

文章编号:1000-8055(2013)01-0025-07

叶片型面曲率属性对数控铣削加工过程的影响

王明海, 李晓鹏

(沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳 110136)

摘 要: 提出了一种基于曲面曲率属性分析数控铣削加工过程的方法. 该方法通过在构建的自由曲面上规划走刀轨迹, 建立刀位轨迹等参数曲线, 来分析等参数曲线曲率属性对加工干涉和加工带宽度的影响. 同时, 通过对刀位轨迹和残留高度与曲面曲率属性之间关系的研究, 获得了影响数控铣削加工效率、加工精度及发生干涉的一些规律. 此外, 研究表明通过对刀具半径、残留高度与加工表面曲率之间的吻合关系曲线合理优化, 可有效提高加工带宽度. 试验结果证明该曲面曲率属性分析数控铣削加工过程的方法是有效的, 加工效率可提高 5%~8%.

关 键 词: 自由曲面; 曲率属性; 数控铣削; 刀具轨迹; 叶片

中图分类号: V232.4; TP391

文献标志码: A

Effect of curvature attribute of free-form surface on CNC milling process

WANG Ming-hai, LI Xiao-peng

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of
Aeronautical Digital Manufacturing Process,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: A method was presented to analyze the computer-numerical-control (CNC) milling process based on characteristics of the curvature of curved surface. It applied differential geometry theory to CNC milling process. This method was employed to analyze the effects of the curvature attributes of isoparametric curves on the interference and cutting width during the process through planning the cutting path on the constructed free-form surface and establishing cutting path isoparametric curve. At the same time, according to the research on the relationship among the cutting path, the scallop height and the attributes of curvature of curve, some laws affecting the machining efficiency, accuracy and interference were obtained. In addition, the research shows that the cutting width can be improved effectively by optimizing the anastomosis curve of the cutting tool radius, the scallop height and machined surface's curvature. The experimental results show the effectiveness of the method in analyzing CNC milling process based on the attributes of the curvature of curves, the machining efficiency can be increased 5%~8%.

Key words: free-form surface; curvature attribute;
computer-numerical-control (CNC) milling; tool path; blade

自由曲面是指那些不能由初等解析曲面组成, 而以复杂方式自由变化的曲面. 自由曲面一般

收稿日期: 2012-04-27

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130114.1726.201301.25_Q04.html

基金项目: 中航产学研创新基金(CXY2010SH29)

作者简介: 王明海(1971—), 男, 山东济南人, 副教授, 博士, 主要研究方向为精密、超精密加工技术.

形状复杂、精度要求高,且难以用数学表达式精确表示,其加工一直是生产中的难题。但自由曲面所具有的复杂性、功能特征能够提高零件的工作效率、缩小系统结构尺寸,已经在航空航天、造船、国防等领域获得了广泛应用^[1],尤其是近些年国家对航空航天产业大力支持,这就更加要求制造业提高对自由曲面的加工精度和加工效率,尤其是加工效率。

在航空发动机制造中,各类自由曲面类零件所占比约 30%^[2],是航空发动机中的核心零件。该类零件常见加工工艺主要有数控切削、电解加工、精密锻造、铸造等^[3]。

目前自由曲面切削加工的研究^[4-6]主要侧重于如何控制自由曲面的刀具切痕、加工带宽、刀具干涉。研究内容主要涉及功能自由曲面的生成方法^[7-10]、自由曲面的刀具路径生成方法^[10-13]、刀具与加工表面的干涉判别^[14]等。但这些研究并没有考虑自由曲面的曲率属性对数控加工的影响,也没考虑曲率属性与干涉之间的密切联系。为分析自由曲面曲率属性对加工过程的影响,提出一种自由曲面曲率属性分析的研究方法。该方法基于 Gauss 曲率分析,计算量小,通过 Gauss 曲率分析能有效避免加工中的干涉问题,并结合残留高度、曲面曲率、刀具半径 3 个因素对加工带宽度的影响,根据加工表面沿切削行进方向的曲率来制定加工策略,旨在选择合理的球头刀半径,优化切削参数进行加工,达到刀位触点处曲率吻合,在加工精度允许的范围内提高加工效率。

