

DOI: 10.3901/JME.2021.13.201

电解加工电源研究现状及发展趋势*

罗红平^{1,2,3} 张清荣^{1,2,3} 刘桂贤^{1,2,3} 张永俊^{1,2,3}

(1. 广东工业大学机电工程学院 广州 510006;

2. 广东工业大学广州市非传统制造技术及装备重点实验室 广州 510006;

3. 广东工业大学省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室 广州 510006)

摘要: 电解加工电源是电解加工装备中的关键核心基础设备,其性能直接影响着电解加工的精度、稳定性、表面质量和经济性。为了更加充分发挥电解工艺的潜力和优势,实现精密、高效、稳定的电解加工,有必要对电解加工电源的研究现状及发展趋势进行系统梳理和全面总结。系统分析了宏观尺度电解加工和微细电解加工的工艺原理,加工质量、效率和工艺稳定性等的影响因素,归纳总结出不同类别、不同应用场合下电解工艺对加工电源的性能指标要求。较为全面地介绍了近年来国内外在电解加工电源方面的相关研究进展及应用情况。对电解加工电源在控制高频脉冲产生、信号处理与输出、加工间隙监测、电源保护等几个方面的关键技术进行了评述,同时对电解加工电源的发展趋势进行了预测和展望,为促进我国电解加工技术的快速发展和广泛应用提供有益的参考。

关键词: 电解加工; 电源; 微细电解加工; 高频; 脉冲

中图分类号: TG662

The State of the Art and Development of Power Supply Technology in ECM

LUO Hongping^{1,2,3} ZHANG Qingrong^{1,2,3} LIU Guixian^{1,2,3} ZHANG Yongjun^{1,2,3}

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006;

2. Guangzhou Key Laboratory of Non-traditional Machining Technology and Equipment, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006;

3. State Key Laboratory of Precision Electronic Manufacturing Technology and Equipment Jointly Built by Province and Ministry, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006)

Abstract: As the key basic device in electrochemical machining (ECM) system, ECM power supply directly influences the machining accuracy, process stability, surface quality and economy of ECM. To fully release the potential and take the advantages of ECM, it is necessary to systematically review the research literature of ECM power supply and predict its' development trend. Based on the systematic analyses of the processing principle of macro-scale ECM and electrochemical micromachining (ECMM), and the influencing factors of machining quality, efficiency and process stability of these two types of machining, the performance requirements for ECM power supply for different machining type and various applications of ECM are summarized. The related research progress of ECM power supply at home and abroad in recent years are comprehensively introduced. Then, several key technologies of ECM power supply in control, high frequency pulse generation, signal processing and output, machining gap detection, power supply protection are summarized. At the same time, the development trend of ECM power supply is predicted and prospected, which provides a reference for promoting the rapid development and wide application of ECM technology in China.

Key words: electrochemical machining; power supply; electrochemical micromachining; high frequency; pulse

0 前言

随着航空航天、国防、汽车制造、半导体工业、

精密医疗、生物工程等领域的高速发展,电解加工技术得到了广泛应用。因具有加工范围广、加工质量好、效率高、工具无损耗、无机械切削力等特殊

的工艺优势,电解加工在解决难加工材料、精密零件、复杂形状结构的加工场合中发挥着不可替代的作用。电解加工不仅可用于实现对复杂型面、叶轮

* 国家自然科学基金资助项目(51705088, 51775119)。20200715 收到初稿, 20201227 收到修改稿

和枪炮管膛线等复杂零件的大面积高效加工,同时还由于其离子级反应的加工原理,成为微齿轮、微轴、微孔等微尺度零件的有效微细加工方法,甚至具备发展为纳米级加工方法的潜力。然而电解加工技术还存在一些不足,比如在宏观尺度加工时加工精度不够高、稳定性不易保证、容易产生污染、影响加工过程的因素繁多^[1](如加工电压、温度、进给速度、电解液种类、浓度、流场分布等)、工艺复杂等;微细电解加工的效率较低等。目前这些问题制约了电解加工技术的进一步发展和应用,成为特种加工领域的研究热点。

电解加工电源在电解加工工艺中起到核心基础作用。早期电解加工大多采用直流电源,这类加工方式导致加工精度、稳定性等方面的技术指标都较低。而高频脉冲电源电解加工方式的出现,尤其是纳秒级脉宽超短脉冲电源的出现,改变了传统认为电解加工精度差的观点,重新激发了电解加工工艺的应用潜力、唤起了对精密电解加工工艺的研究兴趣、扩展了工业应用。电解加工电源从 20 世纪 60 年代的直流发电机组和硅整流器发展到 20 世纪 70 年代的可控硅调压、稳压的直流电源,到 80 年代则出现了可控硅斩波的脉冲电源,到 90 年代随着现代功率器件的发展和广泛应用,又出现了高频、窄脉冲电解加工电源,电源的每一次变革都会引起电解加工工艺的新进展^[2]。近年来,埃玛克(EMAG)、PEMTec 等机床制造商近年来纷纷研发出系列精密电解加工装备,加工精度甚至媲美电火花加工。这与电解加工新工艺和脉冲电源及控制系统的发展、尤其是高频脉冲电解加工技术的进展是分不开的,比如荷兰 Philips 公司通过采用较窄脉宽(1~10 ms)脉冲电源和小间隙(10~50 μm)加工,成功实现了对剃须刀网罩 280 μm 宽沟槽的精密电解加工(加工精度为 5 μm ,表面粗糙度为 0.03 μm ^[3]);通过纳秒甚至皮秒脉宽的超短脉冲电流进行微细电解加工,已经实现了高至亚微米级的电解加工精度^[4];通过采取脉冲与振动耦合的振动辅助电解加工方式,实现了深窄槽的精密电解加工^[5]。

一般现代功率器件的频率越高,其相应的电流承载能力就越低。在宏观尺度电解加工中,由于工件材料去除量较大,加工面积也较大,为了达到一定的加工电流密度(一般 10~100 A/cm^2),电流值则高达数百、数千甚至上万安培,因而其加工频率一般在几十千赫兹都被视为高频;而在微细电解加工中,为了有效控制工件材料的定域性蚀除,脉冲电源的电流一般在 1 安培以下(毫安级别),其脉冲频

率则可高达千赫兹以上甚至兆赫兹级别。

目前高频脉冲电源作为电解加工电源得到了广泛的应用,其性能指标直接影响电解加工技术的发展水平。精密电解加工电源技术越来越受到世界各国的广泛关注。国内外在电解加工电源技术方面开展了研究,研制了一系列对应不同加工场合的电解加工电源,但我国在工业应用方面与国外相比还有不小的差距。因此有必要针对电解加工电源的性能要求、关键技术、存在问题及未来的发展趋势进行系统总结分析及研究,从而推动我国电解加工技术高速发展,提高我国特种加工技术水平。

1 电解加工电源研究现状

电解加工电源的基本类型一般有两种:直流电源和脉冲电源。宏观尺度电解加工中常用的直流电源为硅整流电源和晶闸管整流电源,但加工过程的稳定性和可靠性较差,加工精度较低。脉冲电源按加工场合可分为宏观尺度电解加工电源和微细电解加工电源。表 1 列举了这两种在不同电解加工场合下应用的电源主要技术参数对比。

表 1 宏、微尺度电解加工电源技术参数比较^[6-8]

主要技术参数	宏观尺度电解加工	微细电解加工
加工电压/V	10~30	<10
加工电流/A	15~1 000	<1A
电流密度/(A/cm^2)	20~2 000	75~100
加工电源	直流/脉冲	高频-超短脉冲
脉冲频率	Hz-kHz	kHz-MHz
加工速度/(mm/min)	0.2~10	5×10^3
电解液流速/(m/s)	10~60	<3 或静液
电极尺寸	大到中等	微小
极间间隙/ μm	100~600	5~50
侧面间隙/ μm	>20	<10
加工精度	一般 0.1 mm, 可达 0.01 mm	可达 1 μm 及以下
表面粗糙度 R_a	0.1~1.5 μm	0.05~0.4 μm

