

[文章编号] 1003-4684(2021)02-0081-05

基于 NSGA-Ⅱ 与 BIM5D 的工期-成本优化

王绪民, 王 琪

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为达到工程项目效益最大化,实现工期与成本的综合优化目标,提出一种改进 NSGA-Ⅱ 算法与 BIM5D 结合的寻优方法,对工期-成本优化问题进行求解。考虑投产效益对成本的影响,完善了工期-成本多目标优化模型。为解决 NSGA-Ⅱ 算法寻优过程中搜索空间小,准确度低的问题,在引进动态交叉、变异概率基础上,设计求解该模型的改进 NSGA-Ⅱ 算法。并将算法与 BIM5D 平台对接,进行施工工序及资金、资源曲线模拟,提高单一算法寻优实践性。案例分析表明,改进 NSGA-Ⅱ 算法与 BIM5D 结合求解工期-成本优化问题可有效优化进度和成本目标。

[关键词] 工期-成本优化; 改进 NSGA-Ⅱ 算法; BIM5D

[中图分类号] TU721 **[文献标识码]** A

对于工期-成本优化问题,国内外学者主要从两方面探讨:1)求解算法的选择。启发式算法引入传统生物学概念,相较于传统数学方法具有更强全局把控性,为多目标优化问题提供新的思路。Kyung Kim 等在蚁群算法上提出改进,以避免寻优效率低的问题^[1-2]。Zalmai LM 考虑确定性的项目值,采用和声算法进行寻优^[3]。申建红选择电子优化算法,引入精英档案存储,着重于寻找最优成本的最优工期^[4]。尽管很多新算法被证明可以在工期-成本优化问题中得以运用,但难以满足整个寻优过程中种群多样性和稳定性。2)实施过程的优化。考虑到工期-成本优化问题是一个复杂度高且影响因素多的问题,简单算法优化缺乏指导性和实践性。BIM(Building Information Modeling)信息模型可视化功能可以弥补单一算法寻优的缺陷,为实际施工提供可行性指导。黄良辉建立基于 BIM 的成本优化信息模型,并采用微粒子群算法优化求解^[5]。何威提出将遗传算法和 BIM 碰撞技术结合,使优化方案更具实践性^[6]。Hyounseok Moon 将遗传算法和 BIM 环境结合,最大程度地减少高风险活动的重叠^[7]。但以上研究对于 BIM 的应用还十分狭隘,仅停留在三维建筑层面,缺少对进度、成本信息集成和管理。

基于此,本文采用 NSGA-Ⅱ 算法进行求解,为扩大算法寻优搜索空间和提高收敛性,在进行遗传

操作时,引入动态交叉、变异概率,对 NSGA-Ⅱ 算法进行改进,使 Pareto 解集更有效性。利用 BIM5D 信息集成化和三维可视化的特点,对求得的解集进行施工方案模拟,有效避免工序安排、资源安排以及资金安排不合理问题。

1 工期-成本优化数学模型

1.1 问题描述

工期和成本存在着一定制约关系,即缩短工期会引起成本增加,成本降低又会引起工期延长。这种以一个函数目标值降低来提高另一个函数目标值的问题被称作多目标优化问题^[8],该问题又可以表示为图论中最小点成本最短路径问题(MCSP),其有向图如图 1 所示。通过为每个工序确定持续时间,编制施工方案,在应急状态和正常状态中寻求一个平衡状态,达到工期-成本的综合最优。图 1 中,每个工序由一个节点表示,其中该节点内英文字母表示该工序的编号。本文所研究的工期-成本优化问题目的在于寻找 A 节点到 F 节点的一种最短路径,使所有节点成本达到最低。

1.2 数据建模

为减少算法迭代次数,得到的最优解更加精确和客观,需要在建立工期-成本优化模型时做相应假设:

假设一:不存在其他资源约束且各工序无返工

[收稿日期] 2020-08-09

[基金项目] 湖北工业大学博士启动基金(BSQD14040)

