

二维不规则排样背景下的零件像素化表达算法

刘 斌¹, 王宇帆¹, 刘嘉敏²

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 针对目前主流的零件表达方式, 当零件外形呈现出凹多边形特性且顶点数目较多时, 冲突检测算法明显变慢的问题, 提出了一种零件像素化表达方法, 即在零件包围盒上布置多个方形微粒, 然后, 通过二维布尔变量数组存储微粒是否被占用的信息, 提出了微粒“占用”的判断算法。算例1研究了像素图生成速度与微粒边长和零件外形的关系; 算例2则研究了零件像素化程度与排样性能的关系, 最后, 给出了推荐的微粒边长。推荐微粒边长可令排样计算速度和排样效果取得最佳的平衡。同时, 算例2还与商用排样软件 SigmaNest 进行了对比, 实验结果表明, 如果使用推荐的微粒边长, 本文算法得到的材料利用率高于 SigmaNest 算法, 且计算耗时只有后者的 2.8%。

关键词: 不规则排样; 像素化; 矢量图; 冲突检测; 材料利用率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2021.08.008

中图分类号: TP391.73

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2021) 08-0044-05

Pixelated expression algorithm of parts under background of two-dimensional irregular layout

Liu Xiao¹, Wang Yufan¹, Liu Jiamin²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: For the current mainstream expression way of parts, when the shape of part exhibits concave polygonal characteristics and the number of vertices is larger, the conflict detection algorithm is significantly slower. Based on the above issue, a pixelated expression method of part was proposed, which was to arrange multiple square particles on the part bounding box, and then based on the information that whether the particles were occupied which was stored by two-dimensional Boolean variable array, the judgment algorithm of particles being occupied was proposed. Furthermore, the relationships between the speed of pixel image generation and the side length of particles and the shape of part were studied by calculation example 1, and the relationship between the pixelization degree of part and the performance of layout was studied by calculation example 2. Finally, the recommended side length of particles was given, which made the best balance between the layout calculation speed and the layout effect. At the same time, the calculation example 2 was compared with the commercial layout software SigmaNest. The experimental results show that if the recommended side length of particles is used, the material utilization ratio of algorithm in this paper is higher than that of SigmaNest, and the calculation time is only 2.8% of the latter.

Key words: irregular layout; pixelization; vector illustration; conflict detection; material utilization ratio

将零件在母材内布排, 以材料利用率的提升为目标, 这类问题称之为排样。如果待排零件或者母材均可表达为多边形, 则称其为二维排样问题^[1-2]。该问题在金属板材加工、皮革、服装等工程领域具有广泛的应用^[3], 属于优化算法的分支。二维排样算法分为规则排样^[4-5]和不规则排样^[6-10]。其中,

不规则排样主要是指待排零件不规则, 或者母材形状不规则^[11-12], 亦或兼而有之^[13]。

零件冲突检测算法是不规则排样问题的关键技术, 是排样算法整体执行效率最为关键的制约因素。因此, 不规则零件的冲突检测算法吸引了很多学者的关注。主要的解决思路是将零件表达为多边形, 然后再进行多边形之间的冲突检测。多边形冲突检测算法又主要分为两大类: 第一类是基于临界多边形 (No-Fit Polygon, NFP) 的算法^[14]; 另一类则是基于多边形分离判据的算法^[15]。

无论是基于临界多边形的算法还是基于多边形分离判据的算法, 其零件和母材的几何表达均是基于矢

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2020-11-18

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (2014A030313225);

上海交通大学海洋工程国家重点实验室研究基金项目 (1518)

作者简介: 刘 斌 (1976-), 男, 博士, 副教授

E-mail: liuxiao@scut.edu.cn

量图的。当零件外形呈现凹多边形特性或顶点数目较多时，冲突检测算法的速度变慢，工程上有时无法接受。刘虢等^[16]提出了一种基于混合表达的零件排样算法 HAPE_HRG。在排样的前处理（读入零件和母材信息）和后处理阶段（输出精确排样图），零件为矢量图表达。在零件优化布排阶段，则采用像素化表达以增加冲突检测算法的执行效率。研究表明，零件像素化表达后，排样计算时间平均可节省 65%。

