文章编号：2095-2163(2022)09-0100-05　　中图分类号：TH164　　文献标志码：A

喷锡钢网曲线偏置方法研究

罗　铭[1,2]，李　贵[1,2,3]

（1 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室，武汉 430081；2 武汉科技大学 机械传动与制造过程湖北省重点实验室，武汉 430081；3 武汉科技大学 精密制造研究院，武汉 430081）

摘　要：喷锡钢网设计在喷锡钢网生产中尤为重要，是保证喷锡钢网功能与质量的关键，曲线偏置在喷锡钢网设计过程中占有很大的比重，但是目前缺乏简单有效的偏置算法应对喷锡钢网特殊的几何结构。本文基于有向图理论以及曲线重构思想，提出一种喷锡钢网曲线偏置方法。首先，基于喷锡钢网结构特点，提出了一种复合多段线偏置方法，并基于有向图理论解决了偏置过程中曲线自相交问题；其次，基于曲线重构思想提出了偏置曲线孤岛绕行方法，解决了偏置曲线与孤岛体结构的干涉问题，并进行了尖角处理；最后，将算法应用于实例，得到的偏置曲线无尖角与自相交点，且与孤岛结构无干涉情况，完全满足偏置要求。

关键词：喷锡钢网；曲线偏置；复合多段线；有向图；曲线重构；尖角处理

Research on the curve offset method of tin-sprayed steel mesh

LUO Ming[1,2], LI Gui[1,2,3]

(1 Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2 Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 3 Institute of Precision Manufacturing, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

【Abstract】The design of the tin-sprayed steel mesh is particularly important in the production of tin-sprayed stencils, and it is the key to ensuring the function and quality of the tin-sprayed stencils. Among them, the curve offset occupies a large proportion in the design process of the tin-sprayed steel mesh, but at present there is no simple and effective offset algorithm to deal with the special geometric structure of the tin-sprayed steel mesh. Therefore, based on the directed graph theory and the idea of curve reconstruction, this paper proposes a curve offset method for tin-sprayed steel mesh. Firstly, based on the structural characteristics of the tin-sprayed steel mesh, a composite polyline offset method is proposed, and based on the idea of directed graph theory, the problem of self-intersection of curves in the offset process is solved. Then based on the idea of curve reconstruction, an island detour method of offset curve is proposed which solves the problem of interference between offset curve and island structure, and sharp corners are also solved. Finally, by applying the algorithm to the example, the obtained bias curve has no sharp corners and self-intersection points, and no interference with the island structure, which fully meets the bias requirements.

【Key words】tin-sprayed steel mesh; curve offset; compound polyline; directed graph; curve reconstruction; sharp corner processing

0　引　言

随着通信技术的发展，合路器在通信系统中应用越来越广泛，如大型商场、地铁的信号覆盖等[1]。应用最多的是同轴腔体合路器，主要装载在腔体排腔结构中，主体结构包括腔体、与腔体相对拼装为一体的盖板以及装设于腔体上的公共端口[2]。合路器腔体结构如图 1 所示。加工腔体过程中，需要借助喷锡钢网对腔体表层喷锡。喷锡钢网的平面结构是通过基曲线经过多次偏置而来的，一般是由人工借助 CAD 软件偏置功能与剪切功能实现，有大量重复且容易出错的操作，设计效率低下。在基曲线偏置的过程中，偏置曲线很容易与其他结构发生干涉，对于该问题的处理，迄今为止还无法用软件加以实现。

对于曲线偏置问题，很多学者都进行了大量研究。Lee 等人[3]采用基曲线与二次贝塞尔曲线段的卷积来计算偏置曲线，可以有效避免偏置曲线自相交。Seong 等人[4]通过求解偏置曲线二次多项式方

基金项目：容桂科技计划项目(容桂经发(2017)27 号-8)。

作者简介：罗　铭(1996-)，男，硕士研究生，主要研究方向：机械产品二次开发；李　贵(1986-)，男，博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向：机械产品数字化、智能化设计技术及系统。

