

数控电火花
线切割加工

数控电火花 线切割加工

〔日〕井上 潔 著

张耀中 姚汝彬 译

国防工业出版社

77
4

数控电火花线切割加工

〔日〕 井上 潔 著

张耀中 姚汝彬 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了数控电火花线切割加工的原理和特点,线切割机床的构造和控制系统的硬件、软件,程序的编制以及机床精度的激光测量方法。本书还分析了加工中出现的各种问题,如加工精度、表面光洁度、放电间隙长度、放电发生气体的作用、电极材料的反粘现象、电极丝振动效果、电极丝弯曲产生的误差等,并着重介绍了用去离子水作工作液时的加工特性。本书适用于从事电火花加工工作的技术人员和工人阅读,也可供大专院校师生参考。

ワイヤカット放電加工

NC-EDM

井上 潔 著

未踏加工技術協会1978年

*

数控电火花线切割加工

〔日〕 井上 潔 著

张耀中 姚汝彬 译

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 5⁸/₈ 114千字

1986年2月第一版 1986年2月第一次印刷 印数: 0,001—3,160册

统一书号: 15034·2930 定价: 1.15元

译 者 的 话

本书系统地阐述了数控电火花线切割加工技术，它与《放电加工原理》互为姊妹篇，同属于日本电加工技术协会的放电加工技术丛书。书中比较全面地叙述了机床结构、控制系统、工作原理、加工特性以及加工中出现的各种问题。

本书在翻译过程中，曾得到机械工业部自动化研究所姜亦琛同志及中国科学院电工研究所李安定同志的认真审校，在此表示衷心感谢。

由于我们的水平有限，错误之处在所难免，恳请批评指正。

1982.3.21

原 序

电火花线切割加工方法是苏联于 1955 年首先发表的, 欧洲也曾于 1960 年有过报导, 然而, 这种加工方法的应用日益增加, 则是最近几年的事, 它是七十年代后期才真正发展起来的新型加工方法。线切割装置早在 1960 年就已试制出来, 但由于当时的数字控制 (NC) 技术尚未达到现在的水平, 因而未能得到实际应用, 现在所使用的线切割装置有 90% 以上是最近几年制造的。可见, 电火花线切割加工 (NC-EDM) 技术仍处于发展之中, 有待于阐明的问题颇多, 而有关这方面的专著, 目前国内外还没有出版过一本。

电火花线切割加工, 采用机械强度不高的材料作电极, 以水为工作液, 本书就这种情况下的加工特性与用煤油作工作液时的加工特性作了对比, 以便使这方面的论述具有普遍性。此外, 电火花线切割加工与以往单一的特种加工方法不同, 它主要是由好几种现象组合的复合作用来实现加工的。例如有电火花加工和电解加工的复合作用, 也有放电压力变形和机械变形的复合作用, 其现象非常复杂。因此, 为使读者易于理解, 本书选用了一些实验例子加以阐述。再者, 电火花线切割加工装置几乎是无人操作的装置, 它堪称能长时间自动运行的 NC 加工装置的代表。从这个意义上讲, 电火花线切割加工是最新、最现代化的加工方式, 它展示了未来加工方式的发展方向。因此, 作者确信, 掌握电火花线切割加工技术就是掌握现代加工方式。

目 录

第一章	电火花线切割加工的特点	1
1.1	前言	1
1.2	从仿形装置到数字控制 (NC) 装置	2
第二章	电火花线切割加工的一般特性	10
2.1	加工机理	10
2.2	加工原理与总体结构	11
2.3	机床与电源	13
2.4	NC 装置的功能	16
第三章	水工作液的加工特性	21
3.1	用水作介质时的加工现象	21
3.2	加工屑与放电凹坑	23
3.3	加工速度 (包括电解作用)	25
3.4	水介质加工与煤油介质加工的比较	27
3.5	表面光洁度	29
3.6	放电间隙长度 (加工扩大量)	30
3.7	电导率的作用	31
3.8	各种材料的加工特性	32
3.9	用水工作液加工时电极材料的特性	33
3.10	工作液电阻的特性	36
第四章	用水作工作液的实际加工特性	40
4.1	实际加工速度	40
4.2	实际表面光洁度	42
4.3	实际电极损耗比	44
第五章	电火花线切割加工中的各种问题	48

