

分类号: TP391
密 级: 公 开

学校代码: 10363
学 号: 2220140105



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 复杂曲面构件机器人电解铣
削加工方法研究

论 文 作 者 侯亮亮

指 导 教 师 方明 副教授

学 科 (专 业) 智能制造工程

研 究 方 向 机器人加工

论文提交日期: 2025 年 6 月 5 日

分类号：TP391

单位代码：10363

密 级：公 开

学 号：2220140105

复杂曲面构件机器人电解铣削加工方法研究

RESEARCH ON MACHINING METHOD OF ROBOT ELEC-
TROLYTIC MILLING COMPLEX CURVED SURFACE
COMPONENTS

学生姓名： 侯亮亮

指导教师： 方明 副教授

专 业： 智能制造工程

研究方向： 机器人加工

论文答辩日期：2025 年 5 月 8 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：侯亮亮

日期：2025 年 6 月 5 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在_____年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：侯亮亮

日期：2025 年 6 月 5 日

指导教师签名：



日期：2025 年 6 月 6 日

复杂曲面构件机器人电解铣削加工方法研究

摘 要

随着航空航天领域对复杂曲面构件精密制造需求的不断提升,传统数控机床电解铣削工艺面临柔性不足、加工精度受限等挑战。工业机器人凭借其多自由度运动特性与自适应加工优势,为复杂曲面零件的高效制造提供了新的解决方案。结合电解铣削在难加工材料精密成形中的独特优势,机器人电解铣削技术已成为先进制造领域的研究热点。

然而,工业机器人固有的结构柔性及动态误差会引发电解加工过程中轨迹偏差和极间间隙的非线性波动,严重影响加工精度与表面质量。本文以工业机器人电解铣削加工技术为核心,围绕复杂曲面构件的高效精密加工需求展开研究,旨在突破机器人加工精度的技术瓶颈,主要内容如下:

(1) 介绍了管电极电解铣削加工原理,通过极化曲线测量试验完成了 SUS304 不锈钢在不同电解液中的溶解特性研究,并基于改进型 D-H 参数法建立了机器人正/逆运动学模型和正逆运动学求解仿真验证,为复杂曲面电解加工轨迹规划奠定了理论基础。

(2) 提出了一种工具电极可变姿态的复杂曲面轨迹规划方法。基于 NURBS 曲面参数化建模与曲率自适应插补算法,通过弦高误差约束动态优化路径点密度,解决了传统步长法在曲面突变区域的过切与欠切问题,结合法矢共线姿态调整策略,确保工具电极轴线与曲面局部法向矢量实时共线,实验表明,可变姿态加工策略使沟槽宽度由 2.25 mm 提升至 3.11 mm,显著提升了材料蚀除均匀性。

(3) 进一步针对机器人动态误差与电解加工间隙波动问题,构

建了加工过程多源误差影响下的间隙补偿模型。通过加工间隙与电流的传递关系，提出基于电流反馈的伺服控制策略，设计了间隙在线补偿系统。并通过实验验证该策略使表面粗糙度均值从 $0.73\ \mu\text{m}$ 降至 $0.28\ \mu\text{m}$ ，槽深误差降低 28%，有效抑制了极间间隙波动对加工精度的影响。

(4) 最后集成六自由度工业机器人、高频脉冲电源与电解液循环系统，搭建了机器人电解铣削加工平台。其中开发了基于电流信号的短路保护机制与对刀系统，并设计高动态响应末端执行器实现间隙实时补偿。结合 RobotPRO 离线编程系统，实现了复杂曲面轨迹的自动生成与姿态优化，并经过实验验证加工轮廓最大几何偏差控制在 $0.026\ \text{mm}$ 以内，为机器人多轴协同电解加工提供了可靠便捷的工艺平台。

关键词：工业机器人，电解铣削，极间间隙，曲面轨迹规划，伺服控制，离线编程

RESEARCH ON MACHINING METHOD OF ROBOT ELECTROLYTIC MILLING COMPLEX CURVED SURFACE COMPONENTS

ABSTRACT

With the continuous increase in the demand for precise manufacturing of complex curved surface components in the aerospace field, traditional CNC machine tool electrochemical milling processes are facing challenges such as insufficient flexibility and limited processing accuracy. Industrial robots, with their multi-degree-of-freedom motion characteristics and adaptive processing advantages, offer a new solution for the efficient manufacturing of complex curved surface parts. Combining the unique advantages of electrochemical milling in the precise forming of difficult-to-machine materials, robot electrochemical milling technology has become a research hotspot in advanced manufacturing.

However, the inherent structural flexibility and dynamic errors of industrial robots can cause nonlinear fluctuations in the gap between electrodes during electrochemical processing, seriously affecting processing accuracy and surface quality. This paper focuses on the efficient and precise processing of complex curved surface components using robot electrochemical milling technology, aiming to break through the technical bottleneck of robot processing accuracy. The main contents are as follows:

(1) The principle of tube electrode electrochemical milling processing is introduced. Through polarization curve measurement experiments, the dissolution characteristics of SUS304 stainless steel in different electrolytes are studied, and the forward and inverse kinematics models of the robot are established based on the improved D-H parameter method, with simulation

verification of forward and inverse kinematics solutions, laying a theoretical foundation for the trajectory planning of complex curved surface electrochemical processing.

(2) A trajectory planning method for complex curved surfaces with variable tool electrode attitudes is proposed. Based on NURBS surface parametric modeling and curvature adaptive interpolation algorithm, the path point density is dynamically optimized through chord height error constraints, solving the overcutting and undercutting problems in the traditional step size method in the sudden change areas of the surface. Combined with the normal vector alignment attitude adjustment strategy, it ensures that the tool electrode axis is always aligned with the local normal vector of the surface in real time. Experiments show that the variable attitude processing strategy increases the groove width from 2.25mm to 3.11mm, significantly improving the uniformity of material removal.

(3) Further, to address the dynamic errors of the robot and the fluctuations in the electrochemical processing gap, a gap compensation model under the influence of multi-source errors in the processing process is constructed. Through the transmission relationship between the processing gap and current, a servo control strategy based on current feedback is proposed, and an online gap compensation system is designed. Experiments verify that this strategy reduces the average surface roughness from $0.73\mu\text{m}$ to $0.28\mu\text{m}$ and reduces the groove depth error by 28%, effectively suppressing the impact of gap fluctuations on processing accuracy.

(4) Additionally, a robot electrochemical milling processing platform is built by integrating a six-degree-of-freedom industrial robot, high-frequency pulse power supply, and electrolyte circulation system. A short-circuit protection mechanism and tool setting system based on current signals are developed, and a high-dynamic response end effector is designed to achieve real-time gap compensation. Combined with the RobotPRO offline

programming system, the automatic generation and attitude optimization of complex curved surface trajectories are achieved, and experiments verify that the maximum geometric deviation of the processing contour is controlled within 0.026mm, providing a reliable and convenient process platform for multi-axis collaborative electrochemical processing by robots.

KEY WORDS: Industrial robot, Electrolytic milling, Inter-electrode gap, Curved surface trajectory planning, Servo control, Offline programming

目 录

摘要.....	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景和研究意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 电解铣削加工技术的研究现状	3
1.2.2 基于复杂曲面加工的机器人轨迹规划研究现状	6
1.2.3 机器人加工误差补偿的研究现状	7
1.3 课题来源和主要研究内容	9
1.3.1 课题来源	9
1.3.2 主要研究内容	9
第 2 章 机器人电解铣削加工理论基础	11
2.1 管电极电解铣削加工方法	11
2.1.1 电解加工基本原理及特点	11
2.1.2 管电极电解铣削原理	12
2.1.3 法拉第定律	13
2.1.4 双电层结构模型	14
2.2 SUS304 电化学溶解特性的研究	15
2.2.1 样品制备	15
2.2.2 试验方案	16
2.2.3 试验仪器	16
2.2.4 极化曲线	18
2.3 机器人运动学分析	19

2.3.1 加工系统坐标系的建立	19
2.3.2 机器人 MD-H 参数模型	21
2.3.3 机器人正运动学分析	22
2.3.4 机器人逆运动学分析	24
2.4 本章小结	27
第 3 章 机器人电解铣削加工轨迹规划与间隙控制策略研究	28
3.1 机器人电解铣削加工策略	28
3.1.1 固定姿态曲面电解铣削	28
3.1.2 可变姿态曲面电解铣削	29
3.2 机器人位姿规划	30
3.2.1 NURBS 曲线曲面建模	30
3.2.2 等步长法优化	31
3.2.3 位姿信息规划	33
3.3 加工间隙伺服控制策略	36
3.3.1 机器人误差模型建立	36
3.3.2 加工间隙控制理论模型	37
3.3.3 间隙补偿系统数学模型	39
3.3.4 基于电流信号的间隙自动控制方法	40
3.4 本章小结	42
第 4 章 机器人电解铣削加工系统设计	43
4.1 加工系统总体方案设计	43
4.2 运动系统	45
4.3 对刀系统和短路保护	46
4.3.1 高频脉冲电源	46
4.3.2 对刀系统	48

4.3.3 短路保护	50
4.4 电解液循环系统	51
4.5 电流监测系统和末端执行器的设计	52
4.5.1 末端执行器的设计	52
4.5.2 电流监测系统	53
4.6 本章小结	54
第 5 章 机器人电解铣削曲面加工实验研究	55
5.1 不同姿态曲面铣削加工实验	55
5.1.1 加工参数的选择	55
5.1.2 固定姿态和可变姿态电解铣削实验	56
5.2 基于电流信号的加工间隙补偿实验	57
5.2.1 加工间隙误差补偿控制方法仿真分析	58
5.2.2 单次曲面铣削间隙控制加工实验	59
5.2.3 往复曲面铣削间隙控制加工实验	60
5.3 机器人离线编程下的曲面铣削实验	62
5.3.1 机器人离线编程系统架构	63
5.3.2 实验条件和流程	64
5.3.3 加工轨迹离线编程仿真实验	65
5.3.4 实验结果与分析	66
5.4 本章小结	67
第 6 章 总结与展望	68
6.1 总结	68
6.2 创新点	69
6.3 展望	69
参考文献	70

攻读硕士期间的主要成果	74
-------------------	----

第 1 章 绪论

1.1 课题背景和研究意义

航空航天装备研发生产能力已成为衡量国家工业基础水平与科技竞争力的关键指标。据估计，未来十年内全球民用航空运输市场对新型商用飞机的需求总量预计达到三万架次^[1]，这为航空航天领域的技术革新与产业发展提供了持续动力。在此背景下，航天器推进系统与承力结构设计正朝着集成化、轻量化方向发展，而具有高比强度且具有抗腐蚀性、抗高温、抗疲劳性功能特性的轻质合金复杂型面构件应用比例显著提升^[2]。随着新一代飞行器推进装置与承载结构的迭代升级，特别是涉及动力传输、热防护等关键功能的多功能复合结构件呈现出拓扑构型复杂化、功能梯度多样化的发展特征，这对难加工材料复杂曲面构件的工艺柔性、加工效率与成形精度等制造技术提出了更为严苛的技术要求^{[3][4]}。

然而，由于难加工复杂曲面类构件存在薄壁、曲面多变等特点，且多数采用钛合金、金属间化合物、高温合金等难加工材料，导致实现其柔性化、高效率、高精度加工变得十分困难^[5]。因此，如何提高该类构件加工精度并保证其高效、柔性化加工制造，已经成为航空、航天、能源等相关领域亟需解决的重要科学问题之一，也是提高我国制造业发展水平、提升综合国力需要突破的关键技术。图 1-1 所示为航空发动机涡轮叶片及其装配示意图，作为航天器核心部件，发动机风扇、压气机与涡轮中密集排列的叶片直接影响整机安全性与动力性能^[6]。航空叶片典型特征包括薄壁弱刚性结构、复杂自由曲面轮廓以及表面密集分布的气膜冷却孔阵列^[7]，传统铣削工艺在加工此类构件时面临薄壁特征导致易引发颤振变形，高温强度特性加剧刀具磨损等难题。而电化学加工技术其加工过程不受材料特性制约且无工具损耗现象，凭借其非接触式加工特性及对难切削材料的优异适应性，在精密制造领域展现出独特优势^[8-9]。



图 1-1 发动机叶片及其分布

目前,如图 1-2 所示的应用于电解加工的专业数控机床虽然铣削加工精度高,表面质量一致性较好,但其存在自由度受限、可拓展性差、难加工材料加工刀具损耗大、难以满足高度柔性加工需求等缺点,限制了其在复杂曲面加工方面的进一步发展^[10]。相较于传统数控机床,工业机器人凭借其多自由度运动特性、可扩展工作空间和工艺兼容性较好等优势,正从常规搬运、焊接等低精度作业向精密抛光、多轴铣削及增材制造等复杂工艺领域拓展^[11]。然而,机器人应用于加工时会存在刚度较差以及切削力波动大的问题,同时工业机器人固有的结构柔性及动态误差会导致加工精度与表面质量显著下降,这成为制约机器人加工技术工业化应用的核心瓶颈。因此如何克服这些问题并使用多自由度工业机器人代替专用数控机床完成难加工复杂曲面类构件的加工,已成为当前学术界和工业界一直尝试努力攻克的方向。

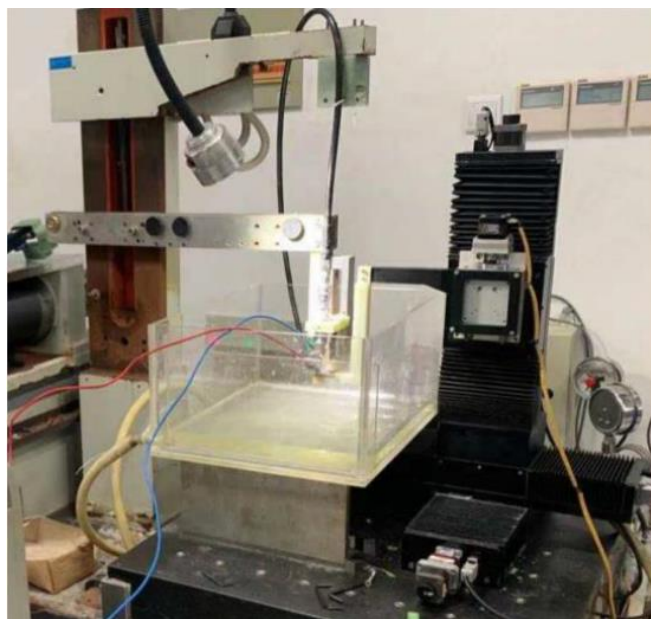


图 1-2 电解加工数控机床

因此,如何将机器人与电解铣削技术相结合起来形成机器人电化学铣削技术,从而解决复杂曲面构件的多轴联动加工成为本研究的重点。本研究在现有电解铣削加工理论基础上,通过引入机器人铣削加工方法,利用电化学阳极溶解原理具有的与材料性能无关、无工具损耗、无重铸层、无切削力等独特优势实现难加工材料的高效去除,通过提出一种工具电极可变姿态的复杂曲面加工轨迹规划方法,以及电解铣削加工工具末端的加工电流反馈闭环控制实现电解加工间隙的在线实时补偿,从而克服低刚度铣削加工机器人在铣削力的作用下因受力变形

引起加工精度降低、铣刀位姿变化导致机器人构形变化引起的系统刚度多变不定以及低刚度与变刚度耦合影响下的抑振控制困难等问题,实现难加工复杂曲面类构件柔性化、高效化精准加工。因此,开展机器人电解铣削加工过程轨迹规划与补偿控制方法的研究具有重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 电解铣削加工技术的研究现状

如图 1-3, 电解铣削加工技术是采用电化学溶解的原理, 以类似铣削的进给方式, 通过控制工具阴极的空间运动实现工件型面的精密加工^[12]。与拷贝式电解加工不同, 在整个电解铣削加工过程中, 深度方向上加工轨迹需进行多次间隔性得扫描, 使得待加工表面距上一次电解加工存在一段时间的间隔, 从而形成新的氧化层^[13]。因此, 电解铣削加工电化学溶解必须经历钝化-钝化层破碎-阳极金属溶解几个过程, 导致阳极电化学溶解过程状态演化规律掌握困难, 使得电解铣削加工材料的有效去除变得难以控制。

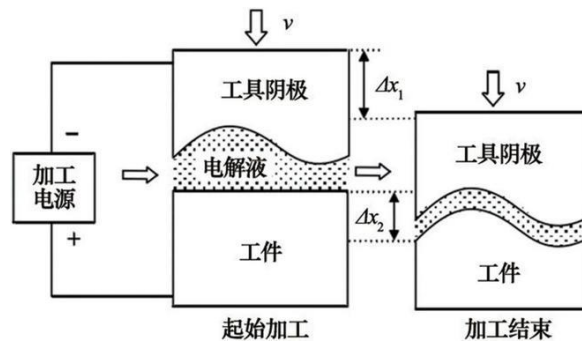


图 1-3 电解铣削加工技术原理图

为了实现电解铣削加工材料的有效去除, 国内外学者围绕加工材料钝化膜破碎时间开展实验研究, 研究证实钝化膜破碎时间与电解液种类及电流密度密切相关, 相同电解液条件下, 电流密度越大, 钝化膜破碎时间越短; 如 TC4 钛合金在 50 A/cm^2 、质量分数 20% NaNO_3 条件下的钝化膜破碎时间为 1.6 s ^[14]; GH4169 高温合金在 60 A/cm^2 条件下的钝化膜破碎时间仅为 1 s ^[15]。在工艺参数对材料有效去除的影响方面, 国内外学者实验研究了阴极进给速度和电流密度对材料去除效率与质量的影响, 研究表明当工具阴极扫描速度过快时, 会导致阳极表面钝化层来不及破碎, 而影响材料的有效去除^[16]; 而电流密度的增大会带来去除效率的提升, 并在一定程度上会对加工表面质量带来提^[17-18]。

上述研究大多通过加工工艺实验的方式开展, 导致针对新材料构件的有效加

工,往往需要进行大量的工艺试验才能优选出加工参数,从而大幅增加工艺研发成本和研发周期。因此,建立加工材料钝化-破碎-溶解过程多物理场耦合模型,通过加工过程建模与仿真手段,实现加工材料有效去除工艺参数的优选匹配是一种有效的低成本解决方式。

电解铣削工艺中加工间隙内电解液动力学与电磁场分布的协同控制是实现高精度加工的关键技术要素。针对该工艺的流场特性分析已成为重点研究对象,其涉及气液两相流交互作用及多物理场耦合模型。广东工业大学^[19]通过建立吸入式射流电解加工的湍流-电场耦合模型,采用负压抽吸式工具电极电化学加工,原理图如图 1-4 所示,系统揭示了外吸式流场结构相较于内吸式方案更有利于维持间隙内电解介质的均质化输运,这种特性可显著降低气体空泡率并改善电流密度分布均匀性,从而提升加工表面形貌质量。

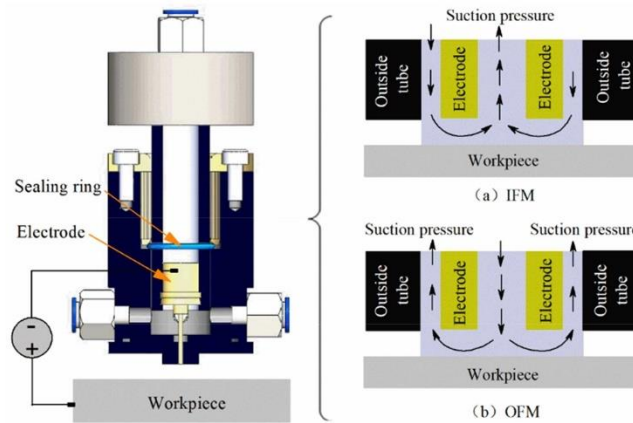


图 1-4 电解液抽吸工具电化学加工示意图

目前,在电解加工过程建模方面,Newman 等^[20]提出一种描述电荷守恒的电压模型 (PM),来求解电流密度分布;Bortels 等^[21]提出多离子传输反应模型 (MITReM),来计算电解液中离子浓度和电流密度。为了更好的描述极间流场分布情况,加工过程流场建模由单相流模型向多相流模型发展,其中比较有代表性的研究成果是 Chang 等^[22]建立二维两相流模型对温度场和流场进行预测,来实现阴极形状的优化设计和日本学者 Fujisawa 等^[23]建立气-固-液三相流模型对极间间隙分布进行预测。在直流电解加工温度场建模方面,Deconinck 等^[24-25]运用该模型来研究温度对电解加工材料去除和离子传输的影响。Klocke 等^[26]对加工区温度分布进行求解,并与实验检测的加工区温度分布进行对比。

同时国内外学者为了推进抑制杂散腐蚀和提高加工表面质量两方面的发展,聚集于工具阴极优化设计、多物理场协同调控及工艺参数匹配等关键技术环节,

通过工具构型创新与工艺模式改进，持续推动电解铣削向高精度、低损伤方向发展。其中诺丁汉大学^[27]研发了具有喷嘴角度调节功能的管电极电解铣削技术，见图 1-5，通过改进喷嘴结构使射流方向由固定垂直冲液改进为可调多角度冲液。实验表明，在加工过程中倾斜管状电极不仅可提升加工产物的排出效率，还能有效降低加工沟槽的表面粗糙度。

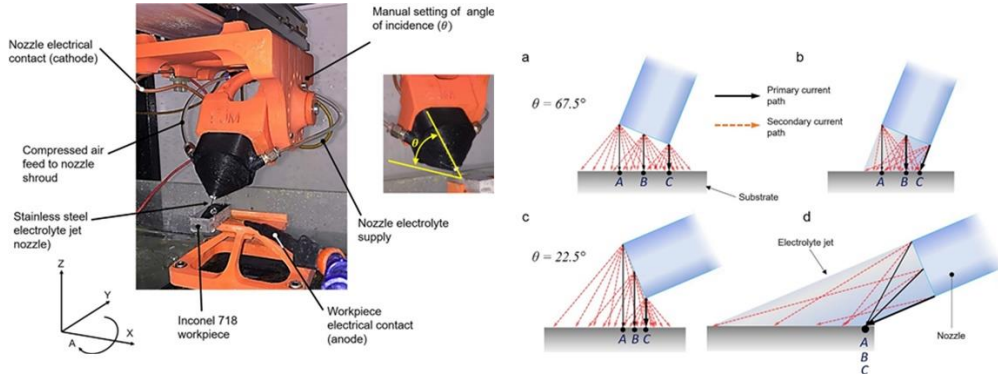


图 1-5 喷嘴角度可调节的电解铣削加工系统示意图

此外还有 Jonathon 等^[28]人采用内径 $500\ \mu\text{m}$ 管状工具电极在 718 镍基高温合金表面进行了电解铣削加工研究，如图 1-6 所示，结果发现通过改变工具电极端部结构形状可改变工具电极端部在工件表面的电场分布，从而电解铣削加工出不同轮廓形状的沟槽。

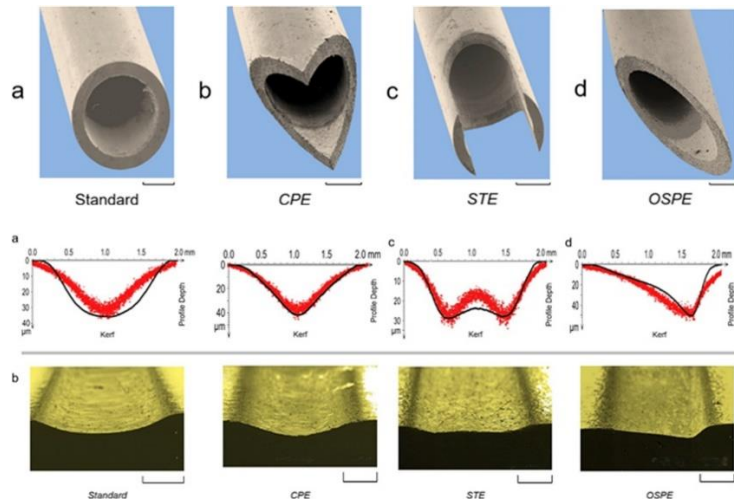


图 1-6 不同形状工具电极加工结果图

以上研究表明，目前电解加工过程多物理场建模方法的研究相对比较成熟，尽管在解决多时间尺度溶解过程仿真建模计算量大的问题方面取得了一定的进步，但缺乏对脉冲电解铣削加工多状态多时间尺度溶解过程的全面精确描述，从而难以有效地揭示多状态多时间尺度加工参数的匹配规律。此外，目前针对电解铣削加工的研究更多聚焦于沟槽及少量平面加工方面，针对复杂型面电解铣削加

工的研究几乎空白,需要进一步研究适合复杂型面电解铣削加工的工具电极结构、加工轨迹规划、电场流场分布调控等,以提高复杂型面电解铣削的加工精度及表面质量,为加工技术的进一步工程化应用奠定基础。

1.2.2 基于复杂曲面加工的机器人轨迹规划研究现状

机器人轨迹规划策略的核心在于几何构建方法与运动路径位姿特征的协同规划。当前主流的曲面加工轨迹生成方法主要包括等参数线法、截面线法及投影法^[29]等,其几何构型可分为行切式、环切式、螺旋式等形式。当前学者们在轨迹优化领域已经取得多项突破, Kout 等^[30]人提出的基于微分几何原理的测地线轨迹生成算法可有效维持路径残高一致性,在复杂曲面加工中避免多余修正需求,显著提升了机器人运动连续性。另有 Manuel 等^[31]人提出了基于曲面参数化的等距刀具路径生成策略,通过逆向插值算法将三次样条坐标系下的规划路径转化为笛卡尔空间坐标,形成完整的加工轨迹系统,但未解决笛卡尔空间轨迹跟踪的精度衰减问题。而在适应性规划方面, Ma 等^[32]人通过选择三维模型上的关键接触点,然后根据曲率变化率和曲线长度准则,进一步细化工件的敏感区域中产生曲面曲率突然变化或曲面相交的目标点,通过曲率梯度分析实现路径点密度的智能调控,特别适用于曲面突变区域的精确成形加工。如图 1-7 所示,广东工业大学吴世雄团队^[33]针对拐角与窄槽加工中的切削力动态特性优化,提出采用变径圆弧路径过渡工艺,该方法通过在几何突变区域设计半径渐变的圆形工艺路径,有效抑制了传统直线轨迹引发的切削力振荡现象,然而由于未建立切削力突变区的定量判别机制,致使轨迹优化过程中可能引发轨迹冗余或密度不足的工艺缺陷。这些研究揭示了机器人轨迹规划需要通过几何构型与运动动力学的协同作用进行优化,同时可以着眼于融合智能算法与实时反馈机制,进一步提升复杂曲面加工中的轨迹适应性与成形精度。

