

数控电解加工整体叶轮的关键技术

徐家文 朱永伟 胡平旺 云乃彰 严德荣
(南京航空航天大学,南京 210016)

文 摘 以平行直纹型面的数控展成电解加工为例,对数控电解加工整体叶轮的主要关键技术,包括成形规律、展成运动、数控编程、阴极设计制造、机床及多轴联动数控系统、典型叶轮加工工艺逐一进行了介绍。
关键词 整体叶轮,数控,电解加工,关键技术

Key Techniques of Numerically Controlled Electrochemical Machining of Integrated Impellers

Xu Jiawen Zhu Yongwei Hu Pingwang Yun Naizhang Yan Derong
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Taking the numerically controlled-electrochemical contour evolution machining (NC-ECCEM) of a parallel straight generatrix surface as an example, the key techniques of NC-ECM of an impeller are introduced, including the shaping law, the evolution movement, the NC programming, the design and manufacture of tool-cathode, the machine tool and the relative NC system, the technology for manufacturing some typical integrated impellers.

Key words Integrated impeller, Numerical control, Electrochemical machining, Key technique

文献[1]综述了整体叶轮的主要加工方法及其比较,论述了数控电解加工(NC-ECM)整体叶轮的技术特点及其在解决以数控铣、精密铸造难加工或不能加工的难题方面所能发挥的重要作用;并对于我们独创研究的适合我国国情的以“直线刃”阴极数控展成电解加工平行直纹型面的基本原理、系统组成、加工方式进行了简要介绍,本文将继续就其若干关键技术逐一进行介绍。

1 成形规律

与拷贝式电解加工比较,展成电解加工的间隙形成及分布有很大的差别^[2]。拷贝式电解加工是工具阴极整个加工面与工件被加工面间保持一定的间隙,经过一定的加工时间或者说阴极加工送进一定的距离,加工间隙会逐渐达到一个平衡间隙状态。因此,拷贝式电解加工间隙通常采用平衡间隙理论

进行研究。而数控展成电解加工却类似于数控铣削,以简单形状的阴极进行展成运动,在运动过程中对工件只是在对应“加工刃”的一个很小的局部区域进行电解“切削”;随着展成运动的进行,电解“切削”区也在不断改变,即工具阴极连续顺序地“切入”和“退出”一个个加工区,从而形成工件加工面。显然,其加工间隙及相应的流场、电场、电化学溶解速度场都呈现动态变化的特点,通常不会达到如同拷贝式电解加工那样典型的平衡状态,而是一个随时间(t)、空间(x, y, z)变化的函数^[2,3]。因此,需要采用动态的电解加工理论,对展成电解加工间隙进行试验研究,以掌握间隙大小及分布,它是构造展成运动、阴极设计及加工参数选择的依据,是实现展成电解加工工艺的技术基础。

