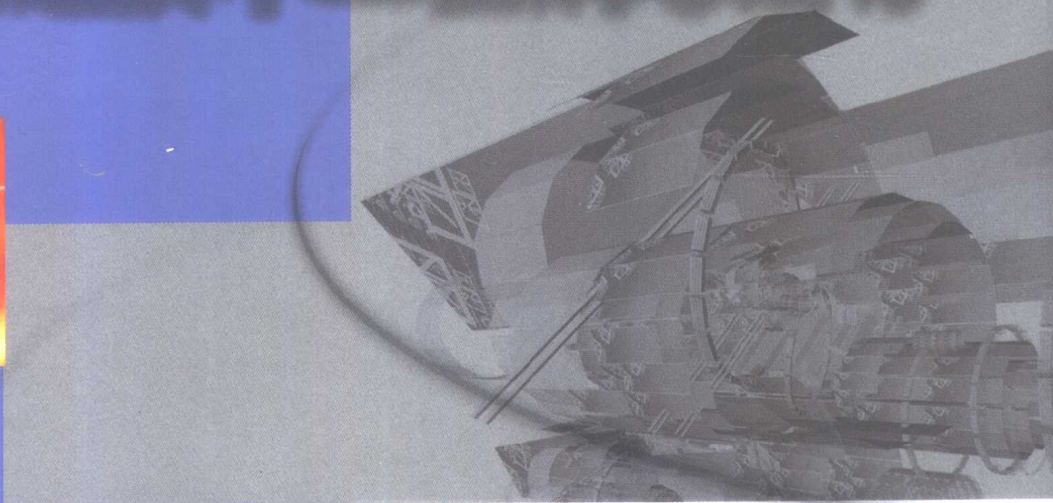


高等学校“工程材料及机械基础”课程系列用书

# 现代制造技术工程训练指导



● 合肥工业大学工业培训中心 编



合肥工业大学出版社

高等学校“工程材料及机械基础”课程系列用书

# 现代制造技术工程训练指导

合肥工业大学工业培训中心 编

主 编 宋树恢

副主编 胡友树

参 编 阚绪平 汪韶杰 盛英泰

合肥工业大学出版社

## 现代制造技术工程训练指导

---

出 版 合肥工业大学出版社  
地 址 合肥市屯溪路 193 号  
电 话 总编室:0551-2903038 发行部:0551-2903198  
版 次 2004 年 7 月第 1 版 印 次 2004 年 7 月第 1 次印刷  
开 本 787×1092 1/16  
印 张 13.5 字 数 310 千字  
印 数 1-6 000  
发 行 全国新华书店  
印 刷 合肥现代印务有限公司  
邮 编 230009  
网 址: www.hfutpress.com.cn E-mail: press@hfutpress.com.cn

---

ISBN 7-81093-073-7/TH·2 定价:20.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换

## 前 言

工程训练是一门实践性很强的技术基础课。国家教育部“工程材料及机械基础”课程指导小组对系列课程教学有基本要求,其中要求工程训练中现代(先进)制造技术的训练课时须占实习总课时的 20%~40%。根据这一要求,几年来,本中心陆续开设了数控车和数控铣、CAD/CAM 计算机辅助设计制造、电火花数控线切割、电火花成型加工、电解加工等现代制造技术的训练课程,并逐步达到了占实习总课时的 30%左右。在教学过程中,我们精心编写了大量讲义。在此基础上,我们又对其进行了仔细推敲和认真修改,并根据需要增添了新的内容,最后形成本书。

本书既然是工程训练的指导书,故主要篇幅为操作指导,并兼顾工艺知识,以便学生在进行设备操作训练时对照使用。

若本书的内容在工程训练中能安排 30%以上的课时,建议软件及编程安排 12 小时,数控车床操作安排 16 小时,数控铣床操作安排 24 小时,其他制造方法安排 12 小时;当学时较少时可对内容作适当筛选,或以操作为主,编程部分可在课外执行;当学时较多时(如培训班使用)可适当增加工艺参数内容。软件使用及设备操作若采用多媒体教学则效果更为显著。

学生在使用本指导书时,应先认真阅读操作内容,听课时注意讲解要点,做到动手之前心中有数,忌盲目上机操作。

参加本书编写的均是本中心具有丰富教学经验的指导教师。他们的具体工作为:绪论(宋树恢、胡友树),第 1 章(汪韶杰、宋树恢),第 2 章(宋树恢、阚绪平),第 3 章(阚绪平、汪韶杰),第 4 章(胡友树、盛英泰),第 5 章(宋树恢、胡友树),第 6 章(阚绪平、盛英泰)。全书由宋树恢统稿。

