

文章编号: 1001-0920(2013)09-1281-07

## 关键链项目调度方法研究评述

张静文, 李若楠

(西北工业大学 管理学院, 西安 710072)

**摘要:** 客观地评述了关键链方法的优缺点. 首先, 简要阐述了关键链与关键路径法/计划评审技术及资源约束型项目调度问题的异同点; 然后, 从关键链调度优化模型、缓冲机制和关键链的应用3方面梳理了已有的研究成果, 相应地, 从两个方面总结出目前关键链方法中的欠缺; 最后, 从多目标优化、动态关键链、与鲁棒性结合和与其他理论融合4个角度指出了关键链方法将来的研究趋势. 评述工作将会对关键链的理论研究和实践应用提供一些思维启发.

**关键词:** 关键链; 项目调度; 缓冲区; 评述

**中图分类号:** TP29, C935

**文献标志码:** A

## Review of critical chain project scheduling method

ZHANG Jing-wen, LI Ruo-nan

(School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: ZHANG Jing-wen, E-mail: zhangjingwen@nwpu.edu.cn)

**Abstract:** The purpose of this paper is to objectively review the merits and the pitfalls of the critical chain(CC) method. Firstly, the differences and the correlations between the CC and the existing methods for the project scheduling are analyzed briefly, such as the classical critical path method/program evaluation and review technique(CPM/PERT) and the resource-constrained project scheduling problem(RCPSP). Secondly, the achievements in the CC are classified and commented based on three aspects: the optimization model, the buffer mechanism and the application of the CC. Accordingly, two shortcomings of the CC are also probed. Finally, the four further extensions are presented as the trends of the CC: the multi-objective optimization, the dynamic CC, the integration with the robustness, and the mergence with other theories of project managements. The review will shed some new illuminations on the future CC for researchers and practitioners.

**Key words:** critical chain; project scheduling; buffer; review

### 0 引言

现代项目的结构及规模日趋复杂, 面临环境日益多变, 项目外部的不确定性和风险不断增大<sup>[1]</sup>; 同时, 经济全球化导致市场竞争日趋激烈, 众多项目对稀缺资源的竞争愈加激烈. 因此, 经典的项目调度计划方法关键路径法/计划评审技术(CPM/PERT)已不能适应实际的需求. 针对此种背景, 为克服CPM/PERT的缺陷, 提升项目管理的能力, 以色列物理学家Goldratt博士<sup>[2]</sup>于1997年将约束理论(TOC)成功应用于项目管理领域, 产生了一种全新的项目计划调度方法——关键链方法(CCM). 关键链法一经推出便风靡全球, 到目前已逐渐形成一种独特的项目管理哲学, 并成功地应用于多个企业, 引起企业界和学术界的广泛关

注<sup>[3-4]</sup>.

关键链方法根植于TOC, TOC中蕴含的不断消除系统瓶颈的思想是关键链技术在项目管理中得以推崇的重要原因<sup>[5]</sup>. 然而, 尽管关键链首次考虑了项目计划和执行过程中的行为不确定性, 在管理理念上突破了经典的项目管理方法, 但是并未进一步挖掘行为不确定因素产生的根源, 因此在正确预测和积极引导项目决策者的行为中还有待深入研究<sup>[6]</sup>. 近年来, 一些学者从理论和实践两个方面对关键链方法进行了完善和拓展, 产生了较多研究成果<sup>[7-8]</sup>. 然而, 任何一种理论或方法都有其优点和不足, 本文将客观地评述关键链调度方法的现有研究成果并总结其不足, 期望能对关键链在理论和实践两方面的发展提供一些

收稿日期: 2012-09-20; 修回日期: 2013-03-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70702026); 陕西省自然科学基金项目(2011JQ9001); 西北工业大学管理振兴基金项目(RW201005); 西北工业大学管理学院优秀青年教师培养计划项目.

作者简介: 张静文(1976—), 女, 副教授, 从事项目调度优化理论等研究; 李若楠(1989—), 女, 硕士生, 从事项目的研究.

思考和借鉴.

### 1 关键链与其他项目调度方法

#### 1.1 关键链的概念

关键链是在满足资源约束和活动间相互依赖关系下制约项目工期的最长任务链. 假定活动工期服从正态分布, 且通常以一种奋进的态度(如 50% 的完工概率)估计活动时间, 各活动的剩余“余裕”时间将以缓冲形式体现. 根据活动的估计工期和资源限量可识别出活动网络的关键链和非关键链. 在非关键链汇入关键链入口处设置输入缓冲(FB), 用来吸收由于非关键活动拖延对关键链的影响; 在关键链末端设置项目缓冲(PB), 用来吸收由于关键链上的活动拖延对项目工期的影响. 与 FB 和 PB 不同, 资源缓冲(RB)作为一种预警机制设置在关键链上, 防止关键活动受资源短缺而延误. 关键链对经典的 CPM /PERT 有较多改进, 同时与资源约束型项目调度问题(RCPSP)关系密切.