第九章 电火花线切割加工实例 144

 (1) 冲压模..... 144

 (2) 粉末冶金模..... 145

 (3) 挤压模..... 146

 (4) 模型模..... 146

 (5) 压铸模..... 146

 (6) 零件加工..... 158

第十章 未来的电火花线切割加工技术 159

 (1) 机械加工方法的判断基准..... 159

 (2) 未来的加工方法..... 160

5.1	电极丝的弯曲量	48
5.2	方向改变时电极丝弯曲引起的加工误差	52
5.3	加工缝宽与放电间隙长度	58
5.4	加工面的表面光洁度	61
5.5	放电条件与气体发生量	63
5.6	放电发生气体的作用	64
5.7	电极材料反粘现象	65
5.8	电极丝的移动效果	68
5.9	电极丝振动效果	72
5.10	加工特性和理论上使用的加工速度	73
5.11	加工速度的实际考察	81
第六章	电火花线切割机床的构造	91
6.1	组成概要	91
6.2	机床构造	93
6.3	电极丝	95
6.4	工作液循环装置	96
6.5	数字控制装置	97
第七章	电火花线切割加工的精度	100
7.1	机床精度与加工精度	100
7.2	工件的变形与加工精度	108
7.3	斜度加工装置	112
7.4	加工进给速度与电极丝的弯曲量	115
7.5	电极丝滞后引起的误差	116
7.6	电极材料在加工面上的反粘	117
7.7	放电间隙长度的不均匀	119
第八章	NC 电火花线切割加工的控制	120
8.1	NC 的硬件	120
8.2	NC 控制系统	122
8.3	编程	124
8.4	NC 的软件	140

第一章 电火花线切割加工的特点

1.1 前 言

所谓电火花线切割机床，就是以移动着的细丝（直径约在 0.5 毫米以内）作电极，在电极丝与工件之间产生火花放电，并同时按所要求的形状驱动工件进行加工。

采取电极移动方式的电火花加工装置，国外称为电火花线切割（Wirecut EDM 或 Traveling-Wire EDM），有时也称之为电带锯（Electric Bandsaw），但这个称呼与电弧带锯（Arc Bandsaw）相近，所以一般都称为电火花线切割（Wirecut EDM）。苏联于 1955 年制成了电火花线切割机床，而瑞士于 1968 年制成了 NC 方式的电火花线切割机床。

电火花线切割加工与普通电火花加工不同之点，首先在于，电火花线切割是一边走丝一边放电，所以无需成形电极，而普通电火花加工，则非有成形电极不可。其次是工作液不同，普通电火花加工主要采用油类，而电火花线切割加工，则用水，主要是用去离子水。再者，电火花线切割加工已实现装置化，通常是一边移动工件，一边进行加工；或者使工件按仿形方式移动，或者借助数控驱动工件。特别是由于线切割使用水作工作液，加工特性与普通电火花加工相比，差别甚大。

下面，我们将着重说明用水作工作液时的加工特性，以及采用细丝电极，即线电极时，电极弯曲对加工精度的影响。

1.2 从仿形装置到数字控制 (NC) 装置

电火花线切割机床的主要部件, 如图 1.1 所示, 是由电极进给装置、工件进给装置以及工作液循环装置三部分组成的。1955年苏联提出的电火花线切割机床, 也具有图 1.1 中的装置, 只是工件的进给部分与现在的不同。

