

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.03.017

基于轮廓搜索的机匣铣削毛坯模型自动构建方法

张 帅^{1,2} 李迎光² 苏廷铭¹ 刘自成¹ 郝小忠²

(1. 中国燃气涡轮研究院, 成都, 610507; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要:针对发动机机匣零件铣削毛坯模型构建中,表面凸台回转轮廓获取困难,凸台轮廓之间以及凸台轮廓与回转体轮廓之间组合难处理,毛坯构建效率低且余量分布不均的问题,提出了基于轮廓搜索的机匣铣削毛坯模型自动构建方法。用离散的方法得到复杂形状凸台特征的回转轮廓,将凸台特征与回转体特征的回转轮廓旋转投影到草图平面,结合加工余量、车削刀具尺寸等工艺信息进行毛坯轮廓搜索,进而得到余量分布均匀且符合工艺要求的铣削毛坯。该方法对机匣回转体与表面凸台进行统一轮廓搜索,并充分考虑加工工艺,能处理具有复杂表面凸台的机匣零件,效率高、通用性好;所得毛坯余量分布均匀,减小铣削材料去除量,有助于提高铣削加工效率。

关键词:机匣;铣削毛坯;轮廓搜索;表面凸台;加工余量

中图分类号:V262.3;TG506

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)03-0428-08

Automatic Milling Blank Model Generation Method for Engine Casing Based on Contour Searching

Zhang Shuai^{1,2}, Li Yingguang², Su Tingming¹, Liu Zicheng¹, Hao Xiaozhong²

(1. Gas Turbine Establishment of China, Chengdu, 610507, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In order to address the issue of obtaining the revolving contour of surface boss and combining the revolving contours of surface bosses with that of revolution body of the casing as well as the issue of low efficiency in generation of aero-engine case milling blank model and nonuniformity of machining allowance of the milling blank model, an automatic milling blank model generation method for casing based on contour searching is proposed. In the method, discretion is used to obtain the revolving contour of a complex-shaped surface boss. The revolving contours of the bosses are rotated to a sketch plane where they are combined with the revolving contour of the revolved body. The blank contour is searched on the sketch plane considering milling and turning machining process information. Blank model with uniform machining allowance and good manufacturability is then obtained by revolving the blank contour. The method is effective and universal in milling blank generation of aero-engine casings with various bosses on the surface. Milling efficiency is improved using the blank model generated by the method due to optimized machining allowance and minimized residual cutting volume.

Key words: casing; milling blank; contour searching; surface boss; machining allowance

机匣是航空发动机的关键部件之一,作为发动机的重要承力件,承受质量惯性力、各种气体载荷、

基金项目:国家科技重大专项(2013ZX04001-021)资助项目。

收稿日期:2015-02-03;修订日期:2015-04-13

通信作者:李迎光,男,教授,博士生导师,E-mail:liyingguang@nuaa.edu.cn。

温差引起的热载荷等,对强度、刚度、包容性等有很高的要求^[1]。机匣结构上是以回转轮毂面为主体的圆环结构,表面分布不均匀岛屿凸台,零件最薄处仅有 2~3 mm,属多岛屿复杂薄壁结构件^[2]。机匣数控铣削是机匣加工的主要工序之一,在机匣数控铣削时,铣削毛坯余量分布不均会造成材料去除量增大、刀轨数量增加以及铣削效率降低的问题。

在对航空发动机制造企业的调研中发现,机匣零件铣削毛坯需要工艺人员手工创建。机匣铣削前的毛坯通常为车削后的回转件,铣削毛坯既要保证以铣削所需余量包涵表面凸台的最大回转轮廓,又要符合回转体车削对刀具尺寸的要求。由于机匣表面凸台形状复杂、尺寸多样,工艺人员建模时往往通过测量和估算的方法确定机匣毛坯尺寸;这种方法效率低,经验依赖性强,得到的毛坯余量分布不均匀,不利于铣削加工质量和效率的提高。因此,需要一种由机匣零件模型自动生成优化的机匣铣削毛坯的方法。

基于特征的数控编程技术以加工特征为信息载体,能有效集成加工知识和经验,是数控编程技术发展的重要趋势^[3]。Joshi 和 Chang 提出了属性面邻接图的思想进行零件加工特征的识别^[4],Li 等对飞机结构件特征识别技术进行了研究,提出了基于特征的飞机结构件快速编程方法^[5]。特征识别技术能准确、高效地获得构建机匣铣削毛坯模型所需的零件几何信息,为机匣零件铣削毛坯的自动构建奠定基础^[6-7]。