#### 1.2 关键链与 CPM/PERT

张静文等<sup>[9]</sup>从对待资源的态度、对人的行为认识、对待风险的态度、在网络图中的表现形式和确定过程 5 个层面深入细致地分析了关键链方法对经典 CPM/PERT 的改进. 本文在此基础上再强调两点:

1) 活动网络中的关键链与资源限量相关. 资源限量变化时, 关键链也随之改变. 在一定资源限量下, 寻找关键链是求解具有 NP-hard 特征的组合优化模型 RCPSP, 其过程比较复杂. 例如, 对于图 1 所示的活动网络, 其中节点中的数字表示活动代号, 括号中的两个数字  $(d_j, r_j)$  分别代表活动  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, 8$ ) 的工期  $d_j$  和资源需求量  $r_j$ . 当资源限量  $R = 6$  时, 关键链为  $0 \rightarrow ① \rightarrow ③ \rightarrow ④ \rightarrow ⑤ \rightarrow ⑥ \rightarrow ⑦ \rightarrow ⑧$ , 如图 1 中用虚拟的“链条”链接起来的的活动序列; 而当资源限量变为 5 时, 关键链为  $0 \rightarrow ① \rightarrow ③ \rightarrow ⑤ \rightarrow ⑥ \rightarrow ⑦ \rightarrow ⑧$ . 两种资源限量下的调度方案如图 2 所示, 图中横坐标表示时间轴, 纵坐标表示资源占用量, 从中可以看出当资源限量改变时关键链的变化情况.

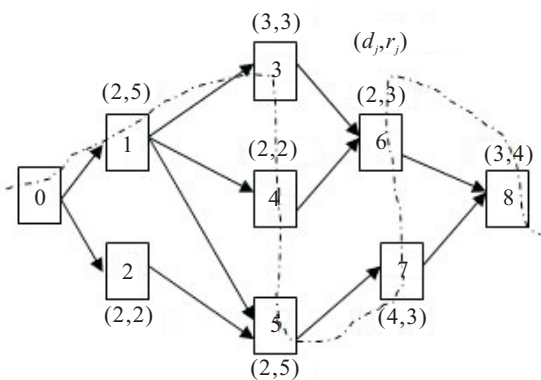
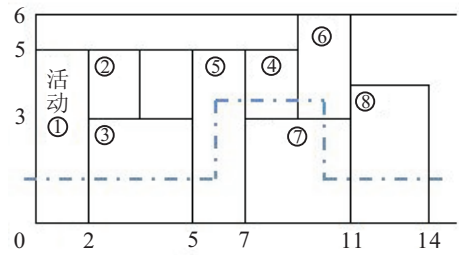
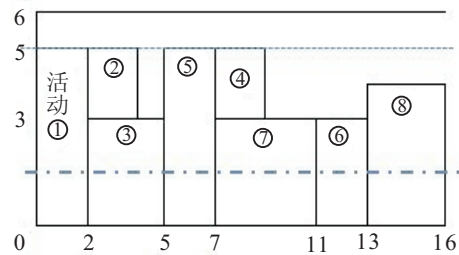


图 1 基于节点(Activity-no-node, Aon)的活动网络图



(a)  $R=6$ 时的关键链



(b)  $R=5$ 时的关键链

图 2  $R = 5$ 时的关键链

2) 执行进度计划的方式不同. CPM/PERT 安排活动尽早开始; 而 CCM 方法则安排非关键链上的活动越晚开始越好, 这样具有紧前关系的两个活动之间不存在空闲时间(除缓冲区外), 以求资源平衡和避免造成紧迫感.

#### 1.3 关键链与 RCPSP

从运筹优化学科的角度来看, 关键链与 RCPSP 的相关性体现为 3 点: 1) 对活动工期和资源需求的假设不同. 2) 识别关键链的过程基于求解 RCPSP, 但是确定活动网络结构中的关键链和非关键链比求解 RCPSP 更复杂. 3) 获得的调度计划不同. RCPSP 的调度计划是刚性的, 不具有抗干扰的能力; 而关键链中的缓冲则具有吸收活动工期拖延的作用.

### 2 关键链的研究进展

后续学者对关键链的研究主要围绕建立关键链调度模型及求解、缓冲区尺寸的确定、缓冲区监控管理、关键链的实际应用等几个方面.

