



艾斯维尔

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

国际机床杂志与制造44 (2004) 1247年至1259年

国际杂志
机床
与制造
设计、研究与应用

www.elsevier.com/locate/ijmactool

电火花线切割加工技术的发展水平

K. H. Ho, S. T. 纽曼, S. Rahimifard, R. D. 伦

先进制造系统和技术中心, 机械和制造工程的沃尔夫森学院,
拉夫堡大学, 拉夫堡, 莱斯特 LE11 3TU, 英国

收到 2003 年 10 月 13 日, 接受 2004 年 4 月 29 日

摘要:

电火花线切割加工是一种特殊的热加工工艺, 能够精确加工各种具有复杂锐边形状, 一般连续工艺难以加工的零件。电火花线切割加工这门实用技术是在传统的电火花加工基础上发展而被广泛利用和接受的不直接接触的材料去除技术。自从这项工艺引进以后, 电火花线切割加工已经由制作一些简单的工具发展成为生产高尺寸精度和表面完成质量的微细零件的最好选择。

这些年以来, 在短期的机床生产发展循法和持续增长的成本压力影响下, 电火花线切割加工机床为满足机床需求已经成为一个具有竞争性和经济型的机床优先选择。然而, 金属丝的磨损的风险已经削弱了工艺的整体性能, 从而大大降低了电火花线切割加工技术的效率和精度。大量有意义的调查研究已经发现不同的实现基本电火花线切割技工目的的一套方法, 通过分析排除金属丝磨损优化大量工艺参数从而整体上提高工艺稳定性。

这篇论文回顾了大量的调查研究工作, 关于电火花加工工艺到电火花线切割加工的发展概况。论文报道的电火花线切割加工研究涉及到工艺参数的最优方法, 调查影响加工和生产过程的各种因素。论文也突出强调具有适应能力的工艺监控和控制, 通过调查获得最优加工条件的不同控制方法的可能性。

大范围的电火花线切割加工工业应用和混合加工工艺的发展同事被报道。论文的最后一部分讨论了这些发展以及概述了未来电火花线切割加工研究的可能趋势。

关键词: 电火花线切割加工; 混合加工工艺; 工艺优化方法; 切割效; 材料去除率; 表面完成

1.引言

WEDM 是一种被广泛接受的非传统的用来加工复杂外形和轮廓零件的材料去除工艺。它被视为传统的用一个电极产生火花电火花加工工艺的独特的改进。然而, WEDM 利用的是能够实现在非常小的区域里循环往复移动的由直径约为 0.05 到 0.3 毫米的黄铜或钨做成的金属丝电极。利用一个手动的张力张紧调整装置时金属丝一直保持张紧状态, 以降低生产次品的趋势。在电火花线切割加工工艺过程中, 毛坯在金属丝前面被腐蚀, 工作区域与金属丝之间没有直接接触, 避免了加工过程中产生的机械应力。除此之外, 电火花线切割加工能够制造高强度高温耐腐蚀的材料, 还能避免热处理钢加工过程中产生的几何形变。

WEDM 于 20 世纪 60 年代末被首度引入制造业。这一工艺的开发是寻求新技术替代 EDM 工艺中所用加工电极的结果。1974 年, D.H. Dulebohn 利用光线跟踪系统来自动控制将由 WEDM 工艺加工的元件的形状[1]。到了 1975 年, 这种工艺得到快速普及, 因为这种工艺及其卓越功能得到制造业界更好的理解承认[2]。在 20 世纪 70 年代末, WEDM 工艺引入了计算机数控系统, 使这种加工工艺发生了巨大变革。因此, WEDM 加工工艺的多种潜能得到充分开发, 通过电极丝进行各种通孔加工——必须穿过要加工的部件。WEDM 的常见应用包括制造冲压和挤压的工具和锻模、夹具和量器、原型、飞机和制药部件, 以及砂轮成形切刀。

本文是 Ho 和 Newman [3]所著关于开模放电机机械论文的姊妹篇, 它回顾了包括 WEDM 加工工艺在内的各个学术研究领域。本文首先基于公认热导原理及其应用集粹回顾了这种加工工艺。本文的主要部分集中阐述 WEDM 的主要研究活动, 这包括 WEDM 加工工艺优化以及 WEDM 工艺监控。本文的最后部分对这些话题进行了讨论, 并暗示 WEDM 的未来研究方向。

2.电火花线切割加工

这一部分介绍了 WEDM 的基本原理以及此工艺结合其他材料去除技术的变化。

2.1 WEDM 工艺

WEDM 材料去除技术与传统的通过电火花腐蚀 EDM 技术非常的相似。在 WDEM 过程中, 工作区域与金属丝被连续冲洗到加工区域的绝缘液隔开, 它们之间产生的电火花慢慢腐蚀材料[4]。然而, 今天的 WEDM 工艺通常在充满绝缘液的箱体工作区中加工。这样一个在绝缘液下加工的方法有利于维持温度恒定和高效率的加工。WEDM 工艺充分利用了负极与正极之间的离子通道里产生的电能, 然后把它转化成热能温度达到 8000℃ 到 12000℃ 或高达 20000℃ 来预热和融化每个电极表面的材料。当脉动直流电源提供的 20000 和 30000 赫兹[9]之间发生断开时, 等离子体通道就会发生故障。这会导致一个突然的温度下降使循环介电液通过等离子

