

# 基于建设项目多目标综合优化的关键链缓冲区研究

罗福周, 刘 静

(西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**关键链技术中工序工期的估计以及缓冲区大小的合理确定和设置是诸多学者较集中探讨的问题. 本文首先量化分析质量、成本、安全因素与工期之间的关系, 以此为基础, 确定工序活动的安全时间并设置缓冲区, 实例证明该方法确定的工期不仅短于常规网络计划求得的工期, 而且综合考虑了工程项目管理中的诸多因素与目标要求, 故在能较好的符合工程实际的同时, 达到项目多目标的综合优化.

**关键词:**关键链; 工期; 质量; 成本; 安全

**中图分类号:** TU 712

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)06-0902-05

工程项目本身是一项复杂的、涉及面众多的活动, 具有投资大、周期长、参与方多、管理难度大等特点. 作为工程项目管理的重要目标之一, 工期的长短与工程的人事物等各方因素之间相互影响, 影响的方向、程度以及影响的结果错综复杂, 带有很大的不确定性, 由此也凸显了工期管理的重要性. 从最初的甘特图开始, 工期管理的技术层出不穷, 如关键线路法、计划评审技术等. 1997年 Goldratt 博士在《关键链—突破项目管理的瓶颈》一书中, 把约束理论引入项目管理领域, 提出了关键链(Critical Chain Method, CCM)的概念和方法<sup>[1]</sup>. 关键链技术强调项目执行过程中的动态管理及整个项目管理流程的持续改进<sup>[2]</sup>, 将约束理论(Theory of Constraints, TOC)、聚集原理等引入到计划的制定中, 站在全局角度考虑项目执行中的风险, 即使个别活动未能按期执行, 仍能有效保证整个项目的按期完成.

缓冲区的设置是关键链技术的核心所在, 也是确保项目进度顺利执行的有力工具<sup>[3]</sup>, 这种方式在理论上证明是卓有成效的, 而对于缓冲区尺寸大小的确定, 却一直没有统一的方法. Goldratt 博士以活动50%的 CPM 时间作为其估计的执行时间来安排项目进度计划, 这种简单的判断不可避免造成各项活动的时间被极大压缩, 给项目组成员形成一种非常紧迫的形势, 这在有效避免了“学生综合症”这一行为特征对工期拖延的后果的同时, 也给项目成员带来了完工压力. 围绕关键链技术缺陷的优化, 许多学者作了大量的探索. 2006年, Oya I. Tukul 基于项目的复杂度和资源需求的紧张程度, 提出密度求解和资源密度求解两种缓冲区的确定方法<sup>[4]</sup>. 2008年, 周阳、丰景春运用运筹学中的排队论方法对缓冲区的确定进行了研究<sup>[5]</sup>. 褚春超综合分析了资源紧张度、工序复杂度和管理者风险偏好等工序特性, 并以此来确定缓冲区尺寸<sup>[6]</sup>. 2009年, 单汨源等基于偶然性不确定因素视角来确定缓冲区的大小<sup>[3]</sup>. 杨莉提出考虑项目管理者风险偏好水平确定关键链上活动的安全时间, 以活动安全时间之和与依据项目中活动数目、活动间逻辑关系确定的系数之积来确定项目缓冲<sup>[7]</sup>.

然而, 诸多的研究多以项目工期最短为目标, 仅考虑了资源约束, 而实际应用中, 项目管理的问题往往是多目标优化问题, 需要考虑成本、质量、安全等因素, 才能实现项目的综合优化. 本文从多目标综合优化角度认识安全时间, 在综合考虑项目成本、质量、安全等几种主要因素与工期之间的相互关系的基础上, 提出一种确定关键链缓冲区的新方法.

## 1 工期与质量、成本及安全因素关系的定量化分析

工程项目管理中的四大目标之间是相互作用与相互影响的, 项目的质量、成本以及安全目标对工期

收稿日期: 2013-01-15 修改稿日期: 2013-09-12

基金项目: 陕西省教育厅科研计划基金资助项目(12JZ013)

作者简介: 罗福周(1963-), 男, 陕西西安人, 教授, 研究方向为建筑经济与房地产管理.

