

引文格式: 侯镇浩, 王京涛, 朱栋, 等. 整体叶盘电解加工电解液进液角度优化研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(7): 96-100, 117.

HOU Zhenhao, WANG Jingtao, ZHU Dong, et al. Optimization of electrolyte solution inlet angle for electrochemical machining of blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(7): 96-100, 117.

整体叶盘电解加工电解液进液角度优化研究*

侯镇浩¹, 王京涛¹, 朱 栋¹, 王福平², 陈文亮²

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 中国航发动力股份有限公司, 西安 710021)

[摘要] 整体叶盘电解加工中, 流场对加工稳定性起着重要作用, 电解液进液角度对流场均匀性具有重要影响。针对由叶尖至叶根流动模式, 设计了5种电解液进液角度流动模型(12°、22°、32°、42°以及52°), 并开展电解加工流场仿真研究。结果表明, 电解液进液角度为32°时, 平均流速为19.01 m/s, 流速均方差为6.33, 满足整体叶盘电解加工对流场的要求。在电解液进液角度为32°的流场形式下, 开展整体叶盘电解加工试验, 加工过程稳定, 试件表面无流纹, 加工精度为0.12 mm, 表面粗糙度为 $R_a0.353 \mu\text{m}$, 验证了流场的合理性。

关键词: 电解加工; 流场仿真; 整体叶盘; 加工精度; 表面质量

Optimization of Electrolyte Solution Inlet Angle for Electrochemical Machining of Blisk

HOU Zhenhao¹, WANG Jingtao¹, ZHU Dong¹, WANG Fuping², CHEN Wenliang²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AECC Aviation Power Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

[ABSTRACT] In the electrochemical machining (ECM) of the blisk, the flow field plays an important role in the machining stability, and the inlet angle of electrolyte solution has an important influence on the uniformity of the flow field. For the flow pattern from blade tip to blade root, five inlet angle flow models (12°, 22°, 32°, 42° and 52°) were designed, and the flow field simulation of electrochemical machining was carried out. The results show that the average flow rate is 19.01 m/s and the mean square deviation of flow rate is 6.33 when the inlet angle of electrolyte is 32°, which meets the requirements of flow field for electrochemical machining of the blisk. Under the flow field form with inlet angle of electrolyte solution of 32°, the electrochemical machining experiment of the blisk was carried out. The machining process was stable, the surface of the workpiece was free of flow texture, the machining accuracy was 0.12 mm, and the surface roughness was $R_a0.353 \mu\text{m}$, which verified the rationality of the flow field.

Keywords: Electrochemical machining; Flow field; Blisk; Machining accuracy; Surface quality

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.07.096

整体叶盘作为航空发动机的核心部件之一, 其叶片结构具有厚度薄、型面复杂、扭曲程度大等特点, 其制造材料多采用钛合金、高温合金等难加工材料, 导致其机械切削性能较差^[1]。电解加工是一种利用电化学阳极溶解原理实现工件成形的非传统加工方式, 具有阴极无

损耗、加工工件表面质量好、生产效率高等优点^[2]。因此电解加工成为国内外整体叶盘等难加工材料以及复杂形状工件主流制造方法。如美国GE公司采用电解加工制造的GE37/YF120、F414等发动机整体叶盘, 实现了整体叶盘叶型及流道部分的粗/精加工^[3]。

* 基金项目: 国家自然科学基金(91860135); 国家科技重大专项(2017-VII-0004-0097); 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(COMAC-SFGS-2019-4168)。

在众多电解加工影响因素中,流场设计的合理性,直接影响着电解加工的加工精度与稳定性,因此流场设计一直是电解加工的重点研究方向。针对电解加工流场模式,相关学者分别提出了W型流场^[4]、 Π 型流场^[5]以及三维复合流场模式^[6]。除了各种流场模式外,国内外专家学者还在其他各方面对流场进行优化。Wang等^[7]提出了工具阴极从进排气边切向进入,改善进排气边处流场稳定性。Sawicki等^[8]提出通过调整加工间隙以及流量大小优化加工区流场。Klocke等^[9]通过研究电解加工中流场、电场等多个物理场关系,建立了多场耦合模型。

