

● 数控编程人员从入门到精通

# 数控线切割

## 自动编程与操作

李必文 唐永辉 何彬 著 张春良 主审

从基础到专业

教你持续创新

多层次、全方位

理论与技巧并行

知识的整合与优化

学术性与职业性并重

- ◆ 实现工模具行业创新设计中的奇思妙想
- ◆ CAXA线切割XP及Mastercam Wire 9.0的自动编程技术
- ◆ 结合SolidWorks、MATLAB的数学处理与自动编程实例
- ◆ 控制机的操作、十大工艺技巧
- ◆ 废品产生的原因及预防方法、特种线切割加工
- ◆ 设备维护保养与故障排除
- ◆ 电火花线切割加工工人等级标准



国防工业出版社

National Defense Industry Press

数控编程人员从入门到精通

# 数控线切割自动编程与操作

李必文 唐永辉 何 彬 著  
梅占国 刘 丽 参编  
张春良 主审

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书共分六章,分别是数控电火花线切割加工的基础知识、工件图形的绘制、数控线切割自动编程、线切割加工的数学处理与自动编程实例、电火花线切割加工操作、特种线切割加工。

本书可作为工程技术人员的参考书,亦可作为相关院校的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

数控线切割自动编程与操作/李必文,唐永辉,何彬  
著. —北京:国防工业出版社,2007.1

(数控编程人员从入门到精通)

ISBN 7-118-04736-8

I. 数... II. ①李...②唐...③何... III. 数控线  
切割—程序设计 IV. TG481

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第099811号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 222 千字

2007年1月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 22.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422 发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

# 前 言

作为特种加工家族的一员,电火花线切割加工是对传统机械加工方法的有力补充和延伸,现已成为机械制造业,特别是模具和工具行业不可或缺的重要加工手段,并正向着自动化、柔性化、精密化、集成化、智能化和最优化方向发展,同时也成为创新设计中实现奇思妙想所不可缺少的工艺方法。

目前,数控设备已经大量进入制造业,电火花线切割机床都是数控的,一些数控线切割机床上本身具有多种自动编程机的功能,或做到控制机与编程机合二为一。数控编程、加工操作及其维修成为数控电火花线切割加工中的重要组成部分。与之相适应,配套的 CAD/CAM 软件也得到了迅速的发展,并在近几年经历了一个重新洗牌的过程。现阶段我国普遍使用的线切割自动编程软件主要有 CAXA 线切割 XP 及 Mastercam Wire 9.0。

笔者多年来在企业、高校从事工模具的设计、加工及科研工作,为本科生、研究生开设了数控编程技术、特种加工、先进制造技术及 CAD/CAM 技术等课程,并成功地主办过多期数控技术培训班。在实际工作中,笔者深深地感受到,现有的数控电火花线切割加工的著作或教材从内容上可以分为学科性教育和职业性教育两大类,学科性教育类的侧重于理论、知识和学术的严谨和完整,而职业性教育类的侧重于生产和工作的实际需要,二者虽各有千秋,但与“培养既懂数控编程理论和技巧、又能独立操作数控机床、创新能力和实践动手能力并重的技术技能复合型人才”的发展目标还是不太适应的。有鉴于此,本书尝试将学科性教育和职业性教育的内容进行糅合,并力求突出一个“新”字,使读者处于数控电火花线切割加工技术的发展前沿,拉近读者与现代科学发展的距离。

本书的重要特点是内容丰富而新颖,除了阐述 CAXA 线切割 XP 及 Mastercam Wire 9.0 的自动编程技术,还以相当的篇幅介绍了数控电火花线切割加工的操作技术,特别是控制机的操作技术,所引用的参考文献近到 2005 年,现代化内容贯穿全书;结合工程实际,融合机械设计自动化软件 SolidWorks 的三维特征造型技术、MATLAB 语言的数值计算功能,较为详尽地介绍了数控电火花线切割 CAD/CAM 软件在模具和工具行业的应用;对于读者普遍关心的电火花线切割加工的工艺技巧及特种线切割加工技术等内容,本书也作了合理的编排。笔者衷心希望本书对培养读者的创新思维能力能有所裨益,即在学好数控电火花线切割自动编程与操作知识的基础上,具备逐渐向专业发展、不因循守旧、敢于创新的综合素质。

本书的第 1 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章由李必文主笔,第 3 章由唐永辉主笔,第 2 章由何彬主笔,全书由李必文统稿。硕士研究生梅占国、刘丽提供了部分实例的初稿,做了大量的图形绘制和处理工作,并上机运行了书中所有的程序。全书由张春良教授审稿。

限于笔者的知识水平和经验,不足之处,恳请广大专家和读者批评指正。笔者的电子邮件地址是: [libiwen68@163.com](mailto:libiwen68@163.com)。

