

# 基于信息熵的关键链缓冲区设置方法

巩军<sup>1</sup> 胡涛<sup>1</sup> 姚路<sup>1</sup>

**摘要** 为解决缓冲区设置不合理带来的项目间工序松弛、工期延误等问题, 基于信息熵理论提出了一种关键链缓冲区设置方法. 首先, 提出了复杂熵、资源熵和人因熵的概念及其度量方法, 运用熵的概念量化诸多不确定因素对工序造成的影响; 其次, 提出了基于区间直觉梯形模糊数的人因熵度量步骤与方法; 最后, 给出了工序工期、项目缓冲和汇入缓冲的熵模型与修正模型, 充分考虑了人的行为因素对项目进度的影响, 并通过算例验证了模型的实用性.

**关键词** 信息熵, 关键链, 缓冲区设置, 区间直觉梯形模糊数, 工程计划

**引用格式** 巩军, 胡涛, 姚路. 基于信息熵的关键链缓冲区设置方法. 自动化学报, 2022, 48(8): 2039–2049

**DOI** 10.16383/j.aas.c190599

## Buffer Setting Method of Critical Chain Based on Information Entropy

GONG Jun<sup>1</sup> HU Tao<sup>1</sup> YAO Lu<sup>1</sup>

**Abstract** In order to solve the problems caused by unreasonable buffer setting, such as process slacking and project delaying, this paper proposes a buffer setting method of critical chain based on information entropy. Firstly, it presents concepts and measurement method of complex entropy, resource entropy and human factor entropy, which are used to quantify the influence of uncertain factors on the process. Secondly, the steps and methods of human factor entropy based on interval-valued intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers are proposed. Finally, fully considering the influence to project schedule of human behavior, it presents entropy models and modification models of procedure duration, project buffer and feeding buffer. The examples given in the end vividly convey the practicability.

**Key words** Information entropy, critical chain, buffer setting, interval-valued intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers (IVITFN), project schedule

**Citation** Gong Jun, Hu Tao, Yao Lu. Buffer setting method of critical chain based on information entropy. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(8): 2039–2049

项目管理者在进行工期估算时, 由于考虑到项目执行过程中可能出现的诸多不确定性因素和潜在风险, 通常会加入大量的安全时间以保证项目的按时完成. 然而, “学生综合症”、“帕金森定律”和项目与任务间的复杂逻辑关系等因素会造成安全时间的浪费, 导致项目工序间松弛、工作效率降低, 甚至工期延误. 因此, 以色列物理学家 Goldratt 成功地将“制约法”(Theory of constraint, TOC)引申至项目管理领域, 提出了取代关键路线的关键链项目管理(Critical chain project management, CCPM). 在CCPM中, 缓冲机制是项目执行过程中不

确定性与进度权衡的有力工具, 共包含 3 类缓冲: 项目缓冲(Project buffer, PB)、汇入缓冲(Feeding buffer, FB)和资源缓冲(Resource buffer, RB), 通过合理设置缓冲区可以有效降低项目进度风险, 保证项目高效完成<sup>[1]</sup>.

剪贴法(Cast and paste method, C&PM)和根方差法(Root square error method, RSEM)是关键链缓冲区设置的基本方法. 然而, C&PM方法会出现缓冲区随项目中工序增多而线性放大的问题, RSEM方法由于链路中各工序相互独立的假设条件并不成立, 会导致缓冲区偏小. 后续学者针对以上问题提出了诸多改进方法, Tukul 等<sup>[2]</sup>通过研究项目中各工序的相互影响因素, 将资源紧张度和网络复杂度分别计入项目缓冲, 徐小峰等<sup>[3]</sup>在此基础上给出了资源紧张度、工期安全度和工序复杂度的缓冲区尺寸计算方法, 刘书庆等<sup>[4]</sup>基于关键链技术构建了考虑 EPC (Engineering procurement construction) 项目实施进度影响因素的缓冲区设置模型, 通过融合工序位置权重系数、作业时间风

收稿日期 2019-08-25 录用日期 2019-12-02

Manuscript received August 25, 2019; accepted December 2, 2019

国家自然科学基金(71501183)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (71501183)

本文责任编辑 袁勇

Recommended by Associate Editor YUAN Yong

1. 海军工程大学管理工程与装备经济系 武汉 430033

1. Department of Management Engineering and Equipment Economics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033

险弹性系数、综合权重值有效解决了由于 EPC 项目中各影响因素对工序的不同影响造成的缓冲区时间估计不准的问题, 胡晨等<sup>[5]</sup>为消除任务不确定性和资源约束对工期的影响, 将活动工期风险、资源影响系数融入到传统根方差法对缓冲区的计算中, 蒋红妍等<sup>[6]</sup>提出的缓冲区设置方法考虑了资源约束对缓冲区的影响, 还能够反映出由于信息约束对活动间相关性带来的变化, 张俊光等<sup>[7-9]</sup>提出了基于熵权法和活动属性的缓冲区优化方法, 并对各类缓冲区设置方法进行了归纳总结。

上述缓冲区的改进与优化方法虽然有一定效果, 但存在以下问题: 1) 人的行为因素对项目进度计划会产生重要影响, 而现有方法并未将其纳入缓冲区的设置中, 如何量化人对缓冲区的影响也鲜有研究; 2) 缓冲区设置的目的是消除由于多种不确定性风险因素造成风险事件而可能产生的进度风险, 如何更合理、精确和全面地量化诸多不确定风险因素有待进一步研究。

鉴于此, 本文提出一种基于信息熵的关键链缓冲区设置方法对根方差法进一步修正. 创新之处主要有: 1) 基于信息熵基本原理提出了复杂熵、资源熵和人因熵的概念及其度量方法, 通过分析信息在工序执行过程中的不确定性程度有效度量各类风险因素对工序造成的进度风险; 2) 给出了基于区间直觉梯形模糊数 (Interval-valued intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers, IVITFN) 的人因熵度量方法与操作步骤, 能够更好地描述人的行为对项目进度影响的不确定性和犹豫性; 3) 重点考虑人的行为因素对项目进度的影响, 提出了工序工期、项目缓冲和汇入缓冲的熵模型与修正模型, 进一步提高工序工期与缓冲区设置精度, 有效解决缓冲设置不合理带来的系列问题。

## 1 基于信息熵的缓冲区影响因素度量方法

### 1.1 基于信息熵的缓冲区设置原理

熵起初是一个热力学概念, 最早由克劳修斯提出, 随后逐步引入到物理学、信息论、管理学等学科领域. 1948 年, 申农首先提出了信息熵的概念并用于分析系统结构有序度评价问题, 信息熵的公式为

$$H = -K \sum_i P_i \ln P_i$$

式中,  $H$  为信息熵,  $K$  为常数,  $P_i$  为系统处于某种状态的概率, 且  $P_i \in [0, 1]$ .

