

面向螺旋铣削的叶身曲面重构的参数化方法^{*}

Parameterization Method in Reconstruction of Blade Surface for Spiral Milling

西北工业大学现代设计与集成制造教育部重点实验室 刘维伟 高晓娟 单晨伟 杨 帅

[摘要] 针对螺旋铣削中普通造型方法得到的叶身型面往往出现扭曲,严重影响螺旋铣削刀位轨迹的问题,提出了一种针对螺旋铣削的叶身曲面重构的参数化方法。该方法首先根据单条叶片截面线的特征,采用累加弦长参数化和等弧长参数化离散的方法,实现单条截面线的参数化,从而得到高质量的截面线。然后在此基础上,从叶身曲面的V向和U向对叶身曲面重新参数化。最后对截面线进行放样,实现叶身曲面的重构。试验结果表明叶身曲面质量较高,能够较好地满足螺旋铣削刀位轨迹的规划要求。

关键词: 螺旋铣削 叶身曲面 重构 截面线 参数化

[ABSTRACT] The distortion often appears in spiral milling by using ordinary modeling methods of blade. In order to figure out this kind of phenomenon, the parameterization methods of blade surface reconstruction for spiral milling are proposed. Firstly, according to the features of a single blade section line, accumulation of chord length parameterization method and equal arc length parameterization method are applied to realize parameterization of single blade section. The high quality blade section line can be obtained. And on this basis, blade surface is re-parameterized from the V and U directions. Finally, reconstructed blade surface is obtained through parametric blade section lines. This method is proved practically and can obtain high quality blade surface. Then, the tool path of spiral milling can be well satisfied.

Keywords: Spiral milling Blade surface Reconstruction Section line Parameterization

目前新型航空发动机叶片大多采用弯掠结构,增加了铣削编程的难度,传统的铣削方法已经不能满足新型薄壁叶片加工要求。螺旋铣削方法由于其良好的工艺性和加工轨迹分布特点,已广泛应用于发动机薄壁叶片的精密加工。该方法能够获得较好的加工质量和较高

的加工效率。但叶片螺旋铣削方法对叶身曲面造型要求较高,普通造型方法得到的叶身型面往往出现扭曲,影响螺旋铣削的刀位轨迹,因此需要对叶身型面进行重新构型,以满足其要求。一般而言,叶片型面构造过程是先构造出叶型的各截平面曲线外形(截面线拟合),然后将各个截面线在径向拉伸得出实体模型^[1]。但是这样得到的叶身型面,往往出现扭曲现象,严重降低数控加工的质量。通过参数化的方法来实现叶身曲面重构则可以有效解决这一问题^[2]。近年来国内外关于参数化造型技术的研究越来越多,但由于叶片类零件型面和截面线是一种复杂的自由型面和自由曲线,因此其参数化造型相对困难,关于这方面的研究也比较少。叶身曲面重构中可采用的参数化方法有均匀参数法、弦长参数化法、等弧长参数化法和弦线容差法等。本文采用累加弦长参数化和等弧长参数化离散的方法实现单条截面线的参数化,解决单条截面线曲率挠动问题;在此基础上,用规范弧长参数化方法实现叶身型面V方向的参数化,将后缘点参数统一,再次利用规范弧长参数化方法,实现叶身曲面U方向的参数化。最后将截面线进行放样,即可实现叶身曲面重构,结果表明本方法实用可行,为叶片的螺旋铣削奠定了良好的基础。

1 叶身截面线离散

叶片造型过程中遇到的首要问题是叶片截面线不光滑造成叶身曲面造型扭曲,刀位轨迹不规整导致表面加工产生缺陷,这种缺陷并不是由叶片设计数据本身导致的问题,而是由叶身曲面参数“不规整”导致的。

