工程研究——跨学科视野中的工程
JOURNAL OF ENGINEERING STUDIES http://jes.ucas.ac.cn 工程研究 跨学科视野中的工程
工程管理
DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250015
CSTR: 32282.14.JES.20250015

基于改进蜉蝣算法的资源受限项目灵活调度研究

彭军龙*，邵玉，唐赛赛，刘骁

长沙理工大学 交通运输工程学院，长沙 410114

摘要：针对工程项目在实际施工过程中因各种不确定因素导致的工期偏差问题，提出了一种在工期不确定环境下的资源约束调度优化方案。通过衡量项目实际工期与基准进度计划的偏差，考量工期波动对活动资源需求量的影响，构建了多目标资源约束的灵活调度模型。针对模型的特点，选用蜉蝣算法进行求解，并对蜉蝣算法进行改进，引入了动态扰动策略和差分策略，以克服传统蜉蝣算法易于过早收敛并陷入局部最优的局限性。研究结果表明，改进后的蜉蝣算法在求解模型时能够获得多个优化的调度方案，并在实际案例验证中，相较传统蜉蝣算法与布谷鸟算法表现出更优的调度效果。本文提出的灵活调度模型及改进的蜉蝣求解算法，能够有效应对工期不确定环境下的资源约束问题，为工程项目的调度优化提供多样化的决策支持，具备显著的实际应用价值。

关键词：不确定工期；灵活调度；资源受限项目调度；改进蜉蝣算法；调度优化

中图分类号：TU72 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-4969(XXXX)XX-0001-12

引言

资源受限项目调度问题（resource-constrained project scheduling problem, RCPSP）指在活动工序约束及可更新资源约束的条件下，给定项目活动和有限资源的优先级，通过有效的方式制订出满足项目特定目标的基准调度计划[1]。作为一类经典的组合优化问题，RCPSP一直是工程项目管理的热门研究内容[2]。然而在实际项目环境中，来自项目内部[3-5]或者外部[6-8]的各种不确定性因素广泛存在，例如工序技术[9]、资源可用性的变化[10]以及外部环境[11]的影响等，这些都给项目调度带来了许多挑战。因此在不确

收稿日期：2025-02-07； **修回日期：**2025-05-07
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51578080）；湖南省自然科学基金资助项目（2015JJ2004，2021JJ30746）
作者简介：*彭军龙（1976—），男，教授，研究方向为工程项目管理。E-mail: 375135287@csust.edu.cn（通讯作者）
邵玉（1999—），女，硕士研究生，研究方向为工程项目管理。E-mail: 1991746511@qq.com
唐赛赛（2000—），女，硕士研究生，研究方向为工程项目管理。E-mail: 1809771597@qq.com
刘骁（2000—），男，硕士研究生，研究方向为工程项目管理。E-mail: 1327626007@qq.com
引用格式：彭军龙,邵玉,唐赛赛等.基于改进蜉蝣算法的资源受限项目灵活调度研究[J].工程研究——跨学科视野中的工程,DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250015.. CSTR: 32282.14.JES.20250015
PENG Junlong, SHAO Yu, TANG Saisai, et al. Research on Flexible Scheduling of Resource-Constrained Projects Based on the Improved Mayfly Algorithm[J]. Journal of Engineering Studies, DOI: 10.3724/j. issn. 1674-4969.20250015.. CSTR: 32282.14.JES.20250015

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

定的条件下，如何运用有限的资源来制定高效、灵活的项目调度方案，已成为工程项目管理理论研究和实际应用中的一大难题[12]。

一般来说，工程建筑项目在执行过程中由于各种外部不确定因素的干扰，实际实施进度与项目开始前生成的基线进度往往存在偏差[13]。例如施工过程中的一些重复性工作，包括钢筋绑扎、模板安装、浇筑混凝土等，工人在反复完成此类工作时，由于操作熟练度上升，可以使项目工期缩短。这些偏差往往会干扰项目预定的基准计划，造成实际工期的变动[14]。此外，活动工期的不确定性也会导致资源分配出现不确定性[15]。这是因为活动工期的变动，导致项目管理者不得不根据实际情况频繁变更施工调度计划，如果不能及时进行调整极有可能造成项目返修或停工，增加整个项目组人员的紧张感及资源的浪费，严重的甚至会引起项目成本超支和进度延迟[16]。

随着项目管理的发展，在考虑工期进度偏差时，国内外学者们提出的方法更加实用，也更接近项目执行的实际情况。一般来说，针对项目工期出现的不确定性，解决办法是将其转化为确定性的问题后再进行求解[17-19]，例如选取工期的期望值作为任务的工期，从而进行确定性的求解[20]。Acebes 等[21]假定项目活动的持续时间服从概率分布函数，通过 Monte Carlo 模拟计算项目进度方差。陈志敏等[22]基于情景理念来设计期望工期指标，从而实现船舶维修工期的优化。尽管期望工期的使用为在不确定环境下的 RCPSP 提供了一种解决思路，但是在实际项目中，可能存在许多小概率的极端延迟情况，导致实际工期比期望值大得多，只是这些极端情况不会在期望工期中得到充分反映。还有部分学者[23-25]将模糊集合理论运用到工期优化问题中，由此形成了模糊网络和模糊工期的概念；Chanas[26]定义了具有模糊活动网络中临界的推广概念，并据此提出了两种计算关键路径临界度的方法；李阳等[27]采用六点模糊数来描述不确定工期，构建以进度计划鲁棒性最大化为优化目标的调度模型，通过对模型的求解计算，为项目制定进度计划提供参考。模糊数的引用扩展了资源受限项目调度问题的应用范围，且在一定程度上减少了项目的延迟风险[28]，但是据此计算得到的模糊工期往往会受到项目决策者的感觉、情绪等主观因素的影响。

鉴于此，本研究引入工期压缩系数来衡量项目各工序实际持续时间与基准工期的偏差程度，考虑到实际工期的变动对于基准资源调度计划的影响，建立了以项目工期和成本为目标的灵活调度模型，同时还设计了一种多策略融合的改进蜉蝣算法（improved mayfly algorithm，IMA）进行模型求解，从而提供多种调度方案，供项目经理根据实际情况选择合适的方案进行灵活决策。

1 问题描述

假设项目的工序集为 $N=[0,1,\cdots,n,n+1]$，其中 0 和 $n+1$ 为虚拟活动，分别表示项目的开始和结束活动，不占用任何时间和资源。项目工期的关键路径为 p_c，合同截至工期为 D；z_{it} 为二进制变量，表示活动在某时刻是否执行。

