

建筑项目支付进度安排问题研究 ——基于业主和承包商交互角度

◎ 匡亚萍 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

建筑项目支付进度安排问题研究

——基于业主和承包商交互角度

匡亚萍 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑项目支付进度安排问题研究 / 匡亚萍著. —杭州:
浙江大学出版社, 2009.10

ISBN 978-7-308-07102-4

I. 建… II. 匡… III. 建筑工程—项目—支付方式—研究
IV. F407.967

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 177760 号

建筑项目支付进度安排问题研究
——基于业主和承包商交互角度

匡亚萍 著

责任编辑 张颖琪

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 富阳市育才印刷有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 9.75

字 数 180 千

版 印 次 2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-07102-4

定 价 25.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

内容提要

支付模式选择和项目进度安排是项目管理中业主和承包商共同关注的两个主要问题。由此简化和抽象出的支付进度安排问题因此成为近年来被广泛关注和研究的重要课题。如何作出柔性的和鲁棒性的决策,使之能适应复杂多变的项目管理环境,是支付进度安排问题研究的一个长期目标。本书的研究目的是基于业主和承包商的交互,探讨更贴近工程实际的支付进度安排模型,并尝试应用此模型进行项目管理的基本分析。本书的主要研究内容包括以下几方面:

(1)指出了项目支付进度安排问题的七个主要影响因素,并对这些因素的含义及影响机制进行了较为系统的分析。本书对业主和承包商关于合同支付条款的谈判过程进行了剖析,指出这个谈判过程是一个双方博弈和信息交互的过程,且双方都以各自的净现值(NPV)最大化为决策准则。

(2)本书以业主和承包商交互为视角,以业主和承包商的 NPV 均实现最大化为优化目标,构建了新的支付进度安排问题的模型,并提出了由内外环组成的双环求解思路,分别模拟了承包商和业主的决策过程。此外,本书还结合一些常用支付激励手段对上述模型进行了拓展。

(3)提出了项目支付进度安排问题求解的双环蚁群算法。其中,内环蚁群算法用于确定承包商在外环传递的支付周期长度下的最优进度安排和最优 NPV;外环蚁群算法则根据内环蚁群算法所传递的工序进度安排信息,对支付周期长度进行搜索,并计算出业主的 NPV。双环蚁群算法经过多次嵌套计算,并结合自适应权重法,最终确定问题的 Pareto 前沿。

(4)本书利用 PSPLIB 测试问题集对双环蚁群算法进行了广泛的计算实验,并将内环蚁群算法与前向/后向混合迭代算法、Rand-50 算法的计算结果进行了对比,将外环蚁群算法与枚举法的计算结果进行了对比。计算结果表明,本书提出的双环蚁群算法整体上具有更好的性能,在寻优性能和效率上能够满足工程实际的需要。

(5)最后,本书还以 PSPLIB 的一个测试问题为例进行了量化分析。计算结果显示,除了工期奖罚结构的影响不甚明显外,支付周期长度、资源约束、间接成本率、业主和承包商的折现率、保留款比例等的变化都将对业主和承包商的最优 NPV,以及承包商的工序进度安排产生重要影响。

关键词: 支付进度安排, 蚁群算法, 净现值(NPV), 帕累托前沿

ABSTRACT

Payment mode selection and project scheduling are two main problems in project management, which attract the client and contractor significantly. Thus many researchers focus on the extending payment scheduling problem in recent years. How to make flexible and robust decision so as to adapt to complex environment in project management is a long-term objective of the research of payment scheduling problem. The purpose of this thesis is to discuss a practical model for payment scheduling problem based on the interaction between the client and contractor, and try to apply the model for basic analysis in project management. The main contents of this thesis are listed as follows:

(1) Seven major elements of payment scheduling problem were pointed out, the meanings and mechanism of which were also analyzed systematically. Furthermore, this thesis revealed the negotiatory process about the payment items of contract between the client and contractor, and showed that the negotiation is a process full of game and information interaction between both sides with the decision rule of maximizing their own net present value (NPV).