[第一作者] 王绪民(1972-),男,湖北武汉人,工学博士,湖北工业大学副教授,研究方向为项目成本管理

[通信作者] 王 琪(1996-),女,湖北荆州人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为项目成本管理

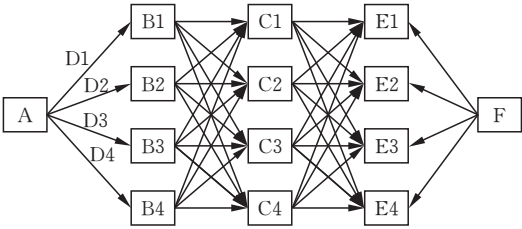


图1 工期-成本优化有向图

问题。

假设二:工程项目施工组织设计方案已经确定,所涉及到计划工期及成本目标确定,在完成所有工序之前,方案不会做出重大调整。

假设三:工序持续时间和成本具有一定函数关系。表1是本文所用符号的注解。

表1 符号解释

| 符号 | 含义 |
|--------------|-----------------------|
| C_1 | 直接成本 |
| C_2 | 间接成本 |
| P | 投产效益 |
| D_{il} | 第 <i>i</i> 项工序的正常工期 |
| D_{ie} | 第 <i>i</i> 项工序的应急工期 |
| D_i | 第 <i>i</i> 项工作的持续时间 |
| K_1 | 边际成本系数 |
| M | 每日产生的间接费 |
| T_{\max} | 合同工期 |
| T | 施工工期 |
| n | 工序数量 |
| C_{1i} | 第 <i>i</i> 项工作的直接成本 |
| C_{2i} | 第 <i>i</i> 项工作的间接成本 |
| $C_{1i\min}$ | 第 <i>i</i> 项工作的应急直接成本 |
| $C_{1i\max}$ | 第 <i>i</i> 项工作的正常直接成本 |
| α | 奖惩因子 |

工程项目成本主要由直接成本和间接成本构成,但考虑到投产阶段工期对成本的影响,加入了工程竣工后的投产效益。采用非线性函数描述各成本要素和工序持续时间的关系。

1)直接成本 工程项目中一旦对工期进行调整,成本也会发生相应变化。加快施工进度同时,需要投入更多人工和机械设备。人工费和机械设备使用费是项目直接成本重要组成部分,即工序持续时间增加导致直接成本增加。但考虑某个工序所需投入的人材机总量是一定的,赶工费用并不会随着工期增加而一直减少,因此直接成本的下降速度也会减缓。即:

$$C_{1i} = C_{1i\min} + k_1 (D_{il} - D_i)^2 \tag{1}$$

其中
$$k_1 = \frac{C_{1i\max} - C_{1i\min}}{(D_{il} - D_{ie})^2}$$

2)间接成本 工程项目间接成本主要由税金、管理费、办公费等固定费用构成,与某个工序持续时间不具有明显关联性,可近似将单个工作日的间接费用视为固定值。

$$C_{2i} = M * D_i \tag{2}$$

其中
$$M = \frac{C_2}{T}$$

3)投产效益 单个活动工序持续时间越短,工期也相应加快,项目投产运行越早,产生的资金时间价值越大。

$$P = \alpha(T - T_{\max}) \tag{3}$$

其中
$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1 T - T_{\max} \geq 0 \\ \alpha_2 T - T_{\max} \leq 0 \end{cases}, T = \sum D_i$$

综上,成本与工序持续时间的关系可表示为:

$$C_i = C_{1i} + C_{2i} + P \tag{4}$$

建立数学模型式。目标函数(1)

$$\text{Min}C = \sum C_i \tag{5}$$

目标函数(2)

$$\text{Min}T = \sum D_i \tag{6}$$

约束条件为

$$D_{ie} \leq D_i \leq D_{il} \tag{7}$$

$$T \leq T_{\max} \tag{8}$$

2 模型的求解与分析

2.1 改进 NSGA-Ⅱ 算法寻优模块

NSGA-Ⅱ算法是一种引进精英策略、采用了拥挤度和拥挤度比较算子的快速非支配算法,能得到包含多组工期-成本序列的 Pareto 解集,是目前最常用的多目标遗传算法之一。相较于传统遗传算法,降低了计算复杂程度,保留了种群多样性,提高了结果精度。尽管该算法做了很大改进,但仍然存在搜索空间过小或寻优准确度不高问题。为避免该问题,本文在进行遗传操作时引进动态交叉和变异概率对算法进行改进,并用 Matlab 软件来实现。

