

文章编号:1672-9331(2021)04-0052-09

基于信息熵的装配式建筑项目关键链缓冲区设置研究

彭军龙¹, 李付美¹, 刘泽鹏²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 岳阳市交通建设投资集团有限公司, 湖南 岳阳 414021)

摘要: 为解决经典关键链缓冲区设置方法中,因不确定性因素量化得不合理而造成的装配式建筑施工工期的延误问题,主要考虑影响装配式建筑施工进度的3类因素,利用信息熵理论提出一种基于复杂熵、多资源熵和项目团队熵的缓冲区设置方法;重点引入偏最小二乘法结构方程模型解决项目团队熵难以度量的问题,并给出缓冲区设置及修正的熵模型;通过算例仿真,验证了本研究缓冲区设置方法的可行性。该方法可有效地缩短装配式建筑项目的完工工期。

关键词: 装配式建筑;信息熵;关键链;缓冲区设置;PLS-SEM

中图分类号: TU712.1

文献标志码: A

Research on buffer setting of prefabricated building project based on information entropy

PENG Jun-long¹, LI Fu-mei¹, LIU Ze-peng²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Yueyang Communications Construction Investment Group Co., Ltd., Yueyang 414021, China)

Abstract: In order to solve the problem of delay in construction of prefabricated buildings caused by unreasonable quantification of uncertain factors in the classic critical chain buffer setting method, mainly considering three types of factors affecting the construction progress of prefabricated buildings, a buffer setting method based on complex entropy, multi-resource entropy and project team entropy was proposed based on the theory of information entropy. Partial least squares structural equation modeling was mainly introduced to solve the problem that project team entropy was difficult to measure, and an entropy model for buffer setting and correcting was proposed. The feasibility of the buffer setting method proposed in this study was verified through the example simulation. The method can effectively shorten the completion period of the prefabricated building project.

Key words: prefabricated building; information entropy; critical chain; buffer setting; PLS-SEM

关键链项目进度管理方法(critical chain project management, CCPM)中经典缓冲区的设置包

括了 GOLDRATT^[1]提出的剪切粘贴法(cast and path method, C&PM)与 NEWBOLD^[2]提出的根

收稿日期:2021-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578080);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30746)

通讯作者:彭军龙(1976—),男,副教授,主要从事工程项目管理、公路工程可行性等方面的研究。

E-mail:375135287@qq.com

方差法(root square error method, RSEM)两个基本方法^[3]。CCPM 方法中缓冲区的设置实质上是基于风险聚合理论,即把原本预留在各工序中的安全时间全部提取出来,用缓冲区的形式集中插入关键链的结尾处形成项目缓冲(project buffer, PB)和关键链与非关键链的交接口处形成汇入缓冲(feeding buffer, FB),目的是保证项目的完工概率满足要求,按期甚至提前竣工。缓冲区的大小是以各个安全时间作为基数进行计算的,因此,设置缓冲区不仅要充分把握链路工序的特点,而且要考虑工序间的逻辑关系。卜朱镇等^[4]从收益、资源及风险角度分析关键链缓冲区的影响因素,提出了一种改进的基于多项目重要度的关键链识别及缓冲评估方法。蒋红妍等^[5]提出了考虑信息与资源综合等影响因素的新的缓冲区设置方法。易欣等^[6]在经典缓冲区设置方法上通过加入施工准备复杂度和盾构施工风险偏好度构建了项目柔性建设期缓冲区模型。目前,缓冲区设置的研究方法^[7-11]虽然在不断地得到改进,但仍存在不足之处:① 针对装配式建筑项目缓冲区设置的研究较少,且多从工序活动及资源角度分析缓冲区计算的不确定性,而从项目及工序双角度、项目团队视角分析缓冲区的不确定性因素尚未涉及,进而忽视了对项目完工工期产生的影响;② 在对缓冲区设置的不确定性因素进行定量分析时,难以统一不确定性因素的度量标准。

鉴于此,本研究基于信息熵理论对装配式建筑项目缓冲区的设置方法进行改进。首先,运用灰色理论对装配式建筑工序工期及安全时间的估算方法进行改进,基于信息熵理论对装配式建筑项目缓冲区设置的 3 类主要不确定性因素进行定量分析,确定统一的熵度量标准;其次,基于熵度量参数构建装配式建筑项目关键链缓冲区设置及修正熵模型;最后,利用蒙特卡洛仿真软件 Crystal Ball 对算例进行仿真模拟,预测装配式建设项目的完工工期,通过与经典缓冲区设置方法的计算结果进行对比分析,验证本研究提出的模型的可行性。

