**摘要**：资源均衡是实现，然而，在项目执行过程中，不确定性是不可避免的。除此，在实际的项目中，项目结构通常是具有柔性的。不确定的环境和柔性的项目结构进一步加剧了资源均衡的难度。因此，本文在传统的RLP中同时考虑了活动工期不确定和柔性项目结构，研究了带有柔性项目结构的随机资源均衡问题（SRLP-PS），建立了该问题的非线性随机规划模型。为了有效的求解SRLP-PS，本文开发了一个混合优化算法（GEDA），该算法集成了分布估计算法的概率模型和遗传算法的交叉和变异算子。在大量实例上进行计算实验，验证所提出算法的有效性。实验结果表明，

关键词：项目调度；资源均衡；柔性项目结构；随机活动工期

调度策略能更好的适应项目中存在额不确定性，无论它们是模糊还是随机引起的（Solving the FS-RCPSP with hyper-heuristics: A policy-driven approach）

实际的活动工期会受不可控因素的影响，随机调度中不创建进度计划，而是在项目执行过程中根据策略调度活动

由于工期的不确定，所有活动都尽早调度，以使项目能在截止日期内完工。

解码：考虑资源和优先关系约束

对于大规模实例，随机选择实例，用算法求解，考虑不同情景下，目标函数值的变异系数，来确定最佳的仿真次数

决策是：确定需要执行的活动，并确定执行活动的调度顺序，在满足优先关系和资源可用量的情况下，为活动分配开始时间，并保证项目的资源使用量波动最小。

资源均衡问题得到了广泛的研究，其中每个活动的工期是确定的，另一方面，在随机资源均衡问题中，活动的工期是随机的。在实际的项目管理中，不确定性是存在的，考虑随机因素是有益的。这种情况在大型软件开发项目，建筑项目等方面都有发生。在这种情况下，使用资源均衡建模和求解可能会导致较差的性能。

关于随机资源均衡的研究并不多。

决策者需要灵活的选活动或者决定这些活动确定的工期

在许多制造业以及食品工业存在活动的选择和时间的不确定，例如热焙烤食品的冷却时间是不固定的

考虑执行活动和活动顺序的组合

1. 活动工期的不确定进一步将问题复杂化，传统的精确算法难以对问题进行求解
2. 本文首先确定项目结构，即执行活动以及它们之间的优先关系，然后在进一步寻找最优的调度策略。
3. 通过调整活动的优先顺序，可以获得更好的进度计划

# 引言

在项目管理中，资源需求的大幅度波动，可能会造成相当昂贵的费用。因此，项目经理需要对资源进行管理，以实现资源的有效利用，并尽可能的降低成本。资源均衡问题（Resource leveling problem，RLP）旨在满足项目截止日期和活动之间优先关系的约束下，获取一个基线进度计划，从而最小化资源使用量的波动 (Li & Demeulemeester, 2016; Li et al., 2018)。RLP因其在建筑业和制造业的实际应用而受到了广泛的关注 (Ballestín et al., 2007; Chan et al., 1996)。为实现对RLP的有效求解，学者们设计了大量的精确算法和启发式算法。在精确算法方面，主要包括动态规划 (Bandelloni et al., 1994)、分支定界 (Gather et al., 2011; K. Neumann & Zimmermann, 2000) 和整数规划 (Rieck et al., 2012) 等。求解RLP 的启发式算法大多都是基于移位的方法(Burgess & Killebrew, 1962; Christodoulou et al., 2010; K. Neumann & Zimmermann, 1999)。元启发式算法主要包括遗传算法 (Li et al., 2018)、禁忌搜索算法 (Koulinas & Anagnostopoulos, 2013)、迭代贪婪算法 (Ballestín et al., 2007) 等。

现有的关于RLP的研究大多是在环境确定和完全信息的假设下进行的，然而，在项目执行过程中，不确定环境是不可避免的。例如：由于天气、材料延迟到达、工人缺勤等因素的影响，活动工期可能是不确定的(Leu et al., 1999)。不确定性不仅加剧了项目管理的难度，还导致确定性RLP模型生成的基线进度计划不能够有效的指导项目执行，使项目实际的进度计划可能与基线进度计划出现偏差。因此，在RLP中考虑不确定环境，对于保证项目顺利实施以及资源的有效使用是非常重要的。

