



2012-2013

Report on Advances in Mechanical Engineering

中国科学技术协会 主编
中国机械工程学会 编著

学
精
萃
研
究

机械工程学科发展报告 (特种加工与微纳制造)

中国科学技术出版社



014033620

TH-12

02

2012-2013

2012-2013

机械工程

学科发展报告

(特种加工与微纳制造)

REPORT ON ADVANCES IN
MECHANICAL ENGINEERING

中国科学技术协会 主编
中国机械工程学会 编著



中国科学技术出版社

· 北京 ·



北航

C1721807

TH-12

02

2012-2013

014033850

图书在版编目 (CIP) 数据

2012—2013 机械工程学科发展报告 (特种加工与微纳制造) / 中国科学技术协会主编; 中国机械工程学会编著. —北京: 中国科学技术出版社, 2014.3

(中国科协学科发展研究系列报告)

ISBN 978-7-5046-6556-0

I. ① 2… II. ① 中… ② 中… III. ① 机械工程—研究报告—中国—2012—2013 IV. ① TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 032442 号

策划编辑 吕建华 赵 晖
 责任编辑 赵 晖 左常辰
 责任校对 何士如
 责任印制 王 沛
 装帧设计 中文天地

出 版 中国科学技术出版社
 发 行 科学普及出版社发行部
 地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
 邮 编 100081
 发行电话 010-62103354
 传 真 010-62179148
 网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm × 1092mm 1/16
 字 数 380 千字
 印 张 16.75
 版 次 2014 年 4 月第 1 版
 印 次 2014 年 4 月第 1 次印刷
 印 刷 北京市凯鑫彩色印刷有限公司
 书 号 ISBN 978-7-5046-6556-0/TH·61
 定 价 58.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

2012—2013

机械工程学科发展报告

(特种加工与微纳制造)

REPORT ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING

首席科学家 朱 荻

专 家 组

组 长 苑伟政 赵万生

成 员 (按姓氏笔画排序)

马炳和	王华明	王国彪	王晓浩	尤 政
叶 军	田小永	史玉升	白基成	冯 涛
巩水利	曲宁松	刘 冲	刘军山	刘志东
孙立宁	李 勇	李涤尘	杨永强	杨晓东
肖荣诗	陈 涛	陈立国	林 峰	季凌飞
荣伟彬	姚建华	徐 征	徐均良	黄卫东
常洪龙				

学术秘书 左晓卫 于宏丽

序

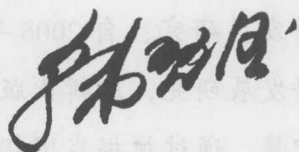
科技自主创新不仅是我国经济社会发展的核心支撑，也是实现中国梦的动力源泉。要在科技自主创新中赢得先机，科学选择科技发展的重点领域和方向、夯实科学发展的学科基础至关重要。

中国科协立足科学共同体自身优势，动员组织所属全国学会持续开展学科发展研究，自2006年至2012年，共有104个全国学会开展了188次学科发展研究，编辑出版系列学科发展报告155卷，力图集成全国科技界的智慧，通过把握我国相关学科在研究规模、发展态势、学术影响、代表性成果、国际合作等方面的最新进展和发展趋势，为有关决策部门正确安排科技创新战略布局、制定科技创新路线图提供参考。同时因涉及学科众多、内容丰富、信息权威，系列学科发展报告不仅得到我国科技界的关注，得到有关政府部门的重视，也逐步被世界科学界和主要研究机构所关注，显现出持久的学术影响力。

2012年，中国科协组织30个全国学会，分别就本学科或研究领域的发展状况进行系统研究，编写了30卷系列学科发展报告（2012—2013）以及1卷学科发展报告综合卷。从本次出版的学科发展报告可以看出，当前的学科发展更加重视基础理论研究进展和高新技术、创新技术在产业中的应用，更加关注科研体制创新、管理方式创新以及学科人才队伍建设、基础条件建设。学科发展对于提升自主创新能力、营造科技创新环境、激发科技创新活力正在发挥出越来越重要的作用。

此次学科发展研究顺利完成，得益于有关全国学会的高度重视和精心组织，得益于首席科学家的潜心谋划、亲力亲为，得益于各学科研究团队的认真研究、群策群力。在此次学科发展报告付梓之际，我谨向所有参与工作的专家学者表示衷心感谢，对他们严谨的科学态度和甘于奉献的敬业精神致以崇高的敬意！

