

## 基于活动工期风险和资源约束风险的缓冲大小计算方法

胡雪君<sup>1</sup>, 崔南方<sup>1</sup>, 赵雁<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 管理学院, 武汉 430074; 2. 中南财经政法大学 工商管理学院, 武汉 430073)

**摘要:** 提出一种不确定情况下考虑活动工期风险和资源约束风险的缓冲大小计算方法. 首先, 运用贝叶斯网络技术分析关键风险因素, 评估其造成的活动工期风险; 其次, 通过资源流网络方法衡量资源约束风险, 进而提出合理的缓冲配置方法以构建稳定的关键链调度计划. 通过算例分析和比较研究, 验证了所提出方法兼具有效性和实用性, 能够在保证较高按时完工率的同时, 有效缩短项目工期并保持进度计划稳定.

**关键词:** 关键链缓冲管理; 缓冲大小设置; 工期风险; 资源约束; 贝叶斯网络

中图分类号: F224

文献标志码: A

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

HU Xue-jun<sup>1</sup>, CUI Nan-fang<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>2</sup>

(1. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Business Administration, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China. Correspondent: HU Xue-jun, E-mail: huxuejun0626@hust.edu.cn)

**Abstract:** A buffer sizing method considering the activity duration risk as well as the multi-resource constraint risk under uncertainty is proposed. First of all, the key risk factors are identified and the activity duration risk is effectively assessed by using Bayesian networks. Then, the resource constraint risk is appropriately determined by using the resource flow networks. And a reasonable buffer sizing approach is developed for the construction of a stable critical chain scheduling plan. A numerical example is given to illustrate the effectiveness and practicability of the proposed method which is capable of maintaining the schedule stability with a short project makespan, while ensuring a high on-time completion rate.

**Keywords:** critical chain buffer management; buffer sizing; duration risk; resource constraint; Bayesian network

### 0 引言

当前市场环境快速变化且竞争愈发激烈, 项目特别是大型工程项目外部所涉及的不确定性和风险不断增大, 项目本身的结构和规模日趋复杂, 对稀缺资源的竞争逐渐加剧, 导致越来越多的项目难以按期完工, 传统的项目计划和调控方法已经不能满足现代项目进度管理的需求<sup>[1]</sup>. 为此, Goldratt<sup>[2]</sup>将约束理论(TOC)应用于项目管理领域, 提出了关键链缓冲管理方法(CC/BM), 提供了一套包括计划、执行和控制的综合管理理论, 引起企业界和学术界的广泛关注<sup>[3-7]</sup>, 将其应用于工程建筑项目已经取得了良好绩效<sup>[8]</sup>. 其中, 缓冲的大小设置和监控方法决定着项目计划完工期及项目进度风险, 成为CC/BM最核

心的内容之一<sup>[9-10]</sup>. 确定缓冲区大小的经典方法主要有Goldratt<sup>[2]</sup>提出的剪切法和Newbold<sup>[11]</sup>提出的根方差法, 之后很多学者针对这两种方法进行了对比研究, 并综合考虑了不同影响因素(如项目网络特征、资源紧张度、管理者风险偏好、工序执行时间及开工柔性等), 提出了多种改进的缓冲设置方法<sup>[9, 12-14]</sup>.

以上方法都各有其合理性, 但是总体来说仍存在以下局限:

1) 以根方差法为基础的改进方法是基于概率论的, 其对于活动方差的计算主要依赖于项目经理对活动工期不确定性的主观判断, 没有针对性和普适性, 不能客观度量不同活动不同工期的风险程度.

2) 从工期的不确定性角度设置缓冲, 没有考虑到

收稿日期: 2015-07-21; 修回日期: 2015-10-22.

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); 湖北物流发展研究中心项目(2015a05).

作者简介: 胡雪君(1989—), 女, 博士生, 从事项目调度、关键链项目的研究; 崔南方(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事项目调度、生产运作管理等研究.

