

文章编号:1000-6893(2010)03-0650-05

# 三元流闭式叶轮组合电加工技术研究 I —— 总体方案设计及关键技术

刘辰, 徐家文, 赵建社, 吴锐

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

## Research on Combined Electrical Machining of 3D-flow Closed Impeller I —— Overall Scheme Design and Key Technology

Liu Chen, Xu Jiawen, Zhao Jianshe, Wu Rui

(Jiangsu Province Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**摘要:** 针对难切削材料三元流闭式叶轮上复杂弯扭型腔的加工难题,提出数控电解(NC-ECM)/数控电火花(NC-EDM)组合加工数字化制造技术方案。本文重点论述了其总体方案设计及关键技术,包括总体工艺流程设计,数控电解预加工中阴极及运动轨迹设计,数控电火花精加工中电极及加工轨迹设计,工装夹具设计以及加工参数的选择与优化等问题。成功试制了合格的某型三元流闭式叶轮,试验结果表明,组合电加工技术能够满足三元流闭式叶轮的的实际生产要求。

**关键词:** 三元流; 闭式叶轮; 组合电加工; 数控系统; 电解加工; 电火花加工

**中图分类号:** V261 **文献标识码:** A

**Abstract:** In order to solve the difficult problem of how to machine a complex curved cavity of a difficult-to-cut material in a 3D-flow closed impeller, a new process of combined electrical machining and digitized manufacturing technology is put forward, which is a combination of numerically controlled electrochemical machining (NC-ECM) and numerically controlled electrical discharge machining (NC-EDM). Its overall scheme design and key technology are discussed in this article, including the overall process design, the design of cathodes and their tracks in pre-processing by NC-ECM, the design of electrodes and their tracks in precision work by NC-EDM, fixtures design, and the technological parameter selection and optimization. A 3D-flow closed impeller is machined successfully by this method, and the test results show that the combined electrical machining is useful in the production of 3D-flow closed impellers.

**Key words:** 3D-flow; closed impeller; combined electrical machining; numerical control systems; electrochemical machining; electrical discharge machining

三元流设计理论又称“吴氏通用理论”,是我国吴仲华院士早在20世纪50年代提出的。由于该种设计更加接近流体相对于叶轮的真正运动,因此所设计、制造的叶轮具有更高的工作效率,目前三元流设计理论在国际上已经广泛应用于先进的航空航天发动机设计以及先进透平机械设计中<sup>[1-3]</sup>。近20年来,随着设计、制造技术的发展,在三元流开式叶轮的基础上,增加设计出了轮盖、叶片、轮盘为一个完全整体结构的三元流闭式整体叶轮,例如航天发动机离心泵中的闭式整体叶轮,大型涡轮机中的闭式整体叶轮等,这种设计将大大提高叶轮强度、刚性、极限转速、工作可靠性

和使用寿命。

整体叶轮的制造一直以来都是世界范围内的难题,对于三元流闭式整体叶轮的加工尤其困难。由于受到材料及刀具可达性的限制,常规加工方法如数控铣削很难甚至无法加工,目前主要的三元流闭式叶轮制造方法包括整体铸造法和分体焊接法。整体铸造法很难获得高精度,对于那些不能铸造的高强合金材料的整体叶轮也不适用;分体焊接法从本质上还称不上是整体制造,无论是采用三大件(轮盘、叶片、轮盖)还是两大件(轮盘与叶片成一体)的式整体叶轮、轮盖)进行焊接都不可避免由焊接高温产生热变形、热应力、甚至裂纹,都严重影响使用寿命和工作可靠性,特别是对于那些直径小、叶片薄的小型三元流闭式叶轮,分体焊接法更难达到设计使用要求<sup>[4]</sup>。

收稿日期:2009-04-29; 修订日期:2009-08-10

基金项目:“十一五”国防技术基础项目

通讯作者:刘辰 E-mail: liuchen502@nuaa.edu.cn

目前三元流闭式叶轮只有少数发达国家拥有整体制造能力,但技术严加保密,而国内尚处于起步研制状态。为了解决三元流闭式叶轮上复杂型腔、型面的加工难题,本课题组提出了数控电解(NC-ECM)/数控电火花(NC-EDM)组合加工数字化制造技术方案,进行了试验研究并试制加工成功。

