

《涡轮/透平叶片气膜冷却孔电加工关键技术及装备》

项目总结报告

一、项目概况

项目名称：涡轮/透平叶片气膜冷却孔电加工关键技术及装备

立项时间：2016年7月30日

项目编号：BY2016024-01

项目负责人：李勇

合作企业：无锡微研精微机械技术有限公司

经费预算：省拨款 60 万元，单位自筹 165 万元

主要研究内容：

面向（航空发动机和燃气轮机）的核心热端部件（涡轮/透平叶片）的复合结构（圆孔+扩散孔口）气膜冷却孔批量化加工，研究一种采用水基弱电解质工作液的电火花高速穿孔加工、扩散孔高效加工工艺，开展工艺优化、精密机电控制、核心模块开发、加工装备集成等关键技术研究，研发气膜孔电加工专用装备，实现多孔径、复合结构、薄/无重熔层的气膜孔高效自动批量化加工。

（1）设计一种新主轴机构，实现管状工具电极高精度旋转、蠕动进给补偿、高压内冲液复合功能；

由于加工用细长电极刚度差，后推式主轴机构在加工中容易导致弯曲和摆动，研究设计一种新主轴机构以提高电极的进给刚度和降低电极摆动，实现管状工具电极高精度旋转、蠕动进给补偿、高压内冲液复合功能，具有电极损耗自动补偿和良好的伺服响应性能。研究电极驱动和导向器精密匹配机构的创新设计，以达到电极高精度旋转进给；设计自动更换多根电极模块，以实现大量气膜孔的批量化连续加工；设计为包括电极伺服进给和电极导向器加工区定位的宏微进给结构。

（2）设计高放电效率和薄重熔层智能脉冲放电电源，实现脉冲、脉间、峰值电流、电

容值等参数在线调控功能；

脉冲电源决定加工速度、表面质量、电极损耗、能量利用率，脉冲电源提供放电脉冲类型影响着工件的重熔层厚度。根据工作叶片高温合金材料的电火花加工特性，有针对性地设计高放电效率和薄重熔层智能脉冲放电电源。开展脉冲电源拓扑结构设计和模块化结构设计，研究纳秒级工作频率下的脉冲驱动技术，使驱动电路具有过电流保护功能，动态驱动能力强，能为开关管栅极提供陡峭前后沿的驱动脉冲，减小开关管的发热量，以提高电源抗干扰能力和可靠性；设计具有脉冲、脉间、峰值电流、电容值等重要参数在线控制调节功能，以实现在线优化加工工艺参数。

(3) 研究放电间隙智能伺服控制、加工工艺过程协调控制方法，实现全自动化高效的气膜孔加工工艺过程；

控制系统对气膜孔加工效率、重熔层减薄效果和自动化程度具有重要作用。在气膜孔电火花加工状态变化快，影响因素多，随机性大，很难用数学模型来描述这种非线性、多参数时变系统。研究电火花加工过程控制方法，深入研究高精度多轴定位及联动控制、加工深度精确控制、参数自动调节输出控制、加工过程协调控制，以期实现全自动化高效工艺过程。

(4) 研究复合结构气膜孔加工工艺及重熔层减薄工艺；

研究电火花加工后重铸层显微组织结构、微裂纹的产生机理，获得有利于减小重铸层的加工工艺途径。探索水基弱电解质工作液下电火花加工工艺途径，在兼顾加工精度和加工效率的前提下，达到有效减薄甚至消除重铸层的加工效果。

(5) 集成开发出气膜孔批量化全自动加工装备样机；

研究电加工系统及专用装备的整体系统化设计，在主轴机构模块、工装机构模块、脉冲放电电源、控制系统等机电控软硬件模块开发基础上，对加工系统及专用装备进行软硬件集成联调、性能测试和优化，开发出气膜孔批量化全自动加工装备样机，拟达到主要功能和技术参数指标先进、性能可靠。并力求实现模块的可互换性、可维护性、可升级性。开展各个功能模块性能测试和验证实验，分别优化圆孔穿孔、扩散孔口加工工艺。在性能验证和工艺优化基础上，在叶片样件上进行气膜孔加工应用实验研究，对加工出的气膜孔质量进行检测，包括空间位置、尺寸形状精度、表面重熔层厚度等指标，评价加工工艺及装备的效率、精度等加工效果。

二、项目实施情况

1 完成项目过程中所做的主要工作

本研究按照计划有序开展，所做的主要工作：

通过创新设计电极驱动和导向器精密匹配机构、柔性自适应密封结构，选择耐磨耐腐蚀材料等技术措施，发明了一种满足电极高精度旋转、蠕动式自动进给、管状电极高压内冲液、电极供电及绝缘、耐腐蚀的复合功能主轴。

开发出一种纳秒级脉冲放电的高能量密度脉冲电源，解决了较高浪涌电压和很强的电磁干扰情况下的高压脉冲主振快速驱动问题。

进而采用水基弱电解质作为电介质，研究出纳米级窄脉宽高峰值放电电流的电加工技术，实现了重熔层厚度的减薄甚至消除。

通过实时监测穿孔加工过程中的放电信号、进给速度反馈方法，并结合剔除初始阶段误判信号的策略，实现了电火花加工中电极贯穿长度的精确控制，保证了孔进出口精度并且可避免触及相邻筋板或叶片对壁。

发明了一种气膜孔扩散孔的电火花分块加工技术。根据气膜孔扩散形出口的形状尺寸，将待加工区域分为若干个子区域，利用细长型电极进行电火花分块加工，通过多次进给加工出完整扩散形出口，实现了高效率、成本低的扩散孔加工方法。

集成了复合功能主轴、纳秒级脉冲电源、加工过程精密控制、控制系统等关键模块，研发出多孔径、薄/无重熔层的气膜孔高效自动化加工的整套工艺与装备。开发出气膜孔电火花加工数控样机，并加工出气膜孔样件。

2 联合研发团队的组织、实施计划的制定与落实

本研究通过产学研有效联合组织的方式开展，由清华大学无锡应用技术研究院精微制造技术研究中心和无锡微研精微机械技术有限公司共同开展合作研究。

清华大学无锡应用技术研究院精微制造技术研究中心依托清华大学机械工程系先进制造学科的优势，侧重开展了复合功能主轴机构、高频窄脉宽放电电源、加工过程监测及自动化控制、气膜孔圆孔及扩散孔加工工艺、重熔层减薄工艺等关键理论和技术研究。

无锡微研精微机械技术有限公司侧重开展了加工装备集成、加工工艺实验和加工装备产

品化的开发，实现了将关键理论和技术成果工程转化。这种研发方式交叉结合了精微制造技术研究中心的技术开发优势和无锡微研精微机械技术有限公司的精密制造和工程化能力优势。

课题组成员定期开展技术及装备研发进展讨论会，增强了研发人员之间的沟通和合作，有效解决了研发过程中遇到的技术问题。项目实施过程中，通过制定切实可行的研究计划和时间节点，并进行明确的研发任务分工，使研究计划得以有效实施和落实。

3 企业研发人员的培养培训

本研究执行过程中特别注重研发人员的培养和培训。项目研发涉及机、电、控多学科交叉，研发人员的机械设计、电路设计、加工工艺及过程控制、机电系统集成等多方面能力可得到综合训练和提高。

从技术问题提出、技术方案论证、技术问题解决的全过程对研发人员进行培训，通过关键机构装配、系统集成、工艺实验培养研发人员的动手能力。培养研发人员的以技术先进性和产品实用化为导向的创新意识和成本意识。通过研究规划、技术探讨、研究合作的过程培养研发人员的时间管理、沟通及团队合作意识。

4 项目完成情况及成效

本研究完成了预期的项目研究内容和目标。

研发出一种复合功能新主轴机构，实现了管状工具电极高精度旋转、蠕动进给补偿、高压内冲液复合功能。

研发出一种高放电效率和薄重熔层智能脉冲放电电源，实现了脉冲、脉间、峰值电流、电容值等参数在线调控功能。

研究出放电间隙智能伺服控制、加工工艺过程协调控制方法，实现了全自动化高效的气膜孔加工工艺过程。

研究出复合结构气膜孔加工工艺及重熔层减薄工艺，集成开发出气膜孔批量化全自动加工装备样机 2 台。气膜孔样机及样件达到了性能指标：孔径范围 0.2~2mm；加工效率>20mm/min；孔径精度优于 $\pm 20\mu\text{m}$ ；表面重熔层厚度 $<10\mu\text{m}$ 。申请申报发明专利 3 项、实用新型 4 项。

5 经费预算执行情况

江苏省科技计划项目经费决算表

经费单位：万元

项目来源	2016年省级政策引导类专项资金				
项目编号	BY2016024				
项目名称	涡轮/透平叶片气膜冷却孔电加工关键技术及装备				
经费投入		经费支出			
来源	投入数	科目	支出数	其中：省拨款 支出数	其中：自筹经 费支出数
投入合计		支出合计	225	60	165
1、省拨款	60	(一) 直接费用	199.60	51.9 3	147.6 7
2、部门、地方配套		1、设备费	42.04	5.66	36.3 8
3、承担单位自筹	165	(1) 设备购置费	42.04	5.66	36.3 8
4、其他来源		(2) 设备试制费			
		(3) 设备改造与租赁费			
		2、材料费	40.43	17.3 2	23.1 1
		3、测试化验加工费	49.38	12	37.3 8
		4、燃料动力费	3.83	2.95	0.88
		5、差旅费	3.88	1.77	2.11
		6、会议费	0.89	0.89	
		7、国际合作与交流费	3.88	3.88	
		8、出版/知识产权事务费	3.18	3.18	
		9、劳务费	52.37	6.1	46.2 7
		10、专家咨询费			
		11、其他支出			
		(二) 间接费用	26.95	8.07	18.8 8
		其中：绩效支出	1.44		1.44
经费结余		0			

三、项目技术情况

1 项目的研究方法及技术路线

本研究综合采用理论分析、计算仿真、系统设计与集成、加工工艺实验相结合的研究方法。重点研究复合结构气膜孔电加工过程关键理论、以及主轴机构和脉冲电源等装备样机的核心技术。采用理论分析、建模仿真并结合基础实验方法：侧重研究了重熔层形成机理，工艺因素对重熔层去除效果的影响规律、加工过程检测和加工过程自动化控制、气膜孔穿孔加工深度的精确反馈和控制。采用系统化和模块化设计方法，创新设计了复合功能主轴机构、多维定位专用工装夹具、电加工脉冲电源、机电控制系统等关键功能模块，并集成各个模块形成加工工艺实验平台。进一步采用工艺实验方法，优化加工系统平台和工艺参数。

在理论、机构、工艺研究基础上，开发出气膜冷却孔自动化加工专用装备，进一步进行工艺装备优化和应用实验研究，并对加工装备和加工出的气膜孔样件进行性能测试，评价加工效率和精度、可靠性等应用效果。本研究整体技术路线如图 1 所示。可分为基础理论与加工机理研究、关键功能模块开发与加工装备集成研究、工艺实验研究与加工性能测试。最终形成一套完整的叶片气膜孔电加工工艺，并集成开发出用于气膜孔加工的专用装备 2 台。

