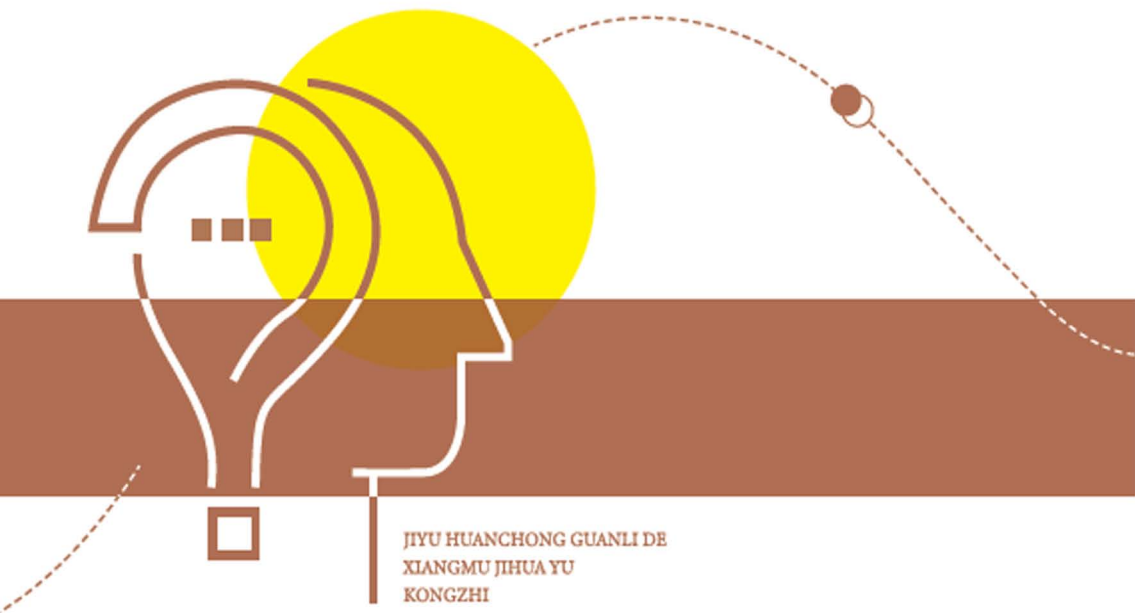
基于缓冲管理的项目计划与控制

胡雪君　王建江　单汨源　著

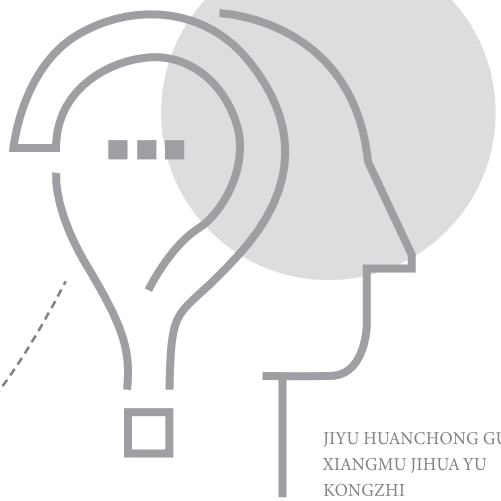


JIYU HUANCHONG GUANLI DE
XIANGMU JIHUA YU
KONGZHI

湖南大学出版社
HUNAN UNIVERSITY PRESS

基于缓冲管理的项目计划与控制

胡雪君　王建江　单汨源　著



JIYU HUANCHONG GUANLI DE
XIANGMU JIHUA YU
KONGZHI

湖南大学出版社
HUNAN UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书对基于缓冲的项目进度计划与控制方法展开系统深入的研究。首先，详细阐述了关键链缓冲管理方法的主要思想，对最新研究成果进行了综述分析；其次，提出考虑活动工期风险和多资源约束风险的缓冲大小计算方法，构建抗干扰能力强的关键链调度计划；接着，提出基于统计过程控制的两阶段缓冲监控方法，分别考虑活动敏感性、赶工成本和紧急资源分配策略，设计了基于缓冲监控的项目进度控制方法。通过项目实例与模拟实验，本书对以上方法的有效性进行了验证，并展望了关键链缓冲管理未来的一些应用前景和发展方向。