体通道冲洗从磁极表面的熔融颗粒。

虽然 EDM 和 WEDM 材料去除技术是相似的，但他们的功能特性是不完全相同的。WEDM 连续使用很薄的金属丝通过工件由微处理器进给，这使复杂形状的零件能够被加工，具有很高的精度。加工的零件锥度范围从100mm 厚的15度到400mm 厚的30度。微处理器也始终保持着丝和工件之间的间隙，而变化范围从0.025毫米至0.05毫米。WEDM 消除需要进行复杂的预成形电极，这通常需要在 EDM 执行粗加工和精加工操作。在 WEDM 的情况下，金属丝必须做出几个加工通道沿着轮廓进行加工才能达到所需尺寸精度和表面光洁度的质量。Kunieda and Furudate[10]测试利用干 WEDM 提高精加工的可行性的操作，这是一个气体中进行不使用电介质流体的试验。典型 WEDM 切削率（CRS）对于厚50mm D2工具钢是300 mm²/min，对于150毫米厚的铝[11]是750 mm²/min 且表面完成质量为0.04~0.25 LRA。此外，WEDM 使用去离子水代替烃油作为绝缘液体并将其包含它的火花区域内。去离子水不适合于传统的 EDM，因为它会导致快速的电极磨损，但其低的粘度和快速冷却速度使其非常适用于 WEDM[12]。

2.2 混合加工工艺

也有一些混合加工工艺（HMPs）寻找线切割机床与其他机械加工技术的综合优势。这样的组合是电线放电磨削（WEDG）这是常见的用于电子电路的细棒微机械加工。WEDG 采用单丝导向以限制金属丝张力于导线的边缘和杆之间的放电区域内，为了尽量减少导线振动。因此，能够研磨出5 min 内直径[13]具有精度高，良好的重复性和良好的直线性[14]的钢筋。WEDG 其他的优点包括能加工具有大的纵横比，并保持同心的钢筋，具有很广泛的形状复杂性，如各个部分的锥形和梯形形状。一些科学家[16~19]已经在细电极或引脚具有大纵横比的微机械加工中使用 WEDG 工艺，这是很难通过传统的精密加工微机械加工方法如微电火花，LIGA 和准分子激光钻孔。

有些 HMPs 旨在改善 WEDM 如表面完整性和 CR。例如超声波振动应用到线电极以提高表面完成质量与 CR 在一起，以减小残余应力在加工表面[20]。在另一方面，WECG 工艺替代用于 WEDG 使用电化学的放电解决方案，生产出高品质的表面完成的广泛的加工条件[15]。Masuzawa 等 [13, 15]将 WECG 与适合于精加工 WEDG 的表面完成质量进行了比较。旋转轴被应用到线切割机床到实现更高的材料去除率（MRR），并使自由几何形状的生成[21, 22]。各种工艺参数的影响如部分旋转速度，焊丝输送速度和脉冲导通时间的表面完整性和圆度所产生的部分在可行性研究中已经在被调查[23]。

3. 线切割机床的应用

本节讨论了 WEDM 的可行性过程中在所用的各种材料的加工特别是在模具的应用。

3.1 现代模具的应用

WEDM 在现代所用的各种材料的加工工装的应用已获得广泛接受。一些科学家[24, 25]研究电火花线切割加工中的加工性能在硅和压实模具加工的由烧结碳化物组成的硅片。使用圆柱形的可行性线切割机床修整一个旋转的金属结合剂金刚石用于精密形式砂轮陶瓷也进行了研究[22]。结果显示, 该电火花线切割加工过程中能够产生精确的和小圆角半径错综复杂的轮廓, 但一在高磨损率是观察到的金刚石砂轮第一磨通。这种初始的高轮磨损率是由于过度突出钻石粒, 其不经过强力粘结到轮线切割加工过程[26]。永久的线切割机床钹铁硼和'软'锰锌铁氧体磁性材料小型系统中, 这就需要小的磁性使用部分, 研究了它与比较光切割过程[27]。人们发现, 在电火花线切割加工过程产生更好的尺寸精度和表面完成质量, 但有一个缓慢的 CR, 5.5毫米/分钟的钹铁硼和0.17毫米/分钟的锰锌铁氧体。研究还做调查的机加工性能用于加工具有高纵横比的微 WEDM 采用各种金属, 包括中尺度部分不锈钢, 奥氏体不锈钢, 铍铜和钛[28]。

3.2 先进陶瓷材料

在 WEDM 过程中也演变为一个为的加工最有前途的替代品先进陶瓷。 Sanchez 等人。 [29]提供了一种文献调查的先进陶瓷的电火花, 已通过钻石被普遍加工磨削和研磨。在同一份文件, 他们研究加工碳化硼 (B₄C) 的可行性和采用电火花加工硅渗透碳化硅 (SiSiC) 和线切割机床。 Cheng 等人。 [30]还评价的可能性采用电火花加工基础硼化锆材料和线切割机床, 而松尾和大岛[31]研究的导电性的碳化物含量的影响, 即 NBC 和 TiC 等, 上氧化锆陶瓷的 CR 和表面粗糙度(氧化锆)线切割机床中。乐和 Lee [32]已经成功 WEDMed 塞隆501和铝氧化物。不过, 他们意识到该 MRR 是非常低的相比, 所述切割金属, 如合金钢 SKD- 11与表面的粗糙度一般不如用得到的1电火花加工过程。 [33]解释说, 材料去除率和表面粗糙度不仅依赖对加工参数, 而且材料部分。

