

控制与决策

Control and Decision

基于统计过程控制的两阶段缓冲监控方法

胡雪君, 王建江, 崔南方

引用本文:

胡雪君, 王建江, 崔南方. 基于统计过程控制的两阶段缓冲监控方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(6): 1453–1462.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1195>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

机票定价与舱位控制两阶段决策方法

Two-stage decision approach of air pricing and seat inventory control

控制与决策. 2019, 34(6): 1293–1299 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1474>

考虑"时间-资源"的大型客机协同研制GERT网络优化

GERT network optimization with consideration of "time-resource" on large aircraft collaborative development

控制与决策. 2019, 34(2): 309–316 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0121>

多源异构灰数据背景下的贝叶斯迭代优化控制图模型

Bayesian iterative optimized control charts model based on multi-source heterogeneous grey information

控制与决策. 2018, 33(7): 1287–1294 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0397>

舰载机弹药调运不确定系统的T-S模糊优化模型

T-S fuzzy optimization model for uncertain weapons transporting system in carrier aircraft

控制与决策. 2018, 33(4): 639–643 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0271>

基于活动工期风险和资源约束风险的缓冲大小计算方法

Buffer sizing method based on activity duration risk and resource constraint risk

控制与决策. 2016, 31(8): 1513–1518 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0926>

基于统计过程控制的两阶段缓冲监控方法

胡雪君¹, 王建江^{2†}, 崔南方³

(1. 湖南大学 工商管理学院, 长沙 410082; 2. 国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410073; 3. 华中科技大学 管理学院, 武汉 430074)

摘要: 当前市场环境快速变化且竞争愈发激烈, 通过有效控制不确定性以避免进度延迟是项目管理者极为重视的方面. 关键链缓冲管理提供了一种应对项目进度风险的有效方法, 针对现有缓冲监控机制存在的忽视活动层面不确定信息以及项目动态执行特征的不足, 提出一种基于统计过程控制的两阶段统计缓冲监控方法(SBMA). 第 1 阶段通过在活动层面设置管理者认为可以接受的活动工期波动范围, 生成项目层面基于缓冲消耗指标的容忍阈值, 建立统计缓冲控制图; 第 2 阶段依据假设检验理论, 当缓冲消耗指标超出缓冲控制图中监控阈值时即触发相应行动. 模拟实验结果表明, 相对于已有研究中的其他 3 种缓冲监控方法, SBMA 可以更准确及时地给出项目整体进度预警信息, 并且可以更有效地追溯至活动层面识别出活动工期是否发生异常波动, 从而验证所提出方法的实用性和优越性.

关键词: 关键链项目管理; 缓冲监控; 统计过程控制; 两阶段方法; 监控阈值; 不确定性
中图分类号: F224 **文献标志码:** A

Two-stage buffer monitoring method based on statistical process control

HU Xue-jun¹, WANG Jian-jiang^{2†}, CUI Nan-fang³

(1. Business School, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In today's highly competitive and rapidly changing marketplace, project managers attach great importance to dealing with the uncertainty in order to avoid schedule disruptions. The critical chain scheduling and buffer management (CC/BM) technique has shown to provide an effective approach for coping with schedule variability. Yet, the current buffer monitoring mechanism faces a problem of neglecting the related activity uncertainty information and the dynamic feature of the project execution. In order to overcome these deficiencies, this paper develops a new two-stage buffer monitoring approach (SBMA) based on a statistical process control procedure. In the first phase, our approach allows the user to set the duration variation that is acceptable on the activity level, which will result in tolerance limits of the buffer consumption at the project level in the form of a statistical buffer control chart (SBCC) by using Monte Carlo simulation. In the second phase, the observations of schedule deviations measured by the buffer consumption can be plotted against the tolerance limits on the SBCC, and the corresponding action decisions can be derived by using the hypothesis testing theory. A computational experiment has been set up to compare the capability of the proposed SBMA versus the existing traditional/relative/dynamic buffer monitoring approach in the literature. The results demonstrate that the SBMA can report warning signals more accurately and hence trigger control actions more timely, while maintaining a comparatively high probability of successful detections. Besides, the SBMA is more capable of differentiating between variations that are either acceptable or unacceptable in the duration of the individual activities.

Keywords: critical chain project management; buffer monitoring; statistical process control; two-stage method; monitoring thresholds; uncertainty

0 引言

Goldratt^[1] 于 1997 年将约束理论 (theory of constraints, TOC) 由生产领域拓展应用到项目管理领域, 提出了关键链缓冲管理方法 CC/BM. 该方法

同时考虑了资源约束和不确定性, 被认为是继计划评审技术和关键路径法之后项目管理领域最重要的进展之一, 以其重要的理论价值和应用背景, 受到企业界和学术界的广泛关注^[2-4]. CC/BM 是一套包含

收稿日期: 2018-09-04; 修回日期: 2019-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71701067, 71801218, 71572010); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50039).

†通讯作者. E-mail: jianjiangwang@nudt.edu.cn.

计划、执行和控制的完整项目管理理论,缓冲机制是其中的重要内容,利用缓冲管理方法实施项目进度风险控制,能够为管理者提供较为准确及时的项目整体进度风险水平评估^[5-7]。其中,缓冲监控是实施进度风险控制的关键,它通过分析项目实际进展与计划进度的偏差来判断项目延迟的可能性,如果项目执行遇到问题,则插入缓冲的关键链调度计划可以监测偏差程度,从而做出是否采取赶工等控制行动的决策,对基准计划进行校正和修复。

最早,Goldratt经验式地将缓冲均分为3部分(绿色区、黄色区和红色区)进行监控,之后学者们持续探索,将Goldratt的静态缓冲监控阈值(threshold)改进为动态的、递增的等多种设置方式^[8-10]。然而,现有的缓冲监控方法仍然存在诸多缺陷,如未能充分利用特定项目基准计划所能提供的预期信息、不具备区分可接受波动和不可接受波动的能力等。造成这些缺陷的一个重要原因就是,缓冲消耗指标是一个项目层面的累积指标,在观测和控制项目整体进度的过程中可能会丢失单个活动的执行信息。

鉴于此,本文在缓冲监控中引入统计过程控制(statistical process control, SPC)方法,研究在关键链项目执行过程中,如何实现活动层面和项目层面不确定性信息的集成,以期进一步提高关键链缓冲机制的进度偏差预警精度与效度。

