

## 项目资源均衡研究综述

李洪波, 熊 励, 刘寅斌

(上海大学 管理学院, 上海 200444)

**摘 要:** 作为一类经典的项目调度问题, 资源均衡研究的是如何通过安排活动来均衡整个项目周期内资源的使用. 资源均衡问题因其重要的理论价值和应用背景, 一直是项目调度领域的重点研究课题. 鉴于此, 对国内外项目资源均衡的研究成果进行了系统性总结与梳理: 介绍了资源均衡问题的数学模型和常用的测试问题库; 综述了求解资源均衡问题的各类算法; 总结了资源均衡问题的一些扩展问题和应用情况. 最后指出了未来进一步的研究方向.

**关键词:** 项目调度; 资源均衡; 算法; 综述

**中图分类号:** O223

**文献标志码:** A

### A literature survey of project resource leveling

LI Hong-bo, XIONG Li, LIU Yin-bin

(School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China. Correspondent: LI Hong-bo, E-mail: ishongboli@gmail.com)

**Abstract:** The resource leveling problem is a class of classical project scheduling problems, which aims at leveling the resource usages over the project horizon by scheduling activities. Because of the theoretical importance and the practice background, the resource leveling problem has been attracting many research efforts. Therefore, a literature review of the research on the area of resource leveling is proposed. Firstly, the mathematical model of the resource leveling problem and some standard test instances are introduced. The algorithms for solving the resource leveling problem are reviewed. The extensions and applications of the resource leveling problem are surveyed. Finally, some future research directions are presented.

**Keywords:** project scheduling; resource leveling; algorithms; survey

## 0 引 言

在项目管理中, 减少某些昂贵的可更新资源(如大型机器、设备、专业人员等)在项目执行过程中使用量的波动是至关重要的, 这样可以降低不必要的资金支出, 避免仓促地调配临时资源以及频繁地雇佣和解雇员工等. 这就导致了项目资源均衡问题(RLP, 也称资源平衡问题、资源水平问题等)<sup>[1]</sup>. RLP是一类经典的项目调度问题, 它旨在确定一个项目基线进度计划, 该计划指明了各活动的计划开始时间, 在满足活动优先关系约束和项目截止日期约束的基础上, 最小化资源使用量随时间的波动.

RLP与传统资源受限项目调度问题(RCPSP)具有相同的优先关系约束, 但目标函数不同<sup>[1-2]</sup>. 从项目调度问题的类别上看, RCPSP属于“有限资源问题”, 即在资源供应量给定的条件下, 去最小化项目工期,

目标函数为正规函数<sup>[3]</sup>; 而RLP属于“有限时间问题”, 即在项目工期给定的条件下, 去优化资源的使用, 目标函数为非正规函数.

理论上, 项目资源均衡问题是强NP难的<sup>[4]</sup>; 实践上, 有效的资源均衡有助于提高项目资源的使用效率, 进而提升项目的成功率. 因此, 这一问题一直受到学术界和工业界的广泛重视, 在建模、求解、问题扩展以及应用上取得了许多重要的研究成果. 本综述以国内外主流学术期刊上发表的文献为主, 首先概述RLP及其数学模型; 然后梳理RLP的求解算法; 归纳RLP的一些扩展问题; 回顾资源均衡方法在实践中的应用情况; 最后对未来的研究方向进行了展望.

## 1 模 型

### 1.1 问题描述

经典的项目资源均衡问题描述如下.

收稿日期: 2014-08-27; 修回日期: 2014-11-30.

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(12YJA630158); 上海市软科学研究计划重点项目(14692105900).

作者简介: 李洪波(1985-), 男, 博士后, 从事项目调度与智能算法的研究; 熊励(1966-), 女, 教授, 博士生导师, 从事信息管理与商务智能等研究.

1) 一个项目可以由一个有向无环图  $G = (N, A)$  表示. 其中:  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  为节点的集合, 表示活动;  $A$  为有向弧的集合, 表示活动之间的优先关系,  $A \subseteq N \times N$ . 当  $(i, j) \in A$  时, 称活动  $i$  是  $j$  的紧前活动,  $j$  是  $i$  的紧后活动. 将各活动从 1 到  $n$  拓扑编号 (即每个活动的编号总是小于其紧后活动). 活动 1 和  $n$  是虚活动, 分别代表项目的开始和结束,  $n = |N|$ . 虚活动的工期为 0, 且不消耗任何资源.

在 RLP 的研究中, 常用的优先关系有两种: 经典的关键路径法 (CPM) 中的优先关系和广义优先关系 (GPR). 在 CPM 优先关系中, 每项活动只有在其所有紧前活动均完工后才可以开始, 这是项目调度领域用得最多的优先关系. 而 GPR 囊括了更多优先关系类型 (包括活动之间的“开始—开始”、“开始—完成”、“完成—开始”、“完成—完成”关系, 并且允许这些关系之间存在时间延迟), 从而扩展了 CPM 优先关系的描述能力. CPM 优先关系属于 GPR 中的“完成—开始”、零时间延迟型关系, 是 GPR 的子集<sup>[4-5]</sup>. 利用 GPR 可以很容易描述项目管理中一些特殊的约束关系, 如: 活动或子项目存在交付日期、活动并行执行、资源存在可用时间窗约束等.

2) 每个非虚活动  $i$  的工期用整数  $d_i$  表示, 活动  $i$  的开始时间记为  $s_i$  (也是整数), 则活动  $i$  的完成时间等于  $s_i + d_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ). 虚终止活动的开始时间  $s_n$  代表项目的完成时间. 假设活动一旦开始执行就不允许中途暂停 (即不可抢占, Non-preemption). 在 RLP 中, 项目的工期是给定的, 即项目的截止日期为  $\delta_n$ .

3) 非虚活动执行时需要消耗资源. 在经典的 RLP 中, 只考虑可更新资源 (Renewable resources), 可更新资源在每个时段的供应量是有限的; 在一个时段结束后, 可更新资源又可以被下一时段重新使用, 诸如人员、机器、工具等都是可更新资源. 如无特别说明, 本文所指的资源均为可更新资源. 假设一共存在  $K$  种资源. 活动  $i$  在执行时, 每个时段对第  $k$  种资源的需求量为固定的整数  $r_{ik}$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ .

4) 如果将时间离散化, 则在项目周期内一共存在  $\delta_n$  个时间段. 在时段  $t$ , 所有正在执行的活动集合记为  $A_t$ , 即  $A_t = \{i | s_i \leq t < s_i + d_i \wedge i \in N\}$ , 这些活动对第  $k$  种资源的总需求量为  $u_{kt} = \sum_{i \in A_t} r_{ik}$ .

RLP 的目标是, 在满足活动优先关系约束和项目截止日期约束的前提下, 制定一个项目基线进度计划  $S^B$ , 该计划列出了每项活动的计划开始时间,  $S^B = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ , 从而最小化资源使用量的波动程度 (即令整个项目周期内资源的使用情况尽可能均衡).

