


高级数控技工职业技能培训教程

数控线切割机床 培训教程

李家杰 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高级数控技工职业技能培训教程

数控线切割机床培训教程

李家杰 编著

机械工业出版社

本书全面系统地介绍了数控线切割机床的编程与操作的方法和知识,以及数控线切割机床的使用和维护。全书共分3篇10章,内容包括数控线切割机床概述,数控线切割机床结构,数控线切割加工工艺,数控线切割手工编程,CAXA数控线切割自动编程,数控线切割机床的基本操作,FW系列数控线切割机床操作实训,数控线切割操作工考级实训及创新综合训练,并介绍了数控线切割机床常见故障的处理、安全操作规程及数控线切割机床日常维护与保养等。尤其是数控线切割操作工考级强化训练一章,更是对典型零件的编程与加工进行了详细的讲解。另外,单独列出一章创新综合训练,精选典型工艺品零件进行零件设计、编程与加工过程的详细讲解,以提高读者的学习兴趣。本书适用面宽,不仅可作为机械类、数控类、模具类及机电类专业的大中专、高职、技校的教材,也可作为数控线切割操作工职业技能鉴定与考核的培训教材,还可作为数控技术应用工程技术人员的实用参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数控线切割机床培训教程/李家杰编著. —北京:机械工业出版社, 2012.9

(高级数控技工职业技能培训教程)

ISBN 978-7-111-37594-4

I. ①数… II. ①李… III. ①数控线切割—机床—技术培训—教材
IV. ①TG481

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第034145号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:周国萍 责任编辑:周国萍 舒雯

版式设计:刘岚 责任校对:纪敬

封面设计:路恩中 责任印制:杨曦

唐山丰电印务有限公司印刷

2012年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13印张·338千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-37594-4

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010) 88379733

社服务中心:(010) 88361066

网络服务

销售一部:(010) 68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是《高级数控技工职业技能培训教程》系列教材之一，是根据教育部数控技能型紧缺人才的培养培训方案的指导思想和《数控线切割操作工国家职业技能鉴定标准》，并结合考工培训的教学特点编写而成。

数控技术集传统的机械制造技术、计算机技术、信息处理技术、网络通信技术、成组技术、现代控制技术、传感检测技术、微电子技术、液压气动技术、光机电技术于一体，是现代制造技术的基础。数控技术具有强大优势，是提高产品质量、提高劳动生产率、改善劳动条件必不可少的物质手段。实现加工机床及生产过程数控化，是当今制造业的发展方向。事实上，当今任何自动化生产设备都与数控技术密切相关。随着数控技术的发展，数控机床作为自动化加工设备正被越来越普遍地采用。

数控机床是制造业实现自动化、柔性化和集成化生产的基础，是关系到国家战略地位和体现国家综合国力的重要基础性产业，其技术水平和拥有量是衡量一个国家工业现代化的重要标志。为适应数控线切割机床工作人员培训和学习的需要，并供大中专、高职、技校学生教学及数控线切割机床操作工考工培训之用，特编写了本书。

全书共分3篇10章，主要内容包括数控线切割机床概述、数控线切割机床结构、数控线切割加工工艺、数控线切割手工编程、CAXA数控线切割自动编程、数控线切割机床的基本操作、数控线切割操作工考级强化训练及创新综合训练等。

本书具有系统性、通用性、实用性和先进性的突出特色。所选实例典型的编程讲解详细，操作步骤具体。还包括数控线切割机床常见故障的处理、安全操作规程及数控线切割机床日常维护与保养等内容。尤其是数控线切割操作工考级实训，更是对典型零件的编程与加工做了详细而具体的讲解，对社会学员考工培训与学校学生实习考级具有极强的针对性和实用性。另外，单独列出一章创新综合训练，精选典型工艺品零件进行零件设计、编程与加工过程的详细讲解，以提高读者的学习兴趣。

本书适用面宽，不仅可作为机械类、数控类、模具类及机电类各专业大中专、高职、技校的教材，也可作为数控线切割操作工职业技能鉴定与考核的培训教材，以及数控技术及应用方面工程技术人员的实用参考书。

本书在编写过程中参阅了国内同行有关的资料、文献和教材，在此对这些作者和公司表示衷心的感谢！感谢我的家人对本系列教材编写工作的理解和支持，丛书的编写漫长而艰辛，占用了大量本应与他们在一起享受家庭天伦之乐的时间。感谢所有为本教材编写工作提供支持和帮助的人们！

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中难免有不妥和错误之处，恳请有关专家学者及广大读者朋友批评指正。作者 E-mail: ljhn@126.com。

