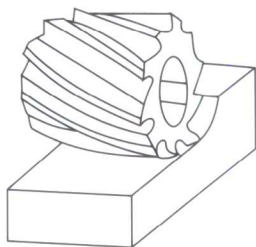




国家高技能紧缺人才培训丛书·数控技术

数控线切割加工技能



实训教程

主编 徐 峰



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国家高技能紧缺人才培养丛书 数控技术

数控线切割加工技能 实训教程

主编 徐 峰

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是根据“高等职业教育机械类专业人才培养目标及基本规格”的要求编写的。本书系统地介绍了数控线切割机床的结构、数控线切割的加工工艺、数控线切割加工操作、数控线切割的手工编程、CAXA 数控线切割自动编程等基础知识,并结合实例讲解了典型零件数控线切割加工实例,突出了应用性、实用性、综合性和先进性,体系新颖,内容详实。

本书可作为高职、高专、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院机床数控技术及应用、机电一体化等专业教材,同时也可作为职业技能培训的配套教材。另外,还可作为本科院校学生的实践教学和有关工厂技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数控线切割加工技能实训教程/徐峰主编. —北京:

国防工业出版社, 2006. 4

(国家高技能紧缺人才培养丛书 数控技术)

ISBN 7-118-04439-3

I. 数... II. 徐... III. 数控线切割 - 技术培训 -
教材 IV. TG481

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 017599 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)

北京市李史山胶印厂

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11 $\frac{1}{4}$ 字数 261 千字

2006 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 24.00 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

《国家高技能紧缺人才培养丛书 数控技术》

编委会

编委会主任

长三角国家高技能人才培养中心主任
德国职业教育培训中国项目总监

马库斯·卡曼

编委会委员

上海现代模具培训中心
江南大学
江南大学
河海大学
南京航空航天大学
合肥工业大学
上海第二工业大学
长三角国家高技能人才培养中心
长三角国家高技能人才培养中心
苏州工业园区培训中心
上海屹丰模具制造有限公司
上海昌美精械有限公司
上海上汽制造有限公司
韩国机床工业协会中国技术服务中心

徐 峰
张能武
周斌兴
唐亚鸣
刘淑芳
周明建
王新华
黄 芸
程美玲
邱立功
吴红梅
苏本杰
卢小虎
金友龙

丛书序言

改革开放 20 多年来,我国经济保持持续增长的势头。进入 21 世纪后,随着新一轮经济增长周期的到来,经济发展将跨上一个新的平台。其中,以先进制造业为主的第二产业对我国国民经济的飞速发展起到了非常重要的作用;制造业的迅速发展,为国民经济和社会发展作出了重要的贡献,成为我国经济腾飞的强劲动力。根据联合国工业发展组织公布的《工业发展报告 2002—2003》,我国制造业增加值占世界制造业的 6.3%,位居美国、日本和德国之后,排名世界第 4 位。

随着我国工业化进程的加速、产业结构的调整和升级,经济发展对高质量技能人才的需求不断扩大。然而,技能人才短缺已是不争的事实,这已引起中央领导和社会各界的广泛关注。调查研究表明,目前,我国在制造业领域急需大量数控、模具、汽车维修等专业高技能人才,而且我国技能型人才的培养模式相对落后,迫切需要通过提高职业教育和培训的针对性和适应性。教育部、劳动和社会保障部、国防科工委、信息产业部、交通部、卫生部联合提出优先在数控技术应用、计算机应用与软件技术、汽车运用与维修、护理等专业领域实施“先进制造业和现代服务业技能型紧缺人才培养培训工程”。劳动和社会保障部在全国范围内发起实施“国家高技能人才培养培训工程”,并制定了“三年五十万新技师培养计划”,以缓解高技能人才短缺状况。

面对技能人才短缺现象,政府及各职能部门快速做出反应,采取措施加大培养力度,鼓励各种社会力量倾力投入技能人才培养领域。同时,社会上掀起尊重技能人才的热潮,营造出一个有利于技能人才培养与成长的轻松、和谐的社会环境。