目前,针对整体叶盘电解加工的流场形式主要有W型流场和三维复合流场,前者为电解液从整体叶盘叶根两侧流入,至叶尖汇合流出;后者则是由进(排)气边进入,排(进)气边流出的侧流式流场为基础,从工具阴极背部辅以电解液。但是这两种流场方式所涉及的工装夹具相对复杂,安装较为繁琐。相比较而言,电解液从叶尖至叶根的流动模式,工装夹具设计较为简洁,但电解液进液角度对流场均匀性和电解加工的稳定性影响较大。因此,本文对叶尖至叶根电解液流动模式下的电解液进液角度进行优化研究,提高流场均匀性,通过整体叶盘电解加工的试验对流场优化设计的合理性进行验证。

1 整体叶盘电解加工方式

本文采用双边进给方式对整体叶盘进行加工,即阴极工具从两侧同时进给,完成叶盆、叶背型面加工。电解加工传统流场有侧流、反冲流动和正冲流动3种。对于整体叶盘电解加工,常用侧流方式进行加工,主要分为排气边至进气边、进气边至排气边、叶根至叶尖和叶尖至叶根4种形式,如图1所示。排(进)气边至进(排)气边流动模式未加工到位的进排气边一定程度上会阻碍流体流动,导致两侧电解液分布不均匀,产生加工缺陷。叶根至叶尖流动模式需要工装夹具与储液槽之间形成密封腔体,对于整体叶盘这类尺寸较大的零件,实施整体密封难度大。叶尖至叶根流动模式夹具设计制造简单,容易构成密封腔体,故本文选择由叶尖至叶根的流动模式。

根据电解液从叶尖至叶根的流动模式设计相关的工装夹具,如图2所示,电解液进液倾斜角度定义为进液口中轴线与积叠轴所形成的夹角,记为 α 。可以看出若电解液进液角度过大,电解液会冲击工具阴极,压力损失较大,电解液流速分布不均匀;若电解液进液角度过小,电解液会正冲叶片叶尖,影响加工区域流速分布。由此可见电解液进液角度对整体叶盘的加工影响很大,本文将针对不同电解液进液角度开展流场仿真模拟,以加工区域内流速分布均匀性为指标,获得最优的电解液进液角度。

2 流场仿真

通过流场仿真对流场均匀性进行预测,从而指导电解液进液角度的优化研究。通过对电解液进液角度的改变开展相应的仿真,采用RNG $k-\epsilon$ 模型进行求解,寻找叶尖至叶根流动模式下最佳的电解液进液角度。

2.1 流场模型

流场可以分为6个部分,包括进液口、加工区流域、导流段、蓄液腔、进液道以及出液口,如图3所示。导流段与蓄液腔平缓连接,保证电解液在导流段内分布均匀并对电解液进行提速;蓄液腔保证电解液能够充满导流