(2) From the viewpoint of the interaction between the client and contractor, with the optimal objective of maximizing their own NPV, the thesis constructed a new model for payment scheduling problem and proposed a double-loop thought for resolution consist of the inner loop and outer loop, which simulates the decision process of the contractor and client respectively. Moreover, the thesis also tried to extend the above model combined with some common way of payment incentive.

(3) A double-loop ant colony optimization algorithm was proposed, of which the inner loop ant colony optimization algorithm was used to determine optimal activity schedule and optimal NPV of the contractor under the periodic length of progress payment delivered from the outer loop, and the outer loop ant colony optimization

algorithm was applied to search the periodic length of progress payment and calculate the NPV of client on the basis of the activity schedule delivered from the inner loop. After several iterations between the outer loop and inner loop, and combined with the adaptive weight method, the Pareto Front of the problem was determined ultimately.

(4) With PSPLIB testing problems, a computation experiment for the double-loop ant colony optimization algorithm was carried out in this thesis. The results of the inner loop ant colony optimization algorithm were compared with the result of the forward/backward hybrid iteration algorithm and Rand-50 algorithm, and the results of the outer loop ant colony optimization algorithm were compared with the enumeration method. The results show that the double-loop ant colony optimization algorithm has better performance as a whole, and the searching efficiency and performance can fulfill the request of practical project.

(5) Eventually, a quantitative analysis on a testing problem of PSPLIB was illustrated in this thesis. The results indicate that except for the bonus-penalty structure on the due date, the change on the periodic length of progress payment, resource constraints, indirect cost rate, the discounted rate of the client and contractor, and the percent of retention will have great influence on the optimal NPV of the client and contractor, and will also affect the activity schedule of contractor significantly.

Key Words: payment scheduling, ant colony optimization algorithm, net present value (NPV), Pareto Front

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 问题研究的背景	1
1.1.1 支付进度安排问题的提出	1
1.1.2 研究的目的和意义	2
1.2 支付进度安排问题的研究现状	3
1.2.1 研究历史及演化	3
1.2.2 支付进度安排问题的模型	10
1.2.3 支付进度安排问题的求解	18
1.2.4 小 结	21
1.3 主要研究内容、研究方法和技术路线	24
1.3.1 主要研究内容	24
1.3.2 研究方法和技术路线	24
1.4 研究的创新与不足	26
1.4.1 研究的创新点	26
1.4.2 研究的不足	26
第 2 章 支付进度安排问题的理论与模型	27
2.1 支付进度安排问题的影响因素	27
2.1.1 工序之间的逻辑关系	27
2.1.2 资源约束	28

2.1.3	现金流入/流出	29
2.1.4	两种常见的网络计划	29
2.1.5	支付模式	30
2.1.6	净现值和折现率	30
2.1.7	支付激励措施	31
2.2	业主和承包商的谈判过程	32
2.2.1	业主和承包商关于合同支付条款的谈判过程与决策准则	32
2.2.2	业主和承包商的理想解	33
2.2.3	示例分析	34
2.2.4	小 结	38
2.3	支付进度安排问题的数学模型	38
2.3.1	问题的描述和模型的假设	38
2.3.2	业主和承包商的现金流分析	39
2.3.3	支付进度安排问题的目标	40
2.3.4	支付进度安排问题的数学模型	41
2.3.5	支付进度安排模型的求解思路	43
2.3.6	支付进度安排模型的拓展	44
2.4	测试问题集	46
第 3 章	支付进度安排问题的内环蚁群算法	48
3.1	PSM2 模型可行解的确定思路	48
3.1.1	工序进度安排顺序和可行进度计划的关系	49
3.1.2	局部最优进度计划	51
3.2	内环蚁群算法的基本思路	54
3.2.1	蚁群算法概述	54
3.2.2	内环蚁群算法的求解思路	56
3.3	工序进度安排顺序的产生	59
3.4	局部最优进度计划的产生	62
3.4.1	进度产生方案	62
3.4.2	局部优化程序	65

