电火花成形加工技术的现状与挑战

北京市电加工研究所、电火花加工技术北京市重点实验室 （100191） 翟力军 伏金娟 刘建勇 孙东江 卢学军 郭 妍

摘要：从应用、机床和加工工艺三方面综述了电火花成形加工技术的现状，根据未来市场对特殊材料、微细复杂结构零部件精密加工以及智能化、数据化和网络化的需求，提出了我国电火花加工技术面临的挑战。



中国机械工程学会特种加工分会电火花成形加工技术委员会主任委员 翟力军

自上世纪中叶，电火花成形加工技术开始应用以来，在难加工材料、复杂型腔零部件加工中表现出的独特优势，使其在模具、刀具、特殊结构零件以及特殊材料等加工领域得到了非常广泛的应用。近年来，随着国防军工、航空航天、船舶核电、汽车模具、电器电子和医疗民用等领域的科技进步，高熔点、高强度、高纯度和高韧性的新型材料不断涌现，类似涡轮发动机整体叶片的复杂结构零部件需求量日益扩大，电火花成形加工以其“无切削力加工、无刀痕加工、以软克刚及仿形逼真”等显著特点，成为上述难加工零部件不可或缺的加工手段。

1. 电火花成形加工技术的现状

在“中国制造2025”、“德国工业4.0”和“互联网+行动计划”的引导下，国内外学者、科技人员都在关注和研究电火花成形加工技术如何融合信息化、智能化，以顺应新常态下新市场对各类机床产品的需求。

电火花成形加工（sinking electro-discharge machining，简称SEDM）近年来技术上发展很快，已成为难加工材料、复杂微细结构加工的中坚力量。用户已接受了SEDM与HSM工艺技术的融合，尤其是SEDM已进入HSM物流网的体系之中。当下用户更多关心的是工艺流、信息流、接口技术的衔接，而不是单纯的SEDM新技术。

电火花成形加工整体解决方案有了实质性进展，客户需求得到高度关注，国外厂商已经不再专注于高档机的单项技术指标的提高，而是把重点放在用户关注的市场应用和整体解决方案上。

国内厂商在产品类型和先进技术应用上紧跟国外步伐，在各方面进行探索，从产品外观到内在结构都在尝试着升级换代，产品技术有了明显提高，反映出市场结构调整和产品性能提升以及在拓展应用领域的变化。

（1）中国作为模具、装备制造大国，世界各大EDM制造商都高度重视是必然的。国际知名厂家产品在不断地开拓中国市场，国外主要公司有：瑞士GF公司（GF Machining Sotutions）、日本沙迪克公司（SODICK）、日本三菱公司（MITSUBISHI）、日本牧野公司（MAKINO）、西班牙欧纳公司（ONA）、韩国艾克索公司以及德国斯来福临集团（SCHLEIFRING WALTER）等。国际上知名厂家产品的主要技术特点和发展趋势表现为如下三点。

首先，信息化、智能化、自动化已成大趋势。未来工厂是智能化的、超级快速的、更多IT介入的且无缺陷的加工过程，发展趋势和行业的相互关联融合将以燎原之势快速发展。机器将推动工厂的生产力，不需要太多的人力，必需由人力完成的工作应由

制造商对人力资源进行分配。工厂自动化将解决劳动力成本日益提高和传统制造技术工人短缺两大问题。

GF公司提出了Solution的概念——加工方案。针对航空航天发动机叶盘、支架零件以及叶片冷却孔加工为主的航空航天产品，将五轴镗铣加工中心HPM800U、五轴联动加工中心HEM700U、五轴电火花钻孔机DRILL300整合为自动生产线；针对精密模具和零件加工的产品，将移动机器人、高速铣削加工中心HSM400LP、精密数控电火花成形机床FORM200、3R工件电极自动交换库（定位精度2μm）、海克斯康三坐标测量机及电极自动补偿系统等组成了自动化生产线。这类自动生产线的出现有效缩短了机床的待机时间，避免了操作人员对加工的干涉，保证了加工产品的一致性，使零件和模具不间断的生产成为现实。

