

《国外机械工业基本情况》参考资料

电 加 工 机 床

—机部苏州电加工机床研究所编

第一机械工业部技术情报所

出版说明

以华主席为首的党中央向全国人民提出了新时期的总任务，全国从上到下一心一意搞四个现代化。机械工业要适应“四化”的要求，必须为国民经济各部门提供现代化的技术装备。为此，需要研究和学习国外机械工业的先进技术和经验。在这种形势下，我们组织有关单位编写一套《国外机械工业基本情况》参考资料。这项工作第一次开始于1973年，1975年基本完成。这次是第二轮，在内容和范围上都比上次有所充实和扩大。

这套参考资料按专业分册出版。《国外金属切削机床基本情况》部分包括：机床行业综述、机床基础技术、重型机床、高精度机床、组合机床、车床、自动车床、铣床、钻镗床、电加工机床、齿轮加工机床、磨床、插拉刨锯床等分册。本书为电加工机床分册，主编单位是一机部苏州电加工机床研究所和一机部机床研究所，参加编写单位及主要执笔人员有一机部苏州电加工所谷式谿、章齐德、吴明华，中国科学院电工所张耀中，上海第八机床厂赵燕慈，营口电火花机床厂杨永义，天津第六机床厂陈岩禧，一机部机床研究所高亨德、郁慕蔺。

一机部技术情报所

目 录

第一章 综述	1
一、电加工的原理、特点及应用	1
二、技术经济统计资料	1
三、电加工工艺及机床的发展	5
四、基础理论	14
五、保证产品质量的组织和技术措施	14
六、技术发展展望	17
第二章 电火花成型机床	18
一、发展概况	18
二、电火花加工工艺及其发展	18
三、机床产品的发展及“三化”水平	20
四、机床技术结构的发展	21
五、产品主要性能及代表性产品	24
六、电火花成型机床的展望	33
第三章 电火花线切割机床	34
一、发展概况	34
二、机床结构	36
三、线切割工艺的发展与机床使用现状	40
四、标准化、系列化和通用化情况	44
五、技术展望	49
第四章 电解成型机床	50
一、概述	50
二、生产概况	50
三、电解加工机床的发展	57
四、电解加工工艺的发展	60
五、经济性及存在问题	63
六、代表性企业介绍——阿诺卡特公司概况	64
第五章 其它电加工机床	65
一、电火花强化机	65
二、电火花磨床	66
三、电火花专用打孔机	66
四、阳极机械切割机床	66
五、电解打印机	67
六、电解去毛刺机床	67

第一章 综述

一、电加工的原理、特点及应用

电加工是特种加工中应用得较广的一种加工方法。这种方法是直接利用电能进行加工的，因而称谓电加工。它主要包括电火花加工、电解加工，以及间接利用电能的激光加工、等离子加工和超声波加工等。由于这些加工方法利用能量的形态、加工的机理及加工特性的不同，所以它们适用的范围也不同。如激光、电子束、超声波加工等对于金属和非金属的加工都适用，而电火花和电解加工等只适用于金属加工，但后者对加工形状的适应性较强。相反，电子束、激光等加工法则只限于二维形状的加工。在应用时选用那种加工方法，首先必须考虑其适用范围，其次是经济性，即装置的投资与运行费用，是否批量生产等因素。由于电加工是一种电物理和电化学的加工方法，因此可以加工任何硬、脆、粘、软、高熔点材料，包括热处理后的各种高硬度钢及其合金，而与其物理机械性能无关；工件材料的蚀除不是靠刀具的机械力作用，因此工件不会在加工时引起变形，有利于某些不能承受机械力的小孔、薄壁、窄槽及各种复杂截面的型孔、曲线孔、型腔等零件的加工。另外，如电火花加工，它在加工时所施加的能量是间歇地以极短的时延作用于材料局部的极微小一点上，故对整个工件而言，几乎不受热的影响，可减少或避免在工件表面造成热影响层，因此又可加工热敏感很强的材料。总之，电加工特别适用于传统的机械加工感到困难的场合，是材料加工中的一种新方法，是在难加工材料和复杂形状的加工方面的一种不可缺少的加工方法。

随着电加工工艺的发展，相继研制了各种电加工机床。工业上应用得最早和最广泛的是电火花加工机床和电解加工机床，其中，又以电火花加工机床为主，约占全部电加工机床的80%以上，而这些机床有90%是用于加工模具的，但最近已逐渐扩大到精密、细小和特殊材料零件的加工领域中。

二、技术经济统计资料

（一）机床的使用情况

1. 机床的拥有量及构成比

随着科学技术的进步，宇航、电子等新兴工业的飞速发展，愈来愈多地采用了新材料和各种复杂形状的零件。这样就促进了特种加工方法，首先是电加工方法和机床的迅速发展，特别是最近五年的进展尤为显著。

苏联在1971~1975年间，电加工机床总额增长了1.5倍。在五年期间，研究、制造和在工业上获得应用的通用的和专用的机床约30余种，其中生产了带有数字程序控制的4531Φ3和4532Φ3型电火花线切割机床。除此还生产了与机床配套的电源、控制系统、过滤器以及专用夹具等。并予计在1980年前电加工机床将得到更大的发展，计划生产一系列新型机床，其中有高精度座标电火花穿孔机床、大型锻模和压延模电加工机床、激光加工微孔机床以及硬质

合金电解磨床等^[1]。日本电气加工学会和精机学会在1975年6月至1976年5月用了一年的时间对670家大小公司作了电加工机床的拥有量、使用现状和存在问题的调查。并由此推算出日本全国电加工机床的拥有量已达12000台^[2]。而在1961年时仅有700台,十五年间增长了16倍,其中,电火花线切割机床的增长速度最快,在1976年生产的1000台电加工机床中,数控电火花线切割机床约占30%。据《Sci. et techn.》, 1976年№37报导法国拥有电加工机床的数量也超过2000台了,而且预计在1980~1985年间,这类机床占金属切削机床的百分比将从现在的1.5%上升到5%。

目前,世界主要生产电加工机床国家的拥有量及构成比如表1所示。

表1 电加工机床拥有量及构成比

	苏联	美国	日本	瑞士	英国	西德	法国
拥有量(台)	20000	15000	12000	7000	4000	3000	2000
构成比(%)		0.5			0.4		1.5

