

分类号: TP18

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210120148



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 工业机器人磨抛工艺知识自主学
习和可视化研究

论 文 作 者 陈清清

校 内 导 师 许德章 教授

校 外 导 师 李公文 高级工程师

专业学位类别 机 械

研究方向(领域) 智能制造

论文提交日期: 2024 年 6 月 7 日

分类号：TP18

单位代码：10363

密 级：公 开

学 号：2210120148

工业机器人磨抛工艺知识自主学习和可视化研究

Research on Autonomous Learning and Visualization of Industrial Robot Grinding and Polishing Process Knowledge

学生姓名：	陈清清
校内导师：	许德章（教授）
校外导师：	李公文（高级工程师）
专 业：	机械
研究方向：	智能制造

论文答辩日期 2024 年 5 月 24 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：陈清清

日期：2024 年 5 月 25 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：陈清清

指导教师签名：许洪宇

日期：2024 年 5 月 25 日

日期：2024 年 5 月 25 日

工业机器人磨抛工艺知识自主学习和可视化研究

摘要

随着制造业快速发展,自动化生产中工业机器人发挥日益重要的作用。磨抛作为一项重要的工艺技术,对于提高产品表面质量、降低生产成本具有重要意义。然而,传统工业机器人磨抛加工存在着操作复杂、效率低下,加工过程工艺信息传输不及时,工艺知识可视化程度低,磨抛工艺知识呈现“黑箱”特征等问题,制约磨抛工艺发展。本研究以工业机器人磨抛加工为应用场景,运用马尔可夫决策理论、工业物联网、机器学习和可视化等技术,开展工艺数据采集、工艺特征提取、工艺知识定义和数字化、工艺知识运用等方面研究,旨在提高磨抛工艺自主学习、继承、应用和可视化水平。主要研究内容如下。

(1) 磨抛工艺知识数字化表征研究。针对磨抛工艺知识的复杂性,研究知识表征方法,提出一种基于符号和矩阵表示磨抛工艺知识表示的方法,探索了如何有效表达磨抛关键工艺参数、工艺流程等方法。通过分析磨粒与工件干涉机理,构建基于 Preston 方程的材料去除修正模型和磨抛轨迹模型,为研究磨抛轨迹自主规划奠定理论基础。

(2) 融合强化学习的磨抛轨迹规划。融合强化学习(Reinforcement learning,RL)方法,提出一种基于完整覆盖路径规划(Complete Coverage Path Planning,CCPP)的磨抛轨迹规划方法,该方法使用 Actor Critic With Experience Replay(ACER)算法训练具有长短期记忆(LSTM)层的卷积神经网络(Convolutional Neural Network,CNN),在预训练的环境中生成路径,实现工业机器人磨抛轨迹自主规划。

(3) 基于知识图谱的磨抛工艺知识可视化。进一步研究基于知识图谱实现磨抛工艺知识的可视化方法。设计磨抛工艺知识图谱的结构和图谱可视化框架;定义磨抛工艺知识图谱模式层的内容为实体概念层、关系层、属性层、规则层和实例层;通过知识抽取、知识融合和知识存储等技术构建磨抛工艺知识图谱的数据层;最后基于 Neo4j 构建磨抛工艺知识图谱,选择某碳化硅晶片磨抛加工实例,验证知识图谱可视化方法。

(4) 基于 Unity 3D 的磨抛工艺知识可视化系统。选择 Unity 3D 开发平台,设计磨抛工艺知识可视化系统。系统结合磨抛工艺知识图谱与三维可视化技术,利用 UI 界面多方位可视化功能,呈现了磨抛加工过程的工艺知识信息,为操作人员学习和管理磨抛工艺知识,提供自然、高效的人机交互方式。

综上所述，本研究探讨了工业机器人磨抛工艺知识数字化表征；融合强化学习的CCPP方法在磨抛工艺中应用，实现了磨抛轨迹自主规划；结合知识图谱和三维可视化技术构建了磨抛工艺知识可视化系统。提升了工业机器人磨抛加工过程智能化水平，改进了磨抛行业知识管理方法，具有重要的学术和工程应用价值。

关键词：磨抛工艺知识，机器人，轨迹规划，知识图谱，可视化

Research on Autonomous Learning and Visualization of Industrial Robot Grinding and Polishing Process Knowledge

ABSTRACT

With the rapid development of the manufacturing industry, industrial robots play an increasingly important role in automated production. As a critical manufacturing technology, grinding and polishing are of great significant for improving product surface quality and reducing production costs. However, traditional industrial robot grinding and polishing processes suffer from issues such as complex operations, low efficiency, delayed transmission of process information, low visualization of process knowledge, and a "black box" nature, which hinder the development of grinding and polishing processes.

This study focusing on the application of industrial robot grinding and polishing operations, employing Markov decision theory, industrial Internet of Things, machine learning, and visualization technologies to conduct research on aspects such as process data acquisition, process feature extraction, digitalization and definition of process knowledge, and utilization of process knowledge, aiming to improve the level of autonomous learning, inheritance, application, and visualization of grinding and polishing processes. The main research contents are as follows.

