



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION

基于广义资源日历约束的项目资源调配优化问题

孔峰, 司戈, 郭金亮

引用本文:

孔峰, 司戈, 郭金亮. 基于广义资源日历约束的项目资源调配优化问题[J]. *控制与决策*, 2024, 39(5): 1620–1628.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1541>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题

An improved NSGA-II algorithm for multi-objective resource-constrained project scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(3): 669–676 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0906>

基于动态资源权重的多技能项目调度启发式算法

Dynamic resource priority-based heuristics for multi-skill resource constrained project scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(10): 2553–2561 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0070>

面向建材装备集团制造的分布式多项目资源调度

Distributed multi-project resource scheduling oriented to manufacturing of building materials equipment group

控制与决策. 2021, 36(9): 2133–2142 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1802>

基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度

Flight deck operations scheduling based on dual population fuzzy gravitational search algorithm

控制与决策. 2021, 36(11): 2751–2759 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0523>

铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化

Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal

控制与决策. 2021, 36(12): 3063–3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

基于广义资源日历约束的项目资源调配优化问题

孔峰^{1†}, 司戈¹, 郭金亮²

(1. 华北电力大学 经济管理系, 河北 保定 071000; 2. 国网冀北电力有限公司 经济技术研究院, 北京 100038)

摘要: 资源受限项目调度问题(RCPSP)是最具代表性的项目调度问题之一,针对实际情况中考虑资源投入的必要性,建立一种以资源投入为变量的基于广义资源日历约束的项目调度优化模型. 首先,引入组合优先关系的概念对广义资源日历的概念和具体内容进行整合和完善,为了避免传统网络图在表示组合优先关系时出现的网络循环等弊端,使用节点表示活动开始和结束的瞬时状态改进节点网络图;其次,考虑活动优先关系、活动持续时间、不可更新资源总量和资源日历约束,以项目工期最短和项目成本最小为优化目标,运用CP优化器求解所建立的多目标优化模型;最后,通过设计仿真算例并进行数值实验验证模型的准确性和高效性.

关键词: 资源受限项目调度; 资源调配; 节点网络图; 约束规划; 广义资源日历; 多重时间约束

中图分类号: TB114.1

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1541

引用格式: 孔峰, 司戈, 郭金亮. 基于广义资源日历约束的项目资源调配优化问题[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1620-1628.

Project resource allocation optimization problem based on generalized resource calendar constraints

KONG Feng^{1†}, SI Ge¹, GUO Jin-liang²

(1. Department of Economic Management, North China Electric Power University, Baoding 071000, China; 2. Economic and Technical Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Beijing 100038, China)

Abstract: The resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) is one of the most representative project scheduling problems. In this paper, a project scheduling optimization model based on a generalized resource calendar constraint with resource inputs as variables is established to address the necessity of considering resource inputs in practical situations. Firstly, this paper introduces the concept of combined precedence relationships to integrate and improve the concept and content of the generalized resource calendar. In order to avoid the drawbacks such as network loops that occur in the traditional network diagram when representing combined precedence relationships, the instantaneous state improvement node network diagram with nodes indicating the start and end of activities is used; Second, considering the activity priority relationship, activity duration, total non-renewable resources and resource calendar constraints, and the CP optimizer is used to solve the multi-objective optimization model established in this paper, with the shortest project duration and the smallest project cost as the optimization objectives. Finally, the accuracy and efficiency of the model are verified by designing simulation cases and conducting numerical experiments.

Keywords: resource constrained project scheduling; resource allocation; node network diagram; constraint programming; generalized resource calendar; multiple time constraints

0 引言

自上世纪五十年代项目管理理论产生以来,项目调度受到了越来越多学者的关注,有关其理论和实践的探索不断深入和扩展. 资源受限项目调度问题(resource-constrained project scheduling problem, RCPSP)是项目调度的代表性问题,其目标是科学

合理地安排各项活动的施工顺序形成相应调度方案. 传统RCPSP考虑的“资源受限”主要是指可更新资源的种类及数量的限制,本文将包括人力和机器的可更新资源作为研究对象. 活动通常以两种方式相互依赖:第一,他们争夺开展活动所需的有限资源;第二,活动之间的优先级约束要求每对活动都按照预

收稿日期: 2022-08-29; 录用日期: 2023-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72101089).

责任编委: 刘士新.

[†]通讯作者. E-mail: kongfeng@ncepu.edu.cn.

*本文附带电子附录文件,可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

先确定的顺序进行^[1]. RCPSP对于建设项目的规划和管理至关重要,当资源的可用性受到限制时,建设项目的优化调度和资源分配可能会面临挑战^[2]. 资源的可用性往往由资源最初的调配方案确定,以往的研究很少关注资源投入方案对优化目标的影响,实际上同一个项目通常有多种资源投入方案,如何选择最佳的资源投入方案是未来研究的方向之一. 将上述问题定义为资源投入优化问题(resource allocation optimization problem, RAOP). 在实际工程项目中,项目经理往往需要权衡多个目标来确定资源投入方案,因此RAOP通常是一个多目标优化问题. 在时间和成本方面,提高施工项目效率是每个新项目开始时调度员都要考虑的最重要因素之一^[3]. Kong等^[4]将资源的可用性归属为资源日历,根据项目管理知识体系,资源日历识别了每种具体资源可用时的工作日、班次、假期等,即资源的可用性. Zhan^[5]提出了考虑资源中断的资源日历,如果资源处于不可用状态,则必须中断活动. 在实际施工时,浇筑、切割和排水等活动是不能中断的,因此在实际项目调度中同时考虑资源日历和活动的可中断性是必要的. Kreter等^[6]考虑了资源日历中活动不能中断的情况,但当活动的持续时间长于资源可用周期且活动不可中断时,资源必须加班或调休,这会影响项目的成本和总工期.

