

考虑桥连接的钣金切割件加工路径优化方法

张文斌¹, 廖小平¹, 马俊燕¹, 鲁娟²

(1. 广西大学 机械工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 北部湾大学 机械与船舶海洋工程学院, 广西 钦州 535011)

摘要: 针对包含桥连接的钣金切割件加工路径问题, 提出基于旅行商问题模型的钣金件切割路径优化方法, 并确定了该方法下桥连接的定位。此方法针对钣金排样图, 将轮廓基于图元特征拆分成 N_i 段子轮廓段加工图元, 以遍历所有子轮廓段为目标规划切割路径, 采用改进的蚁群算法获得包含桥连接定位点的切割路径, 最后依据桥连接定位点确定全体桥连接位置。对排样好的钣金切割件进行仿真验证, 并将含桥连接的传统广义旅行商问题切割方法与相关文献方法进行对比, 表明了该方法能够有效地减少切割空程路径及切割过程中的启停次数, 提高了加工效率。

关键词: 钣金切割; 切割路径优化; 桥连接; 旅行者问题; 蚁群算法

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.009

中图分类号: TP391; TH164 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0066-06

Process path optimization method on sheet metal cutting parts considered bridge connection

Zhang Wenbin¹, Liao Xiaoping¹, Ma Junyan¹, Lu Juan²

(1. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Department of Mechanical and Marine Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: For the process path problem of sheet metal cutting parts including bridge connection, a cutting path optimization method for sheet metal parts based on the traveling salesman problem model was proposed, and the location of bridge connection under this method was determined. Then, for the sheet metal layout diagram, the contour was split into processing graphic elements of N_i sub-contour segments based on graphic element features, and the cutting path was planned with the goal of traversing all sub-contour segments. Furthermore, the cutting path including bridge connection positioning points was obtained by the improved ant colony algorithm, and the overall bridge connection positions were determined based on the bridge connection positioning points. Finally, the simulation verification of the well-arranged sheet metal cutting parts was tested, and the traditional generalized traveling salesman problem cutting method with bridge connection was compared with the related literature methods. The results show that this method can effectively reduce the cutting empty path and the number of starts and stops during the cutting process, which improving the processing efficiency.

Key words: sheet metal cutting; cutting path optimization; bridge connection; traveling salesman problem; ant colony algorithm

在钣金切割中, 在工件轮廓上会设置微小的未切断部分, 形成一定尺寸的连接点, 称为桥连接或微连接 (Micro Joint) (后统称为桥连接), 为零件提供支撑, 防止在加工过程中零件发生位移或翻转从而对加工造成不利影响。因此, 寻求一种考虑桥连接的钣金切割路径优化方法, 缩短切割过程的空

程距离, 并设置合理的桥连接位置, 对减少切割时间和提高加工效率具有重要意义。

目前, 国内外学者对钣金数控加工路径优化已经做了大量研究, 优化方法集中在智能算法上, 例如: 侯普良等^[1]使用最近邻插入算法对传统蚁群算法进行了改进, 使迭代次数减少约 30%, 缩短了激光加工; Eapen N A 等^[2]利用部分切割方法 (Partial Cutting Approach) 解决了切割路径确定问题, 构建了一种时间复杂度为 $O(n \log n)$ 的 MASTRI 算法 (其中 n 为所有多边形顶点的总数), 所得到的切割路径能保证在刀具最佳行程距离的 $3/2$ 范围内; Reginald D 等^[3]使用分区和树状图表示刀具路径, 并提出了一种由 dmond-Liu 算法和 Lin-Kernighan 算

收稿日期: 2022-06-20; 修订日期: 2022-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52165062); 广西自然科学基金重点项目 (2020JJD160004)

