

DOI: 10.7672/sgjs2026080053

基于阈值动态调整的两阶段钢筋下料优化技术*

段伟,黄昕,熊杨,石峰,王东
(武汉建工集团股份有限公司,湖北 武汉 430000)

[摘要] 一维下料问题是运筹学的重要领域,在制造业有广泛应用研究,如何降本增效、提高材料利用率是成本控制的关键。针对钢筋一维下料原材料利用率不高、作业效率低等问题,根据实际工程中子材需求情况,提出了一种基于阈值动态调整的两阶段钢筋下料优化技术,首先对子材需求数据进行预处理分析确定阈值,根据阈值对子材需求进行分类,再针对不同类别的子材需求建立以余料最少为目标函数的两阶段优化模型,并利用改进的粒子群算法求解,其中子材需求的阈值可以动态调整,以使余料最少。工程实例表明,该模型有效提高了原材利用率,求解优化算法稳定性较好。

[关键词] 钢筋;下料;优化;粒子群算法

[中图分类号] TU755.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0053-04

Two-stage Steel Bar Cutting Optimization Technology Based on Threshold Dynamic Adjustment

DUAN Wei, HUANG Xin, XIONG Yang, SHI Feng, WANG Dong
(Wuhan Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China)

Abstract: One-dimensional cutting problem is an important field of operations research, which is widely used in manufacturing industry. How to reduce cost, increase efficiency and improve material utilization is the key of cost control. Aiming at the problems of low utilization rate of raw materials and low working efficiency in one-dimensional steel bar cutting, a two-stage steel bar cutting optimization technology based on dynamic adjustment of threshold value according to the actual engineering demand for steel bars is proposed. The threshold was determined by pre-processing and analysis of the demand data of steels bar which are needed, and then an optimization model with the minimum remaining material as the objective function was established for different types of demand steel bars. The improved particle swarm optimization algorithm is used to solve the problem, in which the threshold can be dynamically adjusted to minimize the residual material. Engineering examples show that the model effectively improves the utilization rate of raw materials and the optimization algorithm has good stability.

Keywords: steel bar; cutting; optimization; particle swarm optimization (PSO)

0 引言

一维下料问题是比较典型的组合优化问题,涉及钢筋、造纸、木材、玻璃和纤维等多个行业领域^[1]。一维下料问题的主要目标是将给定数量的单位规格或者多规格原材料切割成满足施工需求的大量不同规格的零件^[2]。由于钢材生产能耗高,是建筑工程中的主材,较大程度影响工程成本,且

切割后的余料处理对环境污染较大。按照国家双碳目标,如何提高钢筋利用率,实现降本增效、绿色施工和节能减排,成为建筑工程项目中的重要问题。一维下料问题是 NP-Hard 问题。目前,国内外大量学者针对此问题进行了研究,主要包括模型和算法改进:一是利用数学规划方法对问题进行建模。近几年来大量的改进模型利用实际工作场景增加优化目标函数或添加约束条件。如 Gradišar 等^[3]构建了一种模型,将不满足某种标准的切割模式进行重新规划,从而找到针对不同对象的一维下料问题。Zheng 等^[4]考虑实际楼板面工程设计和环

*湖北省住建厅建设科技计划;大型复杂工况室内滑雪场建造关键技术研究(No. 39)

[作者简介] 段伟,硕士,高级工程师, E-mail: 365524228@qq.com

[收稿日期] 2025-09-30

境因素,通过最小化切割损失解决钢筋下料问题。Melhem 等^[5]将排列顺序、原材料长度和余料再利用 3 个变量嵌入模型,最大限度地减少切割浪费。二是求解算法方面,主要以传统的数学规划方法、智能优化算法和启发式算法为主,以及对算法的改进和综合应用等。Haessler^[6]同时考虑切割方案和降低废料成本,提出了顺序启发式算法(sequential heuristic procedure, SHP)进行求解。Hendry 等^[7]提出了一种两阶段求解方法,首先利用启发式算法确定铜金属加工过程中每个周期的原材料需求,其次建立批量问题模型并用整数规划方法求解,从而得到生产方案。Sweeney 等^[8]采用两阶段 SHP 算法解决了不同质量等级的原材料和坯料的一维下料问题。

本文在现有研究成果的基础上,结合工程实际问题,通过对需求数据进行预处理分析,出现子材需求长度及对应的数量差异较大的情况,基于此,本文提出了基于阈值动态调整的两阶段钢筋下料优化技术,首先利用 K 均值聚类分析方法预先对子材需求进行分类,并确定分类阈值,再针对不同类别的子材建立以余料最小为目标函数的通用优化模型,再利用改进的粒子群算法求解模型,其中阈值可以动态调整以尽可能使得预料率最低,最后进行工程应用实例分析。

