

不确定资源受限项目调度研究综述

王 凌, 郑环宇, 郑晓龙

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘 要: 不确定资源受限项目调度问题(RCPSP)是研究在不确定环境和有限资源约束下如何合理安排项目活动,以实现既定目标的最优化. 不确定 RCPSP 具有很强的工程背景,在学术和应用上均具有很高的研究价值,但存在大规模、强约束、多极小、多目标和不确定等诸多复杂性,求解非常困难. 为此,介绍了不确定 RCPSP 的数学描述和几种具体形式,重点综述了不确定 RCPSP 的算法进展,并归纳了相关的应用成果,最后指出了有待进一步研究的若干方向和内容.

关键词: 资源受限项目调度; 不确定; 模型; 算法

中图分类号: TP18

文献标志码: A

Survey on resource-constrained project scheduling under uncertainty

WANG Ling, ZHENG Huan-yu, ZHENG Xiao-long

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: WANG Ling, E-mail: wangling@tsinghua.edu.cn)

Abstract: The resource-constrained project scheduling problem(RCPSP) under uncertainty is to study the arrangement of activities with limited resources under the uncertain environment so as to optimize certain objectives. The RCPSP under uncertainty is of strong engineering background, which has great research significance in both the academic and the application fields. The problem has the complexities such as large scale, strong constraint, multiple local minima, multiple objective and uncertainty, which make it very difficult to be solved. Thus, the mathematical description of the RCPSP under uncertainty and some of its specific forms are introduced, and the advances in algorithms for the RCPSP under uncertainty are reviewed, and some related applications are summarized. Finally, some future research directions and contents are pointed out.

Key words: resource-constrained project scheduling; uncertainty; model; algorithm

0 引 言

不确定资源受限项目调度问题(不确定 RCPSP)研究如何在环境不确定的情况下,通过合理利用资源和调度活动实现既定目标的最优化. 不确定 RCPSP 具有很强的工程背景,涉及诸多工业和生活领域,例如化工、半导体生产、物流、钢铁制造、工程管理、芯片制造、软件开发、铁路调度、港口调度以及飞机航线制定和大型运动会比赛安排等. 不确定 RCPSP 是经典 RCPSP^[1]的扩展. 除经典问题存在的大规模、强约束、多极小和多目标等复杂性,活动、资源和环境等环节存在的不确定性使得不确定 RCPSP 具有更高的求解难度,是一个更具挑战性的复杂优化问题. 一方面,不确定 RCPSP 在数学上属于 NP-hard 问题;另

一方面,不确定 RCPSP 更切合实际问题. 因此,不确定 RCPSP 的研究具有非常重要的学术意义和实际应用价值.

迄今,不确定 RCPSP 的研究已经取得了很多成果. Herroelen 等^[2]主要针对 10 年前的不确定项目调度问题的研究进展给予了综述,但没有专门对资源受限的问题给予重点考虑. 考虑到近 10 年不确定资源受限项目调度问题得到了诸多领域的密切关注,相关研究得到了迅速发展,尤其在求解算法方面取得了很大进展,本文主要总结近些年国内外有关不确定 RCPSP 的代表性研究成果,介绍不确定 RCPSP 的问题描述和几种具体形式,重点综述相关算法的研究进展和应用成果,并提出了不确定 RCPSP 有待进一步

收稿日期: 2013-09-21; 修回日期: 2014-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174189); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130002110057).

作者简介: 王凌(1972—),男,教授,博士生导师,从事智能优化调度理论与方法等研究; 郑环宇(1989—),男,硕士生,从事智能优化调度的研究.

研究的若干方向和内容.

1 不确定 RCPSP 的描述

不确定 RCPSP 的项目网络可用单节点 (activity-on-node, AON) 网络图 $G=(\mathbf{N}, \mathbf{A})$ 描述. 其中: G 表示网络, 节点 $\mathbf{N}=\{0, 1, \dots, n\}$ 表示活动, 边 $\mathbf{A}=\{(i, j), i, j \in \mathbf{N}\}$ 表示活动的优先约束. 活动 0 和活动 n 为虚拟活动, 用于表示项目的开始和结束, 其持续时间及资源需求均为 0. 活动 $j=1, 2, \dots, n-1$ 则为实际活动, 其开始时间为不确定变量 s_j , 持续时间为不确定变量 d_j , $\mathbf{d}=\{d_1, d_2, \dots, d_{n-1}\}$ 表示活动时间集合, 它的一个实现 $d=\{d_1, d_2, \dots, d_{n-1}\} \in \mathbf{R}_+^{n-1}$ 称为一次采样或一个场景, 为确定性向量. 在某次实现中, 活动 $j \in \mathbf{N}$ 的实际开始时间为确定性常量. \mathbf{S}_t 表示在时刻 t 执行中的活动集合, \mathbf{P}_j 表示活动 j 的前驱活动集合. 项目共包含 K 种可更新资源, 对于资源 $k=1, 2, \dots, K$, 项目执行时提供 a_k 单元资源, a_k 为变量或常量.