1 信息熵原理

信息熵原理是通过对系统复杂度、无序度、混乱度以及不确定性程度进行熵度量,分析评价系统有序度的一种方法^[12]。针对装配式建筑项目进

度管理的特点,可将项目及工序的执行看作此类系统,将不确定的执行过程视为信息熵理论中的熵变过程,从而实现基于信息熵的装配式建筑项目不确定性因素的定量分析。

假设用离散型随机变量 X 表示某个具有不确定性特征的系统的状态,则 X 的取值及对应的概率为:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, n \in [2, +\infty) \quad (1)$$

$$P(X) = \{P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)\},$$

$$P(x_i) \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

则系统的信息熵为:

$$H(X) = \sum_{i=1}^n P(x_i) \ln \frac{1}{P(x_i)} = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \ln P(x_i) \quad (3)$$

式(3)中的信息熵为泛熵,可用来表征任何系统的不确定性程度。

2 缓冲区设置及修正熵模型

2.1 工序工期及安全时间的估计

由于装配式项目及工序中存在着大量的不确定性因素,用传统三时工期估计法估计装配式建筑项目工期极可能造成估算值与期望值的偏差过大,而灰色理论模型具有预测精准度高、计算量小、样本需求量少的特点,且能适应样本分布的多样性,适合用来做预测评估^[13]。因此,本研究对传统的三时工期估计法进行改进,引入基于灰色理论的梯形白化权函数及一致性指数对装配式建筑工序工期及安全时间进行估算。

依据灰色理论的梯形白化权函数理论模型,假设装配式建筑项目工序 θ_i 的工期估算值服从梯形模糊分布,用 a_i 表示工序 θ_i 的最乐观工期, m_i 表示工序 θ_i 的最可能工期的最小值, n_i 表示工序 θ_i 的最可能工期的最大值, b_i 表示工序 θ_i 的最悲观工期。 a_i, m_i, n_i, b_i 的取值由专家或经验丰富的管理人员根据具体项目及工序特征进行估算,相应的梯形模糊数为 (a_i, m_i, n_i, b_i) ,其隶属度函数为经典的白化权函数。参考文献^[14],确定工序 θ_i 的期望工期 $E(\theta_i)$ 及工序安全时间 σ_i :

$$E(\theta_i) = \frac{2a_i + m_i + n_i + b_i}{6} \quad (4)$$

$$\sigma_i = t_{i,95\%} - E(\theta_i) \quad (5)$$

式中: $t_{i,95\%}$ 为 95%完工率的情况下,工序 θ_i 的一致性工期。

2.2 缓冲区影响因素的熵度量

根据现有文献,影响装配式项目^[15-16]缓冲区设置的 3 类主要因素为:装配式项目的综合复杂程度^[17]、装配式项目的多资源紧张程度^[18]以及装配式建筑的项目团队能力^[19](包含承包商领导管理部门能力和施工团队能力)。基于信息熵原理确定 3 类影响因素的熵度量:综合复杂熵、多资源熵和项目团队熵。对于难以直接确定的项目团队熵,在对装配式建筑的项目团队能力进行分析的基础上,通过引入偏最小二乘法结构方程模型(partial least squares structural equation modeling, PLS-SEM)进行确定。

2.2.1 综合复杂熵、多资源熵度量的确定

在装配式建筑项目中,工序 θ_i 在进度网络计划图中的复杂程度可表示为工序复杂度 $F_{i,G}$,各工序逻辑关系组成的项目网络复杂程度可表示为项目复杂度 F_x 。在信息熵理论中,系统的复杂水平可用信息熵进行量化。若系统内部因素的数量及联系变多,则系统变得复杂,其熵值也变得更大。故 F_x 与 $F_{i,G}$ 可用项目复杂熵 $H(F_x)$ 和工序复杂熵 $H(F_{i,G})$ 来度量,可将二者统称为综合复杂熵 $H(F)$ ^[20]。

工序复杂度及工序复杂熵的度量公式为:

$$F_{i,G} = \frac{1}{2} \left(\frac{l_{i,p}}{l_{i,q}} + \frac{t_{i,p}}{t_{i,q}} \cdot \frac{t_i}{t_{i,q}} \right) \quad (6)$$

$$H(F_{i,G}) = -F_{i,G} \ln F_{i,G} \quad (7)$$

式(6)~(7)中: t_i 为工序 θ_i 的持续时长; $l_{i,p}$ 为工序 θ_i 所在链路的紧前工序的数量; $t_{i,p}$ 为工序 θ_i 距离链路开工点的时长; $l_{i,q}$ 为工序 θ_i 所在链路的工序总数量; $t_{i,q}$ 为工序 θ_i 所在链路的总工期。