(1) Research on digital representation of grinding and polishing process knowledge. Considering the complexity of grinding and polishing process knowledge, research is conducted on knowledge representation methods, proposing a method based on symbolic and matrix representation for representing grinding and polishing process knowledge. The effective expression of key grinding and polishing parameters and process flow methods is explored. By analyzing the interference mechanism between abrasive particles and workpieces, models based on the Preston equation for material removal correction and grinding and polishing trajectory are constructed, laying the theoretical foundation for autonomous studying grinding and polishing trajectory planning.

(2) Integration of reinforcement learning into grinding and polishing trajectory planning. A grinding and polishing trajectory planning method based on Complete Coverage Path Planning (CCPP) is proposed by integrating reinforcement learning (RL) methods. This

method utilizes the Actor Critic With Experience Replay (ACER) algorithm to train a Convolutional Neural Network (CNN) with Long Short-Term Memory (LSTM) layers, generating paths in a pre-trained environment, achieving trajectory planning for industrial robots in the grinding and polishing process.

(3) Visualization of grinding and polishing process knowledge based on knowledge graphs. Further research is conducted on methods for visualizing grinding and polishing process knowledge based on knowledge graphs. Design the structure and visualization framework of the grinding and polishing process knowledge graph, define the content of the knowledge graph model layer as entity concept layer, relationship layer, attribute layer, rule layer, and instance layer. Through technologies such as knowledge extraction, knowledge fusion, and knowledge storage, we construct the data layer of the grinding and polishing process knowledge graph. Finally, a grinding and polishing process knowledge graph is built based on Neo4j, and the visualization method is validated using an example of grinding and polishing processing of a silicon carbide wafer.

(4) Grinding and polishing process knowledge visualization system based on Unity 3D. The Unity 3D development platform is chosen to design a grinding and polishing process knowledge visualization system. The system combines grinding and polishing process knowledge graphs with three-dimensional visualization technology, utilizing multi-faceted visualization features of the UI interface to present process knowledge information during grinding and polishing, providing a natural and efficient human-computer interaction method for operators to learn and manage grinding and polishing process knowledge.

In summary, this study explores the digital representation of industrial robot grinding and polishing process knowledge; applies the CCPP method integrated with reinforcement learning to grinding and polishing processes, achieving autonomous planning of grinding and polishing trajectories; and constructs a grinding and polishing process knowledge visualization system combining knowledge graphs and three-dimensional visualization technology. It enhances the intelligence level of the industrial robot grinding and polishing process, improves knowledge management methods in the grinding and polishing industry, and has important academic and engineering application value.

Author: Chen Qingqing (School of Mechanical Engineering ,Anhui Polytechnic University)

Supervised by: Xu Dezhang

KEY WORDS: Grinding and polishing process knowledge, robotics, trajectory planning, knowledge graph, visualization

目录

摘要.....	I
目录.....	V
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 工业机器人磨抛加工研究现状.....	3
1.2.2 机器人磨抛轨迹规划研究现状.....	4
1.2.3 磨抛工艺知识可视化研究现状.....	5
1.3 研究内容和论文结构.....	6
1.3.1 研究内容.....	6
1.3.2 论文结构.....	7
第 2 章 磨抛工艺知识数字化表征研究.....	8
2.1 磨抛工艺知识表征方法.....	8
2.1.1 磨抛原理.....	8
2.1.2 磨抛工艺数字化表征.....	9
2.1.3 磨抛工艺矩阵化.....	10
2.1.4 机器人磨抛过程表示.....	12
2.2 磨粒与工件干涉机理分析.....	14
2.3 基于 Preston 方程的材料去除模型.....	15
2.3.1 磨抛接触区域分析.....	15
2.3.2 材料去除修正模型建立.....	16
2.4 基于 Hertz 弹性理论的轨迹模型.....	17
2.4.1 磨抛轨迹模型建立.....	17
2.4.2 磨抛轨迹表示评估.....	18
2.5 本章小结.....	19
第 3 章 融合强化学习的机器人磨抛轨迹规划.....	21
3.1 磨抛轨迹规划方法.....	21
3.1.1 马尔可夫决策过程.....	21
3.1.2 MDP 最优策略.....	22
3.1.3 磨抛轨迹规划策略.....	25
3.2 基于 CCPP 的磨抛轨迹规划.....	27
3.2.1 CCPP 算法原理解析.....	27
3.2.2 状态空间定义.....	28
3.2.3 动作空间定义.....	30
3.2.4 奖励函数设计.....	31
3.3 基于网格的表示建模.....	31
3.3.1 网格分解策略.....	31
3.3.2 贪婪策略搜索.....	32
3.3 磨抛轨迹规划决策网络.....	33
3.3.1 Actor-Critic 决策网络模型.....	33
3.3.2 ACER 训练网络.....	35

