

航空发动机壳体 2.5 轴铣削加工刀具优选方法^{*}

周 君¹,任景刚²,廖铃吉²,张定华¹

(1.西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 710072;

2.中航工业西安航空发动机(集团)有限公司 710021)

[摘要] 为提高 2.5 轴零件数控加工过程中的加工效率和加工精度,合理选择刀具直径组合是非常必要的。然而,目前刀具的选择主要依靠工艺人员的实际生产经验或结合大量的试验确定,代价昂贵。为解决上述问题,文章提出一种基于 2.5 轴零件数控加工刀具直径优选方法。首先分析了 2.5 轴零件的结构特点,将图形区域按照加工精度要求转换为二值图像,并利用相关方法获取图像骨架;然后采用拓扑细化法获取图像的初始骨架,并结合动态骨架法进行初始骨架的修正,获得图像的准确骨架,继而得到沿骨架加工时刀具的直径分布。针对型腔类零件数控加工的算例分析表明,采用本文方法能够快速获取给定刀具数量下的最优刀具组合和相应的加工轨迹,提高了加工效率。

关键词: 欧氏距离场;骨架;2.5 轴加工;刀具直径

Cutting Tool Diameter Optimizing Method for 2.5-Axis CNC Machining of Aeroengine Shell Parts

ZHOU Jun¹, REN Jinggang², LIAO Lingji², ZHANG Dinghua¹

(1.The key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2.AVIC Xi'an Aero-engine (Group) Ltd., Xi'an 710021, China)

[ABSTRACT] Reasonable choice of cutting tool diameter combination for improving the 2.5-axis parts of CNC machining in the process of processing efficiency and accuracy is necessary. However, the tool cutting selection in the current is costly, it is mainly depends on an actual production experience of processors or a large number of experiments. In order to solve the above problem, the paper proposed a cutting tool diameter optimizing method in 2.5-axis CNC machining. Firstly, we analyze the structural features of 2.5-axis parts and convert the graphic area to a binary image with the machining precision, and then using relevant methods to generate the skeleton. Secondly, the initial skeleton is obtained by the topological thinning method, in order to get the exact skeleton, we correct the initial skeleton with the dynamic skeleton method. And finally we get the tool diameter distribution along the skeleton machining. Analysis of cavity parts demonstrate that with the proposed method we can quickly obtain the most optimal tool combination and the cutting path under the given cutting tool number, and it does improve the working efficiency.

Keywords: Euclidean distance field; Skeleton; 2.5-axis machining; Cutting tool diameter

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.143

在数控加工领域中,刀具的选择直接影响加工时间和加工精度。但对于复杂零件而言,选择最优或近似最优的刀具直径组合是非常困难的,实际生产中通常是工艺人员根据实际生产经验或通过大量的试验确定,这会花费大量时间和费用,且对工艺人员素质要求较高^[1-2]。对于型腔、岛屿等零件的加工通常采用 2.5 轴加工方式,这类零件通常能够通过二维曲线描述其外形轮廓。为提高切削效率,通常在这类零件的粗加工中采用不同尺

寸的铣刀,而在精加工中,为提高表面质量,通常采用一把较小的刀具沿轮廓进行加工。铣刀尺寸的优选原则如下:(1)铣刀直径尺寸应尽可能大;(2)切削余量应尽可能小;(3)刀具数量应尽可能少。

目前,国内外学者在刀具尺寸优选方面做了大量工作。Yao 等^[3]针对 2.5 轴零件加工提出了一种自动刀具顺序优选方法,实现了零件的高效加工。Veeramani^[4]提出选择 2.5 轴槽腔加工刀具最优尺寸的二相方法。首先,通过 Voronoi Mountain 计算加工过程中材料去除量,并