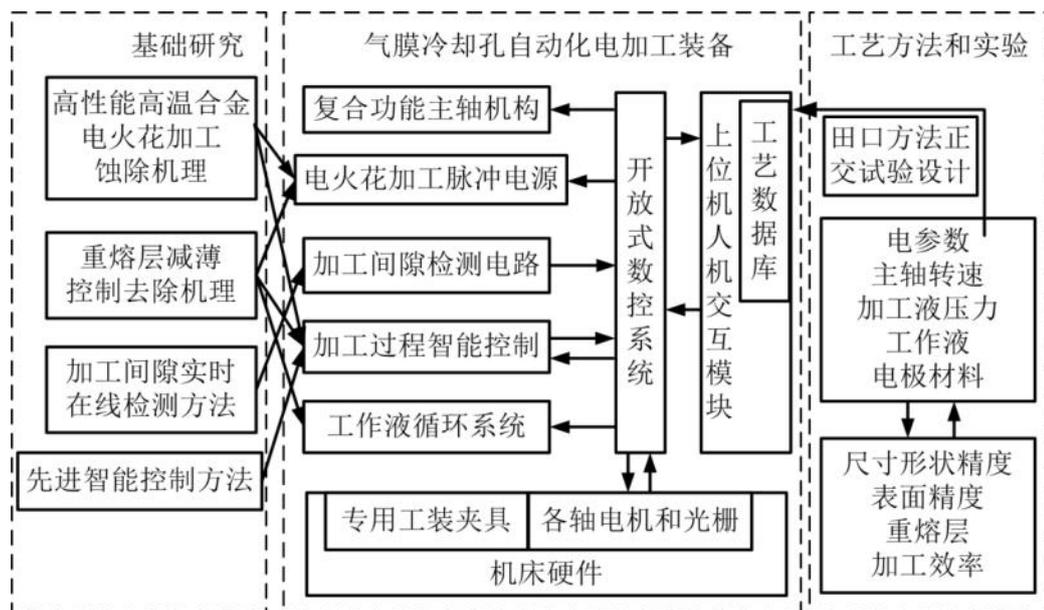


图 1 课题研究技术路线

2 解决的关键技术

解决的气膜冷却孔电加工关键技术包括功能复合型主轴及换丝机构、高能量密度脉冲电源、表面重熔层减薄、扩散出口高效加工、加工贯穿检测及控制、装备系统联调与集成。

2.1 功能复合型主轴及自动换丝机构

5.1.1 功能复合型主轴原理设计

主轴机构设计方案如图 2 所示。其工作原理和过程为：气膜孔加工前，通过 Z 轴定位主轴机构相对于工件的相对位置；在气膜孔加工中，通过 S 轴伺服控制电极保持放电间隙，同时电极转动和中空高压冲液以提高排屑和加工效率；每个气膜孔加工完成后，停止电极旋转和中空冲液，通过工作台和 Z 轴重新定位电极到下一个气膜孔，然后通过电极蠕动进给补偿损耗。电极轴向运动、旋转运动分别通过伺服轴 S、旋转轴 R 实现。电极蠕动利用常开夹子、常闭夹子双夹子结构的交替径向开合运动与 S 轴驱动的轴向相对运动实现。电极旋转精度通过导向器约束保证，电极进给 S 轴和主轴头定位 Z 轴构成宏微复合驱动方式。

根据工作原理和过程可知：电极运动包括伺服加工用轴向运动与旋转运动、补偿电极损耗的蠕动进给运动。电极轴向运动、旋转运动分别通过伺服轴 S、旋转轴 R 实现。考虑到电

机引线方便性，整体方案为旋转运动（轴 R）置于轴向运动（轴 S）上。电极蠕动利用常开夹子、常闭夹子双夹子结构的交替径向开合运动与 S 轴驱动的轴向相对运动实现。电极蠕动的原理如图 3 所示，加工前常闭夹子、电极在初始位置（图 a），接着 S 轴驱动常闭夹子、电极完成一个孔的进给加工（图 b），然后 S 轴驱动常闭夹子带动电极回退（图 c）；此时由于电极损耗，常闭夹子与常开夹子距离较初始距离变短，于是闭合常开夹子、松开常闭夹子（图 d），S 轴驱动常闭夹子达到初始位置（图 e），最后闭合常闭夹子、打开常开夹子，则回到初始状态（图 a）。电极的旋转运动通过旋转轴 R 带动常闭夹子夹紧电极转动实现，并利用导向器限制电极底端旋转径跳。

导向器的配合精度和配合长度对于保证电极旋转精度起决定性作用。而且，电极旋转精度还受到常闭夹子旋转时的径跳误差、常闭夹子与导向器的同轴度误差的影响。通过显微镜观测的装配方法，达到较高的装配精度，以减小常闭夹子本身旋转误差，以及其与导向器同轴度误差的影响。

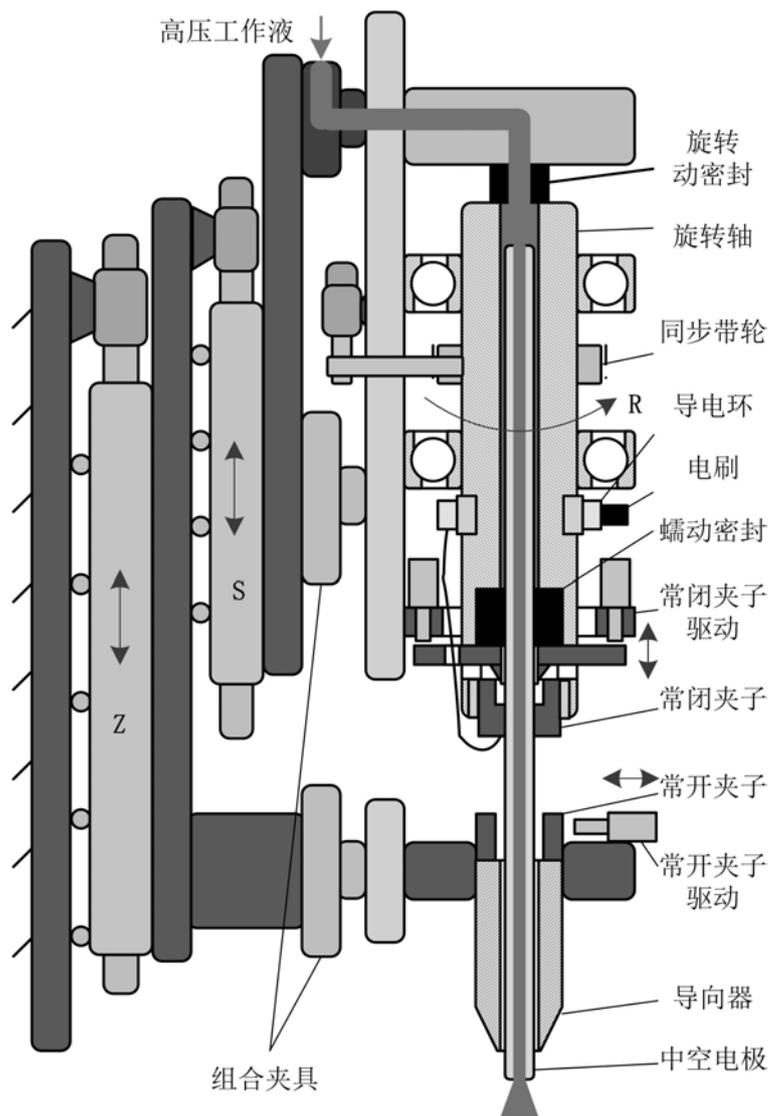


图2 复合功能主轴机构设计方案原理图

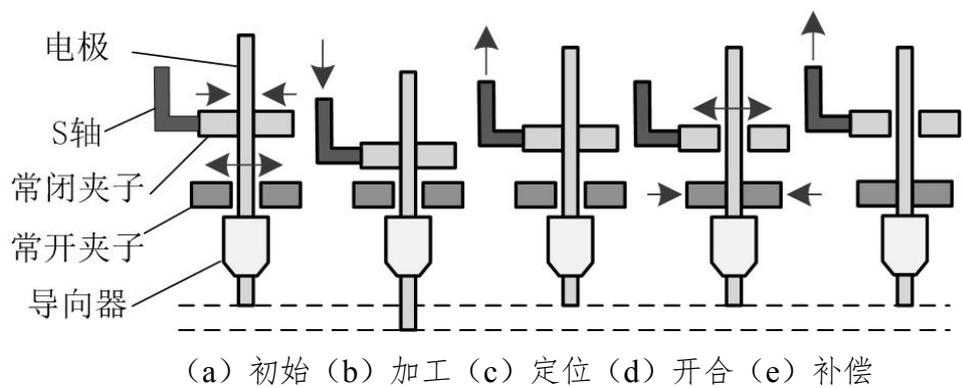


图3 蠕动进给原理示意图

高压工作液密封结构和电极供电结构在满足密封、供电的基本要求前提下，还应与电极旋转和进给运动相适应，避免运动干涉问题。密封机构要解决电极旋转中的动密封和蠕动进给中动密封两方面问题。如图 2 所示，设计为利用旋转动密封结构件将工作液引入旋转轴内，然后在工作液中利用蠕动密封结构件实现加工时密封压紧电极、电极蠕动进给时密封松开电极。

对于旋转电极供电，常规方式为利用电刷直接接触摩擦常闭夹子或旋转轴方案。电刷直接顶在常闭夹子上，不仅会造成常闭夹子磨损，而且易产生常闭夹子和电极变形。电刷直接顶在旋转轴上，常规通过内部构件传导电流方式，电阻较大而影响高频脉冲电的传输效率。因此，本研究采用电刷顶在旋转轴 R 上的导电环，导电环通过两个半圆式绝缘套筒与旋转轴 R 固定连接，再利用导线将导电环和与旋转轴绝缘的常闭夹子可靠连接。

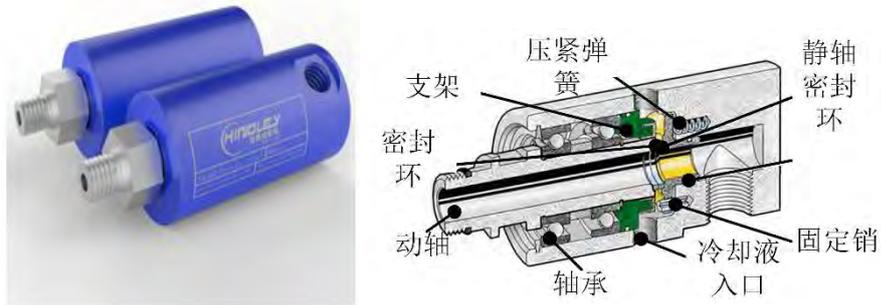
5.1.2 功能复合型主轴优化设计

为更好地实现旋转主轴机构功能，进一步对主轴的主轴高压工作液密封结构、不同直径管状电极夹持、高频脉冲电源可靠引入进行了优化设计。

(1) 主轴旋转动密封结构优化设计

主轴旋转动密封结构主要为旋转主轴持续提供高压工作液，实现高压工作液从高压泵到管状电极的密封连接。通过对使用较为广泛的旋转接头进一步设计与优化，得到主轴所需具体机构。采用单通道旋转接头如图 4 所示。旋转接头是一种可以 360° 旋转的零部件，同时具有良好的密封性能。

单通道旋转接头主要有静轴、动轴、轴承、卡簧、弹簧、密封件组成，旋转接头通过内部两个精密轴承支撑，运转平稳持久可靠、坚固灵活，磨擦系数小，可以实现高速运转。旋转接头采用硬接触材料轴向密封的方式，在高精度旋转轴承的支撑下，通过冷却通道和静轴支架，在压紧弹簧作用下实现静轴密封环和动轴密封环的良好接触达到密封效果，密封环材料采用机械强度高、耐酸碱腐蚀、耐磨的聚醚醚酮材料精密加工而成。冷却通道的作用是对高速相对滑动的密封环降温，在低转速的情况下可以不使用冷却通道降温，可通过金属的热传导自然冷却降温。