在现实项目管理中,一些活动的持续时间还存在限制. 例如美国材料与试验协会制定的预拌混凝土标准规范(ASTM C94/C94M)规定,混凝土的排放应在将搅拌水引入水泥和骨料后60~90 min内完成. Ballestín^[7]考虑了活动持续时间的概率分布,但其假设仍然是活动的持续时间在执行之前是已知且确定的,并基于该假设开发了启发式算法. Wang等^[8]认为RCPSP具有指数分布的活动持续时间和两种类型的随机返工. Yeganeh等^[9]提出了一种多目标优化方法,用于在资源约束下构建弹性项目进度,以应对不确定的活动持续时间. 前面提到的研究将活动的持续时间设置为确定值并且忽略其上限,本文将分析活动的最长持续时间约束对其他约束的影响,以证明在模型中考虑持续时间约束的必要性和完整性.

广义优先关系(generalized precedence relations, GPRs)是活动之间的最小和最大时滞,其优点是可以轻松描述许多复杂的优先关系约束^[10]. Bartusch等^[11]提出了GPRs的经典解决方案,即将结束到开始(FTS)、结束到结束(FTF)、开始到开始(STS)和开始到结束(STF)转换为STS,但是当活动持续时间不固定时此方法无效,且复杂的优先关系会导致传

统的网络计划相互矛盾而无法施行^[5]. 许多学者进行了实现活动分解的经济效益研究^[12],但忽略了不可中断活动对调度的影响^[13-14]等. 本文将不可中断活动定义为不允许中断的活动或活动的允许中断时间小于特定值,尽管这不是所有活动的必要限制,但在许多情况下都是有效的^[9];考虑包含资源、活动和时滞的中断日历,活动的可中断性、优先关系和资源各阶段的投入量对于操作RCPSP应用程序不可忽略^[11],几乎没有任何文献同时考虑到前面4个限制因素. 本文对资源日历进行扩展形成广义资源日历(generalized resource calendar, GRC). 广义资源日历综合考虑资源与活动的各种相关影响因素,在资源日历的基础上,确定每种资源的可用性、类型和性质,及其在项目期间何时可用及可用多久. 本文提出的问题称为广义资源日历约束下的资源调配优化问题(resource allocation optimization problem under generalized resource calendar constraints, RAOP/GRC).

Blazewicz等^[15]已经证明RCPSP是非确定性多项式困难(NP-Hard)问题. 由于RAOP/GRC是RCPSP的一个扩展,相比于RCPSP,RAOP/GRC还具有以下复杂性:1)需要考虑项目资源约束、广义资源日历和优先关系;2)解空间规模随项目数量呈指数增长;3)解空间难以勾画. 例如,某项目有4个活动,两种可更新资源,资源容量都为10,每个活动的资源需求量分别为[1, 2]、[1, 1]、[2, 1]和[2, 2],只考虑FTS的优先关系,对于以资源投入为变量、考虑每周休一天的七天工作制的资源日历,有超过850亿个可能的时间表,当工序数量增加时解的数量呈指数增长,其时间复杂度属于非多项式级,所以RAOP/GRC也是NP-Hard问题. 约束规划(constraint programming, CP)源于人工智能领域对约束问题的研究,是运筹学、人工智能和计算机科学相结合的强大范例,已成功应用于解决组合问题和约束满足问题^[16]. Menesi等^[17]在Zhang^[18]研究的基础上,使用CP解决了有、无资源均衡的多模式资源约束项目调度问题,并证明了在大中型项目中CP的优化质量和速度优于遗传算法、粒子群优化算法和蚁群优化算法. Zou等^[16]将CP应用于重复性项目的调度问题,通过建筑项目验证了该模型的可行性和准确性. 综上所述,关于RCPSP的研究很多,但大多集中在单一时间约束上. 此外,关于资源投入方案影响的研究还不够充分. 本文提出RAOP/GRC并建立相应的模型,填补了项目管理体系中一个重要的空白.

1 广义资源日历约束

1.1 活动的持续时间约束与资源日历

在调度过程中,由于活动进行所需要资源的限制和活动的可中断性,活动的持续时间可能需要延长.例如,活动*i*由工人A需要至少7天才能完成.工人A存在资源日历约束,他将在第6、第7天和第13、第14天休息,因此活动*i*的持续时间会延长.如图1所示,方案1和方案2是资源约束下的两种调度安排,其持续时间分别为9天和11天.当活动*i*的特殊属性导致其持续时间不能超过10天时,方案2将成为不可行的解决方案.

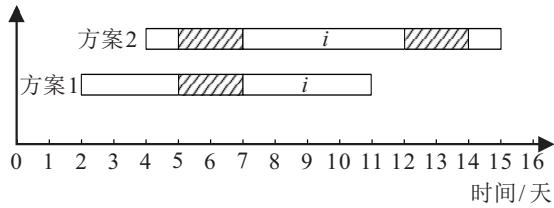


图1 可中断活动*i*

1.2 组合优先关系与资源日历

从工程中提取混凝土模板的网络计划如图2(a)所示. A、B、C和D分别指钢筋支撑、模板工程、浇筑和混凝土养护.一般,模板工程开工后可直接进行浇筑,浇筑完成并达到标准强度后方可拆除模板.从图2(a)可以看出,这种复杂的施工技术导致了网络循环,这使得传统网络不可行.因此本文设计一种新的网络表示方法如图2(b)所示,其中节点表示活动开始和结束的瞬时状态,定义其为节点网络图.在节点网络图中,活动、节点和优先级关系如图3所示.两个节点之间的实线表示活动,虚线表示优先关系.

