

整体叶盘电解加工阴极修正方法与试验

刘嘉 方忠东 邓守成 朱栋

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要: 电解加工是航空发动机整体叶盘制造的主要技术之一, 阴极修正是该加工技术的重要环节。为了提升阴极修正精度, 提出了恒采样点空间法向修正方法。该方法将阴极型面设计、加工误差分析、工具阴极修正统一至阳极采样点空间法向的一维坐标系中, 将复杂的三维曲面修正简化为离散的一维修正, 消除了加工误差与修正量的错位。以某整体叶盘为例, 在自行研制的整体叶盘型面电解加工机床上开展工具阴极修正试验, 采用三坐标测量机对修正前后的加工样件进行检测, 经过一次修正, 叶片电解加工精度由 0.25 mm 提高至 0.04 mm, 试验结果表明该阴极修正方法合理有效, 具有较强的可行性。

关键词: 电解加工; 整体叶盘; 阴极设计; 阴极修正

中图分类号: TG662 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)05-0744-06

Experimental Study on Cathode Modification for Electrochemical Machining of Blisk

Liu Jia, Fang Zhongdong, Deng Shoucheng, Zhu Dong

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

Abstract: Electrochemical machining (ECM) is one of the important technologies in production of aero-engine blisk. The cathode modification is an important part of the processing technology. In order to improve the modification precision of cathode, a new method based on normal direction of constant sampling points is presented. The 1-D coordinate system along the normal direction of sampling points is established. The basic cathode surface, machining error and correction value are calculated in the coordinate system. The position deviation of machining error and correction value is eliminated by using the new method. In order to test the validity of the cathode modification method, experimental investigations of blisk processing are carried out by using a self-designed blisk ECM system. The machining samples are detected by the three-coordinate measuring machine. After one modification of cathode, the accuracy of ECM blade is increased from 0.25 mm to 0.04 mm. Experimental results verify the feasibility and effectiveness of the new cathode modification method.

Key words: electrochemical machining; blisk; cathode design; cathode modification

电解加工是利用电化学反应阳极溶解原理去除材料的一种加工工艺, 该技术具有加工效率高、表面质量好、工具无损耗、加工与材料力学性能无关等优点, 已成为航空发动机叶片、整体叶盘等难

切削复杂结构零件的主要制造方法之一^[1-2]。电解加工为非接触式加工, 工件与工具之间存在加工间隙, 然而该加工间隙受电场、流场、电化学等多因素交互作用, 精确预测非常困难^[3-6], 因此工程上通常

基金项目: 国家自然科学基金(51205199)资助项目; 航空科学基金(20133052)资助项目。

收稿日期: 2014-05-10; **修订日期:** 2014-07-10

通信作者: 朱栋, 男, 副教授, E-mail: zhudong@nuaa.edu.cn。

采用 $\cos\theta$ 、反考等方法获得工具阴极的近似形状,再通过试验修正最终获得工具阴极形状^[7-9]。在电解加工成型规律的理论中,当加工进入平衡状态时,工件阳极与其型面法线方向工具阴极之间的距离逐渐趋于法向平衡间隙,即工件阳极的形状主要受法线方向上的工具阴极形状影响,因此工具阴极修正应该基于工件阳极空间法线方向进行。然而传统阴极修正方法基于阳极与阴极的二维截面分析误差与修正量,未充分考虑工件三维形状,当阳极型面较为扭曲时,会引起加工误差与修正量错位,导致修正不足或修正过度,影响修正精度,增加修正次数,因此有必要从空间法线方向出发,开展工具阴极修正研究。

为了提高阴极修正精度,在分析电解加工成型规律基础上,提出了恒采样点空间法向工具阴极修正方法,该方法将阴极型面设计、加工误差分析、工具阴极修正统一至阳极采样点空间法向的一维坐标系中,将复杂的三维曲面修正简化为离散的一维修正,消除了加工误差与修正量的错位,大幅简化了修正过程、显著提升了修正精度。以整体叶盘叶片为加工对象,开展恒采样点空间法向阴极修正试验,通过修正前后的加工误差的对比与分析,提出阴极修正方法的可行性与有效性。

1 恒采样点法向修正方法

电解加工过程中,工件接电源正极,工具接电源负极,工具与工件之间通过具有一定压力与流速的电解液,在电化学反应作用下工件金属逐渐溶解,随着工具不断进给,工件形状逐渐趋近于工具,直至加工完成,其加工原理如图 1 所示。

