

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.12.017

韩会宾. 基于目标 PSO 算法的工程项目优化研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(12): 167-177.

基于目标 PSO 算法的工程项目优化研究

韩会宾

辽宁工业大学 经济管理学院, 辽宁 锦州 121000

摘要: 近年来, 国内建筑工程类产值与投资获得高速增长, 建筑工程已成为我国重要的支柱性产业, 合理有效地进行项目管理对建筑行业发展具有重要意义。以项目工期、成本及质量为项目施工的 3 大管理目标, 通过对参数分析构建项目多目标优化模型。考虑到工程项目属于多目标优化求解问题, 采用先进的 PSO 算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 构建工程项目多目标求解模型。由于传统的 PSO 算法在训练中存在局部最优解问题, 采用最优位置策略来优化算法, 完成对工程项目多目标问题的求解。在模型性能测试中, 选择 Schaffer 基准函数来检验各算法性能, 改进 PSO 算法能够在第 6 次迭代时趋于收敛, 全局最优值为 0.002 5, 相较于另外 3 种算法误差更低, 收敛速度更快。以某工程项目为实验对象, 采用改进 PSO 算法对多目标模型进行求解, 与原有规划目标相比, 工程项目优化过后建设成本下降了 3.785%, 工期缩短了 3.103%, 同时工程项目自身质量与环境质量均满足工程项目要求。

关键词: PSO 算法; 工程项目; 多目标优化; 最优位置策略

中图分类号: TU973

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)12-0167-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Engineering Project Optimization Based on Target PSO Algorithm

HAN Huibin

School of Economics and Management, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning 121000, China

Abstract: In recent years, the output value and investment of domestic construction engineering have achieved rapid growth, and construction engineering has become an important pillar industry in China. Reasonable and effective project management will be of great significance for the development of the construction industry. Taking project duration, cost, and quality as the three major management objectives of project construction, a multi-objective optimization model for the project was constructed by analyzing project parameters. Considering that the engineering project belongs to a multi-objective optimization solution problem, an advanced Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was used to construct a multi-objective solution model for the engineering project. At the same time, considering the existence of local optimal solutions in the PSO algorithm, the optimal position strategy was adopted to optimize the model and solve the multi-objective problem of engineering projects. In model performance testing, the Schaffer

收稿日期: 2023-04-19

基金项目: 教育部“十四五”教育科研规划重点课题项目(JKY16920); 辽宁省社会科学规划基金项目(L21BGL029)。

作者简介: 韩会宾, 博士, 高级工程师, 主要从事工程项目管理研究。

benchmark function was selected to test the performance of each algorithm. The improved PSO algorithm was able to converge in the 6th iteration, with a global optimal value of 0.002 5. Compared to the other three algorithms, the error was lower and the convergence speed was faster. Taking a certain engineering project as the experimental object, an improved PSO algorithm was used to solve the multi-objective model. Compared with the original planed objectives, after the optimization of the engineering project, the construction cost was decreased by 3.785%, the construction period was shortened by 3.103%, and the quality of the engineering project itself and the environmental quality met the requirements of the engineering project. The research content provides important reference opinions for the problems of multi-objective optimization in modern construction engineering.

Key words: PSO algorithm; engineering projects; multi objective optimization; optimal location

截至 2020 年,我国建筑规模达到了 26 397 亿元,同比增长 6.2%,工程建筑项目在我国经济发展中有着极为重要的地位. 伴随着国内经济增长、工程技术革新,国内工程项目建设正朝着规模化、复杂化及高集成化方向发展,工程项目多目标管理是保障项目有效开展的关键^[1]. 在工程项目建设周期内,需要保证工程满足相关施工要求,包括项目工期、项目质量、项目成本、环境要求等^[2]. 由于工程项目目标相互作用并存在密切关联,一个目标调整会给其他目标造成影响,如何有效平衡各个项目管理目标成为工程建设的难点^[3]. 因此,对现有工程项目展开研究,需满足工期、降低成本并符合项目建设质量要求,构建工程项目多目标优化模型. 工程项目属于多目标优化问题,机器学习模型在处理此类问题上具备明显的优势,如神经网络、模拟退火、群智算法等均能很好地处理此类问题^[4]. 本文引入先进的 PSO 算法构建项目工程多目标求解模型,同时采用最优位置策略对 PSO 模型的局部收敛进行优化,从而实现对工程项目多目标问题的优化. 工程项目多目标优化问题的难点在于资源合理分配与目标平衡,采用优化方法对工程项目多目标优化具有重要的参考价值.

1 基于目标 PSO 算法的工程项目优化模型构建

1.1 工程项目多目标优化模型构建

在工程项目建设中,项目管理任务需要满足 3 大目标,分别是工期、质量与成本目标. 3 个目标之间并不是相互独立的个体,3 者相互作用影响,在实际工程项目管理中很难达到平衡. 因此,需要将工期、质量与成本作为优化目标构建工程项目优化模型,从而实现对项目施工的有效管理,并降低工程建设成本^[5]. 工程项目多目标优化模型技术路线如图 1 所示.