本研究实现项目工期成本的灵活调度的前提是工期处于固定区间，以此应对不确定性。为了明确项目活动实际持续时间的上、下界（d_i^l 和 d_i^r），引入工期偏离程度系数 ϕ 实现这一目标，定义如下：

$$\begin{cases} d_i^l = d_i(1-\phi) \\ d_i^r = d_i(1+\phi) \end{cases} \tag{1}$$

其中，工期偏离程度系数 ϕ 为区间(0,1)之间的实数，表示为活动工期的波动范围。ϕ 的值越大，工期的波动范围越大；ϕ 的值越小，工期的波动范围越小。本研究取 ϕ=0.5，提供了一个适中的波动范围，同时平衡了工期压缩和延长的成本与风险，适用于大多数实际项目场景。

2 问题假设及模型建立

2.1 问题假设

为了方便问题的研究，现做出如下假设：

（1）在本研究中，整个项目的开始时间为 0，各项活动的持续时间保留整数，且考虑到灵活调度的需要，各个工序的实际施工时间介于最短工期和最长工期之间。

（2）项目在施工的过程中，各方面的客观条件都能够达到标准，不存在工期延误的情况。

（3）一般来说，项目的各工序都会有多种执行模式, 不同的执行模式其所对应的资源投入量和活动持续时间都不同。考虑到多种执行模式会使问题过于复杂，因此本研究中的算例中，每项活动只能选择一种执行模式，且在活动执行过程中不可更换，这样就保证了每项活动资源消耗量的唯一性。

（4）工程项目的活动资源包括可再生资源和不可再生资源，本研究进行调度研究时只考虑可再生资源。

2.2 模型建立

基于以上的问题描述和假设，为了在工期不确定情况下帮助项目管理者灵活决策，将项目工序的实际持续时间作为决策变量。同时为压缩完工时间，并且尽可能地减少项目成本，模型的目标函数设置为活动工期最短和消耗成本最少。项目的总工期可以用关键路径上各工序的实际持续时间加和求得，如式（2）所示：

$$f_1=\min\sum_{i\in p_c}d_{ai} \tag{2}$$

式中，d_{ai}表示工序i的实际持续时间。

较重要的活动要想缩短工期必然会投入较多的资源，相反那些不太重要的活动可以考虑适当延长工期来达到节约资源的目的。需要注意的是，在资源受限的情况下，若同时进行多项工序，势必会产生资源冲突，其结果是有些工序每天实际的资源消耗量要超过日基准资源消耗量。超出计划消耗量的活动想要调用额外的资源则必须付出更多的成本单价，据此构建的项目成本目标模型如式（3）所示:

$$f_2=\min\sum_{k\in K}\sum_{i\in N}\begin{cases}c_k n_{ak}d_{ai}, & \text{if } n_{ak}\leqslant n_k\\ c_k n_{ak}d_{ai}+c_k^*\left(n_{ak}-n_k\right) & \text{or not}\end{cases} \tag{3}$$

约束条件为：

$$S_{i+1}-S_i\geqslant d_i,\ \forall i\in N \tag{4}$$

$$S_{n+1}\leqslant D \tag{5}$$

$$d_i^l\leqslant d_{ai}\leqslant d_i^r,\ \forall i\in N \tag{6}$$

$$n_{ak}=\frac{m_i^k}{d_{ai}},\ \forall i\in N\,\forall k\in K \tag{7}$$

$$n_k=\frac{m_i^k}{d_i},\ \forall i\in N\,\forall k\in K \tag{8}$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{t\in S_i}^{S_i+d_{ai}}z_{it}n_{ak}\leqslant s_{ak} \tag{9}$$

式中，c_k^*和c_k分别表示各工序资源实际日消耗量超出和未超出每日基准需求量的单价，n_{ak}和n_k分别表示实际日消耗量和基准日消耗量；d_i表示工序i计划持续时间；m_i^k表示可更新资源消耗总量；S_i表示工序i开始时间；K为项目施工过程中需要的可更新资源种类。

在这些约束条件中，式（4）~式（6）是工期的约束。式（4）表示各工序逻辑关系的约束，确保工序i的完成时间和开始时间之差满足工期要求；式（5）是项目总工期的约束，表示项目实际工期要小于项目的合同截止工期；式（6）表示工序i的实际持续时间约束，即活动的实际工期要介于最小和最大工期之间。式（7）~式（9）是资源的约束。式（7）和式（8）用每项活动的资源消耗量和活动持续时间分别表示项目可更新资源的实际日消耗量和基准日消耗量；式（9）表示在项目施工内的任一天，资源的实际日需求量要小于实际日供给量。

整个模型通过动态调整时间安排、资源分配和任务执行顺序来应对工期的不确定性，确保调度方案的灵活性，通过目标函数f_2（最小化成本）和这些约束条件，实现资源和进度的优化。

3 多策略融合改进蜉蝣算法设计

蜉蝣算法（mayfly algorithm，MA）是由Zervoudakis等在2020年提出的一种种群优化算法。它综合了粒子群算法、遗传算法和萤火虫算法的各大优势，具有较强的全局搜索能力[29]。较其他传统种群优化算法，它的结构更加清晰，在寻优能力方面具有显著优越性。本文研究的问题是在活动实际持续时间不确定的情况下，如何实现工期和成本目标优化下的灵活调度，本质上属于优化问题。因此本文基于标准的蜉蝣算法，通过采用动态扰动策略和差分进化策略来对该算法进行改进，设计出符合研究模型的求解算法。

3.1 基本蜉蝣算法

MA遵循三个步骤，即雄性蜉蝣的移动、雌性蜉蝣的移动和雌雄蜉蝣的交配，其中雌性蜉蝣和雄性蜉蝣的移动为算法提供了局部搜索能力，而雌雄蜉蝣的交配行为提供了全局搜索能力。