李必文  
2006 年 9 月

# 目 录

<b>第 1 章 数控电火花线切割加工的基础知识</b> .....	1
1.1 电火花线切割加工原理、特点及应用范围 .....	1
1.2 电火花线切割加工机床 .....	4
1.3 主要名词术语 .....	11
1.4 影响线切割工艺指标的若干因素 .....	15
1.5 电火花线切割控制系统和编程技术 .....	20
<b>第 2 章 工件图形的绘制</b> .....	29
2.1 计算机绘图的基础知识 .....	29
2.2 用 CAXA 线切割 XP 绘制工件图形 .....	36
2.3 CAXA 线切割 XP 的图形编辑 .....	39
2.4 Mastercam Wire 的图形绘制与编辑 .....	43
2.5 文字输入 .....	45
2.6 位图矢量化 .....	47
2.7 不同 CAD 软件之间的图形数据交换 .....	50
<b>第 3 章 数控线切割自动编程</b> .....	53
3.1 通用参数设置 .....	54
3.2 线切割轨迹操作 .....	55
3.3 代码生成 .....	59
3.4 代码传输与后置设置 .....	61
3.5 Mastercam Wire 的线切割自动编程 .....	67
<b>第 4 章 线切割加工的数学处理与自动编程实例</b> .....	74
4.1 一般图形的绘制 .....	74
4.2 渐开线齿轮成形铣刀廓形的精确设计 .....	75
4.3 凸形汉字切割 .....	78
4.4 平面盘形凸轮的加工 .....	81
4.5 花键滚刀、链轮滚刀成形车铲刀的 CAD/CAM 技术 .....	82
4.6 偏摆钼丝法加工斜度时刀位点的修正 .....	84
4.7 复杂图形矢量化 .....	86
4.8 基于通用双正弦规夹具的斜齿梳齿刀的 CAD/CAM 技术 .....	87
<b>第 5 章 电火花线切割加工操作</b> .....	89
5.1 电火花线切割加工的步骤及要求 .....	89
5.2 电火花线切割工件的正确装夹方法及典型夹具 .....	105
5.3 电火花线切割加工产生废品的原因及预防方法 .....	107
5.4 电火花线切割加工的十大工艺技巧 .....	111
5.5 数控电火花线切割机床的维护保养及故障排除 .....	118
<b>第 6 章 特种线切割加工</b> .....	119
6.1 锥度线切割加工 .....	119
6.2 上下异形直纹面数控线切割加工程序的编制 .....	126
6.3 空间曲面零件线切割加工技术 .....	129
<b>附录 1 JB3208—83 准备功能 G 代码与辅助功能 M 代码</b> .....	133
<b>附录 2 计算机与线切割机床通信接线图</b> .....	135
<b>附录 3 电火花线切割加工工人等级标准</b> .....	136
<b>参考文献</b> .....	139

# 第 1 章 数控电火花线切割加工的基础知识

电火花线切割加工 (WEDM, Wire Electrical-Discharge Machining) 是在电火花加工基础上于 20 世纪 50 年代末最早在苏联发展起来的一种工艺形式。它用线状电极 (钼丝或铜丝) 靠火花放电对工件进行切割, 在加工中能看到大量的电火花, 故称为电火花线切割, 有时简称为线切割。由于线切割具有无需制作成形的工具电极, 可切割高硬度的导电材料和形状极其复杂的零件, 切割中几乎没有切削力, 可采用套料加工等一系列优点, 因而获得了广泛的应用。目前, 国内外的线切割机床已占电加工机床的 60% 以上。

## 1.1 电火花线切割加工原理、特点及应用范围

### 一、电火花线切割加工的原理

电火花线切割加工的基本原理是利用移动的细金属导线 (直径为  $0.02\text{mm}\sim 0.3\text{mm}$  的钼丝或黄铜丝) 作工具电极, 在细金属导线与工件间施加脉冲电流, 产生放电腐蚀, 对工件进行切割加工。

根据电极丝的运行速度, 电火花线切割机床通常分为两大类: 一类是高速走丝 (或称快走丝) 电火花线切割机床 (WEDM-HS), 这类机床的电极丝作高速往复运动, 一般走丝速度为  $8\text{m/s}\sim 10\text{m/s}$ , 这是我国生产和使用的主要机种, 也是我国独创的电火花线切割加工模式; 另一类是低速走丝 (或称慢走丝) 电火花线切割机床 (WEDM-LS), 这类机床的电极丝作低速单向运动, 一般走丝速度低于  $0.2\text{m/s}$ , 这是国外生产和使用的主要机种。

图 1-1(a)、(b) 为高速走丝电火花线切割工艺及装置的示意图。由于在电火花放电中, 大多数情况下阳极腐蚀量远多于阴极, 为此利用细钼丝 4 作工具电极进行切割, 钼丝接高频脉冲电源 3 的负极, 工件 2 接正极, 即采用正极性加工。钼丝绕在贮丝筒 7 上, 由三相多速异步电动机带动贮丝筒运动, 使钼丝作正反向交替移动, 致使钼丝不断地进入和离开放电区域。为保证火花放电时钼丝不被烧断, 必须向钼丝与工件之间浇注大量工作液介质。当高频脉冲电源通电后, 随着工作液电离、击穿, 形成放电通道, 电子高速奔向正极, 正离子奔向负极, 于是电能转换为动能, 粒子间的相互碰撞以及粒子与电极材料的碰撞, 又将动能转换为热能。在放电通道内, 正极和负极表面分别成为瞬时热源, 达到很高的温度 (约  $10000\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 12000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 使工作液介质汽化、热裂分解、金属材料熔化、沸腾、汽化。在热膨胀、局部微爆炸、电动力、流体动力等综合作用下, 蚀除下来的金属微粒随着钼丝的移动和工作液的冲洗而被抛出放电区, 于是在金属表面形成凹坑。在脉冲间隔时间内工作液介质消电离, 放电通道中的带电粒子复合为中性粒子, 恢复工作液的绝缘性。由于工作过程是连续的, 步进电机受控制系统控制, 使工作台在水平面沿两个坐标方向各自按预定的控制程序, 根据火花间隙状态作伺服进给运动, 从而合成各种曲线轨迹, 工件就逐步被切割成各种形状。

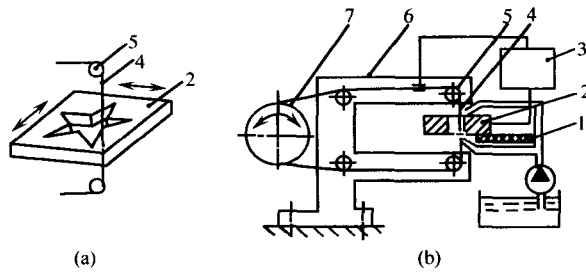


图 1-1 电火花线切割工艺及装置示意图

1—绝缘底板；2—工件；3—脉冲电源；4—钼丝；5—导向轮；6—支架；7—贮丝筒。

## 二、电火花线切割加工的特点

电火花线切割加工过程的工艺和机理，与电火花穿孔成形加工既有共性，又有特性。

### 1. 电火花线切割加工与电火花成形加工的共性表现

(1) 电火花线切割加工的电压、电流波形与电火花加工的基本相似。单个脉冲也有多种形式的放电状态，如开路、正常火花放电、短路等。

(2) 电火花线切割加工的加工机理、生产率、表面粗糙度等工艺规律，材料的可加工性等也都与电火花加工的基本相似，可以加工硬质合金等一切导电材料。

### 2. 电火花线切割加工相比于电火花加工的不同特点表现

(1) 由于电极工具是直径较小的细丝，故脉冲宽度、平均电流等不能太大，加工工艺参数的范围较小，属中、精正极性电火花加工，工件常接脉冲电源正极。电火花线切割加工基本是一次加工成型，一般不要中途转换规准。