1 钢筋一维下料模型

1.1 问题描述

通常在建筑工程中,市场供应的钢筋原材料有 S 种,长度分别为 $L_s(s = 1, 2, 3, \dots, S)$,现使用这些原材料进行下料,根据施工需要,切割成 m 种规格的子材,每种子材的长度为 l_j 及对应的需求量为 $d_j(j = 1, 2, 3, \dots, m)$,如何下料才能使钢筋的原材使用最少或者总余料率最小。

1.2 基于阈值动态调整的两阶段钢筋下料优化模型

考虑到子材需求总量较大情况下,子材需求尺寸和数量差异较大,如表 1 所示。由表 1 数据可看出,最大长度的子材需求为 9 850mm,最小长度的子材需求为 1 300mm,且不同尺寸的子材需求数量也差异较大,其中尺寸为 9 850mm 的子材需求数量为 5 根,尺寸为 9 600mm 的子材需求数量为 15 根,尺寸为 1 300mm 的子材需求为 256 根,尺寸为 1 500mm 的子材需求为 256 根。

首先利用 K 均值聚类方法,对子材进行初步聚类分类,确定子材阈值,将子材需求分为两类,针对两类子材分别建立优化模型,从而把问题转化为

表 1 子材需求

子材长度/mm	需求数量/根	子材长度/mm	需求数量/根
4 350	60	4 775	16
5 225	60	1 500	256
9 600	15	3 935	16
9 850	5	3 060	16
1 900	120	2 428	16
3 685	28	1 553	16
3 025	16	4 775	16
3 500	32	1 300	256
2 810	28	5 475	16

2 个子问题来求解。其中两类子材都以总余料率最少为目标函数,保证模型和求解算法的一致性。

现将子材需求长度按照从大到小排序,存在 t ,使得 $l_t \geq \tau$,则记满足此条件的所有子材需求长度为 $l_j(j = 1, 2, 3, \dots, t)$ 及对应的数量为 $d_j(j = 1, 2, 3, \dots, t)$,其余子材需求为 $l_j(j = t + 1, t + 2, \dots, m)$ 及对应长度 $d_j(j = t + 1, t + 2, \dots, m)$ 。对两类子材建立总余料最少目标函数的通用优化模型如下:

$$\min \left(\sum_i^{n_s} \sum_s^S L_s X_i^s - \sum_j^t d_j l_{jj} \right) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sum_i^t \sum_s^S a_{ij}^s X_i^s = d_j, (j = 1, 2, 3, \dots, t) \\ \sum_j^t a_{ij}^s l_j \leq L_s, (i = 1, 2, 3, \dots, n_s) \\ X_i^s \geq 0 \text{ 且为整数}, (i = 1, 2, 3, \dots, n_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中: X_i^s 为第 s 种原材的第 i 种切割方式频次; a_{ij}^s 为第 s 种原材第 i 种切割第 j 种子材数量,其中原材规格为两类时模型参数如表 2 所示。

本文通过将问题转化为 2 个子问题:①第 1 阶段,以原材 $L_s(s = 1, 2, 3, \dots, S)$,子材需求 $l_j(j = 1, 2, 3, \dots, t)$ 及对应长度 $d_j(j = 1, 2, 3, \dots, t)$ 作为模型的输入数据,通过式(2)建模,再求解下料方案,并求余料长度;②第 2 阶段,将第 1 阶段余料和原材作为第 2 阶段的原材输入,并根据设定条件判定是否继续加入原材,再根据式(1)、式(2)以原材最少为目标函数建模求解。

2 算法设计

2.1 基于 k-means 聚类方法确定子材阈值

结合 k-means 算法对子材需求的尺寸进行聚类分析,初始分类数为 2 类。

1) 根据初始分类数确定元素距离矩阵,并确定初始聚类中。

2) 计算各尺寸与初始聚类中心距离,并确定分组。

3) 更新聚类中心。

4) 根据各聚类中心的距离判断初始分类数

表 2 一维下料数学模型参数

Table 2 Parameters of one-dimensional cutting model

子材需求 长度	原材 L_1 使用次数						原材 L_2 使用次数						需求 根数
	X_1	X_2	...	X_j	...	X_m	Y_1	Y_2	...	Y_j	...	Y_m	
l_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1j}	...	a_{1m}	ay_{11}	ay_{12}	...	ay_{1j}	...	ay_{1m}	b_1
l_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2j}	...	a_{2m}	ay_{21}	ay_{22}	...	ay_{2j}	...	ay_{2m}	b_2
...
l_i	...	...	...	a_{ij}	...	a_{im}	...	...	...	ay_{ij}	...	ay_{im}	b_i
...
l_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mj}	...	a_{mm}	ay_{m1}	ay_{m2}	...	ay_{mj}	...	ay_{mm}	b_m
废料	cx_1	cx_2	...	cx_j	...	cx_m	cy_1	cy_2	...	cy_j	...	cy_m	—

