

我国电加工技术及装备发展与展望

苏州电加工机床研究所有限公司董事长 叶 军



目前我国电加工机床拥有量约50万台，成为世界之最。近年来，我国每年进口电加工机床在2 000台左右，进口额约3亿美元，已经成为世界最大的电加工机床消费市场。

电加工机床生产大国瑞士原有2家，现并为1家（瑞士阿奇夏米尔公司），年销售量为2 500~3 000台，销售额约人民币30亿元；另一个电加工机床生产大国日本也只有4~5家公司，年销售量为6 000~6 500台，销售额约合人民币40亿元。我国的电加工企业数量远远超过其他国家，经过几十年的发展，目前已有约170家生产企业，每年生产3~5万台电加工机床，为航空航天、军工、模具等行业提供了大量装备，推动了这些产业的发

展，也确立了我国在国际电加工领域的地位。但我国内资电加工企业仍然是多而不强，销售额超1亿元的企业只有2~3家。我国电加工机床生产企业的效益和综合实力相对差距很大。

我国电加工机床产品结构调整取得的主要突破

1. 高端电加工机床在与跨国企业（集团）的竞争中艰难前行

高端电加工机床面对的是跨国电加工企业性能品质优良的产品，近期有关内资企业在国家数控机床重大专项成果的支撑下，在与跨国企业（集团）的竞争中艰难前行，有喜有忧。

内资企业生产的高端数控电火花成形机床近期在性能质量上有明

显提高，3轴以上数控电火花成形机床达到了中端机的水平，有的逼近国际先进水平，打破了国外产品一统天下的局面，市场份额在不断提升。

用户对内资企业生产的该类机床认可度在提升，相关产品在精密模具、航空航天、军工等领域得到了更广泛的应用。

内资企业生产的单向走丝电火花线切割机床，自2008年金融危机以来市场份额在不断下降，这类机床的市场竞争力还明显不足，亟待进一步提升。有的产品能做了“形似”，是第一步，但要做到“神似”，则还有更艰难、更长的路要走。

高端的多轴数控微小孔电火花加工机床，由于技术提升较快，内资企业生产的产品占据了90%以上的市场份额。为航空航天领域研制的7轴数控电火花高速小孔加工机床基本满足了用户的要求，但在某些性能上与国际先进水平相比还存在差距，应加速提升。

多轴数控的微小孔加工机床，内资企业的产品不仅能满足国Ⅲ排放标准的汽车发动机喷油嘴精密喷油孔的加工要求，而且开发的具有倒锥孔加工功能的产品也得到了应用，加工化纤喷丝板精密微孔的机床性能也有明显提升，更好地满足了用户新型产品的加工要求。

2. 多次切割技术推动往复走丝电火花线切割机床由低端向中端发展

量大面广的往复走丝电火花线切割机床属低端电加工机床，近几年开发的多次切割加工技术，使该类产品的加工精度、表面质量及相关性能有明显提高，获得了突破性的进展，推动了该类机床由低端产品向中端产品的发展。但在加工精度稳定性（保持性）、可靠性方面还有待进一步提高。

3. 细分市场专用数控电加工机床的开发形成了产品结构调整的亮点

随着我国国民经济及先进制造业的高速发展，在航空航天、军工、能源、汽车、钢铁、IT和医疗器械等领域中新产品、新工艺和新材料不断涌现，遇到大量用传统机械加工或常规通用电加工设备无法解决的加工难题，为电加工技术及装备的发展提供了极好的发展机遇。近年来，国内电加工企业和科研院所积极为这些重点领域制造业排忧解难，研制了一大批各种各样的具有专项技术的专用电加工设备，如数控高效放电铣削加工机床、多轴数控微孔加工机床、蜂窝环数控电火花磨削专用设备、数控高效钛合金电火花加工专用设备、超硬材料电火花工具磨床、高效特种钢阳极机械切割设备、特殊材料复杂型面电解加工机床和轮胎模花纹块5轴数控电火花加工机床等。这些产品不仅有力地支撑了我国相关制造业的快速发展，特别是为我国航空航天、军工领域新机种、新武器的研制和神州飞船的上天发挥了重要作用，而且促进了有关企业避开竞争、差异发展，开启

