

# 基于改进关键链的地铁车站土建工程进度优化

陈桂香<sup>1,2</sup>, 宋久乐<sup>2</sup>, 张 昭<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海, 200092; 2. 河南工业大学土木建筑学院, 河南 郑州 450001; 3. 同济大学经济与管理学院, 上海 200092)

**摘 要:** 通过对约束理论与关键链技术的简单介绍, 指出了关键链技术在应对工程项目进度延期风险方面的优点, 较为详细地分析了关键链技术运用于城市轨道交通项目进度计划管理的优势。同时, 结合城市轨道交通项目的进度管理特点提出了关键链技术在约束因素的分类、安全时间的确定以及缓冲区的确定等几个方面的改进必要性和改进的方法。最后, 以郑州轨道交通一号线某车站工程的土建部分为例研究论证了改进后的关键链技术可以有效地缩短项目的持续时间。

**关键词:** 城市轨道交通; 关键链; 优化

**中图分类号:** TU94

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.05.006

## 0 引言

城市轨道交通项目不仅技术要求高、资金需求大而且建设周期长, 尤其是建设周期长成为了比较难以克服的瓶颈。目前, 多数轨道交通项目普遍采用传统的进度管理方法, 其管理效果比较一般。然而, 基于约束理论的关键链项目管理技术在进度管理方面具有巨大的优势, 但关键链技术在轨道交通项目进度管理中的应用还没有引起相关人员足够的重视。

约束理论(Theory of Constraint, TOC)的提出者 Goldratt 认为, 每一个项目中都至少存在一个制约最大产出的因素, 即约束<sup>[1]</sup>。因此, 约束理论要求从系统的最大产出角度来进行项目的效率/进度管理。基于约束理论的项目管理技术称为关键链项目管理(Critical Chain Project Management, CCPM)<sup>[2]</sup>。关键链技术(Critical Chain Method, CCM)认为, 影响项目进度的因素不仅仅局限于各个工序之间的逻辑关系和工序持续时间, 同时还应该包含资源因素, 也即项目工期由各个工序持续时间、工序间逻辑关系以及资源约束三个因素共同决定。

## 1 关键链技术在地铁进度管理中的优势

引起项目持续时间过长或者进度延期的因素有很多, 例如资金不足, 技术落后以及场地有限等等。传统的进度管理技术分散考虑各种风险因素, 导致了工期不合理的延长。基于风险聚合原理<sup>[3-4]</sup>, 关键链技术提出在项目中插入三类缓冲区以应对导致进度延期的各种风险因素。具体来说, CCM 在应对轨道交通项目进度延期风险的作用主要体现在以下几个方面:

### 1.1 考虑了各类可能的制约因素

城市轨道交通项目的进度风险主要来自于地下管线迁改以及征地拆迁<sup>[6]</sup>。管线迁改以及征地拆迁持续时间长且工作难度高, 很容易造成项目工期的延迟。基于约束理论的关键链技术要求提前识别项目中存在的约束因素, 也即影响进度的风险因素, 并通过“五步法”最大限度的利用项目制约因素和优化项目的进度计划。由于 CCM 将约束因素提到了与工序逻辑关系同等重要的地位, 因此在工程建设前就会详细考虑征地拆迁等因素对工程进展造成的影响, 以保障项目按期完工。

### 1.2 插入缓冲区

轨道交通项目工序多, 若其中某一工序出现延迟就可能会导致其后的工序也出现延迟, 并极

收稿日期:2012-03-20; 修订日期:2012-04-12

基金项目:河南省青年骨干教师资助计划(2010GGJS-083)

作者简介:陈桂香(1976-), 女, 河南郑州人, 同济大学副教授, 博士, 主要从事结构的可靠度和风险管理、城市生命线系统的安全管理等方面的研究与教学工作。E-mail:chen-guixiang@163.com.

有可能发生积累的延迟,对项目工期造成不良的影响.关键链技术要求合理的安排各个工序的持续时间,剔除存在于每个工序中的安全时间,同时严格保证各工序在规定的时间内完成.因此,即使某些工序出现了延迟也可以由缓冲区来吸收,保证项目按计划进行.