由于时间仓促,书中难免存在欠妥甚至错误之处,欢迎广大读者批评指正。

编 者  
2004 年 6 月

# 目 录

|                        |      |
|------------------------|------|
| 绪论                     | (1)  |
| 第1章 电火花线切割加工           | (6)  |
| 1.1 电火花线切割加工概述         | (6)  |
| 1.1.1 电火花线切割原理         | (6)  |
| 1.1.2 火花放电与电弧放电的区别     | (7)  |
| 1.1.3 电火花线切割的特点及应用范围   | (7)  |
| 1.2 电火花线切割机床           | (8)  |
| 1.2.1 数控电火花线切割机床的型号及参数 | (8)  |
| 1.2.2 数控电火花线切割机床的机械结构  | (9)  |
| 1.2.3 工作液系统            | (9)  |
| 1.2.4 电气系统             | (10) |
| 1.2.5 计算机控制系统          | (10) |
| 1.3 线切割机床的操作和加工工艺      | (11) |
| 1.3.1 线切割机床的操作         | (11) |
| 1.3.2 线切割加工工艺          | (12) |
| 1.4 控制系统的使用            | (13) |
| 1.4.1 控制屏幕             | (13) |
| 1.4.2 系统功能             | (15) |
| 1.5 加工程序               | (19) |
| 1.5.1 编程格式             | (19) |
| 1.5.2 自动编程             | (20) |
| 1.5.3 编程示例             | (27) |
| 1.6 电火花线切割加工的安全操作技术规范  | (30) |
| 复习思考题                  | (30) |
| 第2章 电火花成型加工            | (31) |
| 2.1 电火花成型加工原理          | (31) |
| 2.1.1 电火花加工概述          | (31) |
| 2.1.2 电火花成型加工的特点及主要用途  | (31) |
| 2.1.3 电火花加工原理          | (32) |
| 2.1.4 电火花加工介质          | (33) |
| 2.1.5 电火花成型电极          | (34) |
| 2.2 电火花成型加工工艺          | (35) |
| 2.2.1 电火花加工工艺指标        | (35) |

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| 2.2.2 放电参数                       | (36) |
| 2.3 数控电火花成型机床的结构及操作              | (38) |
| 2.3.1 电火花成型机床的结构                 | (38) |
| 2.3.2 电火花成型机床数控系统                | (39) |
| 2.3.3 电火花成型机床数控系统屏幕操作            | (41) |
| 2.3.4 电火花成型机床加工方法                | (44) |
| 2.3.5 塑料注塑模加工方法                  | (45) |
| 2.3.6 电火花加工安全操作                  | (46) |
| 复习思考题                            | (46) |
| 第3章 数控雕铣机床                       | (47) |
| 3.1 数控雕铣机床简介                     | (47) |
| 3.1.1 数控雕铣机床的组成                  | (47) |
| 3.1.2 数控雕铣机床的运动方式                | (48) |
| 3.2 SKY2000N 数控系统简介              | (48) |
| 3.2.1 SKY2000N 数控系统工作原理和控制组成     | (48) |
| 3.2.2 SKY2000N 数控系统的启动           | (48) |
| 3.2.3 SKY2000N 数控系统的显示装置、鼠标及键盘设定 | (49) |
| 3.2.4 SKY2000N 系统的关闭             | (51) |
| 3.3 SKY2000N 数控系统操作方式及功能阐述       | (51) |
| 3.3.1 进入 SKY2000N 系统             | (51) |
| 3.3.2 F1 自动方式操作                  | (52) |
| 3.3.3 F2 手轮方式操作                  | (54) |
| 3.3.4 F3 手动方式操作                  | (55) |
| 3.3.5 F4 返参方式操作                  | (58) |
| 3.3.6 F5 管理方式操作                  | (61) |
| 3.4 数控雕铣机床的编程                    | (62) |
| 3.4.1 系统定义                       | (62) |
| 3.4.2 SKY2000N 适用的 G 代码          | (63) |
| 3.4.3 进给功能(F)                    | (64) |
| 3.4.4 坐标系统                       | (65) |
| 3.4.5 数控雕铣机床常用指令                 | (66) |
| 3.4.6 机床辅助功能(M)                  | (70) |
| 3.4.7 数控雕铣机床编程运用实例               | (71) |
| 复习思考题                            | (72) |
| 第4章 数控车削加工                       | (73) |
| 4.1 数控车床概述                       | (73) |
| 4.1.1 数控加工的定义和特点                 | (73) |
| 4.1.2 数控车床分类                     | (74) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 4.1.3 数控车床的组成                | (75)  |
| 4.2 数控车床加工工艺分析               | (77)  |
| 4.2.1 数控加工工艺设计内容             | (77)  |
| 4.2.2 数控加工工艺设计过程             | (78)  |
| 4.3 数控车床编程基础                 | (84)  |
| 4.3.1 数控编程的作用与目的             | (84)  |
| 4.3.2 数控车床编程的内容与方法           | (84)  |
| 4.3.3 零件加工程序的结构和格式           | (86)  |
| 4.3.4 数控车床坐标系                | (88)  |
| 4.4 数控车床基本功能                 | (91)  |
| 4.4.1 准备功能                   | (91)  |
| 4.4.2 辅助功能                   | (92)  |
| 4.4.3 主轴功能、刀具功能、进给功能         | (93)  |
| 4.5 手工编程基础                   | (94)  |
| 4.5.1 绝对值和增量值编程 G90、G91      | (94)  |
| 4.5.2 坐标系设定与选取               | (95)  |
| 4.5.3 G00 快速定位               | (96)  |
| 4.5.4 G01 直线插补               | (97)  |
| 4.5.5 G02、G03 圆弧插补           | (98)  |
| 4.5.6 G04 暂停                 | (100) |
| 4.5.7 G20、G21 英制与公制转换        | (100) |
| 4.5.8 G27 回参考点检验、G28 自动返回参考点 | (100) |
| 4.5.9 螺纹加工                   | (101) |
| 4.5.10 单一固定循环加工              | (104) |
| 4.5.11 多重复合循环加工              | (109) |
| 4.5.12 刀具补偿功能                | (115) |
| 4.6 数控车床操作技术                 | (118) |
| 4.6.1 数控车床系统操作面板             | (118) |
| 4.6.2 CNC 系统 MDI 操作面板        | (118) |
| 4.6.3 机床操作面板                 | (121) |
| 4.6.4 数控车床操作方法               | (126) |
| 4.7 数控车床编程实例                 | (137) |
| 复习思考题                        | (143) |
| 第 5 章 数控铣削加工                 | (145) |
| 5.1 数控铣床的结构                  | (145) |
| 5.1.1 数控铣床的床身结构              | (145) |
| 5.1.2 数控铣床的导轨结构              | (146) |
| 5.1.3 数控铣床的主轴结构              | (146) |