信息熵的基本原理主要体现为<sup>[10]</sup>:

**原理 1.** 信息熵是表征系统状态的函数, 能够反映出系统的复杂程度、无序程度或混乱程度, 也是系统不确定性的度量。

**原理 2.** 熵值大小标志着系统发展的阶段和层次, 如果一个系统任其自由发展, 其熵值必然逐渐增加, 混乱程度一定不断上升, 最终处于非常复杂、无序的状态。

**原理 3.** 影响系统熵值的主要因素有: 系统规模、系统复杂性和系统的确定程度. 相同条件下, 系统规模与熵值成正比; 系统元素间关系越多、越复杂, 熵值越大; 有用信息量越少, 熵值越大。

对于项目中的工序而言, 在执行过程中存在诸多不确定性风险因素可能会对其造成潜在影响而产生进度风险, 最终使得整个项目难以按时完成. 熵是对系统不确定性的一种度量, 而工序是一个广义系统, 信息熵可以量化描述其静态与动态特征, 反映工序的无序程度、复杂程度或偏离某项指标的离散来, 可以通过分析信息在工序执行过程中的不确定性程度度量各类风险因素对工序造成的进度风险。

缓冲机制是关键链研究的一个核心问题. 基于对信息熵基本原理的分析, 为了克服人的不良行为因素对工序工期产生的影响, 一方面需要合理压缩工序的持续时间; 另一方面, 可以运用信息熵度量工期压缩后产生的诸多不确定性因素, 并依此设置缓冲区, 从而有效化解进度风险。

### 1.2 缓冲区影响因素及其度量方法

现有项目工期与计划对项目网络的综合复杂度、多资源约束情况特别是人的行为因素考虑不足, 从而导致项目及其工序难以按期完成. 因此, 将缓冲区主要影响因素分为 3 类: 1) 网络复杂度; 2) 资源约束情况; 3) 人的行为因素。

网络复杂度分为综合复杂度 ( $C$ )<sup>[11]</sup> 和工序复杂度 ( $C_i$ ),  $C$  是指项目网络计划中各工序紧前与紧后关系的综合复杂程度,  $C_i$  为项目网络计划中工序  $i$  的复杂度<sup>[7]</sup>. 根据原理 3, 系统规模与复杂性均可用信息熵度量, 且与熵值成正比, 系统规模越大, 元素间关系越多、越复杂, 熵值越大. 因此,  $C$  和  $C_i$  可分别用综合复杂熵 ( $H_f$ ) 和工序复杂熵 ( $H_{f_i}$ ) 度量. 由于工序的工期受紧前工序的影响很大, 紧前工序越多, 工期越容易拖延, 链路中工序总数越少, 工序拖延对工期的影响越大. 综合复杂熵和工序复杂熵统称为复杂熵, 复杂熵越大, 该项目或工序工期受不确定因素的影响越大, 引起工期拖延的可能性也越

大. 根据复杂度与信息熵的公式,  $C$ ,  $H_f$ ,  $C_i$ ,  $H_{f_i}$  可分别通过式 (1)~(4) 得到

$$C = \frac{3 \sum_{j=1}^{N-1} (K_j - S_j) \times j}{A(N+1)} \times \frac{\log_2 \prod_{j=1}^{N-1} S_j}{\log_2 (N-1)!} \quad (1)$$

$$H_f = -C \ln C \quad (2)$$

$$C_i = \frac{L_i}{L_t} \quad (3)$$

$$H_{f_i} = -C_i \ln C_i \quad (4)$$

式 (1) 中,  $N$  表示项目网络计划中或链路上的网络节点数,  $A$  表示对应的工序数,  $K_j$  表示节点  $j$  的紧前工序数,  $S_j$  表示节点  $j$  的紧后工序数; 式 (3) 中,  $L_i$  表示工序  $i$  的紧前工序数,  $L_t$  表示工序  $i$  所在链路的工序总数.

资源约束情况主要由资源紧张度确定. 资源紧张度表征了项目或工序在执行过程中对资源的综合使用强度和负荷, 当资源的使用量接近资源供给上限时, 工期拖延可能性加大. 资源紧张度<sup>[5]</sup> 分为项目资源紧张度 ( $\alpha$ ) 和工序资源紧张度 ( $\alpha_i$ ). 在本文中, 资源紧张度特指  $\alpha_i$ . 根据原理 3, 系统的确定程度可用信息熵度量, 与熵值成反比, 系统的有用信息量越少, 不确定性越大, 熵值越大. 因此,  $\alpha_i$  可用资源熵 ( $H_{z_i}$ ) 度量. 资源熵越大, 表明该工序资源使用量或需求量越多, 工期受资源约束的影响越大. 特别地, 对资源  $p$  的工序紧张度表示为  $\alpha_i^p$ . 根据紧张度与信息熵的公式, 各类资源紧张度和资源熵可由式 (5)~(7) 计算.

$$\alpha_i^p = \frac{r_i^p}{R^p} \times \frac{d_i}{D} \quad (5)$$

$$\alpha_i = \max_{p \in \varphi_i} \{\alpha_i^p\} \quad (6)$$

$$H_{z_i} = -\alpha_i \ln \alpha_i \quad (7)$$

式 (5) 中,  $r_i^p$  表示项目网络中工序  $i$  对资源  $p$  的需求量,  $R^p$  表示资源  $p$  的总量,  $d_i$  表示工序  $i$  的工期,  $D$  表示关键链长度,  $\varphi_i$  为工序  $i$  中所需资源的集合. 假设各类资源均为可更新资源, 且为连续整型变量.

人的行为因素对项目进度的影响主要源于学生综合症和帕金森定律<sup>[1]</sup>, 表现为工期拖延习惯养成 (习惯于工期末尾完成工作)、冗余时间设置过大 (工期中包含了过多的安全时间)、预算执行心态不良 (由于担心提前完成会导致下次工期减少, 工作完成后并不汇报) 等, 这些因素对工序工期的综合影响程度表示为  $\xi_i$ . 根据原理 2 和原理 3, 人的行为因素增加了工序执行中的不确定性程度和进度延迟风

险. 因此,  $\xi_i$  可用人因熵 ( $H_{r_i}$ ) 度量. 人因熵越大, 表明该工序实施过程中受人的不良行为与习惯影响越大, 工期拖延的可能性越大. 根据信息熵的公式,  $H_{r_i}$  可通过式 (8) 得到

$$H_{r_i} = -\xi_i \ln \xi_i \quad (8)$$

## 2 基于区间直觉梯形模糊数的人因熵度量方法

项目执行过程中可能会出现诸多不确定性因素和潜在事件, 由这些因素引发的可能导致项目拖延的事件称为风险事件. 风险事件特别是对于由人的行为因素产生的风险事件由于具有很强的不确定性, 故难以对其作出明确的预测和评价.

保加利亚学者 Atanassov<sup>[12]</sup> 提出的直觉梯形模糊数是对直觉模糊集的拓展与完善, 由于同时考虑了隶属度、非隶属度和犹豫度信息, 能够更好地描述评价对象的不确定性和犹豫性, 避免评价信息的丢失, 也可以表达不同物理量纲的决策信息, 具有很好的信息集结质量与效率. 区间直觉梯形模糊数是直觉梯形模糊数的特殊形式, 其最可能值、隶属度、非隶属度均为区间形式, 专家在评价与判断风险事件的不确定性时使用区间形式更为合理. 因此, 笔者运用区间直觉梯形模糊数的性质与特点量化人的行为因素对工序的影响, 从而实现对人因熵的度量.