^{*} 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(No.2014JM7274)。

依据其生成加工轨迹;再应用动态规划方法选择最优的刀具尺寸,减少了加工时间。Bala、Chang 等^[5]提出了多边形轮廓零件的刀具尺寸选择方法。Lim 等^[6]通过找出走刀路径边界,提出刀具位移空间的算法,根据这一算法刀具可以依靠给定的直径安全切削。因此,lim 等^[7]发展出了一个确定二维轮廓零件加工中最优刀具组合方法。Lee^[8]提出了几何计算(多边形剖分和凸包)的方法,从给定的复杂设计表面中选取加工信息的几何约束条件,继而完成工艺规划。Chen 等^[9-10]基于 2.5 轴零件轮廓线(NURBS 曲线),提出一种计算最优刀具直径组合的方法,该方法主要通过计算封闭 NURBS 曲线的中轴线,以此作为走刀轨迹,通过建立刀具直径优化目标,并分别利用粒子群算法(PSO)和遗传算法(GA)等智能算法求解并获得最优刀具直径组合。杨旭静等^[11]等通过圆弧样条拟合的方法,在保证刀具切削路径 G1 连续的基础上,设定临界相对曲率变化率,使圆弧半径各点的误差控制在拟合公差范围内,继而确定了相应刀具直径和走刀轨迹。高雷等^[12]基于遗传算法对多目标、多约束条件、多变量问题进行优化,在不同条件下应用最小成本目标函数和最高效率的优化参数,进行遗传寻优迭代计算,以进化论为理论基础进行启发性探索。上述方法中,虽然能够获得较优的刀具系列,但计算通用性差、稳定性低、计算复杂,不能很好地用于实际生产中。

针对上述刀具优选中存在的问题,文章提出一种基于 2.5 轴零件数控加工刀具直径优选方法。首先将图形区域按照加工精度要求转换为二值图像,然后通过构建图像的欧氏距离场,获得沿骨架加工时刀具的直径分布情况,从而确定加工所用的刀具直径及组合。

1 壳体零件模型分析

本文主要以如图 1 所示的 2.5 轴型腔类零件为研究对象,进行刀具直径最优组合的计算。在数控加工中,为保证零件不与刀具发生过切或者将过切量控制在公差范围内,所用刀具的直径应被严格控制。

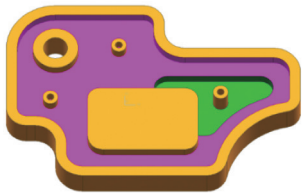


图1 2.5轴零件
Fig.1 2.5-axis parts

图 2 中阴影部分所示为 2.5 轴加工的区域。可以看出,这个区域结构复杂,若能采用合适的加工刀具将能有效提高加工的效率。为选择合适的刀具组合,本文中首先将待加工区域的截面图形转化为二值图像,然后

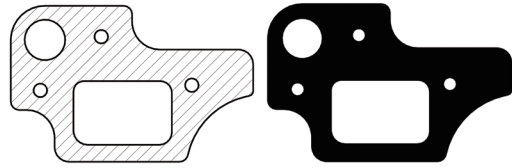


图2 加工区域轮廓图及转换得到的二值图像
Fig.2 Contour map and converted binary Image of the machining region

通过对二值图像中轴线的提取从而获得可用刀具直径的分布情况,并进而确定合适的加工刀具。

目前,中轴线的计算主要分为两大类:一类针对离散域的二值图像^[13],该类主要是通过对像素点的操作得到中轴线(即图像骨架),其计算速度较快,但受到像素点的限制,其精度也受限;第二类针对连续模型^[14],该类计算主要采用严格的数学方法求解,计算结果准确,存在如下问题:(1)计算方式复杂,需要进行原始轮廓曲线的分割及重复迭代运算;(2)通用性差,主要用于具有封闭形状的空间,对于非封闭空间和具有内部孔洞的空间计算复杂;(3)稳定性差,对于分支较多的区域,中轴线计算易出错。同时,由于本文计算中轴线提取的目的是为了优选刀具直径,而刀具直径间的变化一般是非连续的,因此为保证计算过程稳定、可靠,拟采用离散域的二值图像获得中轴线。即首先将图形区域按照加工精度要求转换为二值图像,之后利用相关方法获取图像骨架,而这时的图像骨架即为所求的加工区域中轴线。