图书在版编目（CIP）数据

基于缓冲管理的项目计划与控制／胡雪君，王建江，单汨源著. —长沙：湖南大学出版社，2020.3

ISBN 978-7-5667-1820-4

Ⅰ.①基… Ⅱ.①胡… ②王… ③单… Ⅲ.①工程项目管理 Ⅳ.①F284

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第265927号

基于缓冲管理的项目计划与控制

JIYU HUANCHONG GUANLI DE XIANGMU JIHUA YU KONGZHI

著　　者：胡雪君　王建江　单汨源

责任编辑：刘湘琦　　**责任校对**：冯　英

印　　装：虎彩印艺股份有限公司

开　　本：710mm×1000mm　16开　　**印张**：10.5　**字数**：110千

版　　次：2020年3月第1版　　**印次**：2020年3月第1次印刷

书　　号：ISBN 978-7-5667-1820-4

定　　价：36.00元

出 版 人：李文邦

出版发行：湖南大学出版社

社　　址：湖南·长沙·岳麓山　　**邮编**：410082

电　　话：0731-88822559（发行部），88821327（编辑室），88821006（出版部）

传　　真：0731-88649312（发行部），88822264（总编室）

网　　址：http：//www.hnupress.com

电子邮箱：395405867@qq.com

版权所有，盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错，请与发行部联系

前　言

当前市场环境快速变化且竞争愈发激烈，项目所面临的风险和不确定性不断增加，同时项目本身的结构日趋复杂，对稀缺资源的竞争逐渐加剧，导致越来越多的项目难以按期完工。而进度延误又会进一步导致项目预算超支、资金回收困难、投资人利益受损和最高管理层改组等其他不利影响。因此，在项目面临各种不确定性因素的复杂环境下，如何高效地做好项目计划与控制工作是项目管理者和从业人员面临的重大挑战。

传统的项目管理方法比如关键链路径法（critical path method，CPM）、计划评审技术（program evaluation and review method，PERI）等，由于没有考虑项目资源约束的情况，在资源短缺和不确定性较大的项目环境中实施效果较差。关键链缓冲管理（critical chain scheduling and buffer management，CC/BM）方法应运而生，迅速成为项目管理领域理论研究的热点，同时在实践中比如生产、制造及服务等行业得到了广泛应用。缓冲是 CC/BM 的重要概念，缓冲的大小估计和监控方法，直接决定着项目计划完工期及项目进度风险，是 CC/BM 方法应用成功的关键。

近些年来，在关键链的识别和缓冲大小的计算方面，已经取得了大量研究成果，但目前学术界关于如何有效进行缓冲监控的文献并不多，特别是缺乏相关的定量分析与研究。依托国家自然科学基金、湖南省自然科学基金等项目，作者所在的课题组围绕关键链缓冲管理问题深入开展研究，研究成果发表在 *European Journal of Operational Research*，*International Journal of Production Research*，*Flexible Services and Manufacturing Journal*，《系统工程学报》《运筹与管理》《控制与决策》等管理学科国内外高水平学术期刊上，得到了国内外同行的高度认可和评价。本书融合了课题组的代表性研究成果，介绍了基于缓冲管理的项目计划和控制方法，为不确定条件下的项目管理提供了新思路。

