

文章编号: 1001-2486(2000)05-0078-05

## 带冠涡轮叶盘弯扭通道中复杂电极的进给轨迹\*

赵万生, 詹涵菁, 王刚, 刘文涛

(哈尔滨工业大学特种加工及机电控制研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 整体涡轮叶盘精加工是决定叶盘最终几何精度的关键技术, 电火花加工(EDM)则是涡轮叶盘精加工的有力手段。在涡轮叶盘 EDM 精加工中电极的设计的基础上, 进行了电极在带冠叶盘弯扭狭窄通道中无干涉进给轨迹的搜索, 其中的核心问题是电极运动约束条件的确定。最后给出了轨迹搜索的范例结果。

**关键词:** 整体涡轮叶盘; 电火花加工; 多轴数控进给轨迹; 进给轨迹搜索

**中图分类号:** TG611      **文献标识码:** A

## Feeding Complex Electrodes through Twist Channels of Rimed Turbine Blisks

ZHAO Wan-sheng, ZHAN Han-jing, WANG Gang, LIU Wen-tao

(Research Institute of Nontraditional Machining &amp; Mechatronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The finishing of turbine blisks, a critical technology determining the final geometric accuracy of blisks, can be implemented efficiently with the electrical discharge machining (EDM). Upon the basis of the design of the electrode for blisk EDM finishing, the searching of an interference-free path for feeding an electrode through twist channels of a rimed blisk is carried out, in which the kernel problem is the determination of the electrode kinematic constraints. An implementation of the path-searching algorithm is illustrated with an example at the end of the paper.

**Key words:** turbine blisks; electric discharge machining; multiaxis CNC feed path; feed path searching

装配式涡轮中, 叶片通过机械方式(通常是燕尾榫槽)镶嵌在轮盘上, 结构较笨重, 其结构复杂性导致涡轮耐久性较差, 用户承担的寿命周期费用急剧增加。整体涡轮叶盘则由同一块材料加工出叶片和轮盘, 结构轻巧耐用, 在提高涡轮性能的同时显著降低了寿命周期费用。目前各技术强国纷纷投入很大力量进行涡轮叶盘的设计与制造研究, 目的都是在降低综合成本的同时大幅提高航空航天发动机性能。

然而, 叶盘的引入为制造技术带来了新的挑战。在叶盘中实现先进涡轮设计, 如全三维(扭转加侧斜)翼型和整体叶冠(包围叶片的完整护圈), 使加工极端困难和耗时。作为精加工的有效手段, 电火花加工(EDM)以其精密、非接触的蚀除特点成为叶盘精加工的主流技术。EDM 中电极的进给轨迹决定了加工是否完善(有无干涉、过切或加工不足)和加工精度。本文讨论在已知涡轮叶片形状的条件下, 电极的设计原则和电极完善进给轨迹的最优化搜索方法。

## 1 待加工涡轮叶盘的几何描述

描述涡轮最通用的坐标系有两种<sup>[1]</sup>:  $x$  轴平行于涡轮轴,  $y$  轴位于叶栅平面内(图 1); 或  $x$  轴平行于叶片伸展方向,  $y$  轴与之垂直。后者通常用于叶片加工的工艺基准, 设计中常采用第一种坐标方向。现代涡轮设计采用更加符合实际流场的非正常三维粘性流体模型, 设计出的叶片具有弯曲、扭转、变截面的复杂几何型面, 一般无法解析表达。对叶片型面的描述是给出沿叶高  $z$  方向若干叶片截面上叶盆和叶背型线的若干数据点以及前、后缘的圆心位置和半径。叶片的三维造型是根据型值点生成叶片型面的插值过程。双 3 次 B 样条曲面具有 2 阶连续导数, 形式简单, 计算稳定, 可得到良好的流体动力性能, 在航空航天及造船等领域得到广泛应用。在采用上述双变量样条曲面对各叶片截面上的离散数据点进行处理后, 得到的是排列有序、足够密集且位于叶片表面上的数据点集, 从而完成了对叶片曲面的三维

\* 收稿日期: 2000-05-10  
基金项目: 教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金资助  
作者简介: 赵万生(1957), 男, 教授, 博士生导师。