2.1.1 改进的遗传操作

1)遗传操作的基本形式 遗传操作中交叉和变异操作是产生新个体的主要方式^[9]。交叉操作即将两个父代染色体随机进行交换,产生新个体,常见交叉方法有单点交叉和多点交叉,本文采用单点交叉。变异操作不同于交叉操作,是针对基因层面,通过随机对个体中一个或几个基因随机进行更改,产生新个体。在进行交叉和变异操作时,通常采用一个固定概率值,以致于出现搜索空间过小或寻优准确度不高等问题。

2)改进的遗传操作 针对上述问题,本文提出一种新方法,来提高传统 NSGA-Ⅱ算法速度和准确度。具体的交叉和变异策略如下:

第一,采用轮盘选择方法对初始化种群进行选择操作,产生 n 个变量 $X_1 - X_n$ 。

第二,将选择的变量根据 P_c 进行交叉操作,然

后由 $X_1 - X_n$ 变成 $X'_1 - X'_n$ 。

第三,将交叉产生的 $X'_1 - X'_n$ 根据 P_v 进行变异操作,产生子代 $X''_1 - X''_n$ 。

与传统遗传操作不同,新的交叉和变异策略中引进了两个动态参数 P_c 和 P_v ,早期将 P_c 和 P_v 值设置为较大的值,大多数变量就有机会参与交叉操作,加强对搜索空间的探索,后期将 P_c 和 P_v 设置为较小的值,有利于在搜索后期将总体收敛到高适应性个体。其中, P_c 和 P_v 的动态取值见下式:

$$P_c = \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}$$

(9)

其中, P_c 应满足条件 $0.2 < P_c < 0.8$

$$P_v = \frac{k_2(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}$$

(10)

其中, P_v 应满足条件 $0.001 < P_v < 0.1$; f_{\max} 为种群最大适应度; f_{avg} 为种群平均适应度; f 为当前个体适应度。

2.1.2 算法流程及要点

1)初始化种群 从待分类的点中随机选择 K 个点作为问题的一个解并编码为一个染色体。重复进行这个操作直到种群中所有个体全部被初始化。

2)非支配排序 假设种群中所有可以被支配个体的集合为 S_p , 个体被其他个体支配的数量为 N_p 。首先,计算出每个个体的 S_p 和 N_p ,将 $N_p=0$ 的个体组成 F_1 。在 F_i 中对每个个体的 S_p 集合的个体满足 $N_p-1=0$,则将该个体加入到 F_{i+1} 。以此类推,求得该种群中所有个体的 Pareto 等级。

3)遗传操作 遗传操作是算法中种群产生新个体的方式,主要通过选择、交叉和变异。本文将根据改进的遗传操作进行种群迭代。

4)拥挤度计算 拥挤度计算是 NSGA-II 算法为解决局部最优问题在原有遗传算法上做出的改善,基于前期非支配排序结果进行。假设将种群中首个个体和末端个体拥挤距离设置为无穷大,则第 i 个个体的拥挤距离为第 $i+1$ 个个体的适应度值与第 i 个个体的适应值差值。

5)算法终止标准 迭代次数是否达到规定值是算法终止的标准。种群迭代过程就是个体不停进行遗传操作,通过有限次数循环,寻找满足限制条件的最优 Pareto 解集。

2.2 BIM 模型

单一算法寻优仅在数学层面进行优化,并不是每组方案都符合实际施工情况。BIM5D 技术在三维模型中加入工程项目进度信息和成本信息,相较于以往 BIM 技术,涵盖信息更全面,整合度更高,便于进行全过程、多维度项目管理^[10]。本文选择广联达 BIM5D 平台对 Pareto 解集对应的施工方案进行