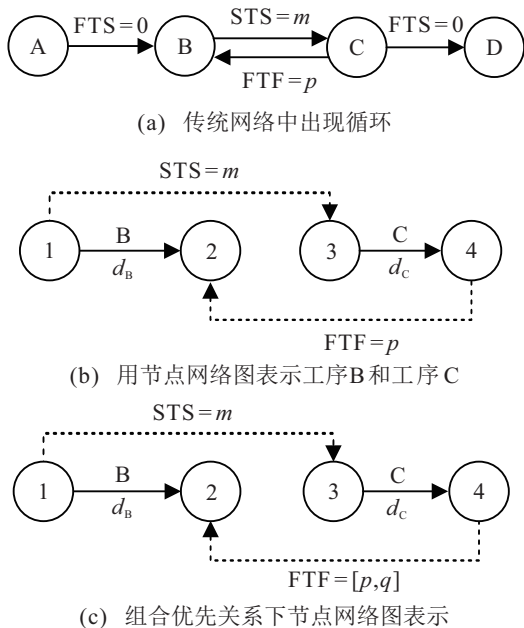


图2 网络循环与节点网络表示方法

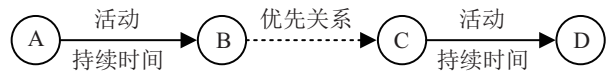


图3 节点网络图的一般表示法

网络周期的存在往往影响活动持续时间.如图2(b)所示,根据优先关系计算得到结果 $d_B - d_C \geq m + p$,因此 d_B 与 d_C 之间存在交互作用.此外,考虑资源日历时网络循环将大大增加调度的难度.如果图2(b)中 $m = 1$ 且 $p = 3$,那么活动B和活动C分别需要7天和4天才能完成(活动所需资源具有周末休息的资源日历),调度结果如图4所示.图4中斜线部分表示由资源中断引起的活动中断.在这种情况下,只有当活动B在周一开始且活动C在周二开始时,调度方案才能在优先级关系和资源日历的联合约束下得到一个可行的解决方案.

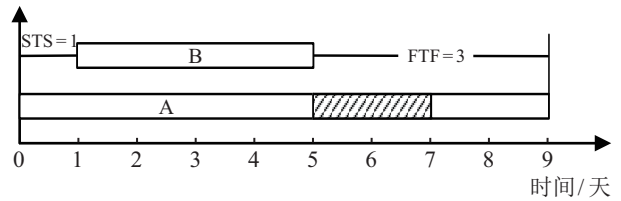


图4 网络周期和资源日历的相互作用

活动持续时间相互作用的第2种情况是存在最大时滞.在图2(c)中, $FTF = [p, q]$ 分别表示活动B和活动C之间的最小和最大时滞分别为 p 和 q .计算得到结果 $m + p \leq d_B - d_C \leq m + q$.增加资源日历后,计划的难度也会相应增加.当图2(c)中的 $m = 4, p = 0, q = 1$,且活动B和活动C的工作时间分别为4和1时,图5中的条件可以满足全面时间约束.因此,有必要考虑可中断性与资源日历之间的相互作用.

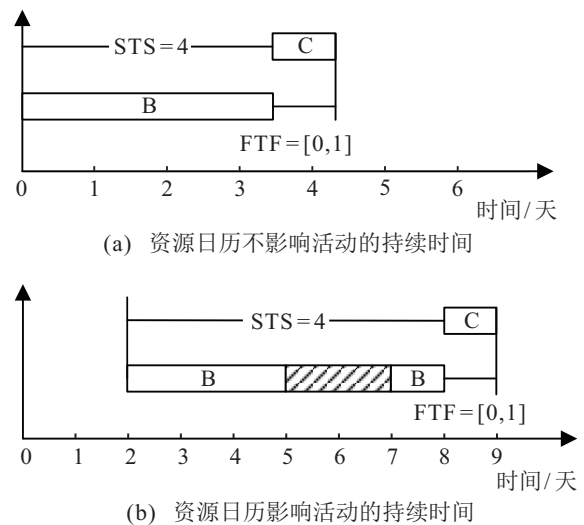


图5 最大时滞约束和资源日历的相互作用

1.3 活动的可中断性与资源日历

由于施工技术等不同,活动分为可中断和不可中断.例如,对于排水和浇筑,一旦活动中断,将影响工

程质量. 可中断活动的持续时间大于或等于工作时间, 不可中断活动的持续时间与工作时间相同. 在考虑可中断性和资源日历时, 某些情况可能会导致模型失败. 当活动不可中断且工作时间超过一个工作周期时, 休息时间与不可中断活动的性质产生冲突. 因此, 有必要考虑资源在休息时间加班或调休的情况. 在图6中, 白色部分表示资源可用, 斜线部分表示资源不可用或调休.

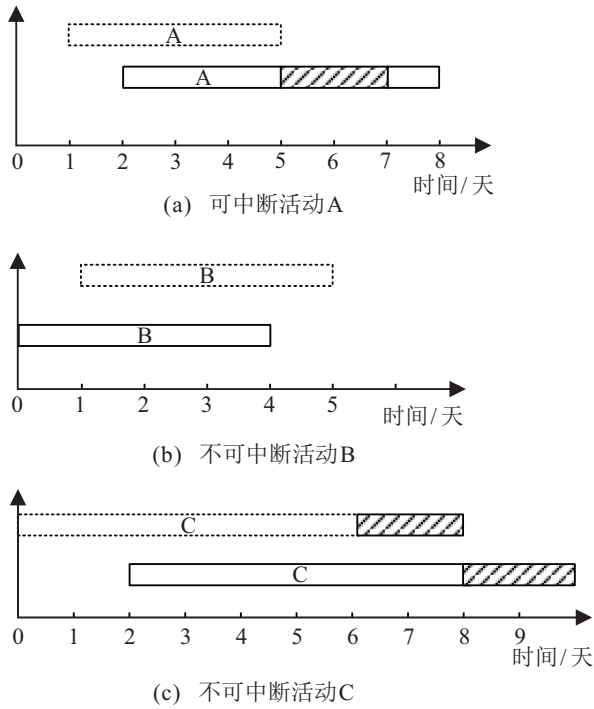


图6 3种活动类型

1) 活动可中断: 如图6(a)所示, 活动A是一项工作时间为4天的可中断活动. 考虑资源日历, 活动在周末中断. 考虑到工作周期是否包含周末, 在调度时有图6(a)中的两种实施方案.

