

基于轨迹搜索的闭式三元流通道电火花 加工电极设计方法

赵建社¹ 唐兰剑^{1,2} 郁子欣¹ 周旭娇¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 中国燃气涡轮研究院, 江油, 621700)

摘要: 数控电火花加工技术是加工闭式三元流通道的首选工艺之一, 其中工具电极设计是关键技术。为此, 从电极运动位姿变换的角度出发, 提出了一种基于轨迹搜索的电极设计方法, 并据此设计了某型三元流闭式整体叶轮叶间气流通道的电火花加工电极, 利用 UG 平台上自主开发的加工仿真模块进行了加工过程仿真, 验证了该设计方法的可行性与正确性。

关键词: 三元流通道; 电火花加工; 电极设计; 闭式整体叶轮

中图分类号: TG661; V261; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2013)06-0824-06

EDM Electrode Design Based on Path Searching for Closed 3D-flow Channel

Zhao Jianshe¹, Tang Lanjian^{1,2}, Yu Zixin¹, Zhou Xujiao¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. China Gas Turbine Establishment, Jiangyou, 621700, China)

Abstract: The design of tool electrodes is the key technology in numerically controlled electrical discharge machining (NC-EDM), which is one of the preferred machining methods for closed 3D-flow channel. Therefore, a new method for electrode designing is put forward based on the path searching and transformation of position and pose. Electrodes of NC-EDM for one type of 3D-closed flow channel are designed by the method, and the process of electrical discharge machining is simulated by using self-developed simulation software based on UG-platform. The correctness and feasibility of the design method are validated.

Key words: 3D-flow channel; electrical discharge machining (EDM); electrode design; closed integral impeller

包含闭式三元流通道的整体构件因其结构与性能上的优越性, 被越来越多地运用到航空航天发动机、武器装备及先进叶轮机械等领域^[1-3]。然而, 包含闭式三元流通道的整体构件加工可达性很差, 且又多为难切削材料制造成本很高, 因此, 该类零件的整体制造一直困扰着各国技术人员。随着先进数控技术与电火花加工技术的结合, 数控电火花

加工已成为该类零件的主流加工方法^[4]。

目前, 国外发达国家已初步掌握包含三元流通道整体构件的数控电火花加工技术, 如德国 Zimmer&Kreim(ZK)公司利用六轴联动数控电火花机床, 采用石墨电极成功加工了如图 1 所示三元流闭式整体叶轮^[5], 代表了此类零件当今世界的制造技术水平。然而, 需要指出的是, 图 1 所示的闭

基金项目: 航空科学基金(2011ZE52055)资助项目; 国防技术基础成果管理与推广资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金(NS2012012, NS2013052)资助项目。

收稿日期: 2013-08-15; **修订日期:** 2013-10-15

通信作者: 赵建社, 男, 副教授, 1976 年出生, E-mail: zhaojs@nuaa.edu.cn。

式整体叶轮的叶间流道弯扭程度还比较小,采用一个成形工具电极进行六轴轴联动就能够完成加工。而对于弯扭程度更大、叶型更复杂的闭式三元流通道,如作者所在课题组完成的某型三元流闭式整体叶轮^[6],无论采用多少轴联动也无法利用一个电极完成整个气流通道的加工,因此,只好采用了多个电极分别从进排气口分步分区进行加工的方法^[7]。为进行电极设计,采用了对叶间气流通道的区域划分及以“线性替代非线性”的插补思想设计电极及其加工运动轨迹。文中提出的电极设计方法,就是在此研究成果基础上,对更加弯扭、更加狭窄的闭式三元流通道开展研究,从电极每步运动位姿姿态变换的角度出发,结合运动轨迹搜索进行电极设计,以求提高电极设计精度,缩短研制周期。

