

文章编号:1672-9331(2017)03-0061-07

# 基于不确定性因素的柔性关键链缓冲设置方法

陈 赟, 张营慧, 朱文喜

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:** 为了解决施工进度计划不具备柔性、实施过程中需根据实际进度不断调整变化等问题,在关键链项目管理中引入柔性技术,在其缓冲区设置时考虑实际进度控制中多种不确定性因素,从而提高了柔性关键链缓冲区设置的有效性。首先,基于柔性关键链技术,识别影响施工进度计划的内外部不确定性因素,并对这些不确定性因素进行评估和量化,在根方差法的基础上进行改进,提出了柔性关键链缓冲设置的新方法;然后,采用 Monte Carlo 模拟法对实例的计算结果的有效性进行验证,并计算出实例项目的完工率以及缓冲消耗情况;最后将新方法结果与 C&PM, RSEM 方法得到的结果进行对比分析。研究结果表明,这种基于多种不确定性因素的设置方法得到的柔性关键链缓冲更为合理、稳定和有效。

**关键词:** 进度计划; 柔性关键链; 不确定性; 缓冲区; 根方差; Monte Carlo

中图分类号: TU71

文献标识码: A

## Flexible critical chain buffer setting method based on uncertainty factors

CHEN Yun, ZHANG Ying-hui, ZHU Wen-xi

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the construction schedule is not flexible, and that the implementation process should be adjusted according to the actual progress, flexible technology is introduced in the critical chain project management, and many uncertainties in the actual progress control are taken into account when the buffer is set, which can improve the effectiveness of flexible critical chain buffer settings. Based on the flexible critical chain technology, the internal and external uncertain factors influencing the construction schedule are identified, evaluated and quantified. On the basis of the root square error, the method of the flexible critical chain buffer setting is improved and a new one is proposed. The Monte Carlo simulation method is used to verify the validity of the calculation results, and the completion rate and buffer consumption of the example project is calculated. The results of the new method are compared with C & PM and RSEM method. The results show that the flexible critical chain buffer based on a variety of uncertain factors is more reasonable, stable and effective.

**Key words:** schedule; flexible critical chain; uncertainty; buffer; root square error; Monte Carlo

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(73171036); 湖南省交通科技项目(201235)

作者简介: 陈 赟(1963-), 男, 湖南邵阳人, 长沙理工大学教授, 博士生导师, 主要从事项目管理和知识管理的研究。

建设项目在施工过程中会受到各种限制,如:项目的复杂程度、资源的稀缺程度以及工序的持续时间等不确定性,如果不全面考虑这些约束,可能会影响建设项目的进度。

基于约束理论,Glodratt 提出了关键链项目管理(CCPM)这一概念,缓冲估计一直是关键链项目管理中的重要问题。时间缓冲是 CCPM 有效的工具,缓冲区的设置对避免项目延期起到了关键性的作用。CCPM 不是在每个工序后面都设置安全缓冲时间,在关键链项目管理方法中,缓冲根据它的位置和功能可分为 3 种形式:资源缓冲(RB)、入口缓冲(FB)、项目缓冲(PB)。RB 是一种警示信号,在资源不足时起到保护关键链工序正常实施的作用,不消耗任何时间;FB 主要作用是减少非关键链上工序的延误以及避免对关键链产生影响,位置在关键链和非关键链的接驳处;PB 被放置在关键链末端,以防止该项目工期延误。

缓冲设置常用 2 种方法:C&PM(剪切法)和 RSEM(根方差法)。C&PM 是采用传统方法去估计每道工序的安全时间,并累加每道工序安全时间的二分之一作为该项目的总缓冲值,这种方法计算简单。然而,C&PM 的计算采用的是一个线性程序,缓冲的大小会随着关键链工序的增加而变大,这就对工序产生了不必要的保护,最终导致资源的浪费。RSEM 方法对关键链上的每道工序提出了 2 种估计:安全估计和平均估计,通过计算 2 个估计之间的差,并把每道工序差的平方根累加起来作为缓冲值。RSEM 较 C&PM 的优势明显,RSEM 受关键链长度的影响较小,计算的缓冲区不会过大也不会过小,并且这种优势会随着关键链长度的增加而更加明显。但 RSEM 方法的缺陷是没有考虑不确定性因素影响的关联性,只是单纯地认为工序的时间参数估计是独立的。

