DOI 编码：10.3969/j.issn.1672-884x.2020.06.015

基于活动弹性的关键链项目缓冲管理方法研究

张俊光 季 飞
（北京科技大学经济管理学院）

摘要：为提高项目的综合绩效，基于活动的运营成本进行缓冲确定。提出项目活动弹性的概念，用以表示项目活动适合被提取缓冲的大小，进而确定项目缓冲；在缓冲确定的基础上，提出累计缓冲的概念，并结合滚动期的设置，建立有良好缓冲再分配能力的缓冲监控模型。仿真结果显示：基于项目弹性进行缓冲确定可以大大减少预警频次，尤其是红色预警，并可以改变经典缓冲监控方法红色预警随着项目运行不断增加的趋势；相较于静态缓冲监控法和相对缓冲监控法，项目成本和综合绩效都有了极大的改进，因此能够有效地降低项目成本，保证项目的按时完工。

关键词：缓冲管理；活动弹性；累计缓冲；滚动期；缓冲再分配
中图法分类号：C93 **文献标志码**：A **文章编号**：1672-884X(2020)06-0924-07

Project Buffer Management Based on Activity Resilience

ZHANG Junguang JI Fei
(University of Science and Technology Beijing, Beijing, China)

Abstract: In order to improve the comprehensive performance of the project, the project buffer is determined based on the operating cost of activities. We therefore propose a new concept, Project resilience, to indicate and determine the buffer that should be taken from the activity duration. A buffer monitoring model with good buffer redistribution capability is next established based on the setting of rolling periods and the cumulative buffer. The simulation results show that the proposed method can significantly reduce the warning frequency, especially the red warning frequency, and can improve the adverse trend of traditional buffer monitoring methods that red warning frequency increases with the implementation of the project. Compared with the static buffer monitoring method and the relative buffer monitoring method, the project cost and the comprehensive performance of the proposed method are greatly improved. Therefore, it can effectively reduce the cost of the project and ensure the project completed on time.

Key words: buffer management; activity resilience; cumulative buffer; rolling period; reallocation

1 研究背景

GOLDRATT[1]于 1997 年将约束理论应用到项目管理领域，提出关键链项目管理理论(CCPM)及缓冲的概念，通过将活动的安全时间集中到项目尾部形成缓冲，以实现风险共担；并提出剪切粘贴法(C&PM)的缓冲确定方法及静态缓冲监控方法。在此基础上，后续学者在缓冲管理领域进行了大量的研究，从剪贴法和根方差法(RSEM)，再到基于排队论的缓冲确定方法，这些方法都是从项目工期的特性角度出发进行研究[2,3]，之后又提出基于项目属性的缓冲确定方法[4,5]。在应用方面，CCPM 被应用到不同的领域，如大型科研工程项目[6]、EPC(engineering procurement construction)项目[7]、施工类项目[8,9]以及不确定性较大的 IT 类项目[10]等。

近年来的研究进一步细化到基于项目活动特性的缓冲确定方法，具体的活动特性包括项目活动开工柔韧性、活动工期长短、活动成本大

收稿日期：2019-12-09
基金项目：国家自然科学基金资助项目(71572010,71701067)

小等因素[11,12]。但是，目前的缓冲确定方法研究尚存在如下不足：①不同项目活动的成本不同且不同项目阶段的成本也不相同，在缓冲确定时应充分考虑各个活动的成本属性；②项目活动的工期存在极限工期，也叫应急工期，其大小随着项目及活动的不同而不同。所以本研究基于这两个因素，利用项目活动弹性来确定适合提取的项目活动缓冲尺寸。在缓冲监控方面，现有的缓冲监控模型对项目的再计划方面研究不足，因此本研究提出累计缓冲的概念，并结合滚动期的设置来提高项目监控时的再计划能力。

本研究主要有以下几个创新点：①提出项目活动弹性的概念，根据活动弹性来衡量项目活动可以提取的缓冲大小，并在缓冲确定时考虑到成本的因素；②提出累计缓冲的概念，并结合滚动期的设置来提高项目缓冲监控的再计划能力；③将缓冲确定、缓冲分配和缓冲监控模型集成在一起，弥补了现有方法只考虑单一因素的不足，从而实现更为全面的缓冲管理。