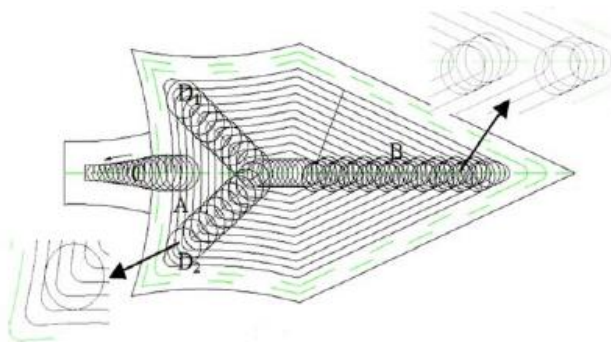


图 1-7 轨迹优化方法

机器人独特的结构导致其在运动时轨迹跟踪性能会受到关节姿态影响,因此位姿优化成为轨迹规划体系中的关键研究方向。Mousavi 等^[34]人指出机器人的冗余自由度特性使得单条加工轨迹会对应无限组关节空间解,在加工路径点确定的情况下,通过位姿优化可显著提升系统动态稳定性。丁烨^[35]则提出一种以刚度指标为约束条件、运动平顺性为优化目标的位姿序列求解模型,采用路径最短化原则生成高连续性姿态序列,然而当刚度阈值提升时,关节空间解的范围会显著减少,可能会出现平顺性优化目标与刚度约束产生冲突的情况。

总的来说,当前机器人轨迹规划方法大多来源于数控机床加工轨迹的方法,尚未充分融合机器人本体动力学特性。另外当前研究虽通过变形补偿解决了机器人弱刚度引发的动态失稳问题,但是并没有显著提高机器人加工精度。因此,在复杂曲面加工场景下,开发融合运动学约束、刚度优化准则与轨迹精度补偿多维度的轨迹规划方法具有重要理论价值与工程意义。

1.2.3 机器人加工误差补偿的研究现状

机器人加工过程中的轨迹位置误差由本体定位精度偏差与切削力作用下的动态形变误差共同构成。当机器人的运动轨迹未经优化控制时其综合误差可达毫米量级,严重制约着机器人在精密加工领域的发展。当前在机器人加工过程中对本体定位误差的补偿已形成较完善方法,如基于激光跟踪测量系统^[36]的标定技术可将定位误差控制在 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 以内,然而该技术体系无法有效抑制形变误差。而且由于切削力的多变特性与机器人的弱刚度特征^[37],导致建立机器人误差预测模型面临显著技术挑战。为此,学者们围绕误差建模预测、实时补偿机制、精度提升策略及运动学参数辨识等维度展开了系统性研究,旨在构建多源误差协同控制的理论框架。

在误差建模领域,华中科技大学的李文龙团队^[38]构建了基于曲面几何特征的加工误差几何模型,如图 1-8 所示,系统揭示了工件/工具位姿偏差与加工精度的量化映射关系,并建立了涵盖关节运动学误差与刚度形变共同作用的误差传递模型。此后他们又创新性地提出动态工况下的位姿参数辨识方法,通过高密度大规模实测数据突破传统静态标定无法辨识切削振动、力致变形及回转误差的技术局限,构建了面向多工艺场景的误差协同补偿模型,可有效解决法向切入(磨削/铣削)、切向位移(制孔)、姿态偏转(切边)等典型加工模式下的误差控制难题,实现了全域加工精度优化目标^[39]。

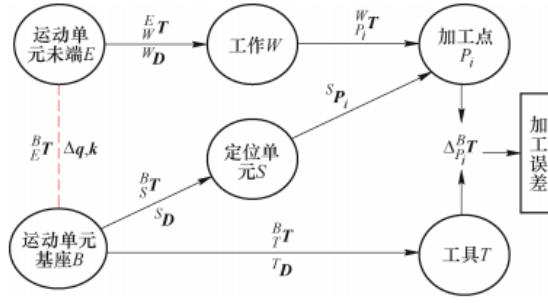


图 1-8 基于机器人空间运动链的误差传递关系

在在线补偿方法方面，现有机器人精度的传感测量控制方法主要集中在基于视觉的定位误差预测^[40]和激光跟踪仪的轨迹误差测量^[41]等，前者难以考虑铣削轨迹误差，后者操作复杂且设备成本较高。在误差补偿策略研究方面，邸红采等^[42]人开发了基于双目视觉跟踪的机器人刀具位姿误差动态检测与补偿系统，以此实现铣削过程中位姿偏差的实时辨识与自适应修正。华南理工大学^[43]通过建立几何标定误差与刚度形变误差的双重数学模型，继而融合切削力在线监测数据构建动态误差预测器，并设计基于自适应增量 PID 调控的闭环补偿机制，通过实时反馈调整实现定位误差与变形误差的同步抑制，显著提升了加工系统的动态精度稳定性。

为了考虑加工过程中复杂曲面工况下不确定性因素对动态变形误差的影响，满足机器人柔性加工过程中在线补偿、闭环反馈控制和高精度加工的要求。Slavkovic 等人^[44]重点研究了切削力导致的误差离线补偿技术，其核心在于建立刀具尖端静态形变与工艺参数的量化关系。贝尔格莱德大学^[45]开发的虚拟加工仿真平台集成了轨迹修正算法与表面形貌预测模块，通过融合机器人运动学模型与切削力模型实现刀具位移的协同修正。Kelaiaia 等人^[46]则构建了面向复杂曲面的侧铣工艺闭环控制体系，基于实时检测数据动态调整工艺参数，为复杂曲面零件精密加工提供了一种可利用的误差补偿方案。

虽然以上研究均可有效提高机器人轨迹跟踪精度，但基于运动学标定的补偿体系难以有效抑制外部载荷引发的动态形变；基于外部传感的位姿补偿策略虽能有效抑制本体非线性误差源，但在动态负载工况下易产生响应迟滞；基于刚度模型的补偿方法虽可表征外力扰动影响，却难以实时补偿传动系统非线性特性引发的误差。因此如何在机器人动态误差与电学非线性特性耦合作用下实现极间间隙的实时调控和复杂曲面的轨迹规划，成为当前研究的重点。

1.3 课题来源和主要研究内容

1.3.1 课题来源

本课题研究来源于芜湖市科技计划项目“航空发动机叶片机器人复合加工基础研究”和安徽省自然科学基金项目“复杂难加工材料构件机器人电解磨削加工基础研究”。

1.3.2 主要研究内容

本文以航空航天复杂曲面构件的高效精密加工需求为背景,针对传统数控机床电解铣削工艺柔性不足、机器人加工精度受限等问题,系统开展工业机器人电解铣削加工技术的理论探索与工程应用研究。主要研究内容如下:

(1) 工业机器人电解铣削加工理论基础。机器人电解铣削加工理论基础。首先介绍了管电极电解铣削加工的基本原理,建立管电极射流电解铣削电流密度与去除速率的定量关系,揭示钝化膜破碎与材料蚀除的动力学规律。其次开展 SUS304 不锈钢在硝酸钠电解液中的电化学溶解特性研究,通过极化曲线分析揭示钝化膜动态演化规律及其对加工效率的影响,确定最优电解液参数。最后通过构建六自由度工业机器人运动学模型,完成正/逆运动学解析仿真验证,为复杂曲面电解铣削的轨迹规划与位姿控制奠定数学基础。

(2) 复杂曲面机器人电解铣削轨迹规划与间隙控制策略。围绕机器人电解铣削复杂曲面的关键技术瓶颈,一方面,提出一种可变姿态加工策略,确保电极轴线与曲面局部法矢实时共线,然后基于 NURBS 曲面参数化建模,开发一种曲率自适应的改进型等步长轨迹规划算法,通过弦高误差约束动态调整插补点密度,避免传统固定步长法在曲面突变区域的过切与欠切缺陷。另一方面,通过建立多源误差耦合下的法向间隙动态补偿模型,结合电流反馈闭环控制策略,设计基于伺服驱动的间隙在线修正系统,通过实时调节工具位姿实现极间间隙的稳定控制,显著提升加工表面质量与几何精度,为机器人电解铣削提供了一种高效加工方法。

(3) 机器人电解铣削加工系统设计与关键子系统开发。面向复杂曲面加工需求,搭建智能化机器人电解铣削加工平台,硬件层面,集成六自由度工业机器人、高频脉冲电源、电解液循环系统及末端执行器。并设计对刀系统与短路保护机制,通过接触式短路检测与多级电气防护确保加工安全。同时设计高动态响应的间隙补偿机构,构建电流信号的在线监测系统,通过末端执行器实现工具电极

的快速位置调整。

（4）机器人电解铣削加工实验与工艺优化验证。通过一系列实验验证理论模型与系统设计的有效性。首先，开展固定姿态与可变姿态电解铣削对比实验，分析工具位姿协同控制对沟槽形貌与加工结果的影响；其次，基于电流反馈的间隙控制实验，评估电解加工间隙动态补偿策略对加工精度与表面粗糙度的提升效果；最后开发基于 RobotPRO 平台的离线编程系统，实现复杂曲面轨迹的自动生成与姿态优化，对加工结果进行形貌重构与误差分析，验证机器人电解铣削在航空航天复杂构件制造中的工程适用性。

第2章 机器人电解铣削加工理论基础

电解加工（ECM）作为一种具有高材料适应性、无热损伤特性及复杂几何成形能力的加工技术，在复杂曲面构件加工中具有独特优势，然而传统电解加工系统受限于刚性机床结构，在曲面加工灵活性与加工轨迹动态调整方面存在固有缺陷。工业机器人因其多自由度运动特性与高柔性化优势，为电解加工技术的空间拓展提供了新思路。本章围绕工业机器人电解铣削加工的理论体系构建，系统阐述了电解加工机理、管电极射流电解铣削工艺原理、对以 SUS304 不锈钢材料作为加工对象的溶解特性研究以及机器人运动学建模方法，旨在为后续曲面构件机器人电解铣削加工的设计与工艺优化奠定理论基础。

2.1 管电极电解铣削加工方法

2.1.1 电解加工基本原理及特点

电解加工（Electrochemical Machining, ECM）是一种基于电化学阳极溶解机制的非接触式材料去除工艺^[47]。其加工系统由直流电源、电解液循环装置及工具阴极-工件阳极对电极构成（如图 2-1 所示）。工具电极作为阴极连接直流电源负极，待加工工件作为阳极连接电源正极，两电极间维持一定的加工间隙并通入具有特定流速与压力的电解工作液以构建导电回路。施加外接电源后，阳极工件表面发生电解蚀除，同时电解蚀除产物经过高速流动冲刷排出。在初始加工阶段，工具电极与工件表面几何形态存在显著差异，导致电场呈现非均匀分布特征，极间距离较小区域因电流密度升高而加速阳极溶解，反之则溶解速率降低。当系统达到动态平衡状态时，工件表面形貌逐渐收敛于工具电极的几何轮廓，最终形成具有预定形状的精密零件。

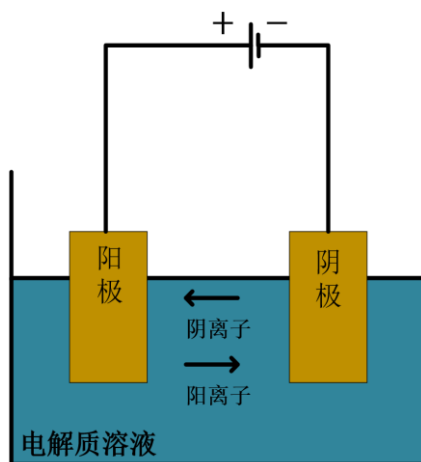


图 2-1 电解加工原理示意图

因电解加工的特点所致，电解加工有下列优势：

(1) 材料适应性广：基于电化学阳极溶解原理，可加工各类导电金属材料，包括不锈钢、铸铁、高温合金及硬质合金等难切削材料，尤其适用于航空发动机叶片、复杂型腔模具等精密构件的成形加工^[48]。

(2) 加工效率突出：材料去除速率可达传统机械加工的 5-20 倍，通过调整电流密度与极间接触面积，可实现高效高精度协同加工，对复杂异型结构的加工效率仍能保持传统工艺的 5-10 倍水平。

(3) 表面完整性优异：非接触式加工机制避免了切削力与热影响，工件表面无残余应力、热影响层及机械损伤，显著优于传统加工^[49]。

(4) 工具阴极可持续性：加工过程中阴极仅发生还原反应生成气体，在合理工艺参数下工具电极无损耗，显著降低工具制备成本并保障加工稳定性。

(5) 复杂几何成形能力：通过电场分布的精密调控，可实现三维复杂型面、微细结构的一次性成形，特别适用于深窄槽、异型孔等特征的高效制造。

尽管电解加工优势明显，其工艺短板亦不容忽视：

(1) 加工精度制约因素：极间间隙受多物理场（电场、流场、温度场）耦合作用影响，导致间隙值产生波动，并且有杂散腐蚀现象造成侧向蚀除，使得加工精度显著低于传统精密加工方法^[50]。

(2) 阴极设计复杂性：工具阴极需通过电场数值模拟进行反求设计，尤其对于微型化、高复杂度阴极的制备存在显著技术壁垒，导致开发周期与成本增加。

(3) 工艺优化挑战：需协同调控电解液参数（浓度、温度、流速）、电参数（电压、电流密度、脉冲频率）及机械参数（进给速度、间隙压力）等工艺变量，对工艺条件有较大要求。

(4) 环境影响控制：电解废液中含有金属氢氧化物及反应副产物，需建立 pH 调节、重金属分离等环保处理系统，增加了工艺链的复杂性及运营成本。

2.1.2 管电极电解铣削原理

如图 2-2 所示，管电极射流电解铣削加工系统由微细金属管电极（接电源阴极）与金属工件（接电源阳极）构成电化学回路。其工作原理为：通过控制系统驱动管电极沿预设轨迹进行进给，同时维持一定的极间加工间隙，电解液在泵压作用下经管电极内腔形成高速射流，冲击阳极表面形成局域活化区，引发工件表面发生选择性阳极溶解。该过程中，电解产物被高速射流及时冲刷排出，通过

射流压力与进给速度动态平衡，最终在工件表面加工出所需形状的沟槽结构。

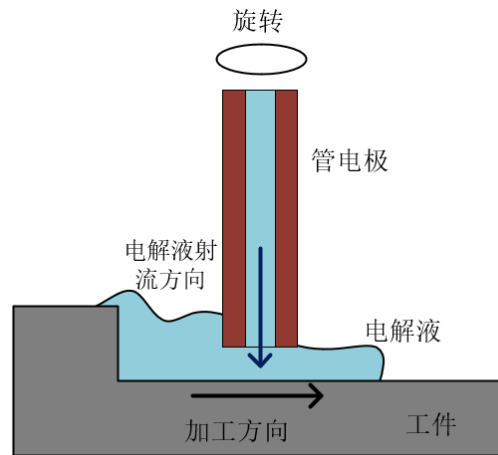


图 2-2 管电极射流电解铣削沟槽原理

溶解产物（金属氢氧化物、氧气等）通过射流动力学特性实现实时排出，其传输效率与射流雷诺数 $Re^{[51]}$ 相关：

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2-1)$$

式中， ρ 为电解液密度 (kg/m^3)， v 为射流速度 (m/s)， d 为管电极内径 (mm)， μ 为电解液动力粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

管电极电解铣削沟槽作为先进电化学加工工艺，其核心在于工件阳极与阴极管电极间维持非接触式加工状态。该工艺区别于传统机械加工的本质特征体现在加工过程中完全消除了切削热效应，从根本上避免了热影响区和加工硬化现象的产生。这些特性使得管电极电解铣削工艺在微尺度沟槽结构制造领域展现出独特的技术优势，尤其适用于高精度细沟槽的成形加工。

2.1.3 法拉第定律

电解加工的材料去除过程严格遵循电化学基本定律——法拉第定律^[52]，该定律包含两个核心内容：

- (1) 电极反应物质量与通过电解质的总电荷量呈线性正比关系；
- (2) 相同电荷量条件下，不同物质的电极反应量与其电化学当量成反比。

法拉第定律如下所示：

$$M = kQ = kIt \quad (2-2)$$

式中： M 为阳极溶解质量 (g)； k 为质量电化学当量 (g/C)； Q 为电荷量 (C)； I 为电流 (A)； t 为时间 (s)。

质量电化学当量可通过原子特性参数计算：

$$k = \frac{A}{nF} \quad (2-3)$$

式中：A 为摩尔质量 (g/mol)；N 为原子价态；F 为法拉第常数，取值为 96500 C/mol。

为适应工程应用需求，需将质量参数转换为体积参数：

$$V = \frac{M}{\rho} = \eta \omega I t \quad (2-4)$$

式中：V 为蚀除体积 (mm³)；ρ 为材料密度 (g/mm³)；ω 为体积电化学当量 (mm³/C)；η 为电流效率 (%)。

带入上式，局部体积蚀除速率 v_r 与电流密度 i 存在函数关系：

$$v_r = \frac{\partial V}{\partial t} = \eta \omega i \quad (2-5)$$

该微分方程揭示了电流密度的空间分布直接决定材料去除速率的提升。电流密度可显著增强阳极溶解过程，进而改善加工效率，该电流密度参数受电源输入特性、极间间隙尺寸及电解液离子迁移特性等多重因素共同影响。

2.1.4 双电层结构模型

在固/液电化学体系中，电极与电解液接触时因费米能级差异引发电荷重排，系统遵循热力学第二定律自发向自由能最小化状态演变。当电荷转移达到动态平衡时，界面处形成具有纳米尺度特征的双电层结构，其空间电荷分布对电化学反应具有决定性影响^[53]。图 2-3 展示了典型金属/电解液界面双电层的三维电荷分布与电势梯度特征，其中横轴表示与电极表面的距离 x ，纵轴对应电势 ϕ 的变化。该模型中，电极表面以规则排列的正电荷为主。在电解液一侧，由于静电作用与离子热运动的动态平衡，电荷分布呈现两种不同形式：位于电极表面约一个水化离子半径距离 d_0 处的离子形成紧密排列的紧密层，而距离更远的区域则形成呈梯度分布的扩散层。

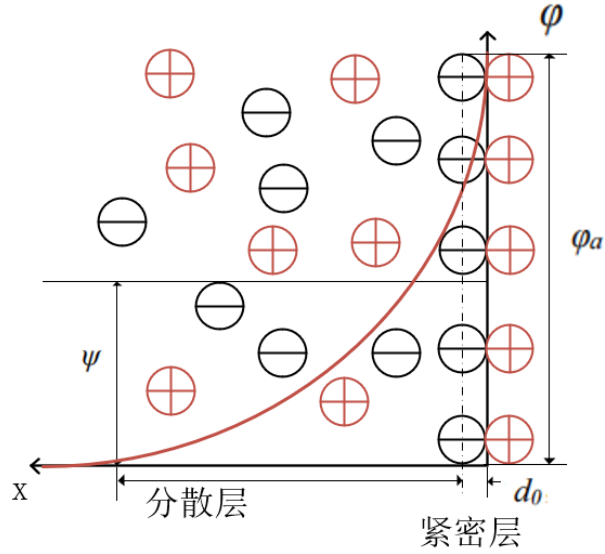


图 2-3 界面双电层电荷与电位的分布示意图

根据 Stern 修正模型，双电层可分为两个特征区域：（1）紧密层：分布于电极表面至距电极 d_0 范围内，离子受强库仑力作用呈定向排列，该层介电常数 ϵ 显著低于本体溶液，电势梯度呈线性衰减；（2）扩散层：从 d_0 延伸至德拜长度，离子分布受电场力与热运动双重作用，遵循玻尔兹曼统计规律，电势呈指数衰减：

$$\psi(x) = \psi_0 e^{-\kappa x} \quad (2-6)$$

式中： ψ_0 为紧密层外缘电势； κ 为德拜-休克尔参数。

双电层结构可等效为分层电容器，其微分电容满足：

$$C_d^{-1} = C_j^{-1} + C_f^{-1} \quad (2-7)$$

其中， C_j 为紧密层电容，与电极表面粗糙度及离子特性相关； C_f 为扩散层电容，与溶液浓度及温度相关。根据上式 2-7 解释了界面电容随电位变化的非线性特征。

2.2 SUS304 电化学溶解特性的研究

2.2.1 样品制备

本文所有实验研究均选用 SUS304 不锈钢材料作为研究对象，因此有必要对 SUS304 的电化学溶解特性进行研究，作为典型奥氏体不锈钢，SUS304 不锈钢的主要成分包括 18%-20%的铬和 8%-12%的镍，这种合金元素的配比赋予了它卓越的耐腐蚀性和耐热性，其耐蚀机理源于 Cr 元素在表面形成的致密钝化膜^[54]。其在 pH 值为 2-11 介质环境中表现出优异的抗均匀腐蚀性能，在 600 °C 高温以下仍能维持奥氏体相结构，并且优异的可焊性使得它在制造过程中能够进行各种焊

接工作，确保结构的牢固性和完整性。

2.2.2 试验方案

本研究通过溶解特性实验分析材料的电化学溶解规律，具体流程如下：

（1）样品工艺处理。实验前对金属试样进行标准化表面处理，采用碳化硅砂纸对测试面实施多次打磨，随后进行机械抛光以消除表面微缺陷。

（2）电化学测试。采用电化学工作站在-2 V 至 4 V 电位区间进行阳极极化曲线测定，扫描速率 10 mV/s。测试完毕后通过分析自腐蚀电位、钝化电流密度等关键参数，定量评估材料活化-钝化转变特性。

（3）电解液确定策略。通过测量 SUS304 在不同种类和不同浓度电解液中的钝化膜稳定性与材料溶解速率的构效关系模型，综合极化曲线特征参数，最终确定适合 SUS304 的最优电解液。

2.2.3 试验仪器

1. 电化学工作站

电化学测试作为测速金属电化学腐蚀行为的关键技术，其作用机制是电化学反应与能量转换的双向作用过程，通过施加外电路电流促使材料发生氧化还原反应，同时利用化学势差实现电能输出。本试验中数据均通过上海辰华 CHI660E 型电化学工作站采集，其设备见图 2-4 所示。测试方法采用经典三电极体系进行，其中以研究试样作为工作电极，铂片作为辅助电极，饱和甘汞电极作为参比电极。为精确控制反应条件，实验过程依托恒温水浴装置实现温度控制，试样在电解液中预浸泡 30 分钟以达到开路电位稳定状态，该严格遵循电化学测试规范要求。



图 2-4 电化学工作站

2. 三电极体系

三电极体系是电化学测试中用于精确测量电极电势和控制极化电流的核心技术，其核心优势在于通过分离极化回路与测量回路，减少因电流通过导致的参

比电极极化误差，从而提升数据可靠性，图 2-5 为测试时所用的三电极体系。

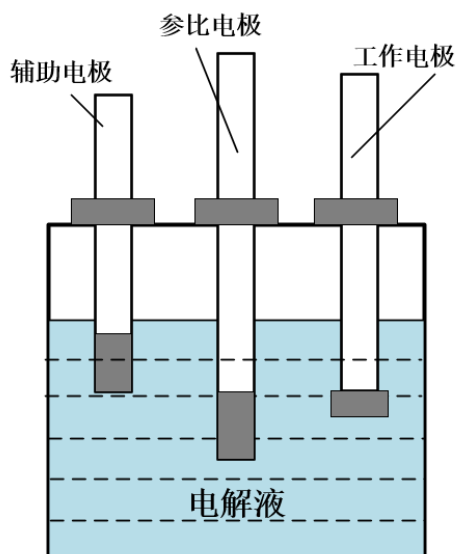


图 2-5 三电极体系

①工作电极。根据实验需求选用 SUS304 不锈钢，作为电化学反应的场所，其表面发生的氧化还原反应直接反映体系电化学的过程。实验前需通过预处理消除表面氧化层或污染，确保反应活性位点的一致性。

②参比电极。根据电解液性质选择对应的材质作为参比电极，本研究中使用 AgCl 电极，其提供恒定的电势基准，通过盐桥实现与电解液的离子导通，阻隔电解质溶液对参比液的污染，同时需要低电流负载，避免计极化干扰。

③辅助电极。本实验中选用铂电极作为辅助电极，其主要构成电流闭合回路，通过电子传输平衡工作电极的电荷变化，实验中需确保其与工作电极无直接物质交换，防止反应产物交叉污染。

3.磁力搅拌器

图 2-6 为智能磁力搅拌器，其包括磁力搅拌、数字化 PID 温控模块及人机交互界面。可通过电磁驱动实现 0-1500 rpm 无极调速的搅拌控制，并搭载高精度铂电阻温度传感器，可在 20-100 °C 范围内实现 ± 0.5 °C 的恒温调控^[55]。同时配置 1L 耐化学腐蚀玻璃搅拌容器，加热单元采用陶瓷复合式加热盘，结合底部均温设计有效消除溶液局部温差，用于本试验中的电解液搅拌和温度控制。

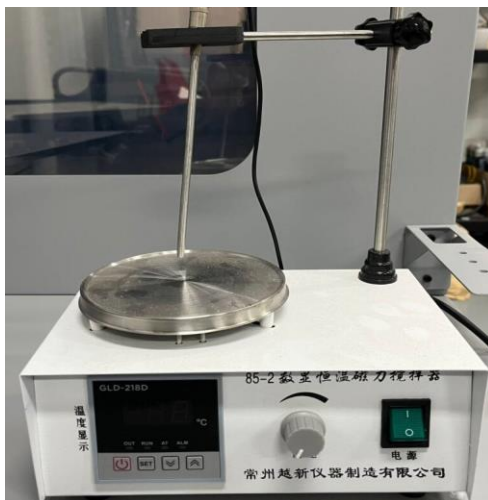


图 2-6 恒温磁力搅拌器

2.2.4 极化曲线

极化曲线是表示金属溶解规律的重要函数关系图，其揭示了电流密度与电极电势的动态响应规律^[56]。在电解加工工艺优化中，不同电解液成分及浓度条件下的组合将显著影响金属溶解效果，因此需通过系统性对比阳极极化曲线，分析材料溶解速率与表面钝化机制的关联性。本研究采取了恒电位法进行试验，扫描速率 10 mV/s，扫描电压范围-2 V 到 4 V，分别测量了 SUS304 在不同溶液和不同浓度下的极化曲线。

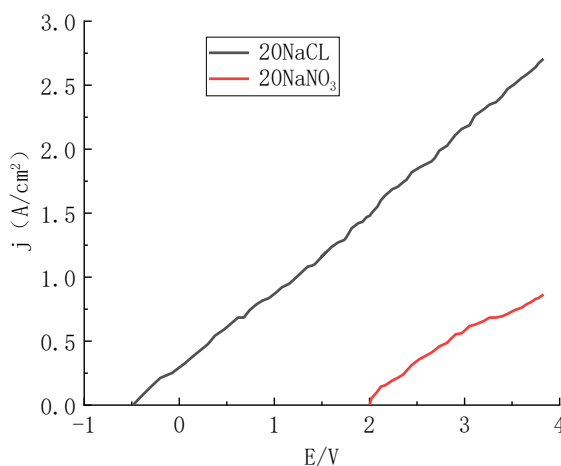


图 2-7 SUS304 在不同溶液中的极化曲线

图 2-7 揭示了 SUS304 在两种电解液体系中的典型阳极极化反应。在 20%硝酸钠体系中，材料表现出显著钝化特性，当极化电位低于 2.0 V 时，电流密度几乎一直维持在零附近，表明金属表面钝化膜保持完整，当电位击穿阈值 2 V 后，电流密度呈指数增长，表明金属材料开始逐渐被腐蚀，这与钝化膜局部击穿引发的金属活化溶解直接相关。而在 20%氯化钠溶液中的极化曲线呈现明显差异，在

