

三元整体叶轮的几何造型与数控加工刀具路径规划*

曹利新¹, 苏云玲¹, 金玉淑²

(1 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024

2 沈阳鼓风机 (集团) 有限公司 沈阳透平机械股份有限公司, 辽宁 沈阳 110022)

摘 要: 采用三次 B 样条曲线对叶轮中性面上盖盘和轴盘的两组数据点进行插值, 得到盖盘曲线和轴盘曲线, 进而得到直纹面形式的叶轮中性面; 按照叶片的厚度做盖盘曲线和轴盘曲线的变距偏置曲线, 得到叶片曲面的直纹化表达式; 在此基础上, 讨论了三元叶轮加工的刀具路径规划方法, 给出了确定球头刀刀心位置和计算残留误差的两种迭代算法, 最后给出了加工实例。

关键词: 叶轮; 造型; 刀具路径规划*; 数控加工

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2005) 02-0188-05

Geometrical design and tool-path generation of three dimensional impeller

CAO Lixin¹, SU Yun-ling¹, JIN Yu-shu²

(1 Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining of Ministry of Education, Dalian Univ. of Technology, Dalian 116024, China

2 Shenyang Air blower (Group) Co., Ltd. Shenyang Touping Machinery Joint-stock Co., Ltd. Shenyang 110022, China)

Abstract By using cubic B-spline curve technology, two group of data of shroud camber line and hub camber line were interpolated. According to the thickness of the blade, variable distance offset curves of the shroud camber line and hub camber line were acquired, then the blade surface can be expressed by ruled surface. Based on the above, NC machining tool-path of three dimensional impeller were generated. Two iterative algorithms were proposed. One is for determining the cutter center, the other is for determining geometrical cusp height. Finally, the machined 3D impeller is given.

Key words Impeller; Modeling; Tool-path generation*; Numerically controlled machining

1 引 言

三元叶轮是根据透平式流体机械内部的三元真实流动状况而设计的, 能大幅度的降低能耗, 在流体机械中的压缩机、鼓风机和水泵中广泛应用。整体 (半开) 式三元叶轮的加工是指轮毂和叶片在同一毛坯体上进行的整体加工, 而不采用叶片加工成形后焊接在轮毂上的工艺方法, 所以在加工中有很大的难度, 被公认为机械加工的“难点”。国外在这方面的研究大多集中在生产叶轮的公司内, 如美国的 NREC 和 NGERSOLL-RAND, 日本的日立、瑞士的 SULZER 等, 出于技术保密的原因, 几乎很难查到这方面的技术论文。90 年代中期国内部分厂家引进国外叶轮加

工软件进行叶轮加工和仿真, 如 MAX5, UG, VeriCUT 等, 但这种软件价格高昂, 而且这些软件为一封闭的系统, 其中的关键技术无从获得。为了提高我国整体叶轮的加工水平和叶轮 CAM 软件的开发, 有必要对三元整体叶轮的几何造型和刀具路径规划有一个深入的认识。2001 年 Chen Shang-Liang^[1] 采用反求工程的方法获得了叶轮曲面的控制点, 并利用 UG CAD/CAM 软件进行了叶轮曲面造型和刀具路径规划, 通过 VERICUT 软件对叶轮的加工过程进行了仿真。2002 年于源^[2] 博士针对测量得到的三元叶轮数据, 在能量法的基础上, 提出了一种基于平均曲率的目标函数, 对叶轮型线进行了光顺。此外, 文献 [3, 4] 对三元叶轮数控加工的工艺问题进行了探讨。

* 收稿日期: 2004-04-07; 修订日期: 2004-08-31。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50105001)。

作者简介: 曹利新 (1966—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为精密复杂曲面的设计与加工。Email: caosn@dlut.edu.cn

本文采用三次 B 样条曲线对叶轮中性面上盖盘和轴盘的两组数据点进行插值, 得到盖盘曲线和轴盘曲线, 进而得到直纹面形式的叶轮中性面; 按照叶片的厚度做盖盘曲线和轴盘曲线的变距偏置曲线, 得到叶片曲面的直纹化表达式; 在此基础上, 讨论了三元叶轮加工的刀具路径规划方法, 给出了确定球头刀刀心位置和计算残留误差的两种迭代算法。作者应用 Visual C++ 语言, 编制了相应的叶轮加工软件, 最后给出了加工实例。

