

文章编号: 1671-0444(2018)04-0658-06

一种分层填补的矩形件几何排样算法

郑鹏飞^{1, 2}, 楼京京², 林大钧¹, 安琦¹

(1. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237;

2. 义乌工商职业技术学院 机电信息学院, 浙江 义乌 322000)

摘要: 通过分析矩形件排样问题中图形间的几何关系, 根据矩形件的尺寸提取其角点坐标, 对待排样矩形件进行重组。按照板材的尺寸将重组后的矩形件进行分层排样, 利用可变式排样基线定位排样空隙, 选择尺寸适宜的矩形件进行空隙填补, 提出了一种分层填补的矩形件几何排样算法。选用矩形件长边分别平行于 x 轴和 y 轴两种板材摆放方式, 并设计多种分层排样规则, 计算出多种排样结果, 优选后输出最佳排样方式。通过算例分析, 验证了该算法的有效性。试验结果表明, 该算法操作简单、结果可视可选、稳定可靠、适应性广。

关键词: 分层; 空隙填补; 矩形件; 排样基线; 几何排样

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

A Geometric Pattern Algorithm for Rectangular Items with Layered Filling

ZHENG Pengfei^{1, 2}, LOU Jingjing², LIN Dajun¹, AN Qi¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. School of Mechanical Information, Yiwu Industrial & Commercial College, Yiwu 322000, China)

Abstract: Based on the analysis of the geometric relationship among rectangle items, the corner coordinates were extracted from the geometric information of the rectangle and the rectangle items were reorganized according to the dimension relation of rectangular items. According to the size of the plate, the rectangle items were arranged in stratified layout, the blank was located by the variable patterning base line, and the suitable rectangular items were selected to fill the gap. A geometric pattern algorithm for rectangular items with layered filling was proposed. Two types of patterning were used with the length of rectangle parts along x and y axes. Various layering rules were designed and various patterning results were calculated and output, the best patterning method was selected. The effectiveness of the algorithm was verified by an example. The results show that the algorithm is simple, visual, reliable and has wide adaptability.

Key words: layering; gap filling; rectangular items; patterning line; geometric patterning

随着先进制造技术的发展, 下料排样的自动化、柔性化与智能化已成为必然趋势。下料优化排样系

统由于具有效率高、省时省力、节省原材料、降低成本等优点而成为了衡量下料排样技术优劣的主要标

收稿日期: 2018-04-30

作者简介: 郑鹏飞(1984—), 男, 浙江兰溪人, 博士研究生, 研究方向为 CAD&CAGD 与反求工程, E-mail: pfzheng@126.com
安琦(联系人), 男, 教授, E-mail: anqi@ecust.edu.cn

志。排样问题是一个典型的组合优化问题,且该问题广泛存在于生产实践中。在国外,排样下料问题很早就得到了研究。例如,Kantorovich^[1]于1939年讨论了一维下料问题,其中,矩形件的下料排样方法被广泛应用于机械制造、印刷包装等行业。