2　文献综述

缓冲管理是关键链项目管理的两个核心问题之一，主要包括项目缓冲确定和项目缓冲监控两个方面[1]。在缓冲确定方面，HERROELEN 等[13]提出 C&PM 计算的缓冲区大小随着关键链的长度线性增加，可能导致无竞争力的提案和商业机会的损失；WEI 等[14]表示对所有任务应用 50% 的削减可能会不合理地缩短某些任务。为此，NEWBOLD[2]提出基于中心极限定理的根方差法。后续学者在此基础上进行了大量的研究，TUKEL 等[4]提出基于资源紧张度和网络复杂性的项目缓冲确定方法；刘士新等[15]基于资源受限项目调度理论与方法，设计了一种接驳缓冲确定方法；ZHANG 等[5]提出了基于综合资源紧张度的项目缓冲确定方法。在活动属性方面，ZHANG 等[16]提出考虑活动之间的相互依赖关系的缓冲确定方法；林晶晶等[17]提出基于工序不确定性的关键链缓冲设置方法；胡雪君等[18]提出基于活动工期风险和资源约束风险的缓冲计算方法；杨立熙等[19]考虑工序数大小、工序执行时间的不确定程度和开工柔性来进行缓冲确定。

在缓冲监控方面，GOLDRATT[1]提出静态缓冲监控法；LEACH[20]针对静态缓冲监控的不足，提出相对缓冲监控法；别黎等[21]考虑项目执行的动态环境，提出了一种关键链动态缓冲监控方法，通过动态地调整两个触发点的位置来监控项目实际进度和计划进度之间的差异；别黎等[22]引入项目进度风险分析方法中的活动敏感性信息，研究了动态环境下活动敏感性指标的计算和监控阈值的设定，提出基于活动敏感性信息的关键链动态缓冲监控方法；KUO 等[23]提出依据项目计划阶段确定缓冲大小，对缓冲量进行合理的分配并进行监控；HERROELEN 等[13]提出随着活动的完成，检查缓冲的消耗和剩余量，并据此采取相应的纠正措施；胡勇等[24]对软件项目的风险进行了预测；郭鹏等[25]建立了双模式风险预警机制；ZHANG 等[26]基于灰色预测模型提出偏差监测和控制模型，从而建立了动态缓冲监控模型；VANHOUCKE[27]建立了基于活动敏感性和网络拓扑信息的项目监控模型；HU 等[28]提出综合进度监测方法；胡雪君等[29]还针对现有缓冲监控机制存在的忽视活动层面不确定信息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。

综上，现有缓冲确定方法没有将不同活动加入的安全时间不同及成本不同等因素进行综合考量。而缓冲监控的再计划能力仍有待提高，且缓冲监控模型没有与缓冲确定方法相结合，而缓冲确定方法会影响到缓冲监控的频率和强度，应该综合来考虑。基于此，本研究拟将成本因素融入缓冲确定方法中，提出项目活动弹性概念来衡量项目可提取缓冲的大小；为提高项目缓冲监控的再计划能力，将累计缓冲结合滚动期的设置融入缓冲监控模型，便于缓冲的实时调整与监控。

3　基于活动弹性的项目缓冲确定

下面首先根据项目的工期和成本因素来确定项目活动弹性，然后根据项目活动的弹性确定项目缓冲。

3.1　项目活动弹性确定

项目活动包括正常工期和应急工期，正常工期是指在项目计划时所估计的项目正常完工时间；应急工期是指项目活动可能的最短的完工时间，即无论投入多少额外的资源，都不可能在比应急工期短的时间内完成这项活动。

正常工期和应急工期的差值为最大合理缓冲，活动提取的缓冲不应该超过最大合理缓冲。从正常工期压缩到应急工期会产生额外成本，可用压缩工期的单位时间成本来表示增加的成本[30]，即

$$AR_i = \frac{Cc_i - Cn_i}{Tn_i - Tc_i}, \tag{1}$$

式中，AR_i为活动 i 压缩工期的单位时间成本；Cc_i为活动 i 应急成本；Cn_i为活动 i 正常成本；Tn_i为活动 i 正常工期；Tc_i为活动 i 应急工期。

