应对各类项目风险，打造与国际标准接轨的项目执行力及企业核心竞争力已显得尤为迫切。体现到微观层面，如何安全高效地把控项目的实施过程，对承包企业的获利水平乃至国家的声誉都有重要影响，因此研究不确定环境下的项目进度管理符合社会经济发展的大趋势。当前，项目管理的发展已呈现出全球化、多元化和专业化等特点。项目调度优化理论作为项目管理中的经典核心内容，是项目管理科学性的集中体现。合理的调度计划是降低成本、提高质量、缩短周期以及应对变化的重要保证。受项目管理实践发展的驱动，一些新的需求和问题不断涌现并亟待解决，这些新问题也需要通过总结、凝练向理论层面提升并探索科学的解决方法。近年来，不确定环境下的项目进度决策已引起广泛关注，成为当前项目调度优化理论中的研究热点。

目前已有的项目管理方面的图书多从项目组织、管理和实施的角度概要介绍项目管理的理念和知识体系，尽管内容涵盖了项目管理的全过程，但是对项目调度优化理论深入探索的书籍较少。虽然为数不多的著作对项目调度优化理论的发展做出了巨大贡献，然而其研究内容主要集中在确定情形下的项目调度优化问题上，不确定情形下的项目调度优化问题研究还相对较少，相关的专著更少。但是，确定情形下传统的项目调度理论与方法已不适用于复杂多变的项目实施环境。对此，研究者需从实践中提取科学问题，构建新的组合优化模型，分析模型的数理结构特征及计算复杂性，设计与模型契合度高的算法并分析模型和算法的有效性。鲁棒性项目调度作为研究不确定情形下项目进度管理的一种重要方法，旨在考虑如何建立不确定性因素对项目实施过程影响的模型，并得到鲁棒性强的项目调度决策方案。2011年，项目调度优化领域的国际知名学者 Demeulemeester 与 Herroelen 出版了专著《Robust Project Scheduling》，该书通



过建模求解的方式研究了几个单目标鲁棒性项目调度优化问题。目前,对于不确定情形下项目进度管理的研究仍处于起步阶段,许多复杂多变环境下的项目实施过程还需要更完善的理论和方法来指导,本书正是基于此开展了相关的研究。

作者所在的课题组长期从事项目进度管理的探索研究,在项目调度优化理论与方法方面有着长期的积累和深入的研究。本书总结了作者近年来在不确定项目调度优化方面的主要研究工作,创新之处包括以下四个方面。

(1) 从鲁棒性和多目标两个角度拓展了最基本的资源约束型项目调度模型。以时差效用函数为鲁棒性指标,提出并构建了同时包含项目工期和调度方案稳定性的双目标资源约束型鲁棒项目调度模型,设计了一种调整的快速非支配性排序多目标遗传进化算法 NSGA-II 求解模型。

(2) 针对传统关键链方法中最棘手的“二次资源冲突”,剖析了其产生机理;从鲁棒性优化角度提出了一种启发式局部重调度协调策略并设计了量化指标,基于鲁棒性目标构建模型并求解,形成了鲁棒性关键链项目调度新理论与方法。

(3) 整合了鲁棒调度和随机调度两种调度方法。从解的鲁棒性角度,形成了鲁棒性随机资源约束型项目调度 (SRCPSP) 模型并设计了禁忌搜索算法求解;从质量鲁棒性角度,构建了以按期完工率为目标的 SRCPSP 模型,开发了将启发式智能算法与离散仿真技术相结合的联合优化算法求解模型。通过大规模数值测试或实例展示,研究结果很好地验证了随机资源受限的鲁棒性项目调度优化模型、求解模型的智能优化和联合优化算法的有效性。

(4) 提出了不确定情形下项目进展过程的财务状态分析方法。将活动工期和费用同时建模为随机变量,首次采用“山笛形状”描述了具有时间进化特征的累积费用曲线族的存在及分布形态,基于随机规划理论给出其数学表达式;基于“山笛形状”提出了随机活动工期和费用情形下的项目财务状态评估方法。