零件像素化表达方法可分为两类：方形微粒填充^[16]和圆形微粒填充^[17]。两种方法各有优缺点。本文提出一种基于方形微粒的零件像素化表达算法，然后通过两个算例进行展开研究。算例 1 研究像素图生成速度与微粒边长和零件外形复杂度的关系；算例 2 则研究零件像素化程度与排样性能的关系，最后给出推荐的微粒边长。

1 零件像素化表达算法

如图 1 所示，可以用方形微粒来填充零件。为了便于描述，建立描述零件的局部坐标系为 X-Y。

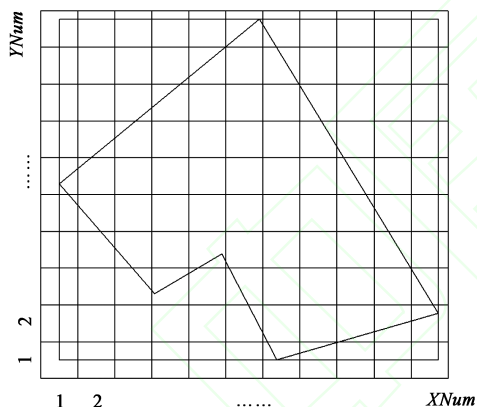


图 1 采用方形微粒填充零件
Fig. 1 Filling part with square particles

1.1 局部坐标系

如图 1 所示，将零件包围盒的左下角点取为局部坐标系的原点，水平向右为 X 轴，竖直向上为 Y 轴。假定离散微粒为正方形，其边长为 PSL (Particle Side Length)。那么，沿 X 轴布置 $XNum$ 个微粒，沿 Y 轴布置 $YNum$ 个微粒，则：

$$\begin{cases} XNum = \text{零件包围盒长边} / PSL + 1 \\ YNum = \text{零件包围盒宽边} / PSL + 1 \end{cases} \quad (1)$$

1.2 二维数组存储微粒的占用信息

图 1 中，有的微粒与零件冲突，可理解为被零件“占用”；有的则与零件分离，可理解为“空置”。为了对微粒的“占用”信息进行描述和存储，

可以设立二维布尔变量数组，即：

$$\text{bool ParticleOccupied}[XNum][YNum] \quad (2)$$

1.3 微粒占用判断算法

图 1 中，微粒是否被“占用”的主要判据为：如果微粒的中心点位于零件多边形内，则认为微粒被“占用”。

尚有两点补充判据如下。

补充判据 1：如图 2 所示，当微粒顶点刺入零件时，即微粒某顶点在零件内，则两者冲突，微粒被“占用”。

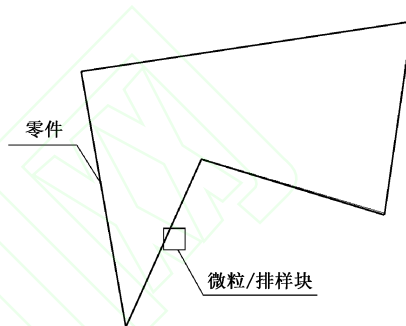


图 2 微粒/排样块“刺入”零件（微粒顶点在零件内部）
Fig. 2 Particle/layout block ‘piercing’ part (Particle vertex inside part)

补充判据 2：如图 3 所示，当零件顶点刺入微粒时，即零件某顶点在微粒内，则两者冲突，微粒被“占用”。

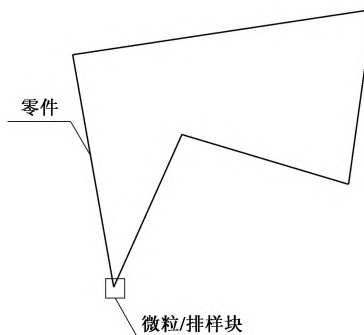


图 3 零件顶点“刺入”微粒/排样块（零件顶点在微粒内部）
Fig. 3 Part vertex ‘piercing’ particle/layout block (Part vertex inside particle)

