

文章编号:1672-9331(2020)04-0062-08

# 基于关键链法的工程施工进度优化

彭军龙,刘泽鹏

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**为解决在传统施工过程中由活动不确定性及多资源冲突等因素造成的工期延误,在三时估算的基础上,利用最短路径法的对偶思想给出关键路径及期望工期最简单的矩阵表达式,通过以资源优先分配为原则的启发式算法进一步确定关键链;从项目内、外部两方面结合定量和定性分析,考虑多种不确定性因素对缓冲区设置的影响,使得设置的缓冲区更具有合理性;最后,通过 Monte Carlo 模拟将传统计划评审技术与该方法进行了对比分析。研究表明:该方法能够在保证完工率的同时,实现施工进度优化,有利于解决资源约束问题,为施工过程提供了新的理论依据。

**关键词:** 进度优化;计划评审技术;最短路径法;关键链法;Monte Carlo

中图分类号: TU721.3

文献标志码: A

## Optimization of project construction schedule based on critical chain method

PENG Jun-long, LIU Ze-peng

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to solve the delay of construction period caused by activity uncertainty and multi-resource conflicts in the traditional construction process, based on the three-time estimation, using the duality of the shortest path algorithm, the simplest matrix representation of the critical path and expected duration was given. The critical chain was further determined by the heuristic algorithm under the principle of resource prioritization. The quantitative and qualitative analysis was combined from the internal and external aspects of the project, and the influence of various uncertain factors on the buffer setting was considered, which made the buffer setting more reasonable. Finally, the traditional PERT was compared with the method in this paper by Monte Carlo simulation. The results show that the method in this paper can achieve the optimization of construction schedule while guaranteeing the completion rate, which is beneficial to solve the resource constraint problem and provide a new theoretical basis for the construction process.

**Key words:** schedule optimization; program evaluation and review technique; the shortest path algorithm; critical chain method; Monte Carlo

收稿日期:2020-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578080)

通讯作者:彭军龙(1976-),男,湖南岳阳人,长沙理工大学副教授,主要从事工程项目管理方面的研究。

E-mail:375135287@qq.com

进度管理是工程项目管理的重要组成部分。在传统进度管理中,管理者普遍追求在满足成本和质量约束条件下实现进度优化。其中,关键路径法(critical path method,CPM)和计划评审技术(program evaluation and review technique,PERT)研究应用得较为广泛。在大型施工网络计划中,PERT 考虑了工期的不确定性,其初始计划阶段常通过优化有向赋权图的设计计算程序来估算工期,而未考虑实际施工过程中的多资源约束,结果造成进度计划与实际情况偏差较大<sup>[1-2]</sup>。1997 年,Goldratt<sup>[3]</sup>提出了基于约束理论(theory of constraints,TOC)的关键链项目管理方法(critical chain project management,CCPM),该方法作为一种新的项目进度管理技术,与 CPM 和 PERT 相比,考虑了活动逻辑关系和资源的双重约束,通过设置缓冲区机制吸收项目的不确定性,确保项目按时完工。

关键链识别和缓冲区机制是 CCPM 的两大重点。李俊亭<sup>[4]</sup>提出了三大缓冲机理并构建了关键链项目的网络计划技术;查京民等<sup>[5]</sup>、蒋红妍等<sup>[6]</sup>基于 PERT 建立了关键链进度优化模型,实现了单资源受限的施工进度优化;郭恒栋等<sup>[7]</sup>引入成本统一衡量多资源,提高了缓冲区设置的合理性;郑成法<sup>[8]</sup>基于灰色理论估算活动持续时间,通过启发式算法识别关键链;张俊光等<sup>[9]</sup>结合熵权法和模糊理论确定了缓冲区设置的有效方法;尤建新等<sup>[10]</sup>将贝叶斯网络应用于关键链法,有效控制了关键风险活动;彭军龙等<sup>[11]</sup>针对活动持续时间的随机分布类型,建立了工期与完工率模型;刘永强等<sup>[12]</sup>通过计算机建立的 Monte Carlo 模拟模型能有效地进行多次工期的循环计算。此外,还有学者通过混合粒子群算法<sup>[13]</sup>、混合遗传算法<sup>[14]</sup>等多种智能算法对项目进度进行综合优化。