根据压缩工期的单位时间成本和项目提前完工奖励之间的差额，可以确定项目活动的合理压缩程度，即项目活动弹性。RP 为项目提前完工单位时间（如 1 天）的奖励。若 $AR_i-RP\leqslant 0$，说明该活动压缩工期的单位时间成本不大于项目提前完工奖励，则可提取全部的最大合理缓冲，项目活动弹性系数为

$$K_i=\frac{Tn_i-Tc_i}{Tn_i};\tag{2}$$

若 $AR_i-RP>0$，说明该活动压缩工期的单位时间成本大于项目提前完工奖励，则不能提取全部最大合理缓冲，项目活动弹性系数为

$$K_i=\frac{Tn_i-Tc_i}{Tn_i}\left(1-\frac{AR_i-RP}{AR_{\max}-RP}\right),\tag{3}$$

式中，K_i为第 i 个活动的活动弹性系数；$AR_{\max}$为所有活动中压缩工期的单位时间成本最大值；Tn_i-Tc_i为活动 i 的最大合理缓冲时间；$1-(AR_i-RP)/(AR_{\max}-RP)$为活动缓冲的成本校正系数。

3.2 项目缓冲确定

根据前文所确定的项目活动弹性系数，可知活动 i 的缓冲为

$$PB_i=Tn_i\cdot K_i。\tag{4}$$

根据活动缓冲公式，得出关键链的项目缓冲为

$$PB=\sum_{i=1}^{n}PB_i。\tag{5}$$

项目缓冲的提取考虑了各活动的可压缩程度并兼顾了成本因素。当用该方法来计算非关键链上的接驳缓冲时，可能会因为非关键链上的活动弹性系数较小，而导致非关键链的工期比关键链还长，这时应当舍弃原有关键链，将该非关键链作为新的关键链，因为活动弹性系数越小，越容易发生延迟，且应急成本也越高。

根据项目的活动弹性可以确定项目缓冲，以实现项目的风险共担。但不同项目可以风险共担的程度是不同的，因此本研究引入项目弹性概念来研究不同项目的弹性情况，项目弹性为

$$PK=\frac{\sum_{i=1}^{n}PB_i}{\sum_{i=1}^{n}T_i}=\frac{PB}{T},\tag{6}$$

式中，PK 为项目弹性系数；T 为项目的正常工期。

用根方差法和剪贴法计算的项目缓冲分别为 PB_1和 PB_2，则可以得出以下两个参数：$\alpha=PB_1/T$，$\beta=PB_2/T$。其中，α 为根方差法计算的项目缓冲与项目正常工作时间的比值；β 为用剪贴法计算的项目缓冲与项目正常工作时间的比值（假设 $\alpha<\beta$，反之亦然）。则可得到以下结论：①若 $0\leqslant PK<\alpha$，则说明项目基于活动弹性计算的项目缓冲小于根方差法计算的项目缓冲，即项目弹性较小，可以风险共担的项目缓冲较少，易发生项目延迟。但是如果采用根方差法计算的项目缓冲，则容易造成缓冲消耗过快，从而导致项目正常运营却警报频出的状况。②若 $\alpha\leqslant PK<\beta$，则说明项目基于活动弹性计算的项目缓冲大于等于根方差法计算的项目缓冲，但是小于剪贴法计算的项目缓冲，即项目弹性适中。③若 $\beta\leqslant PK<1$，则说明项目基于活动弹性计算的项目缓冲大于等于剪贴法计算的项目缓冲，即项目弹性较大，项目中活动的弹性很大，安全时间较多。

4 动态缓冲监控

下面根据前文所确定的缓冲，首先进行缓冲分配，然后基于所分配的缓冲进行预警触发点的设置和动态缓冲监控。

4.1 项目缓冲分配

根据活动弹性公式确定了项目缓冲后，以去除缓冲后的活动工期长短为权重分配项目缓冲，每个活动分配的缓冲为

$$PB'_i=\frac{Tn_i-PB_i}{T-PB}PB。\tag{7}$$

根据式(4)所计算的 PB_i有可能大于、等于或小于实际所需要的尺寸，这是因为项目缓冲并不只是根据项目活动的工期长短来确定的。本研究的缓冲确定方法考虑了不同项目活动的工期和成本因素，确定缓冲之后的活动工期在工期和成本因素上都处于同一水平，故缓冲分配只需根据活动工期的长短来进行。