从操作角度,探究了采用面向对象方法实现项目调度问题求解算法的核心技术,进而介绍了基于程序的大规模数值测试实验的内容。

本书整体遵循了“提出问题→量化分析并建模→模型求解→解决效果分析”的系统思路,综合运用了运筹学、管理学、随机规划理论、多目标规划理论、算法设计技术、系统仿真、编程技术等多学科的方法开展研究。

本书是作者在项目调度管理方面的第二本著作,已出版的第一本专著《项目调度优化模型与方法的拓展》集中探索了确定情形下的多个项目调度优化问

题，其中也涉及少量的鲁棒性项目调度理论，因此可以说第一本专著是本书的前期雏形；本书则专门深入细致地研究多个鲁棒性项目调度问题的优化模型和方法。此外，本书还修正了第一本专著在基本模型描述章节中的一些细节性疏漏。

在本书的撰写过程中，作者直接或间接地引用和参考了国内外项目调度方面的多种文献和书籍，前人相关的研究成果是作者开展研究工作的基础，在此首先向相关作者和出版机构表示诚挚的感谢！其次，本书中的部分研究成果是在国家自然科学基金“干扰管理视角下大型复杂工程项目多目标鲁棒调度优化”（编号：71572148）等几个项目的支持下取得的；本书作者的几位研究生，西北工业大学管理学院的乔传卓、刘耕涛、孙婷等参加了相关课题的研究工作，在此一并表示感谢！

虽然书稿进行了反复修改，但由于作者水平有限，仍难免存在错漏之处，恳请各位专家和学者不吝指正。

张静文

目 录

前言

第 1 章 项目调度问题的核心模型及研究脉络	1
1.1 基本 RCPSp	2
1.2 两类项目调度问题	4
1.2.1 确定型项目调度	6
1.2.2 不确定型项目调度	8
1.3 研究脉络及方法	12
1.4 项目调度问题算例库和特征参数	14
1.4.1 典型算例库	14
1.4.2 特征参数	15
1.5 本书的内容和结构	17
第 2 章 确定型资源约束项目调度模型与算法	20
2.1 基本 RCPSp 的解空间	21
2.1.1 基本 RCPSp 解的特征	21
2.1.2 求解基本 RCPSp 的精确算法	25
2.2 求解基本 RCPSp 的启发式算法	27
2.2.1 调度计划生成机制	27
2.2.2 优先规则的启发式算法	35
2.2.3 超启发式算法	38
2.3 多模式资源约束型项目调度问题	40
2.3.1 MRCPSP 的优化模型	41
2.3.2 MRCPSP 模型的解空间特征	43
2.4 非工期目标的项目调度问题	46
2.4.1 基本 RCPSp 的变体	46
2.4.2 多种资源约束型的 Max-NPV 时间—费用权衡	48



第3章 鲁棒性多目标项目调度	53
3.1 鲁棒性项目调度问题概况	54
3.1.1 实践背景	54
3.1.2 研究进展	55
3.2 双目标资源约束型鲁棒性项目调度	58
3.2.1 问题描述及模型构建	59
3.2.2 求解 BORRCPSP 的 NSGA-II 算法	63
3.2.3 实验设计及结果分析	69
3.3 反应性调度程序	72
第4章 鲁棒性关键链项目调度方法	79
4.1 关键链方法的现状及问题	79
4.1.1 关键链方法概述及缓冲设置	79
4.1.2 关键链和非关键链的识别	84
4.2 关键链方法中的二次资源冲突困境	89
4.2.1 二次资源冲突困境	89
4.2.2 发生二次资源冲突的条件	92
4.3 消除二次资源冲突的策略及鲁棒性指标	93
4.3.1 消除二次资源冲突的鲁棒性策略	93
4.3.2 基于二次资源冲突消除策略的鲁棒性指标设计	96
4.4 基于鲁棒性目标的关键链项目调度优化	98
4.4.1 问题描述及模型构建	98
4.4.2 CCPS-P-R 优化模型求解	101
4.4.3 试验测试及结果分析	104
第5章 随机资源约束型鲁棒性项目调度	109
5.1 随机资源约束项目调度问题模型及特点	109
5.1.1 SRCPS-P 模型及特点	109
5.1.2 Graham 怪象	111
5.2 随机资源受限的鲁棒项目调度问题	116
5.2.1 问题描述及模型构建	116
5.2.2 RRCPS-P-RAD 模型求解	120
5.2.3 测试实验及结果分析	126



