

鲁棒性项目调度中缓冲设置方法

崔南方, 赵 雁, 胡雪君

(华中科技大学 管理学院, 武汉 430074)

摘要: 研究应对不确定因素的鲁棒性项目调度, 针对其所用时间缓冲区技术中的两种重要方法——集中缓冲和STC (starting time criticality) 分散缓冲, 采用仿真模拟实验, 以项目管理库中的帕特森例1为对象, 进行详细的比较研究. 研究表明, 分散缓冲法具有更好的解鲁棒性; 当活动时间的不确定性程度较大时, 集中缓冲法的质量鲁棒性较好; 当项目工期较紧时, 分散缓冲法具有更好的鲁棒性. 这些研究结论为管理者在特定的项目环境下选择合适的缓冲方法提供了决策依据.

关键词: 鲁棒性项目调度; 集中缓冲; 分散缓冲; 质量鲁棒性; 解鲁棒性

中图分类号: F224

文献标志码: A

Buffer management in robust project scheduling

CUI Nan-fang, ZHAO Yan, HU Xue-jun

(School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. Correspondent: ZHAO Yan, E-mail: zydx@163.com)

Abstract: The robust project scheduling dealing with project uncertainties is studied. A simulation experiment with the project of Patterson 1 in project scheduling problem library(PSPLIB) is set up to compare two important methods of time buffering technology in robust project scheduling: Critical Chain centralized buffer and starting time criticality(STC) scattered buffer. The experiment results show that, the scattered buffer method always acts well in solution robustness. The larger the uncertainty of activity time is, the better the centralized buffer method in quality robustness will be. When the project deadline is very tight, the scattered buffer method is preferred in both kinds of robustness. These research conclusions provide decision supports for managers to choose the appropriate buffer method in the specific environment.

Key words: robust project scheduling; centralized buffer; scattered buffer; quality robustness; solution robustness

0 引言

项目调度问题广泛存在于企业的生产实践中, 吸引了国内外众多学者的关注与研究, 已有大量的研究成果^[1]. 大部分研究是以确定的任务时间和资源为前提, 以尽可能短的项目工期为目标, 旨在构造一个项目基准调度计划(BS). 然而这种调度计划并不能保证项目在执行过程中的稳定性, 因为在项目实际执行过程中存在着各种各样的不确定因素, 例如活动时间估计的不准确、资源可用量的减少、原料延期到达、交货期改变、工程范围更改和气候发生变化等情况^[2-3]. 如果执行项目基准计划受到这些因素的扰动, 则会导致项目延迟, 增加项目成本, 导致资源闲置, 产生更高的在制品库存, 以及频繁重新调度而增加系统紧张度^[4]. 尤其对于现代的项目, 其创新性强、规模大、不

确定性因素更多, 这更增加了基准调度计划如期执行的难度. 近年来, 为应对项目复杂环境中出现的各种不确定性因素而形成的鲁棒性项目调度问题已成为项目调度领域的研究热点.

鲁棒性项目调度是指在考虑不确定性因素的基础上, 制定抗干扰能力强的项目调度计划^[5]. 通常用解鲁棒性和质量鲁棒性来衡量项目调度计划的鲁棒性^[6-7]. 解鲁棒性是指项目按计划执行的稳定性, 即基准项目调度计划与项目实际调度计划之间的差别大小, 又称计划鲁棒性; 而质量鲁棒性是指项目按时完工的稳定性, 通常用项目完工日期的稳定性来度量, 又称完工鲁棒性. 时间缓冲区技术是解决鲁棒性项目调度问题的主要方法, 它强调在项目活动中或项目链中插入缓冲, 生成稳健的预应式基准调度计划, 以应

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2013-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71271097); 国家自然科学基金青年科学基金项目(71201119).

作者简介: 崔南方(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事项目调度、供应链管理等研究; 赵雁(1984—), 女, 博士生, 从事鲁棒性项目调度的研究.

对项目执行过程中发生的突发情况. 最具代表性的方法是关键链缓冲管理法 (CC/BM)^[8]和分散缓冲管理法^[9-12].