因此在规划叶片螺旋铣削轨迹之前,必须对截面线进行重新处理。首先对截面线进行离散,使截面数据重新参数化。通过截面数据的参数化离散能有效解决叶身截面线的曲率挠动,保证截面曲线的高阶连续性,是实现叶片参数化造型的基础。组成叶身截面线的曲线有叶身型线、缘头圆弧和缘头拼接曲线。叶身型线有叶背曲线和叶盆曲线组成。本文根据截面线曲线的特点采用不同的方法进行截面线的离散。

1.1 缘头过渡区域拼接

在缘头和叶身截面线相交的区域曲率变化较大。

^{*} 国家科技支撑计划(2008BAF32B10)资助。

因此必须先对缘头区域进行拼接光滑处理,形成一过渡区域,如图1所示。

将叶身型线缩短一定的距离,满足缘头圆弧端点 d_0 与截面线端点 d_2 之间的距离小于0.5mm, d_1 为 d_0 点的切矢与 d_2 点的切矢的交点。将这3点作为控制顶点,构造1条二次贝齐尔曲线。二次贝齐尔曲线的方程为^[3]:

$$p(t) = [1 \ t \ t^2] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}, \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (1)$$

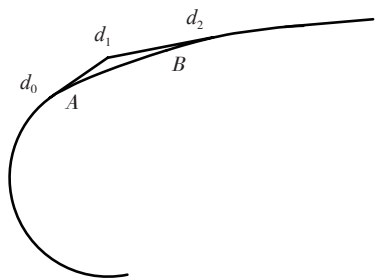


图1 拼接曲线
Fig.1 Splicing curve

根据贝齐尔曲线的切矢量性质,此过渡贝齐尔曲线与缘头圆弧曲线和截面线相切,完成过渡区域的光顺。

1.2 中弧线的离散方法

中弧线是叶片截面线的内切圆圆心构成的一条连续曲线,它是叶片设计的重要基准之一,也是判定截面线离散的依据^[4],如图2所示, R_{max} 是最大的内切圆半径,它将中弧线分成了两段。根据叶身截面中弧线的定义可知,叶背、叶盆和中弧线3条曲线上的点存在一一对应的关系^[2]。因此本文首先对中弧线进行离散,以此为基础对叶盆和叶背曲线进行离散。

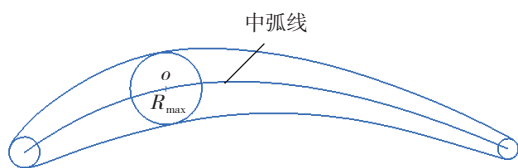


图2 叶身截面线的中弧线
Fig.2 Camber line of blade section line

为了保证最终插值得到的截面线质量,要求离散后相邻两段曲线的弧长之比不能太大。弦长参数化方法是公认的最佳参数化方法,它在某种程度上可看作近似弧长参数化,能克服采用均匀参数化所出现的尖点问题^[3]。因此本文采用弦长参数化的方法对中弧线进行离散。

弦长参数化法也称为累加弦长参数化方法,该方法的数学表达式为^[5]:

$$\begin{cases} u_0 = 0 \\ u_i = u_{i-1} + |\Delta p_{i-1}|, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

图3为中弧线离散方法,圆 O 为叶身截面最大内切圆的圆心,半径为 R_{max} ,该圆与叶背和叶盆曲线分别切于 A 、 B 点。假设中弧线离散数据点的数目为 n_z ,即在参数域 $(0,1)$ 上数据点的数目为 n_z 。为了使离散后各曲线的弧长近似相等, n_z 的值不能取的太小。

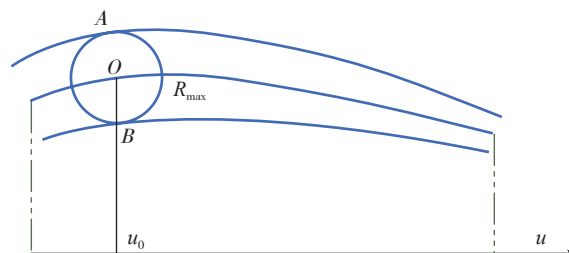


图3 中弧线的离散方法
Fig.3 Discrete method of camber line

至此,可以得到中弧线的离散点数列。假设得到的中弧线离散点的数据点序列为: $z_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 。

