

分类号: TP273

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210120124



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 机器人管电极脉冲电化学
小孔加工方法研究

论文作者 余良

校内导师 方明（副教授）

校外导师 肖永强（正高级工程师）

专业学位类别 机 械

研究方向（领域） 机器人化加工

论文提交日期: 2024 年 4 月 16 日

分类号：

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210120124

机器人管电极脉冲电化学小孔加工方法研究

RESEARCH ON PULSE ELECTROCHEMICAL SMALL
HOLE MACHINING METHOD FOR ROBOTIC TUBE
ELECTRODE

学生姓名：____余良____

指导教师：____方明(副教授)____

校外导师：____肖永强(正高级工程师)____

专 业：____机 械____

研究方向：____机器人化加工____

论文答辩日期：____2024 年 4 月____

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：余良

日期：2024年5月30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 2 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：



指导教师签名：



日期：2024年5月30日

日期：2024年5月30日

机器人管电极脉冲电化学小孔加工方法研究

摘要

涡轮叶片气膜冷却孔的制造是航空发动机生产中至关重要的工艺之一。近年来,管电极脉冲电化学加工(TE-PECM)作为一项小孔加工技术,广泛应用于叶片气膜孔等深小孔/斜小孔加工,受到广泛关注。但是叶片往往具有复杂曲面结构,小孔以不同的角度分布在叶片上。为了充分利用机器人在复杂曲面规划方面的灵活的优势,因此,机器人管电极脉冲电化学加工目前成为电化学加工新技术研究的热点。

本文面向复杂曲面小孔高效加工需求,将管电极电化学加工在小孔加工方面的优势与机器人在复杂曲面规划方面的灵活性结合起来,提出一种机器人管电极脉冲电化学小孔加工方法。

本文的主要研究工作及成果如下

(1) 介绍了管电极脉冲电化学加工的基本原理,对 SUS304 的电化学溶解特性和加工电流效率进行了分析,首先利用 M-DH 方法对机器人的电化学加工系统进行正向和逆向运动学分析,然后进行方法验证,最后完成对加工空间中工具和工件坐标系的标定,选用 NURBS 理论进行加工轨迹描述。

(2) 为了对脉冲电化学加工多物理场耦合关系进行精确描述,引入了 $k-\varepsilon$ 气液两相流模型,对极间气液两相流场变化规律进行模型化描述,并在此基础上成功建立了脉冲电化学加工多物理场耦合模型,对极间多物理作用机制进行精确描述。针对溶解过程中时间尺度跨度大导致仿真计算量庞大的挑战,提出了一种基于热源平均的准稳态迭代简化算法。仿真分析了微时间尺度和宏观时间尺度下溶解特性,并与全精度方法进行了对比,

结果表明两种方法仿真精度基本一致。设计并搭建实验平台，开展了不同加工时间下的一系列实验，结果有效的验证了仿真方法的正确性。

(3) 为了解决传统电化学三轴加工机床加工位姿受限的问题，结合电化学加工方法与六自由度工业机器人的优势，打造了一套基于六自由度机器人管电极脉冲电化学小孔加工系统。根据小孔加工要求设计了相应的末端执行器和电解液循环系统的连接方案，根据加工工艺的需求增加了短路保护、加工电流检测和自动对刀功能。同时设计控制程序，完成对刀和加工过程。

(4) 利用 ROBOT PRO 软件和 NURBS 理论，导出电化学小孔加工轨迹点上工具坐标系的位置和姿态数据。随后，通过机器人控制系统中的逆运动学和插补算法，对轨迹进行的插补拟合，以实现电化学机器人小孔加工的操作策略。通过多物理场耦合仿真孔模拟方法对不同姿态角度下的小孔加工进行仿真，探究寻求孔一致性(孔深 W_{av} 和孔宽 D_{av})的加工参数。并进行了小孔轨迹规划验证和小孔加工一致性验证实验。

关键词：工业机器人，管电极，脉冲电化学加工，多物理场耦合，多时间尺度建模，加工策略

RESEARCH ON PULSE ELECTROCHEMICAL SMALL HOLE MACHINING METHOD FOR ROBOTIC TUBE ELECTRODE

ABSTRACT

The fabrication of turbine blade air film cooling holes is one of the crucial processes in aero-engine production. In recent years, tube electrode pulsed electrochemical machining (TE-PECM), as a small-hole machining technology, has been widely used in the machining of deep small holes/oblique small holes such as blade air film holes, and has received much attention. However, blades often have a complex curved surface structure, and small holes are distributed on the blade at different angles. In order to take full advantage of the flexibility of robots in complex surface planning, therefore, robotic tube electrode pulsed electrochemical machining is now becoming a hot spot in the research of new electrochemical machining technologies.

In this paper, oriented to the demand for efficient machining of small holes in complex surfaces, we combine the advantages of tube electrode electrochemical machining in small hole machining with the flexibility of robots in complex surface planning, and propose a robotic tube electrode pulse electrochemical small hole machining method.

The main research work and results of this paper are as follows.

(1) The basic principle of tube electrode pulse electrochemical machining is introduced, and the electrochemical dissolution characteristics and machining current efficiency of SUS304 are analyzed. Firstly, the forward and reverse kinematic analysis of the electrochemical machining system of the robot is carried out by using the M-DH method, and then the method validation is carried out, and finally, the calibration of the coordinate system of the tool and workpiece in

the machining space is completed, and NURBS theory is selected for the machining Trajectory description.

(2) Aiming at the problem of accurate description of multi-physics field coupling relationship in pulsed electrochemical processing, the $k-\varepsilon$ gas-liquid two-phase flow model is introduced to carry out the modeling description of the change rule of the gas-liquid two-phase flow field in the inter-polar region, and a multi-physics field coupling model of pulsed electrochemical processing is successfully established on the basis of which the multi-physics mechanism of inter-polar multi-physics interaction is accurately described. A quasi-steady-state iterative simplification algorithm based on heat source averaging is proposed to address the challenge of the large time scale span in the dissolution process, which leads to the large amount of simulation computation. The dissolution characteristics are simulated and analyzed in micro- and macro-time scales, and compared with the full-accuracy method, which shows that the simulation accuracies of the two methods are basically the same. An experimental platform was designed and constructed to carry out a series of experiments under different processing times, and the results effectively verified the correctness of the simulation method.

(3) In order to solve the problem of limited machining position of traditional electrochemical three-axis machining machine, a set of six-degree-of-freedom robot-based tube electrode pulse electrochemical small hole machining system is built by combining the advantages of electrochemical machining method and six-degree-of-freedom industrial robot. According to the requirements of small hole machining, the corresponding end-effector and electrolyte circulation system connection program is designed, and short-circuit protection, machining current detection and automatic tool setting functions are added according to the needs of the machining process. At the same time, the control program is designed to complete the tool setting and machining process.

(4) Using ROBOT PRO software and NURBS theory, the position and attitude data of the tool coordinate system on the electrochemical small hole machining trajectory points were derived. Subsequently, the interpolation of the trajectories is fitted by the inverse kinematics and interpolation algorithms in the robot control system to realize the operation strategy of electrochemical robotic small hole machining. Small hole machining under different attitude angles is simulated by a multi-physics field coupled simulation hole simulation method to explore the machining parameters for seeking hole consistency (hole depth W_{av} and hole width D_{av}). Hole trajectory planning validation and small hole machining consistency validation experiments are also conducted.

KEY WORDS: industrial robotics, tube electrodes, pulsed electrochemical machining, multi-physics field coupling, multi-timescale modeling, machining strategies

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
目 录	VI
专用术语注释表	IX
第 1 章 绪论	I
1.1 课题研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 管电极电化学加工技术研究现状	2
1.2.2 机器人电化学加工技术研究现状	8
1.3 课题来源	9
1.4 本文主要研究内容	9
第 2 章 机器人管电极脉冲电化学加工理论基础	12
2.1 管电极脉冲电化学加工理论	12
2.1.1 管电极脉冲电化学加工基本原理	12
2.1.2 SUS304 电化学溶解特性	12
2.1.3 电流效率	18
2.2 机器人运动学分析	19
2.2.1 机器人运动学与坐标系	19
2.2.2 Modified-DH 法机器人正运动学及验证	20
2.2.3 Modified-DH 法机器人逆运动学及验证	24
2.2.4 坐标系统的标定	27
2.3 NURBS 曲线曲面计算	30
2.3.1 NURBS 曲线表达	30
2.3.2 NURBS 曲面表达	31
2.4 本章小结	31

第 3 章 管电极脉冲电化学加工过程建模与仿真方法研究	33
3.1 电化学加工多物理场仿真模型的建立	33
3.1.1 几何模型	33
3.1.2 电场模型	33
3.1.3 气液两相湍流模型	34
3.1.4 温度场模型	36
3.2 多物理场耦合仿真条件与策略	36
3.2.1 仿真参数和边界条件设置	36
3.2.2 多物理场多时间耦合加工模拟策略分析	37
3.3 管电极电化学加工过程多物理场耦合仿真分析	39
3.3.1 平均热源准稳态计算过程	39
3.3.2 全时间耦合精度方法和平均热源准稳态迭代方法比较	40
3.3.3 加工过程微时间尺度	41
3.3.4 加工过程宏观时间尺度	44
3.4 管电极脉冲电化学加工实验验证	46
3.4.1 试验设备及步骤	46
3.4.2 实验结果及讨论	47
3.5 本章小结	49
第 4 章 机器人管电极电化学加工系统设计	50
4.1 机器人管电极电化学加工系统总体设计	50
4.2 电解液循环系统及末端执行器设计	53
4.2.1 电解液循环系统	53
4.2.2 末端执行器的设计	55
4.3 短路保护与对刀系统设计	55
4.3.1 高频脉冲电源	55
4.3.2 短路保护功能	57
4.3.3 电流检测采集系统	58
4.3.4 对刀系统	58

4.4 控制程序设计.....	60
4.4.1 对刀程序.....	60
4.4.2 加工程序.....	61
4.5 本章小结.....	62
第 5 章 机器人管电极电化学小孔加工实验研究.....	63
5.1 机器人管电极电化学小孔加工策略.....	63
5.1.1 孔加工轨迹的生成方法.....	63
5.1.2 孔加工间隙的规定和偏置.....	64
5.1.3 孔加工路线的规划.....	66
5.2 机器人孔加工规划及仿真.....	66
5.2.1 机器人孔加工位姿的求解.....	66
5.2.2 机器人孔加工初始点路径参数计算.....	70
5.2.3 机器人孔加工初末点轨迹直线插补.....	71
5.3 机器人孔加工实验验证分析.....	73
5.3.1 实验加工参数的选择.....	73
5.3.2 实验验证及分析.....	75
5.4 本章小结.....	78
第 6 章 总结与展望.....	79
6.1 结论	79
6.2 创新点	79
6.3 展望	80
参考文献	81
攻读学位期间的学术论文目录.....	87
致 谢	88

专用术语注释表

缩略词	英文全称	中文全称
ECM	Alternating Direction Method of Multiplier	电化学加工
PECM	Pulse Electrochemical Machining	脉冲电化学加工
TE-ECM	Tube Electrochemical Machining	管电极电化学加工
RECM	Robot Electrochemical Machining	机器人电化学加工
QSSSC	Quasi-steady State Shortcut	准稳态快捷方式
EDM	Electrical Discharge Machining	电火花加工
LBM	Laser Beam Machining	激光加工
EBM	Electron Beam Machining	电子束加工
FEA	Finite Element Analysis	有限元分析
DNG	Deep Narrow Groove	深窄槽
UAECDG	Ultrasonic Assisted Electrochemical Drilling and Grinding	超声辅助电化学钻磨削
TDS	Total Solid Dissolved Substances	总固态溶解物
MDH	Modified Denavit-Hartenberg	修正 D-H 变换
CAD	Computer-aided Design	计算机辅助设计
CAM	Computer-aided Manufacturing	计算机辅助制造

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景和意义

1.1.1 研究背景和意义

为了突破“两机”关键技术的限制，国家积极推动大型客机发动机和重型燃气轮机等领域的研发工作，启动了航空发动机及燃气轮机的重要专项计划^[1]。该计划的目标是进行基础研究、技术开发以及建立相应的产业体系，以实现自主创新并提升航空发动机和燃气轮机的性能。随着新型航空发动机不断改进性能和设计结构，采用了更多的整体薄壁结构和高温高比强度合金材料^[2]。叶片结构也变得更为复杂，包括型面曲率的变化、端弯和后掠等特性，这导致对几何精度水平和整体质量提出了更高的要求。航空发动机的关键零部件成型加工和表面完整性的保障变得越来越具有挑战性，这已经成为制约航空发动机制造的主要障碍^[3-4]。

在极端的高温 and 高压条件下，航空引擎的叶片作为核心热力构件，承担着重大的热载荷^[5]。为了保证叶片的寿命和可靠性，需要采取有效的冷却措施来降低叶片温度并防止过热。气膜冷却孔是一种常用的叶片冷却技术，通过在叶片表面开设微小孔洞，使冷却气体形成薄膜覆盖在叶片表面，起到隔热和冷却的作用^[6]。如图 1-1 为涡轮发动机叶片气膜孔，如采用传统的加工工艺很难实现冷却孔的加工，电火花加工、激光束加工和电子束加工会在金属表面上产生微裂纹、重铸层和残余应力。与该方法相比，电化学加工具有无材料力学性能限制、无刀具损失、无重熔层等优点。它已成为最流行的深、小孔处理技术。电化学加工是一种利用金属离子去除工件材料的加工技术，适用于处理高硬度金属材料^[7]。与激光加工和电火花加工相比，电化学加工能够实现更优质的孔壁表面质量，且无需担心重铸层的问题。因此，管电极电化学加工在制造叶片气膜孔方面具有重要的实际意义^[8]。

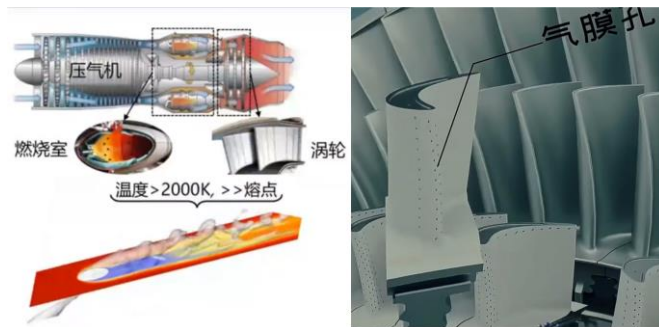


图 1-1 涡轮发动机叶片气膜孔^[6]

大多数电化学加工设备采用三轴加工机床,如图1-2所示。传统机床在加工过程中存在着自由度受限、加工空间受限等问题,因此在处理表面结构复杂的零件时会遇到一定的挑战。为了解决叶片复杂类曲面小孔加工姿态受限问题,机器人有潜力作为一种经济有效的解决方案,增加了灵活性、多功能性和移动性的。目前,工业机器人在制孔、铣削、钻削等加工中得到了越来越广泛的应用^[9-10],然而,机器人在加工过程中往往会面临切削力较大和刚度较差的问题,这限制了它们在加工高硬度材料时的应用。因此,目前主要将机器人用于加工低硬度材料^[11]。

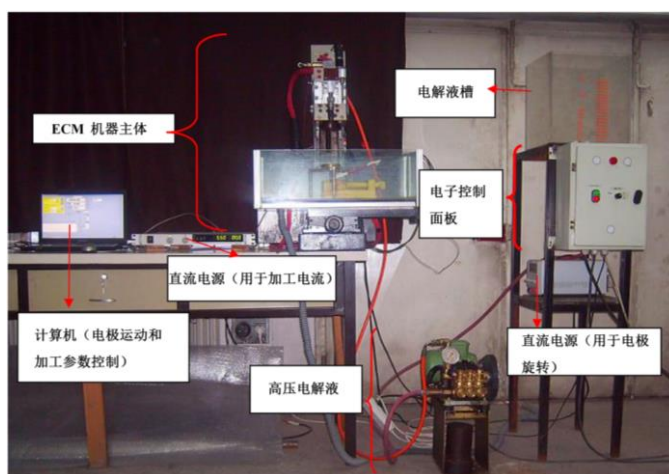


图 1-2 三轴管电极电化学加工机床^[32]

因此为了充分利用电化学加工在小孔加工方面和多关节串联机器人在轨迹规划方面的灵活性优势,同时解决管电极脉冲电化学加工多时间尺度仿真困难问题,有必要开展机器人管电极电化学加工的理论和实验研究,探究脉冲电化学小孔加工过程材料高效去除机理,探索管电极工具电极多物理场耦合优化和机器人电化学小孔加工策略,破解复杂曲面类构件电化学小孔加工的难题。我们搭建了机器人管电极脉冲电化学小孔加工系统,为电化学加工领域应用机器人提供了理论支持和技术指导,也拓宽了工业机器人在机械加工领域的应用前景。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 管电极电化学加工技术研究现状

(1) 脉冲电流电化学加工技术

脉冲电流电化学加工是一种利用瞬态脉冲电流对工件表面进行精密加工的方法^[12]。这种加工方法结合了电化学腐蚀和电化学沉积的特点,通过在工件表面引入周期性的电流脉冲,脉冲电流电化学加工原理示意图如图1-3所示。

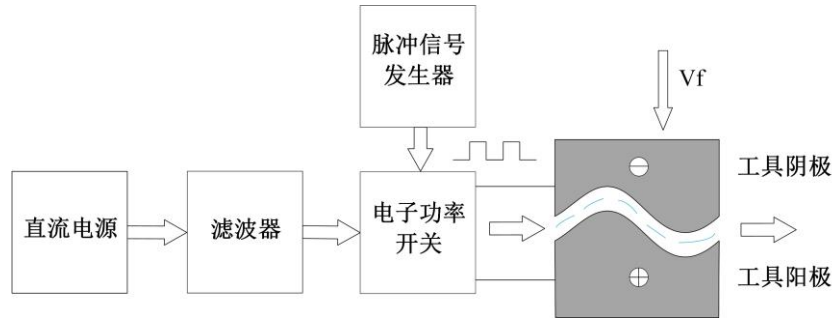


图 1-3 脉冲电流电化学加工原理示意图^[12]

通过定期更换电解液，脉冲电流电化学加工技术能够有效排除产物，维持良好的加工环境。相较于直流电化学加工，脉冲电流电化学加工允许使用更高的电流密度，以改善表面质量，并且可以实现更小的加工间隔，从而提高加工精度^[13]。此外，脉冲电流电化学加工具有更多可调参数，增强了加工过程的可控性^[14]。

脉冲电化学加工由于存在大跨度多时间尺度溶解特性，使得多时间尺度溶解过程的集成化仿真建模时间步长的确定变得困难，时间步长过长将会丢失对微时间尺度溶解过程的描述从而影响仿真精度，而时间步长过短将会导致仿真计算量变的巨大而难以进行。为了解决上述难题，国内外学者相继做出了一些尝试，并取得了一定的科研成果。Smets 等^[15-16]提出一种准稳态简化模型(QSSSC)，解决脉冲电流时间尺度远小于温度场达到稳态时的时间尺度而导致计算量大无法求解的问题。合肥工业大学^[17]针对脉冲电流电解加工过程仿真计算量大的问题，提出一种加工过程简化算法(图 1-4)，实现了脉冲电流电解加工阳极轮廓的预测和阴极形状的设计。德国学者^[18]开展阴极振动运动对极间流场影响的仿真建模研究(图 1-5)，仿真结果表明阴极的振动运动会导致极间流体产生漩涡，并提出了相关解决建议。

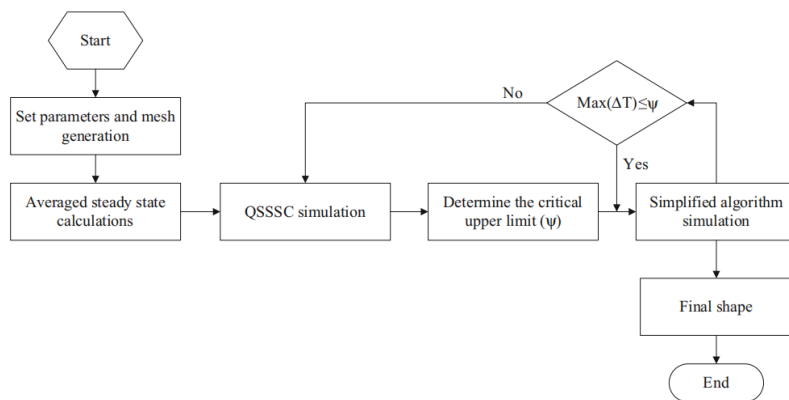


图 1-4 脉冲电流电化学加工过程简化算法^[17]

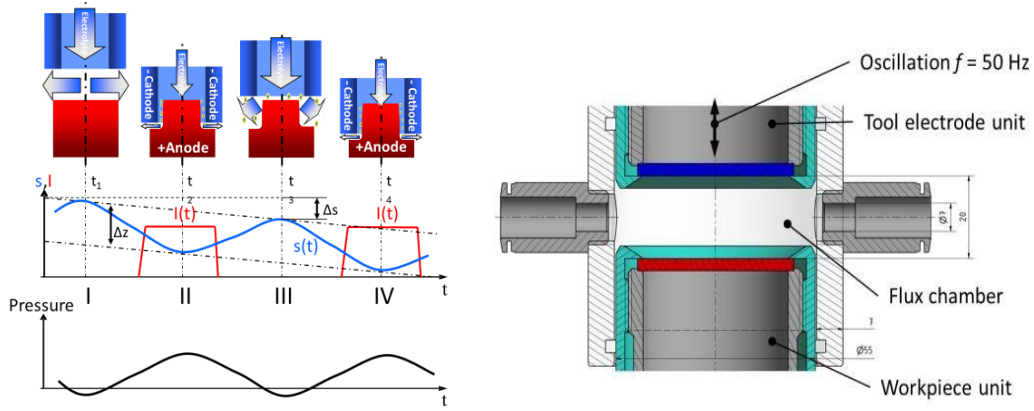


图 1-5 工艺流程和装置示意图^[18]

此后，德国学者^[19]还开展了多时间尺度脉冲电流振动电解加工多物理场耦合建模的研究，分析了短时间尺度内温度、气泡的变化，并运用迭代方法对阳极的材料去除量进行求解。德国学者 Klocke 等^[20]提出将脉冲电流振动电解加工仿真过程分三步，先求解稳态流场，再求解瞬态电场、温度场和阴极振动位移，最后求解阳极的溶解，以此来解决瞬态流场求解计算量大的问题(图 1-6)。

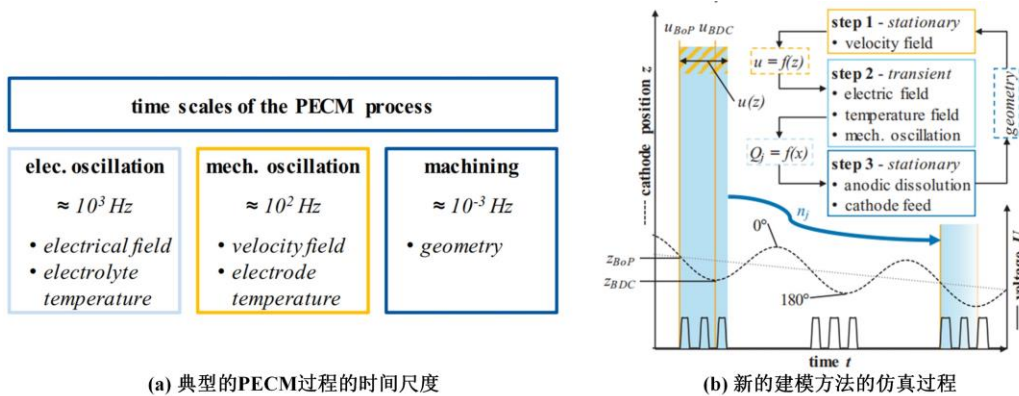


图 1-6 脉冲电流和振荡阴极电化学加工的新建模方法^[20]

安徽工程大学针对高频脉冲电流电解加工中阴极设计的准稳态特点，提出了一种基于多物理场耦合模型的迭代求解算法，完成了高频脉冲电流电解加工阴极的优化设计^[21](图 1-7)。上述研究方法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，但都基于一定的简化条件，缺乏对脉动态电解加工多时间尺度溶解过程的全面精确描述，也尚未构建宏微时间尺度溶解过程的作用机制，从而难以有效地揭示多时间尺度加工参数的匹配规律。

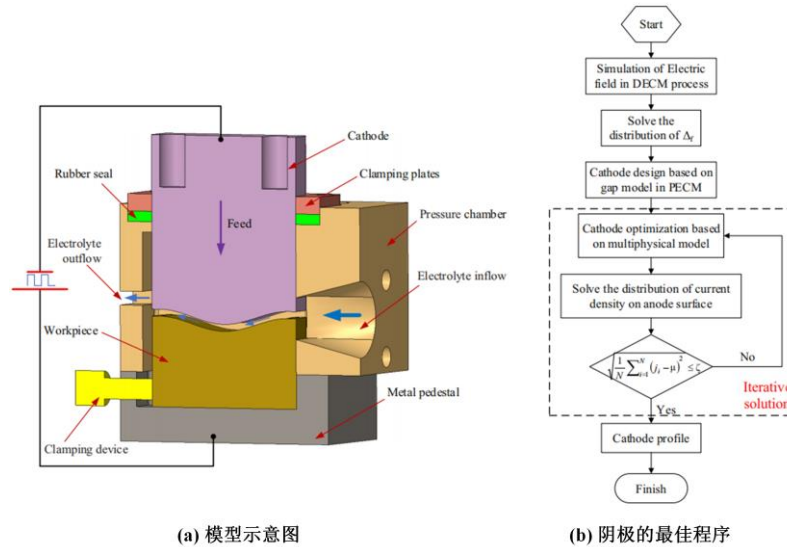


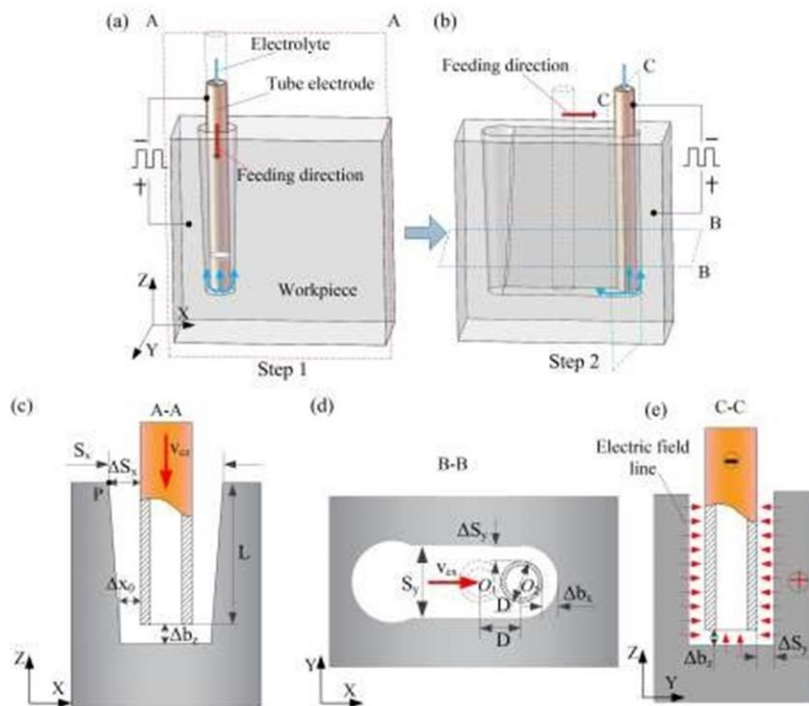
图 1-7 多物理场耦合模型的迭代求解算法^[21]

(2) 管电极电化学孔加工技术

近些年来，深孔结构已广泛应用于精密仪器、航空航天、武器装备等领域^[22-23]。尤其在航空航天发动机中，深小孔结构的使用使得叶片表面冷却孔可以确保在极高温环境下稳定运行。然而，传统的加工工艺在实现冷却孔加工时存在一定困难。电火花加工(EDM)、激光加工(LBM)和电子束加工(EBM)可能导致金属表面产生微裂纹、重铸层和残余应力^[24-26]。相比之下，电化学加工方法具有诸多优势，包括不受材料力学性能限制、无工具损耗以及无重熔层等特点^[27-28]。在深小孔加工领域，电化学加工技术具备独特的优势，因此备受关注，尤其在加工气膜孔方面。

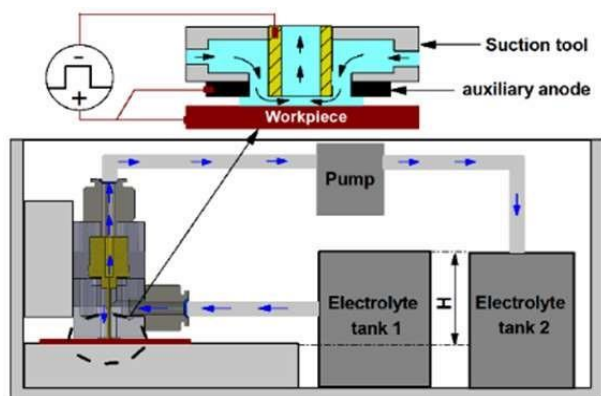
管状电极电化学加工技术(TE-ECM)是一种先进的无接触材料去除加工方法，通过利用金属管作为工具的阴极，并借助电化学阳极溶解的原理来对工件进行孔加工^[29]。因其电解过程受多个物理场的因素影响，加工过程难以实现自适应控制，无法保证加工质量^[30-31]。随着数值仿真计算的发展，研究者相继开展了电化学加工小孔过程的仿真建模研究。印度学者等^[32]开发 ECM 制孔过程中工具设计的多物理仿真模型，采用有限元分析(FEA)软件，将 ECM 过程中的各种现象耦合在单一模型中，以获得更好的精度。通过仿真预测了峰值的过切和高度，并通过实验结果验证了其峰值的准确性和能力。预测结果和实验结果吻合较好，所开发的创新仿真模型提供了 ECM 过程的完整可视化。广东工业大学陈晓磊^[33]提出了一种利用管状电极单通铣削制备 DNG 的新方法(图 1-8)，建立了包含气液两相流场和电场的多物理耦合模型，研究了不同电解质压力