项目复杂度及项目复杂熵的度量公式为:

$$F_x = \frac{\log_2 \prod_{j=1}^{J-1} U_j}{\log_2 (J-1)!} \cdot \frac{3 \sum_{j=1}^{J-1} j (V_j - U_j)}{I(J+1)} \quad (8)$$

$$H(F_x) = -F_x \ln F_x \quad (9)$$

式(8)~(9)中: J , I 分别为项目网络图或链路中的节点数量和工序数量; V_j , U_j 分别为节点 j 的紧前和紧后工序的数量。

装配式建筑项目属于资源种类及数量密集型的项目,故计算缓冲值需充分考虑项目中资源的紧张度 $Z_{i,D}$ 。 $Z_{i,D}$ 可用多资源熵 $H(Z_{i,D})$ 来度

量, $H(Z_{i,D})$ 越大,说明工期受资源紧张度的影响越大。

资源紧张度和多资源熵的计算公式^[20]为:

$$Z_{i,D} = \frac{\sum_{k=1}^K (C_{tik} \times r_{tik})}{\sum_{k=1}^K (C_{tik} \times R_{tik})}, t \in [ST_i, ST_i + D_i] \quad (10)$$

$$H(Z_{i,D}) = -Z_{i,D} \ln Z_{i,D} \quad (11)$$

式(10)~(11)中: K 为工序 θ_i 所需的资源种类数; C_{tik} 为资源 k 的单位成本,代表 t 时间内对 k 的需求量; r_{tik} 为 t 时间内资源 k 的供给量; R_{tik} 为 t 时间内资源 k 的可供量; ST_i , D_i 分别为工序 θ_i 的开工时间与工期。

2.2.2 项目团队熵度量的确定

PLS-SEM 作为一种数据统计分析方法,其优点在于对不能直接通过测量获取的潜变量数据可通过设计一系列可观测变量的题项进行获取^[21]。在装配式建筑项目中,可直接将综合复杂程度和多资源紧张程度进行量化来确定熵度量,但对项目进度目标起着至关重要作用的项目团队能力难以直接量化。因此,引入 PLS-SEM 对装配式建筑项目团队能力进行因素分析。

首先,根据信息熵公式得到项目团队熵 $H(\eta_{i,T})$ 的度量公式:

$$\eta_{i,T} = |1 - \eta''_i| \quad (12)$$

$$H(\eta_{i,T}) = -\eta_{i,T} \ln \eta_{i,T} \quad (13)$$

式(12)~(13)中: η''_i 为项目团队能力的胜任系数; $\eta_{i,T}$ 为项目团队对工期的影响程度。

其次,引入 PLS-SEM,建立装配式建筑项目团队能力的回归方程,从潜变量的形成和作用角度构建项目团队模型,并计算能力系数及相应的熵。

1) 项目团队能力 PLS-SEM 模型设计。

基于已有的团队胜任能力模型^[22-25],综合考虑承包商领导管理部门能力和施工团队能力两个方面,对相关观测变量进行题项设计,并结合专家意见设计问卷。变量的测量采用 Likert 5 级量表,并给予 1~5 的评分,变量及模型设定见表 1。通过对承包商管理部门及施工团队的人员进行调研或访谈,发放纸质及电子问卷获取样本。共发放问卷 180 份,收回问卷 165 份,其中有效问卷 152 份,有效率为 85%。

表 1 变量及模型设定

Table 1 Setting of variables and models

潜变量	观测变量	题项	模型设定
承包商领导管理部门能力(CMA) ^[22]	35 岁以上人员的比例 (CMA1)	Q1	FM
	本科及以上学历人员的比例 (CMA2)	Q2	
	以往合同履约率 (CMA3)	Q3	
施工团队能力 (CTA) ^[23]	装配式建筑持证技术人员的比例 (CTA1)	Q4	FM
	装配式建筑施工工作经验 3 年以上人员的比例 (CTA2)	Q5	
	以往项目的按时完工率 (CTA3)	Q6	
项目团队能力 (PTA) ^[24-25]	质量管控能力 (PTA1,PTA2)	Q7,Q8	PM
	进度管控能力 (PTA3,PTA4)	Q9,Q10	
	成本管控能力 (PTA5,PTA6)	Q11,Q12	

2) 模型检验及回归方程的建立。

利用 SmartPLS3.0 软件中的 PLS 算法和 Bootstrapping 算法求解装配式建筑的项目团队能力,并进行信度、效度检验和结构模型的检验。信度、效度检验结果为 $\alpha=0.876$, $C_R=0.907$,说明信度、效度水平较高;载荷 T 值高于 2.58,说明显著性水平符合要求。结构模型的检验结果见表 2。从表 2 可以看出,共线性统计值 V_{IF} 均小于 5,表明无多重共线性现象;拟合优度 R^2 均高于 0.5,表示结构模型的解释力较好;预测效度 Q^2 均高于临界值 0,说明结构模型的预测相关性较好。