如图 4 所示，与零件冲突的方形微粒得以保留，这样即完成了零件的像素化表达。

为了研究零件像素化表达对排样算法的影响，下文通过两个算例进行展开分析。

2 算例 1 像素图生成速度

如图 5 所示，4 个零件的面积相同，但复杂程

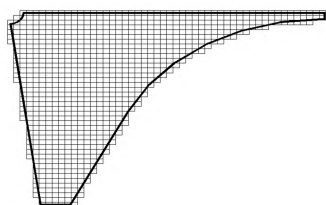


图 4 像素化零件

Fig. 4 Pixelated part

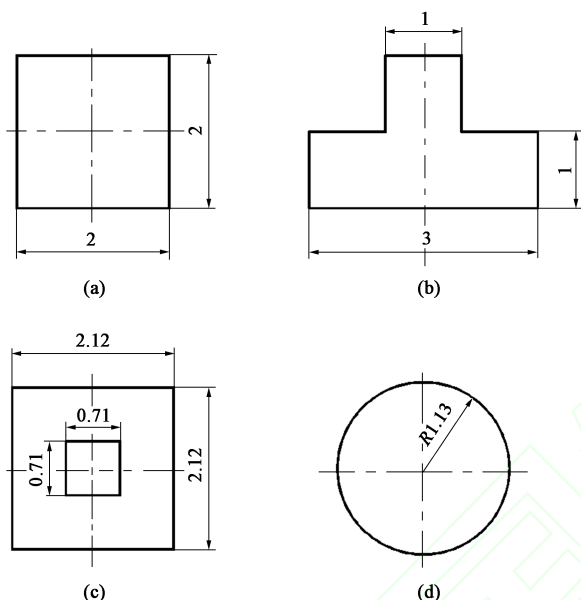


图 5 4 个零件的尺寸图

(a) 矩形零件 (b) T形零件 (c) 回形零件 (d) 圆形零件

Fig. 5 Dimension drawings of four parts

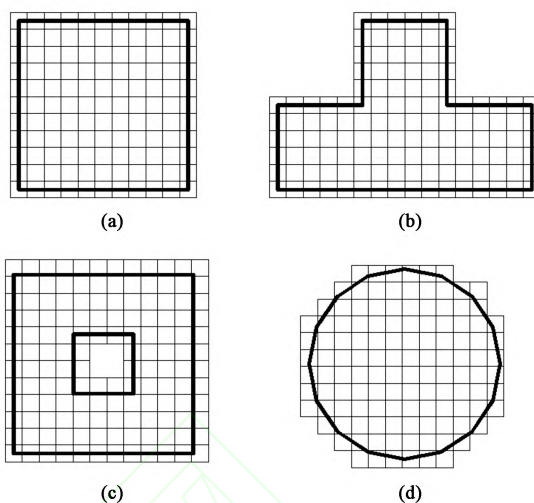
(a) Rectangular part (b) T-shaped part

(c) Ring part (d) Circular part

度不同：矩形零件为凸多边形，T形零件为凹多边形，回形零件为带孔洞的凸多边形，圆形零件为圆形（圆周分为 16 等份，实际上是包含 16 个顶点的多边形）。

下文研究零件微粒边长 PSL 、零件外形的复杂程度与像素图生成速度的关系。在区间 $[0.10 \text{ mm}, 0.30 \text{ mm}]$ 对 PSL 取 5 个值，分别对如图 5 所示的 4 个零件进行像素化处理。篇幅所限，仅列出 $PSL = 0.20 \text{ mm}$ 时的像素图（图 6）。

4 个零件在不同 PSL 情况下的像素图生成时间如表 1 所示，对应的曲线图如图 7 所示。结论如下：（1）零件像素化的时间与 $(1/PSL)^2$ 成正比（拟合曲线如图 8 所示）；（2）在面积相同的前提下，决定零件像素化时间的因素按照重要程度排列为：零件顶点数目（圆形零件）> 凹多边形（T形零件）> 带孔洞的凸多边形（回形零件）> 凸多

