

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.04.031

基于粒子群算法的二维不规则排样

吕万林, 游有鹏

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对工业生产中常见的二维不规则排样问题,提出运用粒子群算法求解的方法。将 BL 算法和 NFP 算法结合,作为排样定位策略;对工件的入排顺序和入排角度进行编码,进行粒子群算法优化求解,并通过交叉替代传统的插值改进粒子位置更新过程,满足排样的离散问题求解;通过添加粒子的变异过程,避免陷入局部最优解。算例排样结果验证了该算法的有效性。

关键词:二维不规则排样;BL 算法;NFP 算法;粒子群算法

中图分类号:TP391 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)04-0165-04

Two-dimensional Irregular Layout Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

LYU Wanlin, YOU Youpeng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A method to solve the common two-dimensional irregular layout problem in industrial production by particle swarm optimization algorithm is proposed. BL algorithm and NFP algorithm are combined as the positioning strategy. The input order and input angle of the workpiece are coded, and the particle swarm optimization algorithm is used to optimize the solution. By replacing the traditional interpolation with intersection, the process of particle position updating is improved to solve the discrete problem of layout. The mutation process of particles is added to avoid the local optimal solution. The sample layout result verifies the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: two-dimensional irregular layout; BL algorithm; NFP algorithm; particle swarm optimization algorithm

0 引言

二维不规则排样问题是在给定的原材料板材上,摆放各种不规则的工件,找出工件的最优排布,使得板料的利用率最高。二维不规则排样要求工件必须排布在板材内,各个工件互不重叠,工件之间的间隙尽量小,以达到节约材料、提高效益的目的。该问题在服装裁剪、印刷、钣金零件切割等方面应用广泛,是工业生产加工中的重要环节。

二维不规则排样问题属于复杂的非确定性多项式(nondeterministic polynomial, NP)完全问题,具有很高的计算复杂度,国内外也相继提供了一些解决方案。秦振浩^[1]对不规则工件生成最小包络矩形,将其转化为矩形件排样问题,应用群遗传算法在全局范围内搜寻可行解。UMETANI 等^[2]提出了针对光栅化模型,在水平和垂直方向交替重复进行直线搜索的坐标下降启发式算法。刘虢^[3]提出了一种基于矢量格式的零件靠接算法,

依据最小势能原理进行不规则零件排样。王莉^[4]以最低水平线算法为定位策略,将遗传算法和模拟退火算法结合进行求解。刘海明等^[5]提出了基于排挤机制的小生境遗传算法,来进行不规则图形的排序优化。陈燕等^[6]针对小批量圆形件的排样问题,提出了顺序分组启发式算法与递归算法相结合的排样方案。罗强等^[7]提出了基于复合评价因子的改进遗传算法求解矩形排样问题改善了遗传算法的局部搜索能力。

对于二维不规则零件排样问题的求解,一般分为两部分:在给定入排顺序和角度情况下,对不同工件之间碰撞的检测和定位策略的设计;对工件入排顺序和入排角度的优化求解。本文将从这两部分对算法进行设计与改进。

1 BL-NFP 算法

排样过程中,为了最大化利用板料空间,需要保证不同工件间间隙尽量小,且不能重合,即需要

第一作者简介:吕万林(1997—),男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为钣金折弯和激光切割离线编程仿真,lvwanlin520@163.com。

确定一个工件相对于另一个工件的最佳位置,本文采用基于 BL 算法和 NFP 算法的融合算法作为工件的定位算法。

1.1 BL 算法

BL 算法是排样问题中常用的定位算法,如图 1 所示,先将工件放置于板料的右上角处,向左平移至极限位置,之后向下平移至极限位置,该算法让工件放置位置尽可能接近板料的左下角。

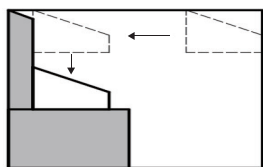


图 1 BL 算法

1.2 NFP 算法

如图 2 所示,给定两个工件 A 和工件 B,工件 A 固定,将工件 B 绕工件 A 环绕一周,工件 B 的角度保持不变,取工件 B 上任意一点 p , p 在环绕的过程中走过的轨迹,即为临界多边形 NFP_{AB} 。取工件 B 上不同的点 p ,形成的临界多边形形状相同,本文取工件 B 的下顶点作为参考点。当参考点定位在该临界多边形上时,工件 A 与工件 B 之间贴合。在该临界多边形上搜索,可计算出工件 B 的最佳摆放位置。