下电极间间隙的流场分布以及 DNG 边缘的电流密度分布。并进行了相关实验。仿真和实验结果表明, 压力越高, 电解质速度越高, 对加工过程有显著影响。其次, 电极间间隙中的高电解质速度可以增强传质能力, 改善 DNG 的截面轮廓。

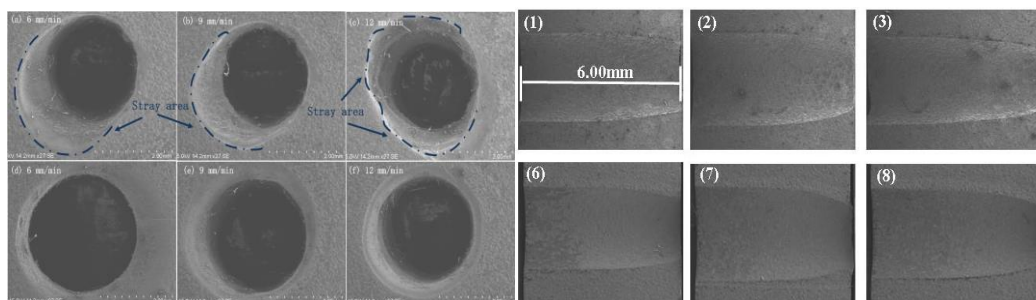
图 1-8 深窄槽(DNG)电化学(ECM)铣削原理图^[33]

哈尔滨工业大学曹炳任等^[34]人在流传热模型和 $k-\varepsilon$ 湍流模型的基础上, 考虑温度场的影响, 建立了 ECM 冷却孔加工精度的仿真模型。利用 COMSOL 多物理软件模拟分析了加工电压、电解液浓度、电解液入口流量、刀具阴极进给速率对加工区域电解液温度分布和冷却孔加工精度的影响, 该仿真模型考虑了温度场的影响, 对 ECM 冷却孔的加工精度具有较高的预测精度, 对提高冷却孔的加工精度具有重要意义。

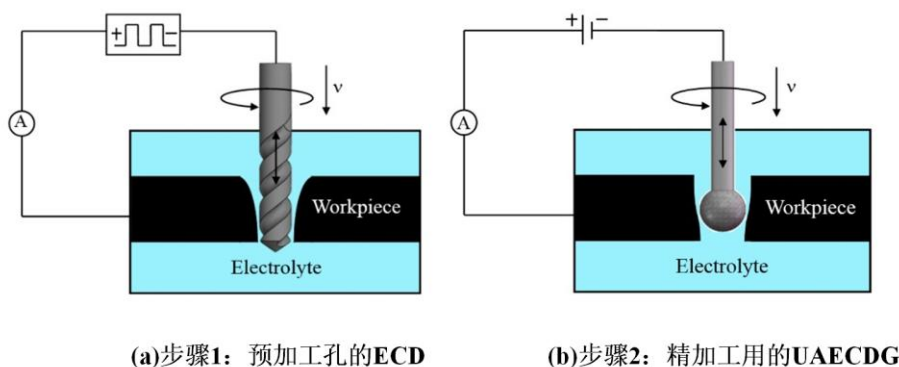
除了常规加工过程的数值仿真，为改善管电极电解加工的加工精度，研究人员还提出了一系列工艺措施。乔治亚理工学院 Yanfei Lu 等^[35]提出了一种利用深度卷积网络和贝叶斯优化算法来预测电化学加工过程中钻孔直径的新方法。东京农业技术大学 Guixian Liu 等^[36]提出了一种内置辅助阳极的新型吸力工具，并将其应用于电化学加工中(图 1-9)。由于内置的辅助阳极的功能是进一步抑制电场，除了抑制电解液流动外，还导致电极间间隙的电流面积更窄，因此可以实现更高的加工精度和表面质量。基于刀具结构，对电流密度分布进行了数值模拟，验证了新刀具的有效性。

图 1-9 内置辅助阳极吸刀 ECM 实验设置示意图^[36]

哈尔滨工业大学李兆龙^[37]等人提出了冷却孔的掩模电化学加工方法(图 1-10)，探讨了耐高温材料 GH 4169 冷却孔结构的入口形貌和锥度形成规律。建立了 ECM 冷却孔阳极溶解的数学模型，分析了电压和电解液流量对 ECM 冷却孔的影响。与无掩模电化学加工相比，在相同的加工参数下，掩模的电化学加工效率更高，加工精度更高。

图 1-10 冷却孔进口和截面的形态^[37]

山东大学 Yong Liu 等^[38]人本文提出了一种新的超声辅助电化学钻磨(UAECDG)技术(图 1-11)，它结合了电化学钻孔、机械研磨和超声波振动，在高温合金上制造高质量的小孔。将超声振动应用于高速旋转电极，可明显提高加工的稳定性、效率和表面质量。

图 1-11 超声辅助电化学钻磨(UAECDG)技术^[38]

1.2.2 机器人电化学加工技术研究现状

与数控机床相比,工业机器人具有成本低、适应性高^[39],与传感器和不同端部执行器的集成更突出等特点。因此,近年来机器人加工和精加工吸引了许多研究者^[40-42]。另外,工业机器人能够处理各种类型的工件,包括大型或复杂的工件。这种灵活性让工业机器人成为了一种高效且经济实惠的解决方案,尤其是对于那些具有几何复杂性的工件来说^[43-45]。

众多研究表明,在电化学加工中使用机器人是一种可靠且有效的方法,国外学者 Abd El Khalick Mohammad 等人最初提出了使用机器人电化学机械抛光来替代传统的抛光工艺方法。他们通过将力控制执行器安装在工业机器人的末端,成功实现了机器人根据工件进行粗定位,从而控制阴极进行低速高精度的电化学加工^[46]。这一方法成功降低了复杂零件表面的粗糙度,详细示意参考图 1-12。

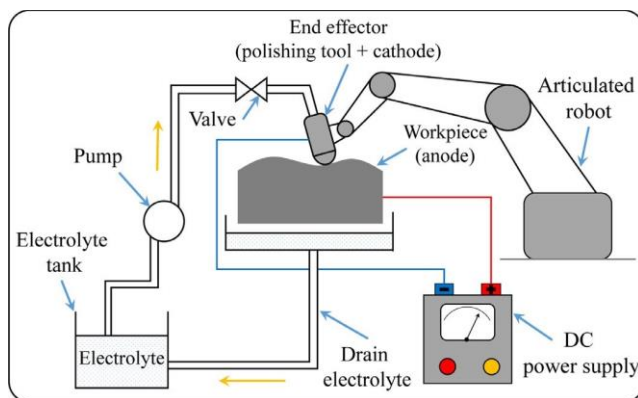


图 1-12 机器人电化学机械抛光系统^[46]

随后 Abdulkadir Cebi 等人^[47]提出一种新的机床,结合了电化学加工与机械臂的高灵活性,并对此系统进行了介绍,如图 1-13

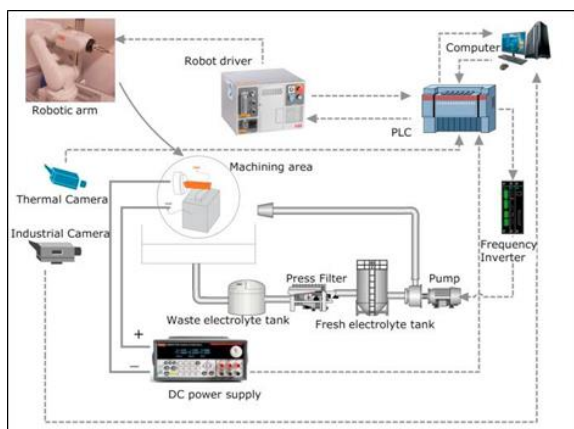


图 1-13 RECM 机床概念^[47]

合肥工业大学的陈远龙等借助电化学加工的独特特点，结合了低速、高精度和紧凑的工作空间等特性。他们明确了目标机器人运动的特征，采用象限法来界定工作范围，最终成功研发出一种定制的电化学加工机器人^[48]。这种机器人将电化学加工技术与工业机器人的优势相结合，有效实现了以较低成本加工复杂形状零件的目标。安徽工程大学方明等人^[49]引入了一种模拟方法来研究正态误差对材料去除的影响，以降低工业机器人的运动精度对加工质量的影响。介绍了一种电化学加工(ECM)过程的模拟方法，研究了法向误差、加工电压和 X 轴移动速度对材料去除的影响。实验说明了机器人 ECM 过程中的仿真方法。结果表明，该方法能有效地反映实际处理过程。如图 1-14。



图 1-14 工业机器人的脉冲 ECM 平台^[48]

1.3 课题来源

本课题研究建立在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”的基础上。

1.4 本文主要研究内容

本文主要研究内容分为四个部分，分别是机器人管电极脉冲电化学加工理论基础，管电极脉冲电化学加工过程建模与仿真方法，机器人平台的管电极电化学加工系统设计，机器人管电极电化学小孔加工实验研究。部分方法及内容如图 1-15。



图 1-15 研究方法及内容

(1) 机器人管电极脉冲电化学加工理论基础。首先介绍管电极脉冲电化学加工基本原理，并对 SUS304 进行了电化学溶解特性测量，即探究金属极化规律和阳极极化曲线测量。在 304 不锈钢材料的电化学溶解实验中，通过采用最小二乘法对实验数据进行拟合，得出了电流密度与电流效率之间的关系。随后使用 MATLAB 完成了机器人的正逆运动学模型建立，对工件坐标系和工具坐标系进行了标定。最后，介绍了 NURBS 曲线和曲面的表达与计算方法。

(2) 管电极脉冲小孔加工多时间尺度溶解仿真方法。首先基于 $k-\varepsilon$ 气泡流建立多物理场耦合模型，提出一种基于热源平均的准稳态迭代简化算法，并对该迭代方法的精度进行了分析。然后分析了极间区域中流速、气体体积分数、温度、电解质电流密度的多时间尺度溶解特性，并对加工工艺参数的影响进行了分析，最后通过实验加工工件的轮廓和仿真轮廓对比，证实了该多物理场模型具有较高的仿真精度.为小孔加工提供了一种高效可行性加工方法。

(3) 基于机器人的管电极脉冲电化学小孔加工系统设计。概括为三个关键部分，分别是运动主体部分、短路保护与对刀系统设计和控制程序设计。运动主体包括机器人本体、电解液循环系统和管电极末端执行器的设计。短路保护与对刀系统部分包括高

频脉冲电源、短路保护功能、电流检测采集系统和对刀系统。控制程序部分包括对刀程序和加工程序设计。

(4) 机器人管电极电化学孔加工策略及实验研究。介绍了机器人管电极孔加工策略, 采用机器人配套软件 **ROBOT PRO** 生成孔加工轨迹方法, 对孔加工间隙进行规定和偏置, 根据加工点位进行轨迹规划和仿真研究, 最后根据不同加工点位进行加工参数选择, 并进行实验验证及分析加工孔的一致性。

第 2 章 机器人管电极脉冲电化学加工理论基础

2.1 管电极脉冲电化学加工理论

2.1.1 管电极脉冲电化学加工基本原理

根据电解液的供给方式,可知管电极脉冲电化学加工有三种,分别为浸入式、外部射流和内部射流,当采用浸入式和外部射流时加工速度慢、外部流体供液困难^[50]。本文于是采用内部射流供液的方式进行研究,管电极脉冲电化学加工(TE-ECM)原理示意图如图 2-1 所示,管电极阴极和工件阳极连接于脉冲电源正负极两端,电解液通过计量泵从电解池抽出通过过滤器进入管电极内管中,经管电极内径高速流入到加工间隙中,形成完整的闭合回路,脉冲电源周期性通断供电进而在管电极与工件之间发生电化学反应,管电极阴极发生还原反应产生氢气,工件阳极随着管电极阴极的进给运动,进而不断溶解、加工成形。加工间隙产生的气体、电解腐蚀产物和通过高速电解液持续带离加工区域,对于电化学深孔的加工,电解液总会分散于深孔间隙中,孔壁的二次腐蚀会对加工精度造成影响,因此在管电极阴极的外侧面涂有绝缘层,进而解决加工过程的二次腐蚀问题。

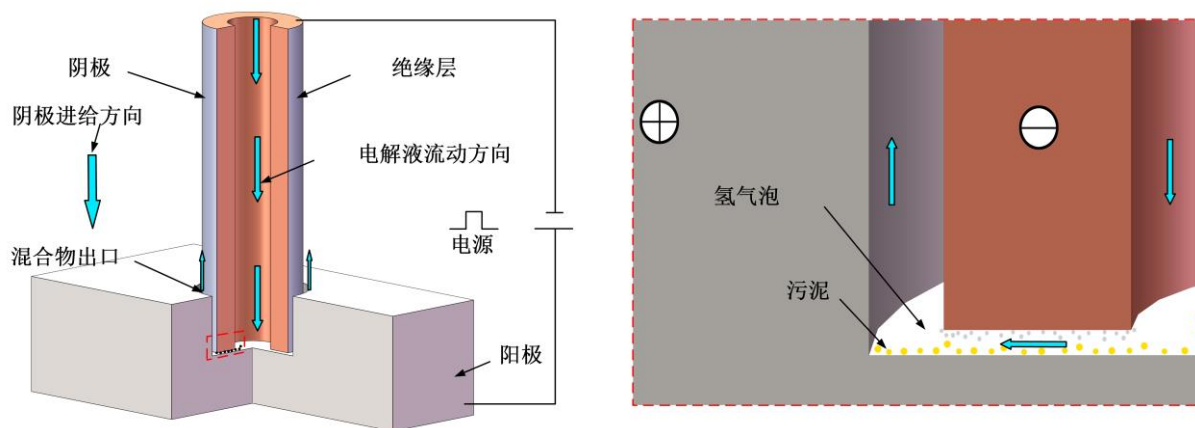


图 2-1 管电极脉冲电化学加工原理图

2.1.2 SUS304 电化学溶解特性

(1) 金属极化规律

在电化学系统中,当电极表面发生电化学反应或离子浓度不均匀时,会引起电极极化现象,导致电极的电位偏离平衡电位。而电极与电解质溶液的交界处形成的双电层结构,可以影响电位分布和反应速率;平衡电极电位则是指在稳定状态下,双电层

结构中的电荷分布平衡所产生的电势，这个电势被称为该体系的平衡电极电位(E)^[51]。

因此，在管电极电化学加工电位分布如图 2-2 所示。方程为：

$$E = E_c + E_{ohm} + E_a \quad (2-1)$$

式中： E —为施加电压(V)；

E —为阴极极化电位(V)；

E_{ohm} —为溶液欧姆降(V)；

E_{ohm} —为溶液欧姆降(V)；

E_a —为阴极极化电位(V)。

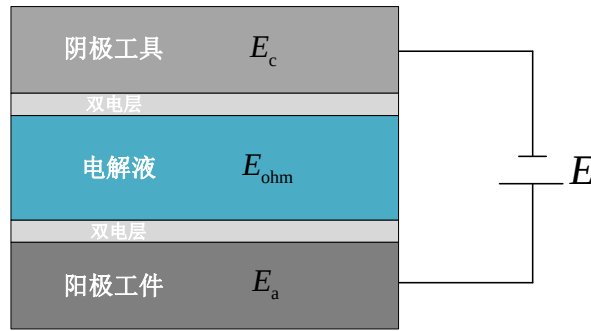


图 2-2 管电极电化学加工电位分布

其中电极电位的偏移值称为过电位，则阳极和阴极的过电位分别为。

$$\Delta E_a = E_a - E_a' \quad (2-2)$$

$$\Delta E_c = E_c - E_c' \quad (2-3)$$

式中： E_a' —为阳极平衡电位(V)；

E_c' —为阴极平衡电位(V)。

按照极化产生的不同原因，可分为三类即浓差极化、电化极化和电阻极化^[53]。

①浓差极化 ΔE_s ：其产生原因是电极表面附近的离子浓度不均匀。当电化学反应进行时，反应物在电极表面消耗，造成反应物浓度逐渐减少。这会导致电极表面与溶液之间的浓度差异，从而引起浓差极化现象，可用能斯特(Nernst)方程进行表达：

$$E' = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{氧化态}}}{a_{\text{还原态}}} \quad (2-4)$$

式中： E' —平衡电极电位(V)；

E^0 —标准电极电位(V)；

R —摩尔气体常数(8.314J/mol·K)；

F —法拉第常数(96500C/mol);

T —热力学温度(K);

n —电极反应得失电子数;

a —离子有效浓度(mol/K)。

②电化学极化：在电化学反应中，电极表面的反应速率受到约束，不能达到与溶液中活性物质反应速率相同的极化现象。这种极化是由于电极表面上的反应速率限制了整个电化学系统的反应速率，这种由于电化学反应速度缓慢而引起的情況被称为电化学极化。

③电阻极化 ΔE_R ：电阻极化主要是由电解质溶液中离子的传递速率受到限制而引起的。在电解质溶液中，离子在电场的作用下向电极迁移，但这个过程本身也存在电阻。电解质溶液的电导率和电极与电解质溶液之间的接触电阻会影响离子迁移速率和电流密度分布。当电阻较大时，电流在电解质溶液中的传递受到限制，导致电极电势降低，形成电阻极化。电阻极化的过电位可由下式计算：

$$\Delta E_R = IR_d \quad (2-5)$$

式中， I —电极电流(A);

R_d —钝化膜电阻(Ω)

(2) 阳极极化曲线测量系统

SUS304 材料具有很高的耐腐蚀性、热稳定性和机械强度。它可以用于制作各种用途的机械零部件、电器设备、化工设备、食品加工设备、建筑装饰及航空航天领域等，所以 SUS304 具有很广泛的应用前景，其合金含量如下表 2-1 所示。

表 2-1 SUS304 钢的化学成分(%)

成分	Fe	Cr	Ni	Mn	Si
SUS304	68	19	10	1.5	1

1) 电化学工作站

本试验采用电化学工作站(上海辰华 CHI660E)，联合 chi660e 配套软件对电化学进行动力学测量、电分析、基础研究、腐蚀和电池研究。工作站可以通过外部计算机进行控制，在视窗操作系统下运行，如图 2-3 所示。

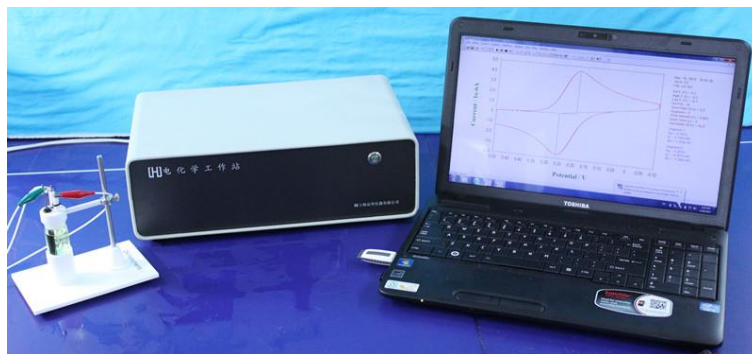


图 2-3 电化学工作站

2) 三电极体系

三电极体系是电化学研究中常用的一种实验配置，用于研究电化学反应、催化反应和电化学界面的行为等。它包括一个工作电极、一个参比电极和一个辅助电极，每个电极承担不同的功能。

① 工作电极

工作电极(Working electrode)是测量电化学反应电位和极化曲线的主要电极，即工作电极为 SUS304,工作电极是进行电化学反应的主要场所，它承担着传递电荷和反应物质的功能。

② 辅助电极

辅助电极(Counter electrode)的主要的作用是提供电子传输的通道，以维持电化学系统中的电荷平衡。所以本实验选择 5mm×10mm 的铂片电极，采用铂片电极作为辅助电极具有高导电性、抗腐蚀性能、催化活性和平整表面等多种优点，能够提供稳定的电子传输通道，并在电化学实验中发挥关键作用。

③ 参比电极

参比电极(Reference electrode)提供了稳定的电势参考，可以精确测量工作电极和比较电极之间的电位差。常见的比较电极种类包括饱和甘汞电极、银/氯化银电极、铂/酸性溶液饱和的银电极等。比较电极的电势是已知且稳定，在电化学测量中被视为恒定数值，本试验选择 $\phi 6 \times 65\text{mm}$ 的银/氯化银电极。

3) 其他试验设备

① 分析天平

如图 2-4 为本试验选用的 METTLER TOLEDO 分析天平，最高可达到 0.1 μg 可读性，由于高性能称量单元的灵敏度，分析天平配有防风罩，以确保稳定的称量环境。

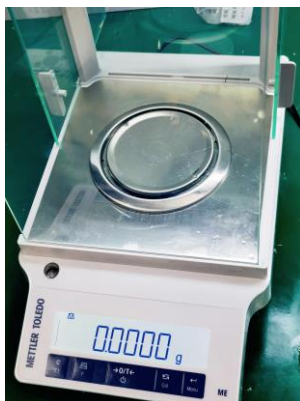


图 2-4 精密分析天平

②磁力搅拌器

如图 2-5 选用数显恒温磁力搅拌器，包含磁力搅拌器和温度控制器功能，可同时进行搅拌和加热，仪表设定温度，温度可控可恒温，温度范围：室温-100°，搅拌量 1000ml。该设备受热均匀，可对试验的电解液进行加热。



图 2-5 数显恒温磁力搅拌器

③电导仪

图片 2-6 中的设备是上海仪电科学公司生产的 DDBJ-350F 型手持电导仪，能够检测电导率、电阻率、总溶解固体(TDS)、盐度和温度数值。该设备支持多种读数方式，包括连续读数、平衡读数和定时读数，用户可以选择长时间间隔或者短时间间隔进行读数。此外，它可以存储 1000 组电导率、TDS、盐度和电阻率的测量结果。可满足实验室对电导率测量的需求。



图 2-6 DDBJ-350F 型便携式电导仪

(3) 极化曲线分析

极化曲线是用来描述电化学系统中工作电极电位与工作电流之间的关系的图形。本试验主要对 SUS304 材料的电化学溶解特性进行分析，将待测 SUS304 工件切割成边长为 10mm 方形试件，然后采用 2000#砂纸进行表面打磨，然后对打磨后的试件进行酒精清洗，吹干备用。本文采用 NaCl 溶液作为电解液，电解液浓度配比为 10%条件下进行试验，主要试验参数如表 2-2 所示。在进行试验时，参比电极表面与工作电极表面保持相互平行，以确保电场的均匀性且所有的电化学反应都作用在工作电极上，极化试验设备的示意图可参见图 2-7。

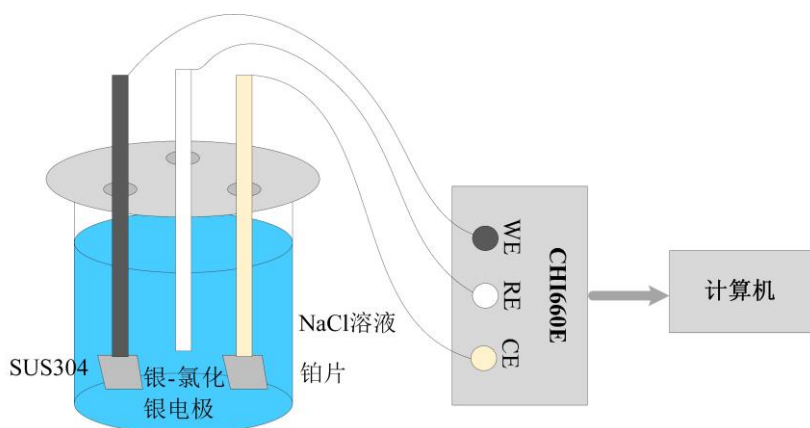


图 2-7 极化试验设备示意图

使用铂网材料作为辅助电极，所有电位都在饱和热线性电极上测量。在进行测量之前，在 -1V 下从工作电极上去除氧化膜 60 s，表面在 E_{ocp} 下稳定 30 min。电位扫描速率为 2 mV/s。极化测量在 10 wt.%氯化钠溶液中，在 $18 \pm 1^\circ\text{C}$ 下进行三次。

表 2-2 电化学测试试验参数

参数	参数值
电解液种类	NaCl
电解液浓度	10%
扫描速度	2mv/s
测量电位	-1~5V

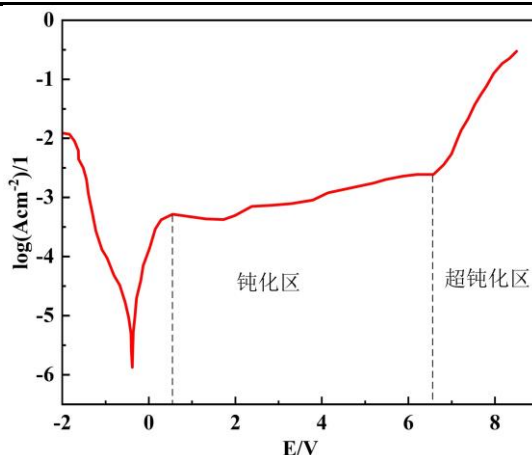


图 2-8 SUS304 在 10%NaCl 溶液中的极化曲线

SUS304 在氯化钠溶液的极化曲线如图 2-8 所示，实验证明，SUS304 在氯化钠溶液中表现出不完全钝化区和超钝化区，并显示出钝化特性。质量分数的 10 wt.%氯化钠溶液钝化区间大约为 0.48V-6.67V，钝化范围更广、钝化更稳定，可选用质量分数 10 wt.%氯化钠溶液。

2.1.3 电流效率

电流效率 η 是用来表征在电化学加工中，阳极金属溶解所消耗的实际电量与通过阳极界面总电量之间的利用率^[54]。在实际电化学加工中，金属的溶解量通常会与理论溶解量有所偏差。因此，引入电流效率 η 的概念来描述这种偏差，即公式为：

$$\eta = M / Kit \quad (2-6)$$

式中， M 是样品溶解的质量(g), K 是理论质量电化学当量， I 是阴极和阳极之间的电流(A), t 是加工时间(s), 在进行测量时，电化学反应发生在恒定的电流密度下。记录加工时间，测量样品的重量损失，然后用公式(2-6)计算电流效率。

Bejar 和 Gutierrez 通过实验测得电流效率随电流密度变化的规律，本文在相同条件下，测得 304 不锈钢材料电化学溶解过程中，电流密度与电流效率的变化关系曲线，

如图 2-9 所示。采用最小二乘法，对实验数据进行拟合，得电流密度与电流效率得关系为：

$$\eta(i) = \frac{0.85}{1 + e^{\frac{(10-i)}{6}}} - 0.1 \quad (2-7)$$

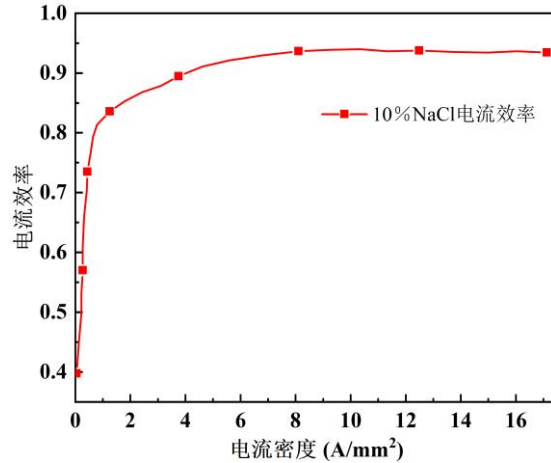


图 2-9 电流效率曲线的拟合

2.2 机器人运动学分析

2.2.1 机器人运动学与坐标系

在进行电化学加工时，必须对机器人的加工系统坐标系进行建立和分析。这是因为机器人在执行加工任务时，需要精确控制其位置和姿态，以确保加工过程的准确性和稳定性。如图 2-10 所示，展示了整个机器人坐标系系统的结构，其中包括基座坐标系 O、工件坐标系 B 以及工具坐标系 A。基座坐标系 O 是建立在机器人的本体基座坐标上的，是整个坐标系系统的基准。所有后续的坐标系标定都以它为基准，确保了整个加工过程的一致性和准确性。工件坐标系 B 用于确定工件的位置，它是一个固定不变的绝对坐标系，不受机器人运动的影响。通过工件坐标系 B，可以准确地定位工件，为后续的加工操作提供准确的参考。而工具坐标系 A 则是相对动态的，其坐标原点位于工具管电极的末端。随着机器人末端的移动，工具坐标系 A 的位置和姿态会发生变化。因此，在机器人运动过程中，需要动态地更新工具坐标系 A 的位置和姿态信息，以确保加工过程的准确性和稳定性。机器人轨迹生成的过程实际上是坐标系 A 相对于坐标系 B 的位置和姿态的变化过程。通过精确分析和建立坐标系间的相对关系，可以有效地控制机器人的运动轨迹，实现精密的电化学加工操作。

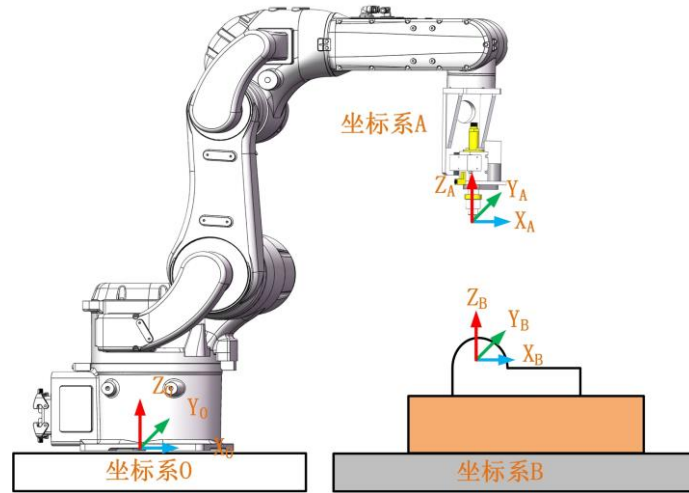


图 2-10 机器人坐标系系统

在进行工具坐标系 A 和工件坐标系 B 的标定之前，首先需要构建机器人的运动学模型。这是因为机器人的运动是由多个连杆和执行机构组成的开链系统所驱动的，为了准确描述它们之间的关系，需要建立机器人的运动学模型。通过建立机器人的运动学模型，可以深入理解机器人的运动规律和结构特点，为后续的工具坐标系 A 和工件坐标系 B 的标定提供基础和支持。

本文采用了 Modified-DH 方法对机器人进行运动学建模。Modified-DH 方法是对传统的 Denavit-Hartenberg (DH)方法进行改进的一种机器人运动学建模方法。它主要解决了传统 DH 方法在描述复杂机器人结构时遇到的一些问题，例如轴向旋转不规则和关节轴不相交等。Modified-DH方法引入了一些新的参数和规则，可提高运动学模型的精度和有效性^[55]。