以该点序列为圆心做叶身型线的内切圆,与叶盆曲线和叶背曲线相切,得到两组切点序列:叶背切点序列 $b_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 和叶盆切点序列 $p_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 。这两组序列即为叶背曲线离散数据点序列和叶盆曲线离散数据点序列,如图4所示。

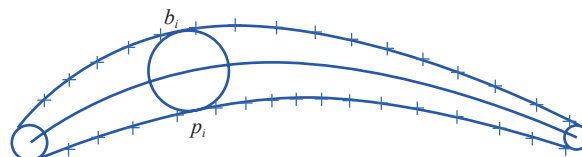


图4 叶盆和叶背曲线的离散点
Fig.4 Discrete points of suction surface curve and pressure surface curve

1.3 缘头圆弧区域离散

前缘头圆弧区域的离散采用等弧长参数化法,即离散后各段的圆弧长度是相等的。若缘头圆弧区域的离散点数目要求为 n_y ,缘头圆弧的半径为 R ,则等弧长参数化后,各个圆弧段的长度为:

$$l_y = \frac{\pi R}{n_y} \quad (3)$$

1.4 缘头过渡区域离散

由于叶身型线和缘头圆弧曲线分别是按照弦长参数化方法和等弧长方法离散的。通常用这两种方法离散以后,叶身型线的曲线弧长和缘头圆弧曲线的曲线弧长相差较大,曲线形状出现不稳定的几率比较大,因此

必须对过渡曲线进行离散,使得各相邻曲线弧长均匀变化。图5所示的AB段为过渡的贝齐尔曲线,以叶背曲线为例,叶背曲线的离散圆弧长度近似为 $l_z=L/n_z$,缘头圆弧区域各圆弧段的长度为公式(3)的 l_y 。

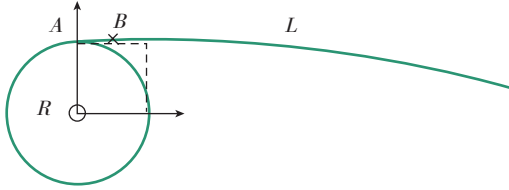


图5 过渡区域离散

Fig.5 Discrete method of transitional region

确定过渡区域的离散点的数目。过渡区域AB段的离散采用等弧长方法离散。假设过渡区域离散点的数目为 n_g ,则AB段离散后各曲线的弧长为:

$$l_g = \frac{l_{AB}}{n_g} \quad (4)$$

当相邻两段曲线弧长之比小于[1,1.5]时,得到的曲线外形是稳定的^[2]。因此过渡区域的弧长需要满足以下条件:

$$\begin{cases} \frac{l_g}{l_y} \leq [1, 1.5] \\ \frac{l_z}{l_g} \leq [1, 1.5] \end{cases} \quad (5)$$

由公式(4)和(5)可以确定过渡区域离散点的数目。即:

$$\begin{cases} \frac{l_{AB}}{l_y n_g} \leq [1, 1.5] \\ \frac{l_z n_g}{l_{AB}} \leq [1, 1.5] \end{cases} \quad (6)$$