作 者

2012年5月于南京

目 录

前言

第 1 篇 数控线切割机床基础知识

第 1 章 数控线切割机床概述…………… 1

1.1 数控线切割机床的产生及其发展方向…………… 1

1.1.1 数控线切割机床的产生…………… 1

1.1.2 数控线切割机床的发展方向…………… 2

1.2 数控线切割机床的加工特点和应用范围…………… 4

1.2.1 数控线切割机床的加工特点…………… 4

1.2.2 数控线切割机床的应用范围…………… 4

1.3 数控线切割加工原理…………… 5

1.3.1 数控线切割加工的微观过程…………… 5

1.3.2 数控线切割加工的基本原理…………… 7

1.4 数控线切割机床的分类和型号…………… 8

1.4.1 数控线切割机床的分类…………… 8

1.4.2 数控线切割机床的型号…………… 10

思考与练习题…………… 12

第 2 章 数控线切割机床结构…………… 13

2.1 数控线切割机床的组成…………… 13

2.1.1 数控高速走丝线切割机床的组成…………… 13

2.1.2 数控低速走丝线切割机床的组成…………… 14

2.2 数控线切割机床本体…………… 14

2.2.1 床身…………… 14

2.2.2 工作台…………… 14

2.2.3 储丝及走丝机构…………… 17

2.2.4 丝架及导轮部件的结构…………… 21

2.3 工作液及其循环过滤系统…………… 23

2.3.1 工作液性能…………… 23

2.3.2 工作液的配制及使用方法…………… 24

2.3.3 工作液循环及过滤系统…………… 25

2.4 数控线切割机床的脉冲电源…………… 26

2.4.1 对脉冲电源的基本要求…………… 26

2.4.2 脉冲电源的种类…………… 27

2.5 数控线切割机床的控制系统…………… 30

2.6 数控线切割机床的伺服系统…………… 32

2.7 数控线切割机床的控制面板…………… 36

思考与练习题…………… 38

第 3 章 数控线切割加工工艺…………… 39

3.1 数控线切割加工工艺的基本规律…………… 39

3.1.1 数控线切割加工的主要工艺指标…………… 39

3.1.2 数控线切割加工的切割速度及其主要影响因素…………… 41

3.1.3 数控线切割加工的加工精度及其主要影响因素…………… 43

3.1.4 数控线切割加工的表面粗糙度及其主要影响因素…………… 44

3.2 电参数对线切割加工工艺指标的影响…………… 44

3.3 非电参数对线切割加工工艺指标的影响…………… 47

3.3.1 工作液对工艺指标的影响…………… 47

3.3.2 电极丝对线切割工艺性能的影响…………… 48

3.4 线切割加工工艺…………… 50

3.4.1 线切割加工操作流程…………… 50

3.4.2 图样分析与毛坯准备…………… 51

3.4.3 穿丝孔的加工…………… 52

3.4.4 加工路线的确定与切入点的



选择.....	53	5.3.2 基本操作.....	89
3.5 数控线切割加工的工艺技巧与 废品产生原因分析.....	54	5.3.3 菜单命令系统简介.....	91
3.5.1 数控线切割加工的工艺 技巧.....	54	5.4 CAXA 线切割自动编程过程 举例.....	97
3.5.2 数控线切割加工废品产生 原因分析.....	59	5.5 图形绘制与编辑.....	99
思考与练习题	60	5.5.1 基本曲线.....	99
第 2 篇 数控线切割加工编程与操作		5.5.2 高级曲线	105
第 4 章 数控线切割加工手工编程	61	5.5.3 曲线编辑	109
4.1 数控线切割加工编程基础.....	61	5.6 加工轨迹生成与轨迹仿真	113
4.1.1 数控线切割加工编程概述.....	61	5.6.1 轨迹生成	113
4.1.2 数控线切割加工编程常识.....	62	5.6.2 轨迹跳步	116
4.2 3B 格式手工编程	63	5.6.3 取消跳步	116
4.2.1 程序格式.....	63	5.6.4 轨迹仿真	116
4.2.2 直线编程.....	64	5.7 后处理生成加工程序代码	117
4.2.3 圆弧编程.....	65	5.7.1 生成 3B 代码	118
4.2.4 带有间隙补偿的 4B 格式	67	5.7.2 生成 4B/R3B 代码	119
4.3 ISO 格式手工编程	71	5.7.3 校核 B 代码	120
4.3.1 程序格式.....	72	5.7.4 生成 HPGL	120
4.3.2 常用的 G 功能	74	5.7.5 查看/打印代码.....	121
4.3.3 常用的 M 功能	79	5.7.6 粘贴代码	121
4.3.4 常用的 T 功能.....	80	5.8 程序传输	122
4.4 程序编制中的数学处理.....	80	5.8.1 应答传输	122
4.4.1 编程常用数学基础.....	80	5.8.2 同步传输	123
4.4.2 利用 CAD 软件进行尺寸和 坐标查询.....	83	5.8.3 串口传输	123
4.5 数控线切割手工编程实例.....	83	5.8.4 纸带穿孔	124
4.5.1 3B 格式手工编程实例	83	5.9 CAXA 数控线切割自动编程典型 实例	124
4.5.2 ISO 格式手工编程实例	84	思考与练习题.....	127
思考与练习题	85	第 6 章 数控线切割机床的基本操作.....	128
第 5 章 CAXA 数控线切割自动 编程	87	6.1 线切割加工步骤	128
5.1 数控线切割自动编程的基本内容 与步骤.....	87	6.2 工件的安装与找正	128
5.2 线切割 CAD/CAM 软件简介.....	87	6.2.1 工件的安装	128
5.3 CAXA 线切割软件的操作 界面.....	88	6.2.2 工件位置找正	131
5.3.1 用户界面.....	88	6.3 电极丝的安装与位置调整	132
		6.3.1 电极丝的安装	132
		6.3.2 电极丝相对工件位置 调整	134
		6.4 编程并输入系统	136
		6.5 调整加工参数与切割速度	136
		6.6 试切加工	138



6.7 断丝的处理	138	8.2 内轮廓零件的加工	162
6.8 其他常见故障的处理	139	8.2.1 穿丝孔的设置	162
6.9 文明生产与安全操作规程	139	8.2.2 型腔零件编程与加工 实例	163
6.10 数控线切割机床日常维护和 保养	140	8.3 有锥度零件的加工	168
思考与练习题	141	8.3.1 线切割加工斜度的原理	168
第7章 FW系列数控线切割机床操作		8.3.2 锥度加工有关的G代码	171
实训	142	8.3.3 锥度零件编程与加工 实例	172
7.1 FW系列数控线切割机床组成 及其主要功能	142	8.4 异形面零件的加工	173
7.1.1 FW系列数控线切割机床外观 图及各部分的构成	142	思考与练习题	174
7.1.2 FW系列数控线切割机床的 主要功能	142	第9章 数控线切割操作工职业技能鉴定 题库	175
7.2 FW系列数控线切割机床操作 ..	143	9.1 数控线切割操作工职业技能鉴定 (中级)理论试题	175
7.2.1 手控盒的使用	143	9.2 数控线切割操作工职业技能鉴定 (高级)理论试题	184
7.2.2 手动模式	144	9.3 数控线切割操作工职业技能鉴定 (中级)技能操作试题	189
7.2.3 编辑模式	148	9.4 数控线切割操作工职业技能鉴定 (高级)技能操作试题	190
7.2.4 自动模式	149	第10章 创新综合训练——零件设计、 编程与加工一体化训练	192
7.2.5 自动编程系统	150	10.1 创新综合训练的目的与意义	192
7.2.6 系统参数设置	152	10.2 创新综合训练具体实施步骤	192
7.2.7 系统诊断	153	10.3 工艺品零件的设计、编程 与加工	193
7.2.8 维护与保养	153	思考与练习题	194
7.3 数控线切割机床加工综合实例 ..	154	附录 数控线切割操作工考试大纲 标准及内容	196
思考与练习题	157	参考文献	202
第3篇 数控线切割操作工考级实训			
第8章 数控线切割操作工考级强化 训练	158		
8.1 外轮廓零件的加工	158		
8.1.1 外轮廓零件切割的特点	158		
8.1.2 外轮廓零件编程与加工 实例	159		