1 自由曲面数控加工干涉分析

由于自由曲面类零件形状复杂,在曲面的局部内凹区域及组合曲面的交线附近,刀具常常可能与加工零件曲面发生干涉。本文针对球头刀加工自由曲面时的刀具干涉进行研究。

刀具干涉是指加工过程中,刀具切削了非加工对象,工件材料被过切或欠切。刀具过切干涉的发生情况比较复杂,不容易检验,在自由曲面加工过程中也是最常发生的一种干涉形式,如图 1 为球头刀加工自由曲面时发生干涉。 p_{cc} 为切削点, p_{cl} 为刀具定位点, R 为刀具半径, i 为刀轴矢量。

刀具与曲面发生干涉时满足关系式(1)

$$(l_{op} - l_{op}^*) \cdot n^* \leq 0 \quad (1)$$

式中 l_{op} 为 O 点到刀具底面上任意点 p 的矢量; l_{op}^* 为矢量 l_{op} 在曲面上的投影; n^* 为与矢量 p^* 的端点相对应的曲面法矢。

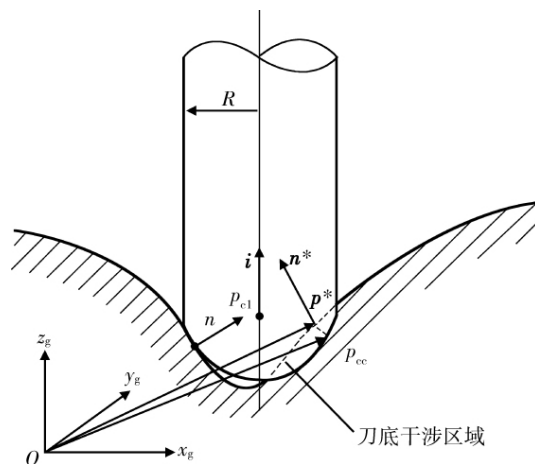


图 1 球头刀干涉曲面

Fig. 1 Ball-end cutter interference surface

当刀具接触点处工件表面的曲率大于刀具回转面的曲率时发生曲率干涉,曲率干涉将破坏被加工表面的 2 阶连续性,直接影响曲面的光顺性。

对于光滑曲面(至少相邻两面相切连续),要保证加工过程无干涉现象,必须要求球形刀的刀具曲率半径小于曲面凹处的最小曲率半径。因此,在对曲面进行加工之前,分析整个待加工曲面的最小内凹曲率半径,并以此作为刀具半径选择的依据,对保证加工过程无干涉现象具有十分重要的意义。

2 自由曲面叶片型面曲率分析

2.1 自由曲面 Gauss 曲率的微分几何分析

曲面上任意点处的 Gauss 曲率

$$K = \frac{L \cdot N - M^2}{E \cdot G - F^2} \quad (2)$$

其中 L, N, M 和 E, G, F 分别为曲面的第一基本量和第二基本量,其计算方式分别如式(3)所示

$$\begin{aligned} E &= r_u^2 & F &= r_u \cdot r_v & G &= r_v^2 \\ L &= n \cdot r_{uu} & M &= n \cdot r_{uv} & N &= n \cdot r_{vv} \\ n &= \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|} \end{aligned} \quad (3)$$