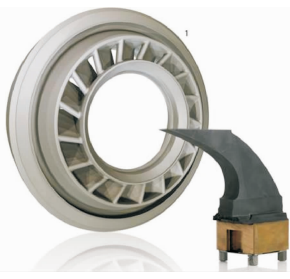


图1 德国 ZK 公司加工的叶轮及工具电极

1 研究对象

图2为3种典型含有闭式三元流通道的整体叶轮,该类零件在结构上具有以下共同点:(1)叶间流道近似呈空间“L”型,即都为进气口轴向开放,出气口径向开放的轴径式结构;(2)叶间流道相对狭长。图3为叶间流道子午流道示意图,在采用三元流动理论进行设计时,最佳的相对轴向长度 L/D_2 随相对叶轮出气口宽度 b_2/D_2 呈线性增加。也就是说当出气口宽度大时,叶轮的轴向距离也相应地长,即对于不同的三元流闭式整体叶轮,它们的叶间流道常常为一种比较狭长的结构;(3)叶片型面空间弯扭程度大,进气口边到排气口边常常掠过一个较大的角度。

由于含有闭式三元流通道的整体叶轮具有上述结构特点,无法仅采用一个成型电极实现整个叶

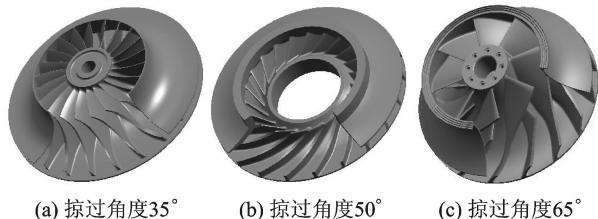


图2 含有闭式三元流通道的整体叶轮

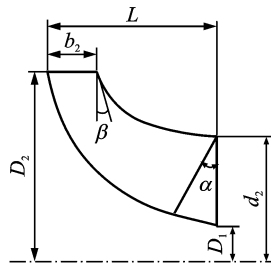


图3 子午流道示意图

间流道的加工,因此需要将叶间流道划分为进气口区域与出气口区域,再针对每个区域进行相应的电极设计。

2 电极设计

2.1 进排气口加工依据划分

进行区域划分时,主要关注的是轮盖型面与轮盘型面,为此提取出叶间流道的子午流道,重点对其轮盖型面与轮盘型面进行分析。在电极的终了加工位置,电极既可进行摇动加工,也可无摇动加工。无论是否采用摇动加工,在子午流道上都会表现为轮盖型面与轮盘型面向内偏移距离 δ ,其中进气口表现为水平偏移,排气口表现为竖直偏移,如图4所示。

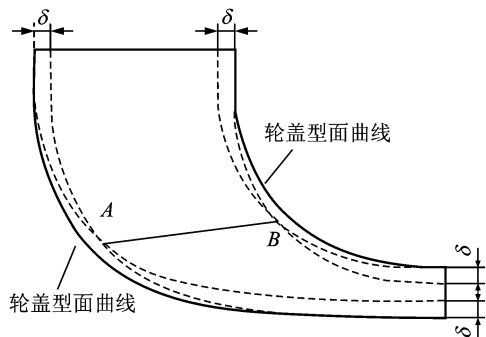


图4 子午流道分区示意图

为便于观察,图4中几何比例较实际要夸张许多,可以看出,随着水平偏移后的轮盖型面曲线与轮盘型面曲线的斜率的算术值不断减小,水平偏移后的曲线与原曲线的法向间距不断减小,到排气口处甚至出现重合与相交现象;随着竖直偏移后的轮盖型面曲线与轮盘型面曲线的斜率的算术值不断增大,竖直偏移后的曲线与原曲线的法向间距也不断减小,到进气口处甚至出现重合与相交现象。由此可见很有必要对流道进行区域划分。从图4中还可看出,水平偏移的轮盘型面曲线与竖直偏移的轮盘曲线相交于点A,在此处二者到原轮盘型面曲线的法向距离相等;水平偏移的轮盖曲线与竖直偏