### 2.1 区间直觉梯形模糊数的基本概念与算法

定义 1<sup>[13]</sup>. 设  $\tilde{\alpha}$  为实数集合上一个直觉模糊数, 其隶属函数为

$$\mu_{\tilde{\alpha}}(x) = \begin{cases} \frac{(x-a)\mu_{\tilde{\alpha}}}{b-a}, & a \leq x < b \\ \mu_{\tilde{\alpha}}, & b \leq x \leq c \\ \frac{(d-x)\mu_{\tilde{\alpha}}}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

非隶属函数为

$$\nu_{\tilde{\alpha}}(x) = \begin{cases} \frac{b-x+(x-a)\nu_{\tilde{\alpha}}}{b-a}, & a \leq x < b \\ \nu_{\tilde{\alpha}}, & b \leq x \leq c \\ \frac{x-c+(d-x)\nu_{\tilde{\alpha}}}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中,  $\mu_{\tilde{\alpha}}, \nu_{\tilde{\alpha}} \in [0, 1]$ ,  $\mu_{\tilde{\alpha}} + \nu_{\tilde{\alpha}} \leq 1$ ,  $a, b, c, d \in \mathbf{R}$ , 称  $\tilde{\alpha} = ([a, b, c, d]; \mu_{\tilde{\alpha}}, \nu_{\tilde{\alpha}})$  为直觉梯形模糊数. 当  $\mu_{\tilde{\alpha}}$  和  $\nu_{\tilde{\alpha}}$  均为  $[0, 1]$  上的闭区间时,  $\tilde{\alpha}$  为区间直觉梯形模糊数, 记  $\mu_{\tilde{\alpha}} = [\underline{\mu}, \bar{\mu}]$ ,  $\nu_{\tilde{\alpha}} = [\underline{\nu}, \bar{\nu}]$ ,  $\tilde{\alpha}$  可简记为  $\tilde{\alpha} =$



$([a, b, c, d]; [\underline{\mu}, \bar{\mu}], [\underline{\nu}, \bar{\nu}])$ .  $\pi_{\tilde{\alpha}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{\alpha}}(x) + \nu_{\tilde{\alpha}}(x)$  为犹豫函数,  $\pi_{\tilde{\alpha}}(x)$  越大, 模糊数的不确定性越大.

**定义 2**<sup>[14-15]</sup>. 设  $\tilde{\alpha}_i = ([a_i, b_i, c_i, d_i]; [\underline{\mu}_i, \bar{\mu}_i], [\underline{\nu}_i, \bar{\nu}_i])$ ,  $i = 1, 2$  为两个区间直觉梯形模糊数, 则它们之间的 Hamming 距离为

$$d_h(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = \frac{1}{8} [ |(\underline{\mu}_1 - \bar{\nu}_1)a_1 - (\underline{\mu}_2 - \bar{\nu}_2)a_2| + |(\bar{\mu}_1 - \underline{\nu}_1)a_1 - (\bar{\mu}_2 - \underline{\nu}_2)a_2| + |(\underline{\mu}_1 - \bar{\nu}_1)b_1 - (\underline{\mu}_2 - \bar{\nu}_2)b_2| + |(\bar{\mu}_1 - \underline{\nu}_1)b_1 - (\bar{\mu}_2 - \underline{\nu}_2)b_2| + |(\underline{\mu}_1 - \bar{\nu}_1)c_1 - (\underline{\mu}_2 - \bar{\nu}_2)c_2| + |(\bar{\mu}_1 - \underline{\nu}_1)c_1 - (\bar{\mu}_2 - \underline{\nu}_2)c_2| + |(\underline{\mu}_1 - \bar{\nu}_1)d_1 - (\underline{\mu}_2 - \bar{\nu}_2)d_2| + |(\bar{\mu}_1 - \underline{\nu}_1)d_1 - (\bar{\mu}_2 - \underline{\nu}_2)d_2| ] \quad (9)$$

综合文献 [14-15], 改进区间直觉模糊数的加性运算法则如下.

**定义 3.** 设  $\tilde{\alpha}_i = ([a_i, b_i, c_i, d_i]; [\underline{\mu}_i, \bar{\mu}_i], [\underline{\nu}_i, \bar{\nu}_i])$ ,  $i = 1, 2$  为两个区间直觉梯形模糊数, 其加性运算法则为

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_1 \oplus \tilde{\alpha}_2 = & \left( [a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2, d_1 + d_2]; \right. \\ & \left[ \frac{A(\tilde{\alpha}_1)\underline{\mu}_1 + A(\tilde{\alpha}_2)\underline{\mu}_2}{A(\tilde{\alpha}_1) + A(\tilde{\alpha}_2)}, \frac{A(\tilde{\alpha}_1)\bar{\mu}_1 + A(\tilde{\alpha}_2)\bar{\mu}_2}{A(\tilde{\alpha}_1) + A(\tilde{\alpha}_2)} \right], \\ & \left. \left[ \frac{A(\tilde{\alpha}_1)\underline{\nu}_1 + A(\tilde{\alpha}_2)\underline{\nu}_2}{A(\tilde{\alpha}_1) + A(\tilde{\alpha}_2)}, \frac{A(\tilde{\alpha}_1)\bar{\nu}_1 + A(\tilde{\alpha}_2)\bar{\nu}_2}{A(\tilde{\alpha}_1) + A(\tilde{\alpha}_2)} \right] \right) \times \\ \lambda \tilde{\alpha}_1 = & \left( [\lambda a_1, \lambda b_1, \lambda c_1, \lambda d_1]; \right. \\ & \left[ 1 - (1 - \underline{\mu}_1)^\lambda, 1 - (1 - \bar{\mu}_1)^\lambda \right], \\ & \left. [(\underline{\nu}_1)^\lambda, (\bar{\nu}_1)^\lambda] \right), \lambda \geq 0 \end{aligned}$$

式中,  $A(\tilde{\alpha}_i)$  表示  $\tilde{\alpha}_i$  的期望值, 且

$$A(\tilde{\alpha}_i) = \frac{1}{4}(a_i + b_i + c_i + d_i)$$

为便于对 IVITFN 信息进行集成, 综合文献 [16-18] 提出的直觉语言加权平均算子 (Intuitionistic linguistic weighted averaging, ILWA)、不确定性语言加权算子 (Uncertained linguistic weighted averaging, ULWA) 和诱导有序加权平均算子 (Induced ordered weighted averaging, IOWA), 定义区间直觉梯形模糊数加权平均算子 (Interval intu-

itionistic trapezoidal fuzzy number weighted averaging, IITWA) 如下.

**定义 4.** 设  $\tilde{\alpha}_i = ([a_i, b_i, c_i, d_i]; [\underline{\mu}_i, \bar{\mu}_i], [\underline{\nu}_i, \bar{\nu}_i])$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  为一组区间直觉梯形模糊数, 则

$$UITWA(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_n) = \omega_1 \tilde{\alpha}_1 \oplus \omega_2 \tilde{\alpha}_2 \oplus \dots \oplus \omega_n \tilde{\alpha}_n \quad (10)$$

式中,  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$  为  $\tilde{\alpha}_i$  的权重向量,  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ .

## 2.2 问题描述

假设项目管理者拟对某项目执行过程中由于人的行为产生的不确定性进行评价. 记  $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$  表示由  $m$  道工序组成的某项目 ( $m \geq 2$ ); 邀请了  $x$  个专家  $\mathbf{e} = \{e_1, e_2, \dots, e_x\}$  ( $x \geq 2$ ), 其中,  $e_k$  表示第  $k$  个专家,  $\mathbf{q} = \{q_1, q_2, \dots, q_x\}^T$  为专家权重向量,  $q_k$  表示第  $k$  个专家的权重;  $\mathbf{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  为待评价工序的属性集, 表示由  $n$  个人因熵影响因素构成的集合, 属性的权重集为  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ . 专家  $k$  给出的工序  $X_i$  在属性  $u_j$  下的评估值可用直觉梯形模糊数表示为

$$\tilde{d}_{ij}^k = ([h_{1i}^k(u_j), h_{2i}^k(u_j), h_{3i}^k(u_j), h_{4i}^k(u_j)]; \mu_{ij}^k, \nu_{ij}^k)$$

其中,  $\tilde{d}_{ij}^k$  表示专家  $k$  认为工序  $X_i$  因属性  $u_j$  对工序进度带来的影响,  $\mu_{ij}^k = [\underline{\mu}_{ij}^k, \bar{\mu}_{ij}^k]$ ,  $\nu_{ij}^k = [\underline{\nu}_{ij}^k, \bar{\nu}_{ij}^k]$  分别为工序  $X_i$  在属性  $u_j$  下的值属于、不属于  $\tilde{d}_{ij}^k$  的程度, 得到专家  $k$  的模糊判断矩阵  $\tilde{D}^k = (\tilde{d}_{ij}^k)_{m \times n}$ . 下面探讨的是如何根据  $x$  个专家给出的模糊判断矩阵  $\tilde{D} = \{\tilde{D}^1, \tilde{D}^2, \dots, \tilde{D}^x\}$  及相关信息计算人因熵.