4.2 缓冲监控触发点设置

针对分配的缓冲 PB'_i，将对每个活动分配到的缓冲设定两个触发点，此设定的目的是为了判断活动是否会延期以及是否采取应急措施。

当 $PB'_i\leqslant PB_i$时，触发点 a，b 分别为 $a=33\%\times PB'_i$，$b=66\%\times PB'_i$；当 $PB'_i>PB_i$时，触发点 a、b 分别为 $a=33\%\times PB_i$，$b=66\%\times PB_i$。上述式子以活动分配到的缓冲和被抽取的缓冲中的较小者为参照来设置触发点。当 $PB'_i\leqslant PB_i$ 时，即该活动分配到的缓冲小于等于该活动被抽取的缓冲，可以说明该活动的费率较低，尽快完成于项目有益；当 $PB'_i>PB_i$ 时，即该活动分配到的缓冲大于该活动被抽取的缓冲，可以说明该活动的费率较高，应急费用

较高，所以多分配缓冲，但是触发点设置以被抽取的缓冲为参照，是为了尽量少消耗缓冲，避免多分配的缓冲被当作安全时间而浪费掉。

4.3　动态滚动监控

本研究主要根据项目滚动期内累计缓冲消耗情况来进行缓冲的再分配，从而提高缓冲监控过程中的再计划能力。在活动实施过程中，有些活动可能会消耗的缓冲多一些，有的可能会消耗的少一些。本研究提出累计缓冲(APB)的概念，利用累计缓冲来对项目进行控制。当活动 i 结束以后，该活动的累计缓冲为

$$APB_i = PB'_i - PBA_i。\tag{8}$$

项目累计缓冲 APB 为

$$APB = \sum_{i=1}^{n} APB_i = \sum_{i=1}^{n} (PB'_i - PBA_i),\tag{9}$$

式中，PBA_i 为活动 i 实际运行中消耗的缓冲。可以看出，活动累计缓冲与项目累计缓冲可能为正也可能为负，项目累计缓冲的值即为项目完工的提前量或者延迟量。

通过对项目设置滚动期，建立滚动计划来实现对项目的动态滚动监控。滚动期的设定可以根据项目的实际情况，参考项目的弹性大小来进行。例如，可以设置一周或一个月为一个滚动期。若某项目第一期共 6 个月，设定一个月为一个滚动期，并据此制定缓冲监控计划。在经过一个月的滚动期以后，根据计划与实际的差异，并参照计划修正因素(如差异分析、环境变化、方针变化等)来细化后面 5 个月的缓冲监控计划。在此基础之上，根据项目累计缓冲来确定是否更改下一个滚动期各活动的分配缓冲，主要有以下两种可能的情况：①$APB \geqslant 0$，即活动完成情况良好，项目缓冲计划不需因项目累计缓冲变化而改变；②$APB < 0$，即活动完成情况不好，发生了延期，后一个滚动期的项目缓冲计划需更改，共同分担项目累计缓冲的负值。从而得到项目后期的工期计划：各滚动期的工期计划会随着工期的临近逐渐细化，其中项目后期的工期计划的缓冲分配，会根据项目前期的累计缓冲量进行再分配。通过滚动期和累计缓冲的设置，形成良好的缓冲消耗反馈和缓冲再分配再计划机制。

5　案例分析

为了验证本研究方法的有效性，将该方法与经典的缓冲管理方法进行对比，缓冲确定方法对比根方差法，缓冲监控方法对比静态缓冲监控法和相对缓冲监控法。本研究选择的案例关键链上共有 10 个活动，总的计划工期为 168 天，计划成本为 1 242 000，该项目的原型为《项目计划与控制》中时间-成本平衡法的案例[30]。相关基础数据见表 1，项目提前完工奖励 RP＝6 000/天。