克服了技术的创新方法电火花线切割机床和工艺的限制要求该材料的电阻率与约100 X /厘米[34]或阈值300 X /厘米[35]最近已经探索。有不同档次的工程陶瓷, 其中柯尼希等。 [34]列为非导体, 天然导体和指挥, 这是掺杂非导体的结果与导电元件。 [36]带来了新的视角对传统电火花加工通过使用一个辅助电极, 以促进现高电致电阻陶瓷的火花。无论是电火花线切割机床和工艺已成功测试扩散导电粒子辅助电极上赛隆陶瓷的表面通过绝缘协助供给电极材料。同样的技术也已试验在其他类型的绝缘陶瓷材料的包括氧化物陶瓷, 例如氧化锆和氧化铝, 这已经很有限的导电性能[37]。

3.3 现代复合材料

在几乎所有的不同材料去除工艺当中, WEDM 被认为是现代复合材料加工中既高效又经济的工艺手段。几个比较性研究[38,39]已应用于电火花线切割和激光切割的

加工金属基复合材料 (MMC)，碳纤维和增强液晶聚合物复合材料。这些研究表明，WEDM 产生更好的切削刃质，并具有更好的控制过程参数，产生较少的工件表面损伤。但是，它对于所有被测试的复合材料具有较慢 MRR。Gadalla 和 Tsai [40]比较了线切割机床与常规金刚石锯，发现它产生的粗糙度和硬度具有低速金刚石锯但具有更高 MRR。Yan 等人 [41]调查了在 MMC 上进行各种加工工艺，利用旋转电火花加上一个圆盘状的电极 Al2O3/6061Al 复合材料进行试验加工。其他研究 [42, 43]上的线切割机床已进行调查的 Al2O3颗粒增强复合材料在电火花线切割加工性能的工艺参数的影响。人们发现，工艺参数对表面粗糙度的影响较小但对 CR 产生不利影响。

4 电火花线切割加工研究的主要领域

作者们组织了各种线切割机床研究分为两个主要领域，即电火花线切割加工工艺优化与电火花线切割加工过程监控和控制。

4.1 电火花线切割加工工艺优化

今天，最有效的加工策略是通过识别影响的各种因素决定的在线切割加工过程中，追求的不同方式获得最佳的加工条件和性能。本节提供了一个研究的众多涉及的设计加工策略工艺参数和过程的建模。

4.1.1 工艺参数设计

对各种工艺参数的设置在电火花线切割加工过程中起到了至关重要的作用需要产生一个最佳的机械加工性能。这部分显示了一些分析和统计的用于研究的参数的作用的方法措施，典型的线切割机床的性能如 CR, MRR 和 SF 。

4.1.1.1 影响测量性能的因素

WEDM 是通过控制一个复杂的加工工艺大量的工艺参数，如脉冲持续时间，放电频率和放电电流强度。在这个过程中参数的任何细微变化可以影响措施的机加工性能如表面粗糙度和 CR，这是两种在线切割加工操作的最显著的方面 [44]。铃木汽车和岸 [45]研究了放电的减少能得到更好的表面粗糙度，而罗 [46]发现了一个高能的额外要求效率保持较高的加工速度而不损坏导线。一些作者 [47]有还研究了丝刀具性能的演变影响加工精度，成本和性能措施。

适当的加工条件的选择对线切割加工过程是基于相关分析各种工艺参数，以不同的表现措施，即 CR，MRR 和 SF。传统上，这是开展严重依赖操作者的经验或保守技术由电火花线切割设备制造商提供的数据，这产生不一致的机械加工性能。Levy 和马吉 [48]表明，由制造商给定的参数设定只适用于普通钢种。设置用于加工的新材料，如先进陶瓷和 MMC

卡，必须进一步优化实验。

4.1.1.2 在切割工艺参数的影响率

许多不同类型的解决问题的质量工具已经被用于研究的显著因素及其与其它变量的相互关系在获得最佳的电火花线切割加工的 CR。今田等人[49]分类影响的各种潜在因素措施为五大类线切割机床的性能工件即不同性质的材料和介电液，机械特性，可调加工参数和组件几何。此外，它们应用的设计试验设计（DOE）技术，研究和优化变量在流程设计可能产生的影响和发展，并验证实验结果用噪音对信号（S / N）比分析。Tarng 等。[50]采用神经网络系统与应用模拟退火算法求解多响应优化问题。它结果发现，加工参数，如脉冲开/关时间，峰值电流，开路电压，伺服基准电压，电容和工作台速度是估算的关键参数 CR 和 SF。Huang 等人[51]认为那几个发表作品[50, 52, 53]关注大多与这些参数的优化粗加工切割作业，并提出了实用的过程从粗加工计划精加工策略操作。实验结果表明，该脉冲导通时间和导线外围之间的距离和工件表面影响 CR 和 SF 显著。放电能量对的影响 CR 和一个 MMC 的 SF 也进行了研究[54]。