#### 2.1 关键链调度模型及求解

关键链方法的核心是识别关键链的过程. Herroelen 等<sup>[10]</sup>深入分析了关键链方法的优缺点, 并通过仿真实验对比了关键链获得的调度计划和 RCPSP 获得的调度计划(分支定界法、基于最晚结束时间优先规则), 结果表明前者更接近项目管理实践. Wei 等<sup>[11]</sup>基于改进的约束理论, 给出了关键链项目调度模型的参数设计和算例求解. 紧随其后, Elmaghraby 等<sup>[12]</sup>对 Wei 等提出的调度模型的假设条件、参数设计和算例求解提出不同的见解, 认为其忽略了解决资源冲突下调度问题的技术发展水平, 错误应用关键链概念, 并且缺乏理论支撑. 莫巨华<sup>[13]</sup>提出

一种关键链的识别方法, 该方法首先生成一个近优的调度计划, 通过对调度计划左移和右移操作, 分别获得资源约束下各活动的最早时间和最晚时间, 根据活动的时间参数判断出关键活动和非关键活动集合. 马国丰等<sup>[14]</sup>从冲突资源的角度定义关键任务、关键任务组和关键任务群, 针对一种冲突资源, 提出识别关键冲突任务的一个启发式算法, 进而建立有效的关键链调度计划. 李俊亭等<sup>[15]</sup>用开始-开始(SS)的搭接关系表示由于资源冲突引起的活动之间的滞后, 对存在两种搭接关系, 即结束-开始(FS和SS)的网络, 提出了在资源约束下, 基于活动自由时差的关键链识别思路. 刘士新等<sup>[16]</sup>针对资源受限的双目标优化模型(极小化工期和在制品水平), 首先生成工期最小的近优调度计划, 再在该计划中插入FB和PB来保证调度方案在非确定环境下的稳定性. Tukul等<sup>[17]</sup>基于RCPSP获得的最短项目工期下的最优调度方案, 通过计算资源约束下各活动的最晚开始时间来识别关键链. 管在林等<sup>[18]</sup>以活动贡献度作为优先权系数, 采用左移和右移操作识别关键链. 田文迪等<sup>[19]</sup>运用动态规划的思想, 设计了一个启发式算法来识别关键链和非关键链, 其核心是通过最优调度计划中的活动进行右移操作, 以此来判断活动是否属于关键活动. Truc等<sup>[20]</sup>研究了基于最大加线形系统(max-plus linear system)表示的多项目环境中的关键链项目管理方法. Peng等<sup>[21]</sup>将关键链技术拓展到具有多种执行模式下, 结合多模式网络计划和关键链技术的活动, 建立多模式关键链项目调度的数学模型并设计了启发式的求解算法.

通过综合分析关于关键链调度模型及求解的文献获知, 目前关键链模型都基于RCPSP, 尽管在调度计划中加入FB和PB, 但并未改变模型的组合优化特征和混合整数规划的理论基础, 并且模型求解仍然是NP-hard问题. 因此, 对关键链模型的求解主要采用启发式算法, 各位学者针对特定情形提出的识别关键链的启发式算法并不具有普遍性. 在求解关键链模型时, 采用的活动工期也不相同, 因此采用不同的启发式算法获得的关键链也没有可比性. 以项目工期为关键链调度模型的目标, 获得项目工期短的算法不一定好于获得工期长的算法, 因为关键链方法中还涉及插入缓冲之后, 调度计划的可行性及实施过程中的稳定性.

## 2.2 缓冲区设置

缓冲机制是关键链方法的精髓, 体现为预设缓冲和对缓冲的管理. Herroelen等<sup>[22]</sup>认为, 关键链的缓冲管理实际上体现了关键链是一种不确定型的项目调度方法. 关键链中的RB容易处理, 而FB和PB较复

杂, 因此对缓冲区研究主要集中于FB和PB.