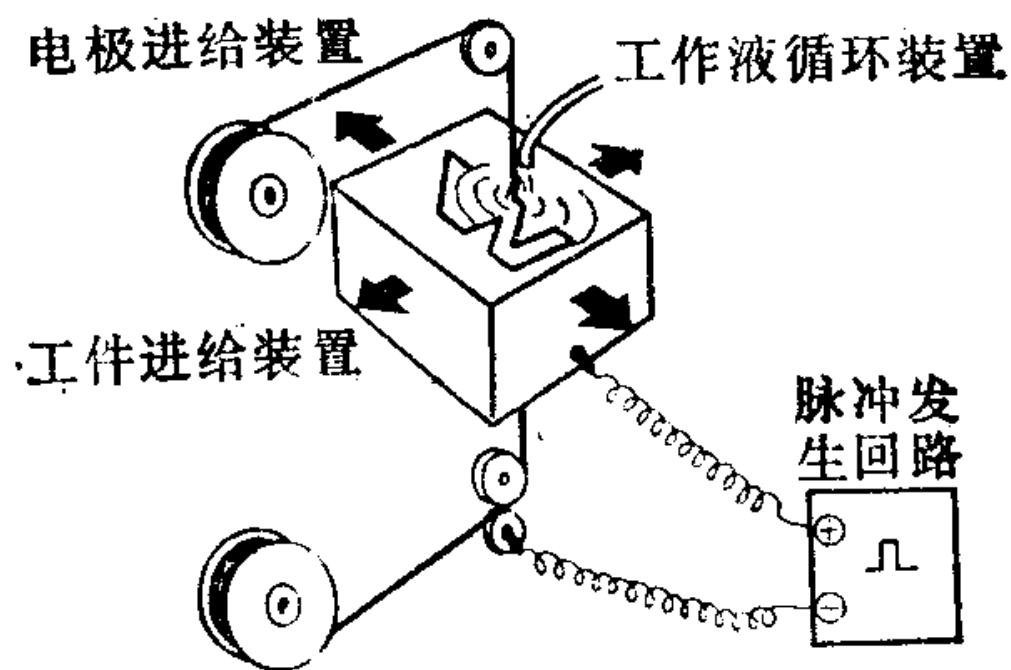


图1.1 电火花线切割机床的主要部件

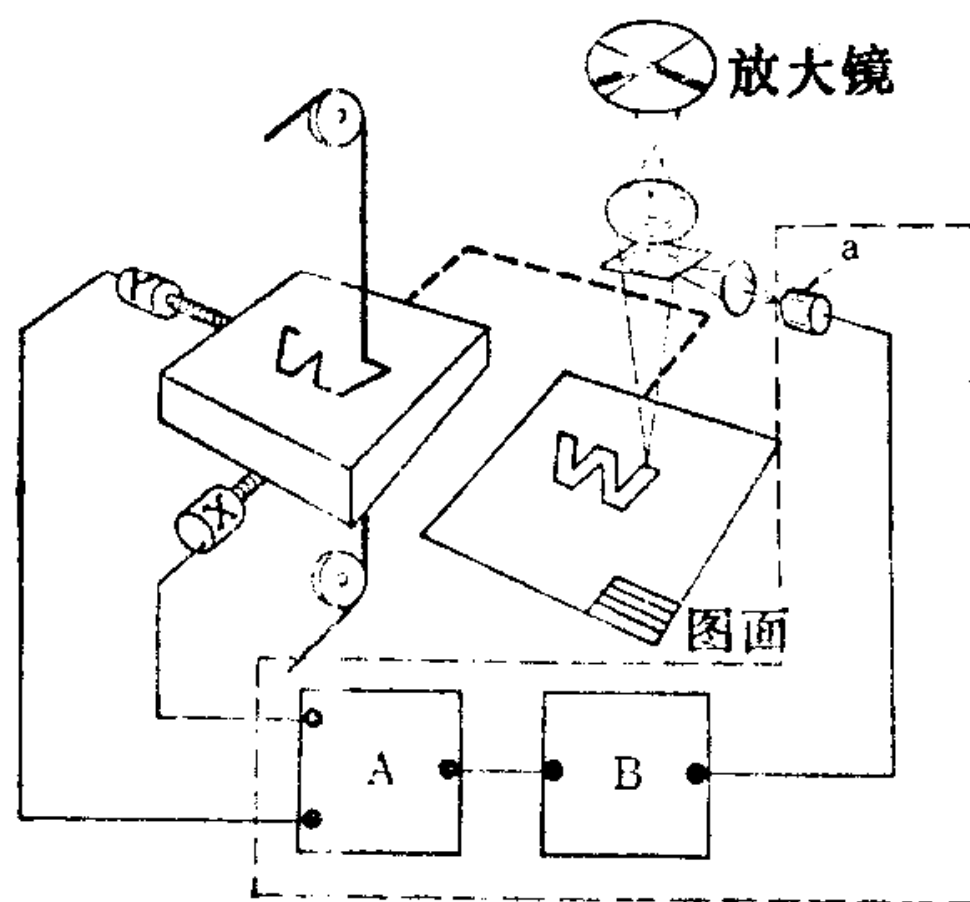


图1.2 光点跟踪式仿形电火花线切割机床的工作原理

A — X 轴及 Y 轴进给电动机功率分量分配器; B —放大器。

正如图 1.2 所示, 当时的电火花线切割机床的工作原理

是，先将图形进行光学放大，然后按放大的图形，在 XY 工作台以手动方式进行跟踪仿形加工。所以，为了驱动该机床，首先要根据被加工物体的形状，正确地描绘出图形。然后，用放大镜将描好的图放大 10~50 倍，一面看着放大图，一面使 XY 工作台联动进行仿形加工。

后来，他们又于 1957 年制成了如图 1.3 所示的光学仿形装置，在光点上用光电管辨别光通量的方式进行自动跟踪图形加工。这种装置被称为 A207 型光点跟踪式仿形电火花线切割机床。不久，还研制了更为自动化的 A207-23M 型，该装置的主要特点是，先来自光源的光，照射在描好的图线上，

然后由光电管接收反射光或透射光，相应于光通量增减来驱动伺服马达。图中 a 为光电管， B 为放大器，而 A 为带动电动机的伺服马达放大器。据称加工精度为

5/100 毫米。放大率由 10 倍增到 50 倍，原图以测微绘图机描出作仿形用。具有手动和自动两种仿形方式。

在苏联，一般将电火花线切割的加工缝宽与放电电压的关系表示为

$$l = D + 0.125V$$

式中 l ——加工缝宽（微米）；
 D ——电极丝直径（微米）；
 V ——放电电压（伏）。

这种机床多以 UMM(万能测长仪)作床身，其主体是在机械位置精度极高的装置上，安装有电极丝进给系统。图 1.4 所示为专门用于电子管加工的 A207 型电火花线切割机床。