1 文献综述

1.1 缓冲监控方法研究

众多研究表明,实施CC/BM可以有效降低项目受不确定因素的影响,在保障按时完工率的基础上缩短项目工期。现有研究主要从关键链调度、缓冲大小设置和缓冲监控3个方面展开,目前针对前两方面内容已有丰富的研究成果^[11-12]。

为了获得工期最短的关键链调度计划,现有研究广泛采用基于求解RCPSP的精确算法或者启发式算法^[13]。在缓冲设置方面,继Goldratt经验式地提出以50%法则确定缓冲尺寸的剪切法(C&PM)以来,众多学者力图建立更为科学、有效的缓冲计算方法。Newbold^[14]考虑不同活动的不确定性水平,提出将链上活动工期不确定性的平方和的平方根作为缓冲大小的根方差法(RSEM)。之后很多学者在C&PM/RSEM基础上进一步开展研究,综合考虑不同影响因素(如资源紧张度、网络复杂度、活动数量、优先关系数量、管理者风险偏好、工序执行时间及开工柔性等),运用不同的理论技术提出了多种改进的缓冲计算区计算方法^[2,3,4,7,15-16]。

目前,有关缓冲监控方法的文献相对较少。Goldratt将各种缓冲均分为3部分进行监控,缓冲监控阈值随项目进展保持不变,称为传统缓冲监控方法(traditional buffer monitoring approach, TBMA),如图1(a)所示。Herroelen等^[17]进一步强调缓冲管理是一种进度延迟风险的反馈/预警机制,目的是为控制决策提供指导。Leach^[8]认为随着项目的进行,项目的情况逐渐明了,不确定性程度会逐渐降低,于是提出随着链路的完成比例线性增加两个监控触发点,称之为相对缓冲监控法(relative buffer monitoring approach, RBMA),见图1(b),但对于如何确定这两条缓冲触发线并没有给出定量分析依据。别黎等^[9]根据项目实际进度与初始计划之间的差异,动态更新缓冲大小、动态设定缓冲监控触发点,构建了一个更符合实际的动态缓冲监控模型(dynamic buffer monitoring approach, DBMA),如图1(c)所示。赵振宇等^[18]将现有的资源缓冲和时间缓冲机制称为单缓冲,提出了进度偏差双缓冲控制模型,以期更好地监控资源变更和保护工期计划。徐小峰等^[19]利用挣值管理中的进度/成本绩效指标,结合贝叶斯估计方法,研究了关键链资源计划的进度偏差预警功能。Zhang等^[20]基于因素分析法和管理者的风险偏好,专门为软件项目设置工作量缓冲(effort buffer),其本质也是一种时间缓冲,然后基于灰度预测模型,提出一个工作量偏差监控模型,并将其应用于实际项目数据,结果验证了该模型在预测软件项目工作量偏差方面的有效性与实用性。

以上缓冲监控方法的缺陷在于均采用一种基于项目的、自上而下的控制流程,即根据在项目层得到的累积性缓冲消耗指标判断项目总体进展绩效,缺少活动层面的相关控制信息。鉴于此,别黎等^[10]引入进度风险分析方法中的活动敏感度指标,将其作为区别不同活动相对于项目工期重要性的赶工决策依据,在综合考虑缓冲指标和敏感度指标监控体系的基础上,提出了在缓冲的黄区监控中集成活动敏感性信息的监控思路。Hu等^[21]在此基础上进一步设计了基于活动关联度指标的缓冲监控方法CRI-BMA(activity cruciality-based buffer monitoring approach),并提出两种CRI监控阈值的动态设定方法,随项目进展递减或者根据缓冲消耗水平RBCI而定,如图1(d)所示。

此外,现有缓冲监控方法大都只关注项目的时间绩效,没有考虑成本信息(如单位时间赶工成本、资金预算等)。对此,Hu等^[22]建立了一个CC/BM赶工优化模型,目标是在满足给定按时完工率要求的条件

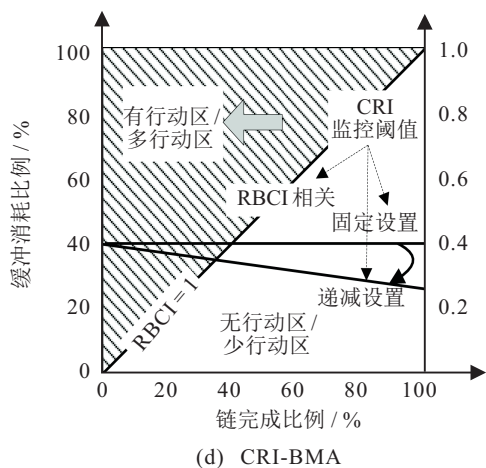
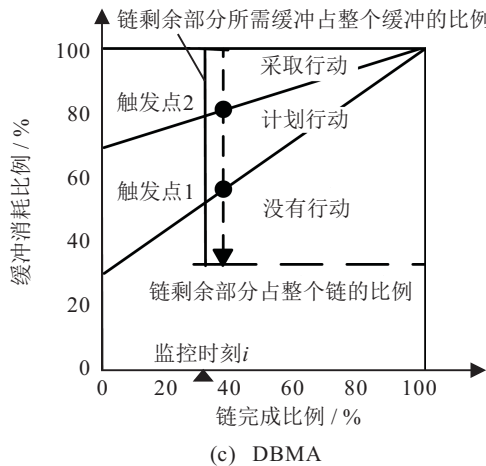
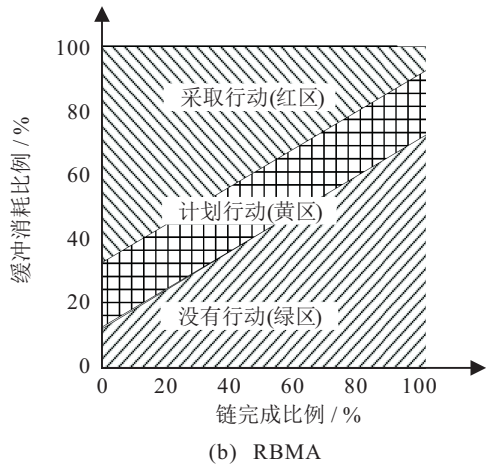
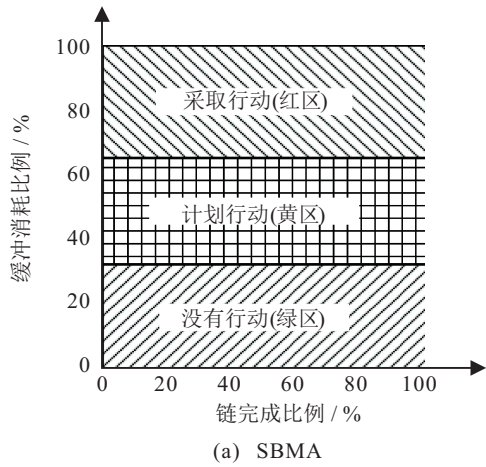


图 1 4种方法缓冲监控阈值设置

下,最小化当前活动及其后续活动的总赶工成本. Hu等^[5]进一步考虑资源可用量成本和进度稳定性,设计了两种基于资源再分配决策的缓冲监控方法,并设计大规模模拟实验对影响各种方法绩效的实验参数进行了分析.