电极电位达到 -0.5 V 至 0 V 区间即出现轻微幅度的电流，这是由于氯离子的特性吸附导致钝化膜薄弱区优先发生阳极溶解，形成点蚀行为。实验数据表明，氯化钠电解液的材料去除率显著增加。然而，氯离子的强去钝化作用可能引发严重的杂散腐蚀现象，加工边缘过渡区显著增大，严重影响了加工几何精度控制。相比之下，硝酸钠电解液形成稳定的钝化区域，该钝化膜可显著降低侧向腐蚀量。这种钝化-活化转变特性使得硝酸钠溶液更适用于本研究中的精密加工场合，同时可以通过脉冲电源来克服其固有加工效率限制。

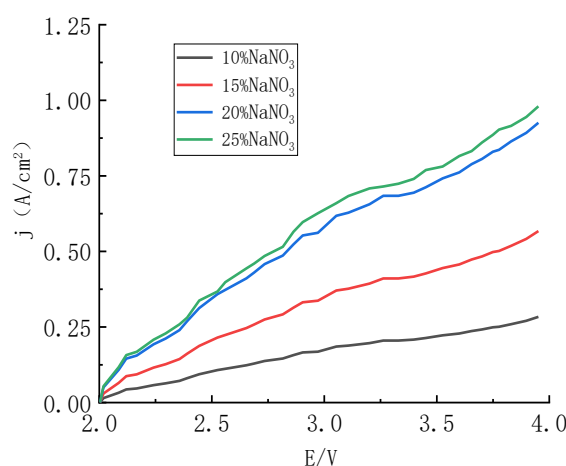


图 2-8 SUS304 在不同浓度的 NaNO_3 溶液中的极化曲线

同时本试验研究了 NaNO_3 溶液浓度对电化学反应速率的影响，通过不同浓度下极化曲线的测试确定最佳电解介质条件。如图 2-8 所示实验分别选取质量分数 10%，15%，20% 和 25% 的 NaNO_3 溶液作为电解介质，在恒温条件 25°C 下测定 SUS304 材料的极化特性。测试结果表明电解液浓度与电流密度呈正相关关系，当 NaNO_3 质量分数由 10% 增至 25% 时，电流密度显著提升，这是由于高浓度电解液中离子迁移率增强及电导率升高，促进了电荷传输效率与电化学反应进程。值得注意的是，当浓度选用 25% 时，相对于 20% 浓度时候电流密度的增长趋势开始趋于饱和。基于上述规律，选定 20% NaNO_3 溶液开展本研究中的电解加工实验，该浓度条件下可在确保电解液活性与材料去除率之间实现最佳平衡。

2.3 机器人运动学分析

2.3.1 加工系统坐标系的建立

电化学加工过程中，机器人运动轨迹的精确控制依赖于多层级坐标系的协同建模。如图 2-9 所示，系统坐标系采用三个坐标系组成：基座坐标系 O、工件坐标系 B 与工具坐标系 A，其功能定位与关联如下：

1. 坐标系定义与功能划分

(1) 基座标系 **O**：以机器人本体安装基面为基准建立的全局静态坐标系，作为系统运动学计算的绝对参考系。其坐标原点与机器人 MD-H 参数模型中的固定节点对齐，所有末端执行器位姿均通过齐次变换矩阵映射至该基准系。

(2) 工件坐标系 **B**：基于加工件几何特征建立的局部坐标系，通过标定后确定工件在基座标系中的空间位姿。该坐标系固定后不受机器人关节运动影响，为加工路径规划提供稳定的几何基准。

(3) 工具坐标系 **A**：动态坐标系，其原点位于工具电极末端中心点，通过手眼标定建立与机器人法兰盘的位姿比变换关系。该坐标系实时反映工具末端在基座标系中的运动状态。

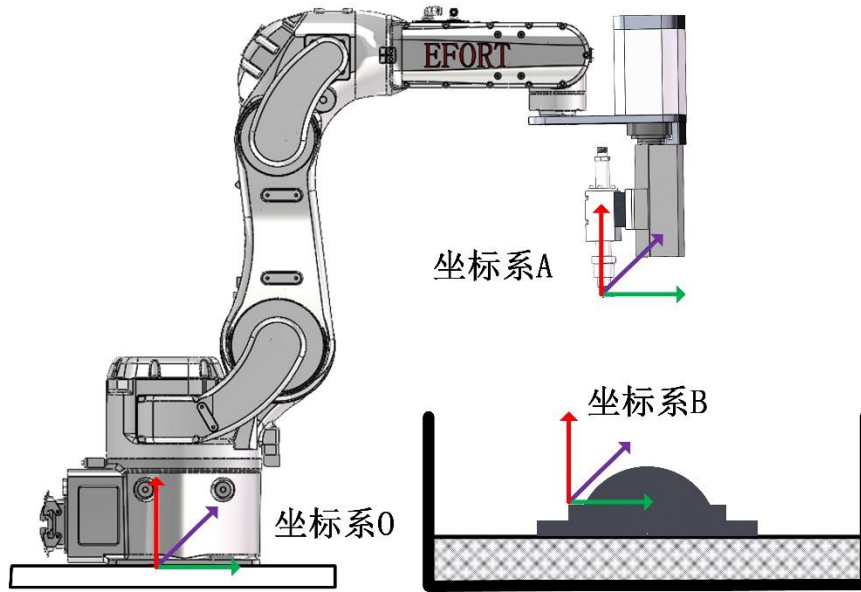


图 2-9 机器人加工系统坐标系

2. 坐标系与运动控制

加工轨迹生成本质上是工具坐标系（A）相对于工件坐标系（B）的位姿连续变换过程，可通过坐标变换表达：

$$T_{A/O} = T_{B/O} \cdot T_{A/B} \quad (2-8)$$

其中 $T_{A/B}$ 表示工具在工件坐标系下的目标位姿矩阵。系统通过计算逆运动学方程，将笛卡尔空间轨迹转化为机器人关节角序列，实现轨迹跟踪。

3. 精度保障机制

(1) 静态误差补偿：基于激光跟踪仪测量数据，建立基座标系与工件坐标系的偏差修正矩阵 $\Delta T_{B/O}$ ，消除机械装配误差对定位精度的影响。

(2) 动态误差抑制：通过在线电流监测系统，通过伺服控制系统实现工具振动幅度控制即控制极间间隙误差。

该坐标系体系通过误差补偿与闭环反馈机制，有效解决了电化学加工中间隙值的波动问题，为复杂曲面电解加工提供了可靠的数学框架。

2.3.2 机器人 MD-H 参数模型

为实现工具坐标系和工件坐标系的精准标定，需优先建立机器人运动学模型。这是由于工业机器人本质上属于多自由度串联机构，其多连杆开链式结构导致运动学参数必须通过数学建模定量描述各关节运动与末端位姿的变换关系。

本研究采用改进型 Denavit-Hartenberg（Modified-DH）建模法构建机器人运动学模型，相较于经典 DH 参数法，该方法的创新性体现在：通过重新定义连杆坐标系原点与轴向关系，有效解决了传统方法在非正交关节轴系（如偏置关节、交叉轴关节）建模时的参数冗余问题^[57]。MD-H 参数法原理如图 2-10 所示：

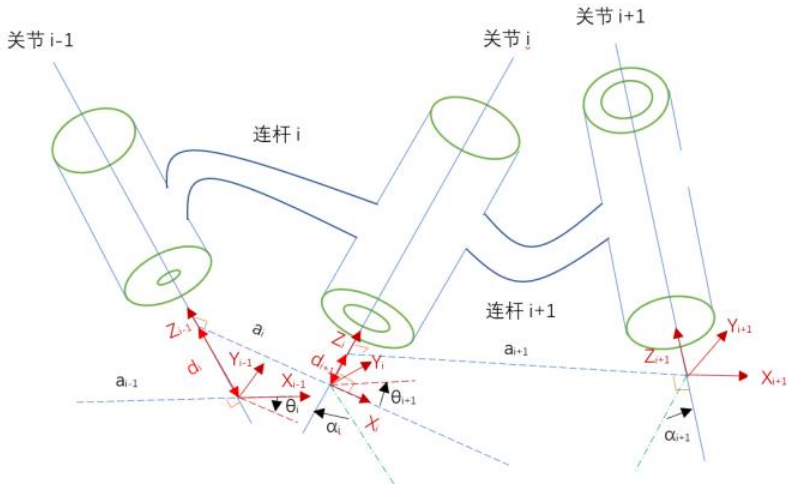


图 2-10 MD-H 参数法^[58]

针对 ER20-1100 六自由度工业机器人，基于其 M-DH 参数表 2-1，采用改进型 Modified-DH 建模方法，构建其连杆坐标系如下图 2-11。

表 2-1 ER20-1100 机器人 M-DH 参数

连杆 i	$\alpha_{i-1}(^\circ)$	$a_{i-1}(\text{mm})$	$d_i(\text{mm})$	$\theta_i(^\circ)$
1	0	0	$\theta_1(0)$	430
2	90	$l_1 = 180$	$\theta_2(90)$	0
3	0	$l_2 = 400$	$\theta_3(0)$	0
4	90	$l_3 = 160$	$\theta_4(0)$	540

(续) 表 2-1 ER20-1100 机器人 M-DH 参数

连杆 i	$\alpha_{i-1}(\circ)$	$a_{i-1}(\text{mm})$	$d_i(\text{mm})$	$\theta_i(\circ)$
5	-90	0	$\theta_5(0)$	0
6	90	0	$\theta_6(0)$	116

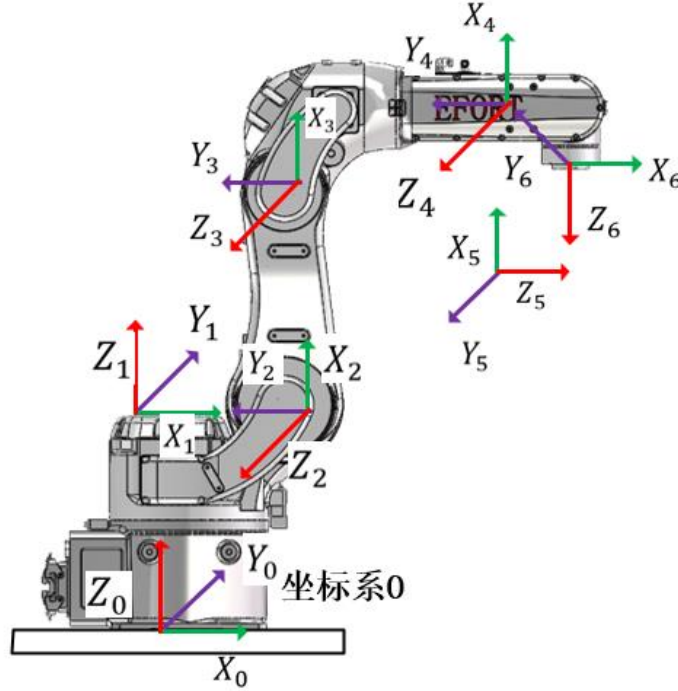


图 2-11 机器人连杆坐标系

2.3.3 机器人正运动学分析

机器人正运动学建模的核心任务是依据各关节旋转角度求解末端执行器相对于基坐标系的位姿变换关系。基于 MD-H 参数法建立各连杆坐标系后,相邻连杆间的位姿转换可通过式(2-9)所示的齐次变换矩阵实现:

$${}^i_{i-1}T = \text{Rot}(X, \alpha_{i-1})\text{Trans}(X, a_{i-1})\text{Trans}(Z, d_i)\text{Rot}(Z, \theta_i) \quad (2-9)$$

该变换矩阵由四个基本运动合成,其具体表达式为:

$$\text{Rot}(X, \alpha_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

$$\text{Trans}(X, a_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

$$\text{Trans}(Z, d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

$$\text{Rot}(Z, \theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

机器人末端坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵可表示为:

$${}^0_n T = {}^0_1 T \cdot {}^1_2 T \cdot {}^2_3 T \cdot \dots \cdot {}^{n-1}_n T \quad (2-14)$$

根据表 2-1 提供的 MD-H 参数, 推导得到各连杆变换矩阵下式所示 (其中 s_i , c_i 分别表示 $\sin \theta_i$, $\cos \theta_i$):

$${}^0_1 T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2 T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

$${}^2_3 T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3_4 T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

$${}^4_5 T = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^5_6 T = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

带入上式通过矩阵连乘运算得到末端坐标系位姿矩阵:

$${}^0_6 T = \begin{bmatrix} n_x & a_x & b_x & p_x \\ n_y & a_y & b_y & p_y \\ n_z & a_z & b_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

其中:

$$\begin{aligned} n_x &= s_1 c_4 s_6 + c_1 s_{23} s_4 s_6 - c_1 c_{23} s_5 c_6 + s_1 s_4 c_5 c_6 - c_1 s_{23} c_4 c_5 c_6 \\ n_y &= -s_1 c_{23} s_5 c_6 - c_1 s_4 c_5 c_6 - s_1 s_{23} c_4 c_5 c_6 - c_1 c_4 s_6 + s_1 s_{23} s_4 s_6 \\ n_z &= -s_{23} s_5 c_6 + c_{23} c_4 c_5 c_6 - c_{23} s_4 s_6 \\ a_x &= c_1 c_{23} s_5 s_6 - s_1 s_4 c_5 s_6 + c_1 s_{23} c_4 c_5 s_6 + s_1 c_4 c_6 + c_1 s_{23} s_4 c_6 \\ a_y &= s_1 c_{23} s_5 s_6 + c_1 s_4 c_5 s_6 + s_1 s_{23} c_4 c_5 s_6 - c_1 c_4 c_6 + s_1 s_{23} s_4 c_6 \\ a_z &= s_{23} s_5 s_6 - c_{23} c_4 c_5 s_6 - c_{23} s_4 c_6 \\ b_x &= c_1 c_{23} c_5 + s_1 s_4 s_5 - c_1 s_{23} c_4 s_5 \\ b_y &= s_1 c_{23} c_5 - c_1 s_4 s_5 - s_1 s_{23} c_4 s_5 \\ b_z &= s_{23} c_5 + c_{23} c_4 s_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_x &= l_1 c_1 - l_2 c_1 s_2 - l_3 c_1 s_{23} + l_4 c_1 c_{23} + l_5 (s_1 s_4 s_5 - c_1 s_{23} c_4 s_5 + c_1 c_{23} c_5) \\ p_y &= l_1 s_1 - l_2 s_1 s_2 - l_3 s_1 s_{23} + l_4 s_1 c_{23} + l_5 (s_1 c_{23} c_5 - c_1 s_4 s_5 - s_1 s_{23} c_4 s_5) \\ p_z &= l_0 + l_2 c_2 + l_3 c_{23} + l_4 s_{23} + l_5 (s_{23} c_5 + c_{23} c_4 s_5) \end{aligned}$$

为验证正运动学模型准确性，首先依据 M-DH 参数表建立理论计算模型，并利用 MATLAB 进行仿真模型，根据 ER20-1100 选取特定关节角组合 (0° , -90° , 0° , 0° , 90° , 0°) 进行仿真验证，通过在 MATLAB 模型中输入机器人关节角度，输入机器人末端坐标系矩阵，两者得到的末端位姿矩阵完全一致：

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1200 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 170 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

该验证过程充分证明了运动学模型的正确性，为后续轨迹规划与控制系统设计奠定了理论基础。

2.3.4 机器人逆运动学分析

机器人逆运动学分析的关键在于通过末端执行器位姿矩阵反求各关节变量，以实现到达该位姿的功能。相较于数值迭代法存在的收敛速度慢、精度受限等问题，解析法通过建立关节角的闭式表达式具有更高的计算效率与精度优势，因此本文采用解析法进行逆运动学求解^[59]。

1. 第一关节角 θ_1 的解析

对式 (2-18) 进行坐标变换操作：

$${}^0_1T^{-1} \cdot {}^0_6T \cdot {}^5_6T^{-1} = {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T \quad (2-20)$$

经矩阵运算化简后，转换建立方程：

$$p_x s_1 - p_y c_1 + l_5 a_x s_1 - l_5 a_y c_1 = 0 \quad (2-21)$$

引入极坐标变换：

$$\begin{cases} \rho \cos \phi = p_x - l_5 a_x \\ \rho \sin \phi = p_y - l_5 a_y \end{cases} \Rightarrow \sin(\theta_1 - \phi) = 0 \quad (2-22)$$

其中

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{(p_y - l_5 a_y)^2 + (p_x - l_5 a_x)^2} \\ \phi = \arctan(p_y - l_5 a_y, p_x - l_5 a_x) \end{cases} \quad (2-23)$$

得到关节角闭式解：

$$\theta_1 = \phi + k\pi \quad (k = \pm 1) \quad (2-24)$$

2. 第二关节角 θ_2 的确定

对上式 (2-18) 建立方程组:

$$\begin{cases} l_3 s_{23} + l_4 c_{23} = \alpha \\ l_3 c_{23} - l_4 s_{23} = \beta \end{cases} \quad (2-25)$$

其中:

$$\begin{cases} \alpha = p_x c_1 + p_y s_1 - l_5 (a_x c_1 + a_y s_1) - l_1 - l_2 s_2 \\ \beta = p_z - l_0 - l_5 a_z - l_2 c_2 \end{cases}$$

联立消元后得到:

$$\theta_2 = \arctan \left(\frac{2\beta l_2 \pm \sqrt{(2\alpha l_2)^2 + (2\beta l_2)^2 - K^2}}{K} \right) \quad (2-26)$$

3. 第三关节角 θ_3 的推导

根据上式 (2-18) 通过坐标变换建立新约束方程:

$${}^0T^{-1} \cdot {}^0_6T \cdot {}^4_6T^{-1} = {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \quad (2-27)$$

左边化简得到:

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x c_1 + p_y s_1 - l_5 a_x c_1 - l_5 a_y s_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & -p_x s_1 + p_y c_1 + l_5 a_x s_1 - l_5 a_y c_1 \\ r_{31} & n_z s_6 + o_z c_6 & r_{33} & p_z - l_0 - l_5 a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

其中:

$$\begin{cases} r_{11} = n_x c_1 c_5 c_6 - o_x c_1 c_5 s_6 + a_x c_1 s_5 + n_y s_1 c_5 c_6 - o_y s_1 c_5 s_6 + a_y s_1 s_5 \\ r_{21} = -n_x s_1 c_5 c_6 + o_x s_1 c_5 s_6 - a_x s_1 s_5 + n_y c_1 c_5 c_6 - o_y c_1 c_5 s_6 + a_y c_1 s_5 \\ r_{31} = n_z c_5 c_6 - o_z c_5 s_6 + a_z s_5 \\ r_{12} = n_x c_1 s_6 + o_x c_1 c_6 + n_y s_1 s_6 + o_y s_1 c_6 \\ r_{22} = -n_x s_1 s_6 - o_x s_1 c_6 + n_y c_1 s_6 + o_y c_1 c_6 \\ r_{13} = -n_x c_1 s_5 c_6 + o_x c_1 s_5 s_6 + a_x c_1 c_5 - n_y s_1 s_5 c_6 + o_y s_1 s_5 s_6 + a_y s_1 c_5 \\ r_{23} = n_x s_1 s_5 c_6 - o_x s_1 s_5 s_6 - a_x s_1 c_5 - n_y c_1 s_5 c_6 + o_y c_1 s_5 s_6 + a_y c_1 c_5 \\ r_{33} = -n_z s_5 c_6 + o_z s_5 s_6 + a_z c_5 \end{cases}$$

右边化简得到:

$$\begin{bmatrix} -s_{23} c_4 & s_{23} s_4 & c_{23} & l_1 - l_2 s_2 - l_3 s_{23} + l_4 c_{23} \\ -s_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ c_{23} c_4 & -c_{23} s_4 & s_{23} & l_2 c_2 + l_3 c_{23} + l_4 s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

构建方程组, 经三角函数变换得:

$$\theta_3 = \arctan \left(\frac{\beta l_3 - \alpha l_4}{\alpha l_3 + \beta l_4} \right) - \theta_2 \quad (2-30)$$

4. 第五关节角 θ_5 的求解

通过上式 (2-18) 建立特征方程:

$${}^0_3T^{-1} \cdot {}^0_6T = {}^3_6T \quad (2-31)$$

左边化简得到:

$$\begin{bmatrix} -n_x c_1 s_{23} - n_y s_1 s_{23} + n_z c_{23} & -o_x c_1 s_{23} - o_y s_1 s_{23} + o_z c_{23} & r_{13} & r_{14} \\ -n_x c_1 c_{23} - n_y s_1 c_{23} - n_z s_{23} & -o_x c_1 c_{23} - o_y s_1 c_{23} - o_z s_{23} & r_{23} & r_{24} \\ n_x s_1 - n_y c_1 & o_x s_1 - o_y c_1 & r_{33} & p_x s_1 - p_y c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

右边化简得到:

$$\begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -s_4 c_6 - c_4 c_5 s_6 & c_4 s_5 & l_3 + l_5 c_4 s_5 \\ s_5 c_6 & -s_5 s_6 & -c_5 & -l_4 - c_5 l_5 \\ c_4 s_6 + s_4 c_5 c_6 & c_4 c_6 - s_4 c_5 s_6 & s_4 s_5 & l_5 s_4 s_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

联立上式 (2-32) 和 (2-33), 通过函数变换得:

$$\theta_5 = \arccos(a_x c_1 c_{23} + a_y s_1 c_{23} + a_z s_{23}) \quad (2-34)$$

5. 第六关节角 θ_6 的解析

利用方向余弦矩阵特性, 构建双变量方程:

$$\begin{cases} -n_x c_1 c_{23} - n_y s_1 c_{23} - n_z s_{23} = s_5 c_6 \\ -o_x c_1 c_{23} - o_y s_1 c_{23} - o_z s_{23} = -s_5 s_6 \end{cases} \quad (2-35)$$

代入得:

$$\theta_6 = \arctan\left(\frac{-o_x c_1 c_{23} - o_y s_1 c_{23} - o_z s_{23}}{s_5}, \frac{-n_x c_1 c_{23} - n_y s_1 c_{23} - n_z s_{23}}{s_5}\right) \quad (2-36)$$

6. 第四关节角 θ_4 的计算

通过旋转矩阵正交性建立约束:

$$\begin{cases} -o_x c_1 s_{23} - o_y s_1 s_{23} + o_z c_{23} = c_4 s_5 \\ o_x s_1 - o_y c_1 = s_4 s_5 \end{cases} \quad (2-37)$$

解得:

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{-o_x s_1 + o_y c_1}{a_x c_1 s_{23} + a_y s_1 s_{23} - a_z c_{23}}\right) \quad (2-38)$$

上述就是机器人逆运动学求解的全过程, 其中会存在有多组解的情况。为验证逆运动学分析的准确性, 本研究采用数值仿真与理论分析相结合的方法进行多维度验证。首先基于 MATLAB 平台所建立的机器人仿真模型, 输入典型末端位姿矩阵后获得八组关节空间解, 如表 2-2 所示, 然后通过正运动学模型带入计算发现所有解所对应的末端位姿矩阵最大位置偏差小于 10^{-6} mm, 姿态角误差低于 10^{-9} rad, 进而验证了逆运动学解的正确性。

表 2-2 八组机器人运动学逆解

序号	关节 1	关节 2	关节 3	关节 4	关节 5	关节 6
1	4.3468	5.3462	1.2769	-5.3862	0.8690	2.6196
2	4.3368	0.4959	-1.3779	2.2316	0.8789	2.6351
3	4.3368	5.1432	2.1145	-9.0456	-0.8798	5.0211
4	4.3469	0.8650	2.2316	-0.5456	-0.8790	0.5211
5	1.6673	-2.2412	-1.1212	2.6045	-2.954	3.1388
6	1.6576	2.6756	1.4333	-5.1254	-2.0854	3.1388
7	1.6670	-2.0945	-2.0917	6.2797	2.0953	0.0017
8	1.5673	2.2105	2.0916	-2.2087	2.0953	0.0017

2.4 本章小结

本章系统构建了工业机器人电解铣削加工的理论框架，首先阐明了电解加工的材料去除机制与工艺特性，揭示了其在难加工材料中的效率优势与精度制约因素；其次针对管电极射流电解铣削工艺，建立了电流密度-去除速率的定量关系，确认了采取管电极内冲液的加工方案；然后针对 SUS304 不锈钢材料开展电化学反应特性研究，通过极化曲线分析，明确了选用 20%硝酸钠溶液作为电解液开展后续实验；最后基于改进型 D-H 参数法构建了六自由度工业机器人运动学模型，通过正/逆运动学解析与数值仿真验证，实现了工具坐标系与工件坐标系的变换，为复杂曲面电解加工轨迹规划奠定了数学基础。

第 3 章 机器人电解铣削加工轨迹规划与间隙控制策略研究

本章围绕机器人电解铣削复杂曲面的关键技术瓶颈,提出基于机器人可变姿态的优化等步长轨迹规划方法,同时构建多源误差耦合下的法向间隙动态补偿模型,创新性地引入电流反馈闭环控制策略,旨在实现复杂型面高精度电解加工过程中轨迹平滑性与间隙稳定性的协同优化,为机器人电解铣削系统的工程化应用提供理论指导与技术支持。

3.1 机器人电解铣削加工策略

在利用工业机器人进行电解铣削复杂曲面时,机器人末端的工具电极需沿三维空间完成高复杂性的扫描运动,为了同时兼顾加工路径平滑性与加工精度,基于实验条件的限制和工件加工的具体要求下选择一个合理的末端执行器的加工姿态显得尤为重要。

3.1.1 固定姿态曲面电解铣削

如图 3-1 所示的数控机床常用的固定姿态电解铣削方法也可同步应用到机器人电解铣削上。首先依据加工约束条件构建机器人可到达的工作空间内的加工姿态,随后基于既定姿态参数进行曲面轨迹计算,最终生成符合机器人运动特性的加工路径。值得注意的是,该技术路径借鉴了数控机床五轴联动加工中刀具位姿规划的较为成熟理论框架^[60],而面向工业机器人的铣削系统仍存在奇异位形规避等关键技术瓶颈。在加工过程中,机器人末端的工具电极在达到预定加工深度后,沿恒定进给方向实施分层式铣削作业。