考虑如下假设: 1) 活动优先约束为结束-开始型约束, 即对活动 $j \in \mathbf{N}$, 当其前驱活动 \mathbf{P}_j 结束后才能执行, 且不考虑准备时间; 2) 以最小化项目最大完工时间为目标; 3) 活动均不可中断, 即一旦开始则必须执行到结束; 4) 只考虑可更新资源. 因此, 不确定 RCPSP 可描述如下:

$$\min s_n. \quad (1)$$

$$\text{s.t. } s_i + d_i \leq s_j, \forall (i, j) \in \mathbf{A}; \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \mathbf{S}_t} r_{jk} \leq a_k, \forall t, \forall k. \quad (3)$$

其中: 式 (1) 为目标函数; 式 (2) 为活动间优先约束关系; 式 (3) 为资源约束, 即任意时刻执行中的活动所占用的某种可更新资源 r_{jk} 的总和不能超过此种可更新资源总量.

需要指出的是, 考虑到不确定性的来源和表示方式的不同, 对于特定的问题, 上述描述可以有不同的具体形式.

2 不确定 RCPSP 的具体形式

2.1 分类原则

由于不确定性的存在, 人们通常采用前摄调度 (proactive schedule) 和反应调度 (reactive schedule) 来处理不确定性. 前摄调度通过考虑不确定性的统计特征建立预测调度, 其目的是减小不确定扰动对调度的影响. 称确定性 RCPSP 和加入前摄调度生成的调度为基线调度 (baseline schedule), 以预测项目执行时活动的实际开始时间, 而在不确定环境下的活动开始时间与基线调度有所不同. 可以加入反应调度处理执行

过程中出现的扰动, 对调度进行校正或再优化. 通常, 基线调度都需要反应调度对实际执行时出现的扰动进行处理. 基线调度的鲁棒性越强, 反应调度需要调整的幅度越小. 极端情况下也可只存在反应调度, 不依赖基线调度直接对出现的扰动进行资源和活动的重新规划.

根据不确定性的表示方法、基线调度方法和项目执行时调度方法, 现有不确定 RCPSP 主要分为 3 类: 模糊 RCPSP、随机 RCPSP 和鲁棒 RCPSP, 如表 1 所示.

表 1 不确定 RCPSP 分类

问题形式	表示方法	基线调度方法	执行的调度方法
模糊 RCPSP	模糊数	模糊调度	无
随机 RCPSP	随机变量	无	调度策略
鲁棒 RCPSP	随机变量	仅确定性调度	反应调度
	随机变量	加入前摄调度	反应调度

2.2 模糊 RCPSP

研究模糊 RCPSP 的学者认为, 采用模糊数描述活动时间更加适合. 理由是, 活动时间的精确分布因历史数据的缺失通常难以得到, 而由专家或技术人员预测的活动时间却通常是模糊的. 模糊 RCPSP 是对不确定 RCPSP 基于模糊数进行建模, 只生成基于模糊数的基线调度, 调度包含了项目实际执行的各种实现.

模糊数是描述元素对集合隶属度的函数. 对于确定性集合 \mathbf{A} , 隶属度函数 $\mu_A: \mathbf{X} \rightarrow \{0, 1\}$, 若 $x \in \mathbf{A}$, 则 $\mu_A = 1$, 否则 $\mu_A = 0$. 模糊数情况下, 事件 $x \in \mathbf{A}$ 为不确定事件, 用隶属度函数表示. 定义模糊数 $\tilde{\mathbf{A}}$ 的 α 截集 (α -cut) 为 $\tilde{\mathbf{A}}^\alpha = \{x \in \mathbf{X} \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$, 所有 $\alpha \in (0, 1]$ 的截集均为闭区间. 模糊 RCPSP 的调度为模糊调度, 即所有活动的开始和结束时间均为模糊数, 它涵盖了所有确定性调度方案.

模糊 RCPSP 通常可描述如下:

$$\min \tilde{s}_n. \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \tilde{s}_i + \tilde{d}_i \leq \tilde{s}_j, \forall (i, j) \in \mathbf{A}; \quad (5)$$

$$\sum_{j \in \mathbf{S}_t} r_{jk} \leq a_k, \forall t, \forall k. \quad (6)$$

其中 $\tilde{t}, \tilde{s}_j, \tilde{d}_j, j \in \mathbf{N}$ 均用模糊数表示.

考虑到一些实际问题, 上述模糊 RCPSP 模型可扩充为若干特定问题.

1) 模糊项目网络的关键路径问题. 在大型项目管理中, 关键路径法/计划评审技术 (CPM/PERT) 应用广泛. 将 CPM/PERT 应用到模糊项目网络, 需要计算模糊项目网络的关键路径. Chen 等^[3]根据各活动的浮动时间定义了活动在模糊项目网络中的关键性, 并根据

路径总关键性的的大小确定关键路径. Chen等^[4]对此问题给出了线性规划模型.

2) 模糊 RCPSP 的关键链问题. 因项目结构和规模的复杂性, 关键链法 (CCM) 克服了 CPM/PERT 方法不能满足实际需要的缺陷, 形成了一套新的项目管理技术. Long等^[5]提出了求解模糊 RCPSP 的关键链法.