5.3 联合优化算法求解 SRCPSP	130
5.3.1 建模及求解	131
5.3.2 算例分析	134
 第6章 不确定环境下项目财务状态评估方法	137
6.1 随机活动工期下的项目进度	137
6.2 不确定情形下的山笛形状	140
6.2.1 “山笛形状”描述	142
6.2.2 模型特征及算法设计	144
6.2.3 基于 AoU 的财务状态评估	150
6.3 大规模数值实验	154
6.3.1 实验设计及参数配置	154
6.3.2 实验指标及结果	158
6.4 干扰项目调度概述	164
6.4.1 问题描述	164
6.4.2 干扰项目调度问题的研究思路	166
 第7章 面向对象的算法实现及大规模数值实验	169
7.1 超启发式算法的编码方案	169
7.2 遗传算法求解基本 RCPSP	173
7.2.1 算法框架	173
7.2.2 遗传进化过程	175
7.3 面向对象技术的算法编程	177
7.3.1 算法运行中类的抽象	177
7.3.2 算法中关键模块的代码实现	182
7.4 大规模数值实验	187
7.4.1 算例产生及测试指标	187
7.4.2 算例的格式化数据读入	192
 附 录 	196
附录 A 项目调度问题发生器 ProGen 的 EXPL BAS 文件	196
附录 B 基本 RCPSP 的格式化数据文件	199
参考文献	202

项目调度问题的核心模型及研究脉络

美国著名学者 Tom Peters 和 David Cleland 指出，在当今纷繁复杂的环境中，项目管理是项目成功的关键——战略管理和项目管理在全球性的市场竞争中起着关键作用。为提升企业竞争力，越来越多的企业更加趋向于采用项目化（Project-Oriented）的方式运作。据统计，全球约有 30% 的经济活动是按照项目化的方式进行运作的（Turner, 2008）。“工作项目化，执行团队化”已成为人们工作的基本范式。

项目调度问题（Project Scheduling Problems, PSP）是项目管理中的经典核心内容，该问题自 20 世纪 50 年代出现伊始即成为管理科学领域的研究热点（Tavares, 2002）。迄今为止产生的大量研究成果为项目管理实践提供了强有力的理论支持并极大地丰富了项目管理的理论和技术。同时，PSP 又与项目管理中的其他问题密切联系并为之提供量化的决策依据，如项目支付调度问题、项目投融资管理、项目风险管理等。目前，项目管理的发展已呈现出全球化、多元化和专业化等特点，日益受到广泛关注。运用运筹学、计算机科学、组织行为学等多学科的理论 and 工具来指导项目管理实践，持续改善项目管理的绩效，仍然是许多学者和项目经理孜孜以求的目标（寿涌毅，2010）。

资源约束型项目调度问题（Resource-Constrained Project Scheduling Problem, RCPSP）是一类重要的组合优化问题，是经典机器调度理论在项目管理领域的一般化，属于运筹学的一个活跃分支。RCPSP 广泛地存在于建筑工程、软件开发、计算机（如操作系统中的资源管理、处理器的任务调度等）、飞机及轮船制造等单件或者小批量生产方式的企业中（刘士新，2007；Hall, 2012）。