(2) 采用水或水基乳剂工作液，而不是煤油，不会引燃起火，容易实现安全无人运转，但由于工作液的电阻率远比煤油小，因而在开路状态下，仍有明显的电解电流。电解效应稍有益于改善加工表面粗糙度。

(3) 一般没有稳定电弧放电状态。因为电极丝与工件始终有相对运动，尤其是快速走丝电火花线切割加工，因此，线切割加工的间隙状态可以认为是由正常火花放电、开路和短路这三种状态组成，但往往在单个脉冲内有多种放电状态，有“微开路”、“微短路”现象。

(4) 电极与工件之间存在着“疏松接触”式轻压放电现象。近年来的研究表明，当柔性电极丝与工件接近到通常认为的放电间隙（例如  $8\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ ）时，并不发生火花放电，甚至当电极丝已接触到工件，从显微镜中已看不到间隙时，也常常看不到火花，只有当工件将电极丝顶弯，偏移一定距离（几微米到几十微米）时，才发生正常的火花放电。亦即每进给  $1\mu\text{m}$ ，放电间隙并不减小  $1\mu\text{m}$ ，而是钼丝增加一点张力，向工件增加一点侧向压力，只有电极丝和工件之间保持一定的轻微接触压力，才形成火花放电。可以认为，在电极丝和工件之间存在着某种电化学产生的绝缘薄膜介质，当电极丝被顶弯所造成的压力和电极丝相对工件的移动摩擦使这种介质减薄到可被击穿的程度，才发生火花放电。放电发生之后产生的爆炸力可能使电极丝局部振动而脱离接触，但宏观上仍是轻压放电。

(5) 省掉了成形的工具电极，大大降低了成形工具电极的设计和制造费用，用简单的工具电极，靠数控技术实现复杂的切割轨迹，缩短了生产准备时间，加工周期短。这不光对新产品的试制很有意义，对大批生产也增加了快速性和柔性。

(6) 由于电极丝比较细，可以方便地加工微细异形孔、窄缝和复杂截面的型柱、型孔。由于切缝很窄，且只对工件材料进行“套料”加工，实际金属去除量很少，材料的利用率很

高，这对加工、节约贵重金属有重要意义。

(7) 由于采用移动的长电极丝进行加工，使单位长度电极丝的损耗较少，从而对加工精度的影响比较小，特别在低速走丝线切割加工时，电极丝一次性使用，电极丝损耗对加工精度的影响更小。

正是电火花线切割加工有许多突出的长处，因而在国内外发展都较快，已获得了广泛的应用。

### 三、线切割加工的应用领域

线切割加工为新产品试制、精密零件加工及模具制造开辟了一条新的工艺途径，主要应用于以下几个方面：

(1) 加工模具。适用于各种形状的冲模。调整不同的间隙补偿量，只需一次编程就可以切割凸模、凸模固定板、凹模及卸料板等。模具配合间隙、加工精度通常都能达到  $0.01\text{mm} \sim 0.02\text{mm}$ （快走丝机）和  $0.002\text{mm} \sim 0.005\text{mm}$ （慢走丝机）的要求。此外，还可加工挤压模、粉末冶金模、弯曲模、塑压模等，也可加工带锥度的模具。图 1-2~图 1-4 为几种典型的用线

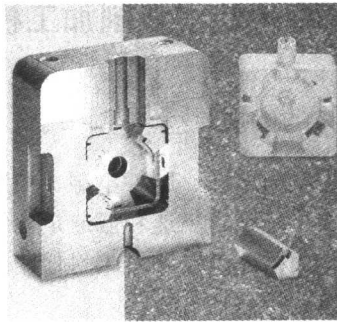


图 1-2 复杂型腔零件

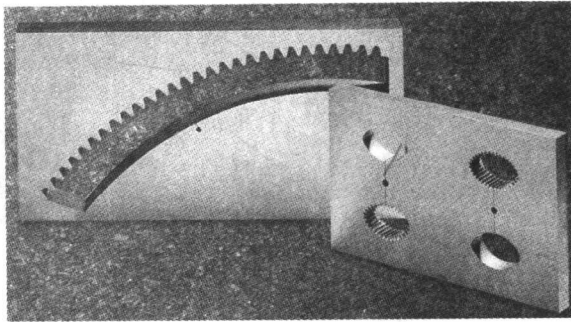


图 1-3 扇形齿及椭圆齿轮冷冲模具

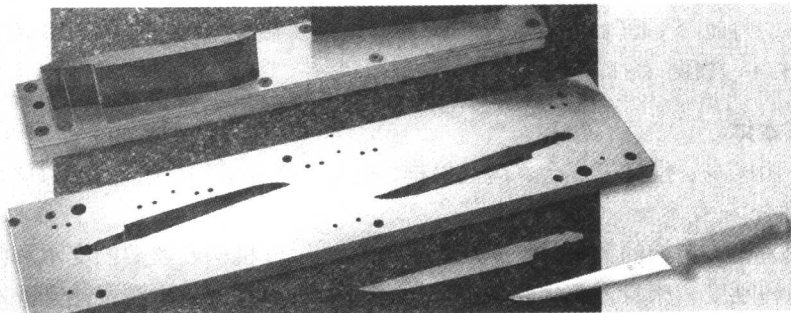


图 1-4 水果刀冷冲模具



切割加工出的模具。

(2) 加工电火花成型加工用的电极。一般穿孔加工用的电极、带锥度型腔加工用的电极，以及铜钨、银钨合金之类的电极材料，用线切割加工特别经济，同时也适用于加工微细、复杂形状的电极。