## 2.3 人因熵度量方法

度量人因熵的关键是计算人的各种行为因素对工序  $i$  进度的综合影响程度  $\xi_i$ . 这里, 利用 TOPSIS (Technique for order preference by similarity to an ideal solution)<sup>[10]</sup> 法中贴进度的概念计算  $\xi_i$ , 具体步骤如下.

**步骤 1.** 将专家  $k$  给出的模糊判断矩阵  $\tilde{D}^k = (\tilde{d}_{ij}^k)_{m \times n}$  规范化为  $\tilde{G}^k = (\tilde{g}_{ij}^k)_{m \times n}$ . 其中,

$$\tilde{g}_{ij}^k = ([g_{1i}^k(u_j), g_{2i}^k(u_j), g_{3i}^k(u_j), g_{4i}^k(u_j)]; \mu_{ij}^k, \nu_{ij}^k)$$

由于工序属性集为人因熵影响因素, 属于风险性指标, 则有

$$g_{ci}^k(u_j) = \frac{\max_j h_{4i}^k(u_j) - h_{5-c,i}^k(u_j)}{\max_j h_{4i}^k(u_j) - \min_j h_{1i}^k(u_j)}, \quad c = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

**步骤 2.** 由式 (10) 和专家权重向量  $\mathbf{q} = \{q_1, q_2,$

$\dots, q_x\}^T$  集结所有专家的  $\tilde{G}^k$ , 得到专家群的模糊判断矩阵

$$\tilde{G}^q = (\tilde{g}_{ij})_{m \times n}$$

式中

$$\tilde{g}_{ij} = ([h_{1i}(u_j), h_{2i}(u_j), h_{3i}(u_j), h_{4i}(u_j)]; \mu_{ij}, \nu_{ij})$$

**步骤 3.** 确定正理想解  $U^+$  和负理想解  $U^-$ .  $U^+ = \{\tilde{u}_1^+, \tilde{u}_2^+, \dots, \tilde{u}_n^+\}$  在属性  $u_j$  下相对于最大梯形模糊数的隶属度和非隶属度分别为  $[1, 1]$  和  $[0, 0]$ ,  $U^- = \{\tilde{u}_1^-, \tilde{u}_2^-, \dots, \tilde{u}_n^-\}$  在  $u_j$  下相对于最小梯形模糊数的隶属度和非隶属度分别为  $[0, 0]$  和  $[1, 1]$ . 其中,  $\tilde{u}_j^+$  和  $\tilde{u}_j^-$  可由式 (12) 计算.

$$\tilde{u}_j^+ = \left( \left[ \begin{array}{l} \max_{1 \leq i \leq m} h_{1i}(u_j), \max_{1 \leq i \leq m} h_{2i}(u_j), \max_{1 \leq i \leq m} h_{3i}(u_j), \\ \max_{1 \leq i \leq m} h_{4i}(u_j) \end{array} \right]; [1, 1], [0, 0] \right)$$

$$\tilde{u}_j^- = \left( \left[ \begin{array}{l} \min_{1 \leq i \leq m} h_{1i}(u_j), \min_{1 \leq i \leq m} h_{2i}(u_j), \min_{1 \leq i \leq m} h_{3i}(u_j), \\ \min_{1 \leq i \leq m} h_{4i}(u_j) \end{array} \right]; [0, 0], [1, 1] \right) \quad (12)$$

由于在步骤 1 中已将模糊判断矩阵规范化, 因此, 正理想解表示人的各种行为因素对工序  $i$  进度产生的影响最小的情况, 负理想解表示人的各种行为因素对工序  $i$  进度产生的影响最大的情况.

**步骤 4.** 根据式 (13) 和式 (14)<sup>[19]</sup> 计算相对贴进度矩阵  $C = (c_{ij})_{m \times n}$ .

$$s_{ij} = \frac{d_{ij}^+}{d_{ij}^-} = \frac{d_h(\tilde{g}_{ij}, u_j^+)}{d_h(\tilde{g}_{ij}, u_j^-)} \quad (13)$$

$$c_{ij} = \frac{s_{ij}}{\max_i \{s_{ij}\}} \quad (14)$$

式 (13) 中,  $s_{ij}$  为工序  $i$  在属性  $j$  下与正理想解的相对贴进度, 表示  $\tilde{g}_{ij}$  到正理想解  $u_j^+$  与到负理想解  $u_j^-$  的距离比.  $s_{ij}$  越大, 说明  $\tilde{g}_{ij}$  与正理想解的相对距离越大, 人因熵影响因素  $j$  对工序  $i$  进度的综合影响程度较大.

为满足信息熵的计算需要和贴进度  $[0, 1]$  的约束, 由式 (14) 得到  $c_{ij}$ .

**步骤 5.** 根据式 (15) 和工序的属性的权重集  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$  计算各工序  $i$  的总贴进度  $C_i$ .

$$C_i = \sum_{j=1}^n \omega_j c_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

$$\text{式中, } \omega_j = \frac{\sum_{i=1}^m c_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m c_{ij}}, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

**步骤 6.** 计算  $\xi_i$ . 由于工序  $i$  总贴进度  $C_i$  的物理意义是人的各种行为因素对工序  $i$  进度的综合影响程度. 因此,  $\xi_i = C_i$ .

**步骤 7.** 根据式 (8) 计算工序  $i$  的人因熵  $H_{r_i}$ .

### 3 缓冲区设置的熵模型

#### 3.1 基于人因熵的工序工期模型构建

RSEM 方法将估计工期减半作为最终的工序工期易造成工序工期的相对紧缩. 因此, 本文对工序初始工期和安全时间的估计采用文献 [5] 的方法, 由专家确定各工序的最乐观时间、最可能时间和最悲观时间, 采用活动工期分布估计的方法, 根据三角概率分布, 工序的最可能完成时间  $d_i$  和安全完成时间  $S_i$  分别选取置信度为 50% 和 95% 的工序工期, 并进行仿真计算. 安全时间  $\sigma_i$  的计算式为

$$\sigma_i = S_i - d_i = T_{95\%} - T_{50\%} \quad (16)$$

式中,  $d_i$  同时为工序的初始工期.

由于人的行为因素会对项目进度产生较大影响, 造成安全时间浪费、项目工序间松弛、工作效率降低, 甚至工期延误. 因此, 需要将人的行为因素合理融入到项目执行过程中: 一方面, 专家根据工程实践经验, 通过人因熵合理压缩各工序的初始工期减少工期中过多的安全时间或者由于人的不良习惯和心态造成的工期延长; 另一方面, 由于人的习惯和心态不可能很快转变, 压缩工序的初始工期会带来延迟风险, 需要通过适当增加项目缓冲以降低由于人的习惯和心态不可能很快适应工期调整带来的进度风险, 也有利于解决 RSEM 方法由于链路中各工序相互独立的假设条件不成立带来的缓冲区偏小问题.