作者简介: 张文斌 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2411252636@qq.com

通信作者: 鲁娟 (1988-), 女, 博士, 副教授

E-mail: ljuan3623366@163.com

法组成的混合分区树方法,使生成刀具路径的时间能够在构造启发式的基础上平均提高 4.2%,最大提高了 11.1%;刘伟等^[4]提出了基于广义旅行商问题 (Generalized Traveling Salesman Problem, GTSP) 和双向蚁群算法的激光切割工艺路径优化方法,与传统蚁群算法规划的切割路径相比,双向蚁群算法规划的切割路径的空行路程减少了 16.44%、切割时间减少了 3.18%;刘山和等^[5]将路径优化问题归纳为广义旅行商问题,提出了利用遗传算法来初始化蚁群初期信息素分布,形成遗传蚁群混合算法,取得了优化的切割顺序。另外,在根据钣金切割工艺特点对算法做出针对性改进方面也有相关研究,例如:宋磊等^[6]考虑了激光加工引起的板材升温,提出了基于双染色体遗传算法的切割路径规划方法,有效地避免了“打刀”问题,降低了板材加工时的最高温度;张青锋等^[7]按零件排样图中的零件大小,分别采用遗传算法和最近插入法生成切割顺序,获得了较短的切割路径,提高了切割效率;陈婷等^[8]提出了基于交叉切割的零件切割约束规则,将钣金切割问题转化为零件轮廓线段顺序选择问题,有效地提高了钣金件数控激光切割的路径优化效果,但所提出的算法使得线段集合扩展,扩大了问题的规模,降低了算法效率;Kandasamy Vijay 等^[9]依据质心及角度对钣金件的桥连接定位点进行定位后,采用启发式遗传算法对激光切割路径进行了规划,但是,其以桥连接点分割轮廓段规划路径并未利

用轮廓信息,算法仍然存在改进空间。

分析上述现状可知,针对钣金切割路径优化问题,将桥连接考虑到切割路径中的研究很少。因此,为合理地确定桥连接定位,并提高含桥连接的钣金切割效率,本文提出一种基于子轮廓段的旅行商问题 (Traveling Salesman Problem, TSP) 模型的钣金切割路径优化方法,结合轮廓信息对蚁群算法进行改进,利用得到的轮廓跳跃点信息对桥连接进行定位,并基于仿真实验验证了本文方法的有效性。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

针对不考虑桥连接的钣金切割,其路径是加工完一个封闭轮廓再转入下一个封闭轮廓进行加工,路径规划时只需考虑封闭轮廓之间的启停点路径优化问题,忽略加工生成桥连接的成本,属于 GTSP^[10],如图 1a 所示,其中粗线为封闭轮廓启停点的路径。本文考虑桥连接的钣金切割,对钣金件共设置 K 个桥连接,形成 K 段子轮廓段,切割路径是加工完一段子轮廓再转入下一段子轮廓进行加工,桥连接均可作为子轮廓切割时的启停点。其路径规划实质为子轮廓之间的启停点路径优化,确定路径后依据子轮廓段启停点确定最终的桥连接位置,属于不对称的旅行商问题,如图 1b 所示,其中粗线为各子轮廓段启停点的路径。