2.2.2 Modified-DH 法机器人正运动学及验证

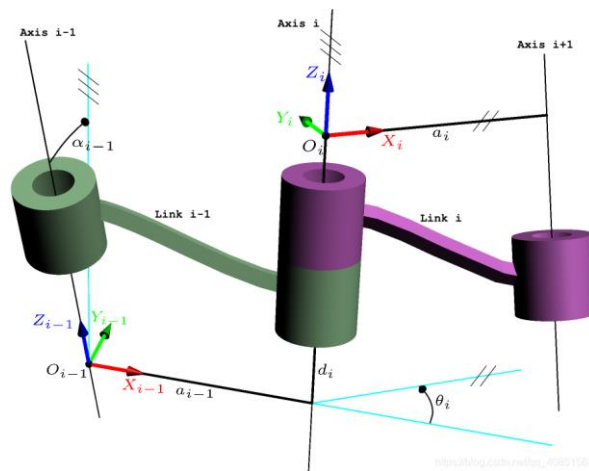


图 2-11 机器人连杆坐标系示意图

图 2-11 展示了机器人的连杆坐标示意图，其中采用改进的 D-H 方法：连杆 a_{i-1} 的长度表示 X_{i-1} 轴上从 Z_{i-1} 到 Z_i 的直线距离；连杆扭角 α_{i-1} 表示围绕 X_{i-1} 轴， Z_{i-1} 转动至 Z_i 的角度；关节角 θ_i 代表绕 Z_i 轴， X_{i-1} 旋转至 X_i 的角度；距离 d_i 为 Z_i 轴上，从 X_{i-1} 至 X_i 的长度。利用 M-DH 方法进行的坐标系定位结果在图 2-12 中显示。

表 2-3 是 ER20-1100 机器人 M-DH 参数。定义图 2-12 位置为机器人的初始姿态位置。

表 2-3 ER20-1100 机器人 M-DH 参数表

连杆 i	连杆扭角 $\alpha_{i-1}/^\circ$	连杆长度 a_{i-1}/mm	关节夹角 θ_i	连杆距离 d_i
1	0	0	$\theta_1(0)$	430
2	90	180	$\theta_2(90)$	0
3	0	400	$\theta_3(0)$	0
4	90	160	$\theta_4(0)$	540
5	-90	0	$\theta_5(0)$	0
6	90	0	$\theta_6(0)$	116

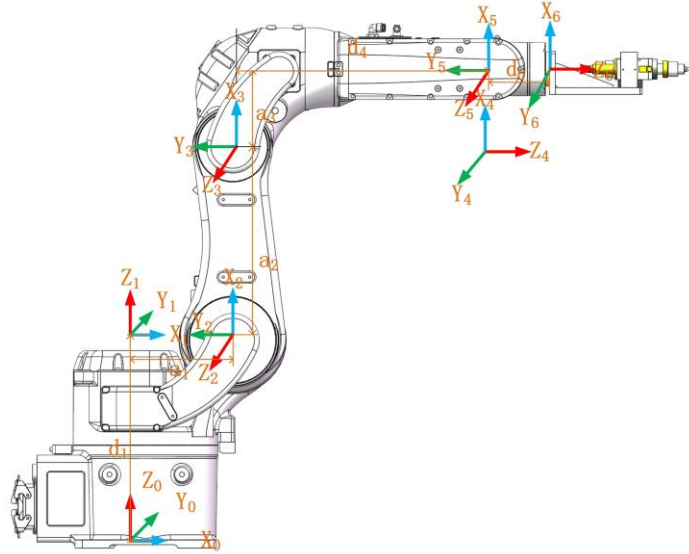


图 2-12 机器人坐标系建立

M-DH 方法得出的相邻坐标系之间的齐次变换矩阵符合方程式 2-8。

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}T_i &= \text{Rot}(Z_i, \theta_i) \text{Trans}(a_{i-1}, 0, 0) \text{Trans}(0, 0, d_i) \text{Rot}(Z_i, \theta_i) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-8)
 \end{aligned}$$

可以求出每一个连杆的变换矩阵：

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & a_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & a_2 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_5 & -\cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S_5 & -C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_6 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_6 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T$ 表示机器人末端执行器中心在基座坐标系下的位置与方向。可以将其改写为：

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0_1T(\theta_1) {}^1_2T(\theta_2) {}^2_3T(\theta_3) {}^3_4T(\theta_4) {}^4_5T(\theta_5) {}^5_6T(\theta_6) \quad (2-15)$$

本方程定义了机械臂末端执行器坐标系的方向向量和其在基座坐标系内的位置。

式中 r_{11} 、 r_{21} 、 r_{31} 表示了机械臂末端法兰盘坐标系 x 轴在基座坐标系中的方向矢量，而

r_{12} 、 r_{22} 、 r_{32} 则代表了机械臂末端法兰盘坐标系 y 轴在基座坐标系中的方向矢量。同样地 r_{13} 、 r_{23} 、 r_{33} 则表示了机械臂末端法兰盘坐标系 z 轴在基座坐标系中的方向矢量。而 p_x 、 p_y 、 p_z 则代表了机械臂末端在基座坐标系中的具体坐标位置。

式中：

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= C_1(C_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_{23}S_5C_6) + S_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6) \\
 r_{12} &= C_1(C_{23}(-C_4C_5C_6 - S_4S_6) + S_{23}S_5C_6) + S_1(-S_4C_5C_6 + C_4S_6) \\
 r_{13} &= -C_1(C_{23}C_4C_5 + S_{23}C_5) - S_1S_4S_5 \\
 r_{21} &= S_1(C_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_{23}S_5C_6) - C_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6) \\
 r_{22} &= S_1(C_{23}(-C_4C_5C_6 - S_4S_6) + S_{23}S_5C_6) + C_1(S_4C_5C_6 - C_4S_6) \\
 r_{23} &= -S_1(C_{23}C_4C_5 + S_{23}C_5) + C_1S_4S_5 \\
 r_{31} &= -S_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - C_{23}S_5C_6 \\
 r_{32} &= S_{23}(C_4C_5C_6 + S_4S_6) + C_{23}S_5S_6 \\
 r_{33} &= S_{23}C_4S_5 - C_{23}C_5
 \end{aligned} \tag{2-16}$$

$$\begin{aligned}
 p_x &= C_1(a_2C_2 + a_3C_{23} - d_4S_{23} + a_1) - d_6(C_1(C_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5) + S_1S_4S_5) \\
 p_y &= S_1(a_2C_2 + a_3C_{23} - d_4S_{23} + a_1) - d_6(S_1(C_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5) - C_1S_4S_5) \\
 p_z &= -a_3S_{23} - a_2S_2 - d_4C_{23} + d_1 + d_6(S_{23}C_4S_5 - C_{23}C_5)
 \end{aligned} \tag{2-17}$$

本论文所采用的埃夫特机器人 ER20，其 M-DH 参数已知，已知机器人的关节空间角度后，可通过机器人运动学逆解来计算末端法兰盘中心点的位置矩阵。

为了验证机器人正运动学算法的准确性，我们根据 M-DH (Modified Denavit-Hartenberg) 参数表，在 MATLAB 环境下采用 Robotics Toolbox 机器人工具箱来建立仿真模型。通过这个仿真模型，我们可以模拟机器人的运动，并且比较仿真结果与正运动学算法计算出的结果，从而验证算法的准确性。在建立仿真模型的过程中，我们根据 M-DH 参数表来描述机器人各个连杆之间的关系，并且利用 Robotics Toolbox 提供的工具和函数来构建机器人的运动学模型。图 2-13 展示了机器人正运动学算法的验证过程，通过对比仿真模型的结果和算法计算结果。

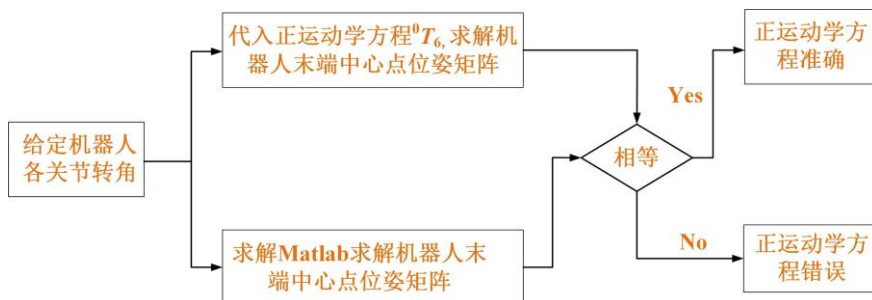


图 2-13 机器人正运动学方程的验证过程

本研究所采用机器人 M-DH 参数：连杆长 $a_1=0.18\text{m}$, $a_2=0.4\text{m}$ $a_3=0.16\text{m}$, 连杆偏距 $d_1=0.43\text{m}$, $d_4=0.54\text{m}$, $d_6=0.116\text{m}$ 。同时给出给出初始角度值($\theta_1=0$ 、 $\theta_2=90^\circ$ 、 $\theta_3=0$ 、 $\theta_4=0$ 、 $\theta_5=0$ 、 $\theta_6=0$)把以上这些初始值带入到方程(2-15)中。可得到末端法兰盘的位姿矩阵。

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.836 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0.99 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

利用 Robotics Toolbok 中的工具箱，可以计算机器人末端法兰盘中心点的姿态。给定机器人的初始关节空间矩阵为 $\theta=[0,\pi/2,0,0,0,0]$ ，利用 Robotics Toolbok 中内置的函数“ $T = \text{Six_Link.fkine}(r,q)$ ”可以求得当前空间的姿态矩阵。经过 Matlab 仿真，得到的运动学解与通过解析方法得到的结果完全一致。编译 MATLAB 脚本输出结果如图 2-14。

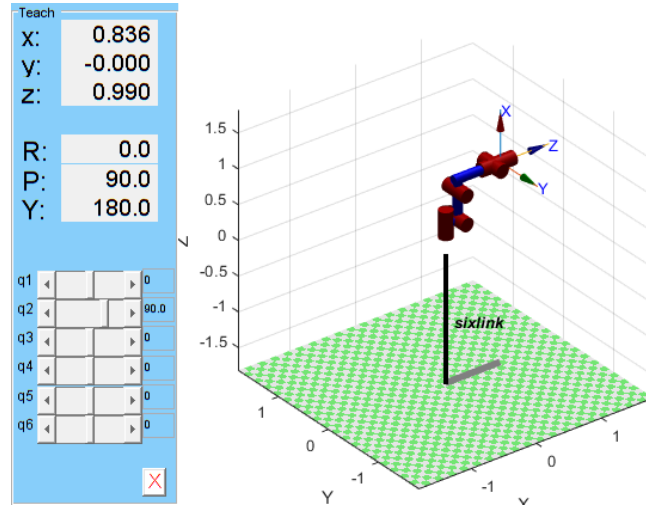


图 2-14 MATLAB 脚本机器人加工初始状态

2.2.3 Modified-DH 法机器人逆运动学及验证

根据正向运动学求得的齐次变换矩阵为 0_6T ，可通过逆运动学方法计算出各个关节的角度值。

${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T$ 将上式两边左乘 $({}^0_1T)^{-1}$ 得：

$${}^1_6T = ({}^0_1T)^{-1} \times {}^0_6T = ({}^0_1T)^{-1} \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

其中

$${}^1_6T = \begin{bmatrix} C_{234}C_5C_6 - S_{234}S_6 & -C_{234}C_5C_6 - S_{234}S_6 & C_{234}S_5 & a_3C_{23} + a_2C_2 + d_5S_{234} - d_6C_{234}S_5 \\ -S_5S_6 & S_5S_6 & -C_5 & -d_6C_5 - d_4 \\ S_{234}C_5C_6 + C_{234}S_6 & C_{234}C_6 - S_{234}C_5S_6 & S_{234}S_5 & a_3S_{23} + a_2C_2 - d_5C_{234} - d_6S_{234}S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

$$= \begin{bmatrix} C_1n_x + S_1n_y & C_1o_x + S_1o_y & C_1a_x + S_1a_y & C_1p_x + S_1p_y \\ -S_1n_x + C_1n_y & -S_1o_x + C_1o_y & -S_1a_x + C_1a_y & -S_1p_x + C_1p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

假设 $d_6=0$,

①求解关节 1、5、6 角度:

由上面的 R24 相等得:

$$-S_1p_x + C_1p_y = -d_4 \quad (2-21)$$

$$\theta_1 = a \tan 2(p_y, p_x) - a \tan 2\left(-d_4, \pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_4^2}\right) \quad (2-22)$$

为求解结果, 必须有 $p_x^2 + p_y^2 - d_4^2 \geq 0$, 这样才能有解。

由 R21, R22, R23 相等得到

$$\begin{cases} -S_1n_x + C_1n_y = -S_5C_6 & (1) \\ -S_1o_x + C_1o_y = S_5C_6 & (2) \\ -S_1a_x + C_1a_y = -C_5 & (3) \end{cases} \quad (2-23)$$

由等式(2-23)得

$$S_5 = \pm\sqrt{(-S_1n_x + C_1n_y)^2 + (-S_1o_x + C_1o_y)^2} \quad (2-24)$$

由等式(2-23), (2-24)得

$$\theta_5 = a \tan 2(S_5, S_1a_x - C_1a_y) \quad (2-25)$$

得出 θ_5 后由(2-23)得

$$\begin{cases} S_6 = \frac{-S_1o_x + C_1o_y}{S_5} \\ C_6 = \frac{S_1n_x - C_1n_y}{S_5} \end{cases} \quad (2-26)$$

②求解 2,3,4 关节角度

由 R13, R33, 得到

$$\begin{cases} C_1 a_x + S_1 a_y = -C_{234} S_5 \\ a_2 = -S_{234} S_5 \end{cases} \quad (2-27)$$

得到：

$$\theta_{234} = a \tan 2 \left(-\frac{a_2}{S_5}, -\frac{C_1 a_x + S_1 a_y}{S_5} \right) \quad (2-28)$$

对比矩阵两边元素 R14, R34

$$\begin{cases} C_1 p_x + S_1 p_y = a_3 C_{23} + a_2 C_2 + d_5 S_{234} \\ p_z - d_1 = a_3 S_{23} + a_2 S_2 - d_5 C_{234} \end{cases} \quad (2-29)$$

消去 θ_{23} ，化简为：

$$-AS_2 + BC_2 = C \quad (2-30)$$

式中令：

$$\begin{cases} A = -2B_2 a_2 \\ B = 2B_1 a_2 \\ C = B_1^2 + B_2^2 + a_2^2 - a_3^2 \\ B_1 = -2B_2 a_2 \\ B_2 = Pz - d_1 + d_5 C_{234} \end{cases} \quad (2-31)$$

则根据等式，依据万能公式：

$$\theta_2 = a \tan 2(B, A) - a \tan 2\left(C, \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}\right) \quad (2-32)$$

需要满足 $A^2 + B^2 - C^2 \geq 0$

$$\begin{cases} S_{23} = \frac{B_2 - a_2 S_2}{a_3} \\ C_{23} = \frac{B_1 - a_2 C_2}{a_3} \end{cases} \quad (2-33)$$

$$\begin{cases} \theta_{23} = a \tan 2 \left(\frac{B_2 - a_2 S_2}{a_3}, \frac{B_1 - a_2 C_2}{a_3} \right) \\ \theta_4 = \theta_{234} - \theta_{23} \\ \theta_3 = \theta_{23} - \theta_2 \end{cases} \quad (2-34)$$

为了验证机器人逆运动学算法的准确性，进行了一项对比试验。首先，我们通过解析方法计算出了一组关节空间角度。随后，利用 Robotics Toolbox 工具箱进行了相同

的计算，得到了另一组关节空间角度。通过对比这两组结果，我们能够确认机器人逆解算法的准确性。具体的验证过程如图 2-15。

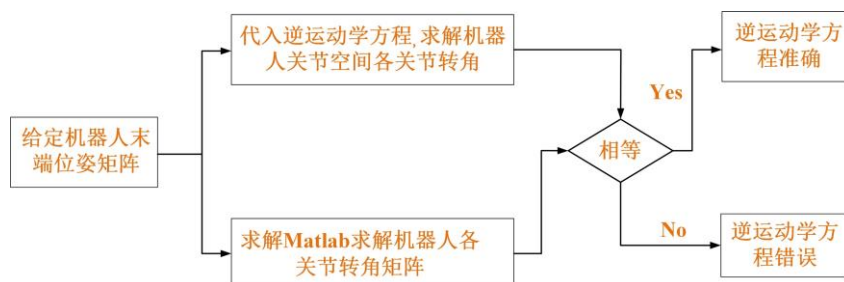


图 2-15 机器人逆运动学的验证过程

为了验证逆运动学算法的准确性，我们给定一组机器人末端中心点的位姿矩阵作为已知参数 $q_1=\pi/2, q_2=-2\pi/3, q_3=-2\pi/3, q_4=0, q_5=2\pi/3, q_6=0$ ，根据第 2.2.3 章逆运动学解析算法计算了 6 个关节的 8 个解。表 2-4 列出了相应逆运动学求解结果。其中，第 7 组解与给定的特定初始角度值 $q_1=\pi/2, q_2=-2\pi/3, q_3=-2\pi/3, q_4=0, q_5=2\pi/3, q_6=0$ 相等，进而验证了该逆运动学算法的准确性。

表 2-4 机器人逆运动学 8 组解

序号	关节	$q(\text{rad})$	关节	$q(\text{rad})$	关节	$q(\text{rad})$
1	1	4.2698	2	5.4452	3	1.3889
	4	-5.4953	5	0.8780	6	2.6394
2	1	4.2598	2	0.4959	3	-1.3779
	4	2.2316	5	0.8789	6	2.6351
3	1	4.2698	2	5.1432	3	2.1145
	4	-9.0456	5	-0.8798	6	-5.0211
4	1	4.2698	2	0.8650	3	2.2316
	4	-0.5456	5	-0.8790	6	-0.5211
5	1	1.5789	2	-2.2412	3	-1.1212
	4	2.6045	5	-2.954	6	3.1388
6	1	1.5691	2	2.6756	3	1.4333
	4	-5.1254	5	-2.0854	6	3.1388
7	1	1.5691	2	-2.0945	3	-2.0917
	4	6.2797	5	2.0953	6	-0.0017
8	1	1.5690	2	2.2105	3	2.0916
	4	-2.2087	5	2.0953	6	-0.0017

2.2.4 坐标系统的标定

在进行电化学加工时，对坐标系进行标定。这个过程涉及对工件坐标系和工具坐标系，其目的是确定这两个坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵。

(1) 工具坐标系标定

默认情况下，工具坐标系原点位于机器人末端执行器中心。然而，在管电极电化学加工过程中，真实工具坐标系的原点位置位于管电极的末端。因此，需要重新标定工具坐标系。默认工具坐标系与 M-DH 法中的第 6 轴坐标系相同，所以默认工具坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵为 0T_6 。根据(2-35)式，可以得到工具坐标系 A 相对于基坐标系 O 的齐次变换矩阵。通过这个变换矩阵，可以将工具坐标系 A 与基坐标系 O 之间的位置关系表示出来。这样可以减少冗余，并且更好地描述机器人工具的位置。

$${}^0T_A = {}^0T_6 {}^6T_A \quad (2-35)$$

式(2-35)中， 0T_6 为单位矩阵， 6T_A 可由机器人正运动学求出，因此，标定工具坐标系转化为解求工具坐标系 A 至第 6 轴坐标系的齐次变换矩阵问题。即确定工具坐标系 A 相对于第 6 轴坐标系的姿态和位置信息。

根据图 2-15，初始时默认工具坐标系的 Z 轴为水平向下，而工件坐标系 A 和基坐标系 O 的 Z 轴竖直向上。为方便表示加工点的位姿，对工具坐标系 B 进行简单姿态变换：绕自身 X 轴旋转 180° ，使工具坐标系 A 的 Z 轴竖直向上，从而得到满足式(2-36)的旋转矩阵。

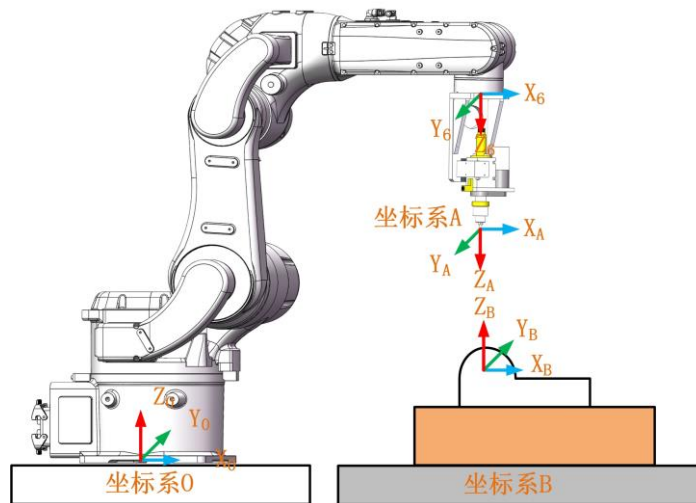


图 2-15 机器人坐标系标定

$${}^6_A R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

工具坐标系的原点被定义为工具电极的末端位置。工具电极末端在默认工具坐标系中的位置向量符合特定的数学方程式(2-37)。我们已经获悉工具坐标系 A 相对于 M-DH 法中第 6 个关节坐标系的姿态信息。通过确定一个齐次变换矩阵, 该矩阵符合特定的数学方程式(2-38), 从而完成了对工具坐标系的标定。

$${}^6 p = [0 \quad 0 \quad 29.82] \quad (2-37)$$

$${}^6_A T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 29.82 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

(2) 工件坐标系标定

随着机器人的移动, 工件坐标系 B 的位置和姿态会发生变化, 与工具坐标系不同。工件坐标系 B 是一个固定在空间中特定姿态的坐标系, 它被用于工件的定位和描述。为了准确地控制机器人执行任务, 需要对工件坐标系 B 进行标定。标定工件坐标系 B 的目的是为了计算工件坐标系 B 与基坐标系 O 之间的齐次变换矩阵, 通常表示为 ${}^0_B T$ 。

工件坐标系 B 的标定方法 TCP&Z, X 方法。首先 1.在桌面点击“工具坐标系”的图标, 计入工具标定设置界面。2.在工具设置界面点击“标定”按钮, 进入标定界面, 显示需要标定的第一点。3.标定第二点界面。后续标定 TCP 点位置所需要点的过程与其一致, 但是每一个记录点的机器人姿态变化尽量大一些。4.当四点标定完成后, 会出现“计算”按钮。5.点击“计算按钮”会进入最终的计算结果显示界面。6.保持机器人姿态不变, 移动机器人远离参考尖点, 该方向作为工具坐标系的 Z 正方向。点击“示教”按钮, 将当前机器人位置记录。图 2-16 为工件坐标系标定 TCP&Z, X 方法。

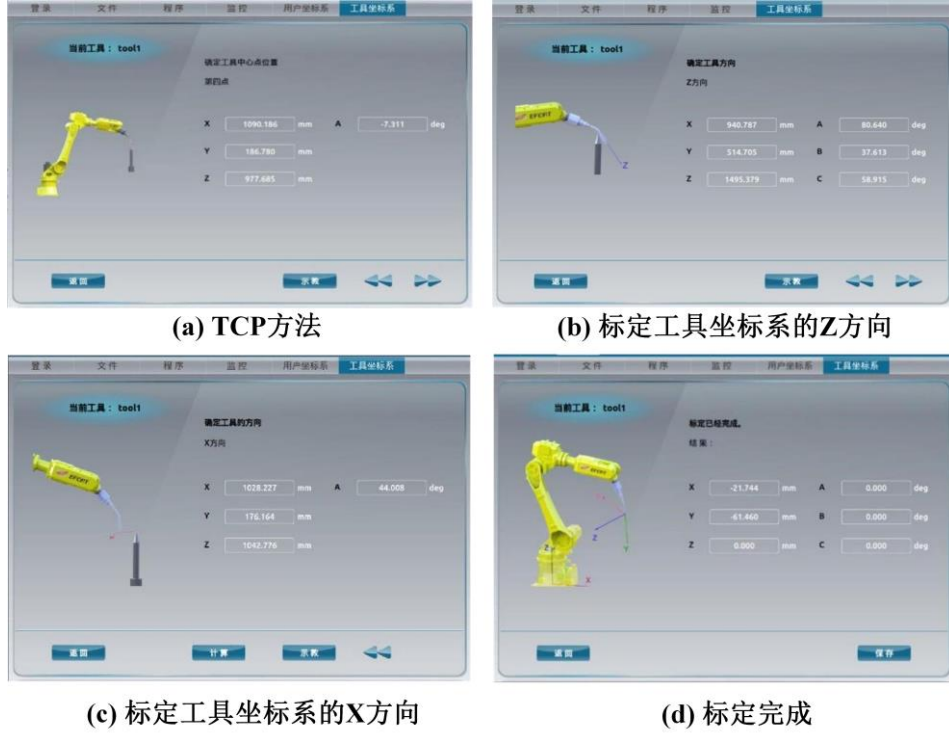


图 2-16 工件坐标系 TCP&Z, X 方法

2.3 NURBS 曲线曲面计算

非均匀有理 B 样条(Nurbs)可实现各种常见曲线的精确表示, 如圆弧、抛物线、椭圆、直线和双曲线等^[56-57], 是 CAD/CAM 系统中的标准曲线。因此在许多数控系统中, 常用他们描述轨迹^[58]。

2.3.1 NURBS 曲线表达

一次 p 次 NURBS 曲线定义为^[59]

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \omega_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \omega_i}, a \leq u \leq b \quad (2-39)$$

其中控制点 $\{P_i\}$ 是用来定义控制多边形的点, 而权因子 $\{\omega_i\}$ 则用来调整各个点的影响程度。另外, $\{N_{i,p}(u)\}$ 表示在非周期节点向量 U 上定义的 p 次 B 样条基函数。

$$U = \left\{ \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \right\} \quad (2-40)$$

除非特别说明, 我们假设 $a=0$, $b=1$, 并对于所有的 i , ω_i 大于零。

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u)\omega_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u)\omega_j} \quad (2-41)$$

则(2-41)式可改写为

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u)P_i \quad (2-42)$$

其中, $\{R_{i,p}(u)\}$ 称为有理基函数, 它们是 $u \in [0,1]$ 上的分段有理函数。

2.3.2 NURBS 曲面表达

一张在 u 方向 p 次、 v 方向 q 次的 NURBS 曲面是具有以下形式的双变量分段有理失值函数^[60]

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)\omega_{i,j}P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)\omega_{i,j}}, 0 \leq u, v \leq 1 \quad (2-43)$$

$\{R_{i,j}\}$ 构成了一个双向控制网格, $\{\omega_{i,j}\}$ 代表权重, $\{R_{i,p}(u)\}$ 和 $\{N_{i,q}(v)\}$ 分别代表节点矢量 U 和 V 上的非有理 B 样条基函数。

$$U = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\} \quad (2-44)$$

$$V = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, v_{q+1}, \dots, v_{s-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \right\} \quad (2-45)$$

这里 $r=n+p+1$, $s=m+q+1$ 。

引入分段有理基函数

$$R_{i,j}(u,v) = \frac{N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)\omega_{i,j}}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m N_{k,p}(u)N_{l,q}(v)\omega_{k,l}} \quad (2-46)$$

式(2-46)可改写为

$$S(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u,v)P_{i,j} \quad (2-47)$$

2.4 本章小结

本章中，围绕机器人管电极脉冲电化学加工理论进行了如下研究:介绍了管电极脉冲电化学加工的三种方式，采用内部射流供液的方式较好，分析了 SUS304 的溶解特性，质量分数的 10 wt.%氯化钠溶液钝化范围更广、钝化更稳定，测得 304 不锈钢材料电化学溶解过程中，电流密度与电流效率的变化关系曲线，并采用最小二乘法，对实验数据进行拟合，得电流密度与电流效率关系。对机器人的加工系统坐标系进行构建分析，即采用 M-DH 法的正运动学模型建立，并验证了建立的运动学模型的正确性，于此对坐标系进行标定，确定这两个坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵。对非均匀有理 B 样条(Nurbs)描述轨迹进行了介绍。

第3章 管电极脉冲电化学加工过程建模与仿真方法研究

目前上述研究方法在简化仿真建模策略方面取得了一定进展。对于 TE-PECM 耦合脉冲电场、两相流场、温度场、结构场的多物理场仿真研究尚少，此外，缺乏对脉冲电化学加工多时间尺度加工过程的精确描述。为了实现脉冲电流存在时的高效模拟和描述电化学加工多场耦合关系，为小孔加工提供了一种高效可行性加工仿真方法。

3.1 电化学加工多物理场仿真模型的建立

3.1.1 几何模型

图 3-1(a)为 TE-PECM 三维几何模型，管电极阴极和工件阳极连接于脉冲电源正负极，电解液高速流入到加工间隙中，形成完整的闭合回路。当管状电极与工件接触时，它们之间会发生电化学反应。管状电极在阴极表面会发生还原反应，导致氢气的产生。随着管电极向前移动，工件作为阳极会持续溶解和逐渐改变形状。由于孔壁的二次腐蚀会对加工精度造成影响，因此在管电极阴极的外侧面涂有绝缘层^[61]。

由于管电极小孔加工结构，具有旋转中心对称性，故本研究将三维结构模型简化为基于旋转中心对称的二维结构模型，如图 3-1(b)所示，电解液从边界 5 流入加工区域，随着阴极边界(6、7、9)的持续进给，阳极边界 4 产生电解腐蚀产物，阴极边界 6、7 产生氢气，电解质、电解腐蚀产物和氢气泡的混合物最终从边界 10、12 流出。