了电加工产品结构调整的亮点。

我国电加工技术取得了长足的进步

1. 自动穿丝、精密、高效数控单向走丝电火花线切割机床

通过重大专项及863计划相关课题的实施，该产品的最大切割速度达到 $350\text{ mm}^2/\text{min}$ ，切割精度 $\leq \pm 0.002\text{ mm}$ ，最佳表面粗糙度值 $R_a \leq 0.2\text{ }\mu\text{m}$ ，这3项指标与以往的产品相比有明显提高。另外，还新增了直径 0.05 mm 细丝切割功能、自动穿丝功能， $A(B)$ 轴的三维切割功能，完善提升了工艺专家系统及专用数控系统，明显缩小了与国际先进水平的差距。

2. 五轴联动精密、数控电火花成形机床

重大专项及863计划相关课题开发的产品最大生产率为 50 A 时 $400\text{ mm}^3/\text{min}$ 、 100 A 时 $1\,125\text{ mm}^3/\text{min}$ ，加工钛合金为 $829\text{ mm}^3/\text{min}$ ，最小电极损耗 $\leq 0.1\%$ ，最佳表面粗糙度值 $R_a = 0.1 \sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$ ，加工钛合金的最佳表面粗糙度值 $R_a = 0.166\text{ }\mu\text{m}$ ，机床备有智能工艺数据库，具有 X 、 Y 、 Z 、 $A(B)$ 、 C 五轴联动功能。所开发的带冠整体涡轮盘扭曲叶形五轴联动电火花成形加工CAD/CAM软件系统及工艺技术，可进行对高温耐热合金、钛合金材料的带冠扭曲叶形火箭发动机涡轮盘加工，打破了西方国家对我国国防工业高端电加工机床的封锁。以上这些技术的突破，使五轴联动、精密、数控电火花成形机床达到或接近国际先进水平。

3. 全浸泡式精密电加工机床专用密封精密数控回转工作台

课题根据电加工机床的特殊要

求，在重大专项相关课题的支撑下，开发了两种规格的浸泡式、全密封精密数控转台，可以在油水工作液中使用，具有良好的馈电和伺服性能。小规格的产品采用了先进的直驱电动机技术；产品采用全闭环控制。重复分度精度 $\leq 5''$ ，分度精度 $\leq 15''$ 。可用于电火花成形机床、电火花线切割机床和电火花微小孔机床等各类电加工机床，能扩展机床的加工功能，提升机床档次。

4. 多次切割往复走丝电火花线切割机床技术进步

近期，电加工行业针对往复走丝电火花线切割机床精度不高、加工表面质量较差（有切割条纹）等问题，对该类机床的主机精度、电极丝张力控制、数字化脉冲电源、工作液系统、专用数控系统等进行综合技术提升，采用粗、中、精多次切割技术，使切割精度从 0.03 mm 提高到 0.01 mm ，表面粗糙度值由原来的 $R_a = 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 提高到了 $R_a = 0.8\text{ }\mu\text{m}$ ，消除了表面条纹，加工效率也有明显提高，使这类量大面广的电加工机床取得了重大的技术进步，推动了该类产品从低端向中端的发展。但这类机床的精度稳定性和可靠性技术将是今后需要研究的重要课题。

5. 细分市场的产品开发取得的技术进步

细分市场的产品开发是转方式、调结构的重要方面，电加工高档专用数控机床在细分市场中发挥着重要作用。近年根据用户的需求开发了不少专用机床，全部是创新产品，有些填补了国内空白，有些在国际上也没有，是我国自主原创产品，在航空航天、军工、汽车、

能源、冶金和模具工业中发挥着重要作用。下面列举几个典型成果。

(1) 高效、数控和放电铣加工技术及设备(863计划项目)。该技术及产品属我国自主原创,拥有多项发明专利。其采用简单铜管为电极,以类似数控铣的方式对难加工材料的复杂型面进行高效率、低成本去余量加工。在加工中需对电极损耗进行在线检测和补偿,以达到一定的加工精度。该机床具有六轴数控五轴联动功能,最大加工效率达 $3\,000\text{ mm}^3/\text{min}$,表面粗糙度值 $R_a \leq 2.5\text{ }\mu\text{m}$,主要应用于航空航天、军工等领域高温耐热合金材料的整体叶盘扭曲叶形、发动机机匣复杂型面的高效放电铣加工。已在西安航空发动机有限公司、沈阳黎明航空发动机有限公司和成都发动机股份有限公司等企业成功应用。其加工难加工材料零件,不仅加工效率高,而且加工成本很低,是采用加工中心加工的几十分之一。