3.1.1 雄性蜉蝣的移动　雄性蜉蝣在一个固定的区域内，容易发生聚集行为，向着群体中心位置靠近。蜉蝣个体的位置按照自身经验或邻近个体的行为进行调节。假设，雄性蜉蝣总数为Q；用x_{cj}^{m}表示蜉蝣c在j维空间第m次迭代的位置；v_{cj}^{m}表示蜉蝣c在j维空间第m次迭代的速率；蜉蝣会不断移动向中心聚集和在水面上进行舞蹈训练。雄性蜉蝣的位置更新和速率更新分别用式（10）和式（11）表示为：

$$x_{cj}^{m+1}=x_{cj}^{m}+v_{cj}^{m+1} \tag{10}$$

$$v_{cj}^{m+1}=\begin{cases}v_{cj}^{m}+\alpha_1 e^{-\beta r_{\mathrm{p}}^2}\left(b_{\mathrm{pc}}-x_{cj}^{m}\right)+\alpha_2 e^{-\beta r_{\mathrm{g}}^2}\left(b_{\mathrm{g}}-x_{cj}^{m}\right), & \text{if } f\left(x_{cj}^{t}\right)>f\left(x_{cj}^{t}\right)_{\min}\\ v_{cj}^{t}+dr, & \text{if } f\left(x_{i}^{t}\right)=f\left(x_{i}^{t}\right)_{\min}\end{cases} \tag{11}$$

式中，α_1和α_2是正吸引力常数，分别用来衡量认知和社会部分的贡献；β是固定的可见度系数，用于限制蜉蝣的可见度；b_{pc}是蜉蝣c访问过的最佳位置；b_{g}是全局最优位置；r_{p}和r_{g}分别表示当前位置距离b_{pc}和b_{g}的笛卡尔距离；f表示适应度函数，越小则函数越适应；$f_{\min}$是雄性蜉蝣中的最小适应度函数值；d是婚礼舞蹈系数，是[−1,1]的随机数。

3.1.2 雌性蜉蝣的移动　雌性蜉蝣的移动方式和雄性蜉蝣的并不相同，它们并不会向种群内最优蜉蝣聚集，而是向雄性蜉蝣靠近，从而进行交配繁殖。同样假设，雌性蜉蝣总数为Q；用y_{cj}^{m}表示蜉蝣c在j维空间第m次迭代的位置；v_{cj}^{m}表示蜉蝣c在j维空间第m次迭代的速率；吸引过程设定为最优雄性吸引最优雌性，第二优雄性吸引第二优雌性，以此类推。雌性蜉蝣的位置更新和速率更新分别用式（12）和式（13）表示为：

$$y_{cj}^{m+1}=y_{cj}^{m}+v_{cj}^{m+1} \tag{12}$$

$$v_{cj}^{m+1}=\begin{cases}v_{cj}^{m}+\alpha_3 e^{-\beta r_{mf}^2}\left(x_{cj}^{m}-y_{cj}^{m}\right), & \text{if } f\left(y_{cj}^{m}\right)>f\left(x_{cj}^{m}\right)\\ v_{cj}^{m}+l_{\mathrm{f}}\times r, & \text{if } f\left(y_{cj}^{m}\right)\le f\left(x_{cj}^{m}\right)\end{cases} \tag{13}$$

式中，α_3表示正吸引力常数；r_{mf}是用来衡量雌性蜉蝣与其对应雄性蜉蝣的笛卡尔距离；l_{f}是随机飞行系数，当雌性没有被雄性吸引时，雌性随机飞行。r是[−1,1]之间的随机数。

3.1.3 雌雄蜉蝣的交配　蜉蝣交配的过程可以这样描述：分别从雄性种群和雌性种群选择一个父代进行交配，选择方式同雄性吸引雌性的方式相同，采用的是最优匹配机制。交配的结果就是生成如下两个子代：

$$\begin{aligned}c_1&=L\times m+(1-L)\times f\\ c_2&=L\times f+(1-L)\times m\end{aligned} \tag{14}$$

式中，c_1和c_2分别代表两个子代；m是雄性父代，f是雌性父代；L为[−1,1]范围内服从高斯分布的随机数。

3.2 动态扰动策略

从雄性蜉蝣位置更新公式可以看出，雄性个体都会受到全局最优雄性个体的吸引。这会导致雄性蜉蝣容易得到局部最优，从而出现早熟收敛的现象。因此，在改进蜉蝣算法中，本研究将设计出一种针对雄性蜉蝣的动态扰动策略，主要根据正态随机分布在全局最优雄性蜉蝣个体附近生成扰动，从而扩大寻优范围，增加收敛速度，提高全局寻优能力。具体改进方法如下：

$$c_{\mathrm{bg}}^{*}=N(c_{\mathrm{bg}},\sigma) \tag{15}$$

式中，c_{bg}和c_{bg}^{*}分别表示改进前后的全局最优位置；σ为动态扰动半径。

3.3 差分进化策略

在使用蜉蝣算法计算最优结果的时候，经常会遇到的阻碍是蜉蝣个体在进行婚礼舞蹈和随机游走的过程中，可能会走到搜索区域交叉的位置，这就可能导致蜉蝣内部得不到良好的信息沟通。因此本研究在雌性蜉蝣和雄性蜉蝣位置更新的过程中引入了差分进化策略。采用这一策略，可以加强种群之间的信息沟通，提高信息利用，确保种群内部信息实现有效协调，提升了算法的寻优精度。

$$c_{m+1}=c_{\mathrm{bp}}+\eta(\eta c_{\mathrm{bp}}-c_m) \tag{16}$$

式中，η 代表一个取值为[−0.5,0.5]的多项式系数。通过在蜉蝣周围用多项式系数 η 做尺度变换的方法，用其来代替原来的矢量。文献[30]显示，此设定方法能够极大地提高算法寻优的准确性。

