

doi:10.7527/S1000-6893.2013.0301

# 整体叶轮自由曲面叶片精密电解加工工艺研究

赵建社\*, 王福元<sup>1,2</sup>, 徐家文, 刘玉杰

(1 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

(1 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

(2 盐城工学院, 机械工程学院, 江苏 盐城 224051)

**摘要:** 针对自由曲面整体叶轮提出了一种适用于自由曲面叶片型面精加工的电解工艺方法, 首先采用分步法对整体叶轮的叶间通道进行加工, 再采用成形阴极对叶片进行精加工, 使其满足叶片加工要求。为了实现叶片的精加工, 设计了叶片电解精加工的实验装置, 设计中利用运动仿真软件对成形阴极结构进行了改进, 并且运用流场模拟软件对阴极流道进行模拟分析, 使阴极形状和极间的电解液流速满足加工要求。在加工试验过程中, 对阴极的运动路径进行了分析与优化, 通过优化减少了进给方向对叶片加工间隙分布不均的影响, 并采用高频脉冲电源加工减小加工间隙, 提高叶片加工精度。试验结果表明, 该工艺方案可行, 加工的自由曲面整体叶轮叶片精度得到了显著提高。

**关键词:** 整体叶轮; 电解加工; 成形阴极; 路径优化; 精加工

**中图分类号:** TG662 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6893 (2013) XX-XXXX-XX

航空发动机上采用整体叶轮已有二十多年的历史, 目前使用整体叶轮的发动机型号有SaM146, Gens等<sup>[1-2]</sup>, 正在研发的新型发动机上将使用的发动机型号有LEAP-X、TechX<sup>[3-4]</sup>。随着整体叶轮的推广与应用, 整体叶轮的精密高效加工技术被各国视为核心技术秘密, 电解加工<sup>[5-7]</sup>、高速切削<sup>[8-10]</sup>、连接法<sup>[11]</sup>是目前整体叶轮主要采用的加工方法。整体叶轮的电解加工技术开始于美国Sermatech-Lehr公司在1985年就开始采用电解加工T700直升机引擎中的整体叶轮, 后来德国MTU、Leitritz公司、美国TURBOCAM、土耳其TEI等公司也运用电解技术加工整体叶轮。国内, 中航工业北京航空制造工程研究所、南京航空航天大学等单位也开展了整体叶轮电解加工工艺研究。从加工方法来分, 整体叶轮电解加工方

法可分为拷贝式<sup>[12]</sup>、数控展成式<sup>[13]</sup>、套料式等加工类型。国内对整体叶轮开展的电解加工方法主要有数控展成与套料加工, 国外采用的方法主要是拷贝式方法, 但由于该技术被视为企业的核心技术, 相关内容鲜有报道。国内还未成功将电解加工应用到整体叶轮叶片型面精密加工中, 其主要问题在于叶片型面电解加工精度不够高。由于航空发动机整体叶轮的叶片型面多为自由曲面, 国内已有的电解加工技术在加工精度上难以达到其设计要求, 仍需要对工艺作进一步的研究。

## 1 叶片型面精密电解加工工艺

为提高整体叶轮电解加工精度, 在研究过程中拟采用数控展成与成形阴极拷贝成形组合的电解加工方法进行自由曲面整体叶轮叶片精加工。

收稿日期: 2013-04-09; 退修日期: 2013-04-11; 录用日期: 2013-06-09; 网络出版时间:

网络出版地址:

DOI: 10.7527/S1000-6893.2013.0301

基金项目: 航空科学基金 (2011ZE52055); 青年科技创新基金 (NS2012012、NS2013052);

江苏省高校优势学科建设工程资助项目 (J0502)

\*通讯作者. Tel.: 025-84891686 E-mail: zhaojs@nuaa.edu.cn

**引用格式:** Zhao Jian She, Wang Fu Yuan, Xu Jia Wen, et al. Research on Electrochemical Machining Process for Fine Finishing of Integral Impeller with Free-form Surface Blade. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, XX(x): xxx-xxx. 赵建社, 王福元, 徐家文, 等. 整体叶轮自由曲面叶片精密电解加工工艺研究. *航空学报*, 2013, 33(x): xxx-xxx.

