

基于改进关键链方法的 MRCPSP 的鲁棒性优化

田 旻¹, 张光军², 刘入境¹

(1. 西安交通大学管理学院, 陕西 西安 710049;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621054)

摘要: 针对鲁棒性项目调度理论研究集中在单模式领域这一现状, 通过对关键链方法的改进, 构建了多模式资源受限项目调度鲁棒性优化模型. 其中, 对关键链方法的两个核心问题进行了改进: 提出了非关键链识别的准则, 采用不同的影响系数对缓冲区的设置进行了修正. 同时, 在综合考虑了关键链方法特点, 任务的多种模式以及资源消耗稳定性需求基础上设计了鲁棒性指标, 并构建了基于鲁棒性目标的关键链多模式资源受限项目调度模型. 通过多组算例验证显示调度计划的鲁棒性显著提高, 证明了模型的有效性.

关键词: 多模式资源受限项目调度问题; 关键链方法; 缓冲设置; 鲁棒性

中图分类号: C935; F224.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2019)02-0277-12

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2019.02.011

Robust optimization of the MRCPSP based on improved critical chain method

Tian Min¹, Zhang Guangjun², Liu Renjing¹

(1. School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621054, China)

Abstract: Different from the current theoretical research of robust project schedule which focuses on the single-mode filed, this paper uses an improved critical chain method to construct a robust optimization model of the multi-mode resource-constrained project scheduling problem(MRCPSP). Two core problems of the critical chain method are improved. A criteria for non-critical chain recognition is proposed, and the buffer settings are corrected by using different influence coefficients. Meanwhile, this paper designs a robust measure based on the comprehensive consideration of the characteristics of the critical chain method, the task's multi-modes and resource consumption stability. A critical chain multi-mode resource-constrained project scheduling model based on the robust objective is constructed then. The robustness of the scheduling plan is improved significantly in multiple test cases, which proves the validity of the model.

Key words: multi-mode resource-constrained project scheduling problem(MRCPSP); CCM; buffer settings; robustness

1 引言

在项目管理实践中, 调度过程常面临诸多不确定因素的影响. 例如, 资源或材料的滞后送达, 新任务的临时分配或取消, 以及交付日期的改变都会造成项目和任务工期的延迟或计划需要重新调整等问题^[1,2]. 因而,

收稿日期: 2018-04-19; 修订日期: 2018-10-18.

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(18ZDA104).

鲁棒性项目调度成为不确定环境中项目调度的热点问题^[3-6]. 目前鲁棒性项目调度的理论研究主要集中在单模式资源受限项目调度问题(resource-constrained project scheduling problem, RCPSP), 关于多模式的研究较少^[7]. 然而现实中, 由于受到不确定因素的影响, 项目任务可能会采取多种模式, 不同模式的工期和资源需求允许存在差异. 因此, 本文针对多模式资源受限项目调度的鲁棒性问题进行研究, 更加符合不确定环境中的项目管理实践需求.

关键链方法(critical chain method, CCM)是 Goldratt^[8]将约束理论应用于项目管理领域, 通过在基线调度计划中插入缓冲来降低不确定因素对基线调度影响的鲁棒性调度理论^[9]. 应用关键链方法有两个核心问题需要解决: 一个是关键链与非关键链的识别, 一个是缓冲的设置. 当前关键链的识别已取得了较为丰富的研究成果^[10-12], 但非关键链识别的相关研究成果甚少. 非关键链是用于保护关键链的重要链路, 处于关键节点之前. 当非关键链上任务发生延期并传递到链尾时, 可以被非关键链尾的汇入缓冲(feeding buffer, FB)所吸收, 起到保护关键链和整个项目稳定实施的作用. 同时, 调度计划中任务资源使用的先后顺序打破了计划网络的初始结构, 任务之间的制约关系受到了资源制约和工艺制约的双重影响, 非关键链上的任务和非关键链的位置更加难以确定. 因此, 有必要对非关键链的识别展开研究. 传统关键链缓冲设置方法包括 Goldratt 的“剪切-粘贴法”(cut and paste method, C&PM)^[8], 以及 Newbold 的“根方差法”(root square error method, RSEM)^[13]. 然而, 传统方法在设置缓冲时常存在过大或过小等问题, 难以有效应对不确定风险的发生. 因此, 一些学者对缓冲设置进行了修正. 徐小峰等^[14]考虑了风险偏好、资源约束和网络复杂度等属性, 提出了与这些属性相关的缓冲修正方法. Tukul 等^[12]提出了基于根方差的缓冲修正方法, 用于在不同资源供应下缓冲设置差异化分析. Zhang 等^[15,16]提出了信息资源紧张度以及综合资源紧张度的概念, 从项目任务之间信息交互的视角对缓冲进行了修正. 虽然修正缓冲的方法较多, 但大多针对调度计划中的资源消耗或网络结构等特征进行修正, 忽略了任务的工期、任务在实施过程的相对位置、相邻任务的工期等因素也是影响调度计划稳定性的重要因素. 此外, 应用 CCM 研究不确定环境中的项目调度问题时, 现有研究主要集中在单模式项目调度^[6,11,17,18]领域, 多模式的情况较为少见. 在单模式项目调度问题中应用 CCM 时, 只需要关注关键链和非关键链尾的缓冲大小以及缓冲对前后任务开始时间的影响, 而多模式调度问题中还需要关注调度计划中任务模式的选择. 因为任务模式的差异会导致任务工期和资源需求的差异, 最终导致关键链、非关键链、缓冲设置以及调度计划的鲁棒性均有所不同.