3.4 模型求解的改进算法步骤设计

综上所述，混合动态扰动策略和差分进化策略的改进蜉蝣算法主要运行过程如图1所示：

Step 1：进行仿真前的准备工作。输入目标函数和约束条件，输入案例工序的数据，设置算法参数。

Step 2：初始化雄性蜉蝣和雌性蜉蝣，计算适应度函数值并排序，从而获取蜉蝣的当前最优位置和全局最优位置。

Step 3：根据式（15），采取动态扰动策略对雄性蜉蝣的位置进行扰动。

Step 4：分别根据式（10）和式（12）对雄性蜉蝣和雌性蜉蝣的当前位置进行更新。

Step 5：执行差分进化策略。根据式（16）更新蜉蝣位置，计算适应度值，更新最优解。

Step 6：根据适应度进行排序，相同排序位置的蜉蝣进行式（14）的交配，产生后代。

Step 7：找到迭代最优位置及适应度值。

Step 8：在满足约束条件的情况下，最优个体就会被输出。这时的最佳蜉蝣个体就是该算法的最优解。否则，退回Step 3。

Step 9：结束。

4 算例分析

4.1 工程项目案例

为了验证模型的有效性，并提高研究的准确性和可信度，本文选择了两个实际案例——一个小型工程项目（项目A）和一个大型工程项目（项目B）进行实验和分析。这两个项目都位于中国湖南省。A项目为岳阳市某小学食堂大楼，共两层，建筑面积1521.39 m²，合同期限60 d。该项目包括22个活动任务，其中第一个和最后一个任务是不消耗时间和资源的虚拟活动。B项目为长沙市区块链工业园区二期工程，共5层，占地面积6945.32 m²，合同期限380 d。该项目包括62个工序任务，第一个和最后一个任务是不消耗时间或资源的虚拟活动。图2和图3分别展示了项目A和项目B的基准进度计划横道图，说明了项目中每个任务的基准活动持续时间。根据实际生产需求，在这些项目中可调度的再生资源有三种：生产人员（R_1）、生产设备挖掘机（R_2）和生产设备混凝土搅拌机（R_3）。由于篇幅限制，本文没有显示每个活动的具体每日资源需求，但它们是已知的。

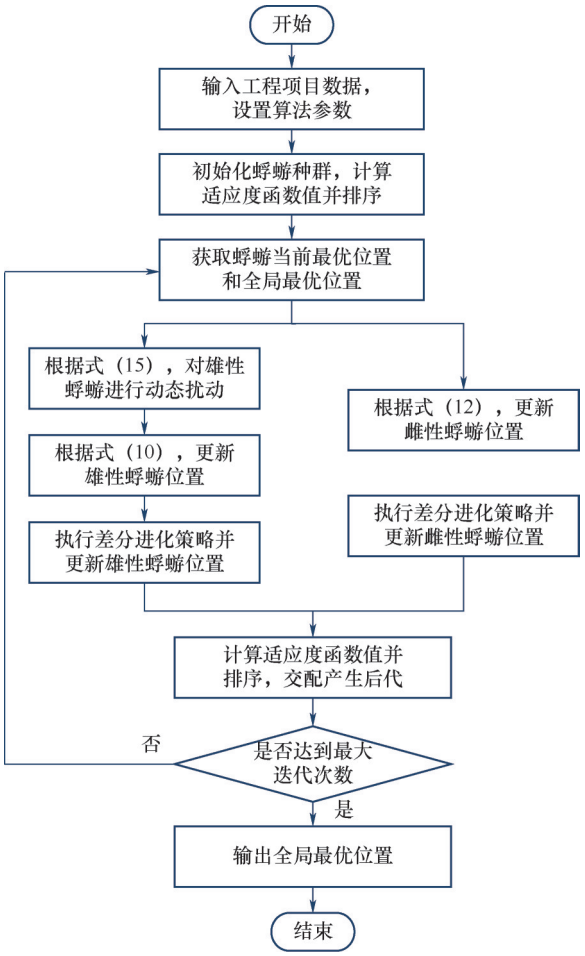


图1 改进蜉蝣算法运行过程

Figure 1 Improved mayfly algorithm running process

4.2 算例求解结果分析

本研究的所有运行仿真实验均在处理器为(TM)

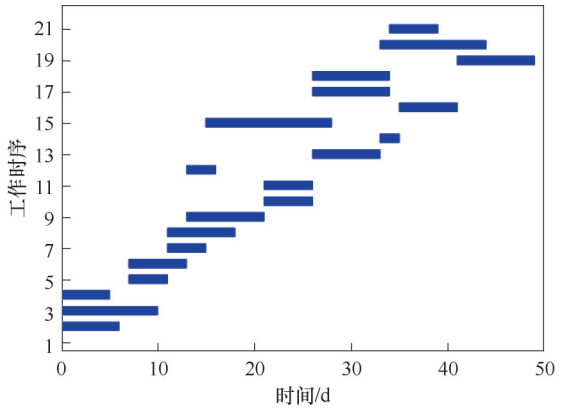


图2 项目A的基准进度计划横道图
Figure 2 Baseline schedule chart of Project A

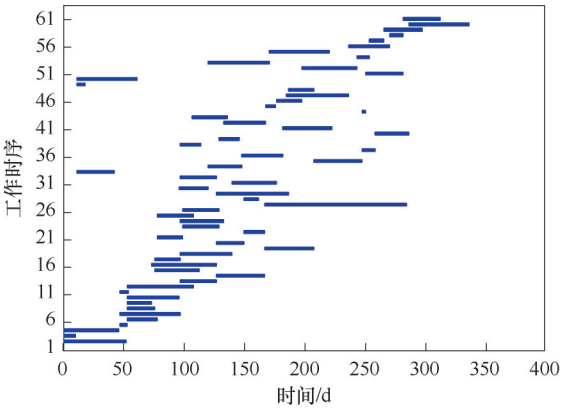


图3 项目B基准进度计划横道图
Figure 3 Baseline schedule chart of Project B

i5-8300H CPU@ 2.30GH的计算机上进行，所使用的编程语言为Matlab2022b，操作系统为Windows 10。改进算法初始参数设置如下：蜉蝣种群规模Q=100；正吸引系数α_1、α_2、α_3分别设置为1、1.5、1.5；可见度系数β=2；婚礼舞蹈系数d=5；随机飞行系数l_f=0.99；最大迭代次数为200次，算法独立运行60次。现选取项目A和项目B部分运行结果分别如表1、表2所示。

根据算法运行得出的结果可以看出，对于该项目来说，由本文提出的灵活调度模型计算得出的结果起到了显著的缩短工期的效果。表1中，最短项目工期为45 d，比合同工期缩短了25%；计算出的最长工期为53 d，比合同工期缩短了11.66%。其中方案2、4、6实现了工期成本的双重优化。表2中，最短项目工期为313 d，比合同工期缩短了17.63%；计算出的最长工期为363 d，比合同工期缩短了4.47%。其中方案1、6、8实现了工期成本的双重优化。