近些年,国内外学者针对矩形件下料排样做了许多研究。袁哲等^[2]以矩形工程板面积之和与凸域板材面积之比的最大值为目标函数,建立凸域板材中单一尺寸矩形排样算法的数学模型,将矩形件排样应用到不规则凸域板材中。扈少华等^[3]根据矩形件的摆放位置不同,提出了一种基于两段排样方式的矩形件优化下料算法。夏以冲等^[4]运用自适应交叉和变异概率动态地控制遗传算法的收敛速度,通过模拟退火算法引导全局最优搜索,提出了一种自适应遗传模拟退火算法的矩形件排样方法。张青等^[5]基于专家模板的照片自动排版方法,提出了一种矩形件排样最优化的解决思路。李海生^[6]基于剪切冲裁相结合的下料工艺,将递归算法应用于单一矩形毛坯无约束的最优排样中,得到了一种条带数最少的排样方案。凌晗等^[7]将改进的启发式判断最低水平线策略与具有全局搜索能力的改进遗传算法相结合,优化了矩形件的排样结果。薛焕堂等^[8]提出了一种复合条带两段排样方式的生成算法。孙波等^[9]通过选择交叉算子和适应度函数,利用遗传算法提出了一种钣金件剩余矩形排样的优化方法。庞剑飞等^[10]通过引入匹配度及匹配权重,改进剩余矩形匹配算法,采用粒子群算法对权重进行优化,建立了一个矩形排样的优化设计模型。综上所述,矩形件的下料排样算法可大致分为两类:一类采用几何学思路,诸如BL(bottom left)算法和BLF(bottom left fill)算法,即根据板材的尺寸与各矩形件的尺寸进行有序整理排列下料,得到最终排样结果;另一类采用现代优化算法,比如GA(genetic algorithm)算法和SA(simulated annealing)算法等,即根据启发式算法思路,设计相应的编码与解码来实现最优排样,但这类优化算法对种群选择的依赖性较大,收敛结果不好控制。本文采用几何问题几何解决思路,利用矩形件的尺寸间关系对其分类排序,逐级排入板材,并优化间隙空间,从而达到几何优化排样之目的。

1 图形排样预处理

在矩形件排样下料之前,需对板材尺寸、待排样矩形件尺寸规格等进行信息预处理,便于后续排样

计算。现定义板材长度为 L 、宽度为 W 的矩形板材,其矩形边框的右上角点坐标为 box_right_top_p 。将所有待排样矩形件进行统一信息标定,标定原则为 $\text{rectangle_i}(\text{length_i}, \text{width_i}, \text{point_ld}, \text{point_ru})$,其中, rectangle_i 代表第 i 个矩形件, length_i 表示该矩形件的长度, width_i 表示该矩形件的宽度, point_ld 表示该矩形件的左下角坐标点, point_ru 表示该矩形件的右上角坐标点。按此原则提取每个待排样矩形件的特征,再通过所提取的特征信息判断各矩形件之间的位置关系,以此将图形排样过程转化为几何数据的计算对比过程,最后根据数据对比结果,逐一移动待排样矩形件到相应坐标点,便于后续实现计算机自动排样。

2 图形分类与重组

将待排样矩形件进行特征信息预处理后,进一步按矩形尺寸大小进行分类排序,以便后续排样过程更为便捷,排样结果更为规整。矩形件排样方式如图1所示,一矩形件可按长度方向平行于 x 轴(沿 x 轴向)摆放(矩形1),亦可按长度方向平行于 y 轴(沿 y 轴向)摆放(矩形2),其最后摆放方式取决于板材利用率。因此,在排样之前,须将矩形件按其组合关系最优化原则进行分类排序。矩形件组合关系最优化为两矩形件保持紧邻组合关系,组合后的图形仍为矩形是最优的。矩形1、2、3组合后的图形不再是矩形,并在排样过程中产生潜在的空间损失(见图2(a)),而这一现象在图2(b)中不存在,则图2(b)的组合方式满足最优组合关系。为了在排样时将板材的浪费降到最低,需尽可能地采用最优组合进行排样,在矩形件的间隙中排入小尺寸的矩形件,避免出现空间损失。

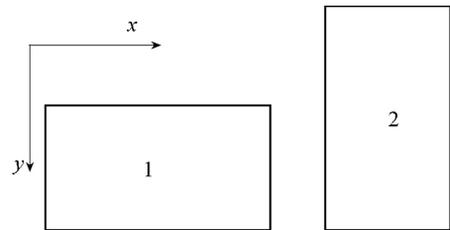
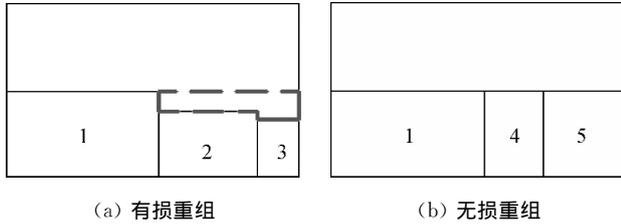