2. 机床的役令、分布与利用率

科学技术的进展日新月异,加快了设备更新的步伐,无论从技术上还是从经济上考虑,机床的使用寿命都被人为地缩短了,本来是一台还可以继续使用的机床,但由于技术上已经落后,或者在经济上不能带来更大的利益,往往就由新的设备代替而被淘汰了,所以机床的役令有逐渐减少的趋势。美国机械制造工程协会在1976和1977年对机械加工、家具和夹具、加工金属产品、运输设备等行业的机床拥有量、使用役令、分布情况等进行了调查^{[3][4]}。从调查的结果中可以看出,在美国的机械加工工业中,有19%的企业使用电加工机床,总台数为1348台,其中电火花加工机床为86%,电解磨床为10%,电解加工机床只占4%。在加工金属产品业和运输设备制造业使用的电加工机床也很多,电加工机床内部的构成比与机械加工工业类似。但无论在那一个行业,电加工机床的役令在十年以内的约占50%,而在二十年以上的,一般皆占5%左右。美国电加工机床役令情况如表2。

表2 美国几个企业的电加工机床役令

	使用厂的 百分数(%)	电加工机 床总数(台)	0~4年		5~9年		20年以上	
			(台)	(%)	(台)	(%)	(台)	(%)
机械加工工业	19	4348	1174	27	1739	40	139	3.2
加工金属产品业	9	1601	314	20	400	25	65	4
运输设备制造业	26	2309	455	20	607	26	264	11

各国电加工机床的发展情况不同,因而机床的分布情况也不一样。美国的电加工机床首先是应用在宇航工业,所以运输设备制造业使用的电加工机床最多,这些企业的规模一般都在千人以上。日本恰好相反,她主要是用于模具制造业,据清水明彦估计约有90%的电加工机床是用于加工模具的^[5],所以在模具制造业及相关的行业中使用的电加工机床的比例就较大,日本电气加工学会和精机学会的用户调查也证实了这个情况。美、日两国电加工机床的分布如表3、图1、图2所示。

表3 按企业规模美国电加工机床的分布

行业	企业规模(人) 拥有电加工机床数(台)	20~49	50~99	100以上
		1428	662	2258
机械加工工业				
加工金属产品业				
运输设备制造业		245	299	3370
家具和夹具业				

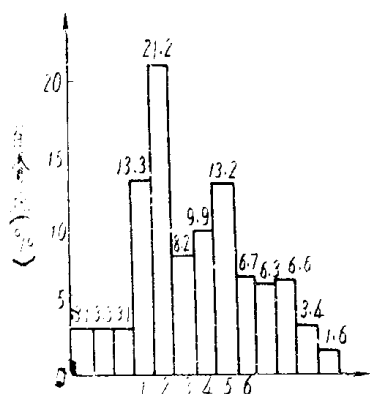


图 1 2 日本使用电加工机床的企业种类

1. 金属制品制造业; 2. 模具制造业; 3. 压延加工
4. 一般机械制造业; 5. 电气机械制造业; 6. 运输
6. 运输机械制造业;

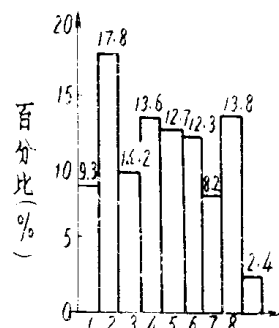


图 2 2 日本使用电加工机床的企业规模

1. 10人以下; 2. 11~30人; 3. 31~50人; 4. 51~
100人; 5. 101~200人; 6. 201~500人; 7. 501~
1000人; 8. 1000人以上;

3. 机床利用率

苏联中央统计局在1969年11月19日对全国机床制造厂设备利用情况进行了一夜的调查统计表明,当时有23%的电火花加工机床未在使用⁶,说明机床的利用率不高,机床未能充分发挥作用的原因有:1) 对电加工机床的用途不明,不能满足加工要求;2) 未经过学习与训练,不熟悉机床操作技能;3) 机床配套,缺乏必要的辅助设备;4) 机床性能差、可靠性不高,易出故障等。而美、日等资本主义国家很重视电加工机床的宣传推广工作和不断地提供性能好、可靠性高的机床。他们的机床的利用率已经很高了,有的机床每天的工作时间已超过10小时。日本电气加工学会和精械学会在1976年进行的调查情况如表4。其中,电火花线切割机床采用数字程序制系统后,提高了自动化程度,尤其是机床性能日趋完善,加工稳定、可靠,可实现无人运转,因而能连续三班运行,所以机床的利用率最高,每天工作10小时以上的机床占64.9%

表4 日本电加工机床利用率

机床类别	占机床百分数 (%)	每日机床开动时间 (小时)		
		3~7	7~10	10以上
电火花成型机床		52.3	31.1	16.7
电火花切割机床线		18.9	16.2	64.9

4. 使用中的问题及发展的要求

近五年来,电加工机床应用面愈来愈广,但机床在使用中也暴露出一些问题。对于电火花成型机床来说,主要有工具电极装夹定位的辅助工时较多,工具电极制造不方便,效率低,加工特性如生产率、精度、加工表面光洁度尚须提高,工具电极损耗仍需进一步降低,除此还要降低机床价格,解决电磁波干扰及以防止火灾的发生等。对于电火花线切割机床,则需要降低机床价格,提高加工速度,提高机床精度与刚性和采用适应控制等自动化技术使机床的操作更加简单、可靠^[2]。电解加工机床在使用中遇到的问题较多,如精度不高、设备投资大、工艺复杂和加工产物的处理等,这些问题都急待解决。

(二) 机床的生产与销售情况

电加工机床制造业已逐渐形成一个独立的,新兴的行业。除一些著名的大企业公司兼

生产这类机床外,已有不少专业厂从事电加工机床的研制与生产。围绕着电加工机床制造业,还相应地发展了电极材料的研究与制造、工作液及其循环过滤装置的研究与生产和电极装夹、定位装置的研究与生产等部门和企业。在日本甚至还出现了出售专为电火花加工机床消灭火灾的灭火器公司。

在资本主义世界里,经济萧条,工业发展停滞不前每每出现的情况下,电加工机床行业却仍然得到发展,而且发展的速度还是很快的。其原因是电加工工艺的优越性已愈来愈被更多的人所了解,应用的范围不断地在扩大,需要量越来越多了。苏联有人认为甚至很难估价这种加工方法对当代机器制造、仪器制造、无线电电子及宇航等工业的发展所起的巨大作用,它能几十倍地提高劳动生产率并改善劳动条件;成倍地缩短模具制造周期和消除笨重的体力劳动^[7]。除此,由于在基础理论和应用技术的研究方面已取得了进展,而且电子工业等新技术的涌现,为在电加工机床上采用电子技术,提高生产效率和自动化程度创造了条件,因此机床的加工性能有了很大的提高。如以电火花成型机床为例,已研制出了无损耗脉冲电源,在加工表面最大不平度为25微米时的加工速度提高了一倍,并仍有继续提高的潜力⁸。制造了大型电火花加工机床,如加工长达4米的柴油机曲轴的装置,使用了4台600安的晶体管脉冲电源。在微细加工方面,加工直径为75微米的发动机喷油咀小孔时,加工精度已达 ± 5 微米。