3.5 蚁群算法	69
3.5.1 信息素信息的设计	69
3.5.2 启发式信息的设计	70
3.5.3 选择概率和选择方法的设计	71
3.5.4 终止准则	71
3.6 内环蚁群算法参数设置	72
3.6.1 实验设计	72
3.6.2 计算结果	73
3.7 内环蚁群算法有效性验证	78
3.7.1 计算实验设计	78
3.7.2 计算实验结果分析	83
第 4 章 支付进度安排问题的外环蚁群算法	86
4.1 外环蚁群算法的基本思路	86
4.2 自适应权重方法	88
4.3 蚁群算法	91
4.3.1 信息素信息的设计	91
4.3.2 启发式信息的设计	91
4.3.3 选择概率和选择方法的设计	92
4.3.4 终止准则	92
4.4 外环蚁群算法有效性验证	92
4.4.1 计算实验设计	92
4.4.2 计算实验结果分析	93
第 5 章 支付进度安排问题的量化分析	96
5.1 测试实例及其参数设置的基本方案	96
5.2 支付模式及支付周期长度的影响	99
5.3 基准折现率的影响	111
5.4 支付激励手段的影响	115
5.5 小 结	126

第 6 章 结论与展望	128
6.1 主要结论	128
6.1.1 关于支付进度安排问题的理论与模型	128
6.1.2 关于支付进度安排问题的内环蚁群算法	129
6.1.3 关于支付进度安排问题的外环蚁群算法	130
6.1.4 关于支付进度参数对支付进度安排的影响	130
6.2 今后待研究的问题	131
参考文献	133
致 谢	145

第 1 章 绪 论

1.1 问题研究的背景

1.1.1 支付进度安排问题的提出

在我国经济飞速发展的今天，不同类型的工程项目建设也是如火如荼。全国的房地产开发投资已经连续多年增长，而我国各项基础设施的投资也方兴未艾，如三峡工程、国家体育馆、杭州湾跨海大桥等。根据国家经济社会的发展态势，未来我国还将继续启动更多的大型工程项目。这些工程项目呈现出投资额巨大、建设周期长、工作任务多的特点。另一方面，自 2006 年开始，中国人民银行已经连续多次加息和提高存款准备金率，实行银根紧缩政策。虽然自 2008 年 9 月以来央行已进行了五次降息，但根据目前的贷款基准利率，建设项目仍然面临着较高的资金成本。因此，对于工程项目而言，应该在考虑资金时间价值的情况下对项目进度进行合理安排。

项目的主要参与者包括业主和承包商，承包商进行工程建设，为项目实施承担各项成本支出，业主就承包商的工作进行支付，具体支付模式则通常由双方在合同中约定。鉴于大型项目存在着现金流大、资金成本高的特点，业主和承包商需要考虑的是如何确定支付时间、支付数额和支付位置，以使各自的财务效益最大化。于是，产生了项目的支付进度安排问题。

作为项目进度安排问题的一个重要的研究分支和研究前沿，支付进度安排问题与项目管理实践的结合极为紧密，且该问题大多属于 NP-hard 问题，求解十分困难，对国内外相关研究人员具有极大的吸引力。从现有的文献资料来看，国内外研究人员大多从承包商角度研究支付进度安排问题，从业主和承包商交互角度进行的研究较少。并且，这些研究在假设条件、激励措施的设置、建模方式和求

解方法等方面仍然存在许多不足。为了进一步完善支付进度安排问题的模型与求解,并探讨适应我国工程项目环境的支付进度安排模型,本书将从业主和承包商交互的角度对支付进度安排问题进行研究。

1.1.2 研究的目的是和意义

支付模式的选择和项目进度的安排是项目管理过程中业主和承包商共同关注的两个主要问题。由此简化和抽象出的支付进度安排问题因此成为近年来被广泛关注和研究的课题。支付进度安排问题涉及的主体包括业主和承包商,他们在有关合同条款和支付模式的谈判过程中相互作用、相互制约。诸如支付模式的选择和项目进度的安排这样的管理决策,需要业主和承包商借助于谈判媒介,在信息交互的基础上作出。仅考虑单方面的利益需求作出的决策都存在一定的片面性,或者由于对方的反对而无法实施,或者即使可以实施,也将产生很多矛盾和冲突,从而影响项目的顺利完成。因此,仅从业主或承包商角度研究支付进度安排问题均存在一定的局限性。

