

崔建双 编著

项目调度问题模型 与优化方法



科学出版社

项目调度问题模型与优化方法

崔建双 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书围绕着项目调度问题及其解决方法展开论述,全书共分为10章。前3章归纳总结了项目调度相关领域的基本知识和常见的优化算法;第4章描述和定义了资源约束项目调度问题和多模式资源约束项目调度问题基本模型,并给出了基于粒子群算法的求解过程。第5章及之后的各章所讨论的问题都属于在第4章基础上衍生出来的模型。第5章考虑带时间窗的资源约束项目调度问题;第6章是时间-成本权衡项目调度问题,包括工期-费用-质量综合权衡项目调度问题;第7章讨论资源均衡项目调度问题,以最小化资源利用的波动变化为目标;第8章是关于柔性资源约束的项目调度问题,重点讨论具有柔性资源特征的软件开发项目调度;第9章涉及了资源约束的多项目调度问题;第10章是以最大化项目净现值为目标的资源约束项目调度问题。

本书在总结前人研究成果的基础上,系统化地把作者多年来针对项目调度问题的研究成果和心得展示出来,适合从事项目管理研究工作的学者、工程师和管理专家阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

项目调度问题模型与优化方法 / 崔建双编著. —北京: 科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-052139-2

I. ①项… II. ①崔… III. ①项目管理—研究 IV. ①F224.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第053895号

责任编辑: 杨慧芳 / 责任校对: 王 瑞
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 刘 刚

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2018年3月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018年3月第一次印刷 印张: 12

字数: 195 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

致 谢

《项目调度问题模型与优化方法》是作者多年来针对该领域问题的研究心得和总结，撰写过程中参考了前人的研究成果和文献。与此同时，本著作的出版还得到了如下基金项目的大力资助，在此一并表示感谢。

- (1) 制造执行系统技术及低碳运营战略研究平台建设（中央高校基本科研业务经费，FRF-BD-16-00A）
- (2) 基于结构化方法的复杂研发项目多领域集成分析与优化研究（国家自然科学基金项目，71472013）
- (3) 大数据环境下融合多源信息的推荐系统关键问题研究（国家自然科学基金项目，71471016）



前言

项目管理理论与实践活动是管理科学与工程领域内重要而活跃的分支，其核心任务是优化项目调度、平衡项目计划，从而在随后的实施过程中能够更精准地控制项目的进程，达到降低项目成本、保证项目工期、提升项目质量的目的。优秀的项目调度方案是项目管理成功实施的重要保证。项目调度问题具有一般调度问题的普遍特征，目标函数的变化、约束条件的变化，乃至数值范围的变化，都会对调度结果产生或多或少的影响。项目调度问题多种多样的衍生模型给广大研究者带来丰富的研究素材，同时也在潜移默化中影响着现实项目管理水平的进步与完善。

本书是关于项目调度问题及其优化方法方面的著作，全书共分为10章。前3章归纳总结了项目调度相关领域的基本知识和常见的优化算法；第4章描述和定义了资源约束项目调度问题和多模式资源约束项目调度问题基本模型，并给出了基于粒子群算法的求解过程。第5章及之后的各章问题都属于在第4章基础上衍生出来的模型，第5章考虑了带时间窗的资源约束项目调度问题；第6章是时间-成本权衡项目调度问题，包括工期-费用-质量综合权衡项目调度问题；第7章讨论资源均衡项目调度问题，以最小化资源利用的波动变化为目标；

第8章是关于柔性资源约束的项目调度问题，重点讨论具有柔性资源特征的软件开发项目调度；第9章涉及了资源约束的多项目调度问题；第10章是以最大化项目净现值为目标的资源约束项目调度问题。各章除了给出问题的数学表达模型之外，还基于不同的优化算法对其中的典型问题进行了求解，给出了求解步骤和算例的结果，以便读者对问题模型有更深入的理解。鉴于作者水平有限，难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

崔建双

2017年8月

目 录

前言	i
----------	---

第1章 项目管理与项目调度..... 1

1.1 项目与项目管理	2
1.1.1 项目	2
1.1.2 项目管理	2
1.2 项目计划与调度	4
参考文献	6

第2章 项目调度基础..... 7

2.1 网络计划图	8
2.1.1 单代号网络计划图	8
2.1.2 双代号网络计划图	9
2.2 活动持续时间与时间约束关系	10
2.2.1 活动持续时间的估计	10
2.2.2 活动的时间约束关系	10
2.3 活动模式与活动资源	13
2.4 目标函数	15
2.4.1 考虑时间的目标函数	15
2.4.2 考虑权衡的目标函数	16
2.4.3 考虑资源均衡的目标函数	17