## 1.2 目标函数

RLP 的目标函数可以统一概括为如下形式:

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{t=0}^{\delta_n} f_k(u_{kt}). \quad (1)$$

在目标函数 (1) 中,  $f_k(u_{kt})$  是资源使用量  $u_{kt}$  的函数, 它衡量了在整个项目周期内资源使用量的波动情况,  $f_k(u_{kt})$  的值越小, 表明资源的使用越均衡. 根据决策者的偏好,  $f_k(u_{kt})$  可以有多种不同的形式, 现有 RLP 文献中一些典型的目标函数可以归纳如下:

$$f_k(u_{kt}) = c_k \cdot u_{kt}^2; \quad (2)$$

$$f_k(u_{kt}) = c_k \cdot |u_{kt} - \bar{u}_k|; \quad (3)$$

$$f_k(u_{kt}) = c_k \cdot |u_{kt} - u_{k,t-1}|; \quad (4)$$

$$f_k(u_{kt}) = c_k \cdot \frac{\delta_n \cdot u_{kt}^2}{w_k^2}. \quad (5)$$

式 (2)~(5) 中,  $c_k$  是赋予每种资源  $k$  的一个权重, 用于表示项目执行时第  $k$  种资源使用量的波动所导致的单位惩罚成本.

式 (2) 是一个经典的目标函数: 最小化资源使用量平方的加权和 (记作 RLP-C)<sup>[6-19]</sup>. 把最小化该目标函数的问题称为“经典的资源均衡问题”. 可以证明, RLP-C 所实现的效果与最小化资源使用量的方差是一样的<sup>[18]</sup>, 但因 RLP-C 的形式更为简单, 故在文献中经常使用.

式 (3) 表示资源使用量  $u_{kt}$  与给定的资源使用量  $\bar{u}_k$  之间的绝对偏差 (记作 RLP-D)<sup>[10-11, 18, 20-31]</sup>. 在该式中, 当  $u_{kt}$  的取值与  $\bar{u}_k$  不相等时, 将导致惩罚成本.  $\bar{u}_k$  通常取资源使用量的平均值, 即

$$\bar{u}_k = \left[ \sum_{i=1}^n r_{ik} d_i / \delta_n \right].$$

把最小化式 (3) 的问题称为“资源偏差问题”. 另外, 式 (3) 中的绝对值符号  $|\cdot|$  可以替换为  $[\cdot]^+$ , 这时将只对资源的超量使用进行惩罚, 把最小化该目标函数的问题称为“资源过载问题”. 也有一些文献用平方  $[\cdot]^2$  代替式 (3) 中的绝对值符号  $|\cdot|$ . 因为  $[\cdot]^2 = |\cdot|^2$ , 所以  $c_k \cdot |u_{kt} - u_{k,t-1}|$  与  $c_k \cdot [u_{kt} - u_{k,t-1}]^2$  是一一对应的, 两者都衡量了  $u_{kt}$  与  $\bar{u}_k$  之间绝对偏差的大小, 这两个目标函数的效果等价.

式 (4) 衡量了任意两个相邻时间段内资源使用量的变动情况 (记作 RLP-P)<sup>[10-11, 32]</sup>, 其中的绝对值符号  $|\cdot|$  可以替换为  $[\cdot]^+$ , 表示资源使用量若随时间增加将导致一个惩罚成本. 此外, Kreter 等<sup>[33]</sup> 研究了所谓的总调整成本问题 (Total adjustment cost problem), 其目标函数 (RLP-A) 与 RLP-P 实现了相同的效果, 主要区别在于, RLP-A 衡量的是两个“资源跳跃点”之间资源使用量的变动情况. “资源跳跃点”指的是每种资源

的使用总量发生改变时所对应的时间点。

式(2)~(4)是RLP文献中研究得最多的3类目标函数,它们主要用于比较同一项目不同进度计划之间的资源均衡程度,使用的前提条件是各进度计划对应的截止日期是相同的。如果要比较多个项目,而不同项目之间的工作量( $w$ )、项目截止日期可能存在差异,则前面的目标函数无法提供公平的比较。在这种情况下,可以采用式(5)所示的“资源改进系数”(记作RIC)<sup>[34-35]</sup>,它用于比较不同项目之间的资源均衡程度。

项目的工作量即为所有活动的工期与其资源使用量乘积之和。对于资源 $k$ ,其对应的工作量 $w_k = \sum_{i=1}^n d_i \cdot r_{ik}$ ;  $w_k$ 还可以这样计算:  $w_k = \sum_{t=1}^{\delta_n} u_{kt}$ 。因此目标函数(5)可以转化为

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{t=0}^{\delta_n} c_k \cdot \frac{\delta_n \cdot u_{kt}^2}{w_k^2} = \sum_{k=1}^m c_k \cdot \frac{\delta_n \cdot \sum_{t=1}^{\delta_n} u_{kt}^2}{\left(\sum_{t=1}^{\delta_n} u_{kt}\right)^2} \quad (6)$$

其中  $\delta_n \cdot \sum_{t=1}^{\delta_n} u_{kt}^2 / \left(\sum_{t=1}^{\delta_n} u_{kt}\right)^2$  在区间  $[1, +\infty]$  取值, 对于一个绝对均衡的进度计划, 其取值为1, 资源越不均衡, 其值越大。

Damci等<sup>[36]</sup>以某钢结构工业建筑项目为案例,研究了9种不同目标函数对资源均衡效果的影响。但该研究仅采用遗传算法这一概率搜索算法来求解,不能排除求解算法这一因素对研究结果准确性的影响;同时,仅用一个案例作为研究对象,导致其结论的可推广性受限。

### 1.3 数学模型

RLP的数学模型可以表述如下:

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{t=0}^{\delta_n} f_k(u_{kt}) \quad (7)$$

$$\text{s.t. } s_1 = 0; \quad (8)$$

$$s_i + d_i \leq s_j, \forall (i, j) \in A; \quad (9)$$

$$s_n \leq \delta_n; \quad (10)$$

$$\sum_{i \in A_t} r_{ik} \leq u_{kt}, \quad k = 1, 2, \dots, K, t = 1, 2, \dots, \delta_n. \quad (11)$$

其中  $s_i$  为决策变量,表示活动 $i$ 的开始时间。目标函数(7)表示最小化资源使用量的波动;式(8)表示令项目在0时刻开始;式(9)表示活动之间的CPM型优先关系约束,即任何一项活动的开始时间必须大于或等于其所有紧前活动的完成时间;式(10)表示项目截止

日期约束,即项目的完成时间不能超过 $\delta_n$ ;式(11)用于估计在时段 $t$ ,所有正在执行的活动对第 $k$ 种资源的需求量之和。式(8)~(10)均为时序约束,满足这三项约束的进度计划( $s_1, s_2, \dots, s_n$ )称为时间可行的进度计划。

需要指出的是,基于上述数学模型建立整数规划模型时,需要解决两个“线性化”问题:1)目标函数的线性化,因为资源均衡问题的目标函数通常都不是线性的。Rieck等<sup>[18]</sup>给出了RLP-C和RLP-D这两种目标函数的精确线性化方法,即线性化后的目标函数,相比原目标函数,在求解时不会损失最优解。2)约束条件(11)中 $A_t$ 的线性化,即将该约束条件转换为线性约束。最常见的做法是引入二值辅助变量,并将时间离散化<sup>[37]</sup>。这样,利用成熟的整数规划算法(如割平面法)或商业软件(如CPLEX)对相应的整数线性规划求解时,才能最大限度地提高求解效率。