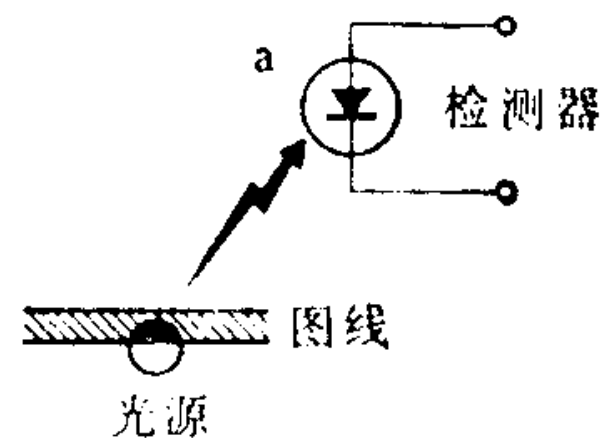


图1.3 光学仿形装置

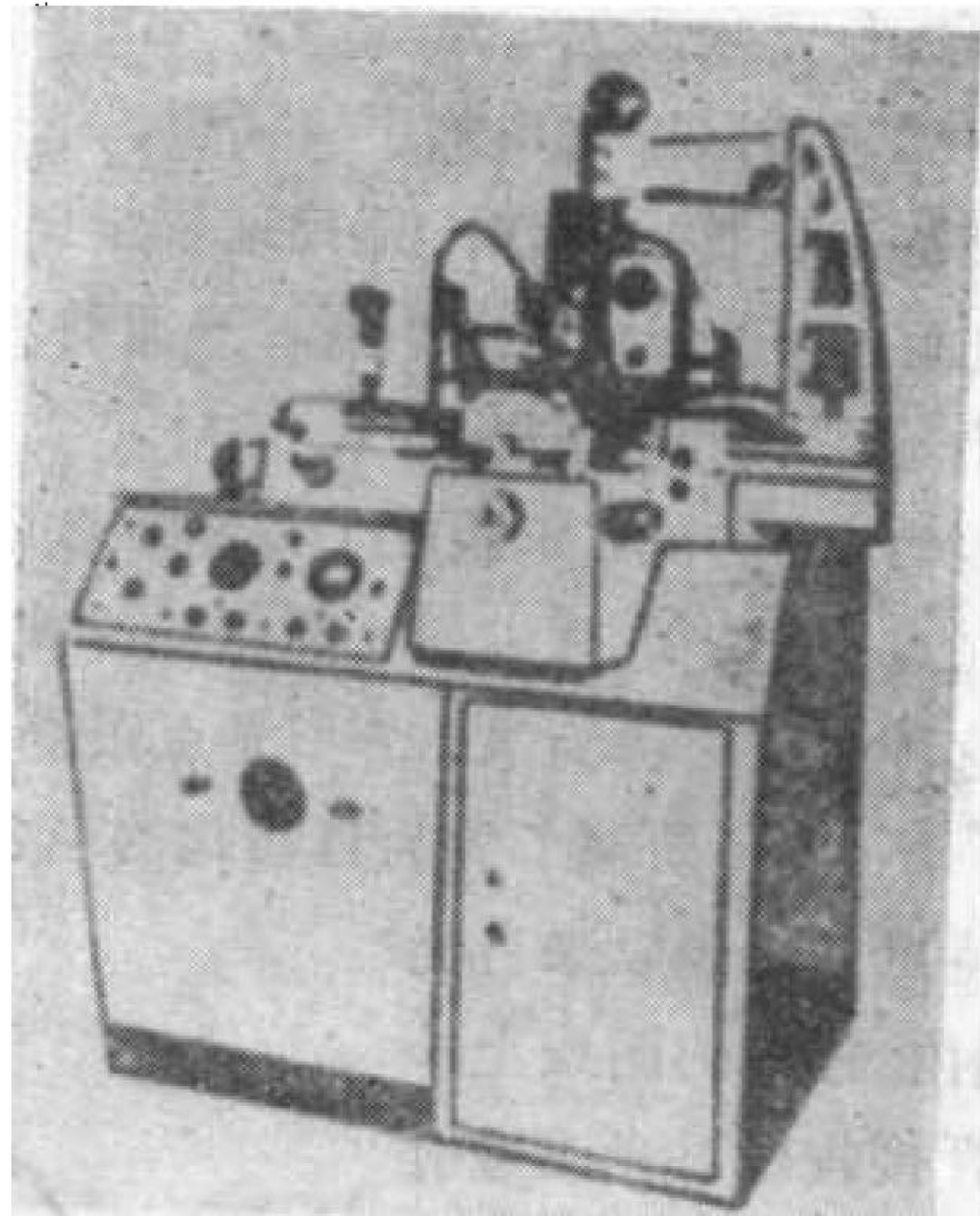


图1.4 A207型电火花线切割机床

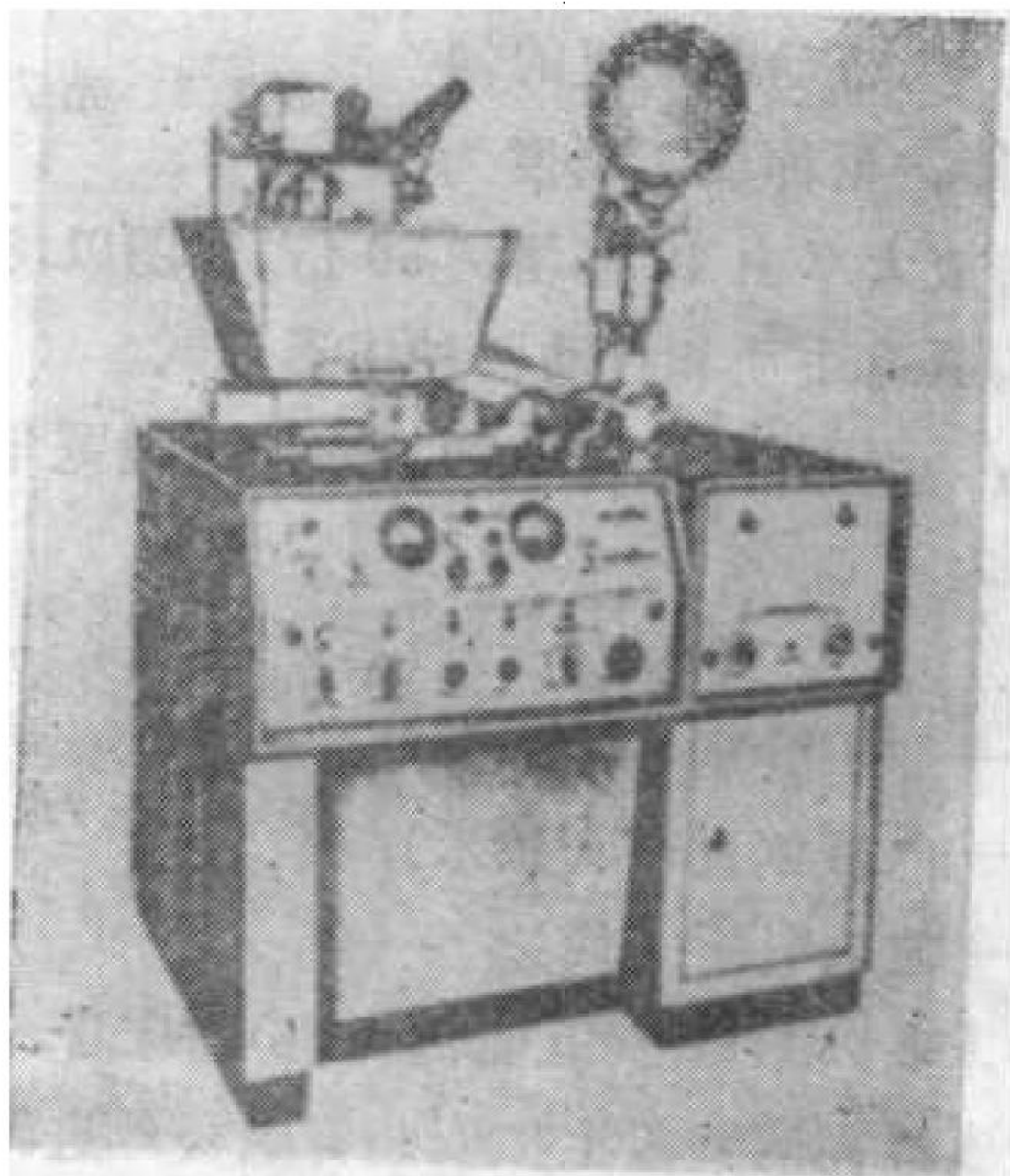


图1.5 备有放大镜的A207-23型仿形电火花线切割机床

目前,他们正在制造的 NC 电火花线切割机床中,具有代表性的是 $\Theta KY \Pi - 2$ 型,现将其性能与特点介绍如下。该机性能: X 轴为 250 毫米, Y 轴亦为 250 毫米,定位精度为 10 微米,最小进给步距为 2 微米。能够加工的工件尺寸可到 $430 \times 270 \times 120$ 毫米,其最大重量为 130 公斤。机床的大小(宽 $\times$ 进深 $\times$ 高)为 $3 \times 1 \times 1.8$ 米,机床重量为 2.5 吨。快速进给为 150 毫米/分。另外,能够使用直径为 0.05 到 0.3 毫米的电极丝。电极丝张力在 150~450 克之间,电极进给速度为 0~80 毫米/秒(0~4.8 米/分)。加工斜度时,其角度在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 之间。工作液为工业用水、去离子水。据报道,最大加工速度铜材为 50 毫米²/分,钢材为 35 毫米²/分。