综上所述,考虑实际项目施工过程中的活动逻辑关系和多资源约束,本研究在 PERT 三时估算的基础上,利用最短路径法的“对偶性”,得到能同时显示关键线路及权值的简单矩阵表达式,并以此进一步识别关键链。在缓冲区的设置上考虑多种不确定性因素,做出了进一步的改进及优化,并通过算例仿真验证了本研究建立的基于关键链

的施工进度优化模型在实际应用中既简便又具有更强的可操作性。

## 1 基于 PERT 三时估算的关键链建模

利用 CCPM 所求的关键链具有同时将活动逻辑关系与多资源约束综合考虑在内的优点<sup>[15]</sup>。因此,本研究将在 PERT 的基础上做出改进,进一步结合关键链进行建模,以更好地优化施工进度。

### 1.1 活动持续时间的估计

在制定 PERT 网络计划的基础上,根据 CCPM 的基本思想,以 50% 的完工概率估算各活动的历时工期<sup>[16]</sup>。假定各活动的工期服从  $\beta$  分布,其工期期望值通过三时估算确定,即:

$$t_i = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (1)$$

式中: $a$  为完成活动的最乐观时间; $m$  为完成活动的最可能时间; $b$  为完成活动的最悲观时间。

为避免因未考虑  $m$  而造成与实际活动工期产生偏差,各活动的历时方差由下式计算:

$$\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{36} \left[ \frac{5}{7} + \frac{16}{7} \chi(1-\chi) \right] \quad (2)$$

$$\chi = \frac{m-a}{b-a}, \chi \in [0, 1] \quad (3)$$

用完成活动的最乐观时间表示其历时工期,能有效提高项目的执行效率,避免了“学生综合征”和“帕金森定律”所造成的工期延误<sup>[17]</sup>。再以此计算项目的期望工期,并识别期望工期下的关键路径。

### 1.2 基于最短路径法的关键线路及权值的确定

Dijkstra 算法作为计算网络图中任意两点最短路径的典型算法,在时效性、准确性、工程实现能力等方面的优势使其更适用于路径规划。在求最短路径问题时,通常定义有向赋权图的邻接矩阵及“加法 $\oplus$ ”运算;根据对偶性,在求 PERT 关键线路的最长路问题时,可定义 PERT 图的赋权邻接矩阵及“乘法 $\otimes$ ”运算<sup>[18]</sup>。定义如下:

1) 设 PERT 图  $D = \langle V, E, W \rangle$ , 其中  $V, E, W$  分别为其点集、边集及对应权值的集合,  $|V| = n$ 。定义  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  为  $D$  上一个  $n$  阶矩阵,且:

$$a_{ij} = \begin{cases} \omega_{ij}, e_{ij} \in E \\ 0, e_{ij} \notin E \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $e_{ij} \in E$ , 为顶点  $v_i$  与  $v_j$  之间的边;  $\omega_{ij} \in W$ , 为与  $e_{ij}$  相应的权值。

在上式中: ① 如果顶点  $v_i$  与  $v_j$  之间不存在边, 则令  $a_{ij}=0$ , 即“乘法 $\otimes$ ”运算中的零元; ② 如果顶点  $v_i$  与  $v_j$  之间存在边  $e_{ij}$ , 且  $\omega_{ij}=0$ , 则令  $a_{ij}=e$ , 即“乘法 $\otimes$ ”运算中的单位元; ③ 规定  $a_{ii}=e$ 。这时称矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$  为  $D$  的一维初始邻接矩阵, 称矩阵  $A=((a_{ij}, ij))_{n \times n}$  为该图的二维元素初始邻接路径矩阵, 且存在最小正整数  $m(m>1)$  使得  $A^m=A^m+1=\cdots$ , 并称  $m$  为矩阵  $A^m$  的长度。

2) 设矩阵  $B=(b_{ij}, \tau(b_{ij}))_{n \times n}$  是 PERT 图的一般邻接路径矩阵,  $b_{ij}$  为任一阶段两顶点  $i$  与  $j$  之间的最大权值,  $\tau(b_{ij})$  代表该阶段两顶点  $i$  与  $j$  之间最大权值的全部路径。

3) 设矩阵  $A$  与矩阵  $B$  经“乘法 $\otimes$ ”运算得到一般邻接路径矩阵  $C=(c_{ij}, \tau(c_{ij}))_{n \times n}$ , 即  $A \otimes B=C$ , 其中  $c_{ij}=\max\{a_{i1} \otimes b_{1j}, a_{i2} \otimes b_{2j}, \cdots, a_{in} \otimes b_{nj}\}$ 。