Goldratt提出采用剪切-粘贴法(50%法则)计算FB和PB, 但是此方法极易导致缓冲区尺寸过大或过小; Newbold<sup>[23]</sup>对此提出了根方差法, 将各活动“余裕”时间平方和的平方根作为FB和PB的尺寸. 剪切-粘贴法和根方差法都未考虑资源约束的松紧度和活动网络的结构, Tukul等<sup>[17]</sup>对此提出两种计算FB尺寸的方法, 一种为考虑资源利用因子的APRT(adaptive procedure with resource tightness), 一种为引入网络复杂性的APD(adaptive procedure with density). 褚春超<sup>[24]</sup>针对项目管理中面临的诸多不确定性, 在考虑上述两个因素的基础上, 又增加管理者风险偏好等因素, 提出一种综合考虑上述3个因素的缓冲区尺寸计算方法, 并采用模拟方法进行了验证. 刘士新等<sup>[25]</sup>综合考虑活动在资源约束下的自由时差和由根方差法获得的FB的尺寸, 分别针对每项非关键链上的活动设置时间缓冲区. 施赛等<sup>[26]</sup>针对褚春超的研究, 采用资源紧张的隶属度函数代替资源利用因子, 提出改进的缓冲区尺寸方法, 并考虑资源的可替代性, 设计了评价缓冲区尺寸效果的指标. Luong等<sup>[27]</sup>基于模糊数描述活动工期, 采用基于模糊技术的根方差法计算PB. 杨立熙等<sup>[28]</sup>考虑3个与具体项目相关的属性: 链中包含的活动数、活动执行时间不确定程度和开工柔性程度, 并提出一种基于根方差法的改进缓冲尺寸方法. Falah等<sup>[29]</sup>基于每个活动工期分布的3个形状参数(偏差系数、偏斜度和峰度)计算PB和FB. 还有一些学者针对不同的情况, 对上述的代表性缓冲尺寸计算方法进行了讨论和改进. 前面学者在计算缓冲尺寸时, 都假定活动之间相互独立. Bie等<sup>[30]</sup>提出了考虑活动之间相关性的缓冲区尺寸计算方法, 并采用数值算例进行了仿真试验. Liu等<sup>[31]</sup>引入结构熵的概念表述建筑项目网络调度的复杂性, 并提出一种新的基于活动属性的缓冲区尺寸计算方法. Ma等<sup>[32]</sup>提出一种基于柔性管理视角的缓冲计算方法, 综合考虑了活动工期的不确定性、项目特征和项目经理的风险偏好.

在缓冲的监控管理方面, Herroelen等<sup>[33]</sup>提出在项目执行中, 活动工期的变化消耗了一部分缓冲量, 可能产生新的资源冲突导致关键链改变. Leach<sup>[34]</sup>指出缓冲监控的本质是基于3个区域的2个触发点(绿区和黄区、黄区和红区), 他指出应动态计算缓冲量的大小. 别黎<sup>[35]</sup>研究了项目进展中的动态缓冲监控, 定义动态的缓冲监控阈值来设置触发点并形成监控整个项目缓冲的两条监控触发线. 然而, 到目前为止, 动态地监控缓冲区的研究很少.

## 2.3 关键链方法的应用

关键链已不仅仅局限于初期阶段对方法的简单

应用层面,已开始向项目管理的更多分支领域延伸.同时,关键链方法也与其他理论方法结合使用.

### 1) 多项目环境下的关键链.

Thomas 等<sup>[36]</sup>认为关键链在多项目资源管理中更能促进项目系统的绩效. 马国丰等<sup>[37]</sup>分析了项目群中一种资源以及多种资源和多任务情形,提出了基于项目群的关键链调度模型并采用遗传算法求解. 李俊亭等<sup>[38]</sup>将多项目优先级转化为项目单位时间延迟损失的相对大小,提出了关键链多项目网络概念模型、数学模型、优化目标和调度算法. Kasahara 等<sup>[39]</sup>将关键链方法应用于 max-plus-linear system 中来控制未预料到的系统状态的变化,并提出一种解决在两个项目中的资源冲突方法. 多项目之间共享资源,多个项目作为一个整体的系统比单个项目更复杂,因此用关键链方法进行多项目调度优化管理将更困难. 目前,基于多项目的关键链管理方法还不完善.

### 2) 关键链与其他方法的结合.

Sonawane<sup>[40]</sup>整合系统动力学和关键链方法,开发了一个现代建筑项目管理系统,并应用于解决一个复杂建筑工程问题. Vonder 等<sup>[41]</sup>研究将缓冲分散置于活动之后和集中于链路之后两种方式下,在项目工期和调度方案稳定性之间的权衡. Rabbani 等<sup>[42]</sup>考虑活动工期服从已知的概率分布,整合关键链概念和基本 RCPSP 调度方法,构建以期望工期与其偏差乘积为目标函数的随机规划模型,并针对模型提出一种启发式求解算法. Luong 等<sup>[26]</sup>开发了一种资源约束和不确定环境下的模糊关键链方法. Bevilacqua 等<sup>[43]</sup>将关键链技术与风险管理相结合,应用于一个高风险工业维护项目的风险管理中. Morita<sup>[44]</sup>从有效地使用资源的角度,提出基于绿色化项目管理的关键链优化方法.

关键链中的缓冲机制可以在一定程度上吸收项目实施中由于不确定性造成的影响,因此,关键链方法多与不确定型项目管理和项目风险管理等结合使用.