全书由 9 章构成，内容上可分为五篇，每一篇自成体系。第一篇为问题概述，主要内容包括：第 1 章从现实问题和理论研究的角度阐述本书的研究背景和研究意义，并对关键链缓冲管理基础理论进行了介绍；第 2 章对缓冲管理国内外研究现状进行了综述分析。第二篇介绍基于缓冲管理的项目计划方法，主要内容为第 3 章，提出一种综合考虑活动工期风险和多资源约束风险的缓冲大小计算方法。第三篇聚焦于动态缓冲监控阈值设置方法，主要内容包括：第 4 章介绍了基于统计过程控制的缓冲阈值设置方法，第 5 章提出基于活动敏感度指标的综合监控阈值设置方法。第四篇聚焦于带有纠偏行动的项目进度-成本控制方法，主要内容包括：第 6 章提出考虑赶工以及赶工成本优化的行动策略；第 7 章考虑资源成本和进度稳定性提出了新的两阶段进度-成本控制方法；第 8 章综合分析在关键链识别中应用不同的优先级指标、插入不同的缓冲尺寸以及采取不同的响应策略，对项目鲁棒性能的交互影响。第五篇为研究展望，主要内容为第 9 章，探讨了关键链缓冲管理领域未来的一些新的研究方向。

本书撰写的分工是：第 1~6 章由胡雪君执笔，第 7~8 章由王建江执笔，第 9 章由单汨源执笔。全书在作者相互审阅和修改的基础上，由胡雪君统稿，由单汨源定稿。此外，课题组何文、周科等参与了部分章节内容的撰写和全书的整理校对工作，在此一并向他们表示感谢。衷心感谢湖南大学工商管理学院马超群教授、雷辉教授、周忠宝教授、杨智教授等，他们悉心的指导和有益的建议使得本书得以一步步完善。感谢湖南大学出版社的大力支持，感谢参与研究的课题组全体博士生和硕士生。本书的研究工作得到了国家自然科学基金（71701067，71801218）、湖南省自然科学基金（2019JJ50039）、国防科技大学科研计划（ZK18-03-16）等项目的资助，在此深表感谢。

由于作者水平有限，本书许多内容还有待完善和深入研究，不足之处诚望读者批评指正。

胡雪君

2019 年 10 月

目　次

第 1 章　绪　论 …… 1

1.1　缓冲管理研究的背景和意义 …… 1

1.2　关键链缓冲管理理论基础 …… 5

第 2 章　关键链缓冲管理研究概述 …… 18

2.1　关键链调度与识别研究现状 …… 18

2.2　缓冲大小设置研究现状 …… 20

2.3　缓冲监控研究现状 …… 23

2.4　其他拓展研究 …… 25

第 3 章　基于风险的缓冲大小计算方法 …… 29

3.1　缓冲区大小影响因素度量方法 …… 30

3.2　基于两类风险的缓冲区大小计算方法 …… 35

3.3　算例分析 …… 38

第 4 章　基于统计过程控制的缓冲监控方法 …… 47

4.1　构建统计缓冲控制图 …… 49

4.2　项目执行与缓冲监控 …… 55

4.3　模拟实验 …… 58

第 5 章　基于活动敏感度的缓冲监控方法 …… 65

5.1　活动敏感度指标监控系统 …… 67

5.2　缓冲与 CRI 监控指标的集成 …… 71

5.3　实验分析 …… 75

第 6 章　考虑赶工成本的进度控制方法 …… 88

6.1　建立数学优化模型 …… 89

6.2　基于模拟的启发式方法 …… 91

6.3　模拟实验 …… 96

第 7 章　考虑紧急资源分配的进度-成本控制方法 …… 100

7.1　两类成本目标 …… 101

7.2　考虑紧急资源分配的控制策略 …… 105

7.3　模拟实验 …… 119

第 8 章　关键链排序与缓冲管理的交互影响研究 …… 129

8.1　关键链识别的优先级指标 …… 130

8.2　三类响应策略 …… 132

8.3　交互影响实验分析 …… 136

第 9 章　研究展望 …… 145

参考文献 …… 148

第1章　绪　论

1.1　缓冲管理研究的背景和意义

当今社会，越来越多的管理活动呈现出项目的特点，不论是在建筑工程、生产制造还是服务领域，许多活动都是按照项目形式进行的。这种泛项目化的发展趋势正逐渐改变着各种组织的管理方式，乃至于人们的观念，使得项目管理成为各行各业的热门话题[1]。美国项目管理协会（Project Management Institute，PMI）将项目的概念归纳为：在一定的时间、预算、资源以及客户要求的性能、规格等限制下，为创造独特的产品、服务或结果而进行的一次性努力[2]。项目管理则是指把知识、技能、工具和技术应用于项目各项活动之中，以实现或超过项目干系人对项目的要求和期望。从20世纪70年代开始，项目管理作为管理科学的重要分支，为项目的实施提供了一种有力的组织形式，改善了利用各种资源的计划、组织、执行和控制的方法，从而引起了广泛的重视，