3) 模糊项目调度时间-成本平衡问题. 在项目调度中, 当活动时间需要缩减时通常会带来成本的增加, 时间-成本平衡问题可以实现最小化项目最大完成时间与最小化成本两个目标的平衡. Leu等^[6]考虑活动成本在承包商完成、自己完成、合作完成3种不同情况, 根据 α 截集给出了活动时间-成本的关系. Chen等^[7]认为, 活动时间的缩减与成本的增加存在线性关系, 并将模糊项目调度时间-成本平衡问题建模为模糊线性规划问题.

2.3 随机 RCPSP

随机 RCPSP^[8]将活动时间假设为分布已知的随机变量, 通常由专家或工程师给出活动时间的分布, 在项目开始及每个活动结束时进行决策, 决策方法称为调度策略. 随机 RCPSP 研究的重点是提出高效的调度策略, 以合理安排活动和资源, 进而实现目标的优化.

2.3.1 问题建模

随机 RCPSP 的调度策略 Π 获得的调度为各活动的实际开始时间 $\Pi(\mathbf{d}) = (s_1, s_2, \dots, s_n)$. 记项目的最大完工时间为 $C_{\max}(\Pi(\mathbf{d})) = s_n$, 则通常目标为最小化项目最大完工时间的期望 $E(C_{\max}(\Pi(\mathbf{d})))$.

随机 RCPSP 通常可描述如下:

$$\min E(s_n). \quad (7)$$

$$\text{s.t. } s_i + d_i \leq s_j, \forall (i, j) \in A; \quad (8)$$

$$\sum_{j \in S_i} r_{jk} \leq a_k, \forall i, \forall k. \quad (9)$$

式(7)中 s_n 为项目的最大完工时间, 其期望通常用 M 个实现的最大完工时间 $s_n^m (m = 1, 2, \dots, M)$ 的均值进行估计, 常设置 $M = 1000$.

2.3.2 调度策略

对于随机 RCPSP, 人们提出了多种调度策略. 其中最早开始策略 (C^{ES})^[9]、预选策略 (C^{PS})^[10-11]和线性预选策略 (C^{LPS})^[12]均基于最小禁忌集. 由于最小禁忌集会随着活动数量的增加而指数增加, C^{ES} 、 C^{PS} 和 C^{LPS} 会导致求解大规模问题时的计算时间无法接受. 近期研究主要采用以下3种策略:

1) 基于资源调度策略 (C^{RB}). C^{RB} 是并行调度生

成机制 (PSGS) 的直接扩展. 在任何决策时间点, C^{RB} 都将满足资源受限和活动优先约束的未调度活动按活动列表 (AL) 顺序进行安排.

2) 基于活动调度策略 (C^{AB}), 或称任务优先策略 (C^{JB})、随机串行调度生成机制 (SSGS). 它是串行调度生成机制 (SSGS) 的直接扩展. 在决策时间点, C^{AB} 按照活动列表 AL 顺序安排活动尽早开始, 即对于任意活动 $i, j \in N$, 若 $i \prec_{AL} j$, 则 $\Pi(\mathbf{d}; AL)_i \leq \Pi(\mathbf{d}; AL)_j$.

3) 预处理调度策略 (C^{PP})^[8]. 它结合了 C^{RB} 和 C^{ES} , 在预处理阶段添加一些额外的活动优先约束到网络中, 以解决资源冲突, 并在项目进行时做决策. 实验结果表明, C^{RB} 和 C^{PP} 在活动时间方差较大时优于 C^{AB} .

2.4 鲁棒 RCPSP

鲁棒 RCPSP 考虑活动时间、可更新资源量等因素的随机性. 在项目执行前先产生基线调度, 可直接将其视作确定性问题进行调度, 或加入前摄调度以提升其鲁棒性. 在项目执行中, 反应调度进一步调整所生成的调度, 使得鲁棒性指标达到最优.

鲁棒 RCPSP 考虑多种不确定性原因^[13-14], 例如: 活动实际时间超过或少于预计时间, 资源临时性短缺, 资金不足, 活动开始时间或交货期变动, 新活动加入项目或舍弃旧活动以及活动拖期等. 目前的研究大多集中在如下两种原因: 1) 不确定的活动时间. 用分布已知的随机变量表示, 项目执行时, 活动实际开始时间与前摄调度预定的开始时间产生偏差. 2) 不确定的资源. 资源单元在使用过程中发生随机故障而导致活动不能按计划进行, 故障时间与修复时间均为分布已知的随机变量. 至于活动优先约束的变化、活动的随机增加或减少、活动资源需求的变化以及活动或项目交货期的变更等情况, 目前相关的研究还较少.

鲁棒性目标主要分为质量鲁棒性和解的鲁棒性^[15]. 质量鲁棒性关注项目的最大完工时间, 包括最大完工时间的期望和项目按时完成的概率等. 解的鲁棒性主要关注活动实际开始时间与预定时间的偏差. 也有文献兼顾质量鲁棒性和解的鲁棒性, 将问题建模为多目标优化问题.