事实上,基于缓冲的项目进度监控核心就是针对缓冲评价指标设置行动阈值,当监测到项目实际进度与计划进度的偏差超出预定阈值时即触发相应的管理行动. 其中阈值的设定目标应当是使监控行为与项目实际执行情况相符,发出错误信号的概率最小^[9]. 然而,现有的缓冲阈值设置方法大多存在以下缺陷: 1) 虽然能够大体反映出项目进度的提前或滞后,但是没有从活动角度定义工期的内在不确定性,因此不能识别非随机原因,即不能帮助管理者判断进度偏差是否在预期/可控范围之内. 2) 缓冲触发线或是静态或是线性,不能针对项目的各个执行阶段做出具体的、可靠的评估. 为了解决以上问题,有必要开发一种新的缓冲监控方法,既能支持从项目整体层面判断进度延迟与否,又支持从活动层面区分可接受波动与不可接受波动. 统计过程控制方法 SPC 为解决此问题提供了思路.

1.2 统计过程控制方法研究

SPC 方法是最初应用于服务业和制造业而发展起来的一种质量管理技术,它利用过程波动的统计规律性对过程进行分析控制,力图建立并保持过程处于可接受的并且稳定的水平. 从统计的角度看,当过程仅受普通因素影响时,称其处于统计受控状态,此时过程特性一般服从稳定的随机分布;当过程中存在非随机因素影响时,称其处于统计失控状态,此时过程分布将发生改变^[23]. 控制图(control charts)是 SPC 中最重要的工具,用来监控过程的稳定性、检测非随机原因及预测过程的动向,常见的有 XmR 图、Shewhart 图、累积和图(CUSUM)、指数加权移动平均图(EWMA)等. 项目控制图中一般包含上控界限、下控界限以及随项目进展的实际绩效指标观测值.

已有研究通过集成 SPC 和挣值管理方法,提供了一种相对客观且易于实施的项目监控系统. 如, Lipke 等^[24] 基于挣值绩效指标采用一种 XmR 图计算进度控制界限. Leu 等^[25] 也将 XmR 图与挣值管理方法相结合,收集了 120 个项目的历史数据,并针对观测数据的不同趋势建立 XmR 控制图. Aliverdi 等^[26] 将 SPC 方法用于项目成本挣值控制. 以上研究都是根据历史数据或者项目以往绩效确定进度/成本控制界限, Colin 等^[27] 通过预先界定项目进展的允许偏差

(即理想状态),基于挣值指标获得项目进度偏差的容许界限.目前还鲜有文献将SPC用于项目缓冲管理,这为本文研究工作提供了契机.

2 基于SPC的两阶段缓冲监控方法

借鉴文献[27],本文采用模拟方法设置缓冲容许界限(即监控阈值),用以判断项目执行是否失控.该方法将过程控制划分为两个阶段:第1阶段,通过定义活动层面工期的可接受波动范围,基于统计过程控制思想生成项目的按计划执行状态,即预先采用模拟方法对关键链基准计划进行仿真执行,定制式地建立统计缓冲控制图(statistical buffer control chart, SBCC);第2阶段,在项目执行中实时统计缓冲消耗情况,并将观测数据随项目进展绘制在缓冲控制图中,判断是否应该对活动采取赶工等控制行动.

2.1 第1阶段:建立SBCC

按照来源的不同,将活动工期的不确定性分为两类^[15]:

1) 认知性不确定因素.与对项目过程缺乏足够的认知与经验相关,例如由于工程项目具有唯一性和复杂性等特点,工程人员对于活动执行时间的估计缺乏经验,在实施项目时就面临极大的不确定性.

2) 偶然性不确定因素.与项目实施过程中的随机因素有关,例如恶劣天气影响开工、可用资源出现故障或短缺、设计变更等.

以上两个方面的不确定性都将作用于活动工期,造成项目实际进展与基准计划发生不同程度的偏离.结合SPC理论,可以认为项目在认知性不确定因素影响下是按计划执行/受控状态;然而,当存在偶然性不确定因素时,缓冲极有可能被过量消耗而超出预定的监控阈值,此时认为项目处于未按计划执行/失控状态.一个有效的缓冲监控图应当赋予管理者区分这两种项目执行状态的能力.为此,本文在第1阶段只考虑由认知性不确定因素造成的工期波动,采用活动实际工期相对于计划工期的最大偏离百分比(dev)来表示.考虑到活动工期分布的偏态特性及延迟拖尾效应(见图2),将dev定义为

$$\text{dev}_i = \begin{cases} \text{dev}_i^+ = (\hat{d}_i - d_i)/d_i, \\ 2\text{dev}_i^- = (d_i - \hat{d}_i)/d_i. \end{cases} \quad (1)$$

其中: \hat{d}_i 为活动*i*的随机模拟工期, d_i 为计划工期(单一确定值), dev_i^+ 为正向偏差, dev_i^- 为负向偏差.假设活动工期服从对数正态分布^[3,24-25],图2中阴影部分显示了 $\text{dev}_i = 1$ 时活动*i*工期的可接受波动范围.