移的轮盖曲线相交于点 B , 在此处二者到原轮盖型面曲线的法向距离相等。作直线 AB , 即为子午流道进气口区域与排气口区域的分割线。直线 AB 绕零件设计中心回转则可形成整个流道的分割面, 利用该面把流道划分为进气口区域与排气口区域。

2.2 电极成形面求解

基于电火花加工的特点, 可采用等间隙法求解电极成形面。即假设平均加工间隙 δ , 在流道待加工型面上均匀采集足够多的型值点, 得到型面上的型值点集 \mathbf{P}_i , 根据加工需要选取一个偏移矢量 \mathbf{n}_{P_i} , 则可得到对应的点集 $\mathbf{P}_{ni} = \mathbf{P}_i - \delta \mathbf{n}_{P_i}$, 如果已知 \mathbf{P}_i 坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $\mathbf{n}_{P_i} = [a_{P_i}, b_{P_i}, c_{P_i}]$, 则 \mathbf{P}_{ni} 的坐标值可表达为

$$\mathbf{P}_{ni} = \{x_i - \delta a_{P_i}, y_i - \delta b_{P_i}, z_i - \delta c_{P_i}\} \quad (1)$$

\mathbf{n}_{P_i} 可为型值点集 \mathbf{P}_i 的法向, 也可为某一具体矢量, 如 $(1, 0, 0)$ 。偏移矢量 \mathbf{n}_{P_i} 的选取, 结合电火花加工技术的特点, 需要遵循以下两点原则: (1) 结合型面曲率变化及其弯扭程度进行选取。在型面曲率大或者弯扭程度大处, 若偏移矢量选取不当, 会使电极成形面与流道待加工面之间的间隙不均匀, 从而造成加工误差; (2) 结合电火花加工的摇动方式进行选取, 摇动方式按其对加工结果的影响可分为: 矢量摇动、平面摇动、球面摇动^[8]。偏移矢量结合适当的摇动方式可以从设计层面减小甚至消除摇动误差。

以式(1)给出的型值点集 \mathbf{P}_{ni} , 在 UG 软件建模环境下进行曲面建模, 即可得到电极的理论成形面。

2.3 运动轨迹搜索与非成形面设计

闭式三元流通道型腔复杂, 需要多轴联动的数控轨迹才能完成通道所有待加工曲面的加工, 通常采用的设备拥有四轴或四轴以上的自由度。成形电极需要无干涉地沿着一条复杂的运动轨迹进入流道, 准确到达加工终了位置, 拷贝放电加工流道所有待加工曲面。特别地, 电极运动轨迹的终点位置有且仅有一个, 而起点位置是有多种选择的。实际上, 电极的运动轨迹即为电极从流道中无干涉撤出的轨迹的反过程。

为了保证电极在撤出过程中不与流道型面发生干涉, 需要不断改变电极的位置姿态。自电极加工终了位置开始, 电极分步向流道出口方向运动。设在电极的第 i 步运动中, 在电极上任意选取一点 $O_i (i=0, 1, \dots, n)$, 建立直角坐标系 $\{\mathbf{B}_i\}$, 在电极的第 $(i+1)$ 步, 直角坐标系记为 $\{\mathbf{B}_{i+1}\}$, 通过描述坐标系 $\{\mathbf{B}_{i+1}\}$ 相对于坐标系 $\{\mathbf{B}_i\}$ 的运动来表示电极

的位形。这样, 电极上各点的第 $(i+1)$ 步的运动情况都可以从坐标系 $\{\mathbf{B}_{i+1}\}$ 的运动以及该点相对于坐标系 $\{\mathbf{B}_{i+1}\}$ 的运动来得到 (如图 5 所示)。