图 1.5 所示的装置即为上述以 UMM 为床身的 A203-23M 型电火花线切割机床。该机床使用的电极丝直径为 $\phi 0.02 \sim 0.1$ 毫米,电极材料采用铜丝、钨丝、钼丝。电极丝张力可调范围在 10~100 克之间。电源的脉冲发生器采用 RC 电路,可用 0.005~0.235 微法电容器。加工进给速度与电极丝直径的关系示于图 1.6。该曲线图为加工 5.5 毫米厚工具钢的一个实例,当采用 $\phi 0.05$ 毫米电极丝时,其加工速度最大,为 1.23 毫米²/分。这与通常电火花线切割机床相比,仅仅为其加工速度的 $\frac{1}{25} \sim \frac{1}{30}$ 。在加工较薄材料时,其加工精度为 ± 5 微米。但值得注意的是,表面光洁度与加工精度同属一个等级。

再者,图 1.4 所示的 A207 型电火花线切割机床,根据说明书来看,其加工面的表面光洁度极好, $R_{\max}$ 为 0.4~0.6 微米,电源输出功率为 0.5 千瓦,工件最大厚度为 35 毫米,工件最大尺寸为 190×100 毫米。另外,加工精度为 2 微米,

相对精度（重复精度）为 ± 3 微米。

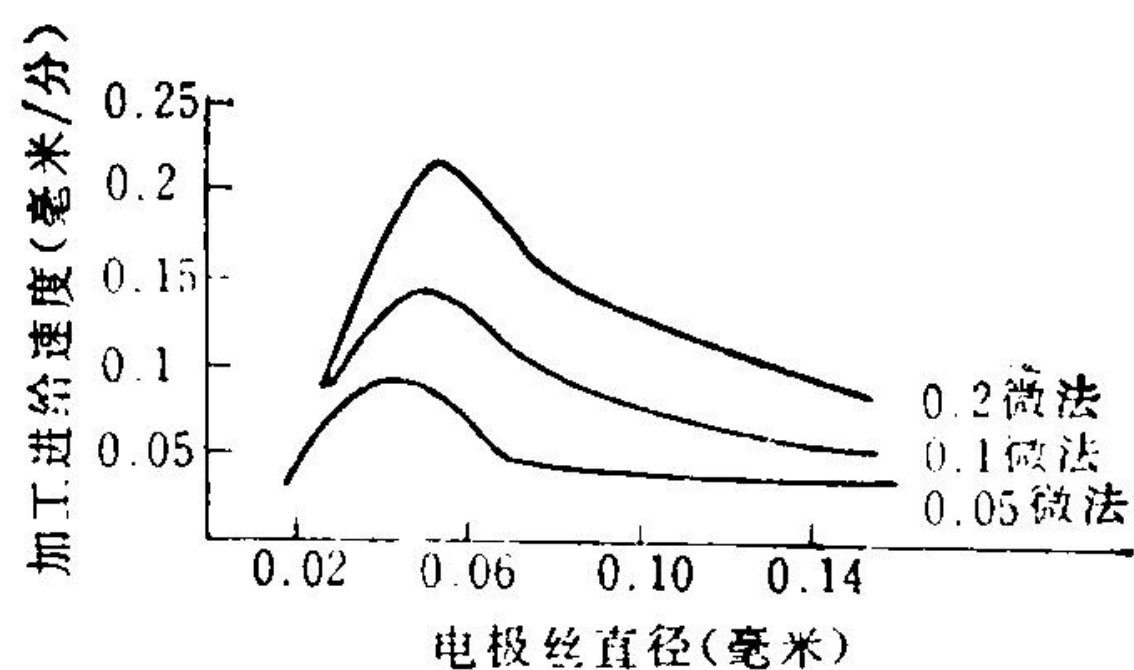


图1.6 加工进给速度与电极丝直径的关系

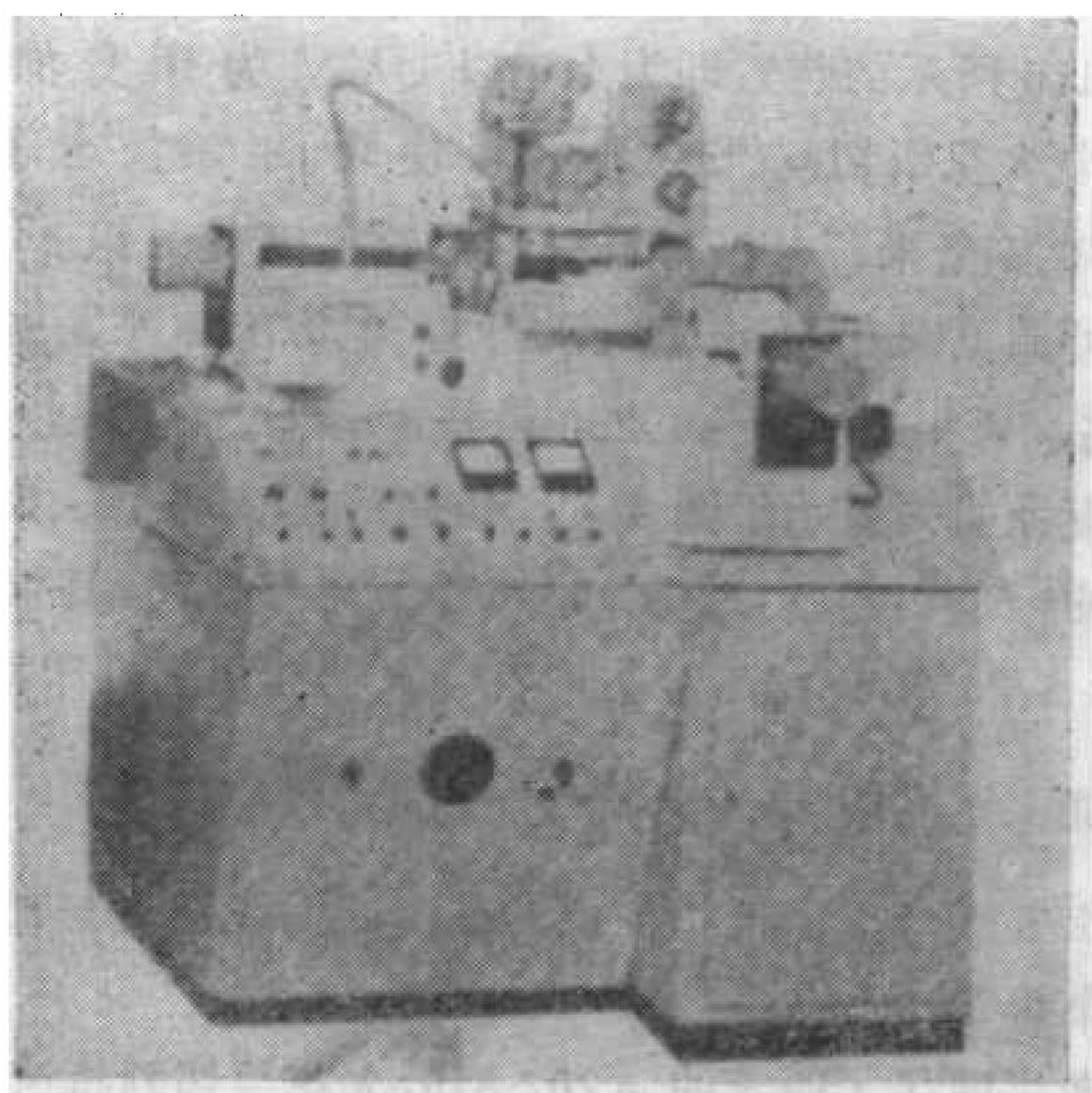


图1.7 电子零件专用电火花线切割机床

除此以外，苏联还制造了如图 1.7 所示的加工锗等电子零件专用的电火花线切割机床。而最大输出功率为 1 千瓦、

加工精度为 ± 3 微米、表面光洁度在10微米以内、加工速度为 $5 \sim 20$ 毫米²/分[●]的机床也在进行制造。