为认真贯彻党的十六届五中全会精神和《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》,适应全面建设小康社会对高素质劳动者和技能型人才的迫切要求,促进社会主义和谐社会建设,国防工业出版社根据教育部大力推动技能型紧缺人才培养培训工程的指导思想,通过大量的市场调研,并结合现有教材的实际情况,组织编写了急需开发的汽车应用、模具及数控专业技能实训教材。为做好该套教材的编写准备工作,使之更适合现代职业教育的特点,突出实践性教学,适应中等职业学校和企业培训的需要,特邀请长三角地区知名

企业、行业协会、职业院校及长三角国家高技能人才培养中心的有关专家编写了《国家高技能紧缺人才培训丛书》。本套丛书分数控技术、模具技术、汽车维修 3 个专业,共 18 个分册。

本套丛书是为了适应高技能紧缺人才的培养而编写的,为此组建了以职业院校、培训机构与企业界人士相结合的编审委员会,发挥各自优势。丛书的编写以企业对人才需求为导向,以岗位职业技能要求为标准,以与企业无缝接轨为原则,以企业技术发展方向为依据,以知识单元体系为模块,结合职业教育和技能培训实际情况,注重学生职业能力的培养,体现内容的科学性和前瞻性。

我们真诚希望本套丛书的出版能为我国的职业教育特别是紧缺技能人才的培训有所帮助。由于时间仓促,加上我们的水平和经验有限,丛书中可能存在某些缺点和不足,我们热切期待广大读者提出宝贵的意见和建议,以利我们今后不断改进和完善!

 **NTC** 长三角国家高技能人才培养中心

《国家高技能紧缺人才培训丛书》编委会

2006 年 1 月

前 言

纵观改革开放 20 年,我国机床消费额大致和国民经济 GDP 增长值同步,10 年翻了一番。20 世纪 80 年代初,我国机床消费额为 10 亿美元,90 年代初达 20 亿美元,2000 年为 37.88 亿美元。当年世界机床最大消费国美国,消费额为 68 亿美元,原预计 2010 年中国将成为世界最大机床消费市场,令人意想不到的是,2003 年美国发表的一项调查统计报告称:全世界机床产值 2002 年约 310 亿美元,比上年减少 14.2%,但中国比上年增加 20%,达 56.96 亿美元。我国首次成为世界第一机床消费大国和全球第一机床进口大国。

随着 WTO 的日益深入,我国制造企业已开始广泛使用先进的数控技术,而掌握数控技术的机电复合人才奇缺。2003 年,国家数控系统工程技术研究中心的一项调研结果显示,仅数控机床的操作工就短缺 60 多万人。

我国目前的数控人才不仅表现在数量上的短缺,而且质量、知识结构也不能完全满足企业需求。根据 2004 年 2 月劳动和社会保障部、教育部等六部门调查研究和分析预测,数控技术应用是我国劳动力市场技能型人才最为短缺的 4 类人才之一,并列榜首。

为加快和推动数控技术的发展,国防工业出版社根据教育部大力推动技能型紧缺人才培养培训的指导思想,通过大量的市场调研,并结合现有教材的实际情况,组织编写急需开发的数控专业技能实训教材。为做好该套教材的编写工作,使之更适合现代职业教育的特点,突出实践性教学,适用中等职业学校和企业培训的需要,特邀请长三角地区知名先进制造企业、职业院校及长三角国家高技能人才培养中心的有关教授专家编写《国家高技能紧缺人才培养丛书 数控技术》。本套丛书包括:

- 1.《数控车工技能实训教程》
- 2.《数控铣工技能实训教程》
- 3.《数控线切割加工技能实训教程》
- 4.《数控加工中心技能实训教程》
- 5.《数控编程技能实训教程》
- 6.《数控机床维修技能实训教程》