3.3.3 Loss 优化.....	36
3.4 仿真实验与结果分析.....	36
3.4.1 磨抛实验设置.....	36
3.4.2 仿真环境设置.....	37
3.4.3 实验结果及分析.....	38
3.5 本章小结.....	40
第 4 章 基于知识图谱的磨抛工艺知识可视化.....	42
4.1 磨抛工艺知识图谱构建.....	42
4.1.1 磨抛工艺知识图谱结构设计.....	42
4.1.2 磨抛工艺知识图谱可视化框架.....	43
4.2 磨抛工艺知识图谱模式层构建.....	44
4.2.1 磨抛工艺知识图谱模式层结构.....	44
4.2.2 磨抛工艺知识图谱模式层内容.....	46
4.3 磨抛工艺知识图谱数据层构建.....	47
4.3.1 基于 Bi-LSTM-CRF 模型的命名实体识别.....	47
4.3.2 基于 Attention-Bi-LSTM 模型的关系抽取.....	50
4.3.3 基于规则匹配方法的属性抽取.....	52
4.3.4 磨抛工艺知识融合.....	53
4.4 磨抛工艺知识存储.....	55
4.4.1 RDF 存储.....	55
4.4.2 Neo4j 存储.....	55
4.5 基于 Neo4j 的磨抛工艺知识图谱可视化.....	56
4.5.1 磨抛工艺知识获取.....	56
4.5.2 实体和关系标签创建.....	57
4.5.3 磨抛工艺知识图谱可视化.....	58
4.6 本章小结.....	59
第 5 章 基于 Unity3D 的磨抛工艺知识可视化系统.....	60
5.1 可视化实现相关技术.....	60
5.1.1 KG 技术.....	60
5.1.2 三维可视化技术.....	60
5.1.3 KG 与可视化系统的通讯方法.....	62
5.1.4 基于 OPC UA 的设备间通讯.....	62
5.2 可视化系统总体设计.....	63
5.2.1 系统框架设计.....	63
5.2.2 系统功能实现.....	64
5.2.3 系统环境设置.....	65
5.3 可视化系统实现.....	66
5.3.1 系统首页功能定义.....	66
5.3.2 用户账号管理界面.....	67
5.3.3 磨抛工艺知识可视化.....	68
5.3.4 磨抛工艺资源管理可视化.....	71
5.4 本章小结.....	72
第 6 章 总结与展望.....	74
6.1 论文工作总结.....	74

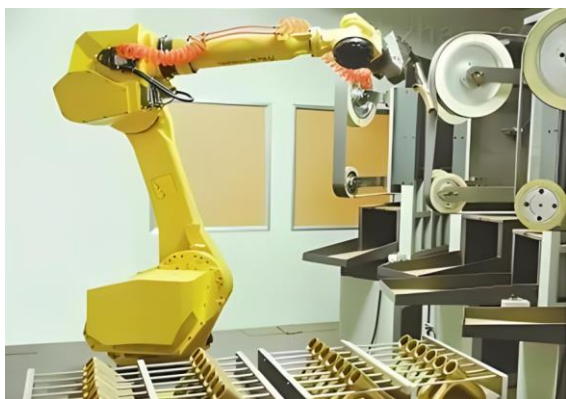
6.2 未来展望	74
参考文献	76
攻读硕士期间发表的学术论文	83
致谢	84

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

在我国提出“制造强国”战略下^[1]，特别是在汽车、航空航天、电子等制造领域，对产品的表面质量和精度要求愈发严苛。磨抛工艺作为制造业中关键的表面处理工序之一，能极大提升产品的表面质量和精度^[2]，受到广泛关注。

传统磨抛加工通常依赖于人工操作，存在生产效率低、一致性差等问题^[3]。随着计算机和信息技术的快速发展和普及，由于机器人的成本效益、高灵活性和多功能性等优点，使用工业机器人代替传统的人工抛光和数控抛光机已成为一个热门的研究课题^[4]。如图 1-1 所示，机器人磨抛加工的应用范围广泛。工业机器人的介入不仅提升了生产效率和产品质量，更为制造业的自动化发展和高效生产注入了新的活力。



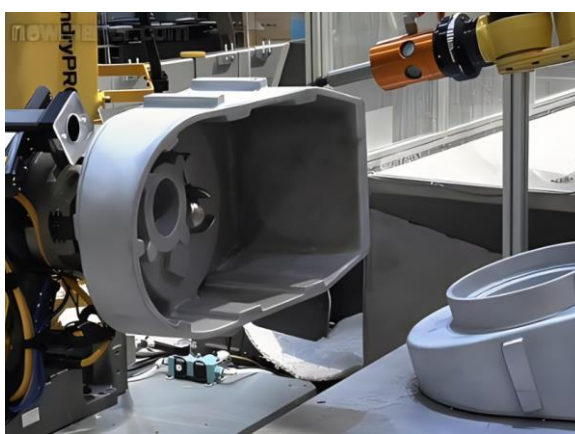
(1) 五金工件磨抛



(2) 汽车外壳磨抛



(3) 柔性磨抛加工



(4) 大型铸件飞边磨抛

图 1-1 机器人磨抛加工应用

一方面，随着制造业向着智能化、数字化和网络化的方向迅速发展^[5-6]，知识驱动

的生产优化成为制造业的重要趋势。磨抛工艺作为制造过程中的重要一环，加工过程包含了磨抛力学参数、控制方法等丰富知识。此背景下，如何充分利用机器人磨抛加工产生的工艺数据，结合机器学习技术，实现磨抛过程的智能化控制与优化已成为一个重要的研究课题^[7]。研究过程中，强化学习技术被引入^[8]，以强化机器对复杂磨抛工艺知识的理解和学习能力，提高企业和工厂的生产效率，为人工智能的快速发展提供有力支持。