活动之间因风险因素影响而形成的相关性,而这种活动工期的相关性对项目总的工期会产生影响,风险是导致活动工期变动的根本原因<sup>[15]</sup>,确定缓冲大小时应考虑将不确定性应对转化为风险管理。

3) 现有方法在考虑资源因素设置缓冲时,仅从资源利用的角度分析,即考虑需求量与可用量之比(需求强度),而未针对特定项目计划网络从整体上考虑每种资源的分配关系可能造成资源受限的情况。

在建筑工程项目领域,风险管理的必要性深入人心,且取得了一定的管理经验,一般来说是通过评估风险因素发生的概率及对项目绩效的影响,采取有效的风险应对策略以消除或降低风险后果,保证项目按期完工。然而,多数风险管理技术,如模糊方法、混合定性/定量评估等方法在实践中的应用并不成功,因为项目团队通常太专注于解决当前问题即完成任务,而没有足够的时间去考虑(更不用说去执行)具体的风险对策。在CC/BM理论框架下,强调将风险评估结果融入对活动工期的影响,通过插入时间缓冲制定包含了不确定性的预应式项目调度计划,缓冲的设置充分体现了风险聚合原理,增强了项目系统的稳定性。因此,本文主要针对建筑工程项目,提出一种综合考虑活动工期风险和资源约束风险的关键链缓冲区大小的计算方法,以达到项目时间管理的两大目标,即保证按期完工和保持进度稳定,从而更好地管理项目进度风险。

## 1 缓冲区大小影响因素度量方法

### 1.1 基于BN的活动工期风险评估

每个活动相关的风险因素不同,风险发生的概率不一样,对活动工期的影响程度也不一样,不同的活动根据其工期风险水平应该具备不同级别的不确定性与重要度,缓冲计算应当对这种区别予以考虑。对此,文献[16]曾提出根据“风险时间量=风险概率×时间后果”为软件项目配置缓冲,这种简单的乘积法则远远不能满足现代工程项目网络复杂度高、资源依赖性强、风险因素更多的现实环境,基于风险的缓冲表达亟需更为合理的技术工具。

近年来,国内外有越来越多的学者将贝叶斯网络(BN)方法应用于建筑工程项目的风险分析与评价中,为管理者决策提供可靠的定量依据<sup>[17]</sup>。BN方法通过图形模型来描述一系列变量及其因果关系,使用概率论来处理各变量之间因条件相关而产生的不确定性,可以将专家意见及先验知识融入现有数据进行分析推理,并且具有基于变化信息而更新事件的能力,可以大大降低多变量统计问题的复杂性。BN的这些特性为本文考虑风险进行缓冲设置提供了可能性与良

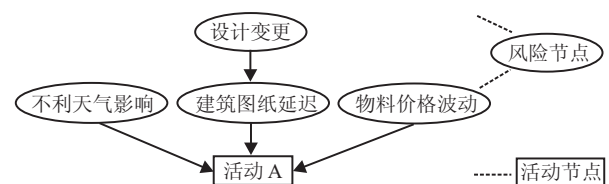
好接口。

不同于以往CC/BM采用活动工期估计的平均值/中值作为计划工期,本文以活动 $i(i=1,2,\dots,N)$ 在理想工作条件(无风险情况)下的完成时间 $d_i^*$ (称为“理想工期”)为基础来评估风险变量对活动执行时间的影响后果。具有类似风险结构的活动,被称之为为一组“活动群”,活动群的预先识别可以大大便利风险分析过程。然后,为每个活动群构建基于贝叶斯网络的进度风险描述图(SRBN),以反映并解决各种不确定性及相关关系,从而得到定量结果,具体分为以下两个阶段。

