DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2006.01.024
2006年 1月 北京航空航天大学学报 January 2006
第32卷 第1期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.1

叶片电解加工阴极设计CAD/CAE/CAM专家系统

李志永 朱 荻

（山东理工大学 机械工程学院，淄博 255049） （南京航空航天大学 机电学院，南京 210016）

摘 要：为了解决航空发动机叶片电解加工工具阴极设计自动化程度较低的难题，在电解加工基本原理的基础上，开发了专用的叶片电解加工计算机辅助阴极设计制造专家系统，主要介绍了该专家系统的基本结构、模块化组成和工作原理，并重点探讨了基于间隙内实际电场分布的叶片电解加工有限元阴极设计方法，最后通过一组工艺试验验证了该专家系统所设计阴极的加工精度.试验结果表明开发的阴极设计专家系统有较高的设计精度和良好的工作稳定性.

关 键 词：电解；叶片；计算机辅助设计/工程/制造；专家系统；有限元

中图分类号：TG 662

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2006)01-0103-05

CAD/CAE/CAM expert system of cathode design of turbine blades in electrochemical machining

Li Zhiyong

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Zhu Di

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

Abstract: ECM(electrochemical machining) is one of the main machining methods of the aero-engine blades production. However, the tool cathode design is very difficult, which limits the applications of ECM in modern industries. To solve the difficulties in automation of the tool cathode design of aero-engine blades in ECM, a specialized expert system of computer aided cathode design for aero-engine blades in ECM was developed on the basis of electrochemical machining foundational theories. The basic structure, module components and work principle of this expert system were discussed in detail. The finite element cathode design arithmetic based on the mathematics model of actual electric field distribution in electrode gap in ECM process was proposed. The experiments for verifying the machining accuracy of the design cathode were developed. The experimental results demonstrate that this cathode design expert system has high design accuracy and excellent operating stability.

Key words: electrochemical machining; blade; computer aided design/engineering /manufacturing; expert system; finite element

电解加工ECM(Electrochemical Machining)是利用金属阳极的电化学溶解原理来去除材料的制造技术，在国防工业尤其是航空发动机叶片生产中得到了极其重要的应用[1~2].而阴极设计是电解加工应用中首先面临和必需解决的难题.目前，工业生产中通常采用“反拷”法制造阴极，然而通过“反拷”获得的阴极在绝大多数情况下并不能立即加工出合格的工件，阴极需要反复试验、修整后方可用于实际生产.“反拷”法这种“反向”的阴极设计制造方法对试验和修整人员提出了严格甚至

收稿日期：2005-03-03

基金项目：中国人民解放军总装备部“十五”预研资助项目(41318.3.2.4)

作者简介：李志永(1976—)，男，山东邹平人，讲师，lzy761012@sdut.edu.cn.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

是苛刻的技术要求,不仅延长了加工准备周期,而且精度也难以保证.因此人们开始了"正向"阴极设计方法的研究.早期研究的阴极设计方法主要有斜阴极法、导电纸模拟法、cos θ 法等,这些方法对加工过程作了过多的假设,因此会带来很大的设计误差.随着计算机和计算数学等相关学科的发展以及对电解加工物理过程的进一步了解,近年来主要是基于 Laplace 方程的更全面的考虑电解加工实际电场分布的阴极设计数值解法的研究,大部分的研究采用迭代调整的思路,反复调整阴极边界直到所有的边界条件都得到满足为止,比较常用的数值解法有差分法、有限元法[3~4]和边界元法[5].但要保证算法具有良好的收敛性和解算精度绝非易事.

综上所述,电解加工阴极设计不仅仅需要精深的专业知识,而且需要丰富的工程经验.目前反映电解加工物理过程的一些电场、流场的数学模型还不完善,很多情况下还要依靠经验公式和经验值,专家知识和专家经验在阴极设计和实际加工过程中往往会起到至关重要的作用.因此采用专家系统来刻画电解加工过程的本质,并在此基础上进行工具阴极设计是实现阴极设计制造自动化的必然选择.由于电解加工涉及的影响因素过于复杂,构建能够适应所有加工条件和工件类型的阴极设计专家系统几乎是不可能的事情,故本文以某型航空发动机转子叶片为研究对象,着重探讨了构建针对这一特定工程应用的叶片电解加工阴极设计 CAD/CAE/CAM 专家系统的若干关键技术,讨论了该专家系统的模块化结构和工作原理,并重点讨论了作为专家系统核心的基于电解加工实际电场分布的有限元阴极设计方法,最后通过一系列的工艺试验验证了该专家系统工作的可靠性和稳定性.