是为序。



2014年2月5日

前 言

《2012—2013 机械工程学科发展报告（特种加工与微纳制造）》（以下简称《报告》）根据《中国科协学科发展研究项目管理实施办法（2012年修订）》的精神和要求，组织机械工程学科的专家学者对特种加工与微纳制造领域开展调研，对其科技发展情况进行研究总结后编写而成。

机械工程涵盖众多领域，学科内容极为丰富，而近年来我国经济的快速发展也极大地促进了各种新兴制造技术的研究和创新，如微纳制造和特种加工领域。为此，中国机械工程学会组织成立了以中国科学院院士、本会理事朱荻院士为首席科学家的专家撰写组，下设9个专题小组，在充分收集资料、深入调查研究和严谨数据分析的基础上，通过多次研讨会讨论和广泛征求本领域内专家学者的意见，经反复修改，形成了《报告》。

《报告》共设综合报告及电火花成形加工、电火花线切割加工、电化学加工、激光加工、增材制造、微纳设计、微纳加工、微纳封装、微纳测量与测试9个专题，涵盖了特种加工与微纳制造的主要领域。共有50多位专家学者参与了《报告》的专题研究及撰写工作，撰稿者都是工作在我国特种加工与微纳制造领域研究第一线的知名中青年学者及专家。中国科学院院士朱荻与西北工业大学的苑伟政教授、上海交通大学的赵万生教授一起负责组织并撰写了《报告》的综合报告。

通过研究、分析、总结，《报告》力求客观、科学地评价近年来机械工程学科中微纳制造和特种加工领域中的新进展、新成果、新见解、新观点、新方法和新技术；并结合国际上的发展动向和国内重大研究计划和课题，分析比较国内外发展现状，提出研究方向；从而，对未来5年的发展趋势做出预测。努力为从事本领域教学、科研、生产的科技人员，以及国家相关的科研管理与决策部门提供有益的启迪。

由于时间、信息、研究和撰写水平的局限，《报告》中难免存在疏漏之处，欢迎读者指正。

中国机械工程学会

2013年11月

目 录

序	韩启德
前言	中国机械工程学会

综合报告

机械工程学科发展研究（特种加工与微纳制造）.....	3
一、引言	3
二、近年的最新研究进展	5
三、国内外研究进展比较	26
四、发展趋势及展望	36
参考文献	45

专题报告

特种加工专题报告

电火花成形加工领域科学技术发展研究	49
电火花线切割加工领域科学技术发展研究	85
电化学加工领域科学技术发展研究	115
激光加工领域科学技术发展研究	132
增材制造（3D 打印）领域科学技术发展研究	149

微纳制造专题报告

微纳设计领域科学技术发展研究	171
微纳加工领域科学技术发展研究	184
微纳封装领域科学技术发展研究	197
微纳米测量与测试领域科学技术发展研究	214

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report

Non-traditional Machining and Micro & Nano Manufacturing 233

Reports on Special Topics

Research on the Development of Electrical Discharge Machining 236

Research on the Development of Wire Electrical Discharge Machining 239

Research on the Development of Electrochemical Manufacturing 240

Summary of Developments of Laser Manufacturing 242

Review on the Recent Developments of Additive Manufacturing

(3D Printing) Technologies 245

Research on the Development of Micro & Nano Design Technologies 248

Research on the Development of Micro & Nano Fabrication 249

Research on the Development of MEMS & NEMS Packaging Technology 250

Research on the Development of Micro & Nano Metrology 251

索引 255

综合报告

机械工程学科发展研究

(特种加工与微纳制造)

一、引言

特种加工技术国外也称为“非传统加工技术”，是指除常规切削加工而外的，基于物理或化学能量场对材料进行去除或添加，以及改变材料性能，从而达到加工目的的一系列工艺方法的统称。最常用的特种加工方法包括：电火花成形加工、电火花线切割加工、电化学加工、增材制造、激光加工、离子束加工、电子束加工、水射流加工、超声加工等。特种加工技术是现代制造体系中不可或缺的组成部分。与传统的切削加工相比，特种加工具有一些突出的优点：①以柔克刚：由于利用了物理或化学效应来去除或添加材料，可以采用比被加工零件软得多的工具，或者不用特殊的工具而加工任意硬度、强度、韧性的材料；②隔空打物：特种加工方法多为非接触式加工，加工过程中工具与工件材料之间不产生宏观的作用力，因此对加工装备承载能力的要求大为降低；③化繁为简：特种加工方法通常采用简单形状的工具（甚至不需要特殊的工具）、简单的运动、简便的控制就能完成较为复杂的形状和高精度的加工要求；④无微不至：材料的最小去除单位可以通过控制加工能量的大小以及能量的作用区域来调控，因此较容易实现微米甚至纳米量级的材料去除、添加及改性。