#### 1) 贝叶斯结构学习。

这一阶段的目标是确定各活动群受风险影响的贝叶斯网络结构,为每个活动节点 $i$ 赋予属性——活动工期风险,描述为“风险影响下活动预计工期超出理想工期的程度”,将其分为“低”、“中”、“高”3个状态,分别表示超出理想工期 $d_i^*$ 的0~20%、20~50%和50%以上,所对应的风险后果即体现在活动理想工期的延迟程度上,记为 $w_j d_i^*$ ( $j=1,2,3$ )。其中: $w_1 \in (0,0.2]$ , $w_2 \in (0.2,0.5]$ , $w_3 \in (0.5,1]$ ,权重 $w_j$ 的具体数值可根据项目整体所处的风险环境、项目负责人/决策者的风险偏好以及工作团队素质等因素确定。

其他各风险节点均赋予两种状态,即“发生yes”与“不发生no”。以某活动A为例,图1显示了影响该活动实际执行时间的风险网络结构。



#### 2) 贝叶斯参数学习。

这一阶段的目标是根据经验数据及专家评估,给出SRBN图各非根节点风险的条件概率,进而评估每个活动3个工期风险等级的发生概率,记为 $p_i^j(j=1,2,3)$ 。仍以活动A为例,表1示例了评估其非根节点风险“建筑图纸延迟”条件概率的过程,属性节点“活动工期风险”(同时也是非根节点)的条件概率评估过程与此类似。运用BN软件工具MSBNx(<http://research.microsoft.com/en-us/um/redmond/groups/adapt/msbnx/>)输入各根节点风险的先验概率,即可计算出各活动的工期风险概率结果 $p_i^j$ 。

综上,BN将定性分析与定量处理相结合,能对风险产生机制中的因果关系进行可视化建模,将风险发生概率与风险后果相统一,并通过风险变量衡量出活

表 1 评估风险节点“建筑图纸延迟”条件概率示例

父节点(如果) “设计变更”	子节点“建筑图纸延迟”	
	Yes	No
状态	Yes	0.8
	No	0.1

动之间的相关性. SRBN 图的构建以及工期风险的评估, 能够使管理者首先明确关键风险因素和高风险的关键活动, 利于在项目执行过程中予以重点监控; 其次在设置缓冲区大小时, 对具有不同程度工期风险的活动区别对待, 从而制定更符合项目实际的 CC/BM 进度计划.

### 1.2 资源约束对缓冲区大小影响的度量方法

现有文献在考虑资源因素对缓冲区大小的影响时, 通常选取紧张度最大的那种资源, 影响系数定义为

$$r = \max_k \frac{\sum_i d_i r_i^k}{R^k T}. \quad (1)$$

其中:  $r_i^k$  为活动  $i$  对可更新资源  $k$  的需求量,  $R^k$  为资源  $k$  的供应限量,  $d_i$  为活动  $i$  的计划工期,  $T$  为关键链的长度<sup>[12]</sup>. 这一定义在计算缓冲时(调整系数为  $1+r$ )对所有活动一视同仁, 而在实际应用中, 每种资源的受限程度可能不同, 活动对多种资源的需求强度也表现出差异, 这两方面都会影响到关键链计划的顺利执行, 归为“资源约束风险”. 一方面, 活动对资源的需求强度可以用资源利用系数  $u_i^k$  表示, 即

$$u_i^k = \frac{r_i^k}{R^k}. \quad (2)$$

另一方面, 为了衡量每种资源的受限程度, 本文从资源分配的角度进行探索. 首先针对插入缓冲之前的初始调度计划建立资源流网络  $G'$ , 对此学者们提出了多种方法, 具体可参见文献[18-19]. 据此, 识别因任意资源流动关系而产生的额外约束, 总的数量记为  $NUM_{G'}$ , 将仅由资源  $k$  造成的额外约束关系的数量记为  $NUM_{G'}^k$ , 原项目网络  $G$  的紧前约束数量记为  $NUM_G$ , 则资源  $k$  的受限度  $r^k$  可以描述为基于该资源的约束关系占项目总约束关系  $G \cup G'$  的比例, 即

$$r^k = \frac{NUM_{G'}^k}{NUM_G + NUM_{G'}} = \frac{NUM_{G'}^k}{NUM_{G \cup G'}}. \quad (3)$$