由于用途多、销路广,因此国外不少公司在研制与生产电加工机床上展开了激烈的竞争。

美国的电加工技术是应宇航工业的需要而发展起来的,但最近已有转向用于民用的工模具生产的趋势。现在,飞机、汽车和机械加工工业是电加工机床的最大的市场。美国考尔特(Colt)工业集团所属的埃洛克斯(Elox)公司是美国最大的电加工机床制造与销售公司。据该公司称,1975年第四季度的营业额超过同年前三季度平均值的25%,买主已从大厂转向小厂。又据埃克赛罗(Ex-Cell-O)公司的大西洋机床公司(Atlantic Machine Tool Works Inc.)推测,其50%的订货是小厂的。该公司在1975年12月份的订货是前一季度月平均值的三倍,而1976年一季度又为前一季度的三倍,可见增长速度之快。过去美国的电加工机床一般皆由国外进口,而目前,除能满足国内市场需要外尚能出口。如雷康(Raycon)公司是以生产专用电火花小孔加工机床著称的,她有一台价值50万美元的五工位的电火花专用机床于1976年3月份开始在一个东方公司自动线上工作。还有15台计45工位的电火花机床是为苏联卡马河汽车厂制造的。另外,该公司还向英国、瑞士、香港、新加坡、日本、菲律宾等地进行市场贸易。该公司接受了很多订货,以至造成来不及按时付货的局面。这家公司1975年的产量与1974年相等,但1976年较多,2月份的订货为1百万美元,比1975年任何一个月都要好,其出口额占35%(1975年为25%)^[9]。

英国在1961、1966和1971年曾三次调查过国内电加工机床的发展情况,调查的结果是1966年比1961年增长78%,1971年又比1966年增长126%,到1971年底已拥有电加工机床2000多台。英国生产的电加工机床中很大一部分是用于出口的。如赫伯特-阿诺卡特(Herbert-Anocut)公司制造的四台电解加工机床都不在英国国内使用,而是卖给南斯拉夫、捷克、罗马尼亚和德国^[10]。仅1975年英国就向国外销售了108台电加工机床,销售的公司主要有艾杰马电火花机床公司(Agemaspark)和威克曼(Wickman)公司等。据文献^[11]报导,英国在最近五年,电加工机床产量增长幅度较大,已从2609台增加至3447台。

苏联的电加工机床在1971~1975年间也得到了很大的发展。1976年电加工机床的年产量

与1970年相比是1.8倍,而拥有量是1.6倍,占世界首位。主要有特罗伊茨克（Троицкий）机床厂等共十几家工厂进行系列化批量生产

日本茨城大学工学部教授久保田护通过对历年来所发表的专利变化分析后认为,电火花、电解加工已过了研究开发的最盛期而转入着重于实用机床的机械精度、操作性、安全性、可靠性和维护等性能的改善,并从品种、数量和性能上满足用户不断增长的需要。日本电加工机床产量逐年变化情况如表5〔12〕。

表 5 日本电加工机床逐年产量变化情况

年 份	1972	1973	1974	1975	1976
电火花、电解及超声波机床(台)	851	1027	809	640	1001
金属切削机床(台)	164553	212586	168952	88108	118994
占金属切削机床比率(%)	0.51	0.48	0.47	0.72	0.84

三、电加工工艺及机床的发展

近五年来,电加工工艺取得了很大的进展。在电火花成型加工中,由于低损耗甚至无损耗脉冲电源的研制成功,以及平动头的实际应用,在国外也开始抛弃了过去常用的繁杂的多电极加工方法而改用单电极——平动工艺了,这样就大大简化了加工程序,提高了加工质量和生产效率,由于工具电极伺服进给系统的改进,也提高了加工的稳定性和加工精度。此外,还有以水玻璃为工作液的阳极机械切割、振动电火花加工和水中混有导电粉的电火花加工等大功率断续电弧放电电解复合加工都有了新的发展,特别是后者即所谓高速放电加工的生产率已达到60克/分(7600毫米³/分)。

数控电火花线切割加工是这五年里在电加工领域中崛起的一支新军。由于这种加工工艺不需要制造工具电极,加工过程易实现自动化,因而广泛地被用来加工二维形状的模具型孔和零件。随着加工工艺的改进,加工效率和质量在不断地提高,加工精度已达微米级,而且加工的潜力还很大,尚可进一步发挥。由于数控电火花线切割加工具有这些突出的优点,所以这一工艺受到极大的重视。国外甚至有人认为电火花加工已进入数控电火花线切割的时代了。

电解加工是应用较早的一种加工工艺。生产效率高、表面光洁度好、工具电极无损耗等是其优点,但加工精度较难控制、电极设计与制造也较麻烦则是其不足之处。近几年来,为了提高电解加工精度,除了从理论上进行探索外,还在实际应用中采用了非线性电解液、混气电解加工和脉冲电源等措施以控制和缩小加工间隙,在这种情况下电解型腔加工的精度已达到±0.1毫米以内。随着加工精度的提高,电解加工的应用范围也在一点点扩大。又如振动电极、反拷电极的应用、静止液电解加工及短路快速切断装置的发明和自动化技术的采用以及废液处理的逐步得到解决,也促进了电解加工的发展。但其发展速度与电火花加工相比还是比较慢的,只有在工艺上出现重大突破之后才有可能大踏步地前进。

电解磨削是电解和机械加工同时起作用的一种复合加工工艺。为了克服过去电解磨削精度低的缺点,现在采用了以电解粗磨和最后以机械精磨的加工工艺,即所谓全刚石——电解磨削(SAM)方法。这种工艺与单纯的机械磨削相比还可减少磨轮的修正次数,而精度则比电解磨削高,因而获得了发展,并认为这是今后难切削材料的数控磨削的一个发展方向。

为了适应电加工工艺的进展和应用范围的扩大,机床的结构、性能也都发生了很大的变化,已系列生产了小型、中型、大型和超大型各种规格的普通的和精密的电加工机床。新的机床增强了刚性,采用了积木式(组件式)结构,应用了数控和其它自动化技术以及出现了机电一体化的趋势等。从近年来电加工机床的发展中可以看出以下一些特点,这就是电加工机床也和其它各类机床一样,随着用户对机床不断增长的需要,随着科学和生产技术的进步,正在努力满足生产上的多样化的要求,以系统化的观点全面地发展电加工技术,并力求实现电加工机床本身的高效化、自动化、最佳化和精密化等^[13]。