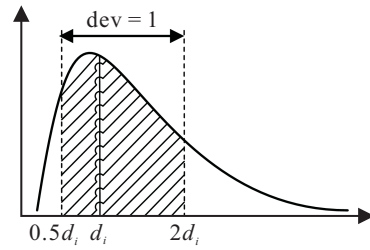


图2 第1阶段活动工期的可接受波动范围示例

缓冲大小(记为BS)在一定程度上反映了项目工期的不确定性水平,插入缓冲的关键链调度计划一方面决定了项目按计划执行的状态(即预期状态),另一方面应当具备判断项目进度失控与否的能力,这正是通过缓冲监控实现.在项目执行过程中任一检查点*p*处,根据已完成活动的模拟工期和剩余活动的计划工期,采用并行进度生成机制得到关键链项目的模拟完工期,通过将模拟完工期与计划完工期进行比较,确定此时的缓冲消耗量(记为 BC_p),则缓冲消耗比例为 $PBC_p = BC_p/BS$.本文以 $X = PBC$ 作为进度评价指标,基于SPC方法构建缓冲控制图SBCC,即采用蒙特卡洛模拟方法得到项目模拟执行数据,获得项目全生命周期缓冲消耗比例的经验分布函数,表示为

$$\hat{F}_{X(p)}(l) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \Gamma_m \{X_{mp} \leq l\},$$

$$\forall p \in (1, 2, \dots, P).$$

其中: M 为总的模拟次数(即模拟样本总数), $m = 1, 2, \dots, M$; P 为总的观测/检查次数, p 为每个检查点; $\Gamma(A)$ 为事件*A*的指示函数,表示为

$$\Gamma(A) = \begin{cases} 1, & A \text{ 是真命题;} \\ 0, & A \text{ 是假命题.} \end{cases}$$

采用统计上限(statistical upper threshold, SUT)和统计下限(statistical lower threshold, SLT)表示缓冲监控的上/下阈值,其大小分别取为分布函数 $F(l)$ 的 α 分位数和 $(1 - \alpha)$ 分位数.根据大数定律,经验分布函数渐近收敛于真实的累积分布函数 $F(l)$.因此,分位数可由经验分布函数的反函数计算得到,或者直接取为样本分位数的估计值.采用第2种方法,将每次模拟得到的*p*点缓冲消耗比例分别记为 $\{X_{1p}, \dots, X_{mp}, \dots, X_{Mp}\}$,按照升序排列得到 $\{X_{(1)p}, \dots, X_{(m)p}, \dots, X_{(M)p}\}$,则 $\hat{F}_{X(p)}(l)$ 的 α 样本分位数可以估计^[28]为

$$\hat{Q}_X(\alpha)_p = (1 - \gamma)X_{(j)p} + \gamma X_{(j+1)p}. \quad (2)$$

其中

$$\frac{j - \alpha + 1}{M} \leq \alpha \leq \frac{j - 2 + \alpha}{M}, \quad \gamma = \alpha M - \alpha - j + 1,$$

$$j = \lfloor \alpha M - \alpha + 1 \rfloor.$$

据此,在某一 α 水平下,针对缓冲消耗比例的上/下监控阈值分别计算为

$$\begin{aligned} \text{SLT}_{X(p)}^\alpha &= \hat{Q}_X(\alpha)_p, \text{SUT}_{X(p)}^\alpha = \hat{Q}_X(1 - \alpha)_p, \\ \forall p &\in (1, 2, \dots, P). \end{aligned} \quad (3)$$

需要指出的是, TBMA方法中缓冲监控的下控界限(lower control limit)为 $\text{LCL} = (1/3)\text{BS}$, 上控界限(upper control limit)为 $\text{UCL} = (2/3)\text{BS}$, 其中BS表示缓冲大小; 对于RBMA方法, 现有CC/BM软件中缓冲触发线的数值大小都是软件开发人员的经验估计, 一般设置下控界限为 $\text{LCL} = 0.15 + 0.6p$, 上控界限为 $\text{UCL} = 0.3 + 0.6p$, 其中 p 表示链路完成比例^[22]. 由此可见, 本文方法充分利用了特定项目基准计划所能提供的预期信息, 赋予了进度控制中辨别计划波动和异常波动的能力, 区别于TBMA/RBMA等方法不考虑项目特征而泛泛地生成固定的缓冲触发线.

2.2 第2阶段: 执行与监控

在项目实际执行过程中, 由于认知性及偶然性不确定因素的客观存在, 活动工期极有可能偏离计划工期, 此时将活动 i 实际工期相对于计划工期的偏离程度记为 $\tilde{\text{dev}}_i$; 如果 $\tilde{\text{dev}}_i > \text{dev}_i$, 则SBCC理论上需要反映出这一异常偏差并发出行动预警信号; 如果所有活动的实际工期都在预设的可接受范围之内, 则可以认为该项目整体按计划顺利执行, SBCC理论上不

应产生任何预警信号. 由此可将动态监控阶段视为一个假设检验问题, 即将某一检查点 p 处的实际缓冲消耗比例记为 Y_p , 运用SBCC中的统计监控阈值判断 Y_p 是否满足零假设 H_0 (项目按计划执行/统计受控), 表示为

$$\text{SLT}_{X_p}^\alpha \leq Y_p \leq \text{SUT}_{X_p}^\alpha, \quad (4)$$

反之, 则拒绝零假设, 认为项目未按计划执行.

以上两个阶段是一个迭代反馈、动态优化的过程, 使得管理者能够随项目执行阶段动态更新缓冲控制图并实施监控, 称为统计缓冲监控方法(statistic buffer monitoring approach, SBMA). 图3给出了实践中运用该方法的具体步骤, 其中参数 A_{per} 的含义见第4.1节. 具体而言, 在项目实际执行过程中, 当缓冲消耗位于统计监控阈值范围之内时, 不需要采取控制行动. 反之, 则需要采取相应行动, 必要时需重新模拟项目剩余部分的预期执行情况(进入第1阶段), 并更新缓冲监控阈值, 然后项目继续执行(进入第2阶段). 如果 $Y_p > \text{SUT}_{X_p}^\alpha$, 则此时触发的预警信号应当被视作危机, 管理者必须追溯至活动层面采取纠偏行动(比如对活动进行赶工、增加资源、进度计划重排等); 如果 $Y_p < \text{SLT}_{X_p}^\alpha$, 则此时触发的预警信号可以视作一种机会, 管理者可据此调整原来的计划, 还可以考虑调整缓冲大小, 最大限度地利用已知信息得到更优的调度方案.