通讯作者：李　贵　　Email：leegui2030@wust.edu.cn

收稿日期：2022-02-25

程的零集，并借助数字步进方法提高了消除自相交的精度。朱洪军等人[5]通过检测偏置点的位置有效性对自相交点域进行消除。黄常标等人[6]基于轮廓线方程来求解偏置曲线，并通过轮廓线方向向量来消除干涉问题。万健等人[7]提出了一种基于区间算术和四叉树的算法来解决曲线自相交问题。朱虎等人[8]根据挤压工具运动轨迹，提出了基于 Sterolithography 模型的顶点偏置算法以及多边形边偏置算法。查光成等人[9]将加工件表面离散为 Sterolithography 模型，可以成功提取得到三角点坐标，进而通过偏置完成支撑体模型设计。朱亮等人[10]提出了一种软干涉检查方法，利用分割思想将实体包围盒空间划分成若干体积相同的空间格。洪庆飞等人[11]等人通过对自相交程度分析估量，采用一种有效的正则化方法来避免产生自相交的矢量图轮廓。李斌等人[12]提出了一种基于轴角的干涉判断方法，并基于人工势场法对机器人进行路径规划。

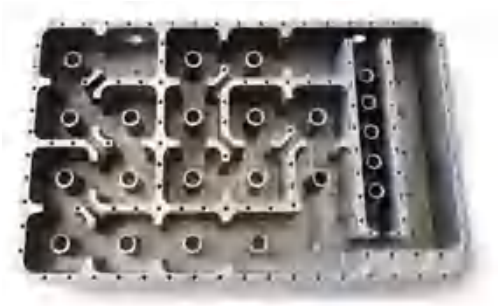


图 1　合路器腔体

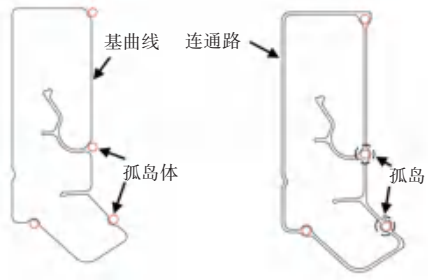
Fig. 1　Combiner cavity

上述研究并未考虑到异体结构在曲线偏置过程中的影响。本文通过分析喷锡钢网曲线偏置案例，针对偏置过程出现的一系列问题，基于图论以及曲线重构思想，提出一种复合多段线偏置算法，成功解决了复合多段线偏置过程效率低、且存在自相交的问题，并对偏置后孤岛体的绕行问题进行了自动化处理，提高了典型喷锡钢网结构设计的质量与效率。

1　喷锡钢网平面结构分析

喷锡钢网二维平面结构如图 2 所示。图 2(a)是孤岛体与基曲线组成的喷锡钢网基础构造体。经过一系列曲线偏置过程，连通路以及处于连通路内的孤岛体共同组成了典型的喷锡钢网结构，见图 2(b)。

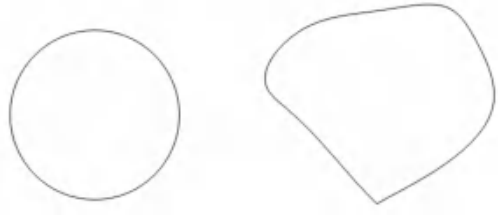
基曲线是由多个直线段与曲线片段组成的复合多段线，线段间由节点联接，且节点处左、右两侧一阶导相同。基曲线具有严格的方向定义，满足右手定则。孤岛体是连通域的一种，其边界长度不超过 10 mm，结构多样，可分为圆形孤岛体和异形孤岛体两大类。其中，圆形孤岛体为具有半径与圆心的圆，异形孤岛体则没有规定和限制，如图 3 所示。



