

The background of the book cover is a photograph of a robotic arm or industrial machinery. It is emitting a large, bright spray of sparks, likely from a welding or grinding process. The sparks are concentrated in the center and fan out towards the bottom and sides. The overall color palette is dominated by the blue of the machinery and the white and yellow of the sparks.

任
福
君
著

空间曲面电火花 线切割运动学 及其应用



中国科学技术出版社

空间曲面电火花 线切割运动学及其应用

任福君 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

空间曲面电火花线切割运动学及其应用/任福君著. —
北京:中国科学技术出版社, 2004.1

ISBN 7-5046-1433-5

I .空… II .任… III .曲面—电火花线切割 IV .IG484
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 000799 号

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本: 850 毫米 × 1169 毫米 1/32 印张: 7 字数: 180 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

定价: 25.00 元

谨以此书

感谢 中国博士后基金(在清华大学和哈尔滨工程大学
分别获得资助)

黑龙江省杰出青年科学基金(2000年度)

黑龙江省重大科技攻关基金(GA01A0401-4)

黑龙江省自然科学基金(E9815、E00-11两次资助)

黑龙江省博士后基金(LRD00013)

黑龙江省教育厅重大科研项目基金(9551Z014)

黑龙江省高等学校骨干教师创新能力资助计划
(2002年度)

资助

内 容 简 介

本书系统分析了空间曲面电火花线切割加工的运动规律,系统总结了空间曲面电火花线切割加工的各种运动参数及其合成的运动形式,建立了相应的运动方程;推导出各种加工系统对应的系列通用数学模型,形成了空间曲面电火花线切割加工运动学的主要内容体系。并对空间曲面电火花线切割加工运动学在开发空间曲面电火花线切割加工计算机仿真技术、CAD 技术、CAPP 技术、CAM 技术及其一体化技术中的应用进行了研究。本书可供从事特种加工技术研究、开发与应用的工程科技人员参考,也可以作为高等院校有关专业的参考书。

前 言

目前，电火花线切割加工技术已经成为模具和一些特殊形状与难硬材料零件加工的重要手段之一。许多制造电子、仪表、电机、电器甚至汽车和拖拉机以及飞机、火箭零件所用的模具或者空间形面零件本身采用电火花线切割加工之后就可以直接使用。但是，有不少的模具或特殊形状与难硬材料零件却要求有落料角或上下两个截面具有不同的形状，这就给电加工界提出如何实现锥度或空间曲面电火花线切割加工的问题。随着工程科技人员不断探索和对这类问题的解决，推动了空间曲面电火花线切割加工技术的快速发展。

综合分析国内外有关情况可以看到，国外慢速走丝线切割机床加工空间曲面是利用特制的锥度切割装置实现的，因此，普遍具有应用工艺范围广、加工精度高等显著优点。但是，与国产快走丝线切割机床相比，慢速走丝线切割机床结构复杂、制造成本高、特别是价格昂贵，国内一般企业买不起。所以，在目前我国的经济条件下，依靠进口慢速走丝线切割机床解决国内大批一般精度要求的空间曲面零件的电火花线切割加工问题，还不能说是一条最理想的途径。在今后相当长一段时期内，还应该主要立足于国内解决我国空间曲面的电火花线切割加工问题。

到目前为止，虽然国内电加工界的科技人员通过各种各样的方法，在国产快走丝线切割机床上加工出了许多具有实用价值的空间曲面零件。但是，这些工作还远远满足不了工业技术飞速发展的实际需要。因此，进一步系统研究和开发以国产线切割设备与现代化工具（尤其是计算机）相结合为主体系统的实用性空间曲面电火

花线切割加工技术，不仅具有较大的理论指导意义，同时也有十分现实的经济和社会效益。

本书结合作者多年来从事空间曲面电火花线切割加工技术研究的实践，总结了近年来的一些研究成果，并介绍了国内外相关研究人员对于空间曲面电火花线切割加工技术发展的主要贡献。本书重点介绍了空间曲面电火花线切割加工运动学的主要内容体系，并对空间曲面电火花线切割加工运动学在开发空间曲面电火花线切割加工计算机仿真技术，CAD 技术、CAPP 技术、CAM 技术及其一体化技术中的应用进行了研究。如果本书能对读者有所启迪，笔者将不胜欣慰。