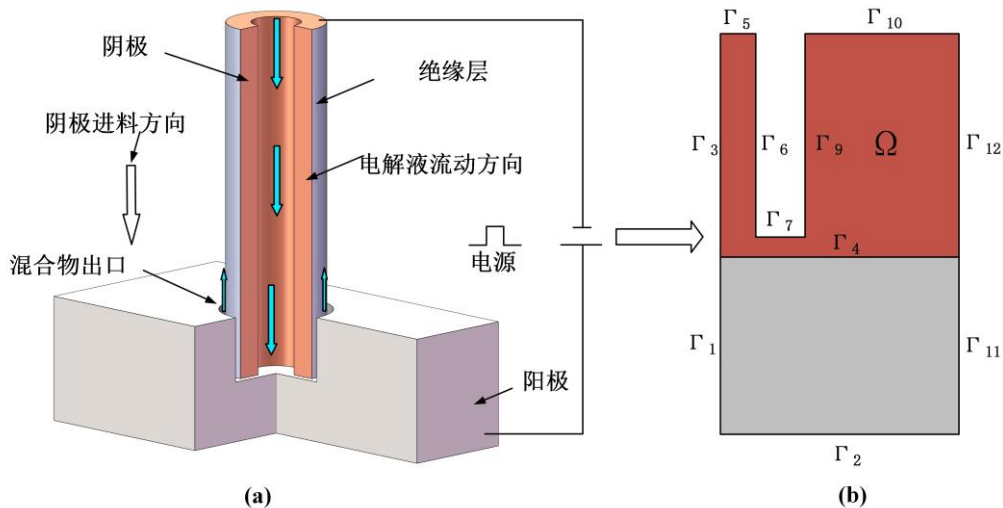


图 3-1 (a) 管电极脉冲电化学加工的三维几何模型；(b) 简化的二维模型

3.1.2 电场模型

在 TE-PECM 过程中, 假定电解质中的离子浓度分布均匀并且稳定, 依据电荷守恒定律和欧姆定律, 可以得出电解液及电极的控制方程式^[62]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (-\sigma_l \nabla \phi_l) = 0 \\ \nabla \cdot (-\sigma_s \nabla \phi_s) = 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

式中: σ_l 为电解质电导率, ϕ_l 为电解质电位, σ_s 为电极电导率; ϕ_s 为电极电势。

工具阴极连续进给, 电场边界条件可表示为:

$$\phi|_{\tau_2} = U \text{ (Anode surface)} \quad (3-2)$$

$$\phi|_{\tau_8} = 0 \text{ (Cathode surface)} \quad (3-3)$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{\tau_9} = 0 \text{ (Insulation)} \quad (3-4)$$

在电极/电解液(τ_4 、 τ_6 、 τ_7)界面上, 由于电极反应的发生, 电极电位偏离平衡电位, 发生电极极化现象, 可由一个温度相关的线性极化模型来描述^[63]:

$$j_k|_{\tau_{4,6,7}} = \left[1 + \alpha(T - T_0) \right] \frac{U - \delta_E}{R_K} \quad (3-5)$$

式中: j_k 为反应电流的密度, T_0 为初始温度, U 为阴阳极之间的电压, δ_E 为阴阳极之间的极化电位值之和 3.604V, R_K 为极化电阻, α 为极化温度相关系数 0.02。

阳极材料的去除和工具阴极的运动使得加工区域几何结构不断变化, 采用 Deformed Geometry 方法进行设定^[64]。阳极的溶解由边界网格法向运动速度代替:

$$\frac{dx}{dt} \cdot n = v_n|_{\tau_5} = -\eta \omega j_n \quad (3-6)$$

式中: v_n 为阳极溶解速度; j_n 为阳极表面法向电极电流密度; n 是法矢, 指向域外部; η 为 NaCl 电流效率; ω 为工件材料体积电化学当量。

电解液电导率除了受电解液浓度和温度的影响, 反应产生的气泡对电解液也产生影响^[65], 如下式:

$$\sigma_l = \sigma_0 (1 - \beta_g)^{b_p} [1 + \gamma(T - T_0)] \quad (3-7)$$

式中: σ_0 为电解液初始电导率, γ 为温度相关系数 0.02, T 为电解液温度, b_p 为气泡率对电导率的影响指数 1.5, T_0 为电解液初始温度, β_g 为气体体积分数。

3.1.3 气液两相湍流模型

流体力学中可依据雷诺数判断流体运动为湍流状态，即

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} > 2300 \quad (3-8)$$

式中 ρ 为电解液密度 1.07g/cm^3 ， v 为电解液速度 5m/s ， D 为管电极内径 2mm ， μ 为电解液运动粘性系数取 $1.25 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。

由于电解产物所占的体积很小，忽略其影响，将加工间隙的流场简化为气液两相流模型，采用分散型多相流的 $k-\varepsilon$ 气泡流模型，在气泡流模型中^[66-68]，流体的动量方程：

$$\begin{aligned} \Phi_l \rho_l \left[\frac{\partial u_l}{\partial t} + (u_l \cdot \nabla) u_l \right] = \\ \nabla \left[-pI + \Phi_l (\mu_l + \mu_T) \left(\nabla u_l + (\nabla u_l)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u_l) I \right) - \frac{2}{3} \Phi_l \rho_l kI \right] + \Phi_l \rho_l g + F \end{aligned} \quad (3-9)$$

混合物连续性方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Phi_l \rho_l + \Phi_g \rho_g) + \nabla \cdot (\Phi_l \rho_l u_l + \Phi_g \rho_g u_g) = 0 \quad (3-10)$$

气相运输方程：

$$\frac{\partial \Phi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\Phi_g \rho_g u_g) = -m_{gl} \quad (3-11)$$

式中 Φ_g 和 Φ_l 分别为气相和液相占两相流总体积的比例； ρ_l 和 ρ_g 分别为气体、液相密度， u_g 和 u_l 分别为气相、液相速度； p 为电解液压力； g 为重力加速度； F_m 为相间作用力， k 代表气泡引起的湍动能。

为了分析气泡的湍流输运行为，为气相速度场添加了漂移速度，两相流体中气、液相之间的速度为：

$$u_g = u_l + u_{slip} + u_{drift} \quad (3-12)$$

式中： u_{slip} 为滑移的速度， u_{drift} 为漂移的速度。

$$u_{drift} = -\frac{\mu_T}{\sigma_T \rho_l} \frac{\nabla \Phi_g}{\Phi_g} \quad (3-13)$$

式中 σ_T 是湍流施密特数， μ_T 是湍流粘度

管电极阴极界面产生的氢气质量通量为：

$$N_{H_2}|_{\tau_{6,7}} = M \frac{\eta j_n}{2F} \quad (3-14)$$

式中 M 为氢气的摩尔质量， F 为法拉第常数。

3.1.4 温度场模型

TE-PECM 热量产生主要由边界层中的反应热和电解液中的焦耳热，由于电极的电导率很大，因此，可忽略电极产生的焦耳热，加工过程中传热方程^[69]：

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u_l \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q_j + Q_{dl} \\ q = -k \nabla T \end{cases} \quad (3-15)$$

式中 ρ 为电极材料密度， C_p 为电极比热容， q 为热流密度； K 为电极导热系数； ∇T 为温度梯度； Q_j 为电解液的焦耳热； Q_{dl} 为管电极阴极和工件阳极边界产生的反应热。

$$Q_j = \sigma_l (\nabla \phi_l)^2 \quad (3-16)$$

式中 σ_l 为电解液电导率； ϕ_l 为电解质电位。

$$Q_{dl}|_{\tau_{4,6,7}} = j_k \eta_k \quad (3-17)$$

式中 j_k 为反应电流密度； η_k 为电解质过电位。

管电极阴极边界 τ_8 、阳极边界 τ_{11} 和流道边界 τ_{10} 与空气自然对流，其余边界均为热绝缘。

3.2 多物理场耦合仿真条件与策略

TE-PECM 多物理场耦合仿真模型如图 3-2(a)。在流道中的近阴极面、中心处和近阳极面选取 A、B 和 C 三个参考点。

3.2.1 仿真参数和边界条件设置

根据 TE-PECM 加工原理，构建多物理耦合仿真模型如图 3-2(a)，由于动态模拟会导致阴极和阳极表面产生较大的变形，因此对变形较大的阴极和阳极边界进行局部细化，以保证模拟结果的准确性如图 3-2(b)。

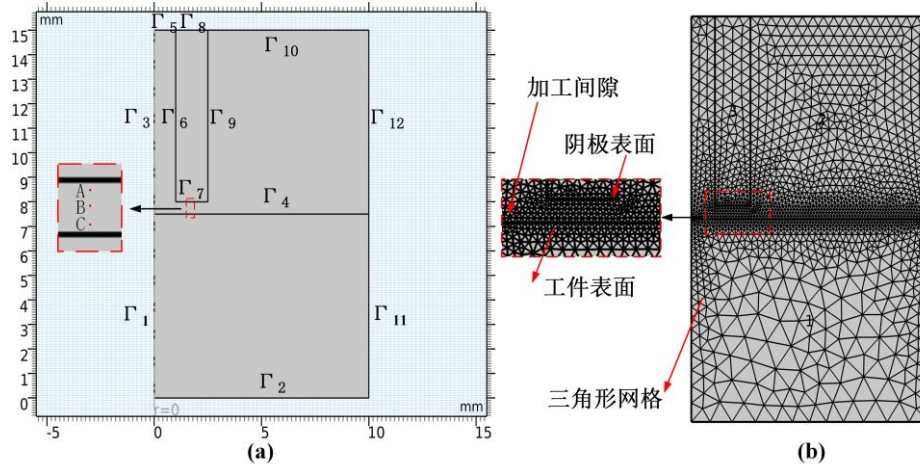


图 3-2 (a) 多物理场耦合模拟模型；(b) 网格划分
仿真前设置相关参数，具体模拟参数如表 3-1 所示。

表 3-1 模拟实验参数

加工参数	值	物理参数	值
初始加工间隙 (mm)	0.5	阴极和阳极材料	SS 304
外加电压 U (V)	26	电解液	10%NaCl
阴极进给速度(mm/min)	0.3	初始电解质电导率(S/m)	12.11
电解液的初始温度(°C)	18	电极电导率(S/m)	1.37×10^6
入口速度 v_i /(m/s)	5	电极的导热性(W/mK)	16.2
脉冲占空比(%)	50	电极密度 ρ_s /(Kg/m ³)	7930
脉冲频率(Hz)	1000	气泡大小/($\times 10^{-5}$ mm)	1

3.2.2 多物理场多时间耦合加工模拟策略分析

TE-PECM过程涉及物理场的时间尺度不同，脉冲电流时间尺度为微秒级。电极发生氧化还原产生热量和气体，热产生和气体产生等于脉冲电流时间尺度。流体动力学时间尺度是基于流体通过流动长度的工作间隙和流动时间，一般为毫秒级，氢转移和流体传热的时间尺度等于流体动力学的时间尺度，固体传热时间尺度为秒级，材料去除时间尺度为分钟和小时级^[70]。由于存在大跨度多时间尺度问题，考虑到耦合计算中高频脉冲电流存在，计算步长需要小于脉冲周期时间，若模拟长时间材料的去除，整个仿真计算量和计算时间十分巨大，难以求解。为了使热源变化不受脉冲周期的影响，于是引入热源平均方法对产生的反应热源进行平均求解，来代替热源在一段时间内的产生量，表达式为^[71]：

$$\begin{cases} \langle Q_j \rangle_{av} = \frac{1}{nT} \int_t^{t+nT} Q_j d\lambda \\ \langle Q_{dl} \rangle_{av} = \frac{1}{nT} \int_t^{t+nT} Q_{dl} d\lambda \end{cases} \quad (3-18)$$

式中 T 表示在一个周期； n 表示周期的个数，

仿真策略如图 3-3，首先进行热源平均的计算，达到给定运算求解总时间，再从新设定模型热源条件。以热源平均稳态的电导率分布为初始值施加脉冲电流，可快速计算出电导率随脉冲的变化。随着求解时间的增加，系统的电导率逐渐趋于准稳态状态。假设系统趋于准稳态状态时，几何结构发生变化的宏观步长时间尺度内。系统的准稳态一直保持不变，随着阴极的持续进给，系统准稳态被打破，进而重新对系统的电导率进行计算，如此反复迭代新准稳态过程，最终加工成型。

热源平均稳态中，软件对计算出的电导率 σ_I 进行收敛评判($\Delta\sigma_I < \zeta_I$)，若收敛，则继续下一步。当系统达到准稳态时，随着脉冲电流的施加作用，各参数随着时间稳定波动,将达到准稳态的时间定义为一次迭代步长的时间和几何结构步长。由于加工区电导率的波动变化较为敏感，为了得到一次迭代步长的时间，我们定义了一个标准 $|\Delta\sigma_I|$ 来进行评判一次迭代步长的质量：

$$|\Delta\sigma_I| = |Max(\sigma_I - \sigma_{I-1})| \quad (3-19)$$

式中 σ_I 和 σ_{I-1} 分别为脉冲前后两个周期内的电导率。在此基础上，引入了一个公式，来计算每次迭代的步长：

$$\lambda_n = \lambda_{n-1} \left(2 - \frac{\psi_1}{|\Delta\sigma_I|} \right) \quad (3-20)$$

定义 ψ_1 为 $1 \times 10^{-5} \text{S/m}$, 如果 $|\Delta\sigma_I|$ 大于 ψ_1 ，则步长增加，如果 $|\Delta\sigma_I|$ 小于 ψ_1 ，则步长减小，因此使得每一次迭代步长的电导率变化保持 $1 \times 10^{-5} \text{S/m}$ 左右。将达到准稳态状态的时间 $\xi_I(t_{n+1}' = \xi_I)$ 作为一次求解总时间 t_{n+1}' ，定义为一次几何结构变化的宏观步长时间。

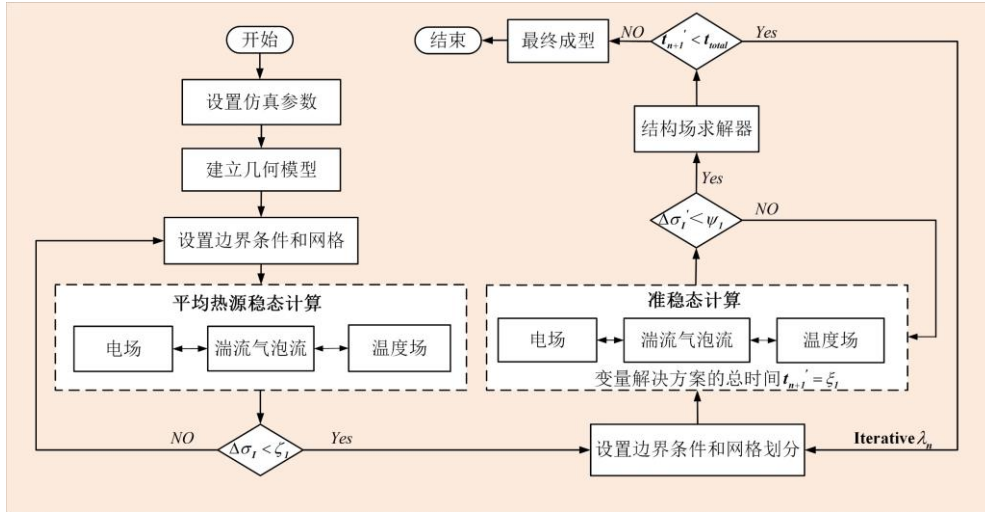


图 3-3 多物理场耦合处理方法的模拟过程

3.3 管电极电化学加工过程多物理场耦合仿真分析

3.3.1 平均热源准稳态计算过程

图 3-4 为热源平均系统达到稳态的仿真结果。图 3-4 (a)加工区域温度较高的部分位于阴极面附近，温度梯度沿着电解液流动方向降低，温差为 8.1°C 。图 3-4 (b)加工区域中的气泡主要集中分布在阴极面附近，工件阳极面气泡率几乎为 0。图 3-4 (c)加工区域电解液的电导率分布不均匀，这是由气泡和温度共同影响所引起的。在图 3-4 (d)中，可以观察到阴极尖端存在明显的杂散电流，而加工间隙中的电流密度分布相对均匀。

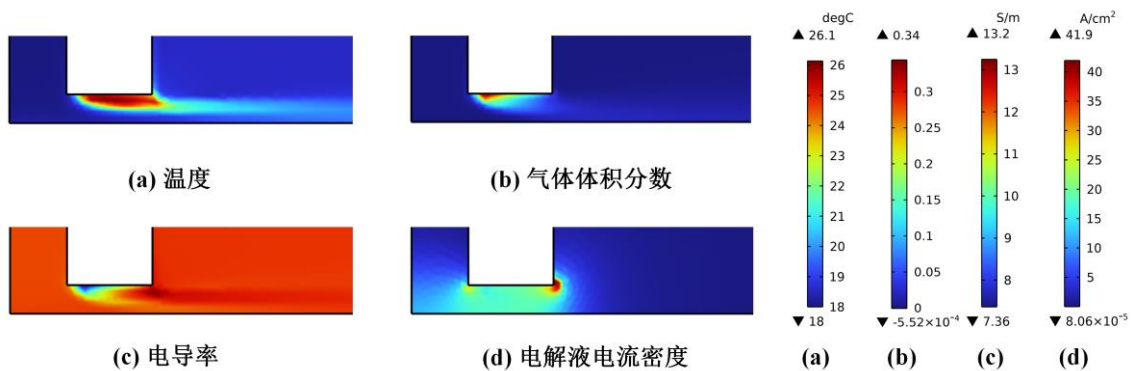


图 3-4 平均热源稳定状态。(a)温度；(b)气体体积分数；(c)电导率；(d)电解质电流密度

以热源平均稳态时的结果为初始值，施加 50 个脉冲电流。图 3-5(a)参考点的温度随着脉冲施加波动而上升，靠近阴极面 A 点温度最高，温度持续脉动上升，尚未达到稳定温度，且流道参考点的脉动温度振幅相差不大。图 3-5(b)参考点的气体体积分数随着脉冲施加波动而上升，靠近阴极面 A 点处气体体积分数最高，并持续脉动上升，

且振幅越大。图 3-5(c)参考点的电导率脉动上升，靠近阳极面 C 点处电导率最高，由于 A 点处气体体积分数影响占主导，导致 A 处的电导率脉动振幅最大且达到准稳态的时间最晚。

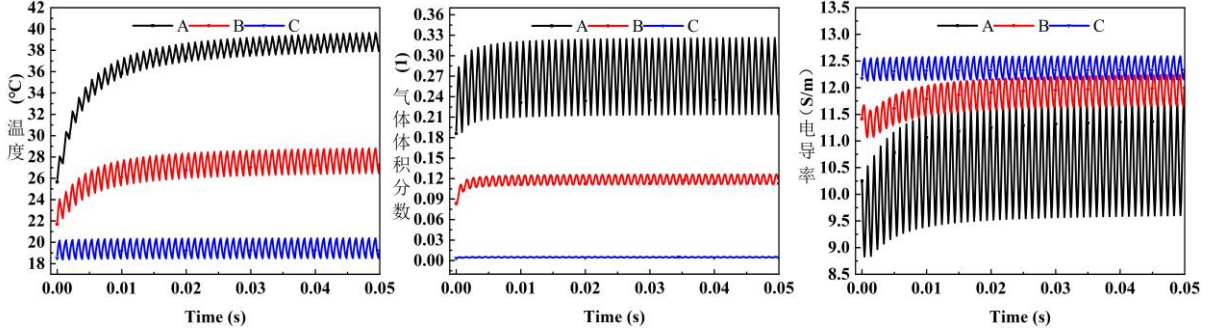


图 3-5 流道参考点。(a)温度；(b)气体体积分数；(c)电导率

图 3-6 中在施加 500 个脉冲后，A 处电导率的波动满足设定的阈值范围内，既第一次达到准稳态状态的时间 ξ_1 为 500 脉冲周期， $\lambda_1=0.5S$ 作为第一次迭代时间步长和几何结构步长，将 λ_1 代入公式(4-20)中，如此反复迭代下一次准稳态过程。

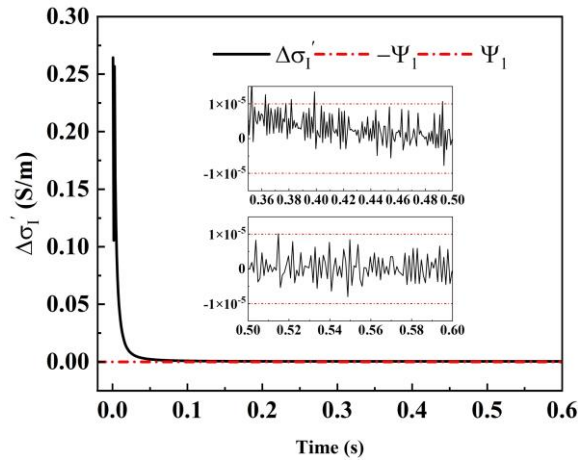


图 3-6 第一迭代步骤判断

3.3.2 全时间耦合精度方法和平均热源准稳态迭代方法比较

为了验证热源平均准稳态迭代方法的可靠性，将此方法与全时间耦合精度方法进行比较。全时间耦合精度方法也以系统热源平均稳态为初始值，几何结构变形和多物理场同时进行全耦合强计算，不进行单独解耦计算。图 3-7(a)为两种方法在加工过程 5S 时间内阳极去除量对比，反复迭代计算的去除量略低于全精度计算，5s 末的总去除量相差 0.001mm^2 。图 3-7(b)为两种方法在加工过程 5s 末阳极工件轮廓对比，5s 末时两者的轮廓一致，最大加工偏差仅为 0.001mm 。考虑到热源平均准稳态迭代计算产生的

误差很小可忽略不计，热源平均准稳态迭代方法的运算时间和运算量约为全时间精度的三分之一(在 64 位电脑，CPU 为 AMD Ryzen 5 5600X @3.70 GHz，32.0 GBRAM),因此热源平均准稳态迭代方法可以很好地处理 TE-PECM 过程中存在脉冲的情况。

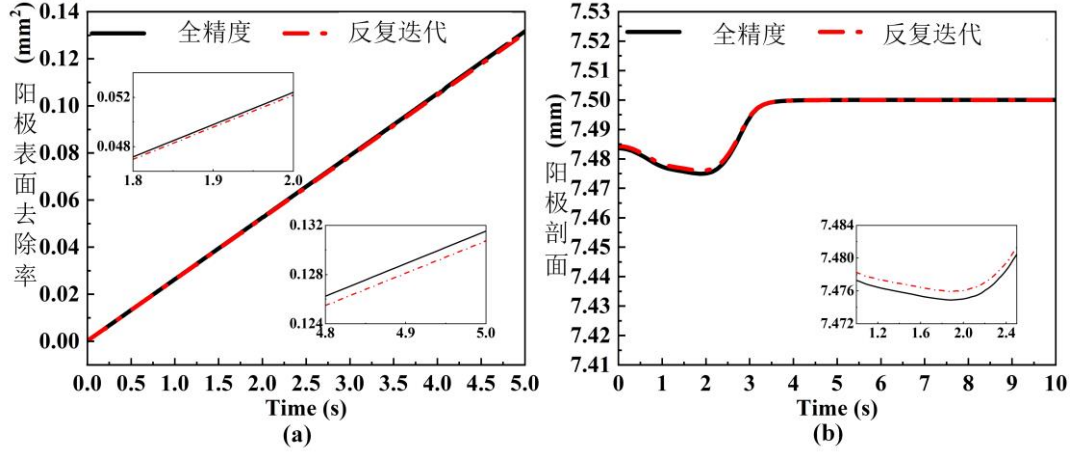


图 3-7 (a)5 秒内阳极表面去除率的比较；(b)5s 时阳极剖面的比较

3.3.3 加工过程微时间尺度

(1) 脉冲加工过程的物理场分布

为研究脉冲电流的存在对加工微时间过程各个物理场量的影响，在阴极表面选取相等间隔的三个参考点。图 3-8(a)参考点温度随着脉冲开启时间内上升，在脉冲关闭时间内温度下降，热产生的时间尺度等于脉冲电流的时间尺度，温度沿着阴极表面电解液流动方向升高。图 3-8(b)可看出，加工区域温度在 0.4T 内上升到 35.8℃，在 0.9T 内下降到 34.4℃。脉冲开启阶段产生热量，热量累积在局部区域，使得该区域温度升高；当脉冲关闭，电解液流动，迅速将热能带走，可知热生产的时间尺度小于流体传热时间尺度。

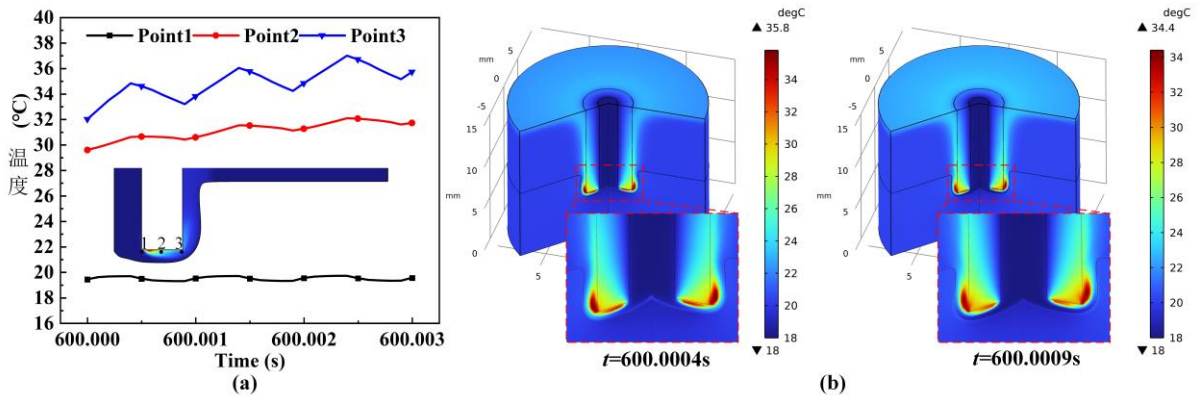


图 3-8 脉冲温度分布。(a)参考点的温度变化；(b)脉冲期间的温度

图 3-9(a)为参考点气体体积分数随时间变化的规律，气相随着脉冲开启时间内上升，在脉冲关闭时间内气相下降，气体产生的时间尺度等于脉冲电流的时间尺度。图 3-9(b)可看出，加工区域阴极面气相在 $0.4T$ 内上升到 0.71，在 $0.9T$ 内下降到 0.51。脉冲开启阶段产生气体，气体累积在局部区域，使得该区域气相升高；当脉冲关闭，电解液流动，迅速将气体带走，可知氢气产生时间尺度小于氢气转移时间尺度。

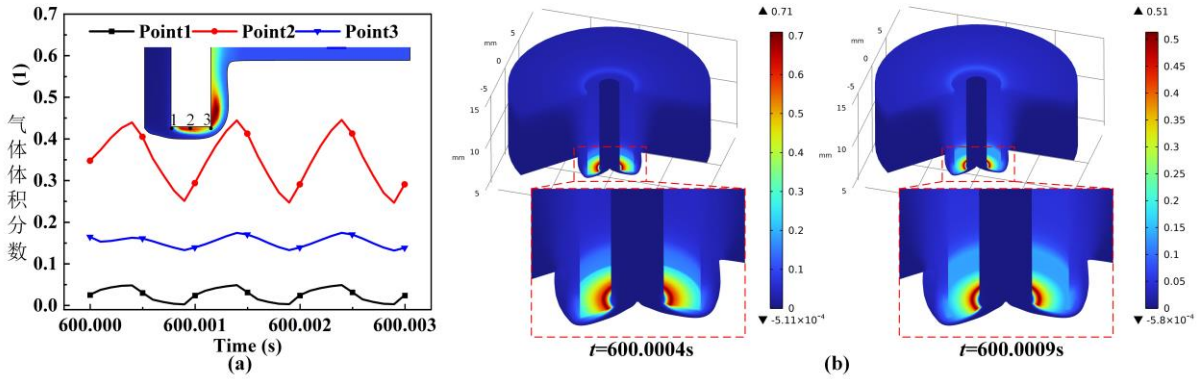


图 3-9 脉冲气体体积分数分布。(a)参考点的气体体积分数变化；(b)脉冲期间的气体体积分数

图 3-10(a)为参考点电导率随时间变化的规律，参考点电导率随脉冲周期变化而变化，电导率随着脉冲开启时间内上升，在脉冲关闭时间内下降。图 3-10(b)可看出，加工区域电导率在 $0.4T$ 内上升到 14.4S/m，在 $0.9T$ 内下降到 13.8 S/m，电解质电导率在脉冲关闭时间得到更新。

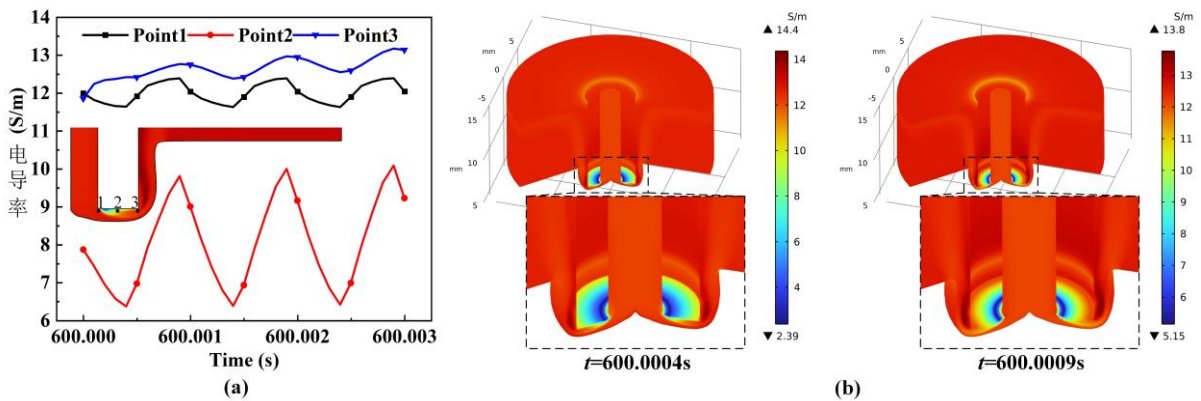


图 3-10 脉冲电导率分布。(a)参考点的电导率变化；(b)脉冲期间的电导率

(2) 加工参数对物理量的影响

图 3-11(a)显示不同脉冲电压 14-26V(1kHz 脉冲频率、50% 占空比和 5m/s 流速)的影响，随着脉冲电压的增加，阳极工件表面电流密度和去除率也会随之提升。这是因为阳极电流密度和去除率与加工电流成正比关系，因此增加电压会导致电流密度和去