1.1 宏观尺度电解加工电源

在宏观尺度电解加工中,由于电流大,对电源的稳压精度要求高。此外,大电流传导容易导致电源线路压降大,使电源发热严重,因此需要同时考虑电源的冷却。在早期使用直流电源进行电解加工,如美国 Anocut 公司采用原边调压方式研制出 10 kA、20 kA 晶闸管全水冷密封电源;北京变压器厂研制出 3 kA、10 kA 水冷密封电源^[2]。这类电源占地面积大、故障率高、使用寿命短。且在直流电解加工中,由于电源连续供电,工具与工件的反应连续进行,电解液的冲刷不充分,这将导致加工间隙内不断堆积产物和产生热量,来不及有效排除,使得加工间隙的控制效果较差,进而难以获得较高的

加工精度。随着脉冲电源电解加工技术的出现,其在加工精度和稳定性较传统直流电解加工显示出较大的优越性。脉冲电解加工的原理是以周期间断供电代替传统的直流供电方式,使得工件在电解液中发生周期断续的电化学阳极溶解^[5]。利用脉冲电流的脉冲效应,通过气泡周期性地生成和溃灭,强化传质传热过程,加速电解产物排出,并使间隙内电解液的电导率分布更均匀,进而影响加工间隙内物理、化学特性,有效解决采用直流电源带来的集中蚀除能力弱、加工间隙大等问题,能够进一步提高电解加工精度。理论上频率越高,脉宽越窄,改善加工精度的效果越佳^[4]。

宏观尺度电解加工的高频脉冲电源的主电路拓扑结构一般有两种:斩波式和逆变式。斩波式是先通过工频变压器把市电转换成低压交流电,再通过整流、滤波、稳压等处理后转换成所需大小幅值的直流电压,最后利用斩波器件输出高频脉冲电压。该结构的脉冲参数容易调节,但其损耗较大,电能利用率低,一般用于中小功率场合;逆变式是把市电通过整流滤波处理后,采用全桥逆变电路,利用 PWM 调压技术获取低压交流电,再通过二级整流滤波和斩波处理后输出高频脉冲电压。该结构可提升电流容量,但其电路结构复杂,抗干扰能力弱,一般用于大功率场合。国内外研究人员大多根据这两种电路拓扑结构进行开发电解加工所需的高频窄脉冲电源。

20 世纪 90 年代,华南理工大学、中国航空工业制造工程研究所和英国爱丁堡大学合作研制出高频窄脉冲电解电源^[9],该电源用于在气门模型型腔加工,使用频率达到 10 kHz,脉冲宽度低至 50 μs ,脉冲前、后沿的上升和下降时间均在数微秒。随后研究人员^[10]开发出 1 kA 电解加工脉冲电源,其输出电压频率为 200 Hz~20 kHz,脉宽为 25 μs ~25 ms,并在生产实践中显示出较好的稳定性和可靠性。诸跃进等^[11]基于大电流快换流原理,开发出以直流加 IGBT 斩波输出的微秒级脉冲电解去毛刺加工电源(图 1),其频率可调范围为 10~25 kHz,占空比可调范围为 0.1~0.5,电流容量 300 A。该电源经过阀体喷孔去毛刺工艺试验后,可有效提高喷孔流量。ALVARADO 等^[12]设计了基于高频半桥拓扑结构的微秒级高频脉冲电源,其可调电压为 0~70 V,电流高达 160 A,频率高达 200 kHz,占空比在 5%~95%范围内连续可调。广东工业大学刘桂贤等^[13-15]基于全桥逆变加斩波输出的主电路拓扑结构开发出高频脉冲电解加工电源,该电源利用状态寄存器分

时控制全桥逆变电路中的功率开关管,由死区控制寄存器控制死区时间以避免上下臂直通,采用全数字式控制多个高速 MOSFET 并联组成的高频斩波器以输出脉冲电压(图 2),该电源的加工电压为 2~35 V,额定电流为 500 A,脉冲频率为 1~20 kHz,占空比为 2%~80%连续可调,通过该电源,用内喷式球头阴极电解展成方法加工出不同螺旋升角的大导程滚珠螺母内滚道^[16],轮廓精度在 $\pm 0.025\text{ mm}$ 以内,表面粗糙度 $Ra 0.54\text{ }\mu\text{m}$ 。该电源可控性强、稳定性高、应用范围广,预留了接口,可实现与数控系统的集成。随后又在此基础上开发出输出电压为 0~30 V,占空比 1%~90%连续可调,9 μs 内实现快速短路保护的高频脉冲电源。利用薄片电极贴壁电解铣削方法,加工出的大导程滚珠螺母内滚道轮廓精度达到 $\pm 0.01\text{ mm}$ ^[17]。

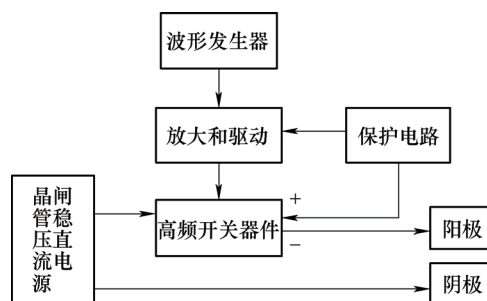


图 1 微秒级脉冲电解去毛刺加工电源系统原理框图^[11]

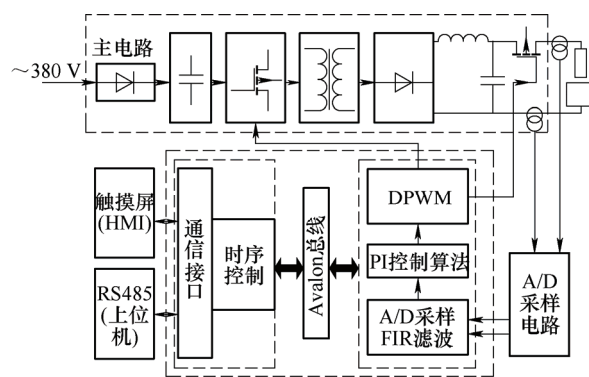


图 2 脉冲电解加工电源系统结构框图^[13]

在单极性脉冲电解加工中,因工件钝化会在电解液中会形成一些带正电的胶状颗粒和絮状松散沉积物,这些物质会从阳极电泳迁移至阴极区域,在使用电解液冲刷不充分时会吸附、粘接到工具表面,使得工具形状尺寸改变以及间隙内通流区域缩小,从而改变阴极表面电化学特性,进而影响工件阳极的去除特性^[18-19]。针对这些问题,国内外学者研究引入双极性脉冲电源,通过负极性脉冲作用来去除阴极表面附着物以提高工件加工精度和效率。李红英等^[18]采用阴极振动和反向脉冲的作用组合成的

双极性脉冲精密振动电解加工出高复制精度的硬币图案。广东工业大学金兴伟^[20]采用双直流电源进行斩波的方法(图 3), 开发出单双极性切换的脉冲电源, 其输出电流峰值为 100 A, 频率为 15~50 kHz, 最小脉宽为 1 μ s, 电解—机械复合磨削试验表明, 反向电流能有效去除嵌在磨粒间的堵塞物。东京农工大学 NATSU 等^[21]采用双极性脉冲电源加工碳化钨微棒来去除粘附在电极表面的氧化物质。LI 等^[22]开发出基于斩波式拓扑结构的高频正负脉冲电源, 该电源的设计频率为 500 Hz, 输出额定电流为 50 A, 输出电压为 24 V, 可输出正负脉冲比为 200:1 的加工波形, 利用该电源在电解加工弯曲深小孔中可有效减少工具电极端部副产物的生成, 从而降低了加工的短路次数, 提高了加工的稳定性。使用双极性脉冲电源进行电解加工可有效去除工具表面的附着物, 但会同时带来工具损耗问题, 并且由于反向脉冲到导通脉冲的电荷中和作用, 在一次脉冲作用下, 工件中金属材料的蚀除量减少, 导致加工速度显著降低^[23]。为此, 日本静冈理科大学後藤昭弘等^[24]提出了在中性电解液中利用单极性电源电解加工钨钴硬质合金的方法。即在电解液流向电极一侧的途中, 通过含有阳离子交换膜的电解液发生装置对电解液进行电解反应, 取反应阴极一侧的碱性电解液作为电解加工时的电解液实现对硬质合金的有效电解加工。而返回电解液槽的电解液又恢复至基本呈中性。该方法既可避免单独使用强碱电解液进行电解加工所带来的安全性问题, 又可避免双极性电源加工过程带来的工具电极损耗问题。