该组合电解加工方法把整体叶轮的叶片加工分为叶间通道加工和叶片型面精加工两个基本步骤,在工艺设计过程中利用数字化制造技术手段解决自由曲面整体叶轮叶片加工中的阴极设计、参数选择、加工路径等方面的难题<sup>[14-15]</sup>,其加工流程如图1所示。

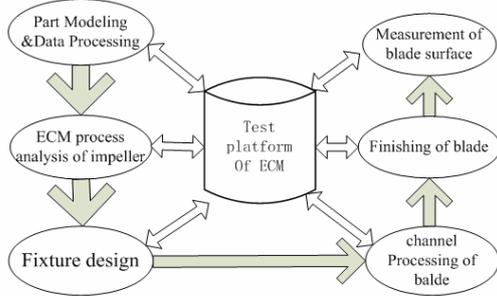


图1 整体叶轮叶片型面精密电解加工工艺流程

Fig.1 ECM process for Fine Finishing of integral impeller

## 2 叶片精加工装置设计

### 2.1 加工装置结构设计

在叶片精加工的电解加工装置设计上可考虑的结构形式主要有开式和闭式两种形式,闭式结构利用密封腔构成一个封闭的电解液流动区间,通过构建的封闭空间控制电解液流动方向,使电解液按设计的路径流动,进出口的压力易于控制,由于叶轮两叶片之间的空间较小,密封装置设计难度较大。开式加工装置利用高速流动的电解液形成加工间隙流场,满足加工要求。由于开式加工装置不需要过多的密封,阴极运动受到的限制少,故选用开式的加工装置开展整体叶轮的精加工工艺试验。在工艺试验中设计的开式的叶片电解加工装置如图2所示,该加工装置由上盖板、下盖板、导流板、阴极、储液腔、接杆等组成。

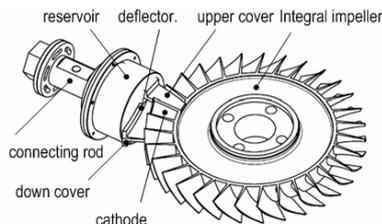


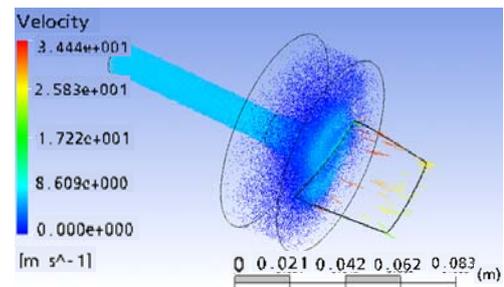
图2 整体叶轮开式加工装置

Fig.2 Open ECM device of integral impeller

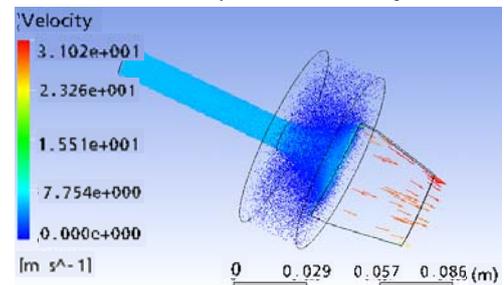
### 2.2 阴极流场设计与分析

1、流道设计。成形阴极的流道由入口、输送区、过渡区、出口、导流区组成。其中过渡区把输送的电解液在此存储,形成积液区以改变电解液流动特性,它还使电解液流束从柱状变为狭缝状,经过出液口输出,再在导流板的导流作用下沿阴极表面流动进入加工间隙。

2、流场分析。为了掌握加工间隙中的流速分布,设计中利用CFX软件进行流场分析。图3(a)为在阴极初始设计阶段所做的分析结果,由分析结果可知,加工间隙中前部流速偏低,部分区域流速小于5m/s,特别是在加工间隙边缘处。为此对原设计的阴极结构进行改进,例如增加上下密封,图3(b)为增加上下密封后阴极流场分析结果,由分析结果可知,当进口压力 $p_0=0.75\text{MPa}$ 时,加工间隙中的电解液流速为25~31m/s之间,能够满足电解加工流速要求。



(a) Flow analysis results of initial design



(b) Flow analysis results with upper and down cover

图3 成形阴极流场分析

Fig.3 Flow field analysis of shaped cathode

3、成形部件设计。在设计成形阴极形状时,必须在已加工出的叶间通道空间内进行。由于叶片扭曲,必须考虑成形阴极的进出,防止发生运动干涉,在设计时先根据叶间大小确定阴极的初始外形,然后运用数控运动仿真软件对阴极进入叶间通道路径进行仿真,观察阴极与叶片的碰撞或干涉。图4所示为在成形阴极设计时运用运动仿真软件对阴极运动进行模拟的过程,利用

