

基于图论和改进 Dijkstra 算法的 STEP – NC 复杂型腔最短刀具路径生成方法

张 禹, 李东升, 王志伟, 巩亚东
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对 STEP – NC(standard for the exchange of product data, STEP ; STEP – compliant numerical control, STEP – NC)复杂型腔的刀具路径生成问题,本文提出了一种基于图论和改进 Dijkstra 算法的 STEP – NC 复杂型腔最短刀具路径生成方法.在该方法中,首先根据走刀行距和基本元素的等距偏置,生成 STEP – NC 复杂型腔封闭等距环.然后,基于图论得到封闭等距环的赋权有向图.最后,利用改进的 Dijkstra 算法生成 STEP – NC 复杂型腔最短刀具路径.通过实例验证了所提出方法的可行性和有效性.

关 键 词: STEP – NC;复杂型腔;刀具路径规划;图论;改进 Dijkstra 算法

中图分类号: TH 166 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005 – 3026(2020)09 – 1285 – 07

Shortest Tool Path Generation Method for STEP-NC Complex Pockets Based on Graph Theory and Improved Dijkstra Algorithm

ZHANG Yu, LI Dong-sheng, WANG Zhi-wei, GONG Ya-dong
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: ZHANG Yu, E-mail: zy4097534@126.com)

Abstract: Given little research on the tool path generation method for STEP-NC (standard for the exchange of product data- compliant numerical control, STEP-NC) complex pockets, a method was proposed to generate the shortest tool path of STEP-NC complex pockets based on the graph theory and improved Dijkstra algorithm. In the method, the closed equidistant ring of STEP-NC complex pockets was firstly generated according to cutting spacing and basic element offset. Then, the weighted digraph of the closed equidistant ring was obtained based on the graph theory. Finally, the shortest tool path of STEP-NC complex pockets was generated by the improved Dijkstra algorithm. The feasibility and effectiveness of the proposed method were verified by a case.

Key words: STEP-NC; complex pocket; tool path planning; graph theory; improved Dijkstra algorithm

为了取代 ISO (international organization for standardization, ISO) 6983, 国际标准化组织 ISO 正在研究和制定一个面向对象的新型 NC 编程数据接口国际标准 STEP – NC^[1]. 该标准独立于机床, 能够提供零件加工所需的全部信息, 支撑零件设计和制造信息的双向流动, 支持零件加工 NURBS 插补, 为刀具路径规划的智能化提供了条件. 因此, 基于 STEP – NC 的刀具路径规划成为智能制造领域研究热点之一.

国内外学者对刀具路径规划进行了很多有意义的研究. Dhanik 等^[2] 基于快速行进方法实现刀具路径的生成; 王利智^[3] 采用“最大深度法”对刀具轨迹规划进行了研究; Manav 等^[4] 提出基于多准则优化的刀具路径规划方法; 王家斌等^[5] 提出

一种螺旋刀具路径生成方法. 上述方法虽然一定程度上解决了刀具路径规划问题, 但与 STEP-NC 不兼容. 在基于 STEP-NC 的刀具路径规划研究方面, Laguionie 等^[6] 基于轮廓平行铣和双向铣削策略, 提出一种用于 STEP-NC 简单制造特征加工的摆线铣削策略; Du 等^[7] 提出一种基于多智能体的 STEP-NC 制造特征刀具路径规划方法; Cuenca 等^[8] 从硬件角度出发, 提出一种精度高、鲁棒性强的 STEP-NC 制造特征刀具轨迹生成解决方案; Liang 等^[9] 开发一个与 STEP-NC 兼容的 CNC 系统, 该系统具有刀具路径规划、刀位点计算、刀具偏移和逆运动学变换的功能; 齐明^[10] 开发了用于电路板加工的 STEP-NC CAM 模块, 该模块采用基于像素的方法实现了 STEP-NC 制造特征刀具路径的生成; Ahmad 等^[11] 构建一种基于知识库的 STEP-NC 数控系统, 该系统能够自动规划 STEP-NC 制造特征的刀具路径.

综上所述, 虽然国内外学者对刀具路径规划进行了很多有意义的研究, 但是大多数研究或者

与 STEP-NC 不兼容, 或者主要集中在 STEP-NC 简单制造特征的刀具路径生成, 对于 STEP-NC 复杂型腔(带有岛屿的型腔)的刀具路径生成方法研究很少. 因此, 本文提出了一种基于图论和改进 Dijkstra 算法的 STEP-NC 复杂型腔最短刀具路径生成方法.