2.4.4 考虑项目净现值的目标函数	17
2.4.5 考虑柔性资源的目标函数	18
2.4.6 多项目与多目标函数	19
2.5 关键路径法	21
2.5.1 基于AON图的关键路径法	21
2.5.2 基于AOA图的关键路径法	23
2.6 调度进度生成机制	25
2.7 项目调度问题表达规则	27
2.7.1 分类标记B规则	27
2.7.2 分类标记H规则	30
参考文献	34

第3章 项目调度问题优化算法

3.1 优化算法概述	40
3.2 算法优劣的评价	42
3.2.1 计算复杂度与问题求解难度	42
3.2.2 算法评价标准	43
3.3 项目调度问题的测试算例	44
3.4 遗传算法	46
3.5 模拟退火算法	50
3.6 蚁群算法	54
3.7 禁忌搜索算法	61
3.8 粒子群算法	65
3.9 人工蜂群算法	68
3.10 混合蛙跳算法	73
3.11 细菌觅食算法	75
3.12 磷虾觅食算法	80
参考文献	83

第4章 资源约束项目调度问题 87

4.1 资源约束项目调度问题基本模型 88

4.2 求解RCPSP的粒子群算法 90

4.3 多模式资源约束项目调度问题 98

4.4 求解MRCPS的粒子群算法 101

4.4.1 算法实现过程 101

4.4.2 实测结果及分析 104

参考文献 104

第5章 带时间窗的资源约束项目调度问题 107

5.1 时间窗的概念 108

5.2 带时间窗的资源约束项目调度问题模型 108

5.3 带时间窗的多模式资源约束项目调度
问题 111

5.3.1 模型描述 111

5.3.2 实例表达 113

5.4 基于遗传算法求解MRCPS/max 118

参考文献 119

第6章 时间-成本权衡项目调度问题 121

6.1 截止期离散时间-成本权衡问题 123

6.2 预算离散时间-成本权衡问题 124

6.3 多目标离散时间-成本权衡问题 125

6.4 工期-费用-质量综合权衡问题 126

6.5 求解建筑工程项目调度问题的遗传算法 128

6.6 求解多目标时间-成本权衡问题的遗传算法	131
参考文献	133

第7章 资源均衡项目调度问题

7.1 资源均衡项目调度模型	138
7.2 资源均衡问题的测试算例	139
7.3 资源均衡项目调度问题的粒子群算法	140
参考文献	143

第8章 柔性资源约束的项目调度问题

8.1 柔性资源约束的项目调度问题模型	146
8.1.1 柔性资源的量化	146
8.1.2 模型描述	147
8.1.3 实例分析	148
8.2 软件项目调度问题及其算法	150
8.2.1 软件项目调度问题概述	150
8.2.2 软件项目调度问题模型	151
8.2.3 基于粒子群算法的软件项目调度问题	154
参考文献	156

第9章 资源约束的多项目调度问题

9.1 资源约束的多项目调度问题模型	160
9.2 求解RCMPSP的遗传算法	161
参考文献	166

第10章 最大化净现值资源约束项目调度问题... 167

10.1 无资源约束MAX-npv项目调度问题.....	168
10.2 资源约束MAX-npv项目调度问题.....	168
10.3 多模式资源约束MAX-npv项目调度 问题.....	169
10.4 不同支付模式对净现值的影响.....	171
10.5 基于人工蜂群算法的MAX-npv.....	173
10.5.1 问题模型描述.....	173
10.5.2 人工蜂群算法求解MAX-npv.....	175
参考文献.....	178

第1章

项目管理与项目调度

自从有组织的人类活动出现以来，不同规模、不同成本、不同工期与不同质量需求的项目就从未间断过。从金字塔到万里长城，从阿波罗登月到举世瞩目的三峡大坝工程，无一不是人类运作大型复杂项目的成功典例。在我们的日常生活和工作中，小到家居装修、新产品的研发，大到举办一届奥运会、修建一条高速铁路，许多工作的开展都以项目的面目出现。项目及其管理活动在人类社会发展进程中起着举足轻重的作用。

随着当代经济规模的不断扩张，基于项目管理模式及其管理过程的需求将会越来越多，涉及的专业将会越来越广，项目的利益相关关系将会变得更加多样化。许多项目不但技术难度大、参与人员众多，而且资源紧张、时间紧迫，传统的一般管理模式已经很难满足复杂而庞大项目运作的需要，人们会要求越来越精确的项目计划和调度。现实也呼唤更加先进而有效的项目管理理论和方法的出现。无论是工业界还是学术界，努力提高项目管理水平已经成为共识。