针对零件设计模型向毛坯模型转换的问题,国内外学者进行了一些研究。Kim 和 Wang 提出采用半空间包络零件加工特征以生成毛坯模型的方法^[8],Zhou 等提出以加工余量对零件特征进行补偿生成毛坯模型的方法^[9],常智勇等提出以最小包络辅助面包络非正交加工表面以生成铸件毛坯模型^[10],杨英昌提出模型递增转换的方法用于涡轮叶片零件模型向铸造模型的转换^[11],万能等研究了 MBD 毛坯模型的特征识别设计方法,提出识别加工特征和抑制加工特征是 MBD 毛坯模型辅助设计的关键^[12-13]。王宗彦等提出采用加工面和加工余量生成的实体对零件模型进行补偿的方法生成毛坯模型^[14]。

上述方法中,很少涉及机匣类带表面凸台的回转体零件铣削毛坯模型的构建。由于机匣表面凸台形状复杂,尺寸多样,很难确定毛坯的尺寸,手工测量和估算的方法会导致余量偏大且分布不均;由

于机匣铣削毛坯是车削后的回转体,要获得凸台的回转轮廓比较困难,而且需要一种凸台与凸台、凸台与机匣回转体轮廓相交时裁剪与取舍的方法。此外,现有设计模型向毛坯模型转化方法只考虑了余量一个工艺参数,对获得毛坯的工艺考虑较少,需要一种考虑前后两步工序的加工工艺,生成一种中间状态过渡毛坯的方法。为提高机匣类零件铣削毛坯模型构建的效率与模型余量的均匀性,本文研究了获取复杂形状凸台回转轮廓以及从零件模型回转轮廓中提取毛坯轮廓的方法。

1 机匣铣削毛坯构建的难点

航空航空发动机机匣为典型的带有表面凸台的回转体零件,其表面凸台数量多,形状复杂,尺寸多样,大大增加了机匣铣削毛坯构建的复杂程度。在机匣铣削毛坯构建时,为尽量减小毛坯余量,达到等余量设计,希望得到机匣表面凸台的回转轮廓,即凸台铣削余量为零的位置。如图 1 所示 $A_1B_1C_1D_1$ 、 $A_2B_2C_2D_2$ 分别为两个凸台对机匣轴线的回转轮廓,其中 A_1B_1 、 C_1D_1 为与凸台 1 侧面平行的直线段, A_2B_2 、 C_2D_2 为与凸台 2 侧面平行的直线段,4 条直线段为凸台侧面回转轮廓线,由凸台侧面的几何决定; B_1C_1 、 B_2C_2 为两条曲线段,分别为凸台 1、凸台 2 的顶面回转轮廓,由两凸台的顶面几何决定。对形状复杂的凸台,获得其回转轮廓十分困难,不同形状凸台也很难找到获取回转轮廓的统一方法。

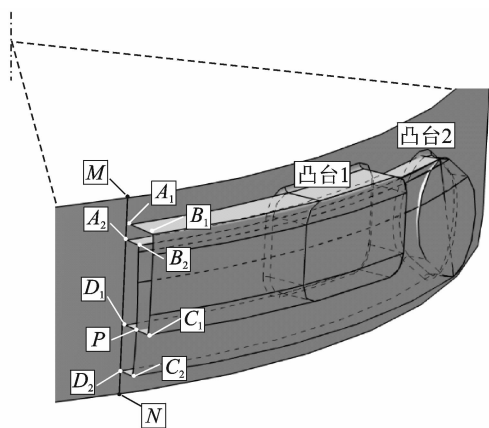


图 1 凸台回转轮廓示意图

Fig. 1 Revolving contour of bosses

在机匣铣削毛坯构建中,存在多个凸台的回转轮廓相交的情况。如图 1 所示两凸台的回转轮廓中,线段 C_1D_1 与 B_2C_2 交于点 P ,在机匣铣削毛坯生成时,为保证工余量分布尽量均匀,应当在轮廓

$A_1B_1C_1PC_2D_2$ 的基础上添加加工余量,即需要一种裁剪与取舍判断的方法得到组合轮廓 $A_1B_1C_1PC_2D_2$; 同样,凸台回转轮廓在添加余量后需要与机匣回转体轮廓 MN 组合,以得到毛坯轮廓,其中曲线裁剪的分类情况多、裁剪后线段取舍判断复杂。