机器人智能化学习磨抛工艺过程，可以逐步掌握磨抛加工过程中的工艺知识，减少人为干预，从而提高生产效率和生产质量。此外，工业机器人通过不断自主学习还可以提高自身的智能化水平，在未来的生产过程中提供更多的应用场景和机会。

另一方面，随着工艺技术的不断创新，磨抛行业的众多企业在多年的生产实践中积累了丰富的工艺知识，但这些宝贵的知识大多仍散落在工艺人员的头脑和纸质文件中，难以形成系统性应用^[9]。在当今社会全面踏入知识经济时代的背景下，知识的重要性愈加明显。依托于信息化、网络化教育环境的蓬勃发展，知识可视化的重要性愈发凸显^[10-11]。此背景下，本研究致力于解决知识呈现的瓶颈问题，通过引入可视化技术^[12]，以直观、形象的方式展现复杂的磨抛工艺知识。这不仅提高了磨抛工艺信息的传播效率，更为工艺人员提供了直观、深入地了解磨抛工艺知识的途径。知识可视化技术的应用能够将抽象的知识信息以图形、图表等形式呈现，揭示了知识信息之间的关联，帮助工艺人员迅速发现和掌握关键知识，更有效地利用知识。

磨抛工艺知识的可视化实现可以为工艺人员提供培训和指导，通过可视化磨削和抛光过程的主要技术点以及操作要领，工艺人员可以更直观、清晰地了解磨抛过程的各种信息和数据。工艺人员可以更直观地学习磨抛工艺技术要领，掌握正确的工作技能。通过可视化技术，工艺人员可以随时了解磨抛生产过程中的异常和变化，从而提高自己的技能水平和工作效率。

综上所述，本研究致力于工业机器人磨抛应用场景，旨在深入研究磨削和抛光过程的自主学习和可视化工艺知识。这不仅能提高工业机器人的智能化水平，还能促进人机交互呈现效果。它在提高生产效率、产品质量和提升工匠能力方面发挥着重要作用。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 工业机器人磨抛加工研究现状

工业机器人在磨抛加工领域的研究已经取得了显著的进展^[12-13]。随着科技的不断进步，磨抛工艺也在不断演进。最初，磨抛加工主要依赖于传统的手工操作，存在加工效率低、产品质量不稳定、从业人员工作环境恶劣等问题^[14-15]。随着数控技术的发展，传统的数控磨床等设备逐渐被引入，使得磨抛加工的精度和效率得到了提高。然而，这些设备受到加工范围有限、灵活性不足等限制^[16]。近年来，随着工业机器人技术的不断成熟和智能化水平的提高，工业机器人在磨抛加工领域得到了广泛应用。如图 2-1 所示为磨抛行业发展历程。

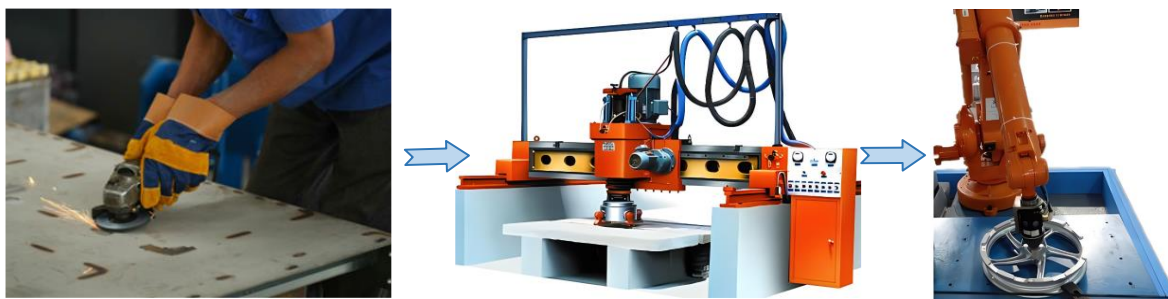


图 1-2 磨抛行业发展历程

工业机器人磨抛加工通常由机器人、磨具、研磨物（如砂带、砂轮等）、工件夹具、控制系统和视觉系统等组成^[17-18]。工业机器人磨抛加工可以通过编程控制机器人的路径和动作，实现磨削、抛光等工艺步骤，实现全自动或半自动化过程。工业机器人可以根据不同工件的形状、尺寸和要求灵活调整位姿，适应不同的磨抛作业需求。工业机器人磨抛作业具有广泛的应用领域，包括制造业、光学工业、3D 打印后处理、建筑施工等。通过自动化和智能化的手段，实现了磨削和抛光等工艺步骤的高效、精确和可重复执行，提高了产品质量和生产效率。

研究人员不断探索机器人视觉、触觉和智能控制等方面的技术^[19-21]，工业机器人在磨抛工艺中的应用变得更加广泛和可行。现代工业机器人不仅能够根据预设的路径和参数执行磨抛任务，还可以通过传感器反馈实时调整姿态和力度，适应不同形状和材料的工件，从而确保产品表面的平整度和光洁度。机器人也能更好地感知工件表面的特征并自主调整加工参数。多轴协作机器人的引入使得复杂曲面的磨抛加工变得更加灵活和高效。同时，加工参数的优化、自适应加工策略的应用以及高精度控制技术的发展，进一步提升了磨抛加工的质量和效率。