表1 项目A部分计算结果
Table 1 Partial calculation results of Project A

方案	f_1/d	f_2/万元	d_{ai}
1	45	488.190	[9,15,8,6,9,6,11,12,8,8,5,11,3,20,9,12,9,4,12,8]
2	45	483.311	[9,15,7,6,9,6,10,12,8,7,4,10,3,19,9,12,9,4,12,7]
3	46	475.754	[9,15,7,6,9,6,10,12,8,7,4,10,3,19,9,12,9,5,13,7]
4	46	469.662	[9,15,7,6,9,6,10,12,8,7,4,10,3,19,9,12,9,5,13,7]
5	47	463.107	[9,15,7,6,9,6,10,12,8,7,4,10,3,19,9,12,9,6,14,7]
6	47	456.494	[9,15,7,6,9,6,10,12,8,7,4,10,3,19,9,12,9,6,14,7]
7	48	451.937	[9,15,7,6,9,6,10,12,8,7,4,10,3,19,9,12,9,7,15,7]
8	48	454.135	[9,15,7,6,9,6,10,12,8,7,4,10,3,19,9,12,9,7,14,7]
9	49	445.740	[9,15,7,6,9,6,10,12,8,7,4,10,3,19,9,12,9,8,16,7]
10	50	442.242	[9,15,8,6,9,6,10,12,8,8,4,10,3,20,9,12,9,9,16,8]
11	51	437.200	[9,15,7,6,9,6,10,12,8,7,4,10,3,19,9,12,9,10,16,7]
12	53	433.467	[9,15,8,6,9,6,10,12,8,8,4,10,3,20,9,12,9,12,16,8]

4.3 求解结果对比分析

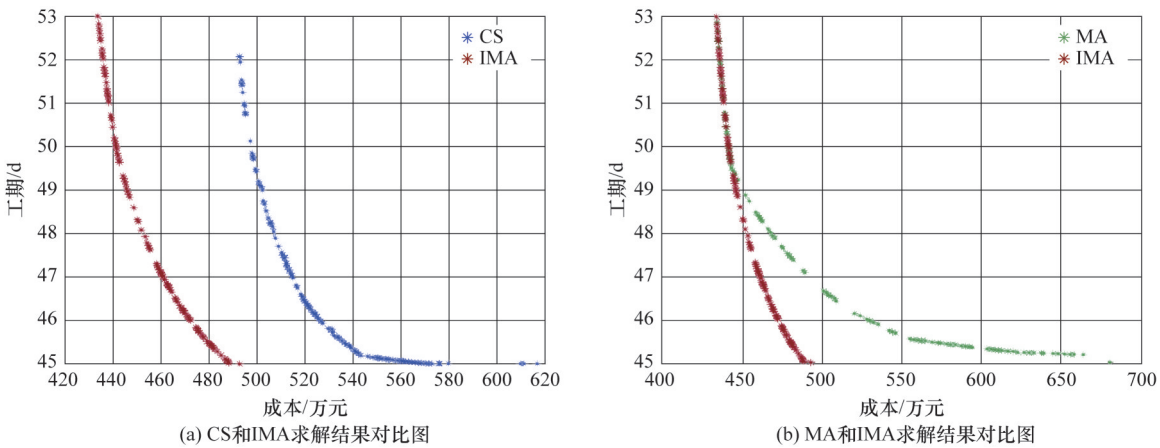
为了进一步验证本文提出的改进蜉蝣算法的优越性，本研究将使用MA和项目调度问题求解中常用的布谷鸟算法（cuckoo search，CS），对4.1节的两个工程算例进行仿真求解。MA基础参数的设置同本文提出的IMA一致。CS的基础参数设置为：种群大小为100，步长控制因子为0.01，莱维飞行控制因子为0.6。算法的求解结果对比如图4和图5所示。

算法对比结果表明，本研究所提出的多策略混合改进蜉蝣算法的求解结果优于传统的蜉蝣算法和布谷鸟算法求解结果。图4（a）和图5（a）中，改进蜉蝣算法的帕累托解曲线一直低于布谷鸟算法的帕累托解曲线，也就是说在求解出工期的范围内，当项目的总工期相同时，由改进蜉蝣算法求解出的成本要少于布谷鸟算法求解出的成本；图4（b）中，当项目的工期处于区间[49.5,53]内，蜉蝣算法和改进蜉蝣算法的帕累托边界曲线几乎完全重合，而当工期处于区间[45,49.5]内，改进蜉蝣算法的优越性开始凸显，其工期—成本帕累托解曲线低于蜉蝣算法的曲线，此时采

表2 项目B部分计算结果

Table 2 Partial calculation results of Project B

方案	f_1/d	f_2/万元	d_{ai}
1	313	1515.789	[73,16,59,9,38,73,34,28,63,10,32,32,59,50,81,32,64,61,30,30,26,44,53,45,40,26,15,90,36,56,45,42,42,60,51,16,25,25,42,62,52,35,4,11,32,76,32,10,45,46,68,76,13,65,46,13,13,46,25,30]
2	313	1577.326	[72,15,57,8,35,70,33,26,60,10,31,32,57,49,77,30,61,58,28,29,24,42,51,43,39,25,14,85,34,52,43,40,40,57,48,16,24,24,40,58,50,34,4,11,30,73,30,9,45,44,65,72,13,62,45,13,13,44,25,30]
3	314	1508.318	[74,16,60,9,37,73,34,28,64,10,31,33,59,50,81,31,64,61,30,30,25,44,53,45,40,26,15,90,36,55,45,42,42,60,51,16,25,25,42,61,52,36,4,11,31,76,31,10,45,46,68,76,13,66,47,14,14,46,25,31]
4	318	1415.298	[79,16,68,9,37,75,34,30,64,10,41,38,60,55,81,31,64,61,34,31,25,45,54,45,45,27,17,90,36,55,45,46,42,60,51,16,25,25,42,61,52,41,4,12,31,78,31,10,53,46,69,76,15,73,51,16,15,48,30,35]
5	322	1378.436	[79,16,70,9,38,75,34,30,64,10,52,41,60,55,81,32,64,61,34,31,26,45,54,45,45,27,18,90,36,56,45,46,42,60,51,16,25,25,42,62,52,43,4,12,32,78,32,10,60,46,69,76,15,75,51,17,16,48,34,39]
6	322	1377.644	[79,16,70,9,37,75,34,30,64,10,53,41,60,55,81,31,64,61,34,31,25,45,54,45,45,27,18,90,36,55,45,46,42,60,51,16,25,25,42,61,52,43,4,12,31,78,31,10,60,46,69,76,15,74,51,17,16,48,34,39]
7	335	1328.692	[79,16,70,9,38,75,34,30,64,10,82,45,60,55,81,32,64,61,34,31,26,45,54,45,45,27,18,90,36,56,45,46,42,60,51,16,25,25,42,62,52,43,4,12,32,78,32,10,75,46,69,76,15,75,51,18,16,48,47,46]
8	350	1320.858	[80,16,70,9,38,75,34,30,64,10,82,45,60,56,81,32,64,62,34,32,26,45,54,45,45,27,18,90,36,56,45,46,42,60,51,16,26,26,42,62,52,44,4,12,32,78,32,10,75,46,69,76,15,75,51,18,16,48,62,46]
9	350	1321.086	[80,16,70,9,38,75,34,30,64,10,82,45,60,56,81,32,64,62,34,32,26,45,54,45,45,27,18,90,36,56,45,46,42,60,51,16,26,26,42,62,52,43,4,12,32,78,32,10,75,46,69,76,15,75,51,18,16,48,62,46]
10	357	1318.703	[80,16,70,9,38,75,34,30,64,10,82,45,60,56,81,32,64,62,34,32,26,45,54,45,45,27,18,90,36,56,45,46,42,60,51,16,26,26,42,62,52,44,4,12,32,78,32,10,75,46,69,76,15,75,51,18,16,48,69,46]
11	360	1317.550	[80,16,70,9,38,75,34,30,64,10,82,45,60,56,81,32,64,62,34,32,26,45,54,45,45,27,18,90,36,56,45,46,42,60,51,16,26,26,42,62,52,44,4,12,32,78,32,10,75,46,69,76,15,75,51,18,16,48,72,46]
12	363	1316.800	[80,16,70,9,38,75,34,30,64,10,82,45,60,56,81,32,64,62,34,32,26,45,54,45,45,27,18,90,36,56,45,46,42,60,51,16,26,26,42,62,52,44,4,12,32,78,32,10,75,46,69,76,15,75,51,18,16,48,75,46]