### 1.4 计算复杂性

Neumann等<sup>[4]</sup>证明RLP可以多项式规约到3划分(3-partition)问题,而3划分问题的判定问题是强NP完全的,所以RLP是强NP难的。需要指出的是,即使只存在一种资源,RLP也是强NP难的。

每个活动所有可能开始时间的集合构成了RLP的解空间。在对RLP的解进行搜索时,一个活动的开始时间改变后,为了保持优先关系的可行,与此活动有直接或间接优先关系的活动开始时间可能也要改变,从而导致搜索可行解的难度增大。另外,与RCPSP明显不同,在RLP中提前活动的开始时间可能会导致目标函数的恶化(即资源更加不均衡),有时推迟活动的开始反而会令资源使用更为均衡。

### 1.5 测试问题库

由于RLP的NP难特性,研究人员提出了大量算法。为了对这些算法的求解效果与效率进行有效比较与评价,需要有共同的项目实例,这些实例的集合便构成了测试问题库(Benchmark)。对算法的计算性能进行分析,就是用待评价的算法对问题库中的实例进行求解,分析求解这些实例耗用的平均CPU时间、内存大小、求得的目标函数值等。

在对问题库中的实例进行设计时,要确保实例具有代表性并充分反映问题自身的结构特点。在RLP领域常用的问题库生成软件主要有:ProGen(<http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/>)、ProGen/max(<http://www.wiwi.tu-clausthal.de/en/chairs/produktion/research/research-areas/project-generator/>)和RanGen(<http://www.project-management.ugent.be/?q=research/data/RanGen>)。这些软件在现有RLP研究中的采用情况如表1所示。

表1 资源均衡问题中的测试问题库及其采用情况

问题库(问题库生成软件)	文献	备注
PSPLIB (ProGen)	[29, 35, 38-41]	专门用于RLP的数据集有: rlp j10, j20, j30
PSPML (ProGen/max)	[4, 10-11, 15, 17-18, 27, 33]	专门用于RLP的数据集有: RLP/max
RanGen	[19, 42]	—
其他	[43]	自行生成

PSPLIB (Project scheduling problem LIBrary) 是目前项目调度领域广为采用的项目调度问题库之一. 该库基于实验设计方法, 由德国慕尼黑工业大学的Kolisch等<sup>[44-45]</sup>用其开发的ProGen软件生成. PSPLIB主要通过以下参数控制生成实例的特征: 活动数量、网络复杂度(Network complexity)、资源因素(Resource factor)、资源强度(Resource strength).

ProGen/max扩展了ProGen的功能, 可以产生存在广义优先关系约束的项目网络<sup>[46-47]</sup>. 基于ProGen/max问题库的典型代表是PSPML (PSP/max library).

Demeulemeester等<sup>[48]</sup>指出, ProGen生成的实例随机性不够高, 并且所用的网络复杂度指标无法有效评估项目网络的拓扑结构, 因而开发了新的项目调度问题实例生成软件RanGen, 该软件可以生成强随机特性的问题实例. 生成每个实例时, RanGen控制的参数主要有: 活动数量、资源的种类、资源因素、次序强度(Order strength)、资源受限程度(Resource constrainedness).

## 2 算法

设计各种有效的求解算法一直是RLP的研究热点和重点. 根据是否可以确保求得最优解, RLP的求解算法可以分为两类: 精确算法和非精确算法. 精确算法主要包括: 动态规划算法、基于整数规划的算法、隐枚举算法(如分支定界算法)等, 这些算法均可以求出理论上的最优解. 非精确算法主要是指启发式算法和元启发算法. 启发式算法主要借助于经验设计一些直观易懂且便于实施的方法, 如资源均衡的“削峰填谷”法. 广义上, 元启发算法也属于启发式算法, 但元启发算法通常给出了求解问题的一般框架, 用户对算法只做很少修改便可以有效地求解相关问题, 遗传算法、禁忌搜索算法、粒子群算法等智能算法均为元启发算法. 启发式算法和元启发算法在求解RLP时, 并不能保证所得的解是理论上的最优解, 但它们通常可以在可接受的时间内给出一个满意解.

由于RLP的NP难特性, 精确算法一般只适用于小规模的问题(项目中活动数量较少), 即使对于目前最好的精确算法——整数规划算法<sup>[18]</sup>, 也只能求解最

多含有50个活动的项目. 对于大规模问题, 精确算法甚至难以在合理时间内求出可行解, 这时, 非精确的启发式算法和元启发算法便成为仅有的选择.

### 2.1 精确算法

表2总结了一些典型的求解RLP的精确算法, 并从所能处理资源的种类、优先关系的类型以及是否对算法进行计算性能分析这3个方面对文献做了进一步分类.

表2 典型的求解资源均衡问题的精确算法

算法	文献	资源种类	优先关系	计算分析
动态规划	[49]	单资源	CPM	无
	[50]	单资源	CPM	无
	[21]	单资源	CPM	无
整数规划	[20]	多资源	CPM	无
	[51]	多资源	CPM	无
	[24]	单资源	CPM	无
	[32]	多资源	CPM	有
	[18]	多资源	GPR	有
分支定界	[33]	多资源	GPR	有
	[11]	多资源	GPR	有
分支定价	[17]	多资源	GPR	有
	[39]	多资源	CPM	有

在动态规划算法方面, Ahuja<sup>[49]</sup>是较早的研究者. Ahuja<sup>[49]</sup>和冯允成<sup>[50]</sup>的动态规划算法枚举了活动所有可能的开始时间. Bandelloni等<sup>[21]</sup>的动态规划算法则是基于时差的.

在整数规划方面, Easa<sup>[20]</sup>较早建立了RLP的整数线性规划模型, 后续研究中的整数规划模型基本都是建立在Easa模型基础上的. 近几年, 有学者探索新的建模方式, 以提升整数规划模型的求解能力. Rieck等<sup>[18]</sup>在其整数规划模型中, 引入多种加速求解的技术, 如域缩减、计算资源使用量的上界与下界、推导有效的割平面等, 利用CPLEX求解改进后的模型, 首次解决了活动数量达到50个、具有较紧工期的项目资源均衡问题. Kreter等<sup>[33]</sup>的改进主要在建模方法上, 除了研究传统的基于离散时间的整数规划模型外, 还提出了基于事件的模型和基于开始时间的模型. 用预处理技术加速CPLEX的求解过程, 并通过域缩减, 用元启发算法提供初始解. 其计算实验结果表明, 当项目工期较紧时, 基于离散时间的模型表现最好; 而工期较松时, 基于开始时间的模型表现较好.

在分支定界算法方面, Neumann等<sup>[11]</sup>提出了一个基于时间窗的分支定界算法, 其核心思想是巧妙枚举活动的可行开始时间. Gather等<sup>[17]</sup>的分支定界算法是建立在枚举准稳进度计划(Quasistable schedules)的基础上的.