工业机器人的应用不仅仅局限于自动化执行磨抛任务，更重要的是与工人之间的协作与互动。现代工业机器人具有越来越智能的特性，可以通过学习算法不断优化自身的操作策略，并与操作人员更加紧密的合作。例如，在磨抛工艺中，机器人可以通过机器学习算法学习工件的特征和加工过程中的最佳操作路径，以实现更高水平的自动化加工^[22]。与此同时，磨抛工艺人员可以监督和指导机器人的操作，及时调整工艺参数，从而保证产品的质量和生产效率。这种人机协作的模式不仅提高了生产效率，还可以减少人力成本和提高工作安全性，是制造业智能化发展的重要方向之一。

综上所述，工业机器人在磨抛工艺中的应用具有重要的意义和发展前景。随着技术的不断进步和制造业智能化需求的提升，工业机器人在磨抛工艺中发挥越来越重要的作用，为制造业的高效生产和智能制造注入更多活力。

1.2.2 机器人磨抛轨迹规划研究现状

在复杂环境中确保机器人能够安全、高效地完成任务，需要规划机器人路径^[23]。同理，磨抛轨迹规划是工业制造领域中的一个重要研究方向，主要用于指导机器人在磨抛过程中的路径规划和控制^[24]。路径规划能够帮助机器人避开障碍物、选择最优路径，提高任务执行效率，同时保证设备安全和任务顺利完成。以下是该领域的一些研究现状。

关于机器人路径规划，研究者们致力于开发高效的路径规划算法，在复杂的工件表面上生成平滑且有效的磨抛路径。这些算法包括基于几何学的方法^[25]、进化算法^[26]、机器学习^[27]等。在机器人路径规划方面，彭建文等人提出七次多项式插值算法，增强了规划路径的平滑性^[28]；蒋承杰等提出一种改进 A*算法缩短了路径规划时间^[29]；王建坤等基于启发式学习预测机器人路径规划^[30]；吴雷等人提出一种改进粒子群算法的路径优化方法^[31]；王萍等提出一种提出了一种 RSS_GN RRT 算法，提升规划速度和改善路径质量^[32]；在磨抛机器人路径规划中，王逸潇等针对复杂轮毂曲面，提出了轮毂力控磨抛路径规划方法^[33]；任利娟等针对叶片抛磨机器人系统研究了复杂曲面柔性轨迹规划方法^[34]；胡建玥设计一种自由曲面磨抛轨迹自动生成方法^[35]等。

近些年来，强化学习的加入提升了机器人路径规划的效率。Changxi 等提出将强化学习用于自动驾驶汽车的轨迹规划^[36]；Kenzo 等使用 DDPG 强化学习算法规划足球比赛中双足机器人的运动^[37]；Farad 等通过 Actor-Critic 强化学习模型为未知环境中的高效探索提供了一条路径^[38]；Aleksandr 等^[39]、Amit 等^[40]和 Soong 等^[41]提出了一种使用 Q Learning 训练的模型，分解基于网格的环境下生成从 A 点到 B 点的路径；David 等人

将这种方法扩展到多机器人系统^[42]；梅泽伟等提出了一种基于 DQN 的航天飞行器轨迹规划方法，提升了航天飞行器的横向避障能力^[43]等。

随着机器人智能化发展，强化学习主要依赖于环境和动作之间的互动，在这个过程中建立奖励机制，持续更新学习模型。然而，强化学习一直用于机器人路径规划，通常标准路径规划算法侧重于机器人从起点到目标的轨迹规划^[44]，所有工作重点都集中在从 A 点到 B 点的轨迹生成的简单任务上，而没有讨论覆盖表面。本研究依据以上内容，研究机器人磨抛加工生成最佳轨迹和形状集以覆盖整个工件表面。

本文提出了一种基于 CCPP 算法的强化学习训练的磨抛轨迹规划方法^[45]，该方法不仅能够实时确定有效的轨迹，提高磨抛效率，还通过最小化形状更改的数量，最大限度地使用单个形状来生成更有效的路径。该算法模型具有高度通用性，可适应未知环境。CCPP 算法可以运用分解位置策略广泛分组^[46]。本文使用了 Moravec 和 Elfes^[47]以及 Choset^[48]提出的基于网格分解的方法表示环境。能量感知算法^[49]、神经网络^[50]和生成树^[51]几种算法可使用网格策略实现环境分区，基于网格分解大大降低了确定覆盖路径计算的复杂性，方便磨抛轨迹规划计算。

1.2.3 磨抛工艺知识可视化研究现状

伴随着当今社会全面踏入知识经济时代^[52]，知识的重要性得到了普遍性的重视，依托于信息化、网络化教育的环境下，知识可视化重要性不言而喻^[53]。

在工业制造过程中伴随着工艺知识的积累，工艺知识由包括产品信息、工业设备和工艺过程等工业制造过程中涉及的相关资源信息组成，它已成为企业核心竞争力的一部分^[54]，当前制造企业对工艺知识的管理愈发重视。