(2) 精密微孔数控电火花加工工艺及设备(863计划项目)。该设备的微孔加工精度可达 $\pm 0.002\text{ mm}$,深径比 $\geq 30:1$,最佳表面粗糙度值 $R_a \leq 0.4\text{ }\mu\text{m}$,加工喷油嘴孔的流量散差 $\leq 3\%$ 。4~6轴数控机床已应用于航空航天、军工、汽车和内燃机等行业的喷油嘴、喷油环和喷片的喷孔等精密微孔加工,以及发动机叶片的气膜孔加工,也可用于化纤喷丝板精密喷丝孔加工。为了满足汽车发动机国IV排放标准的要求,还开发了6轴数控电火花倒锥微孔加工设备,替代了进口产品。

(3) 特种材料复杂型面电解加工技术及设备(863计划项目)。该机床可进行7轴分组联动加工,属于

复杂型面的电解展成加工技术,最大加工效率为 $4\,000\text{ mm}^3/\text{min}$,用于航空航天的高温合金、钛合金等材料的整体叶盘、叶片的精密加工,其加工精度为 $\pm 0.025\text{ mm}$,型面表面粗糙度值 $R_a \leq 0.63\text{ }\mu\text{m}$,该加工技术和设备达到或接近国际先进水平。

(4) 蜂窝环数控电火花磨床。该机床主要用于飞机、燃气轮机蜂窝环的磨削加工。蜂窝环是金属片压制的蜂窝状结构,直径一般为 $200\sim 1\,000\text{ mm}$,在航空发动机中起到关键的密封作用。由于金属片很薄,不能承受机械切削或磨削加工,因此只能采用电加工无切削力的特点进行加工。

(5) 超硬材料电火花工具磨床。机床配备7个传动轴,具备3轴数控3轴联动功能,可满足多刃超硬刀具电火花加工的各项要求,可实现表面粗糙度值 $R_a < 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 的PCD、PCBN刀具刃磨加工。

与国外电加工机床相比存在的差距

1. 数控电火花成形机床国外现状及存在的差距

数控电火花成形机床虽然由于国家科技重大专项的实施,缩小了与国外的差距,有些指标及功能已接近或达到了国际先进水平,但总体来说与国外还有一定的差距,主要体现在:机床热变形控制技术、机床动静刚度设计技术、专家系统、智能化技术、电极和工件自动交换技术、网络化技术及系统集成等方面。

2. 单向走丝电火花线切割机国外现状及存在的差距

单向走丝电火花线切割机近

年取得了长足进步,例如在自动穿丝技术、细丝切割技术、智能化技术以及精密加工技术等方面取得了重大进展,但就这些方面与国外先进水平相比,还存在一定差距,有些在我国还是空白,如细丝切割、加工效率、加工表面质量以及电极丝自动交换技术、工件自动交换技术和网络技术等方面。

3. 电火花微小孔加工机床国外现状及存在差距

电火花微小孔加工机床不论从数控轴数、加工孔径精度、最小表面粗糙度值和深径比等方面都不低于国外水平,但在多回路多电极加工、自动更换电极、复杂形面工件外形的在线检测及纠偏等方面还存在一定差距。

我国电加工机床产品的研发与提升

1. 新一代数控单向走丝电火花线切割机

(1) 研究内容:以10 ns窄脉宽、高峰值电流的高效、无电阻、防电解、绿色节能脉冲电源技术、加工状态检测及控制、细丝自动穿丝技术、恒张力恒速度的运丝技术、热变形控制技术、直线电动机驱动技术、开放式数控系统及智能化控制等关键技术突破为重点,研制出效率和精度更高、加工表面质量更好的绿色节能、智能化的新一代数控单向走丝电火花线切割机。

(2) 指标:最高生产率 $\geq 500\text{ mm}^2/\text{min}$;在第一刀切割效率 $\geq 300\text{ mm}^2/\text{min}$ 时,3次切割表面粗糙度值达到 $R_a = 0.8\text{ }\mu\text{m}$;切割精度 $\leq \pm 0.0015\text{ mm}$;最佳表面粗糙度值 $R_a \leq 0.05\text{ }\mu\text{m}$;最细电极丝直径

0.02 mm; 自动穿丝功能; 可配置高精度4轴; 具有难加工材料工艺专家数据库; 直线电动机驱动; 3D图形CAD导入、判析, 根据工件切割厚度变化适应控制。