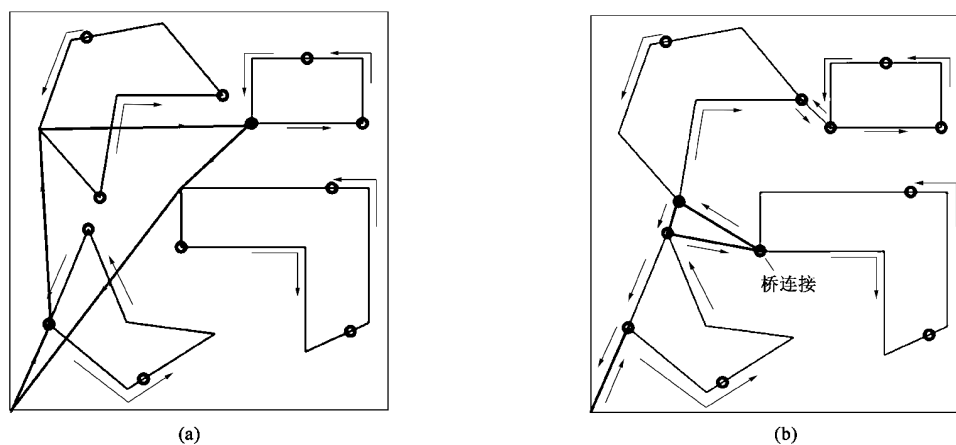


图1 钣金切割路径

(a) 传统 GTSP 模型切割路径 (b) 本文方法的切割路径

Fig. 1 Sheet metal cutting paths

(a) Cutting path of traditional GTSP model (b) Cutting path of this paper method

对比图 1a 和图 1b 可知,钣金切割路径中空程路径和启停位置均会产生额外加工成本,其切割过程加工时间 t 的组成如式 (1) 所示:

$$\min(t) = t_{\text{切割}} + N_1 \cdot t_{\text{桥}} + N_2 \cdot t_{\text{跳跃}} + t_{\text{空程}} = t_{\text{切割}} + N \cdot t_{\text{启停}} + t_{\text{空程}} \quad (1)$$

式中: $t_{\text{切割}}$ 为钣金件切割时间; $t_{\text{桥}}$ 为桥连接导致的切

割启停时间; $t_{\text{跳跃}}$ 为每次轮廓件跳跃空程移动导致的刀具启停时间; $t_{\text{空程}}$ 为空程移动时间; $t_{\text{启停}}$ 为切割启停时间 (即一次抬起和放下的时间); N_1 为桥连接时产生的切割启停次数; N_2 为空程移动时的切割启停次数; N 为切割过程总启停次数。

由于切割各钣金件本身的时间是固定的, 切割过程的启停时间由桥连接数量及子轮廓段间的转移次数决定, 因此, 优化切割路径的实质为减少启停次数和缩短空程移动时间。

1.2 基于轮廓段的不对称 TSP 模型

为优化钣金切割路径, 本文借助 TSP 模型进行

建模, 并改进蚁群算法进行模型求解, 其具体过程为: 首先在封闭图形中, 假定每个图元端点均为潜在的桥连接点, 将轮廓分割为 K 段子轮廓段^[11-12], 并且预定义轮廓加工方向为逆时针, 确定每个子轮廓段的起终点, 如图 2a 所示, 其中, $L1 \sim L5$ 为基于图元拆分的 5 段子轮廓段; 然后, 将子轮廓段等价于城市, 建立以遍历所有子轮廓段为目标的不对称 TSP 最短路径模型, 利用改进蚁群算法求解模型获得最短路径; 最后, 以生成的路径中的轮廓跳跃点 (图 2b) 为桥连接定位点, 确定各钣金零件最终的桥连接位置, 并合并各子轮廓段形成 K 段连续加工轮廓段。

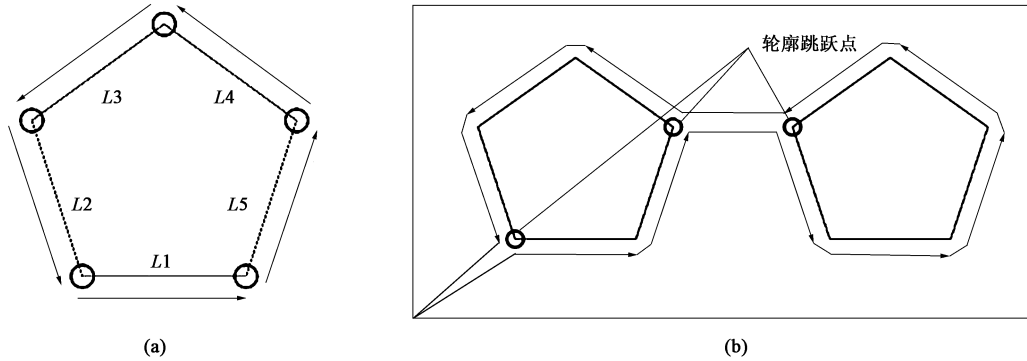


图 2 图元拆分及图元 TSP 切割路径
(a) 子轮廓段及其方向 (b) 路径规划后的轮廓跳跃点

Fig. 2 Element split and TSP cutting path of element

(a) Sub-contour segment and its orientation (b) Contour jumping points after path planning