假设  $c_{ij}=a_{ik} \otimes b_{kj} (i=1, 2, \cdots, n; j=1, 2, \cdots, n)$ , 规定  $a_{ij} \otimes 0=0 \otimes a_{ij}=0, a_{ij} \otimes e=e \otimes a_{ij}=a_{ij}, e \otimes e=e$ 。若  $a_{ik}, b_{kj} \neq 0$  或  $e$ , 那么  $a_{ik} \otimes b_{kj}=a_{ik}+b_{kj}$ 。而且① 若  $c_{ij}=a_{ik}+b_{kj} \neq 0$  或  $e$ , 那么  $\tau(c_{ij})=\tau(a_{ik}) \otimes \tau(b_{kj})$ , 其中, 对任意  $i, j, ii \otimes ij=ij, ij \otimes jj=ij$ , 对任意不同的  $i, j, k, ijk \otimes k=ijk, i \otimes ijk=ijk$ ; ② 若  $c_{ij}=a_{ik}+b_{kj}=0$  或  $e$ , 则  $\tau(c_{ij})=ij$ 。

该阶段矩阵  $C$  的两顶点  $i$  与  $j$  之间的最大权值为  $c_{ij}$ , 对应两顶点  $i$  与  $j$  之间的路径为  $\tau(a_{ik}) \otimes \tau(b_{kj})$ , 代表连接两路径  $\tau(a_{ik})$  与  $\tau(b_{kj})$  的所有路径。

4) 在 PERT 图中, 若开工点是第  $i$  个顶点, 完工点是第  $j$  个顶点, 将矩阵  $A$  的第  $i$  行  $A_i$  与矩阵  $A$  连续做“乘法 $\otimes$ ”运算至最后矩阵  $A^m$  不变, 则最后一行向量  $A_i^m$  中第  $j$  个元素代表这两点之间的最大权值与关键路径。其中, 最大权值可以衡量项目工期、资源数、成本等多个目标。

1.3 关键链的识别

以多资源约束的工期最短为目标, 基于已得关键路径, 利用资源优先分配原则从末尾往前进

行分配调整, 通过启发式搜索确定关键链。

1) 调整步骤。

step 1: 令  $j=1$ , 确定决策点  $t_j$ 。选择未调整活动集  $Q_j$  中的最晚完工活动的结束时刻为决策点, 则起始决策点为项目完工时间点。

step 2: 识别可行活动集  $W_j$ , 即  $Q_j$  中所有完工时间与  $t_j$  相同的活动集合。

step 3: 根据最晚开工时间确定  $W_j$  中活动的进度安排, 并按照资源种类确定  $k$  个资源活动集  $P_k$ 。判断在  $t$  时间段内资源  $k$  的使用量  $n_k$  与其供应量  $N_k$  的大小。若有资源冲突, 即  $n_k > N_k$ , 则执行 step 4, 否则执行 step 5。

step 4: 依据资源优先分配原则对  $P_k$  按优先级累计资源消耗量  $V_i^k$ , 直至  $V_i^k > N_k$ , 将需调整活动集纳入最晚开工活动的紧前活动集, 直到资源种类判断完毕。

step 5:  $j=j+1$ , 并返回 step 1, 直至  $Q_j$  成为空集  $\emptyset$ , 即资源冲突均已解决。

2) 资源优先分配原则。

若发生资源冲突, 则按照以下顺序调整: ① 未完工活动优先分配; ② 关键活动优先分配; ③ 非关键活动根据活动的最晚开工时间按大小顺序优先分配。

2 项目缓冲区的设置

设置缓冲区作为 CCPM 的关键步骤, 能有效地分担多种不确定因素对施工进度造成的风险<sup>[19]</sup>, 其主要包括项目缓冲( $P_B$ )、汇入缓冲( $F_B$ )的设置。通常将求得的  $P_B$  插入项目末端,  $F_B$  插在关键链与非关键链的交汇处, 保证缓冲区设置的合理性。

2.1 缓冲区设置的内部因素

项目活动本身的不确定性主要受项目风险偏好度、资源紧张度、活动复杂度、活动重要性系数等内部因素的影响。

1) 项目风险偏好度  $\delta$ 。

在正态分布条件下, 有:

$$\delta_i = \frac{f_{1-\epsilon}}{2} \quad (5)$$

式中: $\epsilon$  为项目管理者的风险偏好水平,设为 5%,即需要在 95% 的保证率下完成项目,其所对应的标准差倍数  $f_{1-\epsilon}=1.65$ 。