1 STEP-NC 数据模型

为了提供一种高级的产品数控数据描述的中性机制, 国际标准化组织 ISO 提出了一种新型的 NC 编程数据接口国际标准 STEP-NC^[12]. 如图 1 所示, STEP-NC 标准是以基于制造特征的方式描述加工对象, 描述加工的是什么, 而不是和 ISO 6983 一样描述怎么加工, 包含零件加工所需的全部信息, 而且支持设计信息和制造信息之间的双向流动, 支持 NURBS 插补, 这种结构化的数据模型可以清楚全面地描述工件的所有几何信息和工艺信息, 为刀具路径的自动生成提供了条件.

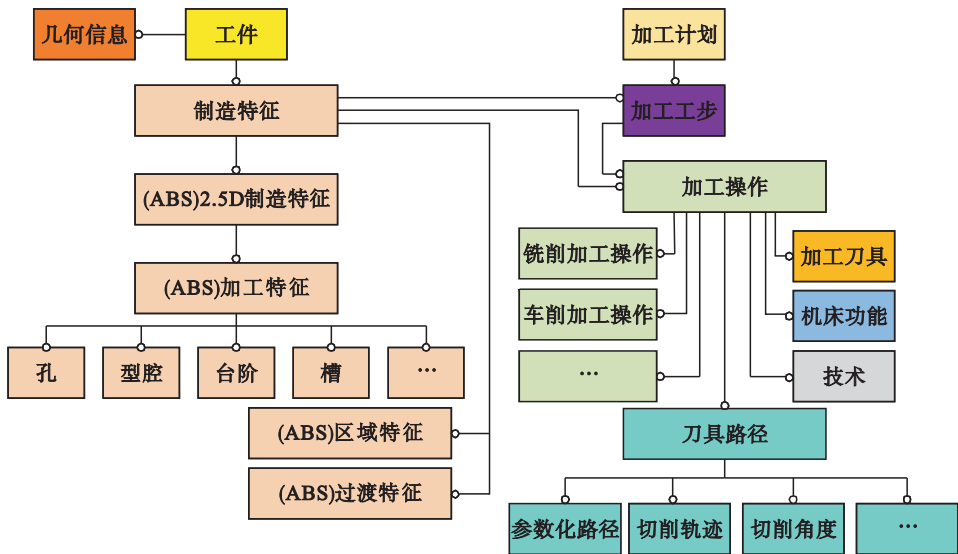


图 1 简化的 STEP-NC 数据模型
Fig. 1 Simplified STEP-NC data model

2 基于图论和改进 Dijkstra 算法的 STEP-NC 复杂型腔最短刀具路径生成

针对 STEP-NC 复杂型腔, 本文提出一种基于图论和改进 Dijkstra 算法的 STEP-NC 复杂型腔最短刀具路径生成方法. 该方法包括 STEP-NC 复杂型腔封闭等距环生成、基于图论的封闭等距环赋权有向图生成和基于改进 Dijkstra 算法的 STEP-NC 复杂型腔最短刀具路

径生成.

2.1 STEP-NC 复杂型腔封闭等距环生成

STEP-NC 复杂型腔封闭等距环的生成包括走刀行距计算、基本元素等距偏置和封闭等距环生成.

2.1.1 走刀行距计算

走刀行距的计算应在满足加工残留高度要求的情况下, 尽量减少加工时间, 其计算表达式为

$$d=2(R-r+\sqrt{h(2r-h)}). \quad (1)$$

式中: d 为走刀行距; R 为刀具半径; r 为刀具尖圆弧

半径; h 为残留高度。

2.1.2 基本元素等距偏置

复杂型腔的轮廓环由直线和圆弧基本元素组成,这些基本元素的等距偏置过程如下(本文规定型腔轮廓向内等距,岛屿轮廓向外等距):

1) 直线段等距偏置. 假设 $R(R_x, R_y)$ 和 $E(E_x, E_y)$ 分别为直线段的起点和终点矢量,则直线段的等距偏置法向矢量 N 为

$$N = \left(-\frac{E_y - R_y}{|E - R|}, \frac{E_x - R_x}{|E - R|} \right). \tag{2}$$