(a) 基础构造体　　(b) 典型钢网结构

图 2　喷锡钢网二维平面结构

Fig. 2　Two-dimensional plane structure of tin-sprayed steel mesh



(a)圆形孤岛　　(b) 异形孤岛

图 3　孤岛分类

Fig. 3　Island classification

2　基于曲线偏置的孤岛绕行算法

2.1　曲线偏置方法

喷锡钢网边界由复合多段线组成，复合多段线是多个直线与曲线片段的组合体。采用常规方法对复合多段线进行偏置，首先需要对复合多段线进行离散；依据偏置方向与偏置距离，对离散点进行偏置；最后，通过曲线拟合技术对偏置点进行曲线拟合。但这种方法迭代次数高，效率低，曲线拟合后的边界实体与实际复合多段线偏置实体还存在一定误差。因此，本文提出了一种新的复合多段线偏置方法，详细过程如下：

(1)提取复合多段线的每一个节点信息。节点是子线段间的联接点，节点信息包括点坐标、凸度值和法线向量，其中凸度值控制着 2 点之间曲线弧度大小和方向，确定 2 点坐标和对应的凸度值即可唯一确定一段弧线。凸度值定义如图 4 所示，凸度值被定义为 1/4 的圆心角正切值，通过凸度即可计算圆心角、半径和圆心坐标等信息。

对于任意节点，当该节点凸度为 0 时，意味着该节点与相邻的下一节点之间由直线连接；否则，2 点之间由圆弧线段连接。依据节点信息，构建节点数

据结构,如公式(1)所示:

$$P_i = \{p_i, bugle, \boldsymbol{V}\} \tag{1}$$

其中, $bugle$ 表示凸度值,$\boldsymbol{V}$ 为法线单位向量。

将节点集作为离散点集 S,可大大减少偏置时的迭代次数。

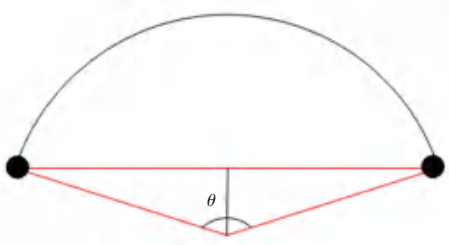


图 4 凸度值定义

Fig. 4 Bulge value definition

(2)遍历离散点集 S,以离散点中存储的法线方向向量 $\boldsymbol{V}$ 为偏置方向,根据偏置距离偏置离散点,获取偏置点集 O。构建偏置点数据结构,偏置点信息与对应的离散点除坐标信息不同外,其他均相同。

(3)依据偏置点集 O 构建偏置后的线段集 R。遍历偏置点集 O,对于其中任一偏置点 O_i,如果 O_i 的凸度值为 0,则连接 $O_i\ O_{i+1}$,作为偏置后的直线段,加入线段集 R;如果 O_i 的凸度值非零,则依据凸度值计算得到该圆弧段半径,从而依据点 O_i,O_{i+1} 与凸度值 $bugle$ 唯一确定一段圆弧,加入线段集 R。

(4)依据线段集 R 构建偏置后的复合多段线。

2.2 偏置曲线自相交的解决

偏置曲线自相交问题是典型的偏置问题。在曲率突变的区域极有可能出现自相交,如图 5 所示。对于这种现象,一般去除蓝色加粗部分的线段,保留其余部分。

(a) 偏置曲线自相交区域 (b) 去除自相交环后的偏置曲线

图 5 偏置曲线自相交

Fig. 5 Bias curve self-intersection

为了实现喷锡钢网偏置需求,本文提出了一种解决复合多段线自相交问题的解决方法,具体过程如下:

(1)遍历线段集 R,对于任意线段 R_i,分别求取 R_i 与其余线段的交点,并加入交点集 I。

(2) 对于点集 I 中任意一点 p,如果 p 为偏置点集 O 中的点,且点 p 为相邻线段所得交点,则删除该点。遍历焦点集 I,删除所有满足上述条件的点,剩余点即为自相交点。

(3) 依据偏置后的复合多段线方向与自相交点信息可以构建有向图 $G = \{V(G), E(G)\}$,以图 5(a)中偏置曲线自相交点为节点构建有向图如图 6 所示。图 6 中,顶点集 $V(G) = \{a, b, c, d\}$,由复合多段线的首尾两点与自相交点集构成,边集 $E(G) = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ 代表顶点集中 2 节点间的连接线段。