并对管理实践做出了重要的贡献。

随着项目规模的扩大和专业化分工的愈加精细，项目管理过程中的计划和控制工作日益复杂，对于项目的质量、成本、工期等方面的要求也越来越高，项目的科学化管理已经成为决定项目生命力的关键。目前，项目管理技术已经日趋成熟，对项目管理中的资源优化技术已经有了较为深入的研究，各种项目管理软件也为项目管理提供了更可靠的分析工具[3]。即便如此，实践中要保证项目成功——“在预算费用之内按照规范准时交付”——仍然非常困难。美国 Standish Group 在 2016 年针对全球 IT 项目的 CHAOS 统计报告指出，19%的项目因在执行中出现严重问题而彻底失败，52%的项目在执行中发生局部失败（虽然完成但存在费用超支、延期、范围不符等问题），报告进一步指出其中出现延期项目的平均超期程度高达 222%。研究表明，未能采取有效的计划和控制方法以应对和弥补项目执行过程中的高不确定性及高风险，是导致项目最终失败的重要原因[4]。

传统的网络计划技术如关键路径法（critical path method，CPM）和计划评审技术（program evaluation and review method，PERT），提出较早且在项目管理实践中得到成功应用，但是其关于活动时间估计及分布的假设、活动安全时间的分散使用、没有考虑资源约束、忽视项目实施过程中组织和人的行为因素的影响等方面，一直受到人们的质疑。过去几十年中，资源受限项目调度问题（resource-constrained project scheduling problem，RCPSP）是项目管理理论研究的核心内容之一，致力于在确定的活动时间下考虑资源约束建立工期最短的项目

基准计划[5]，但是这类研究大多只局限在项目计划阶段，很少考虑到项目执行过程中的复杂性和各种不确性因素，难以应对现代项目面临的高要求及多变的执行环境[6]。

针对项目管理面临的种种问题，一种考虑项目资源约束和决策者行为特征的项目管理方法——关键链缓冲管理（critical chain scheduling and buffer management，CC/BM）方法，日益引起了国内外众多学者和实践者的广泛关注。该方法是以色列科学家 Goldratt 将约束理论（theory of constraints，TOC）由生产领域向项目管理领域拓展运用的结果[7]，被认为是继 CPM/PERT 方法之后项目管理领域最重要的进展之一[8]。CC/BM 是一个包含计划、执行和控制的完整项目管理理论，可较好地降低项目受不确定因素影响的程度，有效缩短项目工期，提高项目绩效。CC/BM 的主要思想是：用同时考虑项目紧前约束和资源约束的关键链来代替传统的关键路径，按活动最晚开始时间制订项目基准调度计划；充分考虑人的行为因素，将各个任务中的安全时间抽取出来作为缓冲放置在项目网络的适当位置进行集中管理，以吸收不确定性并聚合风险，保持项目基准计划的稳定；在执行和控制阶段建立基于缓冲消耗的预警和行动机制，以保证整个项目而非个别活动的如期完成[9]。

缓冲是 CC/BM 的重要概念，缓冲的大小设置和监控方法，直接决定着项目计划完工期及项目进度风险，成为 CC/BM 最核心的内容之一，对于确保项目按时完工和提高项目管理绩效都至关重要。然而，现有的缓冲大小计算方法通常假设项目活动时间相互独立，所有活动的安全时间比例一样，

从风险角度看这种假设是不合理的，没有考虑到活动之间因风险因素影响而形成的区别与联系。此外，缓冲监控是一种基于项目的进度控制方法，能够从全局角度衡量项目整体进度绩效并提供决策依据，但是忽视了项目内部的活动结构、活动重要性以及赶工成本、资源成本等信息，也没有充分考虑项目动态执行的特点，会产生不准确甚至错误的预警信号，导致采取无效的管理行动。