加工表面沿切削行进给方向为 b ,则沿方向 b 的法截线曲率半径为

$$R_b = \frac{Edu^2 + 2Fdu dv + Gdv^2}{Ldu^2 + 2mdudv + Ndv^2} \quad (4)$$

由图 2 几何关系根据欧拉公式,沿 b 方向法曲率

$$k_b = k_1 \cos^2 \beta + k_2 \sin^2 \beta$$

其中 k_1 和 k_2 分别为该触点的主曲率, $k_1 = 1/R$, $k_2 = 1/R \cos \alpha$ 。

故刀具有效切削半径为

$$r_b = 1/k_b$$

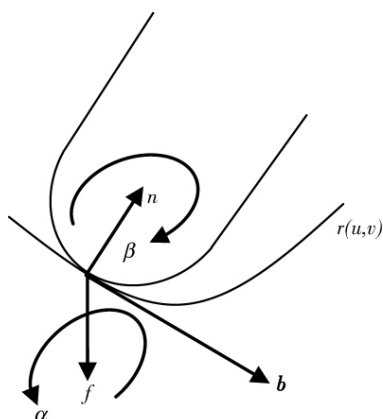


图 2 球头刀加工曲面几何关系

Fig. 2 Geometric relations diagram of ball-end cutter processing surface

2.2 基于 Gauss 曲率自由曲面型面分析云图

曲率分析包含平均曲率、Gauss 曲率、极大曲率、极小曲率、最大正曲率和最小正曲率等,每一种曲率属性都可以从不同角度描述曲面型面信息,其中 Gauss 曲率主要反映的是曲面的弯曲程度,因此在三维软件中常把 Gauss 曲率分析作为分析曲面造型中内部曲面质量和连接情况的主要依据。当曲面的 Gauss 曲率变化速率较快时,表面曲面内部变化比较大,也就表明曲面的光滑程度越低,而 2 个连接的曲面如果在公共边界上的 Gauss 曲率发生突变就表示 2 个曲面的 Gauss 曲率并不连续,通常也叫曲率不连续,说明 2 个曲面的连接没有到达 G^2 连接质量。

在三维软件中,通常都是使用曲面表面的颜色分布和变化来表示曲面 Gauss 曲率的分布,如图 3

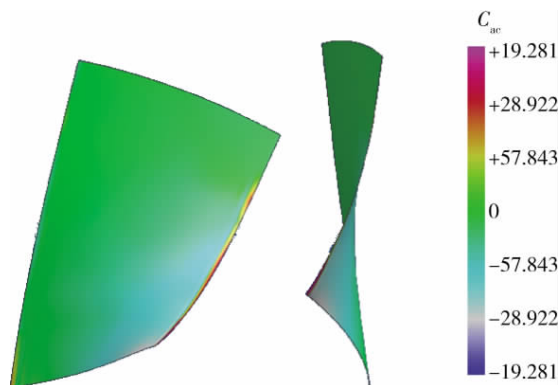


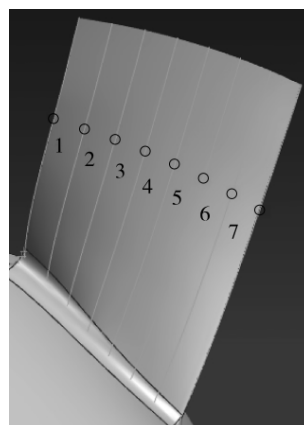
图 3 自由曲面叶片型面 Gauss 曲率分析云图

Fig. 3 Free surface blades surface curvature cloud for Gauss analysis

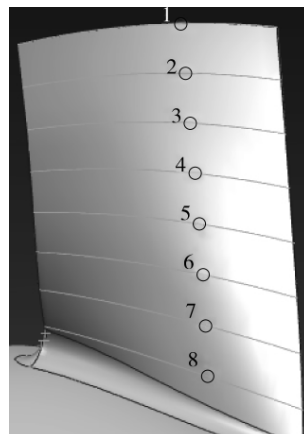
所示,通过这些颜色的变化就可以直观地知道曲面的 Gauss 曲率的变化,而颜色的突变就表示 Gauss 曲率的突变。图中 C_{ac} 表示曲率变化的幅值。

3 自由曲面曲率对加工过程中干涉的影响

分析自由曲面曲率对加工过程中干涉的影响,首先分别对自由曲面叶片型面进行 u 向和 v 向等参数曲线划分,如图 4(a)、图 4(b)所示,并对自由曲面叶片进行参数离散化曲率采样,如图 5 所示。



(a)



(b)