Herroelen 等^[19,20]将项目调度的鲁棒性分为质量鲁棒性和解的鲁棒性. 质量鲁棒性是指项目按时完工的稳定性, 解的鲁棒性是指项目按计划执行的稳定性. CCM 通过在链尾加入缓冲的形式为项目的完工提供保障, 多用于解决质量鲁棒性问题^[21]. 然而, CCM 在实施过程对项目任务的安全时间进行了压缩, 将包含安全时间的任务总工期替换为最可能工期, 导致实施过程的稳定性受到影响, 解的鲁棒性难以得到有效保障. 因此, 一些学者采用时差的度量指标提高调度过程解的鲁棒性^[7]. Mahalleh 等^[22]采用活动的总时差作为 RCPSP 的鲁棒性指标, 并采用差分进化算法对其进行了求解. Ghoddousi 等^[23]设计了基于资源消耗的权重系数对任务的时差进行修正, 以时差加权总和作为 RCPSP 的鲁棒性指标, 并采用改进的遗传算法进行了求解. Zheng 等^[24]设计了基于任务工期标准差的权重系数作为任务时差的修正因子, 将修正后的时差总和作为 RCPSP 的鲁棒性指标, 并采用变邻域搜索算法进行了求解. 这些研究建立在活动时差的基础上, 以活动时差的大小作为衡量调度计划鲁棒性的间接体现, 均缺乏与 CCM 特点的有效结合. 由于 CCM 的缓冲机制, 非关键链和关键链链尾活动的时差被缓冲所取代, 因此关键链的缓冲也是调度计划鲁棒性的重要体现. 虽然张静文等^[1,6]结合关键链特点对鲁棒性指标进行了研究, 但均是基于单模式的项目调度问题. 多模式的项目调度问题中, 任务模式的差异最终会导致关键链调度计划鲁棒性的差异, 鲁棒性指标的建立需要同时结合关键链方法的特点和任务模式的选择. 此外, 调度计划实施过程中, 资源的平稳消耗也是调度计划稳定实施的重要体现, 因此也需要考虑到鲁棒性指标的设计中.

综上所述, 项目调度问题的鲁棒性优化研究主要集中在单模式领域, 将 CCM 应用于多模式资源受限项目调度中还存在以下问题: 一是非关键链识别不清晰, 缺少相应的识别准则; 二是缓冲设置不合理, 缺乏与任务工期、资源消耗水平、紧前紧后活动、任务在进度实施过程的相对位置等其他关键影响因素的有效结

合; 三是鲁棒性指标的设置没有考虑 CCM 的特点、任务模式的差异以及资源的消耗情况. 针对以上问题, 本文提出了非关键链识别的准则, 综合考虑了影响项目实施稳定性的不同因素对关键链缓冲进行修正, 结合 CCM 的特点、任务模式的差异以及项目调度中资源的消耗情况设计了鲁棒性指标, 并在此基础上构建了基于鲁棒性目标的关键链多模式资源受限项目调度模型. 采用遗传算法对多组算例进行了求解, 证明本文构建的模型可以显著的提高调度计划的鲁棒性.

2 基于鲁棒性目标的关键链多模式资源受限项目调度模型

本节首先对多模式资源受限项目调度问题(multi-mode resource-constrained project scheduling problem, MRCPSP)的前提假设和基本模型进行介绍. 其次对 CCM 在多模式项目调度中非关键链识别和缓冲修正机制进行改进. 最后结合 CCM 的特点、调度计划中任务的多种模式以及资源的消耗情况, 设计了新的鲁棒性指标, 并构建了基于鲁棒性目标的关键链多模式资源受限项目调度模型.

2.1 MRCPSP 前提假设和模型描述

在 MRCPSP 中, 管理人员为了应对突发情况, 事先为不同任务制定了多套执行方案, 使得调度过程不仅需要考虑资源的需求、任务的先后, 还需要考虑最佳的执行模式, 增加了调度过程的难度. MRCPSP 假设: 每一种资源的供应量都是正整数; 每个任务都有一种或多种执行模式; 每个任务在选定模式中执行不能被中断; 每个任务在每一种模式下对每一种资源的需求量是事先确定的非负整数; 每个任务在每一种模式下的任务工期、最早开始时间、最早结束时间均为非负整数; 不同任务之间存在事先规定好的工艺先后约束. 一个项目中各个任务之间的工艺先后约束可以通过有向无环图(计划网络图) $G = (V, E)$ 来表示, V 表示项目的任务集合, E 表示任务之间的工艺(先后)约束集合. 具体来讲, 任务 i 采用 1 到 n 之间的整数表示, 其中 $i \in V, 1 \leq i \leq n$. 任务 1 和任务 n 都是虚任务, 分别代表开始和结束任务, 资源需求和任务工期都是 0. 计划网络图中的边 $(i, j) \in E, j \in V, 1 \leq j \leq n$, 代表任务 i 必须在任务 j 开始之前完成, 是其紧前任务. 项目任务最多用到了 k 种资源(仅考虑可再生资源), $1 \leq k \leq K$, 每种资源总供应量为 R_k . 对于项目任务集中的某一个任务 i 最多有 M_i 种执行模式, 在某一种执行模式 m 下, $1 \leq m \leq M_i$, 其工期为 d_{im} ; 对某一种资源 k 需求量为 $r_{imk}, 0 \leq r_{imk} \leq R_k$; 对应的最早开始时间为 s_i . A_t 代表 t 时刻正在实施的任务集合.

MRCPSP 模型如下所示^[25]:

$$\text{Min } s_n, \quad (1)$$

s.t.

$$s_1 = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} x_{im} = 1, i \in v, x_{im} \in \{0, 1\}, \quad (3)$$

$$s_i + \sum_{m=1}^{M_i} x_{im} d_{im} \leq s_j, \forall (i, j) \in E, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in A_t} \sum_{m=1}^{M_i} (x_{im} r_{imk}) \leq R_k, 1 \leq t \leq s_n, 1 \leq k \leq K, \quad (5)$$

其中式(1)代表调度目标为项目总工期最短; 式(2)代表项目的开始时间为 0, 不存在开始任务延期的情况; 式(3)代表项目中每个任务只能在一种模式下实施, x_{im} 是决策变量, 只有 0 和 1 两种取值; 式(4)代表项目中任务之间的工艺(先后)约束, 前继任务的完成时间必须早于后继任务的开始时间; 式(5)代表资源约束, 任一时刻正在进行的任务集对某一资源的总需求量必须小于对应资源的总供给量.

2.2 CCM 在多模式项目调度中的改进和优化

CCM 引入了缓冲机制来应对项目的延期风险. CCM 在项目调度计划实施过程中寻找制约任务更早开始的最长链路作为关键链, 在其链尾加入项目缓冲(project buffer, PB); 寻找会对关键链产生潜在影响且由非

关键节点构成的最长链路作为非关键链,在其链尾加入汇入缓冲(feeding buffer, FB).通过 PB 和 FB 的调节机制,吸收调度计划实施过程中超过计划工期的剩余时间.假设某个项目包含五个任务,采用 CCM 修正的某一个调度计划的网络结构如图 1 所示.其中包含一条关键链和一条非关键链,任务 1、任务 2 在非关键链上,对应的汇入缓冲为 FB;任务 3、任务 4 和任务 5 在关键链上,对应的项目缓冲为 PB.显然, PB 和 FB 的加入可以为关键链和非关键链的延迟分别提供保护, FB 的加入也会对任务 5 的开始时间产生潜在影响.