1. 努力满足多样化的要求。

各种用户对电加工机床有不同的要求,而且用户厂生产的产品品种更新的周期不断地在缩短,因此希望机床能跟上这些可变的要求,即在加工对象一旦发生变化时,机床本身便于改造,而不至于整台机床报废。为了适应这一特点,一种办法是采取根据用户需要提出订货,制造厂按订货要求生产的方式。这不仅对于专用的、大型的、自动化的机床如此处理,就是普通的电加工机床也往往采用这种方式。即用户需要什么样的机床,制造厂就提供什么机床,而不是用户从制造厂生产的机床中去选用较适合自己需要的机床,这样就改变了过去的供求关系。

美国阿诺卡特公司的电解加工机床,就是根据用户提出的要求设计比较专用的机床。在机床出厂后还指导用户厂正确地使用。这样,一方面可协助用户熟悉和掌操机床性能和操作技巧,另一方面又能把机床出现的问题搜集回来,有利于进一步改进机床的设计与制造。根据用户需要,生产厂制造各种专用化的机床,这是满足多样化要求的一种方式,但在这里必须处理好专用化和通用化、标准化、系列化的辩证关系,因而各制造厂在机床的设计中多采用组件式结构,即把机床的几个主要部分设计成不同规格和性能的功能部件,只要改变它们的组合就可满足用户的不同要求了,这是达到多样化要求的一项有效措施。

英国威克曼公司生产的电火花加工机床、西德德克尔(Deckel)公司的DE 40机床都是采用了近代发展起来的组件式结构,美国雷康公司生产的电火花加工机床的主要特点就是采用组件式结构。机床床身、工作液系统、电火花加工头、脉冲电源以及自动控制等都分别做成定型的部件,然后按用户提出的要求,根据加工对象的特点组合成不同类型的积木式机床^[14]。

还有一种满足用户多样化要求的途径是在普通机床上增加附件以扩大其应用范围。苏联的ШУЭГ-3、ШУЭГ-5、ШУЭГ-6型多用途主轴头就是为此目的而研制的。由于这种主轴头能完成多种运动方式,因而能实现50~100种不同的加工工序,如加工内外圆形、异形、螺纹形和齿形的表面,可以制造幅射槽、螺旋槽以及切割圆盘、零件等^[15]。考纳斯“捷尔任斯基”机床厂在坐标镗床基础上制造的4Д722 B型电火花机床配有电磁夹头,这台机床除可加工模具和零件外,还可进行电火花磨孔和线电极切割,它也是通过增加附件来实现扩大加工范围的。

最近瑞士查米尔斯(Charmilles)公司研制成功了一种被日本人誉为电火花加工技术继晶体管电源、数控电火花线切割之后,出现的第三次革命的Isocut多方向伺服控制装置。这一装置使过去工具电极只做垂直上下运动的伺服控制系统改变成多方向的立体控制。这样一来,不仅使生产率可提高2~10倍,电极制造成本降低1/2~1/4,而且扩大了机床的使用范围。从过去只能加工直壁型孔、型腔外,还可用于角部精修、工件侧面的穿孔,从工件端面刻槽和扩孔,用同一尺寸的电极加工不同尺寸的形状相似的型腔,以及加工斜度达±6°的深

盲孔和冲模、铝挤压模等的落料口和刃口的斜面部分等^[16]。

实际上还可举出更多的用来扩大机床用途的附件，所有这些附件都是为满足用户对机床多样化的要求而设想和研制成功的。

多样化是对机床的客观要求，制造厂应努力发展机床设计与制造技术以促进生产的发展。

2. 系统化——以综合性与成套性的观点发展电加工技术及其装备

日本井上贾派克斯（ジヤパックス）研究所的清水明彦在1973年发表的“模具制造和电火花加工今后的发展方向”一文中，已经提出了系统化解解决模具制造的电加工技术的问题。他对某一塑料模具制造的两种加工方法做了比较，结果如表6。从表中可以看出，采用电火

表6 某塑料模加工工时比较

传统的加工方法		电火花加工方法	
工 序	时间（小时）	工 序	时间（小时）
仿形铣	150	电极制造	80
钳加工	220	仿形铣	50
		电火花加工	60
		钳加工	90
合 计	370		280

花加工后，模具制造的时间是减少了，但进一步分析发现，电火花加工工时仅占模具加工总工时的1/4。显然，为了缩短模具制造的周期，除了提高电火花加工效率，减少这道工序的时间外，还必须全面地解决电火花加工的前、后道工序的加工效率问题。只有综合地、整体地提高模具制造工序中各个环节的效率，成套地解决模具制造中的各种技术、工艺和相应的设备，才能有效地缩短模具制造的周期。

从系统化的观点考虑，型腔模制造的系统，包括从根据图纸选用电极材料，制造工具电极和模具毛坯开始，一直到型腔的精加工，最后制成合格的模具产品为止的整个过程。其中除加工工序外，还应包括工件的检测、传输和装夹定位等，而且整个加工过程应由电子计算机控制自动进行。模具制造系统如图3所示。在一般情况下，模具加工的几个主要工序如电

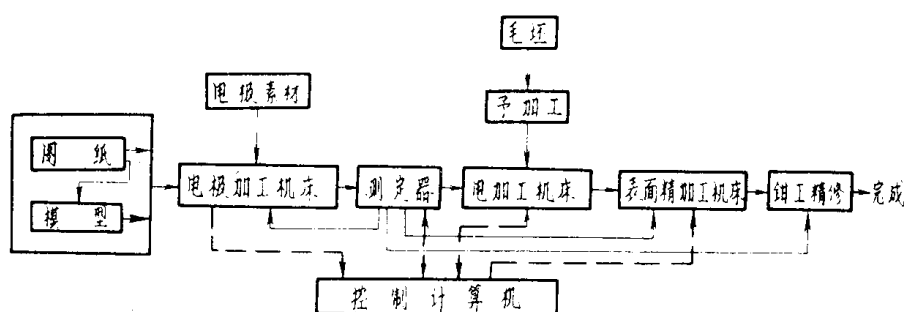


图3 模具制造系统

极制造、模具的予加工、电加工及精正加工约各占总工时的1/4时间，因此，全面地提高各道工序的效率，并减少各道工序间的周转时间的重要性就显而易见了。为此，世界各主要技术发达的国家都在研究、发展电加工技术的同时，对加工对象的研究给予了极大的注意，并把电加工机床置于整个加工工艺流程中来考察它的作用，有机地与其它工序联接起来，这样才能获得最大的经济技术效果^[17]。