组织编写本套培训丛书的目的在于,提供一套与传统教材的编写模式不

同、富有时代创新特色、有利于应用型技能人才培养、真正适合就业方向的实训教材,以满足培养工程应用型技能人才的需求。

《数控线切割加工技能实训教程》一书是根据“高等职业教育机械类专业人才培养目标及基本规格”的要求编写的。本书系统地介绍了数控线切割机床的结构、数控线切割的加工工艺、数控线切割加工操作、数控线切割的手工编程、CAXA 数控线切割自动编程等基础知识,并结合实例讲解了典型零件数控线切割加工实例,突出了应用性、实用性、综合性和先进性,体系新颖,内容详实。本书可作为高职、高专、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院机床数控技术及应用、机电一体化等专业教材,同时也可作为职业技能培训的配套教材。另外,还可作为本科院校学生的实践教学和有关工厂技术人员的参考书。

本书由上海现代模具培训中心徐峰高级工程师主编并统稿,参加编写人员主要有江南大学张能武、周斌兴,长三角国家高技能人才培养中心黄芸、程美玲,苏州工业园区培训中心邱立功,上海屹丰模具制造有限公司吴红梅,上海昌美精械有限公司苏本杰等同志。本书稿由唐继艳、吴娟录入和校对。

本书在编写过程中得到国防工业出版社、上海模具协会、江苏模具协会、江南大学机械学院、常州职业技术学院、韩国机床设备销售服务中心、上海现代模具技术培训中心、长三角国家高技能人才培养中心的大力支持和帮助,并得到众多专家的指导和鼎力相助;同时参考了大量的企业内训资料和图书出版资料,谨此表示衷心的感谢和崇高敬意!

因编者水平有限,加上时间仓促,书中难免有缺点和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2006 年 1 月于上海

目 录

第一单元 数控线切割加工基础	1	三、工件的装夹和位置校正	56
课题一 数控线切割加工概述	1	四、加工参数的选择	60
一、数控电火花线切割的加工		五、数控线切割加工的工艺	
原理	1	技巧	62
二、数控电火花线切割加工特点	1	课题三 典型零件的加工工艺分析	64
三、数控电火花线切割的应用	2	一、冷冲模加工	65
四、电火花线切割技术的应用		二、零件加工	67
现状及发展趋势	2	第三单元 数控线切割编程	69
课题二 线切割控制分析	4	课题一 数控线切割手工编程	69
一、逐点比较法控制原理	4	一、数控线切割手工编程基础	69
二、控制框图	12	二、编程常用数学基础	75
三、典型控制器电路分析	13	三、典型化编程法	79
课题三 线切割加工设备简介	28	课题二 CAXA 数控线切割自动	
一、常用电火花线切割机床的		编程	84
种类和性能	28	一、线切割 CAD/CAM 软件简介	84
二、电火花线切割机床的基本		二、CAXA 线切割的操作界面	85
结构	31	三、点、圆和直线输入方法	91
三、电火花线切割机床的精度		四、CAXA 线切割 V2 编程实例	94
检验方法	41	课题三 HF 线切割图形自动编程	140
第二单元 数控线切割加工工艺分析	48	一、全绘图方式编程	140
课题一 数控线切割加工的主要		二、界面及功能模块的介绍	141
工艺指标及影响因素	48	三、辅助线绘图编程实例	145
一、数控线切割加工的主要工艺		课题四 数控线切割编程实例	149
指标	48	第四单元 数控电火花线切割加工	
二、影响数控线切割加工工艺指		实训	159
标的主要因素	48	课题一 数控电火花线切割加工	
课题二 数控线切割加工工艺分析	52	操作	159
一、零件图工艺分析	52	一、电火花线切割加工操作	
二、工艺准备	53	流程	159