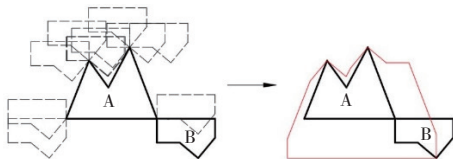


图 2 NFP 临界多边形生成

1.3 BL-NFP 算法

本文的 BL-NFP 算法将 BL 算法与 NFP 算法相结合,在 NFP 算法计算出的临界多边形上选择一个左下的极限位置来放置工件。设有工件 A 和工件 B,求出工件 B 环绕工件 A 形成的 NFP_{AB} ,如图 3(a) 所示。工件 B 放置于该临界多边形上的一些位置时会超出板料的范围,这些位置是不可用的。因此,需求解出工件 B 在内部围绕板料形成的 NFP_B ,如图 3(b) 所示。将两个 NFP 进行合并处理,可获得新的 NFP 多边形,在该 NFP 多边形上,依照向左向下原则,可找到一个较好的位置来放置工件 B,如图 4 所示。

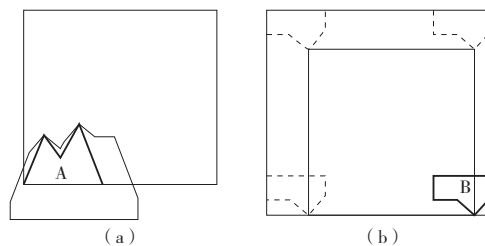


图 3 临界多边形 NFP_{AB} 、 NFP_B

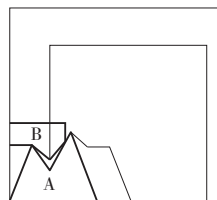


图 4 合成的 NFP

2 粒子群算法

BL-NFP 算法解决了在板料上已放置一些工件的情况下,向板料上添加工件时该工件的最优定位位置的计算。在实际应用中,工件入排的顺序和角度也对排样效果有很大的影响。为此,本文通过粒子群算法来对工件的入排顺序和角度进行优化求解。

2.1 不规则零件的预处理

为减少对入排角度进行优化求解的复杂度,需保证工件在初始位置时的 OBB 包围盒面积最小,即先求出工件的 OBB 包围盒,确定包围盒各边的朝向,并将其旋转至合适的角度。OBB 包围盒的具体求解过程详见参考文献[8]。

2.2 粒子群算法

对于入排顺序和入排角度的计算,大部分研究采用遗传算法和模拟退火算法来进行优化求解,也取得了比较好的结果,但是遗传算法的局部搜索能力较差,而模拟退火算法容易陷入局部最优解。针对这两个问题,本文采用粒子群算法来进行排样问题的求解。粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是由 EBERHART 和 KENNEDY 提出的一种进化计算方法,它起源于对鸟群觅食行为的模拟,是一种基于群智能的优化算法。粒子群算法初始化一群随机粒子(解),通过迭代找到最优解,在每一次迭代的过程中,粒子会记录该粒子到达过的最优位置 p_{best} ,群体会更新群体到达过的最优位置 g_{best} ,并根据这两个

值来进行迭代^[9]。本文中粒子的位置为一组工件的入排顺序和入排角度,所有的粒子都保存最优解的相关信息,它有更多的机会得到全局最优解。

2.3 算法流程

算法的整体流程如图5所示。

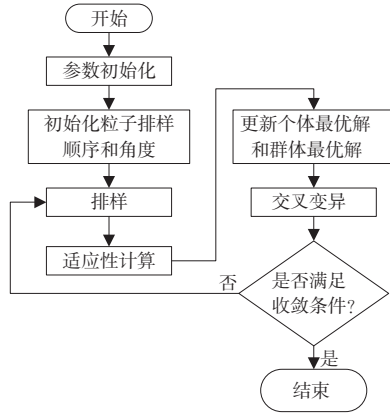


图5 粒子群算法流程

该算法的整体步骤如下。

1) 粒子位置的编码及优化

在排样问题中,粒子的位置编码包含工件入排的顺序和角度。有 n 个工件,记其编号为 $1 \sim n$,则将粒子位置编码为 $\{(p_1, r_1), (p_2, r_2), \dots, (p_n, r_n)\}$,其中 p_i 的数值表示的是第 i 个放入排样的工件对应的工件号,若旋转的角度以 30° 为基准, r_i 表示对工件旋转 $r_i \times 30^\circ$ 。