根据人因熵的涵义, 由式 (17) 得到工序的修正工期.

$$d_i^X = d_i(1 - H_{r_i}) \quad (17)$$

#### 3.2 初始缓冲区模型的构建

根据第 1.2 节中缓冲区影响因素和基于信息熵的度量方法, 以根方差法为基础, 构建初始缓冲区模型如下.

初始项目缓冲大小由式 (18) 计算.

$$PB = (1 + H_f) \sqrt{\sum_i [(1 + H_{z_i})(1 + H_{r_i})\sigma_i]^2} \quad (18)$$

式中,  $PB$  为初始项目缓冲,  $H_f$  为项目的综合复杂熵,  $H_z$  和  $H_{r_i}$  分别为关键链上工序  $i$  资源熵和人因熵,  $\sigma_i$  为工序  $i$  的安全时间.

初始汇入缓冲大小由式 (19) 计算.

$$FB_L = \sqrt{\sum_i [(1 + H_{f_i})(1 + H_{z_i})(1 + H_{r_j})\sigma_j]^2} \quad (19)$$

式中,  $FB_L$  为第  $L$  条非关键链的初始汇入缓冲,  $H_{f_j}$ ,  $H_{z_i}$ ,  $H_{r_j}$  分别为非关键链  $L$  上工序  $j$  的复杂熵、资源熵和人因熵,  $\sigma_j$  为工序  $j$  的安全时间.

### 3.3 初始缓冲区模型的修正

初始缓冲区模型确定后, 如果非关键链汇入缓冲过大可能造成关键链的调整变化或断裂, 引起新的资源冲突等一系列问题<sup>[1]</sup>. 如图 1 所示, 工序 B-C 所在链路为关键链, 根据关键链思想, 应在工序 A 后插入汇入缓冲  $FB$ . 当  $FB > FF_A$  时, A- $FB$ -C 所在链路成为最长路径,  $FF_A$  为工序 A 的自由时差. 为避免类似情况出现, 需要对初始缓冲区模型进行修正, 具体步骤如下.

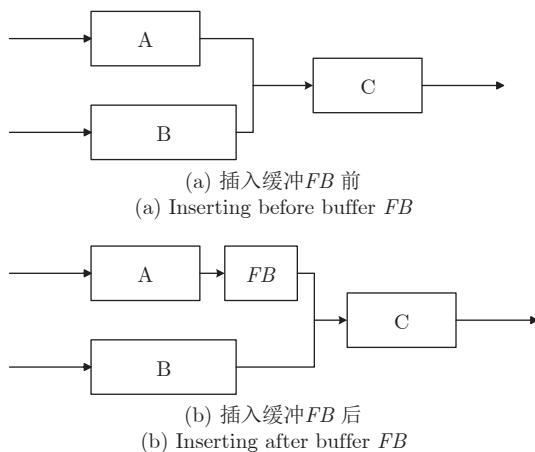


图 1 汇入缓冲对关键链的影响示意图

Fig.1 Flow chart of influence from  $FB$  to critical chain

**步骤 1.** 由式 (20) 和式 (21)<sup>[5-6]</sup> 修正初始汇入缓冲, 得到修正后的汇入缓冲  $FB_L^X$ .

$$FB_L^X = \min(FB_L, FF_p) \quad (20)$$

$$FF_p = \min_{j \in A_p} |ES_{A_j} - EF_p| \quad (21)$$

式 (20) 中,  $FF_p$  表示第  $L$  条非关键链上最后一道工序  $p$  的自由时差,  $FB_L^X$  取  $FB_L$  与  $FF_p$  的较小者可以有效避免由于  $FB_L > FF_p$  造成关键链调整的情况出现; 式 (21) 中,  $A_p$  为第  $L$  条非关键链上最后一道工序  $p$  考虑逻辑和资源约束关系的所有紧后工序  $j$  的集合,  $ES_{A_j}$  为工序  $j$  的最早开始时间,  $EF_p$  为  $p$  的最早结束时间.

**步骤 2.** 由式 (22) 计算第  $L$  条非关键链的冗余缓冲.

$$\Delta t_L = |FB_L - FF_p| \quad (22)$$

**步骤 3.** 由式 (23) 修正初始项目缓冲, 得到修正后的项目缓冲  $PB^X$ .

$$PB^X = PB + \sum_L \Delta t_L \quad (23)$$

式中,  $\sum_L \Delta t_L$  为各条非关键链上冗余缓冲之和, 将冗余缓冲汇入最项目缓冲可以有效降低因修正汇入缓冲给整个关键链带来的进度风险.

**步骤 4.** 由式 (24) 计算项目计划总工期.

$$T = \sum_L d_i^X + PB^X \quad (24)$$

式中,  $\sum_L d_i^X$  为关键链上各工序的修正工期之和.

## 4 算例分析

### 4.1 算例设计

某项目由 19 道工序构成, 各工序可能需要 3 种资源 ( $p_1, p_2, p_3$ ), 资源限量为 (8, 7, 3), 项目中各工序具体信息和项目网络计划分别如表 1 和图 2 所示.

项目执行过程中由于存在资源冲突, 根据文献 [1] 中的启发式算法, 得到项目的关键链及其缓冲如图 3 所示. 图 3 中, A-C-E-G-H-I-K-L-N-M-Q-P-S 为关键链,  $FB_1 \sim FB_5$  为汇入缓冲,  $PB$  为项目缓冲. 下面, 需要计算  $FB_1 \sim FB_5$  和  $PB$ .

### 4.2 复杂熵、资源熵和人因熵计算

由式 (1)~(4), 计算项目的综合复杂度 ( $C$ )、非关键链上的工序复杂度 ( $C_i$ ) 及其对应的复杂熵, 得到

$$C = 0.0420, C_B = C_F = C_J = C_O = C_R = 0,$$

$$C_D = 0.5, H_f = 0.13, H_{f_D} = 0.35,$$

$$H_{f_B} = H_{f_F} = H_{f_J} = H_{f_O} = H_{f_R} = 0$$

复杂熵如表 2 第 7 列所示.

各工序的资源熵待关键链及各工序工期确认后由式 (5)~(7) 计算.

为计算各工序的人因熵, 项目管理者邀请 3 位专家  $e = \{e_1, e_2, e_3\}$  对工序执行过程进行评价,  $q = \{0.3, 0.4, 0.3\}^T$  为专家权重向量,  $q_k$  表示第  $k$  个专家的权重. 记  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_{10}\}$  表示该项目由 10 道工序组成, 经过与专家的讨论, 将工期拖延习惯养成、冗余时间设置过大、预算执行心态不良作为待评价工序的属性集, 记为  $U = \{u_1, u_2, u_3\}$ ,