的影响在实际中是非线性且复杂的,诸多学者在研究当中,通常抓住关键矛盾而取其重要的影响关系.如工程实际中,直接成本会随着工期缩短而增加,而间接成本则随工期缩短而减小,工期与成本之间通常用下凹的近似抛物线函数关系来描述,而研究中则通常假定工程成本与项目的工期在正常时间和压缩时间范围内为线性关系.

### 1.1 质量因素分析

Babu认为工程项目的质量与工程项目的工期有直接的关系,并以0~1之间的实数来表征各工序活动的质量<sup>[8]</sup>.当工程项目由于特殊原因被返工,往往对工程质量要求有所放松,因此,工序工期要求紧张时,质量相对较差,而相反,较宽裕的工期,其质量相对较好.假定各工序的持续时间与质量之间为线性关系.本文以如下函数关系来定量化工序质量要求与工序持续时间的关系:

$$Q_i = Q_i^c + \alpha_i (T_i - T_i^c) \quad (1)$$

式中: $Q_i$ 表示工序活动*i*的实际质量; $Q_i^c$ 表示工序活动*i*在极限工期下的质量; $\alpha_i$ 表示工序活动*i*所对应的*T-Q*曲线斜率; $T_i$ 表示完成工序活动*i*的持续时间,其中 $T_{i1}$ 、 $T_{i2}$ 、 $T_{i3}$ 分别对应在一定质量目标、成本目标和安全目标下的工序活动*i*的持续时间限制. $T_i^c$ 表示工序活动*i*的极限工期.

### 1.2 成本因素分析

工期过短或过长都会造成施工成本的大幅上升.工期缩短,工程施工需要赶工,则施工成本增加;而工期延长,工程施工的固定费用会增加,也会导致施工成本增加.而工程实际中,各工序活动的综合成本与持续时间之间并非简单的线性关系,甚至不是单调函数.根据文献<sup>[9]</sup>,本文采用如下函数关系来定量综合成本与工序活动持续时间的关系(这里考虑到篇幅有限,成本与工序活动持续时间的关系研究不是本文的重点,故简化了二者的关系,成本值与工序持续时间值的实际关系应当更加严谨):

$$C_i = (T_i - T_i^N)^2 + C_i^N \quad (2)$$

式中: $C_i$ 表示工序活动*i*的直接成本; $T_i^N$ 表示工序活动*i*的基本工期; $C_i^N$ 表示工序活动*i*在正常工期下的直接成本.

### 1.3 安全因素分析

近年来,职业健康、环境等因素逐渐为人们所重视,并在一些文献中被囊括到项目管理的目标体系中,2008年,Thanet依据泰国的工程经验研究了项目管理中的安全问题<sup>[10]</sup>,2010年,Ivan引入风险评估模型和地理信息系统来对工程项目管理中的安全问题进行管理<sup>[11]</sup>.不合理的压缩工期,对工人的工作效率、工序的完工质量等因素都会产生一定的影响,从而对工期造成不利影响.同样,对工程项目的安全水平的一定要求,则会形成对工期的制约.本文借鉴文献<sup>[12]</sup>,假设工序活动的安全水平与工序活动的持续时间呈线性关系,以如下函数关系来定量分析安全水平与工序活动持续时间的关系:

$$S_i = \beta_i (T_i - T_i^c) \quad (3)$$

式中: $S_i$ 表示工序活动*i*的安全水平指数; $\beta_i$ 表示工序*i*的安全水平与工序工期之间的指数(可通过历史数据得知).

## 2 基于多目标综合优化的关键链管理方法

传统方法制定进度计划时,为防止风险事件对项目进度计划的顺利执行造成危害而在估算的工期中加入了大量的安全时间. Goldratt 定义安全时间为工序负责人对工期的估算时间与工期概率分布的中间值之差.即采用50%保证率的工序估计工期,而把95%与50%保证率下的估计工期差值作为工序的安全缓冲<sup>[1]</sup>.

本文综合工程项目的质量、成本、安全等目标的要求,通过定量分析项目管理各目标与工序工期之间的关系,以此来确定工序的安全时间,并采用根方差法求得项目的安全缓冲.在一个项目中包含*n*项工序活动,以*i*( $i=1,2,\dots,n$ )表示项目的第*i*项工序活动.步骤如下:

步骤一:最可能工期 $Z_i$ 的确定.