针对机匣铣削毛坯构建的以上难点,本文提出了基于轮廓搜索的机匣铣削毛坯自动构建方法。

2 基于轮廓搜索的机匣铣削毛坯构建方法

发动机机匣零件示意图如图2所示。根据发动机机匣的结构特点,将机匣特征定义为一系列环形槽、环形槽凸台以及机匣内环的组合。即

$$P_{Cas} = P_{Gov} \cup P_{Bos} \cup P_{Rin} \quad (1)$$

式中: P_{Cas} 为机匣; P_{Gov} , P_{Bos} , P_{Rin} 分别为机匣环形槽特征、环形槽凸台特征和机匣内环特征。其中环形槽特征 P_{Gov} 可表示为

$$P_{Gov} = G_{Top} \cup G_{Sid} \cup G_{Cor} \cup G_{Bot} \quad (2)$$

式中: G_{Top} , G_{Sid} , G_{Cor} , G_{Bot} 分别为环形槽顶面、环形槽侧面、环形槽底角面和环形槽底面。

环形槽凸台特征 P_{Bos} 可以表示为

$$P_{Bos} = B_{Top} \cup B_{Sid} \cup B_{Cor} \quad (3)$$

式中: B_{Top} , B_{Sid} , B_{Cor} 分别为凸台顶面、凸台侧面和凸台底角面。

机匣内环特征 P_{Inn} 可以表示为

$$P_{Inn} = R_{Top} \cup R_{Sid} \quad (4)$$

式中: R_{Top} , R_{Sid} 分别为机匣内环顶面和机匣内环侧面。

考虑机匣铣削毛坯创建的实际需求,实现毛坯轮廓的统一搜索,将环形槽特征与机匣内环特征组合,定义为机匣回转体特征 P_{Rev} , 即

$$P_{Rev} = P_{Gov} \cup P_{Rin} \quad (5)$$

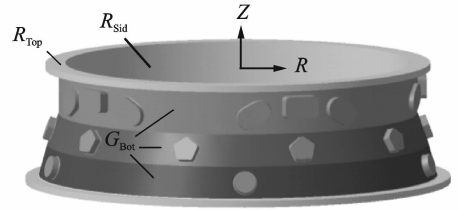
基于轮廓搜索的机匣铣削毛坯自动构建方法,对机匣凸台特征回转轮廓与机匣回转体特征回转轮廓采用统一的规则进行轮廓搜索,方法流程图如图3所示。该方法的关键点包括:提取凸台回转轮廓、轮廓组合与分割和毛坯工艺信息添加、毛坯轮廓搜索。

2.1 凸台回转轮廓提取

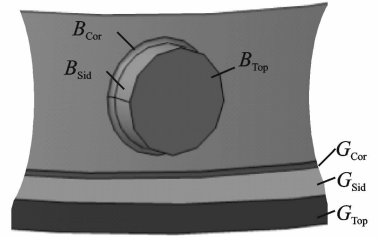
凸台回转轮廓表示为

$$C_{BRC} = L_{Top} \cup L_{Sid} \quad (6)$$

式中: C_{BRC} 为凸台回转轮廓; L_{Top} 为凸台顶面回转轮廓; L_{Sid} 为凸台侧面回转轮廓。



(a) 航空发动机机匣模型



(b) 航空发动机机匣凸台

图2 机匣特征示意图

Fig. 2 Features of aero-engine casing

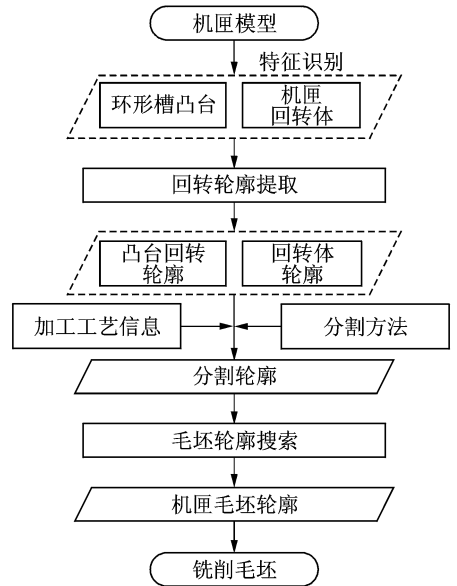


图3 基于轮廓搜索的机匣铣削毛坯创建流程图

Fig. 3 Flow chart of casing milling blank generation

2.1.1 凸台顶面回转轮廓获取

过凸台顶面中心点与机匣轴线作平面 MP (Middle plane), 如图4所示。将凸台顶面外环边以步长 ϵ 离散为点集 P_{Dis} , 离散步长 ϵ 由工艺人员输入, 步长太小会降低计算效率, 太大则影响计算精度。根据凸台顶面外环边的长度 L , ϵ 的参考取值范围为