在这两种方法的基础上,一些研究人员做了更深入的研究。郭海燕<sup>[1]</sup>为了同时满足进度和工期的要求,提出了一种基于盲数理论的缓冲设置方法,它利用不同百分率的完工率计算出项目进度缓冲和成本缓冲。张俊光<sup>[2]</sup>提出了一种基于项目属性的缓冲设置方法,特别提出了活动的敏感性,并通过 4 个指标来评估活动的敏感程度。宋喜伟<sup>[3]</sup>认为模糊评价不能有效地对项目的风险进行量化,基于此提出了梯形模糊数的算法,通过考

虑项目的风险性来估计项目缓冲。张善从<sup>[4]</sup>也从项目风险性出发,通过熵权模糊综合评价法提出了缓冲计算的新公式。张俊光<sup>[5]</sup>考虑到项目工期、资源供给以及项目的变异系数等,也应用熵权评估法对缓冲进行了设置。王艺<sup>[6]</sup>考虑到接驳缓冲设置后可能会造成资源再次冲突等问题,应用独立时差计算出缓冲。为了进一步研究,崔南方<sup>[7]</sup>针对缓冲设置后关键链突然断裂对进度计划产生不利影响的情况,提出了分散缓冲法。李双纯<sup>[8]</sup>提出了灰色关联的关键链,将影响项目工期的因素用 GAR 模型进行分析,通过分析影响工期的几个不确定因素,计算出安全时间系数及安全时间。蒙唐缓怡<sup>[9]</sup>认为灰色关联法和熵权法可能会因为数据的不足导致指标评估的不准确,影响关键链的识别,从而影响缓冲设置,因此他结合灰色关联法和层次分析法,在缓冲设置中提出了灰色一层次分析法。Zhang<sup>[10]</sup>为了获得工序的持续时间与缓冲大小之间的适当比例,提出了一种基于模糊资源约束的缓冲设置方法。同年,为了提高缓冲设置的精准度,解决资源冲突问题,提出了综合资源紧密度的缓冲设置<sup>[11]</sup>,缓冲区的设置直接影响到制定进度计划的过程以及项目按期完成的情况。综上所述,在缓冲设置中仍然存在一些缺陷,虽然有些研究人员考虑了约束项目的一些因素,但在进度计划制定过程中仍然缺乏柔性<sup>[12]</sup>,使得项目进度管理过程比较被动,从而造成了项目作业效率较低,因此需要对进度计划不断地进行调整。

针对上述问题,作者引进柔性关键链技术,提出柔性关键链缓冲设置的一种新方法。柔性关键链技术最重要的目的是辨别出影响项目进度管理的制约因素及其环节,然后合理安排这些影响环节的安全时间,最后通过把这些制约环节串连起来形成具有一定规模的步骤链,这个链被称为柔性关键链。在进度优化中常常用到柔性关键链网络化,主要是识别资源冲突,并解决掉这些冲突,保证制约工序链的工作潜力,使整个项目执行过程比较顺利,避免资源浪费,缩短项目工期,该技术称为柔性关键链技术(FCCM)。该技术在约束理论的基础上,通过改善进度计划的柔性,提高工作效率,缩短项目关键工序的持续时间。考虑到一些约束因素的影响,在关键链的末端引入项目

柔性区(PFB),但考虑到项目实际实施过程中影响环节不仅仅来自于关键链,所以在关键链和非关键链的接驳处引入了供应柔性区(FFB)来解决由非关键链所带来的进度延迟<sup>[13]</sup>。这种通过识别项目的制约因素添加柔性区的方法使得进度管理变得主动,全面考虑了不确定性因素并予以量化,又增加了项目进度管理柔性。计算出的柔性关键链缓冲可以有效保证项目工期目标,提高工作效率,同时消除不确定因素对其产生的影响,进而实现项目管理的主动性、灵活性及高效性。