4.1.1.3 效果上的材料去除速率的加工参数。

加工的影响在体积 MRR 参数也已认为是加工性能的量度。Scott 等人 [52]采用析因设计需要数的实验来确定最有利组合线切割机床参数。他们发现，该放电电流，脉冲持续时间和脉冲频率是影响显著控制因素 MRR 和 SF，而线速度，线张力和介质流速有最小的影响。Liao 等人 [53]建议确定的参数的方法基于田口品质设计方法设置和方差分析。结果表明材料去除率和 SF 很容易被工作台进给的影响率的脉冲的导通时间，从而也可用于控制放电频率为预防断线。黄廖本[55]提出利用灰色关联度和 S / N 比分析，这也显示了类似的结果证明的影响工作台的进给脉冲导通时间对材料去除率。实验研究确定不同的材料去除率和 SF 加工参数也已进行[56]。该结果已被用于与热模型分析了断线的现象。

4.1.1.4 对表面光洁度的工艺参数的影响

也有一些已经发表的作品仅研究对加工参数的影响该 WEDMed 表面。Gokler 和 Ozano [57]研究了最合适的切割选择和偏移参数组合，以获得所期望的表面粗糙度对于恒定线速度和介质冲洗压力。Tosun 的等人 [58]研究的效果脉冲持续时间，开路电压，线速度和在 WEDMed 工件介质冲洗压力表面粗糙度。人们发现，在增加脉冲持续时间，开路电压和送丝速度用表面粗糙度增大，而越来越多介质流体压力减小表面粗糙度。阿南德[59]用部分因子试验正交阵列布局，以获得最可取的工艺规范对于提高在电火花线切割加工的尺寸精度和表面粗糙度。斯佩丁和 Wang [60]优化的过程利用人工神经网络参数设置建模的 WEDMed 工件表面特征，而威廉姆斯和 Rajurkar [61]提出当前调查的特性的结果产生的电火花线切割加工表面。

4.1.2 流程建模

另外,电火花线切割加工的由建模数学技术手段也已经适用于有效地与众多工艺变量的过程的不同表现。斯佩丁和 Wang [62]开发的建模技术采用响应曲面法和人工神经网络技术来预测过程性能如 CR , SF 和表面波纹度在一个合理的大范围的输入因子水平。刘和 Esterling [63]提出了一种实体建模方法,它可以精确表示几何切割由电火花线切割加工过程,而 Hsue 等[64]开发了一个模型来估计 MRR 在几何通过考虑与偏转线切割导线中心的转化指数轨迹。Spur 和 Schoenbeck [65]设计了一个理论模型研究工件材料的影响,并在工件的电火花线切割加工的脉冲型属性与阳极极性。Han 等人。[66]开发一个仿真系统,该系统可精确地再现电火花线切割放电现象。该系统还应用自适应控制,它自动生成最佳加工条件进行高精度 WEDM。

4.2 电火花线切割加工过程监测和控制

自适应控制系统的应用在线切割加工是用于监测和控制至关重要的过程。本节将探讨先进监测和控制系统,包括模糊,断线和自调谐的自适应控制在电火花线切割加工过程中使用的系统。

4.2.1 模糊控制系统

比例控制器历来在伺服进给控制系统用于监视和在电火花线切割加工过程评估差距的条件。然而,控制器的性能是有限的由加工条件,这大大与参数设定而有所不同。Kinoshita 等人 [67]调查的焊丝输送速度,焊丝卷绕的影响速,丝的张力和对电参数电火花线切割加工过程中间隙条件。其结果是,许多常规基于显式的数学控制算法和统计模型已经被开发用于电火花线切割加工或操作 [68-72]。几位作者 [73, 74]还开发了脉冲判别系统提供分析和监测的手段各种线切割机床条件下的脉冲序列定量。虽然这些类型的控制系统可以适用于很宽范围的加工条件下,它不能向间隙状态响应当有一个意想不到的干扰 [75]。在最近几年中,模糊控制系统已应用于电火花线切割加工工艺,以达到最佳和高效加工。一些研究者声称,模糊逻辑控制系统,实现了控制战略,抓住了专家的知识或操作者在保持所需的经验加工操作 [76]。此外,模糊逻辑控制器不需要任何数学综合模型适应的动态行为在线切割加工操作 [77]。一些作者 [75, 78]提出火花频率控制与自适应基于模糊逻辑控制和控制系统的调整策略,这可以应用到很宽一系列的加工条件。廖和胡 [79]也设计了在线监测脉冲模糊控制器系统隔离放电噪声和歧视每个脉冲的点火延迟时间。电火花脉冲可以分为开放,火花,电弧,关闭或总之,这是依赖于点火延迟时间,并且对材料去除率,磨损和零件精度 [80, 81]有直接影响。

4.2.2 线误差自适应控制系统

电火花线切割加工过程中发生的最不理想的加工特征之一大大影响加工精度和性能连同该部分的质量制造。许多尝试取得了开发的自适应控系统提供在线辨识的任何不正常的加工条件和控制策略防止导线的断裂不影响各种措施的线切割机床的性能。这公布的部分报告研究弗罗马集合涉及断线的自适应控制工作滞后和振动线。