磨抛加工过程中工艺知识复杂多样，导致在工艺设计时，主要还是依赖于工艺人员的生产经验^[55]。随着工业制造中工艺技术的不断发展，工艺知识量增加导致了信息超载和认知迷航等问题^[56]。随着信息技术和多媒体的迅猛发展，可视化技术适当地利用视觉信息可以获得更好的知识传播效果。从文字到图像、从二维到三维空间，利用可视化技术可将抽象复杂的知识转化为形象易于被认知接受的视觉图像，能够揭示信息之间的关联，使学习者有效地利用信息、发现知识。因此，实现磨抛工艺知识可视化有利于从事磨抛行业工艺人员直观学习磨抛知识^[57-59]。

磨抛加工是工业制造领域的关键环节之一，工艺过程信息复杂且数量庞大，需要及时收集、处理和分析，并呈现给用户。传统制造可视化方式多为工艺过程看板、二维化数据报表或手机客户端查询等^[60-61]，用户难以直观理解和管控。磨抛工艺涉及到

大量的知识和技术，为了有效地管理和利用这些知识，亟须研究工业制造领域面向工艺过程的工艺知识可视化问题。

为解决这一问题，国内外众多学者展开工艺过程可视化技术的研究。如 WoWoo-Jae 等人通过可视化网络数据搭建看板监测系统，监控生产操作过程^[62]；赵浩然提出三维可视化的监控模式和数字孪生车间的数据管理^[63]；冯浩等基于虚拟仪器设计实时观测机器人三维姿态的可视化系统^[64]；洪辉武基于 B/S(Browser/Server)架构设计出工业机器人远程监控平台^[65]；朱安庆等人建立了船舶分段建造可视化系统，提出孪生数据驱动的分段建造管理体系和数据存储管理方法^[66]；陈琥等人构建航天测控任务三维空间可视化平台，实现了航天测控任务三维场景显示^[67]；廖帅等提出基于知识图谱可视化分析 CNKI 期刊数据库^[68]；李亚宁等基于知识图谱可视化研究监测碳排放^[69]。上述研究已取得一定成果，但仍存在可视化效果不佳，用户对工艺过程理解困难等问题^[70-72]。

根据上述内容，鉴于生产过程中存在可视化内容和功能较为单一，用户对工艺知识理解困难的问题，本研究面向磨抛工艺过程的知识可视化，通过结合知识图谱^[73]和三维可视化技术^[74]，运用 Unity 3D 构建磨抛工艺知识可视化系统，耦合磨抛工艺过程与工艺知识，提高磨抛工艺知识的利用率，进而提高磨抛行业生产效率和产品质量，促进智能化发展。本研究致力于实现磨抛工艺知识可视呈现，帮助工艺人员直观有效地学习和利用工艺过程关键信息。

1.3 研究内容和论文结构

1.3.1 研究内容

针对工业机器人磨抛工艺知识自主学习和可视化课题，本文主要研究内容如下。

(1) 研究磨抛工艺知识表征方法，分析磨抛过程原理和磨抛加工机理知识，利用符号参数和矩阵结合数字化表征磨抛工艺知识，建立材料去除模型、规划、评估磨抛轨迹。

(2) 研究机器人磨抛轨迹规划，融合 MDP 的 RL 方法，提出一种基于 CCPP 的磨抛轨迹规划策略。通过仿真实验，验证磨抛轨迹规划完整覆盖实现，分析实验结果。

(3) 研究基于知识图谱的磨抛工艺知识可视化，根据知识图谱构建的方法和可视化实现框架，构建了磨抛工艺知识图谱的模式层和数据层。通过实例验证构建的磨抛工艺知识图谱可视化。

(4) 构建磨抛工艺知识可视化系统, 利用知识图谱技术和三维可视化技术, 搭建磨抛工艺知识的可视化系统。根据系统功能需求设计可视化系统的框架, 完成功能编程实现及环境设置。

1.3.2 论文结构

论文结构主要包括以下几个章节。

第一章 绪论。首先阐述了工业机器人磨抛工艺知识自主学习和可视化研究的背景和意义。然后, 综述和分析研究方向的国内外研究现状, 介绍前人的研究成果和研究动态, 发现研究的问题、目标和解决方法。

第二章 磨抛工艺知识数字化表征研究。根据磨抛过程原理, 数字化表征磨抛工艺知识。分析了弹性磨具磨粒与工件干涉机理, 建立了基于 Preston 方程的材料去除模型, 以及基于 Hertz 弹性理论的磨抛轨迹模型。

第三章 融合强化学习的机器人磨抛轨迹规划。融合 MDP 的 RL 方法, 提出一种基于 CCPP 的磨抛轨迹规划策略。根据解析 CCPP 算法原理, 定义磨抛轨迹规划中的状态空间、行为空间和奖励函数, 在网格分解和贪婪策略下, 训练决策网络模型。最后实验验证磨抛轨迹规划方法, 分析实验结果。

第四章 基于知识图谱的磨抛工艺知识可视化。设计了磨抛工艺知识图谱的结构和图谱可视化框架。定义磨抛工艺知识图谱模式层的内容为实体概念层、关系层、属性层、规则层和实例层。通过知识抽取、知识融合和知识存储等技术构建磨抛工艺知识图谱的数据层。最后运用 Neo4j 构建磨抛工艺知识图谱, 利用某碳化硅晶片磨抛加工实例验证了图谱可视化方法。