总之,近些年比较受关注的精确算法以整数规划和分支定界算法为主.对于整数规划算法,研究的重点是如何建立有效的整数规划模型;为了减少搜索空间,针对RLP的特性设计合理的有效不等式将会进一步提升模型的效率;现有文献通常使用成熟的数学规划软件(如CPLEX)对整数规划模型进行求解.对于分支定界算法,研究的重点是如何将RLP的解空间映射为分支定界树;为了提升分支定界算法的搜索效率,设计高效的“剪枝”规则,从而避免对解空间某些区域(主要是可以证明的不包含最优解的区域,或该区域的解均劣于已知的最好解)进行搜索,始终是现在以及未来的重点研究课题.

## 2.2 启发式算法

按照产生进度计划的方式不同,可以将RLP的启发式算法分为两类:改善型方法和构造型方法.

改善型方法主要通过活动的最早和最晚开始时间内对活动进行前后移动,实现资源均衡<sup>[6]</sup>.该方法的基本步骤如下.

**Step 1:** 建立一个初始的进度计划,通常以最早开始计划(用CPM法计算每个活动的最早开始时间,以该时间作为活动的开始时间)作为初始进度计划;

**Step 2:** 按照某种优先规则(如最大自由时差等)确定活动的顺序;

**Step 3:** 依照上述顺序,在活动的自由时差内,依次调整每个活动的开始时间,确保调整后的进度计划的目标函数值有所改进(或没有恶化).

Burges等<sup>[6]</sup>是构造型方法的早期提出者,后续研究中的启发式方法大多基于该算法的框架.后续研究的区别主要在于Step 2中优先规则的计算方法不同.Woodworth等<sup>[7]</sup>改进了Burges等<sup>[6]</sup>的算法,用于多项目、多资源均衡(但每个活动仅需要一种资源).Harris<sup>[34]</sup>的“最小矩法”(Minimum moment method)与上述步骤类似.Christodoulou等<sup>[52]</sup>提出了一个基于最大熵的启发式方法,允许活动拉伸与压缩,使得项目的资源使用更为均衡,但该方法仅适用于单资源均衡.Hiyassat<sup>[13]</sup>改进了最小矩法,提出了基于活动的资源使用量和自由时差的优先规则.Hiyassat<sup>[14]</sup>进一步将上述改进方法应用于多资源均衡.梁燕等<sup>[53]</sup>针对紧急事件调度中的资源均衡问题,设计了基于任务紧迫性的启发式算法.

构造型方法是从零开始,依次调度活动,直到获得一个进度计划<sup>[8]</sup>.其基本步骤如下.

**Step 1:** 按照某种优先规则确定活动的顺序;

**Step 2:** 依照上述顺序,选择一个活动,基于已调度的活动,确定选中活动可行的开始时间集合,从中

确定一个时间,使得目标函数值最小;

**Step 3:** 重复Step 2,直到所有活动均已安排开始时间.

这种方法的典型代表是Harris<sup>[8]</sup>的“装箱法”(Packing method),但其不足之处在于仅适用于单资源均衡.

上述文献只针对CPM型优先关系,而且均未给出计算性能分析.针对广义优先关系并提供计算性能分析的研究有:Neumann等<sup>[10]</sup>设计了3个可以求解多种不同类型RLP的具有多项式时间复杂度的启发式算法,计算结果表明,该算法对于含有5种资源、活动数量最多500个的项目,可以在合理时间内求得理想的解;Neumann等<sup>[11]</sup>针对存在资源约束的情形提出了一个新的启发式算法,其基本思路是将一个时间可行的进度计划转化为资源可行.

很多情况下,启发式算法获得的解的质量难以令人满意,因此,启发式算法已不是现在RLP的研究重点.但是,启发式算法可以作为元启发算法的一部分继续发挥重要作用,例如:1)启发式算法可以作为元启发算法的初始化过程,产生初始的解;2)在无需修改或仅作很小修改的条件下,启发式算法可以作为元启发算法的解码过程,将元启发算法获得的解转化为进度计划.

## 2.3 元启发算法

元启发算法是目前RLP算法的研究重点,通常它能在可接受的时间内求得大规模问题的满意解,甚至最优解.采用元启发算法求解RLP时,一般要将RLP的解进行编码,以达到充分利用各类元启发算法中搜索策略的目的.常用的编码方式有以下几种.

1) 开始时间编码.在这种编码中,元启发算法中的解直接对应进度计划 $S^B = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ ,即每个解包含的元素数量等于活动数量,每个元素的取值为活动开始时间.采用这种编码的文献主要有[11, 15-16, 19, 23, 30, 54-58].

2) 基于位移的编码.一个解中元素的数量等于活动数量,每个元素取值对应活动的开始时间相对其最早开始时间的偏移量.采用这种编码的文献主要有[26, 34, 59].

3) 随机键编码.一个解中元素的数量等于活动数量,每个元素取值为一个随机数.采用这种编码的文献主要有[22].

4) 优先值编码.一个解中元素的数量等于活动数量,每个元素取值代表了相应活动优先值的大小.采用这种编码的文献主要有[9, 60].

在上述4种编码方式中,虽然开始时间编码最为

直观,且省略了“编码至进度计划”的解码过程,但其最大不足在于容易产生一些违反优先关系约束的解,导致在算法中需要对这些不可行解进行额外处理;其余3种编码方式因为有相应的解码过程,可以确保解的可行性。

在具体算法方面,遗传算法研究得较为广泛。Leu等<sup>[23]</sup>通过简单的算例验证了其遗传算法,同时还开发了一个资源均衡决策支持系统原型。刘士新等<sup>[38]</sup>以求解RCPSP的遗传算法为基础,设计了基于分支定界策略的近似算法。张连营等<sup>[56]</sup>研究了资源均衡的遗传算法及其Matlab实现。郭研等<sup>[25]</sup>采用活动时间的二进制编码,研究了多项目资源均衡问题的遗传算法。El-Rayes等<sup>[59]</sup>设计了两个新的衡量资源均衡的指标来衡量资源波动导致的负面影响;在其遗传算法中,用基于位移的编码方式,利用改善型启发式方法作为解码方法,采用含有20个活动的项目网络验证了其算法。Ponz-Tienda等<sup>[35]</sup>采用资源改进系数作为目标函数,它可以衡量不同项目进度计划之间的资源均衡程度;同时还设计了基于位移编码的遗传算法。此外,Chan等<sup>[22]</sup>的遗传算法在编码上,采用随机键与位移相结合的方法,而解码方式类似于RCPSP中的串行进度生成机制,即按随机键大小选择活动,安排选中活动的开始时间时,要在其最早可能开始时间的基础上加上一个延迟量。同时分别在2个小规模算例(每个项目含11个活动)和14个较大规模算例上(每个项目中活动数量在14~51之间)验证了算法的有效性。Kyriklidis等<sup>[41]</sup>设计了基于蚁群算法和遗传算法的混合算法。