2) 活动不可中断且持续时间少于一个工作周期: 可以避免调度时资源休息的影响. 如图6(b)所示, 活动B是一个工作时间为4天的不可中断活动, 它可以在可用资源范围内完全调度, 以实现优化目标.

3) 活动不可中断且持续时间超过一个工作周期: 当活动的工作时间超过5天时, 由于活动不能中断, 必须占用周末的时间加班并支付加班费. 由于劳工方面的法律, 劳工资源每周的工作时间受到最大限制. 占用机器维护时间工作后, 可能会导致使用寿命缩短的问题. 因此, 在加班后, 资源应该休息相同的加班时长. 如图6(c)所示, 活动C是一个不可中断的活动, 工作时间为6天, 图6(c)中的两种情况分别代表一天的加班和两天的加班. 当同时考虑全面时间约束时, 项目进度将进一步受到限制.

2 RAOP/GRC

假设一个项目包含的活动集合为 $V = 0, 1, \dots, n, n + 1 (n \geq 1)$, 其中0和 $n + 1$ 分别代表项目的开始和结束. 任意活动 j 的工作时间为 w_j . 可更新资源的集合为 R , 资源投入方案由集合 $U = 1, 2, \dots, m (m \geq 1)$ 组成; 每种可再生资源 $k \in R$, 资源投入方案 i 的投入量都不能超过其提供的容量 R_{ik} . 在活动 $j \in V$ 执行期间持续使用的资源类型 k 的数量为 r_{jk} . 本节主要分为符号、约束和优化目标3部分.

2.1 符号

表1中给出的符号将在整篇论文中使用, 并在论文的其余部分中根据需要引入其他符号.

表1 符号

序号	变量名称
a_j	活动的区间变量
C_k	第 k 种可更新资源单位时间内的使用成本
d_j	活动 j 的持续时间
K	可更新资源的种类数量, $k = 1, \dots, K$
m	计划的数量, $i = 1, \dots, m$
n	活动的数量, $j = 0, \dots, n + 1$
p_j	活动 j 的紧前活动的集合
Q_t	t 时刻正在进行中的活动
R_{ik}	调度方案 i 中可更新资源 k 的投入量
r_{jk}	活动 j 所需要的可更新资源 k 的数量
S_j	活动 j 的开始时间
F_j	活动 j 的结束时间
t	项目时间表中的时刻
w_j	活动 j 的工作时间

此外, RAOP/GRC 具有以下特点: 对于可中断的活动, 它们仅在资源不可用时被中断; 对于不可中断的活动, 执行时应尽可能避免资源休息时间, 如果无法避免, 则应考虑加班或调休; 考虑了人力资源的加班成本, 忽略了机器的加班成本; 资源投入仅包括人力资源和机器, 不考虑材料; 在确定资源投入方案后, 不允许在项目施工过程中进行更改.

2.2 约束

2.2.1 时间约束

1) 优先关系约束.

GPRs 可以分为 STS、STF、FTS、FTF, 当考虑最小和最大时滞时, 4种约束类型加倍. 目前, 学者通常将 STF、FTS 和 FTF 转化为 STS 进行计算. Kong 等^[4]证明了当存在资源日历等约束使得活动持续时间不固定时, 该方法不可行. 因此本文使用 CP 中的优先级函数 endBeforStart、endBeforEnd、startBeforStart 和 startBeforEnd 分别解决活动之间 FTS、FTF、STS 和 STF 的优先关系. 优先函数的开发旨在解决活动之间

的最小时滞,但活动之间的最大时滞也可以通过稍微改变优先函数的输入值来表示.

2) 活动的持续时间约束.

活动 j 的持续时间 x_j 可以表示如下:

$$\begin{aligned} x_j &= [x_j^{\min}, x_j^{\max}], \\ x_j^{\min} &> 0, x_j^{\max} &\in [x_j^{\min}, +\infty]. \end{aligned} \quad (1)$$

活动持续时间应满足以下约束:

$$x_j^{\min} \leq F_j - S_j \leq x_j^{\max}. \quad (2)$$

当 $x_j^{\min} = x_j^{\max}$ 时, x_j 是固定值,活动 j 不能被中断,不能被扩展. 当 $x_j^{\max} = d > x_j^{\min} (d \in R^+)$ 并且活动 j 可以被中断时,活动持续时间不再是定值,其值可根据调度计划进行调整. 变量 x_j 最少可以缩短到 x_j^{\min} ,最多扩展到 x_j^{\max} . 当 $x_j^{\max} \rightarrow +\infty$ 时,活动可以中断, x_j 可以无限延伸,也就是说活动 j 没有时间上限. CP 将每个活动定义为一个区间变量,每个区间变量的大小和长度由 `sizeOf` 函数和 `lengthOf` 函数表示. 计算区间变量 a_j 大小和长度的公式如下:

$$\text{sizeOf}(j) = x_j^{\min}, \quad (3)$$

$$\text{lengthOf}(j) = F_j - S_j. \quad (4)$$

区间变量 a_j 的大小是活动的理想持续时间,即最短持续时间,长度是活动 j 的结束时间与开始时间之间的差值. `lengthOf` (a_j) 和 `sizeOf` (a_j) 之间的差异是是否包含休息时间. 任意活动 j 的大小不小于长度. 当 x_j 是固定值时,区间变量 a_j 的大小等于长度. 活动持续时间约束可以用约束规划中的语言表示如下:

$$x_j^{\min} \leq \text{lengthOf}(j) \leq x_j^{\max}. \quad (5)$$

对于工作时间大于资源工作周期的可中断活动或不可中断活动,有

$$\text{sizeOf}(j) \leq \text{lengthOf}(j); \quad (6)$$

对于工作时间小于资源工作周期的不可中断活动,则有

$$\text{sizeOf}(j) = \text{lengthOf}(j). \quad (7)$$

将此表达式输入约束规划的约束中,以完成持续时间约束的建模.