## 1 柔性关键链缓冲区设置中不确定因素的识别

关键链项目管理中的不确定性因素包括内部和外部两个方面,作者结合柔性关键链技术分析来识别影响其缓冲设置的不确定因素指标。

### 1.1 项目内部不确定性因素

#### 1) 工序规模度(AS)。

在关键链项目管理中,项目的链路是由关键链和非关键链组成的,每条链路上的工序规模越大,链路受不确定性因素的影响就越大,则链路延期的可能性就越大,因此可以通过链路上所有工序的持续时间来衡量链路工序的规模。链路工序的累积持续时间越大,证明链路工序规模越大;链路上工序累积持续时间与整个项目所有工序累积持续时间的比值的大小,代表着链路工序规模的大小。

#### 2) 工序复杂度(AC)。

工序复杂度是指单个工序的复杂度,它取决于所在链路的复杂程度,即由链路工序的规模所决定的。Tukela O. I.<sup>[14]</sup>指出,当一个项目链中的某个工序有几个紧前工作时,这个工序受紧前工作影响的可能性较大,延期的可能性也较大。因此,这个工序只有设置较大的缓冲区,才能够保证项目的进度。

#### 3) 工序的灵活度(AF)。

工序的灵活度是指特定工序的弹性,即工序的自由时差。当工序的自由时差较大时,说明其灵活性较大,抵抗外界风险的能力越强。现有的研究表明,弹性较小的工序很难按期完成,因此要求有较大的缓冲。

#### 4) 资源紧张度(RT)。

一个项目的执行通常是由多个工序共享各种资源,特定工序必须与其他工序竞争所需的资源,因此可能出现资源短缺、工期延误等问题。资源短缺可能由以下因素所引起:供应不足、库存管理不善和损坏<sup>[15]</sup>。资源紧张度表示工序对资源的可能用量和如何容易获得一种资源相关联的一种不确定性,这种不确定性由其他项目对这种资源的需求量所决定。

### 1.2 项目外部不确定性因素

#### 1) 环境不确定性(EU)。

环境不确定性特指项目外部环境的不确定性,包括项目的特定因素和项目的非特定因素。项目的特定因素包括合同风险和供应链稳定性等;项目的非特定因素包括自然灾害和宏观经济条件等。通常是从政治、经济、社会和技术这四个方面去评价环境的不确定性,即采用 PEST 框架分析法对环境的不确定性进行评估,并通过 PEST 等级的划分来反映受这种不确定性因素的影响程度。

#### 2) 风险偏好(RP)。

在项目的实施过程中,在相同的情况下,不同的项目团队以及项目经理可能会因为自己的管理水平和管理观念,对各种环境的判断以及风险承受表现出不同的能力,这很可能会导致对项目工期估计不准确而致使工期过长。因此,由于进度管理内部的问题,增加了项目实施过程中的不确定性。

## 2 不确定因素的量化方法

在目前关键链缓冲设置方法的基础上,通过对 6 个不确定性指标进行评估,综合量化上述不确定性因素,最终提出柔性关键链缓冲设置的方法。

#### 1) 工序规模(AS)。

$$AS = \sum_i^n T_i / \sum_i^m T_i. \quad (1)$$

式中:AS 为项目某一链路的规模; $i$  为某一链路上的工序; $T_i$  为该工序的持续时间; $n$  为该链路上工序的总数量; $m$  为整个项目所包含的所用工序的数量<sup>[16]</sup>。

## 2) 工序复杂度(AC)。

$$AC_i = N_P N_Q. \quad (2)$$

式中:假设关键链上的工序用  $CC$  表示,非关键链上的工序用  $NC$  表示。 $AC_i$  为工序  $i$  的复杂程度; $N_P$  为工序  $i$  紧前工作的数量; $N_Q$  为工序  $i$  所在项目链路上所有工序总的数量; $CC_i$  为包含工序  $i$  的关键链链路; $NC_i$  为含有工序  $i$  的非关键链链路; $AC_{CC}$  为关键链上某特定工序的复杂度,其值等于关键链上所有工序的复杂程度  $AC$  的累加和; $AC_{NC_i}$  为包括工序  $i$  的非关键链上工序的总复杂度,其值等于非关键链上所有工序的复杂程度  $AC$  的累加和。