2) 资源紧张度  $\theta$ 。

在多资源的条件下,其种类的多少很大程度上决定了项目的进度。将不同资源通过资源成本进行统一度量,能反映资源数量及成本的约束情况。资源紧张度的计算公式如下:

$$\theta_i = \frac{\sum (R_{tk} \times n_k)}{\sum (R_{tk} \times N_k)}。$$

(6)

式中: $R_{tk}$  为资源  $k$  的单位成本; $n_k$  为在  $t$  时间段内资源  $k$  的使用量; $N_k$  为此时间段内资源  $k$  的可供应量。

3) 活动复杂度  $\mu$ 。

各活动的复杂程度可以反映项目本身的复杂度,前置活动越多,项目延期的可能性也就越大,故引入活动复杂度,即:

$$\mu_i = \frac{n_p + 1}{n_q}。$$

(7)

式中: $n_p$  为活动所在最长链路的前置活动数; $n_q$  为活动所在链路上活动总数的最大值。

4) 活动重要性系数  $\epsilon$ 。

在活动施工过程中,由于指挥及作业人员的实操不同往往会导致活动产生差异,从而引起一定的进度偏差。因此,从主观层面引入一个活动重要性系数  $\epsilon$  (见表 1),设定其区间为  $(0,1]$ ,以使得设置的缓冲区更贴合实际。该系数的大小由经验丰富的现场技术人员结合项目的具体情况及作业人员的意见进行确定。

表 1 活动重要性系数

Table 1 Activity importance coefficients

系数	不重要	不太重要	重要	较重要	很重要
$\epsilon$	1/5	2/5	3/5	4/5	1

2.2 缓冲区设置的外部因素

除了以上在设置缓冲区时需考虑单个活动的内部因素外,项目活动同时也受到外部整体环境不确定性  $\varphi$  的影响。应用政治、经济、社会、技术、环境、法律(PESTEL)框架能有效地分析外部整

体环境因素的影响<sup>[20]</sup>。将项目整体外部环境分为有利、正常和不利 3 类,基于团队管理的经验、专家意见及项目的整体期望,确定一个数值来衡量这种不确定性,如 0.9, 1.0, 1.1。该数值越大,则项目整体外部环境的不确定性也越大,需设置的缓冲区就越大。

$$\begin{cases} 0.9, & \sum_{i=1}^6 z_i > 5.0 \\ \varphi = \{1.0, & 2.5 \leq \sum_{i=1}^6 z_i \leq 5.0 \text{ 且 } z_i \in [0,1] \} \\ 1.1, & \sum_{i=1}^6 z_i < 2.5 \end{cases}$$

(8)

式中: $z_i$  为项目团队及专家对项目的政治、经济、社会、技术、环境、法律这 6 个因素的评分。

2.3 计算项目缓冲和汇入缓冲

在根方差法的基础上,综合考虑项目风险偏好度、资源紧张度、活动复杂度、活动重要性系数等活动内部影响因素,同时分析项目整体外部环境对项目的影响,以此确定项目缓冲  $P_B$ 、汇入缓冲  $F_B$  的大小。计算公式如下:

$$P_B = \varphi \times \sqrt{\sum_{i \in X}^n E_i}。$$

(9)

$$F_B = \varphi \times \sqrt{\sum_{i \in Y}^n E_i}。$$

(10)

$$E_i = [(1 + \theta_i) \times \epsilon_i \times \mu_i \times \delta_i \times \Delta T_i]^2。$$

(11)

式中: $\Delta T$  为单个活动的安全时间,一般按标准差的 2 倍计算,即  $\Delta T = 2\sigma$ ;  $X$  为关键链上的活动集合; $Y$  为非关键链上的活动集合。