图1 矩形件长度方向沿 x 、 y 轴排样

Fig. 1 The length direction of rectangle parts arranged along the x and y axes

在图形分类与重组过程中,需考虑板材尺寸的影响。定义板材的长为 L 、宽为 W ,重组产生的新矩形件的长为 L^* 、宽为 W^* 。一般可设定规则:若 $L^* > L$ 或 $W^* > W$,则认为该重组矩形不符排样要

求,需作拆分处理;若 $L^* < L$ 且 $W^* < W$, 则认为该重组矩形符合排样要求, 将其作为下一层排样对象, 将符合要求的小矩形件移位合成整体, 并更新图形信息表 $rectangle_i(length_i, width_i, point_ld, point_ru)$ 。



(a) 有损重组 (b) 无损重组

图 2 矩形件的重组

Fig. 2 The recombination of rectangular parts

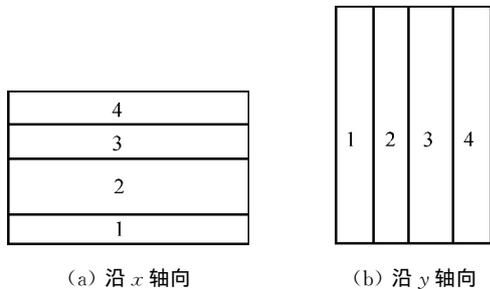
3 图形分层排样与空隙填补优化算法

根据矩形件几何特征、尺寸以及数量不规律的特点, 提出一种图形分层排样策略, 即将原先的板材整体拆分为多层条状板材。这样既可以降低排样的复杂度, 减少不同层面上矩形件的排样干涉, 又可以控制排样结果的规整度, 提高材料的利用率。

3.1 图形分层排样策略

根据板材的尺寸与矩形件的尺寸规格, 有沿 x 轴向和 y 轴向的两种分层排样方式, 如图 3 所示。板材可沿 x 轴向或 y 轴向摆放, 各矩形件也可按此排样, 最终排样结果可根据两种方案择优输出, 如图 4 所示。

择优输出原则为 $R = \sum_{i=0}^n S_i / S_0$, 其中, R 为板材利用率, S_0 为板材面积, S_i 为矩形件面积, i 为矩形件编号, n 为矩形件数量。

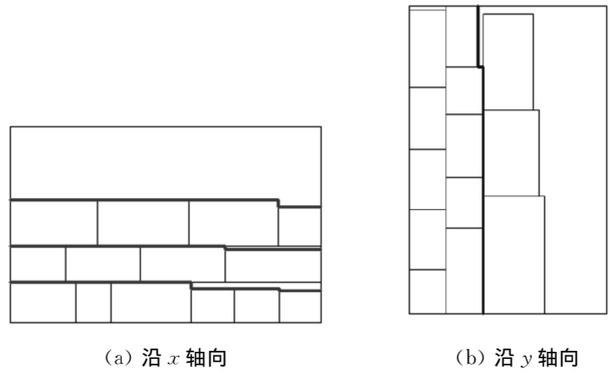


(a) 沿 x 轴向 (b) 沿 y 轴向

图 3 沿 x, y 轴向分层排样

Fig. 3 Hierarchical layout along x and y axes

在分层排样前, 根据分层方式, 利用各矩形件间的尺寸联系, 重组出新矩形条, 再将新矩形条整体排入板材的第一层, 依次类推, 在板材中排入后续层, 直到矩形件全部排完为止。现以沿 x 轴向分层排样方式为例, 其分层重组排样过程如图 5 所示。板材



