

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.01.015

基于关键链的发电设计项目进度优化

黄明亮

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 发电工程设计企业主要基于关键路径法编制进度计划, 基于赢得值原理进行进度控制, 这种方法在设计企业资源充足的情况下, 有效地优化了进度计划, 进度控制取得了很好的效果。但随着市场环境的变化, 原先的管理模式已不能满足现实需求。本文以案例研究的方式对基于关键链的发电设计项目进度优化进行了研究。在单一项目管理时, 考虑了人们行为效应, 将传统工期估计中的安全时间汇聚为缓冲, 在不改变计划总工期的情况下, 仍然提高了按时完成的概率。在多项目管理时, 采用基于层次分析法的模糊综合评价处理多项目优先级问题, 统筹分配能力约束资源, 使企业内所有项目的进度计划得到总体的优化。

关键词: 进度管理; 关键链; 三等分剪切法; 多项目管理; 优先级

中图分类号: F284

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)01-0070-06

Optimization of Scheduling in Power Generation Engineering Projects Based on Critical Chain

HUANG Mingliang

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Engineering enterprises in China mainly develop project schedule based on the Critical Path Method (CPM), and control the schedule based on the Earned Value Concept (EVC). This Method is effective without resource limit, but the old project management mode cannot meet the market and the needs of the development of the enterprise any more. This paper mainly research time management of power generation engineering projects based on Critical Chain with case study. On single project management, considering the effect of human behavior, the trisection shear method is adopted to estimate the construction period and set up the buffer. The safety time of estimating with the traditional method is summed up to a buffer, which increases the probability of finish on time without reducing the total duration. On multi-project management, this paper uses the fuzzy comprehensive evaluation based on analytic hierarchy process to deal with priority levels. Then it allocates constraint resources of capacity as a whole, which optimizes all the project schedules in the same enterprise.

Key words: time management; critical chain; trisection cut-paste method; multi-project management; priority levels

国内领先的发电工程设计企业当前主要基于关键路径法(Critical Path Method, 简称CPM)编制和优化进度计划, 基于赢得值原理(Earned Value Concept, 简称EVC)进行进度控制。这种方法在资源充足的条件下, 可有效地开展进度优化, 并在进度控制中取得良好的效果。但随着国内经

济进入“新常态”, 发电设备利用小时数持续下降, 发电建设规模逐渐萎缩, 电力设计市场竞争愈演愈烈, 一方面设计收费总体呈下降趋势, 业主对定制化服务的需求在不断提升, 如果要保持以往的经营业绩, 必须提高资源效率; 另一方面在国内市场萎缩的背景下, 设计企业“走出去”的步伐开始加快, 国外的设计标准、习惯和文化差异使本已紧张的人力资源捉襟见肘, 原先以充足的资源为假设条件的进度管理模式已不能满足客观需求, 亟需引进资源约束条件下的进度优化和管理方法。

收稿日期: 2015-01-01

作者简介: 黄明亮(1984), 男, 湖北阳新人, 一级注册建造师, 硕士, 主要从事核电、火电等发电工程建设项目管理工(e-mail) hml1073@mail.com。

关键链项目管理方法 (Critical Chain Project Management, 简称 CCPM) 给工程设计企业带来了新的选择。关键链项目管理方法从系统整体优化出发, 既考虑项目任务之间的时序关系, 也考虑资源约束, 并把人们的工作习惯也纳入到管理工作当中, 非常契合以人为主要资源的设计项目的特点。通过设置项目缓冲、接驳缓冲和资源缓冲等手段, 采用监控缓冲消耗状况而不是测算赢得值的方法来控制项目进度, 可大幅提高项目的整体绩效。

1 CCPM 的基本思想和方法

CCPM 最早由 Eliyahu M · Goldratt 博士在小说《关键链》里提出, 他结合了系统论、约束理论 (Theory of Constrains, TOC)、概率论和组织行为学, 发展出一项新的项目管理技术。TOC 的基本假定是, 在任何一个系统中, 总是存在几个关键因素影响整个系统, 即链子的强度取决于最弱的一环。找出系统最薄弱的环节, 并对该环节的约束因素进行整体调整, 可以有效提高系统的整体产出。在此基础上, 建立起 CCPM 的概念和方法体系。

