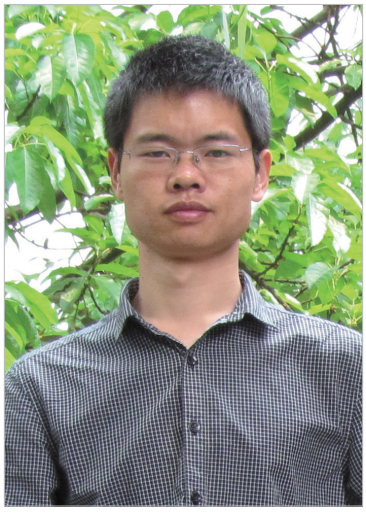
复合材料自动下料优化排样方法*

Optimization Layout Method for Composites Automatic Feeding

西北工业大学机电学院 邓良才 吴建军 张深
中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 陈中革



邓良才
西北工业大学航空工程专业硕士研究生。主要研究方向为复合材料数字化制造。

在复合材料结构件的制造过程中,材料成本占了很大的比例,因此降低材料成本将成为解决低成本复合材料设计制造的有效途径。利用计算机模拟复合材料铺层过程,得到精确的复合材料二维展开形状,并且采用计算机对二维展开形状进行优化排样,能够显著提高复合材料利用率。

近年来,高性能复合材料在航空领域的应用越来越广泛,飞机结构复合材料的用量已成为衡量飞机先进性的一项重要指标[1]。高性能连续纤维复合材料能够生产更轻、性能更好的产品,但是复合材料较高的材料成本、复杂的设计和制造过程在很大程度上制约了复合材料的更大规模的应用,因此低成本复合材料设计制造一体化技术已经成为世界通用飞机制造商必须要面对和解决的问题之一。

在复合材料结构件的制造过程中,材料成本占了很大的比例,因此降低材料成本将成为解决低成本复合材料设计制造的有效途径。利用计算机模拟复合材料铺层过程,得到精确的复合材料二维展开形状,并且采用计算机对二维展开形状进行优化排样,能够显著提高复合材料利用率。

计算机辅助优化排样就是将一系列展开毛坯形状按照一定的排列方式排布在给定的材料上,使其所用的材料利用率最高。从数学计算复杂性理论看,任意形状毛坯优化排样问题属于具有最高计算复杂性的NP(Non-Deterministic Polynomial, 非确定多项式)问题,至今还无法找到解决该问题的有效多项式时间算法。传统的排样工作都是人工依靠经验进行的,时间长且效果不理想。由于生产实际的需要,人们迫切需要利用现代科技来解决这一问题,本文主要研究了二维任意形状毛坯料的优化排样问题。

二维不规则形状优化排样

设复合材料的幅宽为 W,用料长度为 L,需要裁剪 k 种形状的毛坯料,

* 国家自然科学基金(51075332)资助。

每种毛坯面积为 S_i，数量为 n_i，则优化排样的目标是使材料利用率 ξ 尽可能高，如公式（1）所示。

$$\max\xi=\frac{\sum_{i=1}^{k}(S_i\times n_i)}{L\times W}\quad。\qquad(1)$$

条件 4 是由复合材料的各向异性决定的，复合材料在经线和纬线方向上的性能差异比较大，但是材料的正反两面可以认为性能完全一样。因此排样时毛坯不可以任意旋转，只能有如图 1 所示的 4 种镜像方式。

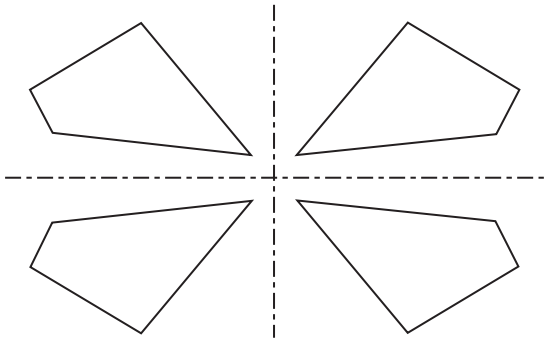


图1　毛坯的4种镜像方式

实际生产中，复合材料通常以卷料形式供应，可以认为是具有一定宽度，长度无限的矩形，排样的目标是裁剪一定数量的零件毛坯，使用料长度最短，从而材料的利用率最高。复合材料毛坯下料排样过程中需满足以下 4 个条件：