在本书撰写过程中，得到了哈尔滨工业大学刘晋春教授、赵万生教授、白基成教授，清华大学汪劲松教授、段广洪教授，哈尔滨工程大学孟庆鑫教授，北京航空航天大学周正干教授等的大力支持和帮助，谨在此表示衷心的感谢。

感谢王殿君博士、韩继光教授、荆广珠教授、王新荣副教授、袁凯锋副教授，博士生李小海、张岚以及黄德臣、刘财勇、颜兵兵、姜永成等在课题研究过程中做出的贡献。

感谢中国博士后科学基金委员会、黑龙江省自然科学基金委员会、黑龙江省科技厅、黑龙江省教育厅、黑龙江省博士后管理办公室的大力支持与帮助。

由于作者的学术水平和能力有限，书中不妥之处在所难免，希望读者不吝赐教。

作 者

2003 年 11 月 17 日

目 录	
第1章 绪 论	1
1.1 国内复杂曲面电火花线切割加工技术的研究与 发展现状.....	3
1.2 国外复杂曲面电火花线切割加工技术的研究与 发展现状.....	10
1.3 国内外电火花线切割加工CAD、CAPP / CAM及虚拟 制造技术的研究现状及发展前景	13
1.4 本课题的来源、目的、意义及主要研究工作.....	18
1.4.1 本课题的来源、研究目的及意义	18
1.4.2 本课题的主要研究内容	19
第2章 复杂直纹曲面电火花线切割加工运动学建立	20
2.1 空间直纹曲面的形成与分类.....	21
2.1.1 直纹曲面的形成条件.....	21
2.1.2 常见直纹曲面的形成.....	22
2.2 复杂直纹曲面电火花线切割加工运动规律分析.....	27
2.2.1 复杂直纹曲面电火花线切割加工运动参数	27
2.2.2 复杂直纹曲面电火花线切割加工系统及其 运动形式分析.....	29
2.3 复杂直纹曲面电火花线切割加工数学模型建立.....	45
2.3.1 一般平面加工系统的简要回顾	45
2.3.2 极坐标加工系统的数学模型建立	45
2.3.3 双旋转坐标加工系统的数学模型建立	53

2.3.4 三轴双旋转联动加工系统的数学模型建立	58
2.3.5 多轴联动加工系统的数学模型建立	61
2.4 本章小结	64
第3章 空间曲面电火花线切割加工运动学应用之一 ——空间曲面电火花线切割加工过程计算 机仿真研究	66
3.1 图形仿真的基本思想	66
3.2 计算机图形学有关的数学基础	67
3.2.1 三维坐标点的表示方法	67
3.2.2 三维错移	69
3.2.3 三维旋转	69
3.2.4 三维平移	71
3.3 开发平台、程序设计方法及仿真编程语言的选择	72
3.3.1 开发平台的选择	72
3.3.2 程序设计方法的选择	72
3.3.3 仿真编程语言的选择	73
3.3.4 绘图模块的系统要求	74
3.4 真实感图形生成	74
3.5 极坐标加工系统的仿真程序设计	75
3.5.1 数学模型处理	75
3.5.2 仿真实现过程及其框图	77
3.5.3 典型仿真结果	81
3.6 五轴联动加工系统的仿真程序设计	86
3.6.1 数学模型处理	86
3.6.2 仿真实现过程及其框图	87
3.7 仿真结果分析	95
3.8 本章小结	96

第4章 空间曲面电火花线切割加工运动学应用之二

——空间曲面电火花线切割加工CAD、CAPP 基础技术研究..... 97

4.1 CAD技术的发展沿革及发展趋势	98
4.1.1 CAD发展过程——CAD技术的四次革命	98
4.1.2 CAD技术发展趋势	100
4.2 支撑系统的选择和开发方法原理	104
4.2.1 支撑系统的选择.....	104
4.2.2 开发方法原理.....	105
4.3 空间曲面电火花线切割加工CAD综合数据库建立	106
4.4 空间复杂曲面电火花线切割加工CAD系统的基本功能 及解决方案	109
4.4.1 实现空间直纹曲面的造型功能	109
4.4.2 生成刀位文件.....	115
4.4.3 实现空间直纹曲面的形态仿真功能	116
4.4.4 研制后置处理模块.....	118
4.4.5 实现空间直纹曲面的形成过程仿真功能	120
4.4.6 实现空间直纹曲面的屏幕建立与编辑功能	121
4.5 空间曲面电火花线切割加工CAD系统的综合描述	123
4.5.1 整体框架结构.....	123
4.5.2 数据间的总体结构.....	126
4.5.3 数据存储结构.....	128
4.5.4 环境建立.....	130
4.6 开展CAPP (Computer Aided Process Planning) 研究的意义	134
4.7 空间复杂直纹曲面电火花线切割加工CAPP基础 技术研究.....	135
4.7.1 建立零件特征模型.....	136