(a) 沿 x 轴向 (b) 沿 y 轴向

图 4 沿 x, y 轴向分层排样输出示例

Fig. 4 The sample output of hierarchical layout along x and y axes

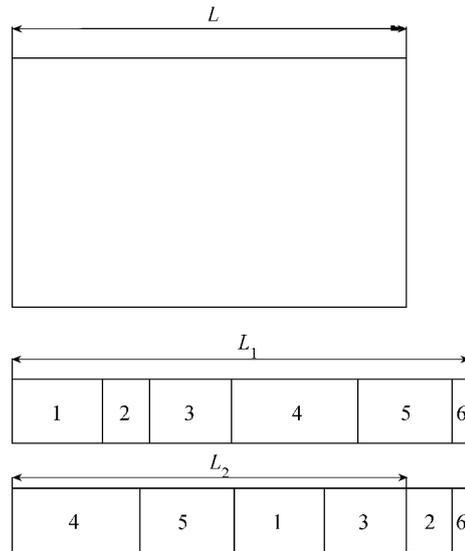


图 5 矩形件分层排样策略

Fig. 5 The stratified pattern strategy for rectangular parts

长度为 L , 在排序后的矩形件信息表中, 找出所有可重组矩形件进行归类存储。可重组矩形件的条件是两矩形件的长、宽尺寸中有一组相等。根据可重组原则, 搜索得到矩形件 1、2、3、4、5、6, 重组后其长度为 L_1 。由于 $L_1 > L$, 无法直接排入板材, 需对重组件进行拆分。拆分原则为将各矩形件按长度降序排列, 其排序为 4-5-1-3-2-6, 通过测量其部分长度可得 $L_2 \leq L$, 则该重组件排序为 4-5-1-3。

3.2 可变式排样基线

采用图形分层排样策略, 在每一层排样时, 其都与当前层的位置线有关。这里将该位置线定义为排样基线, 第一层排样的基线即为板材的下基准线。由于传统的 BL 排样法在分层排样时会造成较多的空间浪费, 故本文提出可变式排样基线的方法, 如图 4 所示。其中, 图 4(a)、(b) 中的粗实线分别是沿 x

轴向和 y 轴向排样的各层排样基线, 可见每层的排样基线都是变化的。采用可变式排样基线之后, 图 4(a) 的排样结果即变为如图 6 所示的可变式排样。显而易见, 可变式排样基线能有效降低板材的浪费。为了便于算法设计, 采用提取特征点坐标的方式来存储可变式排样基线, 如图 6 中的基线 3 用 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 4 个坐标点进行表示, 当坐标点数 (n_{fp}) 超过 2 个, 则说明该排样基线是折线, 存在后期进行填补优化的可能性。

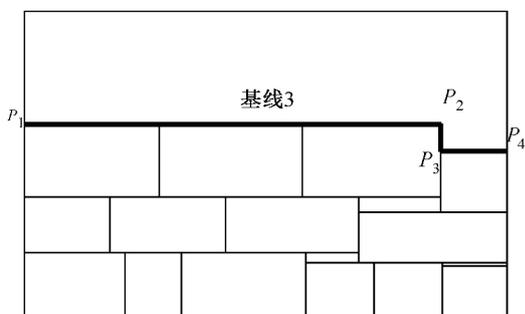


图 6 可变式排样基线
Fig. 6 The variable patterning baseline

3.3 排样空隙的填补优化

为进一步利用可变式排样基线所产生的空隙, 通过设定每个待排样件的优先等级来优化填补局部空隙, 提高材料利用率。在分层排样时, 排入每一层的首个矩形件前需确定可变式排样基线的最低点位置, 即在该层最低位置排入首个矩形件, 填补上一层排样结果造成的空隙, 尽量挤满整个空间。

以 x 轴向排样为例, 具体过程如下:

Step 1 排样当前层时, 搜索当前排样基线的特征点信息表, 若 $n_{fp} = 2$, 转 Step 2; 若 $n_{fp} > 2$, 转 Step 3。

Step 2 当前排样基线为一条直线时, 将所有待排样件按尺寸大小降序设置优先等级, 将尺寸最大者优先排入该层, 排入时先判断该排样件是否超出板材高度方向边界线, 若 $y_{rectangle_i}(point_ru) > y_{box_right_top_p}$, 则放弃该排样件排入, 转下一排样件进行判断排样。根据各排样的优先等级, 依次排入当前层的其余空间, 转 Step 4。