显然,  $u_i^k$  越大, 表明活动  $i$  越可能受到第  $k$  种资源限制的影响;  $NUM_{G'}^k$  越大即  $r^k$  越大, 表示真正形成某资源约束关系的可能性越大, 即表明项目的第  $k$  种资源受限程度越高. 进而定义活动  $i$  的资源风险系数为

$$RRI_i = \sum_k u_i^k r^k. \quad (4)$$

$RRI_i$  越大, 说明该活动越容易因资源不能及时提供而延误, 所以针对该活动的缓冲量就要设置越大.

这一定义的理论合理性将以工程建设项目网络为例分两种情况作进一步说明:

1) 假设 3 种资源的可用量为  $[R^1, R^2, R^3] = [7, 7, 7]$ , 则可以得到

$$\begin{aligned} NUM_{G \cup G'} &= 29, \\ [NUM_{G'}^1, NUM_{G'}^2, NUM_{G'}^3] &= [17, 10, 9]. \end{aligned}$$

2) 假设 3 种资源的可用量为  $[R^1, R^2, R^3] = [7, 7, 18]$ , 则可以得到

$$\begin{aligned} NUM_{G \cup G'} &= 23, \\ [NUM_{G'}^1, NUM_{G'}^2, NUM_{G'}^3] &= [16, 11, 0]. \end{aligned}$$

显然, 第 1 种情况下资源 3 不怎么受限, 第 2 种情况下资源 3 根本不受限(因为资源 3 没有产生任何额外的资源约束关系), 在项目执行过程中不会造成资源冲突风险, 而采用其他文献(如文献[12]或者文献[14])的资源影响度量方法, 则不能很好地表现出多资源环境下的这一差异.

## 2 缓冲区大小计算方法

基于 1.1 节工期风险评估结果和 1.2 节资源风险度量方式, 本文提出了新的缓冲计算方法. 首先, 将“低”风险纳入理想工期加以直接保护, 令

$$d_i = (1 + p_i^1 w_1 d_i^*). \quad (5)$$

以  $d_i$  作为活动计划工期(基础/排程工期), 构建关键链基础调度计划(BS). 决定项目工期的最长链即为关键链(CC), 在 CC 末尾加入项目缓冲(PB), 在非关键链(NCC, 假设有  $h$  条)与 CC 交汇处设置接驳缓冲(FB), 各个缓冲的大小由链上活动“中”、“高”级别的期望风险量之和以及资源风险系数决定, 计算公式如下:

$$PB = \sum_{i \in CC} (1 + RRI_i)(p_i^2 w_2 + p_i^3 w_3) d_i^*, \quad (6)$$

$$FB_h = \sum_{i \in NCC_h} (1 + RRI_i)(p_i^2 w_2 + p_i^3 w_3) d_i^*. \quad (7)$$

以上缓冲设置方法的理由如下:

1) 若仅以理想工期  $d_i^*$  进行项目基础排程, 则即使插入了缓冲, 项目执行中绝对的不确定性仍会导致活动频繁超期, 实际进度与 BS 出现较大偏离, 造成项目执行人员紧张甚至引起混乱; 同时, 如果将所有或者绝大部分风险都加入排程工期也是不明智的, 因为风险及其影响后果都是概率事件, 没有必要进行百分之百的保护. 所以本文仅将“低”风险纳入理想工期, 而将“中”、“高”级别的风险聚合为时间缓冲以保护计划的顺利执行.