2.2.2 资源约束

1) 不可更新资源总量约束. 资源的使用量不超过投入量. `pulse` 是 CP 中的一个基本累积函数表达式,表示单个区间变量或固定时间区间的相加. 对于不可更新资源,活动在开始时增加资源使用量,在结束时释放资源,这意味着 `pulse` 适用于不可更新资源

使用量的积累.

$$\sum_{Q_t} r_{jk} \leq R_{jk}, \quad (8)$$

$$\sum_{j=0}^{n+1} \text{pulse}(j, r_{jk}) \leq R_{jk}. \quad (9)$$

2) 资源日历约束. 资源日历的模型如下:

$$F_k(t) = \begin{cases} 0, & \text{resource } k \text{ is not available at time } t; \\ 1, & \text{resource } k \text{ is available at time } t. \end{cases} \quad (10)$$

$$G_j(t) = \prod_{k=1}^K F_k(t). \quad (11)$$

如果 $G_j(t) = 1$,则活动 j 在时刻 t 所需要的资源都可用,即活动 j 可以在 t 时刻执行; $G_j(t) = 0$ 表示活动使用的资源中至少有一个不可用,即活动 j 无法执行. 此外,所有活动都不能在不可用的资源间隔内开始或结束.

$$G_j(S_j) \times G_j(F_j) = 1, \quad (12)$$

$$\sum_{t=S_j}^{F_j} G_j(t) = w_j. \quad (13)$$

`stepFunction` 是约束规划中表示工作强度的阶梯函数,它可以通过定义不同时间间隔内工作人员的不同工作强度来表示资源日历. CP 中的 `intensity` 是应用程序度量区间长度内的消耗或利用率的关键字,是使用整数值的分布函数. 当活动可执行时, `intensity` 的值为 1, 否则为 0, 其表达式如下:

$$S_j \notin Z, \quad (14)$$

$$F_j \notin Z. \quad (15)$$

CP 中的 `forbidStart` 函数和 `forbidEnd` 函数是禁止值约束,它们确保间隔变量不能在特定日期开始或结束. 如果 $G_j(t) = 0$ 的解集为 Z , 则有

$$\text{forbidStart}(a_j, Z), \quad (16)$$

$$\text{forbidEnd}(a_j, Z). \quad (17)$$

在本文中,假设劳动力资源加班会产生加班工资,而机器加班不会引起成本变化. 假设加班费是 C_k 的 h 倍,劳动力资源的数量是 b . 加班产生的额外费用计算如下:

$$\sum_{G_j(t)=0, w_j > 5} \sum_{k=1}^b r_{jk} C_k (h-1) (d_j - w_j). \quad (18)$$

综上,通过约束规划中的上述功能,可以在资源日历中同时考虑资源可用性和活动可中断性.

2.3 优化目标

该模型的优化目标包括最小化工期和成本. CP 中 startOf 函数和 endOf 函数分别代表活动变量的开始时间和结束时间, 工期(TD)计算公式如下:

$$TD = \max(\text{endOf}(a_j)) - \min(\text{startOf}(a_j)). \quad (19)$$

对于优化目标, T_k 表示资源 k 的使用时间, 有

$$T_k = \max(\text{endOf}(a_j)) - \min(\text{startOf}(a_j)), \quad r_{jk} > 0. \quad (20)$$

设每日的间接成本为 mc , 则成本 (TC) 表示为

$$TC = \sum_{k=1}^b R_{ik} C_k T_k + TD \times mc + \sum_{G_j(t)=0, w_j > 5} \sum_{k=1}^b r_{jk} C_k (h-1)(d_j - w_j), \quad (21)$$

其包括不可更新资源成本(直接成本)、间接成本和加班成本.

目前的多目标优化方法主要有综合赋权法和帕累托优化法. 然而, CP 的一个优势在于内部函数, 可以定义一个具有多个目标的目标函数, 第 1 个目标是最重要的, 以此类推^[6]. 利用 minimize staticLex(TD, TC) 语句, 开发 CP 模型的多目标版本, 有两个目标: 1) 最小化项目工期; 2) 最小化项目成本.

近年来, 学者投入了大量精力来开发能够评估多目标优化模型性能的方法. 在多目标组合优化问题中通常不存在满足所有目标的最优解, 取而代之的是得到一组称为最优帕累托解集的非支配解, 利用这些解的目标值来确定最优帕累托前沿. 搜索最优的帕累托解集中的所有解在计算和方法上都非常困难, 以至于方法经常通过近似获得前沿, 在此过程中识别出非支配解, 并连续获得近似前沿.

3 案例实证

3.1 案例 1

通过一个应用实例来说明所提模型的使用, 并展示其在最小化项目工期和最小化项目成本之间进行最佳权衡的能力. 该示例最初由 Hegazy^[19] 引入, 以同时优化包括 20 项活动且需要 6 种不同类型资源项目的资源调配.

为了说明本文模型的实用性和有效性, 运用本案例进行分析时, 在原有数据的基础上引入资源日历和工人的加班调休等, 且假设工人加班的工资为正常工资的两倍. 第 1、第 2 种可更新资源为人力资源, 其他为不可更新的原材料, 其资源日历和每天的使用成本如表 2 所示. 本文中允许其中一些活动可中断, 而其他活动不可中断^[20].