4.7.2 以线切割加工工艺为主的空间直纹曲面CAPP开发系统模型.....	138
4.7.3 以线切割加工工艺为主的空间直纹曲面CAPP实现方法.....	138
4.7.4 以电火花线切割加工为主的三导线曲面CAPP系统组成	142
4.8 基于VC++开发电火花线切割工艺数据库技术简介	143
4.8.1 建立数据库.....	144
4.8.2 建立ODBC数据源.....	146
4.8.3 定义MFCODBC.....	146
4.9 本章小结.....	147
第5章 空间曲面电火花线切割加工运动学应用之三——空间曲面电火花线切割加工CAM基础技术研究.....	148
5.1 可行性及问题分析	148
5.1.1 加工系统的实现目标.....	148
5.1.2 问题分析	148
5.2 五轴联动加工系统坐标系的建立及相互关系.....	150
5.2.1 五轴联动加工系统示意图.....	150
5.2.2 工作台坐标系(绝对坐标系) $OXYZ$	151
5.2.3 步进电机坐标系 $oxyz$	151
5.2.4 下摆台坐标系 $o_1x_1y_1z_1$	152
5.2.5 上摆台坐标系 $o_2x_2y_2z_2$	153
5.2.6 工件坐标系 $o_\phi x_\phi y_\phi z_\phi$	154
5.2.7 坐标系小结	155
5.3 三导线转、摆、摆直纹面五轴联动加工系统数控模型建立.....	155
5.3.1 转、摆、摆数控数学模型.....	155

5.3.2 步进电机单向数控数学模型	158
5.3.3 五轴联动加工系统数控模型小结	159
5.4 转、摆、摆三轴联动加工系统的数控模型分析	160
5.4.1 问题分析及数控数学模型	160
5.4.2 隐函数(5-18)式的整理	161
5.5 数控转、摆、摆工作台结构设计	161
5.5.1 设计任务的分析	162
5.5.2 转、摆、摆数控工作台方案设计	163
5.6 空间曲面电火花线切割加工CAM系统控制基础	
技术研究	172
5.6.1 空间曲面电火花线切割加工CAM系统控制	
功能分析	172
5.6.2 数控系统的选择	173
5.6.3 数控系统的硬件设计	174
5.6.4 数控系统的软件设计	181
5.7 本章小结	182
附录1 数控模型推导过程	182
附录2 模型整理过程	184
第6章 空间曲面电火花线切割加工运动学应用	
之四——空间曲面电火花线切割加工	
实验研究	186
6.1 极坐标加工系统样件加工实验	186
6.1.1 $\vec{X} + \vec{A}$ 运动形式下的样件加工实验	186
6.1.2 $\vec{X} + \vec{A} + E$ 运动形式下的样件加工实验	188
6.1.3 $\vec{X} + \vec{A}$ 形式下的样件加工实验	188
6.1.4 $\vec{X} + \vec{A} + E$ 运动形式下的样件加工实验	191
6.1.5 $\vec{X} + \vec{A} + \alpha + E$ 运动形式下的样件加工实验	192
6.1.6 $\vec{X} + \vec{A} + \theta + E$ 运动形式下的样件加工实验	193

6.1.7	$\vec{X} + \vec{A} + \theta + E + \alpha$ 形式下的样件加工实验	195
6.1.8	$\vec{X} + \vec{A} + \theta + E$ 运动形式下的样件加工实验	195
6.1.9	$\vec{X} + \vec{A} + E + \theta$ 运动形式下的样件加工实验	196
6.1.10	$\vec{X} + \vec{C} + E$ 运动形式下的样件加工实验	196
6.2	双旋转坐标加工系统的样件加工实验	198
6.2.1	$\vec{B} + \vec{C} + E$ 运动形式下的样件加工实验	198
6.2.2	$\vec{B} + \vec{C}$ 运动形式下的样件加工实验	198
6.2.3	$\vec{B} + \vec{C} + E$ 运动形式下的样件加工实验	199
6.3	三轴单旋转加工系统样件加工实验	199
6.3.1	$\vec{X} + \vec{Y} + \vec{A}$ 运动形式下的样件加工实验	200
6.3.2	$\vec{X} + \vec{Y} + \vec{A} + E$ 运动形式的样件加工实验	200
6.3.3	$\vec{X} + \vec{Y} + \vec{A} + E$ 运动形式下的样件加工实验	201
6.4	三轴双旋转加工系统的样件加工实验	201
6.5	四轴联动加工系统的样件加工实验	202
参考文献		204