传统蚁群算法以点为研究对象, 其城市距离矩阵是对称的, 而轮廓段 TSP 模型基于子轮廓段结构, 形成非对称的子轮廓段距离矩阵, 将子轮廓段作为旅行商问题中的城市, 城市之间的距离为上一子轮廓段终点到下一子轮廓段起点的距离, 以访问所有子轮廓段 (城市) 为目标, 找到一条可遍历各子轮廓段的 Hamilton 回路。对于包含 m 种钣金件的排样图, 其封闭轮廓集合为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_m\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, 封闭轮廓 c_i 中包含有 N_i 个子轮廓段, 该排样图子轮廓段总数 $K = \sum N_i$, 切割过程的空程移动距离 $L_{\text{空}}$ (目标函数) 为:

$$\begin{cases} \min(L_{\text{空}}) = s_0 + s_j + s_K + M \times s_{\text{桥}} \\ s_j = \sum_{j=1}^{K-1} \text{Dis}(P_j, P_{j+1}) \\ s_0 = \text{Dis}(O, P_1) \\ s_K = \text{Dis}(O, P_K) \\ s_{\text{桥}} \approx 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: s_0 为机床原点 O 至第 1 个子轮廓段起点 P_1 的距离; s_j 为子轮廓段 P_j 终点与子轮廓段 P_{j+1} 之间转

移时的距离; s_K 为最后一个轮廓段 P_K 端点到机床原点 O 的距离; M 为桥连接数量; $s_{\text{桥}}$ 为每个桥连接所需要的空程移动距离, 虽然桥连接导致的空程移动距离极短可忽略不计, 但所导致的切割启停时间却不能忽略; $\text{Dis}(P_j, P_{j+1})$ 为子轮廓段 P_j 终点与子轮廓段 P_{j+1} 起点的距离, $j = 1, 2, \dots, k-1$, 其他类似。

钣金件的桥连接点采用均布方式, 其数量大于或等于 3。这样的桥连接定位规则可合并部分桥连接产生的启停次数与空程移动的启停次数, 减少切割过程中的总启停次数。当考虑原点且每种钣金件均仅具有 3 个桥连接位置时, 能够保证启停次数 $N = 3m + 1$, 而采用随机选择桥连接位置的方法会使得启停次数 N 在区间 $[3m + 1, 4m + 1]$ 内。

2 轮廓段蚁群算法

2.1 算法改进

本文利用了图形轮廓信息对蚁群算法进行了一定改进。为了避免轮廓之间重复无意义的跳出, 采用双重禁忌表 (子轮廓段选择禁忌表 $allowed_pr$,

轮廓选择禁忌表 $allowed_co$) 共同作用于子轮廓段候选集合, 增加轮廓间跳跃点的记忆性。如果在未完全遍历所在封闭轮廓中所有子轮廓段便跳出 (如图3中封闭图形2中的 $P2$ 点), 则在确定下一子轮廓段候选集合时只可以选择未经过的封闭轮廓上的子轮廓段 (即封闭轮廓3和封闭轮廓4上的子轮廓段)。若此时跳跃返回封闭轮廓1, 由于封闭轮廓2上仍然存在未遍历子轮廓段, 后续还需返回封闭图形2, 从而产生轮廓间的无效跳跃。通过采用双重禁忌表方法, 可以避免产生轮廓间无效跳跃, 提高解的质量, 加速蚁群系统的收敛。