## 3 关键链方法的不足

关键链方法自诞生以来一直存在争议<sup>[36]</sup>,到目前为止尽管关键链方法在理论和实践上都取了较大发展,但其方法体系仍不够成熟和完善. 已有一些学者指出,关键链中对人的行为假设过于单一,仅考虑到单一的工期目标等不足. 除此之外,本文总结出关键链在理论和实践方面还存在以下两点欠缺:

### 1) 输入缓冲不一定能吸收非关键活动的拖延.

已有关键链的文献中假设 FB 可以在一定程度上吸收非关键活动的拖延,但通过研究发现,FB 并不一定可以吸收所有非关键链上活动的小的拖延(时差

范围内),因为在调度计划中(不是网络图中),对于处在某条非关键链末端的活动而言,它的前面可能是关键活动,此时在网络结构图中,在同一条非关键链上,此末端活动之前的非关键活动的拖延不能被设置的 FB 吸收. 采用图 3 所示的 Aon 活动网络图加以说明,项目进行中仅需一种资源,其限量  $R = 6$ .

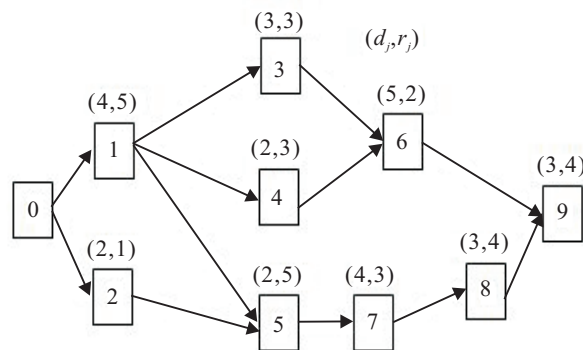


图 3 包含 9 个活动的 Aon 网络

假设根据某种优先规则,获得关键链对应的调度计划如图 4 所示.

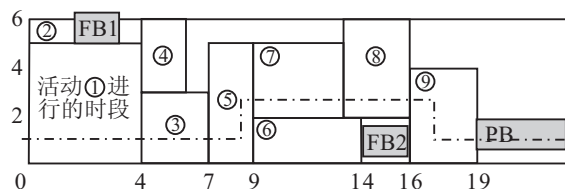


图 4 关键链对应的调度计划

从图 4 中可以看出,项目的关键链为活动  $0 \rightarrow ① \rightarrow ③ \rightarrow ⑤ \rightarrow ⑦ \rightarrow ⑧ \rightarrow ⑨ \rightarrow \text{PB}$ , 非关键链有 2 条, 分别为活动  $② \rightarrow \text{FB1}$ , 活动  $④ \rightarrow ⑥ \rightarrow \text{FB2}$ . 对于非关键  $④ \rightarrow ⑥ \rightarrow \text{FB2}$  而言, 活动 ⑥ 在一定范围内的拖延可以由 FB2 来吸收, 然而活动 ④ 与活动 ⑥ 尽管处于同一条非关键链上, 且活动 ④ 作为活动 ⑥ 在网络结构中的紧前活动, 但是活动 ④ 的拖延仅能被其自己的自由时差(优先关系和资源约束都可行)所吸收, 当拖延超过其自由时差时, 超出部分的拖延并不能直接由 FB2 来消化, 因为在调度计划中, 关键活动 ⑤ 作为活动 ④ 的紧后活动, ④ 的拖延直接导致活动 ⑤ 开始时间推后. 因此, 实际上缓冲 FB2 并未对本条非关键链上的活动 ④ 的拖延起作用. 究其原因, 在此调度计划中, 活动 ④ 与活动 ⑥ 之间存在关键活动 ⑤, 导致了活动 ④ 与缓冲 FB2 之间的孤立. 与 CPM 相比, 尽管 FB 可以看作一种基于网络路径的集中时差, 但由于存在活动之间的资源冲突, 这种设置在路径末端的集中时差, 并不能对路径中的所有活动的拖延起到保护作用. 因此认为 FB 可以吸收非关键活动的拖延这种观点, 仅是一种从网络图上获得的直觉, 在严格的调度计划中的正确性还值得深入探讨.



## 2) 忽略FB和PB之间在动态环境下的协作.

目前,对设置FB和PB的认识,还保持在缓冲可以吸收活动工期拖延的理想层次,尽管有几位学者已提出动态缓冲和缓冲修复的思想,但仍然停留在概念阶段.FB和PB作为不占用资源且具有柔性工期的活动插入到调度计划中,根据关键链的思想,基于活动网络图的链路结构,FB将吸收非关键活动的拖延,PB将吸收关键活动的拖延,然而这仅是计划和理想.一方面,FB的插入可能导致新的资源冲突.PB设置在关键链末端,不会引起资源冲突,但是FB需要占用时间,项目进展中导致资源冲突的可能性较大.如在图4中,当活动②的拖延时间超过其自由时差和FB1时,即活动②的结束时间超过④时,必然出现资源冲突,导致关键活动③的开始时间推后.另一方面,目前对FB和PB的设置仅停留在计划阶段的静态层次,并且FB和PB之间相互独立,但在项目实际进展中,这两类缓冲之间是相互影响的,且情形比较复杂.现区分两种情况说明:FB消耗殆尽和未消耗完.FB消耗殆尽后,后续未执行的非关键活动的拖延必将引起关键活动的拖延,从而会消蚀一部分PB,而这部分被消蚀掉的PB是由非关键活动拖延引起,即由FB的失效导致.即使缓冲未消耗完,但某个非关键活动的拖延已引起了资源冲突,导致其紧后开始的关键活动和非关键活动都晚开始,必将消耗PB,如果紧后的非关键活动与初始拖延的非关键活动不在同一条非关键链上,则还可能会消耗其他的FB.如在图4中,活动②的拖延影响到关键活动③和非关键活动④,这种拖延同时消蚀部分PB和FB2.因此在动态的实施环境中,多个FB之间、多个FB与唯一的PB之间都存在复杂的相互影响,如何让它们之间进行协作来获得动态的调度计划,已有的关键链方法中并未涉及.