Step 3 当前排样基线为一折线时, 在所有待排样件中搜索与该折线最低处 (如图 6 中的 P_3 、 P_4) 匹配最佳的矩形件, 将其优先等级设为最高, 以其来优先填补此处空隙, 填补后该排样件不能超过折线的最高点。依次类推, 将该层空余部分排入符合要求的矩形件, 转 Step 4。

Step 4 判断当前层排样基线最低点是否超过板材上边框, 若 $y_{baseline} > y_{box_right_top_p}$, 则退出排样循

环, 排样结束; 若 $y_{baseline} < y_{box_right_top_p}$, 则转入下一层排样, 转 Step 1。

4 算例分析

在上述算法分析的基础上, 本文借助 AutoCAD 软件进行了算例验证。为了设计更便捷的操作方法, 在矩形件自动排样之前, 添加自动框选读入待排样件几何信息的功能, 这一功能大大提高了算法的效率, 也便于用户操作。

4.1 待排样件的自动识别

利用 entget 函数获取矩形件的几何信息表, 通过查询每个矩形件的组码, 提取组码中描述矩形 4 个角点的字段, 筛选出矩形件的角点坐标, 并按矩形件的尺寸进行排序存储 (存储于待排样矩形件的几何信息总表 `rectangle_i_info_lst` 中)。某待排样件图例的自动规整示意图如图 7 所示。自动框选读取功能还可旋转非一般摆放的矩形件, 如图 7(a) 中的 11、12 号矩形件所示。根据图形分层排样策略, 将所有待排样矩形件重组排序, 如图 7(b) 所示。

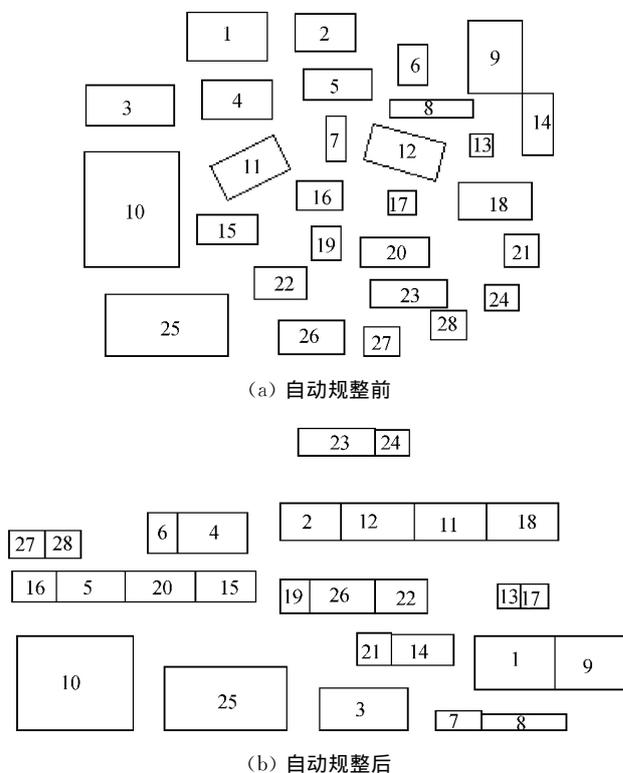
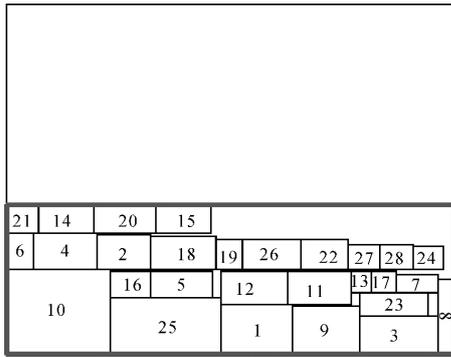


