

引文格式: 翟璐璐, 刘海波, 桓恒. 基于 DOE 设计的叶片电解加工工艺优化 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(9): 45-52.

ZHAI Lulu, LIU Haibo, HUAN Heng. Optimization of electrochemical machining process of blade based on DOE design[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(9): 45-52.

基于 DOE 设计的叶片电解加工工艺优化

翟璐璐, 刘海波, 桓 恒

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

[摘要] 高温合金复杂曲面叶片的电解加工需满足对进排气边尺寸和形状的高精度要求。而毛坯厚度、前后缘余量、电解液电导率和电压等工艺参数对叶片加工精度的影响较大。为了找出 4 种主要工艺参数对叶片前后缘加工精度和加工效率的影响规律,对某压气机静子叶片的加工型面和加工时间进行了研究。运用 DOE 试验设计优化叶片电解加工工艺,采用部分因子方法设计出 8 个样本,利用 Minitab 软件对所有样本的性能进行对比分析。结果表明,影响叶片前后缘加工精度的主要参数为毛坯厚度、前后缘余量和电导率;影响加工时间主要参数为毛坯厚度、电导率和电压。优化后的工艺参数指标为毛坯厚度 10mm、前后缘余量 0.99mm、电解液电导率 134.7mS/cm²、电压 20V。在此参数下获得的前后缘精度稳定在 0.06mm,加工时间稳定在 20min。

关键词: 叶片; 电解加工; DOE 试验设计; 前后缘加工精度; 加工时间

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.09.045



翟璐璐

工程师,博士,研究方向为特种加工技术。发表 SCI 论文 4 篇, EI 论文 1 篇以及核心论文 1 篇。

航空发动机是飞机的核心,而叶片则是发动机中非常重要的零件,航空发动机的质量、性能以及使用寿命等直接受叶片设计水平和制造质量的影响^[1]。叶片型面加工是叶片制造的重要环节,其复杂的空间曲面结构和高加工精度决定了叶片加工方法的特殊性。精密电解加工以其高效率、高重复性的特点已成为难加工材料航空发动机叶片叶型批产的优选工艺之一^[2],叶片精密电解加工的技术难点在于提高前后缘加工精度的同时兼顾加工效率。叶片的加工精度能够影响气流和载荷在叶盆和叶背上分布的均匀性,进而影响叶片的气动性能^[3]。在电解加工过程中,工件加工精度会受到流场和电场的

影响。流场的变化对电解加工精度和工件表面质量有很大的影响,甚至会决定电解加工能否顺利进行^[4]。流场的状态不仅受阴极型面和流道结构的影响,改变电解液进出口压力等工艺参数也会使电解液的流动发生变化。通过调节电流密度的分布和大小能够调控阳极工件的去除量和精度,而电流密度的变化也会受到阴极型面和工艺参数的影响。但在实际的电解生产中,通过前期的技术摸索,阴极工具的型面结构一旦固定一般不会轻易改变,因此通过调整工艺参数来优化工件的方式具有可行性。但电解加工过程中需要控制的工艺参数多达 20 多个,这使得工艺过程控制难度大大增加,往往需要通

过多次试验来优选并优化工艺参数。因此合理的试验设计是减少电解加工时间和成本、提高电解加工精度和加工效率的重要途径^[5-6]。

DOE 试验优化方法是处理多因子试验的一种科学方法,能够通过较少的试验次数得到较好的工艺优化参数。目前 DOE 优化设计方法较多地应用在焊接^[7-8]、铸造^[9]以及结构优化^[10]等方面。在发动机叶片加工中也有优化设计的研究,郑似玉等^[11]研究了压气机叶片位置度、轮廓度及扭转度偏差对压气机性能的影响,程超等^[12]同时分析了多结构参数变化对压气机性能的影响。以上研究仅针对加工后的叶片结构参数,而没有具体考虑叶片加工过程中的参数优化,特别是对电解加工叶片的优化还鲜有报道。因此对于某一特定的叶片加工而言,确定出最优的参数控制过程则更具有实际意义。

本文以电解叶片稳定批产为工艺基础,选取毛坯厚度、前后缘余量、电导率和电压 4 个工艺参数,并且从优化电解加工工艺以及降本增效的角度出发,以叶片前后缘加工精度和加工时间这两个能够反映叶片质量和电解加工效率的指标,有针对性地利用 DOE 方法优化工艺参数,这对于提升电解加工控制能力和实现降本增效具有重要的理论和实际意义。

试验工艺及 DOE 设计方案

根据工艺参数控制要求,在对电解加工中涉及的毛坯、工装、电解液和电源等影响因素进行一系列攻关调整后,选定毛坯厚度、叶片前后缘余量、电解液电导率和加工电压作为主要工艺参数。其中电导率的变化受温度和电解液浓度影响,在实际生产中,电解液温度一般控制在室温,主要依靠改变电解液的浓度来调节电导率参数。图 1 为叶片精密电解加工装置的局部示意图。