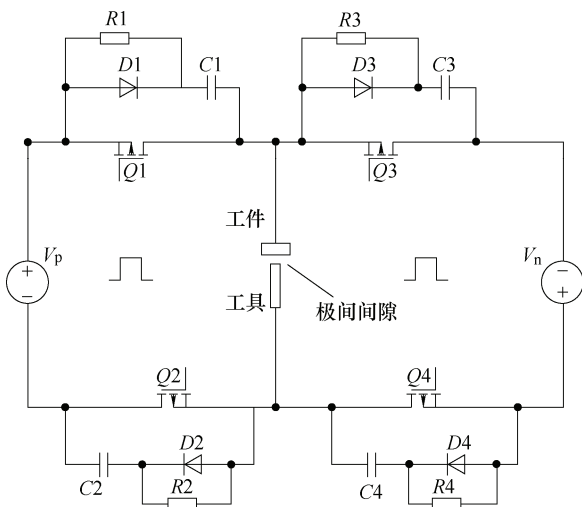


图 3 双极性脉冲电源斩波主电路拓扑结构^[20]

以上列举的宏观尺度电解加工电源虽然有些已

经用于工业生产, 但大多还处在实验研究阶段。目前电解加工对高频窄脉冲电源的可靠性、稳定性和加工效率的要求也越来越高, 并且大多数电解加工电源还只能适合于某一特定工艺, 难以随着工艺类型参数的变化而自适应变换电源参数来完成工序。随着工业化的高速发展, 一些机床生产厂商在电解加工技术方面取得巨大成就, 典型代表德国 EMAG 公司研制出一系列用于加工整体叶片、涡轮盘等零件的电解加工装备(图 4), 大多数配置有无间隙精密驱动的振荡器, 以及可升级的电源发生器, 脉冲电流可达 30 kA, 可输出 50 μ s 脉冲电流。WIBA 公司利用研制的电解加工装备可加工出微型腔, 微齿轮等精密零件(图 5)。除此之外, MTU 公司以及荷兰 Philips 公司在精密电解加工领域也取得较大成就。表 2 列举了一些国内外典型机床制造商生产的电解加工高端装备相关电源参数情况。

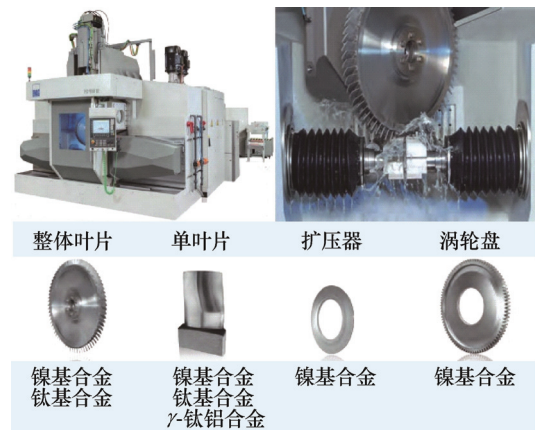


图 4 EMAG 公司电解加工装备及其应用

表 2 典型电解加工装备产品相关的电源参数情况

生产商/牌号	加工电源性能指标参数	应用场景
德国 EMAG/PO100SF	最大脉冲电流: 24 000 A 脉冲持续时间: 0~50 μ s	叶片加工
德国 SITEC/ES128P	输出电流: 0~1 200 A; 加工电压: 0~45 V	去毛刺/钻孔/空腔成形
德国 PEMTec/PEM 800	输出脉冲电流: 1 200~12 000 A 加工最大电压: 23 V	齿轮、叶片加工/模具制造
俄罗斯 STANKOFINEXPO/SFE-12000M	输出脉冲电流: 8 000 A 加工电压: <12 V 脉冲频率: 50 Hz	去毛刺/模具制造/齿轮加工/雕刻
美国 ExtrudeHone/COOLPULSE™ 1000	输出脉冲电流: 1 000 A 加工电压: 30 V	去毛刺
苏州电加工机床研究所/DJK6032	输出电流: 300~2 000 A 输出电压: 0~24V	去毛刺
东莞辉碟自动化科技/PHECM80HSP/7H	输出电流: 500~5 000 A 额定电压: 6~20 V 额定频率: 20~600 kHz 脉宽调整范围: 5~20 μ s	叶轮加工



图5 WIBA 公司电解加工装备及其应用

1.2 微细电解加工电源

微细电解加工场合不同于宏观加工, 主要有以下特点: ① 加工特征尺寸微小^[25]; ② 机床装备精度要求高^[26]; ③ 工具尺寸在微米级^[27]; ④ 静液加工和酸性电解液^[28]; ⑤ 采用高频超短脉冲电源^[4]。如图 6 所示, 超短脉冲电解加工是把脉冲电源的频率提高至兆赫量级, 脉冲宽度减小至纳秒量级时, 利用双电层界面电容的暂态过程, 加工区的时间常数小使加工区双电层电容能够完全充电, 非加工区电容还未达到分解电位就进入脉冲间隔开始释放电荷, 从而使加工区过电位较高, 电流密度大, 集中蚀除的效果显著; 而非加工区电流密度小, 可减小电解加工的杂散腐蚀, 显著提高加工的定域性, 使加工精度达到微米、亚微米量级^[29]。虽然使用超短脉冲可显著提高加工精度, 但其加工效率极低, 其一因为极间间隙微小, 对流作用弱, 界面上的产物难排除, 阻碍反应进行, 极大地改变加工区界面的物理化学性质, 从而减缓工件阳极溶解的反应速度^[30]。其二为高精度电解加工需采用低电、小脉宽的电参数。如何协调加工精度和加工效率这对矛盾, 仍有许多工作要做。

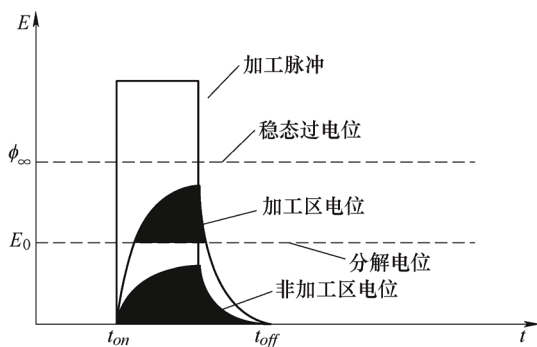


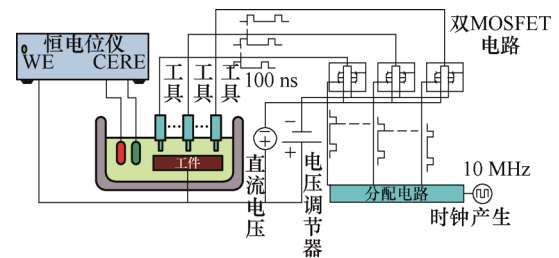
图6 加工区和非加工区示意图

1.2.1 常规微细电解加工电源

目前大多数学者设计的微细电解加工电源采用的常规主电路包括斩波式和功率放大式两种拓扑结构。斩波式是基于开关通断原理, 利用信号发生器产生超短脉冲信号来驱动斩波器件, 把稳定单一的直流电压通过斩波器件的通断动作, 输出与信号频率相同的超短脉冲电压; 功率放大式是直接将脉冲

发生器生成的超短脉冲信号通过功率放大器直接放大, 从而获得微细电解加工所需的超短脉冲电压^[31], 这种方案的控制系统没有接口, 短路保护响应时间较长^[32], 并且成本较高, 拓展性差。