第 1 篇 数控线切割机床基础知识

第 1 章 数控线切割机床概述

1.1 数控线切割机床的产生及其发展方向

1.1.1 数控线切割机床的产生

线切割加工（Wire Cut EDM）简称为线切割，它是利用连续移动的细金属丝作为工具电极，并在金属丝与工件之间通以脉冲电流，利用脉冲放电的腐蚀作用使金属熔化或汽化，通过电极丝和工件的相对运动对工件进行切割加工。

线切割加工属特种加工方法中的电火花加工一类，因在放电过程中可见到火花，故称为电火花加工，又称放电加工。1870 年，英国科学家普里斯特利（Priestley）最早发现放电对金属的腐蚀作用。在日常生活中，放电对金属的腐蚀作用也是比较常见的现象，例如在插拔插头或开断电器开关触点时，常常发生放电把接触表面烧毛，腐蚀成粗糙不平的凹坑现象。在很长一段时间里，电腐蚀一直被认为是一种有害的现象，直到 1943 年，苏联科学院院士拉扎连柯夫妇在研究开关触点遭受放电腐蚀损坏的现象和原因时，发现放电的瞬时高温可使局部的金属熔化、汽化而被蚀除，拉扎连柯夫妇首次利用电容器充放电回路发明了世界上第一台实用的电火花加工装置，开创了人类利用电腐蚀的先河。由此 1943 年 4 月拉扎连柯夫妇获得苏联的发明证书，并在 1946 年先后获得了法国、瑞士、美国、英国和瑞典的专利权。此后，苏联科学院中央电工研究所开展了对电火花加工的机理、脉冲电源、控制系统、机床、工艺应用等方面的研究，相继研制出 RC、RLC、RCLC 线路脉冲电源，脉冲发电机式脉冲电源、电子管、闸流管、晶闸管、晶体管式等脉冲电源和各种伺服控制系统的电火花加工机床。1957 年开始研究电火花线切割加工技术，把慢慢移动的铜丝作为电极丝，在 XY 平面内切割出复杂的轮廓。这就是现在使用的数控低速走丝线切割的前身。1960 年前后研制出靠模仿形线切割加工机床，用一块薄的金属片做成与切割截面相同的形状作为样板靠模，当工作台在 X（Y）方向移动时，保持电极丝与靠模样板“若接若离”状态，按照样板的轮廓进行仿形加工。后来又研制出光电仿形线切割机床，免去了制作靠模样板的麻烦。当时苏联的电火花加工技术处于世界领先水平。随后，美国、日本、瑞士、德国等奋起直追。日本的三菱公司、瑞士阿奇公司在 20 世纪 50 年代初也先后研制出自己的第一台电火花加工机床。

我国自 1951 年开始电火花加工的试验研究工作，1959 年至 1960 年间先后派了许多技术人员到苏联进修电加工技术，以后成立了多家电加工研究所、研究室。自 1960 年后，我国的电加工技术从引进、仿制迅速走上独立自主、自行研究开发的道路。20 世纪 60 年代初，中国科学院电工研究所研制成功我国第一台靠模仿形线切割机床；1963 年上海电表厂工程师张维良创新性地研制出第一台高速走丝简易数控线切割样机，获得国家发明创造奖；1967 年至 1968 年间，上海复旦大学与上海交通电器厂联合研制成功了“复旦型”高速走丝数控线切割



机床,形成了我国特有的线切割机床品种,是当时生产中应用面最广、数量最大的数控电加工机床。

1979年,我国成立了全国性的电加工学会。1981年,我国高校间成立了特种加工教学研究会。这对特种加工的普及和提高起了很大的促进作用。由于我国幅员辽阔,人口众多,在工业化过程中,对特种加工技术既有广大的社会需求,又为其发展提供了巨大的空间。1997年,我国电火花穿孔、成形机床的年产量大于1000台,数控线切割机床的年产量超过3800台,其他电加工机床在200台以上。2002年,电火花穿孔、成形机床的年产量大于3000台,数控线切割机床的年产量大于15000台,电加工机床生产企业已由50多家增至100多家。特种加工机床的总拥有量也居世界前列。但是由于我国原有的工业基础薄弱,特种加工设备和整体技术水平与国际先进水平还有不小差距,高档电加工机床每年还从国外进口300台以上,有待于我们去努力赶超。

1.1.2 数控线切割机床的发展方向

随着模具等制造业的快速发展,近年来,我国线切割机床的生产和技术得到了飞速发展,同时也对线切割机床提出了更高的要求,促使我国线切割机床生产企业积极采用现代研究手段和先进技术深入开发研究,向信息化、智能化和绿色化方向不断发展,以满足市场的需要。数控线切割机床未来的发展,将主要表现在以下几个方面:

1. 稳步发展高速走丝机床的同时,重视低速走丝线切割机床的开发和发展

(1) 高速走丝机床依然稳步发展 高速走丝线切割机床是我国的发明创造。由于高速走丝有利于改善排屑条件,适合大厚度和大电流高速切割,加工性价比优异,深受广大用户欢迎,因而在未来较长的一段时间内,高速走丝线切割机床仍是我国电加工行业的主要发展机型。高速走丝线切割机床的年产量目前已超过10000台/年,今后虽然还会有所增长,但目前的发展重点是提高高速走丝线切割机床的质量和加工稳定性,使其满足那些量大、面宽的普通模具及一般精度要求的零件加工要求。根据市场的发展需要,高速走丝线切割机床的工艺水平必须相应提高,其最大切割速度应稳定在 $100\text{mm}^2/\text{min}$ 以上,而加工尺寸精度控制在 $\pm(0.005\sim 0.01)\text{mm}$ 范围内,加工表面粗糙度达到 $Ra1\sim 2\mu\text{m}$,这就需要在机床结构、加工工艺、高频电源及控制系统等方面加以改善,积极采用各种先进技术,重视窄脉冲宽度、高峰值电流的高频电源的开发及应用。