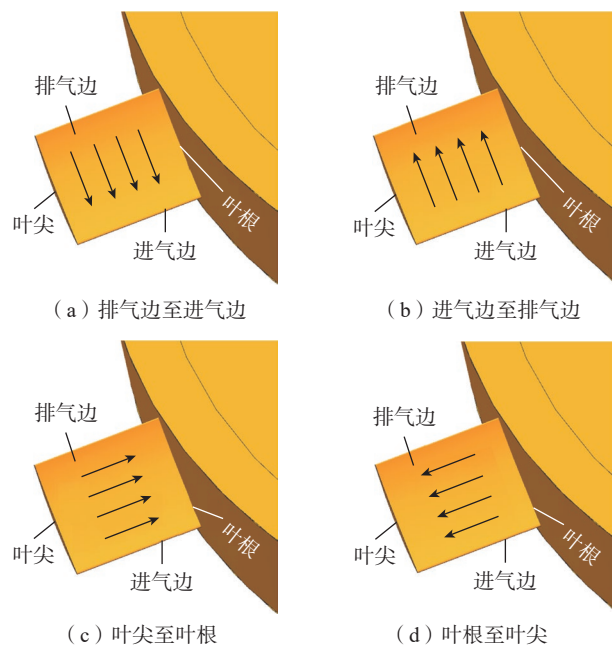


图1 侧流方式

Fig.1 Side flow mode

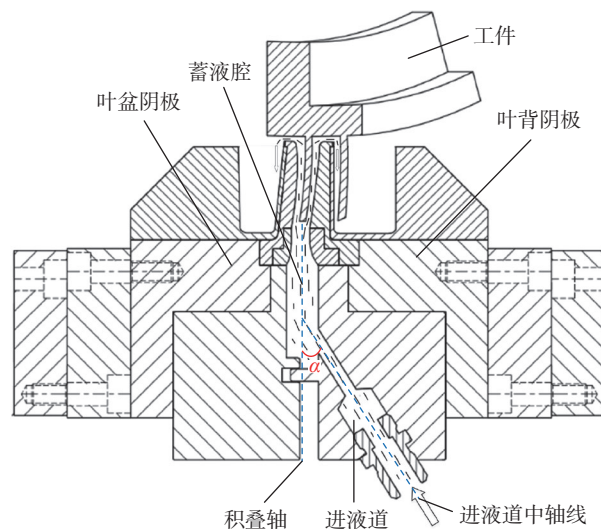


图2 工装夹具示意图

Fig.2 Schematic diagram of tooling fixture

段。考虑到电解液进液角度过大或过小都会对流场产生严重影响,所以选择电解液进液角度 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 进行分析。本文根据实际加工条件分别建立电解液进液角度为 12° 、 22° 、 32° 、 42° 以及 52° 加工终止位置时流场(图4)用于仿真分析。

2.2 数学模型

电解加工过程中,加工区域的环境复杂多变,为了对流场仿真进行简化,做出以下假设:电解液是连续、不可压缩的黏性流体,各向同性,参数关系与坐标系无关。电解液的流动严格遵守质量守恒和能量守恒定律^[10-11]。

(1)质量守恒定律。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = S_m \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; t 为时间; u_i 为速度张量; x_i 为坐标张量; S_m 为从分散的二级相中加入连续相的质量。

(2)动量守恒定律。

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中, x_i 、 x_j 为坐标张量; u_i 、 u_j 为速度张量; p 为静压; ρg_i 为重力体积力; F_i 为其他体积力; τ_{ij} 为应力张量; $i, j=1, 2, 3$ 。