图 1 为 PLS-SEM 模型的路径影响效果图。

表 2 结构模型检验结果

Table 2 Inspection results of structural model

路径	路径系数	T 值	共线性统计值 V_{IF}	外生潜变量	拟合优度 R^2	预测效度 Q^2
CMA→PTA	0.325	3.768	1.154	CTA	0.619	0.087
CMA→CTA	0.366	4.965	1.000			
CTA→PTA	0.493	5.255	1.154	PTA	0.827	0.278

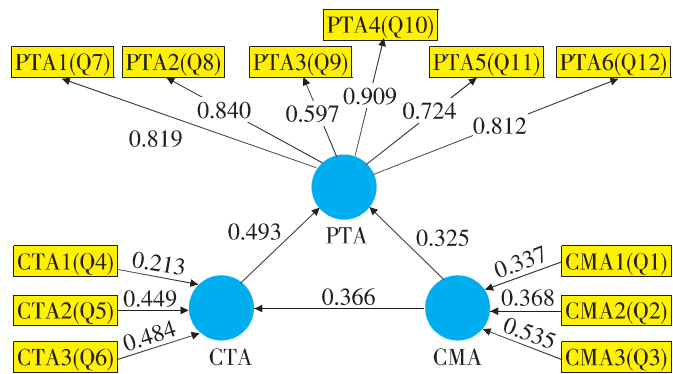


图 1 PLS-SEM 模型路径影响效果图

Fig. 1 Path influence effect image of PLS-SEM model

从图 1 可以看出,承包商领导管理部门能力(CMA)和施工团队能力(CTA)对项目团队能力(PTA)均有正向的影响。

各变量相互影响效果的回归方程为:

$$\eta'' = 0.325\eta' + 0.493\xi \quad (14)$$
$$\eta' = 0.337x_1 + 0.368x_2 + 0.535x_3 \quad (15)$$

$\xi = 0.213y_1 + 0.449y_2 + 0.484y_3$ (16)

式(14)~(16)中: x_i, y_i 分别为第 i 个观测变量构成的向量; ξ, η', η'' 为外生潜变量构成的向量。

通过上述回归方程,可计算得到项目团队胜任能力系数 η''_i , 且 $\eta''_i \in [0, 1]$, $\eta_{i,T} \in [0, 1]$, 其满足信息熵的计算要求,再结合式(12)~(13),即可得到项目团队熵 $H(\eta_{i,T})$ 。

2.3 缓冲区设置与修正熵计算

在对装配式建筑项目工序工期及安全时间的估算进行改进以及 3 类不确定性因素熵进行度量的基础上,构建缓冲区及修正熵模型,既能充分考虑到装配式建筑项目缓冲区设置中的各种不确定性因素,又能有效降低项目工期估算值与期望值偏差较大的可能性。模型构建步骤如下:

首先,参考根方差法的思想计算缓冲区初始值,项目缓冲初始值 PB' 与汇入缓冲初始值 FB'

可通过下述公式进行计算^[17]:

$$PB' = [1 + H(F_x)]$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \{ [1 + H(Z_{i,D})] [1 + H(\eta_{i,T})] \sigma_i \}^2} \quad (17)$$

$$FB' =$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \{ [1 + H(F_{i,G})] [1 + H(Z_{i,D})] [1 + H(\eta_{i,T})] \sigma_i \}^2} \quad (18)$$

式(17)~(18)中: PB' 为项目缓冲的初始值; $H(F_x)$ 为项目复杂熵; $H(Z_{i,D})$, $H(\eta_{i,T})$ 分别为关键链上工序 θ_i 的多资源熵和项目团队熵; σ_i 为工序 θ_i 的安全时间; $H(F_{i,G})$, $H(Z_{i,D})$, $H(\eta_{i,T})$ 分别为非关键链上工序 θ_i 的工序复杂熵、多资源熵和项目团队熵。