选择某级静子叶片为研究对象,尽管压气机叶片三维结构复杂,但其本质上是由多个叶型截面按照一定的规律积叠而成^[12]。本文选用的静子叶片由 22 个截面组成,检测时,每个截面加工精度的测量位置为图 2 中的红色圆圈,利用高精度三坐标测量机检测各截面的前后缘精度。对照设计参考值,取测量值中的最大值作为前后缘加工精度结果。

试验过程中涉及叶片的毛坯厚度、前后缘余量、电解液电导率以及加工电压 4 个因子(工艺参数),若采用全因子设计需要进行 $2^4=16$ 次试验,为减少试验次数和提高试验效率,本试验采用部分因子方法,按高-低水平可将试验次数减少为 $2^{(4-1)}=8$ 次试验,试验设计方式及试验结果如表 1 所示。

试验结果分析

1 因子设计分析

通过“分析因子设计”拟合模型,运用 Pareto 图评估各项效应的显著性,该图能够显示出每项因素对响应

变量的影响程度。Pareto 图以因子(电解加工工艺参数)为纵坐标,按照绝对值大小排列,根据选定的显著性水平确定出临界值,绝对值超出临界值的因子被选中。图 3 为叶片前后缘加工精度和加工时间的效应图和半正态分布图,其中 A、B、C、D 分别为毛坯厚度、前后缘余量、电解液电导率和电压。图 3 (a)中,因子 B 和 C 的绝对值超过了临界值 0.00565,即表明“前后缘余量”和“电导率”这两个影响因素对前后缘精度的影响较大。图 3 (b)的半正态图也反映出这个趋势,即距离参考直线较远者为显著因素。图 3 (c)中,因子 A、C 和 D 的绝对值超过临界值 2.258,即表明毛坯厚度、电导率和电压 3 个影响因素对加工时间的影响较大。图 3 (d)的半正态图也反映出这个趋势,即距离参考直线较远者为显著因素。

图 4 为因子的主效应图,它能够比较出各因子中效应的相对强度。从图 4 (a)中叶片前后缘余量的斜率最大,毛坯厚度和电解液电导率其

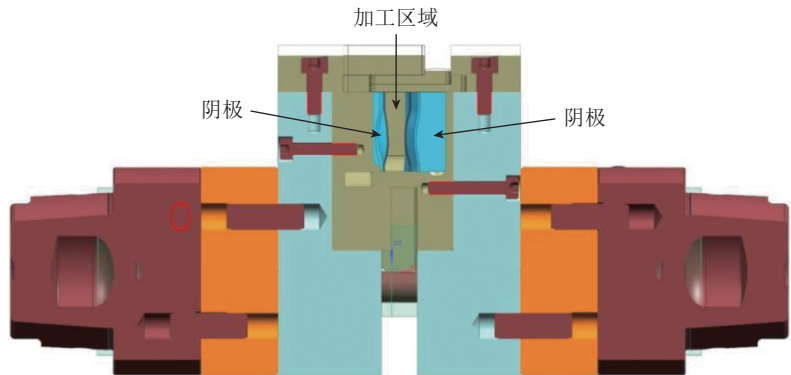


图 1 电解加工装置局部示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrochemical machining department

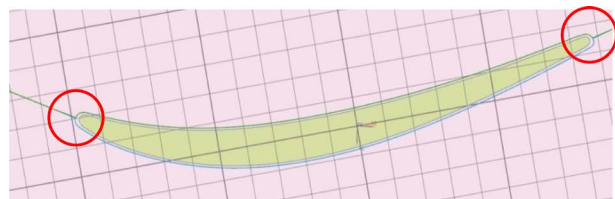


图 2 叶片轮廓检测位置图

Fig.2 Location map of blade profile detection

表 1 因子水平设计及试验结果
Table 1 Factor design and test results

标准序	运行序	中心点	区组	毛坯厚度 / mm	前后缘余量 / mm	电导率 / (mS · cm ⁻²)	电压 / V	前后缘加工精度 / mm	加工时间 / min
7	1	1	1	10.0	1.0	140	20.0	0.061	19.20
6	2	1	1	12.5	0.8	140	20.0	0.069	24.04
3	3	1	1	10.0	1.0	120	22.5	0.058	20.02
1	4	1	1	10.0	0.8	120	20.0	0.065	22.63
5	5	1	1	10.0	0.8	140	22.5	0.070	17.28
4	6	1	1	12.5	1.0	120	20.0	0.052	28.59
8	7	1	1	12.5	1.0	140	22.5	0.059	21.55
2	8	1	1	12.5	0.8	120	22.5	0.062	25.07