就电加工机床本身来说，要提高加工效率、精度与表面质量，提高自动化程度、可靠性

并简化操作程序。由于电子技术与数控技术的发展和在电加工机床上成功地运用,已大大提高了电加工机床的性能。

为了提高电极性能和缩短电极制造时间,国外进行了大量的研究工作,并取得了一定的成果。日本研制成功了HEF100型高速电铸铜电极的设备和EMM-30型石墨电极成型机,英国埃德缪沙(Edmusa)公司研制了24和36型石墨整体成型机床,美国研制了TFM型石墨整体成型机床等。以TFM机床为例,只需5分钟就可加工出连杆模具用的石墨电极,而用仿形铣加工则需8小时,提高效率达96倍。

电火花加工后的表面光洁度一般只达到 $\nabla 6$,对于塑料模、胶木模等光洁度要求较高的模具是不够的,都需对型腔表面进行精整加工。过去用手工研磨极费时,从系统化解模具制造出发,有必要研究提高电火花加工的后道工序的机械化、自动化问题。事实上,国外对这一问题已进行了一些研究工作。目前除了使用抛光纸、抛光布研磨以及砂轮抛光、研磨粉抛光等手工方法外,还采用了化学抛光、电解研磨、液体珩磨、超声波研磨等先进工艺,并研制了相应的设备,如日本的仿形液体珩磨装置^[17]等。虽然已经有了一些方法和设备,但这一问题并未很好地得到解决,仍应作为一个课题继续加以研究。

除上述这些问题外,从日本精机学会的行业调查中还可以看出,电极的装夹定位也占用了很长时间,用户迫切希望能及早得到解决,现在已有了MIZD GUCHI-IMEA电极夹具系统,3R型夹具,KONICA, E. D. SCOPE定位装置以及Centri-Tilt CTC-1夹具等。这些夹具和定位装置都在一定程度上减少了辅助时间。

工业技术的进步和从生产实践中所获得的经验表明,用系统化的观点来考虑电加工技术和机床的发展是极其重要的。研究加工对象(如模具)、改进生产技术和组织管理都是高效、高质量地满足用户要求的必不可少的环节。电加工机床生产厂、有关研究部门必须综合地研究这些问题。

事实上,日本的大沢制作所在1971年就开始了模具自动加工系统的研究并建成了这一系统,当时的日本“放电加工技术研究会”还曾派员去访问过。该系统占地面积为 10×20 米。在中央传输带两侧有电极成形铣、测长机、干燥装置、精整清洗装置、电火花加工机床以及一些台架和控制盘等。这一系统在多品种少批量生产时更为优越,不仅实现了省力化而且提高了产品精度^{[18][19]}。

1976年瑞士阿奇(AGIE)公司与日本的牧野铣床厂决定加强技术协作,共同发展以电加工技术为中心的模具制造加工系统^[20],这是力图从系统化方面全面解决模具加工的一个最近的动向,值得我们注意。

3. 高效化

电加工在生产实际中获得应用的二十几年来,已显示出显著的技术经济效果。但是它与机械加工相比,生产效率不高是阻碍这种加工方法被广泛用于大批量产品零件加工的一个主要原因,据分析,到目前为止电加工的能量利用率还是不高的,大部分能量用于使零件发热、分解工作液等无用的消耗上去了。所以,提高能量转化效率,寻找新的电加工方法是发展电加工技术、扩大应用范围的关键。

日本的爱考米克斯(エコミックス)公司在1976年发表了高速放电加工方法(ADM),它的生产率已达90克/分(500安时),能量转化效率为10.5克/千瓦·分,而一般电火花加工的最大生产率仅达到3~5克/分,能量转化效率为4克/千瓦·分^[21]。生产率提高达30倍,能

量转化效率提高2.5倍,但目前最高光洁度仅为100~500微米 $R_{\max}$ 。

电火花线切割是近年来得到飞速发展的一项电火花加工新技术。日本贾派克斯公司最近研制的クリヤカット装置,据说,已把加工速度提高了1.5~2倍,加工能量利用率提高3~4倍,但用户仍迫切需要解决两个问题,即降低造价和提高效率,以便得到更广泛的应用。同时也只有不断地提高效率和继续提高其加工精度才能战胜其竞争对手——线锯机。线锯机是在1976年芝加哥国际机床展览会上美国的杜奥(Doall)公司首次展出的。这台机床的切削工具是直径为1.52~1.78毫米的金属丝,在金属丝上涂覆金刚石、立方氮化硼或氧化铝磨料。它的切削速度为305~1524米/分,加工精度为0.04毫米,表面光洁度为 $\nabla 7$ 。虽然目前其加工精度还不如数控电火花线切割机床,但生产率却达到1600~3200毫米²/分,比前者高15倍。并且由于磨料和控制技术的发展,这种加工方法还是很有生命力的,现已用于切割电火花加工用工具电极和精度要求不高的模具^{[13][22]}。Laster2026型靠模线锯也是用渗透金刚石的金属丝作为工具进行切割的,它能切割石墨、碳纤维和光学纤维,能切割的厚度达100毫米,加工精度为 ± 0.025 毫米。这台线锯是附在立式铣床上,铣床的工作台由电动机驱动,并用Linemaster装置控制^[23]。

电解加工的效率是比较高的,因此日本已有人设想把电解加工与线切割技术结合起来而发展电解线切割。目前已进行了研究和制造了设备。这种加工方法的特点是电极不损耗,不需要卷丝机构,并能使用弯曲的电极,效率也比较高,但因电极丝较细,焦耳热会使其温度升高,所以不能流过大电流。在使用脉冲电源时,则进给速度可超过10毫米/分,所以还是一种有前途的高速加工方法。

十五年来电火花加工的速度已提高了五倍,但远远还没有达到极限或顶点,苏联拟在1976~1980年间将精加工和半精加工的生产率再提高2~3倍^[24]。虽然电加工机床也在追求高效率,但只有在一定精度下的高效才是有意义的。

4. 自动化

数字控制技术的发展使机床自动化提高到一个新的阶段,这些年来,电加工机床的自动化和自动生产线也逐步实现,归纳起来这主要是由下列技术的进展促成的,即:①数控技术;②自动检测与自动诊断;③自动编程;④机床驱动技术等。