## 1 研究对象

研究对象为如下类型的三元流闭式整体叶轮:其材料为高温高强合金,典型几何造型如图1所示,由轴孔、叶片、上盖及下盖组成。圆周上均布有十几个或几十个叶片,叶间通道为复杂的弯扭型腔且上下封闭,叶间通道较窄,且进气口轴向较宽,周向较窄,出气口轴向较窄,周向较宽。型腔曲面主要根据气动计算确定,以列表曲面的形式给出了叶片中面型值点  $P_n$  的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标,经数据处理并拟合则可得叶片的实体造型。目前,对于该类叶轮国外少数发达国家已经开始采用整体制造,国内的生产一般经过锻造、机械加工成型、焊接、热处理等工艺过程,整体制造已开始进行铸造和数控铣削的探索。

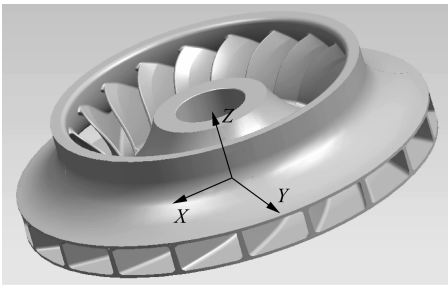


图1 三元流闭式叶轮三维造型

Fig. 1 3D model of 3D-flow closed impeller

## 2 组合电加工工艺方案的提出

由于叶轮为难切削材料,气流腔道弯扭程度大,且被上、下盖封闭,通过刀具可达性分析得出,采用直柄刀具无法加工出整个腔道,因此无法采用多轴数控铣削来完成加工。目前,一些发达国家用电火花为主要工艺手段,但如果完全采用电火花加工整个腔道,则加工效率很低,且电极损耗严重而影响加工精度;如果简单地以频繁更换电极来补偿电极损耗带来的影响精度问题,这就使得加工周期大大增长,电极成本提高<sup>[5]</sup>。

针对该类闭式叶轮的特点,本课题组在两元流、或近两元流叶间流道(异形型腔)整体构件(如

带冠整体叶轮、整体扩压器等)组合电加工成果的基础上,提出了采用数控电解和数控电火花组合加工三元流闭式整体叶轮的新工艺方案,即:先由数控电解加工高速去除叶间通道大部分材料,并留下一定的加工余量;然后再利用数控电火花精加工来达到高精度、高表面质量的要求,其工艺流程如图2所示<sup>[6]</sup>。

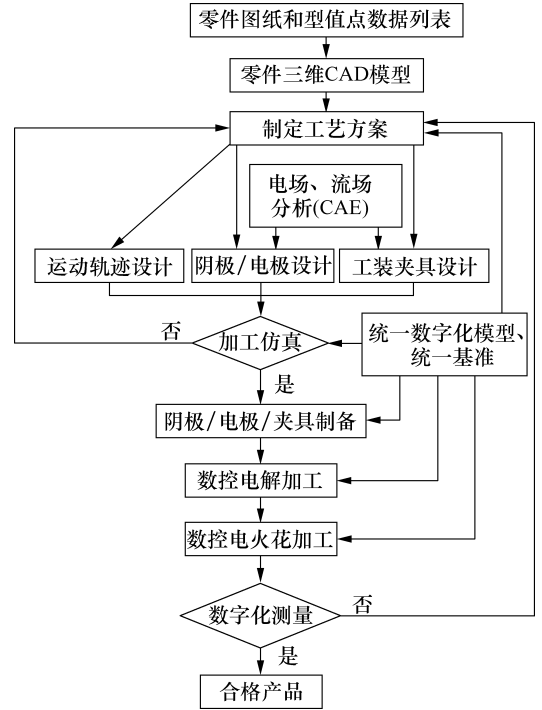


图2 三元流闭式叶轮组合电加工数字化制造流程图  
Fig. 2 Flow chart of combined electrical machining and digitized manufacturing technology of 3D-flow closed impellers

这样,充分发挥了数控电解、电火花加工二者的优点,既提高了加工效率,大大减少了电极损耗,降低了生产费用,又有利于保证叶片型面的最终加工精度。本文将图1所示闭式叶轮的试制加工为例,结合试验,对组合电加工数字化制造的主要关键技术进行分析研究。

## 3 三元流道组合电加工技术要点

### 3.1 数控电解预加工阴极及轨迹设计

数控电解加工实现复杂形状零件的加工可通过两种途径:①采用成形或近成形阴极辅以简单的数控运动实现零件的加工;②利用简单形状阴极辅以空间的数控运动展成加工出零件形状<sup>[7-9]</sup>。