基于以上现实和理论需求，本书基于 CC/BM 中的缓冲管理对项目进度和成本进行综合计划与控制。针对现代项目本身和执行环境越来越高的复杂性和不确定性，以及以往项目管理方法在应对这些挑战时表现的不足，通过设置合适的缓冲尺寸并运用缓冲监控系统去改善项目绩效，为不确定条件下项目计划和控制提供新思路和新方法。

本书的研究对于指导企业解决实际中所遇到的项目计划与控制问题，具有重要的现实意义。本书方法的成功应用，能够消解项目间的资源冲突，有效规避项目成员的“学生综合症”和“帕金森定律”等不良工作行为，应对各类风险和不确定因素的影响，进而缩短项目工期，控制项目成本，提高项目的按时完工率，增强企业服务水平及客户满意度，最终提高企业的经济效益。本研究成果将有广泛的应用前景，尤其适用于不确定性较大、风险较高、资源依赖性较强的项目环境，比如基础设施建设、软件开发、新产品研发、服务集成和运营维护等，这类项目通常要求周期更短、准时完工率更高，运用基于缓冲管理的项目计划与控制方法有望取得卓越的项目绩效。

1.2　关键链缓冲管理理论基础

1.2.1　关键链的内涵

传统的关键路径法只考虑项目活动之间的逻辑依赖关系，关键路径是决定项目工期最长的任务路径，其上所有活动的总时差为零。而关键链是在考虑时间及资源冲突两方面的情况下得到的关键路径，即项目中同时考虑活动紧前关系和资源相依关系后最长的一条链。关键链决定着项目最终工期，是项目系统的约束，相关资源以及其他活动都要依据关键链来调度。因此 CC/BM 理论较之关链路径法从更加系统的角度去思考问题，也更加贴近于实际情况，它是对关键路径理论的一种发展[10]。

为了下文叙述方便，首先对相关参数进行定义。采用节点式网络 $G=(N, A)$ 表示一个项目，其中 $N=\{0, 1, 2, \cdots, n, n+1\}$ 代表项目活动（或称工序/任务）节点，序号 0 和 $n+1$ 分别表示虚拟首活动和虚拟尾活动（既不消耗时间也不消耗资源），A 代表活动之间的结束-开始型优先关系集合。项目有 n 个实际活动，活动 i 的计划工期为 d_i^B。项目有 K 种可更新资源，所谓可更新资源是指在每个时间段资源的供应量是有限的，但资源并不随着项目的进展而消耗。$R_k(k=1, 2, \cdots, K)$ 代表资源的供给量，r_{ik} 表示活动 i 对第 k 种可更新资源的需求量。

图 1.1 给出了一个项目网络图示例。该项目包含 12 个实体活动，用到 3 种可更新资源，资源可用量分别为 2，1，2 个单位。

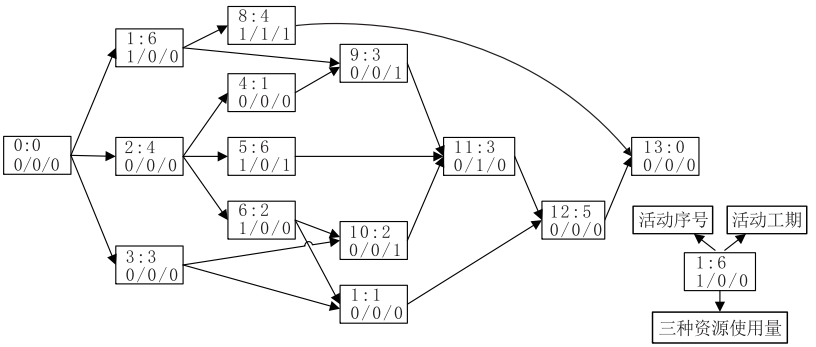


图 1.1　项目网络图示例

本书采用以下步骤查找关键链和非关键链[11]。

第一步：生成逻辑和资源可行的项目初始调度计划。采用分支定界精确求解算法[12]，得到图 1.2 所示工期最短的 RCPSP 调度计划，其中活动 i 的开始时间表示为 S_i。