除率的增加。高电压有助于提高电化学加工速度。随着加工电压的增加,阳极电流密度和去除率的差异范围也会增大。如果阳极去除率不均匀,最终会导致轮廓误差的增加,从而影响轮廓精度的提高。图 3-11(b)显示不同脉冲频率 200-1000Hz(26V 脉冲电压、50% 占空比和 5m/s 流速)的影响,随着脉冲频率的提高,阳极工件表面电流密度和去除率分布基本相同,但阳极电流密度和去除率的极差在减小,有利于减小表面轮廓精度误差;图 3-11(c)显示不同占空比 0.3-0.7(26V 脉冲电压、1kHz 脉冲频率和 5m/s 流速)的影响,占空比从 0.3 增加到 0.5,阳极工件表面电流密度和去除率均相应增加,随着占空比增加到 0.7,阳极电流密度和去除率增加幅度较小,阳极电流密度和去除率的极差增大,不利于轮廓精度的提高,如果占空比太小,加工效率会降低,占空比过大,影响加工精度。因此,中等占空比有利于提高加工精度;图 3-11(d)显示不同流速 3-7m/s(26V 脉冲电压、1kHz 脉冲频率和 50% 占空比)的影响,流速从 3m/s 增加到 5m/s,阳极表面电流密度和去除率均得到提高,随着流速的进一步增大,阳极电流密度和去除率进而有所下降,这是因为流速增加会出现涡流效应,电解产物进行积累,因此,适当增加进口流速可以改善流场分布和加工精度。

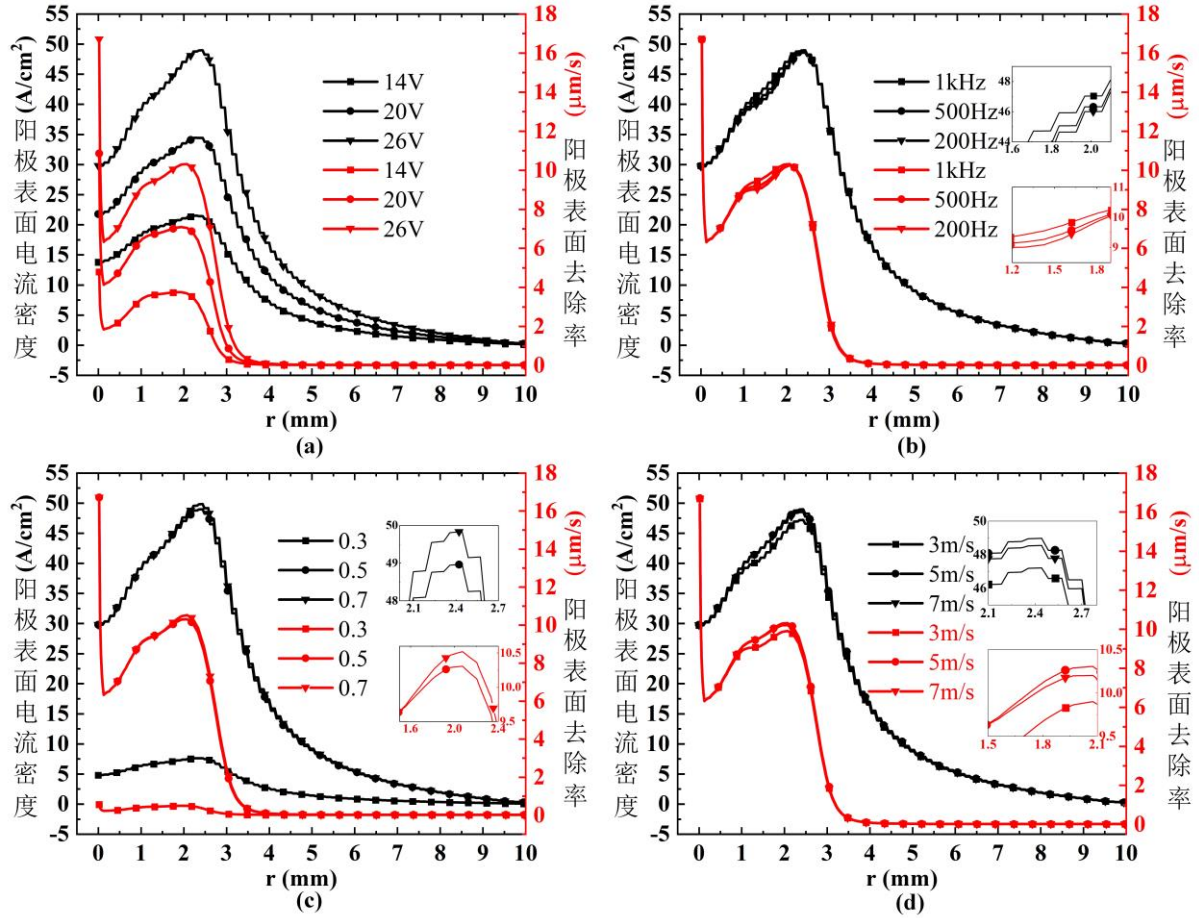


图 3-11 工件表面电流密度和去除率。(a) 不同的加工电压；(b) 不同的脉冲频率；(c) 不同的占空比；(d) 不同的流速

3.3.4 加工过程宏观时间尺度

图 3-12(a)所示由于进液口电解液流量保持不变,不同时间阳极面端面处电解液速率保持在 7m/s-8m/s,随着槽深的增加使得电解液反射形态发生变化。图 3-12(b)所示随着加工的进行,气泡率逐渐增加,从初始阶段到 400s 时,电解液中的气泡率最高达到 61%,400s 后气泡率基本不发生变化,这是因为氢气的产生和随电解液带走的达到动态平衡,气泡没得到积累。图 3-12(c)所示从初始阶段到 200s,加工间隙电解液电流密度最高增加到 $70.6\text{A}/\text{cm}^2$,随着电极的进给,加工间隙中的电解液电流密度逐渐减小。图 3-12(d)所示 400s 时加工区域温度比初始电解液温度高 11.3°C ,这是因为较高的电流密度产生更多的焦耳热,加工间隙较小,导致电解液循环不良,焦耳热向电解液流动方向积累,导致电解液温度升高,热影响区面积扩大。到 600s 时,加工区域内的电解液最高温度降低了 1.2° ,这是因为这个阶段的电流密度较低,产生的焦耳热量较低,随着加工区域的增加,电解液流动顺畅,使得电解液温度降低。

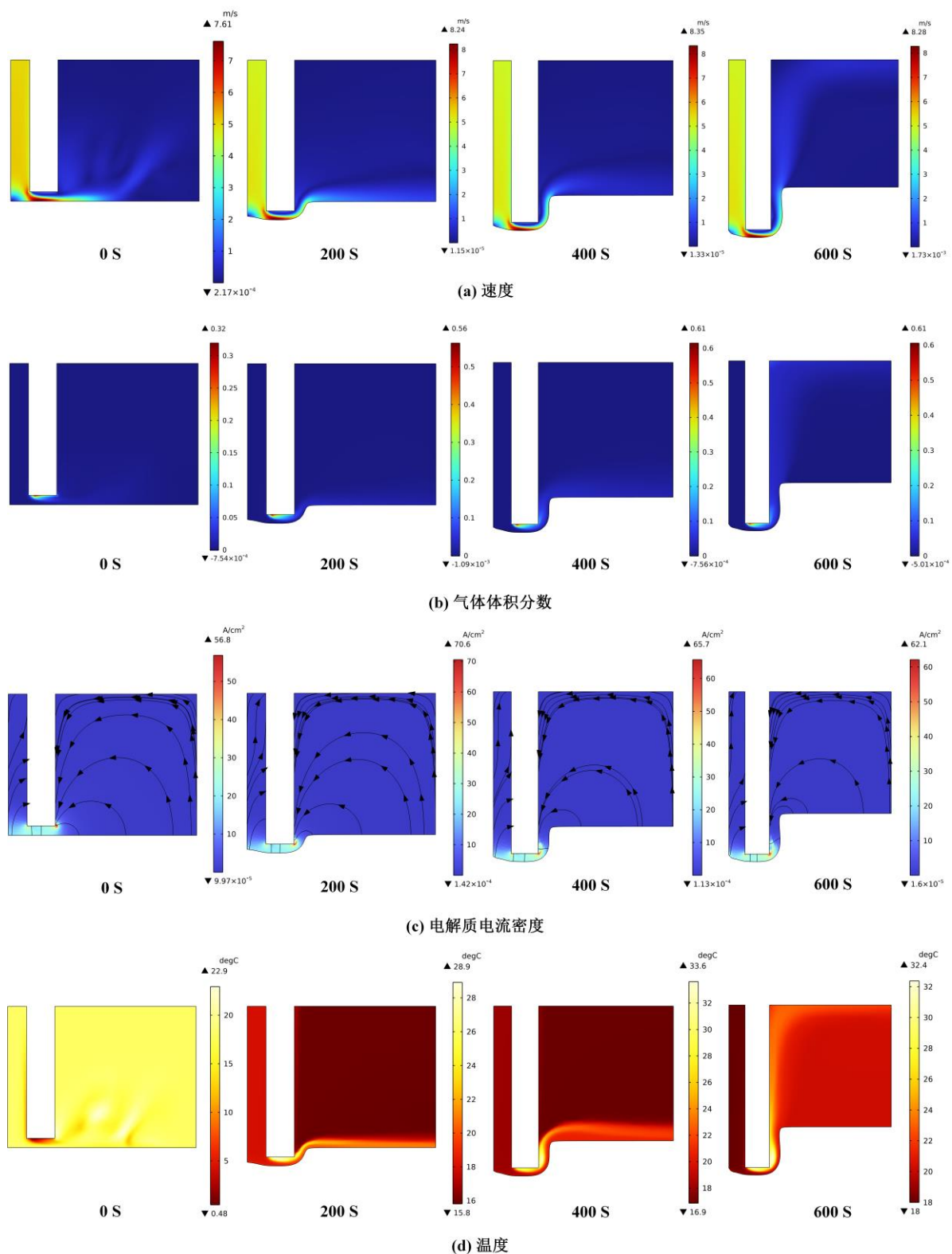


图 3-12 不同时刻的变化。(a)速度；(b)气体体积分数；(c) 电解质电流密度；(d) 温度

图 3-13 为工件表面电流密度和阳极轮廓随时间的变化图，在时间为 0 秒时，电极还未完全进入工件内部，因此电流分布比较集中，作用于工件表面的区域也比较大，

没有集中在电极正下方。这种情况导致切缝入口处的宽度 λ_{in} 较小。随着加工时间的增加, 到达 600 秒时, 电极已经完全进入了工件内部。由于电极进入切缝, 电流分布会逐渐集中在切缝内部。这种情况导致切缝中部的宽度 λ_{Middle} 变大, 即 $\lambda_{Middle} > \lambda_{in}$ 。这是因为电流在切缝内部的作用效果更为明显, 从而使得切缝中部的宽度增加。图 3-13(b) 可见加工过程中底部慢慢出现一个尖峰, 这是因为加工过程中平衡间隙较小, 电流密度集中分布在管电极的环形端面处, 这意味着环形端面处对应的阳极去除量较大。而管电极中间处的阳极去除量较小。由于去除量的不均匀性, 最终将在底部形成凸起, 这是因为在环形端面处去除的材料较多, 而中间处去除的材料较少, 导致加工后底部出现高度不均匀的情况。

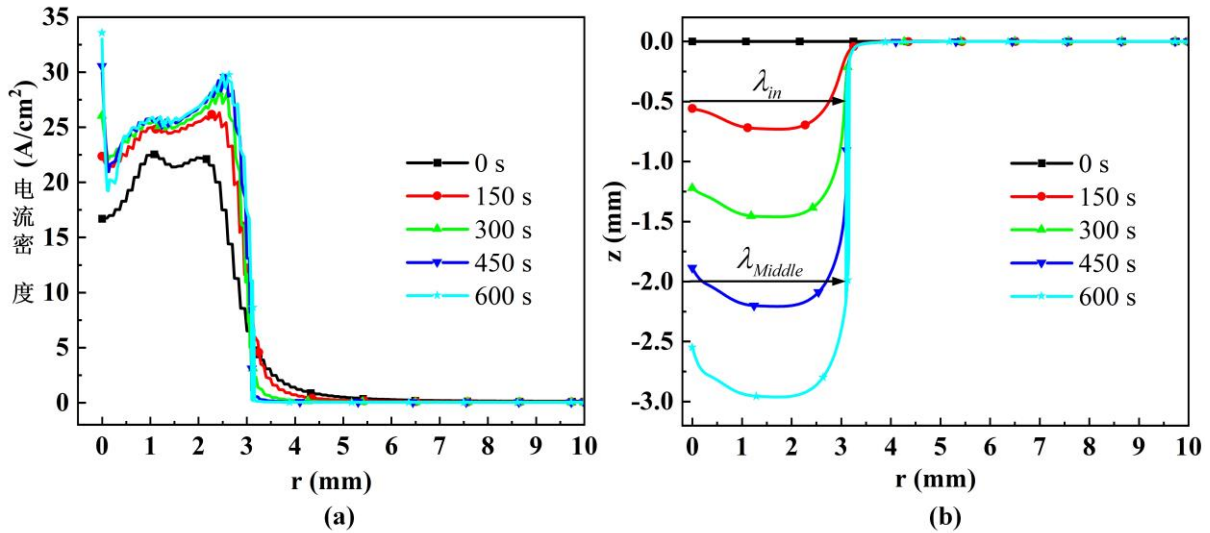


图 3-13 工件表面的不同时间。(a)电流密度的变化; (b)阳极轮廓的变化

3.4 管电极脉冲电化学加工实验验证

3.4.1 试验设备及步骤

为了验证上述仿真方法的准确性, 进行 TE-PECM 试验, 搭建了实验平台, 平台包括运动系统、电源系统、电解液循环系统和电流采集模块, 如图 3-14 为实验系统示意图和加工装置图。加工工件安装在阳极铜板上, 铜板与脉冲电源正极相连。管电极安装在设计的阴极夹具中, 上端口连接高压水管, 下端被三爪夹头夹持, 导电接线位与脉冲电源负极相连。阴极夹具通过 L 型板安装在运动平台上, 控制器控制平台运动。加工过程中, 浑浊的电解液通过过滤器被泵抽出, 经恒温系统流过流量计和压力计被注入到管电极内后喷射到加工间隙内。

选择尺寸为 140 毫米长、10 毫米宽、20 毫米高的不锈钢 SS304 作为待加工的工件。在进行实验之前，先使用 1000 号砂纸对工件进行打磨处理，并进行超声波清洗。试验时所使用的加工参数与仿真参数一致，详见表 3-1。

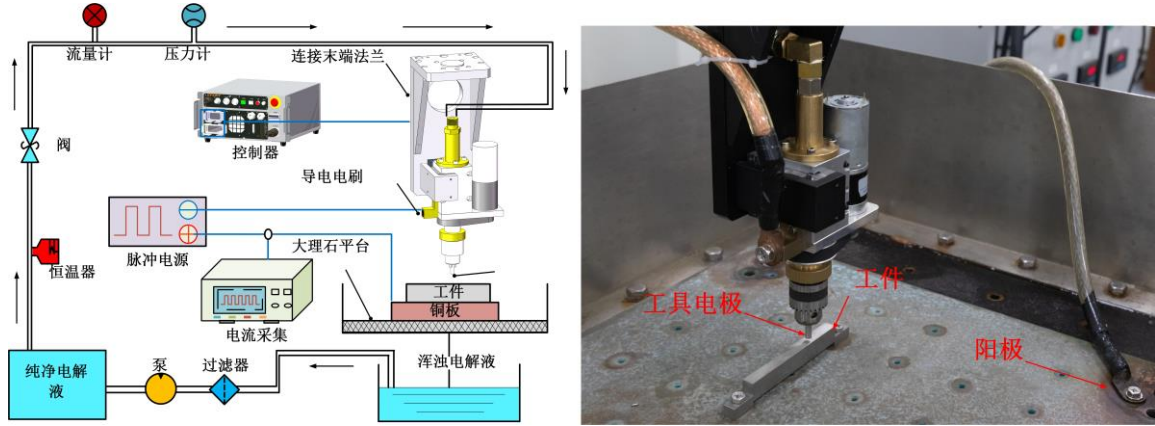


图 3-14 实验系统示意图和处理物理图

3.4.2 实验结果及讨论

对工件分别进行 300s、400s、500s、600s 加工，酒精清洗烘干工件，用海康工业相机(MV-CH120-10GM)拍摄孔入口和横截面的形状，如图 3-15 所示用全自动影像测量仪(KEYENCE IM-8000)测量孔横截面中的宽度和深度,对每次加工的宽和深分别测量三次即 W_1 、 W_2 、 W_3 和 D_1 、 D_2 、 D_3 ，孔宽 D_{av} 和孔深 W_{av} 为测量的平均值,即：

$$\begin{cases} D_{av}[mm] = \frac{D_1 + D_2 + D_3}{3} \\ W_{av}[mm] = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{3} \end{cases} \quad (3-21)$$

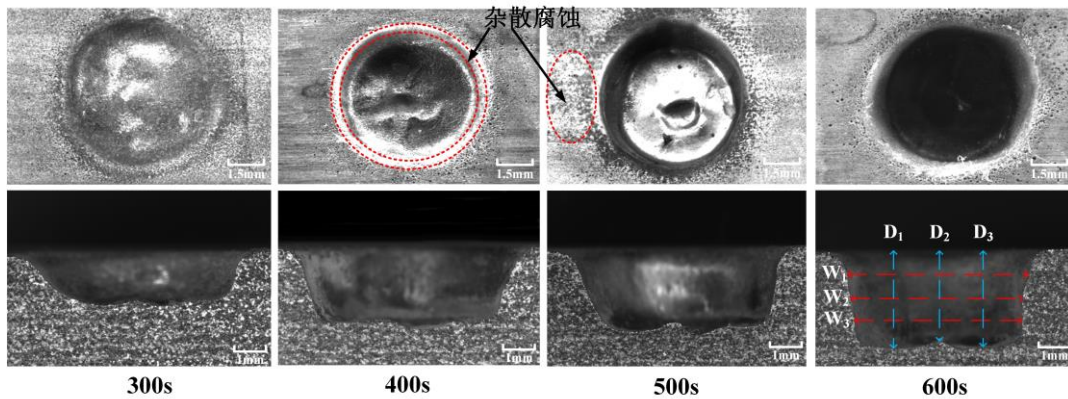


图 3-15 不同加工时间下的孔入口和横截面形状

如图 3-16(a)为实验和仿真 600s 时阳极轮廓曲线的比较，两者孔壁面处的轮廓基本重合，孔壁宽度模拟直径为 6.42mm，孔壁宽度实验直径为 6.50 mm，最大相对误差仅

为 1.05%，可较准确的模拟加工过程。经对比孔底处和入口孔的轮廓误差相比于孔壁轮廓较大，入口处发生杂散腐蚀，是因为电解液在加工初始阶段从管电极内喷射到工件表面，散射面积较宽。孔底处较高的尖点是因为非均匀的网格密度分布导致变形仿真时无法充分挤压。

如图 3-16(b)比较了不同加工时间实验和仿真的孔宽和孔深，结果表明，实验孔的宽度和深度均大于仿真数据，随着加工时间的进行，实验和仿真平均孔宽误差从 0.08mm 增加到 0.17mm，平均孔深误差从 0.12mm 增加到 0.24mm，其原因是随着加工的进行管电极表面绝缘不充分所致，对加工孔宽度和深度进行二次腐蚀造成误差累积，图 3-17 所示(a)为电极使用前的完整绝缘层表面，(b)为电极使用后绝缘层破损的表面。

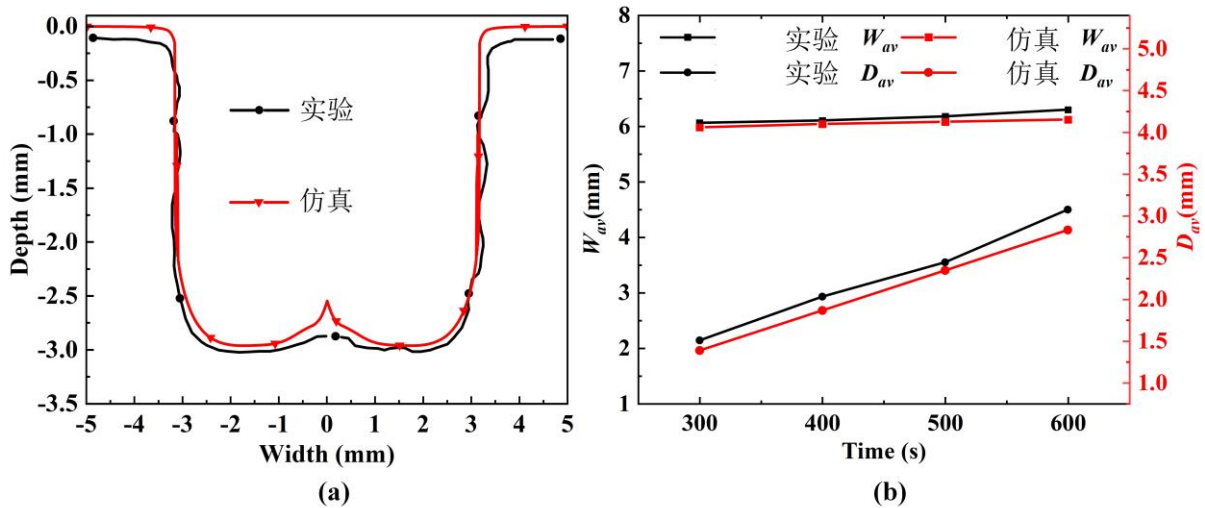


图 3-16 (a)实验和模拟阳极剖面曲线；(b) 不同时间实验和模拟的孔宽和孔深对比

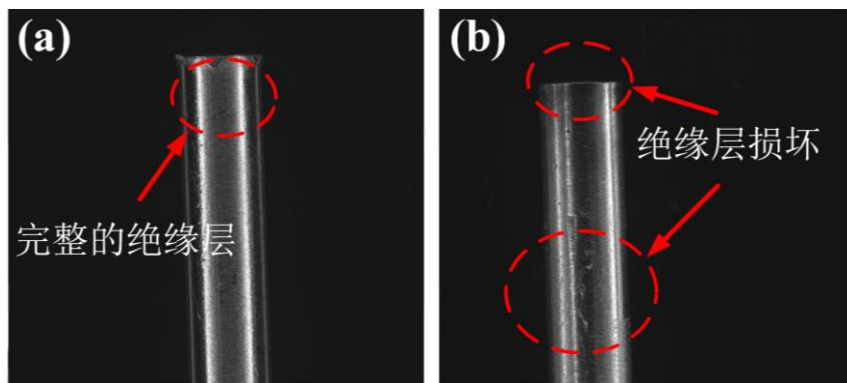


图 3-17 电极表面。(a)使用前；(b)使用后

对实验的电流进行采集，图 3-18(a)为仿真电流和实验电流的微时间对比，电流均随着脉冲电流的波动而周期性变化。对 1s 内电流进行平均，作为一个宏观时刻的瞬时

电流,图 3-18(b)为仿真电流和实验电流随加工宏观时间的变化曲线,可看出随着加工的进行实验电流和仿真电流总体呈增加趋势。

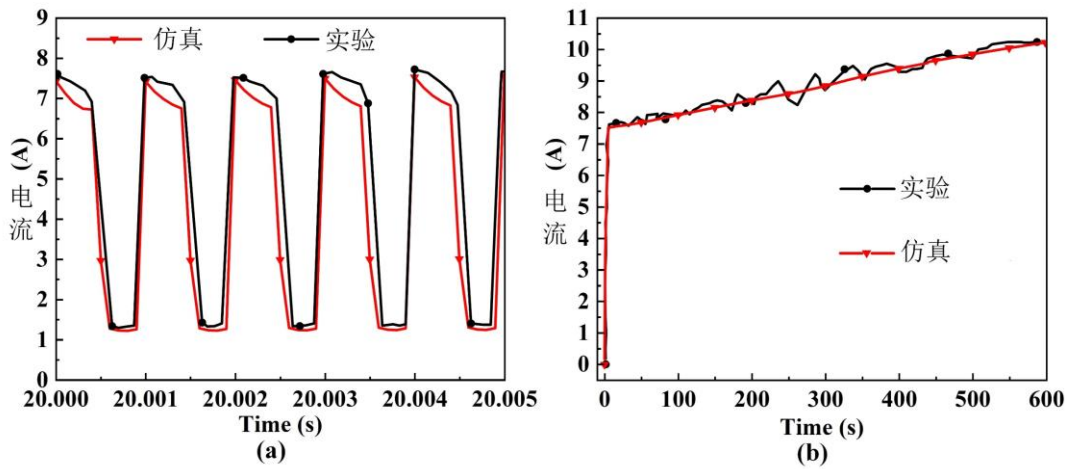


图 3-18 实验电流和模拟电流

3.5 本章小结

本章建立了 TE-PECM 多物理场耦合模型,根据仿真和实验结论,可以得出以下结论:提出了基于热源平均的准稳态迭代简化方法可解决脉冲存在时计算时间过长的问題,通过和全时间耦合精度方法对比,能够显著减少计算时间和计算量,同时提高计算精度。针对管电极脉冲电化学加工建立气液两相场、温度场、电场和结构场的多物理场耦合迭代模型,采用该模型获得了加工微时间和宏观时间的温度、气体体积分数、电解液电导率、电解液电流密度等参数的空间分布。模拟仿真分析了加工过程工艺参数对阳极工件电流密度和去除率的影响显著性,加工电压>占空比>流速>加工频率,随着加工电压、占空比和加工频率的增加,去除率都会增加但表面一致性会下降。加工流速为 5m/s 时,阳极工件电流密度较高,加工一致性较好。采用该多物理场耦合迭代预测工件轮廓动态变化,并和加工实验所得趋势一致,孔壁处最大相对误差为 1.05%,能够准确模拟实际加工过程

第 4 章 机器人管电极电化学加工系统设计

面向小孔复杂曲面类构件柔性化、高效加工需求，将管电极电化学加工在小孔加工材料去除方面的优势与机器人在复杂曲面规划方面的灵活性结合起来，搭建一种机器人管电极电化学小孔加工系统，这种系统设计能够有效地解决传统电化学加工机床在加工过程中所面临的限制，为工件加工带来更大的灵活性和效率。

4.1 机器人管电极电化学加工系统总体设计

机器人管电极电化学加工系统需要满足如下要求：

(1) 加工系统具备六个空间自由度的运动能力，能够在 X、Y、Z 轴上实现平移和绕 X、Y、Z 三个轴的旋转。

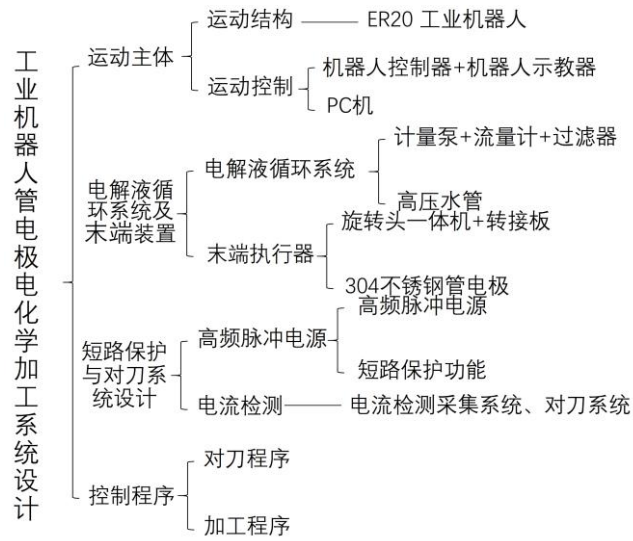
(2) 加工系统需要具备对刀控制和实时响应性能，对刀控制系统用于确认加工工件与管电极之间的相对位置关系。在加工过程中，如果管电极的进给速度过快，会导致加工间隙中电解产物的增加，可能引发短路情况，此时，控制器会向驱动器发送信号，立即停止机器人的运动，以确保管电极电化学加工能够安全、正常地进行。

(3) 加工系统的脉冲电源需要持续稳定的输出特性，同时要具备高度的可信赖性、安全性以及可灵活调节的参数设置。

(4) 加工系统具备检测加工电流的功能，通过监测加工过程中的电流变化，可以准确地识别加工状态。

(5) 电解液循环系统，电解液循环系统需要具备恒温功能，恒定的温度可提高加工的稳定性和精度，同时有助于控制电解过程中的反应速率。电解液循环系统需要配备过滤装置，以去除电解液中的杂质、金属屑等固体颗粒。电解液循环系统应能够提供适当的流速和压力。

为了符合加工系统的设计，对机器人管电极电化学小孔加工系统进行了设计和开发，具体见图 4-1。



如图 4-2 为机器人管电极电化学加工系统的原理图。加工系统的运动主体为机器人本体，机器人运动通过控制器和示教器执行控制，进而实现电化学加工末端法兰处的管电极工具电极运动。加工过程的浑浊电解液通过过滤器流量计和恒温器被输送到管电极入口。高频脉冲电源为小孔加工提供能量，通过调节电阻大小可改变加工电流，通过脉冲斩波控制来改变脉冲电源的频率。内置电流霍尔传感器对加工过程中的电流进行采集，并借用 RDE 软件显示在 PC 机上。脉冲电源的检测电路对霍尔传感器采集的电流进行判断，若加工发生短路时，可使得脉冲电源瞬间切断供电，保证管电极电化学加工的正常进行。图 4-3 为工业机器人管电极电化学加工系统实物图。