以 20 个工件为例,对这 20 个工件排序,它的可能解共有 $20!$ 个,这个解空间是庞大的。为了解决这个问题,本文也对粒子群算法的编码进行了优化,不再将某个顺序编码 p_i 与工件号对应,而是通过预处理,将顺序编码 p_i 与工件的类型相对应,即 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 中 p_i 指的是在第 i 个排入的工件的型号,这避免了同种工件之间进行排列产生的效率浪费。假设同样是 20 个工件,共有 4 种工件,每种 5 个,那么它的解空间的大小是 $20! / (5!)^4$,只有原先方案的两亿分之一,这将大大提高排样搜索的效率。

2) 适应度函数的计算

适应度函数是用于表示粒子在某个位置排样优劣的指标,适应度越高,说明该位置对应的入排顺序和角度排样效果越好。对于某一粒子,本文算法会依次将工件旋转至对应角度,之后通过 BL-NFP 算法对该工件进行定位。将所有的工件都放置好后,进行该粒子位置适应度的计算。本文对粒子的适应性函数为

$$Y = \alpha \cdot \frac{W \cdot L}{x_{\max} \cdot y_{\max}} \quad (1)$$

式中: W 为板料的宽度; L 为板料的长度, $x_{\max}$ 和 $y_{\max}$ 分别表示该粒子中所有工件顶点在 x 方向上的最大值和 y 方向的最大值,即所有工件组成的包络矩形的面积, α 是适应度系数。该函数表示工件是否紧凑对适应度的影响,工件之间排布越紧凑、间隙越小,则 $x_{\max}$ 和 $y_{\max}$ 值越小,计算出的工件实际占用的区域面积越小,适应度则越高。

3) 粒子之间的交叉变异

粒子群算法中,每一个粒子都有记忆功能,除了记录当前排样的顺序和角度,该粒子会有一个单独的空间来记录其经历过的最优位置 p_{best} ,它表示该粒子到达过的适应度最高的位置。同时,有一个全局最优位置 g_{best} ,它表示的全体粒子经历过的最优位置。

对于每一个粒子的位置,在计算出当前的适应度后,算法会对个体最优位置 p_{best} 和群体最优位置 g_{best} 进行更新,并开始迭代生成新一代的粒子的位置。粒子群算法的速度迭代公式为

$$v_{id}^k = wv_{id}^{k-1} + c_1r_1(p_{\text{best},id} - x_{id}^{k-1}) + c_2r_2(g_{\text{best},id} - x_{id}^{k-1}) \quad (2)$$

式中: v_{id}^k 表示第 k 次迭代粒子 i 速度矢量在 $d(x, y, z)$ 方向上的速度分量; x_{id}^k 表示第 k 次迭代粒子 i 在 d 方向上的位置分量; x_{id}^{k-1} 表示在第 $k-1$ 次迭代粒子 i 在 d 方向上的位置分量; α_{id}^{k-1} 表示在第 $k-1$ 次迭代粒子 i 在 d 方向上的位置分量; c_1, c_2 表示加速度常数,调节学习最大步长; r_1, r_2 表示两个随机参数,取值范围 $[0, 1]$,以增加搜索的随机性; w 表示惯性权重,非负数,用来调节对解空间的搜索范围。该式的第一部分表示该粒子的先前速度,第二部分表示该粒子当前位置与自身历史最佳位置 p_{best} 的距离,第三部分表示该粒子当前位置与群体最佳位置 g_{best} 的距离。位置更新公式为

$$x_{id}^k = x_{id}^{k-1} + v_{id}^k \quad (3)$$

粒子群算法的思想是,下一时刻的速度受个体最优解和群体最优解影响,在较优解附近寻找更优解,慢慢找出全局最优解。

但是,该式只适用于变量连续的情况,即 x 在 p_{best} 和 g_{best} 之间连续。本文中粒子位置表示工件入排顺序和角度,不同位置是不连续的,在 p_{best} 和 g_{best} 两个位置中间迭代新的位置无法直接使用位置更新公式来计算。针对该问题,本文采用交叉、变异来进行粒子位置的迭代。假设有 8 个工件需