1.1 CCPM 的基本概念

任务链 (Task Chain): 项目计划中, 彼此之间存在某种依赖关系, 必须依次执行的一组任务。依赖关系可能是任务的时序关系, 也可能是因为使用同一个资源

关键链: 关键链是考虑资源约束和任务时序关系时完成项目的最长路径。如果资源不受限, 关键链等同于关键路径。

缓冲: 用来保护项目薄弱环节不受其他部分影响的环节。关键链项目管理主要缓冲: 项目缓冲 (Project Buffer, 简称 PB)、接驳缓冲 (Feeding Buffer, 简称 FB) 和资源缓冲 (Resource Buffer, 简称 RB)。

项目缓冲: 用来保护项目完成时间的缓冲, 是加在关键链最后的一段空白时间, 这段时间不安排任何工作, 预留出来, 避免因为任务延期, 导致无法按照承诺日期完成项目。

接驳缓冲: 用来保护关键链不受非关键任务影响的缓冲, 是加在非关键任务和关键链之间的一段空白时间, 这段时间不安排任何工作。接驳缓冲的作用是, 只要非关键任务延期时间不超过接驳缓冲的长度, 就不会影响关键链上的任务。

资源缓冲: 资源缓冲是一个信号, 提醒参与关键任务的资源做好准备, 在多项目管理的时候使用。这个信号在关键任务开始前一个段时间发出, 让资源有准备的时间。

能力约束资源 (Capacity-Constrained Resources)^[1]: 能力约束资源是组织内部最缺乏的资源, 它们决定组织一段时间内能够完成项目的数目。

1.2 CCPM 的主要的内容和方法

1.2.1 考虑任务工期的不确定性, 并且引进 TOC 的缓冲概念

传统的项目管理方法估计任务工期时, 采用的是 80% 以上的概率对应的实际, 对每项任务设置安全时间, 以确保任务按时完成。但是由于帕金森定律和学生综合症等人类行为效应的存在, 这些安全时间实际上并不安全, 绝大部分都被浪费。CCPM 在估计单个项目任务工期时, 取 50% 的概率时对应的的时间, 将传统方法的中单个任务的安全时间汇集在一起, 在关键链设置项目缓冲, 在非关键链设置接驳缓冲, 放在每一条任务链的末端。这两种缓冲都是加入计划的一段额外的时间, 不需要配置任何资源。任务链在执行过程中, 如果有任务未按期完成, 就会先占用缓冲中的时间, 只要延误在缓冲所包含的时间内, 就不会造成缓冲后面的任务继续延误, 即可确保项目按期完成。所以, 关键链进度计划和关键路径进度计划两者之间有一些差异。

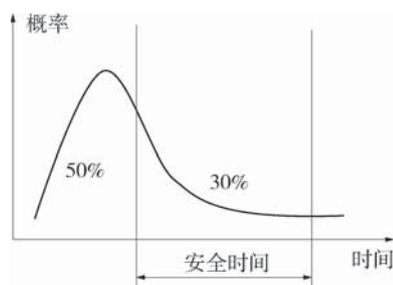


图 1 安全时间示意图

Fig. 1 Safety Time

1.2.2 编制网络计划时考虑资源约束

如果不考虑资源约束, 通过传统项目管理方法计算出的关键路径, 虽然是最长路径, 但在很多情况下不是项目的瓶颈, 有时甚至会得到完全错误的结论。如果非关键路径所需的资源有限, 往往会成为项目的瓶颈。CCPM 既考虑各项任务的时序关系, 同时还考虑资源约束, 从根本上弥补了 CPM

的不足。考虑资源约束情况下，时间最长的任务链即为关键链，关键链加上项目缓冲的时长即为项目的基准计划。如下图所示，红色的任务是关键链，不加入额外的链，关键链方法就可以正确识别项目瓶颈。对关键链上的任务所需的资源设置资源缓冲，它并不在网络计划中显示，只是让资源在关键任务开始前有所准备的一个信号。