2) 实践经验表明, 通过直接估计活动工期分布函数或分布参数来评估时间不确定性是很困难的<sup>[15]</sup>, 估计出来的缓冲也不准确. 而本文是通过估计风险的发

生概率并将其影响定量反映至活动工期来评估活动工期的风险概率分布,将工期的不确定性与客观风险联系起来,而不是受风险影响的活动本身,从而对不确定性的描述更为具体、可信。

3) 资源风险系数  $RRI_i$  从多资源受限度和活动资源利用率两个角度,实现了针对不同活动进而针对不同链路的缓冲设置具体化,可以更合理地反映不同 NCC 链路执行时可能造成的与 CC 链的资源冲突强度,并将其影响区别化地融入各个缓冲区大小的设置中。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例介绍

为了说明所提出方法的缓冲大小计算过程,本文选取一个小型建设工程项目作为算例,该项目包含 11 个活动,用到 3 种可更新资源(员工、机器、物料),每种资源的限量分别都为 7 个单位,项目网络、各活动的工期和资源参数如图 2 所示。

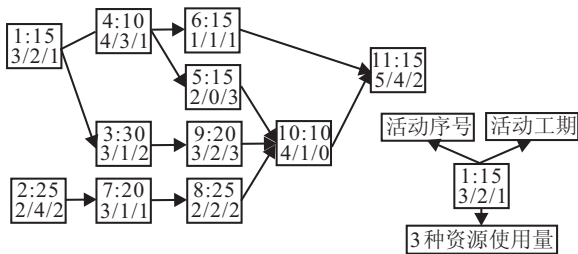


图 2 建设工程项目网络图

首先运用 BN 方法确定各活动群受风险因素影响的 SRBN 图,基础风险变量的识别可以运用头脑风暴法、文件评审法、德尔菲法等,或者采取同承包商协商、访问风险管理数据库等方式。以活动 10 为例,图 3 显示了其风险贝叶斯结构与参数学习过程。

然后,采用分支定界法<sup>[20]</sup>生成同时考虑工艺约束与资源约束的初始调度计划 S,基于 S 采用文献<sup>[18]</sup>所提出的资源流网络算法,得到  $NUM_{G \cup G'}$  =

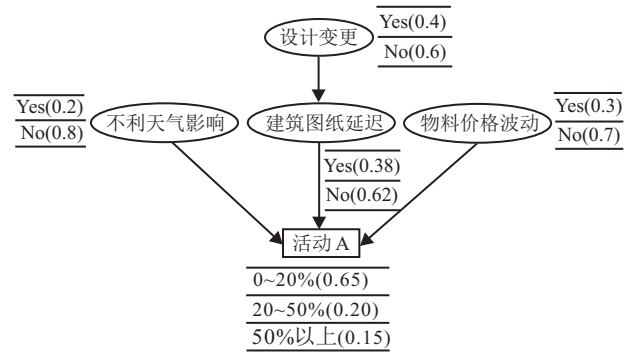


图 3 活动 10 的 SRBN 图评估结果

29,  $[NUM_{G'}^1, NUM_{G'}^2, NUM_{G'}^3] = [17, 10, 9]$ , 则 3 种资源的受限度分别为

$$r^1 = \frac{17}{29}, r^2 = \frac{10}{29}, r^3 = \frac{9}{29}.$$

仍以活动 10 为例,该活动对 3 种资源的资源利用系数分别为

$$u_{10}^1 = \frac{r_{10}^1}{R^1} = \frac{3}{7}, u_{10}^2 = \frac{r_{10}^2}{R^2} = \frac{2}{7}, u_{10}^3 = \frac{r_{10}^3}{R^3} = \frac{3}{7}.$$

根据式(4)计算活动 10 的资源风险系数为

$$RRI_{10} = \sum_k u_{10}^k * r^k = \frac{3}{7} \times \frac{17}{29} + \frac{2}{7} \times \frac{10}{29} + \frac{3}{7} \times \frac{9}{29} = 0.38.$$

本文取  $[w_1, w_2, w_3] = [0.2, 0.4, 0.6]$ , 最终得到各活动的工期风险和资源风险系数结果如表 2 所示。

最后,采用文献<sup>[6]</sup>的算法识别 CC、NCC, 计算各个缓冲区大小(式(6)、(7)), 计算结果见表 3 第 1 行, 得到 CC/BM 基础调度计划 BS 如图 4 所示。