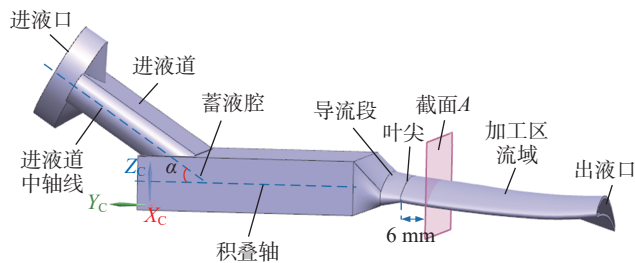


图3 流场结构
Fig.3 Flow field structure

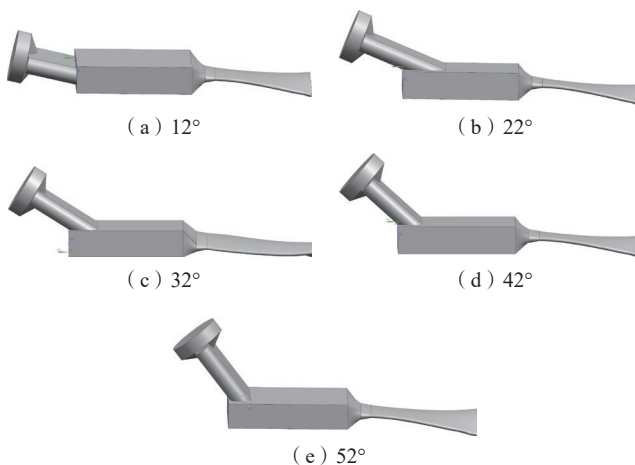


图4 流场仿真模型
Fig.4 Flow field simulation model

电解液流动状态有两种形式:层流和湍流(或紊流)。电解加工过程中,电解液需要及时带走加工区域中电解产物以及加工所产生的热量,所以电解液需要具有一定的流速。选择高流速,可以消除电极附近的浓差极化,保障流场的均匀稳定。综合考虑使得电解液处于紊流状态。根据雷诺系数可以确定紊流状态所对应电解液流速为

$$u_1 \geq 2300 \frac{v}{D} \quad (3)$$

式中, u_1 为进液口电解液流速; v 为运动黏度系数,本文取 $v=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; D 为水力直径。

电解加工过程中会产生大量的热,沿流程方向电解液会被逐渐加热,会引起电导率变化,降低加工的精度,所以需要增大流速。对应温升的流速应满足

$$u_2 = \frac{a^2}{\rho_1 \kappa_0 c_1 \Delta T} L \quad (4)$$

式中, a 为电流密度, A/cm^2 ; L 为流程长度, mm ; ΔT 为温升, K ; ρ_1 为电解液密度, g/cm^3 ; κ_0 为电导率, $1/(\Omega \cdot \text{mm})$; c_1 为电解液比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

综合式(3)和(4)分析,确定电解液的流速为

$$u = \max\{u_1, u_2\} \quad (5)$$

2.3 边界条件

利用 Ansys 软件进行仿真求解,除了根据上述守恒定律外,还需指定边界条件。

(1)入口边界条件。该条件为指定入口处流动变量的值,一般包括速度入口、压力入口和质量流量入口。本文将入口边界条件设定为压力入口,入口压力为 1 MPa 。

(2)出口边界条件。该条件为指定出口处流动变量的值。本文选用叶尖至叶根流动流场,为发散式流场,故出口压力为 0 。

2.4 仿真结果分析

如图3所示,在距离叶尖 6 mm 处选取截面A,获得不同角度流场截面A速度分布云图,如图5所示,并在截面A中任取 6000 个点,计算不同电解液进液角度下整体叶盘加工区平均流速以及流速均方差。综合图5和6分析,电解液进液角度在 $12^{\circ}\sim 32^{\circ}$ 之间时,随着电解液进液角度的增大,流场高流速区即红色区域不断增加,在 32° 时达到最多,继续增大电解液进液角度,流场高流速区不断减少;与此同时,电解液进液角度在 $12^{\circ}\sim 32^{\circ}$ 之间时,随着电解液进液角度的增大,平均流速不断增大,在 32° 时平均流速达到最大 19.01 m/s ,这表明电解液可以及时带走电解产物以及加工产生的热量。继续增大电解液进液角度,平均流速值开始下降;流速均方差呈相反趋势,在 32° 时流场流速均方差最小为 6.33 ,继续增大电解液进液角度,流速均方差值开始增

大。电解液进液角度较小时,高速电解液正冲叶片叶尖,加工区内流速分布不均匀;随着电解液进液角度增大,电解液会冲击蓄液腔壁,流速降低,叶片叶尖部位冲击减小,使得加工区内电解液流速更均匀;继续增大电解液进液角度,电解液冲击蓄液腔壁造成压力损失增多,流速继续减小,通过相同导流段,加工区域流速也会降低。这表明电解液进液角度为 32° 流场均匀性要高于 12°、22°、42°、52° 流场,更有利于电解加工稳定进行。

为了进一步分析不同电解液进液角度对整体叶盘加工区域流速均匀性的影响,利用数学统计法统计低于临界流速(9.21 m/s)的点的个数,如图 7 所示。可以看出低流速点个数随着电解液进液角度的增加而减少,32° 流场低流速点个数最少为 1105 个,继续增大电解液进液角度,低流速点数开始增加。说明电解液进液角度为 32° 情况下,流场的整体均匀性要高于 12°、22°、42° 以及 52° 流场。因此电解液进液角度为 32° 时,整体叶盘加工区电解液具有足够高流速,能够及时带走电解产物,不易发生产物堆积,影响工件表面质量,所以该流场更适合用于电解加工。