等距后的直线段起点矢量 a 和终点矢量 b 分别为

$$a = R \pm d \times N, \tag{3}$$

$$b = E \pm d \times N. \tag{4}$$

2) 圆弧段等距偏置. 假设 $C(C_x, C_y)$ 为圆弧的圆心, $R(R_x, R_y)$, $E(E_x, E_y)$ 分别为其起点和终点矢量,则圆弧段起点等距偏置法向矢量 N_s 和终点等距偏置法向矢量 N_e 分别为

$$N_s = \left(-\frac{R_x - C_x}{|R - C|}, \frac{R_y - C_y}{|R - C|} \right), \tag{5}$$

$$N_e = \left(-\frac{E_x - C_x}{|E - C|}, \frac{E_y - C_y}{|E - C|} \right). \tag{6}$$

等距后的圆弧段起点矢量 a 和终点矢量 b 分别为

$$a = R \pm d \times N_s, \tag{7}$$

$$b = E \pm d \times N_e. \tag{8}$$

2.1.3 封闭等距环生成

基本元素经过等距偏置后,相邻等距线之间可能出现相交或者分离. 为了生成1条连续的加工路径,相邻等距线之间需要进行过渡连接,即生成封闭等距环. 封闭等距环生成的基本方法是:轮廓在进行等距之后,若生成的等距线相交,则添加直线连接,如图2所示;若生成的等距线分离,则添加圆弧过渡,过渡圆弧的圆心是等距偏置前两直线的公共端点,半径等于走刀行距,圆弧与两直线相切,如图3所示。

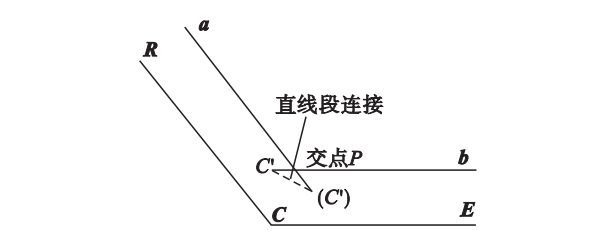


图2 等距线相交的过渡连接
Fig. 2 Transitional connection between isometric intersecting lines

2.2 基于图论的封闭等距环赋权有向图生成

为了快速生成刀具路径,基于图论^[13]将封闭等

距环表示为带约束的赋权有向图,主要步骤如下:

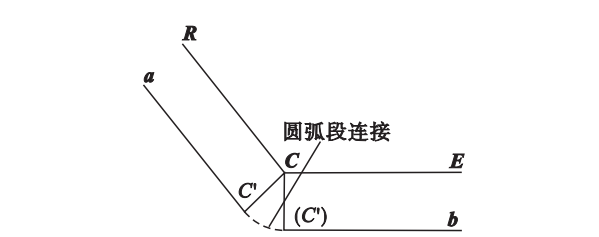


图3 等距线分离的过渡连接
Fig. 3 Transitional connection between isometric separate lines

1) 标记赋权有向图中的节点 v_i 及连接弧 a_m : 赋权有向图的节点 v_i 为封闭等距环中的直线段端点、圆弧段端点以及它们的交点; 赋权有向图的连接弧 a_m 为封闭等距环中相邻节点间的直线段或圆弧段;

2) 确定赋权有向图中连接弧 a_m 的方向: 根据型腔轮廓等距环的方向为逆时针, 岛屿轮廓等距环的方向为顺时针, 确定封闭等距环的赋权有向图中各连接弧 a_m 的方向;

3) 标记赋权有向图中转向约束标志 σ^v : 为了防止生成无效路径, 需要在节点 v_i 处设置转向约束标志 σ^v ;

4) 确定赋权有向图中连接弧 a_m 的权值: 相邻节点 v_i 和 v_j 之间的连接弧 a_m 对应的权值为弧长 w_{ij} .

根据以上步骤得到带约束的赋权有向图 $D = (V, A, \Sigma, W)$, 其中 V 为节点集合, A 为弧集合, Σ 为约束集合, W 为权值集合。

2.3 基于改进Dijkstra算法的STEP-NC复杂型腔最短刀具路径生成

根据上文得到的封闭等距环赋权有向图, 采用改进的Dijkstra算法生成STEP-NC复杂型腔最短刀具路径. 传统Dijkstra算法^[14]是一种贪心算法, 能够寻找最短路径. 由于该算法中节点只能访问一次, 因此该算法不能直接用于STEP-NC复杂型腔最短刀具路径的生成. 针对上述问题, 本文通过增设待选择节点集合 T (通过节点集合 T 可实现节点处最短路径选择) 对传统Dijkstra算法进行了改进(如图4所示), 进而实现STEP-NC复杂型腔最短刀具路径生成, 主要步骤如下:

1) 令已访问节点集合 $S = \emptyset$, 未访问节点集合 $U = V^l$ (V^l 为第 l 次等距计算得到的封闭等距环赋权有向图中的节点集合, $l = 1, 2, \dots, k$, k 为能够进行等距操作的次数, 令 l 的初始值为1), 待选择节点集合 $T = \emptyset$.