为了更好、更深入地研究支付进度安排问题,并充分考虑到业主和承包商双方都在支付进度安排问题中处于主体地位,本书以业主和承包商交互为视角对支付进度安排问题进行研究,其具体研究目标包括以下几方面:

(1)建立业主和承包商交互角度下的支付进度安排问题研究理论架构。该理论架构应充分体现业主和承包商在项目决策过程中的交互本质,系统阐述各种因素的影响机制,并能很好地指导业主和承包商交互角度下的支付进度安排问题模型的建立和系统的分析。

(2)构建业主和承包商交互角度下的支付进度安排问题模型。该模型应立足于对业主和承包商在项目决策中交互行为的研究基础上,综合考虑双方优化目标,对所涉及的要害作出合理假设,使之更加符合工程实践的要求。

(3)对上述模型提出科学合理的求解方法。该求解方法应具备全局寻优的特点,在求解效率和求解时间上符合工程实际的需要,求解结果可以有效地帮助业主或承包商作出柔性的和鲁棒性的项目管理决策。

基于上述目标,本书展开对业主和承包商交互角度下支付进度安排问题的研究。所取得的研究成果将具有以下方面的学术价值和理论意义:

(1)在批判性继承支付进度安排问题现有研究成果的基础上,通过对该问题的主要影响因素,涉及的主体及其相互作用、利益目标等进行系统梳理,力图对业主和承包商交互角度下的支付进度安排问题进行理论上的架构,以丰富和完善

支付进度安排问题的研究理论。

(2)突破现有研究的束缚,立足于业主与承包商在项目管理决策中的交互本质,构建一个新的、与以往研究不同的支付进度安排模型,以丰富和完善支付进度安排问题的模型体系。

(3)结合蚁群算法的全局寻优、并行计算等特性,通过对业主和承包商在项目管理中交互行为的模拟,提出支付进度安排问题的双环蚁群算法,以丰富和完善支付进度安排问题的求解方法。

(4)通过对支付模式或支付周期长度、支付激励措施等的量化分析,便于揭示支付模式和各种激励措施对项目实施的影响,为承发包双方选择合适的合同结构和支付模式,设置各种激励措施等提供科学的分析工具和理论依据。

(5)项目支付进度安排问题的研究是对项目集成管理思想的细化,它将为系统的项目集成管理方法的提出提供理论铺垫和方法准备,它与现有项目管理软件的结合将使项目的全面集成管理成为可能。

1.2 支付进度安排问题的研究现状

1.2.1 研究历史及演化

支付进度安排问题(payment scheduling problem)是指在一定的支付模式下,通过对项目工序的进度安排,确定支付的时间和数额,使项目的净现值最大。支付进度安排问题是项目进度安排问题(project scheduling problem)的一个重要分支,也是该问题的一个研究前沿,近年来得到了国内外研究学者的广泛关注。

作为项目管理的一项重要内容,项目进度安排问题历来是国内外研究人员关注的重点,近年来也有许多调查文献对这方面的文章进行了概括汇总^[1,2,3,4,5]。经过多年的发展,目前对项目进度安排问题的研究已经形成了一个庞大的研究体系,这些研究可以从资源是否受限、目标函数、工序的实施模式、逻辑关系和工序是否允许中断等方面进行分类。从项目的资源是否受到约束,可以将问题分为资源不受限的进度安排和资源受限的进度安排;项目进度安排的目标包括工期最小化、净现值最大化、质量最大化、成本最小化等;工序的实施模式包括单模式和多模式;按工序的逻辑关系则可以分为零时距结束一开始关系和一般关系;按工序是否允许中断则可以分为工序不允许中断(preemptive)和工序允许中断(non-preemptive)等。对上述因素进行不同的设定即产生了项目进度安排问题的