|        |                           |       |
|--------|---------------------------|-------|
| 5.1.4  | 数控铣床的丝杠及伺服机构 .....        | (147) |
| 5.1.5  | 数控铣床的常用控制系统 .....         | (147) |
| 5.1.6  | 数控铣床的刀库结构 .....           | (147) |
| 5.2    | 数控铣床使用基本知识 .....          | (148) |
| 5.2.1  | 数控铣床的坐标 .....             | (148) |
| 5.2.2  | 数控铣加工工艺基础 .....           | (148) |
| 5.3    | 数控铣简明编程指南 .....           | (150) |
| 5.3.1  | 坐标系与坐标系原点 .....           | (150) |
| 5.3.2  | 输入单位及小数输入 .....           | (151) |
| 5.3.3  | 程序及子程序 .....              | (151) |
| 5.3.4  | F 指令 .....                | (152) |
| 5.3.5  | S 指令 .....                | (152) |
| 5.3.6  | G 指令 .....                | (152) |
| 5.3.7  | 变量 .....                  | (160) |
| 5.3.8  | 宏程序 .....                 | (160) |
| 5.3.9  | M 指令 .....                | (161) |
| 5.3.10 | T 指令 .....                | (161) |
| 5.3.11 | 综合示例 .....                | (162) |
| 5.4    | 数控铣床的操作 .....             | (163) |
| 5.4.1  | 三菱系统 .....                | (163) |
| 5.4.2  | FANUC 0i 系统 .....         | (171) |
| 5.4.3  | 数控铣床 DNC 联机操作 .....       | (177) |
|        | 复习思考题 .....               | (179) |
| 第 6 章  | CAXA 制造工程师 .....          | (180) |
| 6.1    | CAXA 制造工程师软件简介 .....      | (180) |
| 6.2    | CAXA 制造工程师软件的零件造型 .....   | (180) |
| 6.2.1  | CAXA 制造工程师软件的用户界面 .....   | (180) |
| 6.2.2  | CAXA 制造工程师软件的零件造型实例 ..... | (183) |
| 6.3    | CAXA 制造工程师软件的数控编程 .....   | (192) |
| 6.3.1  | 设定工件加工区域 .....            | (192) |
| 6.3.2  | 生成刀具轨迹的参数设置 .....         | (192) |
| 6.4    | 后置处理 .....                | (196) |
| 6.4.1  | 后置设置 .....                | (196) |
| 6.4.2  | 生成 G 代码 .....             | (197) |
| 6.5    | CAXA 制造工程师软件零件加工实例 .....  | (198) |
| 6.5.1  | 连杆加工实例 .....              | (198) |
| 6.5.2  | 加工实例总结 .....              | (201) |
| 附录     | .....                     | (203) |



# 绪 论

现代制造技术,有时也称先进制造技术,一般是指数控加工技术和除常规加工以外的所有特种加工技术。现在,各工业化国家都视制造技术为发展生产最主要的竞争手段,制订了一系列振兴计划,建立了世界级制造技术中心,把现代制造技术列为国家关键技术和优先发展领域。我国早在第九个“五年计划”中就已经把现代制造技术列为重点发展领域,高等学校的“211”工程也把现代制造技术列入优先发展课题。现代制造技术的应用,加快了产品设计开发的周期,极大地降低了生产成本,企业效益和劳动生产率明显提高。现代制造技术已经成为带动制造业发展的重要推动力。一个以现代制造技术为核心的科技竞争局面已经展开,一个以现代制造技术为重点的工业革命时代已经到来。

## 1. 数控技术

### (1) 数控技术概述

数控技术和数控装备是制造工业现代化的重要基础。这个基础直接影响国家的经济发展和综合国力,关系到国家的战略地位。因此,世界各工业发达国家均采取特别措施来发展自己的数控技术及其产业。在我国,数控技术与装备的发展亦得到了高度重视,近年来取得了相当大的进步。特别是在通用微机数控领域,以PC平台为基础的国产数控系统,已经走在了世界前列。数控机床的性能价格比不断提高,数控机床逐步普及,企业大量使用数控机床,社会数控机床的保有量大幅度上升,数控机床操作工的需求激增,数控加工技术成为制造业的支柱。