表 1 项目中各工序基本信息  
Table 1 Information of process in the program

工序编号	紧前工序	紧后工序	最乐观时间 (d)	最可能时间 (d)	最悲观时间 (d)	所需资源数量		
						$p_1$	$p_2$	$p_3$
A	-	C, D	6	8	12	4	5	2
B	-	C, D	3	6	8	3	2	1
C	A, B	E, F	7	10	12	4	4	1
D	A, B	E, F	5	6	9	4	3	2
E	G	G	8	10	11	3	2	1
F	H	H	4	6	7	5	3	1
G	E	I, J	8	9	12	4	3	2
H	F	I, J	4	6	9	5	2	1
I	G, H	K	2	4	5	5	3	0
J	G, H	L	10	12	16	3	2	1
K	I	L	9	11	13	3	4	3
L	J, K	M, N, O	8	9	12	4	2	2
M	L	P, Q, R	15	20	22	6	1	1
N	L	P, Q, R	7	10	12	4	3	0
O	L	P, Q, R	4	5	6	4	3	2
P	M, N, O	S	8	9	12	4	4	2
Q	M, N, O	S	6	8	9	7	5	1
R	M, N, O	S	3	5	6	4	3	1
S	P, Q, R	-	4	5	8	7	3	1
资源限量						8	7	3

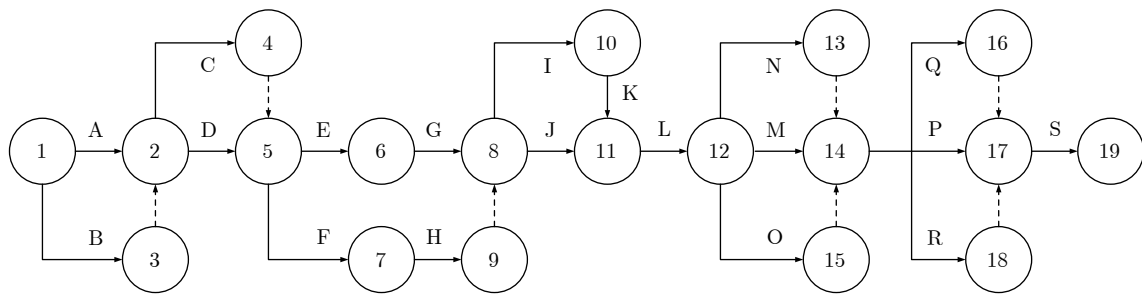


图 2 项目网络计划图

Fig.2 Chart of program network plan

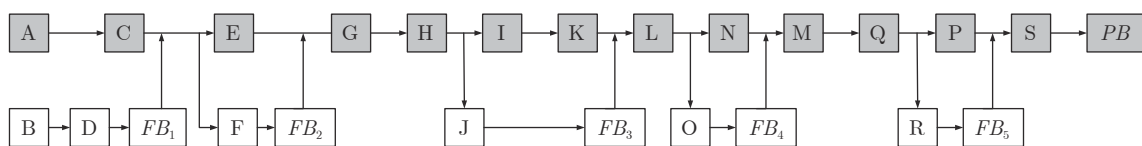


图 3 项目关键链及缓冲设置示意图

Fig.3 Sketch of critical chain and buffer setting

表 2 缓冲区参数计算  
Table 2 Value of buffer parameters

类型	编号	三角分布	$T_{50\%}$	$T_{95\%}$	$\sigma_i$	$H_f$	$H_{z_i}$	$H_{r_i}$	$d_i^X$	$FB$	$PB$	$FB^X$	$PB^X$
关键链工序	A	(6, 8, 12)	8.35	11.19	2.84		0.13	0.15	7.10	-		-	
	C	(7, 10, 12)	10.38	11.42	1.04		0.12	0.18	8.51	-		-	
	E	(8, 10, 11)	10.22	10.64	0.42		0.08	0.20	8.18	-		-	
	G	(8, 9, 12)	9.48	11.04	1.56		0.13	0.21	7.49	-		-	
	H	(4, 6, 9)	6.25	8.45	2.20		0.10	0.10	5.63	-		-	
	I	(2, 4, 5)	4.54	4.83	0.29		0.08	0.13	3.85	-		-	
	K	(9, 11, 13)	11.00	12.28	1.28	0.13	0.22	0.05	10.15	-	7.50	-	8.02
	L	(8, 9, 12)	9.16	11.25	2.09		0.13	0.14	7.88	-		-	
	N	(6, 10, 12)	10.42	11.72	1.30		0.10	0.08	9.59	-		-	
	M	(15, 20, 22)	20.08	21.16	1.08		0.22	0.27	14.66	-		-	
	Q	(6, 8, 9)	8.35	8.78	0.43		0.16	0.08	7.68	-		-	
P	(8, 9, 12)	9.38	11.12	1.74		0.13	0.15	7.97	-		-		
S	(4, 5, 8)	4.92	7.34	2.42		0.11	0.23	3.79	-		-		
非关键链工序	B	(3, 6, 8)	6.26	7.68	1.42	0	0.11	0.14	5.38	4.17	-	4.17	-
	D	(5, 6, 9)	5.86	8.26	2.40	0.35	0.19	0.09	5.33	-	-	-	-
	F	(4, 6, 7)	6.15	6.71	0.56	0	0.18	0.28	4.43	0.66	-	0.66	-
	J	(10, 12, 16)	12.12	14.98	2.86	0	0.14	0.13	10.54	3.98	-	3.46	-
	O	(4, 5, 6)	5.08	6.62	1.54	0	0.17	0.11	4.52	1.80	-	1.80	-
	R	(3, 5, 6)	5.14	6.68	1.54	0	0.13	0.08	4.73	1.74	-	1.74	-

属性的权重集为  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ .

下面以工序 A 为例简要说明人因熵  $H_{r_A}$  的计算过程. 假设 3 位专家给出模糊决策矩阵  $\tilde{D}^k = (\tilde{d}_{ij}^k)_{m \times n}$  ( $k = 1, 2, 3$ ) 分别为

$$\begin{aligned} \tilde{D}^1 &= \{([2, 4, 5, 8]; [0.4, 0.5], [0.2, 0.3]), \\ &\quad ([2, 3, 4, 5]; [0.1, 0.4], [0.5, 0.6]), \\ &\quad ([1, 2, 4, 5]; [0.5, 0.7], [0.1, 0.2])\} \\ \tilde{D}^2 &= \{([1, 2, 3, 4]; [0.6, 0.8], [0.1, 0.2]), \\ &\quad ([2, 3, 4, 5]; [0.4, 0.7], [0.2, 0.3]), \\ &\quad ([3, 4, 5, 6]; [0.3, 0.5], [0.2, 0.4])\} \\ \tilde{D}^3 &= \{([4, 5, 6, 7]; [0.3, 0.5], [0.2, 0.4]), \\ &\quad ([1, 3, 5, 6]; [0.2, 0.4], [0.4, 0.5]), \\ &\quad ([2, 4, 6, 7]; [0.1, 0.4], [0.5, 0.6])\} \end{aligned}$$

由式 (11) 进行规范化处理, 根据式 (10) 和专家权重  $q = \{0.3, 0.4, 0.3\}^T$  得到集结后规范化的专家群模糊决策矩阵为

$$\tilde{G}^q = \{([0.21, 0.44, 0.64, 0.83]; [0.45, 0.62], [0.16, 0.29]), \\ ([0.14, 0.34, 0.60, 0.86]; [0.25, 0.52], [0.35, 0.45]), \\ ([0.17, 0.33, 0.60, 0.82]; [0.30, 0.53], [0.26, 0.40])\}$$

由式 (12) 计算  $\tilde{u}_j^+$  和  $\tilde{u}_j^-$  如下.

$$\begin{aligned} \tilde{u}_j^+ &= ([0.21, 0.44, 0.64, 0.86]; [1, 1], [0, 0]) \\ \tilde{u}_j^- &= ([0.14, 0.33, 0.60, 0.82]; [0, 0], [1, 1]) \end{aligned}$$

根据式 (13) 和式 (14) 计算相对贴近度矩阵得

$$C = \{0.5005, 1.0000, 0.8263\}$$

根据式 (15) 计算工序 A 的总贴近度即各风险因素对工序 A 的综合影响程度.

$$\xi_A = C_A = 0.8309$$

由式 (8) 计算工序 A 的人因熵为

$$H_{r_A} = 0.15$$

同理, 得到其他工序的人因熵, 见表 2 第 9 列.