图 2 使用关键链方法编制的计划
Fig. 2 Schedule Base on CCPM

1. 2. 3 项目执行时需服从资源约束的要求

CPM 主张任务越早开始越好，从而减少项目的延误，而 CCPM 却要求非关键链的任务越晚开始越好。由于每项任务都没有安全时间，且受制于资源约束，项目人员更加专注于完成关键链上的任务，且只专注于一项任务，发挥每项资源的最大潜力来完成当前任务。整个工作过程像一场紧张的接力赛，每项任务必须尽可能快的完成，这样减少了正在进行的任务 (Work in process) 的数量，延迟了资金投入，减少因同时开展多项任务而造成的干扰，提高工作效率和效益。

1. 2. 4 采用缓冲管理控制进度

传统的进度控制一般采用赢得值管理，赢得值是已完成工作量，但反映不出瓶颈问题，有可能工作完成了 90%，但是因为瓶颈因素的存在，最后的 10% 迟迟不能完成。CCPM 则采用缓冲管理来控制进度。缓冲管理内容是，定期更新项目每一个任务的完成率，测算项目进度计划中各项目缓冲和接驳缓冲的耗用率，然后将之与相应任务链的完成率进行对比，据此判断项目进度是否延误，最终确定是否采取赶工措施。采用关键链进度控制时，不在关注项目任务本身的完成情况，重点关注各类缓冲的消耗状况，根据消耗的比例相应采取行动。

1. 3 CCPM 和 CPM 对比

根据以上对 CCPM 的介绍，它同 CPM 比较主

要有以下异同点^[2]：

表 1 CCPM 和 CPM 对比表
Table 1 Differences Between CCPM and CPM

对比项	CPM	CCPM
理论依据	系统理论，图论	系统理论，图论，约束理论，行为经济学
适用范围	单项目管理	单项目管理和多项目管理
目标	1) 局部视角，希望使所有局部最优从而达到整体最优； 2) 使单个项目工期最短； 3) 试图寻找最优的解决方案，但很难达到	1) 全局视角，关注整体产出，优化工期和减少在执行任务投入的数量； 2) 使单个/多个项目有效产出最大化； 3) 寻找令人满意的解决方案
计划	1) 单个任务考虑安全时间； 2) 编制计划时假设资源充足，不考虑资源约束，以关键路径为基准； 3) 有里程碑点计划	1) 单个任务取概率为 50% 的完成值； 2) 考虑任务工期的不确定性，设置项目缓冲和接驳缓冲； 3) 编制计划时考虑资源约束，以关键链为基准，设置资源缓冲； 4) 无里程碑点计划 5) 考虑人的行为因素影响
执行	1) 重点关注关键路径任务以免延误工期； 2) 任务尽早开始，提高所有资源的利用率	1) 重点关注关键链任务以免延误工期； 2) 任务尽量晚开始，提高瓶颈资源的利用率，避免同时开展多项工作
控制	赢得值管理，关注各任务的完成情况	缓冲管理，关注缓冲消耗情况

2 发电设计项目进度管理特点

工程设计是将科学、技术、经济和方针政策综合应用于工程建设项目的一门应用技术科学。发电工程设计为电厂项目提供建设依据的设计文件和图纸，并为项目建设全过程提供工地服务的整个活动过程，对发电效率和效益起着决定性的作用。

2. 1 发电设计项目特点

1) 技术性非常强的系统工作。按我国的基本建设程序，发电工程项目的设计分为初步设计和施工图设计两个阶段，其中施工图设计阶段的工作量相对较大，工期也最长。以一个新建 2 × 1 000 MW 超超临界燃煤发电厂为例，施工图阶段的设计工作一般工期为 12 ~ 16 个月，施工图纸 600 ~ 800 册，采购规格书及专项分析报告百余份。

2) 多专业协作的综合设计。发电设计整个过程参与专业众多，包括热机、锅炉、电气一次、电气二次、热控、水工工艺、水工结构、总图、建筑、

土建结构和暖通等近 20 个，内外部接口上千个，涉及各专业设计人员 60~80 人，一般采用矩阵式管理。

3) 项目间资源共享度高。设计人员是主要的项目资源。单个设计人员普遍参与多个项目，且在不同项目中扮演不同角色，经常会同时承担多项任务。

2.2 发电设计项目进度风险因素

一般来说，在设计项目的实施过程中，影响设计进度的风险因素一般包括设计输入(内外部接口提资)、采购计划、施工计划、项目变更和人力资源等。发电工程往往施工进度优先层次高，而采购活动相对迟缓，导致设计所需的设计输入资料较晚获得，积累了较大风险。另外，人的因素和工作习惯对设计进度影响也非常大，但设计企业来说相对可控，为便于分析，本文假设其他因素都满足设计的需求，仅考虑人的行为因素的影响，主要包括：