其次,为避免出现因汇入缓冲值过大造成非关键链在关键链之前执行、引发二次资源约束及关键链执行中止等现象,通过非关键链上末尾工序的自由时差对 FB' 进行修正,同时将各非关键链上的缓冲剩余值并入 PB' 中。计算公式如下:

$$FB_l = \min(FB', FF_m) \quad (19)$$

$$FF_m = \min_{i \in Q_m} |ES_i - EF_m| \quad (20)$$

$$\Delta FB_l = \max(FB' - FF_m, 0) \quad (21)$$

$$PB = PB' + \sum \Delta FB_l \quad (22)$$

式(19)~(22)中: FB_l 为非关键链 l 汇入缓冲的修正值; ΔFB_l 为缓冲剩余值; FB' 为该链路的汇入缓冲初始值; FF_m 为该链路末尾工序 m 的自由时差; PB 为关键链上项目缓冲的修正值; $\sum \Delta FB_l$ 为全部非关键链缓冲剩余值的总和。

3 算例分析

3.1 项目概况

以某预制装配式剪力墙结构住宅项目的一个标准层为例,其施工过程主要受 R_1, R_2, R_3 3类资源的限制,3类资源的上限为(6,8,5),项目计划工期为57 d。该项目标准层施工工序的基本信息见表3。根据各工序的逻辑关系得到该标准层施工双代号网络计划图,如图2所示。

表3 各施工工序的基本信息

Table 3 Basic information of each construction process

工序	工序名称	紧前工序	紧后工序	所需资源量		
				R_1	R_2	R_3
A	施工准备	—	B	1	2	0
B	测量放线	A	C,E	2	2	0
C	预制外墙板吊装	B	D	4	6	4
D	安装斜撑校正	C	G	2	3	5
E	现浇剪力墙、柱钢筋绑扎	B	F	3	4	0
F	现浇剪力墙、柱支模	E	G	3	3	0
G	搭设楼面、叠合阳台板模板及排架	D,F	H,J,Q	3	3	4
H	现浇梁钢筋绑扎及支模	G	I	2	2	0
I	后浇带模板支护	H	L	2	1	0
J	预制叠合阳台板、空调板吊装	G	K	3	5	5
K	预制异形构件吊装	J	R	3	3	5
L	现浇楼板钢筋绑扎	I	M	2	3	1
M	现浇楼板模板搭设	L	N	2	2	1
N	水电管线安装	M	O	2	2	0
O	梁、板钢筋绑扎	N	P	2	3	0
P	现浇部位混凝土浇筑、养护	O	R	2	2	0
Q	预制楼梯吊装	G	R	3	5	4
R	脚手架及排架拆除	P,K,Q	S	2	0	0
S	高强灌浆施工	R	T	4	6	4
T	检查验收	S	—	1	1	0

按照工序优先级对资源进行分配后,得到调整后的网络计划图,如图 3 所示。由图 3 可知,关键链为 A—B—C—E—F—G—H—I—L—M—N

—O—P—R—S—T,期望总工期为 33.59 d,非关键链包括 D,Q,Q—J—K。

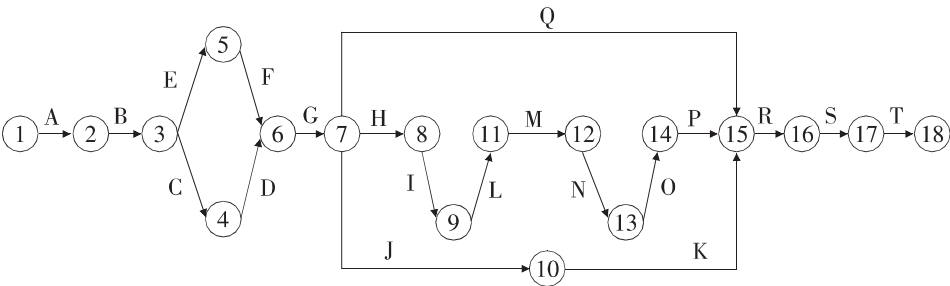


图 2 标准层双代号网络图

Fig. 2 Double code network graph for standard floor

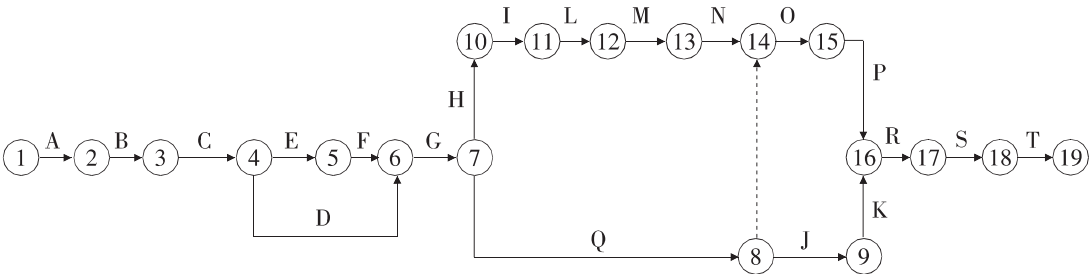


图 3 调整后的双代号网络图

Fig. 3 Adjusted double code network graph

3.2 综合复杂熵、多资源熵、项目团队熵的计算

基于问卷调查结果,根据式(12)~(16)分别计算各工序承包商领导管理部门能力系数 η' 、施

工团队能力系数 ξ 、项目团队的胜任能力系数 η'' 、项目团队的影响系数 $\eta_{i,T}$ 及项目团队熵 $H(\eta_{i,T})$,结果见表 4。