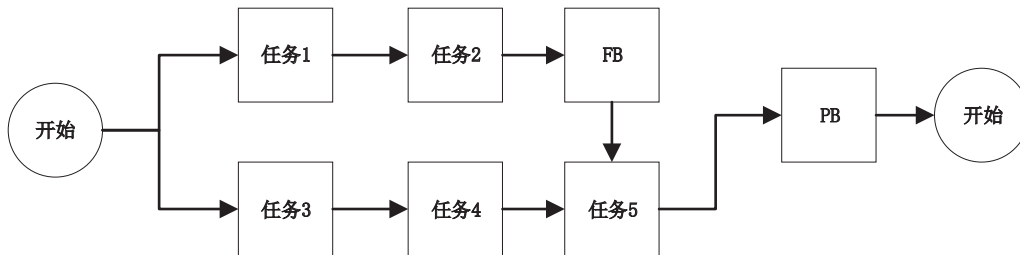


图 1 采用 CCM 的调度计划网络结构

Fig. 1 Scheduling plan network structure using CCM

前面分析指出应用 CCM 研究不确定环境下多模式项目调度问题时,需要根据问题特点解决非关键链的识别,以及缓冲修正问题.在此,本文将提出非关键链识别准则和缓冲修正策略.

1) 非关键链的识别

在项目调度计划的实施过程中,资源约束与工艺约束具有相同重要的地位,各个任务的最早开始时间取决于紧前的资源约束以及工艺约束任务中最早完成时间的最大值.为了便于描述,本文将调度计划实施过程中受工艺先后顺序约束的任务简称为工艺约束任务;将受资源总供给量约束的任务简称为资源约束任务^[17].进而,本文又将紧前任务扩充为资源紧前任务和工艺紧前任务的集合,将紧后任务扩充为资源紧后任务与工艺紧后任务的集合.参照现有研究中任务实施的最早和最晚时间的概念,紧前任务又可划分为最早紧前任务和最晚紧前任务,紧后任务又可划分为最早紧后任务和最晚紧后任务,详见定义 1~定义 4.

定义 1 在某一调度计划中,所有任务均以最晚时间开始,对项目中的某一任务 i 进行局部右移,所有因为资源冲突或者工艺冲突而阻碍任务 i 不能以更晚时间开始,且最晚开始时间等于任务 i 的最晚完成时间的任务称为该调度计划下任务 i 的最晚紧后任务.

定义 2 在某一调度计划中,所有任务均以最早时间开始,对项目中的某一任务 i 进行局部右移,假设任务 i 的结束时间最晚只能右移到时刻 t ,所有因为资源冲突或者工艺冲突阻碍任务 i 不能以更晚的时间开始,且最早开始时间等于 t 的任务称为该调度计划下任务 i 的最早紧后任务.

定义 3 在某一调度计划中,所有任务均以最晚时间开始,对项目中的某一任务 i 进行局部左移,假设任务 i 的开始时间最早只能左移到时刻 t ,所有因为资源冲突或者工艺冲突而阻碍任务 i 不能以更早时间开始,且最晚完成时间等于 t 的任务称为该调度计划下任务 i 的最晚紧前任务.

定义 4 在某一调度计划中,所有任务均以最早时间开始,对项目中的某一任务 i 进行局部左移,所有因为资源冲突或者工艺冲突阻碍任务 i 不能以更早的时间开始,且最早完成时间等于任务 i 最早开始时间的任务称为该调度计划下任务 i 的最早紧前任务.

识别非关键链之前,首先需要识别出对应调度计划中的关键链以及汇入节点,在此基础上才能识别出对关键链存在影响的非关键链.关键链是整个项目调度计划实施过程的瓶颈所在,链上任何一个任务的总时差为 0,故关键链上任何任务均不能有任何的延迟. Goldratt^[8]认为当调度计划中出现多条关键链时,任意选择其中一条作为关键链即可,本文也采用了这种方法.在确定了由总时差为 0 的任务组成的最长链路作为关键链之后,还需要寻找对关键链存在潜在影响的非关键任务作为汇入节点.当前 CCM 研究中汇入节点的判断大体分为两类:一类只考虑工艺约束,认为关键链上关键任务的工艺紧前非关键任务就是汇入节点;另

一类考虑比较全面, 认为影响关键链上关键任务执行的因素不仅有工艺上的先后顺序约束, 还有资源总供给量的约束, 因此汇入节点的位置应该由这两类因素共同决定, 本文对非关键链识别的研究基于后者展开. 其中, 寻找关键链上某一关键任务对应的汇入节点的方法为: 使项目中各个任务均以最晚时间开始, 如果某一任务是非关键任务, 且关键任务是该非关键任务的最晚紧后任务(见定义 1), 则该非关键任务为对应关键链任务的汇入节点, 汇入缓冲将插入在该汇入节点和对应关键任务之间. 对关键链上所有的关键任务寻找汇入节点, 作为对应非关键链的链尾任务, 非关键链后续的识别将在此基础上展开.

非关键链的识别准则 以某一非关键链的链尾任务为基础, 假设非关键链链首任务等于链尾任务(此时非关键链上只有一个任务), 逆向遍历调度计划任务序列里链首任务以前的任务, 如果某一节点属于非关键任务, 且当前链首任务是该任务的最晚紧后任务(见定义1), 则将该任务加入非关键链, 作为新的链首任务. 遍历结束时得到的链表即非关键链, 链尾任务和汇入缓冲的位置始终保持不变.

对关键链上每个汇入节点寻找其对应的非关键链, 就完成了整个非关键链的识别过程.