CC/BM是一种集中缓冲管理方法,其主要思想是用关键链代替传统的关健路径,并在项目结尾处插入项目缓冲,在关键链与非关键链交汇处插入接驳缓冲,以保证项目按时完工.因其具有较好的完工保障性,所以该方法多用于解决质量鲁棒性问题.在执行关键链计划时,按照“接力赛”策略进行,各活动并不严格按原计划开始时间开工,只要紧前活动完工,后续活动便马上开工,因此其解鲁棒性较差.而分散缓冲法是将缓冲分散插入活动之间,并在执行时按“时刻表”策略进行,各活动不得早于计划的开始时间开工,从而保证了项目各活动按计划进行,因而其解鲁棒性较好. Van de Vonder 等^[12]对多种分散缓冲法(包括 STC (starting time criticality)、VADE (virtual activity duration extension)、RFDF (resource flow dependent float factor) 和禁忌搜索方法)进行对比研究发现,STC 是较好的分散缓冲法. Van de Vonder 等^[11]曾将 CC/BM 与 RFDF 分散缓冲法进行对比,实验结论证实 CC/BM 具有较好的质量鲁棒性,而分散缓冲法具有较好的解鲁棒性.但 VADE、STC 和禁忌搜索等更好的分散缓冲方法被提出后,没有进行后续的实验以及与集中缓冲的比较,并且对于同一项目调度问题,应在什么情况下采用集中缓冲区,又在何种情况下采用分散缓冲区,未见到深入研究.

本文在介绍 CC/BM 和 STC 分散缓冲方法的基础上,选用项目管理库 (PSPLIB) 中的特定项目,分别运用这两种缓冲方法,制定鲁棒性项目调度基准计划,并模拟项目的执行来研究对于同一鲁棒性的项目调度问题,应在什么情况下采用集中缓冲,在何种情况下采用分散缓冲.

1 基于集中与分散缓冲的鲁棒性调度计划

选用项目管理库中的帕特森例 1,分别利用集中缓冲法和分散缓冲法制定鲁棒性调度计划.该项目有 12 个活动,3 种资源,每种资源可用量分别为 2, 1, 2, 项目网络如图 1 所示.

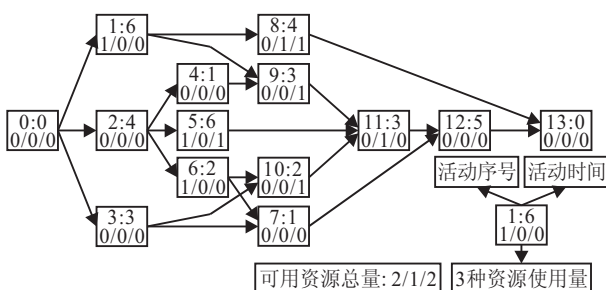


图 1 帕特森例 1

1.1 基于 CC/BM 的鲁棒性调度计划

用分支定界法^[13]生成基准调度计划,得到关键链为 0-1-9-10-11-12-13,项目最小工期为 19. 进一步在基础排程中插入接驳缓冲和项目缓冲,运用剪切法 (C&PM) 来计算缓冲大小,将非关键链长度的 50% 作为接驳缓冲大小,插入非关键链与关键链的交汇处;关键链长度的 30% 作为项目缓冲,放在关键链末端.如果出现非关键链溢出或资源冲突,则减少相应的接驳缓冲大小^[10].最终生成的关键链调度计划如图 2 所示.

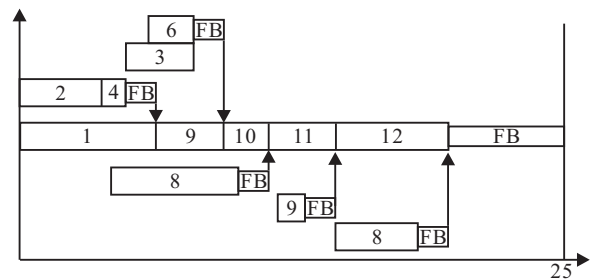


图 2 关键链集中缓冲调度计划

1.2 基于 STC 分散缓冲的鲁棒性调度计划

STC 法兼顾了活动权重、活动时间变动及资源分配. 以往文献的实验结果显示,STC 方法较其他分散缓冲的解鲁棒性最优且计算机实现性较好,被证明是一种较好的分散缓冲法^[12].其主要思想是计算各个活动的开始时间关键度,通过反复迭代来确定缓冲插入的位置.活动 j 的开始时间关键度 $stc(j)$ 定义为

$$stc(j) = P(S(j) > s(j)) \times w_j = r_j \times w_j. \quad (1)$$

其中: r_j 为活动 j 未能在其计划开始时间开工的可能性; w_j 为活动 j 偏离其计划开始时间时,每单位偏离时间所引起的成本,包括因计划变更产生的各种管理费用、协调费用和项目误工的惩罚成本等.