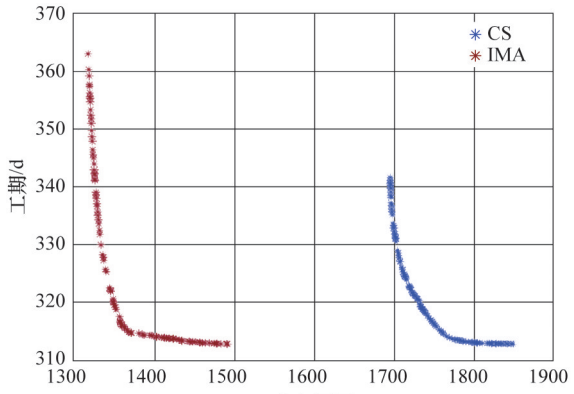


(a) CS和IMA求解结果对比图　(b) MA和IMA求解结果对比图

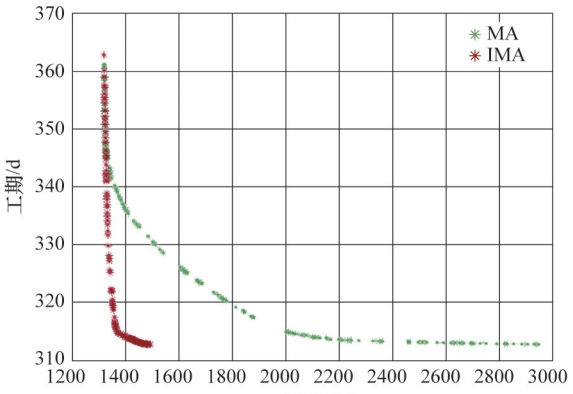
图4 项目A不同算法求解结果对比图

Figure 4 Comparison of results of different algorithms in Project A

用改进蜉蝣算法得出的工期安排和项目调度方案更加经济有效；图5（b）中，当项目的工期处于区间[345,363]内，蜉蝣算法和改进蜉蝣算法的帕累托边界曲线重合，而当工期处于区间[313,345]内，采用改进



(a) CS和IMA求解结果对比图



(b) MA和IMA求解结果对比图

图5 项目B不同算法求解结果对比图

Figure 5 Comparison of results of different algorithms in Project B

蜉蝣算法得出的结果更好。以上分析表明，本研究提出的IMA比CS和MA的效果明显更好。所得解不仅质量较高，而且更适用于实际工程。

5 敏感性分析

为了探究工期偏离系数对于项目进度压缩有效性的影响，本节分别从PSBLIB数据库中选取30 j、60 j、90 j、120 j各30个单模式工程调度算法案例进行测试，它们代表活动数量分别为30、60、90和120的工程项目。PSBLIB是一个国际通用的工程调度问题库，它包含了大量的工程调度测试用例。用算法求解得到的最短工期与基准工期之比作为项目工期的最大压缩比，用来衡量项目进度压缩的程度。测试结果如图6和表3所示。图6显示，随着ϕ的增加，所有测试项目的总持续时间的平均最大压缩比都会增加。此外，项目中包含的活动越多，工期压缩的效果就越明显。这说明灵活工期策略对于缩短项目工期是有效的。如果项目决策者的目的是在不考虑成本的情况下尽可能地压缩工期，可以通过适当增大工期偏离系数来实现。

6 结论

本研究旨在解决在工期不确定且资源约束的工程项目中的多目标调度问题。通过衡量项目实际工期与

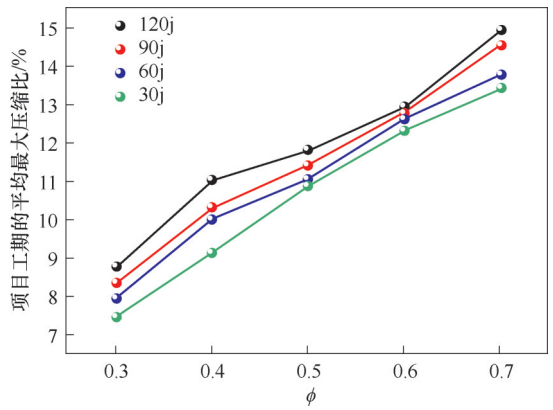


图6 敏感性分析图

Figure 6 Sensitivity analysis chart

表3 算法测试结果

Table 3 Results of algorithmic tests

ϕ	项目工期的平均最大压缩比/%			
	30j	60j	90j	120j
0.3	8.74	10.31	7.92	7.43
0.4	11.04	10.37	10.01	9.14
0.5	11.77	11.39	11.05	10.86
0.6	12.90	12.77	12.65	12.31
0.7	14.93	14.53	13.80	13.43