现代功率器件的高速发展为开发超短脉冲电源提供了有利条件。PARK 等^[33]采用串行脉冲分配电路驱动多个双 MOSFET 电路(图 7), 从而顺序输出大约为 100 ns 的超短脉冲电压。该电源使用多个电极轮流通电阵列电解加工微孔, 虽可提高加工总面积, 但降低了孔的加工效率。SPIESER 等^[32]开发出具备输出数十纳秒脉宽脉冲电压、正负偏压和极性切换功能的微细电解加工电源, 该电源通过组合多路 MOSFET 斩波输出多种不同形状的脉冲电压, 可用于在线制备微细电极, 缩短了微细加工制造与电极二次装夹时间。GIANDOMENICO 等^[34]采用固定频率降压模式转换器(LT3590)来提供稳定的直流给 MOSFET 斩波输出所需的电流脉冲, 其电流脉冲宽度为 10~500 ns, 峰值为 10~120 mA, 该电源制作成本低廉, 可非常精确地调整功率。

图7 串行脉冲微细电解结构示意图^[33]

国内众多高校相继开展了不同参数和不同应用场合的超短脉冲微细电解加工电源的探索研究, 并取得了一定的成果。哈尔滨工业大学李海等^[35]通过调压、整流滤波提供直流电给 MOSFET 进行斩波输出, 研制出微细电解加工脉冲电源, 该电源可稳定输出最小脉宽为 300 ns 的脉冲电压, 电压和电流分别在 0~10 V 和 0~2 A 之间且连续可调, 将其应用在电解铣削不锈钢上, 可加工出宽约为 60 μm 的曲梁。南京航空航天大学张朝阳^[36]利用多谐振荡器产生脉冲信号, 经过倍频、计数、整形等处理后可输出 2 MHz, 脉宽为 40 ns 的纳秒级超短脉冲电压(图 8), 采用该电源加工出“ECM”微型字样(图 9)。该电源的外围电路结构相对复杂, 但抗干扰性强, 且输出波形比较稳定。广东工业大学张永俊等^[37]利用高频精密函数波形发生器 MAX038 产生超短脉冲信号进行放大来驱动互补的高速 MOSFET 进行直流斩波(图 10), 其加工电压为 1.5~10 V, 输出最小脉宽为 50 ns。该电源可有效改善加工中波形失真问题, 但最小加工电压还比较高, 对更微尺度结构的

加工存在一定限制。朱永伟等^[38]利用激光传感器采集超声振动信号对电解脉冲电源进行同步的通断动作,从而实现超声调制放电—电解复合微细加工,有利于加工产物的排除以及更新加工区域的电解液。清华大学孔全存^[39]开发出具有脉间输出反向电流以促使界面加酸,实现抑气促溶和抑制工具电极损耗功能的三电极微细电解加工脉冲电源,该电源通过时分分区控制单路和双路 MOS 管斩波可输出最小脉宽 500 ns 的脉冲电压,利用该电源电解铣削出轮廓清晰、表面质量较好的微细槽(图 11)。此电源不仅可提高加工的定域性,还能有效提高加工效率和加工质量,为高效精密可控微细电解加工提供了新的参考。

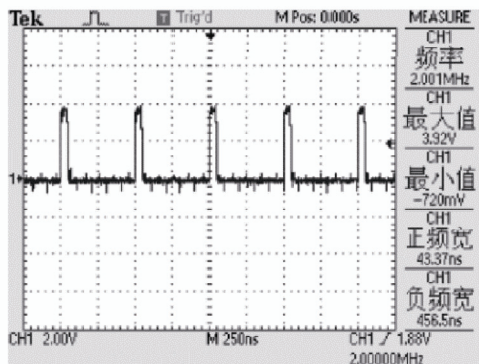
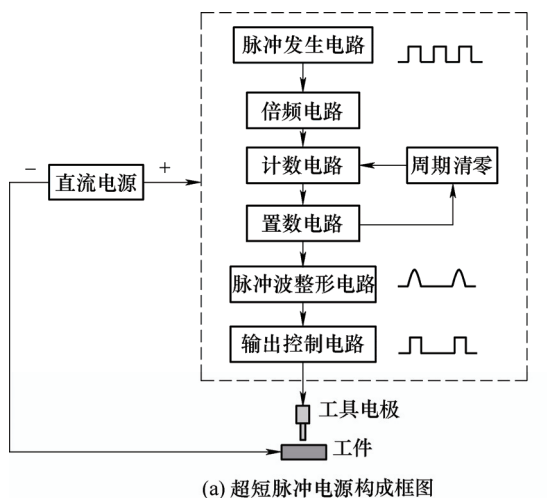


图 8 南京航空航天大学研制的纳秒脉冲电源结构图及其输出波形^[36]

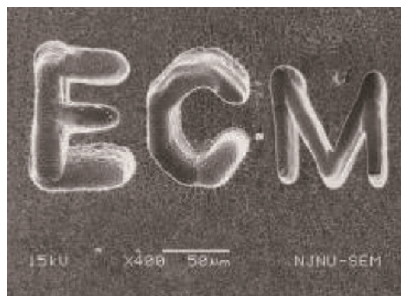


图 9 微细直写加工的“ECM”字样^[36]

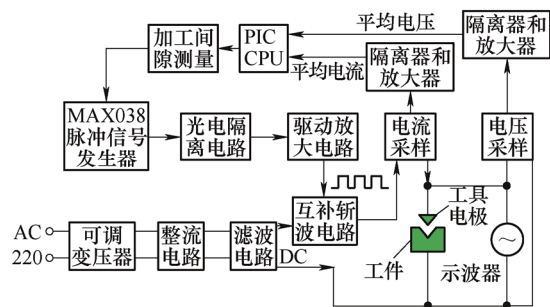


图 10 电解微加工纳秒脉冲电源原理图^[37]

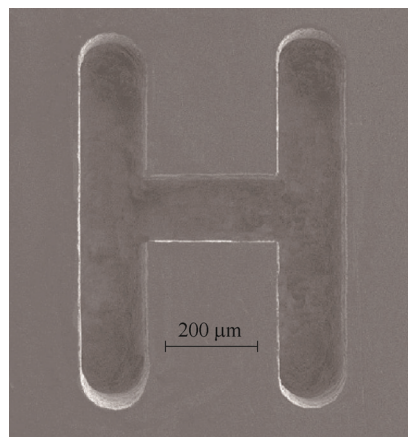


图 11 利用三电极脉冲电源电解铣削加工的微细槽^[39]

除上述工作之外,还有许多学者进行了不同类型不同参数微细电解加工电源的研究,如基于静电驱动的微细电解电火花复合加工(Electrochemical discharge micromachining, ECDM)的脉冲电源^[40]、单双路场效应管脉冲电源的研究^[41]、基于正弦信号^[42]和三角脉冲^[43]电解微细加工技术研究等。

1.2.2 新型微细电解加工电源

国内外学者主要使用研制的常规超短脉冲电源进行微细电解加工研究,通过改变脉冲电源的参数(如频率,占空比,电压等)来提高微细电解加工精度,但电源参数的改变有限,且无法加大加工区和非加工区的电位差,并且微细电解加工精度受电场、流场、温度场等多种复杂因素综合影响,同时使用价格昂贵的超短脉冲电源会增加成本。于是有学者通过改变微细电解加工系统,研制不同于常规超短脉冲电源的新型微细电解加工电源。

XU 等^[8]研究发现采用直流电压加工时,不断降低电极之间的电压和距离,电化学反应可限制在电极非常接近的区域,其加工精度媲美超短脉冲微细电解加工技术的水平,但小间隙对应的高效加工状态不明显。LI 等^[44]采用双直流电源掩膜电解加工技术(图 12),通过控制工件阳极和工具阴极,工具阴极和辅助阳极之间的电位差,可制备出直径约为 100 μm、深度约为几十 μm 的微结构。该技术可高

效阵列多个微结构, 在精密制造工业应用上具有较大的潜在价值。KUNIEDA 等^[45, 46]在脉冲电源与加工间隙之间串联给电电容, 从而实现静电感应给电(图 13), 当脉冲电压发生改变时, 电流才能形成, 该方法虽然可以低成本方式获得几十纳秒的超短脉冲, 但很难方便地调节电压峰值和脉冲参数。

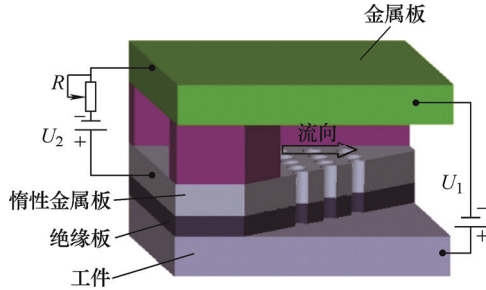


图 12 双直流电源掩模电解加工原理图^[44]