日本牧野公司（MAKINO）也已开始自动化生产线的组线工作，虽然该公司有HSM高速铣削等设备，在与SEDM互通信息、模具车间管理和计算机软件上也有一定的积累，但在寻找工件电极自动交换等物流技术方面遇到了问题，以致工作进展缓慢。

今天的自动线水平离柔性制造系统（Flexible Manufacture System，简称FMS）还有一定的距离，但目标很明确，当今的自动化已不仅仅是给用户省人工费用，而更多的是防止人为失误、简化操作工人难度，为车间调度管理人员提供技术支持。

其次，航空航天关键零件加工仍是主攻方向。由于中国航空航天工业的大力发展，加工发动机上带冠涡轮盘、叶片及空心透平叶片冷却孔等关键部件的需求越来越多，成为各类专用机床研究的主攻方向。随着电火花加工技术的进步，现已成为航空航天工业关键部件制造的一种重要加工方法。像GF公司针对航空、航天领域微小孔类零件开发了DRILL 300机床（见图1），该机床具有实时穿透检测功能，针对不同孔径可自动编程加工，适配了多种自动化解决方案（如有直排式16位电极刀具库和旋转式50位电极刀具库）等功能。如图2所示是叶片安装在该机床双转轴上的加工示意图。针对航空航天领域的复杂零件的加工，西班牙欧纳公司（ONA）也进行很多工艺技术及装备的开发，如航空航天领域叶片型面、密封圈、密封槽、前缘及后缘等关键零部件的加工（见图3、图4）。

最后，精密模具和零件加工机床进一步智能化、自动化。为了完成精密模具和零件的高效、精密加工，国际知名厂家产品的智能化、自动化水平在不断提高。

电火花成形机床有GF公司的FORM200机床、沙迪克公司的AG40Ls机床、三菱公司的EA8S机床和欧纳公司的NX3F机床等（见图5～图8）都是为高精度和微细应用而设计的。主要应用在医疗仪器、植入体、高精度模具、手表、微电子、微孔和LED模具等，以及微细接插件、微细冲压件和微细零部件等有高精度要求的加工。像GF公司FORM200机床具有无障碍工作输入、数据直接下载、远程控制式加工和可预测式平动加工方式等；三菱公司EA8S机床具有自动测量模式、直观形状专家检索系统等；欧纳公司NX3F机床具有免维护过滤系统功能。