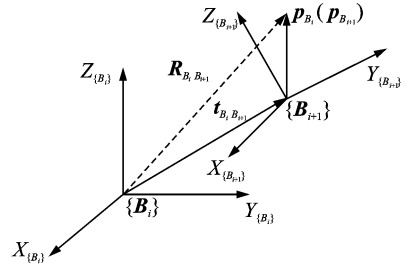


图5 复合变换

$$\mathbf{p}_{B_i} = \mathbf{R}_{B_i, B_{i+1}} \mathbf{p}_{B_{i+1}} + \mathbf{t}_{B_i, B_{i+1}} \quad (2)$$

式中: \mathbf{p}_{B_i} 为点 p 在坐标系 $\{\mathbf{B}_i\}$ 中的坐标表示; $\mathbf{p}_{B_{i+1}}$ 为点 p 在坐标系 $\{\mathbf{B}_{i+1}\}$ 中的坐标表示; $\mathbf{R}_{B_i, B_{i+1}}$ 为坐标系 $\{\mathbf{B}_{i+1}\}$ 相对于坐标系 $\{\mathbf{B}_i\}$ 的旋转矩阵; $\mathbf{t}_{B_i, B_{i+1}}$ 为从坐标系 $\{\mathbf{B}_i\}$ 原点到坐标系 $\{\mathbf{B}_{i+1}\}$ 原点的位置矢量。式(2)的齐次变换的表达形式为

$$\bar{\mathbf{p}}_{B_i} = \mathbf{T}_{B_i, B_{i+1}} \bar{\mathbf{p}}_{B_{i+1}} \quad (3)$$

式中: $\bar{\mathbf{p}}_{B_i}$ 为点 p 在坐标系 $\{\mathbf{B}_i\}$ 中的齐次坐标表示; $\bar{\mathbf{p}}_{B_{i+1}}$ 为点 p 在坐标系 $\{\mathbf{B}_{i+1}\}$ 中的齐次坐标表示; $\mathbf{T}_{B_i, B_{i+1}}$ 为电极第 $(i+1)$ 步运动的齐次变换矩阵。

$$\bar{\mathbf{p}}_{B_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{B_i} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{p}}_{B_{i+1}} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{B_{i+1}} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_{B_i, B_{i+1}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{B_i, B_{i+1}} & \mathbf{t}_{B_i, B_{i+1}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在实际加工中, 采用的是四轴联动数控电火花机床进行流体通道的精加工, 因此 $\mathbf{T}_{B_i, B_{i+1}}$ 的具体矩阵形式为

$$\mathbf{T}_{B_i, B_{i+1}} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i+1} & -\sin\theta_{i+1} & 0 & \mathbf{p}_{x_{i+1}} \\ \sin\theta_{i+1} & \cos\theta_{i+1} & 0 & \mathbf{p}_{y_{i+1}} \\ 0 & 0 & 1 & \mathbf{p}_{z_{i+1}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: θ_{i+1} 为第 $(i+1)$ 步运动中, 电极绕 Z 轴旋转的角度; $\mathbf{p}_{x_{i+1}}$, $\mathbf{p}_{y_{i+1}}$, $\mathbf{p}_{z_{i+1}}$ 分别为在第 $(i+1)$ 步运动中, 电极在 X 轴, Y 轴, Z 轴方向上的位移。

式(3)描述了电极上任意一点的运动情况, 这里电极可视为刚体, 因此电极第 $(i+1)$ 步的位姿得以描述。电极每一步位姿的变换是由每一步的变换矩阵 \mathbf{T} 决定的, 而 \mathbf{T} 的确定需要判别电极与叶间流道的干涉情况, 可通过计算叶间流道外轮廓面与电极各面间的最小距离进行判断。若流道外轮廓面与电极加工成形面间的最小距离 $d_{\text{成形}} \geq$ 加工间隙 Δ , 则判断流道外轮廓面与电极成形面未发生