表 2 资源日历

资源	休息时间 (开始, 结束) ($a = 1, 2, 3$)	成本 / 天
R_{i1}	$\langle 7a - 2, 7a \rangle$	150
R_{i2}	$\langle 7a - 2, 7a \rangle$	200
R_{i3}	\emptyset	10
R_{i4}	\emptyset	10
R_{i5}	\emptyset	15
R_{i6}	\emptyset	12

在 CPLEX Studio IDE 12.9.0 中编写代码, 并在 64 位 Windows 版本下的 AMD R5 2.1 GHz 笔记本电脑上执行该模型, 笔记本电脑具有 16 GB RAM. 根据 Hegazy^[19] 所提供的项目数据, 将数据导入到算法中, 且分别将成本和总工期作为两个优化目标运行程序, 以得到最优资源投入方案和资源使用过程中的调度策略.

RAOP/GRC 通过考虑要最小化的两个变量(项目工期和项目成本), 生成多个资源调度的非支配解. 一旦确定了计划顺序和劳动力分配, 就可以计算出资源投入的目标值. 由于优化模型的随机性, 实验进行 30 次独立运行, 项目工期从 60 天到 90 天不等, 筛选出所有劣解后共得到了 18 组可行解, 其运行结果如表 3 所示.

表 3 优化结果

方案	工期 / 天	成本 / 元	方案	工期 / 天	成本 / 元
1	61	353 296	10	74	304 728
2	64	349 560	11	75	302 992
3	65	338 352	12	78	297 256
4	66	334 616	13	79	286 048
5	67	330 880	14	80	282 312
6	68	327 144	15	81	278 576
7	71	323 408	16	82	274 840
8	72	312 200	17	85	271 104
9	73	308 464	18	86	269 896

接下来运用两相法获得帕累托前沿. 第 1 阶段包括找到所有支持的解决方案以及减少解决方案空间. 在一个双目标问题中, 理想点和最低点可以通过最优地解决每个目标来找到. 如图 7(a) 所示, H_1 和 H_2 将解空间限定在矩形区域中. 为了找到支持的解决方案, 通过加权目标函数 O_1 和 O_2 来创建子问题. 记理想点 $Z = (O_1(H_1), O_2(H_2))$, H_1 和 H_2 两个解决方案生成子问题 P_{AB} , O_λ 表示加权目标. 在图 7(a) 中, 首先选择 H_1 和 H_2 来创建子问题 P_{12} , 这样新的目标函数是 $\min O_\lambda = \lambda_1 O_1 + \lambda_2 O_2$, 若存在解, 则该解应该在三角形区域 $H_1 Z H_2$ 中. 假设 H_3 是通过优化 P_{12} 找到的解, 则生成两个新的子问题 P_{13} 和 P_{32} . 在图 7(a) 中, H_3 、 H_4 和 H_5 分别通过求解 P_{12} 、 P_{13} 和 P_{32} 得到,

其中 λ 值从一个子问题变化到另一个子问题. 解决并创建如上所述的子问题,直到没有新解决方案. 通过解决每个子问题,将前沿推向理想点. 在第1阶段结束时,找到所有支持的解决方案. 对于图7(a)所示的示例,探索空间缩小到图7(b)中的三角形区域,并在第2阶段中搜索该空间中不支持的解决方案.

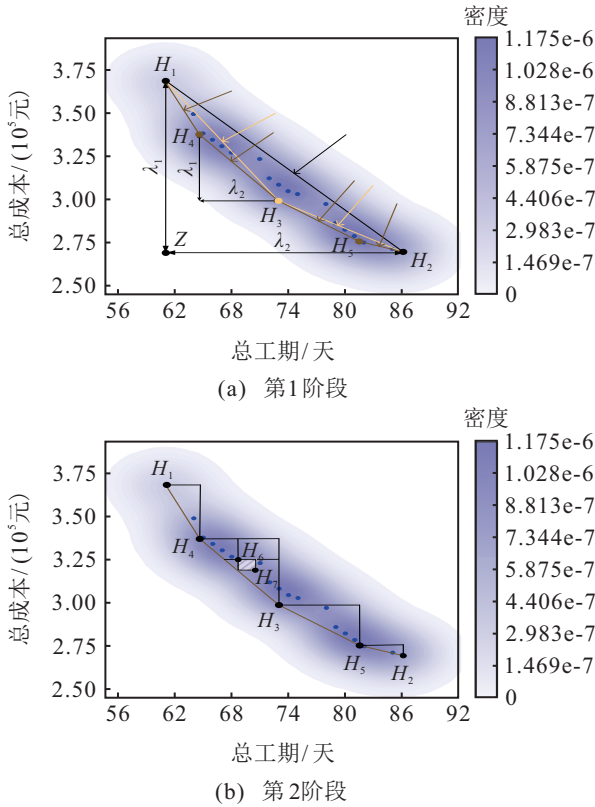


图7 帕累托前沿(案例1)

如图7(b)所示,第2阶段的勘探空间是由每对相邻支撑解界定的三角形区域. 在第2阶段,对于由两个支持解构成的给定三角形区域,没有其他解可以使第1阶段中考虑的子问题的加权目标函数最小化. 假设 H_6 是在三角形内找到的第一个解,然后根据非支配关系缩小探索空间——区域a为 H_4 和 H_6 的共同非支配区域,类似地,区域b为 H_5 和 H_6 的共同非支配区域. 因此,探索空间缩小到图中较暗区域. 新的子问题由目标值有界的 (H_4, H_6) 和 (H_5, H_6) 对产生. 一旦找到了新的解决方案,就需要创建和解决更多的子问题. 当第2阶段结束时,则找到了所有不支持的解决方案,同时获得了最佳帕累托锋.

3.2 案例2

RCPSP的一个著名推广是多模式RCPSP问题. 每个活动都有多个模式,即完成活动的不同方式. 例如,某种方法可以使用不同的资源类型或使用更多的资源来缩短持续时间. 一个由Chen等^[21]提出的包括37个活动的项目,也用于验证RAOP/GRC模型的

实用性. 每个活动都由不同的执行模式组成,为达到最小化项目总工期或者总成本的目标,每个活动选择一种模式执行. 一种可再生资源(人力资源)的可用性是每天12个劳动力. 间接成本为2000美元,对于可中断活动考虑活动的中断成本,中断成本为100美元. 进行20次独立实验后,所有可行解如表4所示.