(3) 加工零件。在试制新产品时，用线切割在坯料上直接割出零件，例如试制切割特殊微电机硅钢片定转子铁心，由于不需要另行制造模具，可大大缩短制造周期、降低成本。另外修改设计、变更加工程序比较方便，加工薄件时还可多片叠在一起加工。在零件制造方面，可用于加工品种多、数量少的零件，特殊难加工材料的零件，材料试验样件，各种型孔、型面、特殊齿轮、凸轮、样板。采用偏摆电极丝法或偏摆刀具法（结合正弦规装夹），可加工出具有精确廓形的成形车刀、铲刀、梳齿刀等。有些具有锥度切割的线切割机床，可以加工出“天圆地方”等上下异形面的零件。同时还可进行微细加工，异形槽和标准缺陷的加工等。

## 1.2 电火花线切割加工机床

### 1.2.1 电火花线切割加工机床的组成

电火花线切割加工设备主要由机床本体、脉冲电源、控制系统、工作液循环系统和机床附件等几部分组成。图 1-5 和图 1-6 分别为高速和低速走丝线切割机床组成图。本书以讲述高速走丝线切割为主。由于线切割的控制系统和机床附件比较重要，且内容较多，故列入以后的小节专门介绍。

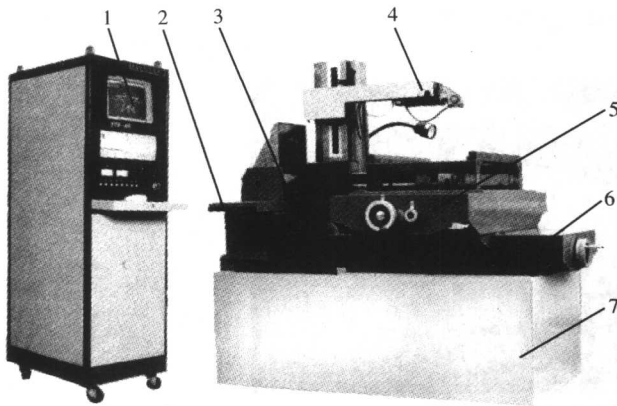


图 1-5 高速走丝线切割机床组成

1—电源、控制柜；2—走丝溜板；3—贮丝筒；  
4—丝架；5—上滑板；6—下滑板；7—床身。

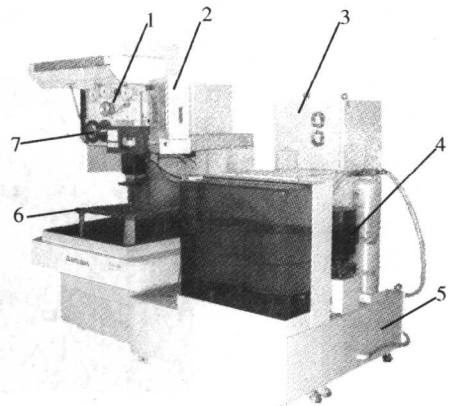


图 1-6 低速走丝线切割机床组成

1—运丝机构；2—控制面板；3—脉冲电源；4—泵；  
5—工作液箱；6—工作台；7—放丝卷筒。

#### 一、机床本体

机床本体由床身、坐标工作台、运丝机构、丝架、工作液箱、附件和夹具等几部分组成。

##### 1. 床身部分

床身一般为箱式结构的铸铁件，是坐标工作台、绕丝机构及丝架的支承和固定基础，应有足够的强度和刚度。床身内部安置电源和工作液箱，为了避免电源发热升温和工作液泵的振动对机床精度的影响，将电源和工作液箱移出床身外另行安装。

## 2. 坐标工作台部分

工件安装在坐标工作台上，电火花线切割机床最终都是通过坐标工作台与电极丝的相对运动来完成对零件加工的，而工作台在水平面两个坐标方向 X 轴和 Y 轴的移动是由步进电机驱动的。控制系统每发出一个进给信号，步进电机就走一步，经过一对齿轮减速，带动丝杆旋转，使工作台前进或后退 0.001mm。为保证机床精度，对导轨的精度、刚度和耐磨性有较高的要求，一般都采用“十”字滑板、滚动导轨和丝杆传动副将电动机的旋转运动变为工作台的直线运动，通过两个坐标方向各自的进给移动，可合成各种平面图形曲线轨迹。为保证工作台的定位精度和灵敏度，传动丝杆和螺母之间必须消除间隙。

图 1-7 所示为坐标工作台原理图。步进电机 1 通过齿轮副 2、3 传动，带动丝杠 6 旋转并向前移动，丝杠 6 空套在滑板 5 上通过滚珠 7 带动滑板 5 前进，滑板 5 与底座 8 之间用弹簧 9 保证丝杠后退时，滑板 5 随之后退，并消除丝杠螺母 4 的间隙。滑板 5 通过对合式滚动导轨装在底座 8 上。X、Y 轴滑板结构相同。因为丝杠 6 空套在滑板 5 上的轴承中，在正向作用力克服弹簧力推动工作台时，滑板 5 即可向前移动。为防止运输或移动机床时，滑板 5 来回窜动而造成损坏，在导轨两端设有固定板安装孔，运输或移动机床时应将滑板 5（坐标工作台）用固定板固定起来。