（1）任意 2 毛坯不得重叠；

（2）在满足裁剪工艺的前提下，任意 2 毛坯之间的间隙要尽可能小；

（3）任意 1 个毛坯都必须在板料宽度范围以内；

（4）排样时毛坯的经、纬线必须与材料的经、纬线平行。

二维不规则形状优化排样有 2 个关键问题 [2]：一是几何问题，目标是计算排样过程中的毛坯之间的最佳贴合位置；另一个是优化问题，即寻找一个最优的毛坯在给定材料上的排样顺序，使裁剪后的废料最少。

毛坯之间的最佳贴合问题是为了满足第 1、2 条约束，保证让毛坯料尽量贴近，同时又必须保证排样毛坯之间不会发生重叠，从而减小毛坯之间的废料面积；毛坯之间相对位置优化问题是为了满足第 2、3 条约束，寻求一个排样过程中的全局最优解。

毛坯最佳贴合算法

现有的排样算法中关于毛坯料贴合方法主要分 2 种：基于轮廓矢量信息方法和基于位图方法。

基于轮廓矢量信息的方法采用几何学、图形学的理论，通过图形移动、碰撞检测等来寻找毛坯之间的最佳贴合位置。具有代表性的是临界多边形（NFP，No-Fit Polygon）算法 [3-4]，极端情况下，对平面上的凹多边形 N 边形和 M 边形进行排样，其算法时间复杂度为 $O((M+N)\times M\times N)$。基于位图的方法有代表性的是扫描线算法 [5]，该方法按像素逐行扫描毛坯之间的空留区，根据每条扫描线的长度，寻找到 2 毛坯间的最小平移距离，其算法的时间复杂度为 $O(N\log M+M\log N)$。

实际应用中，由于毛坯形状的不确定性，这些算法在实现起来都很困难，而且对于某些极端的毛坯，往往得不到正确的结果，导致后续的优化算法也将无法执行。

1 模板测试

计算机通过图形卡控制显示器，而图形卡控制着显示器屏幕上每一个像素点。图形卡将为显示屏上每一个像素分配一个存储区域，用于存储该像素的颜色信息、深度值、模板值等信息。OpenGL 的模板测试功能主要是基于某个像素的模板缓存值与一个参考值相比较的结果，有条件地绘制该像素的方法。图形绘制的时候将这个模板值与即将写入的像素点进行比较，满足一定条件才进行绘制，并可按要求改变模板值。

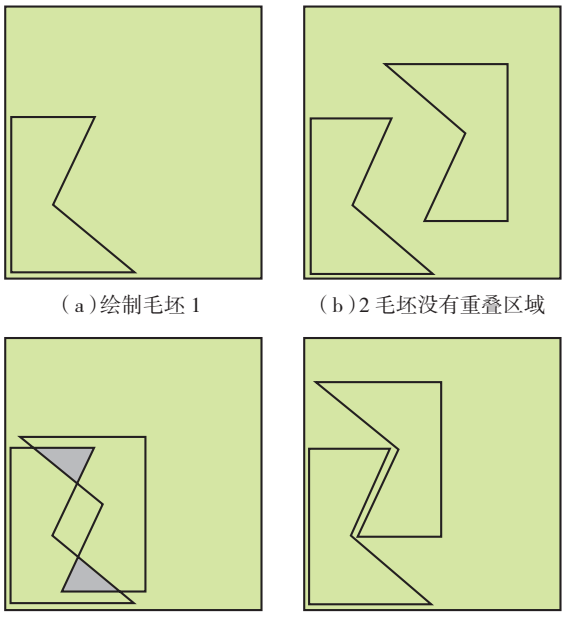
我们可以在绘制不同毛坯时设置不同的模板值，选取适当的比较函数以及模板参考值，每个毛坯对应屏幕上一块绘图区。绘制结束后可以通过检测每一像素的模板值来判断是否有像素被重复绘制，被多次绘制的像素即为毛坯重叠区域。