1.1 项目与项目管理

1.1.1 项目

美国项目管理协会 (Project Management Institute, PMI) 在《项目管理知识体系指南》(Project Management Body of Knowledge, PMBOK) 中把项目 (project) 定义为“为完成某一独特的产品、服务或成果所做的临时性的工作”^[1]。德国工业标准 (Deutsches Institut für Normung, DIN) 把项目看成是在总体上符合下列条件的一次性任务：(1)有预定目标；(2)有时间和资源的限制；(3)有专门的组织。项目管理质量指南 (ISO10006) 则把项目定义为有开始和结束日期，有一系列相互协调和受控的活动，为达到预定目标而开展的一次独特工作过程。就此，可以把项目理解为由一系列相对独立而又相互关联的活动 (activity) 所组成，要求在限定的范围、时间、成本、组织、资源和质量的条件下，依序完成各项活动，以达成一个明确而独特的目标 (object)。

不同于日常一般的例行工作，项目最大的特征是其一次性行为，亦即一个项目有始有终，唯一且不可重复^[2]。项目的生命周期可长可短，其产出可有形亦可无形。项目的“临时性”和“一次性”体现在每一个项目都有明确的起点和终点。当项目目标达成时或当项目因不会或不能达到目标而中止时，项目就会结束。项目的“独特性”在于尽管其所交付的成果或执行过程中可能存在重复的元素，但并不会改变项目本质上的唯一特征。不同项目即便采用相同或相似的材料，由相同的团队来完成，但每个项目都因不同的位置、不同的设计、不同的环境、不同的时间和不同的干系人等而具备其独特性。

1.1.2 项目管理

项目管理理论与实践活动是目前管理科学与工程领域一个重要而活跃的分支。PMBOK把项目管理定义为在项目活动过程中运用专门的管理知识、技能、工具和方法，使项目能够在有限的资源和时间的限定条件下实现或超过设定的目标^[1]。项目的核心工作是制定并优化项目计划，从而在随后的实施过程中

能够更精准地控制项目的进程。其中，优化项目计划包括确定活动的先后顺序（precedence）、调度（scheduling）活动的起止时间和资源供应能力等内容，目的是缩短项目工期、降低成本、提高质量^[3]。

项目管理模式广泛地存在于工程建设、产品开发、生产作业等各行业之中。项目管理模式通常可以这样来实现：不同职能部门的成员因一个项目的需要而组成临时团队，项目经理是团队负责人，在进度、成本、质量、风险、合同、采购、人力资源等各个方面对项目进行全方位的管理，领导团队在不超出预算的情况下，准时、优质地达成项目目标，完成项目所设定的各项任务。

组织活动若采取项目管理模式往往会产生显著的不同。这种模式能够实现一体化的业务管理，跨部门沟通协作，高效的资源配置，减少计划拖延并降低运营成本。有鉴于此，按照项目管理模式和方法运行组织的活动已成为世界范围内日益流行的趋势。据统计，全球经济活动超过80%是采用项目管理的模式来完成的^[4]。项目管理过程包括明确项目需求、制定项目计划、优化项目调度、组织项目实施以及控制项目进展。具体来说，有范围管理、进度（时间）管理、成本管理、质量管理、资源管理、风险管理、沟通管理、采购与合同管理以及综合管理等。

明确项目需求是项目成功的基础和必要条件。通过项目利益相关方之间的反复沟通，确定包含在项目范围内的需求，并采用文档的方式描述出来，相关方确认后即成为制定项目范围、项目目标以及项目计划的基础。项目目标是实施项目所要达到的期望结果，即项目最终所能交付的成果。项目的实施过程实际就是一种追求并最终实现预定目标的过程。对一个项目而言，目标往往不是单一的，很多时候不同目标之间可能存在着冲突。比如，在进度（时间）、成本（资源）和技术性能（质量）之间，加快进度可能需要以提高成本为代价，而时间及成本的投入不足又会影响技术性能的实现，因此三者之间需要做出权衡，是一类典型的多目标优化项目调度问题。有些项目目标的成功标准容易计量，如工期、净现值等，但有些项目目标则较难计量，比如顾客满意度、客服质量等。某些项目是由若干个子项目所组成的，这些子项目有各自的交付成果，相互之间往往又共享一组有限资源，构成了多项目管理问题。

项目计划与调度可以看成是实现项目目标的路线图。优秀的项目计划与调度方案有助于减少项目活动的盲目性，提高项目管理的效率，也是降低项目风险，避免陷入被动的重要手段之一。

1.2 项目计划与调度

从管理理论的视角看，项目管理的首要任务是制定并优化项目计划，从而在随后的实施过程中能够做到有路线可循。

制定项目计划首先要依据项目范围列出项目活动清单，回答“活动做什么”的问题，包括每一活动的工作重点、时间期限、所需资源种类和数量、活动成果的表现形式和数量、项目实施过程中对风险和不可预见因素的处理机制、人员之间的组织协调关系等。这些实际上就是PMBOK中所描述的工作说明（state of work, SOW）和工作分解（work breakdown structure, WBS）的内容。关于项目计划的详细制定过程和方法可参考PMBOK与WBS实践标准。随后的项目调度需要解决“活动如何做”的问题，即具体指定各个活动的先后衔接顺序关系、起止时间，安排不同活动所需要的资源，并且不超出资源的容量限制。优化的项目调度通常是在满足有限的资源约束和活动先后顺序约束关系的前提下，实现工期最短或成本最低等目标。