(2) 重视低速走丝线切割机床的开发和发展 低速走丝线切割机床由于电极丝移动平稳,易获得较高的加工精度和较低的表面粗糙度值,适于精密模具和高精度零件的加工。我国在引进、消化和吸收的基础上,也开发并批量生产了低速走丝线切割机床,满足了国内市场的部分需要。现在必须加强对低速走丝线切割机床的深入研究,开发新的规格品种,为市场提供更多的国产低速走丝线切割机床。与此同时,还应该在大量实验研究的基础上,建立完整的工艺数据库,完善CAD/CAM软件,使自主知识产权的CAD/CAM软件商品化。

2. 完善机床设计,改进走丝结构

1) 为使机床结构更加合理,必须用先进的技术手段对机床总体结构进行分析。这方面的研究将涉及运用先进的计算机有限元模拟软件对机床的结构进行力学和热稳定性的分析。为了更好地参与国际市场竞争,还应该注意造型设计,在保证机床技术性能和清洁加工的前提下,使机床结构合理,操作方便,外形新颖。

2) 为了提高坐标工作台精度,除考虑热变形及先进的导向结构外,还应采用丝距误差补偿和间隙补偿技术,以提高机床的运动精度。龙门式机床的工作台只做Y方向运动,X方向



运动在龙门架上完成，上下导轮座挂于横架上，可以分别控制。这不仅增加了丝杠的刚性，而且工作台只做 Y 方向运行，省去了 X 方向的滑板，有助于提高工作台的承重能力，降低整机总重量。

3) 高速走丝线切割机床的走丝机构，是影响其加工质量及加工稳定性的关键部件，目前存在的问题较多，必须认真加以改进。目前已开发的恒张力装置及可调速的走丝系统，应在进一步完善的基础上推广应用。

4) 支持新机型的开发研究。目前新开发的自旋式线切割机床、高低双速线切割机床、走丝速度连续可调的线切割机床，在机床结构和走丝方式上都有创新。尽管它们还不够完善，但这类的开发研究工作都有助于促进线切割技术的发展，必须积极支持，并帮助完善。

3. 推广多次切割工艺，提高综合工艺水平

根据放电腐蚀原理及线切割工艺规律可知，切割速度和加工表面质量是一种矛盾，要想在一次切割过程中既获得很高的切割速度，又要获得很好的加工质量是很困难的。提高线切割的综合工艺水平，采用多次切割是一种有效的方法。

多次切割工艺在低速走丝线切割机床上早已推广应用，并取得了较好的工艺效果。当前的任务是通过大量的工艺实验来完善各种机型的工艺数据库，并培训广大操作人员合理掌握工艺参数的优化选取，以提高其综合工艺效果。在此基础上，开发多次切割的工艺软件，帮助操作人员合理掌握多次切割工艺。

4. 发展 PC 控制系统，扩充线切割机床的控制功能

随着计算机技术的发展，PC 的性能和稳定性都在不断增强，而价格却持续下降，为线切割机床开发应用 PC 数控系统创造了条件。目前，国内已有的基于 PC 线切割数控系统，主要用于加工轨迹的编程和控制，PC 的资源并没有得到充分开发利用，今后可以在以下几个方面进行深入开发和研究。

1) 开发和完善开放式的数控系统。目前高速走丝线切割机床所用的数控软件是在 DOS 基础上开发的，有很大的局限性，难以进一步扩充其功能，急需在 Windows 操作系统基础上开发线切割数控系统，以便充分开发 PC 的资源，扩充数控系统的功能。

2) 继续完善数控线切割加工的计算机绘图、自动编程、加工规准控制及其缩放功能，扩充自动定位、自动找中心、低速走丝的自动穿丝、高速走丝的自动紧缩等功能，提高线切割加工的自动化程度。

3) 研究放电间隙状态数值检测技术，建立伺服控制模型，开发加工过程伺服进给自适应控制系统。为了提高加工精度，还应对传动系统的丝距误差及传动间隙进行精确检测，并利用 PC 进行自动补偿。

4) 开发和完善数值脉冲电源，并在工艺实验基础上建立工艺数据库，开发加工参数优化选取系统，以帮助操作者根据不同的加工条件和要求合理地选用加工参数，充分发挥机床潜力。

5) 深入研究线切割加工工艺规律，建立加工参数的控制模型，开发加工参数的自适应控制系统，提高加工稳定性。

6) 开发有自主知识产权的线切割 CAD/CAM 和人工智能软件。在上述各模块开发利用的基础上，建立线切割 CAD/CAM 集成系统和人工智能系统，并使其商品化，以全面提高我国线切割加工的自动化程度及工艺水平。



1.2 数控线切割机床的加工特点和应用范围

1.2.1 数控线切割机床的加工特点

数控线切割机床加工具有以下特点：

1) 数控线切割能加工传统切削方法难以完成或无法完成的结构形状复杂的零件，如冲模、凸轮、样板、外形复杂的精密零件及窄缝等，尺寸精度可达 $0.01 \sim 0.02\text{mm}$ ，表面粗糙值 Ra 可达 $1.6\mu\text{m}$ 。

2) 电极丝在加工中不与工件接触，两者之间的作用力很小，因而不需要电极丝、工件及夹具具有足够的刚度来抵抗切削变形。

3) 电极丝不必比工件材料硬，可以加工高硬度、高强度、高脆性、高韧性等难以加工的导体和半导体材料。线切割不能加工非导电材料。

4) 直接利用电能、热能进行加工，可以较方便地对影响加工精度的加工参数，如脉冲宽度、脉冲间隔、加工电流等进行调整，有利于加工精度的提高，便于实现加工过程的自动化控制。