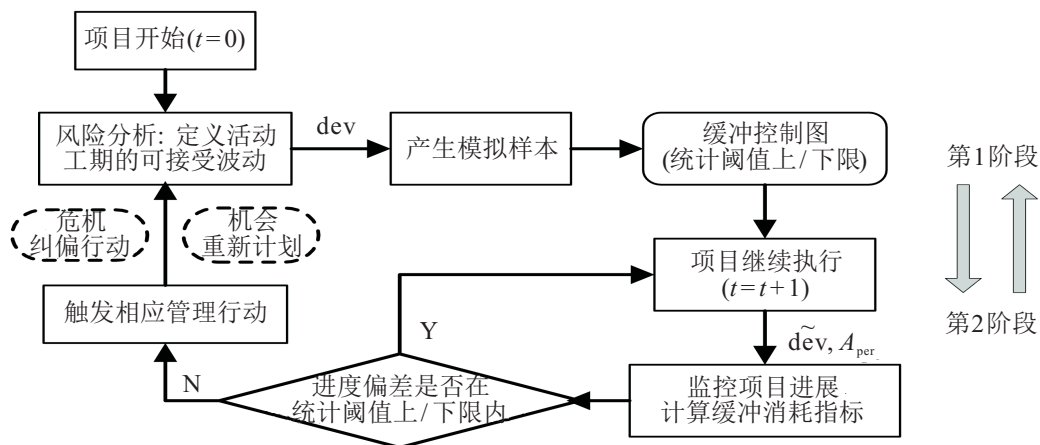


图3 统计缓冲监控方法(SBMA)应用步骤

综上所述, 本文两阶段方法很好地集成了活动层面的不确定程度(dev , as-planned variation)和项目层面的不确定水平(A_{per} , not-as-planned variation), 同时考虑了项目基准计划的相对性和活动工期波动的绝对性($\tilde{\text{dev}}_i$), 并且能够随项目执行阶段动态设置和调整缓冲监控阈值.

3 算例说明

某项目网络如图4(a)所示, 假设工序工期服从对数正态分布. 该项目使用5种可更新资源, A、B、C、D的单位时间可用量为一个单位, E为两个单位. 使用Hu等^[5]的算法确定关键链, 采用剪切法(又称50%法)^[1]计算接驳缓冲(feeding buffer, FB)大小, 以关键

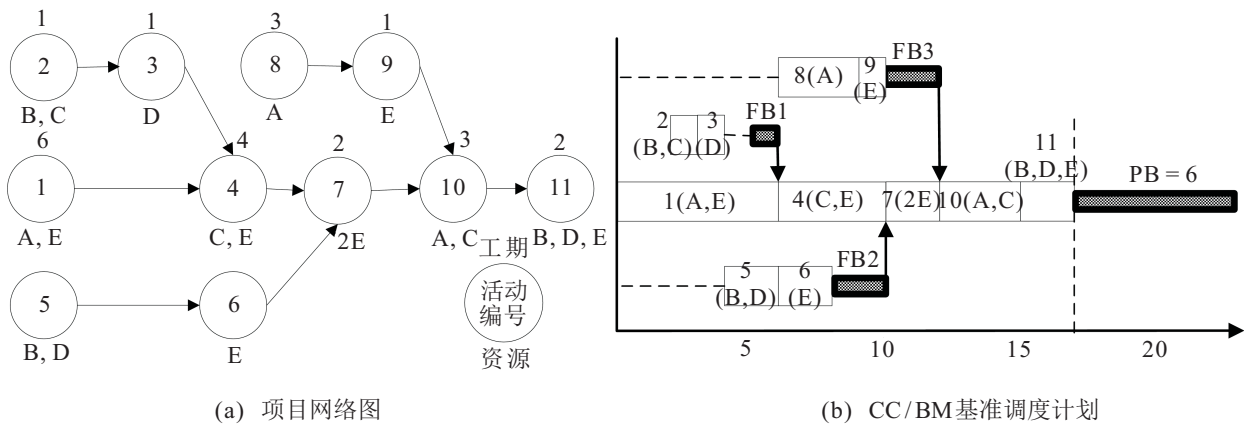


图4 项目网络图与基准调度计划

链长度的30%作为项目缓冲(project buffer, PB)大小,得到关键链调度结果如图4(b)所示。

在第1阶段,为方便分析仅取5次模拟运行结果($M_{sta} = 5$),随机活动工期如表1所示。其中,对数正态分布的均值为基准计划中的确定活动工期 d_i ,用变异系数(coefficient of variation, cv)表达工期的不确定性水平,取 $cv = 1, dev = 0.8$ 。

表1 5次模拟情景下的活动工期

活动编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	项目完工期
s_1	6	1	1	7	2	2	3	2	1	2	3	21
s_2	7	1	1	4	2	3	2	2	1	2	2	17
s_3	6	1	1	3	3	2	2	3	1	3	3	18
s_4	6	1	1	5	3	2	2	2	1	2	2	17
s_5	9	1	1	5	2	2	2	4	1	2	2	20

项目经理在每个活动完成时检查项目缓冲PB的消耗情况,假设在单个活动的执行期间缓冲是线

性消耗的,则据此计算出在每个时刻点缓冲的消耗比例,结果见表2。如果希望以固定的时间间隔收集缓冲消耗数据,则依时间轴的度量需要转换成依项目完成百分比(PCC)进行等距度量。本例中取进度完成百分比 $p = \{10\%, 20\%, \dots, 90\%\}$,这一过程可以通过插值法完成。以表2中模拟情景 s_1 为例,为了得到该项目在某个完成百分比(如50%处的缓冲消耗比例),首先需要找到离这一比例最近的两个时间点 $t_A = 10(10/21 < 50\%)$ 和 $t_B = 11(11/21 > 50\%)$,线性插值公式描述为

$$X_{p=50\%} = X_{t_A} + (50\% - PCC_{t_A}) \frac{X_{t_B} - X_{t_A}}{PCC_{t_B} - PCC_{t_A}}$$

由此可得到项目在每个完成百分比的缓冲消耗比例,如表3所示。进而获得5次模拟情景下的缓冲消耗均值及统计监控阈值上/下限(这里取 $\alpha = 10\%$),作出缓冲控制图。

表2 5次模拟情景下每个时刻点的缓冲消耗比例PBC

时刻t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
s_1	0.056	0.111	0.167	0.222	0.056	0.111	0.167	0.222	0.278	0.333	0.389
s_2	0.021	0.042	0.063	0.083	0.048	0.095	0.143	0.190	0.238	0.286	0.333
s_3	0	0	0	0	0.074	0.148	0.222	0.296	0.370	0.095	0.190
s_4	0	0	0	0	0.048	0.095	0.143	0.190	0.238	0.100	0.200
s_5	0.056	0.111	0.167	0.222	0.042	0.083	0.125	0.167	0.208	0.133	0.267
时刻t	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
s_1	0.444	0.500	0.250	0.500	0.222	0.444	0.667	0.222	0.444	0.667	
s_2	0.111	0.222	0.333	0.111	0.222	0.333	0.167	0.333			
s_3	0.286	0.381	0.476	0.571	0.667	0.222	0.444	0.667	0.333	0.667	
s_4	0.300	0.400	0.500	0.167	0.333	0.500	0.667	0.222	0.444	0.667	
s_5	0.400	0.533	0.667	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	0.278	0.556	0.833