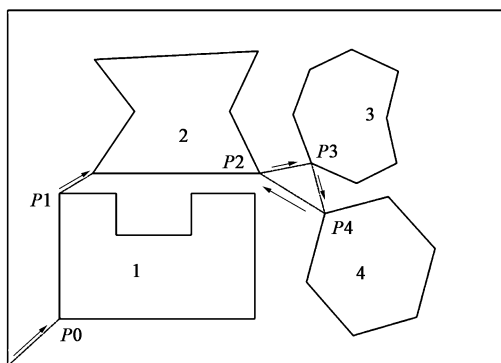


图3 轮廓切入点选择

Fig. 3 Selection of contour entry point

2.2 算法步骤

根据1.2节构建的轮廓段TSP模型, 制定基于改进蚁群算法的钣金切割路径优化流程。

Step 1: 基于dxf文件获取子轮廓段信息, 整理子轮廓段信息, 确定子轮廓段轮廓及各子轮廓段的起点和终点。

Step 2: 初始化蚁群算法, 设置超参数, 最大迭代次数 $T_{\max} = 300$, 蚂蚁数量 $X = 20$, 子轮廓段城市数

量 Y , 封闭轮廓数量 N_{co} , 信息素与启发式因子相对重要度 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 2$; 信息素蒸发率 $\rho = 0.7$, 信息素矩阵 $Info_{N \times N}$, 子轮廓段可选择禁忌表 $allowed_pr_{X \times Y}$, 轮廓可选禁忌表 $allowed_co_{X \times N_{co}}$, 迭代可选城市禁忌表 $allowed_city_{X \times Y}$ 。

Step 3: 进行第 T 次迭代, 各蚂蚁随机选择初始起点子轮廓段城市, 禁忌表更新。

Step 4: 各蚂蚁选择根据可选禁忌表, 得到子轮廓段候选集合, 依据启发式信息和信息素信息计算各子轮廓段城市转移概率, 并采用轮盘赌算法得到下一子轮廓段城市。

Step 5: 更新禁忌表, 判断是否达到遍历完全条件 $all\{allowed_pr = 0\}$, 若满足则执行 Step 6 动作, 否则返回 Step 4。

Step 6: 计算各蚂蚁的路程, 更新最优解, 更新信息素矩阵。

Step 7: 判断是否达到最大迭代次数 T_{\max} , 若达到, 执行 Step 8; 否则, 迭代次数 T 加1, 返回 Step 3。

Step 8: 根据所得到的最优路径, 依据均匀性条件确定桥连接数量和位置。

Step 9: 输出优化结果。

3 算例验证及分析

在 Windows Win10, CPU 2.90GHz, 8G RAM, python3.8 开发环境下对本文所提方法的可行性和有效性进行验证。结合实际情况, 考虑在一般情况下大型钣金件主要依靠底部支撑条支撑, 桥连接只起到限制移动的约束作用, 因此, 本文对每种钣金件均设置3个桥连接点。