$$r_j = \sum_{(i,j) \in T(A \cup R)} P(d_i > s_j - s_i - LPL(i, j)), \quad (2)$$

s 为活动计划开始时间, d 为活动工期, $LPL(i, j)$ 为项目网络中活动 i 到 j 的最长路径时间,该网络包括项目活动网络和资源流网络 $G \cup G'$. 当各活动工期 d_i 的分布已知,产生了基准调度计划时,即可计算 LPL 和活动 j 的 r_j ,进而可计算 $stc(j)$.

STC 算法的步骤为^[12]: 计算所有活动的 $stc(j)$,按其大小将活动降序排列,在 $stc(j)$ 最大的活动前加入一单位时间缓冲,同时将其后续活动的开始时间都推迟一单位时间,得到一更新计划.如果更新计划的工期不超过项目完工期限,并且鲁棒性成本 $\sum stc(j)$ 较原计划更低时,则该更新计划可行,并将之作为下一次迭代的初始计划;如果该更新计划不符合条件,则去掉插入的缓冲,并在序列中的下一个活动前插入缓冲,重复这一过程,反复迭代下去.在迭代

过程中,当遇到一个 $stc(j) = 0$ 的活动时,算法终止,得到一个鲁棒性调度计划。

该方法考虑到了项目中各活动时间分布、活动权重、资源流网络及项目的完工期限,因此在使用该方法前首先要确认一些相关参数,用以计算每个活动的 stc 。针对帕特森例1,假设各活动的权重 w 分别为(3, 5, 4, 7, 1, 6, 3, 4, 2, 4, 6, 8, 50),活动时间存在不确定性,服从一定的概率分布。设每个活动都服从对数正态分布^[14],期望值分别为网络中给出的活动时间,所对应的正态分布标准差代表了活动时间不确定性大小,设值为0.3。

另外,基准调度计划最短项目时间为19,假设项目期限为25,则将时间差 $25 - 19 = 6$ 作为“预缓冲”在STC迭代时分散到各项目活动前。运用MABO^[15]方法求得资源流网络。最终运用STC方法,得到项目期限为25的分散缓冲调度计划,如图3所示。

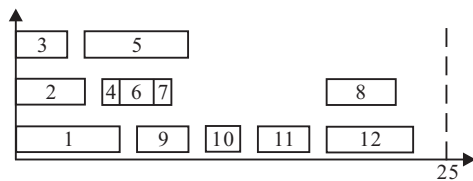


图3 基于STC分散缓冲的调度计划

2 两种缓冲方法比较研究的实验设计

为比较分析集中与分散两种缓冲方法对鲁棒性项目调度计划的影响,特在仿真环境下模拟执行基于帕特森例1得到的两种鲁棒性调度计划,并设计如表1所示的相关参数。

表1 实验相关参数设置

控制参数	参数值或概率分布
活动时间分布	对数正态分布
活动时间变动大(σ)	0.3, 0.6, 0.9
活动单位偏离时间所引起的成本	$U[0,10]$
权重参数(WP)	1, 5, 10, 15
项目计划完工期限 S_n	21, 22, 23, 24, 25
项目调度方式	并行调度
项目调度策略	接力赛(集中缓冲) 时刻表(分散缓冲)
项目调度优先规则	活动计划开始时间(S_i)
项目调度模拟次数	1000
项目完工率(TPCP)	$TPCP = P(S'_n < S_n)$
鲁棒性成本	$SC = \sum w_i S_i - s_i $

1) 活动时间的概率分布及模拟。为表示活动时间的不确定性,假设项目活动时间都服从对数正态分布^[14],期望值为网络图中给出的活动时间。在每次模拟项目执行时都按这种概率分布给活动随机分配时间,项目模拟执行1000次。设活动 i 的时间为 d_i ,所对应的正态分布标准差为 σ ,则所对应的正态分布时间期望值为 $u(i) = \ln(d_i) - \sigma^2/2$,用Matlab模拟活动 i 的时间为 $\text{lognrnd}(u(i), \sigma)$ 。

为分析活动时间不确定性程度的大小对两种缓冲计划的影响,在仿真实验时,设置高、中、低3种程度的活动时间不确定性,所对应的标准差 σ 分别为0.3, 0.6, 0.9。