第二步：在第一步生成的调度计划基础上，保持项目的总调度工期不变，在满足资源约束和紧前关系的条件下，逐步向右移动那些可以后移的活动，直到所有活动都不能移动为止，生成新的项目调度计划，如图 1.3 所示。

第三步：输出向右移动后的调度计划中各个项目活动的最终开始时间 LS_i。计算活动 i 的总时差（total slack），$\Delta_i = LS_i - S_i$。那些不能移动的活动（$\Delta_i = 0$）说明属于关键链，而那些可以移动的活动（$\Delta_i \neq 0$）则说明不属于关键链。

第四步：输出关键链。

（1）所有不能够后移的项目活动为关键链活动，但可能有多条关键链。本例中关键链活动为 1，9，10，11，12，显

然首活动 0 和尾活动 $n+1$，都处在每条关键链上。

（2）从首活动开始将属于关键链上的活动按照紧前关系和时间（前一活动结束时间等于下一活动的开始时间）排序，直到尾活动结束，则会形成一条关键链。

（3）如此循环，直到属于关键链上的所有活动都找到自己所属的关键链。

（4）输出关键链的条数和各条关键链上的活动。

（5）当有多条关键链时，为了在项目调度过程中不受影响，按照 TOC 的思想须从中选取一条关键链，其他关键链可看作非关键链。将关键链上的活动按照关键链的顺序建立紧前关系，以保证关键链的完整性。本例中只得到一条关键链，为 0-1-9-10-11-12-13。

第五步：查找非关键链。从前向后，从第一个非关键链上的活动开始，搜查下一个具有紧后关系且不处于关键链上的活动，直到遇到关键链上的与其具有紧后关系的活动为止，形成一条非关键链，如此循环，直到所有的非关键链上活动都能属于某一条非关键链。本例中得到 5 条非关键链，分别为 2-4，3（6），5，7，8。

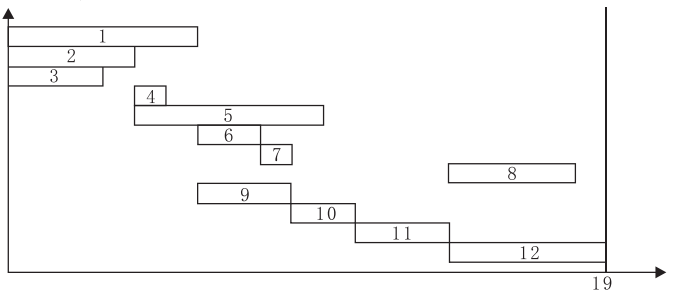


图 1.2　分支定界法得到的最短工期计划

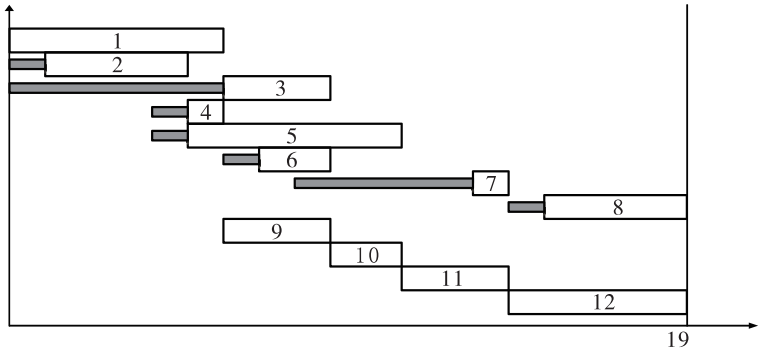
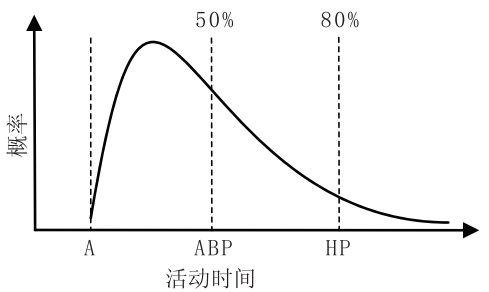