（2）在国家科技重大专项的支持下，以北京市电加工研究

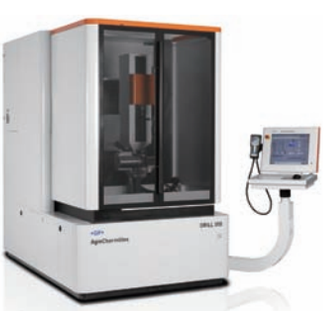


图1　DRILL 300机床

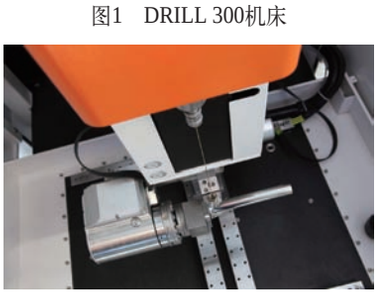


图2　叶片安装在机床双转轴上加工示意图

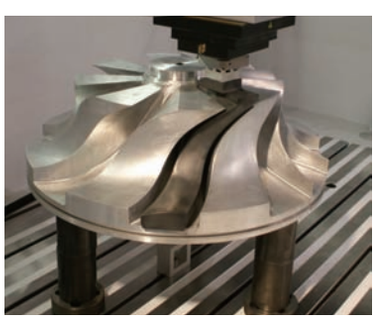


图3　航天用叶片型面加工实例照片

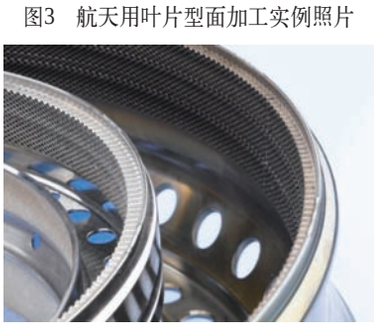


图4　航空用密封圈加工实例照片

所、苏州电加工机床研究所为代表的研究机构完成了五轴五联动数控电火花成形机床的研制（见图9、图10），并成功推向市场。已用于航空航天发动机的整体叶盘加工，突破了西方国家对我国的技术封锁。该类机床实现了五轴全闭环控制，直线轴定位精度≤0.005mm、重复定位精度≤0.002mm、回转轴定位精度≤15″、最佳表面粗糙度值R_a=0.08μm并且钛合金加工效率为829mm^3/min，达到了国际先进水平。



图5　FORM200机床

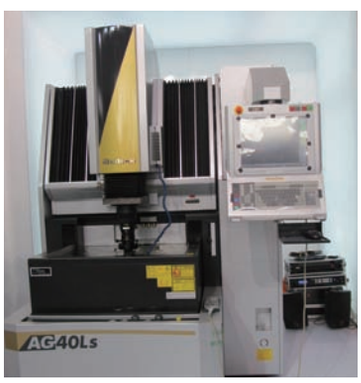


图6　AG40LS机床



图7　EA8S机床



图8　EDM312机床

国内生产企业投放市场的电火花成形加工机床无论外观设计还是制造工艺都有了明显的进步，产品技术展现出了不断的探索和明显的提高。总之，从产品外观到内在结构都在尝试着升级换代，反映出了市场结构调整和产品性能提升。同时也拓展了应用领域，特别是在多轴联动、特殊材料（聚晶金刚石、钛合金、高温耐热合金以及超高温陶瓷等）和微细复杂结构（航空航天



图9　北京市电加工研究所N850机床



图10　苏州电加工机床研究所DK7140

闭式叶轮、空间位姿精密小孔）电火花加工技术方面取得了明显的进展。

目前主要技术特点和发展方向为三点：适应航空航天等领域加工要求的多轴联动电火花成形机床及工艺技术。为满足航空航天等重点制造领域的复杂零部件的制造难题，国内电火花加工装备生产厂家都在开发相应的多轴联动电火花加工装备及技术。像北京市电加工研究所下属公司推出A系列（见图11）、CTM系列（见图12）、以及MD系列（见图13）等多款面向中高端市场的产品，该类机床以高速、高刚度五轴联动数控电火花成形加工机床关键技术及智能技术的应用为突破口，很好的满足了型腔复杂类零件的加工难题，如图14所示为应用北京市电加工研究所开发的，五轴联动电火花加工装备和工艺技术加工完成的典型零件镍基高温合金三元整体闭式叶轮；北京安德建奇数字设备有限公司开发的AF1300四轴全功能数控电火花成形机床（见图15），*X*、*Y*、*Z*、*C*四轴8个方向都可以伺服加工，配备4工位电极自动交换装置，配合*C*轴旋转功能可以实现任意方向圆形和方形平动，实现空间扩孔加工，同时有球形和三维平动功能。

适应精密模具加工要求的数控电火花成形机床。模具加工一直是电火花加工技术的重点应用方向，为了更好的服务于模具加工领域，国内很多厂家都在升级换代自己的产品。像北京凝华科技有限公司生产的NH25F高性能一体化三轴数控电火花成形机