第 1 章 绪 论

20 世纪 40 年代,苏联学者拉扎连柯夫妇发明了电火花加工方法^[1]。电火花加工的主要特点是可以利用较软材料的金属工具加工高韧性、高硬度材料的金属零件,还可以利用电火花加工方法来加工窄槽、异形孔、微细小孔、薄壁零件以及复杂曲面零件。因为在电火花加工过程中基本上没有宏观切削力,所以这种加工方法受到了世界各国工业界的普遍重视,现已成为一种不可缺少的现代机械加工方法。电火花线切割加工属于电火花加工范畴,是以“柔性”金属丝作为电极工具,利用火花放电来蚀除金属的加工方法。与电火花成型加工方法相比,电火花线切割加工方法具有设备成本低、生产效率高以及电极工具设计与制造简单等诸多优点。这种加工方法自 20 世纪 50 年代中期在苏联问世以来,已经得到迅速发展^[2~4]。

苏联曾在 1960 年前后设计出第一台靠模仿形电火花线切割机床,之后又研究出 A207 型光电跟踪电火花线切割机床;并于 1966 年研制出数字控制电火花线切割机床(NC-WEDM)。1969 年 AGIE 公司首次生产出 RC 脉冲电源的电火花线切割机床。1972 年日本的西部电机株式会社生产出了 EW-20 型数控电火花线切割机床。随后,各种新型的电火花线切割机床不断被生产出来^[1~4]。

中国也是世界上最早研究制造电火花线切割机床的国家之一。我国于 1963 年研制成功靠模控制电火花线切割机床;1964 年研制成功简易数控阳极机械切割机床;1967 年研制成功光电跟踪电火花线切割机床和我国特有的高速走丝电火花线切割机床;1969 年研制成功数字控制电火花线切割机床;20 世纪 70 年代中

期,我国又研制出大型电火花线切割机床。进入 80 年代以来,我国生产的电火花线切割机床的性能和质量不断提高^[1~4]。

随着科学技术的不断进步,各行各业,尤其是模具加工和宇航工业以及微电子工业的发展,对材料提出了越来越高的要求。机械制造行业不断遇到高硬度、高韧性、高熔点等难硬材料以及特殊结构,特别是复杂曲面零件的机械加工难题。这些问题的解决极大地促进了电火花线切割加工技术的发展。同时,对电火花线切割加工技术的研究在近十年来得到了突飞猛进的发展,从而促进了电火花线切割加工新方法、新工艺的不断出现,扩大了电火花线切割加工的工艺范围^[2,3,5~12]。

而且,现代制造技术及其相关技术为电火花线切割加工技术的发展提供了良好机遇。柔性制造、人工智能技术、网络技术、敏捷制造、虚拟制造和绿色制造等现代制造技术正逐渐渗透到电火花线切割加工技术中来,给电火花线切割加工技术的发展带来了新的生机。近年来,国内外很多研究机构对电火花线切割加工技术进行了大量的研究,并且在许多方面取得了显著进展^[13~30]。

从国内情况看,我国的电火花线切割加工技术发展迅速,尤其是我国特有的快走丝电火花线切割机床结构简单、价格低廉,各方面指标都有了较大的提高。其最大加工速度已经达到 $266\text{mm}^2/\text{min}$,表面粗造度最好水平为 $\text{Ra}0.5\ \mu\text{m}$,通常可达 $\text{Ra}\ 2\ \mu\text{m}$,尺寸精度可以达到 $\pm 0.01\text{mm}$ ^[13~37]。但是,与国外发达国家相比,我国的电火花线切割技术尚有很大的差距。一些发达国家,特别是瑞士和日本等国的电火花线切割加工机床,自动化程度高,功能多,加工过程稳定可靠,加工工艺指标高,加工综合质量好。它们的最大加工速度达到了 $300\text{mm}^2/\text{min}$,尺寸精度可以控制在 $\pm 2\ \mu\text{m}$ 之内,加工表面粗糙度小于 $\text{Ra}\ 0.3\ \mu\text{m}$ 。而且,国外的这些电火花线切割加工机床一般还配有比较完善的加工过程监控装置,能够实现自动穿丝,连续无人工作时间一般可达