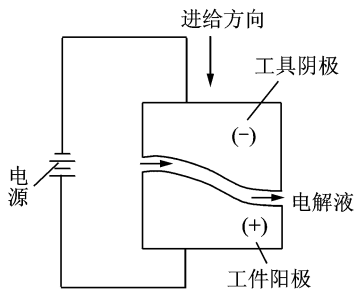


图 1 电解加工方法

Fig.1 Method of electrochemical machining

在揭示电解加工成型规律的经典理论 $\cos\theta$ 法中,当电解加工进入平衡状态时,如图 2 所示,工件阳极的 A 点与其型面法线方向上工具阴极的 B 点之间的距离逐渐趋于稳定,该距离满足法向平衡间

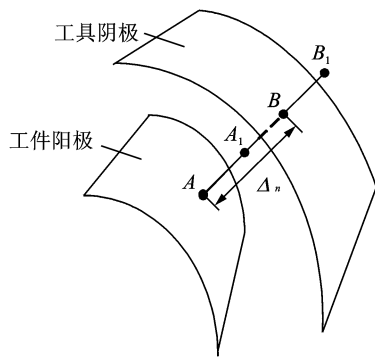


图 2 基于 $\cos\theta$ 法的成型规律

Fig.2 Forming regularity of $\cos\theta$ method in ECM

隙公式,如式(1)所示

$$\Delta_n = \frac{\Delta_b}{\cos\theta} = \frac{\eta\omega\kappa U_R}{v_a \cos\theta} \quad (1)$$

式中: Δ_n 为电解加工法向平衡间隙, Δ_b 为电解加工端面平衡间隙, θ 为工具阴极进给方向与工件阳极型面法线方向之间的夹角, η 为电流效率, ω 为体积电化学当量, κ 为电解液电导率, U_R 为欧姆压降, v_a 为工具阴极进给速度。

对上述结论进行分析,如图 2 所示,若工具阴极上 B 点沿工件阳极 A 点空间法线方向移动至 B₁ 点,则 A 点也会沿相应的方向移动至 A₁ 点,B 点与 A 点移动距离的大小一致。这就说明工件阳极上 A 点的成型,主要取决于其空间法线方向上 B 点的位置,若在加工中 A 点存在加工误差,那么沿 A 点空间法线方向调整 B 点的位置即可消除误差。由此可见,工具阴极应该基于工件阳极型面的空间法线方向进行修正。

1.1 传统阴极修正方法

在传统工具阴极修正过程中,加工误差与修正量的确定通常基于标准阳极、实际阳极、工具阴极的二维截平面分析,其修正过程如图 3 所示,截平面中标准阳极模型上的 A 点与 C 点加工误差分别为 AA₁,CC₁,修正前阴极上的 B 点与 D 点分别位于 A 点与 C 点平面法线方向上,沿 AB 方向与 CD 方向分别计算修正量获得 BB₁,DD₁ 点坐标,这两点即修正后阴极上的点。

然而,当工件阳极型面扭曲程度较大时,二维截平面内的法线与三位空间中的法线方向差异较大,沿二维截面分析会引起加工误差与修正量错位,引起修正不足或过修正,影响阴极修正精度,导致工具阴极必须经过多次修正方可满足生产需求,增加了研究周期与研发成本,因此有必要针对工件阳极型面空间法线方向开展工具阴极修正研究。

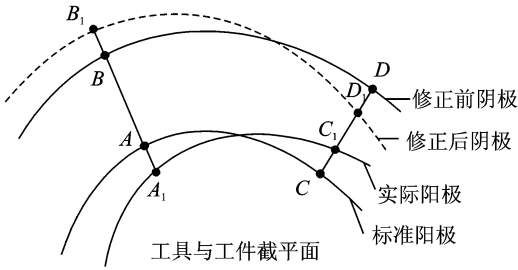


图3 传统工具阴极修正方法

Fig. 3 Traditional method of cathode modification

1.2 恒采样点空间法向修正方法

为了提高阴极修正精度,提出了恒采样点空间法向工具阴极修正方法,以工件阳极上某采样点为例,该采样点的修正过程如图4所示,

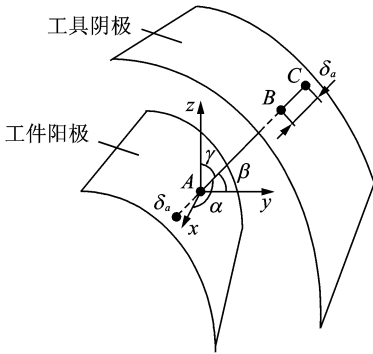


图4 恒采样点空间法向修正方法

Fig. 4 Cathode modification method on normal direction of constant sampling points