2) 令 U 中节点 v_j 的初始标号为 $[v_i, u_j]$ (v_i 为最短路径上节点 v_j 的前一节点, 初始的 v_i 为任

意节点 M ; u_j 是起点到节点 v_j 的距离,其初始值为 ∞);若节点 v_j 被选为起点,则令其标号为 $[v_j, u_j]$ (v_j 为节点 v_j 的本身; u_j 是节点 v_j 到其本身的距离,其值为 0)。

3) 从 U 中选出任意一节点 v_i 为起点和终点 (为了说明方便,起点用 v_i 表示,终点用 v_i^* 表示),并从 U 中删除 v_j . 将 v_i 加入到 S 中,将 v_i^* 存入 U 中,确定 v_i 的标号为 $[v_i, 0]$ 。

4) 判断 U 中是否存在与 v_i 的直接连接的节点 v_j . 若是,则执行步骤 5); 否则,得到 1 条无效路径,将该路径的终点从 U 中删除,并执行步骤 10)。

5) 对于 U 中与 v_i 直接连接的节点 v_j ,若 $u_j > u_i + w_{ij}$,则令 $u_j = u_i + w_{ij}$,并更新其标号 $[v_j, u_j]$ 。

6) 若节点 v_i 不是起点且设置转向约束标志 σ^v ,在 U 中满足条件 (节点 v_j 与节点 v_i 之间的连接弧的方向应不同于节点 v_i 与其上一节点的连接弧方向) 的节点 v_j 中选取 u_j ($u_j > 0$) 最小的; 否则,直接从 U 中找出 u_j 最小的节点 v_j 。

7) 将被选取节点 v_j 记为 v_i ,加入到 S 中,确定 v_i 的标号为 $[v_i', u_i]$ (v_i' 为最短路径上节点 v_i 的前一节点; u_i 是起点到节点 v_i 的距离),并将 v_j 从 U 中删除. 另外,若 v_i 为交点,同时加入 T 中。

8) 判断 v_i 是否为终点 v_i^* . 若是,则得到 1 条最短路径,并执行步骤 9); 若否,则返回步骤 4)。

9) 判断得到的最短路径对应的环是否为逆时针环. 若是,则判定该路径为最短刀具路径,并用向量 **path** 记录该路径中节点的标号,执行步骤 11); 否则,判定该路径为无效路径,并将赋权有向图中属于该无效路径的连接弧的弧长设置为 ∞ ,执行步骤 10)。