随着全球化竞争的到来，项目面临的环境日趋复杂，项目进度管理中出现了许多新的需求，亟待通过总结凝练向理论层面提升并探索科学的解决方法。



在复杂多变的环境下, 现有的 PSP 理论与方法已不适用于解决项目进度实践中的一些新问题 (Demeulemeester & Herroelen, 2007)。在项目内部, 信息完备条件下获得的静态基准调度方案, 由于各类随机因素的干扰最终可能导致项目拖延、范围变更、资源的间断性短缺或闲置、在制品库存更多, 或者频繁重新调度而增加系统的紧张度。尤其对于现代大型复杂工程项目, 面临的不确定性成因更复杂, 在施工过程中更易受到各种不确定因素的干扰而出现投资超算、工期延误和设计变更等诸多问题 (徐小峰等, 2014)。另一方面, 项目的利益相关者众多, 内外部环境经常迫使项目管理者需要同时兼顾多种绩效指标, 所以工期、费用、质量、净现值等多个目标都需要关注。由此可见, 不确定性已处于项目的核心位置, 而传统的项目调度方法不具备依据变化及时地调整调度方案的灵活性, 实践对不确定环境下的项目进度管理方式提出了迫切需求 (Hazir & Schmidt, 2013)。项目进度管理中充分考虑多种决策目标和多种不确定事件的扰动影响, 进而采用科学的调度理论与方法来提高调度方案的质量, 这是缩小理论研究与实际应用之间差距的重要手段 (何立华, 2013)。

本章将首先介绍 RCPSp 的数学描述及特征参数, 然后梳理出 PSP 的研究脉络分支。

1.1 基本 RCPSp

项目调度是指在给定的绩效标准下, 合理安排项目的活动并据此有效配置项目资源, 确保项目的顺利进行及预定目标的实现。通常, 项目由一些具体的可执行的活动/任务 (Activity/Task) 构成, 并且某些活动之间存在逻辑上的优先关系; 同时每项活动的执行需要占用和消耗一定量的一种或多种资源。项目调度的任务就是合理分配资源, 恰当地安排各项活动的进度 (确定开始时间), 以达到优化既定目标函数的目的。项目调度问题的建模通常依附于项目的活动网络图 (Activity Network Graphs), 活动之间的优先关系通过网络图的结构来体现。网络图由两个元素构成: 箭线/弧 (arrow/arc) 和节点 (node), 箭线和节点的时间参数在项目进度计划中有明确的含义。项目调度问题的求解过程就是确定箭线和节点的时间参数。

活动网络图通常有两种表示方式: Aoa (Activity-on-arc) 和 Aon (Activity-on-node)。Aoa 称之为双代号网络图, 用箭线表示活动, 用节点表示事件; Aon 称之为单代号网络图, 与 Aoa 的表述方式恰好相反, 它用节点表示活动, 用箭

线表示事件，如图 1-1 所示。



图 1-1 项目活动网络图的两表示方式

a) 双代号网络图 Aoa b) 单代号网络图 Aon

无论采用哪一种表示方式，对确定型的 PSP 来说，活动之间的逻辑关系都通过一个有向无圈（Directed Acyclic）的网络图来表示，且网络图仅有一个源节点（Source）和一个终节点（Sink）。

在本书中，除特别强调外，多数情形下都采用 Aon 描述 PSP。有向无圈的活动网络图记为 $G=(V, E)$ ，其中 V 为节点（活动）集合，且 $|V|=J$ 表示共有 J 个活动；源节点 1 和终节点 J 通常表示不消耗时间和资源的虚活动。 E 为优先关系集合， $(i, j) \in E$ 表示活动 i 与活动 j 之间具有逻辑关系，即活动 i 为活动 j 的紧前活动，同时活动 j 为活动 i 的紧后活动。