### 1.3 考虑了资源因素

城市轨道交通工程路线长、工种多且工序复杂,常常涉及土建、安装、水电、信号、设备、铺轨等等作业,在施工过程中往往需求多种多样的资源,这些资源中任何一种安排不合理或者供应不及时都会对进度计划产生不良影响.基于约束理论的关键链技术中为了解决上述问题提出在某些关键工序前插入资源缓冲区以保障资源被合理地在项目工序间进行调动.

### 1.4 考虑了人的因素

目前的大多数项目进度管理计划在编制过程中往往按照最早开始时间或者最早完工时间来安排项目的进度计划,这就导致项目的管理者在开始的时候思想放松,工作效率低,把大量的工作都放到最晚开始的那一刻才开始进行<sup>[5]</sup>,这使得帕金森症和学生综合症成为了制约项目进度的潜在风险.CCPM按照各个工序的最晚开始时间编制项目进度计划,这使得项目参与者从一开始就必须投入足够的精力到项目中去,达到很高的生产效率,加速项目的完成.

## 2 对关键链技术的改进及其必要性

Goldratt认为,项目中各个工序持续时间中均存在所谓的“安全时间”,他把所有工序持续时间的一半作为活动的安全时间,并且把缓冲区的大小定义为所有工序安全时间之和的一半<sup>[2]</sup>.该方法简单明了,但简单地把各个工序时间的一半作为安全时间却是不严谨的,同时造成了缓冲区的大小与工作链的长度成线性关系,容易产生缓冲区过大或过小的现象.因此,必须对关键链进行改进.

### 2.1 对资源分类的改进

约束理论最早应用于制造领域,Goldratt指出其中的约束主要为资源约束,也即实物类约束.然而,不同的项目拥有不同的约束因素,类似的项目也会因为生产条件的不同而产生不同的约束.对于轨道项目来说可以把约束分为两类:资源类约束和非资源类约束,诸如征地拆迁、政策法规、行政审批以及组织结构<sup>[5]</sup>类型等不消耗资源的因素都为非资源类约束<sup>[6]</sup>,其他消耗资源的因素则

为资源类约束.针对资源类约束可以增加资源供应量以应对项目进度延迟的风险,对于非资源类约束例如征地拆迁、行政审批类约束项目可以成立特设的部门加快约束解决速度.

### 2.2 对安全时间确定的改进

城市轨道交通项目涉及多工种多工序,而各个工种的施工特点又各不相同,有的只需增加机械设备就可以提高工程进度,有的则因为工程环境的影响而制约工程的进展,因此,剪切-粘贴法一对各个工序取50%的工序持续时间作为安全时间一是不够严谨的.安全时间的大小应分门别类,根据各个工种的特点,依据工作效率和工作难度等取原工序持续时间 $D_i$ 的 $\alpha_i$ 倍作为工序的关键链工期, $D_i$ 与关键链工期的差 $d_i$ 为工序的安全时间.

### 2.3 对缓冲区的改进

缓冲区的设置是CCM的核心所在.因为工序中安全时间的剔除,项目中各个活动的进度计划几乎就没有任何可以变动的可能,但实际工程项目的建设环境是动态变化的.缓冲区的插入正是用来应对因为不能预见的因素而对工程造成的工期延迟风险.另外,关键链缓冲区的大小与工程的持续时间紧密相关,工程持续时间越长则项目不可预见的风险越多,缓冲区可能越大,这主要取决于项目管理者的风险偏好<sup>[7]</sup>.

## 3 建立模型

### 3.1 工期折减系数 $\alpha_i$ 的确定

折减系数可以通过专家打分法、头脑风暴法以及计划-实际对比法等方法获得.在已获得本工程或类似工程原计划工期和实际工期的条件下,可以采用计划-实际对比法获得 $\alpha_i$ .相反地,在没有本工程或者类似工程工期相关统计资料的情况下则可以采用专家打分法或头脑风暴法取得 $\alpha_i$ .

城市轨道交通项目工序多且复杂,如果自工程开始至结束都采用上述三种方法确定 $\alpha_i$ ,其工作量将会十分巨大.为了克服这个不足,在项目实施过程中,可以根据项目环境的不同对已取得 $\alpha_i$ 进行适当的调整,以得到满足各个阶段项目特点的工期折减系数.