计划基准工期的偏差，同时综合考虑资源约束及不确定工期等因素，提出了一种灵活调度模型。与传统双目标均衡优化调度模型不同的是，本研究提出模型求解的结果并非求得最优解，而是提供更多的工期资源调度方案。数据仿真结果显示，计算出的部分调度方

案能实现工期与资源的双重优化。项目决策者也可从实际需要出发，比如合同截至工期、资源供给情况，灵活地选择合适的调度计划。同时，为了对所提出的模型进行求解，本研究将动态扰动策略和差分进化策略融合进基础蜉蝣算法中进行改进。通过将改进后的算法与蜉蝣算法、布谷鸟算法应用于一大一小两个实际工程案例进行求解对比分析，证明了改进后的蜉蝣算法有助于加强种群信息交流，避免陷入局部最优，在一定程度上能提高求解质量，也拓展了资源约束项目调度问题的解决方案。

尽管本文提出的改进蜉蝣算法在求解准确度和质量方面都得到了很好的验证，但在求解效率方面并没有太大的进步，因此怎样让改进后的蜉蝣算法同时具备精确率和计算效率仍是我们未来研究需要努力解决的问题。另一方面，各种风险以及不确定性往往充斥在工程项目执行的整个过程中。工序持续时间的不确定性只是其中的一个方面。除此之外，还存在工程项目在执行过程中资源供给是否会中断等其他类型的不确定性。对于这些不确定性因素的追踪定位和妥善处理，应当是未来研究的一个重要方向。

参考文献

[1] 邓鹏程. 考虑多技能人员学习效应的项目调度问题及优化方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Deng P C. Research on project scheduling problem and optimization method considering the learning effect of multi-skill personnel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[2] 曾鸣, 戴业东, 刘万安. 数据驱动的资源受限项目调度问题求解器推荐研究[J/OL]. 计算机工程与应用, 2025: 1-26. (2025-03-26). https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20250326.1034.007.html.
Zeng M, Dai Y D, Liu W A. Data-driven research on solver recommendation for resource-constrained project scheduling problems[J/OL]. Computer Engineering and Applications, 2025: 1-26. (2025-03-26). https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20250326.1034.007.html.

[3] 马志强, 徐小峰, 何正文, 等. 复杂不确定环境下活动可拆分的项目资源鲁棒性调度优化[J]. 中国管理科学, 2022, 30(3): 117-130.
Ma Z Q, Xu X F, He Z W, et al. Robust scheduling optimization of project resources with activity splitting under complex and uncertain environments[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(3): 117-130.

[4] 魏汉英. 不确定性服务项目调度的鲁棒优化建模及算法研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2024.
Wei H Y. Robust optimization formulations and algorithms for uncertainty project scheduling in service industry[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2024.

[5] 王浩. 柔性资源约束下的重复性项目反应性调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
Wang H. Reactive scheduling of repetitive projects under flexible resource constraints[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.

[6] 曹芳芳, 何正文, 王能民. 活动执行时间可提前的多模式反应性项目调度优化[J]. 运筹与管理, 2022, 31(11): 15-22.
Cao F F, He Z W, Wang N M. Multi-mode reactive project scheduling pptimization based on the roadrunner scheduling policy[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(11): 15-22.

[7] 缪金丹. 考虑气象因素和资源限制的户外作业项目调度研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
Miao J D. Research on resoure-constrained project scheduling for outdoor projects considering weather conditions[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.

[8] 王峰, 韩孟臣, 赵耀宇, 等. 基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题[J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 669-676.
Wang F, Han M C, Zhao Y Y, et al. An improved NSGA-II algorithm for multi-objective resource-constrained project scheduling problem [J]. Control and Decision, 2021, 36(3): 669-676.

[9] 申建红, 孙小宁, 张云华. 基于Shapley值-仿真技术的工序工期预测[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(3): 30-34.
Shen J H, Sun X N, Zhang Y H. Activity duration forcasting based on shapley-simulation teconique[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33(3): 30-34.

[10] 谢芳, 徐哲, 于静. 资源可用量不确定和活动多模式情形下的随机项目调度问题[J]. 管理工程学报, 2022, 36(3): 170-178.
Xie F, Xu Z, Yu J. Stochastic scheduling of projects with uncertain resource availabilities and multiple modes[J]. Journal of Industrial

Engineering and Engineering Management, 2022, 36(3): 170-178.

[11] 郭晓剑, 胡方勇. 基于深度强化学习的随机资源受限多项目动态调度策略[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(9): 2752-2756.
Guo X J, Hu F Y. Stochastic resource-constrained multi-project dynamic scheduling strategy based on deep reinforcement learning[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(9): 2752-2756.

[12] 王敏, 刘国山. 一种基于任务组合优化的项目调度机制研究[J]. 管理评论, 2025, 37(3): 228-237.
Wang M, Liu G S. A project scheduling mechanism based on activity combination optimization[J]. Management Review, 2025, 37(3): 228-237.

[13] Ben-Haim Y, Laufer A. Robust reliability of projects with activity-duration uncertainty[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1998, 124(2): 125-132.

[14] 廖怡娜, 陆志强. 考虑作业返工的资源受限项目调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(11): 2762-2774.
Liao Y N, Lu Z Q. Resource-constrained project scheduling problem with reworking[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(11): 2762-2774.

[15] 胡文斌, 乐宇, 许龙, 等. 工期确定及可变工期下的受限资源多项目调度建模[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11): 2398-2408.
Hu W B, Yue Y, Xu L, et al. Resource constrained multi-project scheduling modeling under certainty and uncertainty duration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(11): 2398-2408.

[16] Naber A, Kolisch R. MIP models for resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 239(2): 335-348.

[17] 李浪. 基于反馈控制的产品开发并行耦合任务工期的研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
Li L. Research on duration of parallel coupling tasks for product development based on feedback control[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020.

[18] 徐哲, 有维宝, 赵松, 等. 考虑转移时间的分布式资源受限多项目鲁棒调度优化[J/OL]. 中国管理科学, 2024: 1-14. (2024-10-11). https://link.cnki.net/doi/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.1813.
Xu Z, You W B, Zhao S, et al. Robust scheduling optimization of distributed resource-constrained multi-projects considering transfer time[J/OL]. Chinese Journal of Management Science, 2024: 1-14. (2024-10-11). https://link.cnki.net/doi/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.1813.

[19] 高中钰. 基于关键链法的工程项目进度管理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
Gao Z Y. The research on schedule management of engineering projects based on critical chain method[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.