二、加工前的准备	159	技术规程	169
三、线切割加工的控制器操作 ...	165	课题二 数控线切割加工实训	169
四、加工过程中特殊情况的处理	168	一、典型零件的线切割加工实例 ...	169
五、电火花线切割加工的安全		二、数控线切割加工初训	174
		参考文献	176

第一单元 数控线切割加工基础

课题一 数控线切割加工概述

随着电火花加工技术的发展,在成形加工方面逐步形成两种主要加工方式:电火花成形加工和电火花线切割加工。电火花线切割加工(Wire Cut EDM, WCEDM)自 20 世纪 50 年代末诞生以来,获得了极其迅速的发展,已逐步成为一种高精度和高自动化的加工方法。在模具制造、成形刀具加工、难加工材料和精密复杂零件的加工等方面获得了广泛应用。目前线切割机已占电加工机床的 60% 以上。

一、数控电火花线切割的加工原理

数控电火花线切割是利用连续移动的细金属导线(称作电极丝,铜丝或钼丝)作为工具电极(接高频脉冲电源的负极),对工件(接高频脉冲电源的正极)进行脉冲火花放电腐蚀、切割加工。其加工原理如图 1-1 所示,加上高频脉冲电源后,在工件与电极丝之间产生很强的脉冲电场,使其间的介质被电离击穿,产生脉冲放电。电极丝在储丝筒的作用下作正反向交替(或单向)运动,在电极丝和工件之间浇注工作液介质,在机床数控系统的控制下,工作台相对电极丝在水平面两个坐标方向各自按预定的程序运动,从而切割出需要的工作形状。

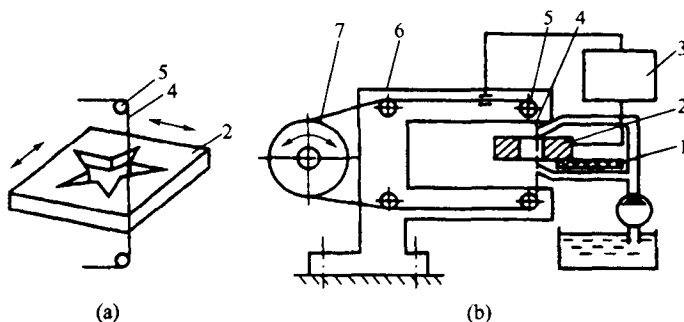


图 1-1 电火花线切割原理

(a) 工件及其运动方向; (b) 电火花线切割加工装置原理图。

1—绝缘底板; 2—工件; 3—脉冲电源; 4—电极丝(钼丝); 5—导向轮; 6—支架; 7—储丝筒。

二、数控电火花线切割加工特点

(1) 直接利用线状的电极丝作线电极,不需要像电火花成形加工一样的成形工具电极,可节约电极设计和制造费用,缩短了生产准备周期。

(2) 可以加工用传统切削加工方法难以加工或无法加工的微细异形孔、窄缝和形状复杂的工件。

(3) 利用电蚀原理加工,电极丝与工件不直接接触,两者之间的作用力很小,因而工件的变形很小,电极丝、夹具不需要太高的强度。

(4) 传统的车、铣、钻加工中,刀具硬度必须比工件硬度大,而数控电火花线切割机床的电极丝材料不必比工件材料硬,所以可以加工硬度很高或很脆,用一般切削加工方法难以加工或无法加工的材料。在加工中作为刀具的电极丝无须刃磨,可节省辅助时间和刀具费用。

(5) 直接利用电、热能进行加工,可以方便地影响加工精度的加工参数(如脉冲宽度、间隔、电流)进行高调整,有利于加工精度的提高,便于实现加工过程的自动化控制。

(6) 电极丝是不断移动的,单位长度损耗少,特别是在慢走丝线切割加工时,电极丝一次性使用,故加工精度高(可达 $\pm 2\mu\text{m}$)。

(7) 采用线切割加工冲模时,可实现凸、凹模一次加工成形。

三、数控电火花线切割的应用

线切割加工的生产应用,为新产品的试制、精密零件及模具的制造开辟了一条新的工艺途径,具体应用有以下三个方面:

(1) 模具制造。适合于加工各种形状的冲裁模,一次编程后通过调整不同的间隙补偿量,就可以切割出凸模、凹模、凸模固定板、凹模固定板、卸料板等,模具的配合间隙、加工精度通常都能达到要求。此外电火花线切割还可以加工粉末冶金模、电机转子模、弯曲模、塑压模等各种类型的模具。

(2) 电火花成形加工用的电极。一般穿孔加工的电极以及带锥度型腔加工的电极,若采用银钨、铜钨合金之类的材料,用线切割加工特别经济,同时也可加工微细、形状复杂的电极。

(3) 新产品试制及难加工零件。在试制新产品时,用线切割在坯料上直接切割出零件由于不需另行制造模具,可大大缩短制造周期,降低成本。加工薄件时可多片叠加在一起加工。在零件制造方面,可用于加工品种多、数量少的零件,还可加工特殊难加工材料的零件,如凸轮、样板、成形刀具、异形槽、窄缝等。

四、电火花线切割技术的应用现状及发展趋势

随着模具等制造业的快速发展,近年来我国电火花线切割机床的生产和技术得到了飞速发展,同时也对电火花线切割机床提出更高的要求,促使我国电火花线切割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。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,重视低速走丝电火花线切割机床的开发和发展

(1) 高速走丝机床依然稳步发展。高速走丝电火花线切割机床是我国发明创造的。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,加工性能价格比优异,深受广大用户欢迎,因而在未来较长的一段时间内,高速走丝电火花线切割机床仍是我国电加工行业的主要发展机型。高速走丝机的年产量目前已达到 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电火花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,高速走丝电火花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 $\pm 0.005\text{mm} \sim 0.01\text{mm}$ 范围内,加工表面粗糙度达到 $R_a 1\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ 。这就需要在机床结构、加工工艺、高频电流及控制系统等方面加以改善,积极采用各种先进技术,重视窄脉宽、高峰值电流的高频电源的开发及应用。

(2) 重视低速走丝电火花线切割机床的开发和发展。低速走丝电火花线切割机床由于电极丝移动平稳,易获得较高加工精度和表面粗糙度,适于精密模具和高精度零件的加工。我国在引进、消化、吸收的基础上,也开发并批量生产了低速走丝电火花线切割机床,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电火花线切割机床。与此同时,还应该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到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作 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,而且工作台只作 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,减小整机总质量。

(3) 高速走丝电火花线切割床的走丝机构,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电火花线切割机床、高低双速电火花线切割机床、走丝速度连续可调的电火花线切割机床,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电火花切割技术的发展,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电火花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。提高电火花线切割的综合工艺水平,采用多次切割是一种有效方法。

多次切割工艺在低速走丝电火花线切割机床上早已推广应用,并获得了尚佳的工艺效果。当前的任务是通过大量的工艺实验来完善各种机型的各种工艺数据库,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,可以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 机控制系统,扩充线切割机床的控制功能

随着计算机技术的发展,PC 机的性能和稳定性都在不断增强,而价格却持续下降,为电火花线切割机床开发应用 PC 机数控系统创造条件。目前国内已有的基于 PC 机的电火花线切割数控系统,主要用于加工轨迹的编程和控制,PC 机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研究:

(1) 开发和完善开放式的数控系统。目前高速走丝电火花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电火花线切割数控系统,以便充分开发 PC 机的资源,扩充数控系统的功能。

(2) 继续完善数控电火花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,提高电火花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 机进行自动补偿。

(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选用加工参数,充分发挥机床潜力。

(5) 深入研究电火花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电火花线切割 CAD/CAM 和人工智能软件。在上述各模块开发利用的基础上,建立电火花线切割 CAD/CAM 集成系统和人工智能系统,并使其商品化,以全面提高我国电火花线切割加工的自动化程度及工艺水平。