2) 缓冲区间的修正

缓冲区间的设置对项目调度计划的稳定实施至关重要. 在项目计划实施的过程中, 因为对任务自身特征以及计划网络环境中的风险属性因素难以全面的权衡, 还常常存在缓冲区间的大小难以应对延期风险的现状. 因此, 本文试图从任务的自身特征和计划网络环境中的风险属性因素出发, 综合利用任务的实施工期和资源消耗、任务的外部网络约束环境、以及任务在网络中的相对位置等影响因素, 结合任务的多模式特点设计相应的修正系数实现对缓冲区间的大小的调整, 以期能有效缓解项目调度过程中的延期风险.

$$B = \sqrt{\sum_{i \in C_i} \left(\sum_{m=1}^{M_i} (x_{im} \sigma_{im} k_{i1} k_{i2} k_{i3}) \right)^2}, \quad (6)$$

其中 B 代表 PB 或者 FB; i 代表项目调度计划中关键链或者非关键链(C_i) 上的一个任务序号; x_{im} 代表决策变量, 即任务 i 只能在一种模式下进行; σ_i 代表任务 i 在 m 模式下的安全时间, 本文采用任务总工期的 50% 作为任务的安全时间; k_{i1} 代表任务 i 的自身实施情况系数; k_{i2} 代表任务 i 所处的网络约束环境系数; k_{i3} 代表任务 i 在网络中的相对位置系数. 三个用于调整缓冲区间的修正因子定义如下:

定义 5 任务自身实施情况的系数为

$$k_{i1} = 1 + \sum_{m=1}^{M_i} \left(x_{im} \frac{d_{im}}{s_n} \max \left(\frac{r_{im1}}{R_1}, \frac{r_{im2}}{R_2} \right) \right), \quad (7)$$

其中假设项目调度计划中最多只涉及两种可再生资源 R_1 和 R_2 , 项目总工期为 s_n . d_{im}/s_n 代表项目中任务 i 在 m 模式下的工期占项目总工期的比例, 以此来衡量任务实施过程任务工期对缓冲区间的影响; $\max(r_{im1}/R_1, r_{im2}/R_2)$ 代表任务所消耗的资源和对资源总供给量占比的最大值, 以此来衡量任务实施过程资源消耗对缓冲区间的影响.

项目中任务的具体实施情况与任务工期的长短以及资源的消耗情况有关, 因为这些因素均会影响 CCM 在项目进度管理中链路的识别和缓冲的设置. 当任务的工期越长时, 具体实施过程发生偏差的可能就越大, 越需要适度的增大缓冲区间来抵抗风险; 任务对资源的需求量越大, 具体实施过程发生资源冲突的可能就越大, 越需要适度增大缓冲区间来抵抗风险.

定义 6 根据本文上一小节对紧前任务和紧后任务概念的扩充, 网络约束环境系数为

$$k_{i2} = 1 + (n_{\text{prei}} + n_{\text{prei}})(n_{\text{suci}} + n_{\text{suci}})/n^2, \quad (8)$$

其中 n_{prei} 代表工艺紧前任务的个数; n_{prei} 代表资源紧前任务的个数; n_{suci} 代表工艺紧后任务的个数; n_{suci} 代表资源紧后任务的个数; n 代表整个项目中任务节点的总数. $(n_{\text{prei}} + n_{\text{prei}})/n$ 代表该任务的紧前任务占项目任务总数的比例, 以此来衡量紧前任务对缓冲区间的影响; $(n_{\text{suci}} + n_{\text{suci}})/n$ 代表该任务的紧后任务占

项目任务总数的比例,以此来衡量紧后任务对缓冲区间的影响.

项目调度过程中任务的实施极易受到其紧前和紧后任务的影响,一般来说,项目的网络结构越复杂,紧前任务和紧后任务越多,发生延期的风险就越大,越应该适度增大缓冲来抵抗这种不确定性因素.

定义7 针对以上问题对缓冲区间进行修正,结合任务的多模式特点的网络相对位置系数为

$$k_{i3} = 1 + \frac{s_i}{s_n} \text{average} \left(\sum_{m=1}^{M_i} \left(x_{im} \frac{d_{im} - d_{\text{pri}}}{\max(d_{\text{pri}}, d_{im})} \right) \right), \quad (9)$$

其中 s_i/s_n 代表任务 i 的开始时间占项目总工期的比例,以此来衡量实施任务在网络中相对位置对缓冲区间的影响. d_{im} 代表任务 i 在 m 模式下的工期, d_{pri} 代表任务 i 的紧前任务(资源紧前任务和工艺紧前任务)的工期, $(d_{im} - d_{\text{pri}})/\max(d_{\text{pri}}, d_{im})$ 代表实施任务 i 在 m 模式下工期和某一紧前任务工期的差值与两者较大值的比例,并以其平均值来衡量任务 i 的紧前任务工期对缓冲区间的影响.

项目实施过程中越靠前的任务越容易把控,越靠后的任务不确定性就越大,越容易被拖延.此外,项目调度计划中紧前任务工期也会对任务的工期产生直接影响:如果紧前任务的工期大多数比较长,且长于该任务自身的工期,那么在此影响下管理者在评估任务工期时也容易比实际情况长一些;如果紧前任务的工期大多数比较短,且短于该任务自身的工期,那么管理者在评估任务工期时也容易比实际情况短一些.计划工期和实际工期的偏离也会为项目的顺利实施带来不确定性影响.

2.3 基于CCM的多模式资源受限项目调度鲁棒性模型构建

1) 鲁棒性指标设计

CCM本身是一种鲁棒性的调度方法,通过在关键链尾添加项目缓冲,以及非关键链尾添加汇入缓冲的形式可以在一定程度上缓解延期风险的发生,提高项目实施的稳定性.显然,项目缓冲和汇入缓冲的大小对调度计划的鲁棒性具有直接影响.此外,如果调度计划实施过程中资源的消耗波动较大,不仅会在资源高峰时刻引发资源需求冲突的加剧,还会在资源低峰时刻导致资源库存紧张等问题.针对以上问题并结合MRCPSP中任务的模式特点,本文构建的衡量关键链调度稳定性的鲁棒性指标如式(10)所示.

$$\text{RM} = \lambda_1 \frac{\text{PB}}{s_n} + \frac{\lambda_2}{L} \sum_{l=1}^L \frac{\text{FB}_l}{\text{dur}_l} + \frac{\lambda_3}{K} \sum_{k=1}^K \left(\sum_{t=1}^{s_n} \sum_{i \in A_t} \sum_{m=1}^{M_i} \left(x_{im} \frac{r_{imk}}{R_k s_n} \right) \right), \quad (10)$$

其中从式(10)可以看出,鲁棒性指标由三部分对鲁棒性的贡献构成:项目缓冲对鲁棒性的贡献、汇入缓冲对鲁棒性的贡献、以及资源消耗情况对鲁棒性的贡献.具体来说, s_n 代表不包括项目缓冲的总工期, λ_1 , λ_2 和 λ_3 为调节各部分鲁棒性大小的参数,防止某一部分过大或过小. PB 代表项目缓冲, PB/s_n 表示项目缓冲为项目工期每一天平均分配的缓冲大小.显然 PB/s_n 越大,项目延期的不确定性风险就越容易被吸收,项目的鲁棒性就越好. FB_l 代表第 l 条非关键链对应的汇入缓冲, FB_l/dur_l 表示第 l 条非关键链上汇入缓冲为非关键链总工期 dur_l 每一天分配的缓冲大小,然后再求 L 条非关键链对应的 FB_l/dur_l 的均值,构成了非关键链对调度计划鲁棒性的贡献.显然非关键链上任务工期的每一天平均分到的缓冲越长越有利于不确定风险的吸收.第三个部分体现了对资源消耗的稳定性考量,首先采用 $\sum_{t=1}^{s_n} \sum_{i \in A_t} \sum_{m=1}^{M_i} \left(x_{im} \frac{r_{imk}}{R_k s_n} \right)$ 计算了第 k 种资源的消耗总量与总供应量的比例,然后再对 K 种资源求均值.该值越大,说明资源得到充分利用的可能性越大,波动就越小,调度计划越容易稳定进行.最后,通过合理设置参数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的值就可以得到衡量调度计划稳定性的鲁棒性指标.