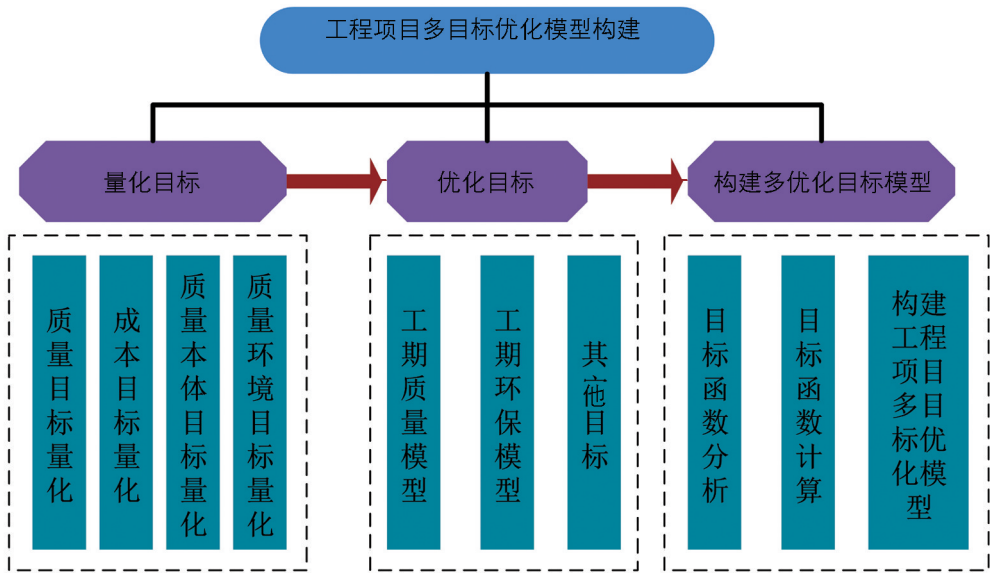


图 1 工程项目多目标优化技术路线

工期目标指工程项目从规划至项目竣工所耗费的所有时间,其中工程项目建设最长时间为项目建设工期^[6].工程项目工期在建设期间受到内部与外部综合因素的影响,为了更好地描述工期与项目的关系,通常采用双代号网络构建工期模型^[7].在网络计划中将不同路线赋予不同的施工时间,并且持续时间最长的路线为工程项目总工期,且作为网络关键线路.为了方便工期模型构建,假设项目按照规划路线顺利开展,并且其余工序不管如何调整,均不会对关键工序造成影响.综合上述关系,工期表达如式(1)所示.

$$T = \max_{lg} \in \left[\sum_{i \in lg} t_i \right] \quad (1)$$

式(1)中, T 表示工程项目总的工期, lg 表示网络中的 g 线路, t_i 表示工序 i 持续作业时间,时间范围满足要求 $t_i^s \leq t_i \leq t_i^l$, t_i^s 和 t_i^l 分别表示工序最短和最长作业时间.在工期与成本的影响关系研究中,工序时间与项目成本有两种存在关系:一种是离散关系,能反映实际项目建设情况;另一种是线性关系,但并不能准确地反映工期与成本的关系,因此通常采用非线性模型来反映工期与成本之间的关系^[8].为了方便计算,不考虑不当因素对成本的影响,若直接成本与工序时间如图 2(a)所示,则工序作业时间与直接成本关系见式(2).

$$c_{i1} = c_{i1}^n + a_i (t_i^n - t_i)^2 \quad (2)$$

式(2)中, c_{i1} 表示工序 i 建设实际耗费成本, c_{i1}^n 表示工序 i 建设正常耗费成本, t_i^n 表示工序 i 正常工作时间, a_i 表示边际成本系数.直接成本与工序时间关系如图 2 所示^[9].

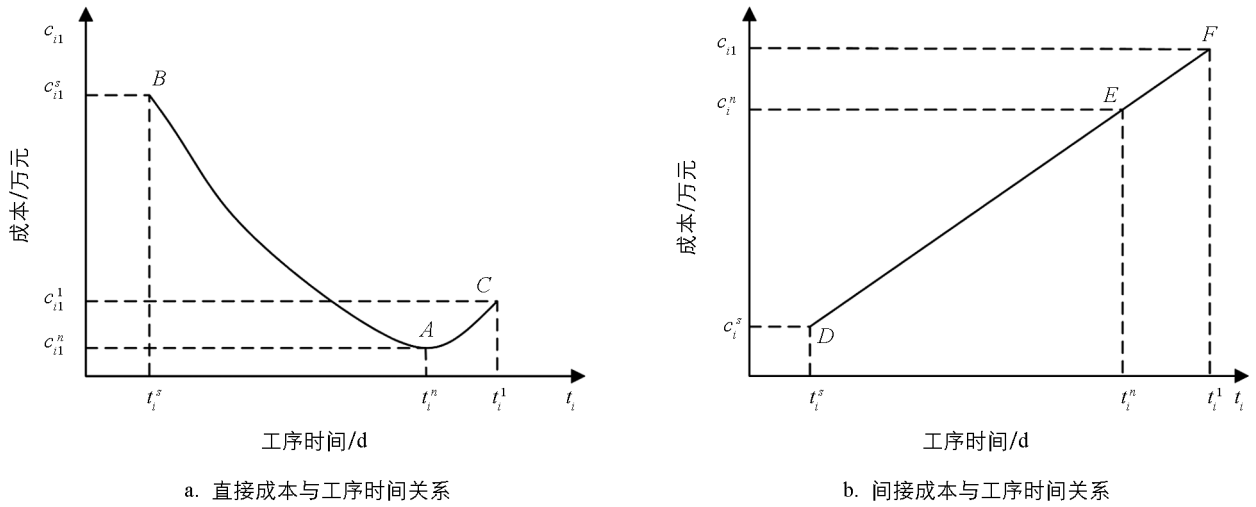


图 2 成本与工序时间关系

在图 2(b)间接成本与工序时间关系研究中,随着工序作业时间增加,所耗费的间接成本也随之增加,两者之间呈正比例关系.在项目建设中,当工期被延长至 t_i^l 时,此刻工序的间接成本最大为 c_{i2}^l ,间接成本与工序时间关系如式(3)所示.

$$c_{i2} = c_{i2}^l - a (t_i^l - t_i) \quad (3)$$

式(3)中, c_{i2}^l 表示工序建设最长时间耗费成本, a 表示间接成本系数.在工期-成本模型研究中,当确定了工序时间与成本关系后,通常会采用二次函数模型来描述工期与成本的关系^[10].但是,在实际工程项目建设中,项目施工很容易出现多个工序同时作业的问题,采用天数与时间乘积关系会造成工序间接成本重复计算问题.为了更精准地描述成本与周期的关系,学者们引入成本分摊策略,对于重复计算的工序问题,通过分摊策略来解决.分摊策略表达如式(4)所示^[11].

$$c_{i2} = \frac{t_i^1 \cdot c_{i2}'}{k_1} + \frac{t_i^2 \cdot c_{i2}'}{k_2} + c_{i2}' \cdot (t_i - t_i^1 - t_i^2) \quad (4)$$

式(4)中, t_i^1 表示同时施工的 k_1 工序作业时间, t_i^2 表示同时施工的 k_2 工序作业时间, c_{i2}' 表示项目间接成本率.