表 4 潜变量及项目团队熵计算结果

Table 4 Calculating results of latent variables and project team entropy

工序	η'	ξ	η''	$\eta_{i,T}$	$H(\eta_{i,T})$	工序	η'	ξ	η''	$\eta_{i,T}$	$H(\eta_{i,T})$
A	1.13	1.09	0.90	0.10	0.22	K	1.13	1.09	0.90	0.10	0.22
B	1.06	1.01	0.84	0.16	0.29	L	1.15	1.05	0.89	0.11	0.24
C	1.13	1.09	0.90	0.10	0.22	M	1.15	1.05	0.89	0.11	0.24
D	1.13	1.09	0.90	0.10	0.22	N	1.14	1.01	0.86	0.14	0.27
E	1.15	1.05	0.89	0.11	0.24	O	1.13	1.03	0.88	0.12	0.26
F	1.15	1.05	0.89	0.11	0.24	P	1.13	1.03	0.88	0.12	0.26
G	1.13	1.09	0.90	0.10	0.22	Q	1.22	1.11	0.94	0.06	0.16
H	1.15	1.05	0.89	0.11	0.24	R	1.13	1.09	0.90	0.10	0.22
I	1.13	1.09	0.90	0.10	0.22	S	1.17	1.09	0.92	0.08	0.21
J	1.13	1.09	0.90	0.10	0.22	T	1.23	1.14	0.96	0.04	0.12

3.3 缓冲区设置及修正熵模型计算

根据式(4)~(11),(17)~(22)计算缓冲区各类参数,结果如表 5 所示。

在关键链与非关键链 D,Q,Q—J—K 末端分

别设置表 5 所示的项目缓冲修正值 PB 与汇入缓冲修正值 FB_1, FB_2, FB_3 ,如图 4 所示。所以,通过基于信息熵改进的关键链法计算得到的期望总工期为 33.59 d+11.43 d \approx 45 d。

表 5 缓冲区各类参数计算结果

Table 5 Calculation results of various parameters of the buffer

工序类型	编码	σ_i	$H(F)$	$H(Z_{i,D})$	$H(\eta_{i,T})$	FB'	PB'	FB	PB
关键链 工序	A	1.39	—	0.18	0.22	—		—	
	B	1.39	—	0.20	0.29	—		—	
	C	1.65	—	0.19	0.22	—		—	
	E	1.28	—	0.16	0.22	—		—	
	F	1.56	—	0.28	0.24	—		—	
	G	1.23	—	0.25	0.24	—		—	
	H	1.70	0.08	0.26	0.22	—		—	
	I	1.23	—	0.20	0.24	—		—	
	L	1.23	—	0.15	0.22	—	8.57	—	11.43
	M	1.23	—	0.11	0.22	—		—	
	N	1.25	—	0.15	0.22	—		—	
	O	1.23	—	0.35	0.24	—		—	
	P	1.56	—	0.33	0.24	—		—	
	R	1.23	—	0.20	0.27	—		—	
	S	1.56	—	0.23	0.26	—		—	
非关键链 及工序	T	0.86	—	0.20	0.26	—		—	
	D	1.58	0.00	0.22	0.16	2.24	—	2.24	—
	J	1.56	0.34	0.09	0.22	—	—	—	—
	K	1.54	0.35	0.19	0.21	—	—	0.00	—
	Q	2.02	0.00	0.13	0.12	2.86	—	—	—
Q-J-K		—	—	—	—	4.96	—	4.96	—

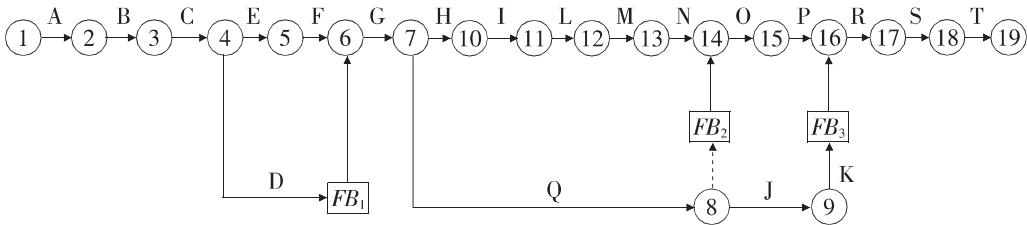


图 4 修正缓冲区设置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of correcting the buffer setting