3 算例分析

3.1 项目基本信息

某项目标准层施工各活动的基本信息如表 2 所示,项目可供应的资源如表 3 所示,该项目为多资源约束。根据各活动关系绘制双代号网络计划图如图 1 所示。

表 2 项目各活动信息表

Table 2 Information of the project's activities							
活动名称	<i>a</i>	<i>m</i>	<i>b</i>	资源			活动期望值 <i>t<sub>i</sub></i>
				1	2	3	
A	3.0	5.0	6.0	1	3	0	4.8
B	5.0	6.0	8.0	2	3	2	6.2
C	4.0	5.5	8.0	2	3	1	5.7
D	3.5	5.0	7.0	0	1	0	5.1
E	4.0	5.5	7.5	1	3	1	5.6
F	5.0	6.5	8.0	1	2	1	6.5
G	6.0	8.0	10.0	4	6	3	8.0
H	5.0	7.0	9.0	1	2	1	7.0
I	6.5	8.0	10.0	2	5	2	8.1
J	4.0	5.0	6.0	2	5	3	5.0
K	5.5	7.0	11.0	4	7	2	7.4
L	5.0	7.0	9.5	3	6	1	7.1
M	4.0	6.0	9.0	2	5	0	6.2

表 3 项目可供应资源

Table 3 Available resources for the project		
资源	资源数量	单位成本/元
1	5	300
2	10	200
3	4	500

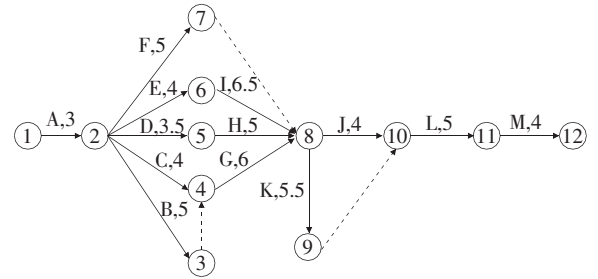


图 1 项目双代号网络图

Fig. 1 Double code network graph for the project

3.2 施工进度优化

根据上述项目网络计划图,以活动的最乐观时间 *a* 作为活动持续时间,将初始邻接路径矩阵 *A* 的各列记为  $\alpha_i$  (*i* = 1, 2, ..., 12),则:

$$\alpha_1^T = [(e, 11)(0, 21)(0, 31)(0, 41)(0, 51)(0, 61)(0, 71)(0, 81)(0, 91)(0, 10-1)(0, 11-1)(0, 12-1)].$$
$$\alpha_2^T = [(3, 12)(e, 22)(0, 32)(0, 42)(0, 52)(0, 62)(0, 72)(0, 82)(0, 92)(0, 10-2)(0, 11-2)(0, 12-2)].$$

$$\alpha_{12}^T = [(0, 1-12)(0, 2-12)(0, 3-12)(0, 4-12)(0, 5-12)(0, 6-12)(0, 7-12)(0, 8-12)(0, 9-12)(0, 10-12)(4, 11-12)(e, 12-12)].$$

在初始邻接路径矩阵 *A* 中,取第一行向量记作  $A_1^{(1)}$ ,则:

$$A_1^{(1)} = [(e, 11)(3, 12)(0, 13)(0, 14)(0, 15)(0, 16)(0, 17)(0, 18)(0, 19)(0, 1-10)(0, 1-11)(0, 1-12)].$$
$$A_1^{(2)} = A_1^{(1)} \otimes A = [(e, 11)(3, 12)(8, 123)(7, 124)(6.5, 125)(7, 126)(0, 17)(0, 18)(0, 19)(0, 1-10)(0, 1-11)(0, 1-12)].$$

$$A_1^{(8)} = [(e, 11)(3, 12)(8, 123)(8, 1234)(6.5, 125)(7, 126)(0, 17)(14, 12348)(19.5, 123489)(19.5, 123489-10)(24.5, 123489-10-11)(28.5, 123489-10-11-12)] = A_1^{(9)} = \dots$$

上述计算所得的  $A_1^{(8)}$  中最后一个元素 123489-10-11-12 代表关键路线,即 A-B-G-K-L-M,期望工期为 28.5 d。考虑各资源的可供应量及可能存在的资源冲突,依据资源优先分配原则确定项目关键链为 A-B-G-I-J-K-L-M,期望工期为 39 d。资源配置进度计划见图 2。