课题二 线切割控制分析

数控电火花线切割机床之所以能加工各式各样的形状的图形,是因为它的 X 、 Y 坐标工作台由数控系统控制。 X 、 Y 坐标工作台只能在 X 或 Y 坐标轴方向作直线进给,但线切割加工的大部分图形都是由斜线或圆弧组合而成。因此为了加工斜线或圆弧,就把 X 或 Y 工作台每走一步的距离(即脉冲当量)取得很小,只有 0.001mm 。依斜线斜率或圆弧半径不同, X 或 Y 两个坐标方向进给步数的多少互相配合,使钼丝的轨迹尽量逼近所要加工的斜线或圆弧。这样,钼丝中心的轨迹并不是斜线或圆弧,而是由逼近所加工的斜线或圆弧的很多长度甚小的折线所组成,也就是由这些小折线交替“插补”进给。所谓“插补”,就是在一个线段的起点和终点间有足够多的短直线组成折线来逼近所给定的线段。

目前的插补方法有很多种,一般的数控电火花线切割机床的数控系统,通常采用逐点比较法来插补。

一、逐点比较法控制原理

线切割数控系统是按逐点比较法的控制原理对线切割机床的 X 和 Y 坐标工作台进

行控制的,工作台每进给一步的移动量为 $1\mu\text{m}(0.001\text{mm})$ 。

(一) 逐点比较法插补原理

首先粗略地介绍机床是如何按规定图形加工出所需工件的。例如,现在要加工一段圆弧 AB (图 1-2(a)),起点为 A ,终点为 B ,坐标原点就是圆心, Y 轴、 X 轴代表纵、横拖板的方向,圆弧半径为 R 。

现在从点 A 出发进行加工,设某一时刻加工点在 M_1 ,一般说来, M_1 和圆弧 AB 有所偏离。人们就应该根据偏离的情况,确定下一步加工进给的方向,使下一个加工点尽可能向规定图形(即圆弧 AB)靠拢。

若用 R_{M1} 表示加工点 M_1 到圆心 O 的距离,显然,当 $R_{M1} < R$ 时,表示加工点 M_1 在圆内,这时应控制纵拖板(Y 拖板)向圆外进给一步到新加工点 M_2 。如概述中讲过的那样,由于拖板进给由步进电动机带动,进给的步长是固定的($1\mu\text{m}$),故新的加工点也不一定正好在圆弧上。同样可以明显地看出,当 $R_{M2} \geq R$ 时,表示加工点 M_2 在圆外或圆上,这时应控制横拖板(X 拖板)向圆内进给一步。如此不断重复上述过程,就能加工出所需的圆弧。

这样,加工的结果是用折线来代替圆弧,为了看得清楚,在图 1-2(a)中,把每步进给的步长都画得比较大,因而加工出来的折线与所需图形圆弧的误差也就比较大。若步长缩小,则误差也随之缩小,如图 1-2(b)所示,步长小了,加工误差也比图 1-2(a)小,而实际加工时,进给步长仅为 $1\mu\text{m}$,故实际误差是很小的。

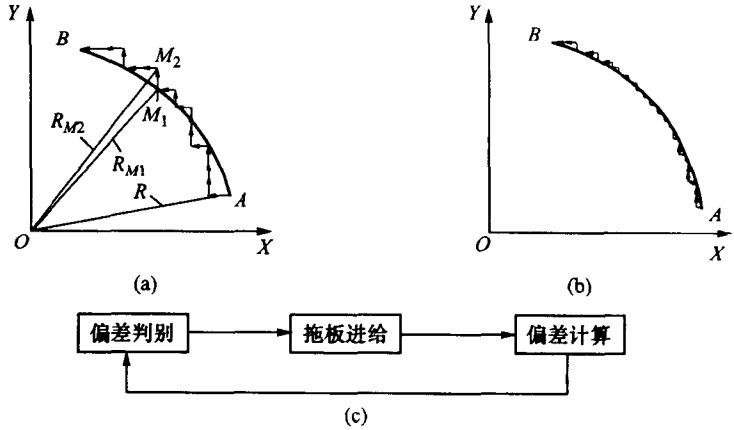


图 1-2 逐点比较法插补原理

由上例可以看出,拖板进给是步进的,每走一步都要完成三个工作节拍:

- (1) 偏差判别。判别加工点对规定图形的偏离位置(例如在加工圆弧时,应判断加工点在圆内还是在圆外),以决定拖板的走向。
- (2) 拖板进给。控制 X 拖板或 Y 拖板进给一步($1\mu\text{m}$),以向规定图形靠拢。
- (3) 偏差计算。对新的加工点计算出能反映偏离位置情况的偏差,以作为下一步判别的依据。

图 1-2(c)就是这三个工作节拍的框图。以后在实用中还应加上第四节拍“终点判

别”。

这种控制方案叫做逐点比较法,即每进给一步,逐点比较加工点与规定图形的位置偏差,一步一步地逼近。

在上述控制方案中可以看到,拖板的进给走向取决于加工点和实际规定图形偏离位置的判别,即偏差判别,而偏差判别的依据是偏差计算。因而,问题的关键是选取什么作为能正确反映偏离位置情况的偏差,以及如何进行偏差的计算。下面将对圆弧与斜线这两种不同的情况分别加以介绍。

1. 加工圆弧

(1) 加工偏差公式。加工圆弧时,很自然地考虑用加工点到圆心的距离和圆弧半径相比较来反映加工偏差。以逆时针方向切割第一象限的圆弧为例。设要加工半径为 R 的圆弧 AB ,箭头表示加工方向(即由 A 到 B), R 表示圆弧半径, R_M 表示加工点到圆心的距离(图 1-3(a))。

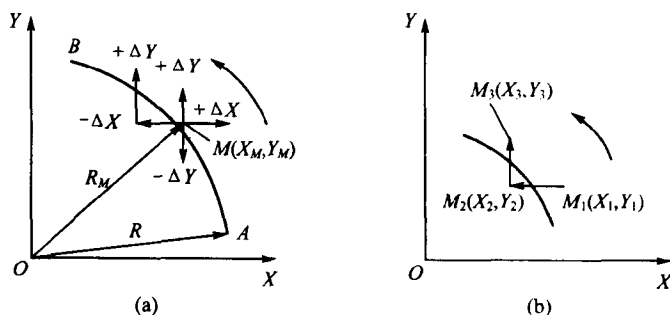


图 1-3 圆弧加工偏差

由上述可知,如果 $R_M > R$,表示加工点在圆外,为了减少加工误差,应控制拖板向圆内进给一步。点 M 进给可以走的方向有四个,在图 1-3(a)中分别用 $+\Delta X$ 、 $-\Delta X$ 、 $+\Delta Y$ 、 $-\Delta Y$ 表示。其中 $+\Delta X$ 、 $+\Delta Y$ 都是越走越离圆弧越远, $-\Delta Y$ 与圆弧加工方向不符。故只能是 $-\Delta X$,即控制 X 拖板沿 $-\Delta X$ 方向进给一步。

同理,若 $R_M < R$ 表示加工点在圆内,应控制 Y 拖板沿 $+\Delta Y$ 方向向圆外进给一步。

若 $R_M = R$ 时,加工点正好在圆弧上。但是为了继续加工,也必须进给。而拖板又只能作纵或横的运动,故不能精确地沿着圆弧进给,进给方向只是 $+\Delta Y$ 或 $-\Delta X$ 。现规定 $R_M = R$ 并入 $R_M > R$ 一类,即 $R_M \geq R$ 时,向圆内($-\Delta X$ 方向)进给。