床（见图16），该机床数控系统为自主研发的，用较低的价格，接近主流机床的性能，使得性价比大幅提升。北京迪蒙数控技术有限责任公司开发的AP30、



图11　A30四轴联动数控电火花成形机床

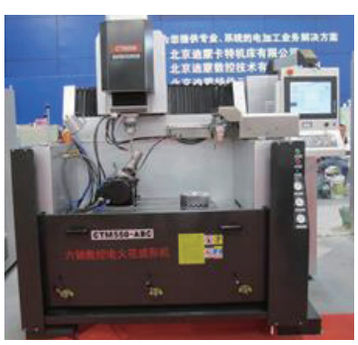


图12　CTM550-ABC六轴数控电火花成形机床



图13　MD6多轴数控电火花小孔机

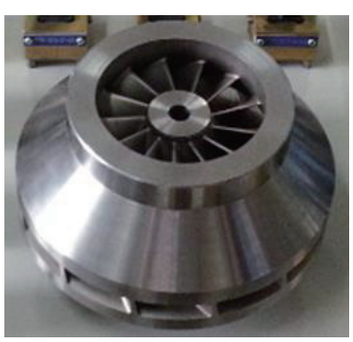


图14　镍基高温合金三元整体闭式叶轮照片

A35油槽升降式精密数控电火花成形机床（见图17），升降油槽结构更便于实现工件的自动化拆装、工件的找正和调整。是实现自动化、提高加工效率必不可少的装备。北京机床所精密机电有限公司生产的AUTOFORM40三轴联动数控电火花成形机床（见图18），该机床采用Windows平台，界面友好，操作简单；采用电感回路，减少了电源柜的能耗和发热量；采用精准等能量脉冲控制，使电极损耗减少到0.1%，表面粗糙度值R_a≤0.3μm。

适应超硬材料刀具加工要求的数控电火花加工专用机床。随着聚晶金刚石（PCD）、立方氮化硼（PCBN）刀具市场从简单的车刀、直刃铣刀、铰刀向高精度、复杂刃口方向的快速发展，



图15　AF1300四轴数控电火花成形机床



图16　NH25F数控电火花成形机床

以及这种超硬材料机械磨削的难点，电火花加工已成为超硬刀具的常用加工手段之一，获得了更广泛地应用。目前电火花刀具磨削机床已实现了PCD多齿片形刀具、螺旋线多齿柱形刀具、复杂形状刃口刀具、木工刀具以及精密复杂超硬刀具的加工。

北京迪蒙特佳工模具技术有限公司生产BDM-902机床不仅具备恒压进给、快速进退刀和砂轮在线修整等先进功能，还具备立轴自动回转功能，可实现精度3μm以内高档PCD活塞刀、铰刀的高效率加工，刀具刃口表面粗糙度值R_a≤0.05μm。BDM-903电火花刀具磨床（见图19），内含放电参数专家数据库，具备三轴数控三轴联动功能，有增爆回路和超精加工回路的高效电火花脉冲电源，适合于加工PCD螺旋铣



图17　A35油槽升降式电火花成形机床



图18　AUTOFORM40数控电火花成形机床

刀、PCD修边刀和PCD雕刻刀等回转类刀具，刃口粗糙度值可达到R_a≤0.2μm。

北京凝华科技有限公司生产MF301双侧面电火花刃磨机床（见图20）、MD25i型四轴自动PCD聚晶金刚石刀具放电刃磨机床，开发了高效等能量脉冲电源，配合放电状态自动检测、齿间距自动检测分度以及在线精车电极轮功能，加上高精度的机械结构和微米级闭环控制，达到了生产效率高、尺寸精度好及表面粗糙度低的优质加工效果，并且一人可操作多机。MF301双侧面刃磨机床具有八轴数控系统，其中六个坐标轴，两个旋转主轴。

北京机床所精密机电有限公司生产的AG400聚晶金刚石刀具数控电火花磨床（见图21）配备了高效率、高表面粗糙度质量PCD加工专用电源、刀具刃磨专用软件，具有盘类刀具自动测量定位、自动补偿和自动加工等功能。



图19　BDM-903精密电火花超硬刀具刃磨机床



图20　MF301双侧面电火花刃磨机床

总的来看，国内电火花加工技术的发展与国外电火花加工在整体技术水平、关键功能模块设计和自动化线组线上与国际知名厂家的产品还有差距，但整体技术水平也在不断进步，也能够完成像航空航天领域内关键零部件的加工制造难题。