图1为圆棒阴极展成电解加工(NC-ECCEM)的

收稿日期:2002-11-17

徐家文,1941年出生,博士生导师,主要从事特种加工新技术的教学研究工作

几何模型。

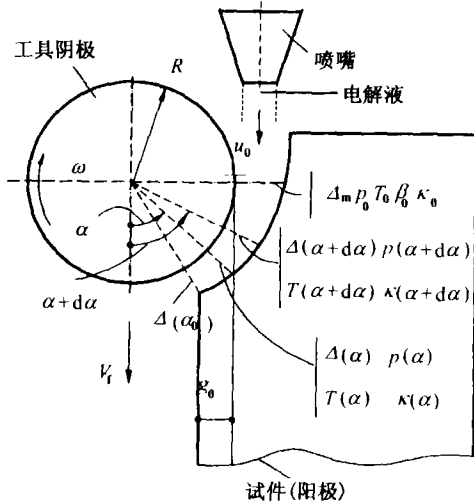


图1 圆棒阴极展成电解加工几何模型
Fig.1 Geometric model of NC-ECCEM with a rod cathode

加工开始时刻,在初始间隙为 $\Delta_0 = \Delta(\alpha_0)$, 即对应角度 α_0 处的加工间隙 $\Delta(\alpha_0)$ 处开始进行加工。随着阴极逐渐向下送进运动而切入试件,并逐渐扩大至 $\alpha = \alpha_0 + d\alpha, \alpha = \alpha_0 + 2d\alpha, \dots, \alpha = \alpha, \alpha = \alpha + d\alpha, \alpha = \alpha + 2d\alpha, \dots$, 直至达到 $\alpha = \pi/2$ 处, 对应 $\Delta = \Delta(\pi/2) = \Delta_m$ 。设各 α 处的加工间隙为 $\Delta = \Delta(\alpha)$, 其他有关参数对应为电解液压力 p_0 、温度 T 、气泡率 β 、电导率 κ (图1)。经过一段时间, 在对应角度 $[\alpha_0, \pi/2]$ 的区间内, 形成一个稳定的间隙分布模型, 即图1中的 $\Delta = \Delta(\alpha)$, 而最关心的是最后影响型面精度的间隙 Δ_m , 即 $\Delta = \Delta(\pi/2)$ 。在加工参数一定的条件下, 其分布与阴极送进速度 V_f 、阴极半径 R 密切相关。在一定假设条件下, 可以推导出加工间隙 $\Delta(\alpha)$ 、最终加工间隙 Δ_m 的分布规律, 即推导出由方程(1)~(4)所组成的加工间隙模型方程组^[3]。

$$d\Delta(\alpha) = R \{ [\Delta_b(\alpha) / \Delta(\alpha)] - \cos\alpha \} \sin\alpha d\alpha \quad (1)$$

$$\Delta_b(\alpha) = \eta \kappa_0 (U - \delta_E) / V_f \quad (2)$$

$$\Delta(\alpha_0) = \Delta_b(\alpha) / \cos\alpha_0 \quad (3)$$

$$\sin\alpha_0 = (R - g_0) / [R + \Delta(\alpha_0)] \quad (4)$$

式中, U 为加工电压; δ_E 为分解电压; g_0 为切入深度; η 为电流效率; ω 为角速度。

加工材料为 A30 优质钢, 取工艺参数: 17% Na- 宇航材料工艺 2003 年 第 2 期

Cl, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $p_0 = 0.3 \text{ MPa}$, $U = 15 \text{ V}$, $\delta_E = 1.6 \text{ V}$, $g_0 = 2 \text{ mm}$, $R = 3 \text{ mm}$ 。在计算机上对模型方程组进行数值解, 结果示于图2; 加工间隙 Δ_m 与加工送进速度 V_f 的关系, 试验及计算结果见图3。两者比较, 其间相差小于 5%, 可供实际应用参考。

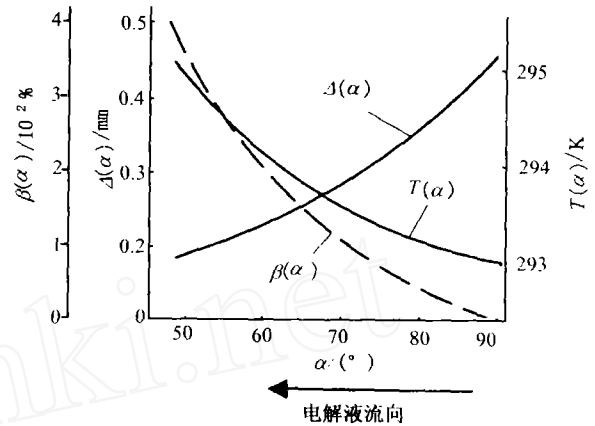


图2 加工间隙、温度及气泡率分布的计算结果
Fig.2 Calculated results of machining gap, temperature and gas bubble ratio

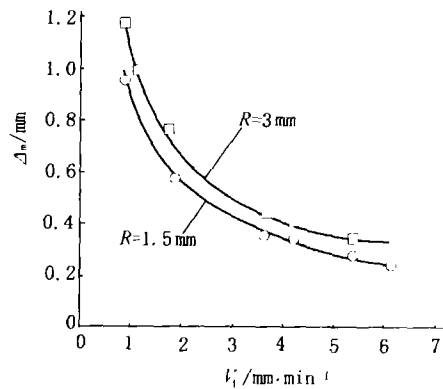
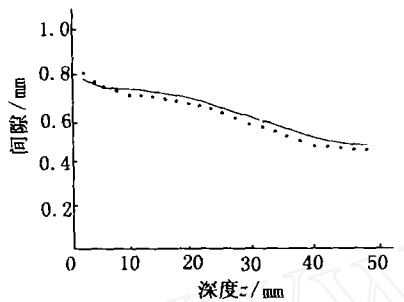


图3 不同 R 的 Δ_m 与 V_f 的特性曲线
Fig.3 Δ_m - V_f characteristic curves with different radius R of cathode
—为计算结果; \circ $R = 1.5 \text{ mm}$ 的试验结果;
 \square $R = 3.0 \text{ mm}$ 的试验结果。