2 基于图像骨架提取的刀具直径分布计算

在得到对应二值图像后,这里将利用这个图像进行直径分布计算和刀具的优选。首先需要获取图像的骨架(即中轴线),在计算过程中需要首先计算图像的欧氏距离场,之后对拓扑细化得到的初始骨架进行变换,得到准确骨架。之后结合图像的欧氏距离场得到骨架上每一点到图像轮廓边界的距离,将这一距离作为该点上最大允许刀具半径,继而得到加工轨迹上刀具直径的分布。

2.1 图像欧氏距离场计算

距离场计算是计算机图像技术中一种基本操作技术。它实际是一种图像变换方法,在图像处理中得到了广泛的应用。本文中主要采用欧氏距离,其定义为:设 P 、 Q 是图像中两个像素点,它们的坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ,而这里的坐标一般指像素所在的行号和列号。因此规定欧氏距离为:

$$d(P, Q) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

这与连续情形下的两点间距离相同。二值图像上的距离场可定义为图像上指定像素点集到图像上轮廓边界像素点集间的最短距离的集合,因此可设 I 是一幅

平面二值图,区域 Ω 是 I 内一个物体,并且 Ω 是连通的, $\partial\Omega$ 为其边界集, $\partial\Omega$ 的每一个连通子集都是封闭不自交的曲线段,则距离场函数可构造如下:

$$f(P) = \begin{cases} \inf_{Q \in \partial\Omega} d(P, Q), & P \in \Omega \\ 0, & P \notin \Omega \end{cases} \quad (2)$$

按照这一定义,需要分别计算一个像素点距离轮廓边界像素点集的最短距离,如果按照这一方式进行计算,将会花费大量时间,为提高计算效率,这里采用向量法或有序传播法计算,最终得到如图 3 所示的距离场计算结果。

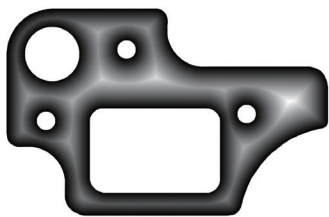


图3 欧氏距离变换结果

Fig.3 Results of euclidean distance transformation

2.2 图像骨架提取与刀具直径计算

在图像骨架的提取上,采用基于偏微分方程的方法获取骨架——动态骨架法。该方法通常结合距离场,通过初始曲线在距离场外力和内力的共同作用下移动到骨架位置,因此该算法计算精度高、抗噪性好。首先按照拓扑细化法计算初始骨架,如图 4 所示。图中黑色细线为计算得到的初始骨架,能够看出,这里得到的骨架与距离场脊线并不完全重合,因此后续应该对这一曲线进行相应调整,使其与脊线重合,继而获得准确骨架。



图4 初始骨架计算结果

Fig.4 Calculation results of the initial skeleton

在得到初始骨架之后,需要建立 Snake 模型,将初始骨架引导到准确位置。Snake 最早由 Kass 等提出,由粗到精的渐变过程取得较优的对象轮廓线。Snake 可由曲线 $r(t) = (x(t), y(t))$, $t \in [0, 1]$ 表示,当 $r(0) = r(1)$ 时,其是封闭图形。一条 Snake 受到两种假想力的作用——内力和外力,内力使 Snake 保持光滑,外力使其向特征目标发生变形。在 Snake 变形过程中,其能量随之降低,为了在整体上使能量达到最低,通常可用 E_{int} 和 E_{ext} 描述 Snake。内力通常可利用下述方式

描述:

$$E_{int} = \int_0^1 (\alpha |\partial r / \partial t| + \beta |\partial^2 r / \partial t^2|) dt \quad , \quad (3)$$