模拟结果对阴极结构进行修改，避免了阴极与叶片、工装的运动干涉，使阴极能够顺利进入叶间通道，完成加工进给运动。

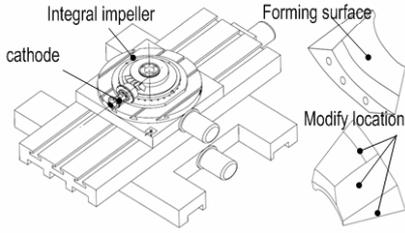


图4 成形部件设计

Fig.4 Contour Design of shaped cathode

除了考虑阴极外形之外，还要进行阴极型面设计，在型面设计中重点考虑流场、进给运动对叶片加工精度的影响。在设计中先用叶片的型面作为阴极初始型面，在此基础上考虑流场与进给方向对型面的影响，对型面进行修正，经过多次修正后达到加工要求。

### 3 加工路径设计与优化

进给方向影响叶片型面电解加工间隙分布，进而影响电解成形精度。下面通过对加工路径优化以进一步提高叶片的加工精度。如图5所示，工件与阴极成形面都为自由曲面， $P$ 为阴极上任意一点， $P'$ 加工表面与 $P$ 相对应的点， $\beta_f$ 为阴极进给平面， $n_c$ 为阴极上 $P$ 点法线， $n_a$ 为工件表面相应点 $P'$ 的法线，即为工件表面的溶解方向。由于阴极表面与工件表面法线不平行，阴极表面法线 $n_c$ 与工件表面法线 $n_a$ 之间存在一定的夹角，进给方向 $v_f$ 与 $n_c$ 之间也存在一定的夹角，通过合理选择阴极进给方向 $v_f$ 可减小加工间隙的分布不均现象。

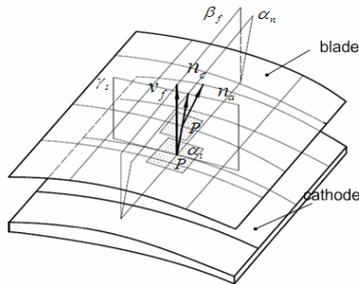


图5 进给方向与叶片溶解方向

Fig.5 Feed direction and blade dissolved direction

设阴极表面与工件的表面为B样条曲面，叶片型面和阴极表面的参数方程分别为

$$P_a(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m F_{i,n}(u) F_{j,m}(v) P_{a_{i,j}}; \quad u,v \in [0,1]$$

$$P_c(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m F_{i,n}(u) F_{j,m}(v) P_{c_{i,j}}; \quad u,v \in [0,1]$$

式中： $F_{i,n}(u)$ ， $F_{j,m}(v)$ 为基函数； $P_{a_{i,j}}$ 为叶片型面特征网格顶点， $P_{c_{i,j}}$ 为阴极型面特征网格顶点。

点 $P$ 与点 $P'$ 法线分别表示为

$$n_a = \frac{\frac{\partial f_a}{\partial x} i + \frac{\partial f_a}{\partial y} j + \frac{\partial f_a}{\partial z} k}{\sqrt{(\frac{\partial f_a}{\partial x})^2 + (\frac{\partial f_a}{\partial y})^2 + 1}}; \quad n_c = \frac{\frac{\partial f_c}{\partial x} i + \frac{\partial f_c}{\partial y} j + \frac{\partial f_c}{\partial z} k}{\sqrt{(\frac{\partial f_c}{\partial x})^2 + (\frac{\partial f_c}{\partial y})^2 + 1}} \quad (2)$$

式中： $f_a$ 和 $f_c$ 分别为叶片和阴极型面表达函数。阴极表面上 $P$ 点和工件表面上 $P'$ 点的法线夹角为

$$\theta_{ac} = \arccos\left(\frac{n_a \cdot n_c}{|n_a| |n_c|}\right) \quad (3)$$

由于叶片表面为空间曲面，进给方向为空间矢量，阴极三维进给优化计算比较复杂，为此把阴极三维进给方向的优化分为径向平面内优化与轴向平面内优化两个步骤。

首先在径向截面内对阴极进给方向进行优化。先把整个叶片在高度方向上等距离划分为 $n$ 个径向截面，图6(a)所示为其中一个径向截面，在该截面内的叶片轮廓线上取 $m$ 个数据点， $P$ 为其中的任意一点， $n_{a_{i,j}}$ 为 $P$ 点的法向。