$$\epsilon < L/100 \quad (7)$$

以机匣轴线 Z_{Ax} 为旋转轴, 将点集 P_{Dis} 旋转投影到平面 MP , 得到顶面轮廓点集 P_{Rev} , 如图4所示。

$$P_{Rev} = Rotate(P_{Dis}, Z_{Axi}MP) \quad (8)$$

点可得

$$AB \parallel A'B', CD \parallel C'D' \quad (10)$$

在平面 MP 上,以凸台顶面回转轮廓端点 Start point 和 End point 为起点,分别以 $A'B'$, $C'D'$ 为方向作直线与凸台所在环形槽底面相交,得到 AB, CD 即为凸台侧面回转轮廓。

2.2 轮廓组合

取任一过机匣轴线的平面为草图平面 SKP (Sketch plane),将凸台回转轮廓旋转投影到草图平面 SKP ,得到草图凸台轮廓 SBC (Sketch boss contour),表示为

$$C_{SBC} = Rotate(C_{BRC}, Z_{Axi}, SKP) \quad (11)$$

如图 6 中所示。在草图平面上,将草图凸台轮廓偏置,得到凸台偏置轮廓 BOC (Boss offset contour),表示为

$$C_{BOC} = Offset(C_{SBC}, Value_{Off}) \quad (12)$$

式中 $Value_{Off}$ 为工艺人员输入的铣削加工所需余量,如图 6 中所示。

$$C_{BOC} = L_{Tof} \cup L_{Sof} \quad (13)$$

式中 L_{Tof}, L_{Sof} 分别为凸台偏置轮廓顶线和侧线。

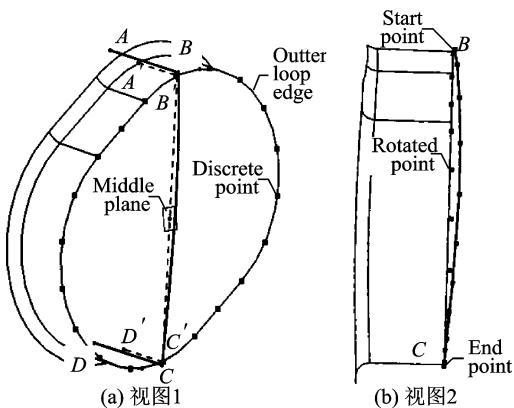


图 4 凸台轮廓提取示意图

Fig. 4 Generation of boss revolving contour

从点集 P_{Rev} 中找出沿机匣轴线距离最大的两个点作为凸台顶面轮廓的边界点,如图 4 (b) 中 Start point 和 End point 所示。从起始点 Start point 开始,搜索形成最大轮廓的点,如图 5 所示。在平面 MP 上,以当前轮廓点为原点,以机匣径向和轴向为坐标轴方向建立直角坐标系,正方向为机匣半径和高度增大的方向;则下一个轮廓点位于坐标系的 3, 4 象限,且为与坐标原点 O 的连线与 x 正方向夹角最小的一点。比较点集 P_{Rev} 中位于 3, 4 象限的点与原点 O 的连线与 x 正方向的夹角,得到下一个轮廓点,如此重复进行,直到进行到点 End point,搜索结束,得到凸台顶面最大轮廓点集 P_{Top} 。以点集 P_{Top} 中的点为型值点拟合样条曲线,得到凸台顶面回转轮廓,如图 4 中 BC 所示。