在本书中，将活动仅有一种执行模式的 RCPSP 称为基本 RCPSP，以区别于其他的资源约束型项目调度问题。基本 RCPSP 是项目调度中最经典和核心的模型，也是研究最广泛、最深入的问题。同时，基本 RCPSP 也是项目调度优化理论中最基础的数学模型，引入表 1-1 的符号和变量来表示基本 RCPSP 的数学模型。

表 1-1 基本 RCPSP 模型中的符号和变量

符号或变量	含 义
j	活动序号, $j=1, 2, \dots, J$; 项目中共包含 J 个活动
t	时间段序号, $t=0, 1, 2, \dots, T$; 表示项目的进展过程; 其中 T 为项目工期的上限
d_j	活动 j 的工期, 通常为整数
$P(j)$	活动 j 的所有紧前活动的集合
$S(j)$	活动 j 的所有紧后活动的集合
s_j	活动 j 的开始时间
f_j	活动 j 的结束时间, $f_j = s_j + d_j$
A_t	在时刻 t 正在进行的活动集合, 即 $A_t = \{j \mid j \in V \cap (s_j < t \leq s_j + d_j)\}$
k	可更新资源的序号, $k=1, 2, \dots, K$; 项目进展中共需 K 种可更新资源



(续)

符号或变量	含 义
R_k	第 k 种可更新资源在单位工期的可用量 (限量), $k=1, 2, \dots, K$
r_{jk}	活动 j 在单位工期上对第 k 种可更新资源的需求量, $k=1, 2, \dots, K$

据此, Pritsker 等 (1969) 首先将基本 RCPSP 模型描述如下。

$$\min f_J \tag{1-1}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} s_i + d_i \leq s_j, (i, j) \in E \text{ 且 } i \in P(j), i=1, 2, \dots, (J-1) & (1-2) \\ \sum_{j \in A_t} r_{jk} \leq R_k, k=1, 2, \dots, K; t=0, 1, 2, \dots, f_J & (1-3) \end{cases}$$

其中, 式 (1-1) 表示追求项目工期最短的目标函数, f_J 代表最后一个活动的结束时间, 即项目工期; 式 (1-2) 表示活动之间 0 时间滞后 (“0 时滞”) 的结束一开始型优先关系约束, 确保活动 j 的开始时间 s_j 不早于它的任一个紧前活动 i 的结束时间 f_i ; 式 (1-3) 表示在项目进展中的任意一个单位工期 t ($t=1, 2, \dots, f_J$) 上, 所有正在进行的活动对第 k ($k=1, 2, \dots, K$) 种可更新资源的占用总量 $\sum_{j \in A_t} r_{jk}$ 不能超过该种资源的可用量 R_k 。

基本 RCPSP 模型以项目工期最短为目标寻找合适的进度计划, 体现为确定每个活动的开始时间。项目进度计划表示为一个 J 一元组: $S=(s_1, s_2, \dots, s_J)$, 决策变量即为进度计划所体现出的 J 一元组; 最优解即为在满足优先关系和资源约束条件下, 最短项目工期对应的调度计划。Blazewicz 等 (1983) 已经证明, 基本 RCPSP 模型的求解属于 NP-hard 问题。

以经典的基本 RCPSP 为核心, PSP 已发展了丰富的理论模型, 一直以来吸引着国内外众多学者的广泛关注。

1.2 两类项目调度问题

前已述及, PSP 的建模通常借助活动网络图来表达, 网络图的结构 (表示活动之间的逻辑关系) 和网络要素 (节点与活动) 的参数构成了已知数据和信息。本书根据网络图的结构和网络要素的参数这两个维度, 将项目管理问题区分为确定型和不确定型两大类: ① 网络结构和网络参数都固定的情形对应确定型项目管理问题; ② 网络结构和网络参数只要有任何一个维度不确定, 对应的则是不确定型项目管理问题。根据网络结构是否确定及网络参数是否确定形成四个区域, 常见的项目调度子问题能够被归类到相应的区域内, 如表 1-2 所示。