与以往的阴极设计不同,对于本文中的三元流闭式叶轮,由于叶间流道型面复杂且弯扭程度

较大,只用一个成形或近成形阴极无法完成整个流道的电解加工。实际设计中采用多个近成形阴极,分别从进气口、出气口进行切入加工,直到各自加工区域连通后才完成整个流道的预加工;此外,对局部加工盲区,再利用简单片状阴极辅以数控运动去除剩余材料,通过多个阴极的组合加工,最终完成整个型腔的电解预加工。

阴极结构采用内喷式结构,在利用数值解法得到阴极理论型面后(相关内容在系列文章“三元流闭式叶轮组合电加工技术研究II——数控电解预加工”中将会有专题介绍),还需针对叶轮三元流道的特点,解决如下问题:①保持整个流道光滑转接,以适当圆角过渡代替“尖棱角”,这样有利于流场稳定,提高工件表面质量,降低杂散腐蚀;②对于扩散式通道加工,要避免电解液压力的突然变化,这需要与夹具设计统一考虑,如在加工间隙出口处施加适当的背压,这样不但提高了电解液工作压力的稳定性,减少局部缺液的可能性,而且可使整个流程上的电导率均匀,从而使加工间隙均匀,对于提高电解加工的复制精度具有显著效果<sup>[10]</sup>;③增加阴极调整找正的工艺基准,这对于多个阴极的组合加工过程中保证定位精度尤其重要。

数控电解加工中阴极的运动轨迹是影响零件最终加工形状、尺寸和精度的重要因素,而阴极形状、尺寸和其加工运动轨迹又相互影响,必须统一考虑,一般需满足如下等式:

$$S - \Delta = \bigcup_{f=0}^{\text{num}} (G \cup I) T_f \quad (1)$$

式中: $S: \{x_i, y_j, z_i, R_i\}$ 为理论型腔外廓点域; $\Delta: \{x_i, y_j, z_i, R_i\}$ 为预留精加工余量点域; $G: \{x_i, y_j, z_i, R_i\}$ 为阴极的外廓点域; $I: \{x_i, y_j, z_i, R_i\}$ 为加工间隙的外廓点域; $T_f$ 为阴极运动到第 $f$ 步时的运动变换。

加工时阴极只做简单的匀速进给或者固定不动,这样有利于流场稳定,而工件可以同时沿 $X$ 、 $Y$ 方向平动,必要时还可加上绕 $Z$ 轴的转动。

### 3.2 数控电火花精加工电极及轨迹设计

之前已经由数控电解预加工出叶间流道,所以在进行电火花精加工时电极的损耗远远小于直接采用电火花加工整个流道时的损耗。这样可以避免频繁更换电极,电极损耗带来的加工误差也相对减小,加工稳定性和加工精度都得到提高。同以往零件不同,图1所示闭式叶轮的叶片属于

三元流设计,型面复杂,叶间流道弯扭程度大,且开放性较差,不能用一个成形电极辅以多轴联动来完成,也难用两个成形电极分别从进、出口实现对接来完成,而是需要多个电极组合加工才能完成,这就大大增加了电极及其加工轨迹的设计难度。设计主线按以下步骤进行:

(1) 加工区域的合理划分。为了完成整个叶间通道的加工,同时也为了使工具电极和加工运动轨迹的设计、以及加工过程尽量简单易行,首先在计算机中提取叶间流道的三维造型,将其划分成若干区域分别进行加工。区域划分的合理性特别重要:既可以减少电极个数,简化成形或近成形电极的设计难度,简化加工轨迹,同时也有利于提高叶片的加工精度,缩短设计和加工周期,降低加工成本。如图3所示给出了两种划分方案(图中1,2,3,4代表划分区域的编号,如1代表1号区域),显然,对于不同的方案,需要设计不同的工具电极和不同的加工运动轨迹。另外,确定各区域加工的先后顺序也很重要,一般不能任意调换,否则会增加电极损耗、降低加工效率。