在工期与质量关系研究中,质量控制是项目优化的难点. 对于一个完整的工程项目而言,项目质量并不局限于项目自身质量,还需要考虑对外部自然因素造成的影响^[12]. 因此,在对质量与成本关系的分析中,通常需要考虑项目本身的质量及项目施工对环境质量的影响,需要两者均达到平衡要求. 因此,在构建工期与质量关系模型时,需要将质量因素量化,根据质量特征反映每个工序的施工质量水准^[13]. 定义工序 i 本身质量为 q_i , 同时准确描述质量与时间之间的关系,将工序质量定义在标注质量水平区间,质量按 0~1 来设定,其中工序时间与最高质量 q_i^1 对应水平点为 I 点,坐标为 (t_i^1, q_i^1) . 在 $t_i^s - t_i^1$ 工序时间内所对应的质量关系如图 3 所示.

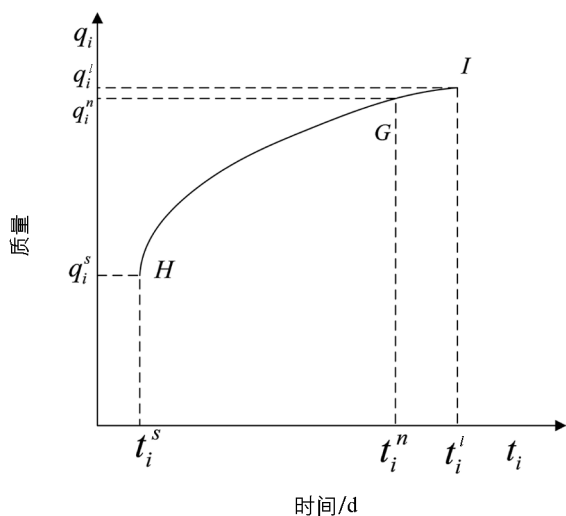


图 3 $t_i^s - t_i^1$ 工序时间内所对应的质量关系

在对应的工序时间内,工序应该达到的质量要求用函数表达如式(5)所示.

$$q_{il} = \ln(\beta_i t_i + a_i) \quad (5)$$

式(5)中, q_{il} 表示项目工序 i 质量, β_i 表示工序 i 的质量因素系数. 根据工序权重,以工序质量计算整个工程项目本身质量如式(6)所示.

$$Q_1 = \sum_{i \in R} \left\{ W_i \cdot \ln \left(\frac{e - e^{q_{i1}^s}}{t_i^l - t_i^s} t_i + \frac{eq_{i1}^s t_i^l - et_i^s}{t_i^l - t_i^s} \right) \right\} \quad (6)$$

式(6)中, W_i 表示工程项目工序 i 权重, q_{i1}^s 表示工序 i 在最短时间质量, e 表示经济水平系数. 由于工程项目质量评级还需考虑外部环境因素影响,即环境质量影响因素包括噪声、水污染、光污染及粉尘污染等^[14]. 环境影响因素越大,表明环境质量越低. 工序内环境质量如式(7)所示.

$$q_{i2} = \frac{t_i^s \cdot e}{t_i \cdot l} (l - s_i) \quad (7)$$

式(7)中, l 表示项目区域影响系数, s_i 表示项目对环境影响系数,由专家团队打分得出. 工程项目内部环境质量如式(8)所示^[15].

$$Q_2 = \sum_{i \in R} W_i \cdot \frac{t_i^s \cdot e}{t_i \cdot l} (l - s_i), 0 < e \leq 1 \quad (8)$$

工程项目最终的工期-质量目标 Q 由工程项目本身质量和工程项目内部环境质量决定,最终重量目标如式(9)所示.

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (9)$$

通过工期-成本模型与工期-质量模型,构建工程项目多目标优化模型. 多目标优化模型最终目标是实现工期、质量及成本 3 个目标的平衡^[16]. 多目标优化模型约束条件包括工序时间、工序质量、区域经济系数等,属于多组求解 Pareto 最优问题,本文采用多目标粒子群算法来求解问题.

1.2 基于 PSO 算法的工程项目求解模型构建

工程项目多目标求解需要平衡工期、成本与质量 3 个目标要求,在满足工程建设要求下使工程建设效益最佳. 多目标求解问题属于向量优化问题,由多个约束和目标函数构成,某个目标取得最优结果会使另外的目标质量下降^[17]. 为方便求解多目标问题,通常在研究中引入 Pareto 最优解思想,并通过改进的粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)求解模型,寻找工程项目多目标最优解. 将工程项目多个目标求解问题表示为 $\min G$, 则表达如式 10 所示^[18].

$$\begin{aligned} \min Gf(x) &= (f_1(x), \dots, f_m(x))^T \\ \text{s. t. } g_i(x) &\leq 0, i = 1, 2, \dots, k \\ h_j(x) &= 0, j = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 表示目标决策变量, 目标函数 G 由 m 各优化目标构成, 在工程项目建设中分为质量目标、成本目标与工期目标. $g_i(x) \leq 0$ 表示多目标函数不等式约束条件, 约束条件数量为 k , $h_j(x) = 0$ 表示目标函数等式约束, 约束条件数量为 p . 由于工程项目建设的复杂性与多变性, 在不同时间、人员条件下工程项目的工期、质量与成本均会受到影响. 为了保障函数目标求解最优, 采用 Pareto 支配关系表达工程项目多目标之间的优化关系^[19], 其中定义 X_{best} 属于多目标求解问题中的一个可行解, 为 Pareto 最优解. 同时, 在多目标中不存在可行解 X_i , $X_i < X_{\text{best}}$, 则最优解集 P 所对应的矢量目标函数如式(11)所示^[20].

$$PE = \{F(X_{\text{best}}) = (f_1(X_{\text{best}}), f_2(X_{\text{best}}), \dots, f_m(X_{\text{best}}))^T \mid X_{\text{best}} \in p\} \quad (11)$$

式(11)中, $f_1(X_{\text{best}}), \dots, f_m(X_{\text{best}})$ 表示可行解函数集, $F(X_{\text{best}})$ 表示目标解函数集. 在工程项目多目标问题求解中, 需要在约束范围内寻找工期、质量与成本 3 大目标的最佳优化位置, 使工程项目 3 大优化目标平衡. 多目标优化求解问题如图 4 所示^[21].