要进行排样,其中有两个工件型号相同,其类型为1,其余工件型号不同,为2—7,工件旋转的基准为 90° 。在第 k 次迭代后,粒子 m 的个体最优位置为 p_{best} ,如图6所示。群体的最优位置为 g_{best} ,如图7所示。

2,0	4,3	3,2	1,2	6,1	5,0	1,2	7,0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

图6 个体最优位置 p_{best}

3,1	7,0	1,1	5,1	1,0	4,2	2,1	6,3
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

图7 群体最优位置 g_{best}

第 i 个方框内的第1个数为该方案中第 i 个进行排样的工件型号,第2个数为排样前对工件进行旋转的系数。

为了在两者中间迭代一个新的粒子,首先是随机生成一个大于0小于8的交叉系数,记为 p 。本例中为4,则在新生成的粒子中,前4个元素与 g_{best} 的前4个元素相同,之后将 p_{best} 中型号被使用过的元素进行删除,之后将未被删除元素的型号依次填入新粒子的剩余元素中,具体过程如图8所示。对于重复的工件型号1,会有单独的数据结构记录该型号还需被放入的件数。本例中新粒子后4个元素的旋转系数并不与个体最优解中相对应的完全一致,它是由随机函数在群体最优解和个体最优解中相对应的两个元素旋转系数中随机选择。

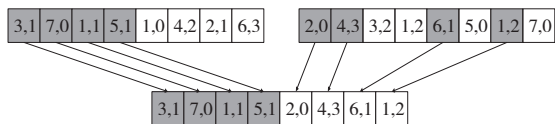


图8 粒子的交叉

为了避免陷入局部最优解,该算法中还有一个变量 p_{mutation} ,表示变异的概率,它是人工设定的值,在迭代的过程中,有一定概率不进行交叉求解,而是对当前粒子进行变异,如图9所示。它不进行 p_{best} 和 g_{best} 之间的交叉变异,而是通过对当前粒子某两个或多个顺序进行交换来生成新粒子,以防止程序过早收敛陷入局部最优解。

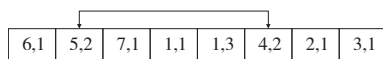


图9 粒子的变异

3 实验与验证

为了验证算法的可行性和有效性,采用C++

语言实现了本文的排样算法,并用ESICUP提供的测试用例进行了测试。表1为算法相关参数的配置。

表1 参数配置

参数	数值
粒子群大小	50
旋转基准/ $(^\circ)$	30
变异概率	0.05
迭代次数/次	40

图10和图11分别为本文算法对BLAZ样例和TROUSERS样例的求解结果。对于BLAZ样例,该方案对板料的占用率为64.30%,工件总面积对占用面积的比值,即材料利用率为78.01%;对于TROUSERS样例,板料占用率为72.19%,材料利用率为91.45%。

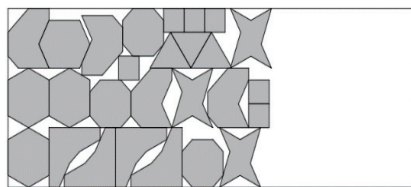


图10 BLAZ 样例求解结果

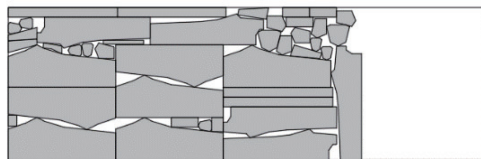


图11 TROUSERS 样例求解结果

4 结语

针对在工业生产中广泛存在的二维不规则排样问题,本文提出了基于BL-NFP的粒子群算法求解。首先将BL-NFP算法作为排样定位策略;对工件的排样顺序和排样角度进行粒子位置编码,并根据二维不规则排样中存在工件重复的特点对编码进行了创新;改进了粒子位置更新过程,以交叉替代传统的插值,使得算法能满足排样的离散问题求解;添加了粒子的变异过程,避免陷入局部最优解。通过ESICUP测试用例的排样试验,验证了该算法的有效性。

(下转第186页)