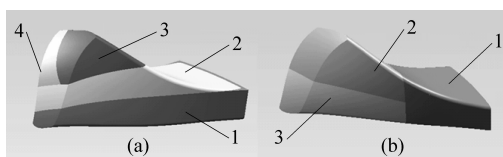


图3 对叶间流道三维模型的加工区域划分

Fig. 3 Working area partition of the 3D model of a cavity of impeller

(2) 电极运动及加工过程的计算机仿真。一般而言,由于三元流闭式叶轮流道的弯扭程度大,且圆周上分布叶片数较多,则流道进出口尺寸较窄,电极在加工时为避免干涉,活动范围很小,加工轨迹只能设计成复杂的空间曲线。为了精确、高效地得到理想的运动轨迹,在UG平台上二次开发了仿真软件,对电极运动轨迹、加工过程进行干涉检测及模拟仿真。将仿真得到的加工型腔和理论型腔进行比较,可以精确确定干涉区域的大小、位置,再根据仿真结果修正电极轨迹,最终达到理想加工状态;在尽量保证成型电极成型加工面最大的情况下,对于一些仅靠修正运动轨迹很难避免甚至无法避免的干涉区域还需要通过对电极外形进行必要的修正来解决。

(3) 完善理论电极结构。这里包括合理设计电极定位和工艺找正基准;为减少或避免各加工区域电极间的接痕,需要对电极边缘进行处理;对

电极模型上的某些干涉区域进行必要的修正或去除等问题。有关电极型面的数值求解和结构优化的具体方法和原则将在系列文章“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”中详细介绍。

### 3.3 工装夹具的数字化设计制造

组合电加工中,开始的数控电解预加工和后续的数控电火花精加工,在加工过程中必须保证其定位、加工基准的统一,才能保证最终的加工精度和质量,尤其对于本文所研究加工的三元流闭式叶轮,需要多阴极、多电极的组合加工,其基准的统一就更为重要。而工装夹具的设计又直接影响到定位基准的精度,在保证定位精度的同时,还需要结构简单,便于拆卸和分度;在电解预加工工序中,流场的稳定与否直接影响加工过程的稳定性,设计工装夹具时应进行流场分析。这些都在UG平台中采用三维数字化设计,对工装夹具的所有关键零件进行数字化建模及装配;同时建立相应的工装夹具及加工工艺数据库,以指导以后实际加工工序中的基准定位、调整、找正。

### 3.4 加工参数的选择与优化

加工参数的选择直接影响零件加工精度、效率及生产成本,在电解及电火花加工过程中,不同的工件材料、不同的型腔结构需要选用不同的加工参数,而加工参数的确定是需要通过大量的试验和科学的分析才能得到;通过多年来对整体叶轮、叶盘以及闭式整体构件的电加工研究,已开始建立起工艺参数数据库,以便进一步开展基础工艺研究。基于以上成果和直接针对三元流闭式叶轮进行的大量基础试验取得的数据,选择并优化了三元流闭式整体叶轮叶间预通道的数控电解、数控电火花加工参数。例如,数控电解加工采用  $\text{NaNO}_3$  电解液,浓度为  $9\% \sim 10\%$ ,温度  $28 \sim 32\text{ }^\circ\text{C}$ ,进口工作压力  $0.68 \sim 0.72\text{ MPa}$ ,加工电压  $14.8 \sim 15.2\text{ V}$ ;数控电火花粗加工平均放电间隙  $0.10 \sim 0.25\text{ mm}$ ,精加工平均放电间隙  $0.01 \sim 0.05\text{ mm}$ 。

## 4 试制加工试验

三元流闭式叶轮叶间通道数控电解预加工在自主研制的五坐标数控电解加工机床上进行;叶片型面最终成形的数控电火花加工在瑞士夏米尔四轴联动数控电火花成形机床上完成。

图4所示为采用1号阴极数控电解预加工后的部分型腔,作为数控电解预加工型腔全部,还需要2号、3号阴极加工共同完成。预加工结果表明,当所有阴极完成电解加工后,叶间通道内大部分型面能均匀留出  $0.5 \sim 0.7\text{ mm}$  的加工余量,只是极个别弯扭角度很大的型面处,有  $1.5\text{ mm}$ ,预加工后的整个叶间通道可顺利、高效进行数控电火花精密加工。



图4 由1号阴极加工完成的部分型腔  
Fig. 4 Part cavities processed by cathode No. 1

图5为数控电火花精加工后的叶轮试件,其型腔加工大部分型面误差小于  $\pm 0.1$ ,叶片分度误差  $< \pm 0.015^\circ$ ,表面粗糙度  $R_a \leq 3.2\text{ }\mu\text{m}$ ,流道光滑转接,无波纹度,“接刀”处只有轻微接痕,通过简单人工打磨即可消除,全部加工结果满足设计要求。由于是首次试制加工,加工方案、加工参数还在不断优化的过程,所以在加工精度和表面质量方面仍有较大的提高空间。