4.2.2.1 金属丝破损

各种各样的控制策略防止导线的断裂是建立上的导线断裂的特性的知识。Kinoshita 等人[82]观察到的快速上涨间隙电压，继续为脉冲频率前约5-40毫秒断线。他们开发一个监测和控制系统，它关掉脉冲发生器和伺服系统防止导线从断裂，但它影响加工效率。一些作者[83, 84]也有人认为浓度放电在某一点的线，这将导致增加的局部温度从而在金属丝的断裂。然而，自适应控制系统集中在检测火花的位置和排出的还原未做任何考虑，开发能源到 MRR。导线的断裂有也被认为与上升的短路数脉冲持续时间超过30毫秒，直到金属丝破损[85]。其他作者[86]认为，断线是相关，在火花频率突然增加。有人还发现，他们的建议的监察和控制系统的基礎上的在线分析火花次数的实时调节脉冲关断时间会影响材料去除率。Liao 等人 [87]补救通过与材料去除率的加工问题参数和使用新的电脑辅助脉冲基于脉冲串的分析判别系统提高了加工速度。而燕和廖 [88, 89]应用了自学习模糊控制策略不仅要控制的火花频率，但也保持较高的 MRR 通过实时调整停机时间脉冲下的恒定进给率加工条件。

导线的破损也是由于过度的热负荷对电线产生不必要的热量电极。大多数过程中产生的热能在电火花线切割加工过程被转移到金属丝而其余散失到冲洗流体或辐射[86]。但是，当瞬时能量比率超过某一限制根据热性能线材，电线会断裂。几位作者[90-92]研究了不同的影响在电线上的热载的加工参数并制定了热模型模拟线切割机床过程。除了产生火花的特征或温度分布，其机械强度导线也有对发生一个显著作用的断线。罗[93]声称，丝材料屈服和断裂向断线，而温度的升高加剧失败的过程。

4.2.2.2 金属丝滞后和振动线

造成的几何误差主要因素 WEDMed 部分都作用于各种工艺势力电线导致它离开了编程的路径。这些力量包括所产生的机械压力其外由所形成的气泡侵蚀机制等离子，轴向力应用拉直的钢丝，液压力量引起的冲洗，作用在导线上的静电力和固有的火花电动态力代[94, 95]。其结果是，静挠度在呈圆滞后导线的作用是至关重要的研究，以便产生精确的切削刀具路径。几位作者[93, 96, 97]进行的几何参数研究的部分的不精确性所造成的导线的滞后并试图以数学建模电火花线切割加工工艺。而贝尔特拉米和 Dauw [98]监测和一个通过一个在线控制线位置用的控制算法使实质上的光学传感器任何轮廓在相对高的切割要切割速度。许多几何工具的运动补偿方法，这增加了加工间隙和防止计量或电线破损切削区时，具有高曲率，如小半径弯道也已经开发[99-100]。Lin 等人[101]开发了基于模糊逻辑控制策略提高加工精度和浓缩在拐角部位引发不影响切割

进给率。

此外，电线的过程中的动态行为线切割机床也被限制以避免切割不准确。上有设计一些讨论和监测和控制系统的开发补偿导线振动的行为[86, 102]。Dauw 等[103]另据报道，导线的振动可以显著减少时在导线和导线导板完全浸没在填充有离子交换水，工作油箱。几个文献[104]给出了一个数学模型分析导线振动的瞬态响应的基础上在单次放电作用于工具电线力过程。一些作者[105, 106]的审阅的各种先进的研究和开发在电火花加工中使用的监测和控制系统和电火花线切割加工工艺。

4.2.3 自整定自适应控制系统

在最近几年中，电火花线切割加工的研究和开发有研究控制策略调整到变化在加工一个所需的功率密度工件具有不同的厚度。几位作者[82, 85]发现，在工件厚度的变化机械加工导致的增加的线中热密度和导线的最终断裂。Rajurkar 等人[107, 108]提出了一种自适应控制系统具有多个输入模型，用于监视和控制根据网上的火花频率确定工件高度。其他作者[72]开发了包括一个明确的数学系统模型需要大量的实验和统计技术。Yan 等人[109]所使用的神经网络来估计所述工件的高度和模糊控制逻辑来抑制断线时工件具有可变高度加工。

以知识为基础的控制系统中的应用控制线切割机床的不利条件也得到了试验。Snoeys 等人[110]提出了一种知识基础的系统，它包括三个单元，即工作的准备，过程控制和操作员协助或故障诊断，使监控和电火花线切割加工过程的控制。劳动预备制模块确定最佳的加工参数设置，同时操作者的援助和故障诊断数据库告知经营者和诊断的加工误差。因此，该功能这些模块增加自主权给予的金额到线切割机床。黄廖本[111]有也表明了运营商援助的重要性，并为电火花线切割加工过程中的故障诊断系统。他们提出了一个原型人工神经为维护网络的专家系统时间表及线切割机床的故障诊断。德凯塞等人[112]开发集成了一个热模用于预测和控制专家系统热过载经历了上线。虽然该模型提高了机器的自治水平，需要大量的计算量，这会降低处理速度和在线破坏控制性能。