还有一些学者研究了其他元启发算法,如:禁忌搜索算法<sup>[11]</sup>、迭代贪婪算法<sup>[15]</sup>、蚁群算法<sup>[26,28]</sup>、差分进化算法<sup>[59]</sup>、粒子群算法<sup>[30,60]</sup>、路径重连算法<sup>[19,29]</sup>、布谷鸟算法<sup>[58]</sup>、神经网络方法<sup>[62]</sup>等。在这些研究中,只有少数学者给出了基于Benchmark的性能验证。如:Neumann等<sup>[11]</sup>针对有/无资源约束的问题,通过禁忌搜索算法检测资源使用的高峰时段,移动高峰时段的活动至非高峰时段,进而实现资源均衡;Ballestín等<sup>[15]</sup>设计了基于种群的迭代贪婪算法,可以有效解决含有多达1000个活动的资源均衡问题;喻小光等<sup>[29]</sup>研究了柔性资源约束的资源均衡问题的路径重连算法,分别采用活动列表和改进的串行进度生产机制作为编码、解码方法,在PSPLIB问题库上对算法性能进行了分析;Ranjbar<sup>[19]</sup>针对无资源约束、CPM型优先关系的资源均衡问题,设计了路径重连算法,通过RanGen软件生成大量数据集,并且活动数量最多可达500个,对算法进行了计算性能分析,计算结果表明该算法的表现优于Neumann等<sup>[11]</sup>和Ballestín等<sup>[15]</sup>的

算法。

此外,Koulinas等<sup>[63]</sup>设计了基于禁忌搜索的超启发算法以求解RLP,但仅用2个简单算例(含11和10个活动,且每个算例中只含一种资源)验证算法,无法充分说明其算法的有效性。

### 3 扩 展

在1.1节描述的基本RLP的基础上,扩展有关假设,或者加入一些其他需要考虑的因素,便产生了一些重要的RLP扩展问题。

#### 3.1 活动执行时可以中断

基本的RLP假设活动执行时不能中断。但在实践中,在项目中途打断某些活动的执行,推迟它们的完成时间,有助于释放资源高峰时段的资源占用,可能会导致更为均衡的资源利用。

由于需要引入更多的决策变量和约束条件处理活动中断,导致活动中断条件下RLP的数学模型比基本的RLP更为复杂,求解难度也相应增大。

在精确算法方面,Son等<sup>[24]</sup>以RLP-D为目标函数,给出了活动可中断条件下RLP的整数规划模型。Hariga等<sup>[32]</sup>的整数规划模型中,目标函数是最小化资源波动导致的成本与非关键活动中断导致的成本之和,并使用含10个活动的案例数据验证了其模型。此外,Afshar-Nadjafi等<sup>[40]</sup>研究了分支定界算法。

在元启发算法方面,Hashemi Doulabi等<sup>[27]</sup>设计了一种遗传算法,采用二维染色体编码方式:染色体长度等于项目工期,每一行对应一个活动;若某个活动在某一天处于执行状态(即需要资源),则该元素取值为1,否则为0。其目标函数为以下两部分之和:资源波动导致的成本(类似于RLP-D)与活动中断导致的成本。同时还利用ProGen/max生成了220个问题实例(每个实例最多含5000个活动),对其算法进行了计算性能分析。Alsayegh等<sup>[43]</sup>采用类似的目标函数,设计了基于粒子群算法和模拟退火算法的混合算法对问题求解,并在随机生成的180个问题实例上通过计算实验对算法进行了验证,但其不足在于,所考虑的问题实例规模较小(最大活动数量只有10个),难以充分体现元启发算法的优越性。李培根等<sup>[64]</sup>也研究了遗传算法,但没有提供计算实验分析,只用一个简单算例验证算法。

#### 3.2 活动具有多种执行模式

基本的RLP假设每个活动只能以一种模式执行,即每个活动所需的工期和资源只有一种组合。但在项目管理实践中,完成一项活动可能有多种不同的模式:分配给活动的资源数量不同,导致的活动工期也会不同。这就产生了多模式RLP。

基本的RLP可以视为多模式RLP的特例,即基本RLP中每个活动的模式数量为1.很明显,多模式RLP的解空间进一步增大,求解更为困难.

目前对多模式RLP的研究还较少.在精确算法方面,Coughlan等<sup>[39]</sup>给出了资源具有可用周期约束下多模式RLP的分支定价算法(Branch and price algorithm),该算法可以对含有多达50个活动的项目求出精确解.在其目标函数 $\min \sum_k c_k \cdot R_k$ 中,通过最小化资源获得成本来获取一个均衡的进度计划,其中 $R_k$ 为第 $k$ 种资源使用量的最大值.但是,该问题设定有些过于简化:假设存在多种资源,但每个活动执行时只需其中一种资源.Afshar-Nadjafi等<sup>[42]</sup>设计了多模式RLP的分支定界算法.

在元启发算法方面,庞南生等<sup>[61]</sup>、郭研等<sup>[31]</sup>分别研究了单资源和多资源条件下的粒子群算法.庞南生等<sup>[65]</sup>针对广义优先关系、多模式、单资源均衡问题设计了模拟退火算法.

### 3.3 多目标资源均衡

在均衡资源这个目标之外,加入其他需要优化的目标,如最小化项目工期,便导致了基于多目标优化的资源均衡.

多目标资源均衡通常要获取帕累托最优解,而由于目标之间的冲突性以及各单独目标对应的调度问题往往是NP难的,导致多目标资源均衡的求解难度进一步增加.

元启发算法是目前多目标资源均衡的研究重点.针对项目工期最小化和资源均衡利用的双目标优化问题,Hegazy<sup>[9]</sup>设计了遗传算法求解;而Jun等<sup>[66]</sup>基于开始时间和优先值的混合编码方式,利用NSGA-II算法<sup>[67]</sup>求解相同的问题.但是上述作者均没有给出计算性能分析,都是用一个含20个活动的案例数据验证算法.

需要指出的是,在同时优化工期和均衡资源时,传统的均衡指标有时无法正确反映可变项目工期下的资源均衡情况(因为传统的资源均衡指标假设工期固定不变).因此,Hegazy<sup>[9]</sup>在传统资源矩指标的基础上,又设计了一个新的指标“ $y$ 矩( $M_y$ )”,即对于第 $k$ 种资源, $M_y = \sum_t u_{kt} \cdot t$ .  $M_y$ 取值越小,表示资源越均衡.

### 3.4 不确定环境下的资源均衡

在项目执行过程中,不确定因素是难以避免的,基于确定型RLP产生的基线进度计划往往难以确保项目实施时完全实现原计划的资源均衡目标.因此,不确定环境下的资源均衡正引起人们的重视,其目标

主要是最小化项目执行时实际的资源使用量与计划的资源使用量之间的差异.

引入不确定因素后,由于在调度阶段需要考虑不确定因素对资源均衡的影响,进一步加剧了RLP的复杂性.

根据对不确定因素的处理方法不同,不确定环境下的资源均衡研究可以分为两类:随机资源均衡和模糊资源均衡.

在随机资源均衡中,利用随机变量对不确定因素建模.Leu等<sup>[55]</sup>研究了随机工期条件下资源均衡问题的遗传算法.徐哲等<sup>[68]</sup>研究了随机活动工期和费用条件下单资源均衡优化问题的启发式方法.