是否满足最优分类值,其中距离公式如下:

$$d(l_{1,r}, l_{2,r}) = \sqrt{\sum_{r=1}^n (l_{1,r} - l_{2,r})^2} \quad (3)$$

式中: $d(l_{1,r}, l_{2,r})$ 为类间距离,以欧拉距离作为其距离计算公式; n 为聚类项; r 为聚类个数。

5) 动态调整聚类效果,以提升分类合理性,为钢筋下料方案提供数据输入,确定子材分类阈值为 τ 。

2.2 算法步骤

本文选择用改进的粒子群算法对两阶段模型进行求解,具体算法步骤如下。

1) 设置原材长度、子材长度及数量,将子材需求长度进行排序,并利用 k-means 聚类方法确定阈值 τ ,将子材需求分为两类,其中第 1 类子材需求长度 $l_j(j=1,2,3,\dots,t)$ 及对应数量 $d_j(j=1,2,3,\dots,t)$ 。

2) 参数设置。空间维数为子材规格数 t ,最大迭代数为 K ,惯性因子 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ [9],学习率为 c_1 和 c_2 。

3) $s=1$ 。

4) 边界条件设置。其中粒子位置边界为 $[x_{i,\min}, x_{i,\max}]$, $x_{i,\min} = 0$, $x_{i,\max} = d_j$, 粒子速度边界为 $[v_{i,\min}, v_{i,\max}]$,若粒子符合边界约束,则进行下一步,若不符合则重新随机产生。

5) 初始化种群粒子。在步骤 3) 边界条件下,利用随机数赋值初始位置 $x_i^{(0)}$ 和初始速度 $v_i^{(0)}$,初始化个体最优位置 $g_i^{(0)}$ 和种群最优位置 $G_i^{(0)}$ 。

6) 更新下一个位置 $x_i^{(k+1)}$ 和速度 $v_i^{(k+1)}$,并判断是否满足边界约束,若不满足,则随机产生,若满足则进行下一步。

7) 计算初始个体和初始种群最优位置。将所有粒子的位置代入适应度函数,利用适应度函数 [9]:

$$Y_i = \frac{L_s - P_i}{L_s} \quad (4)$$

计算每个粒子的适应度值并比较大小,选择个体最优位置 $g_i^{(k)}$ 和群体最优位置 $G_i^{(k)}$ 。

8) 判断终止条件。若迭代次数达到 K ,则种群最优解对应的切割方式为当前规模的第 s 种原材的最优切割方式,否则返回步骤 7)。

9) $s = s + 1$,并判断 $s \leq S$,若成立,则返回步骤 7),若不成立,则获取当前规模下的最优下料方案。

10) 比较所有原材最优切割方式,选择余料最小的方案。

11) 更新下料钢筋子材长度及数量,跳转步骤 3) 寻找下一种切割方式,直至子材需求数量为 0,形成下料方案,并计算每种子材余料 $R_i(i=1,2,3,\dots,t)$ 。

12) 计算子材余料总长度 R 和第 2 阶段子材需求总长度 μ ,若 $R \leq \mu$,则将子材余料数据赋值为 L_s ,第 2 类子材需求长度为 $l_j(j=t+1, t+2, \dots, m)$ 及对应数量为 $pd_j(j=t+1, t+2, \dots, m)$,返回步骤 2),求解第 2 阶段下料方案,若 $R > \mu$,则将原材规格加入第 1 阶段子材余料,同时作为模型的原材输入,并返回步骤 2),求解第 2 阶段下料方案,具体算法流程如图 1 所示。

3 应用实例和结果分析

以武汉甘露山雪世界项目 1 号核心筒 38.050~51.250m 施工段钢筋使用为实例,利用本文提出的基于阈值动态调整的两阶段钢筋下料优化技术。构件 $\phi 25$ 钢筋原材长度分别为 9 000, 12 000mm 两种,子材需求如表 1 所示,通过初步统计,子材需求种类为 18 类。

为了节省人力、降本增效,尽可能减少原材消耗,建立基于上述阈值动态调整的两阶段钢筋下料优化技术,利用 python3.7 进行编程,并与一阶段优化模型+粒子群算法、一阶段+蚁群算法、一阶段+遗传算法进行比较,结果如表 3 所示。通过本文方法,武汉甘露山雪世界项目钢筋原材利用率达到