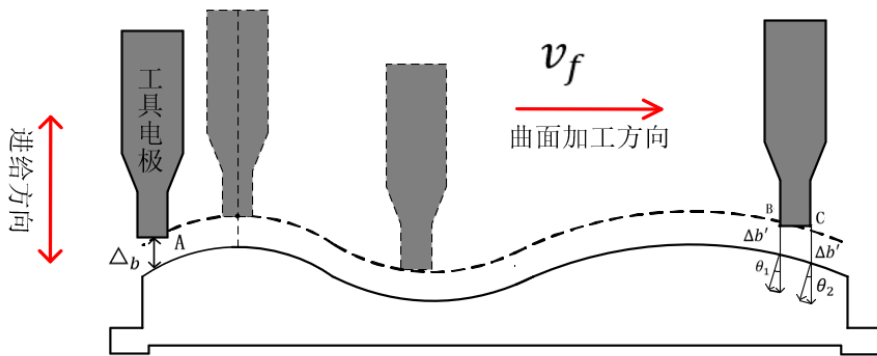


图 3-1 固定姿态电解铣削

如图 3-1 所示的加工路径为例,假设工具电极从工件竖直方向上的 A 点开始铣削,加工间隙 Δb 可表示为恒定参数。当工具电极随着曲面的曲率变化运动至 B、C 等复杂型面特征点时,由于局部半径 R 的变化进给矢量与瞬时法矢形成空

间夹角 θ ，导致有效放电间隙产生动态变化。

实际加工间隙和初始设定的加工间隙存在非线性映射关系：

$$\Delta b' = \Delta b \cdot \sec \theta + \delta(\theta, v_f) \quad (3-1)$$

式中 $\delta(\theta, v_f)$ 表示电极侧向偏移引起的附加间隙分量。当曲面曲率梯度 $\nabla R > 0.8 \text{ mm}^{-1}$ 时， θ 角可达 45° 以上，此时 $\Delta b'$ 的波动幅度将超过预定值的60%。这种周期性间隙波动不仅会引发异常放电现象，还会导致加工表面形成振幅误差。

3.1.2 可变姿态曲面电解铣削

在复杂曲面精密加工领域，六自由度机器人因其多自由度协同控制能力展现出显著优势，可通过多关节联动实现刀具姿态的实时调整。本研究基于非均匀有理B样条（NURBS）曲面建模方法^[61]，通过求解出每个插补点的位置坐标并且根据工件形状转换得到对应的姿态信息，实现工具电极轴线与工件表面局部法矢的始终保持共线。如图3-2所示，图中显示了在加工过程中工具电极在曲面上姿态的变化规律和刀具与曲面的相对位置关系。

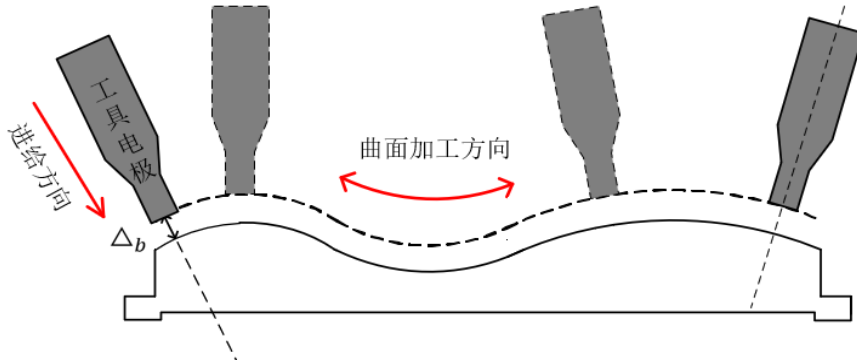


图 3-2 可变姿态电解铣削

该方法的加工间隙模型可表述为：

$$\Delta b = \frac{\Delta m}{\sigma} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial s} \cdot v_f \right)^2} \quad (3-2)$$

式中 $\partial \kappa / \partial s$ 为曲率沿路径方向的变化率。

在此过程下，加工路径始终沿曲面的法向方向，确保进给矢量与主曲率方向保持共线，从而将工具电极的两侧边缘与工件的相对倾角 θ 稳定控制在 5° 以内，在理想加工条件下，刀轴方向严格遵循曲面局部法矢方向，当刀具半径满足曲率约束条件时即可规避过切缺陷。这就极大限度的避免了加工间隙产生较大的波动从而对加工精度造成影响，同时放电过程完全在工具电极的表面与工件表面之间

进行,从而实现工具电极的均匀损耗并提高了放电效率。该策略通过刀具和曲面接触几何的精确定位,为机器人电解铣削系统的精度提升提供了理论支撑。

3.2 机器人位姿规划

在工业机器人可变姿态电解铣削加工复杂曲面的过程中,当加工路径已确定时,为确保加工精度与效率,需对工具电极姿态实施精准控制。在此过程中,插补算法的应用至关重要,规划尽可能多的插补点并导出其对应的位置和姿态信息,生成满足加工要求的工具电极运动轨迹,从而实现对复杂曲面的高精度电解铣削加工。

3.2.1 NURBS 曲线曲面建模

非均匀有理 B 样条曲线是 B 样条曲线的广义形式,其核心特征是通过引入权重因子实现曲线形状的局部调控^[62]。相较于 B 样条曲线(可视为所有权重相等的 NURBS 特例),NURBS 在几何建模中具有更强的灵活性,能够精确表示二次曲面与自由曲面。

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i P_i N_{i,p}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,p}(u)}, u \in [a, b] \quad (3-3)$$

式中主要包含三个要素:

控制点 $\{P_i\}_{i=0}^n$: 为 n 个空间控制点,构成曲线的几何形状;

权重因子 $\{w_i\}_{i=0}^n$: 为与各控制点关联的正实数权重,用于调节局部曲率分布;

基函数 $\{N_{i,p}(u)\}_{i=0}^n$: 为定义在非均匀节点矢量 U 上的 p 次 B 样条基函数。

非均匀节点矢量 u 由 m + 1 个节点构成,形式为:

$$u = \left[\underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right], m = n + p + 1 \quad (3-4)$$

其中首末节点满足 $u_0 = 0$ 与 $u_m = 1$,确保曲线端点插值特性。

通过归一化处理,可将式(3-3)改写为有理基函数组合形式:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u) P_i \quad (3-5)$$

其中:

$$R_{i,p}(u) = \frac{w_i N_{i,p}(u)}{\sum_{j=0}^n w_j N_{j,p}(u)} \quad (3-6)$$

式中 $R_{i,p}(u)$ 为有理基函数,其具有分段有理特性,且在参数域 $u \in [0,1]$ 且满

足 $\sum_{i=0}^n R_{i,p}(u) \equiv 1$ 。

将 NURBS 曲线向双参数空间拓展可得 NURBS 曲面，其在 u 和 v 参数方向上分别具有 p 次和 q 的数学表达形式如下：

$$\mathbf{S}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j} \mathbf{P}_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}, (u, v) \in [0, 1]^2 \quad (3-7)$$

$N_{i,p}(u)$ 和 $N_{j,q}(v)$ 分别为定义在非均匀节点矢量 U 和 V 上的 B 样条基函数：

$$\mathbf{u} = \left[\underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right], \text{其中 } r = n + p + 1 \quad (3-8)$$

$$\mathbf{v} = \left[\underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, v_{p+1}, \dots, v_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right], \text{其中 } s = m + q + 1 \quad (3-9)$$

通过归一化处理可将式 (3-7) 改写为：

$$R_{i,j}(u, v) = \frac{w_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m w_{k,l} N_{k,p}(u) N_{l,q}(v)} \quad (3-10)$$

简化后得到：

$$\mathbf{S}(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u, v) \mathbf{P}_{i,j}, (u, v) \in [0, 1]^2 \quad (3-11)$$

3.2.2 等步长法优化

机器人电解铣削曲面时，采用的加工轨迹由许多离散点构成，同一轨迹线上两相邻加工点之间的距离即为步长。传统等步长法采用固定间距的刀具路径规划，如图 3-3 所示，每段插补步长 l_1 始终保持一致，但未考虑不同的曲面几何特征的曲率变化，随着曲率的变化每段步长的弦高 ε 也会随之不断变化。当曲率变化明显时，就会导致弦高的大小发生突变，这会导致两个突出问题：一方面，在曲率突变区域易因步长过大产生表面残留（欠加工），形成波浪纹或阶梯效应；另一方面，在平坦区域因步长过小造成冗余加工（过加工），既增加空走刀时间又加速工具电极损耗，这种传统加工策略不仅影响表面粗糙度还会使加工效率降低 [63]。

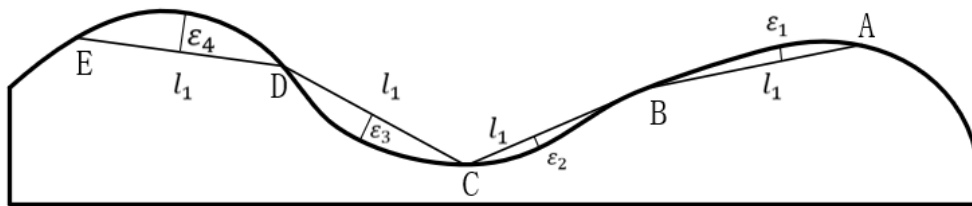


图 3-3 传统等步长法路径规划

在曲面铣削过程中，相邻刀触点间的走刀步长 l 需满足弦高误差要求。设 $[\varepsilon]$ 为允许弦高误差， R 表示沿走刀方向的曲面有效曲率半径。基于小步长假设，可近似认为相邻接触点处曲率半径 R_1 、 R_2 与有效曲率半径相等，即建立等效关系 $R = R_1 = R_2$ 。通过构建工具电极与曲面几何模型，可得弦高约束方程：

$$[\varepsilon] = R - \frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - L^2} \quad (3-12)$$

鉴于实际加工中曲率半径 R 与允许弦高误差 $[\varepsilon]$ 存在较大的差距，上式经过转换简化得到：

$$L = 2\sqrt{R^2 - (R - [\varepsilon])^2} \approx \sqrt{8R[\varepsilon]} = \sqrt{8R[\varepsilon]} \quad (3-13)$$

由此建立步长与几何参数的约束关系，为保证加工表面精度，实际加工步长需满足：

$$L \leq \sqrt{8R[\varepsilon]} \quad (3-14)$$

为了解决上述传统等步长法存在的问题，就需要对路径规划进行改进，当曲面的曲率半径在不断变化时，步长需要根据局部几何形状调整：在曲率半径较大的平缓区域，适当增大步长可提升加工效率；而在曲率半径较小的陡峭区域，则需缩小步长以保证表面成形精度。改进后的路径规划示意图如下图 3-4 所示，当 DE 两个插补点之间的弦高 ε_4 大于初始计算得到的允许最大弦高 $[\varepsilon]$ ，就在 DE 之间增加一个插补点 F，改进后新增的两个弦高 ε_5 和 ε_6 均小于允许最大弦高 $[\varepsilon]$ ，由此来消除因为工件曲率的变化而导致的弦高误差出现较大波动带来的影响。

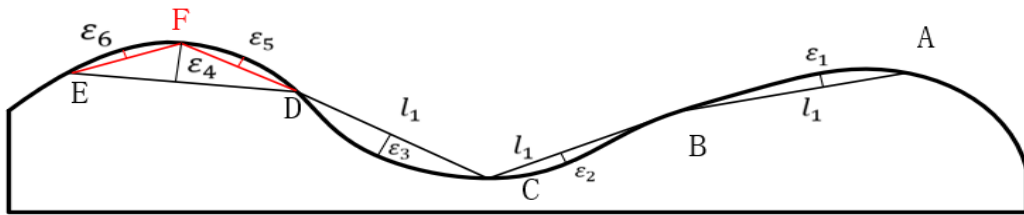


图 3-4 等步长法优化后示意图

在实际电解铣削加工过程中，先对生成的曲面加工路径做传统等步长法规划，生成出所有的插补点，然后计算出每两个相邻插补点步长对应的弦高 ε ，通过与允许最大弦高 $[\varepsilon]$ 进行比较来决定是否对每个相邻插补点之间增加插补点，对所有步长进行重复处理，最终完成整条加工路径的优化，具体的优化路径流程如下图所示 3-5 所示：

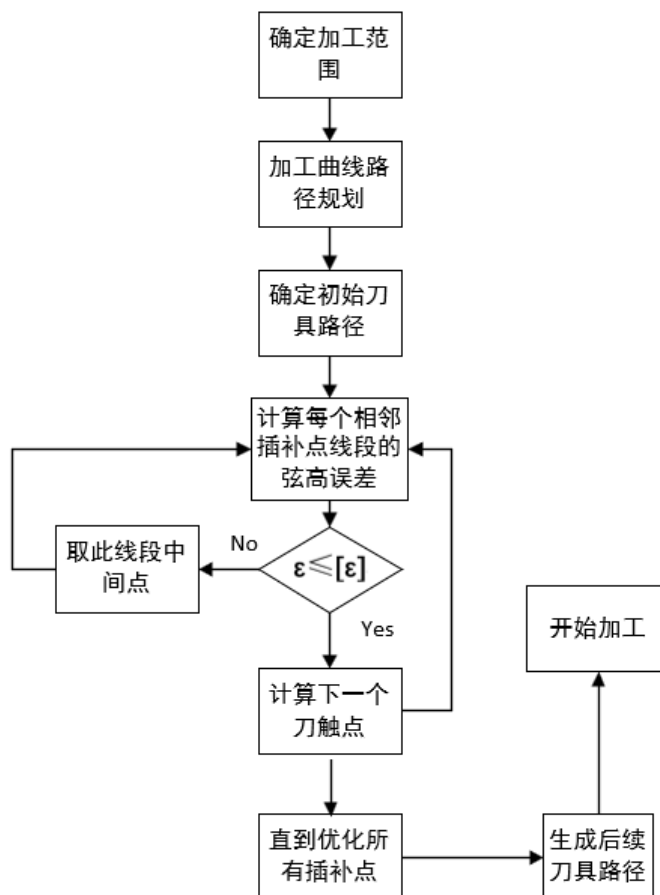


图 3-5 等步长法优化流程图

3.2.3 位姿信息规划

1. 位置坐标的获取

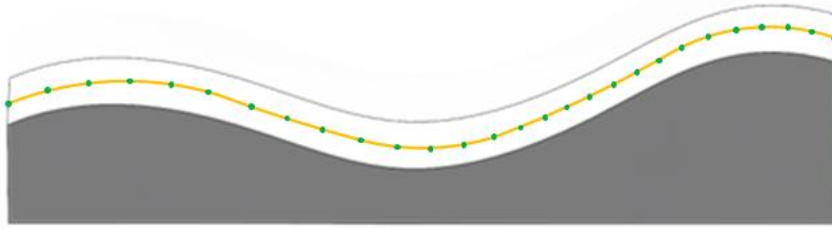
以下图所示的工件进行加工路径规划为例，首先根据工件形状构建满足几何约束的实体模型（图 3-6(a)），完成曲面建模后，按照曲面铣削的要求导入二维加工图案，生成符合曲面曲率特性的空间轨迹曲线，运用仿射变换算法调整图案尺寸及方位，确保其精确定位于曲面中心区域，见图 3-6(b)。在路径生成阶段，首先利用上节所述的等步长法改进方案对加工路径点进行规划，保证每两个加工路径点之间的弦高 ϵ 均小于允许最大弦高 $[\epsilon]$ ，为进一步满足加工精度，将连续轨迹按等参数化准则离散为尽可能多的路径控制点（图 3-6(c)），该离散密度经过计算可保证轨迹插补精度优于 0.05 mm，最终提取各路径点相对于工件坐标系原点的三维坐标数据集，输出格式为位置矢量矩阵，为后续机器人位姿计算提供基础空间数据。



(a) 工件三维模型构建



(b) 加工轨迹的确定



(c) 加工路径点的生成

图 3-6 机器人电解铣削路径规划

在电解铣削加工过程中,维持工具阴极与工件阳极间的极间间隙动态恒定是保证加工精度的核心控制要素。通过上述计算得到各个加工路径点的位置坐标后,需基于曲面几何特性对刀具路径进行法向补偿规划:针对曲面上任一插补点 $C_b(x_b, y_b, z_b)$, 沿其单位法向量 $\mathbf{n}(n_x, n_y, n_z)$, 该点的单位法向量为 $\mathbf{z}=(z_1, z_2, z_3)$, 偏移后的位置坐标计算如下:

$$\begin{cases} x_a = x_b + d * n_x \\ y_a = y_b + d * n_y \\ z_a = z_b + d * n_z \end{cases} \quad (3-15)$$

式中,法向量分量 n_x, n_y, n_z 需通过曲面参数方程的偏导数求解,具体表示为:

$$\mathbf{n} = \frac{\partial S / \partial u \times \partial S / \partial v}{\| \partial S / \partial u \times \partial S / \partial v \|} \quad (3-16)$$

通过此将理论加工轨迹沿法向扩展,确保极间间隙在曲面曲率变化时仍保持动态稳定,从而避免因局部电场强度失衡导致的过切或欠切现象。

2. 姿态信息的获取

由图 3-7 可知本研究中采用的工具电极可变姿态在每个路径点都有独立的姿态，在复杂曲面加工场景下，需建立姿态调整机制以满足曲面加工几何约束：工具电极轴线须与加工表面法矢方向保持共线。因此在铣削过程中需要给定每个插补点的姿态信息，即同步求解插补点的几何坐标与法向量参数。上式（3-15）已经得到了插补点的几何坐标，而其对应的法向量矩阵可通过曲面偏导矢的微分几何特性进行解析。

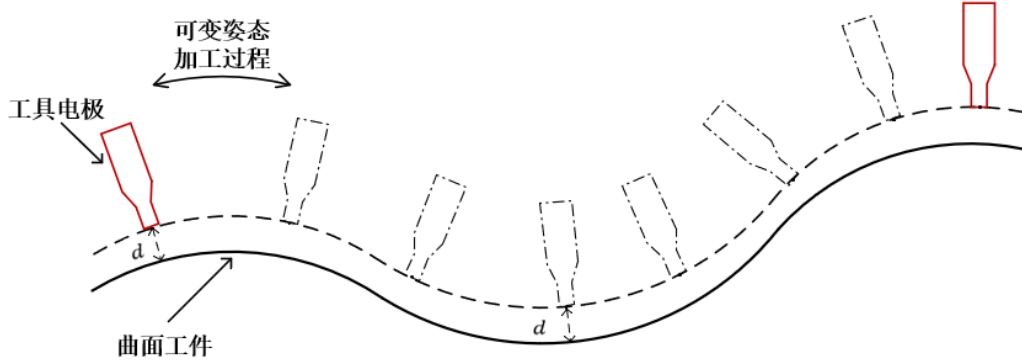


图 3-7 工具电极轨迹姿态

根据上式 3-5 把曲线方程改写成：

$$C(u) = \frac{w(u)C(u)}{w(u)} = \frac{A(u)}{w(u)} \quad (3-17)$$

对其求导得：

$$\begin{aligned} C'(u) &= \frac{w(u)A'(u) - w'(u)A(u)}{w^2(u)} \\ &= \frac{A'(u) - w'(u)C(u)}{w(u)} \end{aligned} \quad (3-18)$$

其中：

$$\begin{aligned} A^{(k)}(u) &= (w(u)C(u))^{(k)} \\ &= w(u)C^{(k)}(u) + \sum_{i=1}^k \left(\frac{k}{i}\right) w^{(i)}(u)C^{(k-i)}(u) \end{aligned} \quad (3-19)$$

通过 Leibniz 微分法则推导，可建立曲线 k 阶导矢的递推关系式：

$$C^{(k)}(u) = \frac{A^{(k)}(u) - \sum_{i=1}^k \left(\frac{k}{i}\right) w^{(i)}(u)C^{(k-i)}(u)}{w(u)} \quad (3-20)$$

在机器人电解铣削加工过程中，刀具位姿参数由插补点坐标 (x, y, z) 及其法向量 (n_x, n_y, n_z) 共同构成六自由度控制量。通过上式（3-20）所述导矢

递推算法计算各插补点偏导矢矩阵继而结合上式（3-15）中工具的插补点位置坐标，然后可通过 MATLA 的程序完成计算：

$$\begin{aligned} x &= [\text{skl}\{3\}(1), \text{skl}\{3\}(2), \text{skl}\{3\}(3)] / \text{norm}([\text{skl}\{3\}(1), \text{skl}\{3\}(2), \text{skl}\{3\}(3)]) \\ y &= [\text{skl}\{2\}(1), \text{skl}\{2\}(2), \text{skl}\{2\}(3)] / \text{norm}([\text{skl}\{2\}(1), \text{skl}\{2\}(2), \text{skl}\{2\}(3)]) \\ z &= \text{cross}(x, y) / \text{norm}(\text{cross}(x, y)) \\ y &= \text{cross}(z, x) / \text{norm}(\text{cross}(z, x)) \end{aligned}$$

由此就确立了机器人可变姿态电解铣削路径规划过程中的位置和姿态信息，然后将其编写成脚本导入到机器人控制器中进行插补规划生成最终的加工路线。

3.3 加工间隙伺服控制策略

在电解加工中，极间间隙的动态稳定性直接决定加工精度与表面质量^[64]，但其受机器人误差，电场特性、电解液参数及加工轨迹误差等多因素共同作用，在加工过程中会产生实时波动，传统恒定参数策略因无法实时反馈实际间隙值而存在间隙补偿滞后性。本节针对现有间接控制法难以匹配加工区动态特性的问题，提出基于工业机器人的加工间隙伺服控制策略，通过轨迹误差补偿机制实现加工间隙的稳定控制。

3.3.1 机器人误差模型建立

机器人 B 样条曲线轨迹控制误差的产生主要源于静态和动态两方面的因素^[65]。静态误差^[66]主要由机器人本体的结构参数、运动变量以及环境条件的变化引起，例如关节角度误差、温度波动和湿度变化等，这些因素会导致机械连接杆的尺寸和位置发生变化，进而影响机器人的位姿精度。动态误差^[67]则是在机器人运动过程中实时产生的，通常由外部载荷、惯性力以及重力等因素引起，导致连杆和关节发生弹性变形或振动，从而影响轨迹控制的准确性。以 D-H 参数模型为例，当众多误差存在时，末端执行器的位姿误差可通过微分运动学模型量化：

$$\Delta P = \sum_{n=1}^6 \left(\frac{\partial U}{\partial b_n} \Delta b_n + \frac{\partial U}{\partial \gamma_n} \Delta \gamma_n + \frac{\partial U}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n + \frac{\partial U}{\partial c_n} \Delta c_n \right) + \mathcal{O}(\Delta^2) \quad (3-21)$$

针对六自由度工业机器人，本研究基于 MD-H 数法构建其运动学模型。通过定义相邻连杆坐标系间的几何关系，采用连杆长度 b_n 、扭转角 γ_n 、关节转角 θ_n 及关节偏距 c_n 等参数描述机械臂各关节的相对位姿。

$$T_{n-1}^n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \gamma_n & \sin \theta_n \sin \gamma_n \\ \cos \gamma_n & \sin \theta_n & \cos \theta_n \sin \gamma_n \\ \sin \gamma_n & \cos \gamma_n & c_n \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

在几何不变特性的框架下，机器人系统的静态偏差主要包括连杆尺寸偏差 Δb_n 、连杆角度偏差 $\Delta \gamma_n$ 、关节角度误差（ $\Delta \gamma_n, \Delta \theta_n$ ）及关节偏距误差 Δc_n 。设机器人末端在基坐标系下的理论位姿为 P^d ，实际位姿为 P^r ， ΔP 是定位误差，则其笛卡尔空间轨迹误差可定义为：

$$P^d = U(b_n, \gamma_n, \theta_n, c_n) \quad (3-23)$$

$$P^r = U(b_n + \Delta b_n, \gamma_n + \Delta \gamma_n, \theta_n + \Delta \theta_n, c_n + \Delta c_n) \quad (3-24)$$

联立得：

$$\Delta P = \| P^d - P^r \|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^6 (p_i^d - p_i^r)^2} \quad (3-25)$$

进一步考虑动态载荷引起的柔性变形^[68]，建立关节力矩 τ 与形变误差 δ 的线性关系模型：

$$\delta = C_\theta \cdot \tau + C_d \cdot \dot{\tau} \quad (3-26)$$

其中 C_θ 为静态柔度矩阵， C_d 为动态柔度矩阵。对于传动部件，其迟滞效应导致的相位误差可表示为：

$$\Delta \phi = \arctan \left(\frac{\text{Im}(H(\omega))}{\text{Re}(H(\omega))} \right) \quad (3-27)$$

式中 $H(\omega)$ 为传递函数，该相位误差会直接造成轨迹跟踪的时间滞后。

由上述分析可知，机器人位姿误差由参数偏差与动态柔性变形的共同效应导致。若直接对二者进行联合建模，将显著增加 B 样条轨迹控制误差分析的复杂性。而在电解铣削加工中，极间间隙的稳定性不仅影响电化学反应的均匀性，还决定了流场与电场的动态平衡状态。为此，本研究提出一种法向间隙动态补偿策略，通过实时修正工具电极位姿，抑制多源误差对加工间隙的干扰，最终实现曲面加工精度与效率的协同优化。

3.3.2 加工间隙控制理论模型

机器人电解铣削曲面模型如下图3-8所示，基于以下假设进行模型分析：（1）阴极与阳极表面均为理想光滑状态，同时电解质溶液呈现低黏度特征，将加工间

隙内的电解质流动状态简化为层流模型；（2）基于电解质物理特性均匀恒定的前提；（3）加工区域尺寸显著大于极间间隙，边界电场畸变效应可忽略。（4）该模型建立在系统达到稳定平衡的条件下（即间隙由间隙中的电解质体积决定）。

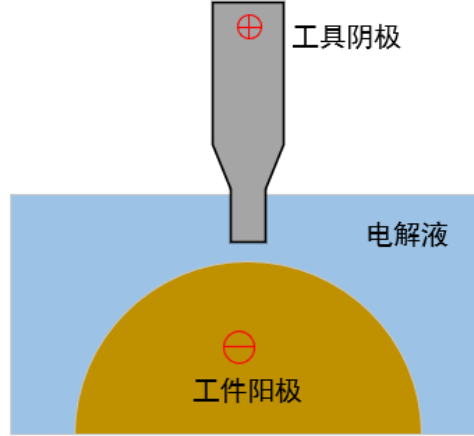


图 3-8 机器人电解铣削曲面模型

根据法拉第第一定律和欧姆定律，可以得到阳极表面的法向去除速度方程为：

$$v_n|_{r_4} = \eta \omega i \quad (3-28)$$

式中 η 为电流效率； ω 为阳极金属的体积电化学当量， i 为电流密度，

机器人法向加工间隙基本方程为：

$$\Delta_{IEG} = \frac{\eta \omega \sigma_l (U - \delta E)}{v_n} \quad (3-29)$$

式中 U 为阴阳极之间的电压； δE 为阴阳极化电位的总和； σ_l 为电解液电导率。

根据电流密度的定义式：

$$i = \frac{I}{S} \quad (3-30)$$

式中 I 为加工电流； S 为阴极截面面积。

在电化学加工过程中，电化学液电导率除了受电化学液浓度和温度的影响，反应产生的气泡对电化学液也产生影响，如下式：

$$\sigma_l = \sigma_0 (1 - \beta_g)^{b_p} [1 + \gamma(T - T_0)] \quad (3-31)$$

式中 σ_0 为电化学液初始电导率， γ 为温度相关系数， T 为电化学液温度， T_0 为电化学液初始温度， β_g 为气体体积分数， b_p 为气泡率对电导率的影响指数。