2 中性面上盖盘、轴盘的曲线插值

在工程中, 叶轮形状一般是根据气动力或流体动力性能指标进行设计的, 设计图纸上给出叶片中性面上盖盘和轴盘的两条空间曲线的离散点坐标和各点处的叶片厚度值。这些数据点的分布常常极不均匀, 因此需要对原始数据点进行样条插值, 下面针对盖盘和轴盘上给出的离散点进行 B 样条曲线插值。

设给定盖盘曲线上 $n+1$ 个数据点, $p_i(x_i, y_i, z_i, h_i)$, $i=0, 1, 2, \dots, n$, 其中, x_i, y_i, z_i 为 p_i 点的直角坐标值; h_i 为该点的叶片厚度值的一半。构造三次 B 样条插值曲线的其实质就是反算三次 B 样条曲线的 $n+3$ 个控制点。三次 B 样条曲线方程

$$\mathbf{r}_{\text{shroud}} = \mathbf{p}(u) = \sum_{j=0}^3 \mathbf{d}_j N_{j,3}(u) \quad (1)$$

$$u \in [u_i, u_{i+1}] \subset [u_0, u_{n+3}]$$

式中 $\mathbf{d}_j$, $j=0, 1, \dots, n+2$ 为控制顶点;

$N_{j,3}$, $j=0, 1, \dots, n+2$ 为 3 次规范 B 样条基函数。

本文采用累加弦长参数化方法进行参数化, 令控制多边形的各边边长依次为 $l_i = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i-1}\|_2$, $i=1, 2, \dots, n$ 。总的边长为 $L = \sum_{i=1}^n l_i$, 则三次 B 样条曲线

的节点矢量为 $\mathbf{U} = \left[0, 0, 0, 0, \frac{l_1}{L}, \frac{l_1+l_2}{L}, \dots, \frac{\sum_{i=1}^{n-1} l_i}{L}, 1, 1, 1, 1 \right]$, 将与数据点 p_i 相对应的参数值 u_{3+i} , $i=0, 1, \dots, n$ 代入式 (1), 再补充两个切矢边界条件

$$\mathbf{d}_1 = \mathbf{p}_0 + \frac{u_4 - u_3}{3} (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0) \quad (2)$$

$$\mathbf{d}_{n+1} = \mathbf{p}_n + \frac{u_{n+3} - u_{n+2}}{3} (\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_{n+1}) \quad (3)$$

解该线性方程组则可求得 $n+3$ 个控制点, 至此则可给出插值 $n+1$ 个数据点的盖盘曲线 $\mathbf{r}_{\text{shroud}}$ 。同理, 可

求得三元叶轮的轴盘曲线 $\mathbf{r}_{\text{hub}}$, 如图 1 所示。利用文献 [5] 还可以求得盖盘曲线和轴盘曲线的一阶导数 $\mathbf{r}_{\text{shroud}_u}$, $\mathbf{r}_{\text{hub}_u}$, 二阶导数 $\mathbf{r}_{\text{shroud}_{uu}}$, $\mathbf{r}_{\text{hub}_{uu}}$, 它们将在下面的讨论中经常用到。

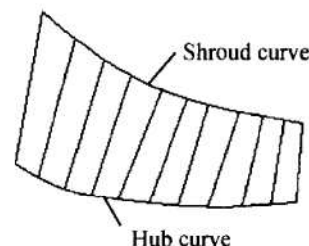


Fig 1 Blade neutral surface

将盖盘曲线和轴盘曲线上的对应点相连, 则形成叶片中性面 $\mathbf{r}_m$, 它为一扭曲的非可展直纹面, 方程为

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{r}_{\text{hub}} + (\mathbf{r}_{\text{shroud}} - \mathbf{r}_{\text{hub}})v \quad (4)$$

式中 $v \in [0, 1]$ 为直母线参数。

3 叶片曲面的造型

在对盖盘和轴盘上离散点进行 B 样条曲线插值的基础上, 根据叶片沿叶轮径向厚度的变化规律, 设计出叶片的左、右廓面。由于叶片沿叶轮的径向和叶片的高度方向其厚度均在变化, 在构造叶片曲面时, 分别做叶片中性面上盖盘曲线和轴盘曲线的法线, 并在此法线上截取相应的叶片厚度的一半, 则可形成盖盘曲线和轴盘曲线的变距等距曲线, 将两条曲线上的对应点相连则形成叶片曲面。具体过程如下:

分别求盖盘曲线和轴盘曲线的法矢, 其方程为

$$\mathbf{N}_{\text{shroud}} = \mathbf{r}_{\text{shroud}_u} \times (\mathbf{r}_{\text{shroud}} - \mathbf{r}_{\text{hub}}) \quad (5)$$

$$\mathbf{N}_{\text{hub}} = \mathbf{r}_{\text{hub}_u} \times (\mathbf{r}_{\text{shroud}} - \mathbf{r}_{\text{hub}}) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{r}_{\text{shroud}_u}$, $\mathbf{r}_{\text{hub}_u}$ 分别为中性面上盖盘曲线和轴盘曲线的切矢, 盖盘曲线和轴盘曲线的单位法矢可表示为

$$\mathbf{n}_{\text{shroud}} = \frac{\mathbf{N}_{\text{shroud}}}{\|\mathbf{N}_{\text{shroud}}\|_2} \quad (7)$$

$$\mathbf{n}_{\text{hub}} = \frac{\mathbf{N}_{\text{hub}}}{\|\mathbf{N}_{\text{hub}}\|_2} \quad (8)$$

中性面上盖盘曲线和轴盘曲线的变距等距曲线分别如图 2 中 C_1 , C_2 所示, 其方程为

$$\mathbf{r}_{\text{shroud_offset}} = \mathbf{r}_{\text{shroud}} \pm h_{\text{shroud}} \cdot \mathbf{n}_{\text{shroud}} \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_{\text{hub_offset}} = \mathbf{r}_{\text{hub}} \pm h_{\text{hub}} \cdot \mathbf{n}_{\text{hub}} \quad (10)$$

式中 h_{shroud} , h_{hub} 分别为叶片顶部和根部曲线对应点的厚度值的一半, 其值分别为两曲线参数 u , u_1 的函数; 式中的正负号分别对应叶片曲面的左右廓面。

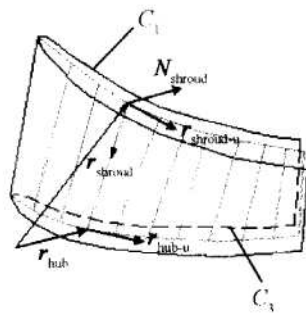


Fig 2 Blade surface

叶片曲面 r_y 的方程可表示为

$$r_y = r_{\text{hub_offset}} + (r_{\text{shroud_offset}} - r_{\text{hub_offset}})v \quad (11)$$

4 三元整体叶轮加工的刀位规划

三元整体叶轮的加工工艺过程大致为: (1)在锻压件毛坯体上车削加工出回转体的基本形状; (2)气流通道的开槽加工; (3)气流通道的扩槽加工; (4)叶片的精加工。

4.1 开槽

开槽加工的位置选在气流通道的中间位置,为了使开槽加工时,刀具不会与叶片曲面发生干涉,刀轴矢量应为气流通道两侧叶片曲面相应位置处的矢量和,见图 3。并从叶轮中心向外缘分段铣削加工。

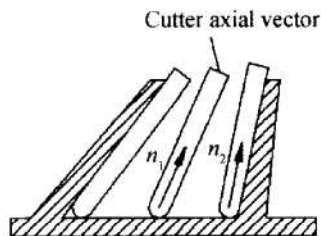


Fig 3 Tool axis vector for notching

4.2 扩槽

扩槽加工与精铣轮毂表面在一次加工中完成,采用球头锥铣刀或球头圆柱铣刀,从开槽位置开始沿轴盘曲线向两侧扩槽,扩槽刀具路径的数目取决于叶轮气道出口处轮毂表面的残留高度的允许值。见图 4。设刀具球头直径为 D , 气道出口处轮毂表面的残留高度的允许值为 h , 则两条刀具路径之间的距离为