综合考虑,在整体叶盘实际加工中选择电解液进液角度为 32° 进行电解加工,满足加工区电解液高速流动的要求,加工区流速分布均匀性也更高。

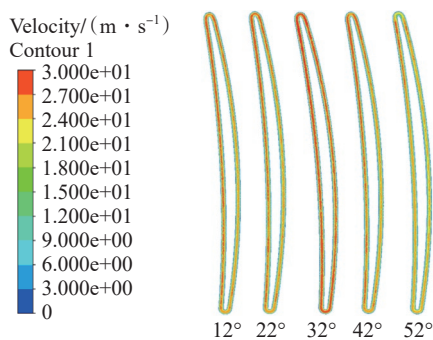


图 5 截面 A 速度分布云图

Fig.5 Cloud diagram of velocity distribution of section A

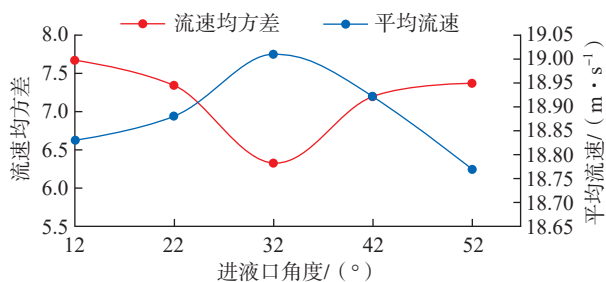


图 6 截面 A 平均流速及流速均方差变化趋势

Fig.6 Variation trend of average velocity and mean square deviation of velocity in section A

3 试验结果与讨论

根据仿真结果设计制作电解液进液角度为 32° 工装夹具,试验参数如表 1 所示,由此加工系统(图 8)进行整体叶盘电解加工试验。

试验获得了轮廓完整、表面光洁的扇段工件,如图 9 所示。为了表征加工的稳定性,实时记录了整体叶盘加工过程中的加工电流变化,如图 10 所示。可以看出,在进给量为 0~2 mm 时,加工电流随着阴极不断进给不断增大;当进给量达到 2 mm 时,加工电流达到最大,随后加工电流逐渐减小。这是因为在进给量在 0~2 mm 时,整体叶盘的叶盆、叶背逐渐成形,加工面积逐渐增大,导

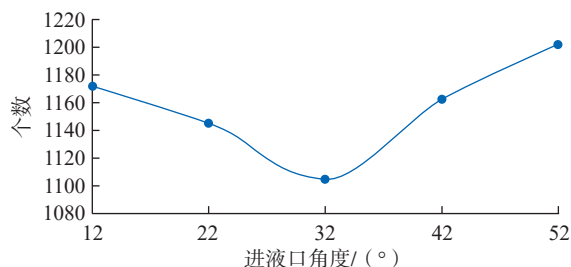


图 7 低流速点个数变化趋势

Fig.7 Variation trend of the low velocity points

表 1 试验参数表

Table 1 Experimental parameter table

参数	数值或条件
工件材料	304 不锈钢
电解液	20% NaNO ₃ 溶液
电解液温度/℃	30
入口压力/MPa	1
出口压力/MPa	0
电压/V	20
进给速度/(mm·min ⁻¹)	0.51