(a) 旋转接头

(b) 旋转接头结构

图 4 单通道旋转接头实物及结构

(2) 不同直径管状电极夹持的常闭夹子

常闭夹子模块是实现电极自动补偿的关键模块。其主要实现不同直径电极夹持与松开，并且夹紧过程中要为电极提供稳定的加工能量。其结构设计合理性直接影响主轴的整体性能，因此需要对常闭夹子夹持能力与机械性能做必要的分析。其整体结构如图 5 所示，其中：1 为气缸固定座、2 为针阀体气缸、3 为推盘、4 为自润滑轴承、5 为八瓣弹性夹子压紧螺母、6 为支撑柱、7 为八瓣弹性夹子、8 为导线锁紧螺母、9 为电极导向柱、10 支撑柱锁紧螺母、11 弹性夹子复位弹簧、12 旋转主轴。

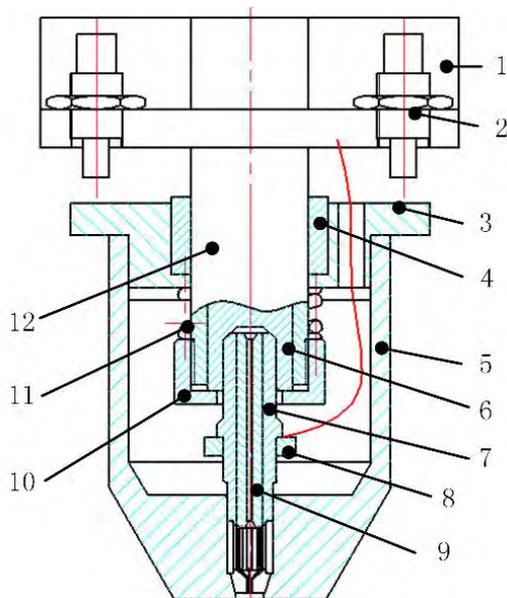


图 5 常闭夹子结构图

在更换电极过程中，通过针阀体气缸推动推盘下移，在弹性恢复力的作用下实现八瓣弹性夹子的打开。在需要电极夹紧时，通过释放针阀体气缸压力，在弹性夹子复位弹簧作用下依靠锥面挤压作用促使八瓣弹性夹子变形，达到实现电极夹持的目的。

常闭夹子为实现不同直径电极稳定夹持和高精度旋转的关键部件，要求其具有较好的强度和抵抗弹性变形的能力。为保证其夹持性能，对其受力分析如图 6 所示，分析表明常闭夹子始终稳定夹持电极，弹簧安装后要有预变形量。得到了弹性夹子理论上最大夹持范围与常闭夹子驱动力与复位弹簧的推力，研究了常闭夹子与常开夹子不同通气压力下的电极加持能力，得到弹性夹子最优加持范围。

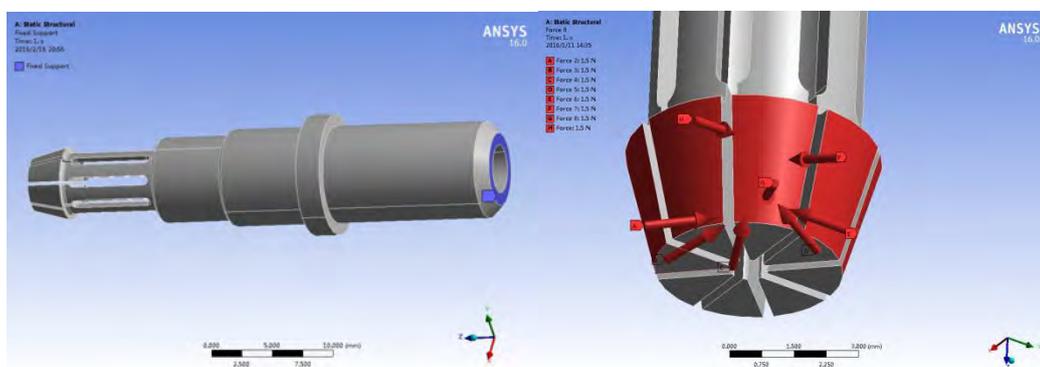


图 6 弹性夹子夹子受力图

(3) 高频脉冲电源可靠引入

加工电源与电极可靠连接是主轴实现稳定加工的关键。主轴的电源引入要求回路接触电阻、寄生电容尽量小的要求，主轴采用导电滑环实现加工电源的动态引入。根选取合适的工业级导电滑环，根据电气参数定制合适的导电组件。电火花加工电源设计参数中最高电压 300V，最大电流 15A，根据此电源参数和主轴结构参数设计导电滑环性能如表 1 所示。

导电滑环结构主要有动环、静环、轴承、接触环和弹簧触针组成如图 7 所示。在轴承导向作用下，可以保证弹簧触针和接触环的稳定接触，降低转动过程中的动态接触电阻和寄生电容。在动环转动过程中弹簧触针在弹力作用下始终压紧接触环，实现了电源到转动轴的引入。

表 1 定性参数表

参数	数值
最大接触电流	30 A
弹簧触针材料	银镍合金
接触环材料	铜环镀银
镀层厚度	30 μ m
额定转速	500 r/min

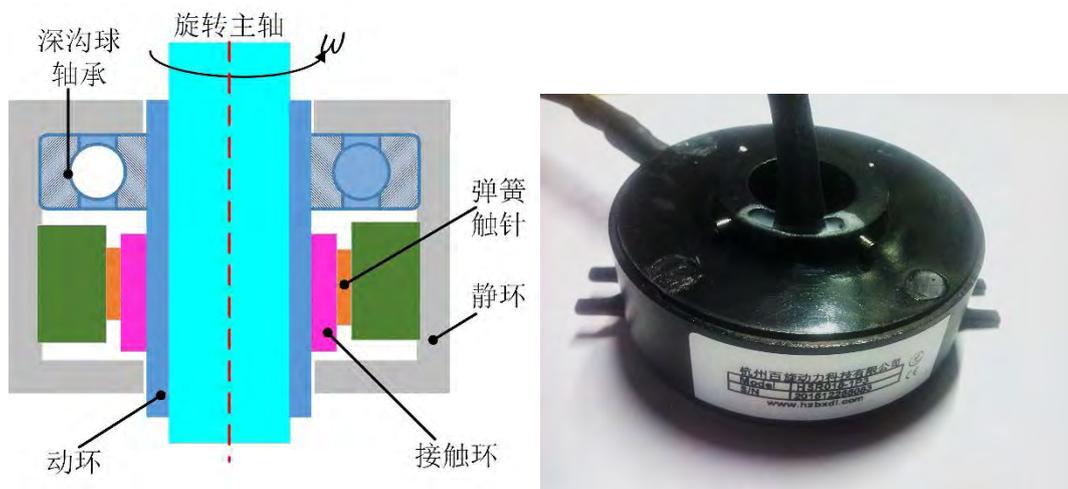
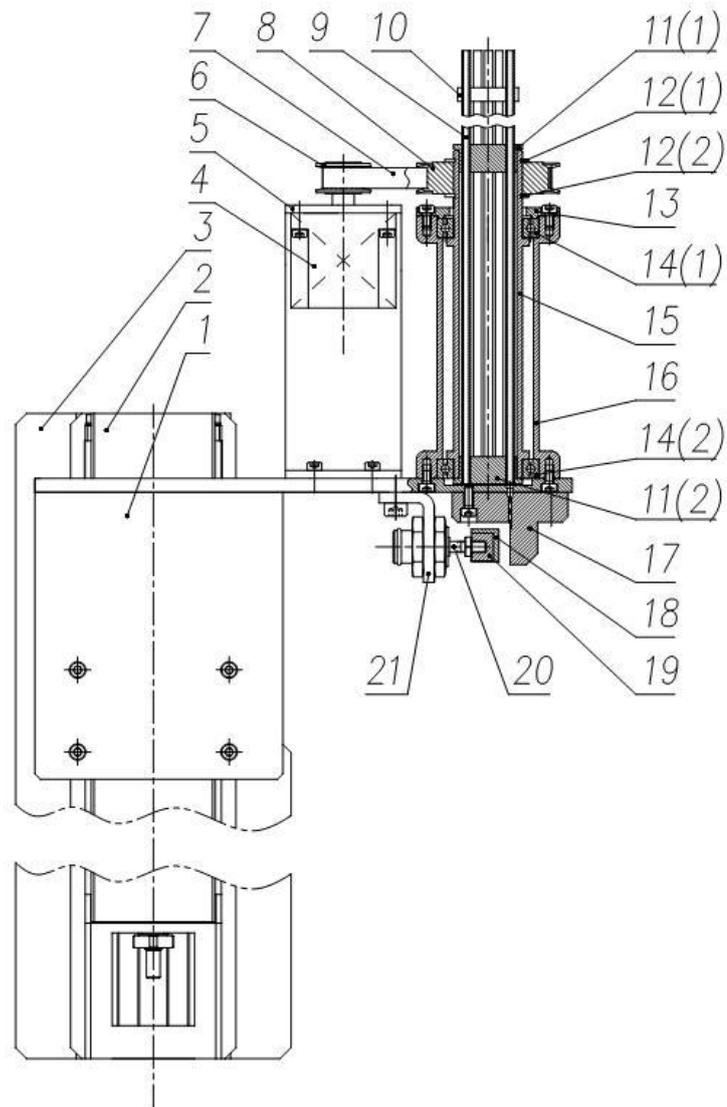


图 7 导电滑环原理及实物示意图

5.1.3 自动换电极机构

在多孔电火花穿孔加工过程中，放电蚀除工件材料的同时，电极也在不断损耗变短。为实现大量群孔连续加工，需要在电极不能满足加工条件的情况下及时更换新电极。如何实现电极的高效自动化更换是大量群孔加工的关键。此外，为满足不同直径穿孔加工的需求，需要电火花穿孔加工装备具有更换不同直径电极的功能。

为实现电极的在线自动更换，研究出一种自动化换电极机构如图 8 所示，主要包括电极储存模块、出丝夹持模块以及运动传递模块，结构简单且布局紧凑，减少了更换电极的时间，提高了整机的利用效率。该机构通过控制伺服电机恒角度旋转，带动储丝筒内圆周均布的电极导管周向恒角度移动，实现电极的自动化更换。出丝夹持模块与储丝模块完全分离，便于电极导管与出丝导向块的随意更换，实现整机装备对加工所需电极规格的选择。



图中： 1-丝筒连接板；2-模组；3-模组安装底座；4-伺服电机；5-电机安装座；6-小同步轮；7-同步带；8-大同步轮；9-电极导管；10-隔片；11-圆套；12-轴用挡圈；13-轴承端盖；14-滚动轴承；15-丝筒转轴；16-轴承安装座；17-出丝导向块；18-金属套；19-缓冲套；20-气缸；21-气缸支架

图 8 自动换电极机构示意图

如图 9 所示，换电极机构通过独立的运动模块固定于整机装备龙门立柱上，其运动模块与工作台运动模块互不干涉，实现与整机装备主轴机构的完全分离；整个机构根据电极走向呈纵向分布，减小了水平方向的布局空间，使整个机构更为紧凑。丝筒连接板与运动模块的滑块相固定，电极储存模块和出丝夹持模块分别布置于丝筒连接板的上侧和下侧，实现了换电极机构储丝和出丝结构的分离，并利用丝筒连接板上开设的倒锥圆孔实现电极在两个模块