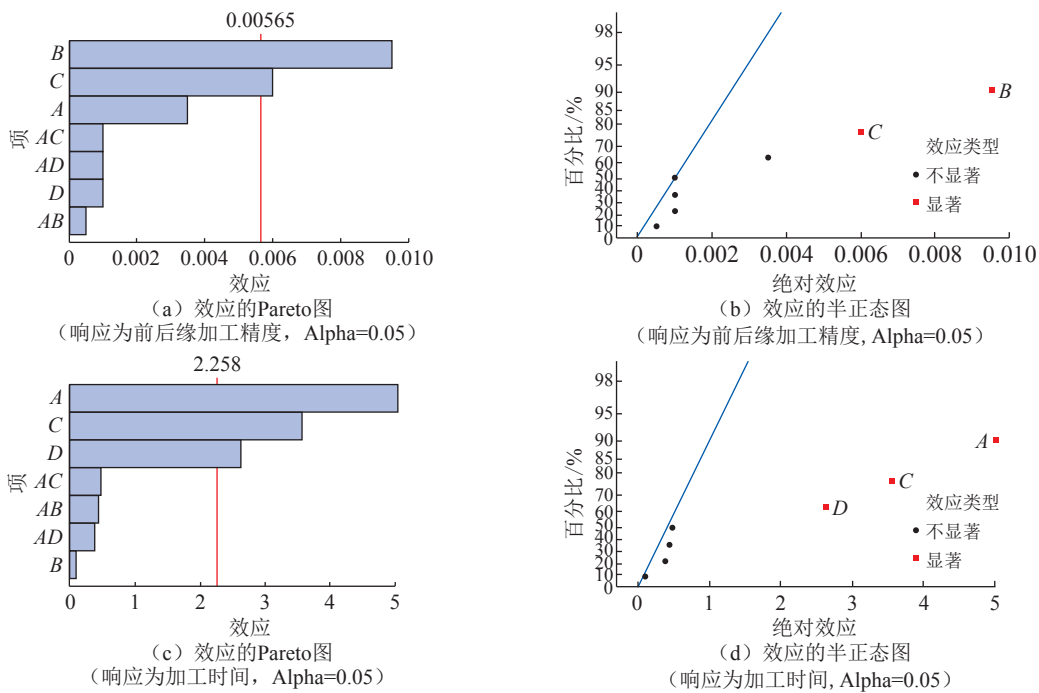


图 3 前后缘精度和加工时间的效应图和半正态分布图

Fig.3 Effect diagram and semi-normal distribution diagram of machining precision of front and rear edges and processing time