微纳制造技术是指特征尺寸在微米、纳米尺度的 MEMS/NEMS 器件或系统的设计、加工、封装、测试等技术。微纳设计研究如何设计微纳机电系统，它涵盖了众多学科领域，如机械、微电子、流体、光学、生物、化学等，并涉及系统行为仿真、物理模拟、工艺过程模拟等关键技术；微纳加工是指微纳器件的实现过程，主要包含了由微电子技术发展而来的批量微加工技术、微机械加工技术、纳米加工技术等；微纳系统的封装就是将微型器件或系统放入并固定在壳体或盒体内，并与壳体或盒体进行引线连接，壳体或盒体对微纳系统起到保护作用，形成与外部具有输入/输出接口的功能单元或模块；微纳测量与测试技术是微纳制造技术的基础与前提，它是在微纳器件的设计、加工和系统集成过程中，对各种参量进行微米纳米级检测的技术。微纳制造技术中，首先产生

的是微机电系统 (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 技术, 微机电系统是指采用微细加工技术批量制作的, 集微传感器、执行器、信号处理电路、电源于一体的微型系统。MEMS 技术源于微电子技术并采用了改进的微电子工艺以及其他特殊的加工制造手段, 其发展的原动力则是传统宏观系统批量化、低功耗、微型化的需求。当微机电系统特征尺寸缩小到纳米量级时则被称为纳机电系统 (nano-electro-mechanical systems, NEMS)。纳机电系统是微机电系统的发展与延伸, 其器件结构至少某一维的尺度为纳米量级, 即特征尺寸介于 $1 \sim 100\text{nm}$ 。由于尺寸更小及纳米结构所导致的新效应, NEMS 器件可以提供很多 MEMS 器件所不能提供的特性和功能, 例如超高频率、低能耗、高灵敏度、对表面质量和吸附性前所未有的控制能力等。经过几十年的发展, 基于 MEMS 技术的新型传感器以其微型化、低能耗等优势逐渐取代传统传感器。NEMS 概念产生于 20 世纪 90 年代末期, 得益于其极高的特征频率、良好的机械特性等优点, 发展异常迅速。

特种加工与微纳制造技术已被广泛应用于各制造领域, 特别是航空航天、能源动力装备、汽车、微电子、生物医疗等高端制造领域。随着我国中长期发展战略的展开, 特种加工与微纳制造技术面临着前所未有的发展机遇。新一代航空航天产品将采用大量高性能新材料, 这些材料往往都很难用常规方法加工; 航空发动机、燃气轮机等的零部件结构越来越复杂, 加工精度也越来越高; 国防军事、工业控制需要高精度微型传感器及微机电系统; 产业升级需要高精度、高效率、低成本及微纳化的制造技术以提高产品的竞争力; 可持续发展需要淘汰大量高能耗、高污染的制造技术, 急需高能效比、环境友好的制造技术加以替代; 产品的快速研发需要增材制造等快速响应、短流程的制造技术。

特种加工与微纳制造技术未来的发展动力将很大程度上来源于上述经济、社会发展的需求。一方面, 社会的发展与进步, 呼唤着自动化技术、信息化技术的普及, 以代替人工劳动, 提高全员生产率; 另一方面, 互联网技术作为新的通信、教育、技术、商业、社交、媒体平台, 对各领域的推动作用日益凸显, 深刻地改变着人们的生产与生活方式。这些都将对特种加工与微纳制造技术本身的发展提出新的要求, 将这些新的技术融入到特种加工与微纳制造技术体系之中也将是一个不可逆转的发展趋势。综合上述的我国科技、经济、社会发展需求可以预见: 未来 20 年间将是我国特种加工与微纳制造技术持续发展和提高并走向世界前列的重要时期。这一时期不仅将是学术研究及产业能力与水平不断提升的过程, 也是我国自主创新技术加速涌现与发展的过程。

本报告的特种加工技术部分以应用最广泛的电火花成形加工技术、电火花线切割加工技术、电化学加工技术、激光加工技术、增材制造技术等典型特种加工方法为对象展开叙述, 微纳制造技术部分则包涵了微纳机电系统、微纳设计技术、微纳加工技术、微纳封装技术、微纳测量与测试技术等微纳制造技术。