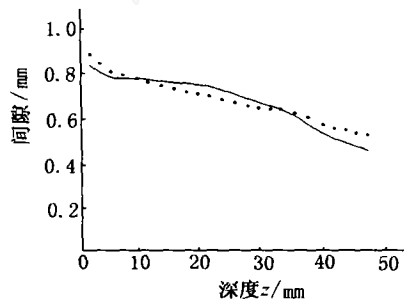
对于整体叶轮叶间槽的加工, 将叶片空间三维型面分割为很多片小平面, 以第 i 小平面加工结束的状态作为第 $i+1$ 小平面的起始条件, 研究加工第 $i+1$ 小平面的过渡过程, 逐段递推, 可以列出各小平面段加工的过渡过程方程组及最终侧面加工间隙计算式^[4,5]。

对文献[4,5]中有关方程组进行数值计算。计

算及试验的参数为:叶轮材料 2Cr13、 $U = 16 \text{ V}$ 、 $\delta_E = 1.6 \text{ V}$ 、电解液 11% NaCl 水溶液、温度 $T = 30^\circ\text{C}$ 、加工区进口压力 $p_0 = 0.55 \text{ MPa}$ 、垂直进给速度 $V_{f|z} = 0.75 \text{ mm/min}$ 、端面初始间隙 $\Delta_0 = 0.5 \text{ mm}$ ，其计算结果及加工实测结果见图 4，而实际加工型面的某截面型线与计算结果比较见图 5。以上理论分析及试验研究结果是随后设计阴极、构造展成运动及选择工艺参数的重要依据。



(a) 叶盆



(b) 叶背

图 4 加工间隙的计算值及加工实测值

Fig. 4 Calculated and measured results of machining gap
—为计算曲线;.....为实测加工数据点。

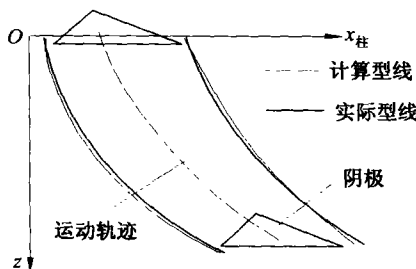


图 5 实际型线与计算型线的比较

Fig. 5 Comparison between machined and calculated section curves

2 展成运动的构成

整体叶轮叶片型面通常以列表曲面(型值点)的形式来描述。数控展成电解加工的编程任务,就是根据这些型值点数据,在保证一定精度条件下,拟合成以直母线展成的直纹曲面(图 6)^[4-6]。整体叶轮叶片型面的加工方式按照阴极结构及向加工区供给电解液形式的不同可分为两类:(1)内喷式加工(文献[1]中图 2),常用于在圆盘毛坯上加工整体叶轮的叶间通道;(2)外喷式加工(文献[1]中图 3),主要用于圆棒阴极、单直线刃阴极或电解磨轮对型面进行精加工。对于直纹曲面加工,加工刃边均为直线。

按照整体叶轮型面的特点,对于可以用平行直纹面来拟合的型面,电解加工的展成运动只需四轴联动^[6];而对于只能用非平行直纹面来拟合的型面加工,其展成运动则需要五轴联动^[7]。为实现所要求的展成运动,需要相应的数控展成电解加工机床及数控系统。对于如图 6 所示的拟合直纹曲面,为了提高曲面拟合精度,还可以进行插值加密处理。

在上述直纹曲面拟合的基础上,再考虑加工间隙的分布,就可以得到阴极刃边的展成运动轨迹。而具体阴极展成运动轨迹的构成,还与加工方式的选择、加工型面及阴极几何尺寸有关,详细过程将另作介绍。

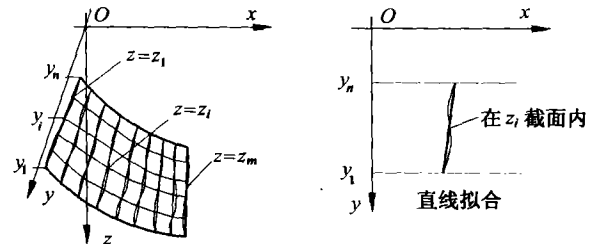


图 6 直纹曲面拟合

Fig. 6 Parallel straight-generatrix surface fitted with surface coordinate points

3 数控运动的自动编程

基于上述展成运动轨迹的分析计算方法,可以实现数控展成运动的自动编程^[4,7,8],其编程软件结构及数据处理流程如图 7 所示。根据叶轮设计图,得到叶片型面坐标点的数值,将它们以一定格式的列表形式输入自动编程软件包,同时还需选定加工