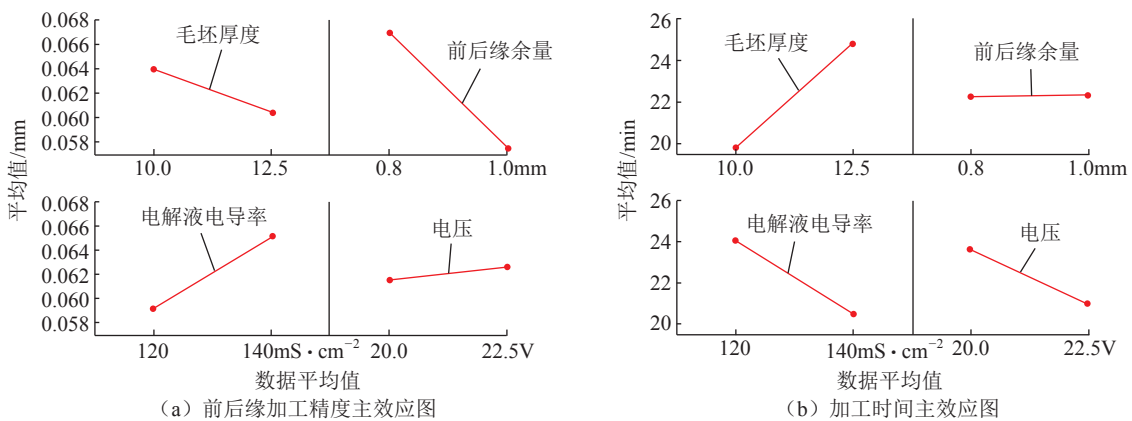


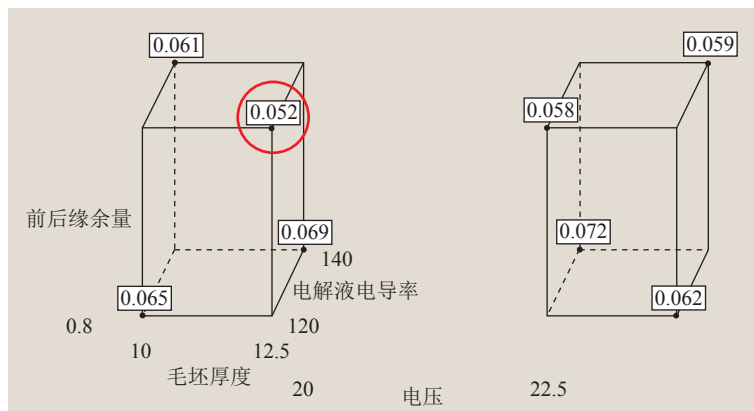
图 4 主效应图

Fig.4 Main effect graph

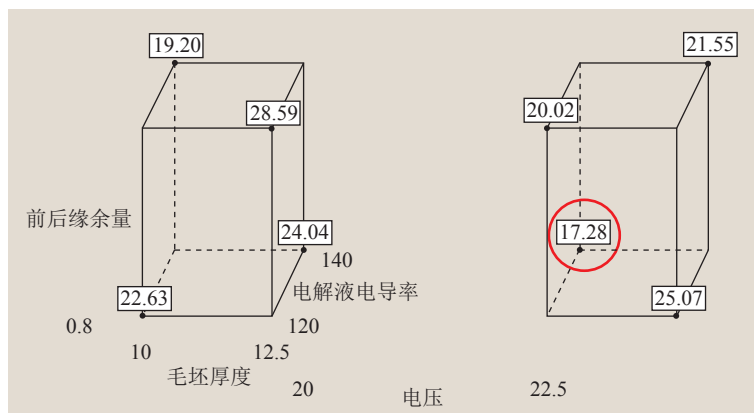
次。尽管在前面的分析中前后缘余量和电导率是显著因素,但结合主效应图应将毛坯厚度也列入前后缘加工精度的主影响因素中。而图 4 (b) 中前后缘余量的斜率很小,说明对加工时间的影响也最小,而其他 3 个因子对加工时间的影响均比较大。

DOE 因子设计结果中的立方图能够显示测试范围内的最佳设置。图 5 为有响应量度量的立方图,红色圆圈标注表示电解加工指标的最佳值。图 5 (a) 是响应量为前后缘加工精度的立方图,可以看出,前后缘加工精度取最小值 0.052mm 时,对应的因子模式为“大毛坯厚度 + 大前后缘余量 + 低电导率 + 大电压”。图 5 (b) 是响应量为加工时间的立方图,可以看出,加工时间取最小值 17.28min 时,对应的因子模式为“小毛坯厚度 + 小前后缘余量 + 高电导率 + 高电压”。

为判断影响响应指标的因子是否有漏项,可以进行残差诊断。图 6、7 分别为前后缘精度和加工时间的残差诊断。通过观察正态概率图是否服从正态分布或是否有弯曲来检



(a) 前后缘加工精度的立方图 (数据平均值)



(b) 加工时间的立方图 (数据平均值)