造型工作(图2)。

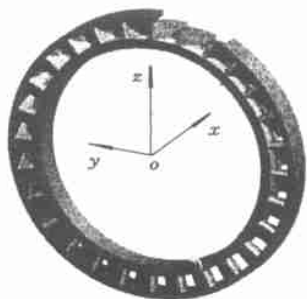


图1 涡轮坐标系  
Fig 1 Turbine coordinate system

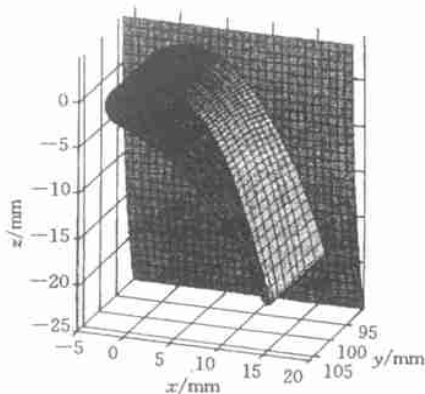


图2 涡轮叶片的造型  
Fig 2 Blade surface after modeling

## 2 成形电极的设计

复杂零件 EDM 不外乎两种思路<sup>[1]</sup>。一种采用复杂电极沿简单进给轨迹加工零件,此时要求制造电极的数控机床联动轴数较多,而对 EDM 加工机的要求可相应降低。另一种采用简单电极沿复杂进给轨迹加工零件,电极制造较简单,但要求 EDM 加工机联动轴数较多。电极的设计原则是在电极制造复杂程度和 EDM 加工机进给轨迹复杂程度之间寻求平衡,使电极制造成本和涡轮叶盘加工成本合理分布。

EDM 中材料去除率与电极放电面积、放电能量等因素相关。简单电极(球电极、圆片电极等)制造简单,但加工弯扭叶片型面时为保证成型精度就必须限制电极的放电面积(放电面积呈点或线状),加工效率很低。另外,放电面积的过分集中将使电极有效部分很快损耗,叶片成型精度不高。在涡轮叶盘 EDM 中,采用与叶片型面完善贴合的成型电极进行拷贝加工是合理的<sup>[2-4]</sup>。

成型电极的型面设计很简单:相邻叶片的叶背和叶盆型面绕涡轮轴相向转动就形成电极的两个型面(图3)。然而,叶背和叶盆型面应旋转多少角度以形成合适的电极厚度是一个关键问题:太肥厚的电极将与流体通道发生干涉;太薄弱的电极在制造时刚度不足容易变形,且不利于电极损耗的补偿。总的说来,电极应具有不与通道干涉的最大厚度。电极厚度将是电极进给轨迹优化搜索中一项关键的优化变量。



图3 电极构造  
Fig. 3 Electrode construction

## 3 电极完善进给轨迹的搜索

在带冠涡轮叶盘的 EDM 中,尽管采用了相对复杂的型面拷贝电极,简单进给运动仍然无法实现加工。带冠涡轮叶盘的弯扭叶片中弧线弯角和稠度一般很大,叶片相互遮蔽(沿涡轮轴向观察),叶冠则在涡轮径向覆盖所有叶片。由相邻叶片和叶冠、轮毂围成的流体通道迂回弯扭、非常狭窄,将电极送入流体通道仅靠简单自由度进给运动无法避免干涉。简言之,带冠涡轮叶盘的 EDM 加工过程,是复杂电极沿复杂轨迹进给的加工过程。在流体通道和电极都很复杂的条件下,搜索一条电极无干涉进入流体通道的轨迹,是带冠涡轮叶盘 EDM 的核心问题(也是采用其它加工方法时必须解决的核心问题)。

### 3.1 问题描述

在图1所示坐标系中,电极从某空间位置开始不断向流体通道中进给,最终电极的两个型面之一与叶片的叶盆或叶背贴合,完成加工进给。电极起始位置在进给轨迹搜索前是未知的,唯一确定的是电极

的进给终止位置。这就提醒我们,当叶片和电极的形状均给定时,搜索电极从流体通道中抽出的轨迹最为方便。电极的实际进给轨迹只不过是沿电极抽出轨迹反向运动。

电极从流体通道中抽出时,电极位置坐标的  $x$  值单调递减。令电极进给终止位置的  $x$  坐标为  $x_E$ , 电极完全离开涡轮并留有一段安全间隔距离的进给起始位置的  $x$  坐标为  $x_S$ , 对区间  $[x_S, x_E]$  做节点分划  $\Delta: x_S = x_0 < x_1 < \dots < x_N = x_E$ 。如果对  $\Delta$  中的每个节点  $x_i (i = 0, 1, \dots, N)$  都可搜索到电极相应的  $y$ 、 $z$  坐标和姿态,那么电极的进给运动就是按  $\Delta$  节点次序播放的“动画片”:每一帧画面中电极的位置和姿态按  $x_i$  节点对应的坐标值和姿态角进行调整,电极不断从一个画面位置走向下一个画面位置。所以,电极进给轨迹搜索问题的本质是:电极的  $x$  坐标位于节点  $x_i$  上时,应如何摆放电极才能避免与流体通道干涉,以及不发生干涉时的电极最大厚度。很显然这是一个优化搜索过程。