### (2) 数控技术的现状

数控加工技术自20世纪50年代初由美国首次试制使用具有信息存储和处理控制操作功能的机床以来,经历半个多世纪的发展,数控系统由最初的电子管、分立式晶体管、小规模集成电路、大规模集成电路到超大规模集成电路。尤其自20世纪80年代以来,数控装置广泛采用32位至64位CPU组成的微处理器,极大地提高了系统的集成度,使体积缩小,结构模块化;驱动装置广泛采用交流伺服、数字化;CNC系统人工智能化;广泛采用功能全面的自动编程系统并具有多种通信功能;数控系统可靠性不断提高。近年,随着计算机技术的迅猛发展,不同层次的开放式数控系统应运而生,目前正朝标准化开放体系结构前进。就其结构形式而言,当今世界上数控系统大致可分为4种类型:

① 传统数控系统:如FANUC 0、三菱MELDAS 50M、Siemens 810等。这是一种专用的封闭体系数控系统。虽然可以由用户做人机界面,但须使用专门的开发工具,它的功能扩展和改变都需要系统供应商协助。目前,这类专用系统为数控系统主流。随着开放体系数控系统的发展,传统数控系统的市场正在受到挑战。

② “PC嵌入NC”开放式数控系统:如FANUC18i、16i、Siemens 840D等数控系统。由于数控系统制造商不愿放弃多年积累的数控软件技术,又想利用计算机丰富的软件资源开发的产

品,因此,尽管它具有一定的开放性,但它的 NC 部分仍然是传统数控系统,用户仍无法介入数控系统的核心。这类系统结构复杂、功能强大,且价格不菲。

③ “NC 嵌入 PC” 开放式数控系统:采用开放体系运动控制卡 + PC 机构成。运动控制卡通常选用高速 DSP 作为 CPU,具有很强的运动控制和 PLC 控制能力。开放的函数库供用户在 Windows 平台下自行开发构造所需的控制系统。如美国用 PMAC 多轴运动控制卡构造的 PMAC - NC 数控系统。

④ SOFT 开放数控系统:这是一种最新开放体系数控系统。它提供用户最大的可选择性和灵活性。CNC 软件全部装在计算机中,而硬件采用计算机与伺服驱动和外部 I/O 之间的标准化通用接口连接,相当于计算机中安装硬件驱动程序。用户可在 Windows 平台上利用开放的 CNC 内核,开发所需的功能,构成各种类型的高性能数控系统。与前几种数控系统相比,SOFT 开放数控系统具有最高的性能价格比,未来最具有生命力。

### (3) 我国数控技术发展现状

我国数控技术经过 20 余年的发展,已基本掌握了关键生产技术,开发了具有中国自主知识产权的数控技术平台,建立了一批数控系统生产基地,初步形成了自己的数控产业,如武汉华中“世纪星”、北京 KND、广州 GSK 等,这些产品的共同特点是数控功能较齐全,价格低,可靠性较强。近年,在中国的外资企业如北京 Siemens 公司推出的 802S、大连大森公司推出的大森 III 数控系统等。这些系统技术性能一般,但质量可靠,加上品牌宣传,占据了一部分低端市场。这些年来尽管我国数控技术的发展取得了不少成绩,但与国外的发展速度和水平相比,差距还很大。国产数控系统的竞争力还较低,中高档数控系统基本上被国外产品所垄断。

### (4) 数控技术的发展趋势

数控机床的总体发展趋势是:

① 性能方面:新一代数控机床面向高速、高效、高精度化方向发展。高速主轴单元如大功率高速电主轴,高速及高加 / 减速度的进给运动部件如高加 / 减速度直线电机驱动进给部件均已实用化。精度方面,普通数控机床的综合加工精度提高了一倍,加工精度已由过去的  $\pm 10 \mu\text{m}$  提高到  $\pm 5 \mu\text{m}$ ,精密级加工中心的加工精度从过去的  $\pm 3 \mu\text{m} \sim \pm 5 \mu\text{m}$ ,提高到  $\pm 1 \mu\text{m} \sim \pm 1.5 \mu\text{m}$ 。群控系统的柔性方面,数控机床的应用从数控单机、加工中心和数控复合加工机床向柔性自动化生产线和网络集成制造系统方向发展。工艺复合性和多轴化方面,实现自动换刀、自动旋转变换主轴头方位和更换主轴头或转台等各种措施,完成多工序、多表面的复合加工。数控机床的可靠性提高,品牌厂家生产的整机平均无故障运行时间已经超过 3000 小时。

② 功能方面:向用户界面图形化、可视化方向发展。日趋成熟的系统在 CAD/CAM 计算机辅助设计制造平台上的直接应用,使机床具有自动编程、学习指导、工艺参数自动生成、刀具尺寸自动补偿和刀具动态管理、运动参数动态补偿等功能以及加工过程的可视化仿真演示,真正实现无图纸制造技术。插补和补偿方式多样化,尤其是与速度相关的前馈补偿、温度补偿、平滑接近和退出补偿等,使机床的实用功能有了较大的扩展。内装高性能 PLC 模块,直接利用梯形图或高级语言编程,可以直观在线调试。多媒体技术在实时监控系统和现场故障诊断、生产过程参数监测方面有着重大的应用价值。

③ 体系结构方面:集成化、模块化——系统形成标准系列化产品,通过积木方式进行功

能裁剪和模块增减,构成不同档次的数控系统。使系统更加适应数控机床多品种、小批量的特点,性能价格比显著提高。网络化——机床可实行远程控制和无人操作。

④ 智能化方面:随着人工智能技术在计算机领域的超常规发展,数控系统引入如前馈控制和电机参数的自适应运算、模糊系统和神经网络控制机理、智能化主轴交流伺服驱动和智能化进给伺服装置、自动识别负载并自动优化调整参数等。尤其是加工效率和加工质量方面的智能化,如为提高驱动性能及使用连接方便方面的智能化、自动选定模型、自整定等,大大方便了系统的使用和机床的操作。