2) 问题模型构建

本文在MRCPSP模型的基础上,结合改进CCM在项目进度管理中任务工期和缓冲设置的特点,并采用第1)部分设计的鲁棒性指标作为问题的调度目标,构建了基于鲁棒性目标的关键链多模式资源受限项目调度问题(critical chain multi-mode resource-constrained project scheduling problem based on the robust objective,

CCMRCPSP-R) 的数学模型, 如下所示:

$$\text{Max RM}, \quad (11)$$

s.t.

$$s_1 = 0, \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} x_{im} = 1, i \in v, x_{im} \in \{0, 1\}, \quad (13)$$

$$s_i + \sum_{m=1}^{M_i} x_{im} d_{im} \leq s_j, i \in \text{pre}_j \cup \text{prer}_j, \quad (14)$$

$$\sum_{i \in A_t} \sum_{m=1}^{M_i} (x_{im} r_{imk}) \leq R_k, 1 \leq t \leq s_n, 1 \leq k \leq K, \quad (15)$$

$$\text{PB} = \sqrt{\sum_{l \in \text{CC}} \left(\sum_{m=1}^{M_l} (x_{lm} \sigma_{lm} k_{l1} k_{l2} k_{l3}) \right)^2}, \sigma_{lm} = t_{lm} - d_{lm}, \quad (16)$$

$$\text{FB}_{ij} = \sqrt{\sum_{l \in \text{NC}_{ij}} \left(\sum_{m=1}^{M_l} (x_{lm} \sigma_{lm} k_{l1} k_{l2} k_{l3}) \right)^2}, \sigma_{lm} = t_{lm} - d_{lm}, \quad (17)$$

$$i \in \text{NC}_{ij}, j \in \text{CC}, i \in \text{pre}_j \cup \text{prer}_j,$$

$$s_i + \sum_{m=1}^{M_i} x_{im} d_{im} + \text{FB}_{ij} \leq s_j, i \in \text{NC}_{ij}, j \in \text{CC}, i \in \text{pre}_j \cup \text{prer}_j, \quad (18)$$

其中式(11)表示以鲁棒性指标的最大值作为项目的调度目标; 式(12)表示项目的开始时间为 0; 式(13)表示每个任务只能在一种模式下实施; 式(14)表示任务的先后约束, i 属于 j 的紧前任务集, j 的紧前任务集包括工艺紧前任务集 pre_j 和资源紧前任务集 prer_j ; 式(15)表示任务的资源约束; 式(16)表示项目缓冲 PB 的求解策略, CC 表示关键链, l 表示关键链上的某一任务, σ_{lm} 表示任务 l 在模式 m 下的安全时间, t_{lm} 表示任务 l 在模式 m 下包含安全时间的任务总工期, d_{lm} 表示任务 l 在模式 m 下不包含安全时间的最可能任务工期; 式(17)表示汇入缓冲 FB_{ij} 的求解策略, NC_{ij} 代表对应的非关键链, i 是非关键链 NC_{ij} 的链尾任务, j 是关键链 CC 上的任务, i 是 j 的紧前任务; 式(18)表示加入汇入缓冲后汇入节点与对应关键活动的先后关系不变, 约束条件与式(17)相同.

3 数据分析与验证

3.1 算例的产生以及参数的设置

MRCPSP 属于 NP-hard 难题^[26,27], CCMRCPSP-R 在 MRCPSP 原有约束特征的基础上, 考虑了工期的不确定性, 关键链、非关键链以及缓冲的位置对调度计划的影响, 并结合了新设计的鲁棒性指标, 因此其求解难度更高, 也应属于 NP-hard 难题, 需要凭借优化算法求得有效解. 遗传算法具有通用性较强, 计算性能优良, 隐含并行性好, 全局搜索能力佳等诸多特点, 是一种高效的优化算法, 被广泛应用于调度问题的求解之中^[18,28-30], 因此本文采用 C++ 实现的遗传算法对问题模型进行求解. 实验过程分别通过对 CCM 的改进策略和鲁棒性指标的验证来实现对 CCMRCPSP-R 模型的有效性验证. 试验过程包含两步: 首先, 采用本文设计的缓冲修正方法, 将 C&PM 和 RSEM 对应的算例调度结果做对比, 求解并分析其调度计划的鲁棒性的大小; 其次, 针对不同缓冲修正方法得到的鲁棒性调度计划, 采用蒙特卡洛仿真方法模拟任务的实施过程, 计算对应的缓冲消耗率、缓冲溢出率、项目按时完工率以及资源使用情况, 综合分析调度计划的稳定性和可靠

性, 进一步验证鲁棒性指标的有效性. MRCPSP 测试算例由项目问题生成器 ProGen 产生, 该生成器来自于项目调度问题算例库(project scheduling problem library, <http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/generate.html>), 对其进行参数设置并产生了 10 组测试算例(CASE 1-CASE 10). 实验过程及 ProGen 设置中涉及的主要参数如表 1 所示. 其中, 假设 ProGen 产生的算例中任务工期为包含安全时间的任务总工期, 任务的最可能工期为任务总工期的一半.