$$f \approx 2 \sqrt{D \cdot h} \quad (12)$$

若气道出口处的宽度为 S , 则扩槽加工的路径数目为

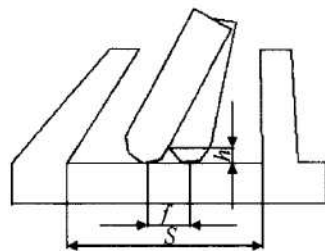


Fig 4 Tool path plan for notching

$$N = S/f \quad (13)$$

为了不发生干涉,扩槽加工时,刀轴矢量应以扩槽一侧的精加工刀轴矢量为基础,同时考虑另一侧的精加工刀轴矢量,采用线性插值的方法来确定每一次扩槽加工的刀轴矢量,如图 3 所示,设叶轮某一直径处开槽加工的刀轴矢量为 n_b , 扩槽一侧的精加工刀轴矢量为 n_2 , 则扩槽加工的刀轴矢量可表示为

$$n_i = n_2 + (n_1 - n_2) \cdot i/(N - 1) \quad (14)$$

式中 $i = N - 1, N - 2, \dots, 2, 1$ 为扩槽序号; N 为扩槽加工的路径数目。

4.3 叶片曲面的精加工

就三元叶轮叶片的数控加工可分为点接触法和线接触法,点接触法即用球头刀按叶片的流线方向逐行走刀,逐渐加工出叶片曲面,从几何上讲,属于双参球面族的包络,因而生产效率较低,而且点接触法成型的叶轮曲面气动性能通常不如线接触包络成型的叶轮曲面。下面为叶轮侧铣加工的刀位确定方法。

4.3.1 刀轴矢量的确定

设要加工的叶片曲面为一直纹面,给出了该直纹面的两条准线(边界曲线) C_1, C_2 , 其方程如式(9), 式(10)所示,分别做叶片曲面上 C_1, C_2 曲线的法线,并截取刀具半径 R , 得到两条曲线 D_1, D_2 , 将曲线 D_1, D_2 上的对应点相连,即可得到刀具轴线,当刀轴沿 D_1, D_2 运动时,刀轴则形成轴迹面,刀具曲面则包络出叶片曲面。具体过程如下:

将式(9), 式(10)对 u, u_1 求导, 则有

$$r_{\text{shroud_offset}_u} = r_{\text{shroud}_u} \pm h_{\text{shroud}_u} \cdot n_{\text{shroud}} \pm h_{\text{shroud}} \cdot n_{\text{shroud}_u} \quad (15)$$

$$r_{\text{hub_offset}_u} = r_{\text{hub}_u} \pm h_{\text{hub}_u} \cdot n_{\text{hub}} \pm h_{\text{hub}} \cdot n_{\text{hub}_u} \quad (16)$$

式中 $h_{\text{shroud}_u}, h_{\text{hub}_u}$ 分别为叶片顶部厚度和根部厚度对参数 u, u_1 的导数; $n_{\text{shroud}_u}, n_{\text{hub}_u}$ 分别为 $n_{\text{shroud}}, n_{\text{hub}}$ 对参数 u, u_1 的导数,由式(7), 式(8)可知其表达式为

$$\mathbf{n}_{\text{shroud}_u} = \frac{\mathbf{N}_{\text{shroud}_u}}{\|\mathbf{N}_{\text{shroud}_u}\|_2} - \frac{\mathbf{N}_{\text{shroud}}(\mathbf{N}_{\text{shroud}} \cdot \mathbf{N}_{\text{shroud}_u})}{\|\mathbf{N}_{\text{shroud}}\|_2^3} \quad (17)$$

$$\mathbf{n}_{\text{hub}_u} = \frac{\mathbf{N}_{\text{hub}_u}}{\|\mathbf{N}_{\text{hub}_u}\|_2} - \frac{\mathbf{N}_{\text{hub}}(\mathbf{N}_{\text{hub}} \cdot \mathbf{n}_{\text{hub}_u})}{\|\mathbf{N}_{\text{hub}}\|_2^3} \quad (18)$$

$$\mathbf{N}_{\text{shroud}_u} = \mathbf{r}_{\text{shroud}_{uu}} \times (\mathbf{r}_{\text{shroud}} - \mathbf{r}_{\text{hub}}) \quad (19)$$

$$\mathbf{N}_{\text{hub}_u} = \mathbf{r}_{\text{hub}_{uu}} \times (\mathbf{r}_{\text{shroud}} - \mathbf{r}_{\text{hub}}) \quad (20)$$