## 2. 特种加工

### (1) 特种加工概述

所谓特种加工是相对于常规加工而言的,也可以称之为非传统性加工或称非常规加工。特种加工的概念也是相对的,一些过去认为是特种加工的方法,如电火花加工,现在已十分普及,而新近出现的快速成型制造又纳入特种加工范畴,其内容将随着加工技术的发展而变化。我们这里用不很严格的范畴来概括先进制造技术,主要指除常规(传统)加工以外的所有特种加工技术。

特种加工是指利用磁、电、光、热、力、声、原子等各种能源,用物理的、化学的方法去除或添加材料或连接以达到零件设计要求的加工方法的总称。由于这些加工方法的加工机理以溶解、熔化、气化、剥离为主,且多数为非接触加工,因此它对于高硬度、高韧性材料和复杂形面、低刚度零件来说是无法替代的加工方法。特种加工是对传统机械加工方法的有力补充和延伸,并已成为机械制造领域中不可缺少的技术内容。目前,这一技术正向着自动化、柔性化、精密化、集成化、智能化和最优化方向发展。在已有的工艺不断完善和定型的同时,新的特种加工技术又在不断涌现,如快速成型制造技术、等离子体熔射成型工艺技术、在线电解修整砂轮镜面磨削技术、实变场控制电化学机械加工技术、三维型腔简单电极数控电火花仿铣技术、电火花混粉大面积镜面加工技术、磁力研磨技术和电铸技术等。新的特种加工技术是在传统的特种加工技术的基础上,紧密结合材料、控制和微电子技术而发展起来的,并随着产品的需要快速向前发展,且正在形成面向快速制造的特种加工技术新体系。

目前对特种加工技术的机理及应用的研究工作方兴未艾,虽然对许多特种加工而言还没有从根本上掌握其工艺特性,然而这些新兴的特种加工技术已对整个制造业的生产模式产生了深刻的影响。

特种加工的微观理化过程非常复杂,往往涉及电磁场、热力学、流体力学、电化学等诸多领域,其加工机理的理论研究极其困难,通常很难用简单的解析式来表达。近年来,虽然各国专家采用各种理论对不同的特种加工技术进行了深入的研究,并取得了卓越的理论成就,但离定量实际应用尚有一定的距离。然而每一种特种加工方法所获得的加工精度和表面质量与加工条件参数间都是有规律的,因此,目前常采用研究传统切削加工机理的实验统计方法来了解特种加工的工艺规律,以便实际应用,但还缺乏系统性。受理论研究水平的限制,目前特种加工的工艺参数停留在经验参数阶段,主要凭经验选取,还难以实现最优化和自动化。虽然已有一些专家对 CAD、CAPP 和 CAM 开展了一些研究,并取得了一些成果,但由于工艺数据的缺乏,仍未有成熟的可供特种加工使用的商品化 CAD/CAM 系统问世。通常只能部分采用 CAD 造型、生成特种加工参数数据。随着模糊数学、神经网络及专家系统等多种人工智能技术的成熟发

展,人们开始尝试利用这一技术来建立加工效果和加工条件之间的定量化的精度、效率、经济性等实验模型,并开始获得初步的成果。因此,通过实验建模,将典型加工实例和加工经验作为知识存储起来,建立描述特种加工工艺规律的可扩展性开放系统的条件已经逐步成熟,并为进一步开展特种加工工艺过程的计算机模拟,应用人工智能选择零件的工艺规程和虚拟加工奠定了基础。

## (2) 特种加工的分类

目前特种加工的分类方法很多。这里首先按照材料的去除、堆积和连接分类,然后再按照加工手段分类。

### ① 去除加工

电物理加工:利用电能转换为热能进行加工,如电火花加工、电火花线切割加工、等离子体加工、高能电子束加工等;利用电能转换为机械能进行加工,如离子束加工等。

电化学加工:利用电能转换为化学能进行加工,如电化学抛光、电化学去毛刺、电解加工、电镀加工等。

物理加工:利用声能转换为机械能进行加工,如超声波加工;利用光能转换为热能进行加工,如激光束加工等。

化学加工:利用化学能或光能转换为化学能进行加工,如化学抛光、化学铣削、光刻加工(即刻蚀加工、光化学加工)等。

力学加工:借助机械能进行加工,如磨粒流加工、磨料喷射加工、液体喷射加工等。

复合加工:将常规加工方法和特种加工方法叠加在一起进行加工,如电解磨削、电解珩磨、超声电解磨削等。

### ② 堆积加工

物理加工:利用原子沉积加工,如离子镀、蒸镀、熔化镀等。

化学加工:化学气相沉积、化学镀等。

电化学加工:电镀、电铸、刷镀等。

### ③ 连接加工

激光焊接、化学粘接等。快速成型制造也可以纳入这一范畴。

快速成型技术是近年发展起来的特种加工方法之一,已成为复杂原形和模具制作最快速、最有效的手段。快速成型采用材料堆积(连接)成形的原理,突破了传统的除去材料的机械加工方法,在不需要工具或模具的情况下,将设计图纸或 CAD 模型迅速制造成任意复杂形状又具有一定功能的三维实体模型或直接生成零件。其方法主要有:

用激光选择性烧结金属粉末,直接生成金属零件或金属模具。

用立体光造型、熔融沉积造型、分层实体造型直接制造光敏树脂、ABS 塑料零件或模具。

用激光选择性烧结造型直接生成树脂砂型或消失模,实现零件的快速精密铸造。

用快速成型原型与电铸、金属喷涂结合快速制造金属、陶瓷模具。

用快速成型原型浇注硅橡胶、环氧树脂或聚氨酯等软材料,直接制造软模具。

用快速成型原型制作的母模涂刷导电层,再电铸或电镀成金属电极。

用快速成型原型制作的母模内填充石墨粉与粘接剂的混合物,固化成石墨电极。

目前比较成熟并已商品化的快速成型技术有立体光造型、激光选择性烧结造型、分层实体

造型、熔融沉积造型等,并与特种加工技术结合,利用特种加工技术在精度和效率方面的优势,扩展了快速成型技术的应用范围。

### 3. 高等学校学生如何学好现代制造技术

目前国内高等学校对现代制造技术的应用和实践教学十分重视,相继建立了现代制造技术训练基地,加强了学生对现代制造技术操作技能的培训。学生在这方面的兴趣也很高,现代制造技术的训练课程普遍受到学生的欢迎。

但现代制造技术涉及的知识面广、内容宽,设备品种规格多、购置费用也非常高,同时由于学生人数较多,设备数量有限。因此,任何一所学校都不可能把所有现代制造技术涉及到的最前沿的技术和设备情况全部介绍给学生,如何学习好现代制造技术则需要引导。

首先,学生参加现代制造技术实习,应重在了解现代制造技术的某些加工手段与传统加工手段的区别和创新之处;了解是加工能源或加工工艺的根本变革还是控制方法的变化(前者需要彻底摆脱传统加工方法的束缚,后者可以借鉴传统加工工艺)。特别是用传统制造技术和现代制造技术两种不同的方法来加工同一类工件时,要注意比较其效果,找到适用的方法。

其次,现代制造技术大多借助计算机控制,这方面是学生的强项,但也要防止学生重视计算机使用轻视设备操作,形成新的“重软轻硬”的倾向。必须加强对设备操作训练,特别是对技术参数选择和设备操作手法的训练。

再次,除了加强对设备操作的训练外,对设备本身结构的组成和控制系统也需要投入较多的注意,做到不但知其然,还要知其所以然,以区别于纯操作工。

由于实习时间有限,因此在有限的时间内,不一定非要面面俱到,应当在全面了解的基础上,重点掌握好一到两种现代制造技术。

# 第 1 章 电火花线切割加工

## 1.1 电火花线切割加工概述

电火花线切割是电火花加工的一种,根据走丝速度可分为快走丝和慢走丝两种。快走丝又称高速走丝,一般走丝速度在  $8\text{ m/s} \sim 10\text{ m/s}$ ;慢走丝又称低速走丝,一般走丝速度在  $10\text{ m/min} \sim 14\text{ m/min}$ 。电火花线切割的加工精度可达  $\pm 0.01\text{ mm}$ ,表面粗糙度可达  $R_a 1.25\text{ }\mu\text{m} \sim R_a 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 。电火花线切割所用的电极丝一般是钼丝或铜丝,所用的工作液是绝缘体且具有良好的消除电离性能。

近年来数控电火花线切割得到迅速普及,已成为我国中小型冲裁模加工的主要工艺方法,在其他加工领域也有广泛的应用。我国的数控线切割机床拥有量居世界首位,但以快走丝线切割机床为主,慢走丝线切割机床目前还较少。本书主要介绍快走丝线切割机床的结构及应用。

### 1.1.1 电火花线切割原理

电火花线切割加工是通过线状工具电极(电极丝)与工件电极(被加工的工件)之间的脉冲放电进行加工。图 1-1 是电火花线切割加工的工作原理示意图。

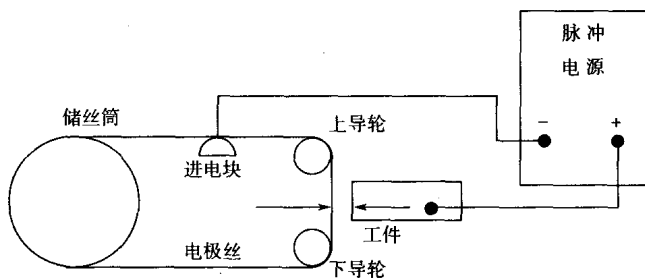


图 1-1 电火花线切割加工原理示意图

一般情况下,脉冲电源阳极接工件,阴极接电极丝,切割时电极丝在轴向以一定的速度相对工件移动,并与工件保持一定的放电间隙,当电极丝与工件之间的间隙小到一定程度时,本来绝缘的工作液被击穿,产生脉冲火花放电,瞬时的局部高温将金属蚀除,并由乳化液带走。

这种加工是电力、热力、磁力和流体力学的综合作用过程,可分为四个加工阶段。

(1) 产生放电通道。线切割加工使用的乳化液是绝缘的,当脉冲电压加在电极丝和工件之间时,极间产生高压电场,在电场作用下,阴极的自由电子向阳极高速运动,而高速运动的电子撞击到工作液介质的分子和中性原子,加速了电离过程,产生了更多的负电子和正离子,形成