图 4 等参数曲线划分

Fig. 4 Isoparametric curves division

通过 u 向和 v 向的等参数线划分,得到 u 向和 v 向等参数线曲率变化图,如图 6~图 8 所示。

通过图 6 和图 8 对比得出,数控加工时,叶片 u 向曲率变化大,不易加工,图 8 恰好反映了 v 向等参数曲线变化平缓,易于加工。通过图 6~图 8

的综合对比分析,可知叶片前后缘处变化较大,而且叶片前后缘处曲率较大,加工过程中容易发生干涉,需要进行合理的切削参数优化和刀具参数优化。

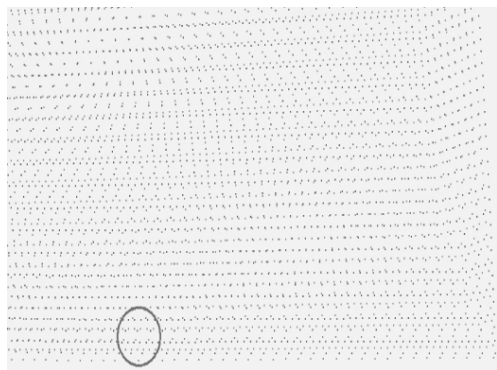


图 5 离散化曲率采样

Fig. 5 Discrete sampling curvature

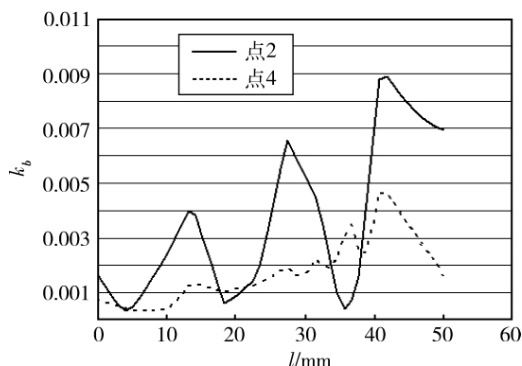


图 6 u 向曲线(2,4)等参数曲率分析

Fig. 6 Isoparametric curvature analysis of u to curve (2,4)

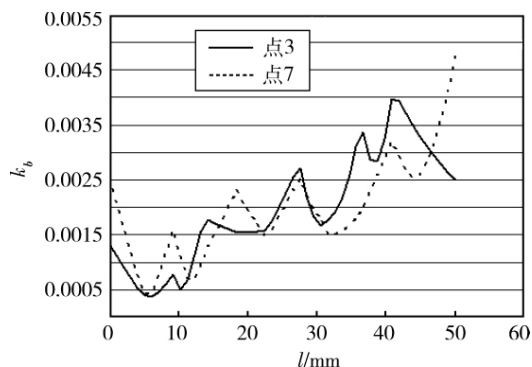


图 7 u 向曲线(3,7)等参数曲率分析

Fig. 7 Isoparametric curvature analysis of u to curve (3,7)

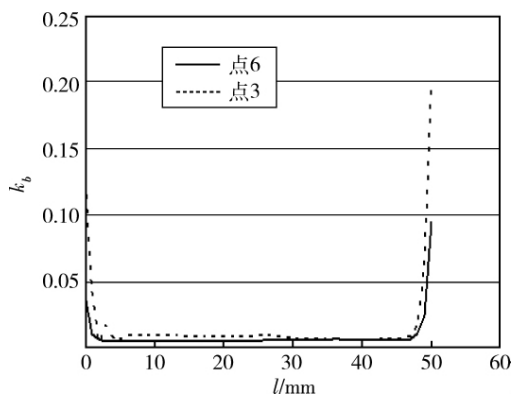


图 8 v 向曲线(3,6)等参数曲率分析

Fig. 8 Isoparametric curvature analysis of v to curve (3,6)

4 曲率因素对加工带宽度的影响分析

文献[15]指出,用球形刀加工自由曲面,刀痕在切削行间构成了残留高度 h . 由如图 9 所示的几何关系,在允许残留高度 h 的范围内,可得加工带宽度参数关系公式(5)