图4为仿真路径规划对比方案。其中, 图4a为

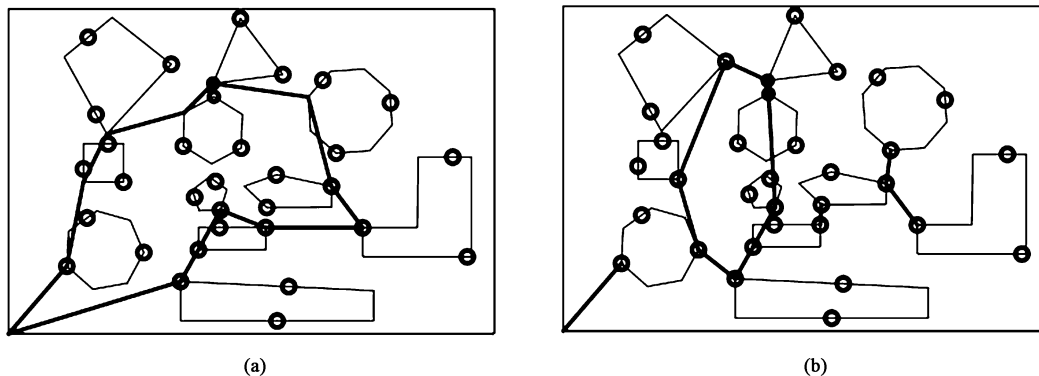


图4 钣金切割路径比较

(a) 基于GTSP模型的切割路径 (b) 本文方法得到的切割路径

Fig. 4 Comparison of sheet metal cutting paths

(a) Cutting path based on GTSP model (b) Cutting path obtained by this paper method

传统方式基于广义旅行商问题（GTSP）模型构建的蚁群算法得到的切割路径和随机选择的桥连接点；图 4b 为基于本文所提出的轮廓段 TSP 模型构建的蚁群算法得到的切割路径和桥连接点，对应的空程距离长度及启停次数如表 1 所示。可以看出，轮廓段 TSP 模型构建的蚁群算法规划出的切割路径相比较传统 GTSP 模型构建的蚁群算法所规划出的路径轮廓空行程减少 35 mm，减少了约 11%，启停次数也减少了 4 次。另外，基于本文方法确定的切割路径中的空程轮廓跳跃点均为桥连接点。

为进一步对比本文方法的有效性，与文献 [9] 中的钣金排样图进行对比，结果见图 5a 和图 5b，

表 1 钣金件排样图切割路径规划

Table 1 Cutting path planning of layout drawing for sheet metal parts

方法	传统 GTSP 模型	本文方法
空程距离/mm	307.73	272.97
切割过程启停次数	38	34

对应的空程距离及切割过程启停次数如表 2 所示。图 5b 为根据文献 [9] 提出的算法得到的切割路径和桥连接位置，其中图 5b 数据在文献 [9] 未给出。分析图 5 可知，基于本文方法求得的空程路径明显少于文献 [9] 获得的空程路径。