二、近年的最新研究进展

(一) 特种加工技术

1. 电火花成形加工

电火花加工,国际上称为“放电加工”(electrical discharge machining, EDM),是利用绝缘介质在脉冲性电场作用下击穿后所产生的放电现象,通过放电等离子通道的高温熔化、气化作用点附近的工件材料,达到材料去除加工的目的。电火花加工一般适合导电材料的精密型腔、复杂形状、微细结构的加工,特别是在模具、航空航天特殊材料和特殊结构的加工方面具有独特的优势;通过特殊技术手段,非导电的陶瓷等材料也可以实现电火花加工。电火花成形加工是指采用成形工具电极进行形面拷贝的加工方式,以区别于以细金属丝为工具的电火花线切割加工技术。以下无特殊说明情况下,均以“电火花加工”指代“电火花成形加工”。

近年来,在国家航空航天等战略产业飞速发展的需求牵引下,以及在国家“863”重点项目、“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题实施的推动下,电火花加工技术取得了长足的进步。随着一大批国家级科研项目的完成,涌现出众多高水平的科研成果,缩短了与国外技术水平之间的差距。一批具有自主知识产权的原创技术也引起了国内外的广泛关注。高水平科研过程培养了一大批高层次科研人才和高水平工程技术人员,带动了我国高等院校、专业科研院所的学科建设,形成了全球人数最多的电火花加工科研队伍,并在国际学术舞台发挥着越来越重要的作用。上海交通大学、哈尔滨工业大学、清华大学、南京航空航天大学、大连理工大学等高校都拥有持续稳定的电火花加工科研与教学活动,在国际学术界具有一定的学术影响力,而且都成为国家重点实验室或国家重点学科的重要组成部分。

(1) 关键技术突破

近几年来,在国家重大、重点科技计划的推动下,紧密结合国家战略需求,通过产学研合作,突破了一系列电火花加工关键技术,取得了一批重要科研成果,解决了一些航空航天发动机研制过程中的关键制造问题。

1) 五轴联动电火花加工机床及其数控系统。在国家科技重大专项和“863”重点项目的支持下,苏州电加工机床研究所、苏州三光科技股份有限公司、上海交通大学等单位组成的联合项目组,以及北京市电加工研究所、首都机械厂、哈尔滨工业大学、大连理工大学等单位组成的联合研究团队,突破了五轴联动电火花加工机床的关键技术,分别研制出具有自主知识产权的五轴联动数控电火花加工机床,实现了电火花加工领域高档数控机床的重大突破。两个联合团队分别加工出高温合金闭式叶盘等典型零件。苏州电加工机床研究所自主设计和研制的外置式高精度A轴和直驱式精密C轴采用先进的设计,简化了结

构和制造难度,与国外同类产品相比具有独特的技术优势。北京市电加工研究所研制的五轴联动电火花加工机床在钛合金加工效率、表面粗糙度等方面均有较大突破。

2) 五轴联动电火花加工数控系统及 CAD/CAM 系统。上海交通大学在实施国家科技重大专项和“863”重点项目过程中,充分利用 Linux 系统的开放性和专用运动控制器的稳定性,开发出具有自主知识产权的电火花加工数控系统,该系统实现了五轴全闭环数字控制、回转轴伺服倍率的自适应控制、正反向伺服进给插补、复杂轨迹的抬刀动作等电火花加工专用数控功能。系统成功地用于闭式叶盘加工。该系统实现了 12m/min 的主轴高速抬刀功能,成功地加工出深 100mm、宽 2mm 的深窄槽样件。

闭式叶盘流道形状复杂,电极设计和电极进给路径设计都很困难。上海交通大学开发出最多支持六轴联动的数控电火花加工 CAD/CAM 系统。该系统以插件方式运行在商业 CAD 软件平台之上,完成成形电极的自动设计,电极进给路径的自动搜索,数控代码生成与加工仿真等功能。该系统所采用独特的“共轭法”电极进给路径搜索优化算法,求解速度和精度得到提高,加工效率提升了 11%,电极消耗量降低了 20%。已成功应用于多家航空、航天发动机生产企业。

3) 高效放电铣削加工。苏州电加工机床研究所在国家“863”重点项目的支持下,研发了“高效放电铣削加工”机床。该机床采用苏州电加工机床研究所自主研发的高效放电铣削加工新工艺,利用回转的铜电极、大能量高频脉冲放电,结合类似分层铣削的数控进给运动,加工高温合金可以实现 $3000\text{mm}^3/\text{min}$ 的材料去除率,对于高温合金叶盘类及机匣类零件加工具有效率高、成本低的优势,已应用于我国航空发动机制造企业。