在模糊资源均衡中,利用模糊数对不确定因素建模.Leu等<sup>[54]</sup>设计了求解带有模糊活动工期的资源均衡问题的遗传算法.Masmoudi等<sup>[57]</sup>的遗传算法可以求解带有模糊活动工期和工作量的资源均衡问题.Zahraie等<sup>[69]</sup>和Ashuri等<sup>[16]</sup>研究了模糊“时间-成本-资源”多目标优化问题,最小化项目成本、工期以及资源使用量的变异,并分别设计了NSGA-II算法、混合遗传和粒子群算法以获取基线进度计划.

上述研究元启发算法的文献均利用几个小规模简单算例对算法进行了验证,并未提供更加全面的计算性能分析.

现有的一些研究<sup>[16,69]</sup>存在一定不足:其目标函数往往忽略了项目工期变更对资源均衡的影响,即由于优化过程中项目工期可能会改变,这时其目标函数无法对资源均衡程度进行公平衡量.为了解决这一问题,Li等<sup>[70]</sup>提出了基于资源使用量变异系数的目标函数,进而在随机活动工期下设计禁忌搜索算法以获取调度策略,动态地决定每一决策时点上应执行哪些活动,并在PSPLIB J90数据集上对算法进行了验证.

## 4 应用

随着RLP研究的深入,资源均衡的应用已在生产调度、通信保障、工厂维护/建造、软件研发、建筑等多个领域取得了进展.这些领域都能以项目的形式开展工作,因而可以将项目分解为众多具体的工作、任务或活动,并明确这些活动执行时所需的各类资源及其数量,进而识别这些活动在技术或时间上的先后关系,使得不同领域的项目均可以建立资源均衡模型并进行求解.

Ballestín等<sup>[15]</sup>将资源均衡方法应用于按订单生产(Make-to-order production)环境下的中期生产计划问题,把订单视为项目中的活动,从而将生产计划问题转化为资源均衡项目调度问题.王长峰<sup>[71]</sup>利用启发式方法解决了北京奥运通信保障工程多项目资源均

衡的实际问题。

Megow 等<sup>[72]</sup>将资源均衡方法应用于大型化工厂的维护检修项目,设计了一个资源均衡启发式算法,设定一个资源使用量的上界作为资源供应量,然后使用 RCPSP 中的列表调度方法产生一个进度计划。Rieck 等<sup>[18]</sup>则描述了核电站翻修项目中资源均衡的方法。

Kreter 等<sup>[33]</sup>将资源均衡应用于德国在北海建造离岸风力发电厂的项目,该项目需要在未来 20 年安装 5 500 个风力涡轮机,以满足德国未来 15% 的电力供应需求;同时在项目执行过程中,对相关人力资源(工程师、地质学家、涡轮操作人员等)进行均衡分配。郭研等<sup>[31]</sup>研究了软件开发项目中的资源均衡。

在建筑项目领域,Leu 等<sup>[73]</sup>研究了资源均衡决策支持系统。Tang 等<sup>[74]</sup>采用约束满足算法求解高铁建设项目的线性资源均衡问题。He 等<sup>[75]</sup>研究了建筑项目资源均衡的动态启发式算法。此外,Kastor 等<sup>[76]</sup>比较了 3 种软件(两个商业软件: Primavera P6.0 和 Microsoft Project 2007, 一个开源软件 Open Workbench 1.1.6)在建筑项目资源均衡中的实际效果。

## 5 结论与展望

RLP 以其重要的理论价值和应用背景,受到了人们的广泛重视与深入研究,提出了众多行之有效的模型与算法,并开拓了一系列资源均衡的扩展问题与应用领域。通过对现有研究的分析可以发现,项目资源均衡领域仍有许多有意义的问题值得研究,归纳如下。

1) 在项目资源均衡的衡量指标(目标函数)方面,现有的多数指标难以对不同项目计划以及不确定环境下的资源均衡程度进行公平测度。因此,研究上述条件下的项目资源均衡的衡量指标将有助于 RLP 理论与算法的完善。

2) 在精确算法方面,基于整数规划的算法是目前最为有效的方法。如何改进 RLP 中整数规划的建模和求解方法,使之求解效率进一步提升,将是很值得研究的一个方向。

3) 针对大规模 RLP,设计新型、高效的元启发算法将始终是这一领域的重要研究课题。应丰富 RLP 的智能算法,研究新的编码方式、智能搜索操作等。另外,现有的 RLP 算法研究中,很多都没有基于 Benchmark 问题库进行计算性能分析,导致对算法的有效性、适用性和可推广性无法提供有说服力的证据。因此,未来的研究要进一步重视算法的计算性能分析。

4) 在扩展与应用方面,有必要根据实践中问题的具体特征对 RLP 进一步扩展,以拓宽 RLP 的应用

范围。例如:针对新产品研发项目中常见的返工迭代现象,研究考虑活动返工的 RLP;研究项目中具有多种技能的人力资源的均衡等。另外,不确定环境下的 RLP 研究需进一步深入。在不确定环境下将鲁棒调度引入 RLP 具有重要的实践价值<sup>[77]</sup>。例如,研究如何产生鲁棒的、具有抗干扰能力的基线进度计划;如何通过动态调度策略实现实时资源均衡;如何在项目变更(添加新活动或取消某些活动)条件下均衡资源等。

## 参考文献(References)

- [1] Demeulemeester E, Herroelen W. Project scheduling: A research handbook[M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002: 368.
- [2] 方晨, 王凌. 资源约束项目调度研究综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 641-650.  
(Fang C, Wang L. Survey on resource-constrained project scheduling[J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 641-650.)
- [3] Sprecher A, Kolisch R, Drexel A. Semi-active, active, and non-delay schedules for the resource-constrained project scheduling problem[J]. European J of Operational Research, 1995, 80(1): 94-102.
- [4] Neumann K, Schwindt C, Zimmermann J. Project scheduling with time windows and scarce resources: Temporal and resource-constrained project scheduling with regular and nonregular objective functions[M]. Berlin: Springer, 2003: 242.
- [5] 寿涌毅. 资源受限多项目调度的模型与方法[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2010: 16.  
(Shou Y Y. Resource-constrained multi-project scheduling models and methods[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2010: 16.)
- [6] Burgess A R, Killebrew J B. Variation in activity level on a cyclical arrow diagram[J]. J of Industrial Engineering, 1962, 13(2): 76-83.
- [7] Woodworth B M, Willie C J. A heuristic algorithm for resource leveling in multi-project, multi-resource scheduling[J]. Decision Sciences, 1975, 6(3): 525-540.
- [8] Harris R B. Packing method for resource leveling (PACK)[J]. J of Construction Engineering and Management, 1990, 116(2): 331-350.
- [9] Hegazy T. Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms[J]. J of Construction Engineering and Management, 1999, 125(3): 167-175.
- [10] Neumann K, Zimmermann J. Resource levelling for projects with schedule-dependent time windows[J]. European J of Operational Research, 1999, 117(3): 591-605.