表3 项目每个完成阶段的缓冲消耗比例PBC

阶段 p	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %
s_1	0.117	0.189	0.128	0.244	0.361	0.478	0.425	0.400	0.267
s_2	0.040	0.079	0.081	0.171	0.262	0.244	0.256	0.133	0.317
s_3	0.000	0.015	0.170	0.326	0.143	0.343	0.543	0.311	0.644
s_4	0.000	0.010	0.110	0.210	0.150	0.360	0.267	0.467	0.267
s_5	0.122	0.150	0.108	0.200	0.267	0.560	0.233	0.600	0.389
均值	0.056	0.088	0.119	0.230	0.237	0.397	0.345	0.382	0.377
$SLT_{X_p}^{10\%}$	0.000	0.010	0.081	0.171	0.143	0.244	0.233	0.133	0.267
$SUT_{X_p}^{10\%}$	0.122	0.189	0.170	0.326	0.361	0.560	0.543	0.600	0.644

4 模拟实验

为了显示SBMA方法在不同参数环境下的适用性,本节基于PSBLIB_J30问题库^[29]进行大规模模拟实验,并将其与TBMA、RBMA和DBMA方法进行对比分析.为保证可比性,4种缓冲监控方法均在项目开始执行之前生成缓冲控制图,不考虑执行过程中动态更新.

4.1 参数设置

如前文所述,在第1阶段假设活动执行时间在可接受范围内波动,据此构建统计缓冲控制图SBCC,在第2阶段项目实际执行时(模拟次数记为 M_{dyn}),活动工期则有可能表现出异常波动(即 $\tilde{dev} > dev$).为此,定义一个界值变量 A_{per} ,表示工期发生异常波动的活动占总活动数量的比例, A_{per} 越大,项目越有可能不按计划执行.模拟实验相关参数取值见表4.

表4 模拟实验参数设置

参数描述	取值
活动工期变异系数(假设活动工期服从对数正态分布) ^[2-3,5,21-22]	$cv_i \sim U[0.5, 1]$
按计划执行状态下,活动预期工期与计划工期的最大偏离百分比	$dev \in \{0.4, 0.8, 1.2, 1.6\}$
未按计划执行状态下,活动实际工期偏离程度超出 dev 的活动	$A_{per} \in \{20\%, 40\%, 60\%, 80\%\}$
比例项目进度完成百分比	$p = \{5\%, 10\%, \dots, 90\%, 95\%\}$
项目缓冲PB	关键链长度的30% ^[5]
接驳缓冲FB	采用根方差法 ^[14] 计算
模拟执行次数	$M_{sta} = M_{dyn} = 1000$

4.2 绩效指标

为了衡量各种缓冲监控方法的监控绩效,定义以下两个基于模拟的绩效评价指标:

1) 异常识别率^[30].在某点 p 处项目层面的缓冲消耗指标超出了缓冲监控阈值上/下限,这一预警信号的产生确实是由于在 p 点之前有活动的实际工期波动 \tilde{dev}_j 超出了预定界限 dev .该指标反映了监控的准确度/响应效率,计算公式为

$$PSD = \frac{1}{M_{dyn}} \sum_{m=1}^{M_{dyn}} \Gamma_m \{ (\exists p(Y_p < SLT_{X_p}^\alpha) \vee (Y_p > SUT_{X_p}^\alpha)) \wedge (\exists p(s_j < p) \wedge (\tilde{dev}_j > dev)) \},$$

其中 s_j 表示活动 j 的实际开始时间.

2) 频数.采用蒙特卡洛技术对项目执行进行1000次模拟仿真,统计缓冲消耗落在3个区域的频数^[9].对于SBMA方法,缓冲控制图中3个区域分别为机会区(SLT以下)、正常区/无行动区(SLT与SUT之间)、问题区/行动区(SUT以上);对于TBMA/RBMA/DBMA方法,缓冲监控图中3个区域分别为绿区/无行动区(LCL以下)、黄区/计划行动区(LCL与UCL之间)、红区/采取行动区(UCL以上),见第2节.

4.3 实验结果及分析

表5列出了4种缓冲监控方法的异常识别率绩效指标值,加粗数字表示对应方法最优.统计结果显示,对于任一种监控方法,一方面,当活动预期工期相对于计划工期的偏离程度较小时($dev = 0.4, 0.8$),异常识别率随着 A_{per} 的增大而增加,即活动预期波动较小时,项目整体层面不确定水平越高则缓冲监控的效率越高;当 dev 较大时($dev = 1.2, 1.6$),异常识别率随着 A_{per} 的取值变化不大.另一方面,当实际工期偏离预期的活动比例较小时($A_{per} = 20\%, 40\%$),异常识别率随偏离程度 dev 的增大先增加后降低;当实际工期偏离预期的活动较多时($A_{per} = 60\%, 80\%$),异常识别率随 dev 的增大而降低.即项目整体不确定性

较高时,活动层面预期波动越大,缓冲监控方法越难体现出其监控效率。

表5 不同参数组合下4种缓冲监控方法的异常识别率

监控方法	参数取值	A _{per}			
		20%	40%	60%	80%
SBMA	dev = 0.4	0.545	0.647	0.720	0.733
	dev = 0.8	0.595	0.677	0.688	0.685
	dev = 1.2	0.615	0.620	0.620	0.621
	dev = 1.6	0.452	0.440	0.447	0.443
DBMA	dev = 0.4	0.317	0.510	0.652	0.669
	dev = 0.8	0.438	0.639	0.656	0.660
	dev = 1.2	0.600	0.619	0.613	0.613
	dev = 1.6	0.499	0.483	0.492	0.492
RBMA	dev = 0.4	0.271	0.403	0.496	0.511
	dev = 0.8	0.394	0.491	0.502	0.502
	dev = 1.2	0.484	0.487	0.492	0.487
	dev = 1.6	0.393	0.387	0.395	0.392
TBMA	dev = 0.4	0.198	0.306	0.384	0.392
	dev = 0.8	0.271	0.376	0.384	0.388
	dev = 1.2	0.354	0.362	0.362	0.361
	dev = 1.6	0.289	0.281	0.285	0.285