由式(1)可得到考虑工序质量要求的工序持续时间估算:

$$T_{i1} = \frac{Q_i - Q_i^c}{\alpha_i} + T_i^c \tag{4}$$

由式(2)可得到考虑成本要求的工序持续时间估算:

$$T_{i2} = \sqrt{C_i - C_i^N} + T_i^N \tag{5}$$

由式(3)可得到考虑安全要求的工序持续时间估算:

$$T_{i3} = \frac{S_i}{\beta_i} + T_i^c \tag{6}$$

则最可能工期  $Z_i$  为:

$$Z_i = \max\{T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}\} \tag{7}$$

步骤二:工序的安全工期裕量  $\Delta t_i$  的确定.

工序的工期裕量  $\Delta t_i$  为工序活动的最可能工期与基本工期的差值,即

$$\Delta t_i = Z_i - T_i^c \tag{8}$$

步骤三:项目缓冲(Project Buffer, PB)的确定.

缓冲区的确定通常有两种方法,剪切-粘贴法和根方差法. 2008 年,周阳等学者认为运用根方差法项目管理者不必随意削减各项工作的预估时间,并且该方法比较符合非确定执行时间累积的统计规律,从而避免采用剪切-粘贴方法可能导致的缓冲区因工序活动的数量而过长或过短的现象<sup>[5]</sup>. 故本文采用根方差法确定项目缓冲.

$$PB = \left[ \sum_{i \in \alpha} (\Delta t_i)^2 \right]^{1/2} = \left[ \sum_{i \in \alpha} (Z_i - T_i^c)^2 \right]^{1/2} \tag{9}$$

式中:CC 表示关键链上的工序活动的集合.

步骤四:接驳缓冲(Feeding Buffer, FB)的确定.

接驳缓冲区的确定和项目缓冲的确定类似,取非关键链上的工序活动的安全时间的根方差量进行计算.

$$FB = \left[ \sum_{i \in \alpha} (\Delta t_i)^2 \right]^{1/2} = \left[ \sum_{i \in \alpha} (Z_i - T_i^c)^2 \right]^{1/2} \tag{10}$$

步骤五:资源缓冲(Resource Buffer, RB)的确定.

资源缓冲 RB 只是一种预警形式,其作用在于确保关键链上的工序活动在执行前期所需要的资源已经就绪. 在具体实施中,可在工序活动的紧前活动开始执行、完成活动工作量的一半、完成前两天等几个可测的时间点对特定的关键资源进行预报,以提前做好准备,确保关键工序活动的顺利执行.

### 3 算 例

表 1 工序基本信息表

Tab. 1 Basic information of activities

工序 $i$	资源	紧前工序	$T_i^c$	$T_i^N$	$Q_i^c$	$Q_i$	$C_i^N$	$C_i$	$S_i$
1	R <sub>1</sub>	—	4	8	0.6	0.9	4.6	5.2	0.85
2	R <sub>1</sub>	1	10	12	0.5	0.8	3.5	3.9	0.75
3	R <sub>1</sub>	1	5	10	0.5	0.9	4.2	5.1	0.8
4	R <sub>2</sub>	1	4	8	0.5	0.8	2.4	3	0.75
5	R <sub>3</sub>	2	3	7	0.4	0.75	5.6	8.2	0.75
6	R <sub>3</sub>	3	6	13	0.65	0.8	3.1	5.5	0.75
7	R <sub>4</sub>	4	5	9	0.5	0.8	3.5	4.1	0.8
8	R <sub>5</sub>	6,7	8	14	0.65	0.9	1.5	2.2	0.7
9	R <sub>5</sub>	5,8	3	6	0.7	0.85	4.1	5.3	0.7

以一简化的工程项目为例,来说明该方法的运用. 该工程项目所包含的工序信息如下表 1 所示,其中基本工期表示考虑工序活动在极限施工条件下的最小工期. 一般工期表示包含了大量安全时间的考虑拖延等因素的工期.

(1)初始关键链确定

考虑工序活动之间的逻辑关系和资源约束,以工序的一般工期值确定该工程项目的关键路线,为①→③→⑥→⑧→⑨. 考虑到在同一时段,关键工序 1 和非关键工序 2 需要共用资源 R<sub>1</sub>,关键工序 6 和非关键工序 5 需要共用资源 R<sub>3</sub>,则根据关键链技术中非关键链上的活动越晚开始越好的原则,将工序 1 和工序 2 由并行改为串行,工序 5 和工序 6 同样改为串行. 从而得到工序的初始关键链为:①→②→③→⑥→⑤→⑧→⑨.