之间的穿丝导向。储丝筒以丝筒转轴的形式置于轴承安装座内，利用两端轴承实现储丝筒在轴承安装座内的周向旋转，通过储丝筒两端的圆套对插入储丝筒内的电极导管进行固定，储丝筒外的电极导管伸出端用隔片进行集束固定；根据电极导管数量、规格需求可在圆套和隔片的圆周方向上开设均布圆孔，用来贯穿和固定电极导管；电极导管选用现有的各种直径长度尺寸可满足要求的管材。

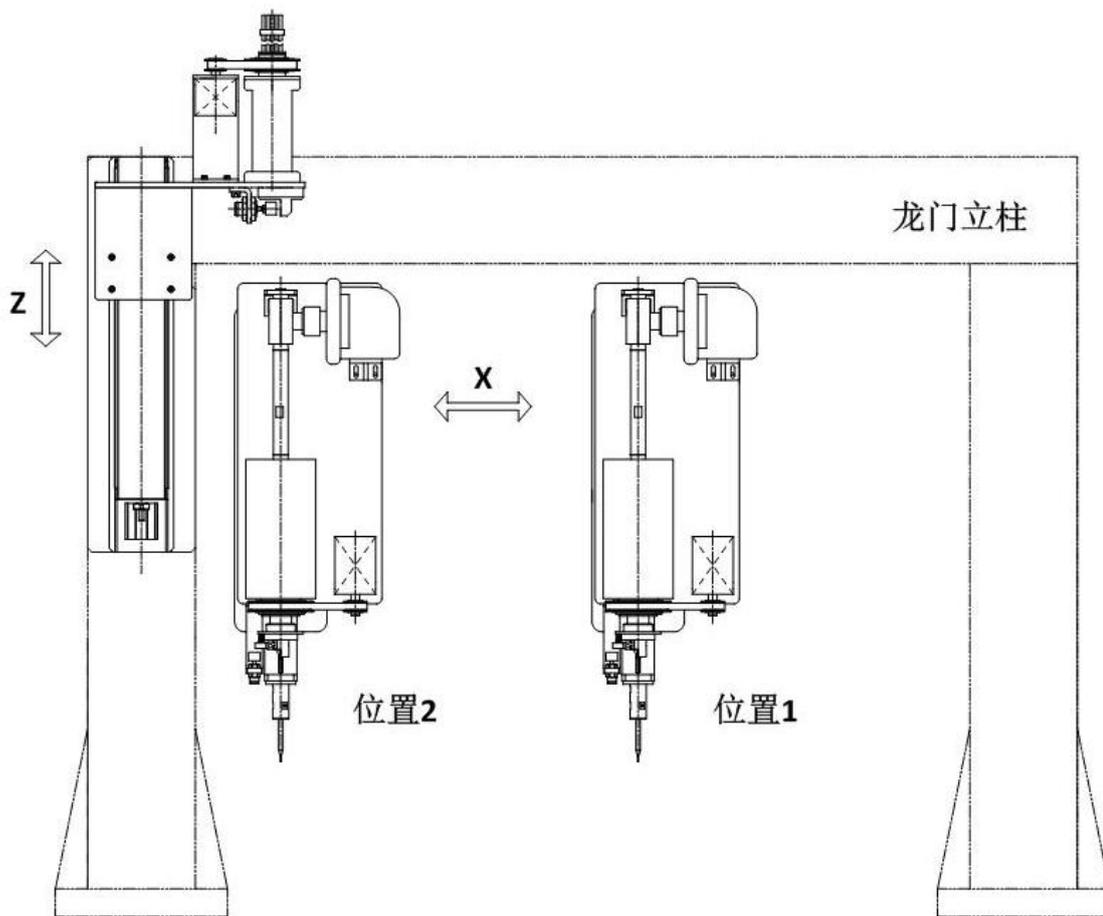


图9 换电极过程中主轴机构移动位置示意图

自动换电极过程为：加工装备旋转主轴根据 X 方向的标定位置水平移动至确定位置，换丝机构伺服电机通过同步带轮传动使储丝筒旋转一定角度(即储丝筒内相邻电极导管之间的分布角度)，储丝筒内电极导管对准出丝口后，管中电极丝进入主轴空腔内至蠕动密封塞上端；控制系统输出指令使主轴常闭夹子打开，同时换丝机构出丝夹持模块的气缸动作夹紧电极，然后换丝机构整体沿 Z 方向向下进给至标定位置，完成送丝；控制系统输出指令使

主轴常闭夹子关闭，同时换丝机构出丝夹持模块的气缸动作松开电极，然后换丝机构整体沿 Z 方向向上进给至初始位置，结束送丝。

2.2 高能量密度脉冲电源

设计原理框图如图 10 所示，主要由上位机、主振系统、功率放大系统、放电状态检测系统构成。上位机根据加工需要，通过串口 232 给主振系统的单片机发送加工电参数（脉宽、脉间、电流、电压）；主振系统的 FPGA 将其转换成相应的脉冲信号和 I/O 信号输出。功率放大系统根据主振信号的脉冲信号控制功率管的开启和关断，为了保证功率管的稳定运行，进行了功率管的保护回路设计。放电状态检测系统实时检测加工间隙的电压信号和电流信号传输给 PMAC 运动控制卡，作为 Z 轴进行伺服进给的依据。选择超快 IGBT 作为功率元器件可以得到最小 150ns 脉冲。

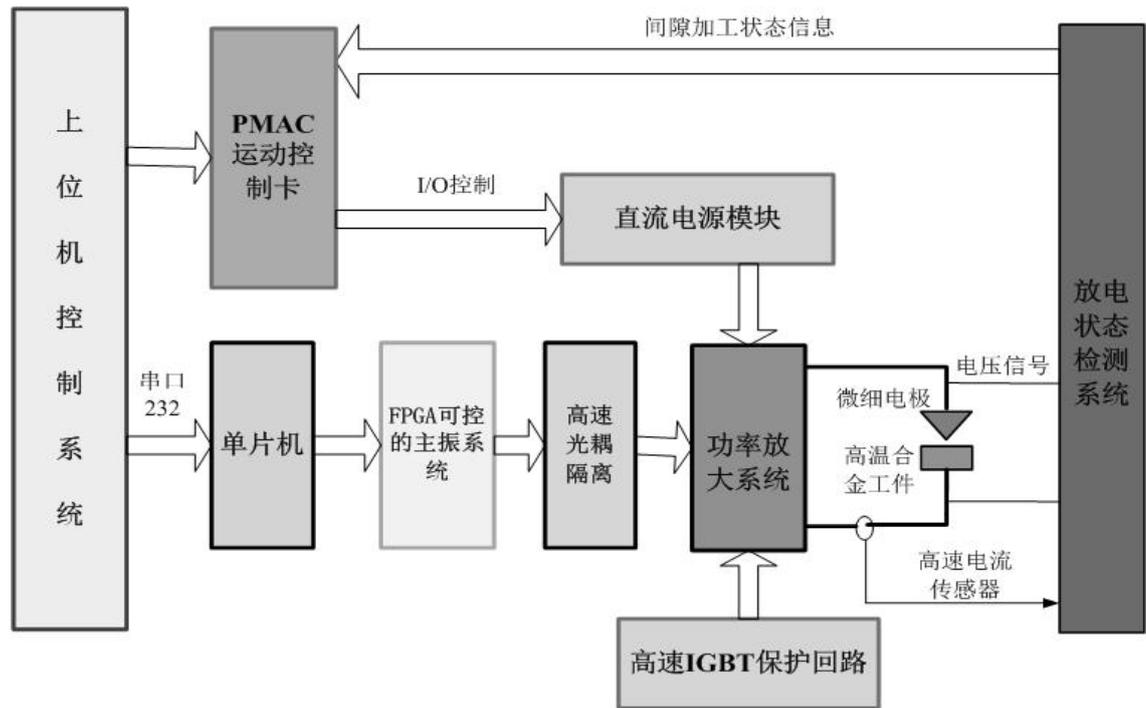


图 10 脉冲电源的设计原理框图

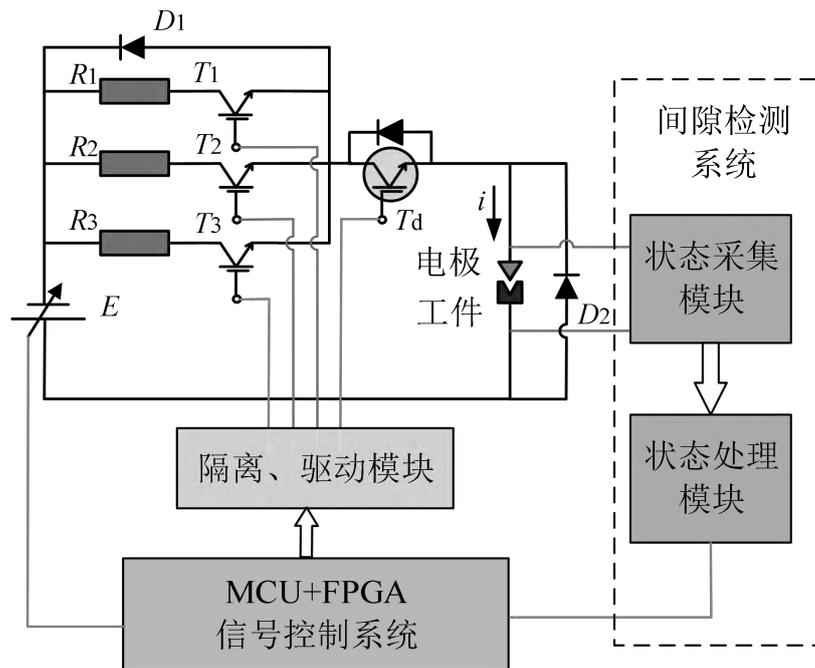


图 11 脉冲电源拓扑结构示意图

脉冲电源的拓扑结构如图 11 所示，通过调节电阻的阻值控制峰值电流。根据不同厚度的气膜冷却孔加工需求，进行不同开路电压的直流电源模块设计。直流电源的输入电压采用工业的三相电 380V，通过变压器的次级线圈不同匝数调节成不同直流电所需的低压三相电，低压三相电通过三相整流桥、大容量的电解电容整流滤波成 60V、90V、120V、150V、200V 直流电。上位机通过继电器驱动系统可以在线进行不同的直流电压的切换，为了防止出现多个电源同时被打开的情况，驱动信号通过译码器处理，保证每次只选择一个电压值，提高脉冲电源的安全性。

5.1.4 信号控制模块的设计

信号控制模块作为主振系统，是利用单片机和现场可编程门阵列（FPGA）作为上下位机的信息转换接口和脉冲发生器。如图 12 所示，通过 232 串口进行上下位机通讯，单片机将接收到的 I/O 控制命令和脉冲参数译码后保存到指定的寄存器中。等上位机传输的信号全部接收完，发送给 FPGA，通过计数器和寄存器的读取，输出要求的脉冲和 I/O 高低电平。信号控制模块的实物图如图 13 所示。