## 3) 工序灵活度(AF)。

$$AF_i = \begin{cases} \alpha, & 0 \leq f_i \leq f' \\ \beta, & f' \leq f_i \leq f'' \\ \gamma, & f'' \leq f_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f_i$  为可变弹性,可通过热力学公式  $f_i = TF_i \ln TF_i$  计算,其中  $TF_i$  指工序  $i$  的总时差; $f'$  和  $f''$  的临界值是根据项目团队的分析和对项目环境的判断所确定的;当  $f_i \leq f'$  时,说明工序  $i$  的总时差较小,因此具有较小的灵活度,也就意味着连续工序按时完成的可能性较小(即风险较大);相反,当  $f_i \geq f''$  时,说明工序具有较大的总时差,因此具有较大的灵活度,不容易出现延期的现象;当  $f' < f_i < f''$  时,说明该工序具有合理的灵活度,不需要加强管理。通过专家调查法并结合大量数据分析, $\alpha$  赋值为 0.85, $\beta$  赋值为 1, $\gamma$  赋值为 1.15。

## 4) 资源紧张度(RT)。

$$TR_i = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{k=1}^m r_{kt} / R_t \right\}, \quad t \in [st_i, st_i + r_i]. \quad (4)$$

式中: $R_t$  表示在  $t$  时刻资源的可利用量; $r_{kt}$  表示在  $t$  时刻资源  $k$  可能的需求量; $m$  表示在  $t$  时刻正在执行的工序数量; $st_i$  表示工序  $i$  的开始时间; $r_i$  表示工序  $i$  的持续时间; $n$  表示在  $t$  时刻所需资源总的种类数。

当  $RT$  值很高时,资源约束变得更加明显,因此需要相对较大的缓冲来防止资源的紧张度,以防止发生由资源的紧张度而引起的工期延误。

## 5) 环境不确定性(EU)。

$$EU = \begin{cases} 0.25, & \sum_{i=1}^n \mu_i \geq 3 \\ 0.5, & 2.5 < \sum_{i=1}^n \mu_i < 3 \\ 0.75, & 2 < \sum_{i=1}^n \mu_i \leq 2.5 \\ 1, & \sum_{i=1}^n \mu_i \leq 2 \end{cases} \quad (5)$$

这里采用 PEST 分析模型对外部环境的不确定进行量化,设立“有利、较好、一般、不利”4 个等级,然后通过专家打分法得到各个等级的分值,分别为“0.25,0.5,0.75,1”,这些数值能反应出项目进度受环境不确定性因素影响的程度。等级与环境的不确定值是有关联的,等级越低,分值越小,说明不确定性越高,因此需要设置较大的缓冲值。其中, $\mu_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) 代表专家对政治、经济、社会和技术环境的评估。 $EU$  代表了这些因素的综合影响分值。

## 6) 风险偏好(RP)。

$$RP = (Z_\epsilon - \mu) / 2\sigma. \quad (6)$$

在实践中,在相同的情况下,不同的项目团队由于对各种环境的判断能力、管理技能以及对风险承受能力的不同而作出不同的风险评价,因此,项目团队对项目实施的影响增加了项目的不确定性,可以说是进度管理内部的问题。本研究为了测量  $RP$ ,根据中心极限定理,假设工序服从正态分布  $T \sim (\mu, \sigma)$ ,并设置标准的风险水平  $\epsilon$  为 5%,这保证了项目的完成率为  $(1 - \epsilon)$ ,其值为 95%,其中, $2\sigma$  为在根方差法(RSEM)计算下的缓冲区的值, $Z_\epsilon = Z$  表示在正态分布中计算的值,即

$$z = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

## 3 柔性关键链缓冲区设置方法

本研究的柔性关键链缓冲计算方法既包含了 RSEM 的不确定性因素,又考虑了上述多种关键不确定性因素,这些因素既有项目内部因素,也有外部环境的因素<sup>[17]</sup>,其中,不确定性因素  $AS$ ,  $EU$ ,  $RP$ ,  $AC$  只影响特定工序,而  $AF$  和  $RT$  对整个项目链都有影响。因此综合考虑各种不确定性因素对项目工序持续时间的影响,在根方差法的基础上对其进行改进,得到柔性关键链缓冲设置