5 讨论与未来的研究方向

作者们归类广泛的发表关于在线切割加工过程分为三个作品，主要范畴即优化过程变量，监测和控制的过程中，电火花线切割机床的发展。本节讨论分类线切割机床研究领域和未来可能的研究方向，如图1所示。

5.1 优化过程变量

在线切割加工过程的优化往往被证明是由于许多调节一个困难的加工变量。一个单一的参数变化会影响以复杂的方式[52]的处理。因此，影响该过程的各种因素必须是理解，以确定该过程的趋势变化，如4.1.1节中讨论。选择的

工艺参数的最佳组合实现了最佳的加工性能涉及的分析 and 统计方法。然而，这是非常复杂的涉及到与输入工艺参数测量输出性能，并得出最优导致使用模拟退火算法。华润，MRR 和 SF 通常选择作为该过程的措施性能。然而，这些方法提供了一个识别影响该变量的有效手段机械加工性能。

此外，该方法的建模也是解决有关的繁琐问题的有效途径工艺参数对措施的表现。正如4.1.2节，多次尝试都已经进行了建模过程中调查到电火花线切割加工参数的影响性能，并确定最佳的加工条件从组合的无穷数。如因此，它提供了一个准确的尺寸检验和验证的过程中产生了更好的稳定性并为电火花线切割加工工艺更高的生产力。然而，侵蚀的复杂性和随机性过程电火花线切割加工中需要确定的应用以及随机方法[61]。因此，在线切割加工工艺的优化仍将是重点研究领域相匹配的众多工艺参数与措施的表现。

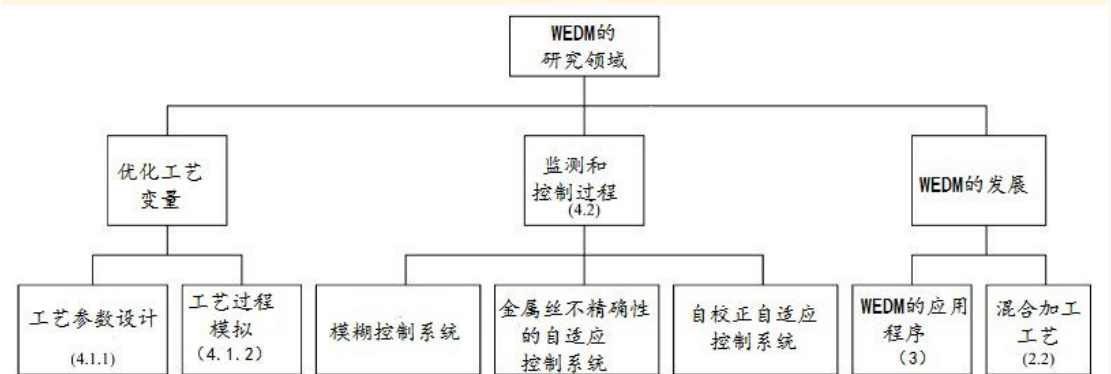


图 1 主要的电火花线切割机床研究领域（相应部分数字是在括号中）的分类。

5.2 监测和控制的过程

多年来，监测和控制系统已在最大限度地减少了重要贡献在电火花线切割加工性能的干扰的效果。多参数加工设置进行了很难清楚地了解，并获得最佳的加工条件。它需要一个控制算法这往往是基于明确的数学和统计模式，以配合加工过程。然而，模糊控制逻辑的应用程序有带来了很大的变化，以常规监测和控制的电火花线切割加工工艺的方法。模糊控制逻辑可以考虑几个加工变量，权衡显著因素影响过程，并进行更改加工不应用详细的数学条件模型，正如上文第4.2.1节。另外，应用所述专家系统能的可行性提供意见和解决问题也一直研究[110]。这种制度将极大地吸引车间运作的需要，要求无人值守线切割机床的操作。

断线和的弯曲的风险电线也限制了效率和准确性电火花线切割加工工艺。断线的发生直接降低已经很低的加工速度影响在加工过程的总效率。虽然，在控制策略中报告第4.2.2旨在解决断线的问题，它完全依赖于可能的指示发生和产生结果调查不充分的断线现象的根本原因。这些策略可能因而被视为是一种挫折当用可变加工工件要求在加工一个急剧变化的高度条件。