3.4 缓冲区设置方法的对比

用 Crystal Ball 软件中经典缓冲区设置的方法(C&PM 法与 RSEM 法)及本研究提出的方法对 3.1 节的算例进行蒙特卡洛仿真模拟,并预测不同完工概率下项目的完工工期。设定模拟次数为 1 000 次,置信水平为 95%,结果见表 6。

从表 6 可以看出,由本研究提出的方法计算得到的不同概率下装配式建筑项目完工工期明显短于由 C&PM 法与 RSEM 法计算得到的。当假定项目完工概率为 100%时,由本研究方法计算得到的完工工期比 C&PM 法缩短了 10.84 d,比 RSEM 法缩短了 4.83 d。故在装配式建筑项目中,充分考虑资源约束,从项目及工序双角度、项

表 6 不同完工概率下项目的完工工期

Table 6 Completion period of the project under different completion probabilities

概率/ %	完工工期/d		
	C&PM 法	RSEM 法	本研究的方法
0	53.50	47.76	41.89
10	54.96	49.37	43.89
20	55.26	49.66	44.19
30	55.46	49.87	44.42
40	55.64	50.04	44.62
50	55.80	50.21	44.81
60	55.98	50.36	44.98
70	56.16	50.54	45.18
80	56.37	50.77	45.42
90	56.65	51.04	45.75
100	58.46	52.45	47.62

目团队视角分析缓冲区的不确定性因素方面,基于信息熵的关键链缓冲区设置方法比经典缓冲区设置方法更加合理。

4 结论

1) 针对装配式建筑项目施工阶段各种不确定性因素,本研究基于信息熵理论提出了影响缓冲区设置的项目团队能力、项目综合复杂程度、多资源紧张程度3类主要因素的熵的度量方法。

2) 对难以直接量化的影响项目团队能力的不确定性因素,引入PLS-SEM并建立回归方程确定熵度量,在3类不确定性因素熵度量的基础上构建缓冲区及修正模型,进一步优化了缓冲区设置的结构。

3) 运用Crystal Ball软件对算例进行模拟仿真,其结果证明了基于信息熵的装配式建筑项目缓冲区设置方法的可行性。在类似的装配式建筑项目的实际施工中,灵活运用该方法可有效缩短项目的完工工期。

〔参考文献〕

- [1] GOLDRATT E M. Critical chain[M]. New York: The North River Press,1997.
- [2] NEWBOLD R C. Project management in the fast lane: applying the theory of constraints [M]. Los Angeles: CRC Press,1998:25.
- [3] 彭军龙,刘泽鹏. 基于关键链法的工程施工进度优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(4): 62-69.
PENG Jun-long, LIU Ze-peng. Optimization of construction schedule based on critical chain method[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science),2020,17(4):62-69.
- [4] 卜朱镇,梁晓蓓,孟虎. 基于多项目重要度的关键链识别改进方法及应用[J/OL]. 工业工程与管理. [2021-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1738.T.20201020.1648.004.html>.
BU Zhu-zhen, LIANG Xiao-bei, MENG Hu. Improved method and application of critical chain identification based on multi-item importance[J/OL]. Industrial Engineering and Management. [2021-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1738.T.20201020.1648.004.html>.
- [5] 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[J]. 土木工程与管理学报,2019,36(1):34-41,47.
JIANG Hong-yan, PENG Ying, XIE Xue-hai. Calculation method of critical chain buffer size based on information and multi-resource constraints[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2019,36(1): 34-41,47.
- [6] 易欣,施晶晶,张跃斌,等. 基于合理缓冲区设置的PPP轨道交通项目柔性建设期研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(5):1 333-1 341.
YI Xin, SHI Jing-jing, ZHANG Yue-bin, et al. Research on flexible construction period of PPP rail transit project based on reasonable buffer setting[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2021,18(5):1 333-1 341.
- [7] FARAG M A. A bridge between increasing reliability and reducing variability in construction work flow: a fuzzy-based sizing buffer model[J]. Journal of Advanced Management Science,2014,2(4):287-294.
- [8] GHODDOUSI P, ANSARI R, MAKUI A. A risk-oriented buffer allocation model based on critical chain project management[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2017,21(5):1 536-1 548.
- [9] 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.
- [10] ZHAO C W, DONG X B, HONG Q, et al. Critical chain buffering calculation method based on Z-number theory[J]. Journal of Civil Engineering & Management,2017(5):163-168.
- [11] 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. Critical chain project buffer determination method based on entropy weight method[J]. Management Review,2017,29(1):211-219.
- [12] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal,1948,27(3):379-423.
- [13] 熊萍萍,张悦,姚天祥. 基于区间灰数序列的多变量灰色预测模型[J]. 数学的实践与认识,2018(9): 181-188.
XIONG Ping-ping, ZHANG Yue, YAO Tian-xiang.