表 1-2 项目调度问题的分类

网络结构		网络参数（如活动工期）	
		确 定	不 确 定
活动之间的逻辑关系	确定	I 关键路径法（CPM） 基本 RCPSP 和 MRCPSP 其他非工期目标的确定型 PSP	II 计划评审技术（PERT） 关键链方法（CCM） 鲁棒性项目调度 随机 RCPSP（SRCPSP） 模糊 RCPSP（FRCPSP）
	不确定	III 决策关键路径法（DCPM）	IV 随机网络计划技术 项目干扰调度管理

I 区域：活动之间的逻辑关系确定，网络参数也确定。这类问题包括经典的关键路径方法（Critical Path Method, CPM），基本 RCPSP 和多模式资源约束型项目调度问题（Multi-mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem, MRCPSP），还有其他一些不以项目工期为目标确定型项目调度问题，如资源投资问题（Resource Investment Problem）、加权提前—拖期惩罚问题（RCPSP with Weighted Earliness-Tardiness Cost）、项目净现值（Net Present Value, NPV）最大化问题等。

II 区域：活动之间的逻辑关系确定，但是网络参数不确定。这类问题包括经典的计划评审技术（Program Evaluation and Review Technology, PERT）、关键链方法（Critical Chain Method, CCM）、鲁棒性项目调度问题（Robust Project Scheduling Problem）、随机资源约束型项目调度问题（Stochastic Resource-constrained Project Scheduling Problem, SRCPSP）、模糊资源约束型项目调度问题（Fuzzy Resource-Constrained Project Scheduling Problem, FRCPSP）。需要特别指出，在实践中使用 PERT 时，基于活动工期的概率分布参数计算出每个活动工期的期望值和方差，然后根据所有活动的期望工期并采用 CPM 获得项目的期望工期，因此在很多情形下称 CPM/PERT 是经典无资源约束项目调度方法的典型代表。

III 区域：活动之间的逻辑关系不确定，但是网络参数确定。这类问题的典型代表是决策关键路径方法（Decision Critical Path Method, DCPM）。

IV 区域：活动之间的逻辑关系不确定，网络参数也不确定。这类问题通常涉及随机网络计划技术，如图形评审技术（Graphic Evaluation and Review



Technique, GERT)、随机网络技术 (Queue Graphic Evaluation and Review Technique, QGERT)、风险评审技术 (Venture Evaluation and Review Technique, VERT) 等。但是, 与调度优化相关的仅有项目干扰调度管理问题 (Disruption Management for Resource-Constrained Project Scheduling Problem, DMRCPSPP)。在 DMRCPSPP 中, 活动工期可能发生波动, 资源可能中断使得网络参数不确定; 新任务到达或已有任务取消都会改变初始的活动网络结构关系。

目前, 确定型项目调度问题已经研究得非常广泛和深入, 但是对不确定型项目调度问题的研究相对较少。已有对不确定型项目调度的研究多集中在 II 区域中的鲁棒性项目调度、SRCPSPP、CCM 等; 尽管 IV 区域中的问题最接近实际, 但是由于问题建模和求解的复杂性, 目前研究项目干扰调度管理的文献还很少。