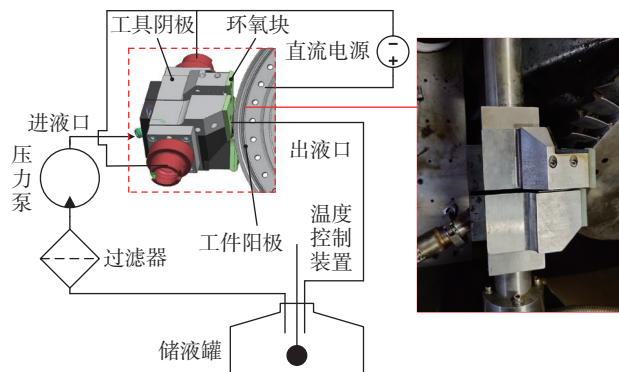


图 8 试验加工系统

Fig.8 Experimental processing system

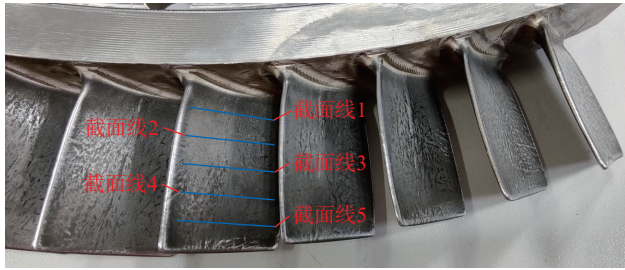


图9 扇段工件实物图

Fig.9 Physical drawing of sector workpiece

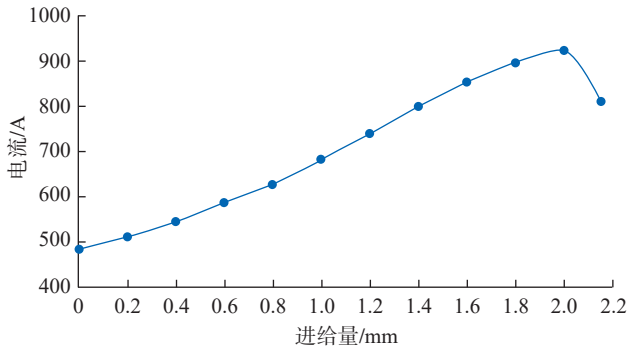


图10 加工过程电流变化趋势图

Fig.10 Current variation trend during machining

致了加工电流的增加。当进给量超过 2 mm 时,整体叶盘进排气边逐渐成形,电解加工面积减小,因此加工电流逐渐变小。在试验过程中,加工电流未异常波动,说明电解加工过程稳定,该流场可满足整体叶盘加工状况。

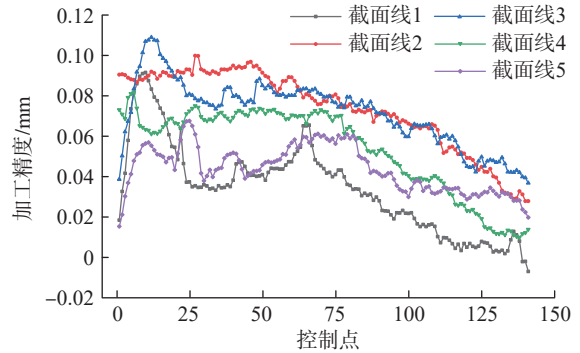
为了进一步检测工件表面精度,利用三坐标测量仪以及粗糙度检测仪对加工出来的整体叶盘进行检测。检测部位为整体叶盘叶盆、叶背的 5 条截面线,每条各检测 150 个点,可得截面线从叶尖至叶根均匀分布(图 9)。将检测结果与整体叶盘标准模型进行对比,得到整体叶盘叶盆、叶背加工精度,如图 11 所示。整体叶盘叶盆、叶背加工精度都在 0.12 mm 以内。

此外,对整体叶盘叶盆、叶背进行粗糙度检测,如图 12 所示。W 型流场加工表面粗糙度可达 $R_a 0.4 \mu\text{m}$ ^[4];三维复合流场加工表面粗糙度可达 $R_a 0.389 \mu\text{m}$ ^[6];本文中由叶尖至叶根流动方式加工表面粗糙度可达 $R_a 0.353 \mu\text{m}$,三者粗糙度相当。加工后的整体叶盘叶片表面光亮整齐,轮廓完整,没有明显流痕。