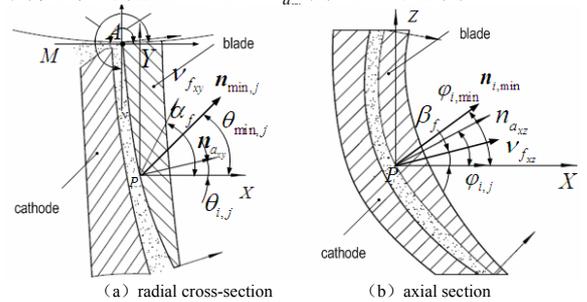


图6 成形阴极加工进给方向优化

Fig.6 Feed direction optimization of shaped cathode

假设第 $j$ 个截面内的最优进给方向为 $n_{\min,j}$ ，它与 $X$ 轴的夹角为 $\theta_{\min,j}$ ，则进给方向 $\theta_{\min,j}$ 的计算公式为

$$\theta_{\min,j} = \min\left(\sum_{i=1}^m \frac{|\theta_{i,j} - \theta_{\min,j}|}{\theta_{\min,j}}\right); \quad j = 1, 2, L, n \quad (4)$$

在得到每个径向截面内的 $\theta_{\min,j}$ 之后，再对所有径向截面的叶片表面法向进行优化，得到阴极

在XY平面的进给方向，它与X轴的夹角 $\theta_{\min}$ 为

$$\theta_{\min} : \min\left(\sum_{j=1}^n \frac{|\theta_{\min,j} - \theta_{\min}|}{\theta_{\min}}\right) \quad (5)$$

同时还要考虑到叶片形状与叶根对阴极进给运动的限制。如图6(a)所示，A点为j截面上叶根圆与叶片轮廓线的交点， $\alpha_{o_j}$ 为叶根圆上A点切线与X轴的夹角， $\alpha_{e_j}$ 为叶片型面上A点切线与X轴的夹角，在径向截面内阴极的进给角度应在 $\alpha_{o_j}$ 与 $\alpha_{e_j}$ 之间。设在整个叶片型面上 $\alpha_{o_j}$ 的最大值为 $\alpha_o$ ， $\alpha_{e_j}$ 的最小值为 $\alpha_e$ ，则 $\alpha_o$ 与 $\alpha_e$ 表示为

$$\begin{cases} \alpha_o = \max(\alpha_{o_1}, L, \alpha_{o_j}, K, \alpha_{o_n}) & j=1, 2, L, n \\ \alpha_e = \min(\alpha_{e_1}, L, \alpha_{e_j}, K, \alpha_{e_n}) & j=1, 2, L, n \end{cases} \quad (6)$$

加工叶片时阴极在径向进给平面内的进给方向 $\alpha_f$ 需要满足的条件为

$$\begin{aligned} (1) \quad & \alpha_o < \alpha_f < \alpha_e; \\ \alpha_f : (2) \quad & |\theta_{\min} - \alpha_f| \leq 45^\circ; \\ (3) \quad & \min(|\theta_{\min} - \alpha_f|). \end{aligned} \quad (7)$$

在(7)约束条件中，条件(1)是叶片与叶根形状对进给方向产生的约束，当阴极进给角度超出这个范围时就会产生加工过切。约束条件(2)是电解加工基本规律对 $\alpha_f$ 产生的约束，由电解加工成形规律可知，当阴极进给方向与叶片表面法向夹角大于 $45^\circ$ 时，则误差会急剧增大。条件(3)是叶片径向平面内点的法向对进给方向约束，即在满足(1)、(2)条件的基础上， $\alpha_f$ 与 $\theta_{\min}$ 的夹角越小越好。

其次在轴向平面对阴极进给方向进行优化，轴向平面的进给方向优化过程与径向截面向优化过程相同。如图6(b)所示，在轴向平面内的叶片长度方向上等距划分叶片，在每个截面求得 $\varphi_{i,\min}$ ，再得到整个叶片轴向平面内的进给角度 $\varphi_{\min}$ ，利用约束条件对其约束得到XZ平面内的进给方向， $\varphi_{i,\min}$ 与 $\varphi_{\min}$ 的计算公式为

$$\begin{cases} \varphi_{i,\min} : \min\left(\sum_{j=1}^m \frac{|\varphi_{i,j} - \varphi_{i,\min}|}{\varphi_{i,\min}}\right); & i=1, 2, L, m \\ \varphi_{\min} : \min\left(\sum_{i=1}^m \frac{|\theta_{\min,j} - \theta_{\min}|}{\theta_{\min}}\right) \end{cases} \quad (8)$$