图 5 立方图
Fig.5 Cube plot

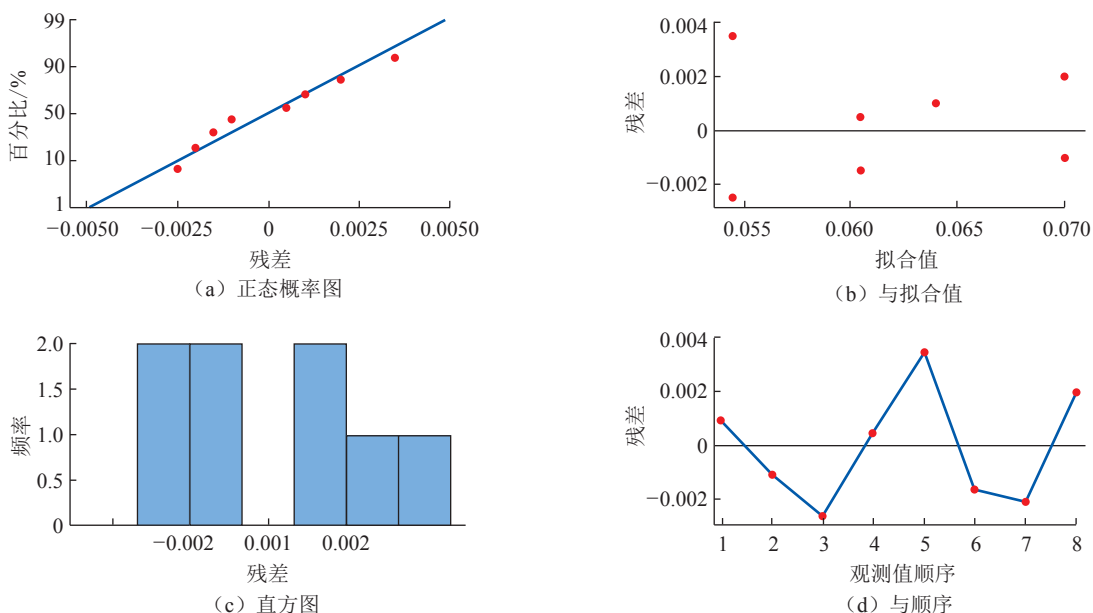


图 6 前后缘加工精度残差图

Fig.6 Residual graph of front and rear edges machining precision

查是否存在漏项等问题,根据图形可判定残差符合要求且模型可以接受。

使用因子设计模型为单对变量生成等值线图,等值线图的二维视图

将具有相同响应的所有点连接到一起,形成恒定响应的等值线。图8为叶片前后缘加工精度的等值线图,可以看出,为保持前后缘加工精度的最

小值(红色边框区域),需要增大毛坯厚度、降低电解液电导率以及提高前后缘余量。图9为加工时间的等值线图,可知毛坯厚度的减小、加工电

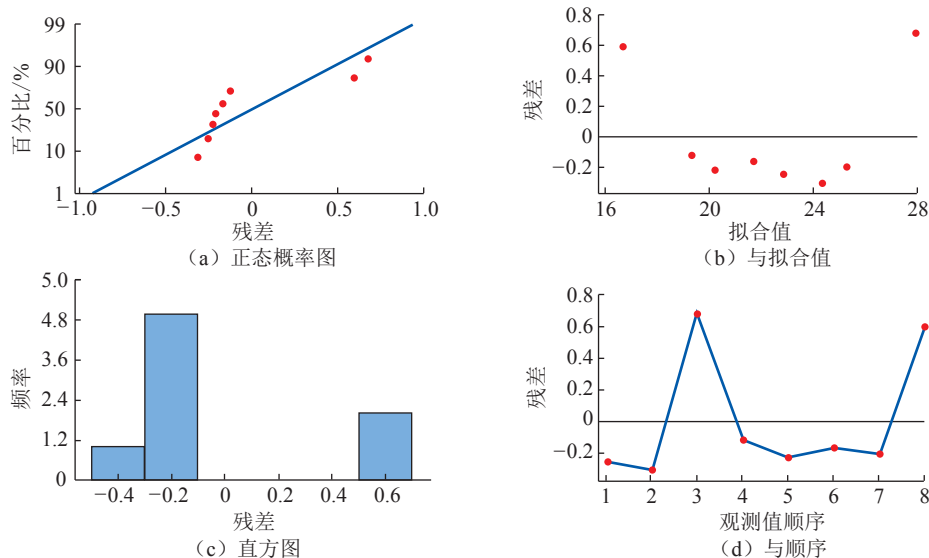


图7 加工时间残差图

Fig.7 Residual graph of processing time

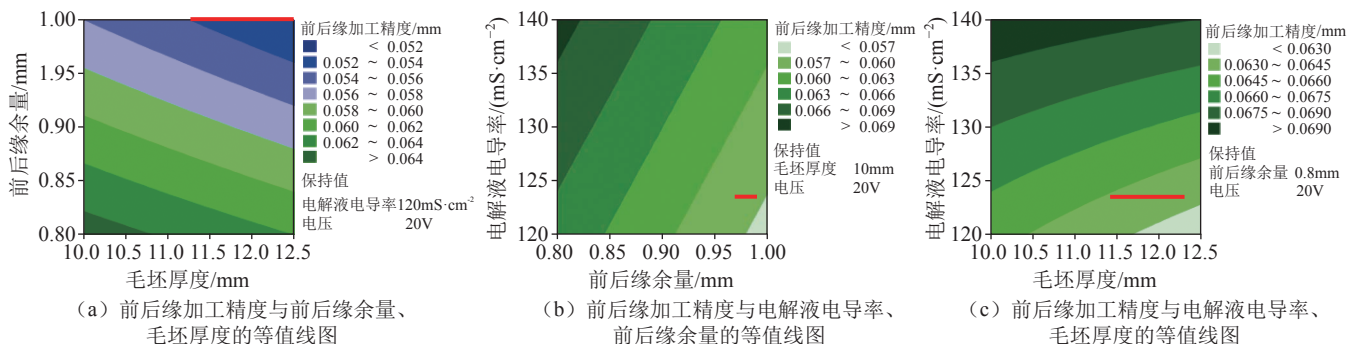


图8 前后缘加工精度的等值线图

Fig.8 Contour plot of machining precision of front and rear edges

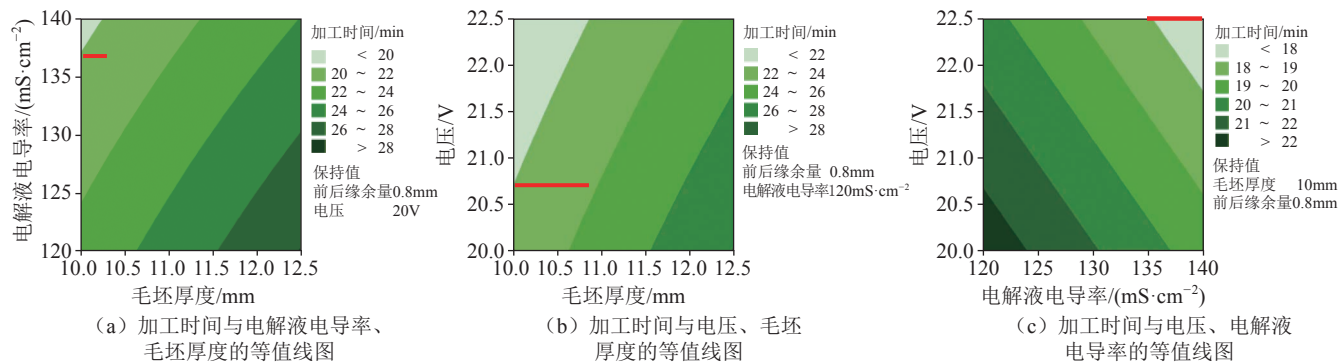


图9 加工时间的等值线图

Fig.9 Contour plot of machining precision of processing time

压的增大以及电解液电导率的提高均有助于减少电解加工时间。

2 回归分析

结合以上对因子的分析结果可得出两个指标的回归方程：

前后缘加工精度 = 0.0817 - 0.0014 毛坯厚度 - 0.0475 前后缘余量 + 0.0003 电导率