在多目标求解中, f_1 至 f_m 均为多目标问题的多个目标函数, 某个目标解函数值增高, 另外一个目标函数值必定降低, 在曲线 A1 至 A2 位置存在目标函数的 Pareto 最优解^[22]. 传统多目标求解方法有约束法、功效系数法等, 这些问题处理思想是将多目标转化为单个目标进行问题优化, 虽然利于理解, 但无法平衡多个目标关系, 且计算复杂^[23]. 工程项目多目标优化问题的难点在于对 3 大目标问题进行平衡, 质量、成本与工期 3 者之间相互约束, 传统多目标求解思想主观性较强, 无法满足工程建设综合性优化要求^[24]. 因此, 本文引入先进粒子群算法来构建 PSO 模型, 完成对工程项目多目标问题的求解.

PSO 算法属于一种群智优化算法, 该算法的思想以群体行为为基础, 通过粒子群体在一定范围内进行有序搜索, 从而寻找最佳的问题解. PSO 算法在处理多目标优化问题、分类问题及识别问题时具有良好的应用效果. 可以将粒子群理解为由多只鸟组成的鸟群, 每一个粒子表示一只觅食的鸟, 在粒子群中共有 n 只鸟. 粒子群中的每一只鸟会在同维度空间觅食, 每一只鸟会对搜索路线进行记忆并记录有食物的最佳位置. 同时, 鸟群搜寻食物的方向和距离与自身速度有关, 鸟群速度最终由同行鸟儿飞行经验决定^[25].

定义粒子在一个 D 维空间范围内进行搜索, 在该范围内第 i 个粒子群可以定义为 m 维向量, 表达如式(12)所示.

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})^T \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

式(12)中, x_i 表示第 i 个粒子在维度空间的位置信息. 为了方便粒子群搜索到有效的最优解值, 需要对粒子的搜索空间范围进行限制. 在 D 维区间范围内, 第 i 个粒子对应的最大边界位置为 x_{max} , 对应的最大搜寻速度为 v_{max} . 粒子在最大边界位置时, 最大飞行速度被限制为 v_{max} , 粒子在维度空间飞行速度向量如式(13)所示.

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})^T \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式(13)中, $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}$ 表示第 i 个粒子在不同位置的飞行速度. 为了对 PSO 算法的开发能力和搜寻效果进行平衡, 粒子群在飞行过程中需要对自身速度 v_i 进行限制. 在 v_i 取值较大时, 粒子群训练容易陷入全局最优解问题; 当 v_i 取值较小时, 粒子群搜索性能提高, 但容易陷入局部最优解问题. 引入最优位置策略对 PSO 模型的训练效果进行优化, 避免模型陷入局部收敛问题.

在多目标 PSO 算法的每一次迭代更新中, 粒子均会对历史搜寻的最佳位置进行记忆, 即将粒子搜寻的最优解存储于外部档案内. 当训练中产生的非支配解 i 受到外部档案支配时, 档案集将保持原有状态^[26]. 当外部档案集中有解受到新产生的非支配解支配时, 则产生的新支配解将取代原有档案内的解, 并对外部档案信息进行更新, 以这种更新方式将粒子群搜索的最优解进行记忆存储. 但在实际粒子群训练中, 外部

档案集数量有限, 需要采用拥挤度计算式对档案集进行修剪. 拥挤度表示在某一种群内个体所在密度, 计算拥挤度距离原理如图 5 所示.

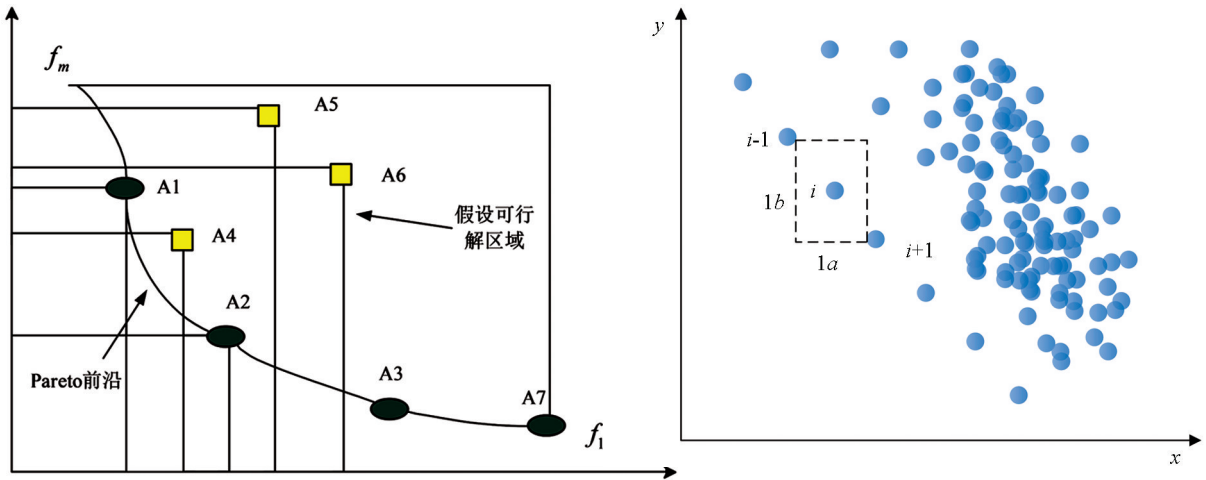


图 4 多目标问题求解示意图

图 5 计算拥挤度距离示意图

对相邻两粒子围成矩形顶点距离进行计算, 则粒子 i 此刻的拥挤距离如式(14)所示.

$$l_i = l_a + l_b \tag{14}$$

式(14)中, l_a 与 l_b 表示两粒子所围成矩形的长与宽. 当外部档案集规模较小时, 对粒子群的拥挤距离进行计算, 并对较小拥挤距离的非支配解进行修剪, 以满足算法设置的迭代要求. PSO 算法外部档案集更新与维护如图 6 所示.