干涉;若 $d_{\text{成形}} < \text{加工间隙 } \Delta$, 则判断流道外轮廓面与电极成形面发生干涉, 此时需要对变换矩阵 T 进行调整, 使得 $d_{\text{成形}} \geq \text{加工间隙 } \Delta$; 若流道外轮廓面与电极非成形面间的最小距离 $d_{\text{非成形}} \geq \text{加工间隙 } \Delta$, 则判断流道外轮廓面与电极非成形面未发生干涉; 若 $d_{\text{非成形}} < \text{加工间隙 } \Delta$, 则判断流道外轮廓面与电极非成形面发生干涉, 此时则需要对电极的非加工面进行修正, 去除干涉部分, 使得 $d_{\text{非成形}} \geq \text{加工间隙 } \Delta$ 。

电极经过 n 步运动后, 完全撤出流道, 其间经过的 n 次变换对应 n 个变换矩阵, 矩阵中的角度值与位移值经过后置处理, 可生成直接用于加工的数控代码, 从而电极的运动轨迹得以确定; 同时非成形面也得以确定, 但此时的非成形面是台阶面, 需对其进行平滑处理, 处理方法有两种: (1) 利用通道型面偏移一定距离或绕零件设计中心旋转一个角度后, 再“切除”各台阶面, 称为“减厚处理”。其优点是可以将非成形面转化为成形面, 使电极的两个侧面都为加工成形面, 能减少同一区域所需电极个数, 缺点是容易出现电极厚度过于薄弱的区域, 此时则不能采用此方法; (2) 利用非成形面上各台阶面的边曲线, 生成一个曲面, 对曲面进行适当的偏置后, 再“切除”各台阶面。其优点是能够有效保证电极厚度, 使电极具有足够的刚度, 其不足亦比较明显, 即电极具有非成形面, 会增加同一区域所需电极个数。

3 应用案例

在 UG 软件环境下, 利用文中所述的方法, 对图 2(a) 所示三元流闭式叶轮进行进气口区域叶盆加工电极设计。首先, 利用 2.1 节所述的区域划分方法将流道划分为进气口区域与出气口区域。然后, 采用法向偏置的方法求解出能够加工整个进气口区域的电极成形面, 但是此时的电极还不能从流道中无干涉地撤出。再通过不断变换电极每一步的位姿和对每一步中有发生干涉的部分进行去除处理, 即可得到非成形面为台阶面的初始电极, 如图 6 所示。

分别采用 2.3 节所述方法 (1) 与方法 (2) 对初始电极的非成形面进行平滑处理, 如图 7(a) 与图 7(b) 所示。从图 7(a) 中可以看出, 采用减厚的方法进行台阶面的平滑处理, 不仅存在过于薄弱的区域, 还会存在无法“切除”的台阶面区域; 而图 7(b) 中采用方法 (2) 进行平滑处理的电极则厚度较大,

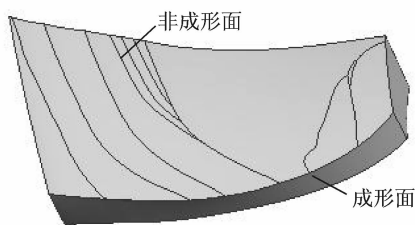
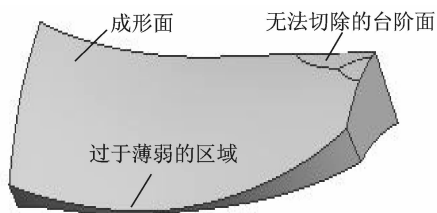
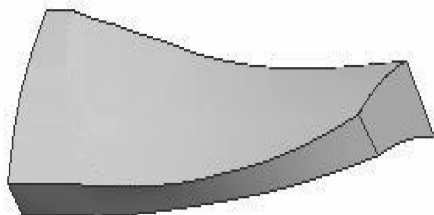