式中 $\mathbf{r}_{\text{shroud}_{uu}}$, $\mathbf{r}_{\text{hub}_{uu}}$ 分别为中性面上盖盘曲线和轴盘曲线的二阶导数; 叶片曲面上 C_1 , C_2 曲线的法矢表达式为

$$\mathbf{n}_{\text{shroud_offset}} = \frac{\mathbf{r}_{\text{shroud_offset}_u} \times (\mathbf{r}_{\text{shroud_offset}} - \mathbf{r}_{\text{hub_offset}})}{\|\mathbf{r}_{\text{shroud_offset}_u} \times (\mathbf{r}_{\text{shroud_offset}} - \mathbf{r}_{\text{hub_offset}})\|_2} \quad (21)$$

$$\mathbf{n}_{\text{hub_offset}} = \frac{\mathbf{r}_{\text{hub_offset}_u} \times (\mathbf{r}_{\text{shroud_offset}} - \mathbf{r}_{\text{hub_offset}})}{\|\mathbf{r}_{\text{hub_offset}_u} \times (\mathbf{r}_{\text{shroud_offset}} - \mathbf{r}_{\text{hub_offset}})\|_2} \quad (22)$$

若采用球头圆柱铣刀, 将 C_1 , C_2 曲线分别沿法线 $\mathbf{n}_{\text{shroud_offset}}$, $\mathbf{n}_{\text{hub_offset}}$ 进行刀具半径 R 的等距变换, 则得曲线 D_1 , D_2 , 其方程为

$$\mathbf{r}_{\text{cutter_center1}} = \mathbf{r}_{\text{shroud_offset}} + R \cdot \mathbf{n}_{\text{shroud_offset}} \quad (23)$$

$$\mathbf{r}_{\text{cutter_center2}} = \mathbf{r}_{\text{hub_offset}} + R \cdot \mathbf{n}_{\text{hub_offset}} \quad (24)$$

刀轴矢量方程为

$$\mathbf{r}_{\text{cutter_axis}} = \mathbf{r}_{\text{cutter_center2}} - \mathbf{r}_{\text{cutter_center1}} \quad (25)$$

4.3.2 刀心位置的确定

刀具球头中心的位置则需要计算刀轴矢量与轮毂曲面 $\mathbf{r}_{\text{bottom}}$ 的等距面 $\mathbf{r}_{\text{bottom_offset}}$ 之间的交点。轮毂曲面为中性面上的轴盘曲线绕叶轮回转轴回转所得, 其方程为

$$\mathbf{r}_{\text{bottom}} = \mathbf{r}_{\text{hub}} \cdot \mathbf{B}(\varphi) \quad (26)$$

式中 $\mathbf{B}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为绕叶轮回转轴的
回转群矢量。

轮毂曲面关于其参数 u , φ 的偏导数可表示为

$$\mathbf{r}_{\text{bottom}_u} = \mathbf{r}_{\text{hub}_u} \cdot \mathbf{B}(\varphi) \quad (27)$$

$$\mathbf{r}_{\text{bottom}_\varphi} = \mathbf{r}_{\text{hub}} \cdot \mathbf{B}_\varphi(\varphi) \quad (28)$$

式中 $\mathbf{B}_\varphi(\varphi) = \begin{bmatrix} -\sin\varphi & -\cos\varphi & 0 \\ \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 为回转群矢量 $\mathbf{B}(\varphi)$ 对 φ 的导数;

根据球头刀的半径计算轮毂曲面 $\mathbf{r}_{\text{bottom}}$ 的等距面 $\mathbf{r}_{\text{bottom_offset}}$ 其方程为

$$\mathbf{r}_{\text{bottom_offset}} = \mathbf{r}_{\text{bottom}} + R \cdot \mathbf{n}_{\text{bottom}} \quad (29)$$