2 基于模板测试的最佳贴合算法

板料排样时的最佳贴合问题实际上是要求 2 个毛坯的距离最近，同时又刚好没有重叠区域，绘制在屏幕上就是要求 2 个毛坯的图像距离尽可能近，但又刚好没有像素点被重复绘制。利用 OpenGL 的模板测试功能，可以在屏幕上指定一块矩形的区域作为初始板料，并给其初始化为指定模板值 T_1，然后分别绘制已排毛坯、待排毛坯，相应区域像素的模板值设置为不同值，绘制待排放毛坯时通过检测相应像素的模板值可以判断出其是否被重复绘制。若有重复绘制区域，则已排毛坯与待排毛坯有重叠区域，采用二分法调整两毛坯之间的距离，迭代一定次数后，将得到满足预定精度要求的 2 个毛坯最佳贴合位置。

二分法的基本思想就是：首先初步确定一个有根区间，再将有根区间分半，通过判断区间两边界及中点的函数值符号进一步缩小有根区间。通过多次迭代使有根区间缩小到充分小，将能够得到满足精度要求的解。其优点是方法简单，且对函数性质要求不高，只要函数在解区间连续，且只有单根即可。

针对毛坯排样问题，目标是要求出 2 个毛坯之间恰好没有重叠区域的最近距离。因 2 个毛坯之间的距离是连续变化的，而且沿某一个特定方向其最佳贴合位置唯一，所以可以采用二分法思想。



（a）绘制毛坯 1　（b）2 毛坯没有重叠区域

（c）2 毛坯有重叠区域，可通过模板值检测　（d）2 毛坯刚好完全贴合

图2　毛坯最佳贴合算法示意图

可以认为 2 个毛坯有重叠区域时函数值为负，否则为正。根据毛坯的尺寸，很容易确定一个有根区间，采用模板测试判断毛坯是否由重叠区域，不断缩小解区间，经过数次迭代，将能得到 2 个任意形状毛坯沿某一特定方向的最佳贴合距离。

本文基于 OpenGL 模板测试以及二分法实现了任意多边形的快速靠接算法，实现过程如下：

（1）初始化绘图区，启动模板测试，预估待排毛坯与已排毛坯相对偏移量 $\vec{v}_{min}$ 和 $\vec{v}_{max}$，设置二分法迭代阈值 σ。

（2）初始化绘图区模板值为 T_1。

（3）设置模板参考值为 T_2（$T_2>T_1$），设置模板测试函数为大于 T_1，通过模板测试则修改模板值为 T_2，绘制已排好零件毛坯，如图 2（a）所示。

（4）设置模板参考值为 T_3（$T_1<T_3<T_2$），设置模板测试函数为大于 T_1，未通过模板测试则将模板值修改为 T_3，若通过测试则模板值不变。相对已排毛坯偏移 $\vec{v}$ 绘制待排放毛坯，其中 $\vec{v}=(\vec{v}_{max}+\vec{v}_{min})/2$。

（5）读取缓冲区模板值，检查模板值，如果所有像素点的模板值都不等于 T_3，则说明待排放区域与已排放毛坯没有重叠区域，如图 2（b）所示，执行步骤 6；如果有像素点的模板值等于 T_3 则说明待排放毛坯与已排放毛坯之间有重叠区域，如图 2（c）所示，令 $\vec{v}_{min}=\vec{v}$，转到第 2 步。

（6）计算 $t=|\vec{v}_{max}-\vec{v}_{min}|$，若 $t<\sigma$ 则得到最优解 $\vec{v}$，如图 2（d）；否则 $\vec{v}_{max}=\vec{v}$，转到第 2 步。