表5进一步显示,在任一参数组合下,现有缓冲监控方法的异常识别率优劣关系为DBMA > RBMA > TBMA,表明DBMA方法在监控过程中动态计算缓冲大小有利于实时衡量项目实际进度与初始计划之间的差异,从而也能更好地反映出活动层面的执行信息。SBMA方法的异常识别率在任一参数组合下均高于TBMA/RBMA,而当dev = 1.6时SBMA稍劣于DBMA,表明当活动工期预期波动非常大时,模拟方法已不能有效反映出项目的按计划执行状态,此时基于SPC生成统计缓冲控制图其监控绩效还不如在项目执行过程中动态更新缓冲大小。总体而言,SBMA方法在绝大多数情况下都具有最高的监控准确度,即当项目整体进度失控时其可以最为有效地追溯至活动层面,识别出活动工期是否发生了异常波动,进而采取相应的管理行动(如赶工、增加资源等)。其中在“低dev-高A_{per}”组合下,所有缓冲监控方法的异常识别率最高,这一结果为实践中项目管理者结合活动工期风险水平判断缓冲监控的有效性提供了指导。

下面在项目进展的各个阶段 $p = \{5\%, 10\%, \dots, 90\%, 95\%\}$, 检查PB消耗情况并判断其落入缓冲监控图的哪个区域。在 $(dev, A_{per} = (0.8, 40\%))$ 组合

下,3种方法对应的频数分布如图5所示,其他参数组合呈现出一致的变化趋势和管理结论。统计结果显示,在项目进展前期,TBMA/RBMA/DBMA处于绿区的频数逐渐减少,处于黄区和红区的频数在增加;SBMA方法处于正常区的频数逐渐减少,处于问题区的频数逐渐增加。这表明随着关键链上活动的完成,缓冲逐步被消耗,问题开始出现。在项目进展中后期,TBMA/RBMA/DBMA处于绿区的频数逐渐增多,处于黄区和红区的频数逐渐减少;SBMA方法处于正常区的频数在增加,处于问题区的频数逐渐减少。这表明随着越来越多的项目活动被执行完,项目面临的不确定性不断减少,同时接驳缓冲逐渐

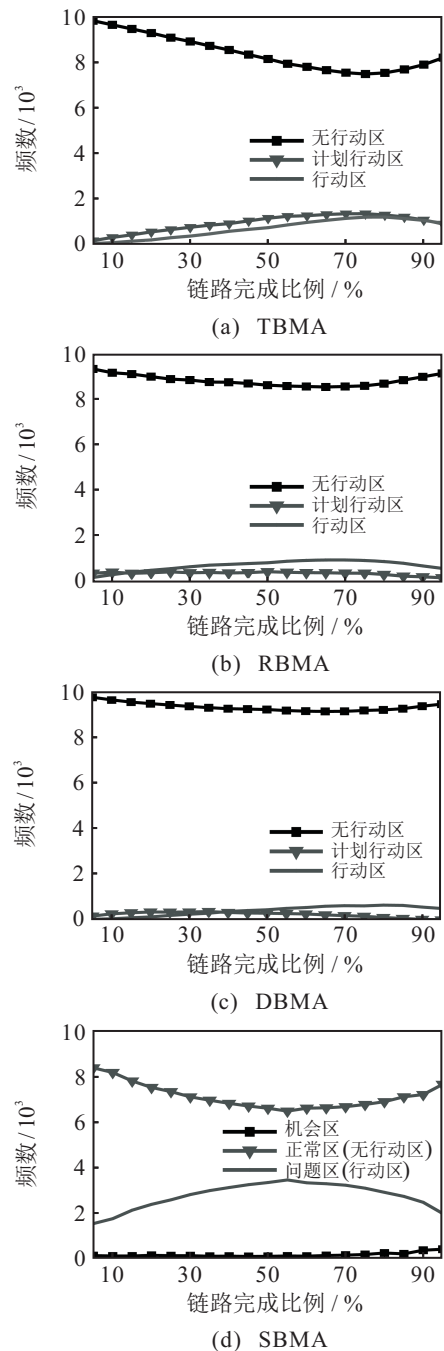


图5 缓冲消耗落入各个区域的频数对比

发挥作用,缓和了前期活动延迟对项目后续执行的影响,这一变化特点也符合项目一般的进展情况。此外,DBMA落在黄区和红区的次数要少于RBMA和TBMA,表明DBMA计划行动和采取行动的可能性远小于RBMA,考虑到DBMA拥有更高的异常识别率(见表5),动态更新缓冲大小的DBMA方法能够以更少的监控成本获得更高的监控效益。

进一步分析图5可知,TBMA/RBMA/DBMA落入无行动区的频数多于SBMA落入正常区的频数,TBMA/RBMA/DBMA落入计划行动区和行动区的频数之和少于SBMA落入问题区的频数。结合表5的异常识别率对比结果可知,TBMA/RBMA/DBMA仍然存在不能及时发出预警信号的风险,即当项目进度真正失控时,TBMA/RBMA/DBMA追溯至活动层面解决问题的能力更差;而SBMA则可以更好地给出整体进度预警信息(问题区),并保证较高的活动异常识别率,从而指导项目管理者采取更合适的控制策略保证项目按期完工。此外,SBMA方法中机会区的提出也具有重要意义,可以用来判断缓冲大小的设置是否合理。图5中缓冲消耗落入机会区的频数整体较少,表明本实验中采用根方差法计算FB、将PB大小设置为关键链长度的30%是较为合理的;反之,如果落入机会区的频数相对较多,则需要考虑重新估计各缓冲大小和制定关键链基准计划。

5 结论

对于具有高度不确定性的资源受限型项目环境,从缓冲监控的视角实施项目进度控制,能够有效应对关键链项目执行过程中受不确定性因素的影响。针对已有缓冲监控方法未能充分考虑活动层面的执行信息、不能识别非随机原因等缺陷,本文引入统计过程控制方法SPC,提出一种两阶段统计缓冲监控方法SBMA,希望能够在理论上和实践中不断完善,为关键链缓冲管理提供更加广泛的发展空间。相较于直觉式/经验式的缓冲阈值设置方法,SBMA针对关键链基准计划定制式地构建缓冲控制图,赋予了进度控制中辨别计划波动和异常波动的能力,不仅为项目缓冲控制界定了统计监控阈值,也为单项活动的工期波动提供了控制准则。模拟实验表明,所提出方法有助于提升缓冲监控触发行动的能力,有效响应,确保进度,从而提高项目管理绩效。未来将进一步在CC/BM框架下探寻高效的进度偏差预警控制模型,在缓冲消耗比例这一单指标基础上,综合考虑动态缓冲大小、缓冲剩余指标等构建多元缓冲控制图,并在实践中测试和改进统计缓冲监控方法的有效性。