1 专家系统模块化结构

专家系统(expert system)技术是以计算机为工具,利用专家知识及知识推理来理解与求解问题的知识系统,模拟人类领域专家的宏观推理活动,是一种利用计算机对于符合模型描述领域中的知识进行符号推理的技术[6].本文在电解加工基本理论的指导下,在 UGII 三维造型软件平台上开发了叶片电解加工阴极设计 CAD/CAE/CAM 专家系统,该系统主要包括以下几个子系统:叶片三维造型 CAD 子系统、阴极型面设计 CAD 子系统、对设计过程和结果进行检测和分析的 CAE 子系统、阴极数控加工 CAM 子系统和辅助管理子系统.系统完整的模块化结构如图 1 所示.

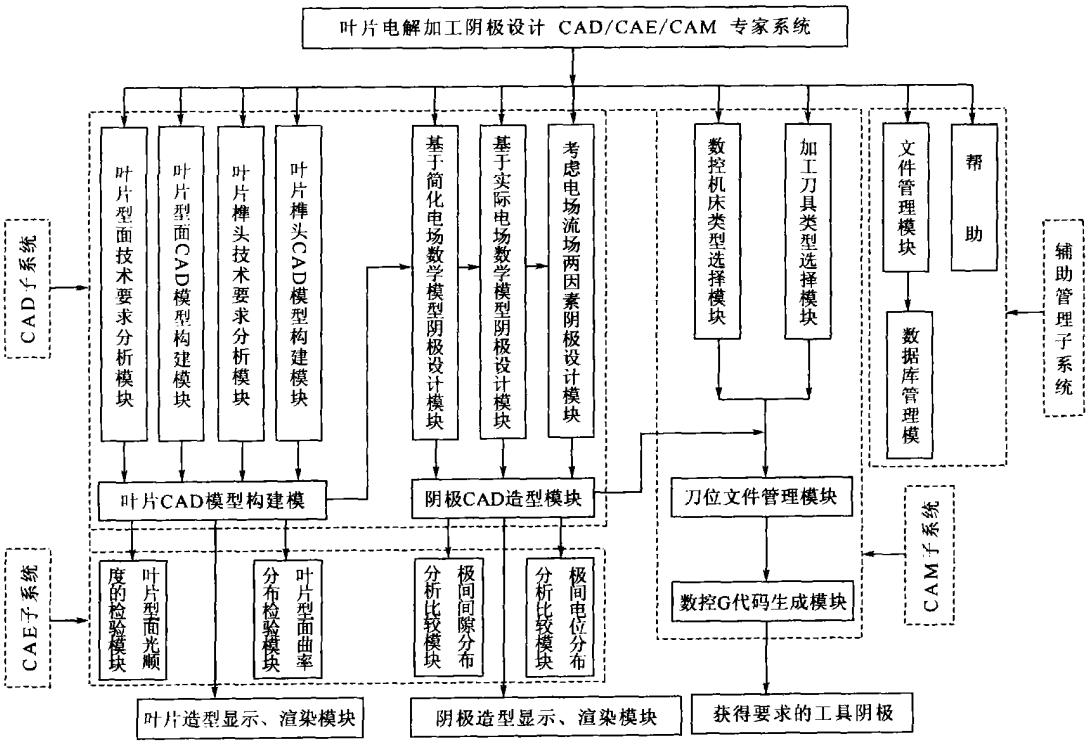


图 1 叶片电解加工阴极设计 CAD/CAE/CAM 专家系统模块化结构图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

叶片三维造型 CAD 子系统的功能主要是完成模型叶片的三维实体建模,为阴极型面的设计提供精确的研究对象,它是整个专家系统的"源头";阴极型面设计 CAD 子系统以模型叶片的三维造型为基础,在电解加工基本理论指导下,结合专家知识和专家经验,负责设计符合各种加工条件的工具阴极型面,该子系统包括 3 个阴极设计模块——基于电解加工简化电场数学模型的阴极设计模块、基于电解加工实际电场分布的有限元阴极设计模块和同时考虑电场、流场 2 因素的阴极设计模块.丰富的电解加工专家知识、信息和经验大都被集成在这些设计模块中,它们是整个专家系统的核心;CAE 子系统主要对设计过程和结果进行检测和分析,包括对叶片三维造型光顺度和叶片型面曲率分布是否均匀的检测、对各阴极设计模块运行时的间隙分布和极间电位分布进行跟踪和对比分析;CAM 子系统的主要功能是工具阴极的制造,将经过 CAD 子系统设计和 CAE 子系统检测分析的工具阴极由几何造型转化为工具实物,从而用于实际加工;辅助管理子系统的主要功能是负责维护系统的数据库、维护专家系统运行后得到的结果文件和帮助信息.