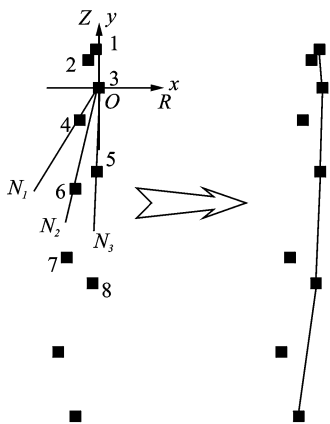


图 5 最大顶面轮廓点搜索示意图

Fig. 5 Searching of boss top revolving contour

2.1.2 凸台侧面回转轮廓获取

凸台侧面与平面 MP 相交,如图 4 中所示。

$$\{A'B', C'D'\} = MP \cap B_{Sid} \quad (9)$$

AB, CD 为凸台侧面回转轮廓,由凸台几何特

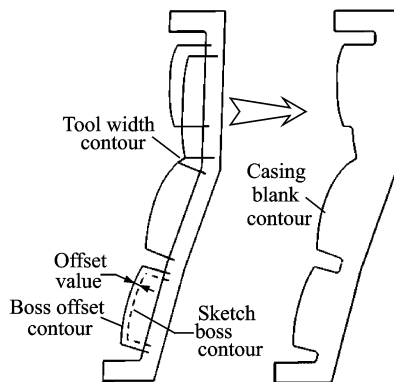


图 6 组合轮廓与毛坯轮廓示意图

Fig. 6 Combination of revolving contours

比较不同凸台侧面回转轮廓侧线 L_{Sof} 之间的距离 d ,若

$$d < Value_{Wid} \quad (14)$$

式中 $Value_{Wid}$ 为工艺人员输入的最小车刀宽度。将两 L_{Sof} 上端点相连,得到刀宽补偿轮廓 TWC (Tool width contour),如图 6 所示。

草图平面与机匣回转体相交,得到机匣回转体轮廓 RBC (Revolve body contour),即

$$C_{RBC} = SKP \cap P_{Rev} \quad (15)$$

毛坯组合轮廓 BCC (Blank combine contour) 是机匣回转轮廓、刀宽补偿轮廓以及所有凸台偏置轮廓的集合,表示为

$$C_{BBC} = L_{TWC} \cup C_{RBC} \cup \{C_{BOC1}, C_{BOC2}, \dots, C_{BOCn}\} \quad (16)$$

2.3 毛坯轮廓获取

2.3.1 组合轮廓求交分割

组合轮廓求交分割,是将组合轮廓 BCC 中的轮廓线进行两两相交性试验,若两轮廓线相交,则两轮廓线求交得到交点,并将交点作为两轮廓线的属性信息保存;得到一条轮廓线的所有交点后,以这些交点将该轮廓线分割成若干段,保存到分割轮廓列表中。通过对组合轮廓 BBC 求交分割,得到毛坯分割轮廓 BSC(Blank split contour),表示为

$$C_{BSC} = \text{Split}(C_{BBC}) \quad (17)$$

轮廓线的相交性试验方法如下:对两直线段,首先进行快速排斥试验,如图 7 所示,若以 P_1P_2 为对角线的矩形与以 Q_1Q_2 为对角线的矩形不相交,即

$$\begin{aligned} \min\{x_i, x_{i+1}\} &\geq \max\{x_j, x_{j+1}\} \\ \text{或 } \max\{x_i, x_{i+1}\} &\leq \min\{x_j, x_{j+1}\} \\ \text{或 } \min\{y_i, y_{i+1}\} &\geq \max\{y_j, y_{j+1}\} \\ \text{或 } \max\{y_i, y_{i+1}\} &\leq \min\{y_j, y_{j+1}\} \end{aligned} \quad (18)$$

此时直线 P_1P_2, Q_1Q_2 一定不相交;若通过快速排斥试验,则继续进行跨立试验,若 P_1P_2, Q_1Q_2 相交,则矢量 Q_1P_1 与矢量 Q_1P_2 位于矢量 Q_1Q_2 的两侧,即