加工时间 = 45.200 + 2.010 毛坯厚度 - 0.178 电导率 - 1.050 电压

为判断回归方程是否合理需引入拟合相关系数 R^2 ，该系数值越接近 1，说明回归方程越能准确表达数学关系^[9]。本次试验中，前后缘加工精度和加工时间回归方程的拟合相关系数 R^2 分别为 0.977 和 0.988，可见两指标回归方程拟合度较好。

3 响应变量优化

通过回归方程分别对前后缘加工精度和加工时间进行优化计算，优化结果如图 10 所示。结果表明，在保证加工时间 20min 以及前后缘精度达到 0.06mm 的条件下，各参数的最优解分别为毛坯厚度 10mm、前后缘余量 0.99mm、电解液电导率 134.7mS/cm²、电压 20V，优化结果的拟合度 $D=0.999$ ，符合要求。

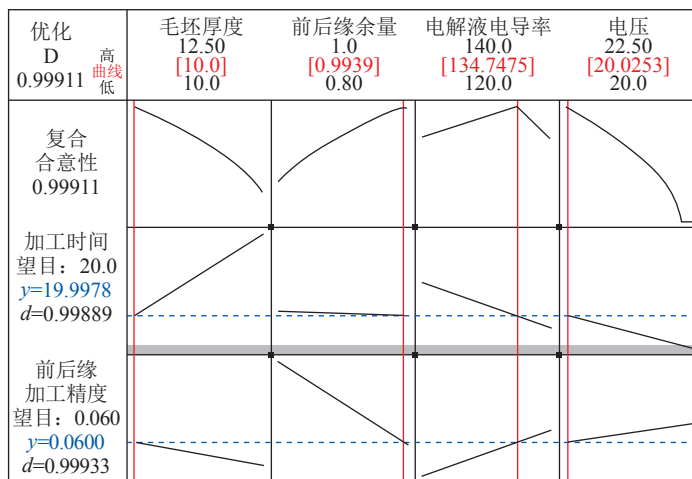


图 10 优化设计图
Fig.10 Optimize design

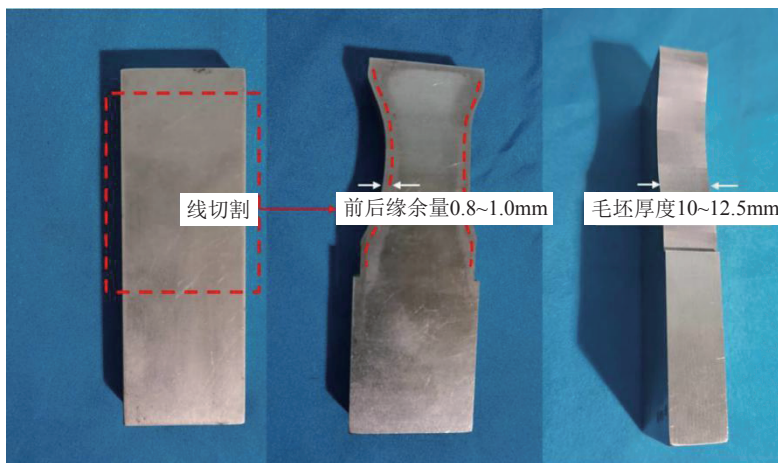


图 11 某级电解用毛坯叶片
Fig.11 Blank blade for electrolysis

试验验证

试验以某级 GH4169 静子叶片为研究对象，通过 DOE 试验设计，在综合考虑设备能力及操作难度后，采用优化后的试验参数进行电解加工。试验中选用非线性低浓度（8%~10%）的 NaNO₃ 为电解液。试验用叶片毛坯的最初状态为方坯，经线切割后作为电解用毛坯，如图 11 所示。电解毛坯的尺寸精度分为两部分：一是位置精度，依靠 3 个基准面，垂直精度要求控制在 0.02mm 以内；二是前后缘轮廓精度，依靠数控铣对型面进行粗加工，前后缘预留余量范围在 0.8~1.0mm 之间，确保消除后续遗传误差的影响。