2. 电火花成形加工技术未来市场需求与产品定位

未来20年，航空航天工业在世界全球一体化、航空运输自由化和城市化日益上升的大趋势带动下，旅游、运输业将飞速发展，预计全球将需要36 000架新飞机，近5万亿美元的市场价值。若每架飞机配置两台发动机，其发动机的需求量就是72 000台。从第十四届中国国际机床展会（CIMT2015）上看，航空航天发动机的需求受到了业内人士的重点关注。从加工方向看航空航天发动机制造的特点主要体现在两方面：①难加工材料，如钛合金、钛铝合金、高温合金、碳纤维复合材料、超高温陶瓷基复合材料及碳/碳复合材料等。②难加工结构，如复杂曲面结构件（叶轮、叶片、机匣等）、低刚性工艺系统结构件（大直径薄壁零件上的小孔、深孔和窄槽等）、精密偶件（喷油嘴等）。到2030年，我国对航空发动机难加工材料复杂结构零部件的需求量会更大，这一缺口将给国产机床提供广阔的市场空间，也促使国内厂商不断追求技术进步、奋力追赶国际先进水平。

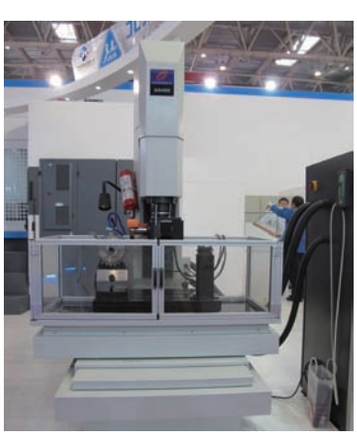


图21　AG400电火花磨床

在微小型腔零部件精密加工领域，预计到2020年，内部结构更小更紧凑的超大规模集成电路制造、大功率半导体激光制造以及大尺寸TFT-LCD显示屏等将被广泛应用；预计到2030年，精密视觉、微力传感装置在电子制造、MEMS制造等领域将被广泛应用，对精密微细多轴联动电火花成形机床有巨大需求。目前，国外高档设备占据了大部分市场，国产机床在可靠性、功能性及精准性等方面存在着明显不足。另外，加工工艺的不确定性、工艺参数的不系统性和工艺数据库的不完整性，也都使其难以与国外高档设备抗衡。

随着智能制造、智能车间的推广普及，具有信息采集、传输和处理功能的网络化智能加工装备市场需求将日益迫切，而目前国产机床在该领域仍处空白。

航空、航天、模具和电子信息等领域的快速发展，以及智能化、信息化技术的不断推广，对电火花加工技术有了越来越高的要求，同时也为电火花加工技术的发展提供了更广阔的空间。

对于未来产品定位，首先是面向微型机械、微小型腔零部件的精密多轴联动电火花成形加工的机床。该类机床专为新材料、

新结构和特殊工艺技术而设计、开发，具有多种联动功能，可满足高精度、高表面质量、微细、微小型和复杂结构零部件的加工要求，尤其适用在超常加工尺度、特殊性能材料以及特殊使用环境的加工领域。如飞行器位姿控制系统对撞孔板、液压伺服系统反馈杆、喷油系统旋流器和副喷口，汽车发动机高压共轨喷油嘴和孔板、具有小于1mm^{3}型腔的微型机械，超大规模集成电路精密模具（如IC、LED及光纤接插件）等领域中的窄槽、微孔和小型腔类产品的加工。

其次是面向航空航天、能源装备的大型精密多轴联动电火花成形加工机床。在航空航天发动机、军工能源等领域，透平压缩机中带叶冠整体涡轮盘、涡轮转子和整体闭式叶轮等关键零部件大多采用切削性能差的高镍合金、钛合金、超高温陶瓷或新型复合材料，其空间结构复杂，具有相邻叶片间通道小、叶型扭曲角度大等特点，用机械加工方法，会出现刀具干涉、粘刀、切痕深，甚至破坏薄壁等问题。