2. 更高水平的数控电火花成形加工机床

(1) 研究内容: 高效、低损耗、无电阻和绿色节能型脉冲电源技术, 纳秒级微精脉冲电源技术, 更高水平的加工状态检测, 优化及策略的智能化控制技术, 高精度保持性的机床热变形控制技术, 直线电动机驱动技术, 电磁兼容技术, 微细微精加工技术, 特殊材料加工技术, 开放式数控系统, 工艺专家数据库等, 研制新一代高效、微精、绿色和智能5轴以上数控电火花成形加工机床。

(2) 指标: 最大加工电流50~

200 A; 最高生产率 $\geq 450 \text{ mm}^3/\text{min}$ (模具钢、电流50 A); 最佳表面粗糙度值 $R_a \leq 0.08 \mu\text{m}$; 直线电动机驱动; 主轴最高抬刀速度 $\geq 12 \text{ mm}/\text{min}$; 自动电极交换; 3D图形CAD导入、判析、根据加工面积变化自适应控制; 具有难加工材料电火花成形加工工艺专家库。

3. 加工指标更加稳定的具有多次切割功能的往复走丝电火花线切割机床

(1) 研究内容: 在现有技术水平的基础上, 重点研究加工精度、表面质量等加工指标的稳定性。主要研究新一代高效、精密、低损耗数字化脉冲电源; 更先进的张力控制及运丝技术; 全面满足多次切割要求的数控系统、工作液的洁净及安全防护技术、智能化的工艺及加工精度和表面质量稳定性控制

技术。

(2) 指标: 加工精度稳定达到 $\pm 0.01 \text{ mm}$; 加工表面粗糙度值稳定达到 $R_a \leq 1.0 \mu\text{m}$; 实用最大切割速度 $150 \text{ mm}^2/\text{min}$; 操作环境洁净; 全面达到新的国家标准。

4. 细分市场电加工机床的研制及提升

在前述相关关键技术突破的基础上, 开发更高水平的满足细分市场要求的电加工机床产品, 如油浸式数控低速走丝电火花线切割、钛合金数控电火花加工机床, 具有倒锥的电火花微孔加工机、多轴数控电火花小孔加工机床、聚晶刀具数控电火花磨床、数控电火花轮胎模具加工机床和数控电火花蜂窝磨床等, 以满足一些关键制造领域对电加工机床的迫切需求。MW

(收稿日期: 20140326)

2014年1~2月机械工业价格指数

2014年年初, 机械工业产品价格指数仍在低位运行, 但在2013年下半年企稳的基础上出现回升迹象。

2014年1~2月, 机械工业产品累计价格指数为98.8%, 连续2个月回升0.1个百分点。

电工行业: 多数产品价格指数仍处于100%以下, 如电站锅炉、汽轮机、水轮机、交流电动机、直流电动机、变压器、互感器、电力电容器、电线电缆、钢绞线、工业链条及高压开关设备等。

机床行业: 多数机床产品价格指数回升至100%以上运行, 如车床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床、数控车床、数控钻床、数控镗床、数控铣床及加工中心等。少

部分机床产品价格指数仍在100%以下, 如组合机床、刨床、数控特种加工机床及数控磨床等。

重型矿山行业: 锻造机及冲压机(包括数控型)、金属轧制设备、铸锻件、矿山提升设备、建井设备、起重机及输送机械等主要产品价格指数仍低于100%, 仅有采掘凿岩设备、矿物筛分及洗选设备等少数产品价格指数高于100%。

工程机械行业: 装卸机械、桩工机械、塔类设备及工程钻机等产品价格指数位于100%以下, 但挖掘、铲土运输机械价格指数已回升到100%以上。

汽车行业: 轿车、轻型客车、重型载货车、中型载货车、轻型载货车及两轮摩托等产品价格指数仍

低于100%, 仅有大型客车、中型客车等少数产品价格指数高于100%。

农机行业: 大型拖拉机、中型拖拉机、小型拖拉机、收获机械及场上作业机械等主要产品价格指数均高于100%。

通用机械行业: 鼓风机、轴流式通风机、真空泵及风制冷设备用压缩机等产品价格指数高于100%, 而阀门、容积泵、动力式泵及离心式通风机等产品价格指数低于100%。

基础件行业: 齿轮、轴承、紧固件等产品价格指数均低于100%水平, 而液压元件、气动元件、弹簧及金属密封件等产品价格指数高于100%水平。 (本刊讯)