表4 优化结果

方案	1	2	3	4
工期/天	173	175	179	180
成本/美元	151 480	148 400	144 200	140 560
方案	5	6	7	
工期/天	184	188	192	
成本/美元	139 650	136 010	134 190	

找到所有的可行解并进行筛选后,根据案例1中所提到的两相法求解所得帕累托前沿如图8所示.

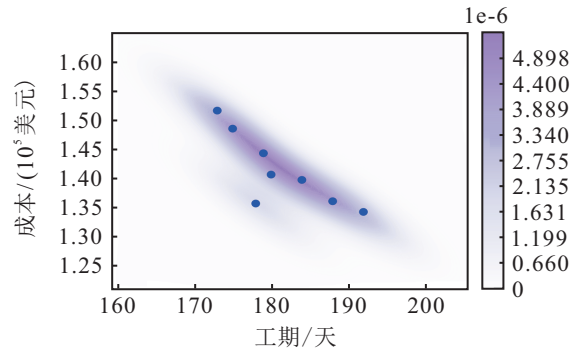


图8 帕累托前沿(案例2)

4 对比实验

基于案例2的项目信息进行两个对比实验:实验1通过该算法与其他算法结果的比较,验证CP的计算性能在多重约束下的优越性;实验2在模型中通过对不同广义资源日历下的实验结果,进一步表明考虑资源日历的必要性,以帮助项目调度人员更加高效地制定调度计划.

4.1 实验1

本实验将Chen等^[21]提出的两阶段遗传算法模型、Ghoddousi等^[22]提出的MRC-DTCRO模型和本文所运用的约束规划的计算结果进行对比,分析结果如图9所示. 当该实际项目考虑所有约束条件时,Chen等提出的两阶段遗传算法模型生成的最佳持续时间为235天,总成本为288 940美元,其帕累托前沿用三角形表示;Ghoddousi等提出的MRC-DTCRO模型,其所得帕累托前沿解决方案的时间、成本分别为190~226天和145 400~147 700美元,其最优解决方案用方形表示.

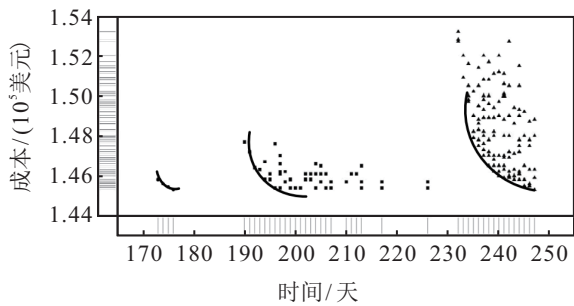


图9 对比实验1的结果

本文中,以工期最小化为第1优化目标,最小化工程成本为第2优化目标,得出的最佳工期为173~192天,总成本为134 190~151 480美元.优化结果用圆形表示.与Chen等提出的两阶段遗传算法优化模型相比,项目的最短工期缩短了62天,工期相同时其成本也较低.与Ghoddousi等提出的MRC-DTCRO优化模型相比,最短项目工期缩短了17天,最小成本减少了11 210美元.由此,在CP中添加多模式等约束条件后其优化性能的优越性和计算的高效性仍可得证明,并且CP的计算结果仍然优于其他优化模型.

4.2 实验2

Chen等提出的两阶段遗传算法模型、Ghoddousi等提出的MRC-DTCRO模型默认工人全年无休,这在实际工程项目中是不合理且不现实的.本实验在案例2的基础上引入资源日历约束,分别以工期最短和成本最低为优化目标进行4次实验.4次实验的变量设定为机组的休息时间,分别为全年无休、21天工作制、14天工作制和7天工作制.其中对于不可中断的活动,当活动持续时间超过工人的工作周期时,需要考虑工人的加班或调休,假设加班工资为正常工资的2倍,所得实验结果如表5所示.

表5 对比实验2的结果

方案	工期最短		成本最低		运行时间/s
	工期/天	成本/美元	工期/天	成本/美元	
全年无休	173	184 660	192	202 440	9
21天工作制	192	157 010	212	175 490	9
14天工作制	202	148 610	222	166 810	11
7天工作制	230	1 514 800	248	134 190	13

在本实验中,设定项目中不可中断的活动不能在资源不可用时进行施工.图10更加直观地展现了机组在不同资源日历下的工期和成本对比,其中柱状图表示工期,折线图表示成本.综合来看,考虑资源日历下的成本低于员工全年无休时的成本,且工期也要长于全年无休的工期.表5的最后一列运行时间表示通过CP得出最优解的总时长.当不考虑资源日历,运

行时长为9s,考虑资源日历时的运行时长分别为9s、11s和13s.因此当增加资源日历的约束时,获得最优解的时长变化不大.这也在另一方面证实了CP在项目调度优化问题中计算性能的优越性.

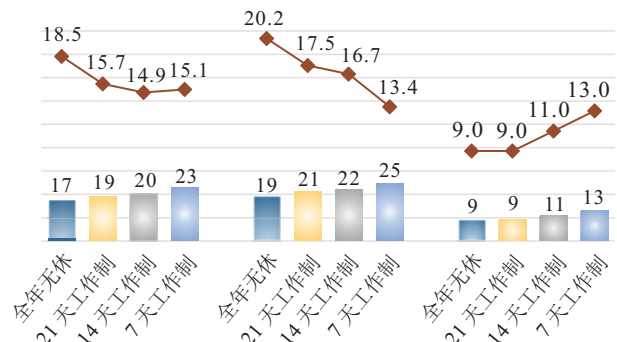


图10 对比实验2的结果

5 结论

本文在传统资源受限项目调度问题的基础上考虑实际调度中存在广义资源日历约束,并以总成本和总工期的最小化为优化目标,提出RCPSP问题的新的拓展问题.本文的主要研究成果如下.