模拟,淘汰一部分不符合实际施工情况的方案,并通过比较各方案的资源安排,资金安排的均衡程度筛选出最优方案。具体步骤为:1)根据工程相关文件分析得到相应工期及成本数据;2)编写改进 NSGA-II 算法程序,并将工期及成本数据导入,得到文件 A;3)将文件 A 中所对应的 Project 文件导入 BIM5D;4)进行施工模拟,得出资金、资源曲线;5)进行方案筛选,得出最优方案进行施工。具体操作如图 2 所示。

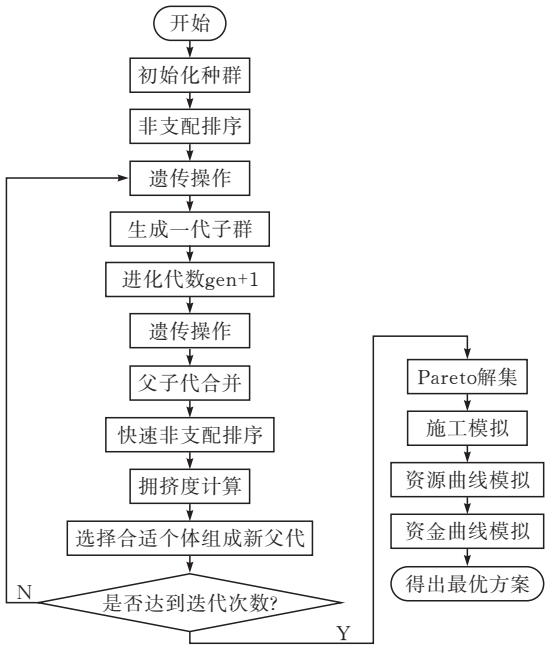


图 2 BIM-改进 NSGA-II 算法寻优流程图

3 案例分析

3.1 项目概况

某工程楼地上建筑面积 46640.67 m², 地下建筑面积 6995.01 m², 建筑高度 32.40 m, 其中地下一层, 地上八层, 结构类型为框架结构。通过对该工程项目合同文件和施工组织设计文件进行分析, 工程楼主要分为 A、B、C、D 四个分区进行施工, 并得到该工程项目在基础施工阶段和主体施工阶段 12 项工序在正常施工和紧急施工状态下的工期和成本, 如表 2 所示。根据合同, 该项目在这两个阶段的合同工期为 242 d, 间接成本总额为 20.268 万元。

3.2 结果分析

3.2.1 改进 NSGA-II 算法有效性分析 为验证算法改进的有效性和必要性, 基于工程项目基本条件, 应用改进算法与标准 NSGA-II 算法进行对比, 图 3 和图 4 为两种不同算法在 Matlab 环境下运行得到的 Pareto 前沿图。通过选择固定任一目标函数值, 对比另一目标函数数值发现改进 NSGA-II 得到结果更优。例如当工期目标函数值 (Objective 1) 为

275 d时,图3中成本目标函数(Objective 2)为1325万元,而图四为1360万元。结果表明相同工期条件下,改进NSGA-II算法求得方案比原始NSGA-II算法求得方案成本更低。

表2 研究数据

| 任务序号 | 任务名称 | 工期/d | | 成本/万元 | |
|------|---------------------|------|------|-------|-------|
| | | 应急工期 | 正常工期 | 应急成本 | 正常成本 |
| 1 | 桩基工程 | 35 | 42 | 50 | 42.98 |
| 2 | 支护桩施工 | 21 | 24 | 233 | 227.9 |
| 3 | AC土方开挖 | 11 | 13 | 61 | 58.67 |
| 4 | BD土方开挖 | 12 | 15 | 62 | 58.78 |
| 5 | AC基坑清底、砖胎膜、垫层施工 | 9 | 10 | 23 | 22.18 |
| 6 | AC管桩填芯、找平层、防水、保护层施工 | 6 | 7 | 18 | 16.38 |
| 7 | AC底板、基础梁施工 | 6 | 8 | 58 | 55.31 |
| 8 | BD基坑清底、砖胎膜、垫层施工 | 8 | 10 | 10 | 6.631 |
| 9 | BD管桩填芯、找平层、防水、保护层施工 | 6 | 7 | 15 | 13.72 |
| 10 | BD底板、基础梁施工 | 6 | 8 | 30 | 28.62 |
| 11 | 地下主体施工 | 23 | 28 | 530 | 512.7 |
| 12 | 地上主体施工 | 120 | 130 | 250 | 210.3 |