案例的选择上把项目关键链上的活动控制在 10 个，原因如下：①项目缓冲确定方法尤其是根方差法，尾部集中需要保证活动数大于 4；②本研究方法考虑了累计缓冲和滚动监控，项目活动过少很难体现出这两点的作用。为了便于仿真数据处理，本研究将案例的 10 个关键链活动划分为 10 个滚动期。支链部分的接驳缓冲可以保护主链的活动，所以在案例仿真模拟部分不考虑支链的影响。

表 1　关键链项目基础数据

活动序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
正常工期 Tn_i	8	8	12	24	36	28	20	8	16	8
正常成本 Cn_i	36 000	24 000	120 000	144 000	270 000	224 000	200 000	40 000	128 000	56 000
应急工期 Tc_i	3	4	8	20	16	12	12	3	6	4
应急成本 Cc_i	96 000	48 000	152 000	216 000	460 000	408 000	320 000	90 000	268 000	96 000
平均费率 AR_i	12 000	6 000	8 000	18 000	9 500	11 500	15 000	10 000	14 000	10 000

5.1　相关数据计算

基于表 1 中的数据，根据项目活动弹性公式，可以算出项目每项活动的活动弹性系数，并得出项目活动缓冲，进而确定项目缓冲，相关数据见表 2。

表 2　活动弹性及缓冲

活动序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
活动弹性 K_i	0.31	0.5	0.28	0	0.39	0.31	0.1	0.42	0.21	0.33
活动缓冲 PB_i	3	4	3	0	14	9	2	3	3	3
实际工期 T_i	5	4	9	24	22	19	18	5	13	5

根据表 2 可以算出项目的计划工期为 168 天，其中项目工期为 124 天，项目缓冲为 44 天。而根据根方差法计算的结果为缓冲 30 天，工期 84 天。根据本研究中的缓冲确定方法对缓冲进行分配，结果见表 3。

表 3　缓冲分配相关数据

活动序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实际工期 T_i	5	4	9	24	22	19	18	5	13	5
活动缓冲 PB_i	3	4	3	0	14	9	2	3	3	3
缓冲分配 PB'_i	1.77	1.42	3.19	8.52	7.81	6.74	6.39	1.77	4.61	1.77

由表 3 可知，每个活动被提取的缓冲和分配的缓冲并不相同。经计算可得，静态缓冲监控法

中绿色缓冲区、黄色缓冲区及红色缓冲区所分配的缓冲都各为 10 天。而相对缓冲监控方法随着完工率的变化，将缓冲分为 3 个部分，绿色缓冲区通过(0，15%×30)、(100%，75%×30)两点确定的直线分割，红色缓冲区通过(0，30%×30)、(100%，90%×30)两点确定的直线分割。

5.2 仿真过程及结果分析

获得了上述基础数据后，通过 Matlab 来对 3 种缓冲监控方式进行 1 000 次仿真；最后得出 3 种缓冲监控方式相对应的工期表现、成本表现以及产生的预警次数，并进行分析比较。为了体现滚动监控的作用，本研究将案例中的每个活动按照一个滚动期来做仿真，这样不断形成累计缓冲，通过再分配去体现滚动监控的作用。

5.2.1 仿真的数据处理

本研究假设项目活动工期服从对数正态分布[1]，对项目工期、预警频次和项目成本的进行 1 000 组仿真模拟。另外，为了避免产生个别极值数据干扰仿真的结果，将每个活动的最大工期限制在正常工期的 150%。

3 种缓冲监控方法的缓冲区都由 3 部分构成，绿色缓冲区、黄色缓冲区和红色缓冲区。本研究设定活动进入绿色缓冲区的部分不采取行动，工期不变，成本不变；进入黄色缓冲区的部分进度加快为计划工期的 1.5 倍，成本为在黄色缓冲区完成工程量的百分比乘以正常成本的 1.5 倍；进入红色缓冲区的部分进度加快为计划工期的 2 倍，成本为在红色缓冲区完成工程量的百分比乘以正常成本的 2 倍，充分体现使用不同的缓冲所带来的成本不同。