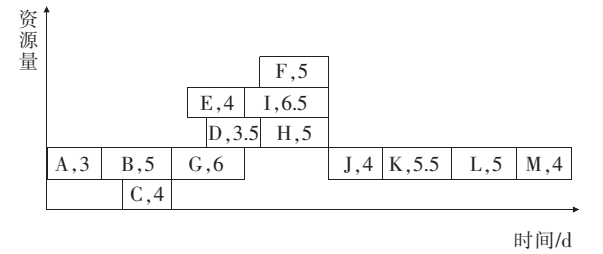


图 2 资源配置进度计划图  
Fig. 2 Resource allocation schedule

根据相关技术人员及专家对此项目的评价及类似项目的数据分析,将外部环境的不确定性  $\varphi$  确定为 1.1。项目各活动重要性系数及相关参数见表 4。

根据上述所得的相关参数,计算得到项目缓冲  $P_B = 2.6$ ,汇入缓冲  $F_{B1} = 0.27, F_{B2} = 0.2, F_{B3} = 0.47, F_{B4} = 0.16$ 。将所得各缓冲量向上取整,得  $P_B = 3, F_{B1} = F_{B2} = F_{B3} = F_{B4} = 1$ ,然后将其插入网络计划图的相应位置,如图 3 所示。此时,项目的关键链未发生改变,设置缓冲区后所得的项目工期  $T_n = 39 + 3 = 42$  d。



表 4 缓冲量相关参数计算表

Table 4 Calculation of related buffer parameters

活动名称	$\sigma^2$	$\Delta T$	$\theta$	$\delta$	$\mu$	$\epsilon$	$E_i$
A	0.31	1.11	9/35	0.83	1/8	1/5	0.00
B	0.31	1.11	2/5	0.83	1/4	3/5	0.04
C	0.56	1.50	17/55	0.83	1/4	3/5	0.06
D	0.43	1.31	1/10	0.83	2/7	2/5	0.02
E	0.43	1.31	14/55	0.83	2/7	2/5	0.03
F	0.32	1.13	12/55	0.83	1/3	2/5	0.02
G	0.57	1.51	39/55	0.83	1/2	4/5	0.72
H	0.57	1.51	12/55	0.83	3/7	3/5	0.16
I	0.43	1.31	26/55	0.83	3/8	4/5	0.23
J	0.14	0.75	31/55	0.83	5/8	3/5	0.14
K	0.98	1.98	36/55	0.83	3/4	4/5	2.66
L	0.72	1.70	26/55	0.83	7/8	3/5	1.21
M	0.88	1.88	16/35	0.83	1	1/5	0.20

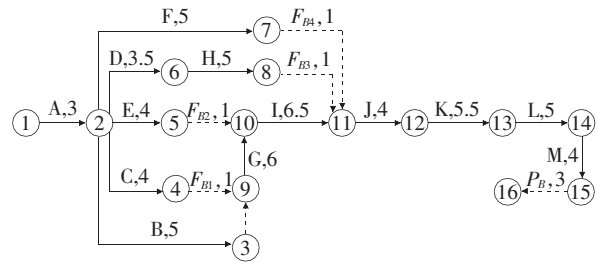


图 3 设置缓冲后的网络计划图

Fig. 3 Network planning graph after setting the buffer

### 3.3 仿真分析

运用 Crystal Ball 软件对传统 PERT 法与基于 PERT 的关键链法进行 Monte Carlo 模拟仿真,并对比分析。

首先,通过 Excel 建立仿真模型,各活动工期设置为假设单元,采用  $\beta$  分布,项目总完工工期设置为预测单元,设置试验运行次数为 10 000,置信水平为 95%;其次,为对比分析两种方法的差异,已消除传统 PERT 法网络计划中的资源冲突,在关键链法中各活动工期为最乐观值  $a$ ,采用三角分布。模拟仿真结果如图 4 与图 5 所示,结果对比分析见表 5 与表 6。

根据上述仿真结果的对比分析得出:使用基于 PERT 的关键链法所得的在不同完工概率下的项目完工总工期均优于使用传统 PERT 法所得的总工期,前者完工工期均值比后者缩短了 6.55 d,

方差降低了 3.16,其预测值更加稳定。当保证完工率为 100%时,前者完工工期更是比后者缩短了 10.13 d。在实际施工过程中,若合理地进行缓冲区设置管理,则实际完工工期会比模拟预测的结果更小。故在考虑了资源约束与不确定性因素的条件,使用基于 PERT 的关键链法进行项目施工进度管理比传统 PERT 法更加合理可行。