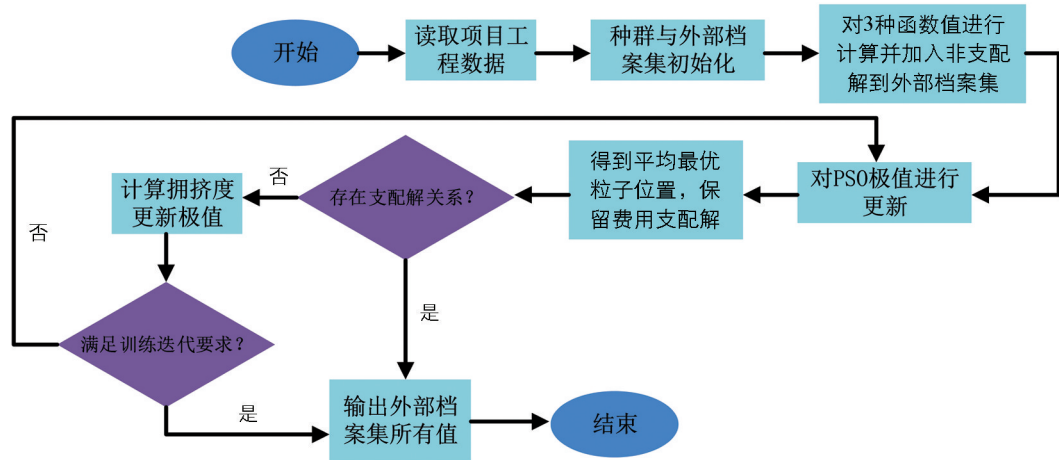


图 6 外部档案集更新与维护

传统 PSO 算法在更新全局最优粒子与个体最优粒子时, 粒子种群容易陷入粒子局部最优解问题, 停止寻找最优结果, 因此本文引入最优位置策略优化此问题, 计算粒子群个体最优位置如式(15)所示.

$$X_m = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_{ibest} \tag{15}$$

式(15)中, X_{ibest} 表示第 i 粒子个体最优解, p 表示粒子数量, D 表示粒子维数. 对式(15)进行更新, 得到粒子更新后的位置如式(16)所示.

$$X_i(t+1) = b + \beta \cdot |pX_m - X_i(t)| \times \ln\left(\frac{1}{u}\right) \tag{16}$$

式(16)中, b 表示吸引因子, β 表示扩张系数, t 表示迭代训练次数, u 表示速度与自变量比值范围. 改进后的 PSO 求解模型参数设置更少, 对全局训练效果进行了优化. PSO 求解模型工作流程如图 7 所示.

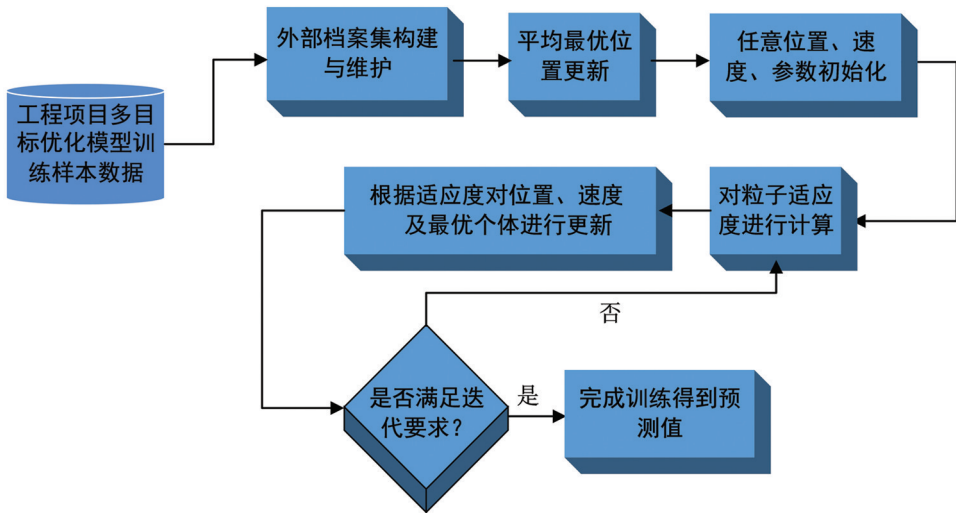


图 7 工程项目多目标求解模型工程流程

2 工程项目案例实验分析

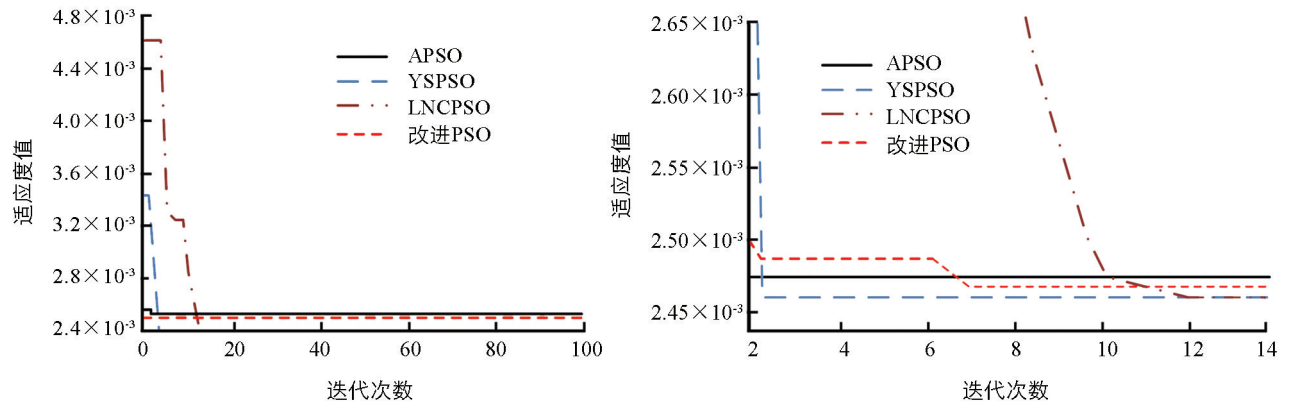
2.1 改进 PSO 算法模型性能测试

为了检验本文改进 PSO 算法的性能效果，选择 ZDT1、ZDT2 及 Schaffer 共 3 种基准函数进行算法性能训练。测试平台为 Windows 7，显卡为英伟达 GTX3070，处理器为志强 64 核。模型训练参数如表 1 所示。

表 1 改进 PSO 算法模型训练参数

模型参数类型	参数数值	模型参数类型	参数数值
问题维度	2	种群规模	40
迭代次数	100	惯性权重最大值	0.9
学习因子	2.05	惯性权重最小值	0.6