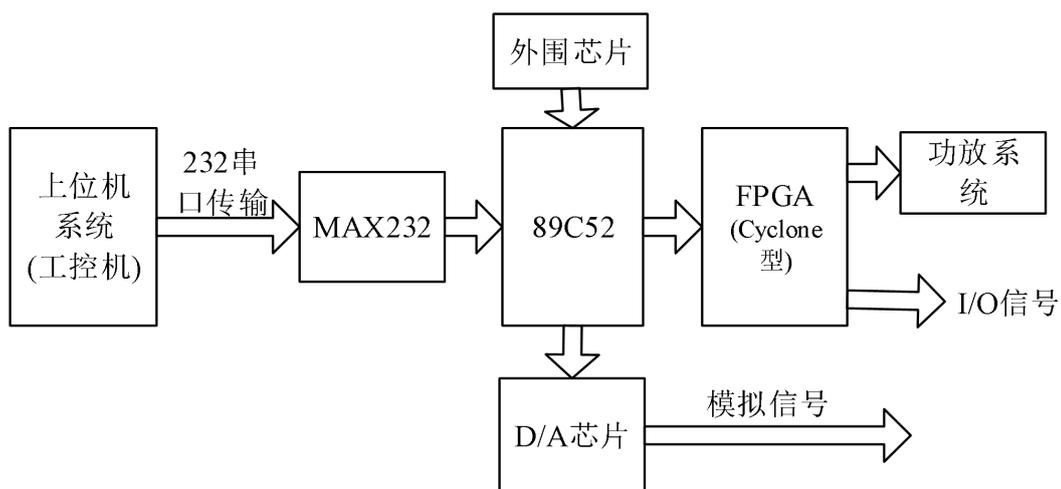


图 12 信号控制模块的结构示意图



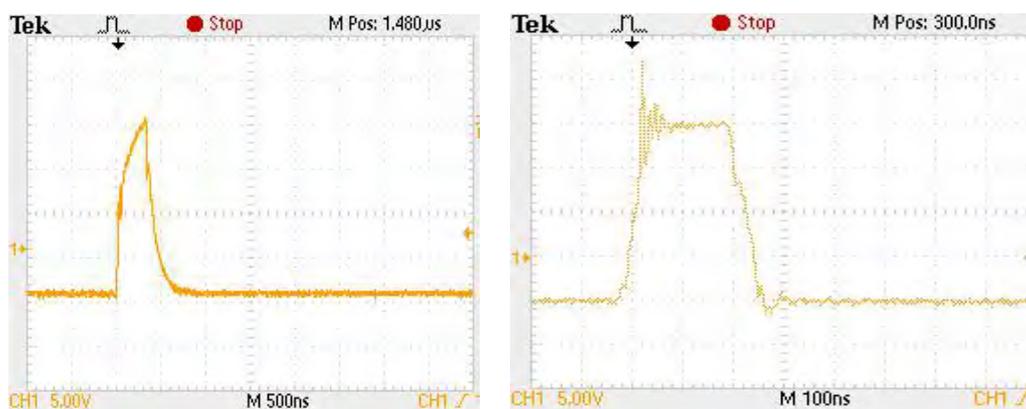
图 13 信号控制模块的实物

5.1.5 功率放大模块的设计

结合图 11 分析功率放大回路，将电流选择器件 T1、T2、T3 内置于功率板中，与主控器件 Td 形成串联，有利于减少脉冲传输过程的寄生电感和电容，易于实现窄脉宽放电。开路电压通过直流可调电源 E 进行在线调节，满足不同厚度和不同孔径气膜冷却孔的加工。为了将放电过程中的多余能量回收，进行能量反馈设计。通过快速响应的二极管 Dd 和 D1，将间隙多余的能量反馈回直流可调电源 E。由于上下两组 IGBT 是串联，所以两组的驱动信号应该隔离处理，可以采用光耦隔离驱动和脉冲变压器隔离驱动，本设计采用高速光耦进行隔离驱动处理。信号控制模块的驱动信号经过光耦隔离后的驱动能力有限，其电流、电压都

无法满足功率管的驱动需要，进行驱动放大回路的设计。

结合的 IGBT 的导通瞬态模型和 FGA40N60UFD 芯片的导通电压特征曲线，脉冲电源的功率管 IGBT 栅极驱动电路的驱动器输出级采用推挽输出方式。驱动放大回路的驱动波形如图 14 所示，根据功率管的开关特性和响应时间，IGBT 的导通电压设计为 15V，关断电压为 -5V。图 14 (a) 是 500ns 的信号放大驱动波形，图 14 (b) 是得到最小功率放大驱动信号的 200ns 驱动信号，虽然上升沿有些抖动，但驱动稳定电压也达到了 15V，可以导通功率管。功率板的实物图如 15 所示。



(a) 500ns 的信号放大驱动波形

(b) 200ns 的信号放大驱动波形

图 14 驱动放大回路驱动波形



图 15 功率板的实物

5.1.6 放电状态检测模块的设计

电火花加工与传统的金属切削加工不同，属于“非接触加工”。加工过程采用伺服进给方式，间隙太大，数控系统让电机快速进给；间隙太小，让电机不进给或回退。一般通过检测两极之间的电压和电流信号来判断间隙是否合适。间隙大，间隙的电压高，电流为零，处于空载状态；间隙过小，间隙的电压很低，电流很大，处于短路状态；间隙适中，间隙的电压维持在一定范围内，间隙电流有效蚀除工件材料，处于火花放电状态。通过放电状态检测系统，将3种放电状态或间隙的电压值传送给数控系统或其它控制系统，经系统采集、分析和处理，控制电机进给。放电状态检测是电火花加工实现稳定、高效加工的关键，是伺服进给控制和电源自适应加工的保障。

如图16所示，该放电状态检测系统采用平均电压法，然后压频转换，利用频率来表征放电状态，提高检测的灵敏度和抗干扰能力。同时还通过霍尔元件采集间隙的电流，然后模数转换传输给PMAC卡，通过同时检测电压、电流信号来提供检测的准确度。放电状态检测板的实物图如图17所示。

间隙放电状态是电火花伺服加工的依据。间隙放电状态检测模块分为状态采集和状态处理两部分。图18表示状态采集模块的电路图。间隙电压采样模块主要是将放电间隙的电压波形采集出来，便于后面模块进行正确的辨别和处理。

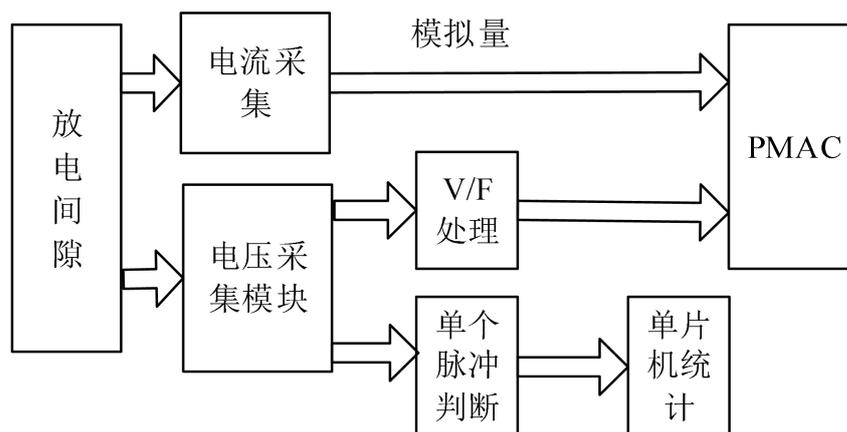


图 16 放电状态检测系统的结构示意图



图 17 放电状态检测板实物图

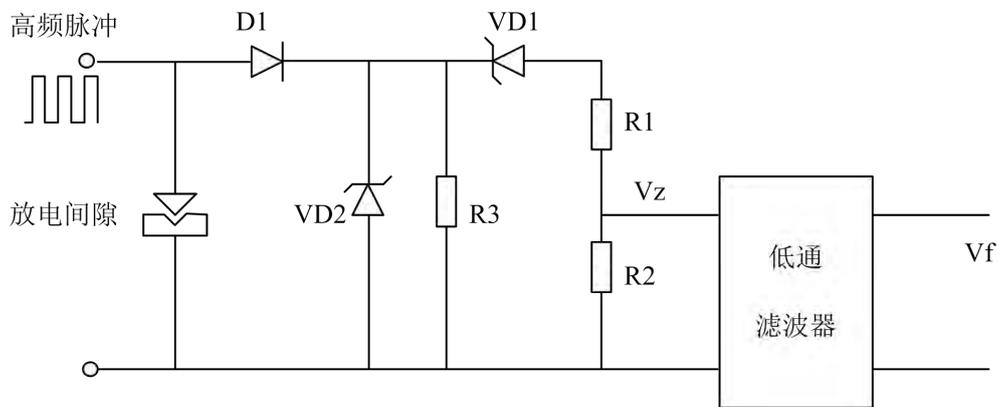


图 18 间隙电压状态采集电路

2.3 表面重熔层减薄

通过改变加工电流实现大电流高速粗加工和小电流精加工去除重熔层的技术，研究在精加工过程中不同开路电压和极性对重熔层减薄效果。基孔粗加工的加工电压为 90V，电流为 4 档加工电流；精加工采用 60V、120V、150V，3 档加工电流。脉宽为 24 μ s，脉间为 32 μ s，正极性加工。工件是 6mm 的 Inconel 738 材料，电极材料是直径 0.5mm 中空黄铜电极。采用内外冲液冷却方式，工作液为去离子水，内冲液压力为 3.6MPa；外冲采用实验室提出的组合冲液方式。每个相同的参数加工 3 个孔，采用网格划分多点测量取平均值。

图 19 是精加工过程中不同开路电压对重熔层的影响关系，表 2 是加工得到的重熔层的厚度。可以看出，粗精复合加工后，重熔层的厚度都不同程度的减薄。150V 的开路电压减少幅度最大，达 23.3%。小优化实验表明，加工电流对重熔层影响较大，因此在精加工中，

减小加工电流，可以得到较薄的重熔层。

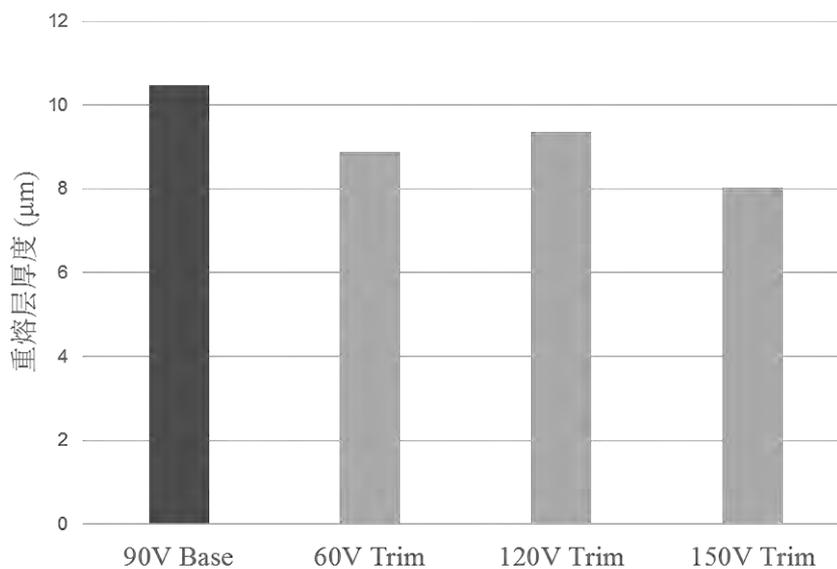


图 19 不同开路电压对重熔层厚度的影响

表 2 不同开路电压加工的重熔层厚度

加工过程	重熔层厚度/ μm
90V 基孔	10.472
60V 精加工	8.887
120V 精加工	9.359
150V 精加工	8.035

图 20 是精加工过程改变极性后不同开路电压对重熔层的影响关系，表 3 是改变极性后得到的重熔层的厚度。明显可以看出该实验将重熔层厚度大幅度的减小。而且随着开路电压的增大，重熔层的厚度随之减小。150V 精加工的开路电压，最小的重熔层的平均厚度约 2.42 μm ，减小的幅度达 76.9%。