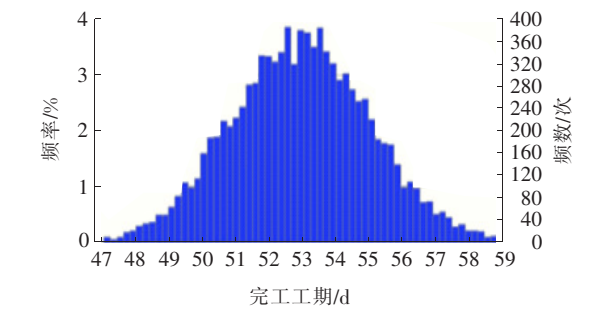


图 4 基于传统 PERT 法的完工工期频率分布图

Fig. 4 Frequency distribution of completion period based on traditional PERT

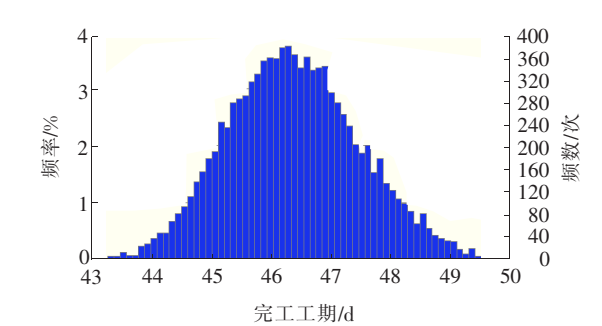


图 5 基于 PERT 关键链的完工工期频率分布图

Fig. 5 Frequency distribution of completion period based on PERT critical chain

表 5 仿真结果对比分析

Table 5 Comparison of simulation results

统计值	预测值		差值
	本研究方法	传统 PERT 法	
平均值/d	46.35	52.90	-6.55
中位数/d	46.31	52.90	-6.59
标准差	1.11	2.10	-0.99
方差	1.24	4.40	-3.16
偏度	0.214 5	0.031 3	0.183 2
峰度	2.94	2.95	-0.01
变异系数	0.024 0	0.039 6	-0.015 6
最小值/d	42.89	45.30	-2.41
最大值/d	50.57	60.70	-10.13
平均标准误差	0.01	0.00	0.01

表 6 完工工期概率对比分析

Table 6 Comparison of the probability of completion period

概率值/ %	完工工期/d		差值/ d
	本研究方法	传统 PERT 法	
0	42.89	45.30	-2.41
10	44.96	50.20	-5.24
20	45.39	51.20	-5.81
30	45.74	51.80	-6.06
40	46.03	52.40	-6.37
50	46.31	52.90	-6.59
60	46.60	53.50	-6.90
70	46.90	54.00	-7.10
80	47.29	54.70	-7.41
90	47.83	55.60	-7.77
100	50.57	60.70	-10.13

4 结论

针对传统施工过程中由活动不确定性及多资源冲突等因素造成的工期延误问题,本研究分析了传统方法的缺陷,并在总结以往研究的基础上,以考虑资源约束后的工期最短为目标,建立了基于关键链的施工进度优化模型,并得出以下结论:

1) 利用最短路径的对偶思想从数学原理的角度求得关键路径与活动权值,结合优先分配原则进一步确定关键链。对于中小型施工网络计划图,本方法易于人工直接使用,对于大型施工网络计划图,则易于通过编程实现。

2) 充分考虑了在多资源约束下项目活动内外部的多种不确定性因素,通过定量与定性分析,合理确定各参数,进一步优化了缓冲区设置和资源配置结构,降低了施工进度管理的风险系数。

3) 运用 Crystal Ball 软件进行 Monte Carlo 模拟仿真,通过对比分析证明了该进度优化模型的可行性。在实际项目施工过程中,灵活应用此方法,能在保证按时完工的同时,优化多资源配置,可靠地实现进度优化。

[参考文献]

[1] Kaur P,Kumar A. Linear programming approach for solving fuzzy critical path problems with fuzzy

parameters[J]. Applied Soft Computing, 2014, 21: 309-319.

[2] Yang J,Yang J,Ge L,et al. Multi-objective path finding in stochastic networks using a biogeography-based optimization method [J]. Simulation, 2016, 92(7):637-647.

[3] Goldratt E M. Criticalchain [M]. New York: The North River Press,1997.

[4] 李俊亭. 关键链项目缓冲区对网络计划技术的影响及设定研究[J]. 项目管理技术,2016,14(1):30-34.