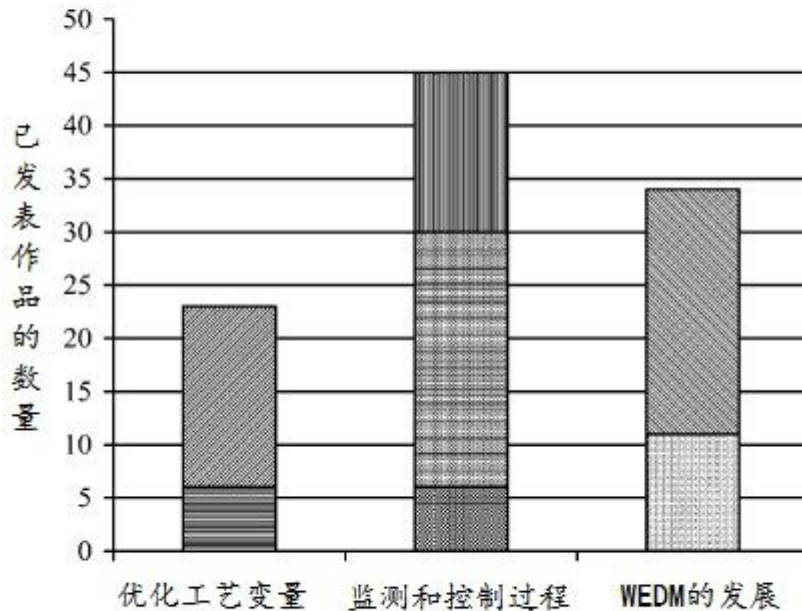
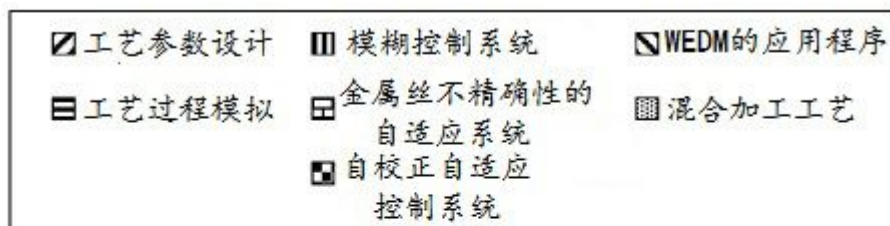


图 2 集合电火花线切割机床研究出版物的分布。

此外，电线的振动行为和静态偏转容易影响的几何精度部分生产。典型的解决这些问题的经常是非常保守的性质通过增加加工间隙或减小放电能量，这被认为是一个主要的缺点为电火花线切割处理效率。图。图2显示了大量的研究工作集中在改善通过应用程序所引起的电线的误差的自适应控制系统。Jennes 和 Snoey[113]认为，传统的研究目的是不提高加工效率，而且，以防止从加工过程中金属丝断裂。因此，一种可能的新的挑战，线切割机床和未来工作区将争取实现更高的被操纵通过收购华润较高的加工效率和 MRR 具有低线量和频率。

5.3 线切割机床的发展

在线切割加工过程是一个合适的加工选项在满足当今的现代应用的需求。它已被广泛应用于汽车，航空航天，模具，工具和模具制造等行业。电火花线切割加工的应用程序，也可以在医疗发现，光，牙科，珠宝等行业，以及在汽车和航空航天研发领域[114]。它的大池的应用中，如图所示。2，主要是欠加工技术，这是没有限制的硬度，强度或工件的韧性材料。如上文第3节的在线切割加工 HSTR，现代的复合材料和先进陶瓷材料，这正显示出越来越多的趋向于许多工程应用程序，也已尝试。它有更换加工陶瓷的常规手段，即超声波加工和激

光束加工，这不仅是昂贵的机器，但损坏的陶瓷构件的表面完整性。然而，由于引入的超过20个非传统在过去50年的加工工艺和在坚硬，坚韧的发展快速增长做强工件材料[115]，在线切割加工过程中不可避免地要在不断焕发青春为了竞争和满足未来的关键加工要求。

此外，在线切割加工过程中一直寻求的好处与其他材料的去除方法相结合的进一步扩大其应用，提高了加工特性。作者们归类在线切割加工机到不同的物理特性，它明确区分了不同的机器特点类型影响性能措施，机械加工能力和配套设施，如图所示3。其中，最实用和精度 HMP 安排使用的 WEDG 过程主要以生产小尺寸和复杂形状细杆，它可以很容易地弯曲或折断由横向使用传统的磨削工艺时，可强制。数控系统的精度也有份为 WEDG [116]的准确性。因此，该 HMP 过程，特别是 WEDG 过程中，将继续得到深入研究的关注特别是在微电子电路的增长制造业领域。