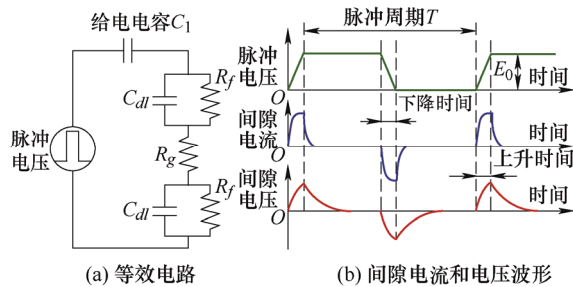


图 13 静电感应给电的电解加工原理图^[47]

燕山大学许立忠等^[48]提出在直接功率放大脉冲电源的输出电路中, 通过引入新的可变参数(如电感, 电容和电阻等^[49])或者加入反馈电路^[50]和微分电路^[51], 改变微细电解加工系统的等效电路, 从而使系统输出响应发生变化。引入可控电感(图 14), 使得加工回路处于欠阻尼二阶振荡状态, 通过调节可变电感的大小, 使系统响应峰值电压高于电解加工的临界电压, 稳态电压低于工件分解电压, 进而提高微细电解加工精度。

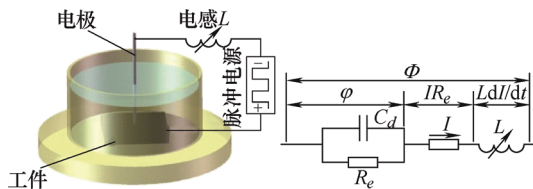


图 14 引入可变电感 L 后电解加工的等效电路图^[51]

当引入可变电感时

$$d \leq d_0 = \lambda \frac{t_{on}}{pC_d} \left(1 - \frac{\pi^2 LC_d S}{t_{on}^2} \right) \quad (1)$$

$$\lambda = -2/\ln(k\phi' - 1), \phi' = \phi_d / \phi_{max}$$

式中, d 为阴阳极间距, d_0 为进行电解反应的最大

距离, t_{on} 为脉冲宽度, ρ 为电解液电阻率, C_d 为单位面积双电层电容, L 为可变电感, ϕ_d 为工件分解电压, ϕ_{max} 为双电层极化峰值电压, k 为引入参数 ($k \geq 1$), S 为电极参与反应部分的有效面积。

当给定加工条件后, 电解液电阻率 ρ 、双电层电容 C_d 即为固定常数。由式(1)可看出当引入可变电感后, 影响脉冲电解加工精度的参数有可变电感、电极参与反应部分的有效面积, 峰值电压。相比于传统采用减小脉冲宽度来提高加工精度的方法, 该方法电路结构简单、成本低, 只需要采用常规脉冲电源即可实现纳米尺度的加工精度, 对微纳加工具有较大的参考价值。

2 电解加工电源的关键技术

2.1 控制系统

对于常规脉冲电源, 其控制系统最主要的作用是产生频率和占空比可控的脉冲信号, 用以控制功率开关器件的开通和关断, 实现加工脉冲电压的输出。大多数脉冲信号采用三种方法实现。第一种是利用单片机内部计数来输出脉冲信号, 但由于其晶振频率不高, 无法产生高频的脉冲信号; 第二种是采用精密函数发生器或集成的 PWM 控制芯片产生脉冲输出, 其调节方式落后且无法与上位机进行通信; 第三种是采用高性能的 ASIC(专用集成电路), 如 CPLD(复杂可编程逻辑器件)和 FPGA(现场可编程逻辑门阵列), 其内部时钟可产生超高频脉冲信号, 因此常将其用于设计纳秒脉冲电源。

电解加工系统主要由机械本体、运动控制系统、加工电源以及供液系统等部分组成。在电解加工过程中, 常常通过运动控制系统中的工控机对运动参数(如运动坐标, 进给速度)以及电源输出参数(如电压、频率、占空比等)进行数据交互。为实现稳定、高效、自动化电解加工, 电解加工电源的控制系统同时应具备丰富的扩展接口, 以便实现与系统组成部分之间的互联互通。比如控制系统获取加工间隙情况后, 需向数控系统发出指令驱动伺服主轴精确控制加工间隙或改变脉冲电压输出的状态, 并且根据不同的工艺特点、加工情况可方便调整电源输出参数等。为拓展电源的交互性功能, 清华大学^[39]基于 FPGA 开发的三电极脉冲电源通过 RS232 串行通讯与工控机建立数据交互, 实现对输出脉冲参数的实时控制(图 15)。广东工业大学^[13]基于可编程片上系统(SOPC)技术设计的脉冲电解加工电源可实现全数字式控制, 支持人机界面交互, 使得电源与电

解加工机床能够实时通信。GIANDOMENICO 等^[34]基于 FPGA 研制的微细电解加工脉冲电源通过 Arduino 平台作为中间桥梁,建立与计算机的通信并实现对伺服电动机的控制。因此,电解加工电源在面对复杂的电解加工环境下能稳定运行,其控制系统应具备多任务并行处理能力,且需要拥有较强的抗干扰能力以及快速响应计算处理能力。表 3 列举了脉冲电源常用控制处理器的性能特点对比。

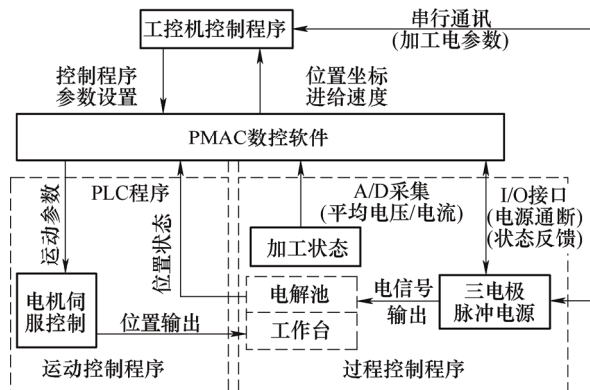


图 15 控制软件结构示意图^[39]

表 3 常用控制处理器性能参数

控制模块	性能特点
PIC18F458 单片机	高性能类的精简指令集处理器,抗干扰能力强,工作速度快,具有锁相环电路,最高时钟频率可达 40 MHz,可适用于各种工业控制场合
Scenix 单片机	外接 50 MHz 晶振,通过编程使用单周期指令使单片机发出最小脉宽为 20 ns 的方波脉冲
MAX038	高频精密函数信号发生器,频率范围从 0.1~20 MHz,最高可达 40 MHz,占空比调节范围宽,占空比和频率均可单独调节
SG3525A	单片集成 PWM 控制芯片,工作电压范围大(8~35 V),振荡器工作频率无级可调且可向外部同步输出,频率范围为 100 Hz~400 kHz,具有死区时间可调 and 可封锁 PWM 脉冲信号等特点
FPGA	现场可编程逻辑门阵列,具有可编程、高响应、运行稳定、可定制开发、多功能结合。常用基准时钟为 50 MHz,可根据自身设计要求对其晶振频率进行倍频或分频,同时具有丰富的扩展接口,可提高所设计电源系统的可拓性
CPLD	复杂可编程逻辑器件,具有高密度、高速度和低功耗的特点,与 FPGA 相比规模较小,逻辑复杂度比较低,多用于实现低成本的设计

2.2 脉冲输出

功率开关器件作为实现直流电压转换成脉冲电压输出的核心部分。宏观尺度电解加工大多数选用多个 IGBT 以满足大电流、高功率需求;而在微细电解加工中,开关速度快、输入阻抗高的 MOSFET 成为其首要选择。由于电路布线等原因^[52],电源回路的各个环节存在寄生电感和寄生电容,在不同加工条件下负载的阻容特性相异,会导致波形畸变。由于关断时电流变化率较大,当功率开关器件的耐击穿电压偏低时,容易导致其过压击穿,与此同