5) 由于线切割加工产生的切缝窄，实际金属蚀除量很少，能有效地节约贵重材料，提高材料利用率等。

6) 与电火花成形机床相比，直接利用线状的电极丝作电极，不需要做专用电极，节约了成形工具电极的设计和制造费用，缩短了生产准备时间。

7) 数控线切割加工的对象主要是平面形状，但是除了所加工零件的内侧拐角处有最小圆弧半径的限制外（最小圆弧半径尺寸为金属线半径+放电间隙），其他任何复杂的形状都可以加工。

8) 可忽略电极丝损耗。在高速走丝线切割加工中采用低损耗脉冲电源，而低速走丝线切割加工采用单向连续供丝，在加工区总是保持新电极丝加工，故加工精度高。

9) 数控线切割机床一般依靠微型计算机来控制电极丝的轨迹和间隙补偿功能，因此在同时加工凸、凹两种模具时，配合间隙可任意调节。

10) 采用乳化液或去离子水的工作液，不必担心发生火灾，可以昼夜无人连续加工。

11) 任何复杂形状的零件，只要能编制加工程序就可以进行加工，因此很适合小批量零件和试制品的生产加工。

12) 现在有的数控线切割机床具有四轴联动功能，可以加工上、下面异形状，形状扭曲曲面体，变锥度和球形体等零件。

线切割加工的缺点是：由于是用电极丝进行贯通加工，所以它不能加工不通孔类零件和阶梯表面。加工表面有变质层需要处理后才能加工。另外，加工效率较低，加工成本高，不宜加工形状简单的大批零件。

1.2.2 数控线切割机床的应用范围

数控线切割机床用途十分广泛，在机械制造业中显示出越来越重要的作用。目前，数控线切割加工的应用范围如下：

1. 试制新产品

在新产品开发过程中需要单件的样品，利用线切割直接加工出零件，无需设计和制造模具，这样可大大缩短新产品开发周期并降低试制成本。例如，在冲压生产时，未开出落料模时，先用线切割加工的样板进行成形等后续加工，得到验证后再制造落料模。

2. 加工特殊材料

切割某些高硬度、高熔点的金属时，使用机床加工的方法几乎是不可能的，而采用线切割



加工既经济又能保证精度。

3. 加工模具零件

数控线切割加工广泛应用于加工各种模具，如冲模、挤压模、塑料模、粉末冶金模及电火花型腔模的电极等。由于线切割加工机床的加工速度和精度的迅速提高，目前已达到可与坐标磨床相竞争的程度。例如，中小型冲模，材料为模具钢，过去用分开模和曲线磨削的方法加工，现在改用线切割整体加工的方法，制造周期可缩短 $3/4 \sim 4/5$ ，成本降低 $2/3 \sim 3/4$ ，配合精度高，不需要熟练的操作工人。因此，一些工业发达国家的精密冲模的磨削等工序，已被电火花成形和线切割加工所代替。表 1-1 为数控线切割加工的应用领域。

表 1-1 数控线切割加工的应用领域

应用领域	具体说明
平面形状的金属模加工	冲模、粉末冶金模、拉拔模、挤压模的加工
立体形状的金属模加工	冲模用凹模的退刀槽加工、塑料用金属压模、塑料等分离面加工
电火花成形加工用电极制作	形状复杂的微细电极的加工、一般穿孔用电极的加工、带锥度型模电极的加工
试制品及零件加工	试制零件的直接加工，小批量、多品种的零件加工，特殊材料的零件加工、材料试件的加工
量具和刀具的加工	各种量具的加工、凸轮及模板的加工、成形车刀的加工
微细加工	化纤喷嘴加工、异形槽和窄槽加工、标准缺陷加工

1.3 数控线切割加工原理

1.3.1 数控线切割加工的微观过程

数控线切割加工每次放电蚀除材料的微观过程大致可分为以下四个连续阶段：极间介质的电离、击穿，形成放电通道；介质热分解、电极材料熔化、汽化热膨胀；电蚀产物的抛出；极间介质的消电离。

1. 极间介质的电离、击穿，形成放电通道

图 1-1a 为矩形波脉冲放电时电压与时间的关系图，图 1-1b 为矩形波脉冲放电时电流与时间的关系图。当脉冲电压施加于电极丝与工件之间时，在图 1-1a 中 0~1 和 1~2 段，两极之间立即形成一个电极。电场强度与电压成正比，与距离成反比，随着极间电压的升高或是极间距离的减小，极间电场强度也将随着增大。由于电极丝和工件的微观表面是凸凹不平的，极间距离又很小，因而极间电场强度是很不均匀的，两极间离得最近的突出点或尖端处的电场强度一般最大。

液体介质中不可避免地含有如金属微粒、碳粒子、胶体粒子等杂质，也有一些自由电子，使介质呈现一定的电导率。在电场的作用下，这些杂质将使极间电场更不均匀，当负极表面某处的电场强度增加到一定程度

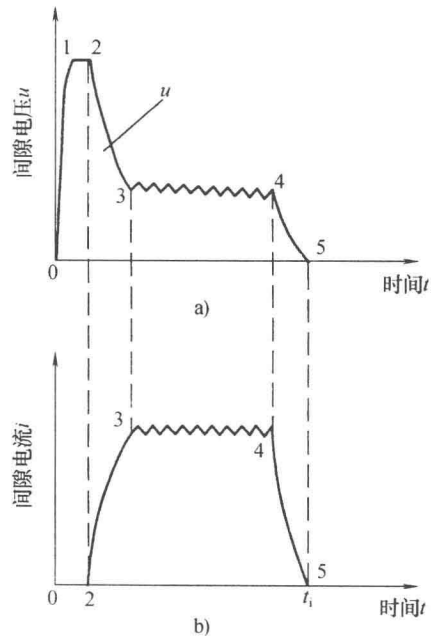


图 1-1 极间放电电压和电流波形

a) 矩形波脉冲放电时电压与时间的关系图

b) 矩形波脉冲放电时电流与时间的关系图

0~1—电压上升段 1~2—击穿延时段

2~3—电压下降、电流上升段

3~4—火花维持电压与电流段

4~5—电压、电流下降段



时,就会产生场致电子发射,由负极表面向正极逸出电子。在电场作用下,电子高速向正极运动,并撞击工作液介质中的分子或中性原子,产生碰撞电离,形成带负电的粒子和带正电的粒子,导致带电粒子雪崩式增多,使介质击穿而电阻率迅速降低,形成放电通道。这种由于电场强度增高引起电子发射形成的间隙击穿称为场致发射击穿。另有一种由于负极表面温度高、局部过热而引起大量电子发射形成的间隙击穿称为热击穿。