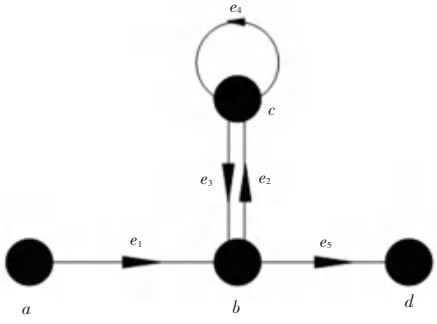


图 6 有向图模型

Fig. 6 Directed graph model

(4)环是顶点数与边数相等的图,从图 6 中可以看出,有向图 G 中存在 2 个环分别是 b, e_2, c, e_3 和 c, e_4,用消除有向图中环的方法来简化偏置曲线自相交问题。剔除 2 个环中的边 e_2, e_3, e_4,形成了 2 个连通分支,2 个连通分支的顶点集分别为 $\{a, b, d\}$ 和 $\{c\}$。剔除 c 这一连通分支后,有向图 G 为无重边和环的简单图,如图 7 所示。

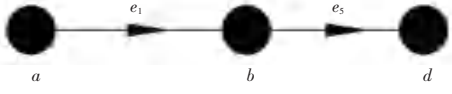


图 7 简单有向图

Fig. 7 Simple directed graph

(5)依据有向图理论简化了自相交消除过程,由于删除的是任意多段线片段,极有可能产生尖角。

2.3 孤岛绕行方法

对复合多段线偏置后,可能会出现孤岛结构与偏置曲线存在干涉的情况。对此拟展开研究分述如下。

(1)检测孤岛与偏置曲线的干涉区域。由于孤岛结构多变,不便于数据管理,本文借助包络矩形化简孤岛结构。计算孤岛包络矩形,将包络矩形外界作为异形孤岛的简化结构,这样孤岛结构就得到了统一表示。孤岛结构简化,如图 8 所示。

求取孤岛外接圆与偏置多段线的交点。由喷锡钢网结构可知,交点至多不超过 2 个。如果交点个数为 2 个,则表示孤岛与偏置曲线存在干涉情况。

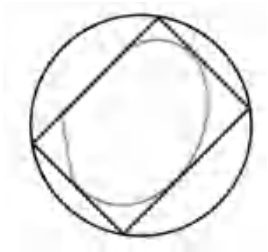


图 8　孤岛结构简化

Fig. 8　Simplified island structure

(2)对孤岛实体包络矩形外接圆进行偏置,偏置距离取外接圆到基曲线的最短距离。由于基曲线为复合多段线,获取复合多段线函数表达式是十分困难的。因此可以节选出孤岛附近的线段,分别计算附近线段与孤岛圆的距离,得到孤岛圆与基曲线的最短距离。计算线段与孤岛圆距离的数学公式见如下:

$$d_i = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (f_i(x_1) - g(x_2))^2} \qquad (2)$$

其中,x_1 为线段上一点的横坐标;$f_i(x_1)$ 为 x_1 对应的纵坐标值;x_2 为孤岛外接圆上一点的横坐标;$g_i(x_2)$ 为 x_2 对应的纵坐标值。

(3)偏置孤岛外接圆后,去除掉偏置圆内的偏置曲线段和偏置方向上的偏置圆片段,偏置曲线孤岛绕行如图 9 所示。由图 9 可以看出,剪切后原本平滑的线段出现了多处尖角,不符合喷锡钢网复合多段线的连续性要求,因此,需要进一步对偏置曲线进行处理,消除尖角。