不同研究分支。

早期的项目进度安排问题考虑的目标主要是工期最小化,在资源不受限的确定型项目网络中,将每个工序安排在满足逻辑关系的最早可能开始时间^[6]。当考虑了资源约束后,即称为资源受限项目进度安排问题(resource constrained project scheduling problems, RCPSP)。RCPSP 问题已被证明是 NP-hard 问题(组合膨胀问题)^[7],即求解这类问题的计算量随着问题规模的增加呈现指数级增长。以工期最小化为目标的 RCPSP 采用的求解方法包括精确求解法和启发式方法(heuristic),其中,精确求解法即最优化方法(optimization)包括动态规划^[8]、0—1 规划^[9,10,11]和带分支定界的隐枚举法^[12,13];启发式方法基本上包括四种不同的求解方法:基于优先权规则的进度安排^[14,15,16],截尾分支定界(truncated branch-and-bound)^[17],分离弧概念(disjunctive arc concepts)^[18,19]和后启发式方法^[20,21,22]。以质量最大化(quality maximization)为目标的项目进度安排研究包括文献[23,24],而以成本最小化的研究将成本目标分解为工序成本和资源成本目标,对应的问题分别是时间—成本均衡问题^[25,26,27]和资源均衡问题^[28,29,30]。

以工期最小化为目标的项目进度安排忽略了项目财务方面的信息,这样的项目进度安排在实施过程中可能会因为资金供应的问题而导致失败,或者即使可以实施但在经济上不合算。Doersch 和 Patterson^[31]已经表明,包含进度款支付的项目按最小化工期制定的最优进度可能不会产生最高的净现值或公司财务回报的最大化。进度安排问题的财务方面内容是指在项目实施过程中的一系列现金流(正的和/或负的)。正现金流(即现金流入)对应于工序和项目实施的支付,负现金流(即现金流出)包括劳动力、设备、材料等的支出。通过现金流的折现考虑资金的时间价值。

当考虑项目的现金流与资金时间价值时,净现值(net present value, NPV)最大化将是一个较为合适的目标,由此形成的问题称为带折现现金流的项目进度安排问题(project scheduling problem with discounted cash flows, PSPDCF),也称为 Max-NPV 问题^[32]。自 A. H. Russell^[33]开创性地将 NPV 准则引入项目进度安排问题以来,Max-NPV 问题激起了研究人员的广泛兴趣,这类研究文献此起彼伏、层出不穷。鉴于项目支付进度安排问题是在 Max-NPV 问题的基础上逐渐演化发展而来,因此下面将对资源不受限与资源受限下 Max-NPV 问题的研究模型和求解方法等进行简要的回顾。

一、资源不受限的 Max-NPV 问题

A. H. Russell^[33]首先在网络中考虑现金流的净现值(NPV)最大化目标。他考虑了一个资源不受限的问题,假设项目用双代号网络表示,不管是正现金流还是

负现金流都与事件相关联。他提出了一个连续复利折现的非线性规划模型,使用了一个泰勒序列近似为一个线性的目标函数。这个线性规划模型的对偶形式可以解释为一个网络流问题,由此导出了优化程序。A. H. Russell 表明了当考虑资金目标时,成本—关键路径与时间—关键路径是截然不同的。

Grinold^[34]通过增加一个项目完工期限将 A. H. Russell 的研究进行了扩展,他将具有线性逻辑关系约束和指数目标函数的非线性规划转化为一个具有加权分布问题结构的等价的线性规划。这个特殊结构的求解方法是,通过搜索项目网络上的可行树集合来确定最优解,以此所有工序都具有零时差。和 A. H. Russell 的论文一样,除了一个小的计算实例外,Grinold 也没有进行广泛的计算实验。

Elmaghraby 和 Herroelen^[35]使用 Russell 模型开发了一个简化的算法,为带 NPV 目标的项目进度安排问题提供了最优进度。他们显示,在通常情况下,在满足网络结构约束的条件下,将带正现金流的事件尽早安排和负现金流的事件尽晚安排是最优的。他们也阐明了净现金流取决于现金流节点的实现时间,以及在不存在项目完工期限的情况下,如果 NPV 小于零,项目将被不确定的拖延。Herroelen 和 Gallens^[36]给出了这个方法的计算实验结果,结果显示这个方法对资源不受限问题是有效的。