10) 将 S 中属于该无效路径且为交点的节点 v_i 删除,并将 T 中的节点存入 U 中。

11) 判断 U 是否为空集. 若是,则得到第 l 个封闭等距环的全部最短刀具路径; 否则,令 $T = \emptyset$,执行步骤 2)。

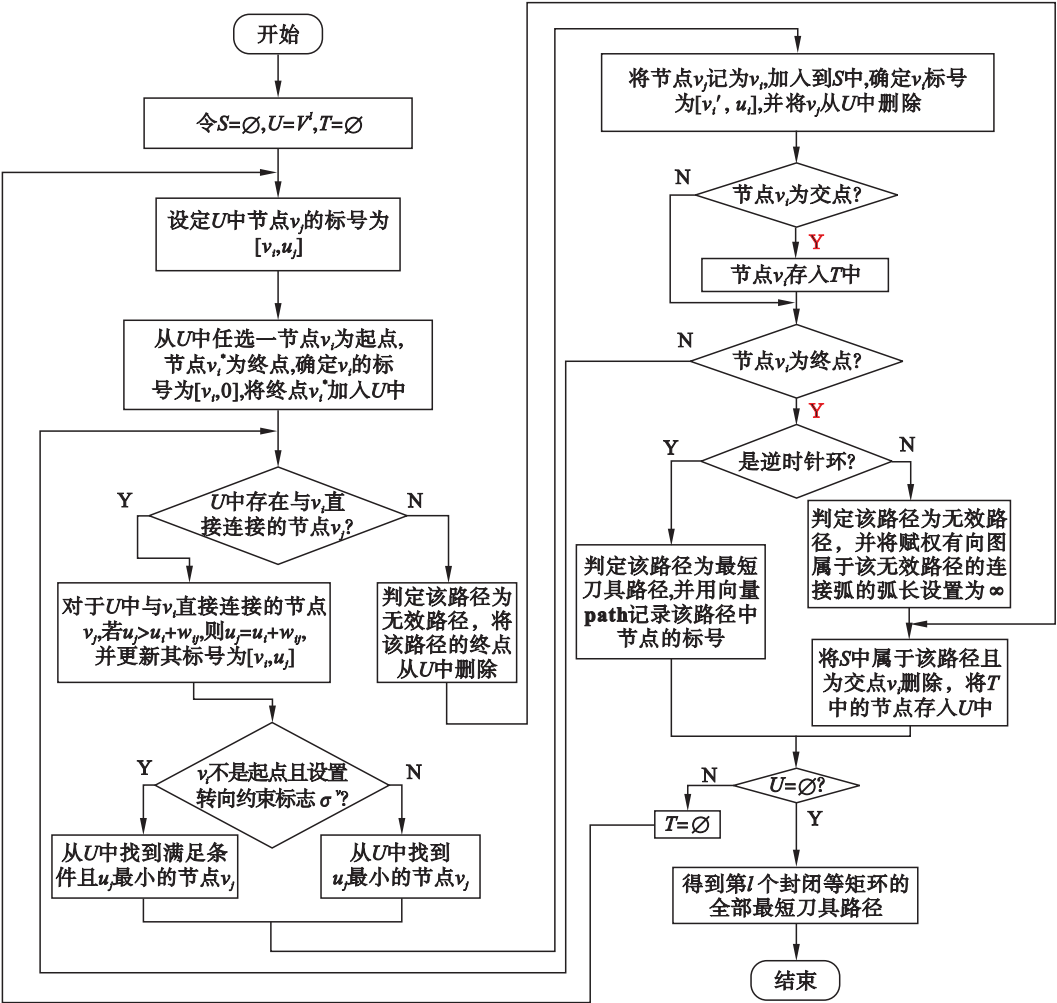


图 4 基于改进 Dijkstra 算法的 STEP-NC 复杂型腔最短刀具路径生成算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the shortest tool path generation method for STEP-NC complex pockets based on improved Dijkstra algorithm

3 实例研究

图 5 给出了一个包含 STEP-NC 复杂型腔的零件模型. 基于所提出的刀具路径生成方法, 对该 STEP-NC 复杂型腔进行了刀具路径规划.

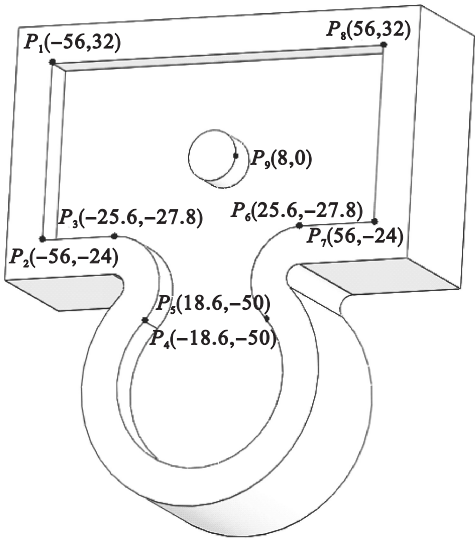


图 5 零件三维模型
Fig. 5 3-D model of a part

本实例中刀具半径 R 为 2 mm, 刀尖圆弧半径 r 为 0.3 mm, 允许的残留高度 h 为 3.2 μm . 由于封闭等距环的相似性, 图 6 给出了该复杂型腔第 4 次等距偏置得到的封闭等距环. 然后, 基于图论得到图 6 对应的赋权有向图, 如图 7 所示. 在此基础上, 基于改进的 Dijkstra 算法得到 4 条最短刀具路径, 如图 8 所示. 进一步, 得到该 STEP-NC 复杂型腔的全部最短刀具路径, 刀具路径总长度为 2 926.1 mm, 如图 9 所示. 在 Windows7 操作系统、CPU 为 2.70 GHz 和内存为 4 GB 的计算机环境下, 刀具路径生成耗时 0.1 s.