图 6 像素化后的零件 ($PSL = 0.20 \text{ mm}$)

(a) 矩形零件 (b) T形零件 (c) 回形零件 (d) 圆形零件

Fig. 6 Pixelized parts ($PSL = 0.20 \text{ mm}$)

(a) Rectangular part (b) T-shaped part

(c) Ring part (d) Circular part

表 1 零件像素图生成时间

Table 1 Pixel image generation time of parts

零件微粒边长 PSL/mm	生成时间/ms			
	矩形零件	回形零件	T形零件	圆形零件
0.10	0.016	0.030	0.063	0.080
0.15	0.008	0.017	0.032	0.038
0.20	0.006	0.010	0.020	0.021
0.25	0.005	0.007	0.015	0.017
0.30	0.004	0.006	0.011	0.016

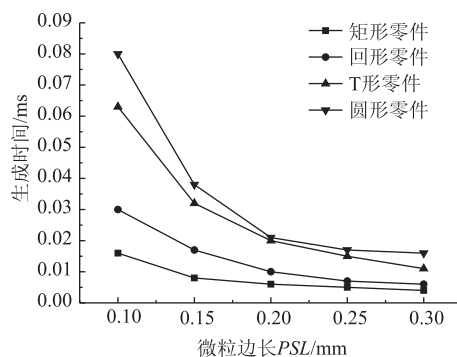


图 7 零件像素图生成时间曲线

Fig. 7 Generating time curves of pixel image for parts

边形（矩形零件）。

3 算例 2 像素化程度与排样性能

零件像素化程度越高（零件微粒边长 PSL 越小），排样效果越好，但必然付出排样时间增加的代价。为了研究 PSL 对排样性能的影响，定义像素化因子 s 为：

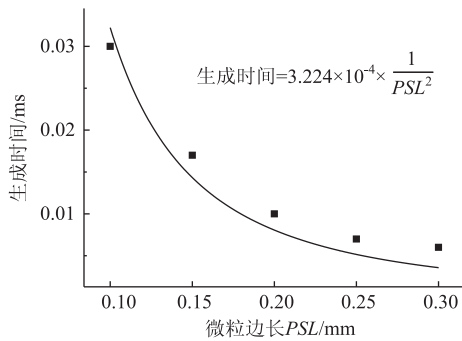


图 8 回形零件的像素图生成时间拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of pixel image generation time for ring part

$$s = PSL/ASL \quad (3)$$

式中： ASL 为所有待排零件中面积最小零件的包围盒平均边长。

选取欧洲排样研究组织 ESICUP 的一个公开算例 Swim，进行不同像素化因子 s 下排样效果的研究。采用文献 [16] 提供的程序 HAPE_HRG，程序和算例见文献 [18]。

表 2 中，在所有情况下 ($s = 2\% \sim 15\%$)，HAPE_HRG 的排样速度均快于商用软件 SigmaNest 的排样速度，大部分情况下，HAPE_HRG 的材料利用率均高于 SigmaNest ($s = 15\%$ 除外)。另外，随着 s 的增加，计算速度不断增加，材料利用率则不断减小。因此，HAPE_HRG 的计算速度和材料利用率是相矛盾的。

表 2 排样时间和材料利用率

Table 2 Layout times and material utilization ratios

算法/软件	计算时间/s	材料利用率/%
HAPE_HRG ($s = 2\%$)	3.000	62.24
HAPE_HRG ($s = 5\%$)	0.173	62.17
HAPE_HRG ($s = 10\%$)	0.042	60.08
HAPE_HRG ($s = 15\%$)	0.032	59.43
SigmaNest	6.138	59.49

如图 9 所示，当 $s = 5\%$ 、 10% 和 15% 时，其计算速度明显快于其他两种情况；如图 10 所示，当 $s = 2\%$ 和 5% 时，材料利用率明显高于其他 3 种情况。因此，当像素化因子 $s = 5\%$ 时，排样的计算速度和材料利用率之间取得了最佳平衡（HAPE_HRG 排样如图 11 所示，其中， $RN = 2$ ，计算时间为 0.173 s，材料利用率为 62.17%）。另外，在计算耗时方面，HAPE_HRG ($s = 5\%$) 的耗时仅有 SigmaNest 的 2.8%（SigmaNest 排样如图 12 所示，其中， $RN = 2$ ，计算时间为 6.138 s，材料利用率为 59.49%）。