- [11] Neumann K, Zimmermann J. Procedures for resource leveling and net present value problems in project scheduling with general temporal and resource constraints[J]. *European J of Operational Research*, 2000, 127(2): 425-443.
- [12] Son J, Skibniewski M J. Multiheuristic approach for resource leveling problem in construction engineering: Hybrid approach[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 1999, 125(1): 23-31.
- [13] Hiyassat M A S. Modification of minimum moment approach in resource leveling[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2000, 126(4): 278-284.
- [14] Hiyassat M A S. Applying modified minimum moment method to multiple resource leveling[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2001, 127(3): 192-198.
- [15] Ballestín F, Schwindt C, Zimmermann J. Resource leveling in make-to-order production: Modeling and heuristic solution method[J]. *Int J of Operations Research*, 2007, 4(1): 50-62.
- [16] Ashuri B, Tavakolan M. Fuzzy enabled hybrid genetic algorithm — Particle swarm optimization approach to solve TCRO problems in construction project planning[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2012, 138(9): 1065-1074.
- [17] Gather T, Zimmermann J, Bartels J H. Exact methods for the resource levelling problem[J]. *J of Scheduling*, 2011, 14(6): 557-569.
- [18] Rieck J, Zimmermann J, Gather T. Mixed-integer linear programming for resource leveling problems[J]. *European J of Operational Research*, 2012, 221(1): 27-37.
- [19] Ranjbar M. A path-relinking metaheuristic for the resource levelling problem[J]. *J of the Operational Research Society*, 2013, 64(7): 1071-1078.
- [20] Easa S M. Resource leveling in construction by optimization[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 1989, 115(2): 302-316.
- [21] Bandelloni M, Tucci M, Rinaldi R. Optimal resource leveling using non-serial dynamic programming[J]. *European J of Operational Research*, 1994, 78(2): 162-177.
- [22] Chan W T, Chua D K H, Kannan G. Construction resource scheduling with genetic algorithms[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 1996, 122(2): 125-132.
- [23] Leu S S, Yang C H, Huang J C. Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application[J]. *Automation in Construction*, 2000, 10(1): 27-41.
- [24] Son J, Mattila K G. Binary resource leveling model: Activity splitting allowed[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2004, 130(6): 887-894.
- [25] 郭研, 宁宣熙. 利用遗传算法求解多项目资源平衡问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 25(10): 78-82. (Guo Y, Ning X X. Using genetic algorithms for multi-project resource balance[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2006, 25(10): 78-82.)
- [26] 匡亚萍, 熊鹰, 张梦芳. 施工项目资源均衡问题的蚁群算法[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2008, 42(7): 1194-1198. (Kuang Y P, Xiong Y, Zhang M F. Ant colony algorithm for construction resource leveling[J]. *J of Zhejiang University: Engineering Science*, 2008, 42(7): 1194-1198.)
- [27] Hashemi Doulabi S H, Seifi A, Shariat S Y. Efficient hybrid genetic algorithm for resource leveling via activity splitting[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2010, 137(2): 137-146.
- [28] 李敬花. 遗传蚁群融合算法求解多项目资源能力平衡问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(3): 643-649. (Li J H. Combination of genetic & ant colony algorithms for multi-project resource leveling problem[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(3): 643-649.)
- [29] 喻小光, 战德臣, 聂兰顺, 等. 柔性资源约束的资源水平项目调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(9): 1967-1976. (Yu X G, Zhan D C, Nie L S, et al. Flexible resource-constrained resource leveling project scheduling problem[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(9): 1967-1976.)
- [30] 郭研, 李南, 李兴森. 多项目多资源均衡问题及其基于 Pareto 的向量评价微粒群算法[J]. *控制与决策*, 2010, 25(5): 789-793. (Guo Y, Li N, Li X S. Multi-resource leveling in multiple projects and vector evaluated particle swarm optimization based on pareto[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(5): 789-793.)
- [31] 郭研, 李南, 李兴森. 多模式多资源均衡及基于动态种群的多目标微粒群算法[J]. *控制与决策*, 2013, 28(1): 131-136. (Guo Y, Li N, Li X S. Multi-mode multiple resources leveling and multi-objective particle swarm optimization with dynamic population[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(1): 131-136.)
- [32] Hariga M, El-Sayegh S M. Cost optimization model for the multiresource leveling problem with allowed activity splitting[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2011, 137(1): 56-64.
- [33] Kreter S, Rieck J, Zimmermann J. The total adjustment cost problem: Applications, models, and solution algorithms[J]. *J of Scheduling*, 2014, 17(2): 145-160.
- [34] Harris R B. Precedence and Arrow networking techniques for construction[M]. New York: Wiley, 1978: 268.