首先,在工件阳极理论模型上均匀选取若干采样点,如图中采样点A为例,该点坐标值为 (x_0, y_0, z_0) ,假设该点空间法线方向与坐标轴夹角为 (α, β, γ) ,该点法向平衡间隙为 Δ_n ,采用 $\cos\theta$ 法设计工具阴极,可获得阴极型面上与A点对应的B点,B点坐标 (x_1, y_1, z_1) 满足式(2),依次计算全部采样点的对应点,并将全部对应点拟合成曲面,该曲面就是修正前的工具阴极型面。

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + \Delta_n \cdot \cos\alpha \\ y_1 = y_0 + \Delta_n \cdot \cos\beta \\ z_1 = z_0 + \Delta_n \cdot \cos\gamma \end{cases} \quad (2)$$

其次,开展修正前的工具阴极型面加工试验,以选中的采样点坐标为理论值,以采样点空间法线方向为检测方向,采用三坐标测量机对试验样件进行加工误差检测,可得A点的法向加工误差加工误差为 δ_a ,如图可知A点已加工过切,若要修正过切的误差量,工具阴极上的B点必须向远离A点

的方向移动,以工误差为 δ_a 为修正量,将修正量代入式(3),即可获得B点沿A点法线方向的修正点C,该点坐标为 (x_2, y_2, z_2) ,依次计算全部修正点并将其拟合成曲面,该曲面就是修正后的工具阴极型面。

$$\begin{cases} x_2 = x_1 - \delta_a \cdot \cos\alpha \\ y_2 = y_1 - \delta_a \cdot \cos\beta \\ z_2 = z_1 - \delta_a \cdot \cos\gamma \end{cases} \quad (3)$$

上述方法基于工件阳极型面法线方向进行阴极修正,在修正过程中将阴极型面设计、加工误差分析、工具阴极修正统一至阳极采样点空间法向的一维坐标系中,将复杂的三维曲面修正简化为离散的一维修正,从原理上消除了加工误差与修正量的错位,可显著提升阴极修正精度;同时将三维曲面修正转化为一维修正后,三坐标测量获得的加工误差无需进行三维建模,可直接处理并代入计算修正点坐标,这势必显著提升阴极修正效率。为了验证恒采样点空间法向工具阴极修正方法可行性与有效性,以某复杂曲面整体叶盘叶片型面加工为例,开展工具阴极修正试验。

2 工具阴极修正试验

工具阴极修正试验的加工对象为某整体叶盘叶片型面,叶片理论模型如图5所示,叶片的叶盆、叶背型面均由7条截面线拟合而成,如图叶盆截面线 P_0 至 P_6 、叶背截面线 B_0 至 B_6 ,本次试验以上述14条截面线上的点作为采样点开展工具阴极设计与修正。