表 1 实验参数设置
Table 1 Experimental parameter settings

参数	取值	参数	取值	参数	取值
粒子数	10	p_m	0.10	可更新资源的种类数	2
最大迭代次数	50	p_s	0.80	网络复杂度	1.5
精英个数	5	p_c	0.95	任务最大工期	10
每个算例测试次数	10	$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	1	资源最大供应量	10
项目非虚任务数	10	任务最大执行模式数	2	截止日期扩大倍数	1.3

3.2 改进 CCM 的有效性验证

为了验证改进 CCM 的有效性, 基于前文构建的 CCMRCPSP-R 模型对 10 组测试算例(CASE 1-CASE 10) 进行求解, 并在保证其他参数不变的前提下, 对缓冲区间设置分别采用剪切粘贴法(C&PM)、根方差法(RSEM) 进行求解, 对比分析三种缓冲设置方法对应的鲁棒性调度目标的最优解. 由于项目总工期是项目调度问题中最常用到的调度目标, 很多优化和分析都基于此目标之上, 因此除了项目的鲁棒性调度目标外, 本文在对比结果中还计算了最优调度解的项目总工期. 实验过程中每个测试算例计算 10 次, 记录 10 次最优调度解的鲁棒性平均值, 鲁棒性最大值, 以及项目总工期的平均值, 如表 2 所示.

表 2 不同缓冲设置方法最优调度的结果对比
Table 2 Comparison of optimal scheduling results with different buffer settings

算例	C&PM			RSEM			本文方法		
	avg(R)	best(R)	avg(C)	avg(R)	best(R)	avg(C)	avg(R)	best(R)	avg(C)
CASE 1	1.85	2.05	23.00	2.27	2.99	21.96	3.37	4.20	23.79
CASE 2	2.14	2.14	22.00	3.02	3.02	20.42	5.09	5.10	21.43
CASE 3	1.84	2.24	17.80	2.66	3.22	16.16	4.18	4.50	18.37
CASE 4	1.90	2.06	13.00	2.49	2.56	13.13	3.56	3.66	13.21
CASE 5	1.95	1.98	22.90	2.49	2.78	22.44	3.80	4.90	24.42
CASE 6	1.84	1.90	23.20	2.40	2.80	21.84	3.46	3.91	26.09
CASE 7	2.06	2.09	14.90	2.65	3.12	15.00	4.94	5.37	17.98
CASE 8	2.25	2.49	15.70	3.18	3.39	15.58	4.40	5.24	16.17
CASE 9	1.92	2.14	19.00	2.40	2.76	18.58	3.28	4.32	20.05
CASE 10	2.07	2.10	15.00	2.62	2.81	16.45	3.80	5.33	16.05

注: avg(R)代表 10 次求解鲁棒性的平均值, best(R) 代表 10 次求解鲁棒性的最大值, avg(C)代表 10 次求解项目总工期的平均值, 加粗的数据为最优值.

由表 2 可看出, 本文(缓冲修正)方法求得调度计划的鲁棒性平均值和最优值都全面优于 C&PM 和 RSEM 对应的求解结果. 在项目总工期平均值方面, 本文方法求得的平均项目总工期劣于 C&PM 和 RSEM 对应的求解结果, 而 RSEM 得到的平均项目总工期绝大部分最优. 这是因为 C&PM 采用线性相加的缓冲处理方法, 导致缓冲区间受任务安全时间的影响过于强烈. 本文方法在设置缓冲时充分考虑了每个任务实施过程的具体情况, 根据任务实施时的不确定性因素修正了任务的安全时间和缓冲大小, 所以求得的平均项目总工期会略大于对比方法的求解结果.

3.3 鲁棒性指标的有效性检验

调度计划的稳定性体现在很多方面,例如:缓冲的设置是否合理,缓冲的消耗是否超出,项目是否可以按时交付,资源是否可以持续稳定使用等等.因此,本文将从这几个方面逐一展开,检验本文设计的鲁棒性指标的有效性.由3.2节10组算例测试结果可以看出,本文方法以牺牲部分项目总工期为代价,提高了调度计划的鲁棒性.为了进一步验证不同的缓冲设置方法得到的鲁棒性调度计划的稳定性差异,并且尽量减少项目总工期对鲁棒性的影响,本文以其中平均工期差异最小的CASE 4为例,验证不同鲁棒性调度计划下项目实施过程的稳定性.

计算三种缓冲设置方法对应的最优鲁棒性调度解中缓冲区间平均值,如表3所示.由表3可以看出,在项目总工期均值差距较小的情况下,本文方法求得的鲁棒性指标的均值和最优值都最大,同时求得的平均缓冲区间也大于其他两组对比结果,这是由于改进CCM对任务安全时间以及缓冲区间的修正导致的.显然,缓冲区间越大,对应的调度计划应对延期风险的能力应该更强一些.为了进一步验证鲁棒性最优调度解在项目实施过程的稳定性差异,本文对不同缓冲设置方法对应的鲁棒性最优调度计划进行了1000次的蒙特卡洛仿真,模拟其实施过程工期的大小,记录了对应的项目按时完工率(COTRt),平均缓冲消耗率(BCsRt),平均缓冲溢出率(BOvRt),如表4所示.其中,假设项目的任务工期服从对数正太分布,均值 μ 为任务的最可能工期,对应正太分布的标准差 σ 有0.3, 0.4, 0.5, 0.6和0.7五个不同的取值.根据对数正太分布标准差的转化公式,将正太分布的标准差转化为与均值相关的对数正太分布标准差,用来反应项目调度过程中不同层次的不确定风险对任务工期的影响.

表3 CASE 4 鲁棒性最优调度计划缓冲区间均值对比
Table 3 Comparison of average buffer intervals for optimal robust schedule

缓冲方法	avg(R)	best(R)	avg(C)	avg(B)
C&PM	1.90	2.06	13.00	4.50
RSEM	2.49	2.56	13.13	3.85
本文方法	3.56	3.66	13.21	5.17

注: avg(B)代表某种方法得到的鲁棒性最优调度解缓冲区间的平均值,加粗的数据为最优值.

表4 鲁棒性最优调度计划蒙特卡洛仿真结果对比
Table 4 Comparison of Monte Carlo simulation results for optimal robust schedule

σ	C&PM			RSEM			本文方法		
	COTRt(%)	BOvRt(%)	BCsRt(%)	COTRt(%)	BOvRt(%)	BCsRt(%)	COTRt(%)	BOvRt(%)	BCsRt(%)
0.3	19.40	40.30	57.98	38.00	41.2	60.44	96.10	19.55	43.80
0.4	15.80	40.68	88.33	25.80	63.26	111.31	91.60	23.45	49.40
0.5	16.80	37.35	59.06	21.40	56.00	104.82	84.20	26.90	53.05
0.6	12.00	56.28	102.71	30.00	43.33	111.99	81.30	29.03	55.65
0.7	7.10	75.53	112.60	18.70	73.70	112.01	77.70	38.25	58.87

注: COTRt代表多次模拟的项目按时完工率, BOvRt代表多次模拟的平均缓冲溢出率, BCsRt代表多次模拟的平均缓冲消耗率,加粗的数据为最优值.