时,在频率较高且关断时会产生阻尼振荡,这会增强开关损耗和功率器件发热,通常采用组合 RCD 缓冲器和快速续流功率二极管来抑制瞬时高压和阻尼振荡^[2]。另外,寄生电感和电容会延迟脉冲电流的上升时间,并在脉冲关断时引起明显的超调,而减小布线长度可减少寄生电感的影响^[52-55]。

在大功率电解加工场合,脉冲输出电路采用多路功率开关器件并联或用 IGBT 换流来加大电流容量^[2],而在中小功率电解加工场合采用双路 MOSFET 以迅速释放脉冲间隙内积聚的电荷,进而消除维持电压,达到加速去极化、能量释放的效果,从而提高加工稳定性和加工精度。BURKERT 等^[54]采用双电源供电的推挽式拓扑结构来对极间间隙的双电层电容进行加载和卸载(图 16),脉间产生的反向电流有利于加速去极化。而 HAN 等^[56]通过时分分区控制 4 个 MOSFET 通断,在脉冲关断期间将阴阳极短接以加速去极化。

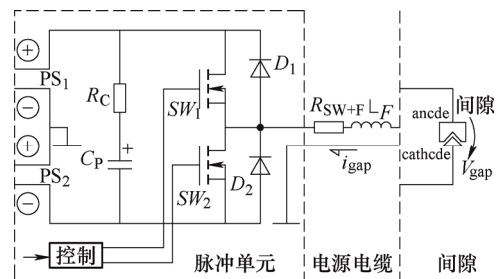


图 16 具有双极性脉冲输出的推挽式拓扑结构^[54]

2.3 加工间隙监测与控制

加工间隙作为电解加工的核心工艺参数,受电解液流动、电极极化、电磁场以及电解液浓度、温度等多因素综合影响,加工间隙的变化会直接影响电解加工精度、加工效率以及加工稳定性,也是选择加工参数、设计阴极工具的主要依据^[2]。加工间隙会随着时间和空间变化而变化。过小的间隙虽可提高加工形状精度^[57],但易导致产物排出困难而发生短路。为此,国内外许多学者设计加工监测系统,通过采集加工间隙内的参考信号以评估间隙状况,并与伺服控制系统建立数据交互以精确控制间隙大小。在宏观尺度电解加工间隙监测方法有恒参数测控法^[57]、超声测距法^[58]、间隙平均电流法^[59]、力反馈检测法^[60]等。而在微细电解加工间隙监测方法有电流检测法^[61]和基于双电层电容的加工间隙监测法^[62]等。这些方法部分存在着监测过程复杂,监测精度还不够高等问题。在满足精密加工要求的前提下,如何以智能、高效、简单的方式对加工间隙进行精确的实时监测与控制,这仍然是电解加工研究

的热点。

CLIFTON 等^[58]利用超声测距法监测极间间隙,但容易受电解液温度、间隙气泡以及安装空间的影响,测量误差较大且不适合微细电解加工。ZHAO 等^[63]采用霍尔电流传感器采集加工间隙的平均电流经过滤波放大处理后,通过与参考值比较,控制系统通过判断来实现伺服控制加工间隙,该控制策略稳定可靠。东京大学 KUNIEDA 等^[46,64]利用差分放大器测量工作间隙电压来伺服控制工具电极进给(图 17),以精确控制加工间隙,研究表明平均峰值电压法的灵敏度明显高于平均电压法。南京农业大学康敏等^[65]提出了基于机器视觉的电解加工间隙测量方法,通过图像获取球形工具阴极与工件的加工间隙,该方法可缩短加工对刀时间,但只是初始间隙的可视化测量,还未实现加工间隙的实时测量。CHEN 等^[65]通过监测脉冲关断期间的极化电压来控制脉冲功率和伺服反馈。

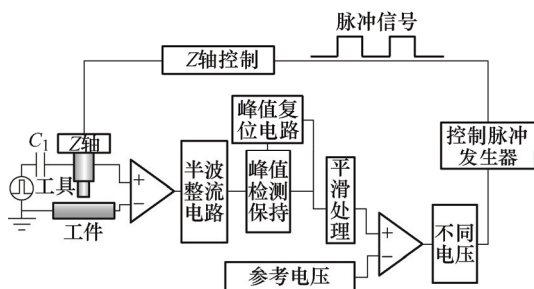


图 17 峰值电压伺服控制系统^[46]

2.4 电源保护

电解加工过程中,在复杂的多物理场耦合条件下,极间可能出现电解液流的空穴、局部沸腾,导致工件表面局部钝化不加工而出现尖凸点,最终钝化膜被顶穿而引起短路,或形成电离通道,产生火花击穿放电而短路。另外还有可能因进给突跳,电极直接接触或极间滞留导电颗粒而直接发生短路^[2]。短路不仅容易导致工件与工具的损伤,还会导致电源损坏。电源保护系统主要由短路信息检测及快速切断装置两大部分组成。由于功率半导体的过载承受能力与过载时间成反比,高响应的短路反应速度有利于保护功率半导体器件不易被短路烧坏^[2]。

现有电解电源的短路保护大多采用预置值法实现过流保护。这种保护策略单一且容易出现误判。为此,刘桂贤等^[15]设置电流的上升率阈值作为短路保护触发信号,当加工出现异常,控制系统能够及时触发能量释放装置保护加工电极,同时关闭逆变电路和斩波电路的功率开关管,实现电解电源的保

护,从而提高加工稳定性。赵建社等^[67]提出一种随动参比电压短路保护系统。当发生短路时,通过快速检测极间短路信号进行运算输出驱动信号来关断功率开关器件。同时采用电荷中和的方法实现极间电荷的快速释放。SHIU 等^[68]构建了基于 FPGA 架构的电解加工的实时短路保护模块,通过建立一系列短路判断规则,当加工系统触发短路条件时,系统将快速响应以切断电源。张建华等^[69]把极间脉冲施加到高频开关管的基极,通过采样高频开关管集电极的脉冲情况来判断是否发生极间短路,进而确定是否关断脉冲输出(图 18),该方法无需过多的电路环节,电路原理简单,易于实现。

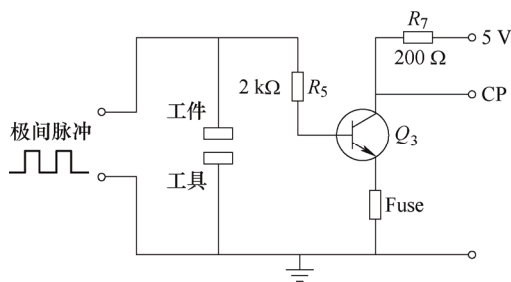


图 18 极间脉冲电压检测与转换电路原理^[69]

3 电解加工电源发展趋势

在电解加工技术领域,电解加工电源作为电解加工系统的关键组成部分,其技术水平决定着电解加工技术的发展和运用,而电解加工技术的高速发展又进一步对电解加工电源的发展提出了更高的要求。

(1) 向智能数字化电源方向发展。近几年来,智能制造技术发展十分迅猛,集合专家控制、模糊控制、神经网络、实时监控等先进技术,采用智能化、柔性化的控制方式控制电源,使其具备非线性控制、故障预测,负载均流等功能。基于互联网、大数据以及 5G 通信等发展环境,利用精密传感器实时采集电解加工状态参数(如电场、温度场及流场等参数),建立数据中心,并与电源输出功率建立相关联系,当环境条件发生变化,自动修正输出功率,便于解决电解加工工艺复杂、最优参数难获得等问题。

(2) 向节能和绿色化方向发展。当前环境的恶化和能源的日益消耗。节能减排,绿色制造是未来工业的发展趋势。电解加工电源应向高效和绿色产品发展,这就需要大力开发超小型、低功耗的新型电子元器件,采用单元化、模块化的方式以便缩短

制造周期、降低制造成本, 快速地开发高效节能的加工电源。

(3) 向复合型加工电源方向发展。目前电解复合加工技术在高端装备关键精密零部件的制造中具有十分广阔的应用空间。而该技术的实现关键在于开发高效、稳定以及低损耗的复合电源。如超声-电解复合加工电源、电解-电火花复合加工电源等, 不仅可满足零件的高质量和新型材料的加工需求, 同时能够有效地提高加工效率和加工精度以及扩展新工艺。