### 3.2 优化变量

电极的运动,从几何角度看是点的坐标变换:把电极坐标系中描述的电极的型值点,变换到涡轮坐标系中电极当前位置处进行描述。电极的当前位置由电极坐标系原点在涡轮坐标系中的位置坐标  $[x_i, y_i, z_i]$  给定;电极姿态由电极坐标系相对涡轮坐标系的转动  $[B_i, C_i]$  给定( $B$  是绕涡轮坐标系  $y$  轴的转动、 $C$  是绕  $z$  轴的转动)。电极厚度的变化,也是坐标变换过程:在电极坐标系中改变电极各型面之间的相对位置即是调整电极厚度。给出电极缩减量  $H_i$ ,就可对电极型面按预定方式进行坐标变换,从而缩减厚度。所以,电极进给轨迹优化搜索中的优化变量:

$$X_i = [y_i, z_i, B_i, C_i, H_i]$$

$x_i$  将作为已知参数出现在优化算法中。经过上述改变形状、移动位置、调整姿态的坐标变换后,电极就进入了流体通道中。接下来是判断电极与叶片是否干涉。

### 3.3 约束条件

约束条件的思想很简单:围成流体通道的各型面自然地形成空间点的可行域。电极上某型值点位于流体通道空腔中时,该点处于可行域内,其约束条件值为零;若该型值点进入叶片或叶冠轮毂内,该点就超出了可行域,其约束条件值为该点到发生干涉的表面的法线距离。电极上所有型值点都经过这样的约束条件取值后,总的约束条件值为各点约束条件值的二范数。

对某叶片型面上的型值点  $M_1, M_2, M_3 \dots$  有序排列后(图4),可以容易地计算出各型值点处外法线矢量  $N_1, N_2, N_3 \dots$ 。 $E_0$  点是电极上某型值点,为计算其约束条件值,首先从叶片型面各型值点向  $E_0$  做矢量  $M_1E_0, M_2E_0, M_3E_0, \dots$  并查找众矢量中长度最短者(即找出叶片型面型值点中到  $E_0$  点直线距离最近者)。设  $M_1E_0$  最短。计算  $M_1E_0$  与  $N_1$  的点积  $Dot_1$ 。若  $Dot_1 > 0$ ,  $M_1E_0$  与  $N_1$  间夹角  $< 90^\circ$ ,  $E_0$  点位于叶片型面之外不与之干涉,其约束条件值  $Con_0 = 0$ ; 若  $Dot_1 \leq 0$ ,  $M_1E_0$  与  $N_1$  间夹角  $\geq 90^\circ$ ,  $E_0$  点位于叶片型面上、甚至深入型面内,  $E_0$  与叶片型面发生干涉,其约束条件值  $Con_0 = \text{abs}(M_1E_0 \cdot N_1)$  (即  $E_0$  点到法线为  $N_1$  且经过  $M_1$  点的平面的距离)。

电极上所有型值点  $E_0, E_1, E_2, \dots, E_N$  对上述叶片型面的约束条件值就组成了整个电极对此叶片型面的约束条件值  $Con_E$ :

$$Con_E = \left( \sum_{i=0}^N Con_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

电极对围成流体通道的所有型面均可得到类似上式的型面约束值  $Con_A, Con_B, \dots, Con_E$ , 则完整的涡轮流体通道对电极的总体约束值  $Constrnt$ :

$$Constrnt = \left( Con_A^2 + Con_B^2 + \dots + Con_E^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

若电极未与流体通道发生干涉,  $Constrnt = 0$ ; 当发生干涉时,  $Constrnt > 0$ 。  $Constrnt$  是电极与涡轮流体通道干涉量的单调递增连续函数。

### 3.4 目标函数

与电极的约束条件相比,目标函数显得极简单:力图使电极厚度缩减量  $H_i$  最小。故目标函数为:

$$obj\ fun(X) = H_i^2$$

其中  $X = [y_i z_i B_i C_i H_i]$ 。该目标函数将保证在电极的可行域内搜索最小的电极厚度缩减量  $H_i$ 。

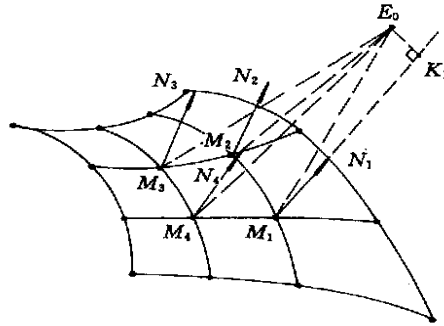


图4 空间点约束条件值的计算原理

Fig. 4 Calculation of the constraint for a spatial point

### 3.5 优化搜索的实施

电极在涡轮流体通道中进给轨迹的优化搜索的数学模型为:

$$\begin{aligned} \min \text{ obfun}(X) \\ \text{ s. t } \text{ Constrnt} \leq 0 \end{aligned}$$