2.4.1 活动时间不确定问题

在项目执行过程中, 活动的实际开始时间为随机变量 $s_j, j = 1, 2, \dots, n$, 它可能与前摄调度的开始时间 s_j 存在差异. 假定 $s_n = \delta_n$, 其中 δ_n 为项目交货期, 则解的鲁棒性目标可定义为最小化支出 $\sum w_j E | s_j - s_j |$ 、最大化总浮动时间、最大化最小浮动时间、最大化最小浮动时间与活动时间之比、活动按时完成的

概率 $P(s_j \leq \sigma_j)$ 等. 其中: w_j 为活动交货期的权重, σ_j 为活动交货期. 质量鲁棒性指标通常定义为最大化项目按时完成概率 $P(s_n \leq \delta_n)$ 、最小化项目最大完工时间的期望等.

2.4.2 资源不确定问题

在活动时间不确定问题的基础上, 进一步考虑资源的不确定性. Lambrechts 等^[16]提出了资源不确定鲁棒 RCPSP. 其中: 可更新资源为随机变量, 资源出现故障和维修完成事件为更新过程. 问题可建模如下:

$$\min \sum_{i \in N} w_i E |s_i - s_j|. \quad (10)$$

$$\text{s.t. } s_i + d_i \leq s_j, \forall (i, j) \in A; \quad (11)$$

$$\sum_{j \in S_t} r_{jk} \leq a_k, \forall t, \forall k; \quad (12)$$

$$s_n \leq \delta_n. \quad (13)$$

其中式 (13) 表示项目必须在项目交货期之前完成.

2.4.3 鲁棒 RCPSP 的扩充

根据实际情况, 鲁棒 RCPSP 有如下扩充.

1) 多模式 RCPSP 反应调度问题^[17].

多数研究都假设执行活动的模式只有一种, 即活动的时间和资源惟一. 然而, 项目调度通常可增加资源以缩短活动时间, 即采用多种模式执行活动. 多模式 RCPSP 反应调度问题可描述为: 活动 $j = 1, 2, \dots, n-1$ 在 $m_j \in M_j$ 模式下的时间为 d_{jm_j} . 共有 K^p 种可更新资源以及 K^v 种不可更新资源, 第 k 种可更新资源有 a_k^p 单位, 活动 j 在 $m_j \in M_j$ 模式下执行时需要 $r_{jm_j k}^p$ 单位; 第 l 种不可更新资源有 a_l^v 单位, 活动 j 在 $m_j \in M_j$ 模式下执行时需要 $r_{jm_j l}^v$ 单位. 在前摄调度基础上, 活动开始时间为 s_1, s_2, \dots, s_n , 执行模式为 m_1, m_2, \dots, m_n , 要求给出反应调度的活动开始时间 s'_1, s'_2, \dots, s'_n , $s'_j \geq s_j$, 以及执行模式 m'_1, m'_2, \dots, m'_n , 使得支出 $\sum w_j (s'_j - s_j) + \sum c_{jm'_j}$ 最小. 其中: $c_{jm'_j}$ 为活动 j 从模式 m_j 转到 m'_j 的支出, w_j 为活动拖期单位时间支出.

2) 随机 RCPSP 前摄调度问题^[18].

项目调度在随机环境下有时也关注其鲁棒性指标. 随机 RCPSP 前摄调度问题可描述为: 活动时间为分布已知的随机变量 $d_j, j=1, 2, \dots, n-1$, 开始时间为随机变量 $s_j, j=1, 2, \dots, n$, 要求给出调度策略 Π 、前摄调度、前摄调度活动开始时间 $\vec{s} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, 使得支出 $C(\Pi, \vec{s}) = \sum E(c_j^+(s_j - s_j) + c_j^-(s_j - s_j))$ 最小. 其中 c_j^+ 和 c_j^- 分别为活动拖期和提前完成的单位时间支出.

为了测试算法性能, 学术界主要采用测试数据集

Patterson 问题库^[19]和 PSPLIB^[20]生成不确定 RCPSP 进行数值仿真研究. 其中: Patterson 问题库包含 110 个项目调度问题, 每个问题有 7~50 个活动、1~3 种资源. Patterson 问题库提出较早, 应用广泛, 但不足以反映现实生产中的实际需求. PSPLIB 为由一套软件生成的标准问题集, 涵盖了各种参数组合, 包含 480 个问题, 每个问题有 30 个活动、4 种可更新资源. 近 10 年的文献大多采用 PSPLIB 开展研究, 并且加入了包含 60、90 和 120 个活动的中大规模问题. 尤其是近期文献^[8,21-23], 针对随机 RCPSP 均使用 PSPLIB^[20] 中 120 个活动的 600 个问题进行测试, 其中活动持续时间以确定性问题的活动时间作为期望, 考虑了不同方差下的几种分布, 包括均匀分布、指数分布及贝塔分布.

3 不确定 RCPSP 算法研究进展

与问题模型研究相比, 不确定 RCPSP 的算法研究相对比较丰富, 主要包括精确求解算法、启发式算法和智能算法等 3 大类算法.

3.1 精确求解算法

精确求解算法虽然在理论上能够得到最优解, 但对于大规模问题往往因计算量和计算时间过于庞大而无法应用, 因此通常只用于解决小规模问题或复杂度较低的中规模问题. 现有的精确算法以分支定界法 (B&B) 为主, 算法利用树形结构将解空间划分成多个分支后, 再通过定界去掉较差的解分支来缩小搜索空间.