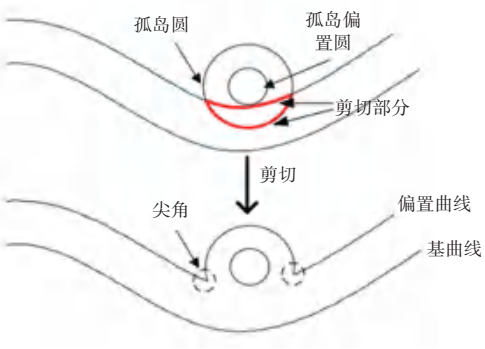


图 9　偏置曲线孤岛绕行

Fig. 9　Offset curve island detour

这里,研究给出了消除尖角的过程,详述如下:

(1)合并剪切后的偏置曲线与尖角部分,组成重构后的偏置曲线。并对偏置曲线按照等弧长离散,得到离散点集 $\{p_0, p_1, p_2, \cdots, p_n\}$。

(2)遍历离散点集,计算任意相邻两点切向向量夹角 α,依据公式(3)对偏置点集进行筛选:

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{O_i} \cdot \overrightarrow{O_{i+1}}}{|\overrightarrow{O_i}|\,|\overrightarrow{O_{i+1}}|}\right) \qquad (3)$$

当任意离散点所对应的切向向量夹角 α_i 大于角度阈值时,则需要删除点 P_i 与 P_{i+1},继续计算 P_{i-1} 和 P_{i+2} 对应的切向转角,否则,继续检测 α_{i+1}。

(3)将筛选后的离散点集作为样本点,重新构建偏置曲线。依据此方法将转角过大的部分消除,解决对偏置曲线尖角问题。尖角消除过程如图 10 所示。

(a) 转角过大的坏点形成了尖角　(b) 消除坏点后曲线拟合

图 10　尖角消除

Fig. 10　Elimination of sharp corners

3　实例讨论

通过实例从曲线偏置质量和效率两个方面来验证本偏置算法的性能。现有待偏置的复合多段线,长度为 307.99 mm,节点数为 4 个,其中直线段数量为 1,曲线段数量为 2,偏置距离 20 mm,圆形孤岛与异形孤岛各一个。

首先对复合多段线进行偏置,并对孤岛体定位,如图 11 所示。

图 11　复合多段线偏置与孤岛定位

Fig. 11　Compound polyline offset and island location

然后,依据曲线重构思想,对偏置曲线和孤岛外接圆进行重组,形成新的绕岛偏置曲线,如图 12 所示。

图 12　偏置曲线几何重构

Fig. 12　Geometric reconstruction of the bias curve

最后,依据离散点切向矢量进行尖角处理,使得偏置曲线更为平顺美观,尖角处理与曲线拟合如图 13 所示。

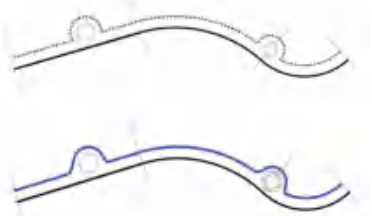


图 13　尖角处理与曲线拟合

Fig. 13　Sharp corners processing and curve fitting

偏置曲线没有自相交和偏置尖角,同时在孤岛体处也能很好地进行绕行,偏置曲线的过渡较为自然,没有扭曲。综上所述,本文算法能够得到较为理想的孤岛绕行的偏置曲线,可应用于喷锡钢网曲线偏置的实际设计。

4 结束语

总结了喷锡钢网设计过程中的难点与问题。同时,对喷锡钢网的平面几何结构进行了分析与解释。针对偏置曲线效率低的问题,提出了复合多段线偏置方法,并依据有向图思想,解决了偏置曲线的自相交问题;针对偏置曲线与孤岛干涉问题,提出了偏置曲线孤岛绕行方法,并基于切向矢量角度计算方法,消除了偏置曲线的尖角问题;最后,通过将算法应用于实例,所得到的偏置曲线无尖角与自相交点,且与孤岛结构无干涉情况,完全满足偏置要求。采用本方法对喷锡钢网进行结构设计,能够大大减少人工操作时间与工作量,是辅助喷锡钢网设计的一个有效的工具。

参考文献

[1] 封建华. 多频同轴腔体合路器的小型化设计 [J]. 移动通信, 2016, 40(19):60-65.