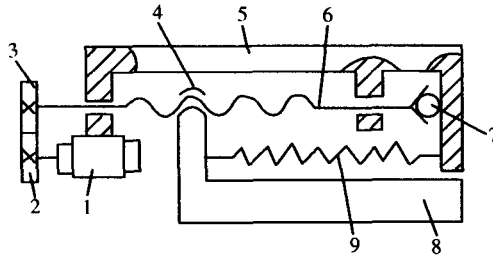


图 1-7 坐标工作台原理图

1—步进电机；2、3—高速齿轮副；4—丝杠螺母；5—上滑板；6—丝杠；7—滚珠；8—底座；9—弹簧。

## 3. 运丝机构

运丝系统使电极丝以一定的速度运动并保持一定的张力。在高速走丝机床上，一定长度的电极丝平整地卷在贮丝筒上（参考图 1-5），丝张力与排绕时的拉紧力有关（为提高加工精度，近来已研制出恒张力装置），储丝筒通过联轴节与驱动电动机相连，电动机由专门的换向装置控制作正反方向交替运转，从而使储丝筒和丝架之间的电极丝以一定速度作往返运动。储丝筒拖板有限位开关保护。运丝速度等于储丝筒周边的线速度，通常为 8m/s~10m/s。在运动过程中，电极丝由丝架支撑，并依靠导轮保持电极丝与工作台垂直或倾斜一定的几何角度（锥度切割时）。

低速走丝系统如图 1-8 所示。丝筒 2（绕有 1kg~3kg 金属丝）未使用的金属丝靠卷丝轮 1 带动，以较低的速度（通常 0.2m/s 以下）移动。为了提供一定的张力（2N~25N），在运丝路径中装有一个机械式（或电磁式）张力机构 4 和 5。为实现断丝时能自动停车并报警，一般还装有断丝检测微动开关。用过的电极丝集中到储丝筒上或送到专门的收集器中。

为了减轻电极丝的振动，应按工件厚度调整跨度，使其尽可能小，通常在工件的上下采用蓝宝石 V 形导轮或圆孔金刚石模块导轮，其附近装有引电部分，工作液一般通过引电区和导轮再进入加工区，可使全部电极丝的通电部分都能冷却。有的机床上还装有靠高压水射流

冲刷引导的自动穿丝机构，能使电极丝经一个导轮穿过工件上的穿丝孔而被传送到另一个导轮，在必要时也能自动切断并再穿丝，为无人连续切割创造了条件。

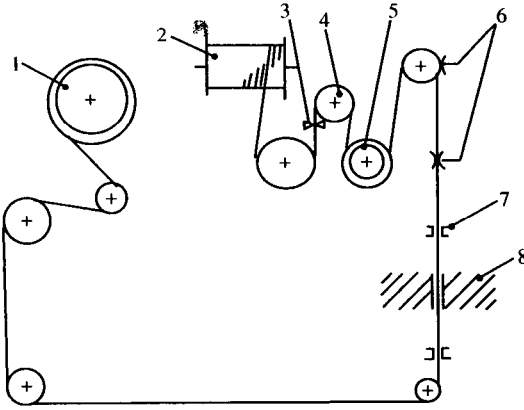


图 1-8 低速走丝系统示意图

1—废丝卷丝轮；2—未使用的金属丝；3—拉丝模；4—张力电动机；  
5—电极丝张力调节轴；6—退火装置；7—导轮；8—工件。

#### 4. 锥度切割装置

为了切割有落料角的冲模和某些有锥度（斜角）的内外表面，有些线切割机床具有锥度切割功能。实现锥度切割的方法有多种，下面只介绍两种。

(1) 偏移式丝架。主要用在高速走丝线切割机床上实现锥度切割。其工作原理如图 1-9 所示。

图 1-9(a)为上（或下）丝臂平动法，上（或下）丝臂沿  $x$ 、 $y$  方向平移，此法锥度不宜过大，否则钼丝易拉断，导轮易磨损，工件上有一定的加工圆角。图 1-9(b)为上、下丝臂同时绕一定中心移动的方法，如果模具刃口放在中心“O”上，则加工圆角近似为电极丝半径。此法加工锥度也不宜过大。图 1-9(c)为上、下丝臂分别沿导轮径向平动和轴向摆动的方法，此法加工锥度不影响导轮磨损。最大切割锥度通常可达  $5^\circ$  以上。

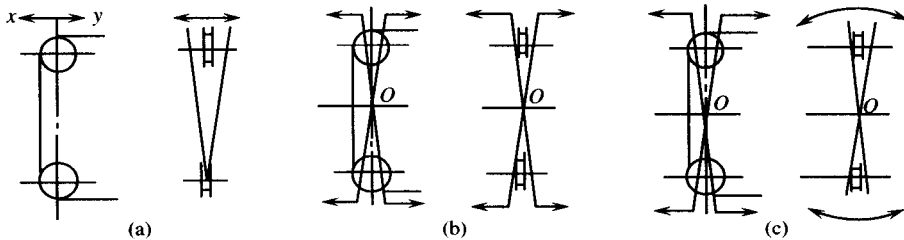


图 1-9 偏移式丝架实现锥度加工的方法

(2) 双坐标联动装置。在低速走丝线切割机床上广泛采用此类装置，它主要依靠上导轮作纵横两轴（称  $u$ 、 $v$  轴）驱动，与工作台的  $x$ 、 $y$  轴在一起构成 NC 四轴同时控制（图 1-10），这种方式的自由度很大，依靠功能丰富的软件，可以实现上下异形截面形状的加工。最大的倾斜角度  $\theta$  一般为  $\pm 5^\circ$ ，有时甚至可达  $30^\circ$ （与工件厚度有关）。

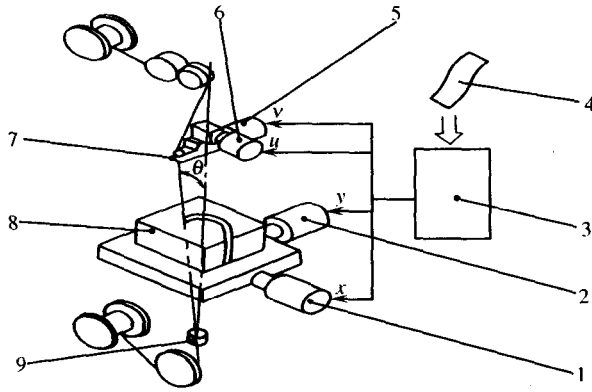


图 1-10 四轴联动锥度切割装置

1—x 轴驱动电动机；2—y 轴驱动电动机；3—控制装置；4—数控纸带；  
5—v 轴驱动电动机；6—u 轴驱动电动机；7—上导轮；8—工件；9—下导轮。

## 二、脉冲电源

电火花线切割加工脉冲电源与电火花成形加工所用的在原理上相同，不过受加工表面粗糙度和电极丝允许承载电流的限制，线切割加工脉冲电源的脉宽较窄 ( $2\mu\text{s}\sim 60\mu\text{s}$ )，单个脉冲能量、平均电流 ( $1\text{A}\sim 5\text{A}$ ) 一般较小，所以线切割加工总是采用正极性加工。脉冲电源的形式品种很多，如晶体管矩形波脉冲电源、高频分组脉冲电源、并联电容型脉冲电源和低损耗电源等。