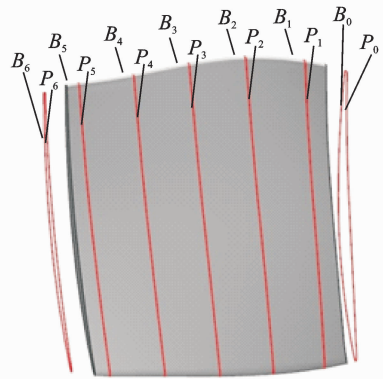


图5 整体叶盘叶片理论模型

Fig. 5 Standard model of blade in blisk

2.1 修正前工具阴极设计

将工具阴极叶盆、叶背型面上14条截面线离散化,每条截面线取70个等分点,共获得980个采样点坐标。确定工具阴极进给方向,并求解每个采

样点空间法线方向,采用 $\cos\theta$ 法开展工具阴极初始型面设计,设计流程如图 6 所示。

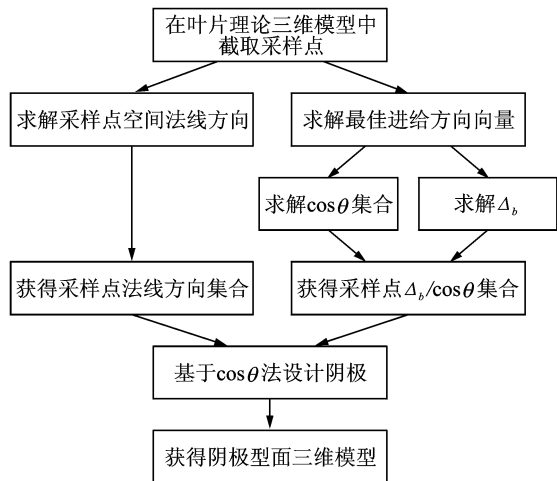


图 6 工具阴极 $\cos\theta$ 法设计流程

Fig. 6 Cathode design of $\cos\theta$ method in ECM

求解所有采样点的对应的阴极点,并将对应点拟合成曲面,最终获得工具阴极叶盆、叶背型面,如图 7 所示。

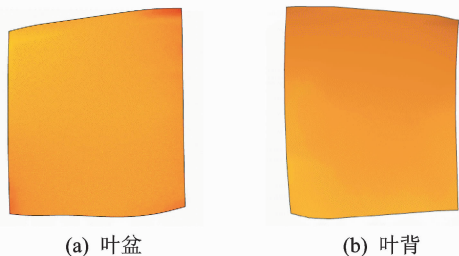


图 7 工具阴极型面

Fig. 7 Surface of cathode in ECM blisk

2.2 加工试验及误差分析

采用修正前工具阴极开展整体叶盘扇段件加工试验,试验加工平台采用本课题组自行研制的整体叶盘面电解加工机床,如图 8 所示。试验使用的工具阴极如图 9(a)所示,材料为不锈钢;试验采用的工装夹具如图 9(b)所示,材料为玻璃钢。

加工试验电解液采用浓度约 228 g/L 的 NaNO_3 溶液,电解液温度 $30\text{ }^\circ\text{C}$,流场方式采用三向进液的三维复合流场^[10],主进液口压力为 0.9 mPa、两个辅助进液口压力为 0.3 mPa、电解液出口背压为 0.1 mPa;加工电源采用大功率脉冲电源,加工峰值电压 20 V、脉冲频率 1 kHz、脉冲占空比 50%;加工时叶盆、叶背工具阴极相互面向进给,两个工具阴极进给速度均为 0.4 mm/min。加工试验共加工 5 片叶片,采用三坐标测量机对叶



图 8 试验加工平台

Fig. 8 Machine tool of ECM blisk

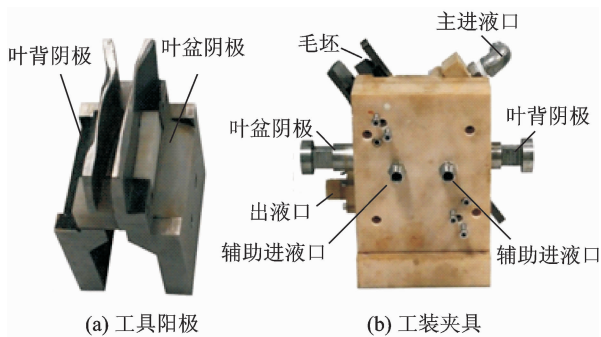


图 9 工具阴极与工装夹具

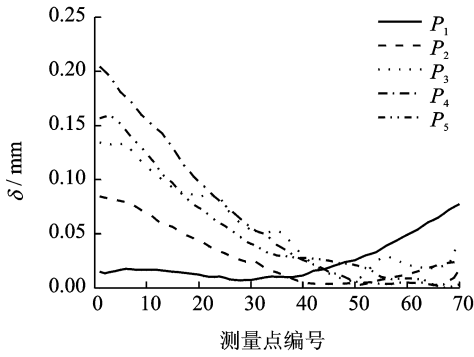
Fig. 9 Tool cathode and fixture

片进行检测,三坐标检测点仍然选择阴极设计时的采样点,如图 5 所示,由于叶片 14 条截面线中, P_0, P_6, B_0, B_6 位于叶片外,因此每片叶盘仅检测 P_1 至 P_5, B_1 至 B_5 共 10 条受控线,共获得 50 条截面线检测数据。将每条截面线不同叶片测量数据作平均值,可得 5 片叶片每条截面线的平均轮廓度误差,其叶盆、叶背截面线轮廓度误差 δ 分布如图 10 所示。