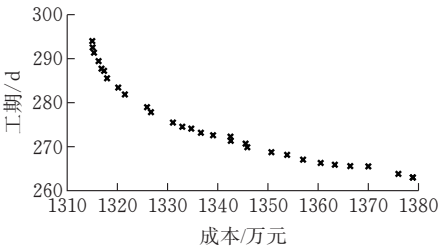


图3 改进NSGA-II算法pareto前沿图

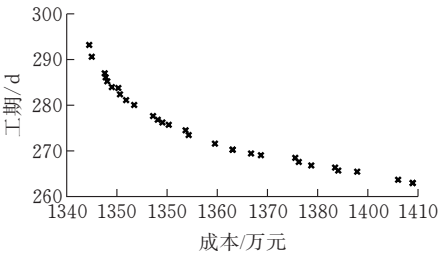


图4 原始NSGA-II算法pareto前沿图

3.2.2 BIM5D应用性分析 BIM5D以改进NSGA-II算法求得的Pareto解集为依据,进行施工工序及资金、资源曲线模拟,根据方案实施的合理性进行筛选。

1)施工工序模拟 施工方案工序模拟如图5所示。通过对各个方案进行施工进度模拟,利用其可视化特点发现施工顺序安排的冲突,筛选出能够合理进行施工的方案。



图5 施工模拟动画

2)资源曲线模拟 通过整合模型和进度信息,

下,改进NSGA-II算法求得方案比原始NSGA-II算法求得方案成本更低。

生成资源曲线,对各个时间段资源量安排状况进行估计,图5为施工方案资源模拟曲线。该方案2019年11月人工消耗量为9933.772工日,预计单日人工容纳量需达到300人,从作业空间角度考虑,该方案不合理。其次,人工消耗量曲线走势陡峭,反映人工安排不均衡,容易出现大量滞工或人工紧缺现象。同人工曲线,水泥消耗量在2019年11月达到峰值13739.123 m³,超出仓库可储存水泥量,不利于节约空间资源。

3)资金曲线分析 资金曲线预测了施工方案每月使用资金当前值和累计值,用以比较每个方案资金使用情况。经过筛选,得到最优方案各项工序持续时间如表3所示,总工期为270 d,总成本为1333.71万元,达到优化目标。

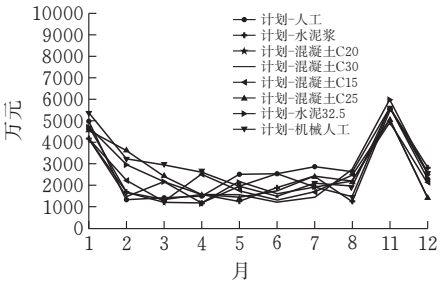


图6 资源曲线

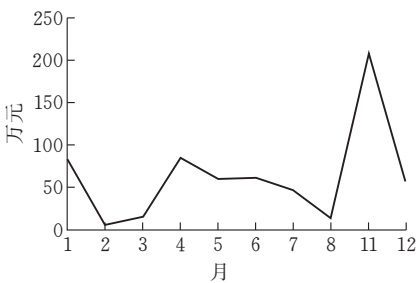


图7 资金曲线

表 3 最优方案工序持续时间 d

| 任务序号 | 持续时间 | 任务序号 | 持续时间 |
|------|------|------|------|
| 1 | 35 | 7 | 6 |
| 2 | 21 | 8 | 8 |
| 3 | 11 | 9 | 6 |
| 4 | 12 | 10 | 6 |
| 5 | 9 | 11 | 25 |
| 6 | 6 | 12 | 125 |