的新方法:

$$PFB = AS_{CC} \times EU \times RP \times AC_{CC} \times \left\{ \sum_{i \in (CC_i)} [(1 + RT_i) \times AF_i \times \sigma_i]^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$PFB_i = AS_{NC} \times EU \times RP \times AC_{CC} \times \left\{ \sum_{i \in (NC_i)} [(1 + RT_i) \times AF_i \times \sigma_i]^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

由式(7)所计算出的  $PFB$  将会被转移到关键链的末端;而式(8)所算出的  $FFB$  是放在非关键链和关键链的交叉点处; $FPB$  和  $FFB$  被用作安全时间,以减轻不确定性因素所产生的不利影响,避免项目工序时间延误。

与传统的缓冲设置方法相比,用这种方法计算出的缓冲更能抵抗不确定性因素对相关项目进度计划的影响。需要说明的是,这种方法计算的缓冲不一定比传统方法计算的缓冲大。当不确定性不显著时,相关系数如  $EU$  和  $RP$  可能会小于 1,该方法计算的缓冲更小,使得项目具有更大的竞争力,并确保商业机会的价值。当不确定性显著时,计算的缓冲区就会不准确,可能会使提案不具备竞争力。然而,进度计划针对各种可能的不确定性因素有足够的稳定性,可以降低项目延期的风险,并有助于避免相关损失。

## 4 应用实例

### 4.1 实例概况

某施工项目共有 11 个工序,假设所需的资源种类为人、材、机,每种资源的可提供量分别为 12, 25, 10。每项工序的工期、资源用量、紧后工作和标准偏差如表 1 所示。

### 4.2 方法应用

步骤 1:根据表 1 中的基本信息绘制网络计划图,识别出 1 条关键路径  $A, B, F, G, H, I, J, K$  和 2 条非关键路径  $C, D$  和  $E$ ,并通过计算得出项目工期为 100 d。

步骤 2:确定缓冲区设置位置,在工序  $E$  和  $D$  后面插入  $FFB$ ,在工序  $K$  后面插入  $PFB$ (如图 1 所示)。

步骤 3:计算各种不确定因素的指标值,由式(1)可得,  $AS_{CC} = 0.65$ ,  $AS_{NC_1} = 0.23$ ,  $AS_{NC_2} =$

0.12;由式(2)可得,  $AC_{CC} = 0.742$ ,  $AC_{NC_1} = 0$ ,  $AC_{NC_2} = 0.5$ ;由式(3)可得,关键链和非关键链上  $AF$  的取值分别为 1.2 和 0.75;由式(4)计算可得,  $RT = 0.781$ ;由式(6)计算可得,  $RP = 0.781$ ;对于环境不确定因素,通过专家打分法得出  $EU = 0.75$ 。

步骤 4:计算缓冲大小,由式(7)和式(8)得出  $PFB = 16.21$ ,  $FFB_1 = 8.61$ ,  $FFB_2 = 13.43$ 。

表 1 项目的基本信息

Table 1 Basic information of the project

工序	持续时间/d			紧后工序	资源量			标准偏差
A	6	8	10	B	1	6	2	1.5
B	10	12	14	C, F, J	3	7	3	3.0
C	18	20	22	D	3	4	2	6.5
D	13	15	17	E	2	5	1	6.0
E	17	19	21	H	1	6	2	6.5
F	16	18	20	G	3	8	2	4.5
G	14	16	18	H	2	4	1	3.5
H	10	12	14	I	2	7	2	2.5
I	7	9	11	K	3	8	1	1.5
J	18	20	22	K	5	9	1	6.0
K	3	5	7	—	1	11	1	0.5

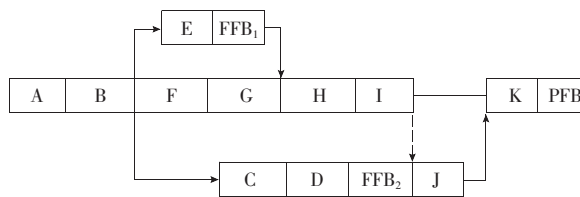


图 1 项目关键链柔性缓冲设置

Fig. 1 Flexible buffer-setting of the critical chain of the project

### 4.3 方法有效性分析

#### 1) 基于蒙特卡罗法的有效性验证。

本研究采用蒙特卡罗模拟方法来验证上述算法的有效性。根据案例提供的数据,采用计算机程序 C++ 来计算。首先假定所有工序的持续时间均遵循正态分布,并且重复 1 000 次,计算出项目的完工概率以及缓冲的消耗情况(如表 2 所示)。