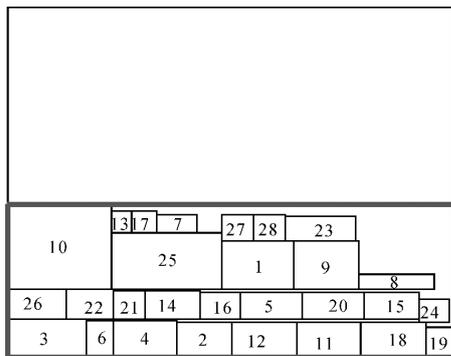
图 7 待排样件的自动规整
Fig. 7 Automatic regulation of the samples

4.2 沿 x 、 y 轴向自动优选排样输出

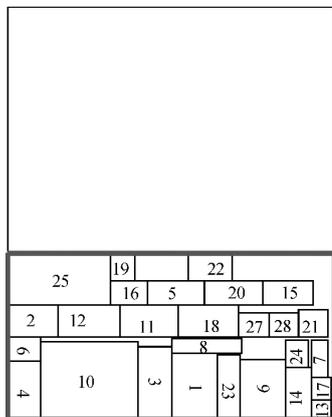
某算例的多种排样结果输出如图 8 所示, 现对这任意尺寸的 28 件待排样矩形进行排样。为了得到更优的排样输出, 本算法设计了多种分排规则:



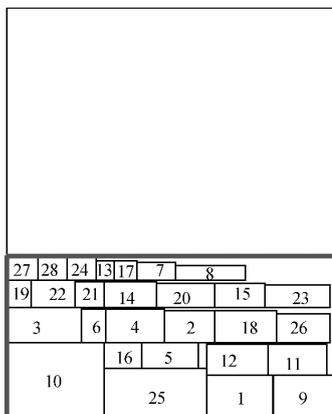
(a) 排样结果 1



(b) 排样结果 2



(c) 排样结果 3



(d) 排样结果 4

图 8 多种排样结果输出

Fig. 8 Multiple output of patterning

(1) 板材沿 x 轴向摆放, 首层优先排入大尺寸矩形件, 并结合可变式排样基线优化填补空隙的规则, 其输出结果如图 8(a) 所示; (2) 板材沿 x 轴向摆放, 首层优先排入矩形重组件, 其中, 重组件选择原则为重组后矩形件产生的空间浪费最小者为佳, 其输出结果如图 8(b) 所示; (3) 将板材沿 y 轴向摆放, 分别以上述两种规则进行排样输出, 其结果如图 8(c)、(d) 所示。根据板材利用率公式: $R = \sum_{i=0}^n S_i/S_0$, 计算选择最佳排样结果。

由于本例排样未排满整个板材, 故此处 S_0 由排样结果中矩形件所占最小矩形面积代替。计算可得: $R_{8a} = 83.4\%$, $R_{8b} = 81.7\%$, $R_{8c} = 87.7\%$, $R_{8d} = 89.3\%$ 。由此可知, 图 8(d) 所示的排样方式为最佳排样结果输出。

4.3 算法效率分析

为了进一步验证本算法的有效性和效率, 现采用文献[10-11]的算例进行效率对比分析。一矩形板材尺寸为 $2\ 400\ \text{mm} \times 1\ 200\ \text{mm}$, 待排样零件数量及规格等数据如表 1 所示。排样输出结果如图 9 所示, 其为本文算法的一种结果输出。算法效率数据如表 2 所示。由此可知, 本文算法在效率与板材利用率方面均优于文献[10-11]。

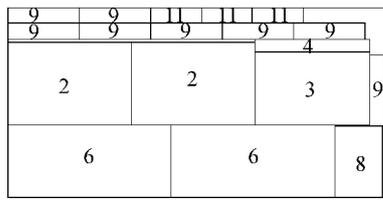
表 1 矩形板材的零件数量及规格

Table 1 Dimension and quantity of parts and rectangular plate

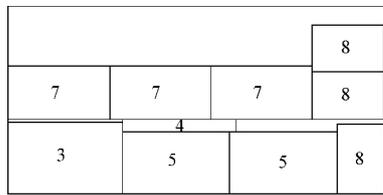
零件编号	数量/个	长/mm	宽/mm
1	2	1 030	720
2	2	780	520
3	2	720	460
4	2	720	80
5	2	680	400
6	4	1 030	460
7	4	640	340
8	4	450	300
9	8	450	100
10	4	340	110
11	4	320	100