1) 在项目计划中设置安全时间。估计项目任务工期时，项目团队成员常常根据项目的工作量、可获得的资源、外部条件以及过去的经验来评估。但是项目具有不确定性，项目各级成员为了确保项目任务的按时完成率，通常会预留一定的安全时间。导致了项目积累了太多的安全时间，占用了大量的时间和资源^[3]。

2) 学生综合症。项目人员在预估工期时，通常会争取更多的时间，但往往在截至日期快到的时候才开始努力工作，造成项目总是存在逾期风险^[4]。

3) 帕金森定律。在项目的实施过程中，如果给项目工作安排了非常充裕的时间，那么只要还有时间，人们往往会放慢节奏，直到用完所有的时间^[5]。

4) 工期变动效应的不对称性。在项目执行的过程中，如果某项任务延误(特别是关键路径上的任务)，往往会致使整个项目工期的延误，但某项任务提前完成却不一定会使项目提前完工。因为根据人们的心理行为倾向，提前完工一般不会得到奖励。即使可能会受到奖励，项目团队在下次评估类似项目工期时，就会缩短工期，那付出的额外努力将变得理所当然，得不到额外的奖励，因此项目成员常常不愿意提前完工，即使提前完工也不会上报。这种工期变动效应的不对称性致使项目无法提

前完成^[4]。

5) 不良多任务效应。大多数情况下，多个项目任务会共享同一个资源，该资源为了满足各项目要求，可能会在不同任务中穿梭，造成每个任务的完工日期加长。另外，人们在同一时间开展多项工作，也会造成工作效率下降，原因主要有两点，一是人们在不同工作之间切换时，需要一定的时间来熟悉新的工作，二是多项工作会给人带来心理负担，而且注意力不能集中，从而耗费了更多的时间^[6]。在设计企业中，一人身兼多个项目的情况非常普遍，不良多任务效应严重。

3 关键链技术在发电设计项目进度优化中的应用

关键链进度计划优化模型包含两大部分，单项目关键链进度计划优化和多项目关键链进度计划优化。关键链进度计划缩减每个任务的工期，相应加入各种缓冲，保护项目的关键链和项目结束时间。单个项目关键链进度优化是针对一个项目，多项目关键链进度优化则在单项目进度优化的基础上，对多个项目的开始时间进行合理安排，在项目之间考虑资源约束，避免企业关键资源超负荷工作。

3.1 单一项目关键链进度计划优化

以新建 2×1 000 MW 超超临界燃煤发电厂 L 为例，编制单一项目关键链进度计划。L 电厂规划总容量为 6×1 000 MW 级超超临界燃煤汽轮发电机组，本期建设 2 台机组，施工图 901 册，计划设计工期约 18 个月。

工期是任务的持续时间，传统方法把任务工期看作一个确定的值，但实际上，任务工期是一个服从某种分布的随机变量。经典的关键链方法使用 50% 的概率下的估计工期编制计划，去掉安全时间，这样关键链进度计划比传统计划的周期显著缩短。但这会导致项目无法按期结束的概率太大，CCPM 通过加入缓冲解决这个问题。

本文综合考虑设计人员的工作习惯和接受程度，采用三等分剪切法进行估算工期和设置缓冲，即将传统方法估算的任务工期的 2/3 作为新的任务工期，另外的 1/3 作为该任务的安全时间，将所有任务的安全时间汇总为缓冲，即缓冲的长度为估算工期的 50%，计划总工期与传统方法相同。

假设项目有 n 项任务，每项任务的估计工期 x_i

相互独立且服从同样的概率分布, 根据中心极限定律有^[7]:

$$E\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) = \sum_{i=1}^n E(x_i) \quad (1)$$

$$V\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) = \sum_{i=1}^n V(x_i) \quad (2)$$

$$\sigma\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^n \sigma(x_i) \quad (3)$$