5.2.2 仿真结果与分析

本研究的仿真结果从预警频次、项目工期和成本 3 个方面对不同的缓冲管理方法进行有效性评估。

(1)**预警频次** 本研究经过 1 000 次仿真模拟后，所得 3 种方法的预警表现分别见表 4～表 6。由表 4 可见，静态缓冲监控的黄色预警和红色预警呈现递增的情况，因为缓冲设定为定值且监控模型不具备再计划能力，而相对缓冲监控的情况有了一定的改善。

表 4 静态缓冲监控

活动序号	不使用缓冲	绿色缓冲区	黄色缓冲区	红色缓冲区
1	525	475	0	0
2	531	449	20	0
3	491	367	142	0
4	524	145	263	68
5	532	44	208	216
6	524	40	145	291
7	521	33	108	338
8	540	35	118	307
9	514	15	93	378
10	520	22	90	368

由表 5 可见，相对缓冲监控法在缓冲分配上有了极大的改善，3 个缓冲区的预警数据也较静态缓冲监控法有了较大的改善；但是仍然存在初始缓冲确定不合理的情况(如活动 3、4、7 的情况没有改善)，且红色预警递增的趋势仍未改变。

表 5 相对缓冲监控

活动序号	不使用缓冲	绿色缓冲区	黄色缓冲区	红色缓冲区
1	525	431	44	0
2	531	388	79	2
3	491	321	158	30
4	524	172	162	142
5	532	133	110	225
6	524	175	76	225
7	521	212	56	211
8	540	296	36	128
9	514	228	41	217
10	520	284	33	163

由表 6 可见，本研究缓冲监控方法在不使用缓冲的数据上有较大改善，说明本研究的缓冲确定方法更为合理；另外，本研究方法的黄色预警和红色预警都呈现出递减的状态，说明滚动监控起到了缓冲再分配的良好作用。

表 6 缓冲监控

活动序号	不使用缓冲	绿色缓冲区	黄色缓冲区	红色缓冲区
1	676	0	93	231
2	531	185	31	253
3	749	94	63	94
4	908	57	21	14
5	532	371	34	63
6	670	287	18	25
7	833	162	3	2
8	666	332	2	0
9	758	238	2	2
10	645	353	0	2

综上，本研究的缓冲确定模型在考虑了应急工期的情况下更为合理，在不考虑应急工期时，此方法在不使用缓冲的次数方面和绿色预警的次数方面的表现也有大幅改善；另外，本研究的监控方法有效地使黄色预警和红色预警频次呈现递减的趋势，而不像静态缓冲监控法和相对缓冲监控法，呈现黄色预警中期偏高、红色预警不断增加的趋势，证明了此方法的有效性。

(2)**成本与综合绩效** 3 种缓冲管理方法的成本对比见图 1，是否考虑应急工期的两组数据仿真结果相类似，故这里仅给出考虑应急工期的数据。由图 1 可知，本研究的缓冲监控方法在成本上有较大的优势，静态缓冲监控法的成本均值为 1 731 500，相对缓冲监控法的成本均值为 14 931 00，本研究的分散式累计滚动

缓冲监控的成本均值为 1 271 500，而该项目的计划成本为 1 242 000。

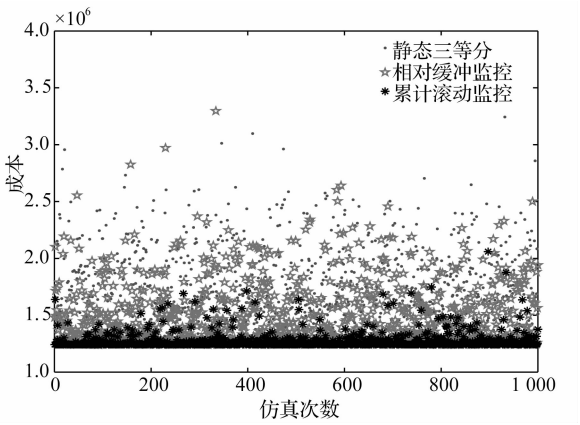


图 1　3 种缓冲监控方法的成本对比

本研究考虑了项目提前完工奖励，将工期因素转化为成本因素，考虑项目工期因素的 3 种缓冲管理方法的综合绩效对比见图 2。由图 2 可知，在考虑项目工期因素后，静态缓冲监控法的综合绩效为 1 673 300，相对缓冲监控法的综合绩效为 1 463 700，本研究缓冲管理方法的综合绩效为 1 271 500。以本研究缓冲管理方法的综合绩效值为参照，将静态缓冲监控和相对缓冲监控的 1 000 组综合绩效值与之对比（见图 3）。结合图 1，由图 3 可知，从成本均值