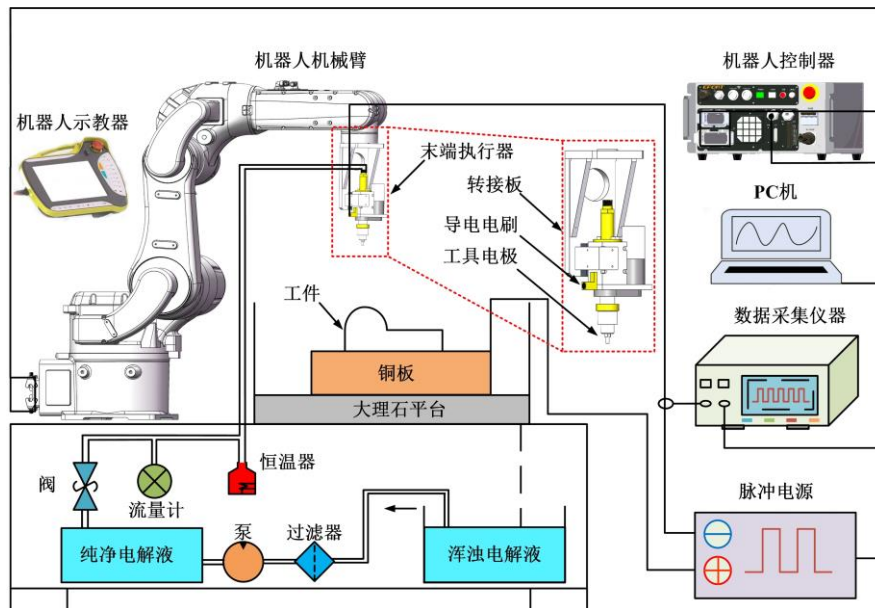


图 4-2 机器人管电极电化学加工系统原理图

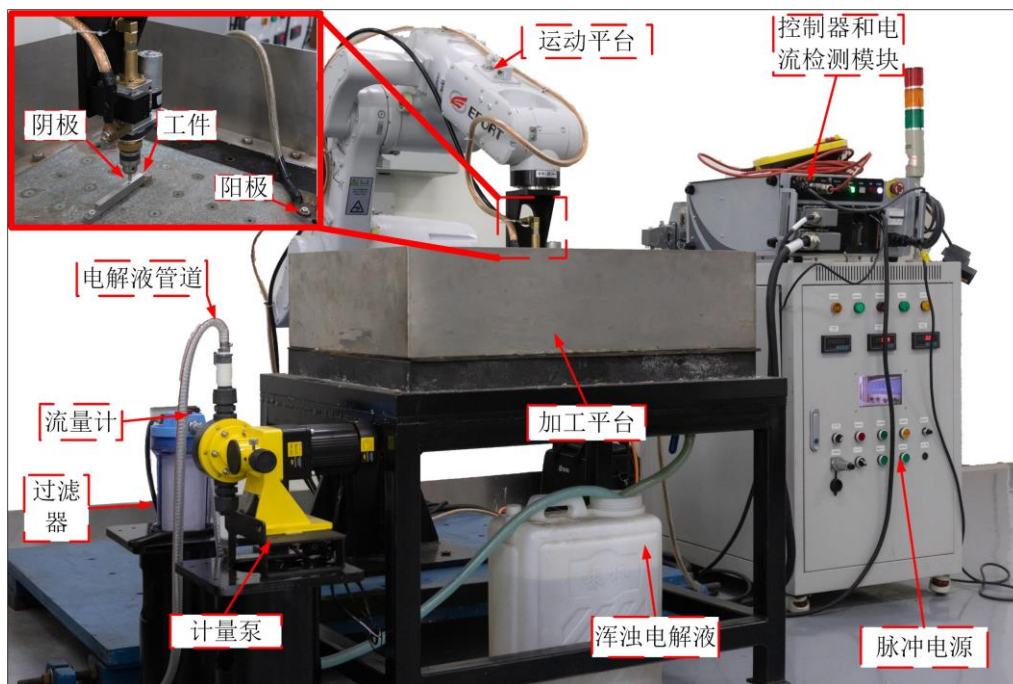


图 4-3 机器人管电极电化学加工系统实物图

机器人管电极电化学加工系统的运动和控制组成部分包括工业机器人、机器人控制柜和机器人示教器。这款六自由度工业机器人被设计用来执行电化学加工过程中的轨迹运动。为了选择适合加工系统的主要机器人，需要综合考虑机器人的尺寸、重量、自由度以及重复定位精度，选取埃夫特 ER20 型号机器人。工业机器人系统的整体结构如下图 4-4 所示，有关机器人性能和技术参数的详细信息可参见表 4-1。

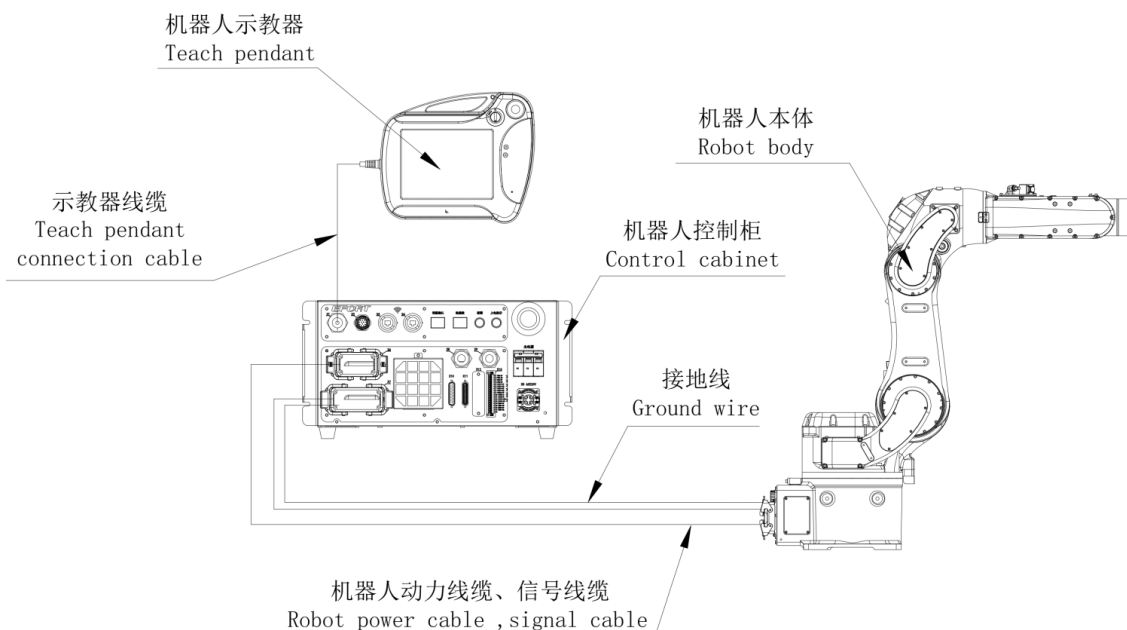


图 4-4 六自由度工业机器人系统构成

表 4-1 机器人性能技术参数

性能	技术参数
本体重量	145kg
手腕部最大负载	20 kg
最大活动半径	1143mm
防护等级	IP65/ IP67(手腕)
电柜防护等级	IP20/IP54(选配)
驱动方式	使用 AC 伺服电机进行电气伺服驱动
重复定位精度	$\pm 0.03\text{mm}$

机器人控制柜是机器人系统中的一个重要组成部分如图 4-5，主要用于集中控制和管理机器人的各种功能和操作。控制柜内配备有机器人控制器，负责整个机器人系统的控制和运行。控制器通过软件算法和程序控制机器人六轴伺服驱动单元。



图 4-5 机器人运动控制系统

4.2 电解液循环系统及末端执行器设计

4.2.1 电解液循环系统

电解液循环系统由过滤器、高压水管、高精度电子数显流量计、恒温器、计量泵等部分组成，如下图 4-6，电解液泵是电解液系统的核心元件。在电化学加工过程中，通常采用恒压控制模式来提供电解液，以确保电解液的压力保持稳定。然而，在使用这种方式时，随着加工深度的增加，由孔壁摩擦引起的阻力会导致压力损失的增加，从而减少电解液的流量。因此，必须确保电解液的流速保持恒定，不会因加工深度的

增加而减少。为了实现这一目标，采用电解液供液采用恒定流量控制模式。以下是该流量泵的主要规格和技术参数见表 4-2 和图 4-6。

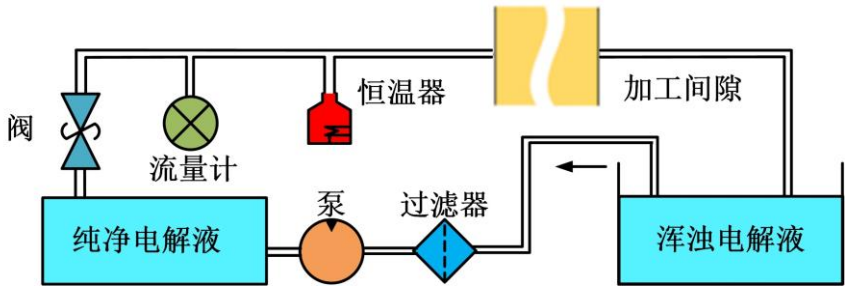


图 4-6 电解液循环系统示意图



图 4-7 电解液计量泵

表 4-2 电解液泵性能技术参数

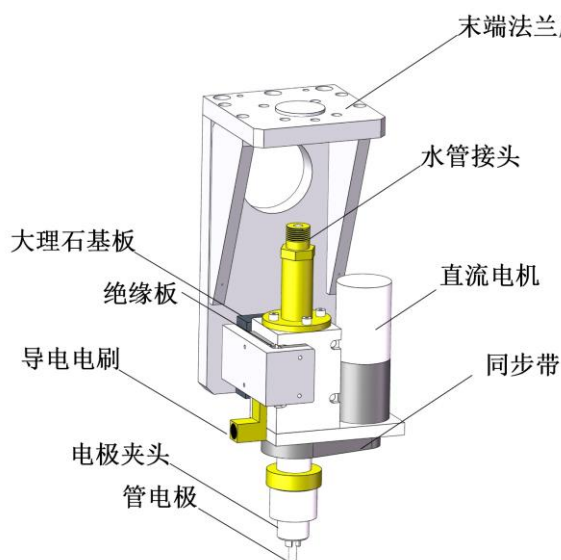
型号	功率	流量	压力	口径
JWM	90W	100L/H	0.4MPA	DN15

在安装电解液回路时，通常需要使用高压型水管。特别是在选择管道接口时，最好选择带有密封环的金属螺纹连接方式，以确保连接处密封良好，避免液体泄漏的发生。这有助于维持电解液回路的稳定性和安全性，确保加工流程的顺利运行。过滤设备是确保加工操作稳定进行的关键器械。因为管道内径较细，电解液中可能含有各种杂质，这些杂质容易导致设备堵塞，同时还可能导致杂质进入加工空隙，引发火花和短路，给加工过程的稳定性造成严重影响。因此，有必要使用过滤器来净化电解液中的杂质。该过滤器采用聚丙烯棉过滤芯进行过滤，需要定期更换以确保过滤效果。

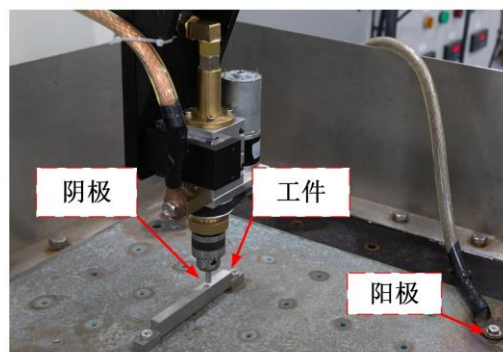
电解液的温度变化会引起电解液电导率的变化，对加工产生影响。在小孔电化学加工中，由于加工时间较长，维持电解液的温度在特定范围内至关重要。为了实现这一目标，本研究采用了温度传感器来进行恒温控制。

4.2.2 末端执行器的设计

管电极电化学加工末端执行器由末端法兰座、大理石基板、绝缘板、旋转头总成、电极夹头等组成。在加工过程中，图 4-8(a)展示了旋转头总成的结构。高压水管连接在旋转头总成的上端，而电极夹头连接在下端。电极夹头用于夹持管状电极，旋转头总成与止水塞协同工作，通过管电极内部喷射孔将电解液喷射出来。操作步骤如下：首先，我们需要使用管电极穿透止水塞，然后将整个电极和止水塞安装到供液机构中。接下来，我们需要将铜柱和螺纹头压紧止水塞，并连接高压水管，使电解液进入机构中。由于存在止水塞，电解液只能通过管电极内部的喷射孔出口流出，从而确保电解液的正常流动。旋转头通过大理石基板和绝缘板连接到末端法兰座上，并安装在机器人的末端法兰。加工电源的阴极连接导电电刷，从而为管电极提供电能。通过以上步骤和连接方式，实现了电解液在加工过程中的正常流动和供给。



(a)末端执行器模型图



(b)末端执行器实物图

图 4-8 机器人末端执行器

4.3 短路保护与对刀系统设计

4.3.1 高频脉冲电源

图 4-9 为自主设计的 100A 直流/高频脉冲斩波两用电源。该电源采用高频脉冲模式，具备刀具和加工两种模式。电源的电压可以调节范围为 0~5V 和 0~50V，并且额定脉冲电流为 100A。脉冲信号的占空比可以在 10%至 80%之间进行调节，脉冲频率的可调范围为 0.1 至 125 千赫兹，而最小的脉冲宽度为 8 微秒。高频脉冲电源具有 0.5%的

稳压精度。该电源的正极和负极分别连接到工件和导电电刷上，为整个加工过程提供必要的能量。通过以上特点和参数，我们可以保证加工过程的准确性和稳定性。高频脉冲电源电气结构介绍：

①电源柜后部的电器安装板上装有交流进线主开关(塑壳自动空气开关)及电源主开关(交流接触器)。上部的电器板上装有同步及电源变压器、触发板控制板、斩波控制板、塑壳断路器及中间继电器等。

②同时，电器安装板上还装有三个桥臂的晶闸管共阳极模块 2 组，在整流输出部分串有保护可控硅的快速熔断器。和晶闸管模块安装在一起的还有 IGBT 斩波模块，脉冲电源输出的正极铜排穿过霍尔电流传感器，霍尔电流传感器输出的信号为 100mA 的直流电流信号。

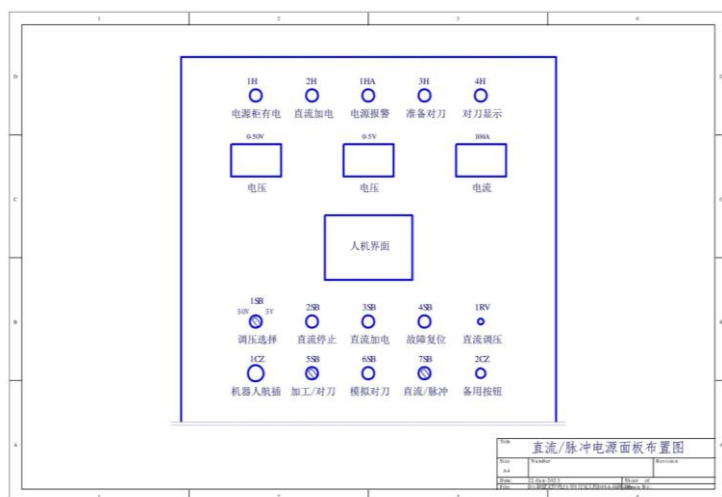
③在电源柜前部的电器安装板上装有对刀电路板、小型继电器板、开关电源、电源变压器、输入与输出端子等。

④脉冲电源的直流负排，经过分流器引至输出的负载，同时负极铜排还与 IGBT 的发射极铜排相连接。

⑤人机界面(触摸屏)、数字式仪表、指示灯、按钮、调节电位器、航空插座等均装在柜前上方的面板上；红、绿、黄三节信号灯(显示高频电源的工作状态)安装在电源柜的顶部。

⑥在电源柜前、后电器安装板的中间部位是三相干式整流变压器。

⑦电源柜的高、宽、深的尺寸分别为：1000×600×800(不含万向轮高度)。



(a) 直流/脉冲电源面板布置图

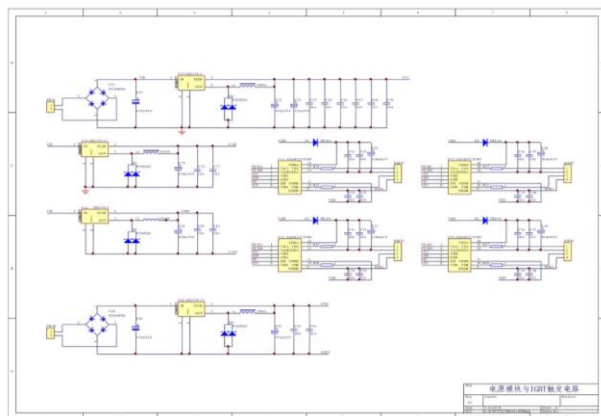


(b) 直流/脉冲两用电源实物图

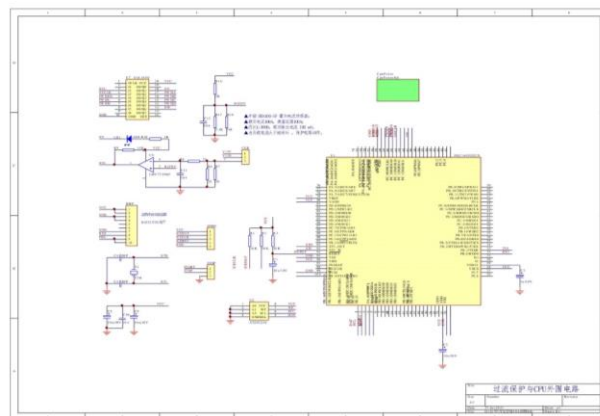
图 4-9 直流/高频脉冲两用电源

4.3.2 短路保护功能

本文采用的直流/高频脉冲电流两用加工电源具备了过载和短路保护功能。在直流电源系统中，若发生过载或短路情况，导致分流器 FL 上的电压超过了 75 毫伏，经过放大器和电压比较器的处理后，保护电路会立即响应。这将导致主触发脉冲在 1 个周期内停止，禁用晶闸管元件，切断直流输出。过载和短路保护器会发出高电平信号，激活交流控制部分，由继电器切断供电，同时发出声音和灯光警报。在脉冲电源输出阶段，如果负载出现过载或短路故障，霍尔电流传感器会检测到超过 5V 的直流电压信号，将其传送至电压比较器，然后输出封锁脉冲至 IGBT 的控制端，切断输出电流。详细的电路保护图如图 4-10 所示。



(a) 电源模块与 IGBT 触发电路



(b) 过流保护与 CPU 外围电路

图 4-10 短路保护电路图

4.3.3 电流检测采集系统

在管状电极小孔加工过程中，为了确保管状电极与工件之间保持适当的最初加工间隙，需要实时监测电流状态。为此，安装在高频脉冲电源中的霍尔电流传感器和电压传感器可以实时监测加工电压和电极间的加工电流。高频脉冲电源通过提取加工电流信号，并将其传送至 ER20 工业机器人控制器。这一过程利用控制器的串口通信完成电流信号的采集和传输。通过图 4-11 中展示的电流检测系统示意图，可以清晰地了解电流监测系统的整体结构和工作原理。

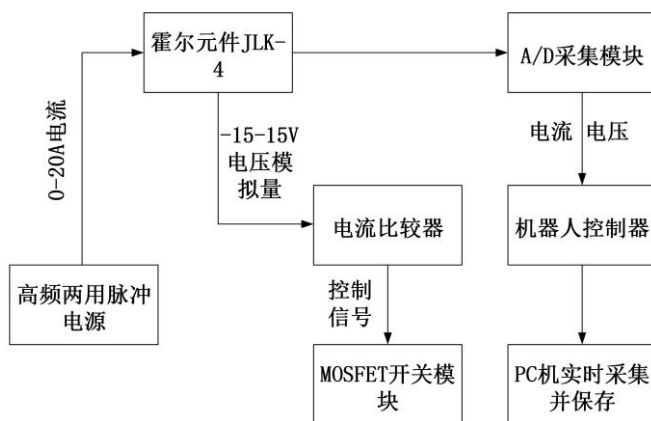


图 4-11 电流检测系统

使用埃夫特 C30 控制器 RDE 开发软件可以实时采集加工过程中产生的电流和电压等数据。图 4-12 展示了 RDE 软件数据采集界面的外观，实现了电流的采集与实时监测，异常状态的判断与控制。



图 4-12 RDE 数据采集

4.3.4 对刀系统

为了设定起始加工间隙，首先需要将带有管电极工具的设备安装在机器人末端的法兰上。随后，利用示教器操控工业机器人的末端沿着笛卡尔坐标系的 Z 轴向下移动。在此过程中，采用“刀具短路测试方法”来设定示教器中的工件坐标系。通过示教器显示的工件坐标系 Z 轴坐标，可以准确确认管状电极工具的阴极与工件阳极的位置关系。最后，通过微调工业机器人末端的位置，来精确定位和设定起始加工间隙。这个过程的具体操作和步骤可参考图 4-13 中的示意图。

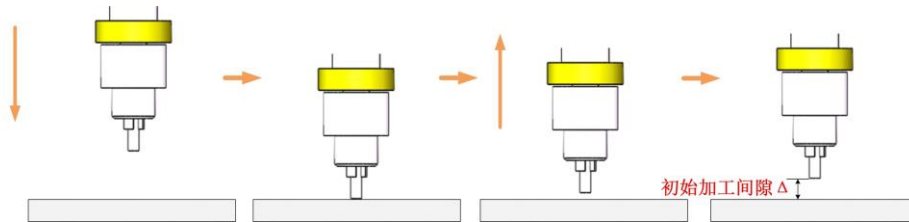


图 4-13 对刀流程

对刀检测系统由对刀直流和交流电路以及接口电路部分组成。它通过提供直流低压电源执行对刀操作，并使用三色报警信号灯来指示对刀变化。所选用的 IO 接口能够采集对刀电路中采样电阻两端的电压信号变化，并将其转化为电流信号的变化。鉴于采集电流较微弱且需考虑外部干扰因素，对刀系统硬件提供了 8 个模拟输入通道，单通道的采样率为 833ks/s，以满足对刀数据采集和精度方面的要求。每个输入通道均带有 8 个可编程输入范围，从 200mV 到 10V 不等。电源对刀模块与运动控制器之间进行 IO 信号通讯，以确定用户坐标系和加工起始点。对刀系统的电路原理图如图 4-14 所示。

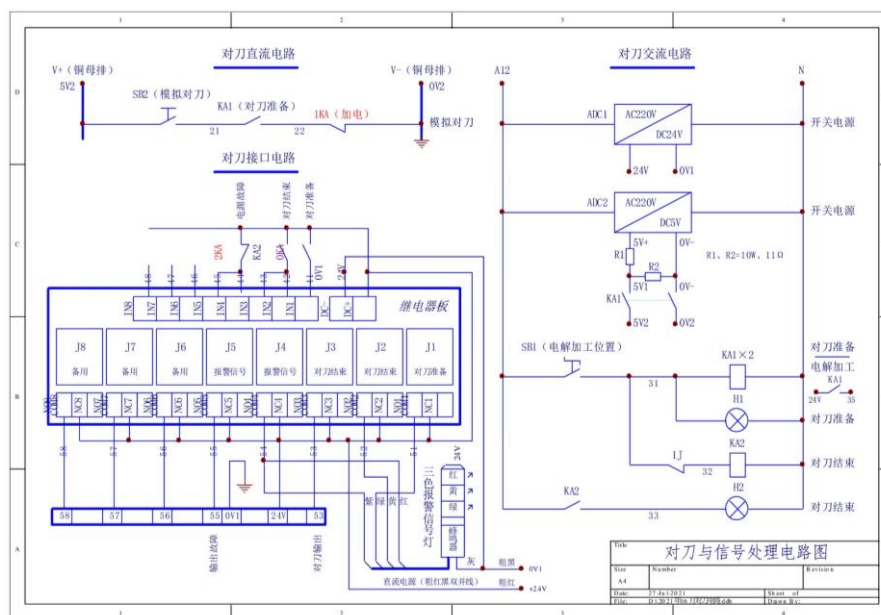


图 4-14 对刀信号处理电路图

4.4 控制程序设计

软件程序设计主要分为两个部分，即根据工业机器人的运动控制指令和 IO 信号通讯人机交互指令，来设计和开发用于电化学孔加工的对刀和加工控制程序。

4.4.1 对刀程序

对刀程序是用于确定加工的起始位置的关键程序。在程序框图中（参见图 4-15），启动程序后，控制器将检测机器人运动控制器输入口 IO8 是否接收到信号。若 IO8 口未接收到信号，则表示工件和工具电极之间的距离较远，此时工具电极将进行进给运动。进给量和速度由用户在示教器界面上输入，单位为 mm 和 mm/s。一旦 IO8 口接收到信号，表明工具电极已接触到工件。程序将记录该位置的坐标值，并将其定义为加工的起始位置，从而完成对刀操作。

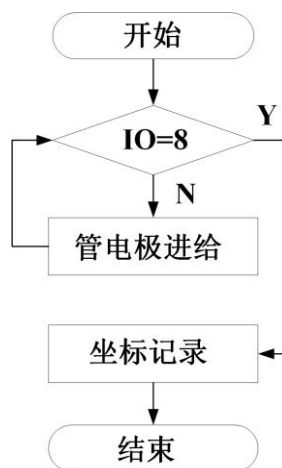


图 4-15 对刀程序框图

如图 4-16 所示为示教器对刀程序。该程序分为两部分，主程序和子程序，分别用于对刀寻位的操作。其中，主程序是对刀寻位代码的主要部分，而子程序则是对刀寻位代码的辅助部分。



图 4-16 示教器对刀程序

4.4.2 加工程序

示教器对刀程序 4.4.2 中，加工程序的程序框图如图 4-17 所示。为了设定管电极的最大进给深度（进给时间），程序定义了变量 **Time_max**。当管电极的进给时间达到设定值时，工具电极进给结束。初始值为加工初始点，每当完成单孔加工时，管电极退入到初始加工点后进入到下一个初始加工点，进给速度和加工时间在开始前由用户从示教器软件程序界面输入。

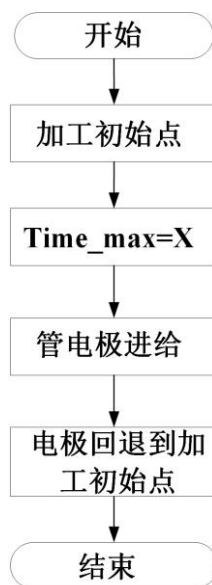


图 4-17 加工程序框图

如图 4-18 所示为加工 6 个点位的孔加工程序。

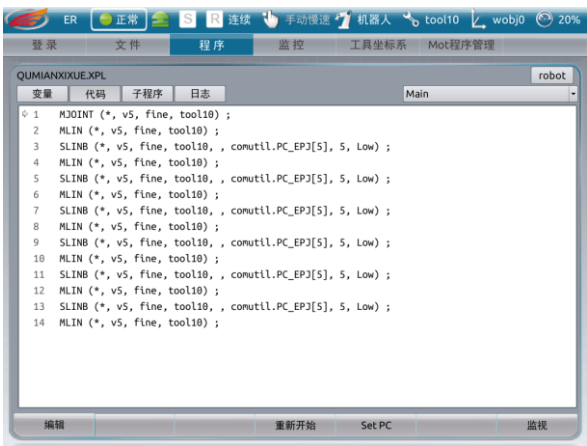


图 4-18 示教器孔加工程序

4.5 本章小结

本节内容详细介绍了机器人平台的管电极电化学小孔加工系统，包括电解液循环系统和末端执行器装置的设计。使用高频脉冲电源，相较于传统脉冲电源，该系统提高了加工效率和品质。还新增了短路保护和电流检测采集功能，提升了系统的智能化水平。根据机器人的运动控制指令和 IO 信号通讯，完成了软件程序的编写，设计和实现了电化学孔加工的对刀和加工控制程序。

第5章 机器人管电极电化学小孔加工实验研究

相比于传统管电极孔加工，机器人管电极小孔加工的运动更为复杂。在进行机器人电化学小孔加工时，应结合加工系统选取合适的小孔加工策略，来保证小孔加工的稳定进行和加工一致性。本章介绍了机器人管电极小孔加工策略，采用机器人配套软件 ROBOT PRO 生成小孔加工轨迹方法，对小孔加工间隙进行规定和偏置，根据加工点位进行轨迹规划和仿真研究，最后根据不同加工点位进行加工参数选择，并进行实验验证及分析。

5.1 机器人管电极电化学小孔加工策略

5.1.1 孔加工轨迹的生成方法

目前，国内外学者研究了许多刀具轨迹的形成方式,常见的方法包括参数线法、等残余高度法和截面线法，孔加工路径轨迹与刀具切削相似，可用相同方法生成加工轨迹^[74]。

①截面法：截面法是通过在曲面上定义截面曲线，然后将这些截面曲线依次进行加工，最终实现对整个曲面的加工。

②投影法：将三维曲面上的加工轨迹投影到一个平面上的方法，以便于对加工路径进行分析、设计和控制。

③等参数化方向法：将曲面参数化，并根据参数在曲面上进行等参数化方向的移动，以生成加工轨迹曲线。这种方法适用于对曲面进行整体加工的情况。

④等残留高度法：加工轨迹的生成是基于设定的残留高度值，确保在不同位置对曲面的切削深度一致，从而获得平滑的加工表面。

等残留高度法可以保证曲面的加工精度和加工效率高。由于市面上成熟的 CAM 软件缺少专用的轨迹生成模块，因此本文使用埃夫特智能装备股份有限公司专用 ROBOT PRO 仿真软件加工模块代替制作孔加工路径轨迹，最后，采用通过等残留高度法根据设定的孔加工间隙，沿着曲面的法向方向确定刀具的加工路径，根据孔路径规划，在曲面上生成加工轨迹曲线，最后，将生成的加工轨迹曲线转化为机器人的控制指令，实现孔加工过程。如图 5-1 ROBOT PRO 加工界面。

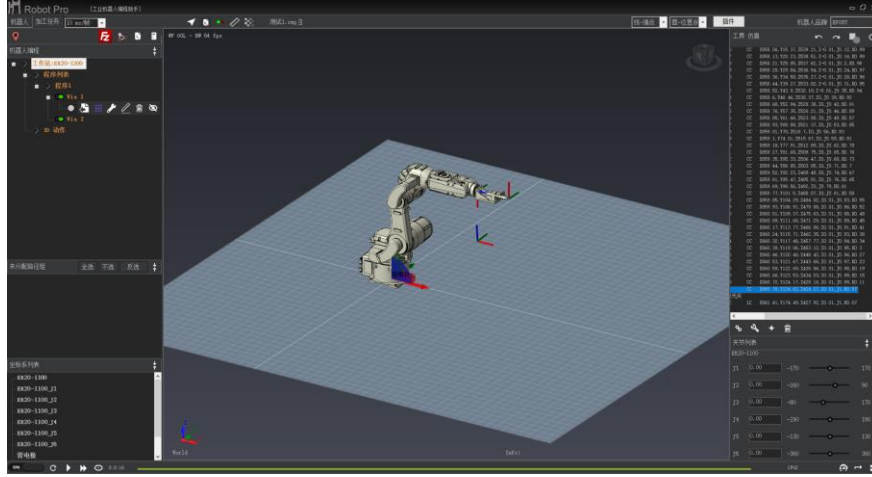


图 5-1 ROBOT PRO 界面

5.1.2 孔加工间隙的规定和偏置

在孔加工的过程中，加工间隔被视为一个至关重要的工艺参数，它直接影响到孔加工的稳定性、准确度和效率。端部间隔会对冷却孔的电化学加工稳定性和表面质量产生一定的影响。孔的电化学加工成型规则可以用一组方程来描述^[74]：

$$\begin{cases} U_R = U - \delta E \\ i = \sigma_I \frac{U_R}{\Delta} \\ v_n = \eta \omega \sigma_I \end{cases} \quad (5-1)$$