根据上式关系可知，电解液电导率与温度呈正相关关系。在曲面加工过程中，工具电极的空间位姿变化将引起电导率场分布的变化，多因素的共同作用下导致加工间隙内电解质电导率呈现非均匀分布特征。因此，为准确描述间隙内电

导率分布特性,需针对工具电极在不同加工位姿下的电导率场进行稳态条件下的空间平均计算。

由于加工姿态在空间上分布不均匀,将工件表面分割为一系列小区域,将间隙区域划分为多个小区域,分别测量每个区域的电导率和该区域的大小,然后计算加权平均电导率:

$$\langle \sigma_I \rangle_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \sigma_I dA_i}{A_1 + A_2 \cdots A_n} \quad (3-32)$$

式中 Ω_1 、 Ω_2 为每个小区域边界定义域, A_i 为极间间隙表面离散化后的微元面积。

通过计算每个微元面积上的电导率积分值,并对所有积分结果进行求和,并将总和除以工件表面总面积,即可求得间隙区域的加权平均电导率值。

联合上式,则加工电流 I 与法向加工间隙 Δ 关系式为:

$$\Delta_{IEG} = \frac{\sigma_I (U - \delta E) S}{I \cos \theta} = \frac{C}{I} \quad (3-33)$$

在机器人电化学铣削中,施加的电压、极化电位值、阴极截面面积和极间平均电导率均可得出,进而认为 C 是常数,理论分析表明,加工间隙大小与加工电流呈现反比关系,该关系为基于电流控制的电化学铣削加工间隙提供了理论依据。

3.3.3 间隙补偿系统数学模型

如图 3-9 所示,自主设计的法向加工间隙补偿装置其核心组件由伺服电机、减速器、高精度滚珠丝杠副及直线运动工作台构成闭环控制系统。图中各物理参数定义如下: T_m 表示电机输出轴扭矩, θ_m 为电机转子角位移, T_i 表示经减速器传递至丝杠输入端的有效扭矩, θ_i 对应丝杠输入轴角位移; θ_s 表征丝杠输出端角位移; i 为减速器传动比。

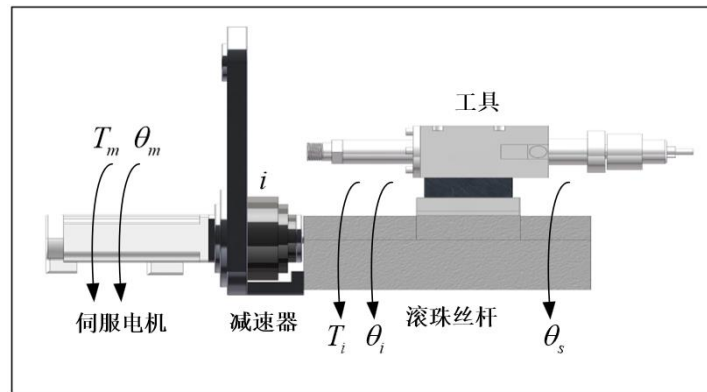


图 3-9 加工间隙补偿装置

整个系统的电机轴刚度 K_{eq} 为:

$$K_{eq} = \frac{1}{1/K_s + (P_b/2\pi)^2/K_0 + 1/K_c} \quad (3-34)$$

式中 K_s 为滚珠丝杠转动刚度, K_0 为滚珠丝杠拉压、螺母、轴承的等效刚度, K_c 为联轴器的刚度。

丝杠转动惯量 J_{eq} 为:

$$J_{eq} = J_0 + J_s \quad (3-35)$$

式中 J_s 为丝杠的转动惯量, J_0 为工作台向滚珠等效转动惯量。

阻尼系数 B_{eq} 为:

$$B_{eq} = B \left(\frac{P_b}{2\pi} \right) \quad (3-36)$$

式中 B 为丝杠和工作台之间直线运动的速度阻尼系数。

建立动力学模型如下^[69]:

$$\begin{cases} T_m = J_m \ddot{\theta}_m + T_i/i \\ \theta_m = i\theta_i \\ T_i = K_{eq}(\theta_i - \theta_s) \\ T = J_{eq} \ddot{\theta}_s + B_{sq} \dot{\theta}_i \end{cases} \quad (3-37)$$

可知工具电极的位移补偿量 δ 与电动机输出转角 q_m 成正比, 即:

$$\begin{cases} \delta = K_1 \theta_m \\ \omega = \dot{\theta}_m \\ K_1 = \frac{1}{2P_s \pi i} \end{cases} \quad (3-38)$$

3.3.4 基于电流信号的间隙自动控制方法

如图 3-10 所示, 由上述分析可知, 在机器人电解铣削加工过程中, 由静态参数偏差与动态柔性变形共同效应导致的机器人位姿误差会使得加工过程中极间间隙产生偏差, 对加工精度和加工效果产生影响。因此工具电极与工件间的放电间隙需依据放电状态进行动态调节, 这要求工具电极具备进给和回退的运动能力。控制系统通过电流状态监测系统和末端执行器对工具电极在工件法线方向上进行伺服控制, 进而实现对法向加工间隙的快速调整, 确保电解铣削加工轨迹的稳定性。当加工系统进入间隙稳态控制阶段, 电流误差信号 $\Delta I = 0$ (对应间隙维持的设定阈值); 此时, 输入电流 I_p 归零且执行机构转角 θ_c 稳定于初始相位, 实现加工间隙的闭环稳定控制。

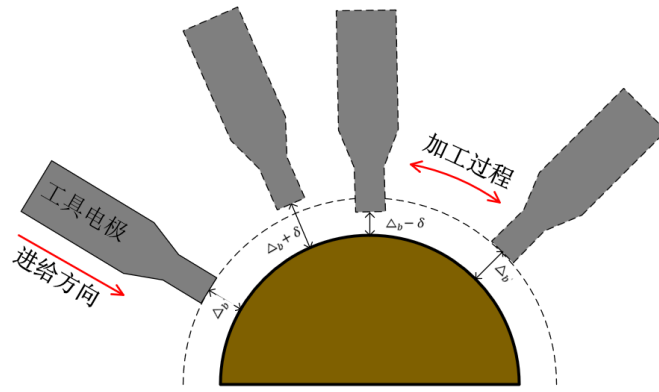


图 3-10 机器人电化学铣削加工平曲面示意图

下图 3-11 所示为基于电流信号的电解铣削加工过程间隙控制流程示意图。首先，依据预设加工间隙完成工件阳极与机器人末端工具阴极的定位安装，形成初始加工间隙。然后根据曲面铣削加工初始设定的法向间隙 Δ_{IEG} 计算出理论加工电流 I_n 并输入到机器人控制模块中。加工过程中，霍尔传感器实时采集加工电流信号，控制模块将其与预设理论电流 I_n 进行比对。当检测到的电流 I_{now} 大于理论电流值 I_n 时，表明当前的法向加工间隙大于初始设定间隙 Δ_{IEG} ，则计算偏差电流 ΔI 并推导出误差量 δ ，驱动末端执行器实施正向补偿使加工间隙回到 Δ_{IEG} ，反之，当检测电流 I_{now} 小于理论电流值 I_n 时，则进行负向补偿使间隙恢复至 Δ_{IEG} 。通过该闭环控制系统的持续调节，可在机器人动态误差影响下实现法向加工间隙的自动控制，确保电解加工过程保持在一个稳定的法向加工间隙。

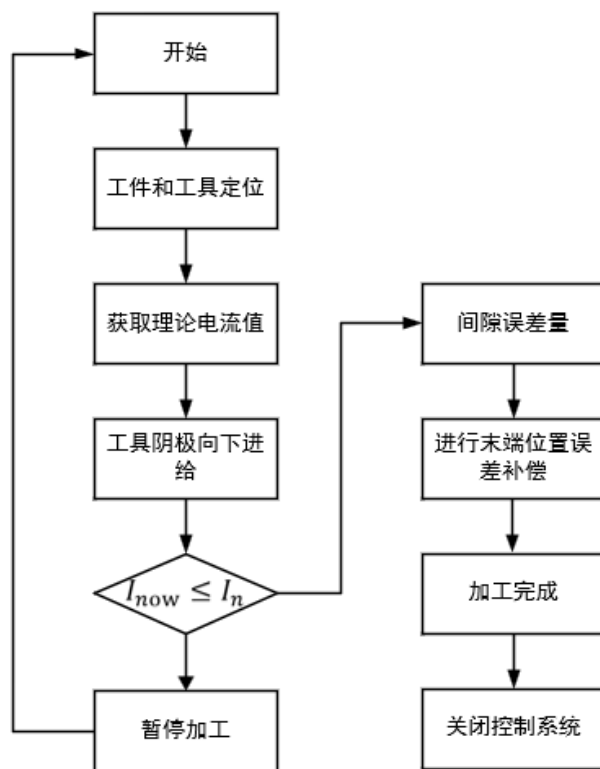


图 3-11 基于电流信号的电解铣削加工间隙控制流程

若在加工过程中根据加工效果想主动调节加工间隙，仅需调整输入初始电流信号 I_n 实现加工间隙的主动控制。当需要减小加工间隙时，只需提高 I_n 的幅值，使误差电流 $I_E = I_{n2} - I_{n1} > 0$ ；随后，控制系统将启动间隙调节机制，使加工间隙逐步趋近于调整后 I_{n2} 所对应的新设定值 Δ_{IEG2} 。

3.4 本章小结

本章针对工业机器人电解铣削复杂曲面加工中的轨迹规划与间隙控制难题，首先在加工策略方面，对比分析了固定姿态与可变姿态电解铣削的工艺特性，揭示了法矢共线姿态调控对提高加工精度的关键作用；然后基于 NURBS 曲面参数化建模方法提出了曲率自适应的改进型等步长规划算法，通过弦高误差约束机制实现轨迹密度的动态优化，从而完成复杂曲面加工的轨迹规划；最后提出了基于电流反馈的法向间隙伺服控制策略，通过建立电导率场加权平均模型与闭环补偿系统动力学方程，从而实现电解加工过程中的间隙自动调整，为复杂曲面精密电解加工提供了兼具理论深度与工程适用性的解决方案。

第4章 机器人电解铣削加工系统设计

工业机器人与电解铣削技术相结合的机器人电化学铣削技术,为解决复杂曲面零件的多轴联动加工提供了创新途径。本研究搭建了一套面向复杂曲面加工的智能化机器人电解铣削加工系统,这套系统能够在机器人误差影响下实现极间间隙实时调控和复杂曲面的加工轨迹规划,为复杂曲面的加工带来更高的精度和效率。

4.1 加工系统总体方案设计

针对机器人电解铣削曲面加工系统的设计需求,其总体技术要求应满足以下要素:

(1) 多自由度运动系统: 需具备六自由度工业机器人本体,其运动学模型应支持非正交基坐标系下的位姿算法。

(2) 对刀系统和短路保护功能: 工具阳极和工件阴极之前的初始相对位置关系需要用对刀功能来确定,其中对刀电流信号的实时反馈直接影响位置校准精度,电流响应时延越短,系统制动速度越快,位姿补偿效能越优。同时当加工过程中阳极和阴极直接接触时候触发短路报警机制,要求此时系统通过通信同步发送急停指令,迅速切断电源并使得机械臂急停,从而保障电化学反应的过程安全且稳定。

(3) 电解液循环系统: 需建立温度调控模块以维持电解液热稳定性,温度对加工过程的稳定性有重要的影响;系统应具备电解液循环清洁度维持能力,需配置多级过滤单元实现电解液在线净化,有效分离加工产物与悬浮杂质,从而为电化学加工提供稳定的物化环境条件;能根据工艺需求适配不同的流速与压力参数,确保加工区域电解液更新效率。

(4) 电流监测和间隙补偿系统: 能够实时监测并解析加工过程中的电流波动特征,并且通过电流信号-间隙的实时函数关系转换成成轴向补偿指令,驱动末端执行器实现间隙误差的动态校正。

(5) 机器人编程系统: 利用工业机器人进行电解铣削加工时,在完成加工路径的规划与优化后,需通过轨迹插补技术将离散路径点序列转换为连续运动指令,运用关节空间插补实现加工起始位姿的快速定位。加工执行阶段则依据工艺时序要求,调用不同插补模式驱动机械臂完成预定轨迹运动,确保放电加工过程

中电极与工件的相对运动精度。

为了符合以上要求，本论文对机器人电解铣削加工系统方案设计如下图 4-1 所示：

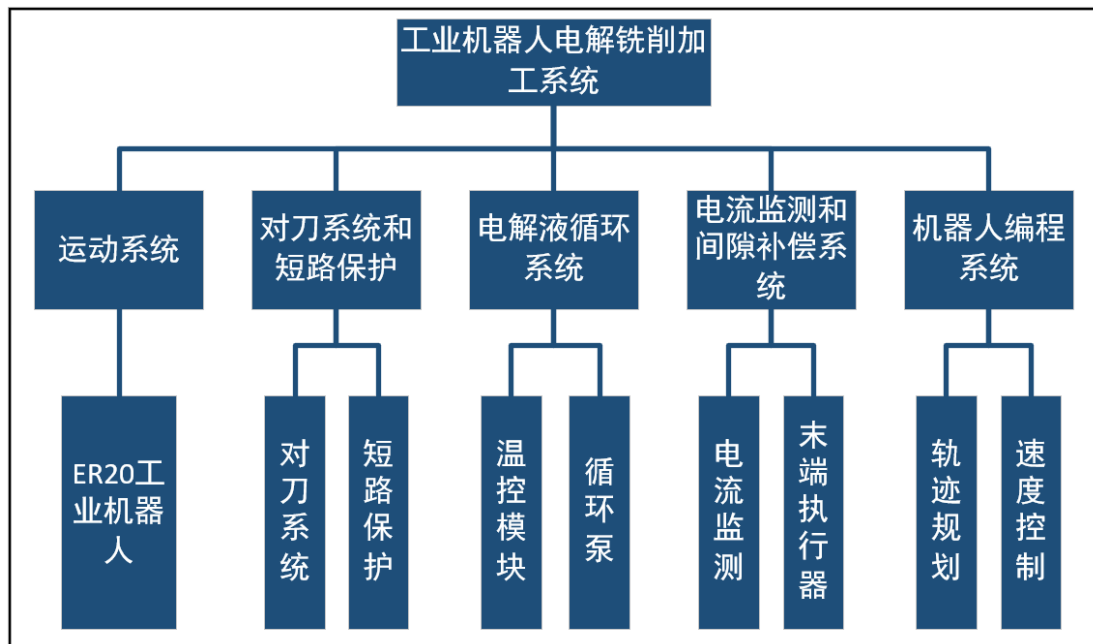


图 4-1 机器人电解铣削加工系统设计

图 4-2 为工业机器人电化学铣削加工系统原理示意图，机器人电解铣削加工系统由运动控制模块和电化学加工模块共同构成。运动控制模块包括六自由度机器人本体、示教编程装置及机器人控制柜，运动控制模块主要负责工具电极加工路径的位姿控制，通过将可变姿态加工过程中工具电极的空间位姿参数转化为可执行代码并加载至控制系统，由此来控制加工过程中的工具位姿。电化学加工系统由电解液循环系统，末端执行装置，脉冲电源柜和伺服驱动器组成，其中末端执行装置通过法兰与机器人末端连接，其核心组件包含高精度伺服驱动单元、自适应夹具系统以及多自由度调节机构。加工过程中脉冲电源柜提供脉冲电流参与加工，电解液循环系统输送电解液通过管电极内冲液参与电解反应，同时通过在线电流检测系统中内置的霍尔传感器实时采集加工回路的电信号参数，基于电流-电导率转换模型动态转换成加工间隙值，并由运动控制器向伺服系统发送补偿指令，驱动末端执行装置实现工具电极的加工间隙在线调节，从而有效保障加工过程的稳定性。图 4-3 为工业机器人电化学铣削加工系统实物图。

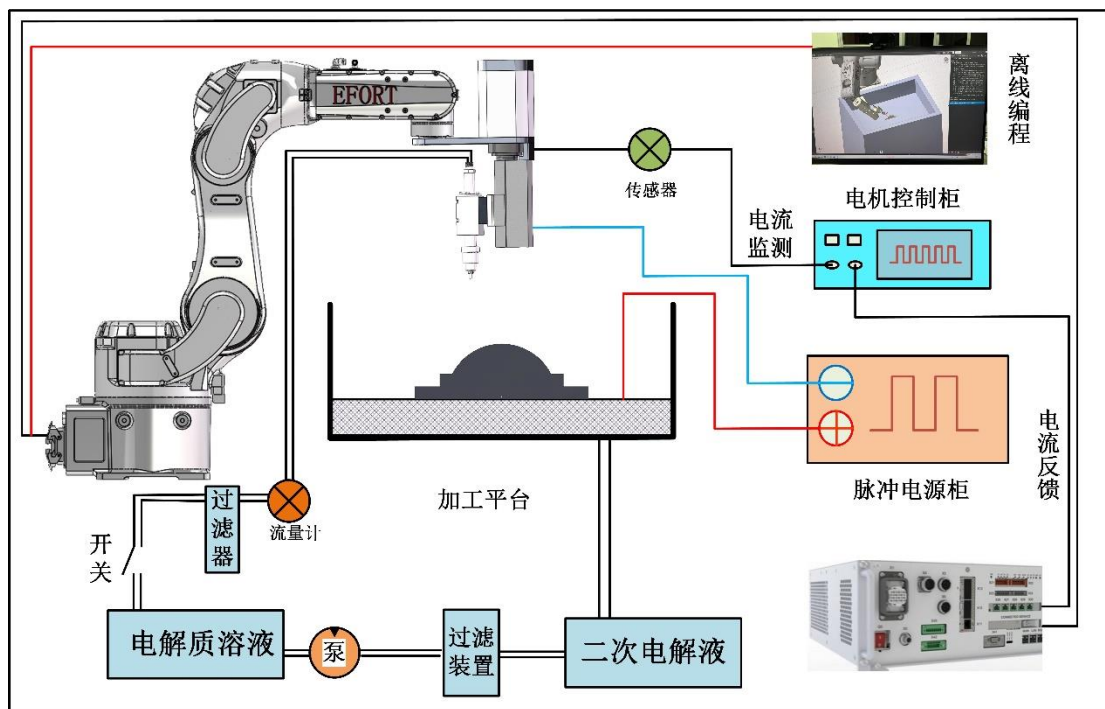


图 4-2 工业机器人电解铣削加工系统原理示意图



图 4-3 工业机器人电解铣削加工系统实物图

4.2 运动系统

机器人电解铣削加工实验平台的运动控制系统由六自由度工业机械人、运动控制柜及机器人示教器三部分构成。该系统主要是由工业机器人末端负责驱动工具电极完成复杂三维轨迹运动，因此其选型需综合评估尺寸参数、负载能力、运动自由度及定位精度等关键指标。经过技术参数对比分析，最终选定埃夫特

ER20-1100 型六轴工业机器人作为核心设备，该设备具备紧凑型机械结构、高重复定位精度及有效载荷 20 kg 等技术特性，可满足电解加工过程中电极运动轨迹的精确控制需求。运动系统架构如图 4-4 所示，详细技术规格参见表 4-1 所列参数，机器人控制系统通过专用控制柜实现运动指令解析与驱动，配合示教编程终端完成加工路径的离线规划与实时监控，同时机器人控制柜可以外接伺服设备和 PLC 等装置，配合工业机器人完成多种条件下的加工需求。

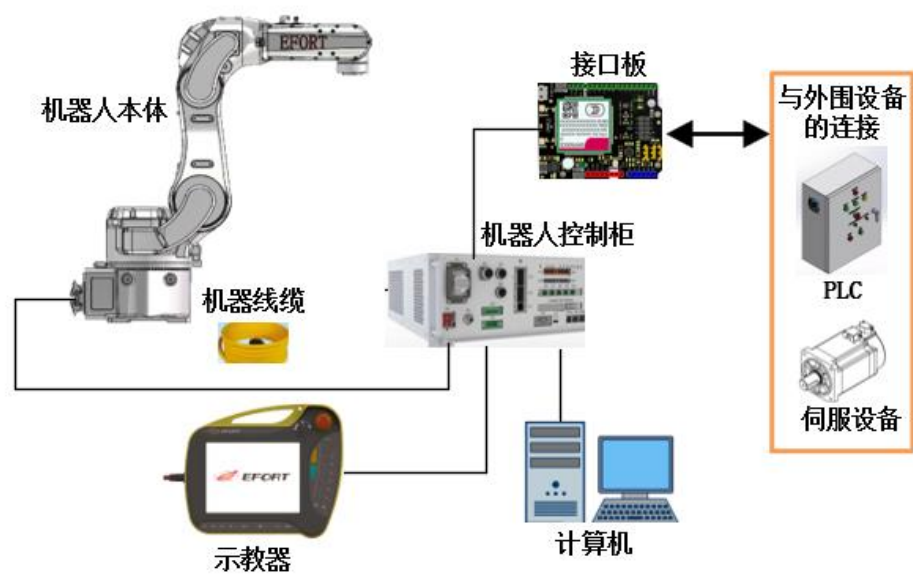


图 4-4 机器人运动系统组成图

表 4-1 机器人技术参数

参数	含义
机器人本体重量	145 kg
手腕可负载重量	20 kg
工作半径	1143 mm
重复定位精度	±0.03 mm
控制柜防护等级	IP20/IP54（选配）
本体防护等级	IP65/IP67（手腕）
驱动方式	AC 伺服驱动

4.3 对刀系统和短路保护

4.3.1 高频脉冲电源

在电解加工中，高频脉冲电源^[70]的应用对工艺性能提升具有重要作用，其通过输出高频脉冲电流，在“通电—断电”的周期性循环中显著降低了电解液的浓差极化效应，从而提高了金属溶解的均匀性和加工精度，同时通过灵活调节脉冲宽

度、频率及占空比等参数，能够有效优化工件表面质量，减少过溶解或不均匀溶解现象，获得更精细的表面光洁度。此外，高频脉冲电源在断电间隙时间内使电解液离子浓度得以恢复，不仅提高了电流效率，还降低了能耗，实现了节能高效的目标，周期性脉冲作用还能防止电极表面钝化，延长电极使用寿命并增强加工稳定性。图 4-5 为自主研发的 MKXF-100/25 高频脉冲电源柜，具备多维度调节能力与宽域调节特性，设备峰值脉冲电流达 100 A，支持双量程电压调控（0-5 V 和 0-50 V）模式，占空比连续可调，高频脉冲电源电路图如图 4-6 所示。其参数配置灵活性可适配不同导电材料的加工需求，通过调节脉宽、频率及能量密度的协同关系，有效解决了传统电解加工中能量分布不均与热效应累积问题，电气结构介绍如下：

①结构参数。整机采用紧凑型设计，外形尺寸 1000×600×800 mm（不含移动轮组件高度），满足工业现场空间限制要求。

②主控单元布局。电源柜后侧配置主电路控制模块，包含三相交流输入断路器及主接触器。上层功能区包括同步变压器、电源变压器、脉冲触发模块、斩波控制器及继电器组等核心元件。

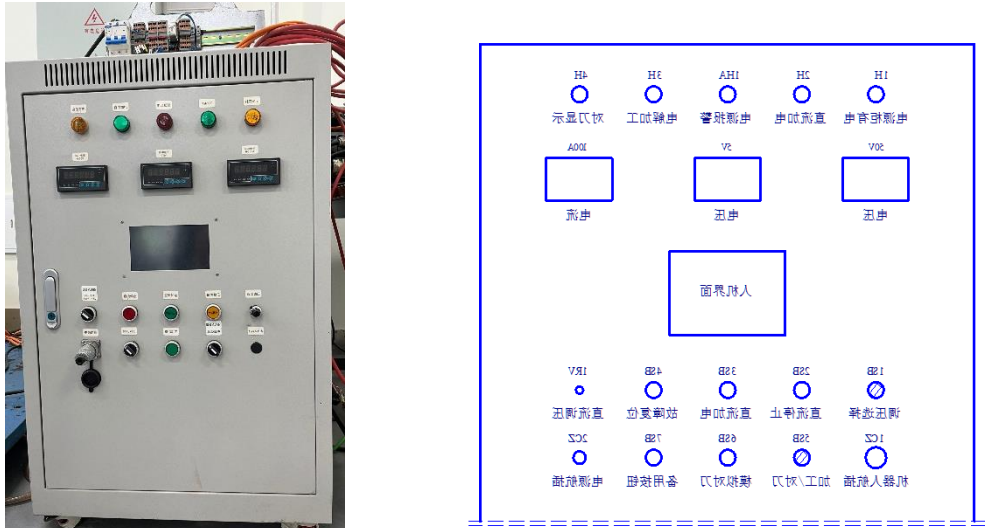
③功率器件配置。后部安装区设置两组三相桥式共阳极晶闸管模组，整流输出回路串联快熔保护器件，同区域安装 IGBT 斩波功率单元，直流正极母线配置闭环电流检测模块（霍尔传感器输出 0-100 mA DC 标准信号）。