由上述仿真结果可知,完工率为 96.89%,大于 95%,证明了本算法的有效性;缓冲的平均消耗率超过了 22%,说明缓冲设置是合理的。

表2 项目完工率及消耗情况

Table 2 Completion rate and consumption of the project

缓冲	缓冲估计 大小	缓冲平均 消耗率/%	超出概率/ %	完工概率/ %
FFB <sub>1</sub>	8.61	23.41	5.82	
FFB <sub>2</sub>	13.43	22.87	4.10	96.89
PFB	16.21	22.19	2.76	

2) 与 C&PM, RSEM 方法结果的对比分析。

本研究提出的方法与常见的 C&PM, RSEM 方法计算结果的对比结果如表 3 所示。

表3 与常用方法的比较结果

Table 3 Results compared with the common method

方法	缓冲	缓冲大小	超出概率/%	完工率/%
剪切法 (C&PM)	FB <sub>1</sub>	5.50	16.40	
	FB <sub>2</sub>	11.50	9.10	91.10
	FB	22.00	1.30	
根方差法 (RSEM)	FB <sub>1</sub>	11.00	3.70	
	FB <sub>2</sub>	16.30	3.50	96.30
	FB	17.60	3.80	
本研究 方法	FFB <sub>1</sub>	8.61	5.82	
	FFB <sub>2</sub>	13.43	4.10	96.89
	PFB	16.21	2.76	

由表 3 可知, ①完工率的比较: 本研究提出的柔性关键链缓冲设置方法完工率为 96.89%, 均高于 C&PM, RSEM 方法确定的完工率, 说明本研究所提出的缓冲设置方法制定的进度计划被完成的可能性更高一些; ②工期结果的比较: 新方法确定的工期比剪切法确定的工期缩短时长为 22-16.21=5.79 d; 与根方差法比较则缩短时长为 17.6-16.21=1.39 d; ③超出概率的比较: 具体而言, 与剪切法相比, 因为工序较少, 计算的缓冲相对剪切法较大, 但并不能说明剪切法计算的缓冲合理, 如果缓冲过小, 则对项目缓冲的保护能力就会降低, 这一点可以通过表 3 中的超出率看出; 与根方差法相比, 本研究提出的方法计算的缓冲较小, 且完成率较高, 优势较明显, 它不仅有利于项目缩短工期、节约资源, 而且也提高了资源的利用率。

另外, 本研究所提出的新方法不仅考虑了外部环境的不确定性因素, 也考虑了项目本身特点

的不确定性因素, 而剪切法和根方差法则没有考虑到这些不确定性因素。

## 5 结论

作者所提出的基于不确定性因素的柔性关键链缓冲设置的方法优势体现在以下几个方面。

1) 该方法结合了柔性关键链技术, 并通过改善进度计划的柔性, 在成本和质量目标一定的情况下, 减小了项目关键工序的持续时间, 提高了工作效率。

2) 该方法综合考虑了内外部的不确定因素, 并对不确定性因素指标进行了量化, 在根方差法的基础上得出了缓冲设置的新方法, 解决了根方差法缓冲设置较小而导致项目按期完成性降低的问题。

3) 采用蒙特卡罗模拟法对本方法计算的缓冲区的有效性进行分析, 通过与 C&PM 和 RSEM 计算的缓冲区值进行对比分析可知, 本研究所提出的方法计算出的缓冲, 减少了资源的浪费, 提高了进度计划的竞争力, 且对不确定性因素的抵抗更具稳定性, 同时还提高了项目按时完成的可能性。