苏联于1965年研制成NC电火花线切割机床, 现仍在生产。图1.8(见书末)是它的线路总图, 这是早期的NC装置。这种NC装置采用多接点继电器组成, 多用于加工扁平形电子管、微波振荡器的阳极(米尔曼行波管)以及磁控管阳极等电子管零件。图上部是放电回路, 采用一般的RC电路。工件进给系统是用一个简单的装置构成的, 其工作台进给电动机上装有进给定位继电器。这是一种用整流子继电器确定电动机旋转角度的预置方式。

除苏联以外, 瑞士于1969年最先制成了NC电火花线切割机床, 从而提高了人们对这种机床的认识。该机床如图1.9所示。主要规格如下: 工作台驱动量为2微米/步; 最大移动速度可达0.4毫米/秒; 电极丝直径为 $\phi 0.02 \sim 0.2$ 毫米; 电极丝移动速度为 $0.6 \sim 2.1$ 米/分; 电源的加工电压为 $150 \sim 350$ 伏, 可分5档转换; 平均加工电流为1.5毫安到2安; 工作液箱容量为20升, 具有离子交换树脂; 可加工最大尺寸为 $210 \times 210 \times 80$ 毫米的工件。

在加工时, 一般采用电阻率为 $100 \sim 2.5 \times 10^4$ 欧姆·厘米的去离子水, 射出量为 $2 \sim 3$ 升/分即可加工。放电间隙所用电容为 $15 \sim 100$ 微法, 分档使用。现仅就线切割加工的实例简要介绍如下: 当以加工速度为 1.5 毫米²/分进行加工时, 表面光洁度为 $R_{\max} 4.5$ 微米, 放电间隙长度单侧为83微米; 而以加工进给速度为 4.5 毫米/分进行加工时, 表面光洁度为 $R_{\max} 8$ 微米, 放电间隙长度单侧为22微米。这时的加工