(2)工序活动的安全时间的计算

首先由式(4)、式(5)和式(6)分别求得考虑质量目标因素、成本目标因素和安全目标因素的工序可

能工期. 然后由式(7)确定最可能工期  $Z_i$  的值, 最后由式(8)求得安全时间  $\Delta t_i$  的值. (取  $\alpha_i = 0.25, \beta_i = 0.6$ )

以工序 1 为例:

$$T_{11} = \frac{Q_1 - Q_1^i}{\alpha_1} + T_1^c = \frac{0.9 - 0.6}{0.25} + 4 = 5.2$$

$$T_{12} = \sqrt{C_1 - C_1^N} + T_1^c = \sqrt{5.2 - 4.6} + 4 = 4.775$$

$$T_{13} = \frac{S_1}{\beta_1} + T_1^c = \frac{0.85}{0.6} + 4 = 5.417$$

$$Z_1 = \max\{T_{11}, T_{12}, T_{13}\} = \max\{5.2, 4.775, 5.417\} = 5.417$$

$$\Delta t_1 = Z_1 - T_1^c = 5.417 - 4 = 1.417$$

其他工序的计算如表 2 所示:

(3)项目缓冲 PB 的计算

由式(9)可求得项目缓冲 PB 值, 关键链上的活动为工序 1、工序 2、工序 3、工序 5、工序 6、工序 8、工序 9 组成, 故项目缓冲 PB 由这些关键链的工序的安全时间求得.

$$PB = \left[ \sum_{i \in CC} (\Delta t_i)^2 \right]^{1/2} = \left[ \sum_{i=1,2,3,5,6,8,9} (\Delta t_i)^2 \right]^{1/2} = 3.722$$

(4)接驳缓冲 FB 的计算

由式(10)可求得接驳缓冲 FB 值, 非关键链上的活动为工序 4 和工序 7, 该两项工序为串行关系, 故接驳缓冲的计算如下:

$$FB = \left[ \sum_{i \in CC} (\Delta t_i)^2 \right]^{1/2} = \left[ \sum_{i=4,7} (\Delta t_i)^2 \right]^{1/2} = 1.828$$

(5)资源缓冲 RB 的设置

结合项目工序间的搭接关系及各工序活动的资源需求, 在工序 1 和工序 4 之间设置资源缓冲  $RB_1$ , 在工序 4 和工序 7 之间设置资源缓冲  $RB_2$ , 在工序 3 和工序 6 之间设置资源缓冲  $RB_3$ , 在工序 5 和工序 8 之间设置资源缓冲  $RB_4$ . 项目的最终进度计划如图 1 所示.

综上, 该项目的总工期  $T$  为:

$$T = T_1^c + T_2^c + T_3^c + T_6^c + T_5^c + T_8^c + T_9^c + PB = 4 + 10 + 5 + 6 + 3 + 8 + 3 + 3.722 = 42.722$$

而若按照常规的计算, 该项目的总工期  $T^0$  为:

$$T^0 = T_1^N + T_3^N + T_6^N + T_8^N + T_9^N = 8 + 10 + 13 + 14 + 6 = 51$$

### 4 结 语

本文所研究的方法确定的工期不仅短于常规网络计划求得的工期, 而且综合考虑了资源、项目的质量目标、成本目标以及安全目标的要求, 故在能较好的符合工程实际的同时, 能使工期更优. 文章的不足之处在于定量化质量、成本以及安全因素对工期的影响时较为简化, 此三因素对工期的影响是动态而复杂的, 用系统理论及其方法对工程项目管理的四大目标进行研究与综合优化, 从而使关键链技术更加贴近实际应用将会是以后一个重要的研究方向.

### 参考文献 References

[1] GOLDRATT E M. Critical chain[M]. Great Barrington, Mass. USA: The North River Press Publishing Corporation, 1997.  
[2] 徐 哲, 王黎黎. 基于关键链技术的项目进度管理研究综述[J]. 北京航空航天大学学报: 社会科学版, 2011 (2): 54-59.