1.2.1 确定型项目调度

以基本 RCPSPP 模型为核心, PSP 在不同方向上已经有了较多的扩展, 主要体现在资源约束、活动之间的逻辑关系、活动的执行方式及目标函数四个方面。

1. 资源约束上的扩展

基本 RCPSPP 模型中仅考虑到可更新资源约束, 而 Słowinski (1980) 将施工中的资源分为可更新 (Renewable)、不可更新 (Nonrenewable) 和双重约束 (Doubly-Constrained) 三类。可更新资源是可用量在项目实施过程中每个时期 (如日、周、月等) 上受到限制的资源, 如人力、机器、场地等; 不可更新资源是可用量在整个项目上受到限制的资源, 如资金、原材料等; 双重约束资源是可用量在每个时期和整个项目上同时受到限制的资源, 资金有时便被视为一种双重约束资源。MRCPSPP 模型中同时包含了可更新和不可更新两种资源约束。Böttcher 等 (1999) 将资源的可用性定义在时期子集上, 提出了一种更为一般的资源概念——部分可更新资源 (Partially Renewable Resources)。部分可更新资源可视为可更新和不可更新资源的一般化形式。可更新资源可以视为一种每一时期都构成一个分离时期子集的部分可更新资源, 而不可更新资源则是一种可用量定义在包含整个项目工期时期子集上的部分可更新资源。部分可更新资源具有更强的表达能力, 它可以表述可更新资源和不可更新资源所无法表述的资源约束, 如存在节假日的人力资源约束。

2. 优先关系约束上的扩展

基本 RCPSPP 模型中, 活动之间为 0 时滞的结束—开始型 (Finish-Start Precedence Constraints with 0 Time Lag, FS) 优先关系约束, 可将最常见的 0 时

滞 FS 扩展为更一般的情形,如具有最小最大时滞 (Generalized Precedence Constraints with Minimal or Maximal Time Lag) 的优先关系约束 (Elmaghraby & Kamburowski, 1992)。最小时滞是指两项活动之间的执行时间间隔必须大于一个最小值;最大时滞是指两项活动之间的执行时间间隔不能超过一个最大值;同时规定最小和最大时滞,这便为两项活动之间的执行时间间隔规定了一个时间窗。一般优先关系约束除了最熟知的 FS 之外,还包括结束—结束型 (Finish-Finish, FF)、开始—结束型 (Start-Finish, SF) 和开始—开始型 (Start-Start, SS)。FF 型表示某项活动在另一相关活动结束时也必须结束;SF 型表示某项活动在另一相关活动开始时必须结束;SS 型表示某项活动在另一相关活动开始时也必须开始。

3. 活动执行方式上的扩展

活动执行方式上的扩展包括两个方面:第一,活动具有多种执行模式。当活动具有多种执行模式时,基本 RCPSP 即被扩展为 MRCPSP。Elmaghraby (1977) 最早开始研究 MRCPSP;较多的文献研究了求解 MRCPSP 模型的优化算法,这些算法基本上都是对求解单模式 RCPSP 算法的扩展;开创性的工作为 Talbot (1982) 提出的一个两阶段的分支定界算法 (Branch and Bound, B&B);Speranze & Vercellis (1993) 提出了深度优先 B&B 算法,该算法列举了活性进度集合,基于优先关系的下边界 (Lower Bound) 被用来修剪部分列举树;此外,Özdamar (1999) 为求解 MRCPSP 开发了一种遗传算法;Maniezzo & Mingozzi (1999) 使用了一种基于奔德斯分解 (Bender Decomposition) 的启发式算法求解了 MRCPSP。第二,活动具有抢先权。基本 RCPSP 中,活动一旦开始则必须不间断地执行直至完成。然而,在很多情形下,由于资源限制,需要在多个任务之间合理调配资源以提高资源的利用率,所以中断执行任务较为常见。如果允许活动抢先,在某些活动中断期间,其他一些活动就可以抢先执行。Kaplan (1988) 首先提出了活动具有抢先权的资源约束项目调度问题 (Preemptive RCPSP, PRCPSP)。研究 PRCPSP 求解算法的文献相对较少,具有代表性的是 Demeulemeester & Herroelen (1996) 提出的 D-H 扩展优化算法,该算法首先将活动分割为数量等于原活动工期的子活动,每个子活动的工期为 1,其资源需求量与原活动相同,由此生成一个新的网络;然后,在子活动层次上用半活性列表来构造局部进度并利用 D-H 算法搜索求解,他们同时从理论上证明了当解决资源冲突时,仅考虑最小延迟集合是充分的。

4. 目标函数上的扩展

基本 RCPSP 中仅考虑以项目工期最短为目标,属时间类目标。然而,项目