由表4可以看出,本文方法得到的鲁棒性最优调度计划,蒙特卡洛仿真对应的项目按时完工率最大,平均缓冲溢出率最低,平均缓冲消耗率最低.较低的项目完功率不利于项目的按时交付,较高的缓冲溢出率和缓冲消耗率会使得项目实施过程中调度计划被不断调整.显然,本文方法得到的鲁棒性最优调度计划,在项目实施过程中更有利于调度计划本身的稳定进行.此外,为了对比不同缓冲设置方法对应的鲁棒性最优调度计划的资源消耗情况,本文又绘制了资源 R_1 和资源 R_2 的消耗曲线,详见图2和图3.

由图2可以看出,本文方法得到的调度计划在使用资源 R_1 的过程中,曲线较为平缓,没有C&PM和RSEM对应的调度计划使用资源 R_1 过程中的资源尖峰(第6天),而且释放资源 R_1 的时间较早.由图3

可以看出,虽然本文方法和其他两种方法的调度计划在使用资源 R_2 的过程中都有两个资源高峰,一个资源低谷,但是显然本文方法对应的调度计划资源消耗曲线更加平缓,资源高峰不高于其他两种方法的资源高峰,资源低谷不低于其他两种方法的资源低谷,而且释放资源 R_2 的时间较早.因此,本文方法得到的鲁棒性最优调度计划可以更加平稳的使用资源.

综上所述,结合改进 CCM 特点以及本文设计的鲁棒性指标构建的 CCMRCPSP-R 模型求得的调度计划,不仅有利于调度实施过程的稳定推进,还可以兼顾资源的平稳消耗.因此,本文设计的鲁棒性优化模型可以有效地提升多模式资源受限项目调度计划的鲁棒性.

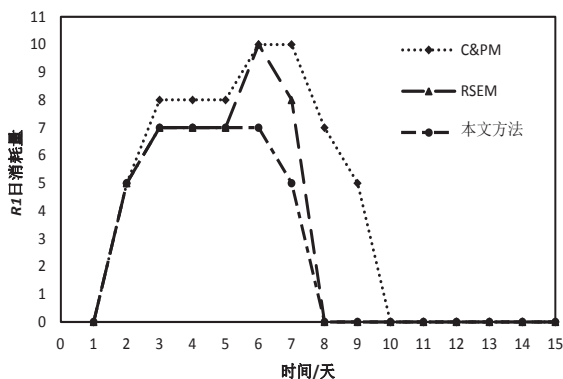


图2 CASE 4 鲁棒性最优调度计划资源 R_1 消耗曲线

Fig. 2 Resource R_1 consumption curve of optimal robust schedule

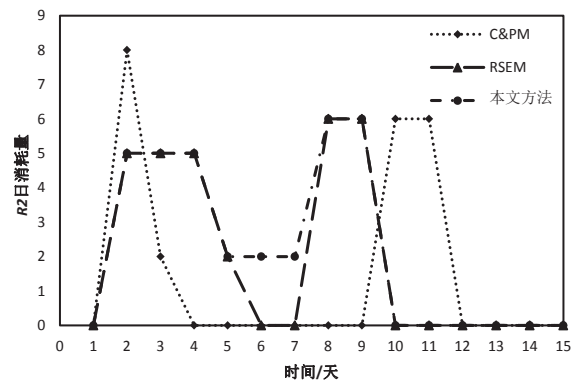


图3 CASE 4 鲁棒性最优调度计划资源 R_2 消耗曲线

Fig. 3 Resource R_2 consumption curve of optimal robust schedule

4 结束语

基于项目实施过程不确定因素对调度计划的影响对 CCM 进行了改进,设计了衡量调度计划稳定性的鲁棒性指标,并构建了 CCMRCPSP-R 模型.采用 10 组算例,验证了模型的有效性.结果显示,本文改进的 CCM 以牺牲部分项目总工期为代价提高了调度计划的鲁棒性,本文设计的鲁棒性指标可以兼顾调度计划实施过程和结果的稳定性.相较于对比模型得到调度计划,本文模型得到的调度计划具有较低的缓冲消耗率和缓冲溢出率、较高的项目按时完工率、以及更加平稳的资源使用情况.本文在验证问题模型有效性的过程中采用了大量的理论算例,然而项目进度管理实践中的情况多种多样,理论上的算例往往和实践中的算例存在一定距离.因此,本文的下一步工作将围绕实践中的算例展开,进一步验证问题模型的有效性.

参考文献:

- [1] 张静文, 乔传卓, 刘耕涛. 基于鲁棒性的关键链二次资源冲突消除策略. 管理科学学报. 2017, 20(3): 105–118.
Zhang J W, Qiao C Z, Liu G T. Strategy to eliminate the second resource conflicts in critical chain method. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(3): 105–118. (in Chinese)
- [2] Zhang J, Elmaghraby S E. The relevance of the “alphorn of uncertainty” to the financial management of projects under uncertainty. European Journal of Operational Research, 2014, 238(1): 65–76.
- [3] Herroelen W, Leus R. Robust and reactive project scheduling: A review and classification of procedures. International Journal of Production Research, 2004, 42(8): 1599–1620.
- [4] Vonder S V D, Demeulemeester E, Herroelen W. Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: An experimental analysis. European Journal of Operational Research, 2008, 189(3): 723–733.
- [5] Hazı Ö, Haouari M, Erel E. Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost trade-off problem. European Journal of Operational Research, 2010, 207(2): 633–643.