Demeulemeester 等^[37]提出了一个新的最优算法,在部分树结构上执行回归搜索,它利用的概念是将带来支付的工序尽早安排,引起支出的工序推迟安排。对比 Grinold 方法,这个计算测试提供的结果令人鼓舞。Möhring 等^[38]提出一个多项式算法,用于最小化与工序开始时间相关的数值之和。这个方法可用于解决 NPV 最大化的特例,其中由于折现的原因,对于最迟开始时间,当现金流出工序的数值单调递增时,现金流入工序的数值单调递减。Schwindt 和 Zimmermann^[39]为带最小和最大时差的净现值问题提出了一个最陡上升算法(steepest ascent algorithm)。

二、资源受限的 Max-NPV 问题

当考虑实际资源的约束时,Max-NPV 问题的求解可以采用精确求解方法、启发式方法和后启发式方法。精确求解方法包括 0—1 整数规划^[40,41]、动态规划^[42]、分支定界算法^[43,44]等。Doersch 和 Patterson^[40]采用 0—1 整数规划方法,考虑的模型中包括对项目中的工序的支出所需资金的约束,项目的可用资金随进度款支付的发生而增加。目标函数包括与工序完成相关联的现金流,以及延误完成的任何罚金。模型为包括 15—25 个工序的项目求得了最优解。结果显示,当资金成本较高时或项目工期较长时,在安排工序时计算奖励/惩罚以及资金约束是非常重要的。

Smith-Daniels 和 Smith-Daniels^[41]扩展了 Doersch 和 Patterson 模型,引入了材料约束和成本。在满足材料和资金约束的情况下最大化 NPV,并求得了小规模问题的最优解。他们得出结论,定购和控制成本不仅确实迫使具有一般需求的工序同时开始或在相近的时间开始,附加的约束也导致项目总成本的降低,即使他们可能导致工序乃至项目的延误。

Tavares^[42]提出一个新的动态规划方法和求解方法,对一个相互联系的项目集合使用变分微积分(calculus of variations)推导出最优条件。最大化的目标函数包括计划实施过程中产生的收益折现之和、项目支出成本的折现之和与超期罚金的净额。这个方法成功应用于葡萄牙的一个大型铁路建设项目。

Baroum 和 Patterson^[43]提出一个分支定界方法,直接用于求解带 NPV 目标的项目进度安排问题。Icmeli 和 Erenguc^[44]开发的分支定界算法使用了最小延误方案的概念,并对来自 Patterson 集的 50 个测试问题(工序数在 7—51 个之间)和使用 ProGen 产生的具有 32 个工序的 40 个问题进行了测试,至多有 3 种资源类型,结果显示对比文献中的结果,算法是有效的。Yang 等^[45]则为 NPV 目标开发了一个整数规划方法,然而他们所提出的方法仅求解了工序数很少的问题。为了求解具有许多工序的较大规模问题,优化方法需要的计算时间过多,于是很多学者采用启发式方法进行研究。

与上述优化方法不同,启发式方法基于一定的优先权规则安排工序进度。它由两个要素组成:进度产生方案和优先权规则。当有一组工序,按照逻辑关系可以在当前时刻开始,但由于资源的约束只能安排部分工序时,就出现了工序安排进度的优先顺序问题。不同的优先顺序导致不同的进度产生。优先顺序的确定可以依据很多经验规则,如按照持续时间的长短、按照时差的多少,等等,由此产生了很多的启发式规则。最基本的进度产生方案则主要有两种:串行进度产生方案(serial schedule generation scheme, SSGS)和并行进度产生方案(parallel schedule generation scheme, PSGS)^[46]。最初的进度产生方案都是前向的,后来发展为后向和双向。所谓前向是指按照工序逻辑关系的先后顺序安排工序进度,工序被安排在尽可能早的位置上;后向是指按照工序逻辑关系的逆序安排工序进度,这种方式下工序被安排在尽可能迟的位置上;双向则是指分别从前后两个方向安排工序进度,前半部分工序按前向安排,后半部分工序按后向安排,最后通过将后半部分工序左移形成最终的进度^[47]。

Max-NPV 问题的启发式程序通常根据资源不受限下 Max-NPV 模型的解开发单向启发式规则,或使用来自于关键路径和现金流的信息,如后续路径的现金流之和,来开发优先规则。相关的文献包括[48,49,50,51,52,53,54],常见的优先