在运用专业三维设计软件对零件型腔、刀具与电极运动轨迹仿真分析的基础上，将该类机床与高速铣削加工、电火花线切割加工等加工手段优化匹配，将使零件加工效率、尺寸精度及表面质量等得到大幅度提升。

最后是发展基于智能化、工艺数据库与互联网的电火花成形加工信息服务平台。互联网技术的飞速发展，为生产过程远程管理、机床故障远程诊断和远程工艺服务等提供了便利条件，但由于零部件品种的丰富性，结构的多样性，使得电火花成形加工信息服务平台的开发成为逻辑复杂、规模庞大的系统工程。

随着电火花成形加工工艺数据库的深入开发，智能化电火花成形加工装备的市场化普及，以及基于互联网的服务平台的成熟应用，将使机床供应商与用户深度融合。客户将在最短时间内获得系统的、完整的工艺解决方案，其产品设计能力与加工技术水平将大幅提高。

3. 电火花成形加工技术面临的挑战

李克强总理在政府工作报告中明确提出：制定“互联网+”行动计划，推动移动互联网、云计算和大数据记忆物联网等与现代制造业结合，促进电子商务、工业互联网和互联网金融健康发展，引导互联网企业拓展国际市场。中国特种加工如何应对“互联网+电加工”以满足未来市场不断变化的需求？这对全行业提出了严峻的挑战。

（1）发展高可靠、高精准节能脉冲电源。借鉴雷达、激光等脉冲电源的DDS（直接数字频率合成）技术、磁脉冲压缩技术；采用PWM开关电源替代工频变压器来提升脉冲电源的供电系统可靠性；采用储能元件电感代替耗能元件电阻，实现80%以上的能量利用率；通过实时波形检测控制来实现异常波形剔除，提升波形精准度；应用清扫脉冲进行电火花精加工，针对不同的加工状况调整不同的检测参数和清扫脉冲能量参数，粉碎短路桥或积碳。

通过以上方法克服目前脉冲电源工频变压器体积大而重，输出对电网依赖度高、能量利用率低、不易模块化等缺陷。面临的挑战包括：克服传统的电路理论，不能满足现有系统开发和测试手段的需求，结合电磁场理论满足系统的电源、信号、电磁和数据完整性的要求；用储能电感替代电阻，可以有效提高能源利用率，但电感会导致脉冲电流开始或结束时出现爬坡和拖尾现象，使波形控制难度大，影响精加工的放电质量；将DDS技术与磁脉冲压缩技术有效应用在脉冲电源中，还需进行深入的理论研究和实践探索；虽然电子技术的发展，高速采集系统实现波形检测已不再是技术瓶颈，但要实现波形的实时准确控制，则对滤波处理、波形模板比对和异常波形控制等算法的合理性与控制实时性提出了更高要求；将PWM大功率电源技术应用到脉冲电源中，满足脉冲电源动态负载、电压调整范围宽的特点，是对脉冲电源设计提出的新挑战；为使脉冲电源实现高可靠性，应深入研究白盒测试对象的运行机理，摸索完善的测试与分析手段，将面临高加速寿命试验方案复杂、失效机理分析欠缺等难题。

（2）发展精密柔性自动化加工机床。将机械技术与电子技术相结合，以硬件为基础，以软件为支持，实现电火花成形加工的柔性和高效率，满足零部件结构复杂性、尺寸精确性以及用户对产品个性化的加工需求，面临的挑战包括：设计与机床结构匹配的工具电极库，开发控制模

块，实现加工过程中任意两个工具电极的互换，满足复杂结构零部件的加工需求；将直线电机控制技术、直线电机冷却技术、直线电机防护技术、垂直轴动平衡技术等应用在电火花成形加工机床中，提高机床运动精度、反应速度、灵敏度、随动性和安全可靠性，延长机床使用寿命；利用CAD建模技术、CAE仿真技术、CAF仿真技术、热处理技术和铸造技术等，设计热敏感小的电火花成形加工机床主机；建立基于温度传感器的模块化温度控制单元，消除温度梯度对机床精度的影响；建立不同工作温度下的精度补偿数据库，自动生成补偿数据；开发适配于多轴联动的精密全浸液转台，结构设计、转轴装配、绝缘设计、分度精度控制方式以及密封结构设计是成功开发此类产品的重要环节。