早期制定项目调度方案需要依靠手工对各项活动进行排序，确定每一活动的开始时间并判断项目目标是否有所改善。这样的排序过程需要反复调整，直到获得满意的结果为止。随着项目规模的增大和约束条件的不断增多，人们为了平衡资源和工期之间的矛盾，必须借助于计算机等辅助工具才能制定出一个比较优秀的调度方案。多年来，人们针对如何科学合理地编制项目计划和优化项目调度展开了多方面的研究，出现了许多优化规则和算法，使得项目优化调度成为项目管理过程的基本功能。

甘特图是20世纪20年代提出的，用于表现项目进度的一种直观而简单的方法。它以二维坐标的形式，用横线图在时间上展开整个项目期间实际的活动完成情况，标明项目中各项活动的执行顺序以及每项活动的开始/结束时间和持续时

间。但是甘特图不能体现活动之间的相互依赖关系，也不能指出哪些活动是“关键”活动，更不能体现活动过早或者过晚开始所造成的后果。

20世纪50年代中期发展起来的网络计划技术，以网络图的形式来表达项目进度计划。它能明确反映各活动时间的先后顺序和相互制约的逻辑关系，通过计算时间参数，可找出计划中的关键活动及关键路径，反映出各活动的时差^[5]；通过调整关键路径的参数，可以优化项目工期和/或成本，代表性的方法包括关键路径法（critical path method, CPM）与计划评审技术（program evaluation and review technique, PERT）等。

当各活动的持续时间确定已知，CPM利用单代号网络计划图（active on node, AON）或双代号网络计划图（active on arc, AOA）所标出的项目活动先后关系，计算出各活动的开始时间、完成时间、总时差、自由时差、关键线路和项目工期。CPM和PERT都是采用网络计划技术表示项目活动的细分结构，很好地反映了项目组成各活动之间的时序依赖关系。二者的区别在于对项目各活动的执行时间的估计方法。CPM采用单点估计法，直接根据历史数据和以往经验给出唯一的估计值，不考虑不确定性因素。PERT则进行了一定的改进，采用数理统计方法给出活动执行时间，所以又称为概率型网络计划技术。PERT更适用于不可预知因素较多或经验数据不多的新项目。

CPM和PERT都没有考虑资源的限制，仅考虑在活动优先顺序关系下安排项目各活动的进度。然而，现实中资源总是稀缺的，各活动之间对所需资源，如人力、设备、材料、资金等的竞争，很可能导致项目无法按照制定的计划执行，项目拖期或者超预算在所难免。因此，项目管理后期的研究和实践活动逐渐转向考虑资源约束的项目调度问题（resource constrained project scheduling problem, RCPS P）^[6]。根据资源种类、类型、活动先后约束关系、目标函数等不同，形成了资源约束的项目调度问题的基本模型及以基本模型为基础扩展出来的多种衍生模型^[7]。与此同时，为了优化这些复杂的调度问题，出现了各种调度优先规则和启发式算法。特别是以遗传、蚁群、粒子群等为代表的元启发式优化算法，结合带有具体问题特征的启发式规则，克服了传统的以运筹学算法为基础的精确算法对多元组合优化问题难以适应的缺陷，为解决复杂的项目调度问题发挥了重要的

作用，并取得了丰硕的成果。不仅在理论上丰富了研究内容，而且在实践中获得了广泛的应用。

本书是作者在对资源约束项目调度问题进行深入研究并参考了大量相关研究文献的基础上，系统性地针对近年来有关项目调度问题模型以及基于各种优化求解算法的最新研究成果，做出的全面总结和梳理，旨在对从事此类问题研究与实践的工作者有所启发和帮助。

〈 参 考 文 献 〉

- [1] Project Management Institute. 项目管理知识体系指南 (PMBOK) [M]. 第5版. 许江林译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [2] Jack R M, Samuel J M. 项目管理: 管理新视角[M]. 第7版. 戚安邦译. 北京: 中国人民大学出版社, 2011.
- [3] James P L. 项目计划、进度与控制[M]. 第5版. 石泉, 杨磊译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [4] Turner J R. The Handbook of Project-Based Management [M]. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [5] Kelley J E. The critical path method: Resources Planning and Scheduling [M]//Muth JF, Thompson GL. Industrial Scheduling. New Jersey: Prentice-Hall, 1963.
- [6] Peter B, Andreas D, Rolf M, Ket al. Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 112: 3-41.
- [7] Sönke H, Dirk B. A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem [J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207 : 1-14.