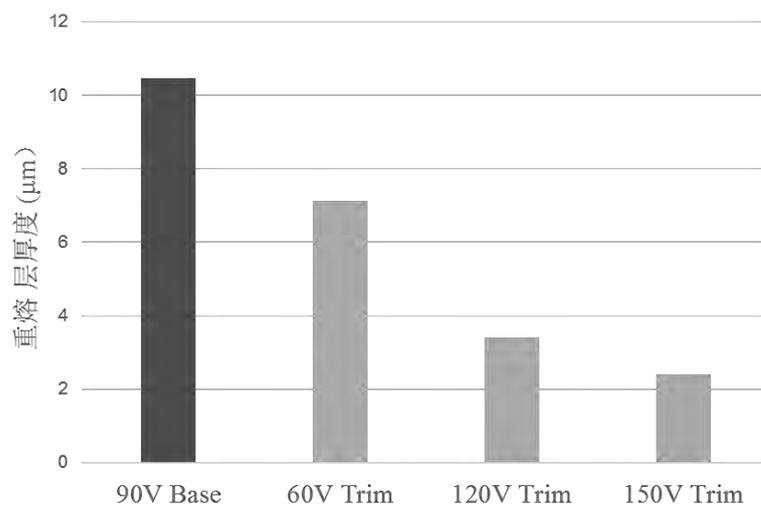
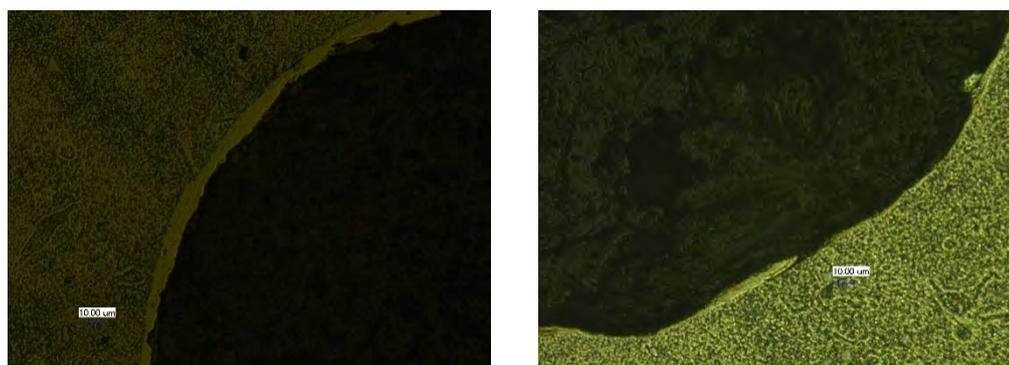


图 20 加工极性对重熔层厚度的影响

表 3 改变极性后的重熔层厚度

加工过程	重熔层厚度/ μm
90V 基孔	10.472
60V 精加工	7.117
120V 精加工	3.4
150V 精加工	2.416

图 21 为基孔重熔层与改变极性后的对比图，从图中可以看出改变极性后的精加工，重熔层厚度减小的非常明显。



(a) 基孔的重熔层

(b) 改变极性后的重熔层

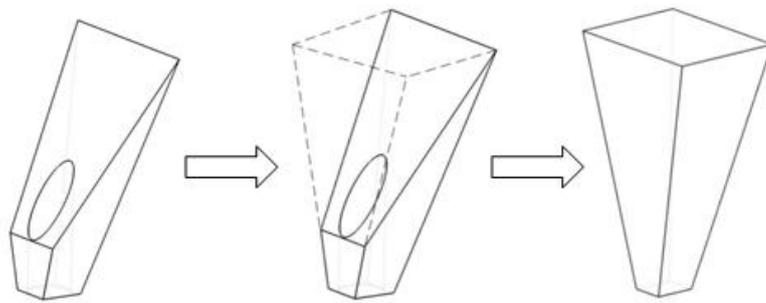
图 21 基孔重熔层与改变极性后的对比

2.4 扩散出口高效加工

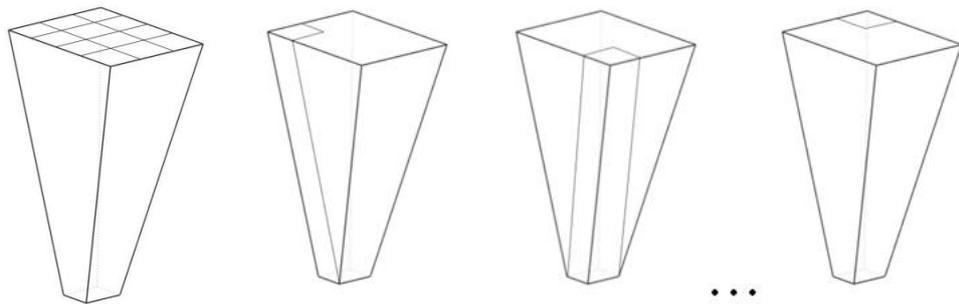
气膜冷却孔的几何结构对冷却效率有明显影响,扩散型气膜冷却孔相对于圆柱孔有更高的冷却效率。每个扩散型气膜冷却孔由圆柱形入口和扩散形出口组成。气体从圆柱形入口进入气膜冷却孔,然后在扩散形出口处不断扩散,最后喷射到被冷却表面。扩散形出口可以减缓气体喷射而出的速度,从而使气体更好的覆盖在被冷却表面,提高气膜冷却的效率。然而,扩散型气膜冷却孔形状复杂,并且叶片材料采用高强度、高硬度的材料,传统的机械加工方式不能满足扩散型气膜冷却孔的加工要求。

本研究提出一种加工效率高、成本低的扩散型气膜冷却孔的电火花分块加工方法。如图 22 (a) 所示,根据待加工气膜冷却孔的扩散形出口的形状尺寸,将待加工区域分为若干个子区域。即其形状扩展为一个倒四棱台,倒四棱台的底面正方形,倒四棱台的顶面长方形;假设倒四棱台的顶面用 n 个边长为 L_1 的正方形覆盖,将 n 个正方形分别与倒四棱台的底面进行放样,即形成 n 个子区域。如图 22 (b) 所示,利用细长型电极进行电火花加工,电极一次进给加工一个子区域,若干次进给加工出完整的待加工气膜冷却孔的扩散形出口。细长型电极的加工长度大于倒四棱台的高度;细长型电极沿着每个子区域所限定的路径进给,细长型电极的横截面为边长为 L_2 的正方形, L_2 小于 L_1 ;细长型电极的每次加工的起始位为倒四棱台的顶面的其中一个正方形,每次加工的止位为倒四棱台的底面。在根据待加工气膜冷却孔的扩散形出口的形状尺寸,将待加工区域分为若干个子区域的步骤之前,利用中空管状电极加工出待加工气膜冷却孔的圆柱形入口。

利用电火花线切割工艺沿水平方向切割掉细长型电极端部的损耗部分。扩散型气膜冷却孔的电火花分块加工方法,采用分块式加工工艺,将待加工的区域分为若干区域以分别加工,因此可采用普通细长杆型电极加工出气膜冷却孔的扩散形出口,且加工完毕后电极修复简单,使得气膜冷却孔的加工效率有效提高,加工成本大大减少。



(a) 气膜孔扩散型出口分块原理



(b) 气膜孔扩散型出口加工时放样过程

图 22 气膜孔扩散型出口电火花分块加工过程示意图

利用气膜孔扩散型出口电火花分块加工方法，进行了仿真与加工实验验证。工件形状的仿真结果与实验对比如图 23 所示。结果显示实现了扩散型出口加工，气膜冷却孔的设计形状与实验结果具有一致性。

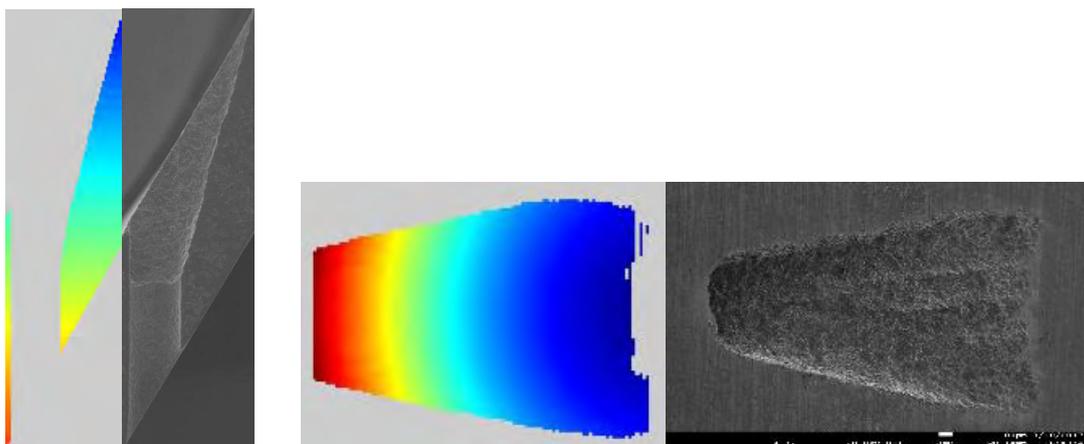


图 23 工件形状的仿真结果与实验对比

2.5 加工贯穿检测及控制

由于叶片的壁厚不同和气膜孔倾斜角度不同，气膜孔加工深度有所不同。若以相同的电极进给距离来控制气膜孔加工深度，将会造成气膜孔加工后电极贯穿长度的不同。不同的贯穿长度将会影响气膜孔加工精度一致性，贯穿过长甚至有可能加工到空心叶片对面壁，造成加工损伤甚至废品。因此，气膜孔加工贯穿长度的精确控制是影响加工精度和成品率的关键因素之一。

本研究通过实时监测加工过程中的放电状态和主轴运动速度的突变，来实现气膜孔加工贯穿瞬间的检测和贯穿长度的精确控制。这是基于盲孔加工阶段与贯穿加工阶段放电间隙内颗粒浓度存在明显不同，因此两个加工阶段中放电电压、加工速度也存在明显不同。通过提取孔加工时放电状态、加工速度的特征信号并在线反馈给控制系统，可以实现通孔的贯穿开始瞬间和完成瞬间检测。

采集频率约为 100Hz 时，检测放电电压、电极轴向位移信号如图 24 所示。结果显示，平均放电电压在贯穿加工阶段由于短路现象增多而降低，加工速度与盲孔加工阶段相比下降。贯穿完成后平均放电电压迅速升高，伺服速度增大。通过对平均放电电压进行窗口化处理、位移信号处理进行线性拟合可以实现贯穿加工判断。