$$(Q_1P_1 \times Q_1P_2) \cdot (Q_1P_2 \times Q_1Q_2) \leq 0 \quad (19)$$

当且仅当 P_1 或 P_2 位于 Q_1Q_2 上时等号成立。

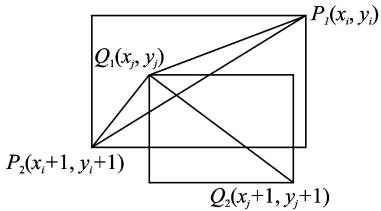


图 7 相交性试验示意图

Fig. 7 Intersect test of two lines

对曲线段相交性试验,先将曲线段离散为一系列直线段,再按直线段相交性试验的方法判断其相交性。

2.3.2 毛坯轮廓搜索

毛坯轮廓搜索是在分割轮廓 BSC 中,通过最小方向角法搜索毛坯轮廓 CBC(Casing blank contour)。搜索毛坯轮廓的流程如图 8 所示。

构建属性边点图描述分割轮廓 BSC 中几何元素的拓扑信息及各个元素间的邻接关系^[15-17],属性边点图的内容如图 9 所示。

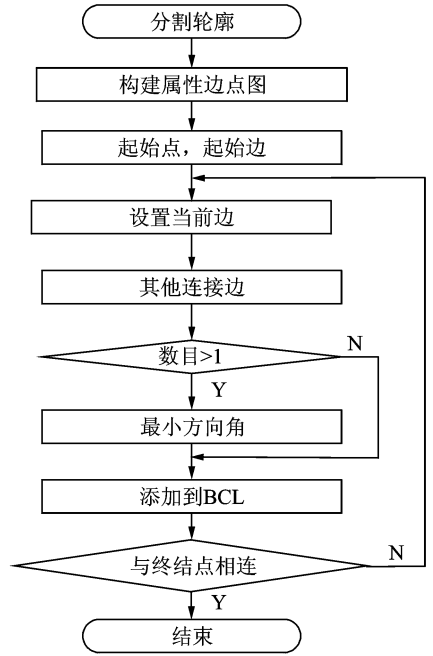


图 8 毛坯轮廓搜索流程图

Fig. 8 Flow chart of casing blank contour generation

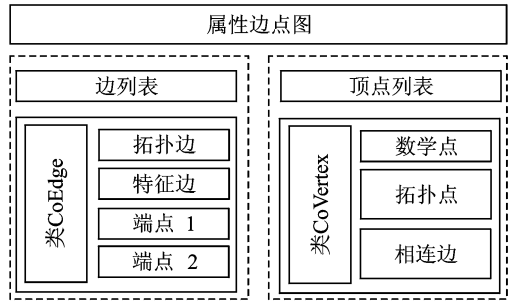


图 9 属性边点图

Fig. 9 Attributed adjacency graph of CBC

最小方向角法是一种多分支路径选择的方法^[18-19],其过程及原理如图 10 所示。 MO 为已经确定的当前轮廓路径,沿搜索方向 MO 在 O 点遇到 3 条分支路径,路径 1、路径 2、路径 3,选择其中一条路径作为新一轮搜索的轮廓路径;3 条路径与当前轮廓 MO 的方向角分别为 $\angle MON_1, \angle MON_2, \angle MON_3$ (圆弧路径 3 的方向用切线 3 代替); $\angle MON_1$ 最小,选择对应路径 1 为新的轮廓路径继续搜索。

方向角的求法为:如图 11 所示, OZ 为机匣轴向单位向量,正方向沿机匣高度增大的方向; OR 为在草图平面 SKP 中,机匣径向单位向量,正方向沿机匣半径增大的方向指向分割轮廓 BSC;则毛坯轮廓搜索方向为

$$OV = OZ \times OR \quad (20)$$

由向量积的定义知, OV 为垂直与草图平面的单位向量。设沿轮廓线 EG, EA 的单位向量分别为 i, j , 则 EG, EA 的方向角 θ 计算公式为

$$\theta = \begin{cases} \arccos(i \cdot j) & (i \times j) \cdot OV > 0 \\ 360^\circ - \arccos(i \cdot j) & (i \times j) \cdot OV < 0 \end{cases} \quad (21)$$

按所述路径选择方法, 在轮廓分支点 E 处, GE 为当前轮廓边, 在 E 点有 EA, EF, EH 三条分支路径, 与 GE 的方向角分别为, $\angle GEA, \angle GEF$ 和 $\angle GEH$; 选择方向角最小的分支轮廓 EA 为下一条轮廓边进行下一轮搜索, 如此进行, 如图 11 中可得局部毛坯轮廓为 $IGEACJ$ 。