1)分析提出了基于广义资源日历约束下项目资源调配优化问题相关的基础理论、数学模型以及计算思路.首先,对广义资源日历约束的概念进行整合和完善,并对其进行拓展,提出了包括资源日历、活动的最长持续时间和优先关系在内的组合优先关系约束.其次,提出节点网络图用以更好地表示组合优先关系.然后,提出了广义资源日历约束下的资源受限项目调度问题,并对其进行了数学建模及算例分析,展示了问题的主要求解思路.

2)分别分析了同时考虑活动的可中断性和资源日历、活动的最大持续时间约束、广义优先关系的必要性.针对基于节点网络图和全面时间约束的项目资源调配优化问题,提出了一种在复杂工艺要求下的调度方法,对准时完工和质量保证具有重要意义.

3)通过设计仿真算例并进行数值实验,验证了约束规划求解RAOP/GRC的准确性和高效性.首先用编写的算法求解具有21个、37个活动的仿真算例,并与以往模型的计算结果进行对比验证了该算法的求解时间和计算偏差率要优于其他模型,可以更加快速准确地解决活动数量更多、优先关系更复杂的RAOP/GRC问题.

参考文献(References)

[1] Hartmann S, Briskorn D. A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207(1): 1-14.

- [2] Bettemir Ö H, Sonmez R. Hybrid genetic algorithm with simulated annealing for resource-constrained project scheduling[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2015, 31(5): 04014082.
- [3] Prithwish C, Roy G G, Das S, et al. An improved harmony search algorithm with differential mutation operator[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2009, 95(4): 401-426.
- [4] Kong F, Dou D. Resource-constrained Project scheduling problem under multiple time constraints[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2021, 147(2): 04020170.
- [5] Zhan J. Calendarization of time planning in MPM networks[J]. *Zeitschrift Für Operations Research*, 1992, 36(5): 423-438.
- [6] Kreter S, Schutt A, Stuckey P J. Using constraint programming for solving RCPSP/max-cal[J]. *Constraints*, 2017, 22(3): 432-462.
- [7] Ballestín F. When it is worthwhile to work with the stochastic RCPSP?[J]. *Journal of Scheduling*, 2007, 10(3): 153-166.
- [8] Wang X M, Leus R, Creemers S, et al. A CTMDP-based exact method for RCPSP with uncertain activity durations and rework[C]. *Operations Research Proceedings 2017*. Cham: Springer, 2018: 559-565.
- [9] Yeganeh F T, Zegordi S H. A multi-objective optimization approach to project scheduling with resiliency criteria under uncertain activity duration[J]. *Annals of Operations Research*, 2020, 285(1): 161-196.
- [10] 苏志雄, 魏汉英, 李岚. 广义优先关系下工序机动时间的隐形消耗[J]. *管理科学学报*, 2018, 21(3): 69-81. (Su Z X, Wei H Y, Li L. Hidden consumptions of activity floats under generalized precedence relations[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2018, 21(3): 69-81.)
- [11] Bartusch M, Möhring R H, Radermacher F J. Scheduling Project networks with resource constraints and time windows[J]. *Annals of Operations Research*, 1988, 16(1): 199-240.
- [12] 孔峰, 张睿, 吴甜. GPRs 搭接网络分解优化定理在流水作业中的应用[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(11): 145-152. (Kong F, Zhang R, Wu T. Application of GPRs network division optimization theorem in the flow process network[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(11): 145-152.)
- [13] 谢芳, 徐哲, 于静. 柔性资源约束下的项目调度问题双目标优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(3): 674-683. (Xie F, Xu Z, Yu J. Bi-objective optimization of project scheduling problem under flexible resource constraints[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2016, 36(3): 674-683.)
- [14] 崔南方, 赵雁, 田文迪. 基于智能算法的双目标鲁棒性项目调度[J]. *系统管理学报*, 2015, 24(3): 379-388. (Cui N F, Zhao Y, Tian W D. Bi-objective robust project scheduling based on intelligent algorithms[J]. *Journal of Systems & Management*, 2015, 24(3): 379-388.)
- [15] Blazewicz J, Lenstra J K, Kan A H G R. Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 1983, 5(1): 11-24.
- [16] Zou X, Zhang L H. A constraint programming approach for scheduling repetitive projects with atypical activities considering soft logic[J]. *Automation in Construction*, 2020, 109: 102990.
- [17] Menesi W, Golzarpoor B, Hegazy T. Fast and near-optimum schedule optimization for large-scale projects[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2013, 139(9): 1117-1124.
- [18] Zhang H. Ant colony optimization for multimode resource-constrained project scheduling[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2012, 28(2): 150-159.
- [19] Hegazy T. Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1999, 125(3): 167-175.
- [20] 邹鑫, 王仁锋, 张立辉, 等. 计及软逻辑的重复性项目离散时间费用权衡及其约束规划模型研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(10): 109-118. (Zou X, Wang R F, Zhang L H, et al. A constraint programming approach for solving the discrete time/cost tradeoff problem in repetitive projects considering soft logic[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(10): 109-118.)
- [21] Chen P H, Weng H J. A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling[J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(4): 485-498.
- [22] Ghoddousi P, Eshtehardian E, Jooybanpour S, et al. Multi-mode resource-constrained discrete time-cost-resource optimization in project scheduling using non-dominated sorting genetic algorithm[J]. *Automation in Construction*, 2013, 30: 216-227.

作者简介

孔峰(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 从事工程项目管理、技术经济及管理研究, E-mail: kongfeng@ncepu.edu.cn;

司戈(2000—), 女, 硕士生, 从事工程项目管理的研究, E-mail: sig@ncepu.edu.cn;

郭金亮(1997—), 男, 硕士生, 从事工程项目管理的研究, E-mail: gjl13464649223@163.com.