设点 M 坐标为 (X_M, Y_M) ,根据勾股弦定理知

$$R_M^2 = X_M^2 + Y_M^2$$

比较 R_M 与 R 的大小,只要比较 R_M^2 与 R^2 的大小,故可取 $R_M^2 - R^2$ 作为点 M 的加工偏差,记为 F_M ,即

$$F_M = R_M^2 - R^2 = X_M^2 + Y_M^2 - R^2$$

这就是圆弧的加工偏差公式,直接按此式计算加工偏差对计算机是不方便的,以下提出一个简便方法。

(2) 偏差计算。如果能找出相邻两个加工点偏差值间的数量联系,从而使每走一步

后,新加工点的偏差可以用前一点的加工偏差来推算,那么就可以简化计算手续,这种算法叫做递推法。

在圆弧起点,很明显加工偏差 $F = 0$ 。

设在某一时刻加工点 $M_1(X_1, Y_1)$ 在圆外(图 1-3(b)), 这点加工偏差必然为

$$F_1 = X_1^2 + Y_1^2 - R^2 > 0$$

故需沿 $-\Delta X$ 方向进给 $1\mu\text{m}$ 到点 $M_2(X_2, Y_2)$, 得

$$X_2 = X_1 - 1 \quad Y_2 = Y_1$$

所以,点 M_2 的加工偏差

$$\begin{aligned} F_2 &= X_2^2 + Y_2^2 - R^2 = (X_1 - 1)^2 + Y_1^2 - R^2 = \\ &X_1^2 + Y_1^2 - R^2 - 2X_1 + 1 = F_1 - 2X_1 + 1 \\ F_2 &= F_1 - 2X_1 + 1 \end{aligned}$$

即

$$F_2 = F_1 - 2X_1 + 1$$

这就是在 $F_1 \geq 0$ 时, F_2 与 F_1 间的递推公式。

中点 M_2 已在圆内, 即 $F_2 < 0$ (图 1-3(b)), 则需沿 $+\Delta Y$ 方向进给 $1\mu\text{m}$ 到 $M_3(X_3, Y_3)$, 得

$$X_3 = X_2 \quad Y_3 = Y_2 + 1$$

所以点 M_3 的加工偏差

$$\begin{aligned} F_3 &= X_3^2 + Y_3^2 - R^2 = X_2^2 + (Y_2 + 1)^2 - R^2 = \\ &X_2^2 + Y_2^2 - R^2 + 2Y_2 + 1 = F_2 - 2Y_2 + 1 \end{aligned}$$

即

$$F_3 = F_2 + 2Y_2 + 1$$

这就是在 $F_2 < 0$ 时, F_3 与 F_2 间的递推公式。

以上是第一象限逆圆加工的情况, 经推导可以得到加工各象限逆圆或顺圆时计算偏差和各点坐标的公式, 以及 F 在不同计算结果进电极丝的进给坐标和方向, 如表 1-1 所示。

表 1-1 圆弧加工运算表

圆弧种类	$F \geq 0$		$F < 0$	
	进给坐标	计算公式	进给坐标	计算公式
SR ₁	$-\Delta Y$	$F - 2Y + 1 \rightarrow F$ $Y - 1 \rightarrow Y$ $X \rightarrow X$	$+\Delta X$	$F + 2X + 1 \rightarrow F$ $X + 1 \rightarrow X$ $Y \rightarrow Y$
SR ₃	$+\Delta Y$		$-\Delta X$	
NR ₂	$-\Delta Y$		$-\Delta X$	
NR ₄	$+\Delta Y$		$+\Delta X$	
SR ₂	$+\Delta X$	$F - 2X + 1 \rightarrow F$ $X - 1 \rightarrow X$ $Y \rightarrow Y$	$-\Delta Y$	$F + 2Y + 1 \rightarrow F$ $Y + 1 \rightarrow Y$ $X \rightarrow X$
SR ₄	$-\Delta X$		$+\Delta Y$	
NR ₁	$-\Delta X$		$-\Delta Y$	
NR ₃	$+\Delta X$			