### 3.2 缓冲区的确定

CCPM提出缓冲区的大小与项目所有工序的安全时间有关<sup>[8]</sup>,但Goldratt提出的缓冲区为安全时间之和一半的算法并不能满足实际要求.缓冲区与安全时间有关,但其大小却与其他许多因素相关.其中,对缓冲区大小有重要影响的



表 3 风险偏好度  
Tab.3 Risk preference degree

作业 代码	作业名称	$a_i/d$	$m_i/d$	$b_i/d$	$\gamma_i$
A1000	建筑物拆除	50	60	85	0.74
A1010	第一阶段管线搬迁	50	75	100	0.75
A1020	第二阶段管线搬迁	300	300	430	0.75
A1030	地下墙第一阶段施工	90	100	130	0.79
A1040	地下墙第二阶段施工	9	10	13	0.79
A1050	地基加固施工	20	23	26	0.88
A1060	立柱桩施工	10	10	14	0.76
A1070	压顶梁及第一道 砼支撑施工	16	17	20	0.87
A1080	降水井打设及降水施工	13	14	16	0.89
A1090	第二层土方及支撑施工	13	14	16	0.89
A1100	第三层土方及支撑施工	20	21	24	0.89
A1110	第四层土方及支撑施工	21	23	26	0.89
A1120	第五层土方施工	13	15	17	0.88
A1130	端头井结构施工	120	140	175	0.81
A1140	标一段结构施工	80	90	100	0.90
A1150	标二段结构施工	80	90	100	0.90
A1160	标三段结构施工	80	90	100	0.90

4.4 缓冲区的计算

各个工序缓冲区的大小见表 4.

表 4 各个工序的缓冲区  
Tab.4 The activity buffer

作业 代码	作业名称	$d_i/d$	$\beta_i$	$\gamma_i$	$\Delta B_i/d$
A1000	建筑物拆除	40	0.04	0.74	11
A1010	第一阶段管线搬迁	40	0.05	0.75	11
A1020	第二阶段管线搬迁	150	0.48	0.75	56
A1030	地下墙第一阶段施工	30	0.18	0.79	7
A1040	地下墙第二阶段施工	4	0.71	0.79	1
A1050	地基加固施工	11	0.75	0.88	2
A1060	立柱桩施工	6	0.72	0.76	2
A1070	压顶梁及第一道 砼支撑施工	6	0.74	0.87	1
A1080	降水井打设及降水施工	6	0.74	0.89	1
A1090	第二层土方及支撑施工	6	0.76	0.89	1
A1100	第三层土方及支撑施工	9	0.78	0.89	2
A1110	第四层土方及支撑施工	11	0.80	0.89	2
A1120	第五层土方施工	7	0.82	0.88	2
A1130	端头井结构施工	43	0.89	0.81	15
A1140	标一段结构施工	25	0.83	0.90	5
A1150	标二段结构施工	25	0.90	0.90	5
A1160	标三段结构施工	25	0.92	0.90	5

通过改进后的关键链技术方法,得到了郑州市轨道交通一号线某车站部分工程的关键链进度计划.与初始计划相比较而言,关键链进度计划工期为 628 d,加上项目缓冲区 60 d 后,项目持续总

时间为 688 d,比初始计划 922 d 缩短了 234 d.证明了改进后的关键链进度技术大大的优化了工程的进度计划,同时也说明了关键链技术在应对工程延迟风险方面具有十分独特的优势.关键链技术方法的郑州市轨道交通一号线某车站部分工程进度计划见图 2.

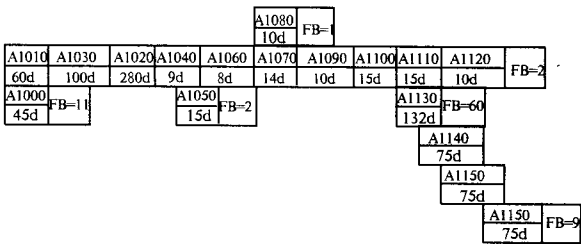


图 2 关键链进度计划  
Fig.2 Critical chain scheduling

5 结论

作者通过对约束理论及关键链技术的研究,结合城市轨道交通项目的特点,提出了关键链技术在城市轨道交通项目中运用的可行性及优势.同时提出了关于工期折减系数、位置权数、风险偏好度以及缓冲区确定的优化关键链模型.最后通过实例研究表明,改进后的关键链技术在城市轨道交通项目进度管理中是符合实际的、适用的.