在模糊 RCPSP 方面, Chen 等^[4]提出了基于线性规划模型及基于模糊数比较的模糊网络关键路径分析方法. 针对最小时间滞后区间数网络, Yakhchali 等^[24]给出了多项式算法来求解最晚开始时间, 以确定模糊 RCPSP 的关键路径. 针对模糊 RCPSP 时间-成本平衡问题, Chen 等^[7]提出了最小总冲突费用的隶属度函数, 并用线性规划进行建模和求解.

在随机 RCPSP 方面, Golenko-Ginzburg 等^[25]使用 0-1 整数规划最大化活动对项目最大完工时间期望的贡献. 对于每个活动, 贡献由项目平均最大完工时间及活动在关键路径的概率决定. Stork^[12,26]采用 C^{ES} 、 C^{PS} 、 C^{LPS} 、 C^{JB} 等调度策略结合分支定界法求解, 并测试了 20 个活动的 480 个问题.

在鲁棒 RCPSP 方面, Bruni 等^[27]指出, 在任意活动不按时完成概率小于设定阈值的约束下, 目标是 minimized 项目最大完工时间. 作者采用无前摄调度的反应调度, 基于 PSGS 提出了动态调度生成机制, 将活动完成时间转化为非线性连续问题或线性规划问题^[27]. Deblaere 等^[17]研究了多模式 RCPSP 反应调度问题, 并

提出了精确算法. Kobylański 等^[28]认为, 最大化总浮动时间并不能保证鲁棒性, 并给出了反例证明其观点, 继而提出了最大化最小浮动时间、最大化最小浮动时间与活动时间之比两个新的目标, 并建立了非线性规划模型, 利用优化软件求解.

3.2 启发式算法

启发式算法采用规则快速获得问题的解, 譬如基于优先级的规则, 但通常难以保证解的质量. 因为不确定 RCPSP 属于 NP-hard 问题, 解空间规模随着问题规模的增加呈指数增长, 因此启发式算法在求解中大规模问题上得到了广泛研究.

在模糊 RCPSP 方面, Hapke 等^[29-30]给出了模糊 RCPSP 模型, 并提出了几种启发式算法和模糊 PSGS 解码策略, 同时用示例进行了测试并给出了甘特图. Bhaskar 等^[31]基于距离比较模糊数, 指出在 α 截集参数不同的情况下关键路径可能改变, 并提出了基于关键路径和活动资源需求的启发式算法. Conde^[32]建立了关键路径的最小最大后悔值问题模型, 并给出了相应的启发式算法.

在随机 RCPSP 方面, Golenko-Ginzburg 等^[33]利用精确算法求解小规模问题, 并提出了求解大规模问题的启发式算法. Rabbani 等^[34]提出了求解随机 RCPSP 的一种基于关键链的启发式算法以及后向调度方法.

在鲁棒 RCPSP 方面, Van de Vonder 等^[15]研究了无资源约束活动网络 (PERT 网络) 下解的鲁棒性与项目最大完工时间期望的平衡问题, 使用启发式算法产生前摄调度, 并研究了网络结构和时间缓冲对解的鲁棒性和质量鲁棒性的影响. Van de Vonder 等^[35]将文献 [15] 的研究扩展到 RCPSP 网络, 提出了相应的启发式算法. 另外, Van de Vonder 等^[36]研究了解的鲁棒性目标下的反应调度, 反应调度方法均为基于随机 RCPSP 中的调度策略, 即随机 SSGS^[21]和随机 PSGS. Van de Vonder 等^[37]还研究了两种不同前摄-反应调度在解的鲁棒性与最大项目按时完成概率的平衡目标问题. 前摄调度分别使用了关注质量鲁棒性的分支定界法和优先规则以及关注解的鲁棒性的启发式算法^[35], 而反应调度则分别使用确定性 RCPSP 重新调度法、最早开始调度策略、基于活动的调度策略、基于解的鲁棒性指标的重新调度. 文献 [38] 则通过实验比较了几种启发式前摄调度算法. Chtourou 等^[39]将多目标问题分成两阶段求解, 首先最小化项目最大完工时间, 然后再满足鲁棒性指标. Deblaere 等^[18]研究了随机 RCPSP 前摄调度问题, 给出了调度策略, 并通过调度策略得到了最优前摄调度.

3.3 智能算法

启发式算法虽然能够在短时间内获得解, 但对于复杂问题却难以保证解的全局质量, 通常只能得到局部最优解. 随着计算智能的发展, 已有多种智能方法被提出并用于解决不确定 RCPSP.

对于智能算法而言, 解的表达方式 (编码) 是首要的任务. 目前不确定 RCPSP 的解的表达方式主要有活动列表^[40]和随机键^[41]. 在搜索算法方面, 现有智能算法主要还是传统的禁忌搜索 (TS)、遗传算法 (GA)、模拟退火 (SA) 等.