[20] 惠明晶. 考虑延迟时距的不确定工期—费用—质量优化模型研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
Hui M J. The uncertain time-cost-quality optimizationmodels considering delay time interval[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.

[21] Acebes F, Poza D, González-Varona J M, et al. On the project risk baseline: Integrating aleatory uncertainty into project scheduling[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 160: 107537.

[22] 陈志敏, 夏源, 王鹏, 等. 基于萤火虫算法的随机工时下船舶维修工期优化[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 128-133.
Chen Z M, Xia Y, Wang P, et al. Improved firefly algorithm for the stochastic duration optimization of the ship maintenance[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 128-133.

[23] 袁辰. 多模式下模糊搭接网络的RCPSP成本优化问题[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
Yuan C. Cost optimization of RCPSP based on multi-mode fuzzy overlapping network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

[24] 李仁杰. 元启发式算法及其在模糊多模式资源约束项目调度中的应用[D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
Li R J. Meta-heuristic optimization and its application in fuzzy multimode resource constrained project scheduling[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020.

[25] Huang M, Cui Y, Yang S X, et al. Fourth party logistics routing problem with fuzzy duration time[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 145(1): 107-116.

[26] Chanas S, Zieliński P. Critical path analysis in the network with fuzzy activity times[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 122(2): 195-204.

[27] 李阳, 何正文, 王能民, 等. 带有模糊工期的多模式项目鲁棒优化[J]. 工业工程与管理, 2022, 27(4): 39-49.
Li Y, He Z W, Wang N M, et al. Robust optimization for the multi-mode project scheduling problem with fuzzy duration[J]. Industrial

Engineering and Management, 2022, 27(4): 39-49.

[28] Roghabadi M A, Moselhi O. Forecasting project duration using risk-based earned duration management[J]. International Journal of Construction Management, 2022, 22(16): 3077-3087.

[29] 陈飞, 杨超, 鲁杰. 基于MA-SVM的家用负荷非侵入式识别[J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(10): 113-117.
Chen F, Yang C, Lu J. Non-invasive identification of household load based on MA-SVM[J]. Intelligent Computer and Applications, 2021, 11(10): 113-117.

[30] 占宏祥, 汪廷华, 张昕. 一种融合反向学习机制与差分进化策略的蛇优化算法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2024, 56(6): 25-31.
Zhan H X, Wang T H, Zhang X. Snake optimizer algorithm based on opposition-based learning mechanism and differential evolution strategy[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2024, 56(6): 25-31.

Research on Flexible Scheduling of Resource-Constrained Projects Based on the Improved Mayfly Algorithm

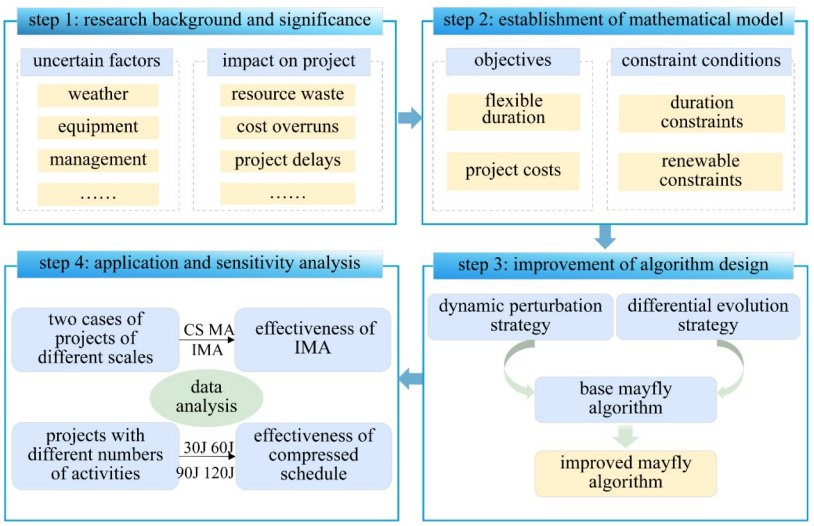
PENG Junlong*, SHAO Yu, TANG Saisai, LIU Xiao

School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114*, China*

Highlights

- A multi-objective resource-constrained project scheduling problem with flexible durations (MORCPSP-FD) is proposed.
- Introduced an improved mayfly algorithm (IMA) with multi-strategy fusion.
- Flexible duration strategy offers project decision-makers multiple combinations of "activity-duration-resource".

Graphical Abstract



Abstract: In the actual construction process of engineering projects, the duration of each activity is often uncertain. If project activity time is regarded as a fixed value, the project scheduling arrangement often does not meet the actual demands of the

project. This study focuses on providing a solution to the problem of resource-constrained scheduling for engineering projects with uncertain durations.

In this paper, we developed a flexible duration strategy and established a multi-objective resource-constrained project scheduling problem model under flexible duration, considering the impact of flexible activity duration on the demand for activity resources. Additionally, we introduce the dynamic perturbation strategy and the difference strategy into the traditional mayfly algorithm for improvement, aiming to overcome the traditional mayfly algorithm's tendency toward premature convergence to local optima. In order to verify and analyze the proposed model and algorithm, we substituted two actual engineering cases, one large and one small, into the model and solved them respectively using cuckoo search algorithm, the standard mayfly algorithm and the improved mayfly algorithm for comparative analysis. Finally, in order to explore the influence of the deviation coefficient of the project duration on the effectiveness of project schedule compression, 30 single-mode engineering scheduling algorithm cases of 30j, 60j, 90j and 120j were selected respectively from the PSBLIB database for testing.

Whether it is the large-scale engineering case or small-scale one, the results of construction period and cost solved by the improved mayfly algorithm are superior to those of the cuckoo search algorithm and the traditional mayfly algorithm. In addition, The test results of the PSBLIB dataset show that the larger the deviation coefficient of the project duration, the greater the degree to which the project progress is compressed.

After reviewing the above process, the findings demonstrate that the MORCPSP-FD model put forward in this work can significantly reduce project length and offer project decision-makers a wide range of realistic scheduling options in the event of duration uncertainty. While the necessary duration of the project solved by the modified mayfly algorithm is shorter in the event of the same total project input cost, it has superior solution quality than the cuckoo search algorithm and the standard mayfly algorithm.

Keywords: uncertain duration; flexible scheduling; resource constrained project scheduling; improved mayfly algorithm; scheduling optimization