### 1. 晶体管矩形波脉冲电源

晶体管矩形波脉冲电源工作方式与电火花成型加工类似。晶体管矩形波脉冲电源广泛用于高速走丝线切割机床，在低速走丝机床上用得不多，因为低速走丝时排屑条件差，要求采用  $0.1\mu\text{s}$  的窄脉宽和  $500\text{A}$  以上的高峰值电流，这样势必要用到高速大电流的开关元件，电源装置的体积也较大。

### 2. 高频分组脉冲电源

高频分组脉冲波形是矩形波派生的一种波形，即把较高频率的小脉冲宽度和小脉冲间隔的矩形波脉冲分组成为大脉冲宽度和大脉冲间隔输出。

矩形波脉冲电源对提高切割速度和减小表面粗糙度值这两项工艺指标是互相矛盾的，即欲提高切割速度，则表面粗糙度值大，若要求表面粗糙度值小，则切割速度下降很多。而高频分组脉冲波形在一定程度上能解决这两者的矛盾，在相同工艺条件下，可获得较好的加工工艺效果，因而得到了越来越广泛的应用。

### 3. 并联电容型脉冲电源

并联电容型脉冲电源是实现短放电时间、高峰值电流的一种方法，常用于低速走丝线切割机床中，依靠调整晶体管的通断时间、限流电阻的个数及电容器的容量，可控制放电的重复频率，而每次放电的能量是由直流电源的电压及电容器的容量决定的。

### 4. 低损耗电源

一般认为，减小放电电流的上升率可降低电极丝的损耗，这样不但可以提高加工精度，还可提高重复使用的电极丝的寿命，这对快速走丝线切割加工是很有意义的，前阶梯波脉冲电源就属于这一类。它是由矩形波组合而成的，可由几路起始脉冲放电时间顺序延迟的矩形

波叠加而成。此外，在矩形波电源放电主回路中串入一定值的电感，可得到前后沿变缓的波形，也能减小电极丝的损耗。

### 三、工作液循环系统

工作液的主要作用是在电火花线切割加工过程中脉冲间歇时间内及时将已蚀除下来的电蚀产物从加工区域中排除，使电极丝与工件间的介质迅速恢复绝缘状态，保证火花放电不会变成连续的弧光放电，使线切割顺利进行下去。此外，工作液还有另外两种作用：一方面有助于压缩放电通道，使能量更加集中，提高电蚀能力；另一方面可以冷却受热的电极丝，防止放电产生的热量扩散到不必要的地方，保证工件表面质量和提高电蚀能力。工作液应具有一定的绝缘性能、较好的洗涤性能、较好的冷却性能，还应考虑其爆炸性、阻尼稳定性、溶沉灭弧性及加工稳定性，以满足加工不同材料、不同厚度的要求，并应对环境无污染、对人体无危害。工作液对线切割加工工艺指标的影响很大，如对切割速度、表面粗糙度、加工精度等都有影响。低速走丝线切割机床大多采用去离子水作工作液，只有在特殊精加工时，才采用绝缘性能较高的煤油。高速线切割机床使用的工作液是专用乳化液，目前供应的乳化液有 DX-1（油酸钾乳化油水溶液）、DX-2、DX-3 及 DX-4 等，各有其特点，有的适用于快速加工，有的适于大厚度切割，也有的是在原来工作液中添加某些化学成分来提高其切割速度或增加防锈能力等。工作液循环装置一般由工作液泵、液箱、过滤器、管道和流量控制阀等组成。对高速走丝机床，通常采用冲液式（浇注式）供液方式，如图 1-11 所示；对低速走丝机床，近年来浸液式（浸泡式）供液方式也得到了应用，如图 1-12 所示。

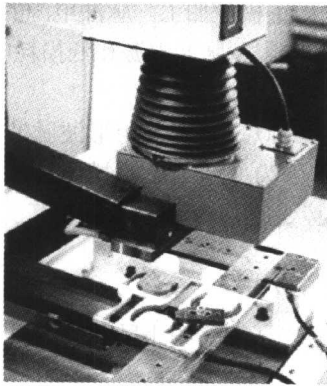


图 1-11 冲液式高速走丝

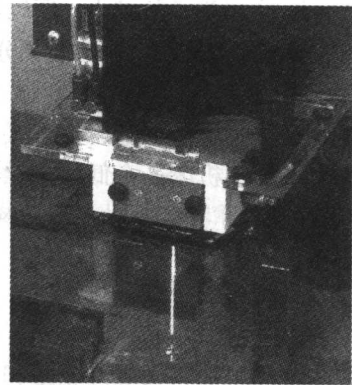


图 1-12 浸液式低速走丝

## 1.2.2 电火花线切割加工机床的分类与型号、参数

### 一、机床分类

按电极丝的运行速度不同可将电火花切割机床分高速走丝电火花线切割机床和低速走丝电火花线切割机床两大类。根据控制方式不同，电火花线切割机床又可分为靠模仿型控制、光电跟踪控制、数字程序控制等，目前国内外 91% 以上的线切割机床都已采用数控化，而且不同水平的微机数控系统，从单片机、单板机到微型计算机系统，有的还有自动编程能力。按加工特点还可分为普通直壁切割型与锥度切割型等。