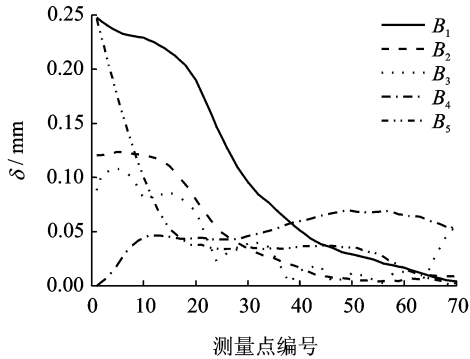
由图可知,采用 $\cos\theta$ 法设计的工具阴极,叶盆线轮廓度误差为 0.21 mm,误差最大的轮廓线为 P_4 ;叶背线轮廓度误差为 0.25 mm,误差最大的轮廓线为 B_5 。叶盆、叶背线轮廓精度均超差,需要进行工具阴极修正。

2.3 工具阴极型面修正与试验

为了验证恒采样点空间法向工具阴极修正方法的可行性与有效性,采用加工误差平均值作为修正量对工具阴极进行修正。将所测 10 条截面线各采样点的平均加工误差代入式(3),将求得的点坐标拟合成曲线,可获得 10 条新的工具阴极轮廓线;由于 P_0, P_6, B_0, B_6 4 条外边界线位于工件外部,无加工误差检测数据,因此上述四条截面线修正量为零。将新生成的 10 条曲线与原有的 4 条外边界曲



(a) 叶盆



(b) 叶背

图 10 修正前平均轮廓度误差分布

Fig. 10 Average contour error before modification

线拟合曲面,最终获得修正后的工具阴极型面。

采用修正后的工具阴极再次开展加工试验,加工参数与初步设计工具阴极试验时的加工参数保持一致,连续加工该扇段样件剩余的4片叶片,获得的加工样件如图11所示,叶片编号1~5为修正前工具阴极加工,编号6~9为修正后工具阴极加工。

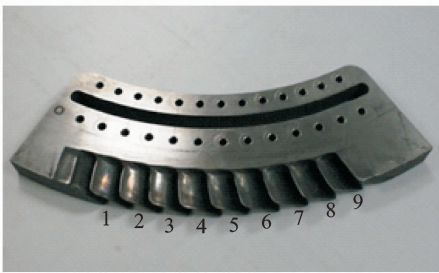


图 11 阴极修正试验样件

Fig. 11 Experimental samples

对修正后加工的叶片进行测量,以修正前加工误差最大的 P_4 与 B_5 两条截面线为例,采用修正前的3号叶片与修正后的7号叶片检测数据进行对比,修正前后的轮廓度加工误差如表1所示。经

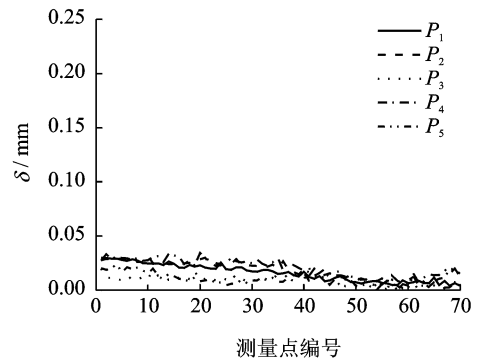
过一次修正, P_4 的误差减小了86.7%, B_5 的误差减小了84.1%,试验结果表明提出的工具阴极修正方法具有很高的修正精度。

表 1 修正前后轮廓度误差

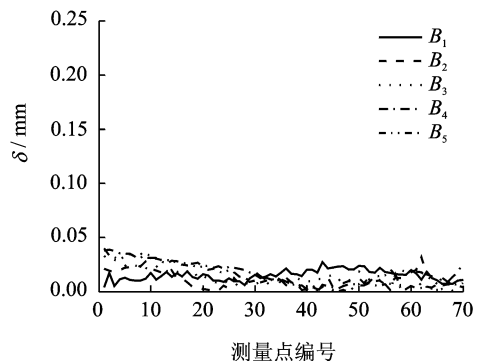
Tab. 1 Contour error before and after modification

测量点编号	P_4 修正前 δ/mm	P_4 修正后 δ/mm	B_5 修正前 δ/mm	B_5 修正后 δ/mm
1	0.204	0.027	0.246	0.039
10	0.155	0.028	0.101	0.034
20	0.098	0.035	0.038	0.024
30	0.056	0.025	0.036	0.010
40	0.026	0.018	0.036	0.004
50	0.006	0.011	0.035	0.007
60	0.005	0.004	0.016	0.019
70	0.017	0.012	0.003	0.015