从雪崩电离开始到建立放电通道的过程非常迅速,间隙电阻从绝缘状态迅速降低到几分之一欧姆,间隙电流迅速上升到最大值,大约在几安培到几百安培。间隙电压则由击穿电压迅速下降到火花维持电压,大约为20~30V,电流则由零上升到某一峰值电流,如图1-1a、b中的2~3段。

放电通道是由数量大体相等的带正电的正离子和带负电的电子及中性粒子组成的等离子体。正、负带电粒子相向高速运动相互碰撞,产生大量的热,使通道温度相当高,但分布是不均匀的,从通道中心向边缘逐渐降低,通道中心温度可高达10000℃以上。电子流动形成的电流同时又产生磁场,磁场又反过来对电子流产生向心的磁压缩效应,电子流动又同时受周围介质惯性动力压缩效应的作用,使通道瞬间扩展受到很大阻力,故放电开始阶段通道截面很小,而通道内由高温热膨胀形成的初始压力可达数十兆帕。高压高温的放电通道及随后瞬时金属汽化形成的气体(以后发展成气泡)急速扩展,产生一个强烈的冲击波向四周传播。在放电过程中,同时伴随着一系列派生现象,其中有热效应、电磁效应、光效应、声效应及频率范围很宽的电磁辐射和爆炸冲击波等。

关于通道的结构,通常认为是单通道,即在一次放电时间内只存在一个放电通道;有人认为可能有多通道,即在一次放电时间内可能同时存在几个放电通道。近期实验表明,单个脉冲放电时有可能出现多次击穿,即在一个脉冲内间隙击穿后,有时产生短路或开路,接着又产生击穿放电。另外,也出现通道受某些随机因素的影响而产生游动,因而在单个脉冲周期内先后会出现多个电蚀坑现象。

2. 介质热分解、电极材料熔化、汽化热膨胀

极间介质一旦被电离、击穿,形成放电通道后,脉冲电源使通道间的电子高速奔向正极。电能变成动能,动能通过碰撞又转变为热能。于是,在通道内正极和负极表面分别成为瞬时热源,达到很高的温度。通道高温将工作液介质汽化,进而热裂分解汽化,如水基工作液热分解为氢气和氧气甚至原子等。正负极表面的高温除使工作液汽化、热分解汽化外,也使金属材料熔化甚至沸腾汽化。这些汽化后的工作液和金属蒸汽瞬间体积猛增,在放电间隙内成为气泡,迅速热膨胀并产生爆炸。观察线切割加工过程可以看到气泡冒出,同时有黑色的工作液流出,并可听到轻微而清脆的爆炸声。线切割加工主要靠热膨胀和局部微爆炸,将熔化、汽化了的金属材料抛出蚀除,此过程相当于图1-1a、b中3~4段的前期。

3. 电蚀产物的抛出

通道和正负极表面放电点瞬时高温使工作液汽化和金属材料熔化、汽化,热膨胀产生很高的瞬时压力;通道中心的压力最高,使汽化了的气体体积不断向外膨胀,形成气泡;气泡上下、内外的瞬时压力并不相等,压力高处的熔融金属液体和蒸汽就被排挤、抛出而进入工作液中,这一过程相当于图1-1a、b中3~4段的后期。

由于表面张力和内聚力的作用,使抛出的材料具有最小的表面积,冷凝时,凝聚成细小的圆球颗粒。实际上熔化和汽化的金属在被抛离时,向四处飞溅,除绝大部分抛入工作液中收缩成小颗粒外,还有一小部分飞溅镀覆、吸附在对面的电极表面上。这种互相飞溅镀覆及吸附的



现象,对电极丝的损耗起到减少和补偿作用。

总之,材料的抛出是热爆炸力、电动力、流体动力等综合作用的结果,对这一复杂的抛出机理的认识还在不断深化中。

4. 极间介质的消电离

随着脉冲电压的结束,脉冲电流也迅速降为零,图1-1a、b中4~5段标志着一次脉冲放电结束,但此后仍应有一段间隔时间,使间隙介质消除电离,即放电通道中的正负带电粒子复合为中性粒子,恢复本次放电通道处间隙介质的绝缘强度,以及降低电极表面温度等,以免下次总是重复在同一处电离击穿而导致电弧放电,从而保证在别处按两极相对最近处或电阻率最小处形成下一放电通道。

在加工过程中,产生的电蚀产物如金属微粒、气泡等如果来不及排除、扩散出去,就会改变间隙介质的成分,并降低绝缘强度。放电时,产生的热量不及时传出,带电粒子的自由能不易降低,将大大减少复合的几率,使消电离过程不充分,结果将使下一个脉冲放电通道始终集中在某一部位,使金属局部表面过热而破坏消电离过程,这样火花放电将恶性循环,转变为有害的电弧放电。

由此可见,为了保证线切割加工过程正常进行,在两次脉冲放电之间一般要有足够的脉冲间隔时间,这一脉冲间隔时间的选择,不仅要考虑介质本身消电离所需的时间,还要考虑电蚀产物排离放电区域的时间,此外还应留有余地,使击穿、放电点分散、转移,否则易形成电弧。图1-2为放电过程中四个阶段放电间隙状态示意图。