其中, α 控制 Snake 的张力, β 控制刚性。外力通常按照下面方式描述:

$$E_{ext} = \int_0^1 \gamma P(r(t)) dt \quad , \quad (4)$$

其中, γ 为常量, P 为势函数,根据需要采用不同的表达方式。

因此,为使 Snake 达到能量最小,应该保证目标函数 $E = E_{int} + E_{ext}$ 达到最小值。在用到 Snake 时,应该注意的是距离场中对应的脊线上各点不等势,如果直接按照 Snake 模型进行优化,则 Snake 在多数情况下可能收缩为一个点;同时,在变形过程中,由于骨架的复杂性,将整个骨架作为一条 Snake 进行变形将非常复杂,因此需要将骨架进行分解,之后对于分解后的 Snake 分别进行变形。但在变形过程中,各条 Snake 间又存在一定的制约关系,因此,应该按照一定的顺序进行各条 Snake 间的变形。

(1) 骨架的分解及优先权确定。在骨架分解过程中,将初始骨架的每一条边作为一条 Snake,其中环对应封闭 Snake,而非环边对应不封闭的 Snake。并定义非环边为单边,不与其他单边或环相连的顶点为叶点。首先定义 Snake 中的各顶点的深度 D 为:

$$D(x) = \begin{cases} 1, & (\text{当 } x \text{ 为叶点或 } x \text{ 在环上时}) \\ \min_{y \in N(x)} (D(y)) + 1, & (\text{当 } N(x) \text{ 是 } x \text{ 相邻点顶点集时}) \end{cases} \quad (5)$$

根据深度 D ,我们能够定义边的优先权 W 为:

$$W(r) = \begin{cases} 0, & , u = v \\ \min(D(u), D(v)), & , u \neq v \end{cases} \quad (6)$$

其中, u, v 为 Snake 曲线 r 上的两个顶点。

(2) 骨架的变形。在定义好优先权 W 后,优先从 W 较小者变形, W 相同者次序可任意,按照这一顺序依次变形各 Snake,得到最终 Snake 曲线即为实际骨架曲线。在变形过程中首先需要定义变形目标函数 E ,为简化计算,采用 3 次 B 样条来描述 Snake 曲线,它隐含了光滑性这一约束条件,因此在骨架变换过程中可以不考虑内力的作用。设 $\{Q_i | i = 0, 1, \dots, n\}$ 为 $n+1$ 个控制顶点,则其 B 样条表达式如下:

$$r(t) = \sum_{i=0}^n Q_i B_{i,3}(t) \quad , \quad (7)$$

式中, $B_{i,3}(t)$ 为 4 阶 B 样条基函数。令 $\{P_i | i = 0, 1, \dots, n\}$ 为 $n+1$ 个型值点,于是能量函数变为:

$$E(r) = - \sum_{i=0}^n f(P_i) \quad , \quad (8)$$

式中, $f(P_i)$ 为 P_i 点上距离图像边界的最短距离。外力方程则可以通过计算距离场中对应的梯度获得。

$$g(x, y) = (\partial f / \partial x, \partial f / \partial y) \quad (9)$$

按照上述方式进行原始骨架上每条 Snake 的变形后, 原始骨架的每条边将落在距离场的脊线上, 如图 5 所示, 而这些曲线的合集即为图像的精准确骨架。在得到上述骨架后, 结合距离场即可得到骨架上距离的分布, 即加工该区域的刀具直径分布情况, 如图 6 所示。



图5 图像的精准确骨架

Fig.5 Exact skeleton of the Image

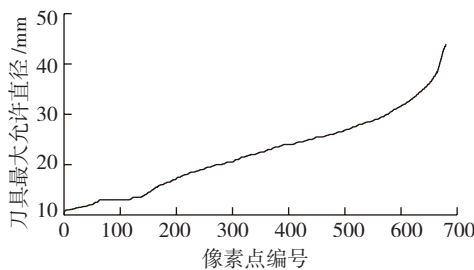


图6 刀具直径分布

Fig.6 Distribution of cutting tool diameter

对于图 1 所示的 2.5 轴型腔类零件, 根据图 6 选择 $\phi 25$ 、 $\phi 11$ 刀具, 与传统采用一把刀具加工的结果如表 1 所示。加工时间对比可以看出本文所提新方法可以有效缩短加工时间。图 7 所示为所选两把刀的加工区域, 绿色部分为 $\phi 25$ 刀具可加工范围, 橙色部分为 $\phi 11$ 刀具可加工范围。