表 2 各工序活动的安全时间计算

Tab. 2 Safety time calculation of each activity

工序 $i$	$T_{i1}$	$T_{i2}$	$T_{i3}$	$T_i$	$\Delta t_i$
1	5.2	4.775	5.417	5.417	1.417
2	11.2	10.632	11.25	11.25	1.25
3	6.6	5.949	6.167	6.6	1.6
4	5.2	4.775	5.25	5.25	1.25
5	4.4	4.612	4.25	4.612	1.612
6	6.6	7.549	7.25	7.549	1.549
7	6.2	5.775	6.333	6.333	1.333
8	9	8.837	9.167	9.167	1.167
9	3.6	4.095	4.167	4.167	1.167

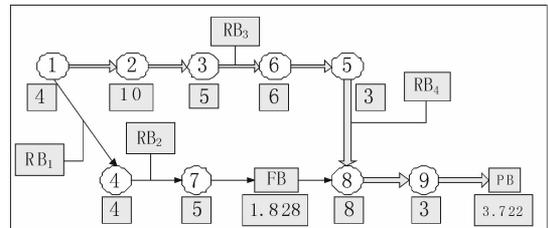


图 1 项目进度计划网络图

Fig. 1 The project schedule plan network diagram

- XU Zhe, WANG Li-li. Review of a technology based on critical chain for project scheduling [J]. J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics; Social Science, 2011 (2): 54-59.
- [3] 单汨源, 刘永, 任斌, 等. 基于不确定因素视角的关键链缓冲区研究[J]. 软科学, 2009 (8): 26-29.  
SHAN Mi-yuan, LIU Yong, REN bin, et al. Research on critical chain buffer based on the perspective of uncertainties [J]. Soft Science, 2009 (8): 26-29.
- [4] TUKEL Oya I, EKSIÖGLU Sandra duni. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling [J]. European Journal of Operational Research, 2006 (172): 401-416.
- [5] 周阳, 丰景春. 基于排队论的关键链缓冲区研究[J]. 科技进步与对策, 2008 (2): 174-176.  
ZHOU Yang, FENG Jing-chun. Research on critical chain buffer based on the queuing theory [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2008 (2): 174-176.
- [6] 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 (5): 1029-1035.  
CHU Chun-chao. Buffer sizing and critical chain project management [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008(5): 1029-1035.
- [7] 杨莉, 李南. 基于模糊理论的关键链管理研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2009 (10): 27-30.  
YANG Li, LI Nan. Research on critical chain management based on fuzzy theory [J]. Science of Science and Management of S. & T., 2009 (10): 27-30.
- [8] BABU A J G., SURESH Nalina. Project management with time, cost, and quality considerations [J]. European Journal of Operational Research, 1996 (88): 320-327.
- [9] 尹齐心, 余明晖, 刘振元. 非线性关系下的工程项目工期-成本-质量综合优化[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 580-583.  
YIN Qi-xin, YU Ming-hui, LIU Zhen-yuan. Optimization of time-cost-quality under nonlinear relationship in construction project [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(2): 580-583.
- [10] AKSORN Thanet, HADIKUSUMO B H W. Critical success factors influencing safety program performance in Thai construction projects [J]. Safety Science, 2008 (46): 709-727.
- [11] FUNG Ivan W H, TAM Vivian W Y, LO Tommy Y, et al. Developing a risk assessment model for construction safety [J]. International Journal of Project Management, 2010 (28): 593-600.
- [12] 张仕廉, 蒋亚鹏. 建筑施工中工期安全水平评价[J]. 施工技术, 2011, 40(4): 48-50.  
ZHANG Shi-lian, JIANG Ya-peng. Evaluation of construction period-safety level in Building construction [J]. Construction Technology, 2011, 40(4): 48-50.

## Multi-objective comprehensive optimization research on critical chain buffer in construction project

LUO Fu-zhou, LIU Jing

(School of Management, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The scheduling estimation and reasonable determination of the buffer duration in critical chain technique is a problem which has been discussed among experts in this respect. Firstly, qualitative analysis on the relationship between quality/cost/safety and schedule, and then the methods such as linear and nonlinear function were used to quantify these relationships based on relative literature review. Following this, the safety time of processes, together with the buffer have been quantified. In the end, the method created in this article proved useful not only in shortening the schedule compared with normal network planning, but also it has taken the critical factor and different objective demands into account to well fulfill the practical use and get a comprehensive optimization.

**Key words:** critical chain; schedule; quality; cost; safety