选择压缩粒子群 (Compressibility_Factor Particle Swarm Optimization, YPSO)、学习因子粒子群 (Learning Factor Particle Swarm Optimization, LNCPSO) 及权重粒子群 (Adapting inertia Particle Swarm Optimization, APSO) 这 3 种改进 PSO 算法作为基础模型。在 Schaffer 基准函数下 4 种算法模型的训练结果如图 8 所示。



a. 4种算法在Schaffer函数下的完整收敛结果

b. 4种算法在Schaffer函数下迭代初期的收敛结果

图 8 Schaffer 基准函数下算法收敛情况

图 8(a)与图 8(b)分别为 4 种算法在 Schaffer 函数上的完整收敛结果与迭代初期收敛结果。在图 8(a)中，4 种算法模型在迭代 20 次内均取得收敛，4 种算法全局最优值均为 0.002 5，但 4 种算法的性能测试

效果有明显差异,改进 PSO 算法在迭代训练时误差最低,误差值为 3.154,APSO 算法、YSPSO 算法、LNCPSO 算法误差值分别为 6.896,5.985,5.865. 在图 8(b)中,展示了 4 种算法初期训练情况,改进 PSO 算法能够在第 6 次迭代时趋于收敛,取得最优适应度值与全局最优值,相较于 APSO 算法、YSPSO 算法和 LNCPSO 算法,收敛性能提升了 37.65%,27.86%和 17.65%. 由此可见,改进 PSO 算法相较于另外 3 种算法拥有更出色的收敛效果. 同时,在 ZDT1 基准函数下对改进 PSO 算法的前沿结果进行测试,如图 9 所示.

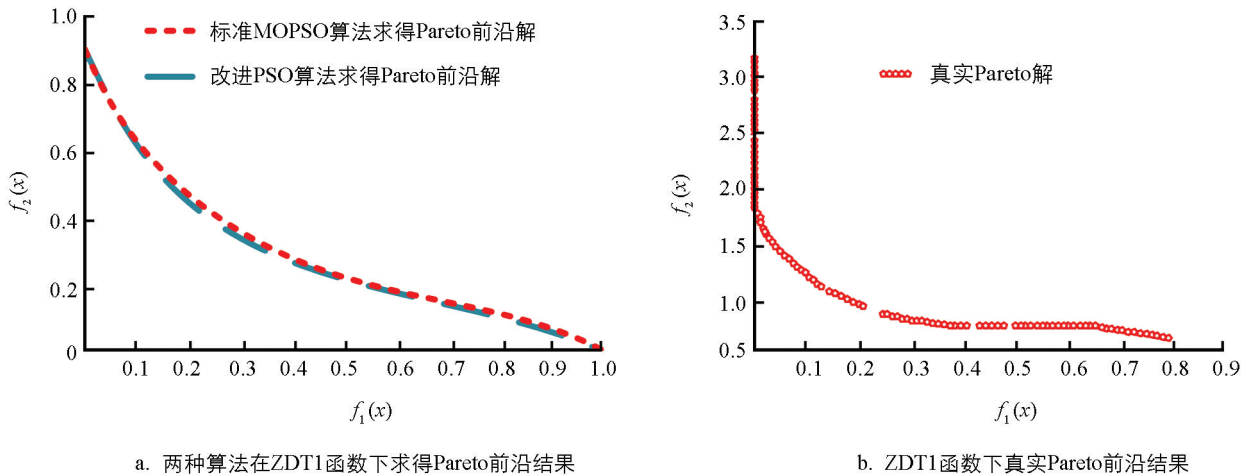


图 9 ZDT1 基准函数下各算法求解得到的 Pareto 前沿结果

图 9(a)为标准 MOPSO 算法和改进 PSO 算法求得的 Pareto 前沿结果,其中红色虚线为标准 MOPSO 算法求得的 Pareto 前沿结果,蓝色虚线为改进 PSO 算法求得的 Pareto 前沿结果. 由测试结果可知,改进 PSO 算法与标准 MOPSO 算法求得的前沿结果接近. 图 9(b)为函数真实的 Pareto 前沿结果,改进 PSO 和标准 MOPSO 前沿结果与真实结果基本吻合,但两种算法在训练效果中有明显不同,如表 2 所示.

表 2 两种基准函数的 3 类指标测试结果

基准函数类型		测试指标	标准 MOPSO	改进 PSO
ZDT1 基准函数	测试耗时/s		8.654	7.120
	模型迭代收敛	best	2.29E-03	2.46E-03
		mean	1.26E-02	1.26E-03
		var	4.14E-03	4.11E-03
	多样性	MS	0.6965	0.7456
	均匀性	SP	6.46E-03	6.44E-03
ZDT2 基准函数/s	测试耗时/s		16.654	8.985
	模型迭代收敛	best	3.69E-03	3.58E-03
		mean	1.18E-02	1.42E-02
		var	1.18E-03	1.43E-03
	多样性	MS	0.7156	0.6845
	均匀性	SP	3.60E-03	3.52E-03

注: best: 最佳值; mean: 平均值; var: 方差值; MS: 分布性指标(多样性); SP: 多样性指标.

根据表 2 测试结果可知,在 ZDT1 基准函数与 ZDT2 基准函数中,相较于标准的 MOPSO 算法,改进 PSO 算法在训练时间、迭代效果、收敛性等指标中数值更低,说明改进 PSO 算法综合性更好. 在 ZDT1 基准函数中,标准 MOPSO 算法耗时为 8.654 s,改进 PSO 算法为 7.120 s,因此将改进算法应用于工程项目多目标求解具有良好的优越性.