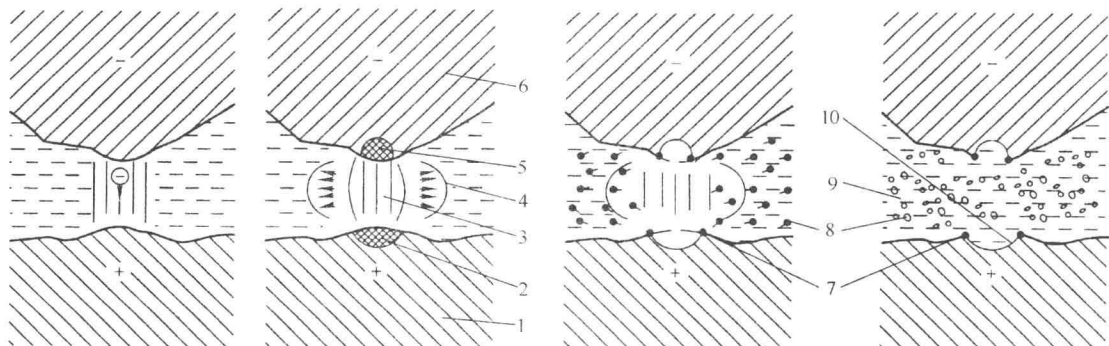


图1-2 放电过程中四个阶段放电间隙状态示意图

1—正极 2—从正极上熔化并抛出金属的区域 3—放电通道 4—气泡 5—在负极上熔化并抛出金属的区域
6—负极 7—翻边凸起 8—在工作液中凝固的微粒 9—工作液 10—放电形成的凹坑

1.3.2 数控线切割加工的基本原理

线切割加工是电火花加工的一种,图1-3为高速走丝线切割机示意图,图1-4为线切割工作原理图。数控线切割加工的基本工作原理是:工具电极丝(铜丝或钼丝)接脉冲发生器的负极,穿过工件上预先钻好的小孔,经导轮在储丝筒的换向装置控制下做往复交替移动。工件通过绝缘板安装在工作台上,并接脉冲发生器的正极(被切割的工件作为工件电极)。脉冲电源对电极丝与工件施加脉冲电压,且在电极丝

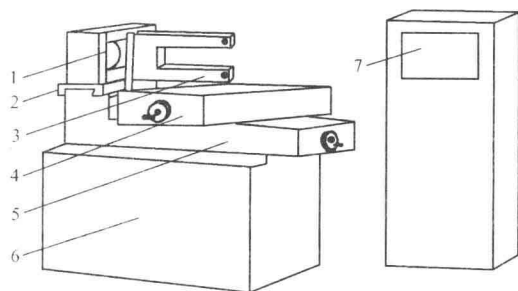


图1-3 高速走丝线切割机示意图

1—卷丝筒 2—走丝滑板 3—丝架 4—上滑板
5—下滑板 6—床身 7—电源、控制台



与工件之间的加工区域里，由喷嘴通过液压泵将水箱内的液体介质以一定的压力喷入。当脉冲电压击穿电极丝与工件之间的间隙时，两者之间即产生火花放电而切割工件。这样，由数控装置发出加工程序指令，控制步进电动机以驱动 X、Y 两轴或 X、Y、U、V 四轴移动，从而加工出任意曲线轨迹和锥度的工件。由于储丝筒带动电极丝作正、反交替的高速移动，单位长度电极丝的损耗很小，从而对加工精度的影响较小，且电极丝可使用较长时间。

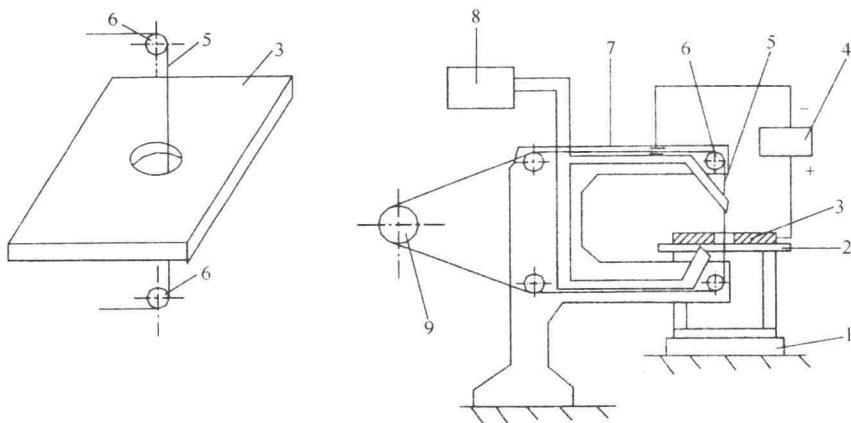


图 1-4 线切割工作原理图

1—床身 2—工作台 3—工件 4—脉冲电源 5—电极丝 6—导轮 7—丝架
8—工作液循环系统 9—储丝筒

数控线切割加工的正常运行，必须具备以下基本条件：

1) 电极丝与工件之间必须保持一定的放电间隙。在该间隙范围内，既可以满足脉冲电压不断击穿介质，产生火花放电，又可以适应在火花通道熄灭后介质消除电离及排出电蚀产物的要求。如果间隙过大，极间电压不能击穿极间介质，则不能产生火花放电；如果间隙过小，则容易形成短路连接，也不能产生火花放电。

2) 必须在有一定绝缘性能的介质中进行，如皂化油、去离子水等。要求较高绝缘性是为了利于产生脉冲性的火花放电；另外，液体介质还有排除间隙内电蚀产物和冷却电极的作用。

3) 放电必须是短时间的脉冲放电。由于放电时间短，使放电时产生的热能来不及在被加工材料内部扩散，从而把能量作用局限在很小范围内，保持火花放电的冷极特性。

1.4 数控线切割机床的分类和型号

1.4.1 数控线切割机床的分类

根据电极丝的走丝速度不同，数控线切割机床可分为两大类：一类是数控高速走丝线切割机床，另一类是数控低速走丝线切割机床。

1. 数控高速走丝线切割机床 (WEDM-HS)

数控高速走丝线切割机床 (WEDM-HS) 如图 1-5 所示，这种机床也称为数控快走丝线切割机床。该类机床采用直径为 0.03 ~ 0.25mm 的钼丝类电极，电极丝做高速往复运动，一般走丝速度为 8 ~ 10m/s，是我国独创的线切割加工模式，国产的线切割机床多是此类机床。工作液一般为水基液或去离子水，常用的水基液有植物油皂化液和线切割专用皂化液等。电极丝的快速移动能将工作液带进狭窄的加工间隙，便于及时清除电蚀产物，有利于切割速度的提高。