在 TS 方面, Tsai 等^[42]提出了求解随机 RCPSP 的 TS 算法, 采用 Patterson 问题库^[19]进行测试, 活动时间的随机变量选择贝塔分布, 并用乐观、最可能、悲观 3 种情况估计参数. Al-Fawzan 等^[43]考虑了最大化总浮动时间和最大完工时间期望两个目标, 提出了多目标 TS. Lambrechts 等^[16]讨论了资源缓冲、时间缓冲对前摄调度的影响, 采用活动列表调度和 TS 两种方法作为反应调度. 针对资源不确定鲁棒 RCPSP, Lambrechts 等^[44]给出了一种新的基于浮动时间的评价函数, 提出了基于 TS 的前摄调度算法, 并在文献 [45] 中考虑了用不同方法设置时间缓冲. 实验表明, TS 在时间充足的情况下可得到最优结果.

在 GA 方面, Leu 等^[6]提出了不同决策风险下的模糊 RCPSP 时间-成本平衡问题的遗传算法. Long 等^[5]在确定性调度中加入项目缓冲区, 结合启发式规则和 GA 对模糊 RCPSP 进行了关键路径分析. Ballestin^[21]提出了随机 SSGS 生成调度, 基于后悔值采样生成初始解, 并利用 GA 求解随机 RCPSP. 在方差和计算量限制都很小时, 使用 SSGS 的算法可得到随机问题的满意解, 否则需要使用随机模型求解. 在测试用于估计期望的场景数与算法性能的关系时发现, 适当减少场景数虽然使得每次估计变得粗糙, 但总体上因增加了评价解的个数而能够取得更好的性能. Ashtiani 等^[8]针对随机 RCPSP 提出了预处理调度策略, 并结合 GA 提出了两阶段算法, 仿真表明对方差较大的问题明显优于其他算法.

在 SA 方面, Hapke 等^[46]针对多目标模糊组合优化问题提出帕雷托 SA, 并以多目标模糊 RCPSP 为例开展数值研究. Abbasi 等^[47]针对多目标鲁棒 RCPSP 设计了有效的 SA.

相对 TS、GA 和 SA, 其他智能算法的研究相对较少. 针对随机 RCPSP, Ballestin 等^[22]提出了贪婪随机自适应搜索算法 (GRASP), 并考虑了不同目标函数之间的关系, 同时讨论了给定调度策略生成的调度的分布, 实验表明大多数情况下分布接近正态分布.

Tahooneh 等^[23]针对随机 RCPSP 提出了一种新颖人工蜂群算法(ABC), 实验结果表明算法在问题方差较大时的效果优于其他算法.

4 不确定 RCPSP 的应用

随着模型和算法研究不断深入, 不确定 RCPSP 的研究成果在多个领域也得以应用. 限于篇幅, 在此仅介绍几项具有代表性的应用.

Hapke 等^[29]将软件开发问题归结为模糊 RCPSP 问题, 并用启发式算法获得了乐观调度和悲观调度. Ozdamar 等^[48]建立了软件开发问题的非线性模型, 用模糊数表示活动时间和活动优先约束, 提出了相应的启发式算法, 并给出了一个案例的具体结果.

针对最小化产品研发风险问题, Wang^[49-50]提出了定向搜索(beam search)算法, 用于求解以最小化项目拖期为目标的情况, 并提出了模糊鲁棒 RCPSP 问题的遗传算法. Choi 等^[51]则对问题的不确定性用离散时间马尔可夫链建模, 进而利用动态规划方法求解包含 5 个项目 17 个活动的研发问题.

另外, 张等^[52]以大型水轮发电机制造项目为实例, 应用 GA 求解了不确定资源约束下的鲁棒 RCPSP.

5 结论与展望

不确定 RCPSP 具有诸多复杂性, 求解难度很大, 但在学术和应用上都具有重要的研究价值. 机遇与挑战并存, 纵观不确定 RCPSP 在问题描述、算法设计和理论、应用等方面的研究进展, 尚有许多工作有待深入开展.

1) 不确定 RCPSP 的模型研究.

首先, 尽管不确定 RCPSP 考虑到实际问题的不确定性, 模型不断丰富, 但仍与现实存在较大的差距, 假设太多和简化过度. 笔者认为, 应该强调模型的实用性和可扩展性, 在注重对不确定性建模的同时, 加强多目标问题、多模式问题等现实问题的研究. 鉴于模糊 RCPSP、鲁棒 RCPSP 尚未形成统一的评价标准和衡量体系, 研究合理的评价体系同样具有重大意义.

其次, 目前随机 RCPSP 的研究大多以最小化项目最大完成时间为目标, 较少涉及其他目标, 例如库存成本、活动和项目拖期、资源利用率等. 同时, 在多目标、多项目、多模式等方面也有待进一步扩展. 目前, 鲁棒 RCPSP 主要研究活动时间和资源的不确定性, 对于活动网络的不确定性、交货期的变动等的研究尚有待加强.

2) 不确定 RCPSP 的算法研究.

由于不确定 RCPSP 属于 NP-hard 问题, 应该加强高效启发式算法的研究. 这类工作不仅可以丰富不确

定 RCPSP 的启发式规则, 而且通过对规则的深入研究, 有利于对问题的理解, 进而可以为智能算法的设计提供指导.