- [35] Ponz-Tienda J L, Yepes V, Pellicer E, et al. The resource leveling problem with multiple resources using an adaptive genetic algorithm[J]. *Automation in Construction*, 2013, 29(1): 161-172.
- [36] Damci A, Polat G. Impacts of different objective functions on resource leveling in construction projects: A case study[J]. *J of Civil Engineering and Management*, 2014, 20(4): 537-547.
- [37] Pritsker A A B, Waiters L J, Wolfe P M. Multi-project scheduling with limited resources: A zero-one programming approach[J]. *Management Science*, 1969, 16(1): 93-108.
- [38] 刘士新, 王梦光, 唐加福. 求解项目调度中资源水平问题的近似算法[J]. *系统工程学报*, 2002, 17(4): 296-301. (Liu S X, Wang M G, Tang J F. Approximate algorithm for solving resource leveling problems in project scheduling[J]. *J of Systems Engineering*, 2002, 17(4): 296-301.)
- [39] Coughlan E T, Lübbecke M E, Schulz J. A branch-and-price algorithm for multi-mode resource leveling[C]. *Experimental Algorithms*. Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 226-238.
- [40] Afshar-Nadjafi B, Khalaj Z, Mehdizadeh E. A branch and bound approach to solve the preemptive resource leveling problem[J]. *Int J of Manufacturing Engineering*, 2013: 1-7, Article ID 930920.
- [41] Kyriklidis C, Vassiliadis V, Kirytopoulos K, et al. Hybrid nature-inspired intelligence for the resource leveling problem[J]. *Int J of Operational Research*, 2014, 14(3): 387-407.
- [42] Afshar-Nadjafi B, Najjarbashi H, Mehdizadeh E. A branch-and-bound procedure for resource leveling in multi-mode resource constraint project scheduling problem[J]. *Research J of Recent Sciences*, 2012, 1(7): 33-38.
- [43] Alsayegh H, Hariga M. Hybrid meta-heuristic methods for the multi-resource leveling problem with activity splitting[J]. *Automation in Construction*, 2012, 27(11): 89-98.
- [44] Kolisch R, Sprecher A. PSPLIB—A project scheduling problem library[J]. *European J of Operational Research*, 1996, 96(1): 205-216.
- [45] Kolisch R, Schwindt C, Sprecher A. Benchmark instances for project scheduling problems[C]. *Project Scheduling: Recent Models, Algorithms, and Applications*. Boston: Kluwer, 1999: 197-212.
- [46] Schwindt C. ProGen/max: A new problem generator for different resource constrained project scheduling problems with minimal and maximal time lags[R]. Karlsruhe: Institute for Economic Theory and Operations Research, Universitat Karlsruhe, 1995.
- [47] Schwindt C. Generation of resource-constrained project scheduling problems subject to temporal constraints[R]. Karlsruhe: Institute for Economic Theory and Operations Research, University Karlsruhe, 1998.
- [48] Demeulemeester E, Vanhoucke M, Herroelen W. RanGen: A random network generator for activity-on-the-node networks[J]. *J of Scheduling*, 2003, 6(1): 17-38.
- [49] Ahuja H. Construction performance control by networks[M]. New York: John Wiley and Sons, 1976: 316.
- [50] 冯允成. 活动网络分析[M]. 北京航空航天大学出版社, 1991: 269. (Feng Y C. Activity network analysis[M]. Beihang University Press, 1991: 269.)
- [51] Younis M A, Saad B. Optimal resource leveling of multi-resource projects[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1996, 31(1): 1-4.
- [52] Christodoulou S E, Ellinas G, Michaelidou-Kamenou A. Minimum moment method for resource leveling using entropy maximization[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2009, 136(5): 518-527.
- [53] 梁燕, 金焯. 求解紧急事件调度资源水平问题的启发式算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(6): 1165-1171. (Liang Y, Jin Y. Heuristic algorithm for resource leveling problem in emergency scheduling[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(6): 1165-1171.)
- [54] Leu S S, Chen A T, Yang C H. A fuzzy optimal model for construction resource leveling scheduling[J]. *Canadian J of Civil Engineering*, 1999, 26(6): 673-684.
- [55] Leu S S, Hung T H. An optimal construction resource leveling scheduling simulation model[J]. *Canadian J of Civil Engineering*, 2002, 29(2): 267-275.
- [56] 张连营, 张金平, 王亮. 工程项目资源均衡的遗传算法及其 Matlab 实现[J]. *管理工程学报*, 2004, 18(1): 52-55. (Zhang L Y, Zhang J P, Wang L. Genetic algorithms based on Matlab of construction project resource leveling[J]. *J of Industrial Engineering/Engineering Management*, 2004, 18(1): 52-55.)
- [57] Masmoudi M, Haït A. Project scheduling under uncertainty using fuzzy modelling and solving techniques[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(1): 135-149.
- [58] 宋玉坚, 叶春明, 黄佐铎. 多资源均衡优化的布谷鸟算法[J]. *计算机应用*, 2014, 34(1): 189-193. (Song Y J, Ye C M, Huang Z Y. Cuckoo search algorithm for multi-resource leveling optimization[J]. *J of Computer Applications*, 2014, 34(1): 189-193.)

- [59] El-Rayes K, Jun D H. Optimizing resource leveling in construction projects[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2009, 135(11): 1172-1180.
- [60] 庞南生, 纪昌明, 乞建勋. 基于MDE资源分时段与活动平移并行的均衡优化[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(6): 130-138.  
(Pang N S, Ji C M, Qi J X. Leveling optimization of parallel adjustment to resource divided period and work translation based on modified differential evolution[J]. *Chinese J of Management Science*, 2009, 17(6): 130-138.)
- [61] 庞南生, 纪昌明, 张艺. 活动多种执行模式下网络计划资源均衡优化模型[J]. *系统工程*, 2009, 27(9): 70-75.  
(Pang N S, Ji C M, Zhang Y. The balanced optimization model of network planning resources based on multiple mode of activity[J]. *Systems Engineering*, 2009, 27(9): 70-75.)
- [62] 谢洁锐, 刘才兴, 周运华. 资源均衡问题的Hopfield解决方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(3): 83-87.  
(Xie J R, Liu C X, Zhou Y H. The Hopfield-based solution for resource-leveling problem[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2006, 26(3): 83-87.)
- [63] Koulinas G K, Anagnostopoulos K P. A new tabu search-based hyper-heuristic algorithm for solving construction leveling problems with limited resource availabilities[J]. *Automation in Construction*, 2013, 31(5): 169-175.
- [64] 李培根, 王建平. 基于活动分割的资源优化研究[J]. *工程管理学报*, 2011, 25(2): 191-194.  
(Li P G, Wang J P. Research on resource optimization based on activity partition[J]. *J of Engineering Management*, 2011, 25(2): 191-194.)
- [65] 庞南生, 纪昌明. 广义时序下活动多模式与离散型资源均衡优化[J]. *系统工程学报*, 2011, 26(4): 538-545.  
(Pang N S, Ji C M. Leveling optimization for multi-mode and discrete resource under generalized precedence relations[J]. *J of Systems Engineering*, 2011, 26(4): 538-545.)
- [66] Jun D H, El-Rayes K. Multiobjective optimization of resource leveling and allocation during construction scheduling[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2011, 137(12): 1080-1088.
- [67] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [68] 徐哲, 李科, 刘荣. 时间和费用不确定的网络计划资源均衡优化[J]. *系统仿真学报*, 2006, 17(10): 2500-2503.  
(Xu Z, Li K, Liu R. Resource leveling optimization of network scheduling under probabilistic time and cost[J]. *J of Systems Simulation*, 2006, 17(10): 2500-2503.)
- [69] Zahraie B, Tavakolan M. Stochastic time-cost-resource utilization optimization using non dominated sorting genetic algorithm and discrete fuzzy sets[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2009, 135(11): 1162-1171.
- [70] Li H, Xu Z, Demeulemeester E. Scheduling policies for the stochastic resource leveling problem[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2015, 141(2): 04014072.1-04014072.9.
- [71] 王长峰. 奥运大型通信保障工程多项目资源平衡数据模型与应用研究[J]. *科研管理*, 2010, 31(2): 162-170.  
(Wang C F. Research on the model and application of group project resource balance for the large communications guarantee engineering of Olympics[J]. *Science Research Management*, 2010, 31(2): 162-170.)
- [72] Megow N, Möhring R H, Schulz J. Decision support and optimization in shutdown and turnaround scheduling[J]. *INFORMS J on Computing*, 2011, 23(2): 189-204.
- [73] Leu S S, Yang C H, Huang J C. Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application[J]. *Automation in Construction*, 2000, 10(1): 27-41.
- [74] Tang Y, Liu R, Sun Q. Two-stage scheduling model for resource leveling of linear projects[J]. *J of Construction Engineering and Management*, 2014, 140(7): 1-10.
- [75] He L, Zhang L. Dynamic priority rule-based forward-backward heuristic algorithm for resource levelling problem in construction project[J]. *J of the Operational Research Society*, 2013, 64(8): 1106-1117.
- [76] Kastor A, Sirakoulis K. The effectiveness of resource levelling tools for resource constraint project scheduling problem[J]. *Int J of Project Management*, 2009, 27(5): 493-500.
- [77] 李洪波, 徐哲. 鲁棒项目调度研究综述[J]. *系统工程*, 2014, 32(2): 123-131.  
(Li H B, Xu Z. Robust project scheduling: A review[J]. *Systems Engineering*, 2014, 32(2): 123-131.)

(责任编辑: 李君玲)