宇航材料工艺 2003 年 第 2 期

方式、加工精度、加工参数及展成运动轨迹型面(称为加工基准面),则可以自动计算出展成运动轨迹及相关运动速度,并经后置处理得到直接控制机床各轴运动的G代码数控程序。其间,可以输出多种必要的图形(如直纹面几何造型)、数据及G代码数控程序,整个编程软件具有友好的人机对话界面,必要时可以根据加工工艺的需要对计算过程进行人工干预、修正。

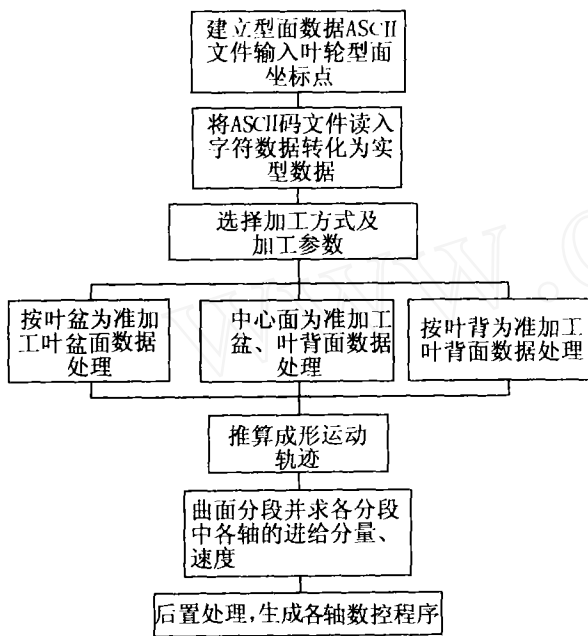


图7 自动编程软件的总体方框图
Fig.7 Scheme of automatic programming

4 阴极设计

型面拷贝式电解加工,工具阴极型面是工件型面的反拷贝形状。对复杂型面加工,阴极设计制造是一项要求高、难度大、耗费多的技术工作。而展成电解加工是基于简单阴极加工刃边的展成运动轨迹包络面及加工间隙的分布形成工件型面的,阴极设计大为简化;但由于展成加工过程所形成流场、电场动态分布的特点,其阴极设计的特殊性也应当重视。

展成电解加工阴极设计要求流场均匀、结构合理,要保证在整个加工过程不产生干涉、过切现象,必要的时候阴极某些部位也要采取绝缘措施,以减小或消除杂散腐蚀。如前所述,展成电解加工的阴极有内喷式、外喷式两种结构^[1],此外还有如图8所示用于光整加工型面的内喷式阴极。

宇航材料工艺 2003年 第2期

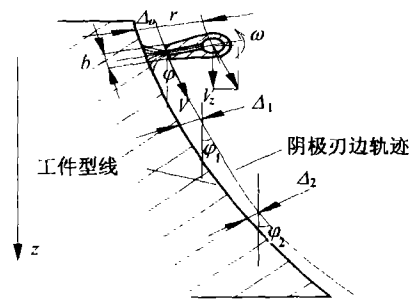


图8 内喷式阴极展成电解光整加工型面
Fig.8 Finishing surface by NC-ECCEM with an inner jet cathode

展成电解加工叶间通道的内喷式阴极一般设计成焊接式扁平斜角结构(图9),出液槽的形状有直线窄缝式、“S”型窄缝式。阴极非加工面与底板交角 α_1 、 α_2 的大小应保证加工时不产生干涉;阴极左、右加工刃边应圆角过渡,钳修光整。其主要结构尺寸有顶宽 A 、长度 L 、底宽 B 、底板斜角 θ 等(图9),基于叶间通道尺寸及加工间隙,按相应几何关系进行设计(图10)。

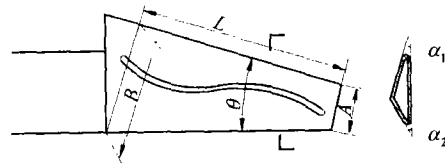


图9 平板双刃边内喷式阴极
Fig.9 Inner jet cathode with two line-edges

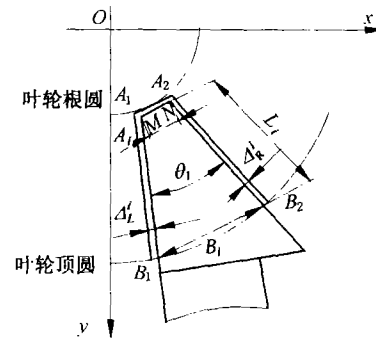


图10 阴极尺寸设计图解
Fig.10 Illustration of cathode design

5 数控电解机床及多轴联动控制系统

为了实现阴极—工件的多坐标运动,则需要多轴数控电解机床及相应的多轴联动控制系统。机床具有垂直进给 z 轴、工作台水平运动 x 、 y 轴、旋转工作台 C_w 旋转轴、阴极的 C_T 摆动轴共五轴。各直