表1 加工方法对比

加工时间 /min	新方法		传统方法
	$\phi 25$	$\phi 11$	一把刀加工 $\phi 11$
加工时间	2.22	4.33	6.55
			8.28

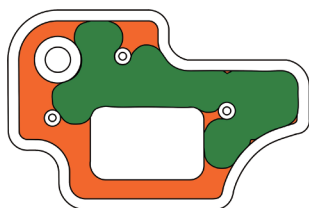


图7 两把刀对应的加工区域

Fig.7 Machining region of two cutting tools

3 结论

针对航空发动机壳体零件的 2.5 轴加工刀具选择,

本文提出了一种将选刀问题转化为图像中轴线提取的方法, 可有效解决任何复杂形状加工刀具的选择问题。与传统方法的对比, 结果显示本文所提方法可以有效地提高壳体类零件的加工效率。

参考文献

- [1] VEERAMANI D, GAU Y S. Selection of an optimal set of cutting-tools for a general triangular pocket. International Journal of Production Research, 1997, 35(9):2621-2638.
- [2] EDALEW K O, ABDALLA H S, Nash R J. A computer-based intelligent system for automatic tool selection. Materials&Design, 2001, 22(5):337-351.
- [3] YAO Z Y, GUPTA S K, NAU D S. Algorithm for selecting cutters in multi-part milling problems. Computer-Aided Design, 2003, 35(9):825-839.
- [4] VEERAMANI D, GAU Y S. Selection of an optimal set of cutting-tool sizes for 2.5D pocket machining. Computer-Aided Design, 1997, 29(12):869-877.
- [5] BALA M, CHANG T C. Automatic cutter selection and optimal cutter path generation for prismatic parts. International Journal of Production Research, 1991, 29(11):2163-2176.
- [6] LIM T, CORNEY J, CLARK D E R. Exact tool sizing for feature accessibility. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(11):791-802.
- [7] LIM T, CORNE W J, RITCHIE J M, et al. Optimizing tool selection. International Journal of Production Research, 2001, 39(6):1239-1256.
- [8] LEE Y S, CHANG T C. Application of computational geometry in optimizing 2.5D and 3D NC surface machining. Computers in Industry, 1995, 26(1):41-59.
- [9] CHEN Z C, ZHANG H D. Optimal cutter size determination for 2.5-axis finish machining of NURBS profile parts. International Journal of Production Research, 2009, 47(22):6279-6293.
- [10] CHEN Z C, FU Q. An optimal approach to multiple tool selection and their numerical control path generation for aggressive rough machining of pockets with free-form boundaries. Computer-Aided Design, 2011, 43(6):651-663.
- [11] 杨旭静, 钟志华, 陈泽忠. 自由曲线轮廓加工样条刀具路径研究. 中国机械工程, 2006, 17(12):1277-1282.
YANG X J, ZHONG Z H, CHEN Z Z. Arc Spline Tool Path Generation for 2D NURBS Profile Milling. China Mechanical Engineering, 2006, 17(12):1277-1282.
- [12] 高雷, 陈文亮, 翟建军. 数控铣削刀具参数的优化. 机械制造与自动化, 2001, 5:11-14.
- [13] GAO L, CHEN W L, ZHAI J J. Optimization of Numerical Control Milling Parameters. Machine Building & Automation, 2001, 5:11-14.
- [14] 车武军, 杨勋年, 汪国昭. 动态骨架算法. 软件学报, 2003, 14(4):818-823.
- [15] CHE W J, YANG X N, WANG G Z. A Dynamic Approach to Skeletonization. Journal of Software, 2003, 14(4):818-823.
- [16] YUSHKEVIEH P, FLETCHER P T, JOSHI S, et al. Continuous medial representations for geometric object modeling in 2D and 3D. Image and Vision Computing, 2003, 21(1):17-27.

(责编 叶枫)