④前端控制单元。柜体前部设置专用控制板组，主要安装刀具检测电路、微型继电器阵列、开关电源模块及信号接口端子，实现设备信号交互与供电管理。

⑤输出回路设计。直流负极母线通过分流器连接负载端，并与 IGBT 发射极形成等电位连接，构建完整的功率输出路径。

⑥人机交互界面。操作面板由触摸式 HMI、数显仪表、状态指示灯及调节旋钮，顶部设置三色 LED 工况指示系统（红/绿/黄），实时显示电源运行状态。

⑦能量转换核心。柜体中央垂直安装三相干式整流变压器，作为交直流能量转换的核心部件。



(a) 脉冲电源柜实物图 (b) 脉冲电源柜面板布置图

图 4-5 MKXF-100/25 高频脉冲电源柜

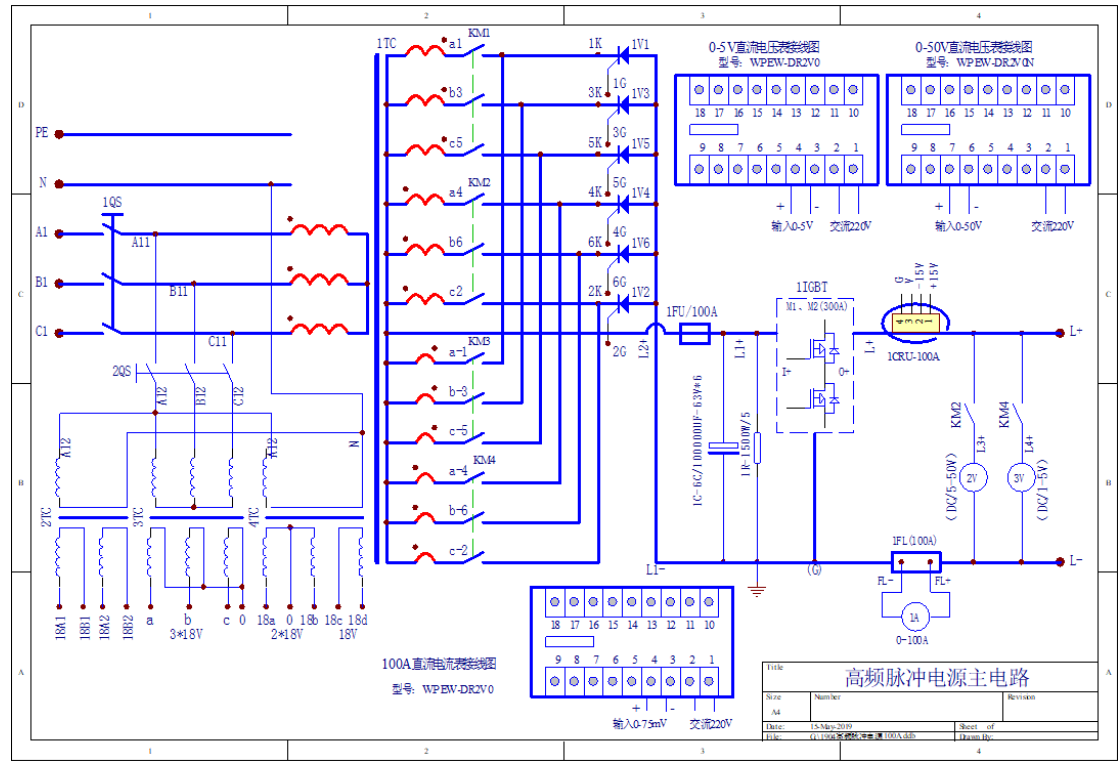


图 4-6 高频脉冲电源电路图

4.3.2 对刀系统

本系统采用接触式短路检测原理实现加工基准标定，其核心由多模态检测电路、高精度信号采集模块及智能反馈控制单元构成。加工系统通过 24 V 直流电源构建检测回路，在工具阴极与工件阳极接触瞬间，精密采样电阻两端产生的电压经过模拟输入模块转换为电流信号，并通过可编程增益调节实现微电流检测。操作流程中，机器人末端法兰搭载管状电极沿 Z 轴进行接触式定位，当极间间隙

趋近零时，运动控制器实时比对检测电流与预设阈值触发三色 LED 状态指示器进行工况反馈（绿灯-正常/红灯-短路/黄灯-对刀）。对刀系统电路原理图如下图 4-7 所示，系统通过 IO 信号交互实现模式切换：电源模块向控制器发送对刀启动信号后，机器人执行低速趋近运动，短路报警触发时自动回退至预设间隙并切换加工模式。

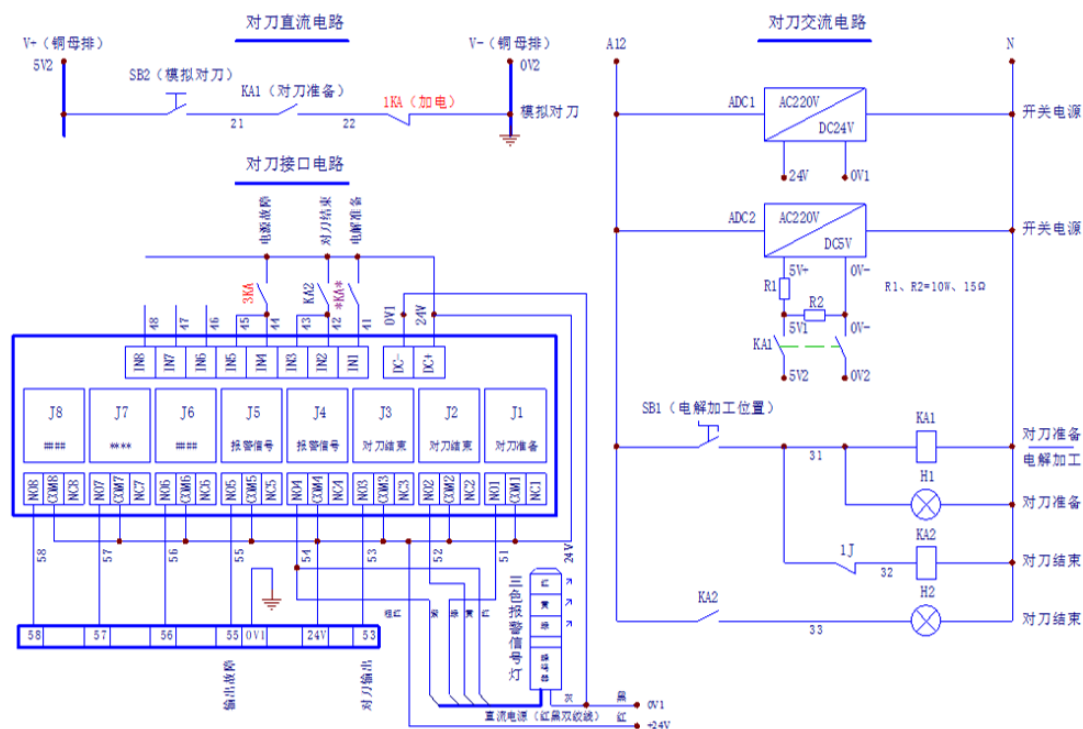


图 4-7 对刀系统原理图

对刀具体步骤如下图 4-8 所示，加工系统采用机械臂末端安装管电极装置，通过法兰连接实现工装快速定位。操作时，首先借助机器人示教编程界面驱动机械臂沿笛卡尔坐标系 Z 轴执行精确向下位移，然后当极间间隙趋近零时，运用接触式短路检测技术构建工件坐标系基准，基于示教器显示的 Z 轴坐标数据，实时解析电极阴极与工件阳极的空间相对位置，最后通过末端执行器的位置向上微调实现加工间隙标定，即对刀完成。

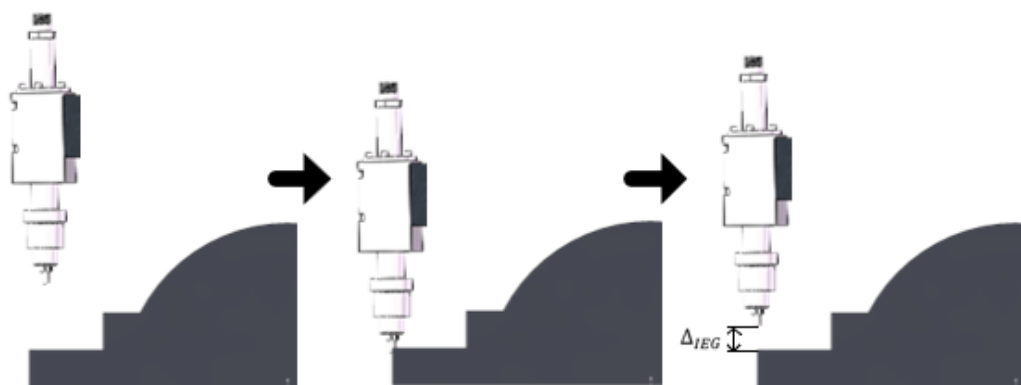


图 4-8 对刀步骤

4.3.3 短路保护

在电解加工过程中，由于是非接触式的加工方式，当工具电极进给过快时，就会很容易出现直接接触的短路现象，因此必须在加工系统中设置短路保护以保障加工安全性和稳定性，短路保护电路图如下图 4-9 所示，本系统中短路保护主要分为两个模块：

A、直流保护单元：当检测到直流供电系统出现过负荷或短路故障时，电流取样元件 FL 两端电压会超过 75 mV 阈值。该信号经运算放大器进行信号调理后输入电压比较器，触发保护逻辑电路立即动作。保护系统采用双重响应机制：一方面在 1 个工频周期内快速切断晶闸管的触发脉冲，实现功率器件阻断；另一方面向交流控制单元发送高电平指令，经 0.5-1 秒延时后，通过中间继电器执行电源切断操作，并同步激活声光报警装置。这种双重保护机制确保了系统在毫秒级时间内实现两级安全防护。

B、脉冲电源防护模块：针对脉冲输出端的异常工况，系统配置了四线式霍尔传感器实时监测。当负载出现故障电流时，传感器次级绕组会产生超过 5 V 的直流检测电压。该故障信号通过高速电压比较器 LMV7235 与可编程逻辑器件 GAL16V8 协同处理，直接向 IGBT 驱动端发送关断指令。整个保护过程响应时间不超过 0.1 ms，确保功率器件在极短时间内实现电气隔离。这种直连式快速关断机制有效规避了微处理器处理延迟，显著提升系统可靠性。

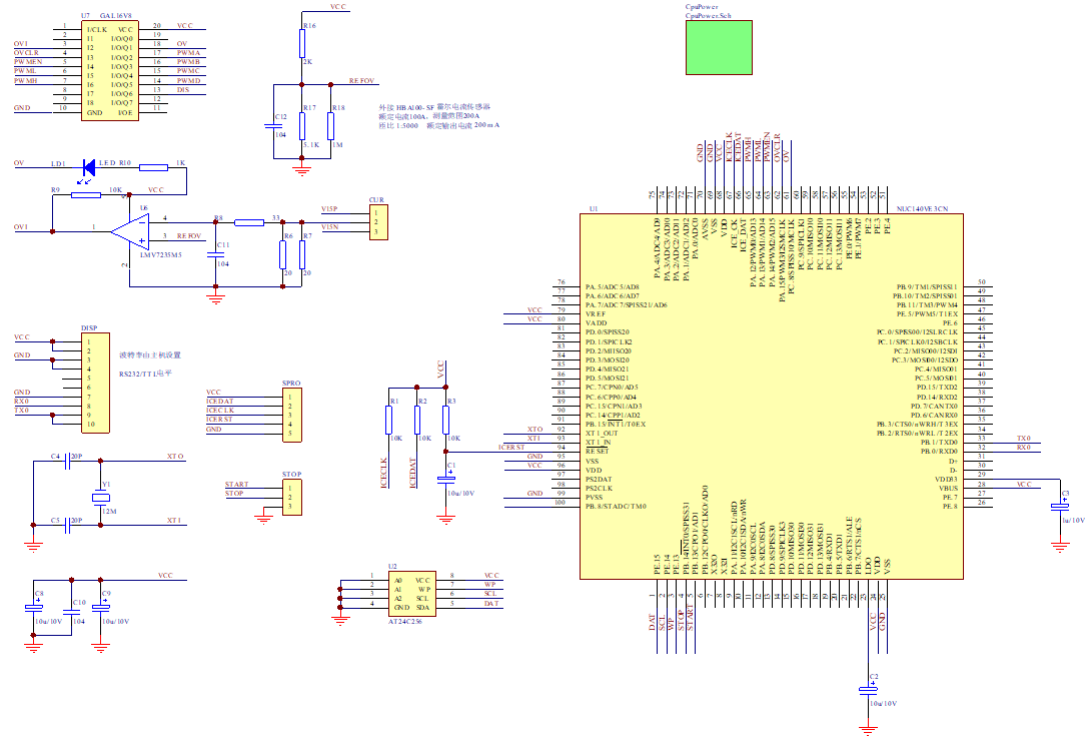


图 4-9 短路保护电路

4.4 电解液循环系统

电解液循环系统是电解加工中的核心装置，本文采用 20%硝酸钠溶液作为电解液，需重点考虑其电导率温度敏感性及腐蚀特性。如图 4-10 所示，电解液循环系统由恒流计量泵、多级过滤装置、流量计及密封管等构件组成，其中计量泵用以配合 PID 调节器实现精密流量控制，泵具体性能参数见表 4-2。

针对电解铣削加工过程中的流体阻力梯度变化，系统采用动态压力补偿算法，通过压力传感器与电动减压阀的闭环控制，有效抵消加工深度增加导致的压降，维持加工间隙流速保持稳定。在电解液输送环节，系统采用 316L 不锈钢硬管与 PTFE 软管复合结构，关键接口处配置双重密封环的 Swagelok 卡套接头，可承受 35 MPa 工作压力。针对硝酸钠溶液在循环过程中产生的金属氢氧化物沉淀及加工碎屑，系统设置三级过滤单元：前置 20 μm 不锈钢烧结滤网拦截大颗粒杂质，中置 5 μm 聚丙烯折叠滤芯进行深度净化，终段配置 0.1 μm 陶瓷膜过滤器确保介质洁净。温度控制方面，设置恒温加热装置使电解液温度稳定在 25±0.5 °C 范围内，该温控精度可将硝酸钠溶液电导率波动控制在±0.8%以内。为应对硝酸钠溶液的强腐蚀性，加工腔室采用整体式 PP 密封结构，实现电解液循环利用率达 92% 以上。

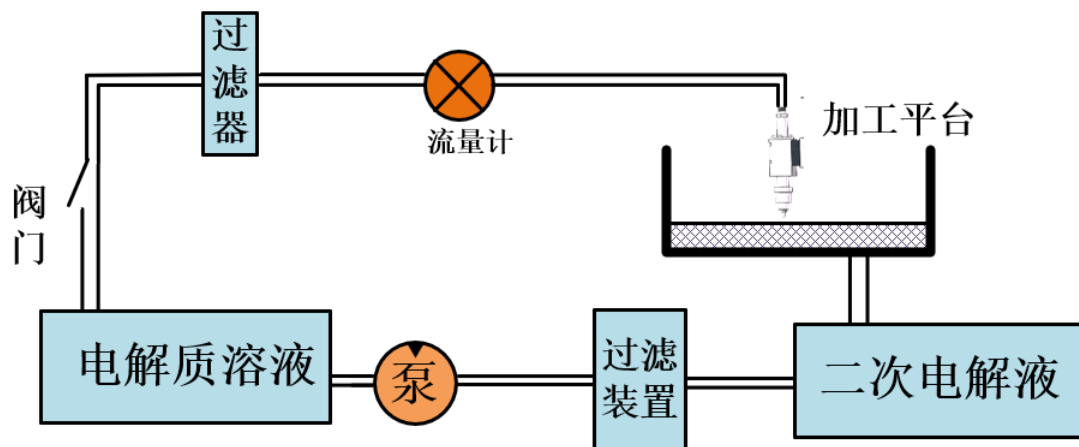


图 4-10 电解液循环系统

表 4-2 计量泵性能参数

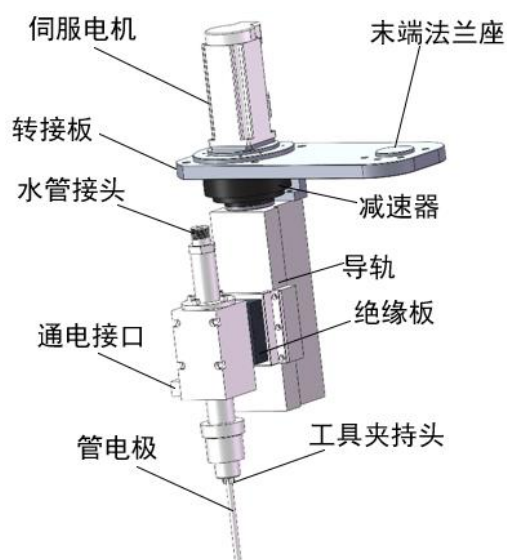
型号	功率	流量	压力	口径
JWM	90 W	120 L/H	0.4 MPA	12*8/DN15

4.5 电流监测系统和末端执行器的设计

4.5.1 末端执行器的设计

在 6-DOF 串联机器人应用于电解铣削加工中，维持稳定的放电间隙需通过电极动态调整实现。受制于串联式机械臂的结构限制，其末端执行器的运动响应存在迟滞现象，且多轴轨迹插补算法存在运算复杂度高、运动指令不可中断等技术瓶颈^[71]，难以满足放电工况下电解加工间隙的实时调控需求。为解决动态响应与轨迹控制实时响应性的问题，本研究设计了一种安装在在机械人末端的末端执行装置用以配合工具电极进行加工，该装置通过精密滚珠丝杠副构建轴向辅助运动，采用独立伺服驱动单元实现工具电极的间隙补偿，其闭环控制周期可达 5 ms 级。这种复合式运动结构既保留机械臂大范围轨迹运动能力，又通过末端快速补偿机制确保放电间隙的动态平衡，有效提升加工过程稳定性。

该末端执行器由伺服电机，减速器，转接板，末端法兰座，水管接头，通电接口，导轨，管电极和工具夹持头所构成，图 4-11 为末端执行器组件构成图。



(a) 末端执行器模型



(b) 末端执行器实物图

4-11 末端执行器

4.5.2 电流监测系统

基于第三章提出的基于电流信号的间隙自动控制方法,因此在加工过程中需要实时检测电流值,并及时通过间隙—电流关系式将电流值转换成间隙值,在通过电机的及时响应来调节加工间隙。为此,通过在脉冲电源柜中安装霍尔电流传感器^[72]和电压传感器来实时获取极间电流密度与电压梯度分布,通过 EtherCAT 工业总线将监测到的参数传输至工业机器人运动控制器,实现加工状态的间隙和电流分析,图 4-12 为电解加工电流监测系统原理流程图。

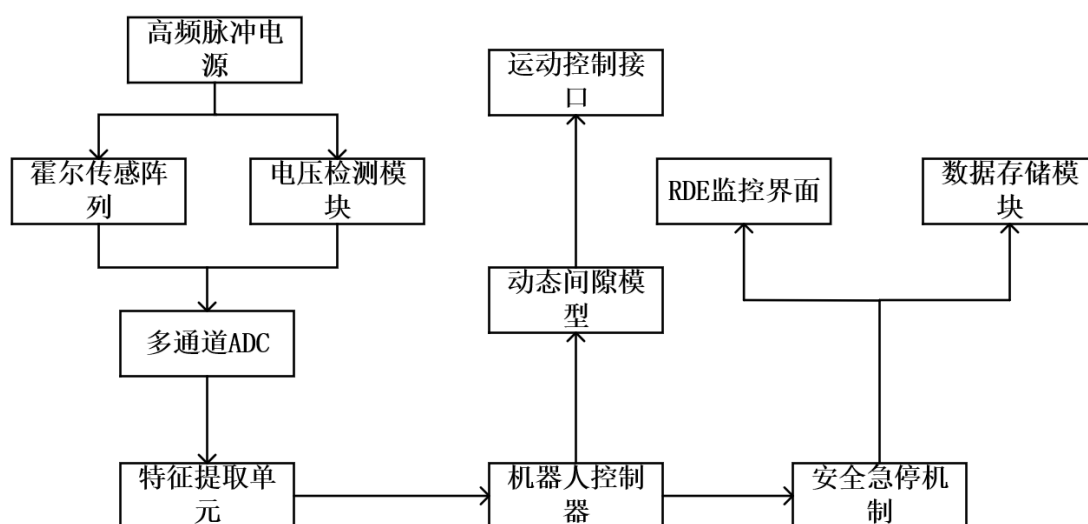


图 4-12 电流检测系统

图 4-11 的电流监测反馈控制系统主要分为以下四个部分执行:

①电参数采集层

霍尔传感阵列：霍尔传感器通过高频脉冲电源正/负极母线，实时采集极间电流分布。

电压检测模块：通过差分放大器测量采集工具-工件间电位差。

②信号处理层

多通道 ADC 模块：采用 24 位 Σ - Δ 型模数转换器，同步采集模拟信号。

特征提取单元：通过 FFT 分析电流纹波频谱，识别异常放电特征频率段。

③控制决策层

动态间隙模型：基于电流-间隙关系式对采集到的电流进行实时分析，并及时转换成间隙数值，计算出需要进行的位移补偿。

运动控制接口：通过 EtherCAT 总线向机器人控制器发送位移补偿指令实现闭环间隙控制。

④人机交互层

安全急停机制：当检测到持续超限电流时即发生短路状态时，自动切断电源并启动急停协议。

RDE 监控界面：显示实时电流波形、电压波形以及其他加工参数状态加及变化趋势图，支持更改不同参数配置来进行数据采集。

数据存储模块：记录加工时序数据，包括时间，电流，电压和速度等，并可兼容数据库导出。

4.6 本章小结

本章系统构建了工业机器人电解铣削加工系统的整体架构。通过选用高精度六轴工业机器人实现复杂轨迹的柔性控制，同时对刀系统集成接触式对刀检测与多级短路保护机制，保障加工基准标定与过程安全，电解液循环系统通过温控模块与多级过滤单元维持电解液的稳定性，电流监测系统结合末端执行器的动态补偿设计，形成基于电流反馈的闭环间隙调控策略。各子系统通过协同优化，实现了机器人电解铣削加工过程中轨迹精度、间隙稳定性与工艺可靠性的综合提升。

第 5 章 机器人电解铣削曲面加工实验研究

本章基于自主搭建的工业机器人电解铣削加工系统平台,系统开展机器人电解铣削加工机理与工艺优化实验验证。通过固定姿态和可变姿态加工对比实验揭示工具位姿协同控制对加工效果的影响;并验证基于电流反馈的动态间隙补偿系统对加工精度的提升;最后结合可变姿态加工策略使用基于 RobotPRO 仿真平台开发的面向复杂曲面加工的机器人离线编程系统实现复杂曲面构件的高效精密电解加工。

5.1 不同姿态曲面铣削加工实验

传统三轴机床受限于线性运动自由度,在加工具有连续曲率变化的型腔结构时存在轨迹精度不足、电极损耗补偿受限等固有缺陷。采用六自由度工业机器人电解铣削加工曲面相较于传统数控机床三轴设备的核心优势在于其多轴协同运动能力,通过末端执行器姿态的动态调整显著提升了复杂曲面的加工适应性。本节针对典型曲面沟槽结构加工需求,基于六自由度工业机器人平台构建了多轴电化学加工系统,重点开展了不同姿态策略下的曲面加工性能对比实验。

5.1.1 加工参数的选择

在进行曲面加工的轨迹规划时,首先根据工件形状构建满足几何约束的实体模型,接着按照加工沟槽的要求导入二维加工图案,生成符合曲面曲率特性的空间轨迹曲线,调整图案尺寸及方位确保其精确定位于正确的曲面加工区域。然后在路径生成阶段基于第三章的优化等步长法对加工路径点进行规划,保证每两个加工路径点之间的弦高 ϵ 均小于允许最大弦高 $[\epsilon]$,最终提取各路径点相对于工件坐标系原点的三维坐标数据集,然后在机器人控制系统中进行插补规划生成最终的加工路线。

机器人不同姿态的曲面铣削加工实验包括固定姿态电解铣削和可变姿态电解铣削加工实验,在其他实验变量相同的情况下采用内径 3 mm 的管电极作为末端工具电极对相同形状的曲面工件进行沟槽加工实验,实验基于下表参数进行。

表 5-1 不同姿态电解铣削加工参数

加工参数	数值
电解液	20%NaNO ₃
电解液电导率/(S/m)	15
占空比	50%
脉冲电压/(V)	20 V
电解液压力/MPa	0.2
初始加工间隙/mm	0.5

5.1.2 固定姿态和可变姿态电解铣削实验

为了验证 6 自由度工业机器人在电解加工复杂曲面时相对于数控机床的加工优势,本文通过第三章的工具电极运动轨迹规划方法求解了工具电极在弧形路径上的位姿参数,并最终转化到机器人控制系统中生成对应的加工路径。

通过第四章设计的工业机器人电解铣削加工实验平台,采用内径 3 mm 的管电极作为末端工具电极对曲面工件进行了固定姿态下射流式电解铣削加工实验,每组实验重复进行三次。在加工过程中,机器人根据获取到的加工路径点进行移动,始终保持竖直向下的姿态不变,加工过程示意图如下图 5-1 所示。在此过程中,由于曲面曲率的不断变化,工具电极与曲面法线夹角也持续变化,加工过程中有较多路径点仅有工具电极端部单侧边缘与工件表面参与放电,此过程类似于数控机床三轴加工,未利用到机器人六自由度的加工优势,难以达到复杂曲面的加工精度要求。



图 5-1 固定姿态铣削加工示意图

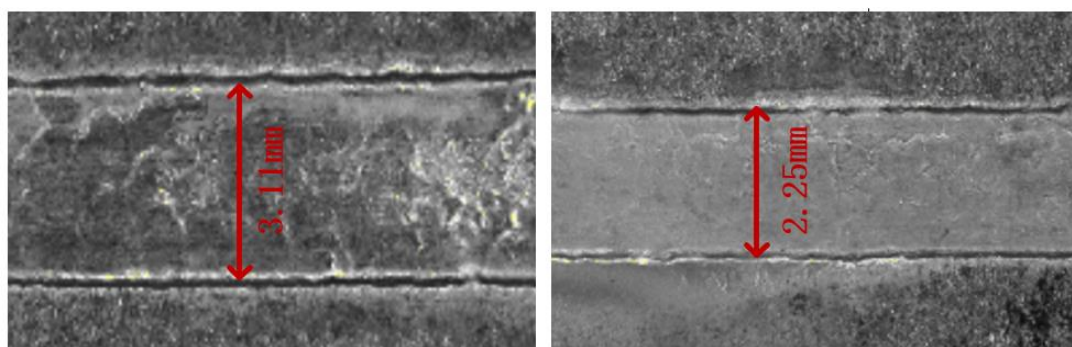
在相同实验参数下对曲面工件开展了可变姿态下射流式电解铣削加工实验,每组实验重复进行 3 次。与固定姿态相比,路径的生成路线和路径点的选取都相同,但是每个路径点的姿态都在始终根据曲面形状实时调整。图 5-2 为可变姿态下加工示意图,由图可知工具电极在每个路径点都有独立的姿态,在复杂曲面加工场景下,需建立姿态调整机制以满足曲面加工几何约束:工具电极轴线须与加

工表面法矢方向保持共线。



5-2 可变姿态铣削加工示意图

图 5-3 分别为固定姿态和可变姿态往复铣削下的加工结果。当采用固定姿态电解铣削加工时，由于工具电极与曲面法线夹角持续变化，加工过程中仅工具电极端部单侧边缘与工件表面参与放电，导致铣削加工出的工件轨迹槽宽 2.25 mm 远小于管电极的内径。当采用可变姿态电解铣削加工时，通过实时调整电极姿态使其始终与曲面法线重合，确保工具电极端面整体能够与工件表面持续参与放电，最终铣削加工出的工件轨迹槽宽 3.11 mm 略大于工具电极直径，符合电解加工间隙的物理特性。因此采用 6 自由度工业机器人工具电极可变姿态电解铣削加工曲面工件时能够实现更高的曲面加工精度和更优的加工效果。