算法分析

该算法时间复杂度为常数，编程易于实现；排样时完全忽略毛坯的复杂几何信息，能同时适用于矢量表示的图形和位图表示的图形；利用了计算机 GPU 的高速图形绘制能力，取代了一些采用 CPU 实现比较复杂的计算过程，能够快速计算任意形状的毛坯的最佳贴合位置。而且该方法也非常容易结合成熟的启发式排样算法，得到更准确的排样结果。

1 排样精度

由于计算机在屏幕上进行绘制的最小单元为 1 个像素，所以最佳贴合结果的精度为 1 个像素所表示的实际尺寸。绘制的时候，图形显示尺寸与实际尺寸比例越大，则排样精度越高。复合材料生产实际应用中，采用普通个人计算机上常用的 1440×900 分辨率的显示器，排样时的相对误差限在 0.15% 以内，能够满足实际生产需求。

2 二分法初始解区间及阈值的设置

初始解区间下限通常取 $\vec{v}_{min}=(0,0)$，上限需保证 2 个毛坯能完全分离，且不能让任意一个毛坯超出材料的范围，二分法迭代的阈值设置也必须大于 1 个像素所表示的实际尺寸。

3 裁剪搭边处理

实际裁剪过程中限于裁剪工艺可能会产生一定材料消耗，同时还要考虑到补偿定位误差等因素，排样时需保留一定的裁剪搭边。现有的排样优化算法多采用毛坯等距放大的方法来实现，这将又增加一定的计算量，这里我们采用 OpenGL 绘制时的线宽设置可以轻松解决该问题。

通常情况下绘制线段默认为 1 个像素线宽，考虑到裁剪搭边，绘制时可根据需要增加线宽，其作用等效于毛坯等距放大，但是不会增加额外计算量。OpenGL 支持的线宽为 1~10 个像素，当绘制时的线宽设置为 10 个像素时，对于 1.0m 幅宽的复合材料，全屏幕排样时单个毛坯实际尺寸最大将能够等距扩大 1cm，2 毛坯之间的裁剪搭边实际尺寸最大将达到 2cm，能够满足裁剪工艺需求。排样时可根据材料属性以及裁剪工艺设置不同的线宽从而得到合适的裁剪搭边值。

仿真实例

BL 排放策略 [6-7] 是自动排样系统中最常用的排放策略，其基本思想是在板料排放时，待排放的零件毛坯应尽量排放在原材料的最左最下区域。本文采用了基于 OpenGL 的模板测试方法结合 BL 排放策略，实现

了复合材料下料排样系统。

图 3 为一种曲线轮廓的复杂毛坯排样图，该毛坯轮廓线由 754 条线段围成，与其包络矩形排样结果（图 4）相比，材料利用率提升了近 20%。

与基于 NFP 的排样算法相比，本文的方法具有较高的运算效率。无论对于由 754 条线段围成的凸多边形（图 3）还是由 1542 条线段围成的凹多边形（图 5），都能快速得到满意的排样结果。任意 2 毛坯的一次靠接运算都在 50ms 以内，不会因为毛坯边数的增加而增加；也不会因为排样的进行，而需要多次轮廓线合并运算。有效避免了 NFP 方法解决优化排样问题时需要对凹多边形进行凸化分割，及需要对已排零件进行的轮廓线合并。