目前，对不确定环境下的RLP研究较少，并且主要集中在活动工期不确定。Leu et al. (1999) 和Leu and Hung (2002) 都在RLP中考虑了不确定的活动工期，不同的是，前者使用模糊理论对活动工期的不确定性建模，而后者则将活动工期视为随机变量，运用蒙特卡洛法对其不确定性进行建模。Masmoudi and Haït (2013) 研究了模糊RLP，用模糊数表示活动工期和工作量。上述的研究均采用遗传算法进行求解。Li et al. (2015) 研究了活动工期不确定下的随机资源均衡问题（Stochastic resource leveling problem，SRLP），并开发了两种启发式算法来生成调度策略，以最小化资源使用量加权变异系数的期望和。除了活动工期的不确定性，Li et al. (2019) 进一步考虑了活动重叠的不确定性，并将活动重叠建模为最小时滞，研究了随机最小时滞的RLP。该研究的目的是获得使资源使用量尽可能平稳调度策略。上述关于SRLP的研究都是通过获得一个开环策略来指导项目的实施。在之前研究的基础上，Li et al. (2020)进一步考虑了包含多个不确定性的RLP，该问题同时考虑了活动工期、活动重叠和资源可用性的不确定。为解决该问题，作者提出了一种混合开闭环近似动态规划算法，实验结果表明，该算法优于最先进的元启发式算法。虽然闭环策略比开环策略具有更好的适应性和灵活性，但它们在计算上通常需要花费大量的时间 (Rostami et al., 2018)。

除了不确定环境，在实际的项目中，柔性项目结构通常是存在的。在柔性项目中，需要执行的活动和活动之间的优先关系都是不固定的，即只需选择一部分活动执行，并且优先关系只存在于被选中的执行活动之间；一些活动即使不执行，也并不影响项目的实施。以桥梁建造为例，在建造桥墩时，可以选择用钢筋混凝土或钢结构建造。如果选择了用钢筋混凝土，相应的就要进行建造基底层、基层和墩身等活动。如果选择用钢结构，需要进行预处理、焊接等活动。两种方式都能完成桥墩的建造，选择不同的方式可能会影响后续活动的执行以及活动之间的优先关系，从而进一步影响资源的使用情况。因此，柔性项目结构对于资源均衡的影响是不可忽视的。

目前，在 RLP中对柔性项目结构的关注较少，现有的研究都是在项目结构是固定的情况下进行研究的，但在项目调度的其他领域，已经有文献在资源受限问题（Resource-constrained project problem，RCPSP）中考虑了的不固定项目结构 (Čapek et al., 2012; Kellenbrink & Helber, 2015; Servranckx & Vanhoucke, 2019b; Tao & Dong, 2017)。这类研究的项目结构都有两个共同的特点：（1）项目中的只有部分活动执行；（2）活动之间除了优先关系之外还存在更复杂的关系。尽管如此，在项目调度中同时考虑不确定环境和柔性项目结构的研究较少。Tao et al. (2017) 研究了具有分层可选方案的项目结构和随机工期的RCPSP，将抽样平均近似与基于种群的进化人工藻类算法相结合，提出了一种元启发式框架来解决该问题。实验结果表明，该框架在求解质量和时间上均优于抽样平均近似和遗传算法。Servranckx and Vanhoucke (2019a) 研究了不确定条件下可选子图的项目调度策略，通过构建备选的进度计划，以应对项目执行中的意外变化。

综上所述，目前在RLP中尚未发现同时考虑不确定活动工期和柔性项目结构的研究。然而，活动工期的不确定性和柔性项目结构都会对项目的资源使用效率造成影响。为了填补这一空白，本文提出并研究了带有柔性项目结构的随机资源均衡问题（SRLP-PS），以期望在不确定环境下，选择并调度活动，使项目的资源使用量尽可能平稳。本文的主要贡献可以总结如下：

（1）本文研究了带有柔性项目结构的随机资源均衡问题，建立了该问题的非线性随机规划模型。除此，本文还建立SRLP-PS的确定等价的线性整数规划模型。

（2）为有效求解SRLP-PS，本文开发了一个混合优化算法（GEDA），该算法集成了EDA的概率模型和GA的交叉和变异算子，并针对SRLP-PS的特点设计了专门的编码和解码机制。

（3）本文基于PSPLIB问题库的项目实例，将其扩展为具有柔性项目结构的实例。通过正交试验设计方法确定GEDA的最佳参数设置，并基于大规模的计算实验，验证所提出算法的有效性和先进性。此外，本文进一步还分析了~~信息价值对于决策的影响~~以及柔性项目结构参数对GEDA性能的影响。

本文的其余的部分描述如下：第二节介绍了SRLP-PS相关概念，并建立了非线性随机规划模型。除此，本文还建立了该问题的等价问题的整数规划模型，并基于该模型提出了一个代理框架。第三节开发了一个混合优化算法（GEDA）。第四节提供了计算实验和结果。第五节是对全文的总结以及未来进一步研究的方向。

项目经理除了需要确定执行的活动之外，还需要考虑如何合理的安排这些活动的开始时间，使整个项目的资源使用量尽可能均衡。

假设活动工期的概率分布是已知的。

资源均衡可以提高工作效率和最小化成本，模糊资源均衡假设真实隶属函数来处理包围在项目及其活动工期周围的不确定性。

设计了一个基于中性集合的资源均衡模型，以克服现实问题带来的模糊性。在该模型中，梯子中子数用于估算活动工期。并以一个数值例子来说明所提模型的有效性。

项目调度是将稀缺的资源分配到活动中，使项目完成已达到特定目标的过程，如最小化项目的完成时间，最小化项目执行的成本和/或最大限度地提高项目质量。