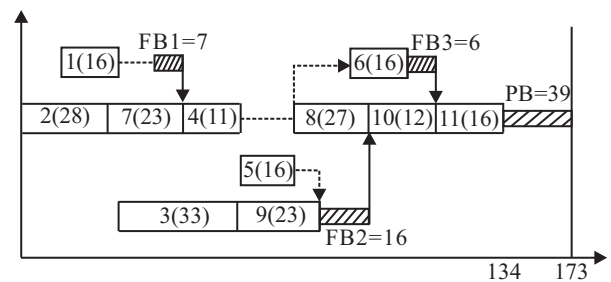


图 4 本文方法所得关键链调度计划

表 2 各活动工期风险及资源风险评估结果

活动序号 $i$	理想工期 $d_i^*$	活动工期风险概率分布			计划工期 $d_i$ [式(5)]	工期风险 $(p_i^2 w_2 + p_i^3 w_3) d_i^*$	$RRI_i$ [式(4)]
		$p_i^1$	$p_i^2$	$p_i^3$			
1	15	0.30	0.55	0.15	16	4.65	0.39
2	25	0.49	0.27	0.24	28	6.30	0.45
3	30	0.41	0.42	0.17	33	8.10	0.39
4	10	0.52	0.33	0.15	11	2.22	0.53
5	15	0.45	0.25	0.30	17	4.20	0.30
6	15	0.32	0.37	0.31	16	5.01	0.18
7	20	0.70	0.18	0.12	23	2.88	0.34
8	25	0.25	0.45	0.30	27	9.00	0.35
9	20	0.67	0.28	0.05	23	2.84	0.48
<b>10</b>	<b>10</b>	<b>0.65</b>	<b>0.20</b>	<b>0.15</b>	<b>12</b>	<b>1.70</b>	<b>0.38</b>
11	15	0.34	0.43	0.23	16	4.65	0.70

表 3 各方法所得缓冲大小及项目完工期

方法	接驳缓冲			项目缓冲 PB	项目计划完工期
	FB <sub>1</sub>	FB <sub>2</sub>	FB <sub>3</sub>		
所提方法	7	16	6	39	173
剪切法	8	25	8	53	187
根方差法	8	20	8	27	161
APRT 法	9	24	9	35	170
对比方法	8	20	7	38	172

### 3.2 绩效对比分析

为了显示本文方法的适用性和优越性, 运用 Matlab 编写程序进行模拟仿真实验, 将其与传统的剪切法、根方差法以及文献 [12] 考虑资源紧度提出的 APRT 方法进行绩效对比, 这 3 种方法也以  $d_i$  作为排程工期, 而以理想工期  $d_i^*$  的一半作为活动安全时间计算缓冲大小. 为了突出本文所提出“资源风险系数”的优势, 另外考虑了对比方法, 即计算缓冲时基于工期风险的那部分保持与本文所提出方法一致, 而基于资源风险的部分采用 APRT 方法中的资源紧张度表达方式. 几种方法计算出的缓冲大小、项目计划完工期等数据综合列于表 3 中.

按照文献 [6] 定义的关键链计划执行策略对以上 6 个调度计划各模拟执行 1000 次 ( $m = 1000$ ). 其中, 活动模拟工期根据表 2 的风险概率以区间分布的形式 (而不是采用某种特定的分布函数) 随机生成, 即针对活动  $i$  生成的  $m$  个模拟时间值中, 有  $100p_1^i m$  个来自  $[d_i^*, 1.2d_i^*]$  的均匀分布, 有  $100p_2^i m$  个来自  $[1.2d_i^*, 1.5d_i^*]$  的均匀分布,  $100p_3^i m$  个来自  $[1.5d_i^*, 2.25d_i^*]$  的均匀分布, 以大致拟合风险对特定活动执行时间的影响.