- [6] 张静文, 刘耕涛. 基于鲁棒性目标的关键链项目调度优化. 系统工程学报, 2015, 30(1): 136–144.
Zhang J W, Liu G T. Critical chain project scheduling problem with the robust objective. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(1): 136–144. (in Chinese)
- [7] 田文迪, 胡慕海, 崔南方. 不确定性环境下鲁棒性项目调度研究综述. 系统工程学报, 2014, 29(1): 135–144.
Tian W D, Hu M H, Cui N F. Review of studies on robust project scheduling under uncertainty. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(1): 135–144. (in Chinese)
- [8] Goldratt E M. Critical Chain. Great Barrington, Massachusetts: North River Press, 1997.
- [9] Herroelen W, Leus R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. European Journal of Operational Research, 2005, 165(2): 289–306.
- [10] Leach L P. Critical chain project management improves project performance. Project Management Journal, 1999, 30(2): 39–51.
- [11] Peng W, Huang M. A critical chain project scheduling method based on a differential evolution algorithm. International Journal of Production Research, 2014, 52(13): 3940–3949.
- [12] Tukul O I, Rom W O, Eksioglu S D. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling. European Journal of Operational Research, 2006, 172(2): 401–416.
- [13] Newbold R C. Project Management in the Fast Lane: Applying the Theory of Constraints. Boca Raton, Florida: St. Lucie Press, 1998.
- [14] 徐小峰, 郝 俊, 邓忆瑞. 考虑多因素扰动的项目关键链缓冲区间设置及控制模型. 系统工程理论与实践, 2017, 37(6): 1593–1601.
Xu X F, Hao J, Deng Y R. Project critical chain buffer setting and control model considered multiple factors disturbance. Systems Engineering: Theory & Practice, 2017, 37(6): 1593–1601. (in Chinese)
- [15] Zhang J, Song X, Chen H, et al. Determination of critical chain project buffer based on information flow interactions. Journal of the Operational Research Society, 2016, 67(9): 1146–1157.
- [16] Zhang J, Song X, Diaz E. Project buffer sizing of a critical chain based on comprehensive resource tightness. European Journal of Operational Research, 2016, 248(1): 174–182.
- [17] 莫巨华. 基于关键链的项目调度模型与算法. 沈阳: 东北大学, 2005.
Mo J H. Critical Chain Based Models and Algorithms for Project Scheduling. Shenyang: Northeastern University, 2005. (in Chinese)
- [18] 彭武良, 王成恩. 关键链项目调度模型及遗传算法求解. 系统工程学报, 2010, 25(1): 125–133.
Peng W L, Wang C E. Critical chain method project scheduling based model and its GA solution. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(1): 125–133. (in Chinese)
- [19] Herroelen W, Leus R. The construction of stable project baseline schedules. European Journal of Operational Research, 2004, 156(3): 550–565.
- [20] Herroelen W, Leus R. On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. Journal of Operations Management, 2001, 19(5): 559–577.
- [21] 崔南方, 赵 雁, 田文迪. 基于智能算法的双目标鲁棒性项目调度. 系统管理学报, 2015, 24(3): 379–388.
Cui N F, Zhao Y, Tian W D. Bi-objective robust project scheduling based on intelligent algorithms. Journal of Systems & Management, 2015, 24(3): 379–388. (in Chinese)
- [22] Mahallan M K K, Ashjari B, Yousefi F, et al. A robust solution to resource-constraint project scheduling problem. International Journal of Fuzzy Logic & Intelligent Systems, 2017, 17(3): 221–227.
- [23] Ghoddousi P, Ansari R, Makui A. An improved robust buffer allocation method for the project scheduling problem. Engineering Optimization, 2016, 49(4): 718–731.
- [24] Zheng W B, He Y K. Resource constrained project scheduling optimization with robust objective under stochastic duration of activities // Proceedings of the 23rd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Atlantis Press, Paris, 2017: 239–243.
- [25] 丁雪枫, 尤建新. 多模式资源受限项目调度问题的混合优化算法研究. 中国管理科学, 2012, 20(1): 154–159.
Ding X F, You J X. Studies on a hybrid optimal algorithm for multi-mode resource-constrained project scheduling problem. Chinese Journal of Management Science. 2012, 20(1): 154–159.
- [26] Roghanian E, Alipour M, Rezaei M. An improved fuzzy critical chain approach in order to face uncertainty in project scheduling. International Journal of Construction Management, 2018, 18(1): 1–13.

- [27] 何正文, 刘人境, 徐 渝. 基于现金流均衡目标的多模式项目调度问题研究. 管理工程学报, 2011, 25(2): 124–130.
Heng Z W, Liu R J, Xu Y. Multi-mode project scheduling problems with cash flow balanced objectives. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2011, 25(2): 124–130. (in Chinese)
- [28] Kadri R L, Boctor F F. An efficient genetic algorithm to solve the resource-constrained project scheduling problem with transfer times: The single mode case. European Journal of Operational Research, 2018, 265(2): 454–462.
- [29] 王伟鑫, 葛显龙, 王 旭, 等. 基于关键链的非抢占式多项目调度多属性优化. 系统工程学报, 2016, 31(5): 689–699.
Wang W X, Ge X L, Wang Xu, et al. Multi-attribute optimization for non-preemptive multi-project scheduling based on critical chain. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(5): 689–699. (in Chinese)
- [30] 王 宏, 林 丹, 李敏强. 求解模糊资源受限项目调度问题的遗传算法. 系统工程学报, 2006, 21(3): 323–327.
Wang H, Lin D, Li M Q. Application of genetic algorithm in solving fuzzy resource-constrained project scheduling problem. Journal of Systems Engineering, 2006, 21(3): 323–327. (in Chinese)

作者简介:

田 旻(1986—), 女, 陕西西安人, 博士生, 研究方向: 项目进度管理, 算法优化, E-mail: tianmin86@stu.xjtu.edu.cn;

张光军(1968—), 男, 重庆人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 项目群管理, 工程管理, Email: zhangguangjun800@126.com;

刘人境(1966—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 知识管理, 战略管理, 多项目管理, Email: renjingl@mail.xjtu.edu.cn.

(上接第 276 页)

- [23] Raghavan N R S, Mishra V K. Short-term financing in a cash-constrained supply chain. International Journal of Production Economics, 2011, 134(2): 407–412.
- [24] 程永文, 周永务. 存在金融对冲的两级供应链优化决策. 系统工程学报, 2014, 29(3): 371–383.
Cheng Y W, Zhou Y W. Two-echelon supply chain coordination with financial hedging instruments. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(3): 371–383. (in Chinese)
- [25] 占济舟, 周献中, 公彦德. 生产资金约束供应链的最优融资和生产决策. 系统工程学报, 2015, 30(2): 190–200.
Zhan J Z, Zhou X Z, Gong Y D. Optimal financing and production decisions in production capital constrained supply chain. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(2): 190–200. (in Chinese)
- [26] Zhang Y. Solving large-scale linear programs by interior-point methods under the MATLAB Environment. Optimization Methods and Software, 1998, 10(1): 1–31.

作者简介:

陈 震(1989—), 男, 河南新乡人, 博士生, 研究方向: 生产管理, 供应链金融. Email: chen_zhen@buaa.edu.cn;

张人千(1974—), 男, 陕西商洛人, 博士, 教授, 研究方向: 库存与供应链管理, 生产运作管理, 运筹与优化算法. Email: zhangrenqian@buaa.edu.cn.