智能算法是解决中大规模问题的有效途径, 但目前的智能算法种类相对较少, 方法相对陈旧. 首先, 应该注重编码和解码的研究, 有效的编码策略有利于设计更高效的搜索操作, 高效的解码策略有利于快速评价解的性能. 其次, 应该丰富不确定 RCPSP 的智能算法的设计, 尤其注重量子计算、蛙跳、人工免疫、微粒群、差分进化、和声搜索、果蝇算法、教学优化、化学反应等新型智能算法. 同时, 应该加强对不确定 RCPSP 的特性分析, 提出有指导性的改良型局部搜索方法, 进而提出更有效的更能够适应问题的混合智能算法. 另外, 随着分布式计算、云计算技术的快速发展, 围绕大规模不确定 RCPSP 提出基于云计算的分布式智能算法很有意义.

3) 不确定 RCPSP 的应用研究.

理论研究能够指导应用, 同时应用研究能够促进理论和算法研究的发展. 目前, 不确定 RCPSP 的相关理论和方法在某些实际工程问题上得到了初步应用, 但成果有待丰富, 研究有待深入. 一方面, 要注重将已有的不确定 RCPSP 的研究成果应用于实际问题, 尤其是多目标、多项目等复杂问题, 强调研究工作的可应用性和有效性; 另一方面, 要注重将不同领域的实际问题建立为不确定 RCPSP, 进而采用现有方法或研究新的方法来解决问题, 从而拓宽不确定 RCPSP 的应用领域.

相信, 随着控制科学、计算机科学、管理科学、人工智能以及诸多工程学科的理论和技术的发展, 不确定 RCPSP 的研究将会得到更多的关注, 模型将更加完善和实用, 理论与算法将更加丰富和高效, 应用将更加广泛和有效, 前景光明.

参考文献(References)

- [1] 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 of study on resource-constrained project scheduling[J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 641-650.)
- [2] Herroelen W, Leus R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials[J]. European J of Operational Research, 2005, 165(2): 289-306.
- [3] Chen C T, Huang S F. Applying fuzzy method for measuring criticality in project network[J]. Information Sciences, 2007, 177(12): 2448-2458.
- [4] Chen S P, Hsueh Y J. A simple approach to fuzzy critical path analysis in project networks[J]. Applied Mathematical

- Modelling, 2008, 32(7): 1289-1297.
- [5] Long L D, Ohsato A. Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty[J]. *Int J of Project Management*, 2008, 26(6): 688-698.
- [6] Leu S S, Chen A T, Yang C H. A GA-based fuzzy optimal model for construction time-cost trade-off[J]. *Int J of Project Management*, 2001, 19(1): 47-58.
- [7] Chen S P, Tsai M J. Time-cost trade-off analysis of project networks in fuzzy environments [J]. *European J of Operational Research*, 2011, 212(2): 386-397.
- [8] Ashtiani B, Leus R, Aryanezhad M B. New competitive results for the stochastic resource-constrained project scheduling problem: Exploring the benefits of pre-processing[J]. *J of Scheduling*, 2011, 14(2): 157-171.
- [9] Radermacher F J. Scheduling of project networks[J]. *Annals of Operations Research*, 1985, 4(1): 227-252.
- [10] Igelmund G, Radermacher F. Preselective strategies for the optimization of stochastic project networks under resource constraints[J]. *Networks*, 1983, 13(1): 1-28.
- [11] Igelmund G, Radermacher F. Algorithmic approaches to preselective strategies for stochastic scheduling problems[J]. *Networks*, 1983, 13(1): 29-48.
- [12] Stork F. Branch-and-bound algorithms for stochastic resource-constrained project scheduling[R]. Berlin: Technical University of Berlin, 2000.
- [13] Wang J. Constraint-based schedule repair for product development projects with time-limited constraints[J]. *Int J of Production Economics*, 2005, 95(3): 399-414.
- [14] Zhu G, Bard J F, Yu G. Disruption management for resource-constrained project scheduling[J]. *J of the Operational Research Society*, 2004, 56(4): 365-381.
- [15] Van de Vonder S, 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.
- [16] Lambrechts O, Demeulemeester E, Herroelen W. Proactive and reactive strategies for resource-constrained project scheduling with uncertain resource availabilities[J]. *J of Scheduling*, 2008, 11(2): 121-136.
- [17] Deblaere F, Demeulemeester E, Herroelen W. Reactive scheduling in the multi-mode rcpsp[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(1): 63-74.
- [18] Deblaere F, Demeulemeester E, Herroelen W. Proactive policies for the stochastic resource-constrained project scheduling problem[J]. *European J of Operational Research*, 2011, 214(2): 308-316.
- [19] Patterson J H. A comparison of exact approaches for solving the multiple constrained resource, project scheduling problem[J]. *Management Science*, 1984, 30(7): 854-867.
- [20] Kolisch R, Sprecher A. PSPLIB—A project scheduling problem library: Or software-orsep operations research software exchange program[J]. *European J of Operational Research*, 1997, 96(1): 205-216.
- [21] Ballestin F. When it is worthwhile to work with the stochastic rcpsp?[J]. *J of Scheduling*, 2007, 10(3): 153-166.
- [22] Ballestin F, Leus R. Resource-constrained project scheduling for timely project completion with stochastic activity durations[J]. *Production and Operations Management*, 2009, 18(4): 459-474.
- [23] Tahooneh A, Ziarati K. Using artificial bee colony to solve stochastic resource constrained project scheduling problem[C]. *Advances in Swarm Intelligence*. Berlin: Springer, 2011: 293-302.
- [24] Yakhchali S H, Ghodsypour S H. Computing latest starting times of activities in interval-valued networks with minimal time lags[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 200(3): 874-880.
- [25] Golenko-Ginzburg D, Gonik A. Stochastic network project scheduling with non-consumable limited resources[J]. *Int J of Production Economics*, 1997, 48(1): 29-37.
- [26] Stork F. Stochastic resource-constrained project scheduling[D]. Berlin: Technical University of Berlin, 2001.
- [27] Bruni M E, Beraldi P, Guerriero F, et al. A heuristic approach for resource constrained project scheduling with uncertain activity durations[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(9): 1305-1318.
- [28] Kobylański P, Kuchta D. A note on the paper by Ma Al-Fawzan and M Haouari about a bi-objective problem for robust resource-constrained project scheduling[J]. *Int J of Production Economics*, 2007, 107(2): 496-501.
- [29] Hapke M, Jaskiewicz A, Slowinski R. Fuzzy project scheduling system for software development[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, 67(1): 101-117.
- [30] Hapke M, Slowinski R. Fuzzy priority heuristics for project scheduling[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 83(3): 291-299.
- [31] Bhaskar T, Pal M N, Pal A K. A heuristic method for rcpsp with fuzzy activity times[J]. *European J of Operational Research*, 2011, 208(1): 57-66.
- [32] Conde E. A minmax regret approach to the critical path method with task interval times[J]. *European J of Operational Research*, 2009, 197(1): 235-242.
- [33] Golenko-Ginzburg D, Gonik A. A heuristic for network project scheduling with random activity durations