电解后的叶片如图 12 所示，红

色圆圈处为电解加工后叶片的前后缘形貌，利用高精度三坐标测量机对叶片进行尺寸检测，包括实际加工时间在内的试验生产数据见表 2。

通过优化前后的数据对比可以发现，叶片前后缘加工精度和加工时间均已经达到了预期的加工要求。图 13 为优化前后叶片前后缘加工精度和加工时间的变化趋势图，可进一步看出，尽管优化前后叶片前后缘加工精度的平均值都约为 0.06mm，但优化后的前后缘加工精度的波动程度明显降低，如图 13 (a) 和 (b) 所示。从加工时间的分析结果来看，优化后加工时间的平

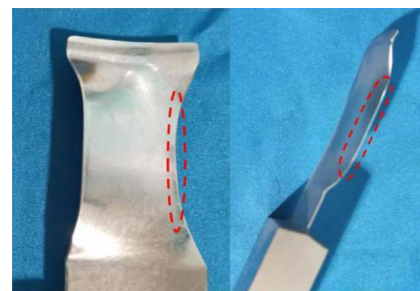


图 12 电解后叶片实物图
Fig.12 Actual picture of blade after electrolysis

均值约为 20.27min，较优化前减少了 9.1%，非常接近于预期加工时间，且其波动程度也趋于平稳，如图 13 (c) 和 (d) 所示。

表 2 基于优化参数的试验数据

Table 2 Experimental data based on optimization parameters

试验样品	前后缘加工精度/mm	加工时间/min	试验样品	前后缘加工精度/mm	加工时间/min
1	0.062	20.13	5	0.056	21.03
2	0.058	20.25	6	0.06	20.65
3	0.061	19.98	7	0.065	19.88
4	0.064	19.91	8	0.062	20.32

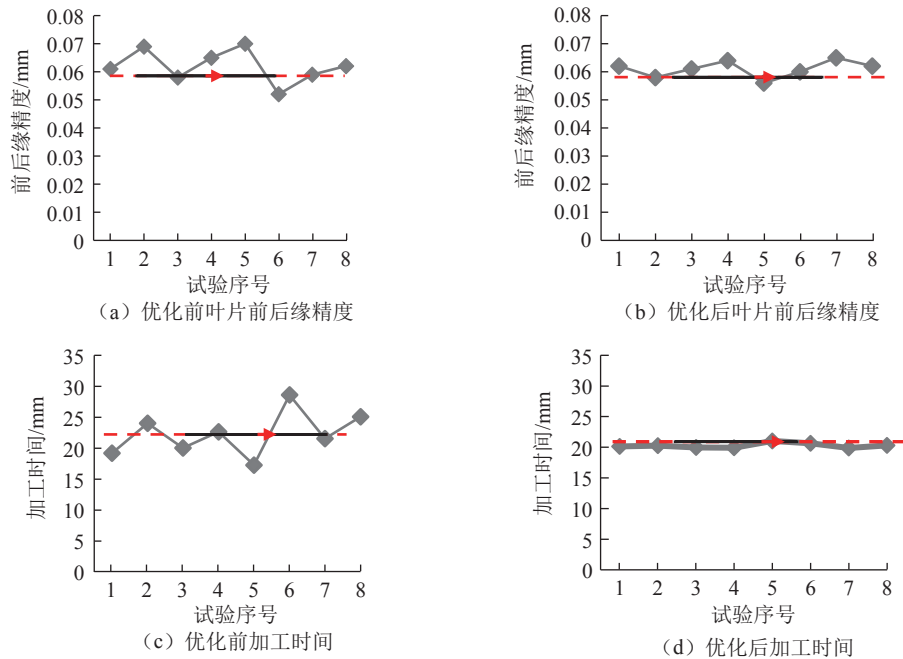


图 13 优化前后叶片前后缘精度和加工时间的变化趋势

Fig.13 Variation trend of blade precision and processing time before and after optimization

结论

本文在叶片电解加工试验的基础上,运用 DOE 试验设计方法,采用部分因子设计对数据进行处理,得到如下结论:

(1) 在叶片电解加工过程中,前后缘加工精度的主要影响因素为毛坯厚度、前后缘余量和电导率,对应的主因子模式为“大毛坯厚度+大前后缘余量+低电导率+大电压”;加工时间的主要影响因素为毛坯厚度、电导率和电压,对应的主因子模式为“小毛坯厚度+小前后缘余量+高电导率+大电压”。

(2) 通过 DOE 优化设计,得到前后缘加工精度和加工时间的回归方程:

前后缘加工精度 = $0.0817 - 0.0014$ 毛坯厚度 - 0.0475 前后缘余量 + 0.0003 电导率

加工时间 = $45.200 + 2.010$ 毛坯厚度 - 0.178 电导率 - 1.050 电压

(3) 优化后加工参数为: 毛坯厚度 10mm、前后缘余量 0.99mm、电解液电导率 134.7mS/cm^2 、电压 20V。在此参数下获得的前后缘加工稳定在 0.06mm 且加工时间稳定在 20min,同时多组试验条件下两项指标结果的波动程度明显减小。