- Multivariate gray prediction model based on interval gray number series[J]. *Mathematics in Practice and Knowledge*, 2018(9):181-188.
- [14] 任忠英. 基于关键链法复杂工程施工进度管理研究与应用[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
REN Zhong-ying. Research and application of complex project construction schedule management based on critical chain method [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [15] 杨玉胜, 洪珍珍. 基于系统动力学的装配式 PC 建筑造价控制研究[J]. *公路与汽运*, 2019(6):156-159.
YANG Yu-sheng, HONG Zhen-zhen. Research on cost control of prefabricated PC building based on system dynamics [J]. *Highway and Automobile Transportation*, 2019(6):156-159.
- [16] 蒋帅, 陈明, 肖杰, 等. 装配式基层道路结构接缝荷载应力分析[J]. *公路工程*, 2019, 44(3):240-245.
JIANG Shuai, CHEN Ming, XIAO Jie, et al. Analysis of joint load stress of prefabricated base road structure[J]. *Highway Engineering*, 2019, 44(3):240-245.
- [17] ARASHPOUR M, WAKEFIELD R, LEE E W, et al. Analysis of interacting uncertainties in on-site and off-site activities: implications for hybrid construction[J]. *International Journal of Project Management*, 2016, 34(7):1 393-1 402.
- [18] 郭恒栋, 高琦, 巩高铄. 基于改进的资源紧张度缓冲区设置方法研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(12):142-144, 149.
GUO Heng-dong, GAO Qi, GONG Gao-shuo. Research on improved resource tension buffer setting method[J]. *Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology*, 2018(12):142-144, 149.
- [19] 蒋红妍, 徐锐, 白雨晴, 等. 装配式剪力墙结构组装进度的关键影响因素分析及应用[J]. *工程管理学报*, 2017(3):123-127.
JIANG Hong-yan, XU Rui, BAI Yu-qing, et al. Analysis and application of key factors affecting the assembly schedule of prefabricated shear wall structures[J]. *Journal of Engineering Management*, 2017(3):123-127.
- [20] 巩军, 胡涛, 姚路. 基于信息熵的关键链缓冲区设置方法[J]. *自动化学报*, 2019, 45(2):5-10.
GONG Jun, HU Tao, YAO Lu. Critical chain buffer setting method based on information entropy[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(2):5-10.
- [21] 韩驰, 熊伟, 刘文艺, 等. 基于结构方程模型的天基信息系统效能评估[J/OL]. *系统仿真学报*. [2021-07-01]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0361>.
HAN Chi, XIONG Wei, LIU Wen-wen, et al. Space-based information system effectiveness evaluation based on structural equation model[J/OL]. *Journal of System Simulation*. [2021-07-01]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0361>.
- [22] 孙月峰, 许明昊, 蒋民阳. PPP 模式下高速公路建设项目团队胜任力影响因素[J]. *土木工程与管理学报*, 2019, 36(1):42-47.
SUN Yue-feng, XU Ming-hao, JIANG Min-yang. Influencing factors of team competence of expressway construction project under PPP mode[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2019, 36(1):42-47.
- [23] 李文华, 彭立敏, 肖文贵. 基于 SEM 的工程施工班组长岗位胜任力影响因素研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(6):1 597-1 604.
LI Wen-hua, PENG Li-min, XIAO Wen-gui. Research on the influencing factors of the competence of the project construction team leader based on SEM[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(6):1 597-1 604.
- [24] 王思琦, 张惠波, 吕文学. 海外 EPC 项目管理团队胜任力评价研究[J]. *工程管理学报*, 2015, 29(6):85-90.
WANG Si-qi, ZHANG Hui-bo, LYU Wen-xue. Research on the competency evaluation of overseas EPC project management team[J]. *Journal of Engineering Management*, 2015, 29(6):85-90.
- [25] 刘昶, 刘辉, 邓小钊, 等. 落墩中央分隔带施工安全风险评估研究[J]. *交通科学与工程*, 2020, 36(4):101-106.
LIU Chang, LIU Hui, DENG Xiao-zhao, et al. Research on the construction safety risk assessment of the central separate belt with pier[J]. *Transportation Science and Engineering*, 2020, 36(4):101-106.