2　专家系统工作实例

2.1　模型叶片的三维实体造型

本文以某型航空发动机转子叶片为研究对象,在给定明确的设计要求和结构要求的前提下,该专家系统的叶片三维造型 CAD 子系统设计出了合格的模型叶片三维实体造型,如图 2 所示.该模型叶片的三维实体造型作为整个专家系统的"源头"为阴极设计 CAD 子系统提供了精确的几何模型.

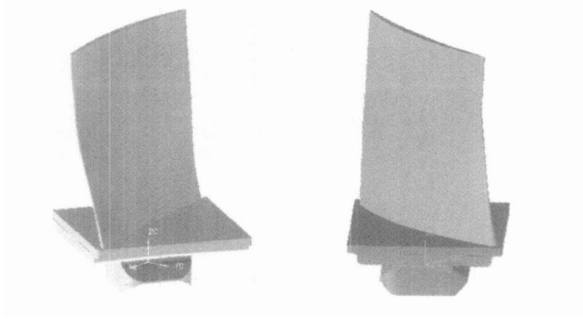


图 2　模型叶片的三维实体造型

2.2　有限元阴极设计方法

本文开发的叶片电解加工阴极设计专家系统的核心是阴极设计 CAD 子系统,在该子系统所涉及的 3 个阴极设计模块中,最具有代表性的是基于电解加工实际电场分布的有限元阴极设计模块.下面着重讨论集成到该模块中的阴极设计有限元数值解法.

根据电解加工的基本原理,当加工过程处于平衡状态时,间隙区域 Ω 内电位分布符合 Laplace 方程,且在阴、阳极边界上满足特定的边界条件,其数学模型如下所示:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}=0 \tag{1}$$

阴极边界条件

$$\varphi_c = 0 \tag{2}$$

阳极边界条件

$$\left.\begin{aligned}\varphi_a &= U\\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} &= \frac{v_f}{\eta\omega\kappa}\cos\theta\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

其中,φ 为间隙电场各点电位,V;U 为工件阳极电位,V;v_f 为阴极进给速度,mm/min;θ 为 v_f 与阳极表面法线之间的夹角,(°);v_a 为阳极表面溶解速度,mm/min;κ 为电解液电导率,$(\Omega\cdot mm)^{-1}$;η 为电流效率;ω 为阳极金属的体积电化学当量,$mm^3\cdot(A\cdot min)^{-1}$.

根据变分原理,Laplace 方程为了满足式(3)中的阳极边界条件,等价于求解一个位函数 φ,使下列泛函最小:

$$I(\varphi)=\frac{1}{2}\iiint_{\Omega}\left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)^2\right]\mathrm{d}v-\int\frac{\partial \varphi}{\partial n}\varphi\mathrm{d}s \tag{4}$$

在具体求解 $I(\varphi)$ 前,先将 $I(\varphi)$ 表示的连续区域 Ω 离散,建立有限单元模型.图 3 是间隙 Ω 内完整的电场分布模型,图中标出了应该满足的边界条件.

阴极设计有限元数值解法具体步骤如下:

1) 利用基于电解加工简化电场数学模型的阴极设计模块给出阴极初始边界,并与叶片阳极边界组成一个封闭的间隙区域 Ω,然后用六面体八节点有限单元将 Ω 区域离散.通常电解加工的间隙很小(<1mm),因此将 Ω 离散成图 4 所示的 5 层,各有限单元的节点编号方式亦在图中标出;

2) 根据有限元的基本理论,按照式(5)在有限单元内对每个节点的电位 φ 求导并令其为 0,可推导出该单元对应的单元系数矩阵 $\boldsymbol{K}^e$,显然 $\boldsymbol{K}^e$ 是 8×8 阶对称矩阵;

$$K_{ij}^e=\iiint_{v^e}\left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x}\frac{\partial N_j^e}{\partial x}+\frac{\partial N_i^e}{\partial y}\frac{\partial N_j^e}{\partial y}+\right.$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