参考文献(References)

- [1] Goldratt E M. Critical chain[M]. New York: The North River Press, 1997: 1-155.
- [2] Tukul O I, Rom W O, Eksioglu S D. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 172(2): 401-416.
- [3] Bie L, Cui N, Zhang X. Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in critical chain scheduling[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(24): 7343-7356.
- [4] Zhang J, Song X, Díaz E. Project buffer sizing of a critical chain based on comprehensive resource tightness[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 248(1): 174-182.
- [5] Hu X, Demeulemeester E, Cui N, et al. Improved critical chain buffer management framework considering resource costs and schedule stability[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2017, 29(2): 159-183.
- [6] Martens A, Vanhoucke M. A buffer control method for top-down project control[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 262(1): 274-286.
- [7] 胡雪君, 崔南方, 赵雁. 基于活动工期风险和资源约束风险的缓冲大小计算方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(8): 1513-1518.
(Hu X J, Cui N F, Zhao Y. Buffer sizing method based on activity duration risk and resource constraint risk[J]. Control and Decision, 2016, 31(8): 1513-1518.)
- [8] Leach L P. Schedule and cost buffer sizing: How to account for the bias between project performance and your model[J]. Project Management Journal, 2003, 34(2): 34-47.
- [9] 别黎, 崔南方. 关键链动态缓冲监控方法研究[J]. 中国管理科学, 2010, 18(6): 97-103.
(Bie L, Cui N F. Research on dynamic buffer monitoring in critical chain project management [J]. Chinese Journal of Management Science, 2010, 18(6): 97-103.)
- [10] 别黎, 崔南方, 田文迪, 等. 基于活动敏感性的动态缓冲监控方法研究[J]. 中国管理科学, 2014, 22(10): 113-121.
(Bie L, Cui N F, Tian W D, et al. Research on activity sensitivity index based dynamic buffer monitoring method[J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(10): 113-121.)
- [11] 张静文, 李若楠. 关键链项目调度方法研究评述[J]. 控制与决策, 2013, 28(9): 1281-1286.
(Zhang J W, Li R N. Review of critical chain project scheduling method[J]. Control and Decision, 2013, 28(9): 1281-1286.)
- [12] 张俊光, 冉文娟, 贾赛可, 等. 关键链项目缓冲设置研

- 究述评与展望[J]. 管理评论, 2017(12): 195-203.
(Zhang J G, Ran W J, Jia S K, et al. Review and prospect of buffer sizing of a critical chain project[J]. Management Review, 2017(12): 195-203.)
- [13] Peng W, Huang M. A critical chain project scheduling method based on a differential evolution algorithm[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(13): 3940-3949.
- [14] Newbold R C. Project management in the fast lane—Applying the theory of constraints[M]. Boca Raton: The St Lucie Press, 1998: 65-73.
- [15] 单汨源, 刘永, 任斌, 等. 基于不确定因素视角的关键链缓冲区研究[J]. 软科学, 2009, 23(8): 26-29.
(Shan M Y, Liu Y, Ren B, et al. Research on critical chain buffer based on the perspective of uncertainties[J]. Soft Science, 2009, 23(8): 26-29.)
- [16] 崔南方, 赵雁, 胡雪君. 鲁棒性项目调度中缓冲设置方法[J]. 控制与决策, 2014, 29(2): 368-372.
(Cui N F, Zhao Y, Hu X J. Buffer management in robust project scheduling[J]. Control and Decision, 2014, 29(2): 368-372.)
- [17] Herroelen W, Leus R. On the merits and pitfalls of critical chain scheduling[J]. Journal of Operations Management, 2001, 19(5): 559-577.
- [18] 赵振宇, 吕乾雷. 项目进度控制的双边缓冲区方法研究[J]. 工程管理学报, 2010, 24(5): 559-563.
(Zhao Z Y, Lv Q L. Study on the double-buffering method for project schedule control[J]. Journal of Engineering Management, 2010, 24(5): 559-563.)
- [19] 徐小峰, 李想, 刘家国. 项目关键链资源计划进度偏差预警控制模型[J]. 系统工程学报, 2014, 29(6): 845-851.
(Xu X F, Li X, Liu J G. Schedule variance early-warning control model for project critical chain resource plan[J]. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(6): 845-851.)
- [20] Zhang J, Shi R, Diaz E. Dynamic monitoring and control of software project effort based on an effort buffer[J]. Journal of the Operational Research Society, 2015, 66(9): 1555-1565.
- [21] Hu X, Cui N, Demeulemeester E, et al. Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 249(2): 717-727.
- [22] Hu X, Cui N, Demeulemeester E. Effective expediting to improve project due date and cost performance through buffer management[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(5): 1460-1471.
- [23] Fang Y, Zhang J. Performance of control charts for auto regressive conditional heteroscedastic processes[J]. Journal of Applied Statistics, 1999, 26(6): 701-714.
- [24] Lipke W, Vaughn J. Statistical process control meets earned value[J]. Journal of Defense Software Engineering, 2000, 13(16): 16-20.
- [25] Leu S S, Lin Y C. Project performance evaluation based on statistical process control techniques[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2008, 134(10): 813-819.
- [26] Aliverdi R, Naeni L M, Salehipour A. Monitoring project duration and cost in a construction project by applying statistical quality control charts[J]. International Journal of Project Management, 2013, 31(3): 411-423.
- [27] Colin J, Vanhoucke M. A comparison of the performance of various project control methods using earned value management systems[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(6): 3159-3175.
- [28] Hyndman R J, Fan Y. Sample quantiles in statistical packages[J]. American Statistician, 1996, 50(4): 361-365.
- [29] Kolisch R, Sprecher A. PSPLIB-A project scheduling problem library[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 96(1): 205-216.
- [30] Ponsignon T, Mönch L. Simulation-based performance assessment of master planning approaches in semiconductor manufacturing[J]. Omega, 2014, 46(46): 21-35.

作者简介

胡雪君(1989—), 女, 副教授, 博士, 从事项目调度、关键链项目管理等研究, E-mail: xuejun_hu@hnu.edu.cn;

王建江(1986—), 男, 讲师, 博士, 从事项目调度、卫星调度、组合优化等研究, E-mail: jianjiangwang@nudt.edu.cn;

崔南方(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事项目管理、生产运作管理、供应链管理等研究, E-mail: nfcui@mail.hust.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)