（3）发展智能数控与远程健康保障技术。电火花成形加工智能数控与远程健康保障可远程诊断异地现场的机床状态与设备故障，实现设备运行状态的可监控性，提高机床的可靠性。随着网络信息技术、工业云、大数据等相关技术的发展，各研究机构针对远程健康保障系统的连接开放体系、诊断信息规程、传输协议以及对用户的合法限制已有初步讨论与研究，面临的挑战包括：针对不同企业，对制造资源信息表达方式不同的情况，在行业范围内，解决机床联网过程中通信协议、接口标准的不统一的难题；开发新算法，实现智能加工，改变加工面积的控制缺乏定量依据的现状；完善CAD/CAPP/CAM系统的融合；开发集工具电极设计、轨迹规划和相关算法等融合的智能摇动技术，保证加工各型面表面粗糙度不均匀性≤10%，尺寸一致性在3～5μm范围；深入分析抬刀的物理过程，建立数学理论，最大限度减少系统软件开发过程中工艺试验的工作量；对数据的采集、挖掘、分析和决策等过程开展深入研究，使电火花成形加工的远程监控与智能故障诊断技术逐渐成熟，并形成规范和标准。

（4）发展特殊材料、超常结构高效多轴联动电火花加工工艺与拓展服务平台。①做到根据材料物理化学及机械特性，摸索一套系统的特殊材料电火花成形加工工艺研究方法，建立快速响应特殊材料零部件的制造工艺平台，实现产品高效高速加工。②应在现有的多轴联动加工技术与其他相关技术进行融合的基础上，开发超常结构零部件，如带叶冠涡轮转子、整体闭式透平叶轮等的电火花加工专用设备，提高这类零部件的加工效率。③应进一步完善从零部件三维模型转换到工具电极拆分设计与仿真，到路径规划与干涉检查，再到自动生成加工程序的专用软件，优化仿真分析算法，生成更加高效的加工代码程序，解决工具电极拆分设计难度大、准备周期长的技术难题。

4. 结语

零部件材料多样性、结构复杂性和尺寸精确性的提高，网络信息技术的发展，客户个性化需求的增大，这些都将给电火花成形加工技术提出更高的要求，也将提供更广阔的发展空间。预计未来10年，随着电火花成形加工技术与信息技术、网络技术的融合，国产柔性化高精度机床主机、智能数控系统、新型脉冲电源以及新型功能部件等的广泛推广，电火花成形加工技术的应用领域将得到进一步拓宽，对我国特种加工行业的推动作用也将更为凸显。

参考文献：

[1] CIMT2015专家组. 第十四届中国国际机床展览会特种加工机床展品评述[J]. 电加工与模具，2015（3）：1-19.

[2] 叶军. 精密高效电加工关键技术取得重大突破[J]. 电加工与模具，2012（1）：9-19.

[3] 中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图[M]. 北京：中国科学技术出版社，2011.

[4] 姜行果. 基于DDS的线性调频雷达波形发生器的设计与实现[D]. 北京：中国科学院研究生院，2007.

[5] 张涛，陈亮. 现代DDS的研究进展与概述[J]. 电子科技，2008，21（3）：73-78.

[6] 戴育航，钱照明. 磁脉冲压缩技术及其在脉冲电源领域中的应用[J]. 电力电子技术，1999（2）：54-57.

[7] 鲁方霞，邓朝晖. 数控机床的发展趋势及国内发展现状[J]. 工具技术，2006，3（40）：44-48.

[8] 叶云岳. 直线电机在现代机床和中的应用与发展[J]. 电机技术，2010（3）：1-5.

MW（收稿日期：20160921）