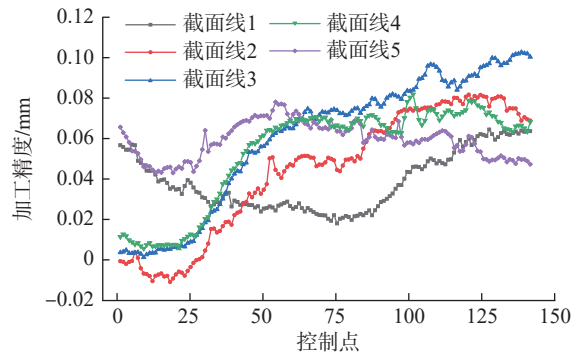
综上所述,应用电解液进液角度为 32° 流场进行整体叶盘电解加工可以满足加工要求。工件加工表面质量好,加工精度高,加工过程稳定,可以证明本文所设计流场的可行性。

4 结论

(1) 针对整体叶盘电解加工中电解液进液角度对



(a) 叶背轮廓精度



(b) 叶盆轮廓精度

图11 整体叶盘叶片轮廓精度

Fig.11 Profile accuracy of the blisk

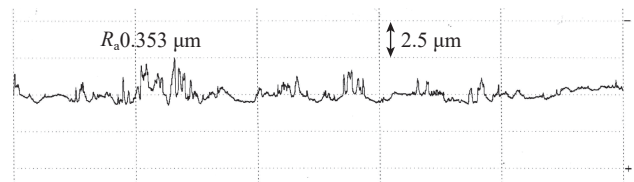


图12 整体叶盘叶片表面粗糙度

Fig.12 Surface roughness of the blisk

流场流速和加工稳定性的影响,分别建立电解液进液角度为 12°、22°、32°、42°、52° 的流道模型,开展相关的流场仿真分析。仿真结果表明,在电解液进液角度为 32° 时,平均流速为 19.01 m/s,流速均方差为 6.33,低流速点个数为 1105 个,满足整体叶盘电解加工对流场的要求。

(2) 开展电解液进液角度为 32° 时的整体叶盘电解加工试验。结果表明,整体叶盘电解加工过程稳定,加工精度在 0.12 mm 以内,加工表面粗糙度为 $R_a 0.353 \mu\text{m}$,验证了流场设计的合理性。

参考文献

[1] 蒋睿嵩,汪文虎,王增强,等.航空发动机涡轮叶片精密成形技术及其发展趋势[J].航空制造技术,2016,59(21):57-62.

JIANG Ruisong, WANG Wenhui, WANG Zengqiang, et al. Precision forming technology and its development trend of aeroengine turbine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 57-62.

(下转第 117 页)

立一个包含双隐藏层的4-9-9-3结构人工神经网络模型,该模型能同时预测多个质量特性值。

(2)根据建立的人工神经网络模型探究工艺参数同质量特性之间的影响关联并进行预测分析,得出各质量特性预测结果的平均误差都能控制在10%以内。

(3)通过该模型成功地预测并优化了激光切割工艺参数,对优化后试验件的尺寸偏差、粗糙度和热影响区宽度进行测量,预测值和实际值误差分别为8.5%、6.4%和8.2%。