采用的绩效评价指标为项目平均完工期 (PCT)、按时完工率 (TPCP)<sup>[3]</sup> 和平均总偏离时间 (TDT). 其中总偏离时间的大小定义为

$$TDT = \sum_i \|S_i - s_i\|,$$

$s_i$  和  $S_i$  分别表示项目活动的计划开始时刻与实际开始时刻. 总偏离时间越大, 说明项目执行时相对于 BS 的变动越大, 由此而产生的执行成本 (包括项目误工的惩罚费用, 以及因计划变更而产生的各种管理费用和协调费用等) 也越高<sup>[21]</sup>.

根据各种方法下的计划完工期数值 (见表 3), 将项目完工期限  $\delta$  分别设置为  $\delta = 165, 170, 175$ , 模拟执行得到 5 种缓冲设置方法的绩效评价指标值如表 4 所列.

由表 3 可看出, 剪切法所得缓冲最大, 根方差法所得缓冲最小, 而 APRT 方法和本文方法所得缓冲大小适中. 进一步对表 4 模拟绩效进行分析可知, 执行本文缓冲大小计算方法生成的 CC/BM 计划时, 虽然

表 4 项目仿真执行所得绩效指标

方法	PCT	TDT	TPCP		
			$\delta = 165$	$\delta = 170$	$\delta = 175$
本文方法	148.44	134.09	0.942	0.972	0.993
剪切法	146.82	159.87	0.956	0.980	0.993
根方差法	149.33	149.74	0.929	0.971	0.984
APRT 法	150.81	156.97	0.916	0.964	0.982
对比方法	149.83	150.74	0.928	0.970	0.987

其完工绩效 (TPCP 和 PCT) 并不是最优, 但仍然优于根方差法和 APRT 法; 最重要的是, 较之其他所有方法, 本文所提出方法能够得到最低的计划偏离时间 TDT, 说明该方法下基准调度计划的稳定性最好. 这是由于本文所提出方法在缓冲设置过程中已经详细分析并充分考虑了活动层面的工期风险可能对项目进度造成的不确定影响, 并且一方面将部分风险融入计划工期作为活动时间估计的直接补充; 另一方面用集中的时间缓冲来吸收其余的概率不确定性, 因此能够合理降低工期风险对项目进度计划的影响, 有效保护关键链计划的顺利执行. 而仅以理想工期为排程工期或者采用剪切法, 虽然能够得到较低的平均完工期, 却是以更高的计划偏离时间为代价, 这在实际中会造成项目执行人员紧张甚至引起混乱, 引发不必要的恐慌, 降低基准调度计划的参考价值, 进而增加项目的库存成本、运营成本以及其他方面的组织协调费用.

另外, 在采用相同工期风险描述方式的前提下, 将本文所提出的资源风险系数  $RRI_i$  和文献 [14] 提出的资源紧张度 (对比方法) 进行比较可以看出, 本文方法能够以更小的缓冲提供更高的完工保护, 计划稳定性也更优, 进一步验证了运用资源流网络判断多种资源受限程度的必要性与合理性. 综合上述分析, 本文方法整体绩效最优, 能够在保证较高按时完工率的同时, 有效缩短项目工期并保持进度计划稳定.

## 4 结 论

本文所提出的关键链缓冲区大小计算方法与现有文献相比, 创新之处主要有:

1) 将贝叶斯网络方法应用于活动工期风险的分析与评估, 建立合适的度量体系, 确定活动计划时间及安全时间, 为基于工期风险的缓冲设置提供定量依据;

2) 针对特定项目计划建立资源流网络关系, 据此评估项目多资源受限度, 结合活动对资源的需求情况综合估计资源约束风险, 并将其作为各个缓冲区大小的调整依据.