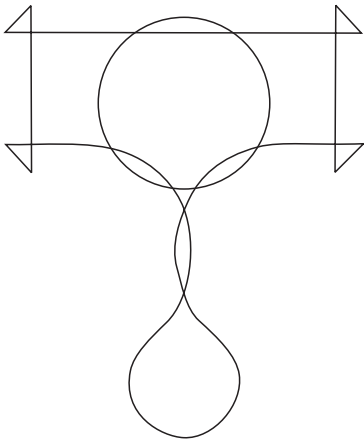


图 6 第 4 个封闭等距环
Fig. 6 The fourth closed equidistant ring

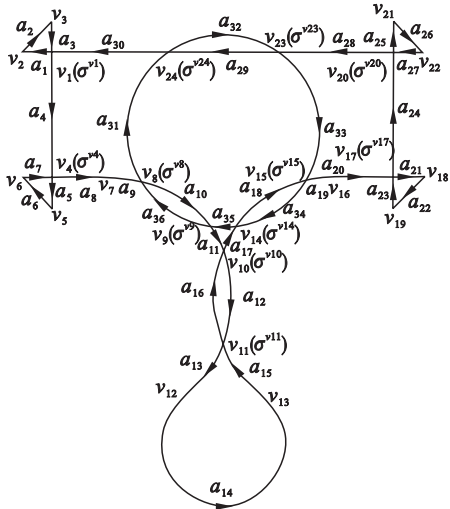


图 7 第 4 个封闭等距环的赋权有向图
Fig. 7 Weighted digraph of the fourth closed equidistant ring

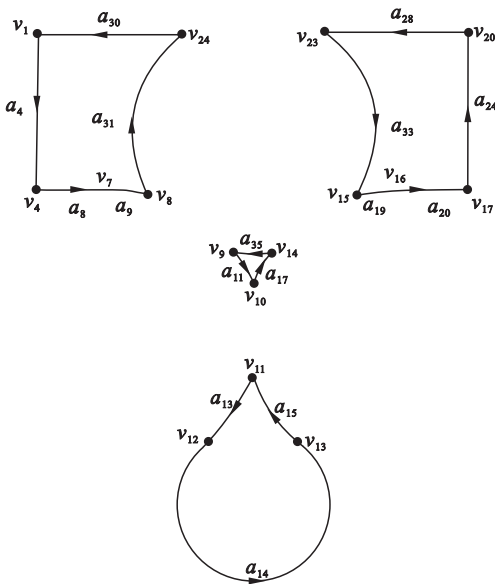


图 8 第 4 个封闭等距环的最短刀具路径
Fig. 8 The shortest tool paths of the fourth closed equidistant ring

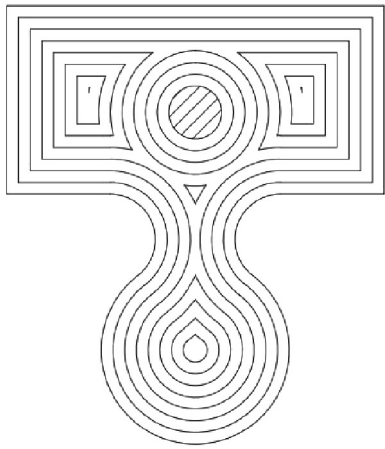


图 9 STEP-NC 复杂型腔的全部最短刀具路径
Fig. 9 All the shortest tool paths of STEP-NC complex pockets

当型腔轮廓和岛屿轮廓的等距偏置次数不同时,生成的 STEP – NC 复杂型腔刀具路径总长度为 2 974. 7 mm,如图 10 所示. 在相同计算机环境下,其刀具路径生成耗时 0. 14 s. 而采用等距法生成的 STEP – NC 复杂型腔刀具路径总长度为 3 027. 3 mm,如图 11 所示. 在相同计算机环境下,其刀具路径生成耗时 0. 2 s. 因此,本文所提出的刀具路径生成方法更好、更高效. 该零件模型刀具路径规划界面如图 12 所示.