参考文献

- [1] PANDEY A K, DUBEY A K. Multiple quality optimization in laser cutting of difficult-to-laser-cut material using grey-fuzzy methodology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(1): 421-431.
- [2] 陈聪,高明,顾云泽,等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 79-85.
- CHEN Cong, GAO Ming, GU Yunze, et al. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 79-85.
- [3] 彭玉海,赵晋平,侯红玲,等. 工艺参数对2A12铝合金激光切割质量的影响及分析[J]. 应用激光, 2016, 36(1): 78-83.
- PENG Yuhai, ZHAO Jinping, HOU Hongling, et al. The influence and analysis to process parameters on the laser cutting quality of 2A12 aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2016, 36(1): 78-83.
- [4] 李建敏,李国柱,王春明,等. 基于MATLAB神经网络激光切割质量预测系统设计[J]. 应用激光, 2014, 34(2): 122-125.
- LI Jianmin, LI Guozhu, WANG Chunming, et al. Design of quality prediction system of laser cutting based on MATLAB neural network[J]. Applied Laser, 2014, 34(2): 122-125.
- [5] 王祝堂,田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 第2版. 长沙:中南大学出版社, 2000.
- WANG Zhutang, TIAN Rongzhang. Handbook of aluminum alloy and its processing[M]. 2nd ed. Changsha: Central South University Press, 2000.
- [6] 武伟超,王永军,张新娟,等. 2A12铝合金激光切割热影响区及其影响分析[J]. 航空制造技术, 2010, 53(9): 91-93, 97.
- WU Weichao, WANG Yongjun, ZHANG Xinjuan, et al. Investigation of HAZ and its influence of laser cutting 2A12 aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(9): 91-93, 97.
- [7] 高隽. 人工神经网络原理及仿真实例[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- GAO Jun. Principle of artificial neural network and simulation example[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [8] 陈明. MATLAB神经网络原理与实例精解[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
- CHEN Ming. MATLAB neural network principle and exact solution of examples[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [9] 田景文,高美娟. 人工神经网络算法研究及应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006.
- TIAN Jingwen, GAO Meijuan. Research and application of artificial neural network algorithm[M]. Beijing: Beijing Insitute of Technology Press, 2006.
- [10] 王蕾,朱获. 采用BP神经网络的叶片电解加工精度预测[J]. 机械科学与技术, 2007, 25(7): 777-780.

WANG Lei, ZHU Di. Accuracy prediction of blade electrochemical machining based on BP neural network[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(7): 777-780.

[11] 叶斌,雷燕. 关于BP网中隐含层数及其节点数选取方法浅析[J]. 商丘职业技术学院学报, 2004, 3(6): 52-53, 60.

YE Bin, LEI Yan. Analysis of choosing the number of the hiddenlayers and its nodes number in back propagation network[J]. Journal of Shangqiu Vocational and Technical College, 2004, 3(6): 52-53, 60.

通讯作者:刘远洋,工程师,硕士,研究方向为激光设备和激光加工工艺。

(责编 晓月)

(上接第100页)

[2] GU Z Z, ZHU D, XUE T Y, et al. Investigation on flow field in electrochemical trepanning of aero engine diffuser[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1-4): 877-884.

[3] 张明岐,张志金,黄明涛. 航空发动机压气机整体叶盘电解加工技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21): 86-92.

ZHANG Mingqi, ZHANG Zhijin, HUANG Mingtao. Electrochemical machining technology of aeroengine compressor blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 86-92.

[4] ZHU D, ZHU D, XU Z Y, et al. Investigation on the flow field of W-shape electrolyte flow mode in electrochemical machining[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2010, 40(3): 525-532.

[5] XU Z Y, SUN L Y, HU Y, et al. Flow field design and experimental investigation of electrochemical machining on blisk cascade passage[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1-4): 459-469.

[6] 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[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.

[7] WANG H, ZHU D, LIU J. Improving the accuracy of the blade leading/trailing edges by electrochemical machining with tangential feeding[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 165-168.

[8] SAWICKI J, PACZKOWSKI T. Effect of the hydrodynamic conditions of electrolyte flow on critical states in electrochemical machining[J]. EPJ Web of Conferences, 2015, 92: 02078.

[9] KLOCKE F, ZEIS M, KLINK A. Interdisciplinary modelling of the electrochemical machining process for engine blades[J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 217-220.

[10] ZHU D, ZHANG J C, ZHANG K L, et al. Electrochemical machining on blisk cascade passage with dynamic additional electrolyte flow[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(1-4): 637-645.

[11] ZHANG G M, TIAN M C, ZHOU S J. Simulation and analysis of flow pattern in cross-corrugated plate heat exchangers[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 18(5): 547-551.

通讯作者:朱栋,教授,博士,研究方向为电解加工。

(责编 晓月)