雪崩式电离,极间被击穿,形成放电通道。通常电场强度达到  $10^2 \text{ V/mm} \sim 10^5 \text{ V/mm}$ 。

(2) 极间放电。在放电通道形成后,电子高速冲击阳极(工件),同时正离子也高速冲击阴极,在  $10^5 \text{ A/cm}^2 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$  的电流作用下,中心通道温度可达到  $10\,000\text{ }^\circ\text{C}$  以上,瞬时压力约  $10^7 \text{ Pa}$ 。在高温高压的剧烈冲击下,两极产生局部熔化和气化。由于这种高温和高压是发生在局部微小范围,在总体上对工件并没有带来太大的温升和冲击力。

(3) 熔蚀材料的剥离。高压高温下,电极材料在熔化、气化的时候会局部发生爆炸,抛出部分蚀除物,同时极间介质也被气化,形成气泡,并吸附在电极表面。在放电结束时,气泡在惯性作用下进一步扩张,形成低压,熔蚀材料在低压作用下汽化沸腾,爆沸力将其抛出,并在工作液中凝固成小颗粒。工件表面留下了很小的一个放电凹坑。

(4) 消除电离。一次脉冲放电结束后,带电粒子迅速减少,原来已被击穿的介质恢复绝缘,为下一次放电做好了准备。如果消除电离不充分,会产生电弧放电,对加工有不利影响。

### 1.1.2 火花放电与电弧放电的区别

火花放电时介质击穿后伴有放电火花,放电通道中电流密度很大,温度很高。电弧放电是一种渐趋稳定的放电,放电集中在一点,而且是连续的,常常引起电极丝和工件的烧伤。我们可以把火花放电和电弧放电的区别归纳成以下几条:

(1) 火花放电爆炸力强、蚀除量大,是一个非稳定的脉冲放电过程;电弧放电爆炸力弱、蚀除量小,是一个稳定的放电过程。

(2) 火花放电击穿电压高,电弧放电击穿电压低。

(3) 火花放电的伏安特性曲线为负值,其通过介质的电流随着极间电压的减小而增大;电弧放电的伏安特性为正值,其通过介质的电流随着极间电压的减小而减小。

(4) 火花放电的通道形状为鼓形,电弧放电的放电通道为圆锥形,阳极小、阴极大。

(5) 火花放电温度高( $10\,000\text{ }^\circ\text{C} \sim 12\,000\text{ }^\circ\text{C}$ ),电弧放电温度相对较低( $7\,000\text{ }^\circ\text{C} \sim 8\,000\text{ }^\circ\text{C}$ )。

(6) 火花放电阳极蚀除量远多于阴极,电弧放电阴极蚀除量多于阳极。

由此可以看出,在电火花线切割时,我们必须保证电极丝和工件之间是火花放电,而不是电弧放电,这样才能保证加工顺利进行,并获得较好的表面质量和加工精度。

### 1.1.3 电火花线切割的特点及应用范围

电火花线切割加工有以下特点:

(1) 加工不受工件材料硬度的影响,材料的可加工性与其导电性能、热学性能有关。

(2) 适合加工形状复杂的直纹面。因为电极丝较细,也可加工异形孔、窄缝等常规加工手段难以加工的尺寸形状,还可以对工件进行套料加工。

(3) 因为切削力很小,可对刚度较低的材料和零件进行精密加工和精细加工。

(4) 加工生产率较低,但不需制作成型的工具电极,适于单件、小批量生产,大大缩短了新产品研发试制的周期。

(5) 工件表面存在电蚀硬层,这种表面由放电凹坑组成,使工件表面硬度得到提高,但因其不易去除,所以给后续工序加工带来一定困难。

(6) 加工精度较高,一次装夹后完成全部加工,一般情况下不需要先粗加工再精加工。

由于电火花线切割具有以上特点,所以广泛用于汽车、电子、仪器、仪表等精密机械领域,

并在加工精密冲模、样板及其他异形零件方面有着非常大的优势。

## 1.2 电火花线切割机床

线切割机床主要由机械系统、工作液系统、电气系统、计算机控制系统等部分组成。图 1-2 是线切割机床主体结构示意图。

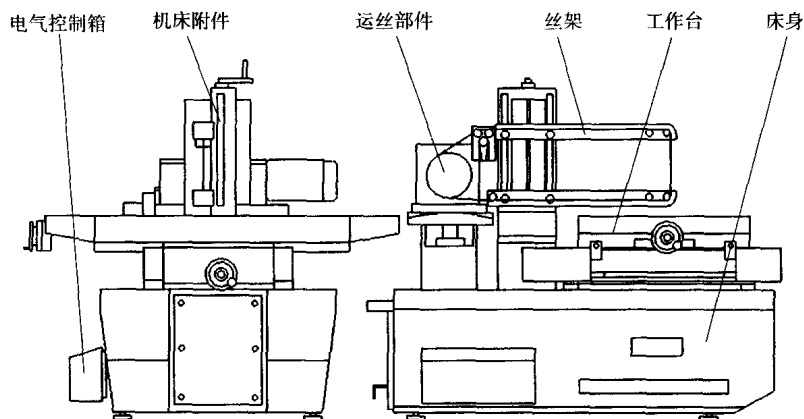
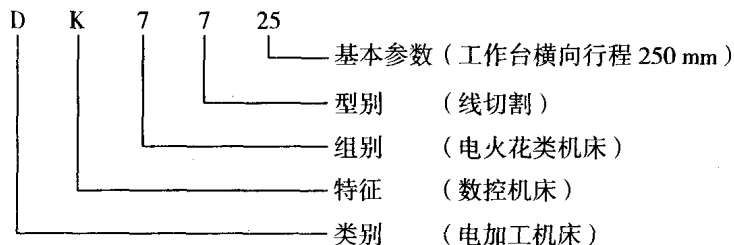