令:

$$E(x_i) = E \quad (4)$$

$$V(x_i) = V \quad (5)$$

$$\sigma(x_i) = \sigma \quad (6)$$

则有:

$$E_{\Sigma} = n E \quad (8)$$

$$V_{\Sigma} = n V \quad (9)$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{n} \sigma < n \sigma \quad (10)$$

式中: $E(\)$ 、 $V(\)$ 、 $\sigma(\)$ 分别表示相应变量的期望值、方差和标准差。

根据以上公式推导可以得出, 项目工期的期望值不变, 但工期标准差减小(任务数越多减小幅度越大), 即工期大幅偏离期望值的程度下降, 提高了项目按时完工的概率。

假设有 a 和 b 两个项目, 各有 n 项任务, 每项任务的估计工期为 X_i , 该任务相关的安全时间为 b_i 。 a 项目分别在各项任务后设置安全时间, 不汇总成缓冲, b 项目根据所有的任务的安全时间设置缓冲 B 。

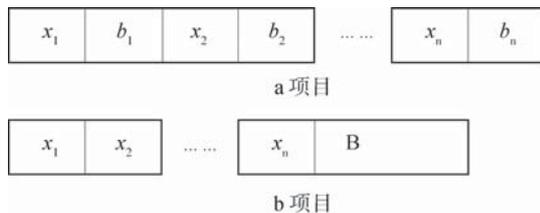


图3 任务工期对比图

Fig. 3 Comparison of Task Duration

由以上结论可以得出, 在同等完工概率下, b 项目任务链上所需设置的缓冲 B 小于 a 项目各任务的安全时间 b_i 的和。由此表明, 把分散的安全时间集中管理, 设置为缓冲放在任务链最后, 不但不会增加项目完工的不确定性, 反而还能缩短项目工期^[8]。在采用三等分剪切法时, 总工期不变, 任务链上共用的缓冲 B 等于安全时间 b_i 的总和, 则提

高了项目按时完工的概率。

对于单一项目来说, 在编制进度计划时应用关键链技术, 考虑了人的行为效应, 如学生综合症和帕金森定律等, 将传统工期估计中的安全时间汇聚为缓冲, 即使不改变计划总工期的情况下, 仍然提高了按时完成的概率。

3.2 多项目关键链进度计划优化

关键链多项目管理技术最重要的内容就是避免能力约束资源工作超负荷, 以及根据优先级保证每个时刻能力约束资源只为一个项目工作, 消除多任务, 尽可能提高能力约束资源的工作效率, 提高公司完成项目的数目。一般而言, 如果一个资源参与数目很多, 总的工作量大, 特别是参与关键任务的工作量比较大的话, 就有可能是能力约束资源。确定项目的优先级后, 当资源冲突时, 先将能力约束资源分配给优先级更高的项目的任务。

在确定项目优先级时, 本文采用基于层次分析 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 的模糊综合评价法 (Fuzzy Comprehensive Evaluation Method, 简称 FCEM)。根据发电设计项目特点和专家调查, 确定战略重要性、客户重要性、项目收益率和工期紧迫性为评价指标, 并得出各指标的权重。

表2 评价指标权重表
Table 2 Weights of Evaluation Index

序号	指标	权重/%
1	战略重要性	8
2	客户重要性	12
3	项目收益率	30
4	工期紧迫性	50

根据评价指标权重, 对多个项目进行模糊综合评价, 最终确定优先级。以类似电厂 L 的三个项目 A 、 B 、 C 为例(优先级依次为 $A > B > C$), 分别在不考虑资源约束和考虑资源约束的情况下编制多项目进度计划。

通过对比可以得出, 在考虑资源约束时, 项目 A 的工期增加了 10%, 项目 B 和项目 C 的工期基本不变, 多项目进度计划的总工期增加了 10%。工期的延长是受能力约束资源短缺的影响, 在没有额外资源投入的情况下, 即使计划工期较短, 但在项目执行时还是会延误。另外, 在在考虑资源约束时, 各项目总的资源投入并无变化, 但项目 B 和项