① 数控技术在电加工机床上的应用

1970年前后数控电火花线切割机床研制成功以后,数控技术在电加工机床上迅速得到了普及。如日本的数控电加工机床中约有99%是数控电火花线切割机床,且基本上实现了无人运转。由于电子计算机的普及、特别是微型计算机的出现为实现电火花、电解及电解磨削机床的自动化提供了有利的条件。

现在微型计算机已用于自动选择和控制电加工的工艺参数与条件,如瑞士查米尔斯公司的M1-AA型Monitron监控器即是一种能连续探测、鉴别、测量和显示间隙状态的微型计算机,它与Isopulse电源配合使用,这在脉冲电源发展史上也是一个突破。日本贾派克斯公司最近研制的附有电极自动交换装置的DP40NC电火花机床,全面地采用了数控技术,因而使该机床达到了高度自动化的水平。这台机床由可数控定位的工作台、液压系统、电极自动交换装置等构成;控制系统由JAPT 2 A自动编程装置、JAPT 4数字控制装置等构成;脉冲电源为具有マイセル放电情报解析处理装置的新型 V_2 电源和控制盘等构成;外围设备则由工作液供给装置、自动灭火装置等组成。这台全自动化的机床再加上其它种由JAPT控制的外围

设备就能很方便地实现模具的自动加工系统。

不少国家还利用数控技术把法国郎格宾 (Languepin) 公司发明的机械式平动头发展为数控平动头。日本三菱电机公司研制的DAC-10数字控制装置,是最早利用数控技术使得只要用简单形状的电极就能加工出异形孔的数控系统。在这之后,日本的梅帕 (メッパ) 公司研制了6-RORAN数控平动头,英国的一家公司研制了叫做Solotrode的平动头。苏联也在4A722 B机床上采用了数控平动头。瑞士查米尔斯公司研制的Isocut数控平动头能最好地说明数控技术给自动化和工艺指标带来的好处,它使加工速度提高2~10倍,电极损耗减少 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}$,而且不需更换电极就可实现粗、精加工,这样既简化了操作程序,又提高了效率,还扩大了使用范围^[25]。

同样,数控技术也应用到电解加工机床和电解磨床上,日本已试制了全自动电解加工机床^[26]。

② 自动检测和自动诊断技术

自动检测间隙状态的装置已经有很多种了,如前面已提到的M1-AA即是其中的一种。能自动计量和显示加工深度的装置也屡见不鲜,但随机测量加工精度与表面质量的装置还处于研制阶段,日本大沢制造所的模具自动加工系统中所使用的方法和设备还只是自动检测的锥型。

数控机床或自动线上的设备发生故障时往往要花费很多时间去检查维修,为了迅速地找到故障点,发展了自动诊断技术,并分为外部诊断和自我诊断两种。外部诊断是由通讯诊断中心寻找故障并指挥修理,这在电加工机床上尚未见采用,而自我诊断在电加工机床上已获得了应用。日本贾派克斯公司于1976年研制成功了世界上第一台数控电火花线切割机床的自我故障诊断系统,它能自己判断硬件所产生的故障并以数字显示,这样就能最快的找到故障点,减少维修时间^[20]。瑞士阿奇公司在数控电火花线切割机床上采用的Agiemeric 15-11ANC和Agiemeric 25-11ANC数控系统也有自动故障诊断机能,它们有五个检验纸带,能迅速查出发生故障的组件并及时予以更换,这样就提高了机床的开机率并使之投入自动化生产系统成为可能^[27]。

③ 自动编程

数控电加工机床在生产上应用以来,发现编制程序的计算工作量很大,影响了数控机床的使用效果,为此研究了用计算机代替人工编程问题。由于计算机日趋小型化、微型化,已经有了在经济上和技术上都可在生产车间使用的小型计算机和微处理机,又创造了电加工机床的编程语言,所以目前国外的数控电火花线切割机床几乎全部配备了自动编程机。

由于自动编程技术的发展和在电加工机床上的应用,也提高了机床的开机率并为自动化提供了条件。

④ 主轴伺服系统的自动化

电液压主轴头是近10年来在电加工机床上普遍采用的一种主轴伺服系统。但在使用中发现它的效率低,其液压系统噪声大、占地面积大,长期运行发热会影响机床精度,制造与维修也都很麻烦。特别是负载能力还不够大,不能精确地实行微量进给,不能准确无误地停在任意位置上等缺点,使得这种主轴头已不能满足电加工工艺对伺服系统日益增长的精密化和自动化的要求。为此,日本大和重机制钢公司于1976年首先在RISEX-400机床上采用了脉冲步进电机主轴头,并宣称这是对电液压主轴头的一次革命^[28]。随后,法国G. S. P.

公司在EDM 8型电火花机床上,日本牧野铣床厂在EM 30机床上和贾派克斯公司在DPS 10机床上都相继采用了脉冲步进电机伺服的主轴头。这一重大改革带来的明显的好处是:灵敏度比电液压主轴头高50%;加工间隙的调节可精确到微米级,这就使得在精加工时加工间隙小到0.01毫米也可以稳定加工;能准确地停在任意位置,可方便地进行位置显示;由于采用了数控技术易实现加工自动化,如规准转换、深度自动测量等。

目前在机床驱动技术中,已开始采用了大惯量直流电机闭环伺服系统和正在研究采用交流异步电机的交流伺服系统,把这些新技术引用到电加工机床的主轴头驱动上是值得引起重视和研究的问题。

由于上面谈到的数控技术的普及,自动检测和自动诊断技术的成熟,自动编程的推广和新型主轴伺服系统的出现,已使电加工机床进入了自动化的时代。

5. 最佳化

加工过程的机械化和自动化减轻了工人笨重的体力劳动,提高了生产效率,然而加工程序和加工参数等的选择一般都是人为规定的,不一定十分合理,而且在加工过程中情况在不断的变化。如何适应变化了的条件,自动地做出调正,以便进一步改进产品质量,提高生产效率和降低成本便是“最佳化”所要解决的课题。