式中 $\mathbf{n}_{\text{bottom}} = \frac{\mathbf{r}_{\text{bottom}_u} \times \mathbf{r}_{\text{bottom}_\varphi}}{\|\mathbf{r}_{\text{bottom}_u} \times \mathbf{r}_{\text{bottom}_\varphi}\|_2}$ 为轮毂曲面的单位法矢。下面来求刀轴与等距面 $\mathbf{r}_{\text{bottom_offset}}$ 的交点, 在刀轴上任取一点 P , 由图 5 可知有下式成立

$$\mathbf{r}_p + \Delta t \cdot \mathbf{r}_{\text{cutter_axis}} = \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}}(u_0, \varphi_0) + \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_u} \cdot \Delta u + \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_\varphi} \cdot \Delta \varphi \quad (30)$$

式中 $\mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_u}$, $\mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_\varphi}$ 为 $\mathbf{r}_{\text{bottom_offset}}$ 对参数 u 和 φ 的偏导数。

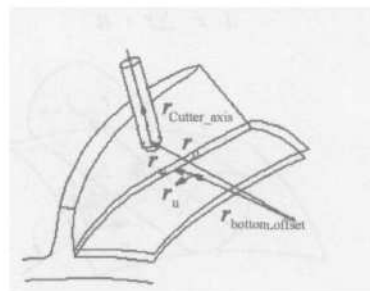


Fig 5 Determination of cutter center

将式两端分别点乘 $\mathbf{r}_{\text{cutter_axis}}$, $\mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_u}$ 和 $\mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_\varphi}$ 可得如下方程组

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{\text{cutter_axis}} \cdot \mathbf{r}_{\text{cutter_axis}} - \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_u} \cdot \mathbf{r}_{\text{cutter_axis}} - \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_\varphi} \cdot \mathbf{r}_{\text{cutter_axis}} \\ \mathbf{r}_{\text{cutter_axis}} \cdot \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_u} - \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_u} \cdot \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_u} - \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_\varphi} \cdot \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_u} \\ \mathbf{r}_{\text{cutter_axis}} \cdot \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_\varphi} - \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_u} \cdot \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_\varphi} - \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_\varphi} \cdot \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_\varphi} \end{cases} \cdot \begin{bmatrix} \Delta t \\ \Delta u \\ \Delta \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_\Delta \cdot \mathbf{r}_{\text{cutter_axis}} \\ \mathbf{r}_\Delta \cdot \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_u} \\ \mathbf{r}_\Delta \cdot \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}_\varphi} \end{bmatrix} \quad (31)$$

式中 $\mathbf{r}_\Delta = \mathbf{r}_{\text{bottom_offset}}(u_0, \varphi_0) - \mathbf{r}_p$

解该方程组可得 Δt , Δu , $\Delta \varphi$ 令 $t + \Delta t \rightarrow t$, $u + \Delta u \rightarrow u$, $v + \Delta v \rightarrow v$ 重复以上过程, 直到 $|\Delta u| \leq \varepsilon$, $|\Delta v| \leq \varepsilon$ (ε 为迭代精度) 即可得到刀轴矢量 $\mathbf{r}_{\text{cutter_axis}}$ 与轮毂曲面的等距面 $\mathbf{r}_{\text{bottom_offset}}$ 的交点, 即刀心位置, 方程为

$$\mathbf{r}_{\text{cutter_center}} = \mathbf{r}_p + t \cdot \mathbf{r}_{\text{cutter_axis}} \quad (32)$$

5 几何残留误差

前面我们已经讨论了五坐标侧铣加工叶轮曲面时的刀具位姿的确定方法, 由于叶片曲面通常为不可

展的直纹面,直母线上每一点的法矢都在变化。因此,上述加工方法仍然是近似加工方法,其加工误差的大小决定着这种加工方法是否可行,文献[6]虽然给出了这种加工方法残留误差的计算公式,但该公式存在相当大的近似。本文下面采用数值仿真的方法来计算这种加工方法的几何残留误差。在前面规划好的刀轴上任取一点 P ,求 P 点到叶片曲面的最短距离,若该最短大于刀具半径,则表示被加工曲面存在欠切误差,若该最短距离小于刀具半径,则表示被加工曲面存在过切误差。求刀轴上一点到叶片曲面的最短距离,实际上属于一个二维寻优问题。如图 6 所示, r_p 为刀轴上一点 P 的矢径, $r=r(u, v)$ 为叶片曲面 S 上一点的矢径, n 为该点的单位法矢, Δr 为 r 到点 P 的矢径,若曲面 P 上不包含奇点,则 Δr 可表示为

$$\Delta r = r_u \Delta u + r_v \Delta v + nd \quad (33)$$

将上式两边分别点乘 r_u , r_v 得

$$\begin{cases} r_u \cdot r_u \Delta u + r_u \cdot r_v \Delta v = \Delta r \cdot r_u \\ r_u \cdot r_v \Delta u + r_v \cdot r_v \Delta v = \Delta r \cdot r_v \end{cases} \quad (34)$$