高速与低速走丝线切割机床的主要区别见表 1-1，加工工艺水平比较见表 1-2，最大切割速度比较见表 1-3，最高加工精度和最细表面粗糙度比较见表 1-4，最大切割厚度及最小切缝宽度比较见表 1-5。

表 1-1 高速与低速走丝线切割机床的主要区别

项 目	国内高速走丝电火花线切割机床	国外低速走丝电火花线切割机床
走丝速度/ $m \cdot \min^{-1}$	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 V~100V, 工作电流 1A~5A	晶体管脉冲电源, 开路电压 300V 左右, 工作电 流 1A~32A, RC 电源
放电间隙/mm	0.01	0.02~0.05

表 1-2 高速与低速走丝线切割机床加工工艺水平比较

项 目	国内高速走丝电火花线切割机床	国外低速走丝电火花线切割机床
切割速度 ( $v_{wi}$ ) / $m \cdot \min^{-1}$	20~160	20~240
表面粗糙度 ( $R_a$ ) / $\mu m$	3.2~1.6	1.6~0.8
加工精度/mm	0.01~0.02	$\pm 0.005 \sim \pm 0.01$
电极丝损耗/mm	加工 $(3 \sim 10) \times 10^4 \text{ mm}^2$ 时, 损耗 0.01	不 计
重复精度/mm	$\pm 0.01$	$\pm 0.002$

表 1-3 高速与低速走丝线切割机床最大切割速度比较

项 目	国内高速走丝电火花线切割机床	国外低速走丝电火花线切割机床
切割速度 ( $v_{wi}$ ) / $m \cdot \min^{-1}$	266	200~300
表面粗糙度 ( $R_a$ ) / $\mu m$	6.3	1.6

表 1-4 高速与低速走丝线切割机床最高加工精度和最细表面粗糙度比较

项 目	国内高速走丝电火花线切割机床	国外低速走丝电火花线切割机床
加工精度/mm	$\pm 0.005$	0.002~0.005 (瑞士 5 次切割) $\pm 0.001 \sim \pm 0.002$ (苏联微精切割)
表面粗糙度 ( $R_a$ ) / $\mu m$	0.4 ( $v_{wi} \geq 13 \text{ mm}^2/\text{min}$ ) 0.8 ( $v_{wi} \geq 20 \text{ mm}^2/\text{min}$ )	0.4 [ $v_{wi} \geq 10 \text{ mm}^2/\text{min}$ (瑞士)] 0.1~0.05 [0.03 $\text{mm}^2/\text{min} \sim 0.3 \text{ mm}^2/\text{min}$ (苏联)]

表 1-5 高速与低速走丝线切割机床最大切割厚度及最小切缝宽度比较

项 目	国内高速走丝电火花线切割机床	国外低速走丝电火花线切割机床
最大切削厚度/mm	钢: 500      铜: 610	400
最小切缝宽度/mm	0.07~0.09	0.0045~0.014 (苏联) 0.035~0.04 (瑞士)

## 二、型号、参数

电火花线切割机床的型号根据 JB 1838—1976《金属切削机床型号编制方法》的规定编制的，现举例说明。

如 DK7716，各标号代表的含义依次为

D—机床类别（电火花机床）；K—机床特性（数控）；7—机床组别（电火花加工机床）；7—机床型别（线切割机床）；16—基本参数（工作台横向行程 160mm）。

电火花线切割机床的参数见表 1-6，我国生产的电火花线切割机床的型号与技术参数见表 1-7，国外生产的电火花线切割机床的型号与及主要技术参数见表 1-8。

表 1-6 电火花线切割机床的参数（GB 7925—1987）

工作台	横向行程/mm	100		125		160		200		250		320		400		500		630	
	纵向行程/mm	125	160	160	200	200	250	250	320	320	400	400	500	500	630	630	800	800	1000
	最大承载质量/kg	10	15	20	25	40	50	60	80	120	160	200	250	320	400	500	630	960	1200
加工件尺寸	最大宽度/mm	125		160		200		250		320		400		500		630		800	
	最大长度/mm	200	250	250	320	320	400	400	500	500	630	630	800	800	1000	1000	1200	1250	1600
	最大切割厚度/mm	40、60、80、100、120、140、160、180、200、250、300、350、400、450、500、550、600																	
最大切割锥度/(°)	0、3、6、9、12、15、18（18 以上按 6 挡间隔增加）																		

表 1-7 我国生产的电火花线切割机床的型号与技术参数

机床型号	工作台行程/mm×mm	最大切割厚度/mm	最大切割速度/mm <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup>	控制器	加工精度/mm	表面粗糙度(R <sub>a</sub> )/μm	走丝速度	切割锥度(斜度)/(°)	生产厂家
SCX-2	150×150	75	60	微机			高速		杭州无线电专用设备厂
DK7716M	160×200	80		微机	0.01	1.25	低速	±5	上海第八机床厂
JO775C-CNC 4	200×250	80	≥120	单板机		2.5	高速	1.5	上海无线电专用机床厂
DK7720	250×200	80	≥20	微机	0.01	1.6	高速		天津仪表机床厂
BF-250	200×300	140		微机五轴			低速	±6	汉川机床厂与日本 Sodick 合作
HC-6	350×200	100	50	微机			低速	5	南京机床厂引进日本 FANUC
DK7725d	250×350	100	100	单板机		<2.5	高速		苏州第三光学仪器厂
DK7725e	250×350	150	100	单板机		<2.5	高速	1.5	
DK7725d-c4	250×350	100	100	单板机， 微机编程		<2.5	高速		
Dk6732	320×250	90	60	单板机或 双板机	±0.01	≤2.5	高速		广州无线电专用设备厂

(续)