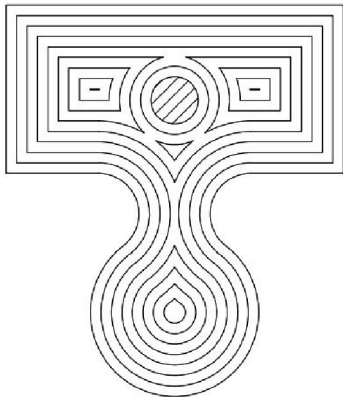


图 10 等距偏置次数不同时生成的 STEP – NC 复杂型腔的最短刀具路径

Fig. 10 The shortest tool path generated with different offsets for STEP-NC complex pockets

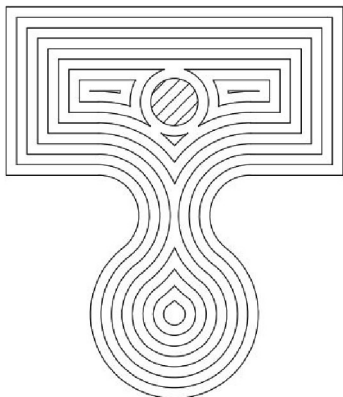


图 11 基于等距法得到 STEP – NC 复杂型腔的最短刀具路径

Fig. 11 The shortest tool path generated for STEP-NC complex pockets based on the isometric method

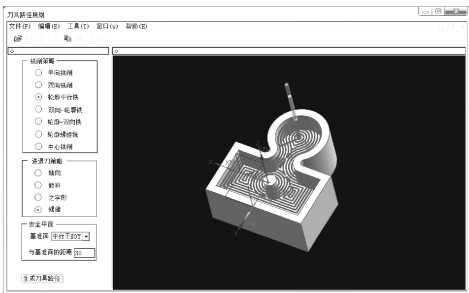


图 12 STEP – NC 复杂型腔刀具路径规划界面
Fig. 12 Interface of tool path planning for STEP-NC complex pockets

4 结 论

1) 提出了基于图论的封闭等距环赋权有向图生成方法,为 STEP – NC 复杂型腔最短刀具路径的快速生成奠定了基础.

2) 提出了基于改进 Dijkstra 算法的 STEP – NC 复杂型腔最短刀具路径生成方法,并与图论有机结合,为自动生成 STEP – NC 复杂型腔的最短刀具路径提供了一个有效的解决方案,也为实现基于 STEP – NC 的智能数控系统提供了有力的技术支撑.

接下来,将对 STEP – NC 复杂型腔刀具过渡路径规划和 STEP – NC 自由曲面特征的刀具路径规划进行研究.

参考文献:

[1] Um J, Rauch M, Hascoët J Y, et al. STEP-NC compliant process planning of additive manufacturing: remanufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88 (5/6/7/8) : 1215 – 1230.

[2] Dhanik S, Xirouchakis P. Contour parallel milling tool path generation for arbitrary pocket shape using a fast marching method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 50 (9/10/11/12) : 1101 – 1111.

[3] 王利智. 二维数控铣切复合加工轨迹规划与路径优化研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
(Wang Li-zhi. Research on path planning and optimization for combined machining of two-dimensional milling and cutting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.)

[4] Manav C, Bank H S, Lazoglu I. Intelligent toolpath selection via multi-criteria optimization in complex sculptured surface milling [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2013, 24 (2) : 349 – 355.

[5] 王家斌, 王炫润, 李劭晨, 等. 含孤岛型腔铣削加工的螺旋刀轨生成算法 [J]. *航空学报*, 2016, 37 (5) : 1689 – 1695.
(Wang Jia-bin, Wang Xuan-run, Li Shao-chen, et al. Spiral tool path generation algorithm for milling pocket with island [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37 (5) : 1689 – 1695.)

[6] Laguionie R, Rauch M, Hascoët J Y. Toolpaths programming in an intelligent STEP-NC manufacturing context [J]. *Physics*, 2009, 19 (7) : 941 – 942.

[7] Du J, Yan X G, Chen Z. A multi-agent based tool path planning method for STEP-NC compliant milling [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 97/98/99/100/101 (4) : 3382 – 3386.

[8] Cuenca S, Jimeno-Morenilla A, Martínez A, et al. Hardware approach to tool path computation for STEP-NC enabled CNC: a case study of turning operations [J]. *Computers in Industry*, 2011, 62 (5) : 509 – 518.

[9] Liang H B, Li X. Five-axis STEP-NC controller for machining of surfaces [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68 (9/10/11/12) : 2791 – 2800.