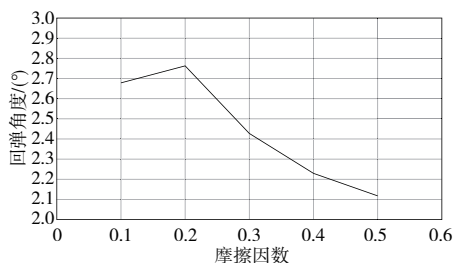


图 10 不同摩擦因数的管材弯曲回弹角度

由图 10 可知,在管材弯曲的过程中回弹角度会随着摩擦因数的减小先增大后减小,在摩擦因数为 0.2 时回弹角度达到最大值,随后继续增大摩擦因数能有效减小回弹角度。

5 结语

1) 研究表明,材料参数中弹性模量、泊松比、管材壁厚对管材多辊弯曲回弹有着不同程度的影响,其中泊松比的影响最小,在 0.25 时达到最大值,0.35 时为最小值,减小了 10.98%;管材壁厚对回弹角度的影响程度最大,回弹角度随着壁厚的增加而增加,在壁厚为 1.5 mm 时弯曲回弹角度最小,相比于 3 mm 壁厚时的回弹角度减小了 19.08%。在加工管壁较厚的材料时应重点考虑到回弹角度对加工精度的影响。

2) 在工艺参数中摩擦因数也是影响管材多辊弯曲回弹的重要因素,在摩擦因数为 0.2 时回弹角度达到最大值,继续增大摩擦因数有利于减小

回弹角度,在实际的加工过程中合理地利用润滑脂可以有效地减小摩擦因数对弯曲回弹角度的影响。送料速度对弯曲回弹角度的影响较小,在此项试验中最佳的送料速度为 12 mm/s,相比于送料速度 14 mm/s 时减小了 6.71%。

参考文献:

- [1] 郭训忠,陶杰,王辉.航空导管先进成形技术的研究进展[J].南京航空航天大学学报,2020,52(1):12-23.
- [2] 万鹏,刘振,姜银方.小直径厚壁管回弹的有限元仿真及试验[J].热加工工艺,2015,44(3):159-161.
- [3] 杜春江,瞿亦峰,陈亚峰.非均匀厚壁管料弯折成形及回弹仿真[J].机床与液压,2011,39(17):126-127,56.
- [4] 任胜乐,赖一楠,张元,等.管材弯曲成形理论与技术研究进展[J].哈尔滨理工大学学报,2011,16(6):31-35.
- [5] 吴磊,张亚民,黄凯东.弯管成形工艺及管材弯曲特性的研究现状[J].机电产品开发与创新,2016,29(4):23-25.
- [6] 张深,吴建军,王强,等.金属管材弯曲成形回弹问题研究[J].航空制造技术,2014,57(10):45-50.
- [7] 徐雪峰,邱泽宇,华如雨,等.内压与相对壁厚对薄壁管材弯曲成形的影响[J].塑性工程学报,2018,25(6):77-84.
- [8] WU J J, ZHANG Z K, SHANG Q, et al. A method for investigating the springback behavior of 3D tubes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131/132:191-204.

收稿日期:2022-11-25

(上接第 168 页)

参考文献:

- [1] 秦振浩.基于多种群遗传算法和剩余矩形匹配算法不规则件优化排样[J].现代工业经济和信息化,2022,12(9):222-224.
- [2] UMETANI S, MURAKAMI S. Coordinate descent heuristics for the irregular strip packing problem of rasterized shapes [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 303(3):1009-1026.
- [3] 刘斌.基于 HAPE 的二维不规则零件排样算法及其性能研究[D].广州:华南理工大学,2011.
- [4] 王莉.矩形件排样问题的遗传模拟退火混合求解算法[J].锻压技术,2021,46(8):70-76.
- [5] 刘海明,周炯,吴忻生.应用临界多边形方法与小生境遗传算法求解不规则排样问题[J].小型微型计算

机系统,2016,37(5):1002-1007.

- [6] 陈燕,谢琪琦,刘咏,等.圆形件下料顺序分组启发式算法的设计与实现[J].图学学报,2017,38(1):5-9.
- [7] 罗强,李世红,袁跃兰,等.基于复合评价因子的改进遗传算法求解矩形件排样问题[J].锻压技术,2018,43(2):172-181.
- [8] 谭同德,吴强,赵红领,等. OBB 层次包围盒构造方法的改进[J].计算机工程与应用,2008,44(5):79-81,95.
- [9] 王仕存,唐敦兵,朱海华,等.基于改进粒子群算法求解分布式多工厂生产调度问题[J].机械制造与自动化,2021,50(4):9-13.

收稿日期:2023-02-13