LI Jun-ting. Research on impact of critical chain project buffer on network planning technology and its setting[J]. Project Management Technology, 2016, 14(1):30-34.

[5] 查京民,王波. 关键链法在项目进度规划中的应用研究[J]. 工程管理学报,2014,28(5):73-77.

ZHA Jing-min,WANG Bo. Critical chain in project schedule planning[J]. Journal of Engineering Management, 2014,28(5):73-77.

[6] 蒋红妍,谢雪海,彭颖. 基于关键链的装配式建筑 PERT 改进模型及应用[J]. 工业工程与管理,2018, 23(5):82-87.

JIANG Hong-yan, XIE Xue-hai, PENG Ying. Improved PERT model based on critical chain and its application of assembly building[J]. Industrial Engineering and Management, 2018,23(5):82-87.

[7] 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 the buffer setting method based on improved resource tightness[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018, 12: 142-144,149.

[8] 郑成法. 基于关键链技术的项目进度管理研究[D]. 大连:大连海事大学,2018.

ZHENG Cheng-fa. The research on project schedule management based on critical chain method [D]. Dalian:Dalian MaritimeUniversity,2018.

[9] 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):212-219.

ZHANG Jun-guang, SONG Xi-wei, YANG Shuang. Buffer sizing of a critical chain project based on the entropy method [J]. Management Review, 2017, 29(1):212-219.

[10] 尤建新,秦云. 基于贝叶斯网络模型的关键链项目

- 进度管理[J]. 同济大学学报:自然科学版,2015,43(10):1 606-1 612.
- YOU Jian-xin, QIN Yun. Critical chain project schedule management based on Bayesian network model[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(10): 1 606-1 612.
- [11] 彭军龙, 汤奇. 基于随机网络的工程项目进度优化[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2017, 14(3): 68-72.
- PENG Jun-long, TANG Qi. Engineering project scheduling optimization based on stochastic network[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2017, 14(3): 68-72.
- [12] 刘永强, 邱云昌, 姚悦铃. 基于蒙特卡罗模拟仿真的工期估算[J]. 工程管理学报, 2014, 28(5): 88-92.
- LIU Yong-qiang, QIU Yun-chang, YAO Yue-ling. Project duration estimate based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Engineering Management, 2014, 28(5): 88-92.
- [13] 廖良才, 张琦. 基于混合遗传算法和关键链的多资源多项目进度计划优化[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(6): 190-195.
- LIAO Liang-cai, ZHANG Qi. Multi-resource and multi-project schedule optimization based on a hybrid genetic algorithm and critical chain method[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6): 190-195.
- [14] 赵平, 吴昊. 差分进化混合粒子群算法求解装配式住宅项目进度优化问题[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(7): 1 495-1 501.
- ZHAO Ping, WU Hao. A differential evolution particle swarm algorithm for prefabricated housing project schedule optimization problem[J]. Computer Engineering & Science, 2016, 38(7): 1 495-1 501.
- [15] 李敏, 姚泽坤, 刘人境, 等. 基于关键链技术的多项目管理研究综述[J]. 科技管理研究, 2019, 39(1): 205-210.
- LI Min, YAO Ze-kun, LIU Ren-jing, et al. Review of multi-project management based on critical chain technology[J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(1): 205-210.
- [16] 陈斐. 基于关键链技术的多项目管理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- CHEN Fei. Research on multi project schedule management based on critical chain[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [17] Herman S. An investigation into the fundamentals of critical chain project scheduling[J]. International Journal of Project Management, 2001, 19(6): 363-369.
- [18] 高遵海, 杨波, 程果. 图的邻接路径矩阵与关键路径求解算法[J]. 中国科技论文, 2017, 12(17): 86-90.
- GAO Zun-hai, YANG Bo, CHENG Guo. Adjacent path matrix of graph and critical path algorithm[J]. China Science Paper, 2017, 12(17): 86-90.
- [19] 周正龙, 董雄报, 左园. 基于根方差法的 MIS 开发项目缓冲区研究[J]. 科技管理研究, 2014(8): 215-218.
- ZHOU Zheng-long, DONG Xiong-bao, ZUO Yuan. Study on the buffer of MIS development projects based on the root variance method[J]. Science and Technology Management Research, 2014(8): 215-218.
- [20] Ma G F, Wang A M, Li N, et al. Improved critical chain project management framework for scheduling construction projects[J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 140(12): 1-12.