● 原文误为毫米³/分——译者。

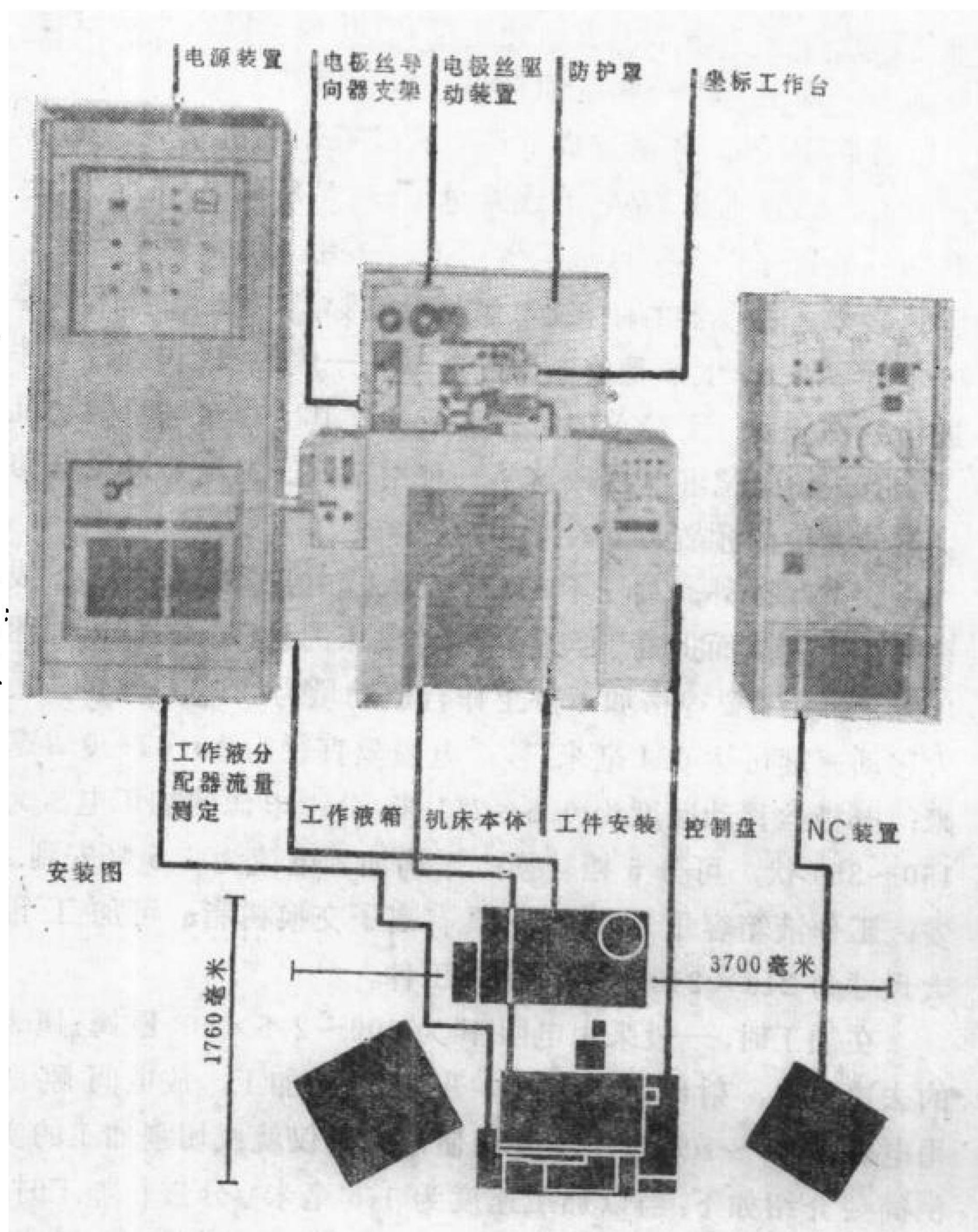


图1.9 瑞士AGIE制NC电火花线切割机床

条件是：电容为 50 微法，水的电阻值为 13×10^4 欧姆·厘米。NC 装置采用 AGIE 代码（包含 EIA, ISO），具有直线、圆弧、椭圆的插补回路。缩放率为 4:1~1:8，可分 5 档转换。

加工完毕后，程序可存储 256 步，而且可以逆行加工这些尺寸。

目前，从事生产各种各样电火花线切割机床的公司，瑞士和美国各有两家，日本有五家。而且，正在制造的电火花线切割机床，95% 以上为 NC 机床。NC 电火花线切割机床在使用上的优点主要有：由于可用 NC 带处理加工形状，故能高精度地再现加工公差和形状；加工工序简化，无需熟练工人；电极材料价格便宜；可由图纸直接加工等。