4) 微细电火花加工。在国家“863”重点项目支持下,由无锡微研有限公司、上海交通大学、清华大学、哈尔滨工业大学、大连理工大学、南京航空航天大学所组成的联合研发团队取得了一系列技术突破,研发了“多功能微细电加工机床”,该机床完全采用自主知识产权的关键技术,将微细电火花加工、微细电化学加工、微细超声加工以及复合加工功能集成在同一机床平台。自主研发的数控系统可以实现多种微细电加工工艺和复合加工工艺控制。可以实现 $10\mu\text{m}$ 最小特征的微细加工。

清华大学在国家“863”计划项目的支持下,成功研制了符合国 3 和国 4 排放标准的高端喷油嘴喷孔电火花加工专用机床,利用独自の专利技术实现了倒锥喷孔的加工。该技术及其专用装备已成功应用于油泵油嘴骨干生产企业。哈尔滨工业大学在“863”计划项目支持下研制出精密微细阵列孔电火花加工装备,可在线制备长径比大于 20 的微细电极。在厚度为 $50\mu\text{m}$ 的不锈钢微喷件上加工出 256 个 $50\mu\text{m}$ 的阵列孔,孔径误差为 $\pm 1\mu\text{m}$ 。中国工程物理研究院机械制造工艺研究所研制了微小群特征结构组合电加工专用机床,该机床配备了 16 个数控轴,可实现任意 4 轴数控联动插补。北京市电加工研究所在国家科技重大专项的支持下,与无锡油泵油嘴研究所合作研制了四工位电火花加工喷孔专用机床,加工直径为 $0.22\mu\text{m}$ 的喷射孔平均加工时间为 45s。

5) 多轴数控电火花小孔加工技术与装备。苏州电加工机床研究所经过 20 多年的持续研发和不断创新,在高速电火花小孔加工技术及装备、产业应用等方面取得了明显的技术

优势，用于航空发动机零件小孔加工的机床已经具备七轴数控能力。已经在航空、航天发动机的涡轮叶片及静叶栅气膜冷却孔、燃油喷注器、火焰筒及安装边等大量小孔制造过程中取得了成功应用，结合数控运动还可完成非圆孔（腰形孔、扇形孔）的放电铣削加工。

（2）工艺方法创新

我国高等院校的基础研究也已经基本摆脱了以跟踪为主的模式，独立思考、自主选题、注重原创的基础研究活动在国家自然科学基金委项目的支持下大量展开，一些原创性的新技术也随着基础科研的深入而陆续涌现出来。

1) 集束电极电火花加工技术。上海交通大学在自然科学基金项目的支持下，开展了集束电极电火花加工方法研究。该方法将众多管状单元电极通过集束方式固定在一起，通过调整每个单元电极的端面位置，形成复杂曲面的逼近形状。该方法大大简化了粗加工电极的制造过程，可节省大量加工时间和成本。由于集束电极具有纵向多孔结构，与传统实体电极相比可实现强化内冲液，从而带走大电流加工时所产生的金属屑和热量，使得加工效率提高了3倍。

2) 高速电弧放电加工。上海交通大学在开展集束电极电火花加工时，发现了“尾状放电痕”这一特殊现象，通过流场仿真印证了尾状放电痕是由高速流场作用于放电等离子体通道，使其发生偏转造成的。其根本原因是高速流体动力对放电等离子体通道产生的控制作用。从而领悟到“流体动力断弧机制”，发明了“高速电弧放电加工”方法。该方法的核心技术要素包括：采用电弧放电作为能量场以提供比火花放电能量密度更高的能量场；通过集束电极或多孔内冲液电极以提供高速间隙流场；利用高速横向流场控制电弧的移动和切断；运用低频或直流大电流提供高效去除材料所需要的能量；以水基工作液提供更好的散热和排屑效果，且无火灾隐患。

由于基于流体动力断弧机制的高速电弧放电加工不需要工具与工件间的切向运动，因此可以实现沉入式的型腔加工，也可以配合数控运动实现任意曲面加工。用该加工方法加工镍基高温合金（GH4169），材料去除率（material removal rate, MRR）可以达到 $14000\text{mm}^3/\text{min}$ （放电电流为600A），相对电极损耗可以控制在1%以内。该方法特别适合难切削材料的高效粗加工。此项研究于2012年获得国家自然科学基金重点项目资助。