100 小时以上,最好的可达 150 小时以上^[35,36,38-41]。不过,这些先进的外国机床价格昂贵,国内一般企业买不起。而结构简单、价格低廉的国产快走丝电火花线切割机床在相当长的时期内仍然是我国电加工行业的重要产品之一,是模具及难硬材料和复杂曲面零件加工的重要设备。

因此,进一步研究快走丝线切割加工技术,扩大其加工工艺范围,尤其是利用计算机等高科技工具和先进的科学方法来提高我国电火花线切割技术水平,缩短同发达国家的差距,不仅具有重要的理论意义,而且具有显著的经济和社会效益^[35,36,42]。

1.1 国内复杂曲面电火花线切割加工技术的研究与发展现状

目前,电火花线切割加工技术已经成为模具加工的重要手段之一。许多制造电子、仪表、电机、电器甚至汽车和拖拉机以及飞机、火箭零件所用的模具采用电火花线切割加工之后就可以直接使用。但是,有不少的模具却要求有落料角或上下两个截面具有不同的形状,这就给电加工界提出如何实现锥度或复杂曲面电火花线切割的问题。随着人们的不断探索和对这类问题的解决,推动了复杂曲面电火花线切割加工技术的发展^[2,3,36,37]。

复杂直纹曲面电火花线切割研究工作在国内已经有了很大的进展,取得了可喜的成绩。目前,在国产快走丝电火花线切割机床上利用附加装置可以实现锥度切割或复杂直纹曲面零件的加工。其中的锥度切割装置可以分为单臂移动式、摆动杠杆式和双臂移动式三类。

单臂移动式锥度切割装置(如图 1-1 所示)由步进电机驱动线切割机床的上导轮或下导轮相对工件做 U 和 V 方向的运动,使电极丝产生倾斜而实现锥度切割。这种装置结构简单、刚度好,但是由于存在切割死角而容易产生较大加工误差。此外,切割较大锥度的零件时,由于电极丝伸缩可能引起电极丝松弛甚至被拉断,而且加工过程中导轮会因为受力不均增加磨损程度^[2-4]。

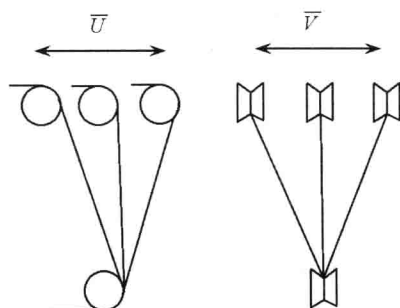


图 1-1 单臂移动式锥度切割原理图

摆动杠杆式锥度切割装置（如图 1-2 所示）由步进电机驱动线切割机床的上下导轮相互配合，进行 U 方向的伸缩和 V 方向的摆动，使电极丝倾斜而实现锥度切割。这种装置能使切割机床上下两个导轮按一定比例反向运动，在摆动过程中电极丝伸缩性小，不会造成电极丝过度绷紧或松弛。但是，由于此类装置刚度低，容易产生结构变形而导致较大的加工误差^[2~4]。

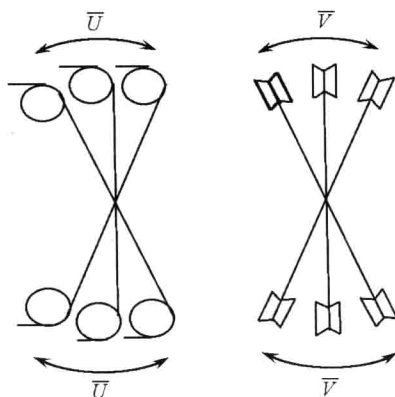


图 1-2 摆动杠杆式锥度切割原理图

双臂移动式锥度切割装置由步进电机驱动线切割机床的上、下两个导轮有比例地各自进行 U 、 V 方向的运动，使电极丝产生