参考文献:

[1] GOLDRATT E M. What Is This Thing Called the Theory of Constraints [M]. NewYork: The North River Press, 1990.

[2] GOLDRATT E M. Critical Chain [M]. NewYork: North River Press, 1997.

[3] 赵道致,廖华,刘一骊. 关键链法:一种新型的项目进度计划方法[J]. 天津理工大学学报, 2005, 21 (2): 8-12.

[4] GREGORY T HAUGAN. Project Planning and Scheduling [M]. Vienna, Va.: Management Concepts, 2002.

[5] 程婷婷,李伟波,程霞. 关键链新技术在项目管理中的研究和应用[J]. 微计算机应用, 2007, 28 (5):539-543.

[6] 黄明真. 关键链和滚动计划思想在高铁施工进度计划中的应用初探[J]. 项目管理, 2009 (7):23-26.

[7] 郭振华,熊华,苏燕. 工程项目保险[M]. 北京:经济科学出版社,2004.

[8] 赵道致,廖华. 对关键链法的几个认识误区[J]. 工业工程, 2005, 8 (2): 4-6.

- [9] 单汨源,龙颖.一种关键链缓冲机制改进方法及其应用研究[J].项目管理技术,2006(9):32-35.

## The Research on Metro Station Scheduling Optimization Based on Improved Critical Chain Technology

CHEN Gui-xiang<sup>1,2</sup>, SONG Jiu-le<sup>2</sup>, ZHANG Zhao<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 200092, China)

**Abstract:** Based on the analysis of theory of constraint and critical chain, this paper firstly illustrates the advantages of critical chain method for dealing with the project overrun and project scheduling management. Secondly, this paper presents the principles and methods about constraint classification, safety size and buffer size based on the Metro scheduling characters. Finally, a computational example is given and the results show that the approach is effective.

**Key words:** Metro; critical chain; application

(上接第24页)

- [2] 欧文 D R J, 辛顿 E. 塑性力学有限元—理论与应用[M]. 曾国平,译. 北京:兵器工业出版社,1989.
- [3] JGJ 94—1994. 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1995.
- [4] 李美生. 大直径扩底桩承载力影响因素研究[J]. 铁道勘察,2008,34(3):41-43.
- [5] 李海林. 桩-土相互作用的数值模拟分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院,2006.
- [6] 王先军,周文字,蒋鑫. ANSYS 在模拟桩土接触中的应用[J]. 森林工程,2006,22(3):49-51.
- [7] 王月梅. 桩基础承载性状 ANSYS 分析[J]. 工程建设与设计,2005(4):48-50.
- [8] 王俊林,王复明,任连伟,等. 大直径扩底桩单桩水平静载试验与数值模拟[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1406-1411.

## Factors for Vertical Bearing Capacity of Large-diameter Belled Piles

ZHANG Qi<sup>1</sup>, LI Kun-xuan<sup>2</sup>, WANG Jun-lin<sup>2</sup>

(1. Water Resources Research Institute of Henan Province, Zhengzhou 450003, China; 2. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** This paper applies international general large-scale finite element software ANSYS to establish the finite element model of pile-soil interaction, with a project example, the influence factors for vertical bearing capacity of large-diameter belled concrete piles are analyzed. Through comparing the simulated results with field test results, it gets the results of finite is close to the measured value; and then different pile length, belled diameter and belled height influence on the vertical bearing capacity are simulated and analyzed by the finite element method. The results show that the belled diameter is larger, the vertical bearing capacity is higher, the growth is slower when  $D/d$  is greater than 2; the belled height is larger, the vertical bearing capacity is higher, but the growth is slow; the length of pile is longer, the vertical bearing capacity is higher, but the growth is slower when the length increase to a certain degree.

**Key words:** pipe-soil interaction model; vertical bearing capacity; influence factor; finite element method