### 4.3 缓冲区大小计算

根据第 3.1 节对工序初始工期和安全时间的计算方法, 通过三角分布的逆函数法对各工序的进度计划进行蒙特卡洛仿真, 抽取 1 000 次仿真结果得到各工序的时间参数, 见表 2 第 4~6 列. 其中, 工序初始工期  $d_i = T_{50\%}$ .

由式 (5)~(7) 计算各工序的资源熵, 见表 2 第 8 列.

由式 (16) 和式 (17) 计算工序的修正工期  $d_i^X$ , 见表 2 第 10 列.

由式 (18) 和式 (19) 计算初始项目缓冲  $PB$ 、初始汇入缓冲  $FB_1$  和  $FB_2$ , 见表 2 第 11 列和第 12 列. 本例中只有工序 B 存在  $FB_J > FF_J = 3.46d$



的情况, 由式 (20) ~ (22), 得  $FB_J^X = 3.46 \text{ d}$ ,  $\Delta t = 0.52 \text{ d}$ ; 由式 (23), 得  $PB^X = 8.02 \text{ d}$ , 见表 2 第 13 列和第 14 列。

由式 (24), 计算项目计划总工期为 110.50 d。

#### 4.4 算法比较分析

为验证本文方法的实用性, 选取关键路线法、根方差法、APRT 法<sup>[2]</sup>、胡晨等<sup>[5]</sup>、蒋红妍等<sup>[6]</sup>、张俊光等<sup>[7]</sup>提出的方法与本文方法进行比较, 分别计算汇入缓冲、项目缓冲和计划总工期; 通过 Cryttal Ball 工具, 对项目执行情况进行 1 000 次模拟, 统计项目缓冲消耗和项目完工情况, 如表 3 和表 4 所示。

比较 7 种方法, 分析结果如下:

1) 方法 7 与方法 1 比较. 由于方法 1 制定关键路径的前提是资源充足无约束, 当出现并行工序且资源有限时部分并行工序可能调整为串行实施, 按照原定计划无法完工. 因此, 其项目完工率仅为 15.14%, 远低于方法 7。

2) 方法 7 与方法 3 比较. 从项目平均完工率分析, 方法 3 最高, 方法 7 较方法 3 低 3.78%, 但方法 3 的计划总工期比方法 7 多出了 14.08 d, 延长 12.7%. 可见, 项目完工率并未随总工期的延长而成比例提升; 同时, 方法 3 的缓冲区消耗比例为 26.98%, 说明缓冲区设置过大, 浪费严重。

3) 方法 7 与方法 2 和方法 4 ~ 6 比较。

a) 从工期角度分析, 方法 7 的计划总工期 110.50 d 是最短的, 这是由于项目管理者在进行工期估算时考虑到人的行为因素对项目执行过程带来诸多影响, 通常会加入大量的安全时间. 人因熵可以实现对这些影响的精准测度, 并将人的行为因素融入到项目执行过程中, 通过修正估算工期, 可以合理压缩各工序工期中过多的安全时间, 从而减少计划总工期. 不仅如此, 由表 4 可知, 方法 7 的项目平均完工率为 95.20%, 高于方法 2 和方法 4, 与方法 5 和方法 6 比较接近, 充分说明通过人因熵修正估算工期的方法是有效的, 并未造成工序工期的紧张而使项目的平均完工率降低。

b) 从汇入缓冲与汇入缓冲平均消耗率、项目缓冲与项目缓冲平均消耗率分析, 方法 2 和方法 4 ~ 7 基本呈现出缓冲大小逐渐增加、缓冲平均消耗率逐渐降低的规律. 方法 7 中, 各项汇入缓冲最大, 由于汇入缓冲不会影响项目工期, 故汇入缓冲起到了更好的保护作用; 项目缓冲方法 7 最大, 平均消耗率为 57.03%, 处在 33% ~ 67% 的理想比例, 而方法 2 和方法 4 ~ 6 的项目工期平均消耗率均超出 67%, 说明缓冲区设置相对较大, 存在不同程度的浪费, 且项目缓冲对工期的保护效果不好。

方法 7 计算得到的项目缓冲略大于其他方法。

表 3 不同方法缓冲区消耗对比  
Table 3 Comparison of buffer consumption by different methods

方法名称	汇入缓冲 (d)/汇入缓冲平均消耗率 (%)					项目缓冲 (d)	项目缓冲平均消耗率 (%)
	$FB_{BD}$	$FB_F$	$FB_J$	$FB_O$	$FB_R$		
1) 关键路线法	-	-	-	-	-	-	-
2) 根方差法	2.79/8.73	0.56/10.82	2.86/2.93	1.54/8.24	1.54/9.55	5.84	91.62
3) APRT法	6.64/2.24	1.31/3.18	5.78/0.10	3.91/1.35	3.74/1.02	12.96	26.98
4) 胡晨	3.06/8.14	0.58/10.62	2.98/2.13	1.58/6.98	1.59/7.54	6.75	88.54
5) 蒋红妍	3.78/5.08	0.60/7.95	3.24/1.09	1.75/2.68	1.62/3.40	7.58	75.76
6) 张俊光	4.04/4.86	0.64/6.76	3.31/0.72	1.72/3.35	1.66/2.08	7.89	69.20
7) 本文方法	4.17/4.68	0.66/6.79	3.46/0.36	1.80/1.95	1.74/1.26	8.02	57.03

表 4 不同方法完工情况对比  
Table 4 Completion comparison of different methods

方法名称	缓冲区主要考虑因素	计划总工期 (d)	项目平均完工率 (%)
1) 关键路线法	-	90.50	15.14
2) 根方差法	工序方差	112.76	89.62
3) APRT法	资源紧张度	124.58	98.98
4) 胡晨	活动工期分布、资源紧张度	115.82	93.56
5) 蒋红妍	工期分布、信息综合约束、资源受限程度等	118.35	96.45
6) 张俊光	资源紧张度、工序复杂度、位置系数、技术与需求不确定性等	120.30	97.68
7) 本文方法	网络复杂度、资源约束、人的行为因素	110.50	95.20

这是由于估算工期压缩后, 由于人的行为与心态调整需要一定时间, 必然会对项目执行带来一定的进度风险; 同时, 人的行为因素产生的风险事件也有可能引发项目拖延. 因此, 确定项目缓冲时融入复杂熵、资源熵特别是人因熵的计算吸收了非关键链上的部分剩余缓冲, 通过合理增加项目缓冲, 有效降低了项目进度风险.

综合分析, 依据仿真结果, 本文提出的方法要优于其他方法, 在项目缓冲消耗和项目完工情况之间可以取得较好的平衡.