经过这些参数化的数据离散后,即可得到合理的叶身截面线离散数据点序列。

2 构建封闭的叶身截面线

离散后得到的叶身截面数据点如图6所示。

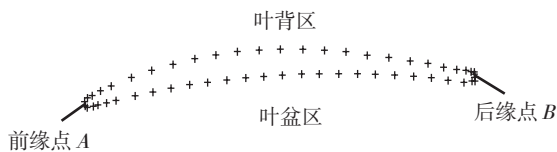


图6 叶身截面离散数据点

Fig.6 Discrete points of blade section

为使这些点插值出一条光滑且完整的叶身截面线,还需要对离散点排序^[6]。定义截面线的数据点采用前

缘点A→叶背区→后缘点B→叶盆区→前缘点A的顺序排列。根据截面离散数据点,采用参数曲线拟合即可得到一条完整的参数化截面线。

3 叶身曲面参数化重构

通过上述的叶身截面线离散,形成了一条封闭且有序的叶身截面线,使单条叶身截面线参数不规整问题得以解决,从而得到质量较高的截面线。但是叶身曲面的参数紊乱,仍然会导致叶片曲面不光顺,如图7的曲面曲率图所示,无法合理规划出螺旋铣削的刀位轨迹。

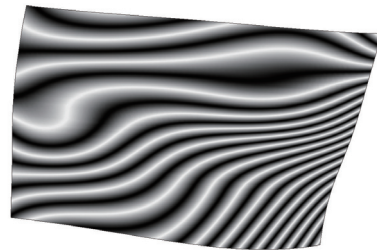


图7 参数调整前的曲面曲率斑马纹图

Fig.7 Zebra-stripe of surface curvature before parameter adjustment

本文在得到质量较高的截面线的基础上,分别沿叶身曲面的V向和叶身曲面的U向对叶身曲面重新参数化,进而进行叶身曲面重构。

本文对叶身曲面的参数化,就是对叶身曲面的数据点进行参数化。曲面数据点的参数化就是给每一个数据点赋予1对参数值,使位于插值曲面上的这些点与UV参数平面上参数域内的点建立一一对应关系^[5]。

3.1 叶身曲面沿V向参数化

本文前面定义的截面线是从前缘点开始,因此各前缘点的参数值均为0,对叶身各条截面线采用等弧长方法离散,假设离散点数目为n,将第一条截面线进行离散,则离散后得到第一条截面线的点序列 $P_{i,0}$ ($i=0,1,2,\dots,n-1$),其各点的参数为 $u_{i,0}$ ($i=0,1,2,\dots,n-1$)。将其进行规范弧长参数化处理后,其各点新的参数值为:

$$u'_{i,0} = \frac{i}{n-1} \quad (i=0,1,2,\dots,n-1) \quad (7)$$

第二条截面线的点序列 $P_{i,1}$ ($i=0,1,2,\dots,n-1$),其各个点对应的参数为 $u_{i,1}$ ($i=0,1,2,\dots,n-1$)。采用同样的方法进行规范化处理,其各点新的参数值为:

$$u'_{i,1} = \frac{i}{n-1} \quad (i=0,1,2,\dots,n-1) \quad (8)$$

若截面线的数目为m,依次类推,一直可以得到第m条截面线各点的规范化参数。

这样就可以实现各个截面线沿V向的重新参数化。

3.2 叶身曲面沿U向参数化

叶身曲面沿 V 向参数化后,设 m 条截面线后缘点的参数值为 $u'_{h,j}$ ($j=0,1,2,\dots,m-1$),则公共的 U 向参数化可取他们的算术平均值:

$$u''_{h,p} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} u'_{h,i} \quad (9)$$

然后进行各截面线的参数域变换,以第一条截面的参数域变换为例,设截面线中叶背数据点为 n_i ,叶盆数据点为 n_p ,设参数变换后得到新的数据点参数序列为 $u''_{i,0}$ ($i=0,1,2,\dots,n-1$)。对叶背数据参数域变换得:

$$u''_{i,0} = \frac{u''_{h,p}}{u'_{h,0}} \cdot u'_{i,0}, \quad i=0,1,2,\dots,n_b \quad (10)$$

对叶盆数据参数域变换得:

$$u''_{i,0} = u''_{h,p} + \frac{1 - u''_{h,p}}{1 - u'_{h,j}} \cdot (u'_j - u'_{h,j}), \quad j=0,1,2,\dots,n_b \quad (11)$$