数控高速走丝线切割机床结构比较简单,价格也比数控低速走丝线切割机床便宜。但它的运丝速度快,易造成电极丝抖动和反向时停顿,导轮损耗较快且电极丝在加工中往复运动时的放电损耗对加工精度也有一定的影响,从而使加工质量下降。目前,数控高速走丝线切割加工能达到的加工精度为 0.01mm ,表面粗糙度 Ra 值为 $0.63 \sim 1.25\mu\text{m}$,最大切割速度可达 $50\text{mm}^2/\text{min}$ 以上,钢件切割厚度最大可达 500mm 。

2. 数控低速走丝线切割机床 (WEDM-LS)

数控低速走丝线切割机床 (WEDM-LS) 如图 1-6 所示,这种机床也称为数控慢走丝线切割机床。该类机床采用直径为 $0.03 \sim 0.35\text{mm}$ 的铜丝作电极,电极丝做低速单向运动,一般走丝速度为 $0.05 \sim 0.2\text{m/s}$,可避免电极损耗对加工精度的影响。加工精度可达 0.001mm ,表面粗糙度值可达 $Ra < 0.32\mu\text{m}$ 。自动化程度更高,可实现无人操作加工,机床价格较高速走丝线切割机床高得多。

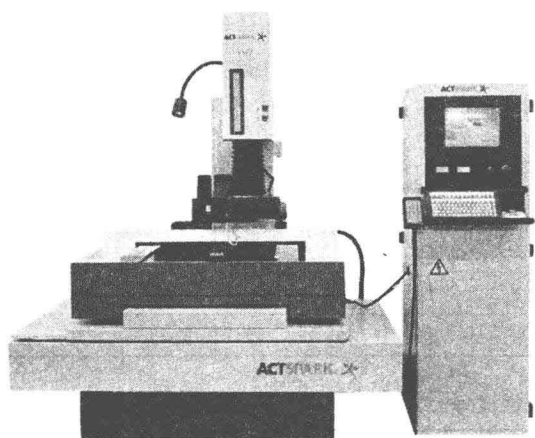


图 1-5 数控高速走丝线切割机床 (WEDM-HS)

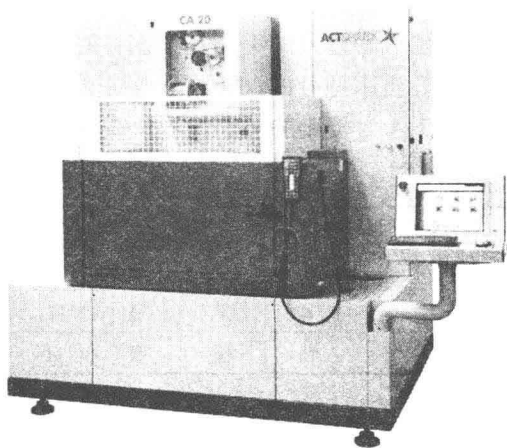


图 1-6 数控低速走丝线切割机床 (WEDM-LS)

此外,根据线切割机床的控制方式可分为靠模仿型控制、光电跟踪控制、数字程序控制等方式,目前国内外 95% 以上的线切割机床都已数控化。

数控高速与数控低速走丝线切割机床的主要区别见表 1-2。加工工艺水平比较见表 1-3。

表 1-2 数控高速与数控低速走丝线切割机床的主要区别

项 目	数控高速走丝线切割机床	数控低速走丝线切割机床
走丝速度/(m/min)	360~660	1~15
走丝方向	往复	单向
工作液	线切割乳化液、水基工作液	去离子水
电极丝材料	钼、钨钼合金	黄铜、铜、钨、钼
电 源	晶体管脉冲电源开路电压 80~100V,工作电流1~5A	晶体管脉冲电源,RC电源开路电压 300V,工作电流1~32A
放电间隙/mm	0.01	0.02~0.05



表 1-3 数控高速与数控低速走丝线切割机床加工工艺水平比较

项 目	数控高速走丝线切割机床	数控低速走丝线切割机床
切割速度/(mm ² /min)	20~160	20~240
表面粗糙度/ μm	3.2~1.6	1.6~0.1
加工精度/mm	$\pm 0.01 \sim \pm 0.02$	$\pm 0.005 \sim \pm 0.01$
电极丝损耗/mm	加工(3~10) $\times 10^4 \text{mm}^2$ 时, 损耗 0.01	不计
重复精度/mm	± 0.01	± 0.002
最大切割厚度/mm	钢 500, 铜 610	400
最小切缝宽度/mm	0.04~0.09	0.0045~0.014

1.4.2 数控线切割机床的型号

我国机床型号的编制是根据 GB/T 15375—2008《金属切削机床 型号编制方法》的规定进行的。机床型号由汉语拼音字母和阿拉伯数字组成,分别表示机床的类别、特性和基本参数,表 1-4 为机床的类别代号,表 1-5 为机床的特性代号。

表 1-4 机床的类别代号

类 别	车床	钻床	镗床	磨床	齿轮加工机床	螺纹加工机床	铣床	刨床插床	拉床	电加工机床	切断机床	其他机床
代 号	C	Z	T	M	Y	S	X	B	L	D	G	Q
参考读音	车	钻	镗	磨	牙	丝	铣	刨	拉	电	割	其

表 1-5 机床的特性代号

特 性	高精度	精密	自动	半自动	数控	仿形	加重型	轻型	简易	自动换刀
代 号	G	M	Z	B	K	F	C	Q	J	H
参考读音	高	密	自	半	控	仿	重	轻	简	换

为了有计划地开发新的机床品种规格和设备管理上的规范,根据实际生产的需要,我国已颁布了 GB/T 7925—2005《电火花线切割机(往复走丝型)参数》标准,要求各机床生产厂家在设计开发新产品时遵守。表 1-6 为《电火花线切割机床(往复走丝型)参数》(GB/T 7925—2005)列出的具体参数。

表 1-6 电火花线切割机床(往复走丝型)参数表(GB/T 7925—2005)

Y 轴行程/mm	100	125	160	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250											
X 轴行程/mm	125	160	160	200	200	250	320	320	400	400	500	500	630	630	800	800	1000	1000	1250	1250	1600	1600	2000
最大工件质量/kg	10	20	40	60	120	200	320	500	1000	1500	2000	2500											
Z 轴行程/mm	80、100、125、160、200、250、320、400、500、630、800、1000																						