## 4 进一步的研究趋势

关键链方法作为一种新的项目管理方式,在很多方面还有待改善和提升.梳理已有研究成果并分析现存的不足之后,从4个方面总结出关键链进一步的研究趋势.

### 1) 多目标优化的关键链.

项目管理中涉及到多个目标,工期仅仅是与时间进度最直接相关的目标.考虑项目调度中的其他目标,如费用、质量、资源均衡,收益等目标.借鉴多目标项目调度问题和多目标进化算法的思路,构建多个目标框架下的关键链规划模型,研究关键链的缓冲机制对不同目标的促进或消弱效果,获得在不同目标下的缓冲设置和管理策略.从多目标角度拓展关键链是项目管理中需要解决的实际问题.

### 2) 动态关键链规划模型.

应建立动态的关键链规模模型,改变总关注缓冲大小计算的静态和微观视角,从完成项目全局目标的角度,研究关键链在动态环境下的整体效果,其中涉及如何解决插入FB导致的资源冲突问题、关键链的转移再识别、缓冲区的动态调整和更新、采用活动的多种概率压缩工期、动态多阶段关键链调度模型的求解等问题.关键链技术在动态不确定环境下的适用性将是下一步值得关注的研究方向.

### 3) 关键链与鲁棒性的结合.

关键链的缓冲机制体现了获得的调度计划具有一定的适应动态环境的能力,是一种鲁棒性的项目调度方法.进一步的研究应将关键链与鲁棒优化调度思想相结合,寻求不同的缓冲区尺寸和鲁棒性指标之间的协同效应,并在关键链技术中同时考虑项目绩效目标和鲁棒性目标.加强不确定性理论在关键链技术中的应用,从动态规划和随机规划角度提升关键链作为一种不确定型项目调度方法的理论层次.考虑将关键链技术与多项目环境下的鲁棒性优化调度研究方法相结合,应是颇具前景的研究方向<sup>[45]</sup>.

### 4) 关键链与其他理论的融合.

关键链中考虑到了人的惰性行为特征,并通过构建优化模型来获得工期最短的调度方案,因此关键链理论中涉及到行为运筹的研究范畴;同时,采用缓冲预警机制来控制项目进度,不同的项目经理对待风险的态度有差别,因此对动态缓冲的反应和调整策略取决于项目经理的风险偏好水平,导致会有应对同样情形的不同决策行为.另外,设置缓冲是为了消除项目执行中的不确定性因素,如何建模随机因素对调度方案的影响是动态关键链模型需要解决的关键问题.因此,关键链实际上是多学科交叉的研究领域.下一步,将行为运筹学、风险管理、不确定性理论等与关键链方法进行融合将成为关键链理论最值得关注的发展方向.

## 5 结 论

与传统的项目管理方法相比,关键链从资源约束和活动工期的不确定性方面进行了拓展,为项目进度管理提供了一种新思路,在众多企业中的成功应用也证实了该方法的实用价值.本文结合国内外相关文献,对关键链与已有项目调度方法的区别和联系进行分析;从关键链调度模型、缓冲机制、关键链的应用3个方面对关键链的研究成果进行梳理,在此基础上从两个方面客观评述关键链方法的不足;最后,从多目标优化、动态关键链规划模型、关键链与鲁棒性结合、关键链与其他理论的融合等4个方面指出关键链方法将来的研究趋势.本文的工作期望对从事关键链理论研究的学者和项目管理实践者起到抛砖引玉

的作用,为进一步发展和提升关键链理论方法提供拓展思路.