MatLab 优化工具箱函数  $fmincon$  应用顺序二次程序法 (SQP) 实现带约束、非线性、多变量函数的极小值的搜索, 适合轨迹搜索的最优化方法。搜索完整的电极进给轨迹的流程框图见图 5。成型电极沿搜索到的进给轨迹从流体通道中抽出的实例见图 6。

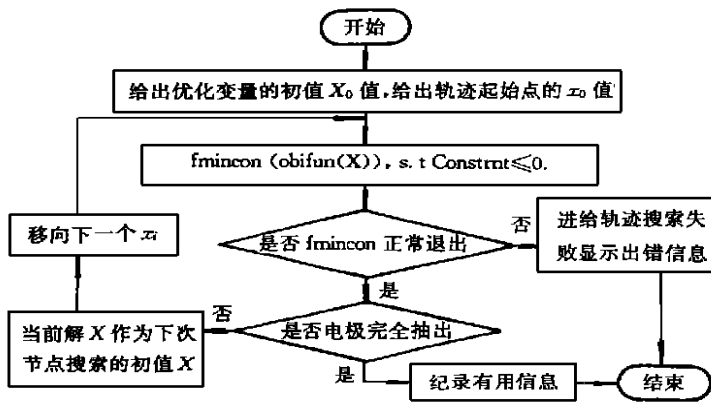


图5 电极进给完整轨迹搜索的流程框图

Fig. 5 Flowchart for searching complete feed path

## 4 结论

多轴数控加工中刀具进给轨迹的计算和干涉校验, 是复杂型面数控加工的核心问题。本文采用多变量非线性约束优化方法, 搜索了 5 轴联动(算法本身对联动轴数没有限制)的刀具进给轨迹, 同时对刀具进行必要的形状修正。该方法是已知被加工型面时搜索刀具进给轨迹的通用算法。本文将此算法具体应用于带冠弯扭叶片涡轮叶盘的 EDM 中, 搜索了电极进给轨迹, 同时对电极本身进行了必要的厚度调整。实际计算表明, 在进给终了位置, 电极型面与叶片型面的贴合误差小于  $0.0072\text{mm}$ , 整个进给过程无干涉。由此得到的电极进给轨迹经过后置处理, 转化为数控代码后, 就可控制数控加工机进行复杂零件的加工。

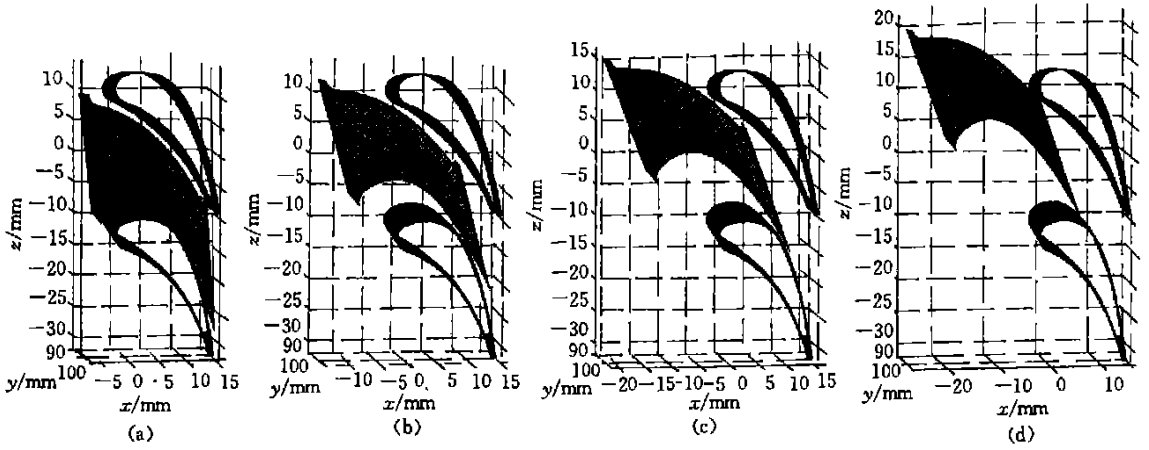


图6 成型电极从流体通道中逐渐抽出

Fig 6 The electrode moves out from the turbine channel

### 参考文献:

- [1] 王刚. 带叶冠扭曲叶片整体涡轮盘通道电火花加工方法的研究[D]. 工学博士学位论文, 哈尔滨工业大学, 1999.
- [2] 赵万生, 王刚, 史旭名. 扭叶片整体叶轮电火花加工成型电极设计[J]. 航空精密制造技术, 1998, 34(6): 14-16.
- [3] 赵万生, 王刚. 整体涡轮电火花加工方法的研究. 机械设计与制造[J], 1999, (4): 41-42.
- [4] 王刚, 赵万生, 史旭名. 整体涡轮通道加工方法的研究[J]. 电加工, 1999, (3): 5-7.