$$d_w \leq 2 \sqrt{2Rh/(1-Rk_b)} \quad (5)$$

$$R \leq 1/k_{\max} \quad k_{\max} \geq 0$$

式中 R 为球头刀半径; d_w 为加工带宽度; h 为残留高度; k_b 为加工表面沿切削行进给方向的法曲率。

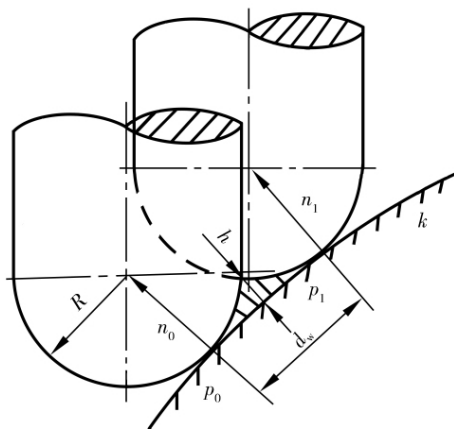


图 9 加工带宽度关系图

Fig. 9 Relation graph of cutting width

通过放大区间变量,采用分离分析的方法,对影响加工带宽度的因素进行分析. 当加工的表面沿切削进给方向的法曲率恒定,球头刀半径由 5 mm 增大到 25 mm 时,加工带宽度随着刀具半径的增大而增大,如图 10 所示. 若加工表面沿切削进给方向的法曲率发生变化,当采用相同半径的

球头刀进行加工,通过分析可得法曲率较大区域获得的加工带宽度较大,如图 11(a)所示。值得注意的是当加工表面进给方向的法曲率较小时,允许残留高度越大,得到的加工带宽度越宽,如图 11(b)所示。

当采用固定半径的球头刀,加工表面沿切削行进方向的法曲率发生变化的时候,在一定范围内,加工带宽度随加工曲面切削进给方向的法曲率单调递增,而且变化速率较缓慢,但是当处于临界值位置时,加工带宽度变化斜率产生变化,变化速率较快,如图 12 所示。若采用不同半径的球头刀进行加工,在加工表面沿切削行进方向的法曲

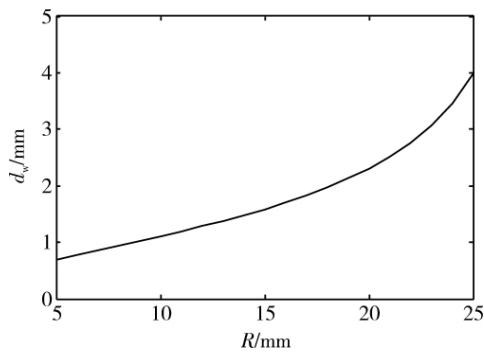
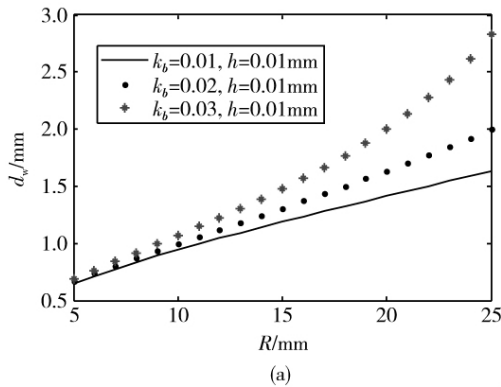
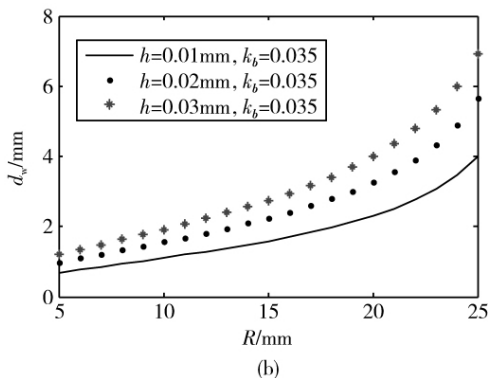


图 10 球头刀半径对加工带宽度的影响

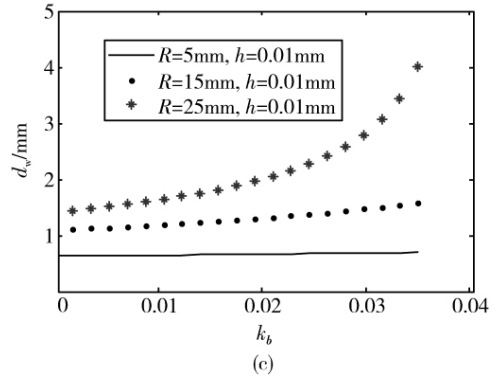
Fig. 10 Influence of ball-end cutter radius on cutting width