机床型号	工作台行程/ mm×mm	最大切割厚度/ mm	最大切割速度/ mm <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup>	控制器	加工精度/ mm	表面粗糙度 (R <sub>a</sub> )/μm	走丝速度	切割锥度 (斜度)/ (°)	生产厂家
LS350X	250×350	120	120	微机	0.005	1	低速	7	上海无线电专用机械厂引进日本 JAPAX
DK7732	320×500	100	100	单板机		1.25	高速		北京第四机床厂
DK7740	400×500	100	≥40	单板机		1.25	高速	±1	营口电火花机床厂
WBKK-40A	400×500	150		微机			高速		内蒙古第二机械制造厂
MODEH	350×200	100		HC-6 或 HC-7			低速	5	苏州电加工机床研究所引进日本 FANUC

表 1-8 国外生产的电火花线切割机床的型号与及主要技术参数

型号	工件最大尺寸/ mm×mm	最大切割厚度/ mm	工作台行程/ mm	工作台进给速度/ mm·min <sup>-1</sup>	工件质量/kg	丝速/ m·min <sup>-1</sup>	丝张力/ N	丝径/ mm	切割速度/ mm <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup>	加工表面粗糙度 (R <sub>a</sub> )/μm	切割锥度/ (°)	生产厂家
DWC90H	350×400	160	250×300	1300	175	15	2~25	0.05~0.33		2~3		日本 三菱
DWC110H	650×600	260	300×450	1300	650	15	2~25	0.05~0.33		2		
DWC200H	650×750	260	400×750	1300	950	15	2~25	0.05~0.33	250			
DWC300H	750×1000	260	500×1000	1300	1250	15	2~25	0.1~0.33				
DWC400H	1000×1200	350	800×1000	1300	2000	15	2~25	0.1~0.33				
W3	700×950	300	400×750	900	800	100	0.8~25	0.05~0.33	250		±15	FANUC (日本)
W4	800×1200	300	600×1000	900	1300	100	0.8~25	0.05~0.33	250			
AGIECUT 200	860×580	250	400×250								±30	AGIE (瑞士)
Robofil200	900×520	150	320×220	900	500						30	CHAR- MILIES (瑞士)
Robofil400	1100×760	200	450×320	900	800						30	
Robofil600	1200×710	200	630×400	900	500						30	

### 1.3 主要名词术语

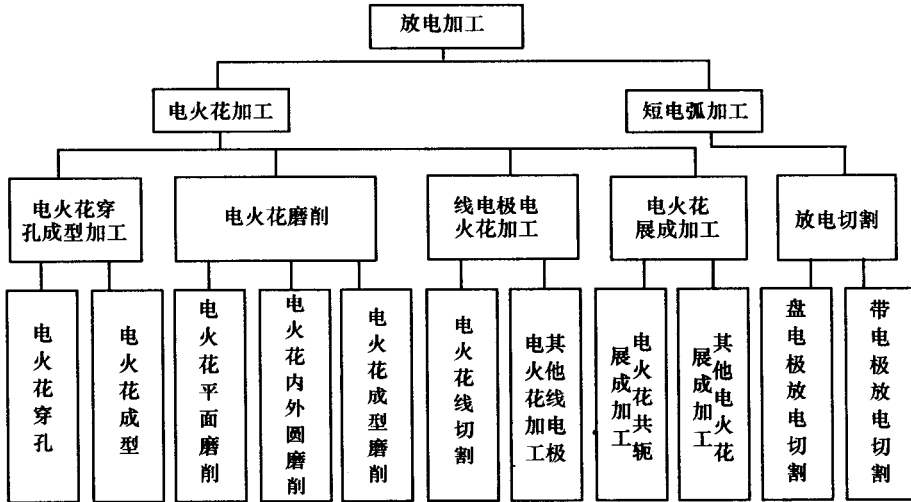
为了便于电加工技术的国内外交流，必须有一套统一的术语、定义和符号。以下内容是根据中国机械工程学会电加工分学会公布的材料编写的。

(1) 放电加工 在一定的加工介质中，通过两极（工具电极和工件电极）之间的电火花



放电或短电弧放电的电蚀作用来对材料进行加工的方法，叫放电加工（简称 EDM）。放电加工的分类见表 1-9。

表 1-9 放电加工分类



(2) 电火花加工 当放电加工只采用脉冲放电（广义火花放电）形式来进行加工时，叫做电火花加工。

(3) 电火花穿孔 一般指贯通的二维型孔的电火花加工，它既可以是简单的圆孔，又可以是复杂的型孔；既可以是等截面通孔，又可以是变截面通孔。

(4) 电火花成型 一般指三维型腔和型面的电火花加工，多是非贯通的盲孔加工。

(5) 线电极电火花加工 是一种用线状电极作工具的电火花加工，它主要应用为电火花线切割加工。其特点是电极丝可作单向慢速或正反向快速走丝运动，工件相对电极丝可作  $x$ 、 $y$  向的任意轨迹运动，它可用靠模、光电或数字等方式控制。

(6) 放电 电流通过绝缘介质（气体、液体或固体）的现象。

(7) 脉冲放电 是脉冲性的放电，这种放电在时间上是断续的，在空间上放电是分散的，它是电火花加工常用的放电形式。

(8) 火花放电 从介质击穿后伴有火花的放电，其特点是火花放电通道中的电流密度很大，瞬时温度很高。

(9) 电弧放电 是一种渐趋稳定的放电，在时间上是连续的，在空间上是完全集中在一点或一点的附近放电。放电中遇到的电弧放电，常常引起电极和工件的烧伤。电弧放电往往是放电间隙中排屑不良，或脉冲间隔过小来不及消电离恢复绝缘，或脉冲电源损坏变成直流放电等所引起的。

(10) 放电通道 又称电离通道或等离子通道，是介质击穿后极间形成的导电的等离子体通道。

(11) 放电间隙  $G$  ( $\mu\text{m}$ ) 放电时电极间的距离。它是加工电路的一部分，有一个随击穿而变化的电阻。

(12) 电蚀 在电火花放电作用下蚀除电极材料的现象。

(13) 电蚀产物 指工作液中电火花放电时的生成物，主要包括从两电极上电蚀下来的金属材料微粒和工作液分解出来的游离炭黑和气体等。