2.2 工程项目多目标优化实验分析

选择某建筑工程项目为实验分析对象，该建筑项目为高层商品房，建筑面积为 17 562.65 m²，建筑项目地上共有 30 层，地下共有 2 层。整个工程项目建设工期为 580 d，工程建设合同价格为 2 768.80 万元。在实际工程项目建设中，需要满足每道工序建设质量要求，验收合格方可进入下一道工序，因此该项目要求质量高于 0.65，工程每天间接费用为 0.28 万元，整个工程项目共有 16 道工序。设置改进 PSO 算法迭代次数为 200 次，对工程项目成本、

工期及质量 3 个目标进行测试，如图 10 为工程项目多目标 Pareto 最优解测试结果。

图 10 为工程项目多目标最优解测试结果，改进 PSO 模型在迭代训练 200 次后得到了 50 组 Pareto 最优解。由测试图像分布结果来看，最优解集主要集中于图像中轴线位置。对单个目标寻优结果进行分析，如图 11 所示。

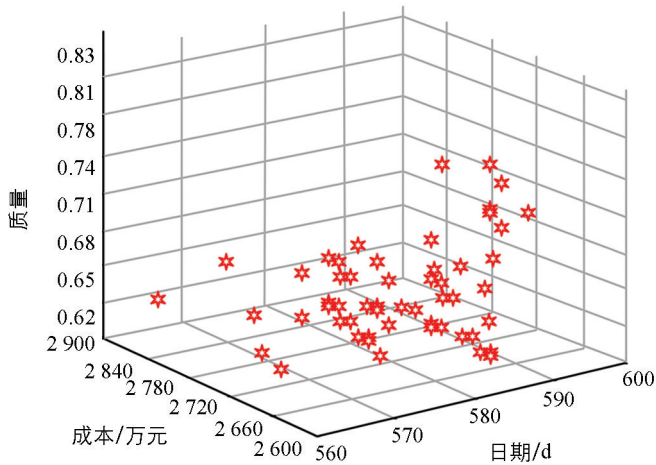
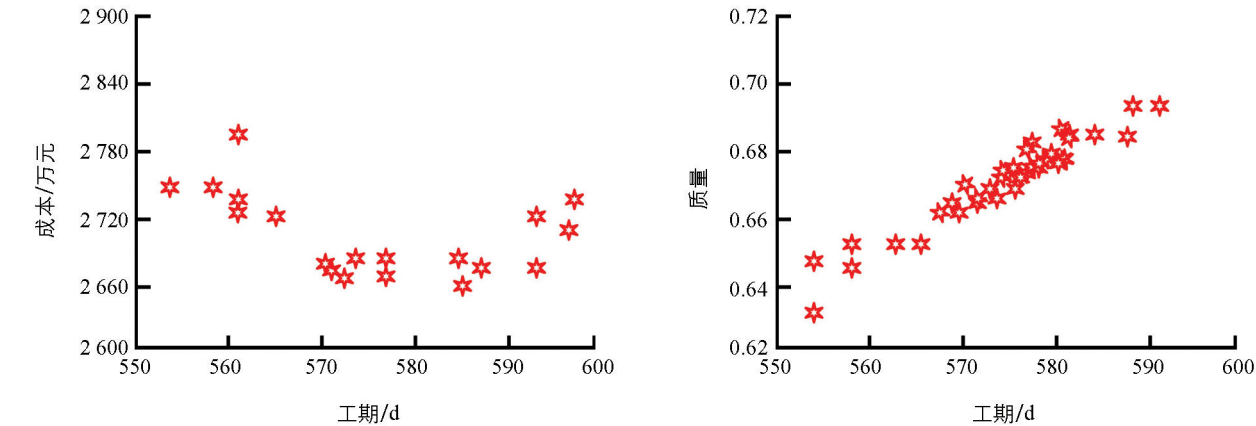
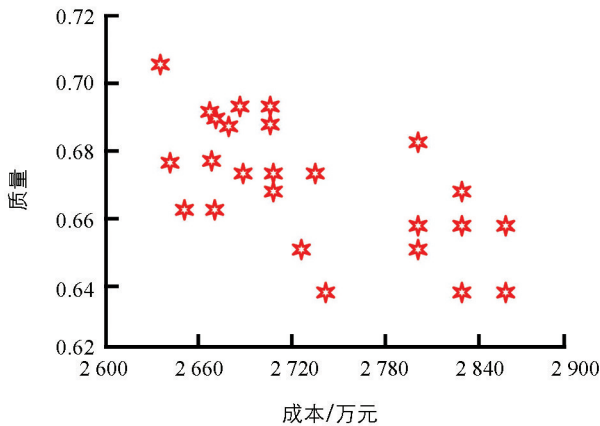


图 10 工程项目多目标 Pareto 最优解测试结果



a. 工期与成本寻优结果

b. 工期与质量寻优结果



c. 质量与成本寻优结果

图 11 工程项目单个目标寻优测试结果

图 11(a)为工期与成本模型寻优测试结果。由结果可知，工期在 585 d 后工程项目成本呈现出上升趋势，同时在 560~580 d 范围内，工程项目成本呈现出下降趋势。工程需要缩短工期并降低工程项目成本，

因此最优解在 570~580 d 范围内. 图 11(b)为工期与质量模型寻优测试结果. 由测试结果可知, 随着工期增加, 工程项目质量不断提高. 工程项目质量要求在 0.65 以上, 在满足工程项目质量标准前提下需要降低工程建设时间, 因此工期范围在 565~572 d 范围内. 图 11(c)为质量与成本模型寻优结果. 质量需要高于 0.65, 且工程项目成本最低, 结合工期与成本模型测试结果, 成本在 2 660 万元至 2 670 万元之间. 综合上述分析结果, 得到 10 组工程项目最终优化方案, 如表 3 所示.

表 3 工程项目多目标优化最终目标值

方案序号	成本/万元	工期/d	质量	最终方案排序
1	2 669	567	0.69	5
2	2 652	564	0.62	9
3	2 657	560	0.64	8
4	2 664	562	0.68	1
5	2 663	568	0.67	3
6	2 662	571	0.68	4
7	2 664	567	0.64	7
8	2 674	566	0.63	10
9	2 665	567	0.65	2
10	2 668	570	0.67	6

表 3 为工程项目最终优化的目标结果. 由结果可知, 工期、质量与成本是 3 个相互影响的目标, 根据工程项目建设要求选出了 10 组方案, 并对方案进行了排名. 最终选择方案 4 作为工程项目建设的最优优化方案, 其中工程建设成本为 2 664 万元, 相较于工程合同预算的 2 768.80 万, 成本下降了 104.8 万元; 工程项目建设目标周期为 580 d, 优化后工程建设周期为 562 d, 工程周期减少了 18 d; 工程质量满足项目建设要求, 工程质量为 0.68, 高于工程项目质量 0.65. 由此可见, 本文所采用的工程项目多目标优化方案能在满足工程项目建设条件下, 对工程项目 3 大目标进行有效优化, 大幅度降低了工程建设成本与工程建设周期. 最终通过优化前后数据对比可知, 工程建设成本下降了 3.785%, 工期缩短了 3.103%, 有效提高了工程项目的建设效果.