图 1-2 线切割机床主体结构示意图

### 1.2.1 数控电火花线切割机床的型号及参数

数控电火花线切割机床型号含义如下(以 DK7725 为例)：



有些机床型号后面还加了 C 或 E。C 表示可调线架，E 表示锥型线架。

数控电火花线切割机床的主要技术参数包括：

(1) 工作台行程：横向与纵向的工作台行程直接限制了机床可加工的最大尺寸，例如行程  $250 \times 100$  的机床显然不可能加工尺寸为  $300 \times 100$  的矩形。

(2) 最大切割厚度：不同的线切割机床其功放的输出功率、脉冲宽度调节范围、加工电压和加工电流的调节范围、走丝速度都不一样，这也就导致了可切割的最大厚度不同，如果加工的零件超过了最大切割厚度，很容易导致电极丝短路、断丝等现象发生。

(3) 加工精度：加工精度包括尺寸精度和表面粗糙度。这是机械加工中最基本的要求，加工精度的高低是一台机床性能好坏的重要标志。

(4) 功放管输出：功放管是并联使用的，其使用的多少关系到可加工的工件厚度和加工效率，但在加工一个具体的工件时，并不是使用的功放管越多就越好。因为，其选择越多，加工电



流就越大,工件表面的粗糙度也就越差。

除此之外,脉冲宽度、加工电压幅值、加工电流幅值和走丝速度等,也都是线切割机床的重要参数。

### 1.2.2 数控电火花线切割机床的机械结构

线切割机床的机械部分主要由床身、工作台总成、丝架导轮机构和储丝走丝机构四个部分组成。

(1) 床身:床身是用来支撑和固定其他零部件的基础,要求有较好的刚性和抗振性,一般为铸件。

(2) 工作台总成:线切割工作台由上拖板、中拖板、下拖板、丝杆螺母副和齿轮变速机构组成。工作台用于安装并带动工件在工作台平面内作 X、Y 两个方向的移动,每个方向都由一个步进电机驱动。当步进电机接收到控制系统给出的运动信号后,其转动一个步距角,这个转动通过消隙齿轮(一种使用两齿轮间带弹簧,靠弹性消除间隙的齿轮结构)和丝杆副带动工作台作出相应的位移,其导轨有滑动导轨和滚动导轨两种。滚动导轨的性能比较好,应用的也较多,一般分为力封式和自封式两种。因滚动导轨成本较高,而线切割机床的切削力小,工作台移动速度要求低,所以滑动导轨也很常用。电火花线切割机床的丝杆螺母副一般采用滚动丝杆螺母,有相当一部分使用双螺母并紧消除间隙的滚动丝杆螺母副。在一些先进的高精度慢走丝线切割机床上,采用直线电机驱动,不用齿轮和丝杆,实现所谓零间隙传动。

(3) 丝架导轮机构:丝架的作用是支撑电极丝,并使电极丝按给定的线速度运动,同时丝架还要保证电极丝与工作台之间的几何角度。丝架一般由丝架本体、电极丝保持器、导轮部件三部分组成。丝架本体有单臂支撑、双臂悬梁式和龙门三种结构形式。单臂支撑结构较为简单,性能也较差;双臂悬梁式结构性能稳定最为普及;龙门结构一般只在大型线切割机床上使用。针对不同厚度的工件,相当多的丝架上臂是可上下移动的,调节上下丝架臂后要注意锁紧。

导轮一般由硬度高、耐磨性好的材料制成,如 GCr15、W18Gr4V、陶瓷、金刚石等,起着对电极丝张紧和导向的作用。根据丝架的不同,也分单支承和双支承两种。导轮的轴向串动和径向跳动的大小,对加工质量有较大影响。

电极丝保持器是用来对电极丝往复运动进一步限位,以提高位置精度,保证加工质量。一般由红宝石或蓝宝石制成,分圆弧型、V 型、# 型等方式。保持器调节的好坏还直接影响导轮的使用寿命。

(4) 储丝走丝机构:该机构是用来带动电极丝按给定的线速度移动,并将电极丝整齐地绕在储丝筒上。它由储丝筒、拖板、齿轮副、丝杆副等零件组成。工作时安装在拖板上的储丝筒高速旋转,带动电极丝移动,同时拖板也作横向移动。当拖板接触到行程开关时,即反向移动,此时储丝筒也先减速再反转带动电极丝作反向移动,所以切割的持续时间不受电极丝长度的限制,可连续的运行下去。储丝筒因为要高速运转且频繁变速,所以要严格做好动平衡并减小转动惯量。储丝筒大多由铝镁合金制造。

### 1.2.3 工作液系统

工作液系统包括工作液箱、泵、阀、管道、过滤网和喷嘴等零部件组成,一般过程是由泵将