4 结束语

工期-成本优化是工程项目管理的重要内容,对于提升工程项目效益十分必要。本文的主要研究方法和结论如下

1)考虑投产效益对成本的影响,以工序持续时间为变量构建多目标优化模型,对以往的工期-成本数据模型进行了完善。

2)通过引进动态交叉、变异概率,设计了一种改进 NSGA-Ⅱ 算法对工期-成本数据模型进行求解,提高算法的优化效果和优化速度。

3)利用 BIM5D 平台对算法寻优得到的 Pareto 解集逐一进行模拟并筛选,弥补了单一算法寻优方案与实际施工不符的问题。

经过相关案例分析,改进 NSGA-Ⅱ 算法在寻优过程中收敛速度更快,具有很好的优化效果,BIM5D 的信息模拟功能为施工方案提供了实践性,同时为 BIM 技术在工程问题中的应用提供了新的思路。

[参 考 文 献]

[1] Kyung Kim, John Walewski, Ph D M. Multiobjective construction schedule optimization using modified

niched pareto genetic algorithm[J]. Journal of Management in Engineerin, 2016, 32(2): 57-62.

[2] Li Y C, Wang S R, He Y S. Multi-objective optimization of construction project based on improved ant colony algorithm[J]. Technicki Vjesnik, 2020, 27(1): 184-190.

[3] Zalmai L M, Akcay C, Manisali E. Timecost optimization using harmony search algorithm in construction projects[J]. Revista la de conuccion, 2019, 18(2): 226-237.

[4] 申建红,杜怡萱,韦佑鑫.基于电子优化算法的项目工期-成本优化[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2013,45(4):597-601.

[5] 黄良辉,王淑苹,刘月宾.基于微粒群算法的建筑工程成本优化技术研究[J].建筑经济,2019,40(7):90-94.

[6] 何威,史一超.基于 BIM 遗传算法的建筑施工工期多目标优化设计[J].土木工程与管理学报,2019,36(4):89-95.

[7] Hyounseok Moon, Hyeonseung Kim, Vineet R. Kamat. BIM-based constructionscheduling method using optimization theory for reducing activity overlaps[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, 29(3): 31-37.

[8] Meier C, Yassine A A, Browning. Optimizing time-cost trade-offs in product development projects with a multi-objective evolutionary algorithm[J]. Research in Engineering Design, 2016, 27(7): 347-366.

[9] Faghihi V, Reinschmidt K F, Kang J H. Objective driven and Pareto Front analysis: optimizing time, cost, and job-site movements[J]. Automation in Construction, 2016, 69(3): 79-88.

[10] Eleftheriadis S, Mumovic D, Greening P. Life cycle energy efficiency in building structures: a review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67(2): 811-825.

Time Cost Optimization Based on Improved NSGA-Ⅱ Algorithm and BIM5D

WANG Xumin, WANG Qi

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to maximize the benefits of engineering projects and realize the comprehensive optimization goal of construction period and cost, an optimization method combining improved NSGA-Ⅱ algorithm and BIM5D is proposed to solve the problem of construction period cost optimization. Considering the impact of production efficiency on costs, the construction period cost multi objective optimization model was improved. In order to solve the problem of small search space and low accuracy in the optimization process of NSGA-Ⅱ algorithm, based on the introduction of dynamic crossover and mutation probability, an improved NSGA-Ⅱ algorithm for solving the model is designed. The algorithm is docked with the BIM5D platform to simulate the construction process and the capital and resource curve to improve the practice of single algorithm optimization. Case analysis shows that the improved NSGA-Ⅱ algorithm combined with BIM5D to solve the time cost optimization problem can effectively optimize the schedule and cost targets.

Keywords: time cost optimization; improved NSGA Ⅱ algorithm; BIM5D

[责任编辑:裴 琴]