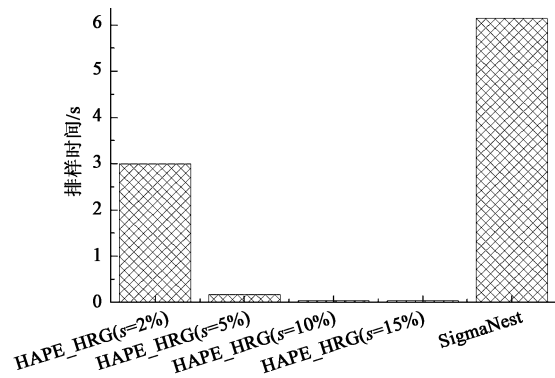


图 9 不同情况下的生成时间

Fig. 9 Generation times under different conditions

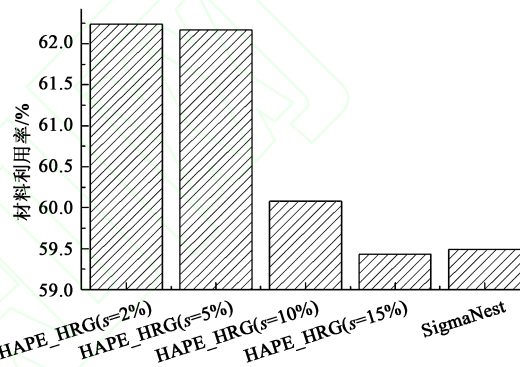


图 10 不同情况下的材料利用率

Fig. 10 Material utilization ratios under different conditions

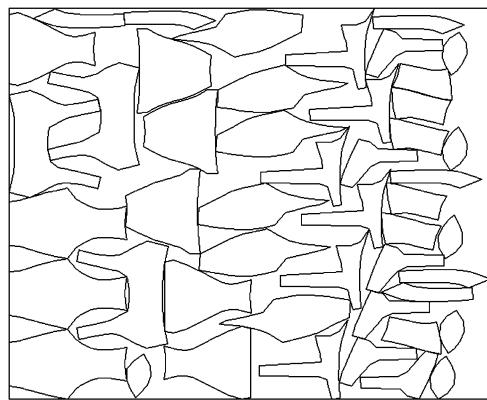


图 11 HAPE_HRG 排样 ($s = 5\%$)

Fig. 11 Layout by HAPE_HRG ($s = 5\%$)

4 结论

(1) 零件像素化表达的生成时间与微粒边长的平方 (PSL^2) 成反比。

(2) 在面积相同的前提下，决定像素化生成时间的因素按照重要程度排序为：零件顶点数目 > 凹多边形 > 带孔洞的凸多边形 > 凸多边形。即零件顶点数目越多，凹多边形特性越明显，则零件像素化

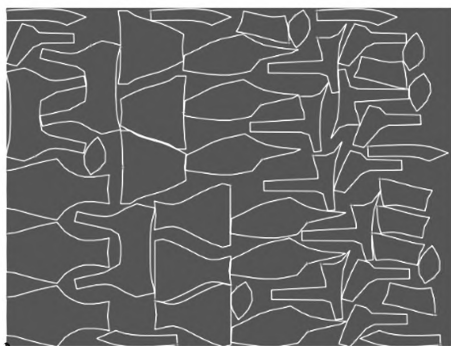


图 12 SigmaNest 排样

Fig. 12 Layout by SigmaNest

生成时间越长。

(3) 零件像素化程度是排样性能的关键因素。当像素化因子 $s = 5\%$ 时, 排样执行速度和排样效果取得最佳平衡, 在排样效果 (材料利用率) 优于商用排样软件 SigmaNest 的前提下, 计算耗时只有后者的 2.8%。

参考文献:

- [1] 王思琪. 基于遗传算法的二维模板排样算法的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Wang S Q. Research on Two-dimensional Layout Algorithm Based on Genetic Algorithm [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [2] 李文学. 多约束二维排样算法研究与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
Li W X. Research and Application of Polygon's Packing Optimization with Multiple Constraints [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [3] 向文欣, 王宏旭, 潘立武. 基于匀质块排样方式的多尺寸板材下料算法 [J]. 锻压技术, 2019, 44 (7): 41-46.
Xiang W X, Wang H X, Pan L W. Blanking algorithm for multiple-size sheets based on homogeneous block layout [J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44 (7): 41-46.
- [4] Bezerra V M R, Leao A A S, Oliveira J F, et al. Models for the two-dimensional level strip packing problem-A review and a computational evaluation [J]. Journal of the Operational Research Society, 2020, 71 (4): 1-19.
- [5] Wei L J, Hu Q, Lim A, et al. A best-fit branch-and-bound heuristic for the unconstrained two-dimensional non-guillotine cutting problem [J]. European Journal of Operational Research, 2018, 270 (2): 448-474.
- [6] 王静静, 瞿少成, 李科林. 一种基于并行交叉遗传算法的二维不规则排样问题求解 [J]. 计算机应用与软件, 2020, 37 (7): 188-193.
Wang J J, Qu S C, Li K L. A two-dimensional irregular layout problem solving based on parallel cross genetic algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2020, 37 (7): 188-193.
- [7] 高荣宇. 二维不规则件排样优化系统研究与实现 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
Gao R Y. Research and Implementation of Two-dimensional Irregular Part Nesting Optimization System [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [8] 王阳. 工艺约束下二维不规则零件排样算法研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
Wang Y. Research on the Nesting Algorithm of Two-dimensional Irregular Parts under Process Constraints [D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [9] 张蜜蜜. 二维不规则零件排样算法的研究与应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
Zhang M M. Research and Application of Two-dimensional Irregular Part Packing Algorithm [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [10] 罗立宏, 冯开平, 叶家玮. 基于摇瓶策略求解二维不规则件排样问题 [J]. 南京理工大学学报, 2015, 39 (2): 194-201.
Luo L H, Feng K P, Ye J W. 2D irregular polygon nesting with shaking bottle strategy [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2015, 39 (2): 194-201.
- [11] 王永振. 二维不规则图形内的矩形排样研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
Wang Y G. Research on Packing Rectangle Items in Two-dimensional Irregular Stone Block [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.
- [12] 陈志扬, 刘妍. 改进粒子群搜索的二维皮革排样优化算法 [J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43 (5): 492-496.
Chen Z Y, Liu Y. Optimization algorithm of two-dimensional leather nesting based on improved PSO search [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2015, 43 (5): 492-496.
- [13] 徐玲玲. 不规则域皮衣衣片排样算法的研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
Xu L L. Research on Layout Algorithm of Irregular Leather Cloth [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.
- [14] 徐将将. 基于临界多边形的二维不规则排样算法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
Xu J J. Research of Two-dimensional Irregular Nesting Algorithm Based on No Fit Polygon [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [15] 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.
Liu X. Two-dimensional Irregular Packing Algorithm Based on HAPE and Its Performance Study [D] Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [16] 刘斌, 叶家玮, 刘嘉敏. 基于混合表达图形的二维不规则排样构造算法 [J]. 上海交通大学学报, 2018, 52 (7): 825-830.
Liu X, Ye J W, Liu J M. Two-dimensional constructive packing algorithm based on hybrid representation graphics [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 52 (7): 825-830.
- [17] Rocha P, Rodrigues R, Gomes A M, et al. Circle covering representation for nesting problems with continuous rotations [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47 (3): 5235-5240.
- [18] 刘斌. 排样算法、资料和程序 [EB/OL]. <http://www.huagongchuanhai.cn/packing/>, 2020-08-26.
Liu X. Packing algorithms, data and programs [EB/OL]. <http://www.huagongchuanhai.cn/packing/>, 2020-08-26.