## 〔参考文献〕

- [1] 郭海燕. 基于质量约束的 CCPM 缓冲区动态管理研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.  
GUO Hai-yan. Study on dynamic management of CCPM buffer based on quality constraint[D]. Handan: Hebei Engineering University, 2013.
- [2] 张俊光, 宋喜伟, 贾赛可, 等. 基于梯形模糊数的项目缓冲确定方法研究[J]. 管理工程学报, 2015, 29(2): 223-228.  
ZHANG Jun-guang, SONG Xi-wei, JIA Sai-kai, et al. Study on project buffering method based on trapezoidal fuzzy number[J]. Journal of Management Engineering, 2015, 29(2): 223-228.
- [3] 张善从, 马丽丛. 高新技术项目的关键链风险缓冲区讨论: 基于熵权模糊评价法[J]. 现代管理科学, 2016(10): 9-11.  
ZHANG Shan-cong, MA Li-cong. Discussion on critical chain risk buffer of high and new technology projects: based on entropy weight fuzzy evaluation

- method[J].Modern Management Science,2016(10):9-11.
- [4] 张俊光,宋喜伟,杨双.基于熵权法的关键链项目缓冲确定方法[J].管理评论,2017,29(1):211-219.
- ZHANG Jun-guang, SONG Xi-wei, YANG Shuang. Study on key chain project buffer determination method based on entropy weight method[J].Management Review,2017,29(1):211-219.
- [5] 张俊光,李伊童,万丹.基于活动属性的关键链项目资源缓冲设置方法研究[J].软科学,2017,31(5):124-127.
- ZHANG Jun-guang, LI Yi-tong, WAN Dan. Study on resource buffering setting method of key chain project based on activity attribute[J].Soft Science,2017,31(5):124-127.
- [6] 王艺,崔南方.接驳缓冲设置中的独立时差策略[J].工业工程,2015,18(2):127-132.
- WANG Yi, CUI Nan-fang. An independent time difference strategy in connection buffer setting[J].Industrial Engineering,2015,18(2):127-132.
- [7] 崔南方,赵雁,胡雪君,等.关键链断裂情况下的缓冲设置方法比较研究[J].运筹与管理,2016,25(3):255-260.
- CUI Nan-fang, ZHAO Yan, HU Xue-jun, et al. Comparative study on buffer setting method in critical chain fracture[J].Operations Research and Management,2016,25(3):255-260.
- [8] 李双辰,王艳春.基于灰色关联的关键链缓冲设置方法研究[J].科技管理研究,2013,29(17):203-206.
- LI Shuang-chen, WANG Yan-chun. Study on key chain buffer setting method based on gray relational analysis[J].Science and Technology Management Research,2013,29(17):203-206.
- [9] 蒙唐媛怡.基于灰色关键链的项目进度管理研究[D].北京:北京化工大学,2015.
- MENG Tang-yuan-yi. Research on project progress management based on gray key chain[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology,2015.
- [10] Zhang J, Song X, Díaz E. Critical chain project buffer sizing based on resource constraints[J]. International Journal of Production Research,2016,55(3):68-80.
- [11] 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.
- [12] 张人龙.多项目关键链柔性资源配置模型及其算法研究[D].长沙:湖南大学,2015.
- ZHANG Ren-long. Multi - project critical chain flexible resource allocation model and its algorithm [D].Changsha: Hunan University,2015.
- [13] 张恩廷.某工程项目柔性化进度管理应用研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- ZHANG En-ting. A project of flexible progress management application research [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2013.
- [14] Tukela O I, Eksioglu S D. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling[J].European Journal of Operational Research,2006,172(2):401-416.
- [15] Ma G, Wang A, Li N, et al. Improved critical chain project management framework for scheduling construction projects[J].Journal of Construction Engineering and Management,2014,140(12):132-142.
- [16] 左飞.关键链项目管理的缓冲设置方法研究[D].武汉:华中科技大学,2010.
- ZUO Fei. Study on buffer setting method of critical chain project management [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2010.
- [17] 庞南生,李恩成.模糊环境下基于不确定因素关键链缓冲区设置方法及仿真研究[J].现代经济信息,2014(24):95-97.
- PANG Nan-sheng, LI En-cheng. Study on key chain buffer setting method and simulation based on uncertain factors in fuzzy environment[J].Modern Economic Information,2014(24):95-97.