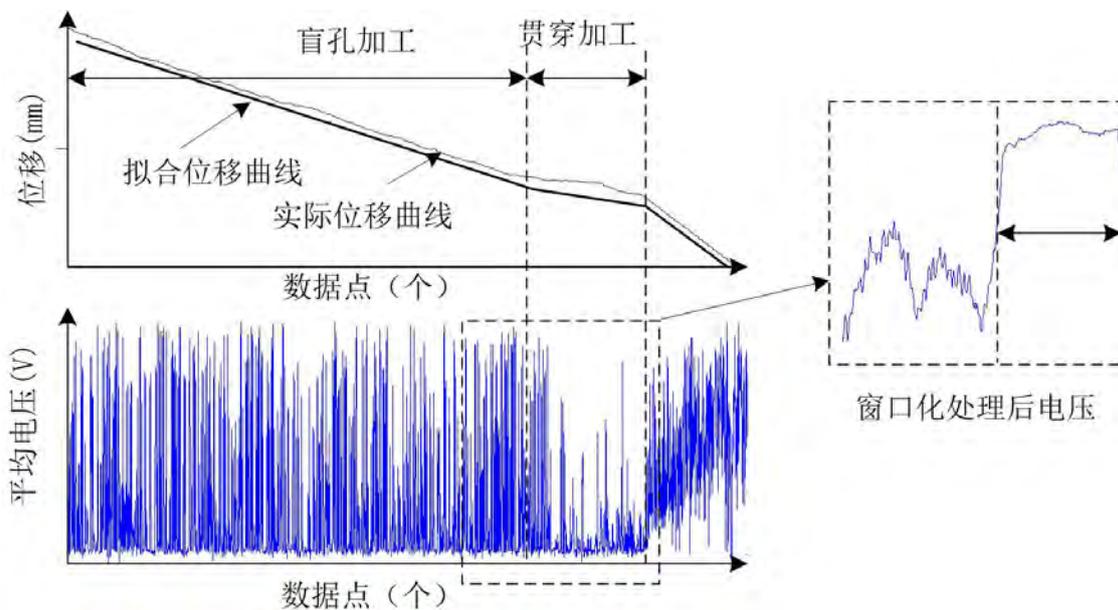


图 24 用于贯穿检测的加工速度和放电状态监测信号

由于平均电压信号更能直接反应放电状态，因此利用处理电压信号作为贯穿开始的判断依据。而位移信号则是更准确的表征了开始贯穿后进给的电极位置，用于对贯穿完成的判断。通过基于贯穿平均电压和位移的组合信号特征实现贯穿检测。检测过程为：当窗口化平均电压信号大于设定阈值时，认为贯穿开始，线性化处理的位移信号超过盲孔加工伺服速度时认为贯穿结束。为了避免加工伺服速度由于加工条件波动影响贯穿结束判断，通过设定贯穿加工最大进给位移来结束伺服加工。保证了孔进出口精度并且可避免触及相邻筋板或叶片对壁。

2.6 组合冲液优化

如图 25 所示，深孔电火花加工过程由于电极存在径向损耗，可分为三个阶段：盲孔加工、贯穿加工、过贯穿加工。在高压工作液作用下，盲孔加工中电极和工件间放电产物可以迅速排出，加工效率较高。而贯穿加工由于内冲液无法进入放电间隙，高速加工需要的工作液快速更新状态改变，所以加工效率很低。而深孔加工一般采用较大的脉冲能量，尖端放电造成电极径向损耗较大，电极径向损耗沿轴向分布的长度也变大，所以贯穿加工阶段需要伺服进给距离较长。很低的加工效率和较长的伺服进给距离造成贯穿加工阶段时间很长。

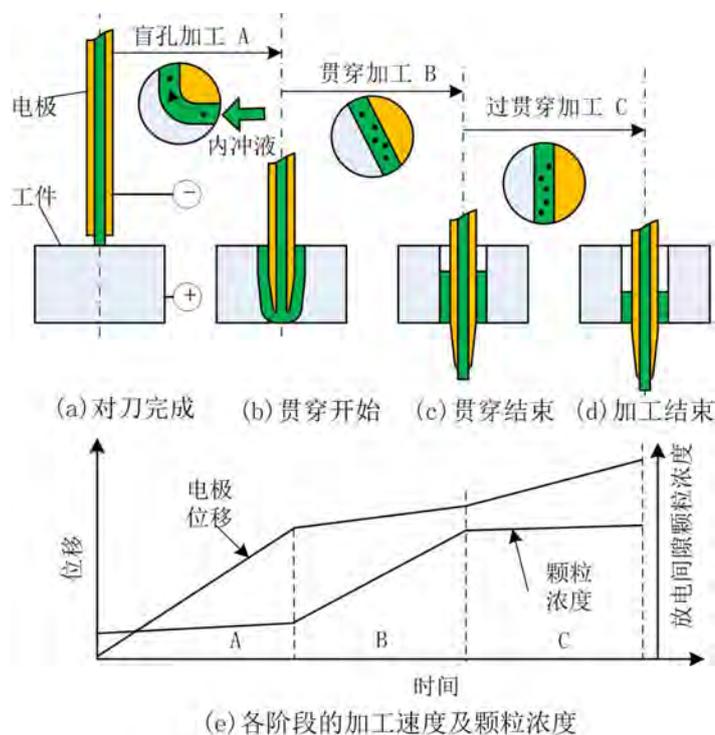


图 25 气膜孔加工过程示意图

贯穿加工阶段加工效率低和过贯穿加工阶段的存在严重影响了整体加工效率。并且如果加工产物无法排出，放电间隙将会出现较多电弧、短路状态，造成工件表面质量降低。因此需要进一步提高贯穿阶段和过贯穿阶段的加工速度，并减小过贯穿加工的长度。

加工速度的提高关键在于放电间隙内加工产物的排出，即工作液更新。由于贯穿加工阶段电极旋转运动及轴向运动速度较低，且液体本身具有表面张力及受到侧壁的摩擦阻力，因此工作液很难在重力作用下自由下落。所以贯穿加工阶段工作液流动更新需要新的外界条件加入。将贯穿后的侧壁间隙视作流通管道，物理模型如图 26 所示。

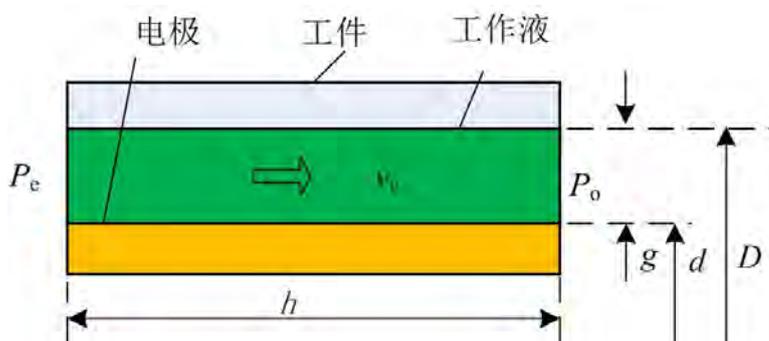


图 26 贯穿加工侧壁间隙的流场模型

图中符号的含义为： d —电极外径； D —孔径； g —侧壁放电间隙； h —孔深； P_e —入口压力； P_o —出口压力； v_e —侧壁间隙工作液流速

实现加工产物排出需要侧壁间隙工作液具有一定速度 v_e 。根据流体运动伯努利方程、沿程损失方程及水力直径 d_2 的计算公式，得到工作液流动速度和外在条件的关系方程式 (1)。

$$v_e = \sqrt{\frac{2(P_e - P_o)(D - d)}{\rho \lambda h}} \quad (1)$$

式中 λ —沿程阻力系数

结果显示，为使工作液具有一定流速 v_e ，出入口之间需要具有压力差 $P_e - P_o$ ，且 v_e 随 $P_e - P_o$ 增大而增大。孔出口一般为开放形式，出口压力一般为大气压。因此实现放电间隙工作液更新需要孔入口具有一个较大的正压力或者负压力。考虑到放电产物流经已加工孔壁会形成二次放电，因此要求孔入口为正压力。但是加工时孔入口一般也为开放环境，压力为大

气压。尽管通过密封结构为孔入口注入高压工作液可以实现孔入口较高压力，但这种方法对机构和控制要求较高。

除了冲液压力外，外冲液效果还受到冲液方向、位置的影响。冲液方向需要考虑让孔入口压力较大，并避免直接冲击电极侧壁。考虑到电极受力平衡，外冲液的位置布局应结构对称。孔入口为圆环形，为了满足周向工作液均匀更新要求，外冲液需覆盖孔的环形入口。理想外冲液喷嘴模式为环形扁平形状，但考虑到制造和安装难度，可以采用圆形喷嘴多点均布式冲液。

根据以上分析，理想的冲液模式如图 27 所示，其过程为：盲孔加工利用压力适中的内冲液实现放电产物排出；贯穿开始时关闭内冲液，启动多点高速外冲液，完成侧壁放电间隙内的工作液更新。然而外冲液不仅需完成贯穿加工阶段侧壁放电间隙工作液更新，还需排出孔入口处的工作液加工产物。盲孔加工时，在内冲液压力作用下，加工产物从侧壁放电间隙内竖直向上排出。在导向器阻挡作用下，工作液方向改变向外流出。贯穿时，部分工作液会残留在导向器上，并在重力作用下重新进入孔入口，引起侧壁间隙二次放电。这不仅会破坏已加工的孔入口，还会和孔出口处放电产物一起影响加工速度和稳定性。在导向器由于形状原因无法避免工作液残留的情况下，需要外冲液实现盲孔加工产物的排出。

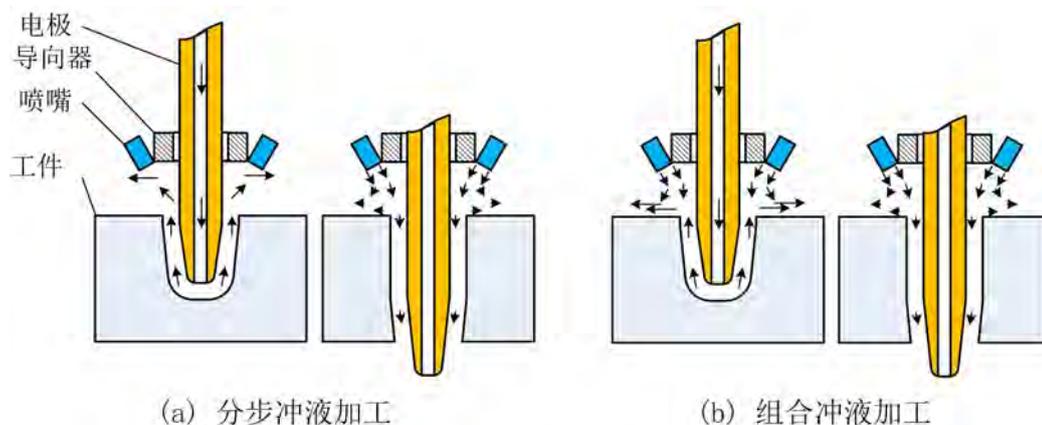


图 27 分步冲液和组合冲液工艺

为了排出盲孔加工产物及保持盲孔加工和贯穿加工的连续性，本研究提出在盲孔加工中采用高压内冲液和高速外冲液的组合冲液工艺。组合冲液加工工艺的流速矢量如图 27 (b) 所示。盲孔加工阶段利用组合冲液工艺排屑，放电间隙中的工作液更新主要是以高压内冲液

为主，外冲液以较快速度将内冲液排出的工作产物排出孔入口区域。贯穿加工阶段，放电间隙中工作液更新以高速外冲液为主，在外冲液较快速度的冲击下实现侧壁间隙内工作液快速流动，排出加工产物。

为验证组合冲液工艺对加工产物的排出效果，进行不同冲液条件下通孔电火花加工实验。实验表明，在内冲液压力较大时，无论是盲孔加工阶段还是贯穿加工阶段，组合冲液时加工速度均有提高。并且在高速外冲液对孔入口、孔出口加工产物的排出作用下，孔入口、出口的表面质量显著提高。由于贯穿加工时组合冲液可以减少二次放电，因此孔出口直径减小了 8~13 μm 。

2.7 装备系统联调与集成

气膜孔电加工专用装备系统集成如图 28 所示，整个系统采用 6 轴数控，基于工控机和 PMAC 卡的控制系统通过数控软件实现加工过程的控制。在软硬件模块的研制和优化改进的基础上，对硬件参数设置、各轴运动性能、软件模块进行联调，进一步优化相关参数。实现预定的功能和性能指标外，进一步完善布局、规范安装结构和电路接口模式，提高模块的可互换、可维护和可升级性。