本文所提出的方法尤其适用于不确定性较大、风险较高、资源依赖性较强的建筑工程项目领域, 这类项目要求周期更短、准时完工率更高, 从而对企业应对风险的能力提出了较高要求. 实际中工程企业一

般都拥有一定的风险数据,为本文方法成功运用并改善项目进度绩效提供了条件.本文所采用的案例虽不能涵盖所有大型复杂工程项目遇到的实际情况,但是为大型复杂项目进度计划的编制与进度风险管理提供了一定的借鉴意义.如何在管理进度风险的同时考虑风险变量对项目成本、质量等目标的影响,对关键链项目进行综合调度与监控,可以作为下一步研究的方向.

### 参考文献(References)

- [1] Herroelen W, Leus R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials[J]. *European J of Operational Research*, 2005, 165(2): 289-306.
- [2] Goldratt E M. *Critical Chain*[M]. New York: The North River Press, 1997.
- [3] Hu X, Cui N, Demeulemeester E. Effective expediting to improve project due date and cost performance through buffer management[J]. *Int J of Production Research*, 2015, 53(5): 1460-1471.
- [4] Hu X, Cui N, Demeulemeester E, et al. Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 249(2): 717-727.
- [5] 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.)
- [6] 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.)
- [7] 马国丰,严勇,尤建新,等.关键链项目进度计划的鲁棒优化的研究[J].*系统管理学报*, 2014, 23(5): 704-710.  
(Ma G F, Yan Y, You J X, et al. A study on robust optimization of critical chain project scheduling[J]. *J of System & Management*, 2014, 23(5): 704-710.)
- [8] Ma G, Wang A, Li N, et al. Improved critical chain project management framework for scheduling construction projects[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2014, 140(12): 1-12.
- [9] 胡晨,徐哲,于静.基于工期分布和多资源约束的关键链缓冲区大小计算方法[J].*系统管理学报*, 2015, 24(2): 237-242.  
(Hu C, Xu Z, Yu J. Calculation method of buffer size on critical chain with duration distribution and multi-resource constraints[J]. *J of System & Management*, 2015, 24(2): 237-242.)
- [10] 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 J of Management Science*, 2010, 18(6): 97-103.)
- [11] Newbold R C. *Project management in the fast lane—Applying the theory of constraints*[M]. Boca Raton: The St Lucie Press, 1998.
- [12] Tükel O I, Rom W O, Eksioğlu S D. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 172(2): 401-416.
- [13] Bie L, Cui N F, Zhang X M. Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in critical chain scheduling[J]. *Int J of Production Research*, 2012, 50(24): 7343-7356.
- [14] 褚春超.缓冲估计与关键链项目管理[J].*计算机集成制造系统*, 2008, 14(5): 1029-1035.  
(Chu C C. Buffer sizing and critical chain project management[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(5): 1029-1035.)
- [15] Creemers S, Demeulemeester E, Van de Vonder S. A new approach for quantitative risk analysis[J]. *Annals of Operations Research*, 2014, 213(1): 27-65.
- [16] 蒋国萍,陈英武.基于关键链的软件项目进度风险管理[J].*计算机应用*, 2005, 25(1): 56-57.  
(Jiang G P, Chen Y W. Schedule risk management method of software project based on critical chain[J]. *Computer Applications*, 2005, 25(1): 56-57.)
- [17] Zhang L, Wu X, Ding L, et al. Decision support analysis for safety control in complex project environments based on Bayesian Networks[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(11): 4273-4282.
- [18] Artigues C, Michelon P, Reusser S. Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling[J]. *European J of Operational Research*, 2003, 149(2): 249-267.
- [19] Deblaere F, Demeulemeester E, Herroelen W, et al. Robust resource allocation decisions in resource-constrained projects[J]. *Decision Sciences*, 2007, 38(1): 5-37.
- [20] Demeulemeester E, Herroelen W. A branch-and-bound procedure for the multiple resource-constrained project scheduling problem[J]. *Management Science*, 1992, 38(12): 1803-1818.
- [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[J].*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[J]. *J of System & Management*, 2015, 24(3): 379-388.)