将各截面线后缘点参数调整一致后,各后缘点的参数值为 $u''_{h,p}$,则叶身截面线前缘点到后缘点的参数域范围为 $[0, u''_{h,p}]$,后缘点到前缘点的参数域范围为 $[u''_{h,p}, 1]$ 。以第一条截面线为例,其截面线长度为 L ,前缘点到后缘点的长度为 L_1 ,后缘点到前缘点的长度为 L_2 ,将 L_1 等弧长离散,离散点数目为 c_1 ,将其进行规范弧长参数化处理,其各点新的参数值为:

$$s_{i,0} = \frac{u''_{h,p}}{c_1 - 1} \times i \quad (i=0,1,\dots,c_1-1) \quad (12)$$

将 L_2 进行等弧长离散,离散点数目为 c_2 :

$$c_2 = \text{int}\left(\frac{L_2}{L_1} \times c_1\right) \quad (13)$$

将其进行规范弧长参数化处理,其各点新的参数值为:

$$s_{i,0} = u''_{h,p} + \frac{1 - u''_{h,p}}{c_2 - 1} \times i \quad (i=0,1,\dots,c_2-1) \quad (14)$$

依次类推,对各条截面线重新参数化,完成叶身曲面的重新参数化。

3.3 叶身曲面重构

新的截面线可以通过对参数调整后的数据点进行插值得到,然后将这 m 条截面线参数对齐放样,即可以得到符合要求的高质量叶身曲面,如图 8 所示。

提取重构前后的曲面等 V 方向参数线进行比较。图 9 为叶身曲面重构前的等 V 参数线,图 10 为叶身曲面重构后的等 V 参数线,可以看出,进行重构后,叶身曲面的参数线得到了明显的改善。证明本文所提出的叶身曲面重构的方法是可行的。

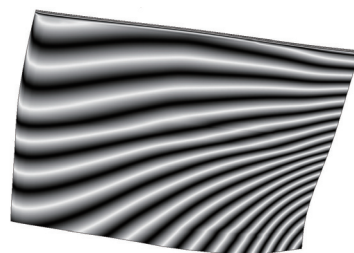


图8 参数调整后的曲面曲率斑马纹图
Fig.8 Zebra-stripe of surface curvature after parameter adjustment

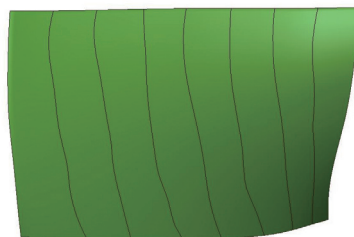


图9 叶身曲面重构前的参数化线
Fig.9 Parameter lines before reconstruction of blade surface

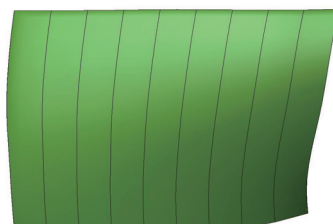


图10 叶身曲面重构后的参数化线
Fig.10 Parameter lines after reconstruction of blade surface

4 结束语

本文采用一系列的参数化方法,实现叶身截面线参数化,通过叶身曲面重构获得高质量的叶身型面,实例表明本方法具有较强的实用价值,为叶片的螺旋铣削奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] 白瑛,张定华,任军学,等.叶片高质量造型方法研究.机械科学与技术,2003(3):447-449.
- [2] 刘维伟,张定华,王军伟,等.叶片造型网格扭曲的校正方法研究.机床与液压,2004(1):65-67.
- [3] 李原,张开富,余剑锋.计算机辅助几何设计技术及应用.西安:西北工业大学出版社,2007.
- [4] 张力宁,张定华,陈志强.基于等距线的叶片截面中弧线计算方法.机械设计,2006(5):39-41.
- [5] 施法中.计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条.北京:高等教育出版社,2001.
- [6] 王军伟.叶片类曲面造型中的参数网格优化技术研究[D].西安:西北工业大学,2003.

(责编 良辰)