则轴向平面内进给方向 $\kappa_f$ 要满足的条件为

$$\min(|\varphi_{\min} - \kappa_f|) \quad (9)$$

## 4 加工实验

### 4.1 试验条件

研究对象为某型航空发动机整体叶轮，其整体叶轮外形如图7所示。该叶轮直径为 $\phi 240\text{mm}$ ，包含31个叶片，其叶片形状为自由曲面，叶背扭曲角度为 $28.09^\circ$ ，零件材料为镍基高温合金GH4169。



图7 小直径整体涡轮

Fig.7 The small diameter integral impeller

在该叶轮的工艺试验中选用了脉冲电源，其频率为25KHz，占空比0.75%，加工平均电压为12V，进给速度为 $0.1 \sim 0.5\text{mm/min}$ ，电解液为20%  $\text{NaNO}_3$ 溶液，进口压力为 $0.8\text{MPa}$ ，初始温度为 $30^\circ\text{C}$ ，图8为叶片电解精加工的现场。

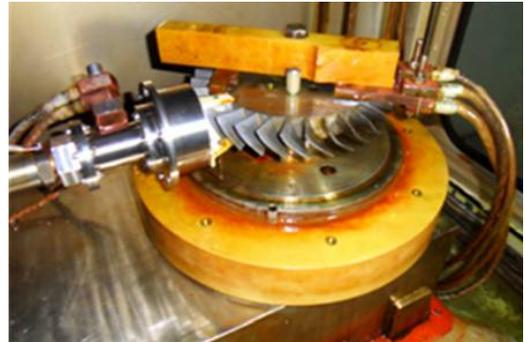


图8 整体叶轮电解精加工

Fig.8 ECM process site of integral impeller

### 1、加工误差分析

在基于UG开发的仿真软件中把加工模型与原叶片的几何模型进行比较，在原叶片表面取样本数据点作为加工误差的分析对象，经过这些点作法线与加工的叶片几何模型相交，求得两个交点的距离，该距离即为加工误差。叶片理论几何模型与加工的叶片表面的对比过程如图9所示，

通过两模型对比及加工误差计算输出加工误差。

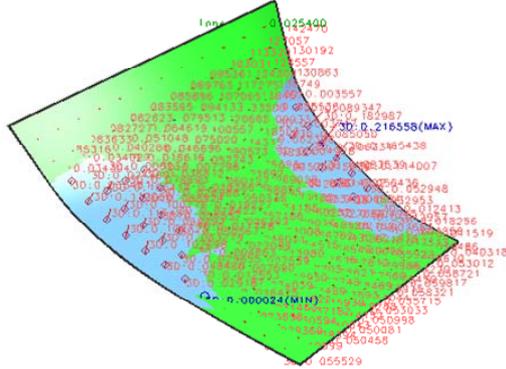


图9 叶片表面加工误差分析

Fig.9 Error analysis of blade surface

## 2、阴极型面修正

和过去展成法相比，以上采用成形阴极加工的叶片精度有了较大的提高，但是还有没有达到加工要求，下面采用阴极型面修正法进一步提高加工精度。由于直接测量叶片的加工间隙十分困难，目前还没有直接测量成形阴极叶片加工间隙的方法，但可以间接计算叶片成形阴极加工的间隙分布。利用CAD软件及其分析工具把加工得到的叶片几何模型与阴极型面进行对比，则可以得到叶片的电解加工间隙分布。叶片电解加工间隙比较过程如图10所示，在阴极表面上取一些采样点，计算采样点到加工叶片型面的法向距离或自行设置方向的距离，则该距离即为通过分析计算得到的叶片加工间隙。通过对加工间隙的分布对阴极的型面进行修正，提高叶片加工精度。