图 1.3　后移之后的项目调度计划

1.2.2　缓冲机理

任何项目的进度计划都要求知道每项活动或任务的时间。由于项目中活动时间有着高度的不确定性，我们无法给出准确的活动时间，活动的时间只能是估计的。TOC 指出，任何在 50%以上概率可以完成任务的估计都包括了安全时间，而活动时间一般呈现偏态分布，如图 1.4 所示。



(注: A-Aggressive; ABP-Aggressive But Possible; HP-Highly Possible)

图 1.4　活动时间偏态分布

一般项目人员认为，各个作业准时完成是整个项目准时完工的前提。为了保证各个作业准时完成，人们在估计时间时都给自己留有了足够的安全时间，即对于活动时间的估计多是在HP以后，通常会估计一个有90%的把握完成的时间。但是人们的行为中由于“学生综合症”“帕金森定律”（工作总是拖延到它所能够允许最迟完成的那一天）、“多任务”等情形，所以如果人们感到时间充足，不到最后关头不会开始行动，即使提早完成了也不会报告，否则可能会有新的任务派过来。这样就会导致资源和时间的浪费，从而导致工期延误和成本增加[10]。

对此，Goldratt提出了“缓冲”（buffer）的概念，用缓冲代替安全时间来吸收项目中存在的不确定因素。CC/BM在考虑资源约束的基础上，加入了三种缓冲区：项目缓冲（project buffer，PB）、接驳缓冲（feeding buffer，FB）和资源缓冲（resource buffer，RB）。项目缓冲位于关键链末尾，用来保证整个项目按时完成；接驳缓冲设置在非关键链与关键链交汇处，用于保护非关键链按时完成；而资源缓冲是一种资源预警机制，通过这种预警机制来保护关键链上的资源供应。

Goldratt提出剪切法（cut and paste method，C&PM）（又称50%法）来确定缓冲大小。假设项目人员原先给出的活动时间是一个以90%概率可以完成的时间，那么则以50%完工概率对应的时间作为活动的计划时间 d_i^B。将工序被剪掉的安全时间总和的一半，作为相对应链路的缓冲，图1.5和图1.6分别显示了项目缓冲和接驳缓冲的插入过程。

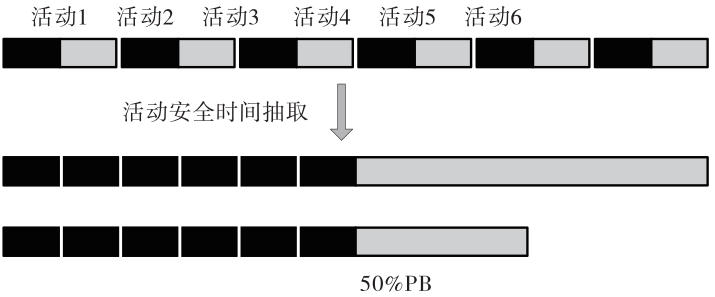


图 1.5　插入项目缓冲



图 1.6　插入接驳缓冲

在资源受限的情况下，在右移之后的项目调度计划中插入接驳缓冲可能重新产生资源冲突，这样会使得缓冲失去预警保护作用，因此，众多学者认为插入缓冲后须对原有计划进行调整。本书采用动态规划算法进行重排[13]，以消除出现的活动和资源冲突，具体步骤如下。

将重排过程视作一个多阶段的动态决策问题。从项目完工时刻开始往前推，即从初始时刻 $t_0 = T$ 处查找正在进行的活动集，先检查该活动集是否存在工序冲突，当发现冲突时将前序活动前移，而后检查剩余活动集是否存在资源冲突，发现冲突时将部分使用该资源的活动前移，并更新前移活动的开始时间。当该时刻点的冲突解决后，推进至前一个时间点 $t_1 = t_0 - 1$ 处再次检查并排除冲突，如此循环，直至前推至第一个项目活动则算法结束。