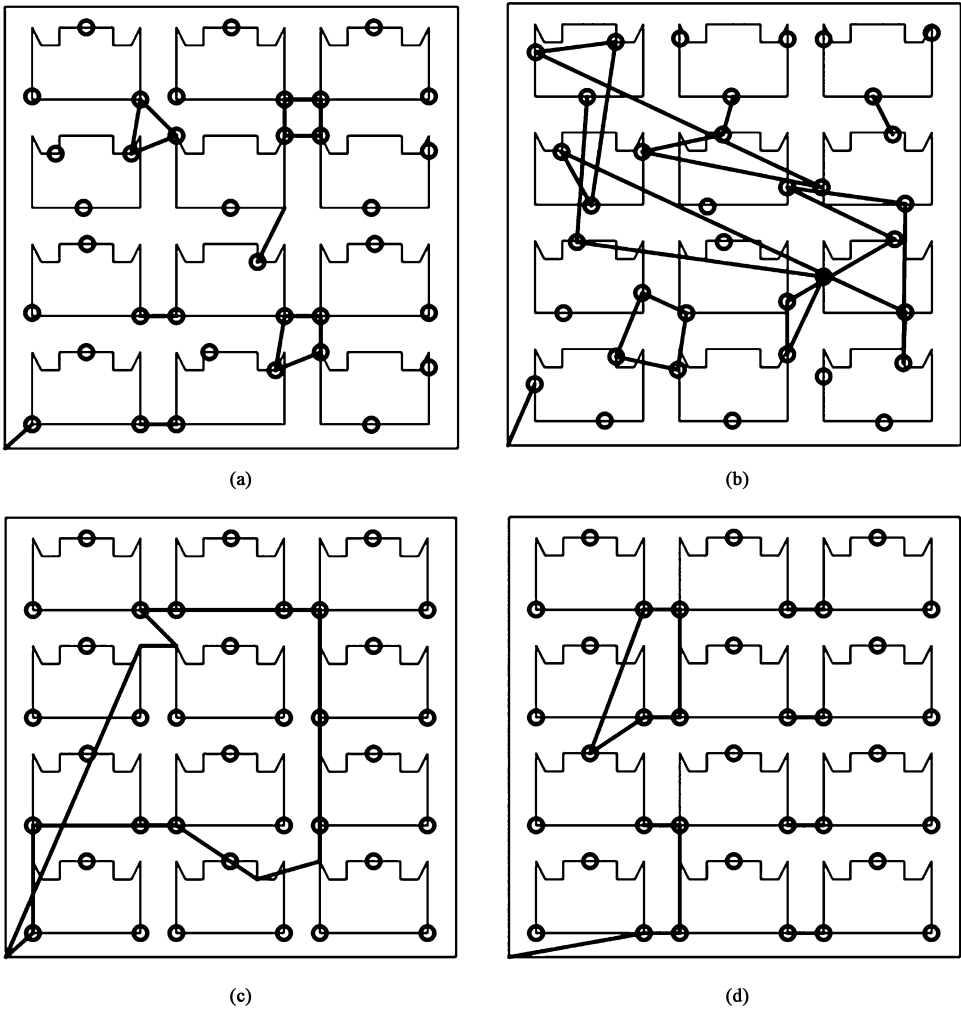


图 5 同一钣金件重复排样时的切割方法

(a) 本文方法的路径和桥连接位置 (b) 文献 [9] 给出的路径和桥连接位置
(c) 固定桥连接下 GTSP 模型得到的切割路径 (d) 固定桥连接下本文方法得到的切割路径

Fig. 5 Cutting methods of repeated layout for the same sheet metal

(a) Paths and bridge connection positions obtained by this paper method (b) Paths and bridge connection locations given in literature [9]
(c) Cutting paths of GTSP model under fixed bridge connection (d) Cutting paths obtained by this paper method under fixed bridge connection

在钣金切割作业中，大量生产的零件往往是通 过在板材上对同一零件重复排样再加工得到的，此

表 2 重复排样的钣金件的切割路径规划

Table 2 Cutting path planning of repeated layout sheet metal parts

方法	本文方法	固定桥连接下 GTSP 方法	固定桥连接下本文方法
空程距离/mm	945.76	1575.11	1432.95
切割过程启停次数	37	39	37

时可能要求零件具有相同的桥连接位置以减少后期研磨或抛光的工作量^[9]。因此，在同一图案的排样图中，对于固定的桥连接位置，对比了 GTSP 模型和本文方法得到的空程路径，其路径规划图见图 5c 和图 5d，空程距离及切割过程启停次数见表 2，本文方法获得的空程距离和切割过程启停次数均少于传统 GTSP 模型。

由此可知，在钣金切割工艺中采用基于轮廓段 TSP 模型进行路径规划和桥连接定位能够有效地减少空程距离及切割过程启停次数，验证了本文方法的有效性和优越性。

4 结论

(1) 针对考虑桥连接的钣金切割路径优化问题，提出了基于轮廓段 TSP 模型的钣金切割路径优化方法。基于待切割钣金零件的轮廓段信息，改进蚁群优化算法，生成优化的切割路径，并利用路径中的轮廓跳跃点确定各子轮廓段最终的桥连接位置。

(2) 针对排样好的不规则钣金件，将本文方法与传统 GTSP 模型加工方法进行对比，对比结果表明，本文方法规划的切割路径有效减少了接近 11% 的切割空程距离，规划的桥连接位置减少了 4 次切割过程抬刀次数；对于同一零件重复排样的板材，在不固定桥连接情况下，本文方法明显优于文献 [9] 方法，相比 GTSP 方法，也减少了 629.35 mm 的空程路径；在固定桥连接情况下，本文方法仍能获得更优的路径，结果与传统 GTSP 模型加工方法相比，减少了 142.16 mm 的空程路径和 2 次切割过程启停次数。