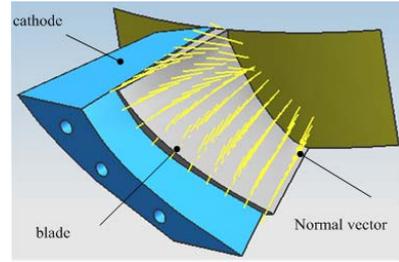


图10 叶片电解加工间隙对比

Fig.10 Contrast of Electrochemical machining gap

## 4.2 试验结果

锻造的整体叶轮毛坯经过叶背、叶盆展成电解加工后，再利用上述加工方法和装置进行叶片精加工，加工完成的叶片形状如图11所示。



图11 精加工后的整体叶轮试件

Fig.11 Integral impeller of fine finishing

表1为对上述加工后的整体叶轮叶片进行误差分析与计算得到的叶背型面上部分采样点的法向加工误差。从测量结果来看，叶片型面的加工误差控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 内。在整体叶轮31个叶片的电解加工试验中，加工过程稳定，加工的叶片型面一致性好。叶片表面没有出现流痕现象，表面粗糙度达到 $Ra 1.6\mu\text{m}$ 。

表1 加工的叶背型面上部分采样点的法向加工误差分布

Table 1 The distribution of processing errors to some sampling points on the dorsal surface of the processing part

point position in section 1		error in section 1	point position in section 6		error in section 6	point position in section 10		error in section 10
X/mm	Y/mm	En /mm	X/mm	Y/mm	En /mm	X/mm	Y/mm	En /mm
-17.080	117.012	0.070	0.495	117.012	-0.097	11.531	117.012	0.094
-16.197	113.594	0.065	0.595	113.594	-0.060	10.703	113.594	-0.098
-15.269	109.997	-0.060	0.760	109.997	-0.004	9.832	109.997	0.095
-14.312	106.292	0.096	0.993	106.292	0.048	8.934	106.292	0.089
-13.345	102.544	-0.055	1.296	102.544	0.075	8.026	102.544	-0.088
-12.384	98.823	0.097	1.672	98.823	0.054	7.125	98.823	0.095
-11.447	95.196	-0.057	2.123	95.196	-0.030	6.246	95.196	0.091
-10.550	91.719	0.071	2.648	91.719	-0.098	5.403	91.719	0.094

## 5 结论

整体叶轮自由曲面叶片精密电解加工工艺研究为整体叶轮的整体制造奠定了坚实的工艺基础,试验结果显示了诱人的应用前景。通过上述精密电解加工工艺试验研究可得出以下结论:

(1) 采用简单形状阴极数控展成电解加工先加工出叶间预通道,然后采用成形阴极进行精密电解加工的工艺方法能够显著提高叶片型面的加工精度,是实现自由曲面叶片整体叶轮高效、精密整体制造的有效技术途径;

(2) 试验中采用的成形阴极及专用工装设计方法,能够满足整体叶轮叶片型面电解加工的流场要求,加工过程稳定;

(3) 提出的成形阴极进给方向确定及优化方法能够显著改善复杂型面电解加工加工间隙的分布状况,有利于提高加工精度。

## 参 考 文 献

- [1] Wall Robert; Taverna Michael A. Growth engine[J]. Aviation Week and Space Technology, 2007, 166(5): 52-54
- [2] Kandebo Stanley W. GenX Details[J]. Aviation Week and Space Technology. 2004,160(16):89-91
- [3] Chen D G. Significant impact of engine technical innovation on airplane performance advancement[J]. Journal of Aerospace Power. 2008,23( 6 ):981-985
- [4] Foust M J, Thomsen D, Stickles R. Development of the GE aviation low emissions TAPS combustor for next generation aircraft engines[C]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 2012: 936:940
- [5] Xu Jiawen, Yun Naizhang, Tang Yangxin, et al. The modelling of NC-electrochemical contour evolution machining using a rotary tool-cathod[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159 (2): 272-277
- [6] Zhu Yongwei, Xu Jiawen. Shaping Law and Process Study on Combined Wobbling Feeds for Electrochemical Contour Evolution Machining Integral Component Parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 280-286. (in Chinese)
- [7] Wu Jianming. Research on the large diameter integral impeller with numerical control electrochemical machining[D]. Nanjing: College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008:74-88. ( in Chinese) 吴建民. 大直径整体叶轮数控电解加工技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008:74-88.
- [8] Ren Junxue, He Qinggong, Yao Changfeng. Tool Axis Orientation Planning Method of Fixed Axis in Each Cutting Line for Closed Blisk Tunnel Five-axis Machining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(10): 1923-1930. (in Chinese) 任军学, 姜振南, 姚倡锋. 闭式整体叶盘通道五坐标分行定轴加工刀轴矢量规划方法 [J]. 航空学报, 2012, 33(10): 1923-1930
- [9] Luo Ming, Wu Baohai, LI Shan, Zhang Dinghua, et al . Five-axis Tool Orientation Optimization Based on Kinematical Method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 159-163. (in Chinese) 罗明, 吴宝海, 李山. 自由曲面五轴加工刀轴矢量的运动学优化方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 159-163
- [10] Włodzimierz Wilk M Sc, Jacek Tota M Sc. Modern technology of the turbine blades removal machining[C] . 8th International Conference on Advanced Manufacturing Operations, 2007: 347-355
- [11] Zhong Yan, Hu Chao. Welding Line Structure Design and Test of Linear Friction Welding Blisk[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2012, (12): 44-47. (in Chinese) 钟燕, 胡超. 线性摩擦焊整体叶盘焊缝结构设计及试验[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, (12): 44-47
- [12] Xu Zhengyang, Zhu Di, Wang Lei. Character of Flow Field on Turbine Blade with 3-Electrode Feeding Method in Electrochemical Machining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 189-194. (in Chinese) 徐正扬, 朱荻, 王蕾. 三头进给电解加工叶片流场特性[J]. 机械工程学报. 2008, 44(4): 189-194