2) 权重分布及参数设置。假设活动单位偏离时间所引起的成本 w_i 服从0-10的均匀分布^[11],其中项目网络中最后一个活动(即虚活动)的成本 w_n 代表整个项目延迟的边际成本。Van de Vonder等^[10]提出用权重参数WP表示项目按时完工的重要性,该参数为最后一个活动的 w_n 与其他活动的 w_i 期望值的比值。WP越大意味着按时完工越重要,延期完工的成本越高。在仿真实验时,将参数WP的值设定为1, 5, 10, 15,以分析该参数变动对两种缓冲计划的影响。

3) 项目完工期限设置。项目完工期限大小的设置将影响项目按时完工的可能性(即质量鲁棒性),它还会影响CC/BM项目缓冲的大小,以及直接影响STC分散缓冲方法的“预缓冲”大小及缓冲的分布状况。基准调度计划得到的项目最小完工时间为19,因此在仿真实验中,分别设置项目完工期限为21, 22, 23, 24, 25几种。针对每种完工期限,得到不同的基于集中缓冲和分散缓冲的鲁棒性计划,进而对项目计划的执行情况进行仿真,评估其鲁棒性结果。

4) 项目执行策略。总体采用并行调度方法,从前到后在每一时刻点作出每个活动是否执行的决策。项目执行时,采用两种执行策略^[10]:执行基于STC分散缓冲法的鲁棒性调度计划时,采用“时刻表”法,所有活动的开始执行时间不得早于计划开始时间,按其计划开始时间决定活动执行的先后顺序;执行基于CC/BM集中缓冲的鲁棒性调度计划时,采用“接力赛”策略,除了每条链的初始活动外,其他活动尽早开始,关键链活动具有优先执行权。

5) 鲁棒性评价指标。将项目的按时完工率(TPCP)^[10]和平均完工期作为质量鲁棒性评价指标,并将鲁棒性惩罚成本(SC)作为解鲁棒性评价指标,其大小定义为^[6]

$$SC = \sum w_i |S_i - s_i| \quad (3)$$

其中 s_i 和 S_i 分别表示项目活动的计划开始时刻和实际开始时刻,参数 w_i 也称为惩罚因子,是指活动偏离计划开始时间时,偏离单位时间所引起的成本。SC反映了整个项目执行过程中,因活动实际开始时刻偏离计划开始时刻所额外增加的成本,因而也常称之为惩罚成本。

3 实验结果分析

3.1 完工期限对鲁棒性的影响

取活动时间的不确定性大小 σ 为0.3,权重参数WP为10,模拟执行项目1000次,统计得到鲁棒性指标的平均值如表2所示。

表 2 $\sigma = 0.3, WP = 10$ 时两种调度计划的鲁棒性指标统计平均值

鲁棒性指标	$S_n = 21$		$S_n = 22$		$S_n = 23$		$S_n = 24$		$S_n = 25$	
	STC	CC/BM	STC	CC/BM	STC	CC/BM	STC	CC/BM	STC	CC/BM
SC	44.829	91.931	32.015	91.836	30.802	90.445	23.289	91.98	17.307	91.423
TPCP	0.409	0.354	0.554	0.5	0.695	0.659	0.782	0.759	0.818	0.859
完工时间	22.802	23.28	23.044	23.177	23.15	23.192	23.867	23.397	24.765	23.289

由表 2 可以看出:

1) 在解鲁棒性方面: 随着项目完工期限的增加, CC/BM 的惩罚成本 SC 基本保持不变, 而 STC 的惩罚成本则逐渐减小. STC 的 SC 指标总是远小于 CC/BM, 而且完工期限越宽松, 这种现象越明显. 因此, STC 法的解鲁棒性要优于 CC/BM, 随着项目完工期限的增加, STC 法的解鲁棒性更好.

2) 在按时完工率方面: ① 两种缓冲方法都随着完工期限的增加而增加; ② 当完工期限较紧时, STC 的按时完工率高于 CC/BM. 随着完工期限的增加, CC/BM 的按时完工率逐渐高于 STC, 其完工鲁棒性优势逐渐明显. 这说明, 因 STC 法的分散缓冲用于保护各活动开始时间的稳定性, 当项目完工期较紧时, 它能保护各活动尽量按计划时间进行, 进而较好地保证项目按期完工. 而对于 CC/BM 而言, 项目完工期较紧时, 关键链尾部的项目缓冲较小, 对项目按时完工的保护也较小; 随着完工期限的增加, CC/BM 的项目缓冲也增加, 从而能更好地保护项目按期完工.