(a) 固定姿态

(b) 可变姿态

图 5-3 电解铣削加工结果

5.2 基于电流信号的加工间隙补偿实验

在机器人电解铣削曲面加工过程中，第 3.3 节提出的加工间隙伺服控制策略可以实时调整工具电极位姿以维持极间放电稳定性，通过该闭环控制系统的持续调节，可在机器人动态误差影响下实现法向加工间隙的自动控制，确保电解加工过程保持在一个稳定的法向加工间隙。本节基于上述控制策略对其展开实验验证，实验参数见下表 5-2，通过对初始设定的加工间隙求得理论加工电流值，进行了机器人可变姿态下有无间隙控制的单次曲面铣削对比实验来验证该策略能否有

效的控制加工过程的电流波动, 以及进行了机器人可变姿态下有无间隙控制的往复曲面铣削对比实验, 进一步验证基于电流信号电解铣削加工间隙过程控制系统的可靠性。

表 5-2 曲面电解铣削实验加工参数

加工参数	数值
工件材料	304 不锈钢
电解液	20% NaNO ₃
电解液温度/ °C	20
电解液电导率/ (S /m)	15
占空比	50%
脉冲电压	20 V, 30 V
电解液压力/ MPa	0.2
初始加工间隙/ mm	0.5
工具电极扫描速度	0.02 mm/s

5. 2. 1 加工间隙误差补偿控制方法仿真分析

基于 Matlab/Simulink 平台构建加工间隙误差补偿控制系统仿真模型, 通过调节伺服驱动器电流环、速度环及位置环的控制参数, 对该间隙控制系统性能进行分析。该末端补偿装置由多摩川伺服电机^[73]、减速装置及滚珠丝杠传动机构构成, 该传动系统的关键技术参数见表 5-3。结合给定的电化学工艺参数, 通过对比实验分析了伺服补偿系统对加工间隙误差的修正能力。

表 5-3 加工间隙补偿装置参数设置

参数	数值	参数	数值
电机转矩 K_t (Nm/A)	0.318	速度环滤波时间常数	0.01
电机反电动势系数 K_e	0.26	减速比 i	10
电机定子相电阻 R_s (Ω)	1.2	工作台质量 m (kg)	1.4
q 轴电感 L_q (h)	0.0136	摩擦系数 u	0.1
电机电气时间常数 T_s (ms)	11.3	丝杠导程 P_s (mm)	0.01
电机转子转动惯量 J_m (kg·m ²)	0.062	丝杠长度 L_b (m)	0.17
电机机械时间常数 T_e (ms)	0.49	丝杆直径 D_b (cm)	2
宽频调制器增益 K_{PWM} (V/A)	6.5	密度 ρ (kg/m ³)	7.8×10^4
时间常数 T_{PWM} (μ s)	175	止推轴承刚度 K_B (N/m)	1.07×10^9
电流环反馈滤波时间常数 T_i	100	螺母刚度 K_B (N/m)	2.14×10^9

为验证法向加工间隙补偿系统的动态特性, 设定初始法向间隙值为 0.5mm 对补偿系统的响应速度和准确性开展性能测试。图 5-4 所示为全闭环控制系统的阶跃响应与斜坡响应特性曲线。由 5-4(a) 可看出, 在阶跃输入工况下, 系统在 50.326 ms 内完成阶跃响应的上升过程, 全程未出现超调现象, 且系统调整时间仅为 0.198 s , 表明其具备快速响应能力, 无超调, 能够满足本研究中需要的间隙补偿实时要求; 由 5-4(b) 可看出, 稳态阶段后最终的输出位置与初始设定的位置误差跟收敛至 0.01 mm 以内, 满足间隙补偿的工艺要求。结果表明, 该闭环补偿控制系统能够有效快速地控制加工间隙偏差, 提高曲面电解加工的精度和效率。

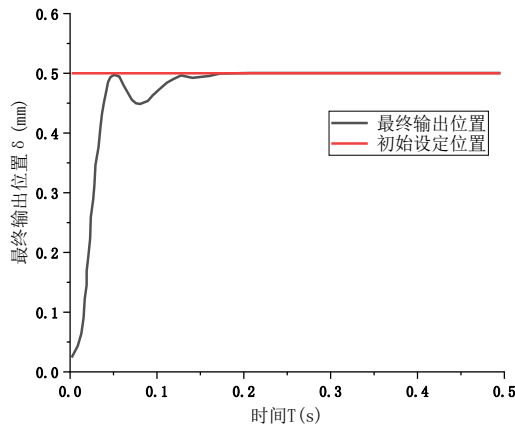


图 5-4(a) 系统位置环阶跃响应曲线

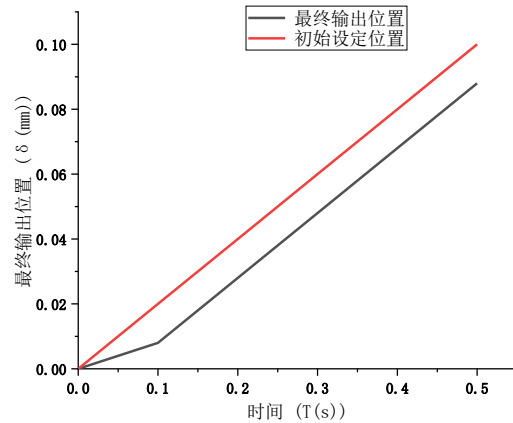


图 5-4(b) 系统位置环斜坡响应曲线

5.2.2 单次曲面铣削间隙控制加工实验

基于上述实验参数计算得出理论加工电流值为 6.12 A 。在采用工具电极可变速态电解铣削加工策略时, 设定机器人单层铣削的阴极扫描速度为 0.02 mm/s 。通过 RDE 实时监测并记录单次曲面电解铣削过程中的电流变化, 并绘制了间隙控制与非间隙控制状态下某 2 秒时间内的电流波动曲线, 见下图 5-5。由图可知, 加工过程中在非间隙控制状态下, 加工电流呈现显著波动, 稳定性较差; 而在间隙控制状态下, 电流波动明显减小, 基本维持在理论值附近。结果表明, 电流反馈控制策略能够有效的控制加工过程的电流波动, 实现对法向间隙误差的实时补偿, 确保加工间隙基本保持在初始设定范围内。

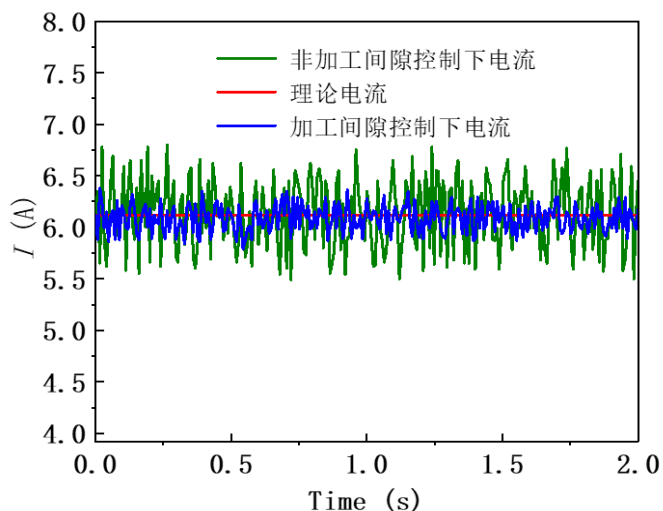


图 5-5 间隙控制状态下的 I-t 曲线

在加工过程的稳定阶段，图 5-6 显示了某 2 秒内不同加工电压条件下处于加工间隙控制状态下的电流随时间的波动情况。在加工电压为 20 V 的间隙控制状态下观察到的电流波动幅度较小，平均波动幅度稳定在 3% 左右。然而，当随着加工电压增大到 30 V 时，电流波动幅度显著增大，平均波动幅度增大到 6%。这可能是因为随着电压升高促使阳极表面的去除速率加快，进而导致加工间隙中腐蚀产物的积累，这些腐蚀产物对电解液的电导率产生显著影响，从而实时的影响了间隙控制状态下的电流稳定状态。

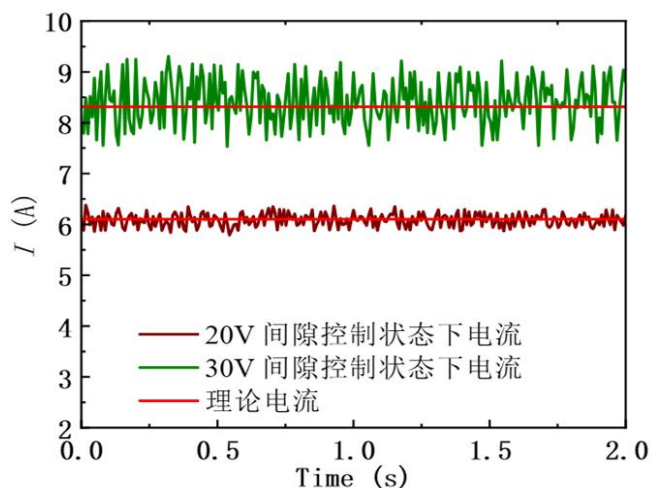


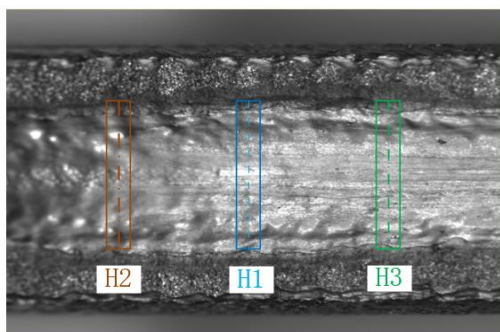
图 5-6 不同电压的间隙控制状态下的 I-t 曲线

5.2.3 往复曲面铣削间隙控制加工实验

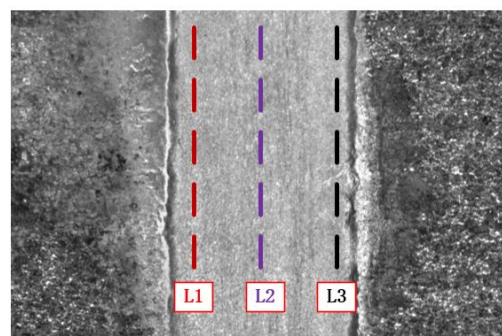
为了进一步验证基于电流信号的电解铣削加工间隙过程控制系统的可靠性，以及对法向加工间隙的调节效果，本研究采用对比实验方法，在相同的加工参数下分别进行有无间隙控制的重复性加工实验（每组实验重复三次）。实验过程中

通过 6 自由度机器人驱动末端工具电极沿预设轨迹执行分层往复铣削运动,以实现复杂曲面沟槽的多层铣削加工。

图 5-7 为加工间隙控制和非控制状态下的多次往复铣削结果。为了准确评估曲面加工质量,取任意三段槽宽区域(H1、H2、H3 分别对应轨迹起始段、中间段与终止段)),如图 5-7(a)所示,采用激光显微镜对每个区域进行三维形貌重构,并沿槽深方向提取 10 组剖面数据,经加权平均处理后得到加工误差,最后得到间隙反馈控制和无反馈控制后的偏差如图 5-7(c)和图 5-7(d),无间隙控制下平均槽深误差在 0.035 mm,有间隙反馈控制下的平均槽深误差在 0.025 mm,由此表明间隙控制策略能够降低电解加工过程中机器人法向间隙误差对加工结果的影响,从而显著提高工件的加工精度。此外为了为更全面表征表面的加工质量,分别在有无间隙控制条件下对工件沟槽两侧边缘及中间区域选取三条截线(L1、L2 和 L3)如图 5-7(b)所示,采用白光干涉仪沿截线方向获取表面轮廓数据,经过表面轮廓测量将每个面的表面轮廓与理论轮廓比较后得到偏差结果如图 5-7(e)和图 5-7(f)。实验结果表明,无间隙控制时,表面粗糙度平均值为 $0.73\text{ }\mu\text{m}$,而采用间隙闭环控制后粗糙度均值降至 $0.28\text{ }\mu\text{m}$ 。间隙控制策略通过抑制极间电解液流场扰动与电流密度波动,有效改善了材料蚀除均匀性。综合加工精度与表面质量评价结果可知,基于电流反馈的间隙闭环控制系统能够显著提升电解铣削过程的稳定性,所获得的曲面沟槽结构在几何精度与表面完整性方面均达到精密加工要求,为复杂曲面电解加工提供了可靠工艺方案。



(a) 加工结果图



(b) 加工局部放大

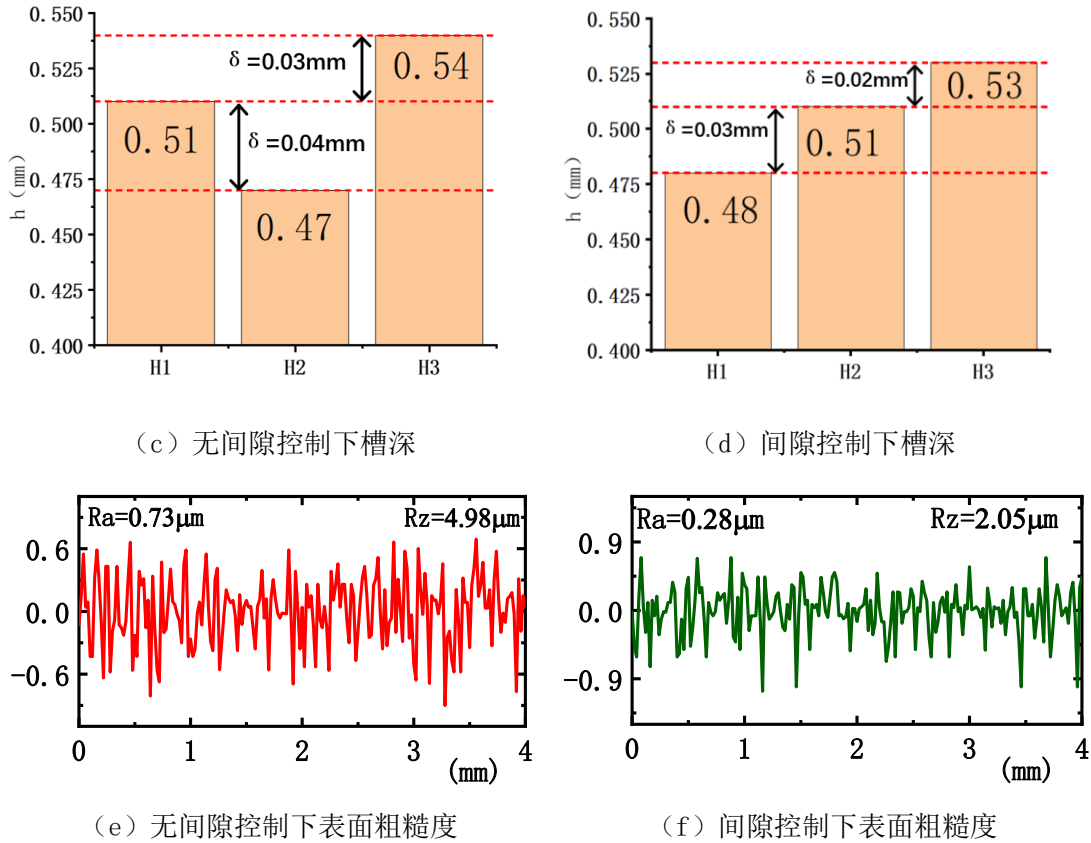
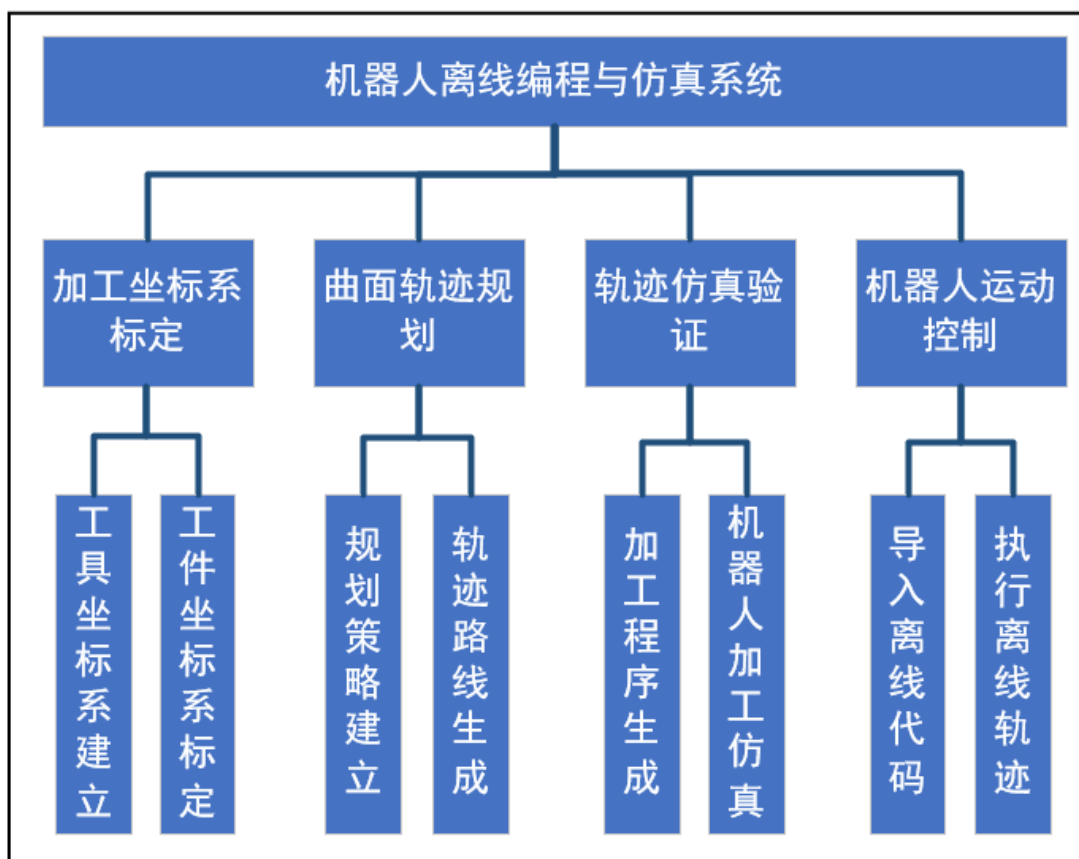


图 5-7 往复曲面铣削的加工结果

5.3 机器人离线编程下的曲面铣削实验

基于第三章提出的可变姿态电解铣削加工策略，其核心实施流程包含三个关键环节：首先基于优化等步长法实现曲面轨迹离散化处理，生成诸多空间插补点；其次通过坐标变换矩阵计算各轨迹点在工作坐标系下的空间位置和法向姿态参数；最后将位姿数据导入机器人控制系统完成运动学逆解与轨迹插补。然而当面对大尺寸或高曲率异形曲面构件时，轨迹离散化将导致插补点数量呈几何级数增长，使得位姿参数计算复杂度显著增加。根据以上曲面加工策略，基于 RobotPRO 仿真软件平台开发的面向复杂曲面加工的机器人离线编程系统^[74]，能满足可变姿态加工需求并根据曲面特征动态调整插补点密度与约束条件（如法向误差阈值），然后自动执行工具坐标系轨迹转换与姿态优化，为机器人多轴协同电解加工提供了可靠便捷的工艺平台。本实验采用了和上述实验相同的曲面构件，通过在 RobotPRO 仿真软件自动生成轨迹，并将加工程序导入到机器人控制器中开展电解铣削加工实验，验证基于工业机器人离线编程系统的有效性。

5.3.1 机器人离线编程系统架构



机器人离线编程系统架构由以下核心功能模块构成，见上图 5-8，各模块协同实现机器人复杂曲面电解加工：

（1）加工坐标系标定模块。该模块通过将实际机器人的模型导入到系统中，末端执行器安装在机器人末端，末端执行器模型和加工工件具体模型一并导入，按照实际加工位置对工具坐标系和工件坐标系进行标定，建立加工模型确保离线轨迹与实际加工位置的一致性。

（2）曲面轨迹规划模块。根据加工表面形貌特征，通过 NURBS 曲线插补生成离散化路径点集，支持可变步长参数化设定；将工件坐标系下的轨迹坐标转换为机器人关节角空间参数，输出可执行的运动指令文件。

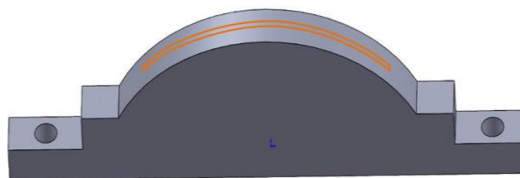
（3）轨迹仿真验证模块。基于机器人运动学模型验证轨迹规划的正确性，主要是为了验证夹具与工件的是否存在空间干涉风险，是否存在不可达路径点，避免机器人实际加工过程中运行此轨迹出现意外情况。

（4）机器人运动控制模块。将离线编程生成的轨迹代码导入到机器人控制器中，实现从轨迹规划到具体执行的闭环控制，并可外加控制器进行实时数据采

集与异常中断响应。

5.3.2 实验条件和流程

基于机器人离线编程电解加工的曲面工件实物图如下图 5-9(b)所示，材质为 304 不锈钢，具体实验参数采取 5.1 节的表 5-1，实验需要加工出的沟槽为 5-9(b)所示的黄色线条区域。



5-9(a) 工件模型图



5-9(b) 工件实物图

图 5-9 待加工工件

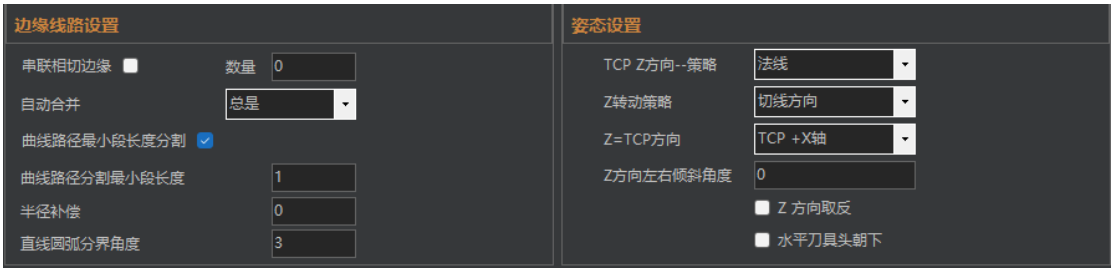
针对图 5-10 所示的工件与机器人末端空间布局关系，首先采用三点标定法建立加工坐标系，通过在工件表面选取三个非共线基准点，结合机器人运动学链式法则求解基坐标系到加工坐标系的齐次变换矩阵，完成机器人和工件的空间位置关系确立。



图 5-10 初始状态布局

随后将工件三维模型和机器人以及末端工具模型导入 RobotPRO 平台，通过二次开发接口调用自主设计的离线编程轨迹规划模块^[75]，见下图 5-11，设置曲线路径分割最小段长度为 1 mm，直线圆弧分界角度设置为 3°，工具电极姿态设置为始终沿着工件法线方向，系统自动生成均匀离散的轨迹点。该过程通过曲面参数化展开算法保证轨迹密度的一致性，同时支持调整关键区域的路径点分布，最

终形成符合电解铣削工艺要求的机器人运动轨迹。



5-11 轨迹规划初始条件设置

5.3.3 加工轨迹离线编程仿真实验

如图5-12所示加工过程仿真界面,基于可变姿态加工策略设置初始条件后,对工件进行分层式电解铣削加工轨迹规划,采用分层切片算法沿 Z 轴方向生成多层层加工平面,每层平面内动态调整轨迹间距为 1 mm,离线编程系统通过齐次变换矩阵实时计算各路径点处工具电极的位姿参数,确保工具轴线始终与曲面法向矢量重合,其姿态调整角度范围控制在合适范围以内。加工过程中,末端执行器执行渐进轨迹运动,每完成单层铣削后通过重新抬升工具后向下进给 0.2 mm 重复轨迹完成分层铣削,最终达到工艺要求的 1 mm 槽深。该过程融合了间隙闭环控制策略,使极间电解液流场分布与工具姿态融合共同调控间隙误差,最终实现复杂曲面沟槽加工的均匀材料蚀除。

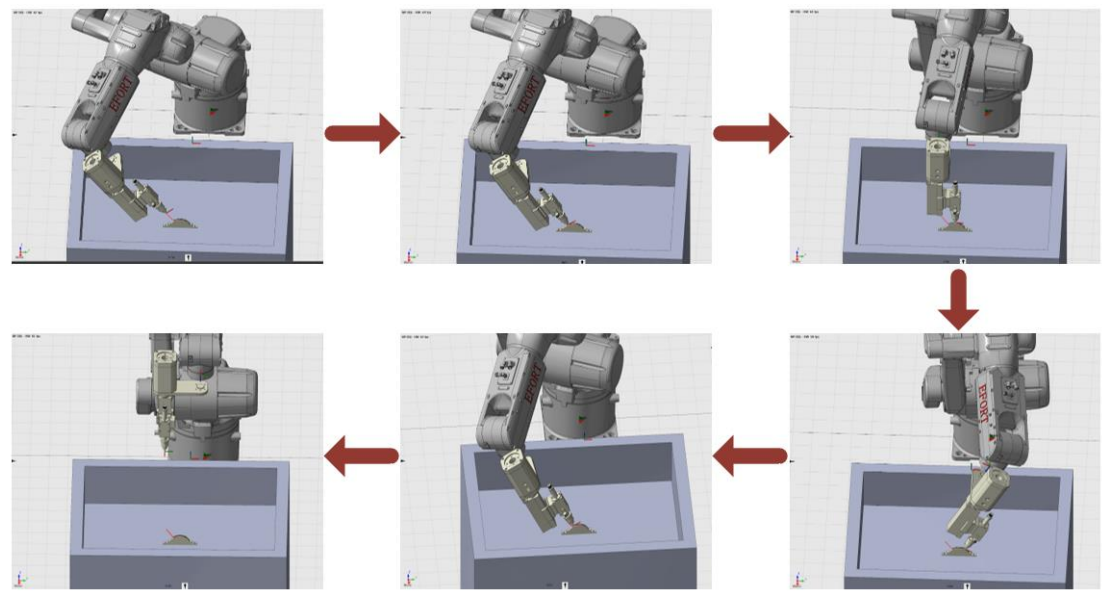


图 5-12 加工过程仿真界面

经过上述离线编程仿真的加工程序,验证了基于机器人运动学模型的轨迹规划的准确性,并且夹具与工件之间不存在空间干涉风险和不可达路径点,有效避免了运行离线轨迹出现意外情况。根据上述轨迹数据生成离线代码如下图 5-13,