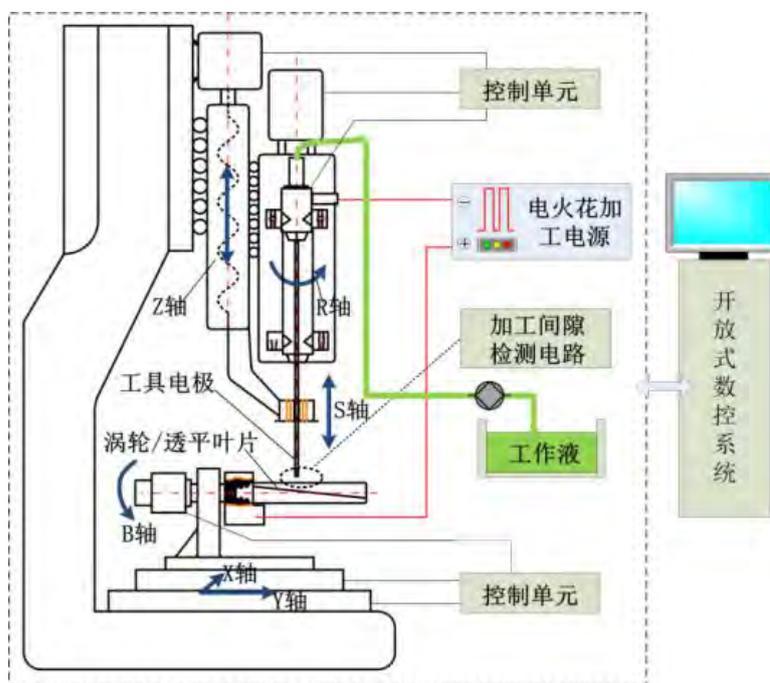


图 28 气膜孔复合加工专用装备系统构成

为了便于系统功能扩展，加工装备控制系统设计为基于 PMAC 运动控制卡的过程控制程序和与 PMAC 控制卡通讯的人机界面程序，总体结构如图 29 所示。控制软件包括功能级、模块级、控制级和执行级四个层次，由上到下逐层细化。功能级主要包括加工圆孔和扩散孔两个部分。模块级根据功能级要求分为帮助、回零操作、各轴运动、孔加工、扩散孔扫描、总体七个部分。控制级根据模块级要求对 PMAC 发出具体的操作指令，实现具体的运动或者控制。执行级由 PMAC 卡完成控制级指令，驱动硬件系统工作并进行状态反馈。这种控制系统结构层次清晰，有利于集成和功能拓展。

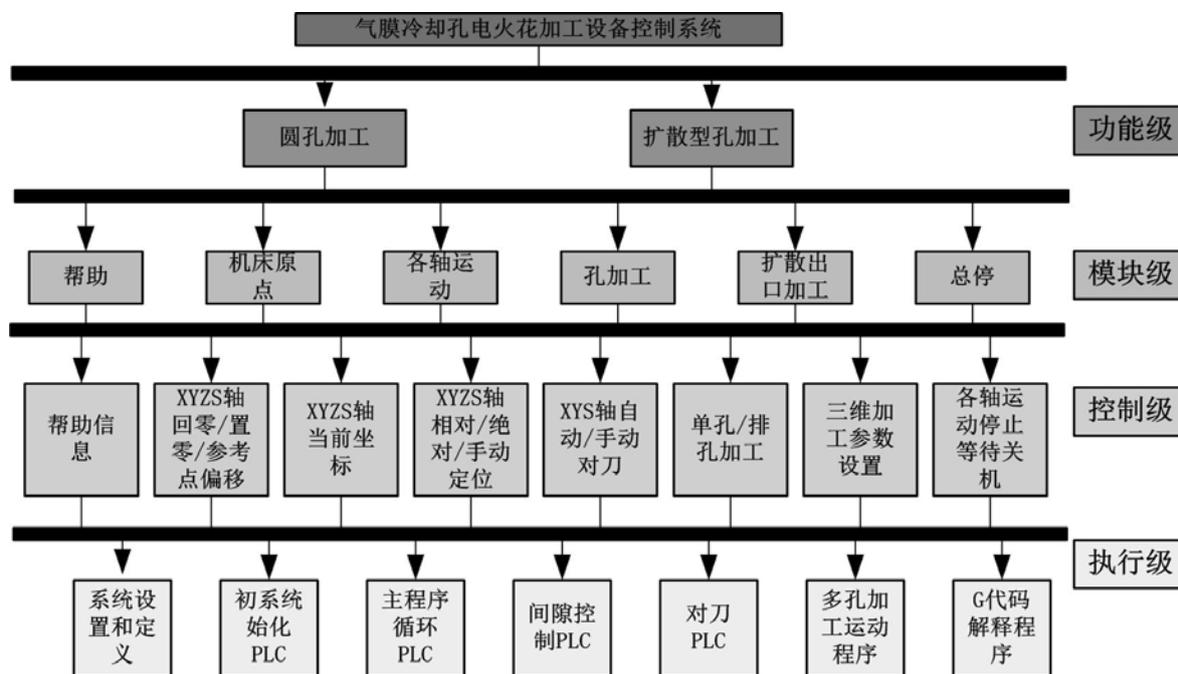


图 29 气膜孔电火花加工装备控制系统结构图

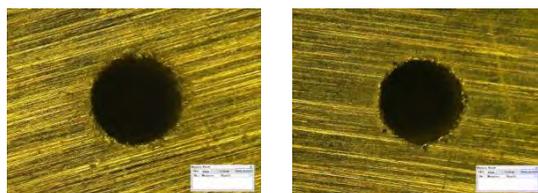
将各功能模块集成的气膜孔电火花加工装备如图 30 所示，加工的气膜孔样件如图 31 所示，重熔层平均厚度可控 $<10\mu\text{m}$ 。通过性能测试得到的性能参数如表 4 所示，包括电极旋转性能、电极蠕动性能、电极高压冲液性能，脉冲电源开路电压、峰值电流、脉宽、脉间，控制系统行程、精度等。



(a) 样机一

(b) 样机 2

图 30 气膜孔电火花加工设备装配实物图



(a) 孔入口

(b) 孔出口

图 31 气膜孔加工样件

表 4 气膜孔电火花加工设备主要性能参数

机床主要参数	性能指标
机床重量	1500kg
机床尺寸	1900mm×1200mm×2300mm
机床轴数	6 轴
X、Y、Z、S 行程	380mm、260mm、100mm、60mm
数控转台 B 轴摆角范围	-30°-105°
X、Y、Z 定位精度	15 μ m
X、Y、Z 重复定位精度	\pm 5 μ m

3 取得的突破性进展及创新点

(1) 管状电极高精度旋转、蠕动进给、高压内冲液复合功能主轴机构

创新设计了电极驱动和导向器精密匹配机构、柔性自适应密封结构，选择耐磨耐腐蚀材料等技术措施，发明了一种满足电极高精度旋转、蠕动式自动进给、管状电极高压内冲液、电极供电及绝缘、耐腐蚀的复合功能主轴。

(2) 重熔层减薄工艺及其适用的纳秒级脉冲电源技术

开发出一种纳秒级脉冲放电的高能量密度脉冲电源，解决了较高浪涌电压和很强的电磁干扰情况下的高压脉冲主振快速驱动问题。进而采用水基弱电解质作为电介质，研究出纳米级窄脉宽高峰值放电电流的电加工技术，实现了重熔层厚度的减薄甚至消除。

(3) 气膜孔圆孔高效电火花穿孔加工过程中加工深度的精确控制技术

通过实时监测穿孔加工过程中的放电信号、进给速度反馈方法，并结合剔除初始阶段误判信号的策略，实现了电火花加工中电极贯穿长度的精确控制，保证了孔进出口精度并且可避免触及相邻筋板或叶片对壁。

(4) 复杂结构气膜孔扩散形出口电火花分块加工技术

发明了一种气膜孔扩散孔的电火花分块加工技术。根据气膜孔扩散形出口的形状尺寸，将待加工区域分为若干个子区域，利用细长型电极进行电火花分块加工，通过多次进给加工出完整扩散形出口，实现了高效率、成本低的扩散孔加工方法。

(5) 多孔径、薄/无重熔层的气膜孔高效自动化加工整套工艺与装备

集成了复合功能主轴、纳秒级脉冲电源、加工过程精密控制、控制系统等关键模块，研发出多孔径、薄/无重熔层的气膜孔高效自动化加工的整套工艺与装备。开发出气膜孔电火花加工数控样机，并加工出气膜孔样件。

四、合同任务指标完成情况

较好地完成了合同任务指标。

研发出一种复合功能新主轴机构，实现了管状工具电极高精度旋转、蠕动进给补偿、高压内冲液复合功能。研发出一种高放电效率和薄重熔层智能脉冲放电电源，实现了脉冲、脉间、峰值电流、电容值等参数在线调控功能。研究出放电间隙智能伺服控制、加工工艺过程协调控制方法，实现了全自动化高效的气膜孔加工工艺过程。研究出复合结构气膜孔加工工艺及重熔层减薄工艺，集成开发出气膜孔批量化全自动加工装备样机。

气膜孔样机及样件达到了性能指标：孔径范围 0.2~2 mm；加工效率>20 mm/min；孔径精度优于 $\pm 20\ \mu\text{m}$ ；表面重熔层厚度 $<10\ \mu\text{m}$ ；实现薄/无重熔层气膜孔加工能力，研究出装备样机 2 台，气膜孔样件 5 件，申请申报发明专利 3 项、实用新型 4 项。

五、项目绩效分析

两机（航空发动机和燃气轮机）是体现一个国家科技发展水平、军事实力的重要标志。两机的先进制造是机械制造领域最具挑战性的技术问题，我国两机制造厂家长期以来依靠进口技术及装备。两机的热端工作叶片（涡轮/透平叶片）气膜群孔加工质量直接影响两机工作性能和可靠性。工作叶片决定整机性能和大修周期的关键部件之一，而其制造成品率以及极端条件下工作可靠性和使用寿命取决于后道工序——气膜冷却孔加工制造水平。

如何实现高效率地加工出满足技术要求的气膜群孔，以满足工作叶片冷却和高可靠性要求，始终是国内外高度重视的研究课题。鉴于此，针对两机工作叶片上大量气膜孔自动化批量加工需求，研发出适合我国国情、具有自主知识产权的关键技术与装备，以提高我国两机的自主研发制造水平，后续有望产生更重要的社会效益和经济价值。

本研究通过产学研联合的方式，在电加工工艺、技术及装备的积累基础上，重点研发了复合结构、薄/无重熔层气膜孔加工工艺及过程控制技术，解决了复合功能主轴、窄脉宽高能量密度脉冲电源、数控机电系统集成的关键技术问题，研发出具有自主知识产权的气膜孔电加工先进技术与装备，提高了无损伤气膜孔加工制造水平。促进特种电加工工艺及技术发展，而且衍生技术亦可应用于对深小孔精密加工需求领域，对我国经济发展、社会进步，亦具有积极、深远的意义。

六、存在问题、有关建议及下一步研究设想

尽管本研究解决了气膜孔电加工工艺及装备的关键技术问题，已开发出气膜孔电火花加工专用装备样机 2 台，但还仍然处于样品样机的加工实验阶段，还尚未实现气膜孔加工专用装备的产品化实际应用。后续将进一步加强与两机（航空发动机和燃气轮机）相关加工制造企业联系，下一步争取实现气膜孔电火花加工专用装备的产品化推广和应用，这将产生经济价值和社会效益。也将进一步将本研究的衍生技术向有深小孔精密加工需求的领域推广。