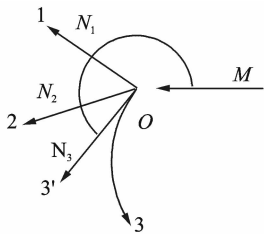


图 10 方向角法原理示意图

Fig. 10 Direction angle searching method

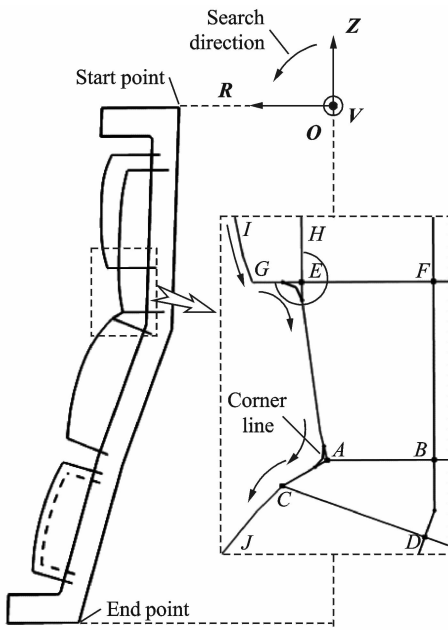


图 11 毛坯轮廓搜索示意图

Fig. 11 Casing blank contour searching method

在轮廓搜索时, 所得相邻两条毛坯轮廓边的方向角小于 180° , 则两轮廓线为凹连接, 以工艺人员输入的车刀圆角半径值 $Value_{Rad}$ 在当前分支点处生成两轮廓过渡圆角线 CL (Corner line), 存入毛坯轮廓列表 BCL (Blank contour list) 中。最后

BCL 中边的集合即为毛坯轮廓, 可以表示为

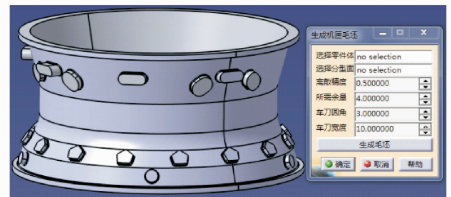
$$C_{BCB} = \{Edge \mid Edge \in BCL\} \quad (22)$$

最后, 以机匣轴线为回转轴, 以毛坯轮廓生成回转体毛坯 CBM (Casing blank model), 即

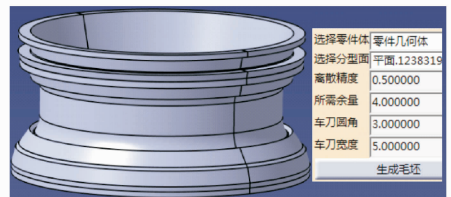
$$CBM = Revolve(CBC, Z_{Axis}) \quad (23)$$

3 应用实例

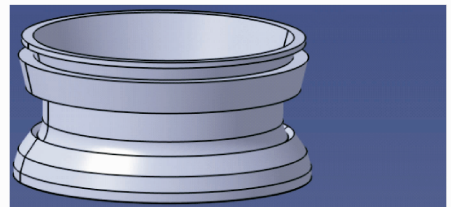
根据以上所述基于轮廓搜索的机匣铣削毛坯自动构建方法, 在 $CATIA V5 CAA$ 二次开发平台进行了功能模块开发。图 11 为该方法在典型航空发动机机匣零件铣削毛坯生成上的应用 (实例零件最大尺寸 $\Phi 1\ 040 \times 500$): (a) 为机匣零件及交互界面, (b) 为自动生成的机匣铣削毛坯及参数设置, (c) 为手工建模生成的毛坯。与手工建模相比, 该方法具有明显的优点, 表 1 为本方法与手工建模效果比较。



(a) 机匣零件及交互界面



(b) 自动生成的毛坯模型



(c) 手工建模生成的毛坯模型

图 12 应用实例

Fig. 12 Application example

表 1 结果对比

Tab. 1 Comparison results

项目	手工建模	自动建模
时间/min	20	2
操作次数	50	6
加工余量/mm	5~17	5~9
剩余材料/ 10^6 mm^3	29	18

由对比结果可以看出, 与手工建模相比, 采用本文所述的方法大大减少了建模操作次数, 缩短建

模时间;同时得到的模型余量分布更均匀,且更贴近目标值;使余量尽量减少,剩余材料的体积大大减少,减少了后续铣削加工材料去除量,提高加工效率。

4 结 论

将凸台顶面外环边离散,搜索最大顶面轮廓点,从而得到复杂形状凸台的回转轮廓,将凸台回转轮廓与回转体轮廓旋转投影到草图平面,采用最小方向角法搜索毛坯轮廓,以毛坯轮廓生成回转体,得到余量分布均匀铣削毛坯。在 CATIA 平台运用该方法开发了功能模块,实例表明该方法具有如下优点:

(1) 根据零件设计模型自动生成铣削毛坯,降低了建模复杂度,建模时间减少了 90%。

(2) 能够处理具有复杂表面凸台的机匣零件,算法通用性好。

(3) 所得毛坯余量分布均匀,铣削加工材料去除量减少了 38%,提高了铣削加工效率。

(4) 充分考虑车削和铣削的工艺,所得毛坯模型既可作为铣削最初毛坯模型,又可作为车削最终零件模型。

参考文献:

- [1] 陈光. 航空燃气涡轮发动机结构设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998: 112-120.
Chen Guang. Structure design of aero-gas turbine engine[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1998: 112-120.
- [2] 陈予恕, 张华彪. 航空发动机整机动力学研究进展与展望[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1371-1391.
Chen Yushu, Zhang Huabiao. Review and prospect on the research of dynamics of complete aero-engine system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1371-1391.
- [3] Li Y G, Ding Y F, Mou W P, et al. Feature recognition technology for aircraft structural parts based on a holistic attribute adjacency graph[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224(2): 271-278.
- [4] Joshi S, Chang T C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model [J]. Computer-Aided Design, 1988, 20(2): 58-66.
- [5] Li Y G, Fang T L, Cheng S J, et al. Research on feature-based rapid programming for aircraft NC parts[J]. Applied Mechanics and Materials, 2008, 10(12): 682-687.
- [6] 何小朝, 沈梅, 蒋谢明, 等. 设计特征模型中的加工特征识别[J]. 航空学报, 1998, 19(6): 685-690.
He Xiaozhao, Shen Mei, Jiang Xieming, et al. Machining feature recognition based on shape feature-based model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(6): 685-690.
- [7] 李迎光, 刘旭, 郝小忠, 等. 航空发动机机匣特征识别方法: 中国, ZL2014101881035[P]. 2014-05-06.
Li Yingguang, Liu Xu, Hao Xiaozhong, et al. Feature recognition technology for aero-engine casing: China. ZL2014101881035[P]. 2014-05-06.
- [8] Kim Y S, Wang E. Recognition of machining features for cast then machined parts [J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(1): 71-78.
- [9] Zhou X H, Qiu Y J, Huang G R, et al. A feasible approach to the integration of CAD and CAPP[J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(1): 324-338.
- [10] 常智勇, 卫海峰, 杨建新, 等. 铸件毛坯模型生成方法研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 60-66.
Chang Zhiyong, Wei Haifeng, Yang Jianxin, et al. Generation of casting model for cast-then-machined parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 60-66.
- [11] 杨英昌. 涡轮工作叶片精铸模型递增转换应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
Yang Yingchang. Research and application of model conversion for turbine blade[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [12] 万能, 苟园捷, 莫蓉. 机械加工 MBD 毛坯模型的特征识别设计方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(8): 1099-1107.
Wan Neng, Gou Yuanjie, Mo Rong. A new feature recognition method for MBD rough model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(8): 1099-1107.
- [13] 万能, 赵杰, 莫蓉. 三维机加工序模型辅助生成技术[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2112-2118.
Wan Neng, Zhao Jie, Mo Rong. Three dimensional procedure model creation methods[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(10): 2112-2118.
- [14] 王宗彦, 吴淑芳, 秦慧斌. 零件的设计模型向毛坯模型转换技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(6): 620-624.
Wang Zongyan, Wu Shufang, Qin Huibin. Transformation technology from part design model to blank model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(6): 620-624.
- [15] 赵建社, 唐兰剑, 郁子欣, 等. 基于轨迹搜索的闭式

- 三元流通道电火花加工电极设计方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(6): 824-829.
- Zhao Jianshe, Tang Lanjian, Yu Zixin, et al. EDM electric design based on path searching for closed 3D-flow channel[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(6): 824-829.
- [16] 郝小忠, Ahmed A A Duroobi, 陈文亮, 等. 环形刀等残留高度多轴加工步距计算[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(4): 538-542.
- Hao Xiaozhong, Ahmed A A D, Chen Wenliang, et al. Calculation of stepover based on constant scallop-height in multi-axis torus milling process[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(4): 538-542.
- [17] 程少杰. 飞机结构件加工特征识别技术研究[与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- Cheng Shaojie. Research and implementation of machining features recognition technology for the aircraft structural parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [18] 王慧洁, 李迎光, 郝小忠, 等. 飞机结构件槽特征加工摆线螺旋复合刀轨生成方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 816-825.
- Wang Huijie, Li Yingguang, Hao Xiaozhong, et al. Cycloid and spiral integrated tool path generation method for pocket machining of aircraft structural parts [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(5): 816-825.
- [19] 张石磊, 李迎光, 刘长青, 等. 基于环分析的飞机结构件槽特征腹板精加工区域自动创建方法[J]. 中国机械工程, 2013, 24(13): 1728-1733.
- Zhang Shilei, Li Yingguang, Liu Changqing, et al. Loop-analysis-based automatic creation method for bottom finish machining region of pocket feature in aircraft structural parts [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(13): 1728-1733.