其中包含两段往复的铣削过程,并且集成了实施分层铣削后加工路径的空间坐标序列和工具姿态参数,将离线编程生成的轨迹数据导入到机器人控制器转换成机器人的控制代码,实现从轨迹规划到具体执行的闭环控制,并在外部同时施加间隙控制策略,通过多轴协同运动与法向间隙闭环控制的结合,实现了复杂曲面电极铣削的精密加工过程。

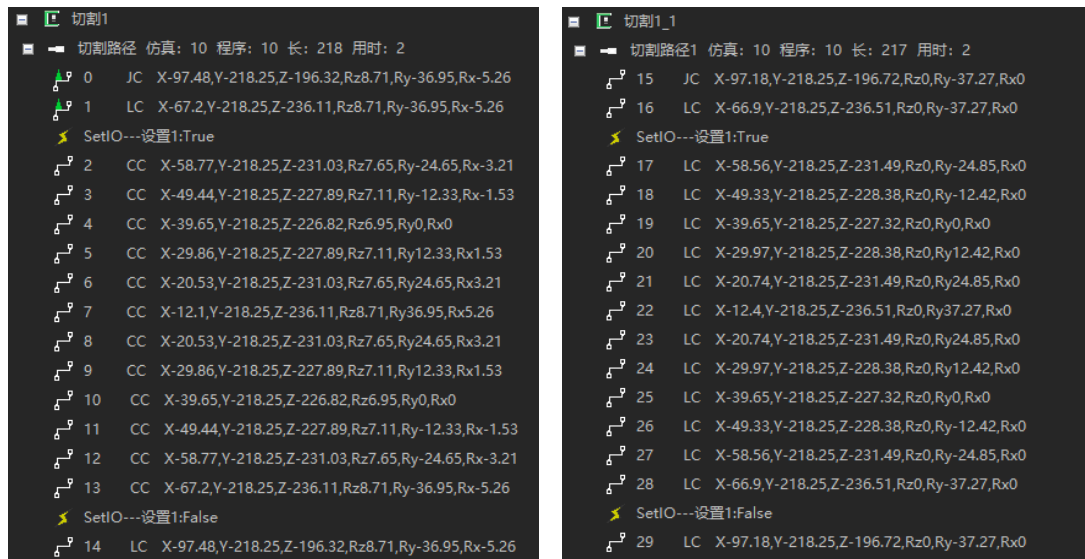


图 5-13 局部加工路径程序

5.3.4 实验结果与分析

利用机器人离线编程系统规划的加工路径导入到机器人中完成加工后,图 5-14 为加工完成后的曲面工件扫描电镜放大图,加工表面呈现连续光滑的微观形貌,无明显过蚀或欠蚀缺陷,这表明在加工过程中电极与工件间的电化学反应过程具有优异的均匀性。为进一步定量评估曲面成形精度,采用三维激光轮廓仪对加工槽结构进行形貌重构,选取具有代表性的三条截线(L1、L2 和 L3)进行误差分析。

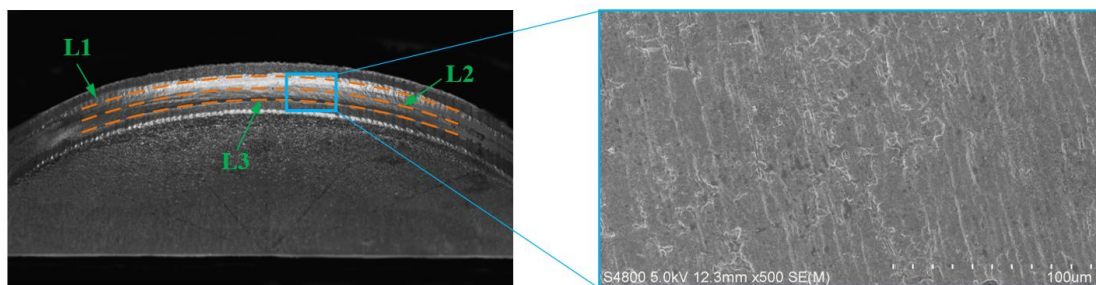


图 5-14 扫描电镜放大图

如下图 5-15 所示,通过将实测轮廓与理论轮廓进行比较,三条轮廓线的整体误差波动幅度都相对较小,均在上下 0.02 mm 波动,其中获得的最大几何偏差

仅为 0.029 mm，显著低于传统电解加工的误差范围，均达到精密加工的表面完整性要求。这种优异的加工性能主要得益于：（1）基于实时电流信号的动态间隙补偿机制有效抑制了杂散腐蚀；（2）基于离线编程下自动生成加工轨迹的机器人多轴联动控制系统实现了电极运动轨迹与曲面法矢的精确匹配。实验结果有效证明了机器人离线编程系统在复杂型面电解加工中带来的精度提升和加工效率提高。

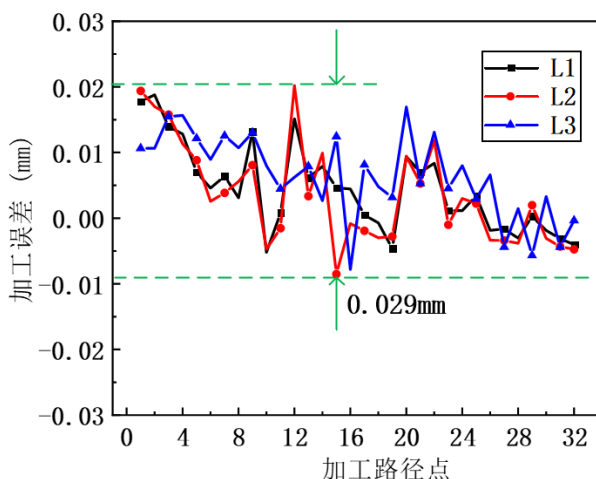


图 5-15 表面加工精度

5.4 本章小结

本章通过机器人电解铣削加工系统对复杂曲面构件做了一系列实验研究，研究表明：首先在相同的加工参数下对工件做了固定/可变姿态对比实验，验证了可变姿态加工策略通过工具轴线与曲面法矢保持共线，能使沟槽宽度从 2.25 mm 提升到 3.11 mm，有效匹配了管电极的内径宽度，并解决了固定姿态加工中的单侧放电的缺陷；此外采用了基于电流反馈的间隙闭环控制系统进行曲面电解铣削实验，结果表明该策略能够有效地降低加工电流波动幅度，即保持加工间隙的稳定，同时表面平均粗糙度值从 0.73 μm 降低到 0.28 μm ，实现了法向间隙的实时稳定控制和加工精度的提升；最后利用机器人离线编程系统通过自动轨迹离散化与位姿参数计算进行曲面加工轨迹规划，减少复杂曲面轨迹规划计算量，使加工轮廓最大几何偏差控制在 0.029 mm 以内，显著低于传统电解加工的误差范围，达到精密加工的表面完整性要求。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

本文围绕工业机器人电解铣削加工技术在复杂曲面精密制造中的关键技术问题，系统开展了理论分析、方法创新、系统设计与实验验证研究。通过将工业机器人的多自由度运动特性与电解铣削的非接触式加工优势相结合，提出了一种面向复杂曲面构件的柔性化、高精度加工解决方案。

本文完成的主要工作如下：

(1) 电解铣削加工机理与机器人运动学建模。介绍了管电极电解铣削的基本原理及特点，然后针对 SUS304 不锈钢材料的电化学反应特性试验，通过极化曲线分析确定了采用 20% 硝酸钠溶液作为电解液开展的电解加工实验。同时，基于改进型 MD-H 参数法构建了六自由度工业机器人运动学模型，通过正/逆运动学仿真验证，实现了工具坐标系与工件坐标系的位姿变换，为复杂曲面轨迹规划奠定了数学基础。

(2) 完成了复杂曲面电解铣削加工轨迹规划与位姿优化。提出了基于工具电极可变姿态的曲率自适应改进型等步长轨迹规划算法，通过弦高误差约束机制动态调整插补点密度，避免传统固定步长法在曲面突变区域的过切与欠切问题。结合 NURBS 曲面建模与工具电极可变姿态策略，实现了工具电极轴线与曲面局部法矢的加工过程实时共线，并且通过曲面铣削实验验证了基于可变姿态加工策略的轨迹规划方法能使沟槽宽度匹配管电极的内径宽度，有效解决了固定姿态加工中的单侧放电的缺陷，显著提升了复杂曲面的成形精度。

(3) 建立了多源误差耦合下的间隙闭环控制策略。通过建立机器人静态误差与动态柔度变形的综合误差模型，提出了基于电流反馈的电解加工法向间隙伺服控制方法。通过加工电流与间隙大小的函数关系，建立电导率场加权平均模型与闭环补偿系统动力学方程，从而实现了间隙误差的实时修正。通过实验验证表明该策略可将平均槽深误差降低 28%，并可将表面粗糙度均值从 $0.73\ \mu\text{m}$ 降至 $0.28\ \mu\text{m}$ ，有效降低了电解加工过程中机器人法向间隙误差对加工结果的影响，为复杂曲面的精密化加工提供了一种切实可行的加工方法。

(4) 进行了机器人电解铣削加工系统设计与离线编程系统的实际应用。搭建了集六自由度工业机器人、高频脉冲电源、电解液循环系统及电流监测模块于

一体的机器人电解铣削加工平台，在系统中设计添加了对刀功能和短路保护功能，并结合间隙闭环控制策略设计了电流监测系统和用于间隙补偿的末端执行装置，解决动态响应与轨迹控制实时响应性的问题。并且创新性的采用基于 RobotPRO 仿真软件平台开发的面向复杂曲面加工的机器人离线编程系统，能满足可变姿态加工需求并根据曲面特征动态调整插补点密度与法向误差阈值，自动生成加工路径与姿态优化来完成曲面加工，并通过实验验证了离线编程系统在复杂曲面电解铣削中的工程适用性，为机器人多轴协同电解加工提供了可靠便捷的工艺平台。

6.2 创新点

(1) 提出了一种基于工具电极可变姿态的复杂曲面电解铣削轨迹规划方法，通过工具电极法矢共线与曲率自适应插补算法，提高了机器人电解加工的精度。

(2) 构建了基于电流反馈的动态间隙补偿模型，通过电流反馈闭环控制系统，实现了机器人多源误差干扰下的间隙稳定性控制。

(3) 提出了面向复杂曲面电解铣削的机器人离线编程系统，集成轨迹优化、姿态调整与误差补偿功能，为高曲率异形曲面构件的加工提供了一种高效工艺平台。

6.3 展望

尽管本研究在机器人电解铣削加工领域取得了一定成果，但受限于实验条件与理论深度，仍存在以下待完善之处：

(1) 当前加工间隙模型未充分考虑电解液气液两相流与温度场的动态交互作用，未来需建立更精确的多场耦合仿真模型，揭示极间介质输运与能量分布的协同机制。

(2) 在未来的工作中需要以提高电解加工间隙稳定性为目的，加强对电机控制系统和控制方法的改进，增强电解加工过程中实时间隙补偿的响应速度。

(3) 可以对工具电极进行改进，将工具电极工具安装在高速旋转的电机主轴上，保证稳定的电解液流速，并带走电解产物和热量从而提高加工稳定性。

(4) 在未来工作中需进一步探索微细管电极设计、机器人轨迹平滑性等关键技术，面向航空航天精密结构件的制造需求，推动机器人电解加工向微纳精密制造领域延伸。

参考文献

- [1] 袁理,刘晓丽,程畅,潘为一. 商用飞机及起落架市场的发展与展望[J]. 中国市场,2024, (2): 118-122.
- [2] 张士宏,程明,宋鸿武,徐勇. 航空航天复杂曲面构件精密成形技术的研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52 (1) : 1-11.
- [3] 王辉,郑洋,吴动波.航空发动机叶片精密加工工艺及装备[J].金属加工(冷加工),2023,(10): 1-9.
- [4] 华琦. 航空发动机叶片型面电解加工工装及阴极设计[D].西安工业大学,2023.
- [5] Fu D, Lv X, Jiang S. Discussion on Reverse Design of Components with Complex Curved Surface and Computer Numerical Control Machining[J]. Journal of Electronic Research and Application,2018,2(4):
- [6] Zhu D, Yu L, Zhao J, et al. Research on shaping law in electrochemical machining for the leading/trailing edge of the blade[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102: 559-565.
- [7] Wang J, Wang W, Li G, et al. Numerical study of the cooling performance of rupertshaped film cooling holes[J]. International Journal of Thermal Sciences,2024,198108859-.
- [8] Gurwinder S, Rupinder S, S.P R, et al. On Morphological and Dimensional Characteristics of Modified Electrochemical Machining[J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C,2023,104(6):1299-1302.
- [9] 何纪源. 电解加工在航空制造中的应用及发展[J].科技创新与应用,2016,(06):41.DOI:10.19981/j.cn23-1581/g3.2016.06.028.
- [10] 朱荻,房晓龙,王登勇,等.电化学制造新进展[J].机械工程学报,2023,59(19):330-347.
- [11] Xiong G, Li Z, Ding Y, et al. A closed-loop error compensation method for robotic flank milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2020,63101928-101928.
- [12] Shen Z, Li H, Zhang J, et al. Improving flatness of machined surface in rotating cathode electrochemical milling[J]. Journal of Manufacturing Processes,2024,11660-76.
- [13] Liu Y, Qu N. Electrochemical Milling of TB6 Titanium Alloy in NaNO₃ Solution[J]. Journal of The Electrochemical Society,2019,166(2):E35-E49.
- [14] Wang Y, Qu N. Effect of breakdown behavior of passive films on the electrochemical jet milling of titanium alloy TC4 in sodium nitrate solution[J].International Journal of Electrochemical Science, 2019, 14(2): 1116-1131.
- [15] Wang D, Zhu Z, He B, et al. Effect of the breakdown time of a passive film on the electrochemical machining of rotating cylindrical electrode in NaNO₃ solution[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239:251-257.
- [16] Liu W, Ao S, Li Y, et al. Effect of anodic behavior on electrochemical machining of TB6 titanium alloy[J]. Electrochimica Acta, 2017, 233: 190-200.
- [17] Kawanaka T, Kunieda M. Mirror-like finishing by electrolyte jet machining[J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 237-240.
- [18] Zanjani Y M, Hackert-Oschätzchen M, Martin A, et al. Process Control in Jet Electrochemical Machining of Stainless Steel through Inline Metrology of Current Density[J]. Micromachines,2019,10(4):261-261.
- [19] Liu G, Zhang Y, Natsu W. Influence of electrolyte flow mode on characteristics of electrochemical machining with electrolyte suction tool[J]. International Journal of Machine Tools

- and Manufacture, 2019, 142: 66-75.
- [20] Newman J, Balsara N P. Electrochemical systems[M]. John Wiley & Sons, 2021.
- [21] Bortels L, Deconinck J, Van Den Bossche B. The multi-dimensional upwinding method as a new simulation tool for the analysis of multi-ion electrolytes controlled by diffusion, convection and migration. Part 1. Steady state analysis of a parallel plane flow channel[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 1996, 404(1): 15-26.
- [22] Chang C S, Hourng L W. Two-dimensional two-phase numerical model for tool design in electrochemical machining[J]. Journal of applied electrochemistry, 2001, 31: 145-154.
- [23] Fujisawa T, Inaba K, Yamamoto M, et al. Multiphysics simulation of electrochemical machining process for three-dimensional compressor blade[J]. 2008.
- [24] Deconinck D, Van Damme S, Albu C, et al. Study of the effects of heat removal on the copying accuracy of the electrochemical machining process[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(16): 5642-5649.
- [25] Deconinck D, Van Damme S, Deconinck J. A temperature dependent multi-ion model for time accurate numerical simulation of the electrochemical machining process. Part I: Theoretical basis[J]. Electrochimica Acta, 2012, 60: 321-328.
- [26] Klocke F, Zeis M, Herrig T, et al. Optical in situ measurements and interdisciplinary modeling of the electrochemical sinking process of inconel 718[J]. Procedia Cirp, 2014, 24: 114-119.
- [27] Mitchell-Smith J, Speidel A, Clare A T. Advancing electrochemical jet methods through manipulation of the angle of address[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 364-372.
- [28] Mitchell-Smith J, Speidel A, Gaskell J, et al. Energy distribution modulation by mechanical design for electrochemical jet processing techniques[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 122: 32-46.
- [29] Lasemi A, Xue D, Gu P. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(7): 641-654.
- [30] Kout A, Müller H. Tool-adaptive offset paths on triangular mesh workpiece surfaces[J]. Computer-Aided Design, 2014, 50: 61-73.
- [31] Amersdorfer M, Meurer T. Equidistant tool path and cartesian trajectory planning for robotic machining of curved freeform surfaces[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 19(4): 3311-3323.
- [32] Ma K, Han L, Sun X, et al. A path planning method of robotic belt grinding for workpieces with complex surfaces[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(2): 728-738.
- [33] Shixiong W, Wei M, Bin L, et al. Trochoidal machining for the high-speed milling of pockets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 29-43.
- [34] Mousavi S, Gagnol V, Bouzgarrou B C, et al. Stability optimization in robotic milling through the control of functional redundancies[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 50: 181-192.
- [35] Peng J F, Ding Y, Zhang G, et al. Smoothness-oriented path optimization for robotic milling processes[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(9): 1751-1763.
- [36] 黄雷, 窦艳红, 樊宇, 等. 基于激光跟踪关节臂的机器人位姿测量系统研制[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(01): 26-31.
- [37] 金永乔, 孙朝阳, 唐小卫, 等. 机器人铣削加工动态变形误差预测与在线感知[J]. 上海航天 (中英文), 2022, 39(06): 112-117. DOI:10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.06.013.
- [38] 李文龙, 谢核, 尹周平, 等. 机器人加工几何误差建模研究: I 空间运动链与误差传递[J]. 机

- 械工程学报 2021,57(07):154-168.
- [39] 李文龙,谢核,尹周平,等.机器人加工几何误差建模研究: II 参数辨识与位姿优化[J].机械工程学报,2021,57(07):169-184.
- [40] Song W ,Liu Q ,Wang W .Error analysis and compensation for Mini LED mass transfer visual positioning system[J].Measurement,2024,234114913-.
- [41] Ke X ,Shuang X ,Qi Q .Research on high-precision positioning method of robot based on laser tracker[J].Intelligent Service Robotics,2023,16(3):361-371.
- [42] 邸红采,彭芳瑜,唐小卫,等.机器人铣削加工误差视觉跟踪测量与补偿研究[J].机械工程学报,2022,58(14):35-43.
- [43] 潘田华,廖昭洋,王清辉.机器人铣削加工误差在线补偿方法研究[J].自动化与信息工程,2022,43(01):1-6+14.
- [44] Slavkovic N R, Milutinovic D S, Glavonjic M M. A method for off-line compensation of cutting force-induced errors in robotic machining by tool path modification[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70: 2083-2096.
- [45] Slavkovic N, Zivanovic S, Kokotovic B, et al. Simulation of compensated tool path through virtual robot machining model[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(7): 374.
- [46] Kelaiaia R. Improving the pose accuracy of the Delta robot in machining operations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5): 2205-2215.
- [47] Ruming Z ,Hang D ,Jianping Z , et al.State of the Art in Power Supply of Electrical Discharge Machining, Electrochemical Machining and their Variants[J].Journal of Physics: Conference Series,2023,2433(1):
- [48] 王登勇,朱荻,朱增伟.复杂型面薄壁回转体零件旋印电解加工基础研究[J].机械工程学报,2019,55(07):162.
- [49] 程小元,黄明涛,张明岐,等.精密电解加工在航空发动机整体结构件制造中的应用[J].航空制造技术,2015,(Z2):54-56+60.DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.23/24.054.
- [50] 谢岩甫,刘壮,陈伟.微细电解加工技术的概况与展望[J].电加工与模具,2010,(06):1-6+35.
- [51] Romano G .Large and small scales in a turbulent orifice round jet: Reynolds number effects and departures from isotropy[J].International Journal of Heat and Fluid Flow,2020,83108571-108571.
- [52] Guisasola J ,Zuza K ,Almudi J .An analysis of how electromagnetic induction and Faraday's law are presented in general physics textbooks, focusing on learning difficulties[J].European Journal of Physics,2013,34(4):1015-1024.
- [53] Paula P S ,Yang H S ,María E E .Toward understanding the role of the electric double layer structure and electrolyte effects on well-defined interfaces for electrocatalysis[J].Current Opinion in Electrochemistry,2021,(prepublish):100918-.
- [54] Nagaoka A ,Nose K ,Nokami K , et al.The Role of Micro Pits in the Initiation Process of Crevice Corrosion of SUS304 Stainless Steel in an Aqueous Chloride Solution:Materials Chemistry[J].MATERIALS TRANSACTIONS,2022,63(3):335-342.
- [55] 马雅诗,李耀悦,刘溢舟.磁力加热搅拌器温度参数校准方法研究[J].计量与测试技术,2022,49(06):98-100.DOI:10.15988/j.cnki.1004-6941.2022.6.029.
- [56] 陶小健,孙伦业.GH4169 合金电化学溶解特性及表面微观形貌分析[J].全面腐蚀控制,2022,36(11):54-59.DOI:10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2022.11.054.06.
- [57] 张石文.六自由度工业机器人轨迹误差补偿研究[D].昆明理工大学,2021.DOI:10.27200/d.

- cnki.gkmlu.2021.000027.
- [58] 李赛松.复杂空间曲线路径机器人运动轨迹与工艺协同规划[D].北华航天工业学院,2023.DOI:10.27836/d.cnki.gbhht.2023.000018.
- [59] 夏毅.手腕偏置轮毂磨抛机器人加工位置优选及标定技术研究[D].哈尔滨工业大学,2022.DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2022.000890.
- [60] Schubert A ,Hackert O ,Schätzchen M ,Martin A , et al.Generation of Complex Surfaces by Superimposed Multi-dimensional Motion in Electrochemical Machining[J].Procedia CIRP,2016,42384-389.
- [61] Zhao D ,Guo H .A Trajectory Planning Method for Polishing Optical Elements Based on a Non-Uniform Rational B-Spline Curve[J].Applied Sciences,2018,8(8):
- [62] 李承宇.6DOF 机器人铣削 NURBS 曲面刀具轨迹规划及姿态控制研究[D].兰州交通大学,2018.
- [63] 赵世田,赵东标,付莹莹.自由曲面加工刀具路径生成高精度变步长算法研究[J].机械科学与技术,2010,29(01):32-35.DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.2010.01.021.
- [64] Rusnac V ,Topala P ,Guzgan D , et al.Autoadjusting of the gap at electro erosion processing [J].IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2017,227(1):
- [65] Wang Z ,Dong H ,Bai S , et al.A new approach of kinematic geometry for error identification and compensation of industrial robots[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,2019,233(5):1783-1794.
- [66] 赵延治,宋晓鑫,杨建涛,等.基于虚设运动副的并联机器人静态误差建模与标定[J].中国机械工程,2017,28(18):2189-2197.
- [67] 王林军,梁志国,张东.堆码机器人的静态受力变形和动态误差分析[J].机械设计与制造工程,2019,48(01):19-22.
- [68] Benallegue M, Lamiraux F. Estimation and Stabilization of Humanoid Flexibility Deformation Using Only Inertial Measurement Units and Contact Information[J].International Journal of Humanoid Robotics,2015,12(3):1550025-1550025.
- [69] Abosh A H, Zhu Z Q, Ren Y. Reduction of torque and flux ripples in space vector modulation based direct torque control of asymmetric permanent magnet synchronous machine[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(4): 2976-2986.
- [70] 刘广民,张勇斌,王锋,等.一种用于微细电火花加工的甚高频微能脉冲电源[J].电加工与模具,2020,(01):17-20.
- [71] Guan L ,Chen L .Trajectory planning method based on transitional segment optimization of spray painting robot on complex-free surface[J].The Industrial Robot,2019,46(1):31-43.
- [72] Maciej C, Aleksander D, Marcin B , et al.Wide Bandwidth and Inexpensive Current Sensor for Power Electronics—An Augmented LEM Current Sensor[J].Energies,2021,14(14):4194-4194.
- [73] 谢小四,杨志红,窦楠.基于 PTO 方式的伺服电机位置控制实现[J].现代制造技术与装备,2023,59(06):210-212.DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2023.0348.
- [74] Jeong H J, Kuk H K. Robotic Workplace Calibration Using Teaching Data of Work-Piece Fixed in Robotic Workplace for Robot Off-line Programming[J]. Journal of the Korean Society for Precision Engineering,2013,30(6):615-621.
- [75] 谢海龙,许晨旻,王清辉,等.曲面零件机器人抛光轨迹规划与工艺仿真[J].自动化与信息工程,2019,40(06):1-7.

攻读硕士期间的主要成果

论文发表情况:

- [1] Automated electrochemical milling of complex surfaces with integrated path planning and gap control strategy[J]. International Journal of Electrochemical Science (已录用, 第二作者)

致谢

行文至此，意味着我硕士研究生阶段的学习与研究工作即将画上句号。回首过往的三载求学时光，心中充满了无限的感慨与深深的感恩。这段旅程不仅是对专业知识的深入探索，更是个人成长的重要阶段。值此论文完成之际，我谨向所有给予我指导、帮助、支持和鼓励的老师、同学、朋友及家人，致以最诚挚的谢意！

首先，也是最深切的感谢，献给我的导师方明老师。能够师从方明老师，是我求学路上的莫大荣幸。老师渊博的学识、严谨求实的治学态度、敏锐的学术洞察力以及精益求精的科研精神，为我树立了学习的典范。从论文的选题构思、研究框架的搭建、研究方法的确定，到具体实验的开展、关键问题的解决，直至最终的撰写与修改定稿，每一个环节都倾注了老师大量的心血。老师不仅在学术上给予我高屋建瓴的指导和细致入微的点拨，更在为人处世方面言传身教，教会我独立思考、勇于探索、直面挑战。

此外诚挚感谢课题组/实验室的各位同门，难忘与你们一起在实验室度过的无数个日夜。感谢你们在学术讨论中碰撞出的思想火花，在遇到困难时伸出的援手，以及在日常生活中带来的温暖与欢乐。这份并肩作战、互相扶持的同窗情谊，是我研究生生涯中最珍贵的财富之一。

最后特别感谢我的家人，感谢我的父母以及所有家人。是你们无条件的爱与支持，为我撑起了一片安心求学的天空。你们总是默默地承担着生活的重担，包容我的焦虑与压力，在我疲惫时给予温暖的港湾，在我迷茫时点亮前行的明灯。你们的理解、鼓励和殷切期望，是我克服困难、不断前进的最大动力。这份恩情，无以言表，唯有在未来的人生道路上更加努力，不负所望。

求学之路漫漫，硕士阶段的结束是终点亦是起点。承载着恩师的教诲、同窗的情谊、家人的期盼以及所有帮助过我的人的祝福，我将怀揣感恩之心，继续在未来的学习或工作岗位上砥砺前行，努力为社会贡献自己的绵薄之力。

尚德敏学 唯实惟新