### 参考文献(References)

- [1] Demeulemeester E, Herroelen W. Introduction to the special issue: Project scheduling under uncertainty[J]. *J of Scheduling*, 2007, 10(3): 151-152.
- [2] Goldratt E M. *Critical chain*[M]. Great Barrington: The North River Press Publishing Corporation, 1997.
- [3] Steyn H. Project management applications of the theory of constraints beyond critical chain scheduling[J]. *Int J of Project Management*, 2002, 20(1): 75-78.
- [4] 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, 24(2): 54-59.  
(Xu Z, Wang L L. Review of a technology based on critical chain for project scheduling[J]. *J of Beijing University Aeronautics and Astronautics: Social Science Edition*, 2011, 24(2): 54-59.)
- [5] Watson K J, Blackstone J H, Gardiner S C. The evolution of a management philosophy: The theory of constraints[J]. *J of Operations Management*, 2007, 25(2): 387-402.
- [6] 张敏. 项目进度管理中的行为不确定性及其控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学管理学院, 2011: 5-7.  
(Zhang M. Research on the behavior uncertainty in project progress management and its control policies[D]. Wuhan: School of Management, Huazhong University of Science and Technology, 2011: 5-7.)
- [7] Zhang Z, Guo B, Chen G, et al. The review of project management based on the theory of constraints and critical chain[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 174-177: 3424-3430.
- [8] Ahlemann F, Arbi E F, Kaiser G M, et al. A process framework for theoretically grounded prescriptive research in the project management field[J]. *Int J of Project Management*, 2013, 31(1): 43-56.
- [9] 张静文, 胡信步, 王茉莉. 关键链项目计划调度方法研究[J]. *科技管理研究*, 2008, 28(3): 280-283.  
(Zhang J W, Hu X B, Wang M Q. Research on critical chain as a project scheduling method[J]. *Science and Technology Management Research*, 2008, 28(3): 280-283.)
- [10] Herroelen W S, Leus R. On the merits and pitfalls of critical chain scheduling[J]. *J of Operations Management*, 2001, 19(5): 559-577.
- [11] Wei C C, Liu P H, Tsai Y C. Resource-constrained project management using enhanced theory of constraint[J]. *Int J of Project Management*, 2002, 20(7): 561-567.
- [12] Elmaghraby S E, Herroelen W, Leus R. Resource-constrained project management using enhanced theory of constraint[J]. *Int J of Project Management*, 2003, 21(4): 301-305.
- [13] 莫巨华. 基于关键链的项目调度模型与算法[D]. 沈阳: 东北大学信息科学与工程学院, 2005: 16-34.  
(Mo J H. Critical chain based models and algorithms for project scheduling[D]. Shenyang: College of Information Science and Engineering, Northeastern University, 2005: 16-34.)
- [14] 马国丰, 尤建新, 杜学美. 识别关键冲突任务的定量分析[J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(4): 668-671.  
(Ma G F, You J X, Du X M. Quantitative analysis of identifying critical conflict tasks[J]. *J of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(4): 668-671.)
- [15] 李俊亭, 王润孝, 杨云涛. 双约束下关键链项目网络计划技术研究[J]. *工业工程与管理*, 2010, 15(3): 71-75.  
(Li J T, Wang R X, Yang Y T. A study on critical chain project network scheduling technology under double constraints[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2010, 15(3): 71-75.)
- [16] 刘士新, 宋健海, 唐加福. 基于关键链的资源受限项目调度新方法[J]. *自动化学报*, 2006, 32(1): 60-66.  
(Liu S X, Song J H, Tang J F. Critical chain based approach for resource-constrained project scheduling[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32(1): 60-66.)
- [17] Tukul O I, Rom W O, Eksioğlu S D. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 172 (2): 401-416.
- [18] 管在林, 马力, 何敏, 等. 基于贡献度的项目调度方法研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(12): 2431-2435.  
(Guan Z L, Ma L, He M, et al. Project scheduling method based on the contribution index[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(12): 2431-2435.)
- [19] 田文迪, 崔南方. 关键链项目管理中关键链和非关键链的识别[J]. *工业工程与管理*, 2009, 14(2): 88-93.  
(Tian W D, Cui N F. Identifying the critical chain and non-critical chain in the critical chain project management[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2009, 14(2): 88-93.)
- [20] Truc N T N, Toto H, Takahashi H, et al. Critical chain project management based on a max-plus linear representation for determining time buffers in multiple projects[J]. *J of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 2012, 6(5): 715-727.
- [21] Peng W L, Jiao Q J. A critical chain project scheduling problem with multi-mode [J]. *Materials Science Forum Advances*, 2012, 697-698: 541-545.
- [22] Herroelen W, Lues R. Project scheduling under uncertainty: survey and research potentials[J]. *European J of Operational Research*, 2005, 165(2): 289-306.