可知加工间隙公式为^[75]：

$$\Delta = \frac{\sigma_I (U - \delta E)}{i} = \frac{\eta \omega \sigma_I (U - \delta E)}{v_a} \quad (5-2)$$

式中 U 为阴阳极之间的电压； δE 为阴阳极之间的极化电位值之和； U_R 为间隙电解液中的电压降(V)； i 电流密度； Δ 为电化学加工间隙； v_a 阳极被加工表面的法向溶解速度。

实际电化学加工过程中，多采用平衡间隙公式来估算最终加工间隙，机器人法向加工间隙基本方程为^[76]：

$$\Delta_{IEG} = \frac{\eta \omega \sigma_I U_R}{v_n \cos \theta} = \frac{\Delta}{\cos \theta} \quad (5-3)$$

式中 v_n 为阳极进给速度； θ 为阴极进给速度与工件阳极表面法向的夹角。

实际过程中，要求管电极保持恒定距离并垂直于工件表面加工。为实现这一目标，所有轨迹点需要在空间坐标中表示管电极位置，同时通过轨迹点法向量的反方向表示管电极朝向。为确保管电极与工件表面保持一定的加工间隙，需要沿着远离工件模型

方向对加工轨迹点进行残留高度偏移。这种偏移方式可分为普通轨迹点的残留高度偏移和基于法向量轨迹点的残留高度偏移。

(1) 普通轨迹点的残留高度偏移

普通轨迹点的残留高度偏移是指将加工轨迹数据沿着阳极工件轴向偏移特定的加工间隙距离 Δ_{IEG} ，图 5-2 显示了普通轨迹点的残留高度偏移，展示了加工曲面生成的原始轨迹点的法向量垂直于所在曲面表面区域，通过将轨迹点在 Z 轴方向偏移 Δ_{IEG} 距离，得到了偏移后的轨迹点。尽管如此，偏移轨迹点的法线偏离了垂直状态，未能符合电化学加工的实际需求。

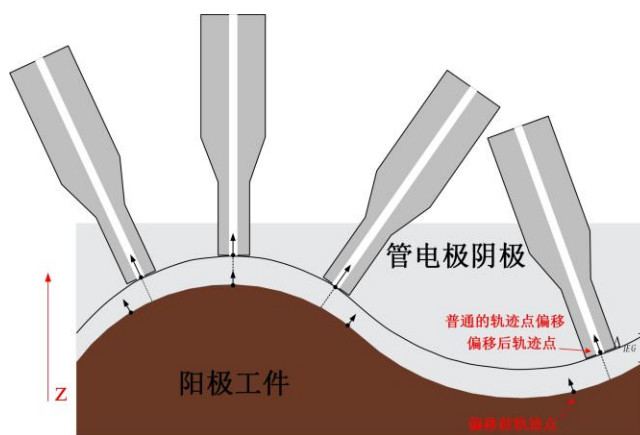


图 5-2 普通轨迹点的残留高度偏移

(2) 基于法向量轨迹点的残留高度偏移

基于法向量轨迹点的残留高度偏移不同于朝特定方向偏移，而是沿着轨迹点的法向量方向进行偏移，偏移距离为 Δ_{IEG} 。具体来说，图 5-3 展示了轨迹点法向量偏移的情况，其中包括上下两组轨迹点。下表面展示了从曲面截面提取的原始轨迹点，通过在法向量方向上进行一定距离的残留高度偏移，得到了真实加工偏移后的轨迹点。

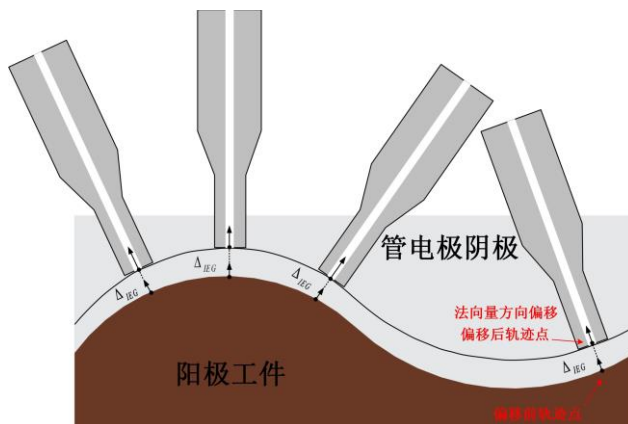


图 5-3 基于法向量轨迹点的残留高度偏移

通过分析图 5-3 中的原始与偏移轨迹点，明显看到偏移满足两个条件。首先，偏移点与原点间的距离恒为 Δ_{IEG} 。其次，保持偏移点的法线与原点区域垂直，满足第二条条件。假设轨迹点代表管电极加工位置，法线反向则指向电极口，这种方法为孔加工提供双重优势。第一，管电极始终与加工工件区域保持恒定的距离。第二，管电极口始终垂直于加工工件。这样的加工轨迹设计具有重要的实际应用价值。这样的方式能有效保证孔加工一致性。

5.1.3 孔加工路线的规划

选取待加工 NURBS 曲面中的一条轨迹进行规划，以此来完成对机器人孔加工的轨迹规划。如图 5-4 为孔加工的路线示意，即打孔过程中有两段轨迹需要进行轨迹规划，分别是打孔进给阶段和孔寻位阶段，打孔进给阶段为 (1-1',2-2',3-3',4-4',5-5')，在此阶段沿着起始点法向方向向加工终止点进给，不断进行电化学孔加工，后续如此反复。孔寻位阶段为(1-2-3-4-5)，在单个孔加工结束返回起始点到加工下一个点时为一个孔寻味阶段。完整的孔加工阶段即为(1-1'-1-2-2'-2-3-3'-3-4-4'-4-5-5'-5)。

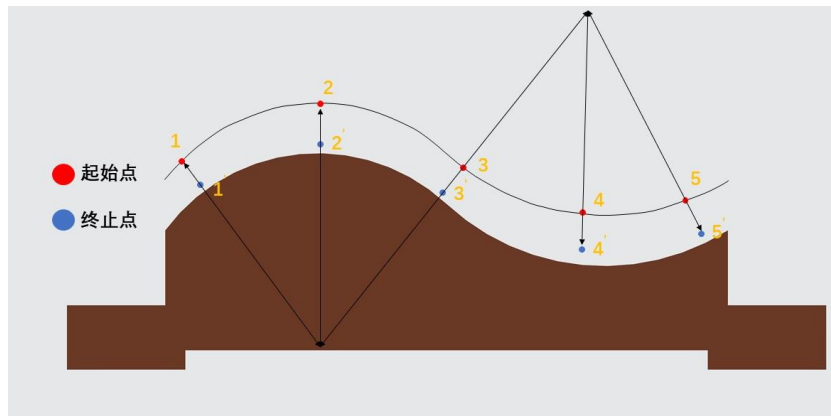


图 5-4 孔加工的路线示意

5.2 机器人孔加工规划及仿真

5.2.1 机器人孔加工位姿的求解

(1) 管电极位姿数学模型

加工的曲面利用 ROBOT PRO 软件模块可得到加工轨迹点，加工点位中包含着加工轨迹点的位置信息和法向矢量。依次将轨迹点的三维坐标及法向矢量的信息提取出来，如图 5-5 孔加工轨迹示意，在笛卡尔空间坐标系中，建立管电极的数学模型，孔加工时，加工工件在工作台上是固定不动的，假设工件轮廓表面的函数为 $z = p(x,y)$ ，其

中，映射 $p: D \rightarrow R$ ，定义域 $D \subset R^2$ 。根据数学集合的定义可得，工件曲面的函数表达式为

$$S = \{(x, y, z) | z = p(x, y), (x, y) \in D\} \quad (5-4)$$

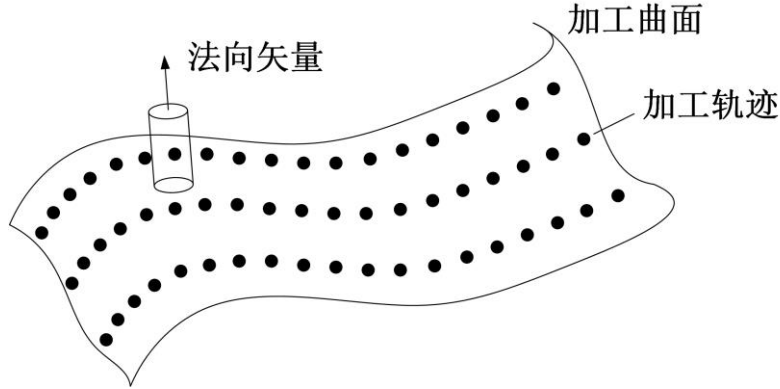


图 5-5 孔加工轨迹示意

假设末端管电极在笛卡尔空间坐标系中的位置用 $M(t)$ 表示，末端管电极在笛卡尔空间坐标系中的姿态用 $N(t)$ 表示， $M(t)$ 和 $N(t)$ 与时间 t 的关系为

$$M(t) = [m_{x(t)}, m_{y(t)}, m_{z(t)}]^T \quad (5-5)$$

$$N(t) = [n_{x(t)}, n_{y(t)}, n_{z(t)}]^T \quad (5-6)$$

在式(5-5)， $m_{x(t)}$ ， $m_{y(t)}$ ， $m_{z(t)}$ 代表 t 时刻末端管电极在空间的 X-Y-Z 坐标值。而式(5-6)里的 $n_{x(t)}$ ， $n_{y(t)}$ ， $n_{z(t)}$ 则展示了 t 时刻下，末端管电极围绕 X-Y-Z 轴的旋转角度 $Rot(z, \theta)$ ， $Rot(y, \beta)$ ， $Rot(x, \gamma)$ ，见图 5-6。此信息可用于将机器人的标准坐标系转换为匹配末端管电极旋转动作的坐标系。

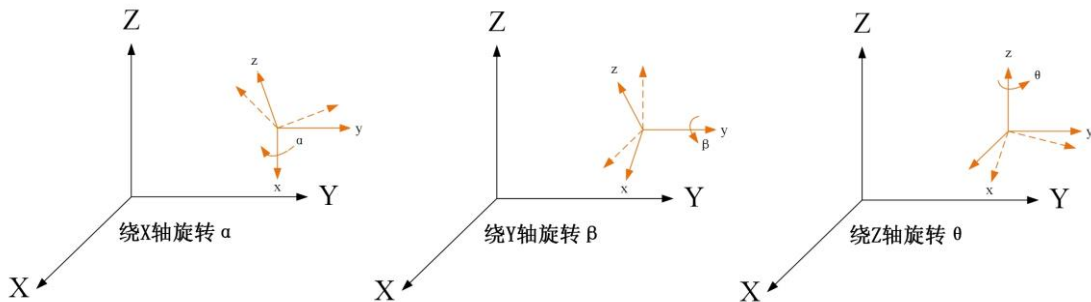


图 5-6 管电极旋转示意图

用函数 $O(t)$ 统一定义末端管电极的位置和姿态，即

$$O(t) = [M(t), N(t)] \quad (5-7)$$

(2) 管电极位姿求解

管电极在插补点处的位置和姿态即插补点处管电极的位姿，管电极的位姿是由孔加工轨迹插补点的位姿决定的，管电极的位姿是保证管电极与加工面关系的重要因素。在孔加工时，管电极的轴线方向垂直于插补点的方向是最佳的，所以加工工件轨迹所在曲面的法线方向为加工路径点的法向量。管电极的姿态与当前管电极目标点的位姿 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 是相一致的，其中 (x, y, z) 为坐标值， (α, β, γ) 为姿态角。

假设工件加工曲面的参数方程式为

$$Q(t) = P(u(t), v(t)) \quad (5-8)$$

切线方向则为式(5-8)的导数，即

$$Q'(t) = P_u(u, v)u'(t) + P_v(u, v)v'(t) \quad (5-9)$$

其中， $P_u(u, v)$ 是对 $P(u, v)$ 求 u 的偏导， $P_v(u, v)$ 对 $P(u, v)$ 求 v 的偏导。

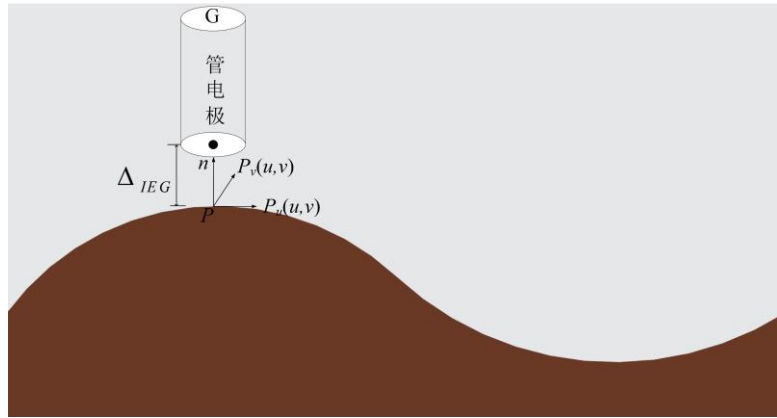


图 5-7 管电极轨迹点的求解简图

管电极高度指的是管电极的喷嘴口 G 到加工面轨迹目标点间的距离 Δ_{IEG} 。根据管电极轨迹目标点的切向和法向矢量，可以求解管电极的运动轨迹点。目标点在加工件曲面上的切向量用于控制末端管电极的移动，而加工件表面的法向量则用于控制末端管电极的姿态。在执行孔加工任务时，末端管电极的轴线与孔加工曲面垂直，当管电极到达轨迹目标点时，管电极的轴线与法向矢量平行，从而确定管电极的姿态，最终实现对孔加工轨迹的精确控制。通过求解得到法向矢量，可以实现这一控制过程：

$$n = \frac{P_u(u, v)P_v(u, v)}{\|P_u(u, v)P_v(u, v)\|} \quad (5-10)$$

(3) 管电极位姿获取

在机器人管电极执行孔加工任务时，需要根据孔加工目标点的位置来进行轨迹插补，以规划管电极的轨迹。通过插补点的法向矢量，可以确定管电极的姿态，使其始终与加工面保持垂直的关系。这样做可以确保管电极的运动更加平滑，从而提高加工的质量和精度。

曲线上插补点 P_i 的位姿坐标为 $(x_i, y_i, z_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ ， $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 与 $X-Y-Z$ 轴的夹角，建立新的坐标系 $O'X'Y'Z'$ ，可以清晰描述管电极与加工面的位姿的关系，插补点与 $X'-Y'-Z'$ 轴的夹角分别为 $\alpha'_i, \beta'_i, \gamma'_i$ ，根据机器人管电极孔加工的要求，将管电极到加工工件表面的法向垂直距离设为 Δ_{IEG} ，则插补点上方的管电极位置坐标为

$$\begin{cases} x'_i = x_i + \Delta_{IEG} \cos \alpha'_i \\ y'_i = y_i + \Delta_{IEG} \cos \beta'_i \\ z'_i = z_i + \Delta_{IEG} \cos \gamma'_i \end{cases} \quad (5-11)$$

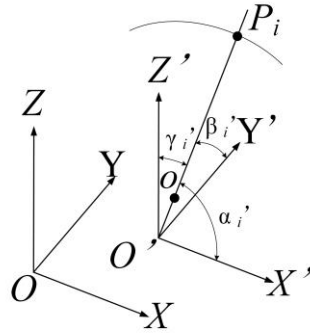


图 5-8 管电极位姿法向矢量

式(5-11)已经求出管电极的位置，但其中的 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 并未求解，也就是管电极的姿态未求解。如图 5-8 所示，设圆心 $O(x_0, y_0, z_0)$ ，半径 R 为

$$R = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (5-12)$$

插补点 P_i 与 $X'-Y'-Z'$ 轴的夹角相当于插补点 P_i 与圆心 O 两点间所在直线与 $X'-Y'-Z'$ 轴的夹角，夹角余弦值分别为 $\cos \alpha'_i, \cos \beta'_i, \cos \gamma'_i$ ，即

$$\begin{cases} \cos \alpha'_i = \frac{x_i - x_0}{R} \\ \cos \beta'_i = \frac{y_i - y_0}{R} \\ \cos \gamma'_i = \frac{z_i - z_0}{R} \end{cases} \quad (5-13)$$

插补点的姿态即管电极运动到插补点的姿态，根据式(5-12)(5-13)求出管电极相对于机器人管电极坐标系的位姿为 $(x_i', y_i', z_i', \alpha_i', \beta_i', \gamma_i')$ 。机器人在执行孔加工作业时，管电极的位姿影响孔的精度，不仅要控制管电极的姿态，还要对机器人的关节进行控制，达到平稳运动的状态。

5.2.2 机器人孔加工初始点路径参数计算

NURBS 曲线一般不经过控制点 P_i 。为确保规划的路径通过型值点(孔加工初始起点)，使用全局插值策略反算控制点。设孔加工初始起点集 $\{Q_k\}, k=0,1,\dots,n$ ，用一条 p 次非有理 B 样条曲线插值于这些点，如果我们为每一个点 Q_k 指定了参数值 u_k ，并且选定了合适的节点矢量 $U=\{u_0, u_1, \dots, u_m\}$ ，然后建立了系数矩阵为 $(n+1) \times (n+1)$ 的线性方程组

$$Q_k = C(u_k) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u_k) P_i \quad (5-14)$$

式中： $n+1$ 个控制点 P_i 是未知量，令 r 是 Q_k 的坐标分量的个数。

根据弦长参指定归一化参数 u_k ，令 d 为总弦长

$$d = \sum_{k=1}^n |Q_k - Q_{k-1}| \quad (5-15)$$

即：

$$\begin{cases} u_0 = 0 \\ u_n = 1 \\ u_k = u_{k-1} + \frac{|Q_k - Q_{k-1}|}{d}, k=1, 2, \dots, n-1 \end{cases} \quad (5-16)$$

式中： $|Q_k - Q_{k-1}|$ 为相邻起始点 Q_k 、 Q_{k-1} 之间的距离； d 为所有相邻起始点间距离的和； u_k 为归一化参数。

本研究为防止解算时遇到奇异方程组并使节点矢量准确表征弦长特性，采纳了一种平均化方法以产生节点矢量 U ，具体计算方法见式(5-17)，实验所用节点矢量参见式(5-18)

$$\begin{cases} u_0 = \dots = u_p = 0 \\ u_{m-p} = \dots = u_m = 1 \\ u_{j+p} = \frac{1}{p} \sum_{i=j}^{j+p-1} u_i, j=1, 2, \dots, n-p \end{cases} \quad (5-17)$$

$$U = [0.00 \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 0.32 \quad 0.53 \quad 1.00 \quad 1.00 \quad 1.00 \quad 1.00] \quad (5-18)$$

采用这种方法可以有效地反映出 u_k 值的分布情况，同时将起始点作为曲线的分界点。通过比较 u_k 和节点矢量 U 中的元素，可以确定非零基函数值。假设将控制点代入式(5-14)计算后得到对应的型值点，然后建立线性方程组并进行 LU 分解。将控制点集 Q_k 、节点矢量 U 、基函数 $N_{ip}(u)$ 代入式(5-14)，可以得到孔加工初始点的空间路径表达式。实际试验中采用的型值点和控制点的数值结果详见表 5-1。

表 5-1 基于 ROBOT PRO 软件生成的型值点与选取的控制点

加工点序号	型值点	控制点
1	(281.55, -70, 395.22)	(772.35, -70, 575.06)
2	(579.76, -70, 522.46)	(1009.23, -70, 452.14)
3	(900.51, -70, 402.79)	(1210.51, -70, 123.45)
4	(1263.66, -70, 256.76)	(1480.51, -70, 64.28)
5	(1526.14, -70, 317.89)	(1663.66, -70, 262.52)

通过使用位置数据、节点向量和目标点来描绘最终路径，根据图 5-10，描绘的路径是光滑的，并且经过所有目标点，符合起始点的规划任务要求。

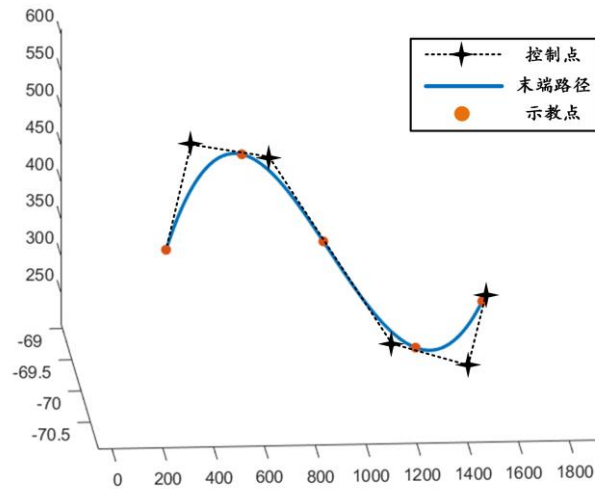


图 5-9 孔加工初始点路径轨迹

5.2.3 机器人孔加工初末点轨迹直线插补

已知空间孔加工初末的两点，记 $P_{n \text{ start}}$ 和 $P_{n \text{ end}}$ ，如图 5-10 所示。假设机器人在打单个孔进给过程中，点 $P_{n \text{ start}}(x_{n \text{ start}}, y_{n \text{ start}}, z_{n \text{ start}})$ 沿直线进给运动到点 $P_{n \text{ end}}(x_{n \text{ end}}, y_{n \text{ end}}, z_{n \text{ end}})$ ，在两加工点之间进行离散化处理，计算出每次插补的位置和姿态。默认进给过程中姿态保持不变，仅对位置进行插补。

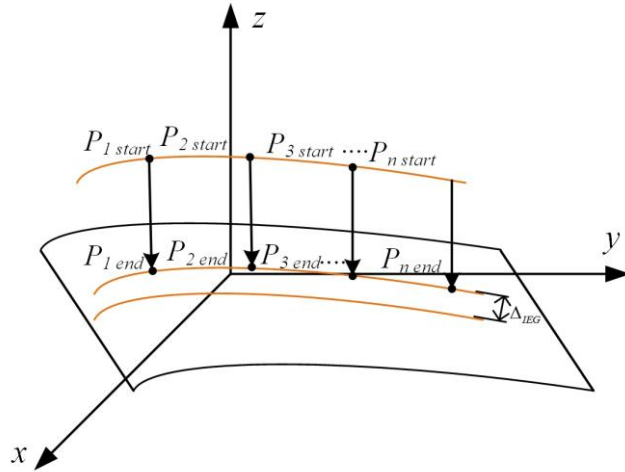


图 5-10 小孔加工进给的直线示意

根据 Euclidean Distance 公式可得三维空间中任意两点之间的距离，如式 5-19 所示：

$$L = \sqrt{(x_{n_start} - x_{n_end})^2 + (y_{n_start} - y_{n_end})^2 + (z_{n_start} - z_{n_end})^2} \quad (5-19)$$

若小孔加工进给运动速度为 v ，插补周期为 T ，插补步长为 $\Delta L = vT$ 。插补次数如式 5-20 所示：

$$N = (L/\Delta L) + 1 \quad (5-20)$$

插补的增量如式 5-21 所示：

$$\begin{cases} \Delta x = (x_{n_start} - x_{n_end})/N \\ \Delta y = (y_{n_start} - y_{n_end})/N \\ \Delta z = (z_{n_start} - z_{n_end})/N \end{cases} \quad (5-21)$$

则每次插补的位置如式 5-22 所示：

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - i\Delta x \\ y_{i+1} = y_i - i\Delta y \\ z_{i+1} = z_i - i\Delta z \end{cases} \quad (5-22)$$

通过 MATLAB 进行仿真验证，选取起始和结束的路径点为第 5.2.2 中型值点 3 和型值点 3'。根据第三章的机器人正运动学和第四章的加工速度(0.005mm/s)和时间(600s)，可以得出管电极末端执行器的齐次位姿矩阵。考虑到仅对位置进行插补，其位姿保持不变，因此我们只需要 ROBOT PRO 软件导出的两点坐标 P3(900.51,-70,402.79)和 P3'(900.51,-70,399.79)。验证结果如图 5-11 所示。

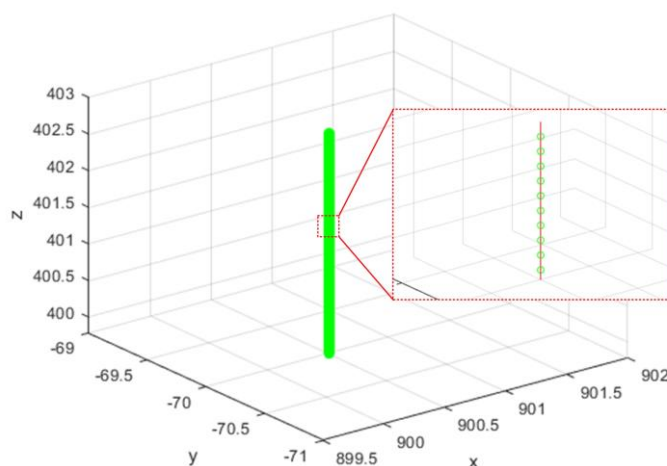


图 5-11 孔加工初末点轨迹直线插补

5.3 机器人孔加工实验验证分析

5.3.1 实验加工参数的选择

由于进行机器人小孔加工时，阴极进给速度较慢，单个孔的加工时间之久；于此同时，机器人加工曲面孔时机器人位姿不同所采用的加工参数不同，不同的参数加工出小孔结果不同。为了减少试验次数和确保小孔加工结果的一致性，以节省实验资源，可以在进行孔加工试验之前，利用小孔加工的仿真模拟来快速确定在不同机器人姿态下的加工实验参数。图 5-12 为不同姿态角度的加工方案示意图。

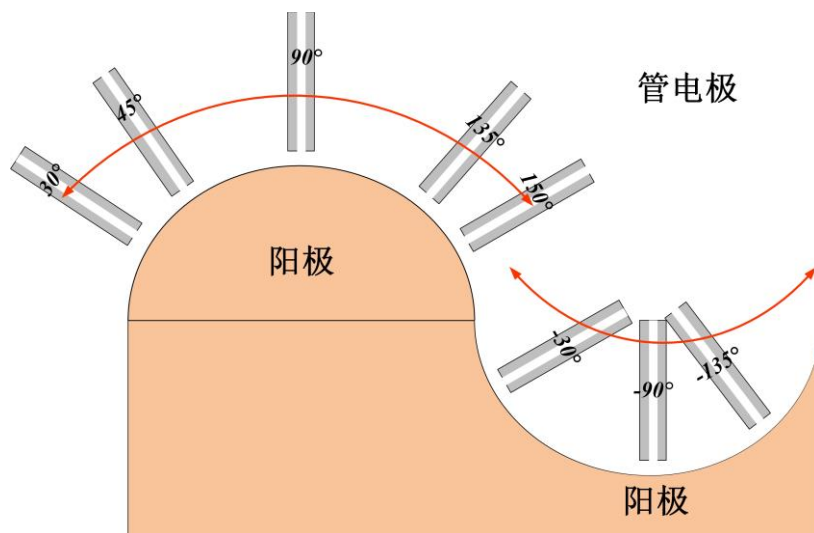


图 5-12 孔加工方案位姿角度示意图

基于第四章的多物理场耦合仿真孔模拟方法，对不同姿态角度下的孔加工进行仿真，探究寻求孔一致性(孔深 W_{av} 和孔宽 D_{av})的加工参数。图 5-13 为孔加工位姿物理场仿真模型，

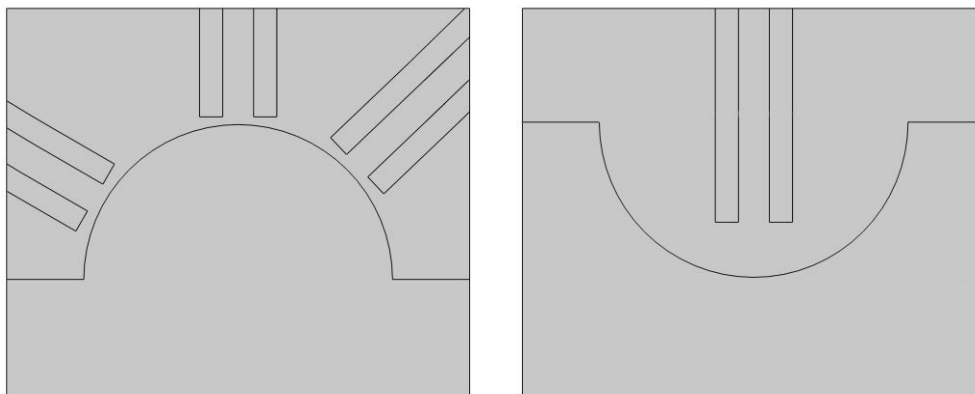


图 5-13 孔加工位姿物理场仿真模型

如表 5-2 所示，在加工凸面时相同的管电极入口流速，在加工相同的时间，随着加工角度的增加(90° - 135°)，孔深 W_{av} 和孔宽 D_{av} 相应减小。当加工角度一致时，孔深 W_{av} 和孔宽 D_{av} 随着加工时间的增加相应增加，在加工凹面时相同的管电极入口流速，在加工相同的时间，随着加工角度的增加(-30° - 135°)，孔深 W_{av} 和孔宽 D_{av} 相应减小，当加工角度一致时，孔深 W_{av} 和孔宽 D_{av} 随着加工时间的增加相应增加，即加工凹凸面时孔加工角度的孔深 W_{av} 和孔宽 D_{av} 变化相反，为了保持孔加工结果的一致性，最终选用参数编号为(1、5、9、12、14、16)对曲面孔进行实际加工。