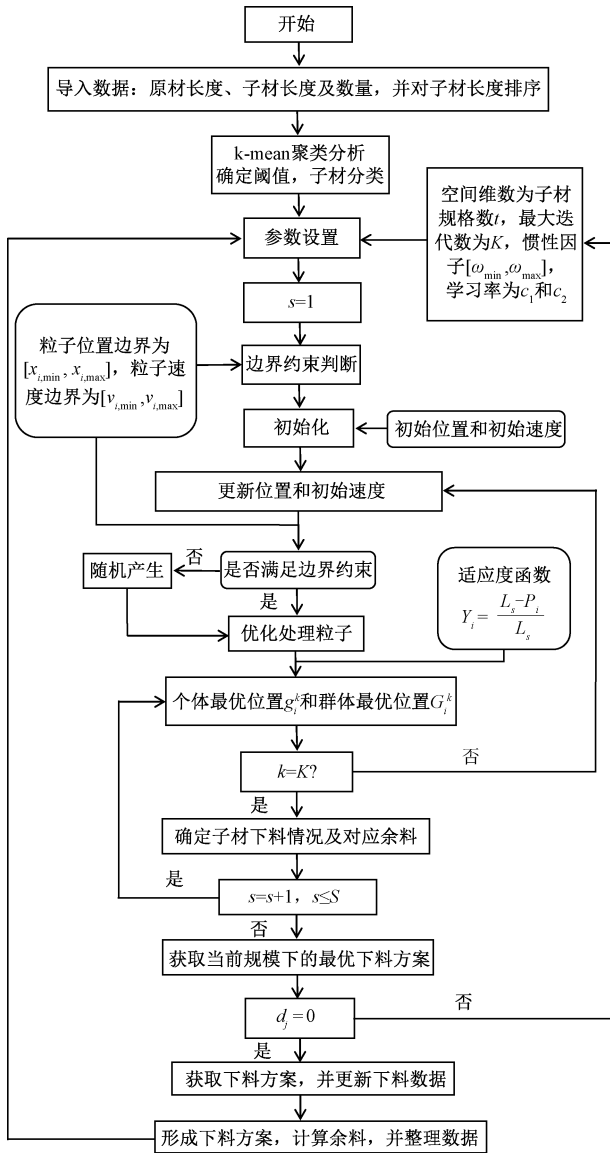


图1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow

98.8%,比其他方法显著提高。

表3 不同算法计算结果对比

Table 3 Comparison among different algorithms calculation results

模型算法	平均计算时间/s	余料率/%
本文方法(两阶段+改进粒子群算法)	195	1.30
一阶段+粒子群算法	110	2.59
一阶段+蚁群算法	125	2.02
一阶段+遗传算法	130	2.45

4 结语

本文在已有研究成果的基础上,根据工程实际子材需求情况,重点研究一维下料方案,实现降本增效。以工程施工实际问题为切入点,基于计算机强大的计算能力,将k-mean均值聚类、整数规划、粒子群算法应用于钢筋生产过程,建立基于阈值动态调整的两阶段钢筋下料一维优化模型,并进行工程实例应用分析。本文方法可以有效提高原材利用率,降低损耗,但是相比于常规一阶段模型,由于加入了预分类以及分类后的动态调整优化,计算效率一般,下一步研究工作将在计算效率方面进行优化。

参考文献:

[1] SARPER H, JAKSIC N I. Evaluation of procurement scenarios in one-dimensional cutting stock problem with a random demand mix [J]. Procedia manufacturing, 2018, 17: 827-834.

[2] OLIVEIRA J F. Waste minimization the contribution of cutting and packing problems for a more competitive and environmentally friendly industry [C] // Talk presented at: EURO2016, poznan, Poland, 2016.

[3] GRADIŠAR M, JESENKO J, RESINOVIĆ G. Optimization of roll cutting in clothing industry [J]. Computers & operations research, 1997, 24 (10): 945-953.

[4] ZHENG C Y, YI C J, LU M. Integrated optimization of rebar detailing design and installation planning for waste reduction and productivity improvement [J]. Automation in construction, 2019, 101: 32-47.

[5] MELHEM N N, MAHER R A, SUNDERMEIER M. Waste-based management of steel reinforcement cutting in construction projects [J]. Journal of construction engineering and management, 2021, 147 (7): 04021056.

[6] HAESSLER R W. Controlling cutting pattern changes in one-dimensional trim problems [J]. Operations research, 1975, 23 (3): 483-493.

[7] HENDRY L C, FOK K K, SHEK K W. A cutting stock and scheduling problem in the copper industry [J]. Journal of the operational research society, 1996, 47 (1): 38-47.

[8] SWEENEY P E, HAESSLER R W. One-dimensional cutting stock decisions for rolls with multiple quality grades [J]. European journal of operational research, 1990, 44 (2): 224-231.

[9] 黄剑涛. 基于智能优化技术的多情景钢筋下料问题研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2023.

HUANG J T. Research on multi-scenario reinforcement cutting problem based on intelligent optimization technology [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.