(4) 向极限脉冲电源方向发展。由于物质可以无限细分, 要想借助极高功能的特殊装备和物理仪器来探索微观世界, 需要依靠极端制造的极限精度零件来实现。由于电解加工是基于离子级的反应原理, 开发出脉冲宽度极短的脉冲电源, 有利于探索微细电解的极限加工能力。

4 结 论

(1) 电解加工电源的设计要根据具体产品、材料特性、工艺规律, 并在大量工艺实验的基础上, 结合电解加工装备、与控制系统实现高度集成, 才能获得良好效果, 不可孤立研发。

(2) 电解加工电源的稳定性、可靠性、短路保护对电解加工过程至关重要。因此, 需要重视新的功率元器件、人工智能技术、大数据等新技术的集成应用。

(3) 脉冲电解加工电源是实现精密电解加工的主流, 电源性能对电解加工过程影响很大, 其性能指标需要结合具体产品、控制系统、电解液参数、进给参数等综合分析。要重视电解加工电源的标准化、通用化、系列化工作, 扩大适用性, 降低电解加工的应用门槛, 从而促进电解加工工艺在工业领域的广泛应用。

参 考 文 献

- [1] CHEN Y, JIANG L, FANG M, et al. Multi-time scale simulation of pulse electrochemical machining process with multi-physical model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7-8): 2203-2210.
- [2] 王建业. 电解加工原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
WANG Jianye. Principle and application of electrochemical machining[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [3] AKMD S, ALTENA H, MCGEOUGH J A. Precision ECM by process characteristic modelling[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2000, 49(1): 151-155.
- [4] SCHUSTER R, KIRCHNER V, ALLONGUE P, et al. Electrochemical micromachining[J]. Science. 2000, 289(5476): 98-101.
- [5] 王峰, 赵建社, 刘鼎明, 等. 钛合金深窄槽可控振动辅助电解加工试验研究[J]. 中国机械工程. 2019, 30(20): 2395-2402.
WANG Feng, ZHAO Jianshe, LIU Dingming, et al. Experimental research on controllable vibration assisted ECM of deep narrow grooves of titanium alloy[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(20): 2395-2402.
- [6] BHATTACHARYYA B, MUNDA J, MALAPATI M. Advancement in electrochemical micro-machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(15): 1577-1589.
- [7] ZHANG C, YAO J, ZHANG C, et al. Electrochemical milling of narrow grooves with high aspect ratio using a tube electrode[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 282: 116695.
- [8] XU L, PAN Y, ZHAO C. Distance effects in electrochemical micromachining[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 31778.
- [9] 王建业, 王晓燕. MOSFET 高频、窄脉冲电解加工新型电源试验研究[J]. 航空制造技术, 2001(1): 27-29.
WANG Jianye, WANG Xiaoyan. The experimental investigations of the up-to-date MOSFET HSPECM power[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2001(1): 27-29.
- [10] 戴立强, 怀华培, 朱海波, 等. 1000A 精密脉冲电解加工电源的研制[C]//第 17 届全国特种加工学术会议, 2017-11-17, 中国, 广州. 2017: 574-576.
DAI Liqiang, HUAI Huapei, ZHU Haibo, et al. Development of 1000A precision pulsed electrolytic machining power supply[C]// The 17th National Conference on Special Machining. Special Processing Branch of Chinese Mechanical Engineering Society, 2017-11-17, Guangzhou, Guangdong, China: 2017.574-576.
- [11] 诸跃进, 冯青. 一种微秒级脉冲电解加工工程化电源研制[J]. 电加工与模具, 2010(1): 61-66.
ZHU Yuejin, FENG Qing. Research on the industrialization power supply for microsecond-grade pulse electrochemical machining[J]. Electromachining & Mould, 2010(1): 61-66.
- [12] MARTINEZ A R, GRANDA U R E, ZUNIGA L M, et al. Pulsed power supply for electrochemical machining[C]// 2015 IEEE International Autumn Meeting

- on Power, Electronics and Computing, November 4-6. 2015, Ixtapa, Mexico: ROPEC, 2015: 1-6.
- [13] 刘桂贤, 张永俊, 罗红平, 等. 基于 SOPC 技术的脉冲电解加工电源的研究[J]. 电加工与模具, 2015(5): 27-30.
LIU Guixian, ZHANG Yongjun, LUO Hongping, et al. Study on Electrochemical machining pulse power supply based on SOPC technology[J]. Electromachining & Mould, 2015(5): 27-30.
- [14] 刘桂贤, 张永俊, 罗红平, 等. 大导程滚珠螺母滚道电解加工机床[J]. 电加工与模具, 2016(1): 59-61.
LIU Guixian, ZHANG Yongjun, LUO Hongping, et al. Electrochemical machine tool for manufacturing large-lead ball nut raceway[J]. Electrochemical & Mould, 2016(1): 59 - 61.
- [15] 刘桂贤, 罗红平, 张永俊, 等. 基于 SOPC 技术的电解加工高频脉冲电源: 中国, 201410338053.4[P]. 2014-11-05.
LIU Guixian, LUO Hongping, ZHANG Yongjun, et al. Electrochemical machining high frequency pulse power source based on SOPC technology: China, 201410338053.4 [P]. 2014-11-05.
- [16] LIU G, LUO H, ZHANG Y, et al. Pulse electrochemical machining of large lead ball nut raceway using a spherical cathode[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1-4): 191-200.
- [17] 张传运. 大导程滚珠螺母滚道电解铣削新方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
ZHANG Chuanyun. Research on new method of electrochemical milling ball nut inner raceway[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [18] 李红英, 程小元, 张明岐. 双极性脉冲精密振动电解加工技术 [C]// 第 14 届全国特种加工学术会议, 2011-10-22, 中国, 苏州. 2011: 402-406.
LI Hongying, CHENG Xiaoyuan, ZHANG Mingqi. Bipolar pulse precision vibration assisted electrochemical machining technology[C] The 14th National Conference on special machining. October 12, 2011, Suzhou, China. 2011: 402-406.
- [19] MENG L, ZENG Y, ZHU D. Wire electrochemical micromachining of Ni-based metallic glass using bipolar nanosecond pulses[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 146: 103439.
- [20] 金兴伟. 双极性高频脉冲电解电源的研制及工艺试验的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2009.
JIN Xingwei. Development of bipolar high-frequency pulse power supply for ECM and experiments[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2009.
- [21] NATSU W, KURAHATA D. Influence of ECM pulse conditions on WC alloy micro-pin fabrication[J]. Procedia CIRP, 2013, 6: 401-406.
- [22] LI Z, JIANG X, GE J, et al. Research of small deep curved hole electrochemical machining based on pulse power supply [C]// 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems, August 11-14, 2019, Harbin, China: ICEMS, 2019: 1-4.
- [23] GAO C, QU N, HE H, et al. Double-pulsed wire electrochemical micro-machining of type-304 stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 381-387.
- [24] 王思聪, 後藤昭弘, 中田篤史. 单极性电源电解加工硬质合金的研究[J]. 电加工与模具, 2018(4): 40-44.
WANG Sicong, GOTO A, NAKATA A. Study on electrochemical machining of sintered carbide with monopolar-pulse power supply[J]. Electromachining & Mould, 2018(4): 40-44.
- [25] KOCK M, KIRCHNER V, SCHUSTER R. Electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses—a versatile method with lithographical precision[J]. Electrochimica Acta, 2003, 48(20-22): 3213-3219.
- [26] SPIESER A, IVANOV A. Design of an electrochemical micromachining machine[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(5): 737-752.
- [27] QIN S, DENG H. Electrochemical etching of tungsten for fabrication of sub-10-nm tips with a long taper and a large shank[J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2019, 2(4): 235-240.
- [28] KIM B H, NA C W, LEE Y S, et al. Micro electrochemical machining of 3D micro structure using dilute sulfuric acid[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 191-194.
- [29] 张朝阳, 朱荻, 王明环, 等. 超短脉冲电流微细电解加工技术研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(14): 1295-1298.
ZHANG Zhaoyang, ZHU Di, WANG Minghuan, et al. Investigation on electrochemical micro-machining using ultra-short voltage pulses[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(14): 1295-1298.
- [30] 马晓宇. 阵列孔微细电解加工基础技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
MA Xiaoyu. Research on fundamental techniques of micro ECM for array hole fabrication[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [31] SCHUSTER R. Electrochemical microstructuring with short voltage pulses[J]. Chem. Phys. Chem., 2007, 8(1): 34-39.
- [32] SPIESER A, IVANOV A. Design of a pulse power supply