(3) 本文方法适用于钣金激光切割、电火花切割、水射流等多种切割工艺，且可对现有 CAM 软件进行二次开发，以帮助生成接近最佳的切割轨迹并定位桥连接，具有良好的使用价值。

参考文献：

[1] 侯普良, 刘建群, 高伟强. 基于改进蚁群算法的激光切割加工路径优化研究 [J]. 机电工程, 2019, 36 (6): 653-657.
Hou P L, Liu J Q, Gao W Q. Optimization of laser cutting path

based on improved ant colony algorithm [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36 (6): 653-657.

[2] Eapen N A, Heckendorn R B. Cutting path optimization for an automatic cutter in polynomial time using a 3/2 approximation algorithm [J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2021, 113: 3667-3679.

[3] Reginald D, Pieter V, Dirk C, et al. An improvement heuristic framework for the laser cutting tool path problem [J]. International Journal of Production Research, 2015, 53 (6): 1761-1776.

[4] 刘伟, 刘志芳. 人工智能技术的激光超高精密加工路径优化研究 [J]. 激光杂志, 2022, 43 (12): 206-210.
Liu W, Liu Z F. Research on path optimization of ultra-high precision laser Machining using artificial intelligence technology [J]. Laser Journal, 2022, 43 (12): 206-210.

[5] 刘山和, 钱晓明, 楼佩煌, 等. 基于遗传蚁群混合算法的激光切割机床路径优化 [J]. 机械制造与自动化, 2016, 45 (6): 92-95.
Liu S H, Qian X M, Lou P H, et al. Path optimization of laser cutting based on combination of genetic algorithm and ant algorithm [J]. Machine Building & Automation, 2016, 45 (6): 92-95.

[6] 宋磊, 王欣欣, 刘晓彦, 等. 激光切割工艺路径的双染色体遗传算法优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 119-125.
Song L, Wang X X, Liu X Y, et al. Optimization of double-chromosome genetic algorithm for laser cutting technology path [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 119-125.

[7] 张青锋, 饶运清. 工艺约束下的激光切割路径优化算法设计 [J]. 机械设计与制造, 2014, (3): 34-36, 40.
Zhang Q F, Rao Y Q. A optimization algorithm of laser cutting path with process constrains [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014, (3): 34-36, 40.

[8] 陈婷, 余小平, 陈俊凤, 等. 基于平面不封闭图形切割的路径规划 [J]. 计算机与现代化, 2019, 288 (8): 39-43.
Chen T, Yu X P, Chen J F, et al. Path planning based on plane unclosed graphic cutting [J]. Computer and Modernization, 2019, 288 (8): 39-43.

[9] Kandasamy Vijay, Udhayakumar Saranya. Effective location of micro joints and generation of tool path using heuristic and genetic approach for cutting sheet metal parts [J]. International Journal of Material Forming, 2020, 13: 317-329.

[10] 王铮, 杨卫波, 王万良, 等. 基于量子进化算法的多轮廓路径优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (10): 2128-2135.
Wang Z, Yang W B, Wang W L, et al. Path optimization for multi-contour based on quantum evolutionary algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23 (10): 2128-2135.

[11] 陈婷, 余小平, 陈俊凤, 等. 基于平面不封闭图形切割的路径规划 [J]. 计算机与现代化, 2019, (8): 39-43.
Chen T, Yu X P, Chen J F, et al. Path planning based on plane unclosed graphic cutting [J]. Computer and Modernization, 2019, (8): 39-43.

[12] 程志华, 吕忻宇. 标准图元数控编程系统及其路径规划算法的研究与设计 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018, (10): 77-79, 84.
Cheng Z H, Lyu X Y. Research and design of the automatic numerical control programming system and its path planning algorithm [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018, (10): 77-79, 84.