电加工机床的最佳化是从适应控制入手的。电加工适应控制的目的是获得最大的生产率和最好的加工精度。从生产实践中发现,在电加工过程中变化的参量有间隙状态、加工面积、深度和工具电极损耗等。调正的量为加工规准(如脉冲电流的波形和幅值)、电极的往复运动和工作液压力等。为了实现最佳调正必须研究工作参数、电极往复运动行程、工作液压力等与生产率、加工质量、成本之间的函数关系,找出评价函数从而确定最佳控制方案。显然,根据间隙的加工状态来控制这个复杂的多参数的加工系统是电加工实现最佳控制的关键。早期的适应控制是及时地调正电流,增大脉冲间隔以防止产生电弧的控制方法。这种方式不可避免地降低了生产率。1974年在捷克布拉迪斯拉法市召开的第四次国际电加工会议上宣读的一篇论文中,详细地介绍了在当时的瑞士、日本、西德、美国等国家一些公司在电加工适应控制方面研究的情况,以及研制的适应控制装置。在这篇论文中,还提出了利用计算机实现适应控制是最为合理的论点^[29]。西德阿亨工业大学研制的一种带有脉冲利用率、击穿延迟、电导率和传动速度等信号的控制系统的由电子计算机控制的,这是用电子计算机实现最佳控制的首次尝试。这个系统的突出的优点是计算机能综合多参数的变化自行选择最佳加工参数。

近年来,已研制了一种对正常放电状态用一定的评价函数进行运算判断,予知要发生异常放电现象时,控制脉冲停歇时间和放电间隙蚀除物浓度的控制系统,检测方法也由单纯检测放电电压,发展到检测放电波形。最新的适应控制装置,则是根据脉冲放电组进行运算,控制脉冲停歇时间,以使电流密度维持最佳值。这样,工具电极就可用最大速度进给,进给速度还能用脉冲电参数来求算。这种方法的特点是表微加工状态的变量已不是变换成模拟信号而是把它们变换成数字信号,应用计算机进行逻辑运算与判断,并随时进行调正^[30]。现在,适应控制系统已进入用微处理机来控制的时代了。如日本贾派克斯公司的DP系列机床配备的“マイナル”自动控制装置(图4)、瑞士的查米尔斯公司研制的M 1 AA型Monitron控制器都是如此。英国依罗达(Eroda)公司的N 250、N 600型机床也是采用微型计算机来监控火花间隙状态和实现最佳控制的。

目前,不仅在电火花加工中研究了最佳化和适应控制的问题,而且在电解加工^{[31][32]}

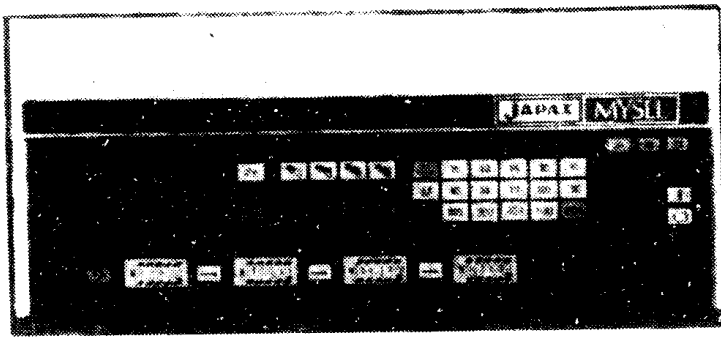


图4 “マイセル”自动控制装置

五个部分组成，即输入、数据库、最佳化程序、后信息处理机和输出。因此只要输入加工深度、截面、周长、工件和电极材料，计算机的输出就能告诉你加工时的最佳规准选择和电极的尺寸。

电加工机床采用适应控制技术后，已能够随时根据加工间隙状态的变化自动调正机床的工作参数，使机床经常处于最佳的工作状态，从而达到所希望的最高生产率、最好的加工质量和最低的成本。

6. 精密化与大型化

不断地提高加工精度始终是对电加工机床提出的迫切要求。随着现代化技术的发展，对零件、产品精度的要求是愈来愈高了，而加工工艺的完善，新技术新材料的应用也使继续提高精度成为可能。

电加工的加工精度和很多因素有关，如工具电极制造精度和在加工中的损耗、工具电极的装夹定位精度、机床本身的精度以及加工时所能控制的精度等等。有人认为，使用电火花加工方法加工钢时，加工表面粗糙度的极限为0.1微米 R_{max} ，因此形状精度的极限则为1微米，所以一般的电火花加工还不能作为一种超精密的加工方法。但实用上，在用电火花加工发动机喷咀小孔时所能达到的精度为 ± 5 微米^[35]，加工型腔时的精度为0.05~0.1毫米^[36]。电解成型加工精度一般为 ± 0.1 毫米^[37]，而电火花线切割加工的最高精度可达 ± 3 微米^[38]。在其它电加工方法中，如电子束扫描曝光制造大规模集成电路时的精度可达0.2微米^[39]。因此，发展电子束、离子束、激光等加工方法是实现精密加工的一条途径。

提高机床精度是获得良好加工精度的基础，因而国外各电加工机床制造厂都在致力于提高机床本身的精度，如加强了机床的刚性、改进了结构和采用了新技术等等。日本黑田精工的SD系列电火花加工机床的导轨，采用聚四氟乙烯材料提高导轨精度，有的机床主轴的导向使用静压轴承，能防止主轴烧伤和磨损，避免运动中的爬行等。日本西部电机公司的EW-30电火花线切割机床，采用高频淬火的滚动导轨，以提高精度及精度保持性，该机床并以直流伺服电机代替传动用的步进电机，其中的一个好处就是不致因电机发热而影响机床精度。瑞士电加工机床的精度一般是比较高的，查米尔斯公司生产的F40DCNC电火花线切割机床采用了刚性好的桥式结构和大理石工作台。总之，现在世界各国对机床本身的精度都给予很大的注意。日本三菱电机公司生产的DK-280和DK-360通用电火花加工机床的主轴刚性和运动精度，经检测实际上都达到并超过了电气加工学会于1969年制定的检验标准的规定值^[26]。

在电加工机床中工作液的发热也是被考虑的一个因素，有的公司已采取措施来改善工作液的循环和冷却条件以减少对机床精度的影响。在电解加工中，为了提高加工精度，还研究

电解磨削^{[33][34]}等加工中也采用了适应控制装置，都得到了很好的效果。

除了上面叙述的已用电子计算机实现了最佳控制外，最近还研究了利用计算机实现最佳设计的问题，并研制了计算机的加工设计系统。像前面已经提到过的一个系统，它有

了新型脉冲电源、快速短路切断装置及新的加工工艺如混气加工、采用硝酸钠电解液等，这些措施都使加工精度有所提高。但尽管如此，电解加工的精度仍是需要重点突破的难关。

大型化也是电加工机床发展的一个趋势，这是随着电加工应用范围的不断扩大而出现的新动向。日本三菱电机公司生产的DK2000型电火花加工机床配用了DIA X EP 120 电源，其平均加工电流达1000安。使用这台机床加工大型电机转子冲模只需17小时，而用过去的加工方法则需100小时；在加工汽车发动机曲轴锻模时也仅用了13小时，但用传统的加工工艺时则需80小时，其效果是显而易见的。还有一台可加工长达4米的柴油机曲轴的机床是由两台机床组合而成，共有四个主轴头，使用四台600安的脉冲电源，总电流达2400安³⁵。