3) 放电诱导可控烧蚀加工方法。南京航空航天大学利用金属在高温下与氧气发生强氧化反应现象，提出了放电诱导可控烧蚀高效加工方法。通过放电诱导，使工件表面放电点局部产生活化区，控制氧气的通入量，使加工表面的金属产生剧烈氧化燃烧，从而大幅度提高材料去除效率。加工模式的兼容性的存在使放电诱导烧蚀过程与纯粹的电火花加工交替进行，可以通过放电诱导烧蚀提高加工效率，通过电火花加工获得较高的表面质量和加工精度。该方法适合于钛合金、高温合金、高强度钢等难切削材料的加工，与电火花加工技术相比，可大幅度提高加工效率。

4) 引弧微爆炸加工。装甲兵工程学院采用高频脉冲电源控制引弧，在极短时间内引发微爆炸，对陶瓷等硬脆材料形成高温轰击作用，产生材料去除。该加工系统主要由专用脉冲电源、空压机、轰击波发生器及三坐标工作台等构成。实验证明引弧微爆炸方法可以

在陶瓷材料上加工出平面、孔、槽、外圆表面等形状,设备成本和运行成本都很低,而且该方法的能效比较高。在加工机理研究方面,通过高速摄影对引弧微爆炸的等离子体射流产生过程、外观形态进行了观察,加深了对微爆炸等离子体射流产生原理的理解。通过显微镜观察和模拟计算对材料蚀除机理也进行了理论探讨。

2. 电火花线切割加工技术

电火花线切割加工,简称为线切割加工(wire electrical discharge machining, WEDM),其加工原理与电火花成形加工相同,都是利用放电蚀除效应来进行加工的。所不同的是采用细金属丝作为工具电极,通过控制电极丝相对于工件的运动轨迹,加工出所需要的直纹面形状,其工作方式类似于木工用的“线锯”。由于工具电极丝的送进方式不同,又分为往复走丝线切割加工(国内发明的独有方式)和单向走丝线切割加工(国外普遍采用的方式)。

电火花线切割加工是精密模具、航天、航空、汽车、半导体等制造领域的关键加工技术,在相关重要制造领域中发挥着难以替代的作用。随着科学技术的不断创新与发展,国内外的电火花线切割行业通过技术改革与攻关,无论在加工过程控制,还是在改进加工工艺方面都取得了大量新的进展和成果,并逐步成为一种高精度和高自动化的加工方法。

(1) 往复走丝电火花线切割加工

近年来,国内科技工作者都以提升往复走丝电火花线切割加工精度、加工表面质量和自动化水平作为产品发展的主攻目标,纷纷推出更高性能的往复走丝电火花线切割机床,并重点在数控系统及自动化控制、脉冲电源、工作液性能以及多次切割工艺等方面做了大量研究。

数控系统及其自动化控制是电火花线切割加工机床的重要组成部分,控制系统的稳定性、可靠性、控制精度及自动化程度都直接影响到加工工艺指标和工人的劳动强度。近年来国内针对往复走丝线切割加工的特点,在控制系统以及相关自动化加工技术等方面取得了突破性进展。山东大学开发的基于扫描仪图像的线切割加工自动编程系统,其以图片或实物为尺寸依据,通过扫描仪获取图像,对图像进行矢量化,并完成曲线拟合和加工程序的编制。哈尔滨工业大学根据往复走丝电火花线切割加工拐角时产生的切割形位误差,研究了横向进给补偿、纵向进给补偿、回形进给补偿3种不同的控制电极丝运动轨迹的策略方案。智能专家控制系统不断完善,包括高频参数、切割次数、加工余量、切割跟踪、丝速控制和张力参数智能化以及低能量、高速进给自动切换等功能的开发,大大提高了往复走丝电火花线切割的加工质量和加工效率。

脉冲电源是电火花线切割机床的心脏,其性能直接影响机床的加工速度、加工精度、加工稳定性以及电能的利用率,因此脉冲电源技术一直是电火花线切割技术领域研究的热点。脉冲电源功能模式的扩展和性能的提高,使得电火花线切割加工应用领域范围更广,满足了不同的加工需求。为解决往复走丝电火花线切割机床脉冲电源加工表面质量和加工精度较低的问题,哈尔滨工业大学研发了一种电参数大范围可调的精密脉冲电源,适合多