3) 在完工时间方面: 随着项目完工期限的增加, STC 的平均完工期也逐渐增加, 而 CC/BM 基本保持不变. 当完工期限较紧时, STC 的平均完工期小于 CC/BM; 随着完工期限的放宽, STC 的平均完工期逐渐大于 CC/BM.

3.2 活动时间标准差对项目鲁棒性的影响

活动时间标准差 σ 反映了活动时间不确定性的程度, 设定 σ 为 0.3, 0.6 和 0.9 三种情况, 分别代表活动时间的不确定性程度低、中、高. 当完工期限 S_n 固定为 23, WP 为 10 时, 模拟执行项目 1 000 次, 统计得到鲁棒性指标的平均值如表 3 所示.

从表 3 可以看出, 不论采用那种缓冲方法, 随着 σ 变大, SC 变大、TPCP 变小、完工时间变长, 说明随着活动时间不确定性程度的增加, 项目鲁棒性变差. STC 的解鲁棒性总是好于 CC/BM.

表 3 $S_n = 23, WP = 10$ 时两种计划的鲁棒性指标统计平均值

鲁棒性指标	$\sigma = 0.3$		$\sigma = 0.6$		$\sigma = 0.9$	
	STC	CC/BM	STC	CC/BM	STC	CC/BM
SC	30.802	90.445	76.888	143.34	112.67	205.31
TPCP	0.695	0.659	0.435	0.516	0.384	0.456
完工时间	23.15	23.192	25.987	24.81	28.474	27.146

进一步比较完工期限、活动时间不确定性程度的大小对两种缓冲方法的按时完工率和平均完工时间的影响. 图 4 和图 5 是 $WP = 10$ 时的统计结果, 横坐标为完工期限, 纵坐标分别表示按时完工率和平均完工时间. 可以看出:

1) 当活动时间的不确定性程度较大时 (σ 为 0.6 和 0.9), CC/BM 的按时完工率总高于 STC 法, 而完工时间总低于 STC 法.

2) 当活动时间的不确定性程度较低时 (σ 为 0.3), 如果完工期限较紧, 则 STC 法的按时完工率高于 CC/BM, 而完工时间低于 CC/BM; 若完工期限较松, 则情况相反.

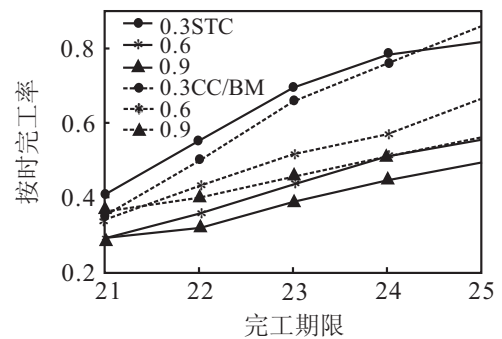


图 4 $WP = 10$ 时两种缓冲方法的 TPCP 指标

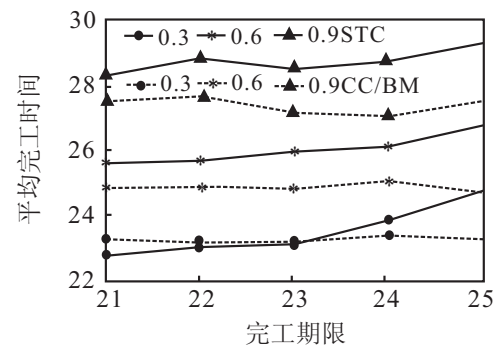


图 5 $WP = 10$ 时两种缓冲方法的平均完工时间

3.3 权重参数 WP 对项目鲁棒性的影响

WP 是 STC 法建立调度计划所需的参数, 其大小反映了项目按期完工的重要性, 它只对 STC 结果产生影响. 固定完工期限 S_n 为 23, σ 为 0.3, 模拟执行项目 1 000 次, 统计得到鲁棒性指标的平均值如表 4 所示. 可以看出, 当 WP 增加时, 要求项目按期完工的重要性增加, 基于 STC 法的调度计划的按期完工率增加、平均完工时间减少, 而相应的解鲁棒性成本 SC 增

加. 说明对于 STC 法而言, 增加 WP 可以增加调度计划的质量鲁棒性, 但会降低其解鲁棒性.