图 6 非成形面处理前的初始电极



(a) 台阶面减厚处理后的电极



(b) 台阶面平滑处理后的电极

图 7 非成形面处理后的电极

刚性较好。

采用上述方法即可完成叶轮叶间流道其他区域的加工电极设计, 添加了统一的设计与制造基准后的所有电极如图 8 所示。图 8 所示为将所有电极在加工终了位置装配在一起的示意图, 进气口、排气口电极添加相同尺寸的设计基准块, 图中斑驳区域为电极接刀处的重叠区域, 有利于消除电极接刀痕迹。

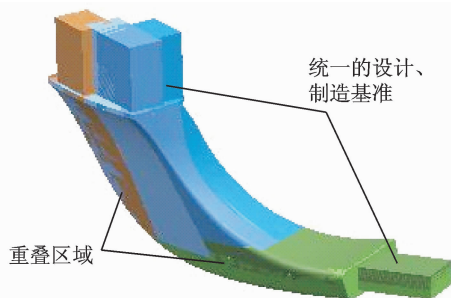


图 8 设计完成后的电极组合

最后运用在 UG 平台上二次开发的加工过程仿真模块, 将加工轨迹离散后把工具与工件进行装配, 在每一个装配瞬间进行基于等间隙假设的布尔减运算, 通过后台编程实现多个装配状态的连续变化, 从而近似模拟出实际的电火花加工过程, 其仿

真界面如图9所示。

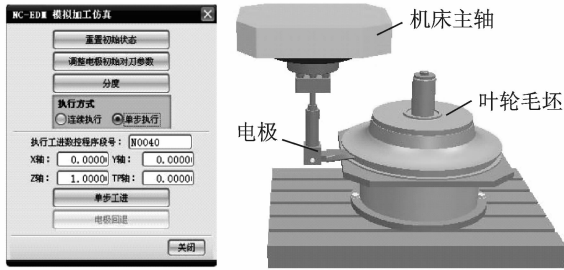


图9 NC-EDM加工过程仿真界面

在具体的仿真过程中,首先将工具电极、叶轮毛坯及工装夹具按实际加工过程中的空间位置关系进行模型装配。在已建立的装配模型上,对各个运动轴方向建立基于尺寸约束的装配约束关系,此装配约束对应于机床的实际运动过程,即作直线运动的运动轴采用距离约束,作回转运动的运动轴采用角度约束,再在轨迹设计中编制好的数控代码来驱动这些约束作同步变化,就能实现与实际加工过程相对应的“动态装配”,以此就可模拟实际的四轴联动加工过程。对于每一个装配位置,电极都以等间隙对工件毛坯做布尔减运算,从而模拟加工出流道模型。

由于是多电极分区域加工,我们不仅需要了解单个电极的加工情况,更需要了解所有电极完成加工流道的整体加工情况,图10为所有电极进行仿真后得到的叶间流道实体模型,由于采用多个电极组合加工,因此存在多处细微的接刀痕迹,不过由于进气口叶背与叶盆型面均采用一个电极加工,故加工后的通道型面光滑,效果良好。即仿真结果验证了文中所采用的设计方法的可行性与正确性。

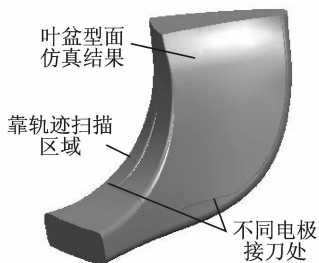


图10 仿真结果与流道理论模型对比

实际加工过程中,电火花加工始终进行等间隙放电加工,文中采用的仿真系统正是基于等间隙去除材料而进行加工过程模拟仿真^[9],因此仿真结果具有相当高的真实性,仿真结果与实际加工效果吻合,这已在图11所示闭式整体叶轮的电火花加工试验中进行了验证。



(a) 三元流闭式整体叶轮

(b) 大小叶片闭式整体叶轮

图11 电火花加工完成的闭式整体叶轮样件

4 结 论

本文针对闭式三元流通道数控电火花加工电极设计难题,重点研究了以下关键技术:

(1)针对闭式三元流通道加工可达性差的问题,将叶间流道分别以叶根圆和叶顶圆为基准进行等间隙偏置,以两偏置线的交点相连将流道划分为进气口加工区域和排气口加工区域,提高了加工可达性;

(2)采用对流道型面型值点进行等间隙偏置的方法,设计了流道各区域的电极成形面;

(3)提出了基于轨迹搜索的电极设计方法,针对某闭式三元流流通道的电火花加工问题,进行了工具电极及其运动轨迹设计;

(4)利用UG平台二次开发的加工过程仿真模块,进行NC-EDM加工过程仿真,验证了工具电极及运动轨迹的合理性。

采用上述设计方法能够快速解决闭式三元流通道电火花加工电极设计的难题,对加工过程进行的模拟仿真,为后续实际加工试验做好了前期准备,可大幅提高设计效率。对于解决包含闭式三元流通道零件的电火花加工具有参考意义。

参考文献:

- [1] 刘宝杰, 邹正平, 严明, 等. 叶轮机计算流体动力学技术现状与发展趋势[J]. 航空学报, 2002, 23(5): 394-403.
Liu Baojie, Zou Zhengping, Yan Ming, et al. Present status and future development of CFD in turbomachinery[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(5): 394-403.
- [2] Zhou Fanzhen, Feng Guotai, Jiang Hongde. The development of highly loaded turbine rotating blades by using 3D optimization design method of turbomachinery blades based on artificial neural network & genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Astronautics Sinica, 2003, 16(4): 198-202.

- [3] Wilby P G. Shockwaves in the rotor world—a personal perspective of 30 years of rotor aerodynamic developments in the UK [J]. *The Aeronautical Journal*, 1998,102(1013): 113-128.
- [4] 刘晓, 康小明, 赵万生. 闭式整体涡轮叶盘多轴联动电火花加工电极运动路径规划[J]. *电加工与模具*, 2012(1): 11-14.
Liu Xiao, Kang Xiaoming, Zhao Wansheng. Electrode path searching for multi-axis NC EDM of shrouded blisk[J]. *Electromachining & Mould*, 2012(1): 11-14.
- [5] 马继川. 航空航天发动机整体叶轮柔性制造(FMS)方案[C]//民用飞机制造技术及准备高层论坛. 天津:[s. n.],2009.
Ma Jichuan. FMS for the integral impellers the aircraftengines and the aerospacecraft engines[C]//Top Forum for Civil Aircraft Manufacturing Technology and Equipment. Tianjin:[s. n.],2009.
- [6] 刘辰, 徐家文, 赵建社, 等. 三元流闭式叶轮组合电加工技术研究Ⅲ——数控电火花精加工关键技术[J]. *航空学报*, 2010, 31(6): 1299-1304.
Liu Chen, Xu Jiawen, Zhao Jianshe, et al. Research of combined electrical machining of 3D-flow closed impeller Ⅲ— Key techniques of numerically controlled electron discharge machining [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010,31(6): 1299-1304.
- [7] 赵建社, 刘辰, 吴锐, 等. 闭式整体构件组合电加工关键技术研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(1):169-176.
Zhao Jianshe, Liu Chen, Wu Rui, et al. Key technology research of combined electrical machining of closed integral structure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011,47(1):169-176.
- [8] 单岩, 王刚, 吴纬纬. 基于刀轨广义偏置的电火花摇动加工补偿方法[J]. *机械工程学报*, 2009,45(10): 99-101.
Shan Yan, Wang Gang, Wu Weiwei. Electrode orbiting compensation in EDM based on generalized offset of tool path[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(10): 99-101.
- [9] 赵建社, 徐家文, 王福元, 等. 整体构件数控电解加工数字化仿真技术[J]. *南京航空航天大学学报*, 2007, 39(3): 333-337.
Zhao Jianshe, Xu Jiawen, Wang Fuyuan, et al. Digital dimulation technology for NC-electrochemical machining of integral components [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2007, 39(3): 333-337.