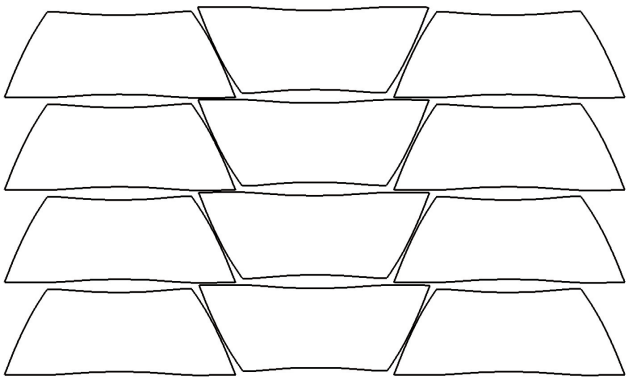


图3　复杂毛坯直接排样结果

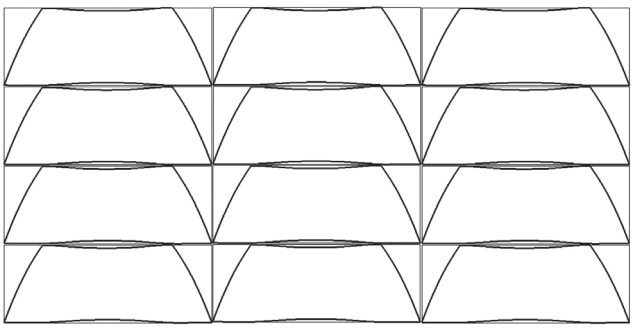


图4　包络矩形排样结果

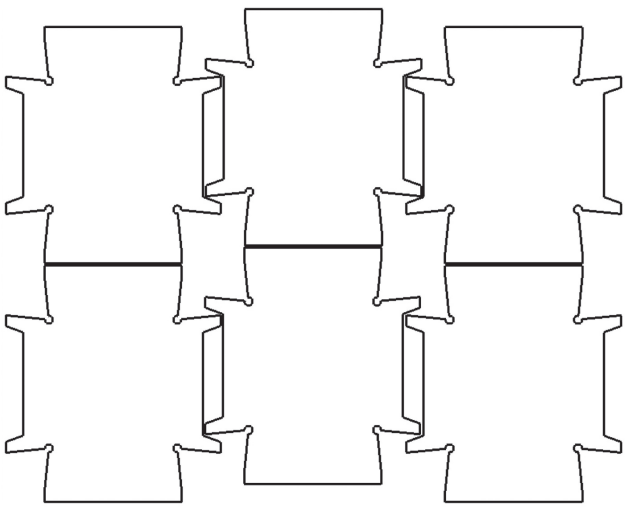


图5　复杂凹多边形排样结果

结　论

本文针对复合材料数字化制造中的复杂形状毛坯优化排样问题作了一定的研究，提出了利用 OpenGL 中的模板测试技术结合二分法思想求解任意形状毛坯的最佳贴合问题，并通过了试验验证。得出以下结论：

（1）该方法能够对任意形状的毛坯料直接进行排样，与包络矩形排样算法相比提高了材料利用率。

（2）与基于 NFP 的靠接算法相比，不需要对凹多边形进行的凸化分割，也不需要对已排毛坯的轮廓线进行合并，减少了复杂的计算过程，毛坯最佳贴合算法时间复杂度降为常数。

（3）可通过增加绘制线宽的方式保留足够的裁剪搭边，不增加额外计算量而起到毛坯等距放大同样的效果。

参 考 文 献

[1] 沈军，谢怀勤．先进复合材料在航空航天领域的研发与应用．材料科学与工艺，2008(5): 737-740.

[2] 白瑞斌．临界多边形法在二维不规则零件排样中的研究与实现 [D]. 西安：西北工业大学，2002.

[3] Burke E K, Hellier R S R, Kendall G, et al. Complete and robust no-fit polygon generation for the irregular stock cutting problem. European journal of operational research , 2007, 179(1):27-49.

[4] 张德福，陈竞驰，刘永凯，等．用于二维不规则排样的离散临界多边形模型．软件学报，2009,20(6):123-132.

[5] 宋亚男，叶家玮，邓飞其，等．不规则图形排样系统中靠接算法比较研究．计算机工程，2004, 30(19): 7-9.

[6] Dowsland K A, Vaid S, Dowsland W B. An algorithm for polygon placement using a bottom-left strategy. European journal of operational research, 2002, 141(2): 371-381.

[7] Jiang X B, Lü X Q, Liu C C. Lowest-level left align best-fit algorithm for the 2D rectangular strip packing problem. Journal of software, 2009, 20(6): 1528-1538.

（责编　赤非）