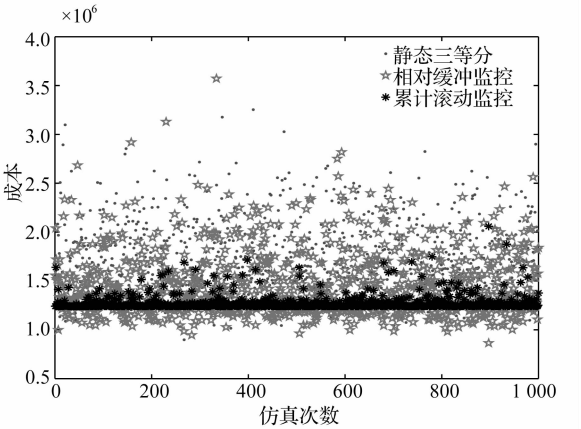


图 2　3 种缓冲监控方法的综合绩效对比

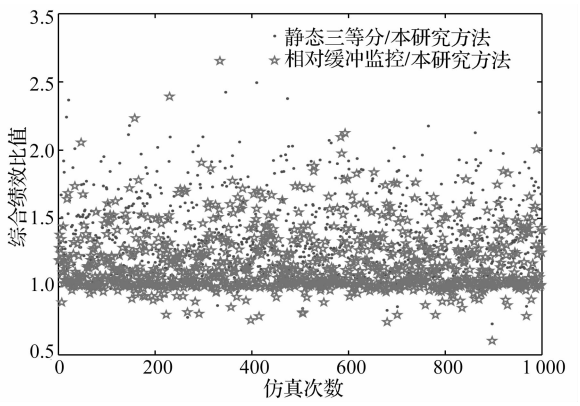


图 3　综合绩效相对值对比

角度来讲，相对于本研究的缓冲管理方法，静态缓冲监控法的成本均值增加了 36.17%，相对缓冲监控法的成本均值增加了 17.43%。在综合考虑工期因素后，相对于本研究的缓冲管理方法，静态缓冲监控法的综合成本均值增加了 31.60%，相对缓冲监控法的综合成本均值增加了 15.12%。另外，在 1 000 次仿真中，静态缓冲监控法的综合成本只有 21 次低于本研究的缓冲管理方法，相对缓冲监控法的综合成本有 125 次低于本研究的缓冲管理方法。

综上所述，本研究的缓冲管理方法在综合成本上有较大的优势。原因可归纳为以下两点：①本研究的缓冲确定方法考虑了应急工期和应急成本因素，因此提取的缓冲更加合理，且提取的缓冲更多来自成本相对低的活动；②本研究的累计缓冲结合滚动期的设置，使得缓冲能够及时地再分配，有效地减少了黄色和红色预警频次，大幅降低了成本。

6　结语

本研究提出了基于活动弹性的缓冲确定模型，以及基于累计缓冲和滚动期设置的缓冲监控模型，两个模型的结合可以使得项目在运行过程中大大减少错误预警。静态缓冲监控法和相对缓冲监控法的仿真工期提前的原因，正是不正常的预警导致工期盲目加快，从而大幅增加了项目运营成本。本研究的缓冲确定和监控模型在相互配合情况下，有效地提前了工期，并且减少了多余的错误预警，大幅度降低了成本。另外，本研究模型使得红色预警和黄色预警随着项目运行逐渐降低，这对项目意义重大，因为项目中后期阶段也正是资源集中投入的时候，需要有效地保证项目平稳正常运营。

本研究的不足之处在于没有考虑项目活动的开工柔韧性。在对关键链缓冲的研究中，资源缓冲的研究还很匮乏，而资源的及时供应才能使得项目活动正常展开，这与项目活动的开工柔韧性密切相关；另外，资源的过早等待也会产生额外的库存缓冲，这又将资源缓冲与库存管理、采购管理进行了联系。鉴于此，本研究后续将结合项目活动的开工柔韧性，对资源缓冲、资源预警机制进行探究。

参　考　文　献

[1] GOLDRATT E M. Critical chain[M]. Great Barrington: The North River Press Publishing Corporation, 1997.