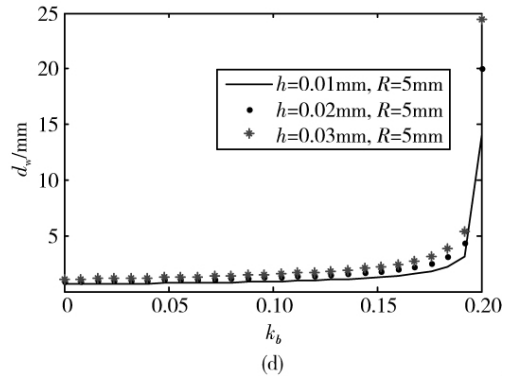
(a)



(b)



(c)



(d)

图 11 影响加工带宽度因素曲线

Fig. 11 Factors curves influential to cutting width

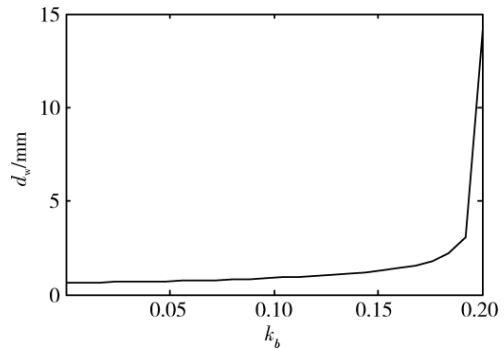


图 12 加工表面法曲率对加工带宽度影响

Fig. 12 Influence of k_b on cutting width

率一定的情况下,刀具半径越大,得到的加工带宽度越大,而且通过图 11(c)可以分析得到,刀具半径越大,随着加工表面沿切削行进方向的法曲率变化,加工带宽度的变化越明显。值得注意的是,当刀具半径较小时,加工不同表面,允许残留高度的大小对加工带宽度几乎没有影响,如图 11(d)所示。

5 试验验证

对曲率分析法形成的轨迹与传统加工方法进行了统计,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出采用

曲率分析法形成的刀具轨迹长度小于传统加工方法形成的轨迹长度,有效地提高了加工效率,可以推断,曲面曲率变化越大,采用曲率分析法的优势越明显。

根据本文提供方法,以某型号整体叶盘自由曲面叶片为例,采用三维软件进行自由曲面叶片三维建模仿真。图13为球头刀加工自由曲面仿真过程,图14为加工试验结果。在仿真无误的情况下,进行了自由曲面叶片加工试验,加工结果表明:采用本文提出的方法可以满足自由曲面的加工需要,提高自由曲面的加工效率。

表1 不同计算方法下球头刀形成的刀具轨迹长度对比

Table 1 Comparison of tool path length of different calculation methods of ball-end cutter