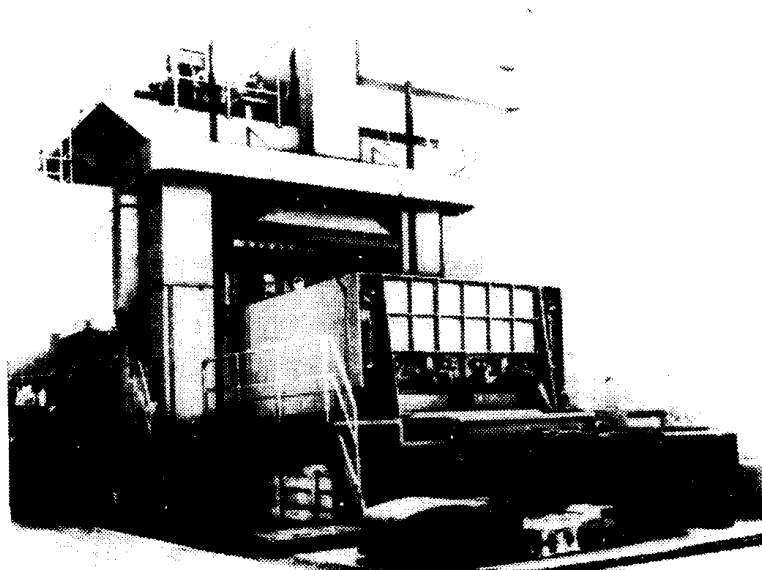


图5 大型电火花加工机床

在最近一、二年里国外也研制和生产了不少大型电火花线切割机床。如日本贾派克斯公司的L 450型、三菱电机公司的DWC-100H型和富士通FANUC公司的MODEL F或G型的工件都已达到300公斤。美国的阿奇特隆（Agiatron）公司在1975年生产的Agiectut DEM 25Special型机床工作台行程为254×610毫米，可加工重量为400公斤长度达1270毫米的大型工件⁴⁰。

同样，在电解加工机床中也有很多大型机床出现。日本三菱电机公司的MC-200G型电解加工机床的工作台面尺寸为3600×1100毫米，电源的电流为20000安。而根据1969年的报导，美国已制造了三台电源的电流为40000安的电解加工机床。显然，容量的进一步加大势必会给机床设计与制造带来很多新的问题，且相应的电解液系统等设备的加大增加了占地面积和投资，这是不利的一面，为此日本的贾派克斯公司提出了要研究低电流密度的电解加工以缓和设备容量的进一步升高。

机床的大型化是生产上的客观需要，目前存在的一些问题需主观上努力加以解决。

上面对当前电加工机床发展中出现的多样化、系统化、高效化、自动化、最佳化、精密化以及大型化的趋势作了简要的介绍，这些动向很值得进一步深入研究与分析。

四、基础理论

电火花加工是苏联的学者 Б. Р. Лазаренко 夫妇发明的, 五十年代开始在工业上获得应用。为了充分发挥这一加工方法的效能, 各国的科学家不断地在探索其机理, 工程技术界也在研究其应用技术。经过二十多年来的研究, 已经对电加工的奥妙有所了解, 并在电加工机理方面提出了不少学说。对在电火花加工时金属的蚀除提出了各种理论, 如苏联的 Б. Р. Лазаренко 的电动力理论, Б. Н. Золотых 的电、热和流体动力理论, 美国的 E. M. Williams 的电场力理论, 日本的风城三郎的热力学理论等等。最近法国人 L. Chincholle 提出了蒸汽泡破裂的理论, 即用流体力学现象来解释电火花加工的机理^[41]。虽然理论很多, 但从能量的观点来分析, 电加工的基础可分为三个方面: 1. 能量的变换——电能转换成热能、力学能和其它形式的能量用于加工; 2. 能量的控制——尺寸加工时需要不连续的脉冲能量, 并能控制其大小; 3. 材料的蚀除过程——弄清楚在材料上发生的熔化、蒸发、溶解、塑性变形等过程。

从目前已经提出的理论来看, 还不能准确无误地解释电加工所发生的全部现象, 这是因为电火花加工的机理是相当复杂的, 并随放电条件不同而有所差异。实际上, 电火花腐蚀的物理过程是电磁学、热力学、流体动力学等的综合过程。目前, 对电加工的机理仍在进行研究, 研制了一种热——数学模型, 并利用有限单元法和电子计算机开展研究工作^[42]。

同样, 在电解加工领域中也在进行理论方面的研究。苏联、日本和西德等国家的学者在这方面都做了大量的工作, 发表了不少文章。特别是为了提高电解加工精度, 还研究了脉冲电流的静止液电解加工、混气电解加工和非线性电解液电解加工时阳极溶解的理论。在应用技术方面, 西德的阿亨工业大学进行了系统的研究, 给出了参数表, 据此可确定加工速度、有效蚀除量、端面间隙及表面光洁度与电流密度之间的关系, 对于工具电极的设计、加工不同材料所需的电解液以及加工过程的最佳化都进行了研究, 并提出了指导资料^[43]。

所有上述这些基础理论和应用技术的研究成果, 都大大促进了电加工技术的发展, 并为探索新的特种加工方法开辟了途径。

五、保证产品质量的组织和技术措施

国外厂家是很注意产品质量的, 因为一台质量不好的机床是没有竞争能力的, 是不可能获得最大利润的。为了保证产品质量, 必须不断地提高产品性能和研制新产品以满足用户的要求。一般情况下在组织管理和发展技术上主要采取以下一些措施。

1. 加强基础理论和应用技术的研究

电加工专业制造厂都设有研究所或研究室, 从事老产品更新和新产品的发展工作等。日本井上贾派克斯研究所自成立以来申请的特许和实用新案在国内为 7736 件, 在国外为 549 件^[44]。该公司由于注意研究工作, 不断地采用新技术、新结构, 所以机床始终处于世界较高的水平。美国的雷康公司仅有 100 人, 其中有 20% 的人员 (电气工程师 12 人、机械工程师 8 人) 是专门从事研究工作的, 因此该公司生产的专用小孔电火花加工机床已著称于世。

除厂内进行发展产品的研究工作外, 对于基础理论或重大的研究项目还委托高等院校、