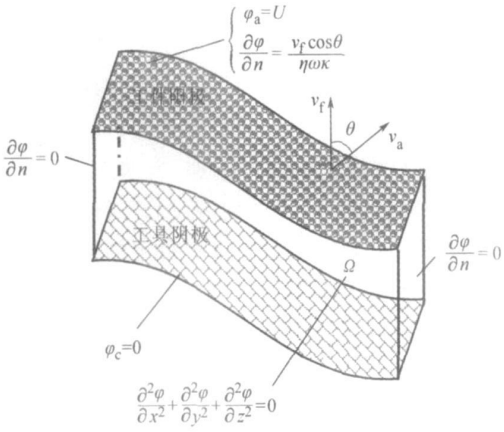


图3 极间间隙 Ω 内电场分布模型

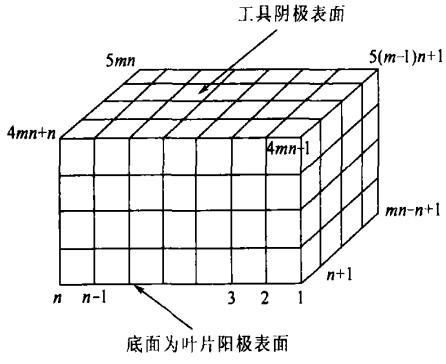


图4 间隙区域 Ω 内有限元网格划分及节点编号

$$\left.\frac{\partial N_i^e}{\partial z}\ \frac{\partial N_j^e}{\partial z}\right]\mathrm{d}v \tag{5}$$

3) 将所有单元对应的单元系数矩阵 $\boldsymbol{K}^e$ 按照有限元的计算装配规则装配得到总体系阵 $\boldsymbol{K}$;

4) 求出总体矩阵 $\boldsymbol{K}$ 后,式(1)～式(3)所示的间隙 Ω 内的电位分布和阴、阳极必需满足的边界条件可用如下的线性方程组来描述:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & 0 & 0 \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & 0 & 0 \\ 0 & k_{32} & k_{33} & k_{34} & 0 \\ 0 & 0 & k_{43} & k_{44} & k_{45} \\ 0 & 0 & 0 & k_{54} & k_{55} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ \varphi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中,φ_1 和 φ_5 分别是叶片阳极和工具阴极的电位;φ_2,φ_3 和 φ_4 分别是极间各层的电位.b_1 是通过对每个叶片阳极边界上的节点在各自所属的单元体内按照式 $\iint\frac{v_f}{\eta\omega\kappa}\cos\theta\cdot\varphi\mathrm{d}s$ 计算数值积分得到,该项数值积分反映了叶片阳极表面溶解平衡的边界条件;

5) 将式(3)所描述的边界条件强加在叶片阳极型面上,求解式(6)的线性方程组,可以求得 φ_1,φ_2,φ_3,φ_4 和 φ_5.然后通过线性插值的方法可以求得"一族"等位面,这族等位面就是要求取的阴极边界.阴极边界可根据不同的加工条件有选择的选取.

上述步骤就是基于电解加工实际电场分布数学模型的有限元阴极设计模块的工作流程,也是阴极设计 CAD 子系统的核心之一.图5、图6分别是该模块设计出来的用于加工叶片叶盆型面和叶背型面的阴极型面造型.

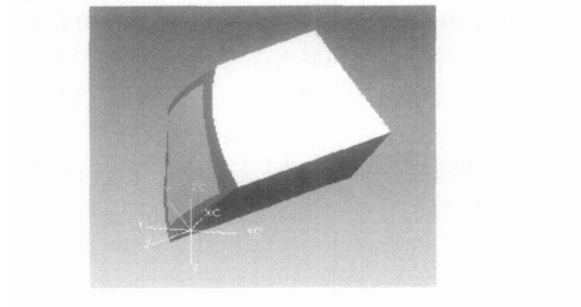


图5 加工叶盆的阴极型面造型

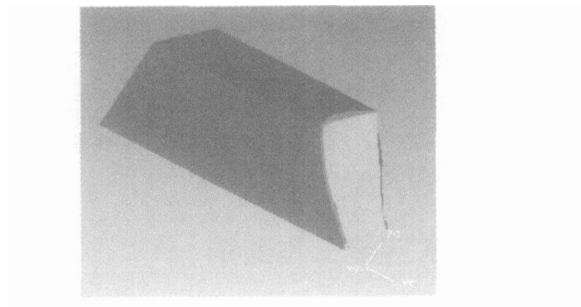


图6 加工叶背的阴极型面造型

2.3 阴极的制造

该专家系统的 CAM 子系统负责将阴极由几何造型转化为工具实物,图7是利用不锈钢材料在5坐标数控加工中心加工的用于加工叶片叶盆型面的工具阴极实物.