图5 电火花精加工完成后的三元流闭式叶轮  
Fig. 5 3D-flow closed impeller after completion of precision work by NC-EDM

## 5 结论

三元流闭式叶轮已经在新型、先进航空航天发动机及工业透平机械中得到越来越多的应用和发展,本文针对其整体制造的技术难题,提出并实现了组合电加工技术方案,对其中关键技术,包括数控电解加工阴极及轨迹设计、数控电火花加工电极及轨迹设计、加工参数的选择及优化等进行了创新研究和以整体制造为目标的工艺试验,并

成功试制加工了合格的、用数控铣削不能整体加工的三元流闭式叶轮。

试验研究表明,以数字化制造为主线,以数控电解/数控电火花组合为核心的组合电加工数字化制造技术途径,能够优质、高效、低成本、快速响应地解决那些叶片构形复杂、弯扭程度大的三元流闭式叶轮整体制造的技术难题,特别对于解决那些用数控铣削、精密铸造特别难加工或不能加工的难题,是一项不可缺少的技术补充;对新型航空航天发动机、以及核能、石油、化工、采矿等工业用大型透平机械的研制及生产具有积极促进作用和重要应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] 陈元先, 赖斌. 离心压气机叶轮三元流场计算[J]. 航空学报, 1995, 16(1): 42-45.  
Chen Yuanxian, Lai Bin. Computation of three-dimensional flow field in a centrifugal impeller[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1995, 16(1): 42-45. (in Chinese)
- [2] Bouquet T, Kouidri S, Bakir F, et al. Study of the 3D flows in the forward-curved blades centrifugal fans[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2003, 3(1): 13-21.
- [3] 沈承龙, 陈康民, 殷忠民. 三元流理论在风机设计、改型中的应用研究[J]. 上海机械学院学报, 1986, 8(4): 55-60.  
Shen Chenglong, Chen Kangmin, Yin Zhongmin. The research of the the 3D-flow theory used in the design and modified in fans[J]. Journal of Shanghai Institute of Mechanical Engineering, 1986, 8(4): 55-60. (in Chinese)
- [4] 赖天琴. 三元流叶轮的加工现状及前景[J]. 机电工程, 1997(6): 18-19.  
Lai Tianqin. The present situation and prospects of the machining of the 3D-flow impeller[J]. Electrical and Mechanical Engineering, 1997(6): 18-19. (in Chinese)
- [5] 郭子贵, 云乃彰, 张磊. 带冠整体叶轮组合电加工关键工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(增刊): 162-164.  
Guo Zigui, Yun Naizhang, Zhang Lei. On the key technique of combined electrical machining of the integral impeller with a ring[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(Supplement): 162-164. (in Chinese)
- [6] 赵建社, 徐家文, 云乃彰, 等. 异形型腔组合电加工数字化制造技术研究[J]. 航空学报, 2006, 27(1): 157-160.  
Zhao Jianshe, Xu Jiawen, Yun Naizhang, et al. Research on the combined electrical machining and digitized manufacturing technology for irregular cavity[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(1): 157-160. (in Chinese)
- [7] Domanowski P, Kozak J. Inverse problem of shaping by electrochemical generating machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109: 347-353.
- [8] Zawistowski F. New system of electrochemical form machine using universal rotating tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1990, 30(3): 475-483.
- [9] 赵建社, 徐家文, 王福元, 等. 异形型腔数控电解加工阴极及运动轨迹设计[J]. 中国机械工程, 2006, 17(1): 18-19.  
Zhao Jianshe, Xu Jiawen, Wang Fuyuan, et al. Cathode and its track design in NC-electrochemical machining irregular cavities[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 17(1): 18-19. (in Chinese)
- [10] 徐家文, 云乃彰, 王建业, 等. 电化学加工技术——原理、工艺及应用[M]. 1版. 北京: 国防工业出版社, 2008: 30-33.  
Xu Jiawen, Yun Naizhang, Wang Jianye, et al. Electrochemical machining technique—theory, technology and application[M]. 1st ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 30-33. (in Chinese)

#### 作者简介:

刘辰(1981—) 男, 博士研究生, 南京航空航天大学机电学院机械制造及其自动化专业。主要研究方向: 特种加工新技术、数字化制造技术。

Tel: 025-84891922

E-mail: liuchen502@nuaa.edu.cn

徐家文(1941—) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 特种加工、计算机应用。

Tel: 025-84891922

E-mail: xjw502@nuaa.edu.cn

(编辑: 蔡斐)