解该方程组可得 Δu , Δv 令 $u + \Delta u \rightarrow u$, $v + \Delta v \rightarrow v$ 重复以上过程,直到 $|\Delta u| \leq \varepsilon$, $|\Delta v| \leq \varepsilon$ (ε 为迭代精度)即可得到 P 点到曲面 S 的最短距离

$$d = \Delta r \cdot n \quad (35)$$

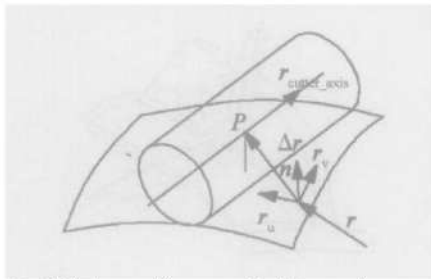


Fig 6 Distance from point to surface

几何残留误差为

$$\delta = d - R / \cos \theta \quad (36)$$

式中 $\theta = |\arccos(n \cdot r_{\text{cutter_axis}}) - \pi/2|$ 。

6 加工实例

应用上面的算法,本文针对沈阳鼓风机股份有限公司的直径为 $\phi 410\text{mm}$ 的三元整体叶轮进行了计算,并在 DELKEL MAHO 70V 加工中心上进行了实际加工,取得了良好的效果。毛坯为不锈钢锻压件,刀具为高速钢材料。需要说明的是在叶片精加工过程中,由于刀具的磨损和切削力引起的变形,将 17 个叶片

分为 5 4 4 4 四组进行加工,每加工一组叶片就更换一把新刀具,最终将叶片厚度控制在公差 0.05mm 范围内,达到了厂方的要求,叶轮的加工效果见图 7。

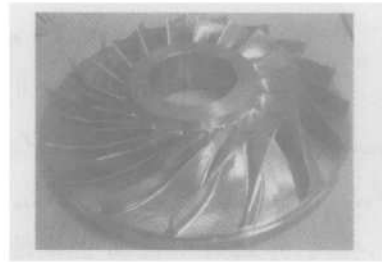


Fig 7 Machined 3D impeller

7 结 论

(1) 针对一组空间坐标点和各点处的厚度值,采用累加弦长参数化对其进行三次 B 样条曲线插值,可保证该空间曲线 C^2 连续,同时各点处的厚度值也 C^2 连续,这种方法可用于多维数据的插值与逼近。

(2) 给出了确定球头刀刀心位置和计算几何残留误差的两种迭代算法,该算法具有较好的收敛性。每一刀位下的几何残留误差表现为中凹形的过切误差。

(3) 在叶片精加工过程中,由于刀具的磨损和切削力引起的变形,为了控制叶片的厚度,将叶片进行分组加工,每加工一组叶片就更换一把新刀具,最终将叶片厚度控制在公差范围内。

参考文献:

- [1] Chen Shang-liang Wang Wen-Tsai Computer aided manufacturing technologies for centrifugal compressor impellers [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 115: 284~293
- [2] 于源,姜歌东,王小椿. 直线元径向三元叶轮型线光顺的计算方法 [J]. 推进技术, 2002, 23 (2): 139~141 (YU Yuan, JIANG Ge-dong, WANG Xiao-chun Approach for design of 3-D radial impeller with straight fibre [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23 (2).)
- [3] 崔莲顺,孟磊. 离心式压缩机三元叶轮加工工艺 [J]. 风机技术, 2003, (6): 33~34
- [4] 杨小毅,霍海燕. 五坐标铣制窄流道三元流叶轮的工艺方法 [J]. 风机技术, 2004, (2): 35~36
- [5] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994
- [6] 刘雄伟. 数控加工理论与编程技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002

(编辑: 梅 瑛)