## 5 结束语

项目执行过程中可能出现的诸多不确定性因素和潜在风险是关键链缓冲区设置不合理的主要原因, 本文基于信息熵理论提出了一种关键链缓冲区设置方法, 通过研究信息在工序实施过程中的不确定性程度度量各类风险因素对工序造成的影响. 首先, 分析了缓冲区的主要影响因素, 并依此提出了复杂熵、资源熵和人因熵的概念、涵义及其度量方法, 重点给出了基于区间直觉梯形模糊数的人因熵度量步骤, 由于区间直觉梯形模糊数同时考虑了隶属度、非隶属度和犹豫度信息, 能够更好地描述人的行为对项目进度影响的不确定性和犹豫性, 避免评价信息的丢失, 提高信息集结质量与效率; 其次, 构建了基于人因熵的工序工期模型, 将人的行为因素合理融入到项目执行过程中, 通过合理压缩各工序的初始工期减少工期中过多的安全时间或者由于人的不良习惯和心态造成的工期延长; 最后, 给出了项目缓冲和汇入缓冲的熵模型与修正模型, 该模型以根方差法为基础, 融入复杂熵、资源熵和人因熵的计算, 能够更为合理与全面地量化风险因素对项目进度的影响, 提高缓冲区设置精度, 有效解决由于汇入缓冲过大可能造成的系列问题, 并通过算例验证了模型的实用性. 下一步将重点研究多项目并行条件下多资源约束的关键链缓冲区设置问题.

## References

- Li Jun-Ting. *Critical Chain Multi-project Management Theory and Methods*. Beijing: China Social Science Press, 2016. 77-99 (李俊亭. 关键链多项目管理理论与方法. 北京: 中国社会科学出版社, 2016. 77-99)
- Tukel O I, Rom W O, Eksioğlu S D. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling. *European Journal of Operational Research*, 2006, **172**(2): 401-416
- Xu Xiao-Feng, Hao Jun, Deng Yi-Rui. Project critical chain buffer setting and control model considered multiple factors disturbance. *Systems Engineering — Theory and Practice*, 2017, **37**(6): 1593-1601 (徐小峰, 郝俊, 邓忆瑞. 考虑多因素扰动的项目关键链缓冲区设置及控制模型. 系统工程理论与实践, 2017, **37**(6): 1593-1601)
- Liu Shu-Qing, Luo Dan, Liu Jia, Chen Dan-Dan. Research on the critical chain buffer setting model of EPC project. *Operations Research and Management Science*, 2015, **24**(5): 270-280 (刘书庆, 罗丹, 刘佳, 陈丹丹. EPC项目关键链缓冲区设置模型研究. 运筹与管理, 2015, **24**(5): 270-280)
- Hu Chen, Xu Zhe, Yu Jing. Calculation method of buffer size on critical chain with duration distribution and multiresource constraints. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2015, **24**(2): 237-242 (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. 系统管理学报, 2015, **24**(2): 237-242)
- Jiang Hong-Yan, Peng Yin, Xie Xue-Hai. Calculation method of buffer size on critical chain with information and multi-resource constraints. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2019, **36**(1): 34-41 (蒋红妍, 彭颖, 谢雪海. 基于信息和多资源约束的关键链缓冲区大小计算方法. 土木工程与管理学报, 2019, **36**(1): 34-41)
- Zhang Jun-Guang, Song Xi-Wei, Yang Shuang. Buffer sizing of a critical chain project based on the entropy method. *Management Review*, 2017, **29**(1): 211-219 (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. 管理评论, 2017, **29**(1): 211-219)
- Zhang J G, Song X W, Díaz E. Project buffer sizing of a critical chain based on comprehensive resource tightness. *European Journal of Operational Research*, 2016, **248**: 174-182
- Xie Zhi-Qiang, Zhang Xiao-Huan, Xin Yu, Yang Jing. Time-selective integrated scheduling algorithm considering posterior processes. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(2): 344-362 (谢志强, 张晓欢, 辛宇, 杨静. 考虑后续工序的择时综合调度算法. 自动化学报, 2018, **44**(2): 344-362)
- Qiu Wan-Hua. *Management Decision Entropy and Application*. Beijing: China Power Press, 2011. 160-163 (邱苑华. 管理决策熵学及其应用. 北京: 中国电力出版社, 2011. 160-163)
- Bai Si-Jun. Choice model for large scale organization of project management based on information entropy. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1994, **15**(7): 891-894 (白思俊. 活动网络计划约束的复杂性度量及其应用. 航空学报, 1994, **15**(7): 891-894)
- Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, **20**: 87-96
- Wan Shu-Ping. Multi-attribute decision making method based on inter-valued trapezoidal intuitionistic fuzzy number. *Control and Decision*, 2012, **27**(3): 455-458 (万树平. 基于分式规划的区间梯形直觉模糊数多属性决策方法. 控制与决策, 2012, **27**(3): 455-458)
- Wan Shu-Ping. Multi-attribute decision making method based on trapezoidal intuitionistic fuzzy number. *Control and Decision*, 2011, **26**(6): 857-860, 866 (万树平. 基于区间直觉梯形模糊数的多属性决策方法. 控制与决策, 2011, **26**(6): 857-860, 866)
- Wang Xin-Fan, Yang Xiao-Juan. Approach to group decision making based on interval-valued intuitionistic trapezoidal fuzzy number. *Journal of Hunan University of Technology*, 2012, **26**(3): 2-8, 51 (汪新凡, 杨小娟. 基于区间直觉梯形模糊数的群决策方法. 湖南工业大学学报, 2012, **26**(3): 2-8, 51)
- Wang Xin-Fan. *Study on Multi-criteria Decision Making Method Based on Trapezoidal Intuitionistic Fuzzy Number*. Beijing: Intellectual Property Press, 2017. 20-35 (汪新凡. 直觉语言多准则决策方法研究. 北京: 知识产权出版社, 2017. 20-35)
- Xu Ze-Shui. *Decision Theories and Methods Based on Linguistic Information*. Beijing: Science Press, 2016. 118-140 (徐泽水. 基于语言信息的决策理论与方法. 北京: 科学出版社,

2016. 118–140)

- 18 Li Xi-Hua, Wang Fu-Qiang, Chen Xiao-Hong. Intuitionistic trapezoidal fuzzy IOWA operator based on Dempster-Shafer theory and its application. *Systems Engineering — Theory and Practice*, 2016, **36**(11): 2915–2923  
(李喜华, 王傅强, 陈晓红. 基于证据理论的直觉梯形模糊IOWA算子及其应用. *系统工程理论与实践*, 2016, **36**(11): 2915–2923)
- 19 Fu Ya-Nan, Mao Jun-Jun, Xu Dan-Qing. Improved TOPSIS of multiple attribute decision making method based on interval-valued ITFN. *Mathematics in Practice and Theory*, 2014, **44**(17): 134–140  
(付亚男, 毛军军, 徐丹青. 基于区间直觉梯形模糊数的改进TOPSIS多属性决策方法. *数学的实践与认识*, 2014, **44**(17): 134–140)



**巩 军** 海军工程大学管理工程与装备经济系讲师, 博士. 主要研究方向为复杂系统建模与仿真. 本文通信作者.

E-mail: haifengyihao11111@163.com  
(**GONG Jun** Ph.D., lecturer in the Department of Management Engineering and Equipment Economics, Naval University of Engineering. His research interest covers complex sys-

tem modeling and simulation. Corresponding author of this paper.)

tem modeling and simulation. Corresponding author of this paper.)



**胡 涛** 海军工程大学管理工程与装备经济系教授. 主要研究方向为装备管理, 系统管理.

E-mail: jiaqiu\_002@163.com

(**HU Tao** Professor in the Department of Management Engineering and Equipment Economics, Naval University of Engineering. His research interest covers equipment management and system management.)



**姚 路** 海军工程大学管理工程与装备经济系副教授. 主要研究方向为信息管理.

E-mail: yaoluv@163.com

(**YAO Lu** Associate professor in the Department of Management Engineering and Equipment Economics, Naval University of Engineering. His main research interest is information management.)