- unit for micro-ECM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(1-4): 537-547.
- [33] PARK M S, CHU C N. Micro-electrochemical machining using multiple tool electrodes[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(8): 1451-1457.
- [34] GIANDOMENICO N, MEYLAN O. Development of a new generator for electrochemical micro-machining[J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 804-808.
- [35] 李小海, 赵万生, 王振龙. 微细电解加工脉冲电源的研制[J]. 电加工与模具. 2004(5): 56-58.
LI Xiaohai, ZHAO Wansheng, WANG Zhenlong. Research on a high frequency short pulse power supply for electrolytic micromachining[J]. Electromachining & Mould, 2004, (5): 56-58.
- [36] 张朝阳. 纳秒脉冲电流微细电解加工技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
ZHANG Zhaoyang. The investigation on the electrochemical micromachining (ECMM) with nanosecond-pulse current[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [37] ZHANG Y, TANG Y, LIU X, et al. Development of ultra-short pulse power supply applicable to micro-ECM[J]. Materials Science Forum, 2009, 626-627: 369-374.
- [38] 朱永伟, 邵健, 苏楠, 等. 同步超声振动调制微细放电-电解加工技术[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 185-192.
ZHU Yongwei, SHAO Jian, SU Nan, et al. Research on micro electro-discharged & electrolysis machining technology modulated by synchronizing ultrasonic vibrating[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 185-192.
- [39] 孔全存. 微细电解加工三电极脉冲电源及基础工艺研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
KONG Quancun. Research on three-electrode pulse power supply and fundamental process of micro ECM[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [40] 王琨宁. 基于静电驱动的微细电解电火花复合加工脉冲电源研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG Kunning. Research on pulse power for micro ECDM based on electrostatic actuator[D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [41] 朱保国. 脉冲电化学微细加工关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
ZHU Baoguo. Research on key techniques of pulses electrochemical micromachining[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [42] XU L, WANG X, ZHAO C. Electrochemical micromachining with sinusoidal signals[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(10): E275-E279.
- [43] PATEL D S, SHARMA V, JAIN V K, et al. Reducing overcut in electrochemical micromachining process by altering the energy of voltage pulse using sinusoidal and triangular waveform[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 151: 103526.
- [44] LI D, YANG S, WU Y, et al. Microstructure of electrochemical machining using mask by dual power supply[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9-12): 3101-3108.
- [45] KOYANO T, KUNIEDA M. Ultra-short pulse ECM using electrostatic induction feeding method[J]. Procedia CIRP, 2013, 6: 390-394.
- [46] HAN W, KUNIEDA M. Research on servo feed control of electrostatic induction feeding micro-ECM[J]. Precision Engineering, 2016, 45: 195-202.
- [47] HAN W, KUNIEDA M. Fabrication of micro-rods with electrostatic induction feeding ECM[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 235: 92-104.
- [48] XU L, ZHAO C. Nanometer-scale accuracy electrochemical micromachining with adjustable inductance[J]. Electrochimica Acta, 2017, 248: 75-78.
- [49] ZHAO C, BAI X, XU L. Controlled electrochemical nanomachining with adjustable capacitance[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2018, 165(7): E269-E273.
- [50] 付文森. 反馈控制微细电化学加工技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
FU Wenmiao. Study on electrochemical machining micro technology with feedback control[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2018.
- [51] 赵传军. 可控脉冲微细电解加工技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
ZHAO Chuanjun. Research on controllable pulse electrochemical micromachining technology[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2019.
- [52] MOLE T, MCDONALD B, MULLERY S, et al. The development of a pulsed power supply for μ ECM[J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 809-814.
- [53] SAXENA K K, QIAN J, REYNAERTS D. A review on process capabilities of electrochemical micromachining and its hybrid variants[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2018, 127: 28-56.
- [54] BURKERT S, SCHULZE H P, Gmelin T, et al. The pulse electrochemical micromachining (PECM)[J]. International Journal of Material Forming, 2009, 2(S1): 645-648.
- [55] SCHULZE H P, HERZIG M, KRONING O. Differentiation of process-energy-sources (PES) in

- pulsed electrochemical machining (PECM) based on their controllability[C]//International Symposium on Electrochemical Machining Technology 2016, November 17-18, 2016, Mechelen, the Northeastern Town of Brussels, Belgium; INSEC, 2016: 15-20.
- [56] HAN F, CHEN W, YING W, et al. Effects of polarization on machining accuracy in pulse electrochemical machining[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 68: 493-498.
- [57] LYUBIMOV V V, VOLGIN V M, VENEVTSEV A Y, et al. Microelectrochemical machining at the ultrasmall interelectrode gaps with the use of the packets of nanosecond voltage pulses[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 831-836.
- [58] CLIFTON D, MOUNT A R, ALDER G M, et al. Ultrasonic measurement of the inter-electrode gap in electrochemical machining[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(11): 1259-1267.
- [59] 王贤成, 狄士春, 迟关心, 等. 间隙平均电流检测在高频窄脉冲电解加工中的应用[J]. *航空精密制造技术*, 2006(2): 36-38.
- WANG Xiancheng, DI Shichun, CHI Guanxin, et al. Gap average current measuring applied in HSPECM[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2006(2): 36-38.
- [60] LU Y, LIU K, ZHAO D. Experimental investigation on monitoring interelectrode gap of ECM with six-axis force sensor[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 55(5-8): 565-572.
- [61] LI Y, ZHENG Y, YANG G, et al. Localized electrochemical micromachining with gap control[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 108(1-3): 144-148.
- [62] 孔全存, 李勇, 朱效谷, 等. 基于双电层电容的微细电解加工间隙的在线检测[J]. *纳米技术与精密工程*, 2013, 11(6): 529-535.
- KONG Quancun, Li Yong, Zhu Xiaogu, et al. On line detection of micro electrochemical machining gap based on electric double layer capacitor [J] *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11(6): 529-535.
- [63] ZHAO W, LI X, WANG Z. Study on micro electrochemical machining at micro to meso-scale[C]//Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. January 18 - 21, 2006, Zhuhai, China, 2006: 325-329.
- [64] KOYANO T, KUNIEDA M. Micro electrochemical machining using electrostatic induction feeding method[J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(1): 175-178.
- [65] KANG M, LI H, FU X. Measurement of electrochemical machining initial gap based on machine vision[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 230-232: 1190-1194.
- [66] CHEN W, HAN F. Short-circuit avoidance in electrochemical machining based on polarization voltage during pulse off time[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102(5-8): 2531-2539.
- [67] 范延涛, 赵建社, 袁立新, 等. 随动参比电压短路保护系统及其电解加工工艺研究[J]. *电加工与模具*, 2019(S1): 39-42.
- FAN Yantao, ZHAO Jianshe, YUAN Lixin, et al. Study on the random reference voltage short circuit protection system and its electrolytic processing process[J]. *Electrical Processing and Tooling*, 2019(S1): 39-42.
- [68] SHIU C, WU W, HUANG P. The Research of FPGA-based short current protection for micro electrochemical machining[J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 656-657: 398-403.
- [69] 张建华, 葛红宇, 李宏胜, 等. 微细电化学加工纳秒脉冲电源的研制[J]. *制造技术与机床*, 2011(10): 37-40.
- ZHANG Jianhua, GE Hongyu, LI Hongsheng, et al. Development of nanosecond pulsed power supply for microfabrication electrochemical processing[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tools*, 2011(10): 37-40.

作者简介: 罗红平, 男, 1978 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为特种加工、精密制造、微细加工。

E-mail: luohongping@gdut.edu.cn

刘桂贤(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士后, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为电化学加工、电火花加工和超声加工工艺装备。

E-mail: gxliu@gdut.edu.cn