第五章 基于 Unity3D 的磨抛工艺知识可视化系统。首先分析了磨抛工艺知识可视化系统构建需要知识图谱和三维可视化技术, 然后完成系统总体设计, 包括系统框架、功能设计以及环境设置。然后运用 Unity3D 开发磨抛工艺知识可视化系统的界面, 最后展示系统可视化界面。

第六章 总结与展望。归纳和总结了工艺知识表示方法、磨抛轨迹规划、基于知识图谱的磨抛工艺知识可视化和磨抛工艺知识可视化系统构建等工作内容。分析不足, 展望下一步研究, 并提出深入研究建议。

第2章 磨抛工艺知识数字化表征研究

2.1 磨抛工艺知识表征方法

2.1.1 磨抛原理

磨抛加工指使用砂轮、油石、磨头和砂带等磨料、磨具的切削作用去除工件表面多余层，使工件表面质量达到预定要求的加工方法。采用弹性基体软固结磨料磨具加工时，软固结磨粒首先以二体磨损形式磨削，随后部分磨粒脱落转化为游离磨粒，以三体磨损形式完成抛光。这种同时存在二体磨损和三体磨损的加工过程称为磨抛加工[75]。

(1) 磨抛过程

根据砂轮形状与工件砂轮运动关系的不同，磨抛作业有许多不同的加工形式。常见的一些磨抛加工方式如平面、外曲面和内曲面等磨抛加工方式，如图 2-1 所示。此外，其他复杂形状的磨抛需要应用复杂的磨抛工艺。

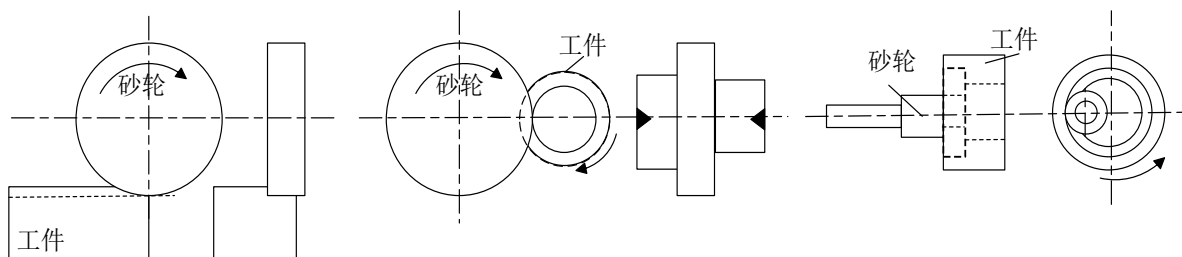


图 2-1 磨抛加工方式

(2) 磨抛原理

研究以弹性磨具基体与工件接触，进一步揭示工件材料的形变和磨削特性^[76-77]。在机器人磨抛工件表面过程中，弹性磨具收到挤压变形，压缩量为 d ，此时磨具与工件的接触会形成磨抛接触面，在接触面上，收到压力和磨削抛光速度的影响，磨具磨削工件表面材料。磨具基体、磨粒和工件材料相互作用的受力分布如图 2-2 所示。

由图可得，在磨抛加工过程中，当弹性磨具基体向工件施加法向力 F_n 时，磨粒磨削工件表面，形成磨抛轨迹的接触轮廓。

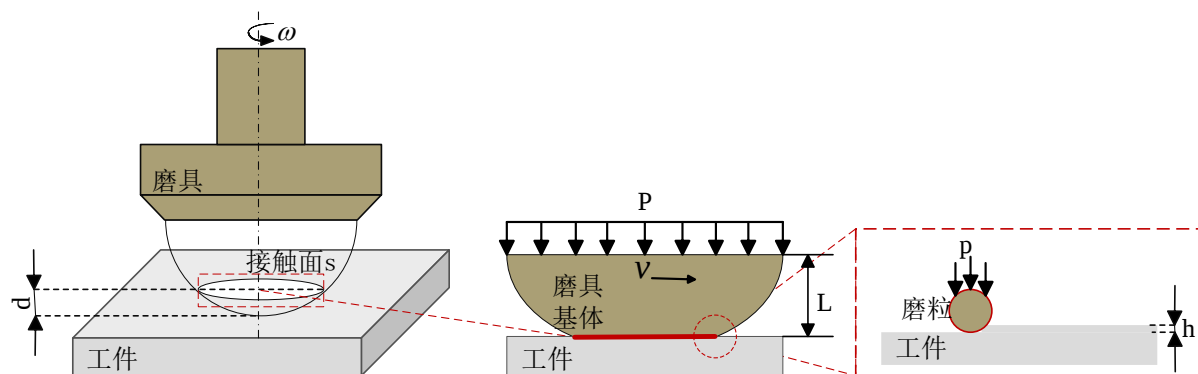


图 2-2 弹性磨具与工件表面接触作用

计算 F_n 的公式如下。

$$F_n = ps \quad (2-1)$$

其中， p 表示磨抛接触压力； s 表示弹性磨具在磨抛接触区域的投影面积。

2.1.2 磨抛工艺数字化表征

为了方便工业机器人对磨抛工艺智能理解和优化，采用磨抛工艺知识符号化、数字化表示的方式，将其分为状态、行为和参数三个要素，并采用多维度表达的方式分类和分层表达。磨抛工艺的状态表示可以包括当前工件的表面状态、磨料的位置、磨粒的密度分布等信息；磨抛工艺的行为表示在特定状态下可以采取的操作或动作，如调整工艺参数、改变磨料位置或调整磨料形状等；参数是磨抛工艺包含的关键参数及其数值。此外，可以类比与磨抛数控机床的一些编写程序语言，设置磨抛工艺参数的符号如表 2-1 所示。