- depending on the resource allocation[J]. *Int J of Production Economics*, 1998, 55(2): 149-162.
- [34] Rabbani M, Fatemi Ghomi S, 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.
- [35] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W, et al. The trade-off between stability and makespan in resource-constrained project scheduling[J]. *Int J of Production Research*, 2006, 44(2): 215-236.
- [36] Van de Vonder S, Ballestin F, Demeulemeester E, et al. Heuristic procedures for reactive project scheduling[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2007, 52(1): 11-28.
- [37] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W. A classification of predictive-reactive project scheduling procedures[J]. *J of Scheduling*, 2007, 10(3): 195-207.
- [38] Van de Vonder S, Demeulemeester E, Herroelen W. Proactive heuristic procedures for robust project scheduling: An experimental analysis[J]. *European J of Operational Research*, 2008, 189(3): 723-733.
- [39] Chtourou H, Haouari M. A two-stage-priority-rule based algorithm for robust resource-constrained project scheduling[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 55(1): 183-194.
- [40] Della Croce F. Generalized pairwise interchanges and machine scheduling[J]. *European J of Operational Research*, 1995, 83(2): 310-319.
- [41] Bean J C. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization[J]. *ORSA J on Computing*, 1994, 6(2): 154-160.
- [42] Tsai Y-W, Gemmill D D. Using tabu search to schedule activities of stochastic resource-constrained projects[J]. *European J of Operational Research*, 1998, 111(1): 129-141.
- [43] Al-Fawzan M A, Haouari M. A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling[J]. *Int J of Production Economics*, 2005, 96(2): 175-187.
- [44] Lambrechts O, Demeulemeester E, Herroelen W. A tabu search procedure for developing robust predictive project schedules[J]. *Int J of Production Economics*, 2008, 111(2): 493-508.
- [45] Lambrechts O, Demeulemeester E, Herroelen W. Time slack-based techniques for robust project scheduling subject to resource uncertainty[J]. *Annals of Operations Research*, 2011, 186(1): 443-464.
- [46] Hapke M, Jazkiewicz A, Słowiński R. Pareto simulated annealing for fuzzy multi-objective combinatorial optimization[J]. *J of Heuristics*, 2000, 6(3): 329-345.
- [47] Abbasi B, Shadrokh S, Arkat J. Bi-objective resource-constrained project scheduling with robustness and makespan criteria[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 180(1): 146-152.
- [48] Ozdamar L, Alanya E. Uncertainty modelling in software development projects(with case study)[J]. *Annals of Operations Research*, 2001, 102(1/2/3/4): 157-178.
- [49] Wang J. A fuzzy project scheduling approach to minimize schedule risk for product development[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 127(2): 99-116.
- [50] Wang J. A fuzzy robust scheduling approach for product development projects[J]. *European J of Operational Research*, 2004, 152(1): 180-194.
- [51] Choi J, Realf M J, Lee J H. Dynamic programming in a heuristically confined state space: A stochastic resource-constrained project scheduling application[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, 28(6): 1039-1058.
- [52] 张宏国, 徐晓飞, 战德臣. 不确定资源约束下项目鲁棒性调度算法[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(6): 2079-2082. (Zhang H G, Xu X F, Zhan D C. Uncertain resource-constrained project robust scheduling algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(6): 2079-2082.)

(责任编辑: 曹洪武)