- [13] Wang Fuyuan, Xu Jiawen, Zhao Jianshe. Process and Test of Electrochemical Machining of Large Diameter Integral Impeller by Fractional Step Machining Method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31 (12): 2450-2456. (in Chinese)  
王福元, 徐家文, 赵建社. 大直径整体叶轮分步法电解加工工艺与试验[J]. 航空学报, 2010, 31 (12): 2450-2456
- [14] Wang Fuyuan, Xu Jiawen. Simulation and Automatic Programming Platform for NC Electrochemical Machining of Integral Impeller [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16 (8): 1673-1678. (in Chinese)  
王福元, 徐家文. 整体叶轮数控电解加工仿真与自动编程平台[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16 (8): 1673-1678
- [15] Marius Purcara, Andrei Dorochenkoa, Leslie Bortelsa, et al. Advanced CAD integrated approach for 3D electrochemical machining simulations [J]. Journal of materials processing technology, 2008, (203): 58-71
- 作者简介:**  
赵建社 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 特种加工新技术、整体构件组合电加工技术。  
Tel: 025-84891686  
E-mail: zhaojs@nuaa.edu.cn
- 王福元 男, 博士, 教授。主要研究方向: CAD/CAM、特种加工技术。  
Tel: 0515-88298571  
E-mail: wfyycit@163.com
- 徐家文 男, 硕士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 特种加工技术、机械制造及其自动化、计算机应用。  
Tel: 025-84893859  
E-mail: Xjw052@nuaa.edu.cn

## Research on Electrochemical Machining Process for Fine Finishing of Integral Impeller with Free-form Surface Blade

ZHAO Jianshe<sup>\*</sup>, WANG Fuyuan<sup>1,2</sup>, XU Jiawen, LIU Yujie

(1 College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, 210016)

(1 Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing, China, 210016)

(2 College of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, China, 224051)

**Abstract:** To solve finishing integral impeller, an electrochemical machining method suitable for free-form surface blade is proposed. The fractional-step method is firstly adopted to form the passage between the adjacent blades. Then the shaped-cathode is utilized to finish blade to its requirements on the above basis. The experimental device for the electrochemical machining of blades is developed. The cathode shape is improved by the motion simulation software and the flow channel of cathode is analyzed by numerical simulation software during the design, so that the shape of the cathode and the electrolyte flow rate in the interelectrode meet machining requirements. During the machining experiment, the motion path of the cathode is optimized to reduce the influence on distribution of interelectrode gap. The high frequency pulse power is used to reduce the interelectrode gap, improve the blade machining accuracy in experiments. The experimental results show that, the ECM process for the free-form surface blade is feasible and the precision of the machined blade in integral impeller is increased obviously.

**Key words:** integral impeller; electrochemical machining; shaped cathode; path optimization; fine machining

Received: 2013-04-09; Revised: 2013-04-11; Accepted: 2013-06-09; Published online:

URL:

DOI: 10.7527/S1000-6893.2013.0301

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2011ZE52055); Youth Science and Technology Innovation Fund of NUA (NS2012012, NS2013052); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education (J0502)

\*Corresponding author. Tel.: 025-84891686 E-mail: zhaojs@nuaa.edu.cn