6	6	11
		10
		10
		10
		10
1	1	7

(a) 板材 1



(b) 板材 2



(c) 板材 3

图 9 矩形板材排样结果

Fig. 9 Pattern results of plate 1, 2 and 3

表 2 矩形板材利用率对比

Table 2 Utilization ratio comparison of rectangular plates

算法	矩形板材利用率/%		
	板材 1	板材 2	板材 3
文献[10]	93.50	89.80	79.50
文献[11]	97.94	94.92	70.45
本文	98.26	95.09	69.12
最理想(零废料)	100.00	100.00	62.47

由上述算法分析可知, 分层填补的矩形件几何排样算法可适用于任意尺寸矩形件排样问题, 且计算结果精度可控, 能达到工程应用的需求。该算法利用排样件的几何特征设计分层排样策略, 排样结果可视、可选, 具有一般性, 操作简单且有较好的鲁棒性, 是一种典型的几何问题几何计算解决的方式。

5 结 语

矩形件的排样算法应用广泛, 多数算法虽然应用了优化算法, 但实际应用存在诸多问题。本文所涉及的算法利用矩形件的几何特征, 提取关键信息, 采用分层排序后排入各矩形件的几何算法, 结合可变式排样基线, 克服了 BL 规则引起的空间浪费问题, 通过局部填补的方式排入每层的空隙, 提高了材

料的利用率。该算法不受矩形件的尺寸、位置(旋转)影响, 提供了沿 x 、 y 双轴向的排样结果, 可以用于解决工程设计、施工安装中所涉及的矩形件排样下料问题。

本文所提出的矩形件排样算法从几何分析出发, 操作简单, 能解决一些实际工程需要。但在大规模矩形排样问题中存在一些不足之处, 即由于该算法的输出结果多样可选, 在计算大规模排样问题时, 需计算多种排样输出, 故需耗费较多时间; 另外, 本算法在排样之前需预先输入待排样件的矢量图形, 算法才能自动读取排样件的矢量数据进行自动优化排样。为简化待排样件的读入过程, 今后可采用扫描识别或交互式在输入排样件尺寸后自动形成其矢量图形以作改善。

参 考 文 献

[1] KANTOROVICH L V. Mathematical methods of organizing and planning production[J]. Management Science, 1960, 6(4):366-422.

[2] 袁哲, 邓长亮, 张岩. 不规则凸域板材中单一尺寸矩形排样算法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(1): 158-164.

[3] 扈少华, 武书彦, 潘立武. 基于两段排样方式的矩形件优化下料算法[J]. 图学学报, 2018, 39(1):91-96.

[4] 夏以冲, 陈秋莲, 宋仁坤. 基于自适应遗传模拟退火算法的矩形件排样[J/OL]. 计算机工程与应用, 2018(3): <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20180301.1539.014.html>.

[5] 张青, 刘芳. 矩形件排样最优化问题求解[J]. 现代电子技术, 2017, 40(22):72-74.

[6] 李海生. 递归算法在单一矩形毛坯无约束最优排样中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(9):125-131.

[7] 凌晗, 刘楠峰, 武照云, 等. 基于改进遗传算法的矩形件排样优化研究[J]. 现代制造技术与装备, 2017, 250(9):66-69.

[8] 薛焕堂, 董海芳, 管卫利. 复合条带两段排样方式的生成算法[J]. 机械设计与制造, 2017(7):124-127.

[9] 孙波, 李粉利, 刘璐, 等. 钣金件剩余矩形排样遗传优化方法研究[J]. 西安工业大学学报, 2015, 35(4):287-292.

[10] 庞剑飞, 宋丽娟. 矩形排样问题的优化设计模型[J]. 现代制造工程, 2014(2):88-90.

[11] 曾凤华. 剩余矩形匹配算法在矩形件排样中的应用[J]. 机电工程技术, 2006, 35(3):64-65.

(责任编辑: 杜 佳)