表 4 $S_n = 23, \sigma = 0.3$ 时 STC 计划的鲁棒性指标统计平均值

鲁棒性指标	WP = 1	WP = 5	WP = 10	WP = 15
SC	15.506	26.131	30.802	31.931
TPCP	0.397	0.615	0.695	0.713
完工时间	24.667	23.845	23.15	23.003

4 结 论

本文运用模拟仿真方法, 以项目管理库中的帕特森例 1 为研究对象, 针对不确定环境下与 CC/BM 集中缓冲法和基于 STC 分散缓冲法的鲁棒性项目调度方法进行了比较研究, 得到以下主要研究结论:

1) 在调度计划的解鲁棒性方面, STC 始终优于 CC/BM, 而且随着项目完工期限的增加, STC 法的解鲁棒性更好. 因为在模拟项目执行时, CC/BM 采用“接力赛”调度策略, 各活动的实际开始时间与计划开始时间很可能不一致, 从而引起较高的鲁棒性惩罚成本. 而 STC 采用“时刻表”调度策略, 能更好地保证各活动按计划时间开工, 因而鲁棒性惩罚成本也较低. 说明当单位偏离时间所引起的成本较高时, 应更多地考虑 STC 法, 保证调度计划有较好的解鲁棒性.

2) 当活动时间的不确定性程度较大时, CC/BM 的质量鲁棒性较好, 即项目按时完工率更高, 而完工时间更低. 所以, 在不确定性较大的项目执行环境中, 应优先选择基于 CC/BM 集中缓冲的鲁棒性项目调度计划.

3) 当项目完工期限很紧时, 应更多地考虑 STC 法, 因为它在质量鲁棒性和解鲁棒性方面都优于 CC/BM. 而随着完工期限的放宽, CC/BM 的质量鲁棒性逐渐优于 STC, 这时, 在以质量鲁棒性为主的项目调度中应更多地考虑 CC/BM.

4) 权重参数 WP 反映了项目按期完工的重要性, 它只对基于 STC 方法的调度计划的鲁棒性结果产生影响. 增加 WP, 可以增加调度计划的质量鲁棒性, 但会降低其解鲁棒性. 说明在制定基于 STC 的鲁棒性调度计划时, 需要权衡这两方面的鲁棒性, 确定合适的 WP.

参考文献(References)

[1] Demeulemeester E, Herroelen W. Project scheduling — A research handbook[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

- [2] Zhu G, Bard J, Yu G. Disruption management for resource constrained project scheduling[J]. J of the Operation Research Society, 2005, 56(4): 365-381.
- [3] Wang J. Constraint-based schedule repair for product development projects with time-limited constraints[J]. Int J of Production Economics, 2005, 95(3): 399-414.
- [4] Herroelen W S, Leus R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials[J]. European J of Operational Research, 2005, 165(2): 289-306
- [5] Newmann M E J. The structure and function of complex networks[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2003, 45(2): 167-256.
- [6] Herroelen W S, Leus R. Stability and resource allocation in project planning[J]. IIE Transactions, 2004, 36 (7): 667-682.
- [7] Al-Fawzan M A, Haouari M. A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling[J]. Int J of Production Economics, 2005, 96(2): 175-187.
- [8] Goldratt E M. Critical chain[M]. New York: The North River Press, 1997.
- [9] Herroelen W S, Leus R. The construction of stable project baseline schedules[J]. European J of Operational Research, 2004, 156(3): 550-565.
- [10] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W, et al. The use of buffers in project management: The trade-off between stability and makespan[J]. Int J of Production Economics, 2005, 97(2): 227-240.
- [11] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W, et al. The trade-off between stability and makespan in resource-constrained project scheduling[J]. Int J of Production Research 2006, 44(2): 215-236.
- [12] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W. Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: An experimental analysis[J]. European J of Operational Research, 2008, 189(3): 723-733.
- [13] Demeulemeester E, Herroelen W. A branch-and-bound procedure for the multiple resource-constrained project scheduling problem[J]. Management Science, 38(12): 1803-1818.
- [14] Tukul O I, Rom W O, Eksioglu S D. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling[J]. European J of Operational Research, 2006, 172(2): 401-416.
- [15] Deblaere F, Demeulemeester E, Herroelen W, et al. Robust resource allocation decisions in resource-constrained projects[J]. Decision Sciences, 2007, 38(1): 5-37.

(责任编辑: 孙艺红)