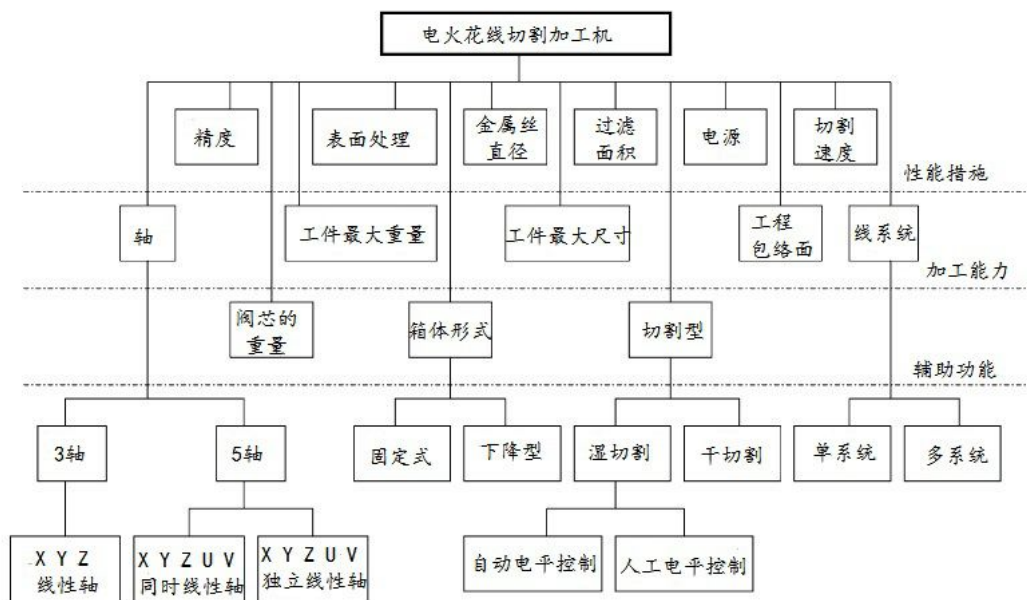


图 3 电火花线切割加工机的分类。

还有一个重要的推动朝无人值守线切割机床的操作实现一机加工性能可以由熟练的操作员才能实现的水平。这样的目标已经通过应用程序部分地满足，的 CNC 控制的加工策略以防止断线和自动化系统。环境友好型和大容量介质再生系统，这自主地保持在介质的质量在线切割加工机内循环，也一直实验[117]。然而，由于考虑仍要给予改善 WED 性能并提升自动化为未来整合的水平内的电火花线切割机床和工艺 CIM 环境[118]。然后，将能够合理满足高技能电火花短缺/线切割机床经营者和实现更具成本效益和成本有效的机械加工操作。

6 结束语

WEDM 是一种行之有效的非传统能够满足材料去除过程由提出要求的不同加

工要求金属切削行业。它已被普遍适用于加工和微机械加工零件复杂形状和不同硬度要求高精确度和严格的尺寸公差。但是该方法的主要缺点是相对低的加工速度，相比于其他非传统的加工工艺，如激光切割的过程中，主要是由于热加工技术。此外，较新的发展而更奇特的材料提出了挑战生存能力在未来的制造业在线切割加工过程中环境。因此，持续改进需要可向电流线切割加工性状，以扩大加工能力，提高了加工生产率和效率。

在线切割加工过程的最终目标是实现了准确，高效的加工操作而不损害机械加工性能。这主要是进行以理解的相互关系影响的各种因素之间的过程和确定最佳的加工条件其外的组合无限多。该自适应监测和控制系统也有被广泛实施驯服瞬态电火花线切割加工行为，而不线断裂的风险。此外，一些监测和控制算法基于显式的数学模型，专家的知识或智能系统已经报道减少所引起的振动特性的误差和电线的静挠度。与连续趋势走向无人值守加工操作和自动化，在线切割加工过程必须不断提高维护作为竞争和在现代模具车间经济的加工操作制造领域。虽然笔者认为该电火花线切割加工过程中，因为它能够有效地机械零件与难加工材料和几何形状具有无法比拟的它自己的应用程序领域。

致谢

作者要感谢支持拉夫堡大学，特别是在欧胜机械与制造工程学院用于资助当前的研究奖学金。

参考文献

- [1] E. C. 詹姆森， 描述和放电的发展加工 (EDM)、 电火花加工技术，社会的制造工程师，Dearbern，密歇根州2001 年，页 16。
- [2] G. F. 本尼迪克特，放电加工 (EDM)，非传统制造过程，马塞尔 · 戴克，公司新纽约 & 巴塞尔，1987 年，页 231 - 232。
- [3] K. H. 何世倜纽曼先进的电气放电加工 (EDM)，int. J. 电机工具麦迪 43 (13) (2003 年)1287 - 1300。
- [4] A. B. 普里，B. 巴氏、 分析和优化由于钢丝滞后现象中的几何误差电火花线切割、 int. J. 电机工具麦迪 43 (2) (2003 年) 151 - 159。
- [5] E. I. Shobert，EDM: E. C. 詹姆森 (Ed)，放电加工： 模具、 方法和应用程序，社会的制造工程师，Dearbern，密歇根州，1983 年，页 3-4。
- [6] H. C. Tsai, B. H. 燕 F. Y. 黄、 电火花加工性能的 Cr /以铜为基础的复合电极，int. J. 电机工具麦迪 43 (3) (2003 年) 245 - 252。
- [7] G. A. K. 温斯顿，非常规加工过程、 加工，马塞尔 · 戴克，公司的基本原理，1989 年，页 491。

[8] J.A. 麦古、机械加工、先进的方法 Electrodischarge 加工, 查普曼 & 大厅, 伦敦, 1988 年, 130 页。

[9] 旧金山 Krar, 人类复选, 电火花加工技术机床、格伦科/麦格劳-希尔、纽约, 1997 年, 页 800。

[10] M. 枝, C. 古馆, 高精度完成切割的干电火花线切割、安 CIRP 50 (1) (2001) 121 - 124。

[11] S. Kalpajian, S.R. 施密德, 材料去除过程: 磨料, 化学、电气和高能光束, 制造普伦蒂斯霍尔, 新泽西, 工程材料的过程 2003 年, 页 544。

[12] E.A. Huntress, 放电加工, 是钳工 122 (8) (1978) 83 - 98。

[13] T. Masuzawa, 香港有限公司滕斯霍夫, 三维微细加工由加工工具、安 CIRP 46 (2) (1997) 621 - 628。

[14] T. Masuzawa M. 藤野, 小林, N. T. Suzuski 木下, 磨的微加工、放电安 CIRP 34 (1) (1985 年) 431 - 434。