表 5-2 不同加工角度和加工时间仿真下的孔深和孔宽

编号	加工角度	加工时间(s)	孔深 W_{av} (mm)	孔宽 D_{av} (mm)
1	90°	600	3.01	6.61
2	135°	600	2.89	6.59
3	150°	600	2.84	6.58
4	90°	620	3.10	6.64
5	135°	620	3.05	6.62
6	150°	620	2.99	6.61
7	90°	640	3.27	6.66
8	135°	640	3.11	6.65
9	150°	640	3.04	6.63
10	-30°	520	2.94	6.63
11	-45°	520	2.96	6.64

12	-90°	520	3.06	6.66
13	-30°	540	3.01	6.67
14	-45°	540	3.03	6.69
15	-90°	540	3.10	6.70
16	-30°	560	3.04	6.68
17	-45°	560	3.10	6.69
18	-90°	560	3.15	6.71

5.3.2 实验验证及分析

(1) 孔轨迹规划验证

经过关闭电解液循环系统，并进行空液实验，我们可以验证机器人在执行过程中，末端管电极是否垂直于加工位置点区域。末端管电极装置安装在机器人法兰末端，启动示教器软件加工程序(见第 3.5.2 章)，机器人带动管电极进行连续运动，机器人速度倍率为 5%。在加工过程中，我们拍摄了视频以观察加工点位管电极的位姿变化情况，并且对每个点位进行了截图，具体请参考图 5-14 和图 5-15

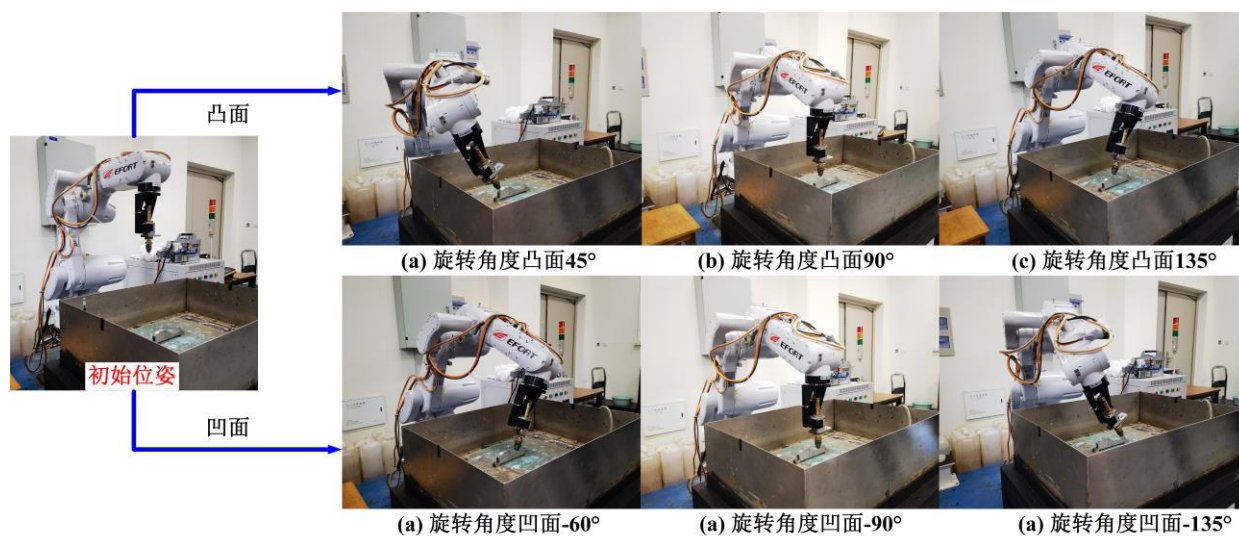


图 5-14 不同制孔点下机器人不同位姿

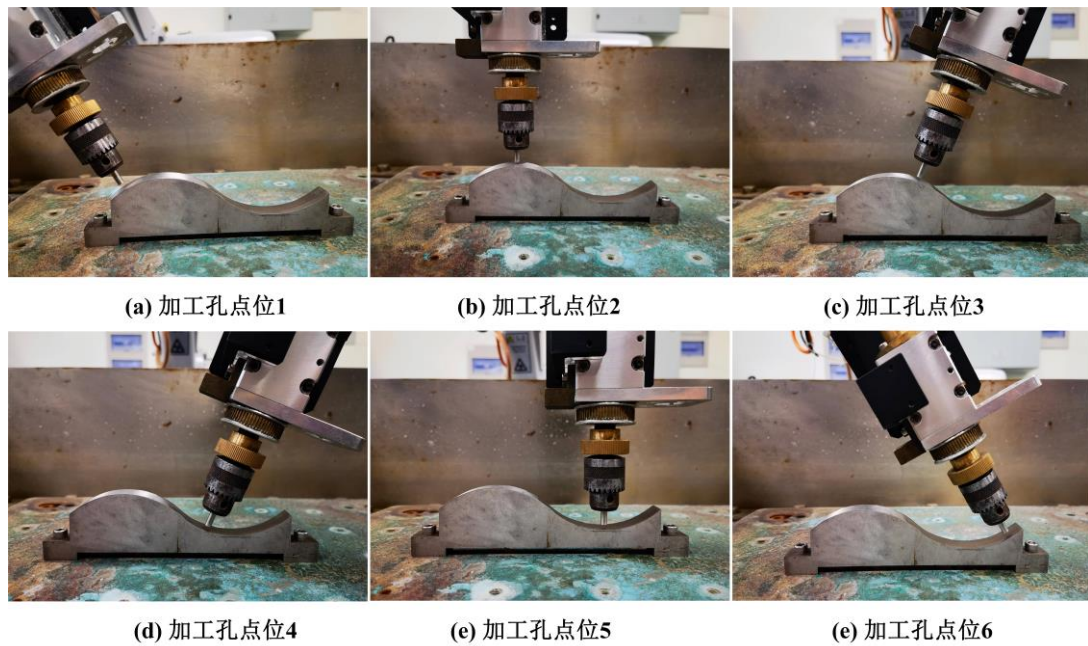


图 5-15 每个小孔加工点位管电极运动截图



图 5-16 初始加工间隙距离测量

根据表 5-3 中展示的实际偏差距离，当法向量偏移距离为 2mm 时，对应的理论初始加工距离值相同。通过比较实际偏离和理论偏离的距离差异，可以计算出偏差值。最大的偏差为 0.2 毫米，平均偏差为 0.098 毫米，而相对平均偏差为 4.91%。鉴于相对平均偏差较小，我们可以得出以下结论：在不同的加工点位置，管状电极与工件表面之间的距离保持相对稳定。此外，在启动电解液循环系统的情况下，管状电极的口与工件表面的距离也将基本保持稳定，因此在机器人连续运动过程中，管状电极的口也能够维持恒定的小孔加工距离。通过两项验证实验，我们可以得出结论：管状电极在加工过程中基本满足距离工件表面特定距离且垂直于工件区域的要求。

表 5-3 加工点实际偏差距离

加工点编号	理论加工设定偏移距离(mm)	实际加工设定偏距离(mm)	偏差(mm)
1	2.0	2.11	0.11
2	2.0	2.20	0.20
3	2.0	1.95	0.05
4	2.0	2.12	0.12
5	2.0	1.94	0.06
6	2.0	2.05	0.05

(2)孔一致性验证

采用上述参数编号为(1、5、9、12、14、16)对曲面机器人管电极孔加工的六个点进行实际的加工。同第四章的实验方法对加工宽和深进行测量，绘制相应的各个孔宽和孔深的数据对比如图 5-17，六个孔角度点位的实验深和宽均大于仿真结果，原因如上章叙述，六个点位孔深度和宽度的平均偏差为 0.03mm 和 0.042mm，加工结果一致性较好。

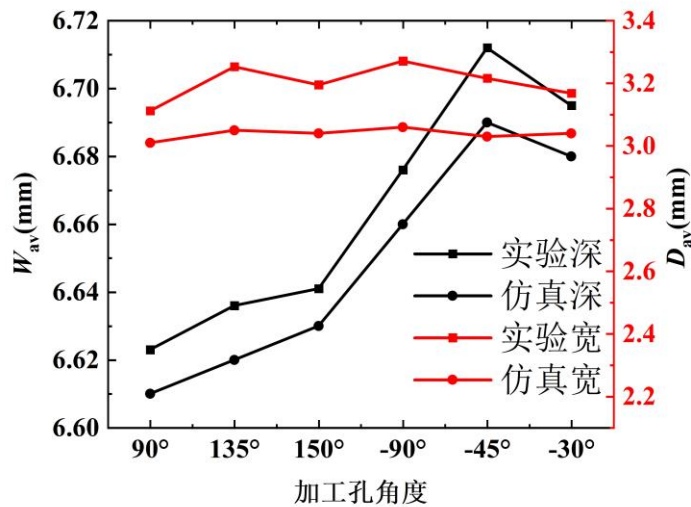


图 5-17 加工点位下的孔宽和孔深数据对比

为分析每个孔加工过程稳定性对加工实验点的电流进行采集，图 5-18 为不同加工点位下加工孔过程的平均电流对比。在凸面加工时随着孔加工角度的增加，稳定时的平均电流相应增加，既第四个加工角度-90°加工过程中平均电流最大，因工件加工点位置不同材质接触属性使其加工电流略微发生变化。

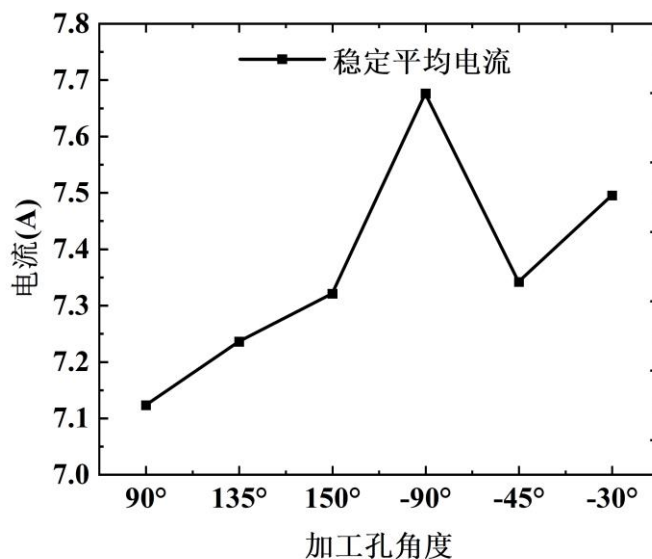


图 5-18 加工点位下加工过程的电流变化

5.4 本章小结

本章提出了 TE-RECM 孔加工策略并进行了相应的实验和仿真研究,可以得出以下结论:提出了机器人管电极电化学孔加工策略,通过截面法获得曲面上的刀孔加工路径、基于埃夫特公司的 ROBOT PRO 软件根据孔加工间隙偏移生成完整的孔加工初始加工的点位。根据 ROBOT PRO 软件模块得到的加工轨迹点,依次将轨迹点的三维坐标及法向矢量的信息提取出来,使管电极的轴线方向垂直于工件轨迹所在曲面的法线方向,并对孔加工初始点路径进行参数计算,确保规划所得路径通过型值点(孔加工初始示教点),最后采用 MATLAB 对孔加工初末轨迹点进行直线插补仿真验证。通过多物理场耦合仿真孔模拟方法对不同姿态角度下的孔加工进行仿真,探究寻求孔一致性(孔深 W_{av} 和孔宽 D_{av})的加工参数。并进行了孔轨迹规划验证和孔加工一致性验证实验验证,通过实验管电极在孔加工初始位置时,也基本满足加工工件表面设定的法向距离且垂直于工件所对区域的要求,六个点位孔深度和宽度的平均偏差为 0.03mm 和 0.042mm,加工结果一致性较好。

第 6 章 总结与展望

6.1 结论

本文对机器人管电极脉冲电化学加工小孔方法进行研究，主要包括理论基础的介绍、机器人小孔加工平台的搭建、孔加工多时间尺度溶解仿真方法、机器人管电极电化学孔加工策略四个部分，完成的主要工作如下：

(1) 提出了基于热源平均的准稳态迭代简化方法可解决脉冲存在时计算时间过长的问題，通过和全时间耦合精度方法对比，大大降低运算时间和运算量，并且计算精度较高。针对管电极脉冲电解加工建立气液两相场、温度场、电场和结构场的多物理场耦合迭代模型,采用该模型获得了加工微时间和宏观时间的温度、气体体积分数、电解液电导率、电解液电流密度等参数的空间分布。采用该多物理场耦合迭代预测工件轮廓动态变化，并和加工实验所得趋势一致，孔壁处最大相对误差为 1.05%,能够准确模拟实际加工过程

(2) 完成了机器人管电极小孔加工系统的设计，充分利用管电极电化学加工在小加工材料去除方面和机器人在复杂曲面规划方面的灵活的优势，采用高频脉冲电源，相对于传统的脉冲电源，加工效率和加工品质得到提升，在该加工系统中增加了短路保护功能和电流检测采集功能，提升了该系统的智能化水平，完成软件程序的设计，根据工业机器人的运动控制指令和 IO 信号通讯人机交互指令，通过工业机器人配套的示教器编写相应的程序，设计和实现电化学孔加工控制的对刀和加工控制程序设计。

(3) 完成了机器人的运动学分析和加工轨迹的生成。采用 M-DH 方法结合 MATLAB 机器人工具箱成功建立了机器人的正运动学模型。同时，对工件坐标系和工具坐标系进行了标定，明确了运动对象和参考坐标系。然后利用 ROBOT PRO 软件和 NURBS 理论加工策略生成了机器人的孔加工轨迹。这些工作为机器人电化学孔加工奠定了坚实的运动学基础。通过多物理场耦合仿真孔模拟方法对不同姿态角度下的孔加工进行仿真，探究寻求孔一致性的加工参数。并进行了实验验证，通过实验管电极在孔加工初始位置时，也基本满足距离工件表面一定距离且垂直于工件所对区域的要求，六个点位孔深度和宽度的平均偏差为 0.03mm 和 0.042mm，加工结果一致性较好。

6.2 创新点

本文的创新点如下：

(1) 提出一种基于热源平均的准稳态迭代简化算法,该多物理场模型具有较高的仿真精度,为气膜小孔加工提供了一种高效可行性加工方法。

(2) 提出一种六自由度机器人管电极脉冲电化学小孔加工方法,破解复杂曲面类构件管电极电化学加工的难题,也拓宽了工业机器人在机械加工领域的应用前景。

(3) 提出了 ROBOT PRO 软件和 NURBS 结合的电化学小孔加工路径规划方法。该方法保证了加工点位与加工表面的恒定法向间隙且垂直。

6.3 展望

本文对机器人管电极脉冲电化学加工小孔方法进行了大量研究,取得了一定成果。由于时间关系,还存在如下问题需进一步探究。

(1) 在未来的工作中,我们需要考虑针对管电极外表面绝缘的方案,可以采用一些新的绝缘工艺来实现侧壁绝缘,进而改善小孔加工质量问题。

(2) 在未来的工作中,我们需要对机器人进行不同姿态加工孔时的参数进行详细分析,找出各项加工参数对加工结果的影响。

(3) 在未来的工作中,我们需要融合叶片冷却孔的真实工艺规则对机器人管电极加工轨迹规划方法进行研究。

参考文献

- [1] Zhu Y ,Cao Y ,Luo R , et al.Orientation-Dependent Characteristics for Residual Grains during Hot Deformation of Nickel-Based Alloy 925[J].Acta Metallurgica Sinica(English Letters),2021,34(09):1296-1306.
- [2] 李红英,张明岐,张志金,等.航空发动机整体薄壁结构复杂表面电解加工技术[J].航空制造技术,2018,61(03):41-45+59.
- [3] 方明. 高频脉冲电化学精密加工多场耦合理论与工艺研究[D].合肥工业大学,2018.
- [4] 张晓博,朱栋.长窄型薄壁叶片的套料电解加工[J].中国机械工程,2022,33(07):797-803+810.
- [5] Liu D, Shi Y, Lin X, et al. Polishing surface integrity of TC17 aeroengine blades[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(2):689-699.
- [6] Wang J, Wang W, Li G, et al. Numerical study of the cooling performance of Rupert-shaped film cooling holes[J]. International Journal of Thermal Sciences,2024,198108859-.
- [7] 李朋峻.管电极脉冲电解加工小孔实验研究[D].沈阳航空航天大学,2018.
- [8] Chao L B, Chao Z, Lun J F, et al. Numerical Study of Film-Cooling and Aerodynamic Performance of Contoured Cratered Holes[J]. Heat Transfer Engineering,2024,45(1):81-95.
- [9] Pereira, Benjamin, Griffiths, et al. Optimization of an autonomous robotic drilling system for the machining of aluminum aerospace alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2021,119(3-4):1-16.
- [10] Ji W, Wang L. Industrial robotic machining: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2019,103(1-4):1239-1255.
- [11] 徐作珂.6-DOF 串联机器人电火花铣削加工技术研究[D].山东大学,2022.
- [12] 冯瑞,刘洋,曲宁松.管电极电解铣削加工 316 不锈钢的实验研究[J].机械制造与自动化,2022,51(01):19-22.
- [13] 李志永.基于电解液非线性特性的叶片电解加工阴极设计[J].机械设计与制造,2007,(01):67-69.
- [14] 章宇航.射流电解加工技术研究[D].南京航空航天大学,2019.

- [15] Smets N, Damme S, Wilde D, et al. Time averaged temperature calculations in pulse electrochemical machining. Part I: theoretical basis[J]. Journal of Applied Electrochemistry,2007,37(11):1345-1355.
- [16] Smets N, Damme S, Wilde D, et al. Time averaged temperature calculations in pulse electrochemical machining, Part II: numerical simulation[J]. Journal of Applied Electrochemistry,2008,38(4):551-560.
- [17] Yuanlong C, Lijun J, Ming F, et al. Multi-time scale simulation of pulse electrochemical machining process with multi-physical model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2020,110(7):2203-2210.
- [18] Hackert-Oschätzchen M, Penzel M, Kowalick M, et al. Transient Simulation of the Electrolyte Flow in a Closed Device for Precise Electrochemical Machining. In: Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Cambridge 2014.
- [19] Schaarschmidt I, Zinecker M, Hackert-Oschätzchen M, et al.Multiscale Multiphysics Simulation of a Pulsed Electrochemical Machining Process with Oscillating Cathode for Microstructuring of Impact Extrusion Punches[J].Procedia CIRP,2017,58257-262.
- [20] Klocke F., Heidemanns L., Zeis M., Klink A. A Novel Modeling Approach for the Simulation of Precise Electrochemical Machining (PECM) with Pulsed Current and Oscillating Cathode [J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 499-504.
- [21] Fang, M., Chen, Y., et al.Optimal design of cathode based on iterative solution of multi-physical model in pulse electrochemical machining (PECM)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2019,105(7–8), 3261–3270.
- [22] Neo K W D, Liu K, Kumar S A. High throughput deep-hole drilling of Inconel 718 using PCBN gun drill[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57302-311.
- [23] Rujia W, Kedian W, Zhengjie F, et al. A comparative study on high pulse energy femtosecond laser drilling of high-aspect-ratio holes under different pressure conditions[J]. Journal of Manufacturing Processes,2023,85492-502.
- [24] Hasan M, Zhao J, Jiang Z. A REVIEW OF MODERN ADVANCEMENTS IN MICRO DRILLING TECHNIQUES[J]. Journal of Manufacturing Processes,2017,29343-375.
- [25] Qingrong Z, Hongping L, Peng L, et al.Bipolar nano-second pulse power supply for electrochemical micromachining of tungsten carbide without tool wear[J].Procedia CIRP,2022,113471-476.

- [26] Shuncheng Z, Zhidong L, Yunxiao H, et al. An electrochemical discharge ablation compound milling method utilizing electrolyte-oxygen aerosol medium[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(7-8): 3713-3724.
- [27] Minghuan W, Ruiyong Z, Yongchao S, et al. Micro-milling microstructures in air-shielding ultrasonic assisted electrochemical machining[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 97: 171-184.
- [28] Mingxia C, Zhiyong L, Xuening S, et al. Optimization and Simulation of Electrochemical Machining of Cooling Holes on High Temperature Nickel-Based Alloy[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTROCHEMICAL SCIENCE, 2021, 16(9):
- [29] 王芯蒂, 李寒松, 房晓龙等. 弧面群孔结构管电极电解加工试验研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(04): 50-53.
- [30] Jingtao W, Zhengyang X, Jia L, et al. Real-time vision-assisted electrochemical machining with constant inter-electrode gap[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 71: 384-397.
- [31] Özerkan Hacı Bekir, Çoğun Can. Design and implementation of an electrode feed rate control system in the electrochemical drilling process[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44(9):
- [32] A.M. Pawar, SS Chavan, DS Bilgi, Multiphysics Simulation And Experimental Validation Of Ecm Drilling Process[J]. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR) 6 (1), 682-689.
- [33] Zhang C, Yao J, Zhang C, et al. Electrochemical milling of narrow grooves with high aspect ratio using a tube electrode[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2020, 282: (prepublish):
- [34] 曹炳任. 电解加工冷却孔多物理场耦合动态成形仿真分析及实验研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2022.
- [35] Lu Y, Wang Z, Xie R, et al. Bayesian Optimized Deep Convolutional Network for Electrochemical Drilling Process[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019, 3(3): 57-57.
- [36] Guixian L, さおり日, 恒夏. Characteristics Investigation of ECM with Electrolyte Suction Tool with Built-in Auxiliary Anode for Narrowing Current Area[J]. 精密工学会学術講演会講演論文集, 2018, 2018S(0): 911-912.

- [37] Zhaolong L, Ye D. Simulation Analysis and Process Evaluation of Cooling Hole Forming Precision in Mask Assisted Electrochemical Machining Based on GH4169[J]. Materials, 2022,15(5):1973-1973.
- [38] Kong H, Liu Y, Zhu X, et al. Study on Ultrasonic Assisted Electrochemical Drill-Grinding of Superalloy[J]. Chemosensors,2020,8(3):62.
- [39] 张通.基于恒力控制的混联机器人自由曲面柔顺抛光技术研究[D].天津大学,2021.
- [40] ZHU Z, TANG X, CHEN C, et al. High precision and efficiency robotic milling of complex parts: Challenges, approaches and trends[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2022,35(02):22-46.
- [41] Bottin M, Rosati G. Trajectory Optimization of a Redundant Serial Robot Using Cartesian via Points and Kinematic Decoupling[J]. Robotics, 2019,8(4):
- [42] Xiao J, Zhao S, Guo H, et al. Research on the collaborative machining method for dual-robot mirror milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2019,105(9):4071-4084.
- [43] Ji W, Wang L. Industrial robotic machining: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2019,103(1-4):1239-1255.
- [44] Shi M, Qin X, Li H, et al. Cutting force and chatter stability analysis for PKM-based helical milling operation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2020,111(11):1-18.
- [45] 王波.6-DOF 机器人在铣削过程中的误差检测与建模研究[D].山东建筑大学,2017.
- [46] Mohammad K E A, Hong J, Wang D, et al. Synergistic integrated design of an electrochemical mechanical polishing end-effector for robotic polishing applications[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing,2019,5565-75.
- [47] Abdulkadir C, Hasan D, Turan M A, et al. A novel machine tool concept: Robotic electrochemical machining[J]. Procedia Manufacturing,2021,54203-208.
- [48] 陈远龙,蒋立军,温信宇等.电化学加工机器人动态性能设计与优化研究[J].南京航空航天大学学报,2023,55(03):410-417.
- [49] Lijun J, Ming F, Yuanlong C, et al. Influence of industrial robot trajectory on electrochemical machining quality[J]. International Journal of Electrochemical Science,2022,17(7):
- [50] Li H X, Wang L Z, Wang F J, et al. Research on Micro Electrochemical Milling[J]. Key Engineering Materials,2008,26(375-376):318-322.

- [51] Fang X ,Wang X ,Wang W , et al. Electrochemical drilling of multiple small holes with optimized electrolyte dividing manifolds[J].Journal of Materials Processing Tech.,2016,24740-47.
- [52] Business - Manufacturing; Studies from Institute of Advanced Manufacturing Technology Update Current Data on Manufacturing [Fabrication of Deep and Small Holes By Synchronized Laser and Shaped Tube Electrochemical Machining (Laser-stem) Hybrid Process][J].Chemicals Chemistry,2019,
- [53] 侯妍.电解加工钛合金表面钝化特性研究[D].西安工业大学,2023.
- [54] 宋东晓.管电极射流电解加工工艺参数规划研究[D].华中科技大学,2022.
- [55] Zhang S ,Gao G ,Na J , et al. Design for performance test system of industrial robots[C]// Proc. SPIE 11343, Ninth International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 113430P (13 November 2019)
- [56] The NURBS book[J]. Choice Reviews Online,1997,35(02):35-0952.
- [57] Željko G. Conics and Graphs of Some Polynomials by Using NURBS Curves[J]. KoG, 2009,13(13):51-55.
- [58] Park J, Nam S, Yang M. Development of a real-time trajectory generator for NURBS interpolation based on the two-stage interpolation method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2005,26(4):359-365.
- [59] 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.
- [60] 董国鑫,杨勋年.矩阵权.NURBS 曲面的拟合与光顺[J].浙江大学学报(理学版),2023,50(06):820-827.
- [61] 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,2019,14266-75.
- [62] 孙宇博, 马锦晖.电解加工去除焊层多场耦合仿真及试验研究[J].表面技术,2021,50(06):347-355.
- [63] 张聚臣,李世成,刘洋等.基于 Realizable k- ε 模型的叶盘通道电解加工多场耦合分析[J].航空学报,2022,43(04):361-372.

- [64] Hua L, Xiaochao Z, Changyong C, et al. Investigation of the Distribution of Temperature in the Electrochemical Machining Using Multiphysics Simulation[J]. International Journal of Electrochemical Science,2022,17(2):
- [65] 周小超,曹昌勇.基于 COMSOL 电解加工温度场仿真[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2018,34(04):41-44.
- [66] CHEN Y, ZHOU X, CHEN P, et al. Electrochemical machining gap prediction with multiphysics coupling model based on two-phase turbulence flow[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2020,33(03):1057-1063.
- [67] Sokolichin A, Eigenberger G, Lapin A. Simulation of buoyancy driven bubbly flow: Established simplifications and open questions[J]. AIChE Journal,2004,50(1):24-45.
- [68] 周小超.基于气液两相流理论的型面电解加工多场耦合模型及工艺优化研究[D].合肥工业大学,2019.
- [69] Hinduja S, Kunieda M. Modelling of ECM and EDM processes[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology,2013,62(2):775-797.
- [70] Hotoiu L, Deconinck J. Time-Efficient Simulations of Nano-Pulsed Electrochemical Micro- Machining[J]. Procedia CIRP,2013,6469-474.
- [71] Smets N, Damme S, Wilde D, et al. Time averaged calculations in Pulse Electrochemical Machining, using a strongly non-linear model[J]. Journal of Applied Electrochemistry,2010,40(7):1395-1405.
- [72] 曹培,杨涛,王天琪,等.面向飞机蒙皮的机器人喷涂轨迹规划[J].现代制造工程,2020,(10):72-77.
- [73] 刘霞云,杨勇,姚宇龙.工业机器人轴承座薄壁孔的铣削加工工艺[J].机械制造,2021,59(04):57-59+62.
- [74] 颜红娟,李志永,严凤洁等.涡轮叶片气膜冷却孔电解加工气液两相流场特性分析[J].机床与液压,2019,47(16):148-151.
- [75] 胡宝文,穆瑞元,黄亮等.航空叶片电加工多物理场耦合仿真及实验研究[J].制造技术与机床,2021,(09):43-48.
- [76] 刘为东.TB6 钛合金射流电解加工机理和关键工艺研究[D].天津大学,2020.

攻读学位期间的学术论文目录

(1) 论文发表情况:

- [1] Research on simulation method of multiple time scales dissolution process in tube electrode pulse electrochemical machining[J].Journal of Manufacturing Processes,2024,110318-330. (SCI 已发表, 第二作者, 对应论文第四章)
- [2] Influence of periodic pulse intake on the ventilation efficiency of positive pressure explosion-proof robot. [J].Scientific reports,2024,14(1):1433-1433. (SCI 已发表, 第三作者, 通讯作者)
- [3] Gap control method for electrochemical milling machining under robot trajectory error perturbation [J]. Int J Adv Manuf Technol (SCI 修改已返稿, 第一作者)

(2) 专利发表情况:

- [1] 一种高空履带式吸附爬壁机器人: 中国, ZL 2022 1 0382440.2. 2023-08-18.(发明专利, 授权)
- [2] 工业机器人电解铣削加工间隙控制方法及其加工系统: 中国, 申请号:202311004029.2(发明专利, 实审)
- [3] 一种喷涂机器人正压防爆系统及其防爆方法: 中国, 申请号: CN202310683848.8 (发明专利, 实审)

致 谢

天波易谢，寸暑难留。笔行至此，文已近终。曾经向往的三年研究生生活也快收锣罢鼓，一千多个昼与夜的交织，绘出一幅意义非凡的画卷。接下来的日子，我要带着这幅画卷，披荆斩棘的开始人生下一段旅程。相逢一见太匆匆，校内繁花几度红。

首先感谢我的导师方明副教授，学生不才，恩师无私，在我攻读硕士学位期间，方老师不仅给予了我大力支持和帮助，而且明确了我的研究方向的优势，同时还为我提供了必不可少的设备和支持。能师从方老师，我感到很幸运。祝方老师身体健康,科研顺利.

感谢实验室里的师兄弟夏富生、储徐烽、程旭、候亮亮、王俊龙在学习生活中给予的大力支持。

感谢芜湖埃夫特智能装备股份有限公司提供的实验场地和技术支持，以及机械与汽车工程学院各位老师所提出的宝贵意见与建议，这些宝贵的意见和建议，使我在这篇论文中更上一层楼。

感谢父母养育我多年，让我在衣食无忧的生活中追寻理想和远方。更要感谢我的姥姥，在父母奔波生活的时候给我创造一处欢颜的温暖,祝愿所有关心疼爱我的家人们，万事如意，平安喜乐。

同时也感谢研究生期间支持和帮助过我的朋友们，以及一起聚餐的兄弟们杨、孟、徐、李、方等等，给在安工程的最后岁月留下青春痕迹。

我也要感谢审稿专家在繁忙之余抽出宝贵的时间审阅本论文。

感谢以上所有给予我帮助和支持的人，正是由于他们的帮助和支持，我才能顺利完成硕士学位论文。我将永远铭记他们的支持和帮助，并祝愿他们一切顺利。

尚德敏学 唯实惟新