对4片叶片轮廓度误差按截面线求解平均值,轮廓度误差分布如图12所示,由图可知,叶盆线轮廓度误差由修正前的0.21 mm减小至0.03 mm,叶背线轮廓度误差由修正前的0.25 mm减小至0.04 mm,叶片已满足图纸精度要求。仅通过一次修正就获得满足加工需要的工具阴极型面,试验结果表明恒采样点空间法向工具阴极修正方法具有很高的修正精度,可显著提高工具阴极修正效率。



(a) 叶背



(b) 叶盆

图 12 修正后平均轮廓度误差分布

Fig. 12 Average contour error after modification

3 结 论

(1)传统工具阴极修正方法基于工件与工具的二维截面分析加工误差与修正量,未根据电解加工成型规律,由工件阳极空间法向分析,使加工误差与修正量产生错位,影响修正精度。

(2)为了提高阴极修正精度,提出了恒采样点空间法向工具阴极修正方法,基于工件阳极法线方向进行修正,并将复杂的三维曲面修正简化为一维问题,有助于工具阴极修正精度的提高;

(3)以整体叶盘叶片型面为加工对象,开展恒采样点空间法向阴极修正试验,仅经过一次修正,叶盆轮廓度误差由 0.21 mm 降低至 0.03 mm,叶背轮廓度误差由 0.25 mm 降低至 0.04 mm,试验结果表明,提出的阴极修正方法具有较高的修正精度,可显著提升修正效率。

参考文献:

- [1] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术[J]. 航空制造技术,2006(4):94-100.
Huang Chunfeng. Modern aeroengine integral blisk and its manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(4):94-100.
- [2] 史耀耀,段继豪,张军锋,等. 整体叶盘制造工艺技术综述[J]. 航空制造技术,2012(3):26-31.
Shi Yaoyao, Duan Jihao, Zhang Junfeng, et al. Blisk disc manufacturer process technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(3):26-29.
- [3] Sun Chunhua, Zhu Di, Li Zhiyong, et al. Application of FEM to tool design for electrochemical machining freeform surface[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 43(2):168-172.
- [4] Westley J A, Atkinson J, Duffield A. Generic aspects of tool design for electrochemical machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1/2/3):384-392.
- [5] 孙伦业,徐正扬,朱荻. 基于叶栅通道可加工性分析的整体叶盘径向电解加工阴极设计及实验[J]. 中国

机械工程,2013,24(9):1137-1141.

Sun Lunye, Xu Zhengyang, Zhu Di. Cathode design and experiments on radial feeding in ECM of blisk based on cascade channel machinability analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(9): 1137-1141.

- [6] 钱军,朱荻,刘正坝. 人工神经网络在电解加工阴极设计中的应用研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1997,29(5):554-558.
Qian Jun, Zhu Di, Liu Zhengxun. Application of artificial neural networks to tool design in electrochemical machining[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1997, 29(5):554-558.
- [7] 徐正扬,朱荻,朱栋. 发动机叶片电解加工变间隙阴极修正法[J]. 机械工程学报,2009,45(9):117-192.
Xu Zhengyang, Zhu Di, Zhu Dong. Variable gap amendment of cathode for the electrochemical machining of turbine blade[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9):117-192.
- [8] 朱栋,朱荻,徐正扬. 航空发动机叶片电解加工阴极数字化修正模型及其试验研究[J]. 机械工程学报, 2011,47(7):191-198.
Zhu Dong, Zhu Di, Xu Zhengyang. Experimental study on the cathode digital modification of turbine blade in electrochemical machining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7):191-198.
- [9] 朱栋,朱荻,徐正扬. 基于神经网络的叶片电解加工阴极修正仿真[J]. 华南理工大学学报,2010,38(2):60-66.
Zhu Dong, Zhu Di, Xu Zhengyang. Simulation of cathode modification for electrochemical machining of blade based on neural network[J]. Journal of South China University of Technology, 2010, 38(2):60-66.
- [10] 刘嘉,徐正扬,万龙凯,等. 整体叶盘叶型电解加工流场设计及实验研究[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 259-267.
Liu Jia, Xu Zhengyang, Wan Longkai, et al. Design and experiment of electrolyte flow mode in electrochemical machining of blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(1): 259-267.