线轴均由步进电机、滚珠丝杆传动,在滚动导轨上实现部件直线运动。旋转轴则通过精密谐波减速器带动相应部件作旋转运动。一般其各轴运动脉冲当量为: z 轴 $0.5 \mu\text{m} / \text{Pulse}$; x 轴、 y 轴 $1 \mu\text{m} / \text{Pulse}$; C_T 轴、 C_W 轴 $0.001^\circ / \text{Pulse}$ 。数控电解机床的其它基本要求与通用电解机床的相同,即刚性好,进给速度宽、特性硬,运动精度、定位精度高;设备耐腐蚀、电气抗干扰能力强;运行安全、可靠等。机床数控系统包括主计算机和控制各轴运动的经济型数控单元,还设置了专门的通讯、控制接口,以保证主计算机与各控制单元的通讯以及各轴之间的同步联动运动。

6 整体叶轮的数控展成电解加工工艺

在掌握前述各项关键技术的基础上,进行必要的工艺试验并掌握整体叶轮加工的工艺规律,包括优选工艺参数,改进阴极结构及流场设计,修改、定型加工程序。通过大量基础工艺试验及典型叶轮的加工工艺试验,逐步建立并完善了典型整体叶轮的数控展成电解加工工艺,已经为型号研制加工了整体叶轮[文献[1]中图 4(a)]。近来,对小型整体叶轮,在加工叶间通道后,采用数控展成电解和电解磨削精密加工了叶片型面^[7-9],试验加工的叶型精度已达到 $\pm 0.07 \text{ mm}$ (图 11)。

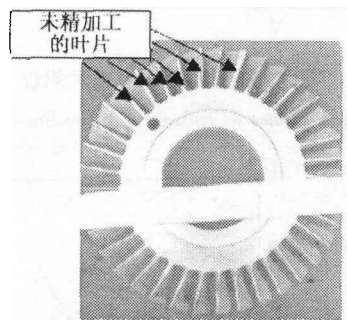


图 11 数控电解磨削精密加工的整体叶轮样件

Fig. 11 Integrated impeller sample precisely machined by NC-ECM

7 结论

经过十余年的试验研究,已经掌握了数控电解加工整体叶轮的关键技术,包括成形规律、展成运动、数控编程、阴极设计制造、五轴数控电解加工机床(实用新型专利)、多轴联动数控系统及其编程方法(发明专利)以及典型叶轮加工工艺,已经开始为新产品研制服务。今后,将进一步拓宽研究思路,扩大应用范围,在应用中不断提高数控电解加工整体叶轮的技术水平。

参考文献

- 1 徐家文,朱永伟,胡平旺,云乃彰,严德荣.整体叶轮的数控电解加工及其在航天制造中的应用前景.宇航材料工艺,2003;33(1): 13~17
- 2 王建业,徐家文.电解加工原理及应用.国防工业出版社,2000:3~39,193~205
- 3 徐家文,唐亚新.数控展成电解加工成形规律研究.机械工程学报,1994;30(6): 28~34
- 4 朱永伟,徐家文,胡平旺.数控展成电解加工整体叶轮的研究与应用.航空学报,2001;22(4): 376~378
- 5 钱密,徐家文.展成电解加工整体叶轮扭曲叶片中的间隙分析.航空精密制造技术,2002;38(2): 11~14
- 6 周宇,徐家文.数控展成电解加工中阴极运动方式及其实现.航空精密制造技术,1997;(4): 4~7
- 7 干为民,徐家文.五轴联动数控展成电解磨削整体叶轮的控制方法.东南大学学报,2002;32(2): 228~231
- 8 康敏,徐家文.精密展成电解加工整体叶轮的数控编程.机械科学与技术,2002;21(5): 748~750
- 9 康敏,徐家文.整体叶轮叶片型面的精密展成电解加工.现代制造工程,2002;(6): 35~36

(编辑 李洪泉)