- [23] Newbold R C. Project management in the fast lane-applying the theory of constraints[M]. BocaRaton: The StLucie Press, 1998: 91-93.
- [24] 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, 14(5): 1029-1035.  
(Chu C C. Buffer sizing and critical chain project management[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(5): 1029-1035.)
- [25] 刘士新, 宋健海, 唐加福. 资源受限项目调度中缓冲区的设定方法[J]. 系统工程学报, 2006, 21(4): 381-386.  
(Liu S X, Song J H, Tang J F. Approach for setting time buffers in resources-constrained project scheduling[J]. J of Systems Engineering, 2006, 21(4): 381-386.)
- [26] 施赛, 王雅婷, 龚婷. 项目缓冲设置方法及其评价指标改进[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(8): 1739-1746.  
(Shi S, Wang Y T, Gong T. An improved approach for project buffer sizing and evaluation[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(8): 1739-1746.)
- [27] Luong D L, Ario O. Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty[J]. Int J of Project Management, 2008, 26(6): 688-698.
- [28] 杨立熙, 李世其, 黄夏宝, 等. 属性相关的关键链计划缓冲设置方法[J]. 工业工程与管理, 2009, 14(1): 11-14.  
(Yang L X, Li S Q, Huang X B, et al. A buffer sizing approach in critical chain scheduling with attributes dependent[J]. Industrial Engineering and Management, 2009, 14(1): 11-14.)
- [29] Fallh M, Ashtiani B, Aryanezhad M B. Critical chain project scheduling: Utilizing uncertainty for buffer size[J]. Int J of Research and Review in Applied Science, 2010, 3(3): 280-289.
- [30] Bie L, Cui N, Zhang X. Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in chain scheduling[J]. Int J of Production Research, 2012, 50(24): 7343-7356.
- [31] Liu D, Chen J, Peng W. A new buffer setting method based on activity attributes in construction engineering[J]. Advanced Building Materials and Sustainable Architecture, 2012, 174-177(1): 3274-3281.
- [32] Ma G, Li L, Chen Z. Research on the buffer sizing approach in critical chain scheduling in perspective of flexible management[C]. Business, Economics, Financial Science and Management: Advances in Intelligent and Soft Computing. Nanchang: Springer, 2012, 143: 61-68.
- [33] Herroelen W, Leus R, Demeulemeester E. Critical chain project scheduling: Don't oversimplify[J]. Project Management J, 2002, 33(4): 48-60.
- [34] Leach L P. Critical chain project management[M]. 2nd ed. Artech House, 2005: 52-70.
- [35] 别黎. 关键链项目管理中的缓冲估计与监控方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学管理学院, 2012: 51-82.  
(Bie L. Study on methods of buffer estimating and monitoring in critical chain project management[D]. Wuhan: School of Management, Huazhong University of Science and Technology, 2012: 51-82.)
- [36] Thomas G L, Boaz R, Eward A S. Critical chain: A new project management paradigm or old wine in new bottles?[J]. Engineering Management J, 2005, 17(4): 45-58.
- [37] 马国丰, 尤建新. 关键链项目群进度管理的定量分析[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(9): 54-60.  
(Ma G F, You J X. Quantitative analysis of critical chain multiple project scheduling management[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007, 27(9): 54-60.)
- [38] 李俊亭, 王润孝, 杨云涛. 关键链多项目整体进度优化[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(8): 1772-1779.  
(Li J T, Wang R X, Yang Y T. Integration scheduling optimization for critical chain multi-project[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(8): 1772-1779.)
- [39] Kasahare M, Takahashi H, Goto H. Resolution of resource conflict between the different two projects in MPL-CCPM representation[J]. WSEAS Trans on Information Science and Applications, 2010, 7(6): 774-783.
- [40] Sonawane R. Applying system dynamics and critical chain methods to develop a modern construction project management system[D]. Texas: Texas A&M University-Kingsville, 2005: 14-23.
- [41] Vonder S V, Demeulemeester E, Herroelen W, et al. The use of buffers in project management: The trade-off between stability and makespan[J]. Int J of Production Economics, 2005, 97(2): 227-240.
- [42] Rabbani M, FatemiGhomi S M T, Jolai F, et al. A new heuristic for resource-constrained project scheduling in stochastic networks using critical chain concept[J]. European J of Operational Research, 2007, 176(2): 794-808.
- [43] Bevilacqua M, Ciarapica F E, Giacchetta G. Critical chain and risk analysis applied to high-risk industry maintenance: A case study[J]. Int J of Project Management, 2009, 27(4): 419-432.
- [44] Morita D, Suwa H. An optimization method for critical chain scheduling toward project greenality[J]. Int J of Automation Technology, 2012, 6(3): 331-337.
- [45] 王勇胜, 梁昌勇, 姜利赢. 约束理论与关键链研究评述[J]. 项目管理技术, 2010, 8(3): 17-22.  
(Wang Y S, Liang C Y, Jiang L Y. Research review on the theory of constraints and the critical chain[J]. Project Management Technology, 2010, 8(3): 17-22.)