	形成轨迹方法	N/条	l/mm	比例
球头刀	传统分析方法	42	13 085	1.08
	曲率分析法	42	12 109	

注: N 为刀具轨迹数目, l 为刀具轨迹总长度。

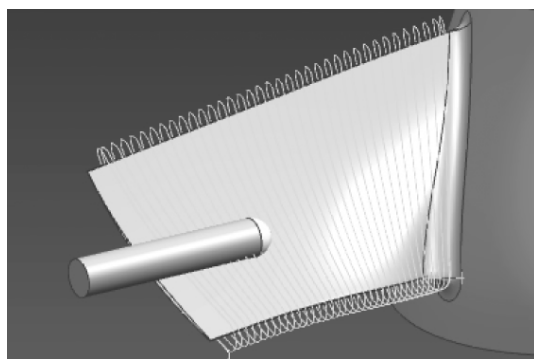


图13 球头刀加工自由曲面仿真过程

Fig. 13 Simulation process of ball-end cutter processing free surface

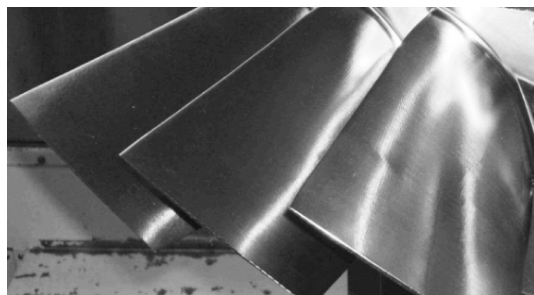


图14 采用曲率分析法实际加工的叶片

Fig. 14 Blades of actual processing by curvature analysis

6 结 论

本文针对自由曲面叶片数控加工过程中刀具干涉曲面这一常见问题,通过对自由曲面曲率属性分析,主要分析自由曲面叶片的 Gauss 曲率,结合加工带宽度影响因素,合理制定出加工方案,选择合理的切削参数、非切削移动参数和刀具参数。针对自由曲面的曲面结构特点,重点分析了加工表面沿切削行进给方向的法曲率对加工带宽度的影响。采用放大局部变量,分离分析的方法,除考虑加工表面凹处的最小半径之外,刀具半径越大,在同样残留高度的情况下,加工带宽度越大,从而加工效率越高。在刀具曲率与加工表面曲率匹配的情况下,采用曲率分析法加工自由曲面,加工效率可提高 5%~8%。

参考文献:

- [1] 李海滨,余颖婷. 叶片数控加工关键技术的研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(11): 14-17.
LI Haibin, YU Yingting. Research on the key technologies of blade's NC machining[J]. Journal of Machine Tool and Hydraulics, 2010, 38(11): 14-17. (in Chinese)
- [2] 刘维伟,张定华,史耀耀,等. 航空发动机薄壁叶片精密数控加工技术研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(3): 331-334.
LIU Weiwei, ZHANG Dinghua, SHI Yaoyao, et al. Study on net-shape NC machining technology of thin-blade of aeroengine[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2004, 23(3): 331-334. (in Chinese)
- [3] 《透平机械现代制造技术丛书》委员会. 叶片制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 8-12.
- [4] 李正强,陈志同,肖俊. 鼓形刀宽行刀位优化纬线分割算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(6): 731-735.
LI Zhengqiang, CHEN Zhitong, XIAO Jun. Latitude distribution algorithm of cutter position optimization on drum-like cutter for strip-maximization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(6): 731-735. (in Chinese)
- [5] Ding S, Mannan M A, Poo A N, et al. Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surface[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(2): 141-153.
- [6] 金曼,张俐,陈志同. 圆环面刀具五坐标加工端点误差控制刀位优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1225-1228.
JIN Man, ZHANG Li, CHEN Zhitong. End-points error controlling method for torus tool position optimization in five-axis NC machining[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(9): 1225-1228. (in Chinese)
- [7] 王瑞秋,陈五一,金曼. 多点切触加工中的局部干涉分析

- [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(5): 580-584.
WANG Ruiqiu, CHEN Wuyi, JIN Man. Local interference identification of multi-point machining[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(5): 580-584. (in Chinese)
- [8] 陈浪, 秦大同, 郑小光. 基于形状特征的自由曲面建模技术[J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 105-108.
CHEN Lang, QIN Datong, ZHENG Xiaoguang. Free-form surface modeling based on shape characteristic in reverse engineering[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(11): 105-108. (in Chinese)
- [9] 丁毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 540-544.
DING Yi, GU Peifu. Freeform reflector for uniform illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 540-544. (in Chinese)
- [10] Erdim H, Lazoglu I, Ozturk B. Feedrate scheduling strategies for free-form surface[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(7/8): 747-757.
- [11] 王太勇, 张志强, 王涛, 等. 复杂参数曲面高精度刀具轨迹规划算法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 109-113.
WANG Taiyong, ZHANG Zhiqiang, WANG Tao, et al. High precision tool path planning algorithm for complex parametric surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 109-113. (in Chinese)
- [12] 谢叻, 周儒荣, 阮雪榆. 自由曲面自适应投影法精加工刀轨生成[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(10): 1382-1384.
XIE Le, ZHOU Rurong, RUAN Xueyu. NC tool path generation based on adaptive projection method for free form surface[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(10): 1382-1384. (in Chinese)
- [13] Krimpenis A, Fousekis A, Vosniakos G. Assessment of sculptured surface milling strategies using design of experiments[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 25(5/6): 444-453.
- [14] Rao A, Sarma R. On local gouging in five-axis sculptured surface machining using flat-end tools[J]. Computer-Aided Design, 2000, 32(7): 409-420.
- [15] 刘雄伟, 张定华, 王增强, 等. 数控加工理论与编程技术[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2001: 115-120.