[2] 潘宁, 叶强, 陈其豪. 基于公共腔的新型同轴腔体双频合路器研制 [J]. 电子元件与材料, 2014, 33(09):75-78.

[3] LEE I K, KIM M S, ELBER G. Planar curve offset based on circle approximation [J]. Computer-Aided Design, 1996, 28: 617-630.

[4] SEONG J K, ELBER G, KIM M S. Trimming local and global self-intersections in offset curves/surfaces using distance maps [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(3):183-193.

[5] 朱洪军, 张亚. 基于位置有效性检测的环形刀路偏置算法研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013 (03):93-95,99.

[6] 黄常标, 江开勇, 林俊义. 平面轮廓线的偏置及干涉消除算法研究 [J]. 机电工程技术, 2007, 36(10):75-77,90.

[7] 万健, 徐小媚, 叶晓华. 基于区间算术和四叉树消除偏置曲线自交算法的实现 [J]. 计算机应用, 2005, 25(08):1942-1943.

[8] 朱虎, 鞠晋, 张伟. 面向数控渐进成形鼓包问题的成形轨迹生成与规划 [J]. 锻压技术, 2015, 40(05):15-21.

[9] 查光成, 贾俐俐, 史晓帆, 等. 基于 STL 模型的渐进成形支撑体的离散化设计 [J]. 锻压技术, 2015, 40(12):155-159.

[10] 朱亮, 章志兵, 柳玉起, 等. 汽车覆盖件模具软干涉检查方法研究 [J]. 锻压技术, 2015, 40(05):38-42.

[11] 洪庆飞, 李亚娟, 邓重阳. 基于先验知识的矢量图轮廓优化 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2021, 41(03):58-61.

[12] 李斌, 杨豪中, 甘旭升, 等. 改进 PSO 算法融合人工势场法的工业机器人路径规划设计 [J]. 系统科学与数学, 2021, 41(04):939-952.

(上接第 99 页)

参考文献

[1] GABER M A, SAMIR A, GABER A, et al. 5G and satellite network convergence: Survey for opportunities, challenges and enabler technologies[J]// Proceedings of Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES). Giza, Egypt: IEEE, 2020: 366-373.

[2] MARZETTA T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590-3600.

[3] MA Shuai, XU E L, SALIMI A , et al. A novel pilot assignment scheme in massive MIMO networks [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(2): 262-265.

[4] OMID Y, MOHAMMAD S, SHAHABI M, et al. A new pilot assignment scheme for pilot decontamination of multi-cell massive MIMO systems [C]// Proceedings of Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Yazd, Iran: IEEE, 2019: 1481-1485.

[5] JANG M, PARK H, KWON Y, et al. Energy-efficient adaptation of pilot power, data power, and transmission rate for downlink multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6):2692 - 2698.

[6] LIU Pei, JIN Shi, JIANG Tao, et al. Pilot power allocation through user grouping in multi-cell massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(4): 1561-1574.

[7] SHEN Xiang, ZHANG Xiang, HUANG Yifan, et al. Reinforcement learning based decoding using internal reward for time delayed task in brain machine interfaces[C]// Proceedings of 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020: 3351-3354.

[8] SHIMOTAKAHARA K, ELSAYED M, HINZER K, et al. High reliability multi-agent Q-learning based scheduling for D2D microgrid communications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 74412-74421

[9] CAO Yanmei, ZHANG Guomei, LI Guobing, et al. A deep Q-network based-resource allocation scheme for massive MIMO-NOMA[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(5): 1544-1548.

[10] XU Ming, MAO Jingli, YU Cuibo. A comparative study of effect with hard and soft handoff on the cell coverage in CDMA cellular network [C]// 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010). Taiyuan: IEEE, 2010: V10-372-V10-376.

[11] SATYAL S, WEBER I, BASS L, et al. Rollback mechanisms for cloud management APIs using AI planning[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2020, 17(1): 148-161.