[2] NEWBOLD R C. Project management in the fast

lane: applying the theory of constraints[M]. Boca Raton: The St. Lucie Press, 1998.

[3] RADOVILSKY Z D. A quantitative approach to estimate the size of the time buffer in the theory of constraints[J]. International Journal of Production Economics, 1998, 55(2): 113-119.

[4] TUKEL 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.

[5] 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.

[6] 张光军,姚泽坤,刘人境,等.风险导向下的关键链多项目能力约束缓冲设置方法[J].科技管理研究,2018,38(23):198-203.

[7] 刘书庆, 罗丹, 刘佳, 等. EPC 项目关键链缓冲区设置模型研究[J]. 运筹与管理, 2015, 24(5): 270-280.

[8] SARKAR D, JHA K N, PATEL S. Critical chain project management for a highway construction project with a focus on theory of constraints[J/OL]. International Journal of Construction Management, 2018: 1-14. https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1512031.

[9] 王乾坤, 冯海洋, 杨蜜, 等. 基于 BIM 的关键链进度预警系统研究[J]. 建筑经济, 2018,39(2): 27-32.

[10] KE S. A new critical chain project management based on social network and software maturity model [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1087(3): 032027.

[11] YANG L, FU Y, LI S, et al. A buffer sizing approach in critical chain scheduling with attributes dependent[C]//4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian: IEEE, 2008: 1-4.

[12] 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.

[13] HERROELEN W, LEUS R. On the merits and pitfalls of critical chain scheduling[J]. Journal of Operations Management, 2001, 19(5): 559-577.

[14] WEI C C, LIU P H, TSAI Y C. Resource-constrained project management using enhanced theory of constraint[J]. International Journal of Project Management, 2002, 20(7): 561-567.

[15] 刘士新, 宋健海, 唐加福. 资源受限项目调度中缓冲区的设定方法[J]. 系统工程学报,2006,21(4):381-386.

[16] ZHANG J, SONG X, DÍAZ E. Buffer sizing of critical chain based on attribute optimization[J]. Concurrent Engineering, 2014, 22(3): 253-264.

[17] 林晶晶, 周国华, 杨琴, 等. 考虑资源可替代性的关键链调度方法研究[J]. 管理学报, 2010, 7(8): 1233-1236, 1241.

[18] 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.

[19] 杨立熙, 李世其, 黄夏宝, 等. 属性相关的关键链计划缓冲设置方法[J]. 工业工程与管理, 2009,14 (1): 11-14.

[20] LEACH L P. Critical chain project management [M]. Norwood:Artech House, 2014.

[21] 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.

[22] 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.

[23] KUO T C, CHANG S H, HUANG S N. Due-date performance improvement using TOC's aggregated time buffer method at a wafer fabrication factory [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36 (2): 1783-1792.

[24] 胡勇, 贺晓娟, 黄嘉星, 等. 软件项目风险的神经网络预测模型[J]. 管理学报, 2010, 7(3):391-394.

[25] 郭鹏, 潘女兆, 赵静. 高新技术项目组合的双模式风险预警机制研究[J]. 管理学报, 2011, 8(10): 1524-1529.

[26] 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.

[27] VANHOUCKE M. Using activity sensitivity and network topology information to monitor project time performance[J]. Omega, 2010, 38(5): 359-370.

[28] 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.

[29] 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/OL]. 控制与决策,2019. https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1195.

[30] 卢向南. 项目计划与控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

(编辑 桂林)

通讯作者: 张俊光(1972~),男,山东青岛人。北京科技大学(北京市 100083)经济管理学院教授、博士研究生导师。研究方向为关键链项目管理。E-mail:zhangjg@ustb.edu.cn