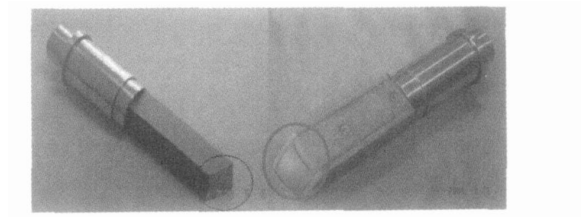


图7 阴极实物照片

3 专家系统的试验验证

为了验证本文开发的叶片电解加工阴极设计专家系统工作的可靠性和稳定性,以加工叶盆型面为例安排了一系列的工艺试验验证了所设计阴极的加工精度.加工条件如表1所示.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　加工叶盆型面工艺试验参数

加工电压/V	阴极进给速度/($mm \cdot min^{-1}$)	电解液参数	流速/($m \cdot s^{-1}$)	工件材料
14.5	0.5	10% $NaNO_3$	15.0	$2Cr13$ 钢

利用图 7 所示的工具阴极在日本制造的 JAPAX-300B 电解机床上进行了一系列的型面加工试验,图 8 是加工出的部分试件照片.利用专用测具对试件型面的成型精度进行了检测,检测结果表明在叶片型面需要测量的 9 条剖截面上的成型精度均达到了型面精度的设计要求,这一检测结果充分表明了本文开发的叶片电解加工阴极设计 CAD/CAE/CAM 系统工作的可靠性和稳定性.

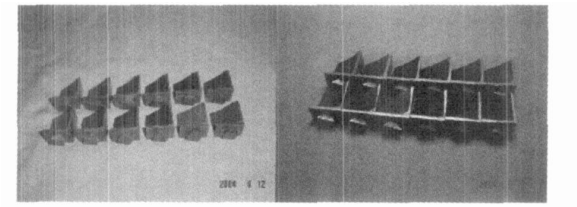


图 8　叶盆型面加工试验加工出的部分试件

4　结 束 语

本文在电解加工基本理论的基础上,充分考虑电解加工技术的工艺特点,针对航空发动机叶片电解加工阴极设计这一具体工程问题,论述了构建叶片电解加工阴极设计 CAD/CAE/CAM 专家系统的必要性,并着重研究了专家系统构建中的若干关键技术,最后通过一系列系统的工艺试验验证了本文开发的该专家系统工作的可靠性和稳定性.

参考文献 (References)

[1] 徐家文,王建业,田继安. 电解加工在航空制造中的应用及发展[J]. 航空制造技术,2002(4):27～30
Xu Jiawen, Wang Jianye, Tian Ji'an. Application and development of electrochemical machining in aviation manufacture[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002(4): 27～30(in Chinese)

[2] 王建业,林苏文. 叶片电解加工技术的新发展[J]. 航空工艺技术,1998(6):17～20
Wang Jianye, Lin Suwen. New development of blade ECM technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1998(6): 17～20 (in Chinese)

[3] Marius Purcar, Leslie Bortels, Bart Van den Bossche, *et al*. 3D electrochemical machining computer simulations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1～3): 472～478

[4] Bhattacharyya S, Ghosh A, Mallik A K. Cathode shape prediction in electrochemical machining using a simulated cut-and-try procedure [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 66(1～3): 146～152

[5] Vladimir M, Volgin, Victor V Lyubimov. Mathematical modelling of three-dimension electrochemical forming of complicated surfaces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109 (3): 314～319

[6] 汪光阳,胡伟莉,张　雷,等. 专家系统及其相关技术的发展[J].安徽工业大学学报,2004, 21(3): 215～219
Wang Guangyang, Hu Weili, Zhang Lei, *et al*. Development of expert system and correlative technique[J].Journal of Anhui University of Technology, 2004, 21(3): 215～219 (in Chinese)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net