3 结论

在建筑工程领域, 多目标优化问题一直是工程项目建设重点与难点. 由于工程项目建设特殊性与复杂性, 项目建设的工期、成本及质量 3 大目标难以平衡. 为了解决工程项目多目标优化问题, 本文以某项目工程为研究对象, 对工程项目施工过程进行研究, 并构建了工程项目多目标优化模型. 考虑到工程项目 3 大目标难以量化求解, 引入先进的 PSO 算法来解决工程项目多目标优化问题. 由于传统 PSO 算法在寻优过程容易陷入局部最优解问题, 本文采用最优位置策略与外部档案集维护来改进算法, 并完成工程项目实验分析. 在工程项目单个目标寻优测试中, 改进 PSO 算法相较于 APSO 算法、YSPSO 算法和 LNCPSO 算法, 收敛性能提升了 37.65%, 27.86% 和 17.65%. 在 ZDT1 基准函数测试中, 改进 PSO 算法耗时为 7.120 s, 标准 MOPSO 算法耗时为 8.654 s, 改进 PSO 算法综合性表现更好. 采用改进 PSO 算法求解多目标优化模型, 优化后工程建设成本由 2 664 万元下降到 2 768.80 万元, 工程项目建设周期目标由 580 d 下降到 562 d. 由此可见, 本文采用的优化方案可以显著降低工程项目成本与工期, 提高工程项目建设效果. 不过本研究也存在不足, 并未考虑工程风险、安全等目标, 后期应该综合讨论这些因素, 以期进一步提高方案的有效性.

参考文献:

[1] 吴炜, 吉坤, 张朋, 等. 基于 ANN-PSO 模型的充填体强度预测及其工程应用 [J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(2): 53-57.

[2] 曾强,袁明明,张进春.多工作日历下的大型工程项目多目标任务指派优化方法[J].计算机集成制造系统,2019,25(5):1223-1237.

[3] 卢辉,王红卫,李锋,等.考虑供应不确定性与需求非平稳性的项目调度与材料供应集成优化[J].系统工程理论与实践,2019,39(3):647-658.

[4] 罗时朋,LWENJE T,王卫锋.基于离散事件仿真的房屋建筑工程项目调度优化[J].土木工程与管理学报,2021,38(5):85-90.

[5] 李英攀,李亚峰,孙志凌,等.基于 SAGA 的工程项目资源均衡优化方法[J].土木工程与管理学报,2021,38(3):84-87,94.

[6] 王家,刘可心,张学清,等.基于子集模拟的建设工程项目多资源均衡优化算法[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(7):168-176.

[7] 丰景春,施嘉锋,丰慧,等.基于遗传算法的工程项目群工期-费用优化研究[J].科技管理研究,2020,40(20):212-218.

[8] KHALAF T Z, ÇAĞLAR H, ÇAĞLAR A, et al. Particle Swarm Optimization Based Approach for Estimation of Costs and Duration of Construction Projects [J]. Civil Engineering Journal, 2020, 6(2): 384-401.

[9] 张建浩,任核权,章剑光,等.改进果蝇优化算法的工程项目信息数据处理[J].电气自动化,2022,44(3):57-59,63.

[10] 李惠玲,王婷.绿色施工项目管理多目标均衡优化[J].土木工程与管理学报,2020,37(4):20-26.

[11] MAO Y, QIN G J, NI P G, et al. Analysis of Road Traffic Speed in Kunming Plateau Mountains: a Fusion PSO-LSTM Algorithm [J]. International Journal of Urban Sciences, 2022, 26(1): 87-107.

[12] 王楠,李穗浓,张郁,等.工程建设项目的多测整合对策研究[J].地理空间信息,2022,20(2):156-158.

[13] 张恒,郑兵云,唐根丽.海绵城市 PPP 项目 VFM 定性评价优化研究——基于入库项目特征关联[J].建筑经济,2020,41(7):43-48.

[14] 张建,周成杰.基于 FCM-CSIs 的跨海铁路大桥投资分析及施工组织优化研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(1):347-355.

[15] PRIYADARSHI N, BHASKAR M S, PADMANABAN S, et al. New CUK - SEPIC Converter Based Photovoltaic Power System with Hybrid GSA - PSO Algorithm Employing MPPT for Water Pumping Applications [J]. IET Power Electronics, 2020, 13(13): 2824-2830.

[16] 曾铁梅,王金峰,吴贤国,等.盾构下穿既有隧道位移控制施工参数多目标优化[J].铁道标准设计,2022,66(2):98-104.

[18] 谢存仁,徐峰,阮敏浩.考虑价格波动的建筑工程施工进度-资源多目标优化[J].土木工程与管理学报,2022,39(3):126-132.

[19] 刘尧,宋元斌,李云祥.多排序施工方案的工期优化算法设计[J].系统工程,2019,37(2):150-158.

[20] 程书萍,常凯凡,陶莎.工程建设项目的多维多目标综合优化研究[J].工程管理学报,2022,36(5):107-112.

[21] 彭武良,陈良威,马雪丽.分散式项目群调度的双目标优化方法研究[J].管理工程学报,2021,35(5):131-140.

[22] 张小富.建筑施工企业多项目资金计划优化——基于约束理论和多目标规划[J].建筑经济,2022,43(9):97-104.

[23] 卢辉,王红卫,李锋,等.考虑供应不确定性与需求非平稳性的项目调度与材料供应集成优化[J].系统工程理论与实践,2019,39(3):647-658.

[24] 李雪,何正文,王能民.考虑鲁棒性成本的多模式双目标项目摄性调度优化[J].系统工程学报,2021,36(1):74-87.

[25] 秦旋,房子涵,张赵鑫.考虑资源约束的预制构件多目标生产调度优化[J].计算机集成制造系统,2021,27(8):2248-2259.

[26] 马宁.基于遗传算法多目标优化的工程项目调度[J].科学技术与工程,2020,20(33):13730-13734.