目C的开始日期分别推后的107天和103天，从资源相关的资金时间价值考虑，资源投入越晚，资金的成本越低。且单位日期投入的资源减少了9%，即单位资源的工作负荷也有所下降，减少多任务不良效应的影响。

表3 工期和资源对比

Table 3 Comparison of Duration and Resource

项目	不考虑资源约束			考虑资源约束			工期变化 %	变化 %*
	开始日期	完成日期	工期/天	开始日期	完成日期	工期/天		
项目 A	2013-12-26	2015-07-09	560	2013-12-26	2015-09-03	616	10	-9
项目 B	2014-06-25	2016-05-03	678	2014-10-10	2016-08-22	682	1	-1
项目 C	2015-01-23	2016-12-01	678	2015-5-6	2017-03-14	678	0	0
合计	2013-12-26	2016-12-01	1071	2013-12-26	2017-03-14	1 174	10	-9

注：*代表单位日期投入的资源变化。

对于多项目来说，除了在单项目管理中取得的收益外，通过项目优先级设置，统筹分配能力约束资源，使公司的所有项目的进度计划更加合理，同时也降低了资源成本，提高公司总体效益。

4 结论

1) 关键链项目管理兼顾了人类行为的影响，非常契合发电设计项目的特点。发电设计项目的参与人员主要是知识工作者，学生综合症、帕金森定律和不良多任务效应等行为相应因素普遍存在。本文考虑设计人员的接受程度，采用三等分剪切法估计任务工期和设置缓冲，在不改变计划总工期的前提下，提高了设计项目按时完成的概率。

2) 关键链项目管理的聚焦约束资源可提高工程项目的总体效益。在关键链项目管理中，先找出约束资源，再根据约束资源建立关键链，重点关注关键链任务，避免不良多任务效应，且使任务尽量晚开始，延缓资金投入，提高瓶颈资源的利用率，提高整体产出。对于工程项目来说，仅延缓资金投入一项，就能带来较大的经济效益。

3) 加入了优先级的关键链项目管理在多项目管理中更具操作性。对于工程公司来说，多项目同时实施使资源约束情况更加严重，在发掘出能力约束资源之后，为不同项目设定优先级使资源分配更加合理。本文采用基于层次分析法的模糊综合评价对不同项目进行排序，综合了定性和定量分析的优势，使多项目管理更具操作性和更加合理。

参考文献：

- [1] LAWRENCE P L. Critical Chain Project Management [M]. 2nd Revised Edition, Artech House, Inc. Norwood, MA. 2005.
- [2] THOMAS G L, BOAZ R, EDWARD A S. Critical Chain: A New Project Management Paradigm or Old Wine in New Bottles [J]. Engineering Management Journal, 2005, 17(4): 46-47.
- [3] 古剑锋. 基于关键链的IT软件项目进度管理应用研究 [D]. 广州: 中山大学, 2011.
GU Jianfeng, Research of IT Project Time Management based on Critical Chain [D]. Guangzhou: Zhongshan University, 2011.
- [4] 高德拉特. 关键链 [M]. 罗嘉颖, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
GOLDRATT E. Critical Chain [M]. Translated by LUO Jiaying. Beijing: Electronic Industrial Press, 2006.
- [5] PARKINSON C N. Parkinson's Law in the pursuit of progress [M]. London, UK: Penguin Books, 1947.
- [6] GLADSTONES W H, REGAN M A, LEE R B. Division of Attention: The Single-channel Hypothesis Revisited [J]. Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology, 1989, 41(A): 1 - 17.
- [7] 李波, 翁东风, 韦灼彬. 工程进度控制关键链法应用分析 [J]. 工程管理学报, 2012, 26(3): 71-74.
LI Bo, WENG Dongfeng, WEI Zhuobin. Analysis of Program Schedule Control Based on Critical Chain [J]. Journal of Engineering Management, 2012, 26(3): 71-74.
- [8] 高攀. 基于关键链的多项目管理的研究 [D]. 合肥: 中国科技大学, 2012: 33-34.
GAO Pan. Research of Multi-project Management Based on Critical Chain [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012: 33-34.

(责任编辑 高春萌)