参考文献

- [1] 徐正扬. 发动机叶片精密电解加工关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
XU Zhengyang. Key technologies research on precision turbine blade ECM[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [2] 黄明涛, 张明岐, 程小元, 等. 叶片型面精密振动电解加工工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 75-78.
HUANG Mingtao, ZHANG Mingqi, CHENG Xiaoyuan, et al. Study on the process of PECM blade surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 75-78.
- [3] 钱浩. 双缘板钛铝叶片前后缘精密电解加工关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空

航天大学, 2019.

QIAN Hao. Key technology of precision electrochemical machining of leading and trailing edges of double-flange titanium aluminum blades[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[4] 陈修文. 整体叶盘电解加工的流场仿真与试验 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

CHEN Xiuwen. Flowing field simulation and experiments on electrochemical machining of blisk[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[5] KUMAR P, JADHAV P, BELDAR M, et al. Review paper on ECM, PECM and ultrasonic assisted PECM[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 6381–6390.

[6] 桓恒, 郑鑫, 刘海波, 等. 基于精密电解工艺的叶片进排气边形状控制方法 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(15): 54–58.

HUAN Heng, ZHENG Xin, LIU Haibo, et al. Leading and trailing edges shape control method of blade based on PECM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018,

61(15): 54–58.

[7] 赵仲前, 冯玉伟, 武飞龙. DOE 在高频电流对焊接工艺参数优化中的应用 [J]. 金属制品, 2019, 45(2): 41–43.

ZHAO Zhongqian, FENG Yuwei, WU Feilong. Application of DOE to optimization of welding parameters of high frequency current butt welding[J]. Metal Products, 2019, 45(2): 41–43.

[8] 郭正松. 基于 DOE 的激光焊接工艺优化研究 [J]. 现代信息科技, 2019, 3(12): 165–167.

GUO Zhengsong. Study on optimizing laser welding process based on DOE[J]. Modern Information Technology, 2019, 3(12): 165–167.

[9] 孙贵平. DOE 设计在降低轴承钢 GCr15 铸坯低倍缺陷中的应用 [J]. 河北冶金, 2019(5): 23–27.

SUN Guiping. Application of doe design in reducing low defect of bearing steel GCr15 slab[J]. Hebei Metallurgy, 2019(5): 23–27.

[10] 吕金贺, 褚亚旭, 党相文, 等. 基于 DOE 设计的曲轴结构优化 [J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2018, 19(3): 410–416.

LÜ Jinhe, CHU Yaxu, DANG Xiangwen, et al. Structural optimization of crankshaft based on DOE design[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2018, 19(3): 410–416.

[11] 郑似玉, 滕金芳, 羌晓青. 叶片加工超差对高压压气机性能影响和敏感性分析 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 216–224.

ZHENG Siyu, TENG Jinfang, QIANG Xiaoqing. Sensitivity analysis of manufacturing variability on high-pressure compressor performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 216–224.

[12] 程超, 吴宝海, 郑海, 等. 叶片加工误差对压气机性能的影响 [J]. 航空学报, 2020, 41(2): 28–38.

CHENG Chao, WU Baohai, ZHENG Hai, et al. Effect of blade machining errors on compressor performance[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 28–38.

通讯作者: 桓恒, 高级工程师, 研究方向为特种加工技术, E-mail: alantam2002@163.com.

Optimization of Electrochemical Machining Process of Blade Based on DOE Design

ZHAI Lulu, LIU Haibo, HUAN Heng

(AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

[ABSTRACT] For the electrochemical machining of super-alloy blades with complex curved surface, the requirements of high precision for the size and shape of inlet and exhaust sides should be met. The process parameters of blank thickness, margin, electrolyte conductivity and voltage have important effects on the machining accuracy of the front and rear edges. In order to find out the four main process parameters on the influence law of machining accuracy and machining time, the processing surface and processing time of a compressor were studied. In this paper, DOE test design was used to optimize the electrochemical machining process of the blade, eight samples were designed by using partial factors, and the performance of all samples was compared and analyzed by using Minitab software. The results show that the main parameters affecting the machining accuracy of the front and rear edges of the blade are blank thickness, margin and electrolyte conductivity. The main parameters that affect the processing time are blank thickness, electrolyte conductivity and voltage. After optimization, the process parameters were blank thickness 10mm, margin 0.99mm, electrolyte conductivity 134.7mS/cm^2 , voltage 20V, respectively. The precision of the front and rear edges obtained under this parameter is stable at 0.06mm, and the processing time is stable at 20min.

Keywords: Blade; Electrochemical machining process; DOE test design; Machining accuracy of the front and rear edges; Machining time

(责编 阳光)