表 2-1 磨抛工艺表示符号定义

磨抛轨迹	符号表示	磨抛参数	符号表示	单位
线形	L	磨粒目数	M	mm
弧形	C	进给速度	V	(mm / s)
		转速	W	(r / min)
		接触压力	F	N
		表面粗糙度	R	mm
		磨削量	H	μm
		磨抛时间	T	s
		加工质量	Q	
		磨抛进动角	α	$(^\circ)$

此外，磨抛加工过程的具体参数值可用数字和国标单位表示。根据以上内容，基于符号数字化表示磨抛工艺知识，如下式所示。

$$\{L \ M200 \ V3 \ W600 \ F6 \ T120\} \quad (2-2)$$

式(2-2)表示直线磨抛时磨头磨粒目数 200，进给速度 3mm/s，转速 600r/min，接触压力 6N，磨抛时间 120s。

通过符号化向量定义磨抛工艺的特征参数，为接下来磨抛工艺矩阵化表示奠定基础，便于磨抛工艺数字化表示和计算。

2.1.3 磨抛工艺矩阵化

磨抛工艺参数可表示为矩阵形式，通过预处理数据，再分类对应转化为属性、约束矩阵和相似度矩阵。其中，属性矩阵表示磨抛工艺中各种属性之间的约束关系；约束矩阵表示属性矩阵中各个属性之间的约束强度；相似度矩阵则表示不同磨抛工艺间的相似程度。

(1) 属性矩阵

属性矩阵表示方法即利用矩阵的行代表磨抛工艺参数样本，利用矩阵的列代表属性值。例如，当考虑磨抛工艺的磨抛接触力、磨抛速度、磨粒目数和表面粗糙度四个参数，则可以将其表示为如下的属性矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} f_1 & v_1 & m_1 & r_1 \\ f_2 & v_2 & m_2 & r_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_n & v_n & m_n & r_n \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

其中， f_i, v_i, m_i, r_i 分别表示第 i 个样本的磨抛接触力、磨抛速度、磨粒目数和表面粗糙度。

(2) 约束矩阵

将磨抛工艺的约束条件表示为矩阵形式。约束矩阵是一个二维矩阵，其中行代表约束条件，列代表磨抛工艺的属性。每个元素表示该约束条件对该属性的限制程度。例如，当磨抛工艺的约束条件为表面粗糙度要小于等于一定值时，磨抛接触力要在一定范围内波动，磨抛速度要大于等于一定值，则可以将其表示成如下式的约束矩阵。

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

根据约束矩阵 C ，可以得到如表 2-2 所示的内容。

表 2-2 约束矩阵表示

约束条件	属性 1(r)	属性 2(f)	属性 3(v)	属性 4($other$)
约束条件 1	0	0	0	1
约束条件 2	0	1	0	0
约束条件 2	1	0	1	0

其中, 属性 1 代表表面粗糙度, 属性 2 代表磨抛力, 属性 3 代表磨抛速度, 属性 4 代表其他属性。这个约束矩阵表示了三个约束条件: 第一个约束条件要求磨抛工艺的属性 4 必须大于等于一定值; 第二个约束条件要求磨抛工艺的属性 2 必须在一定范围内波动, 并且属性 4 必须大于等于一定值; 第三个约束条件要求磨抛工艺的属性 1 必须小于等于一定值, 属性 3 必须大于等于一定值, 属性 4 不能受到任何限制。

以表面粗糙度要求为例, 如果要求表面粗糙度要小于等于一定值, 则可以将其表示为如下式(2-4)的约束矩阵。

$$C_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} R_{\max} \\ R_{\max} \\ \vdots \\ R_{\max} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

其中, C_r 表示表面粗糙度的约束矩阵, r_i 表示第 i 个零件的表面粗糙度, $R_{\max}$ 表示允许的最大表面粗糙度。同理, 磨抛力和磨抛速度的约束矩阵可以用同方法表示。

此外, 在一些特定条件下的磨抛工艺通常会有一些约束条件, 如表面粗糙度、磨抛力、磨抛速度等要求满足一定的数值范围。矩阵化表示磨抛工艺约束条件, 可以很方便地将磨抛工艺的约束条件融入到矩阵表示方法中, 从而更准确地表示磨抛工艺的特征。

(3) 相似度矩阵

相似度矩阵可以采用余弦相似度或欧式距离等方法计算不同磨抛工艺之间的相似度。研究采用加权余弦的方法计算两个磨抛工艺之间的相似度。

使用加权余弦相似度方法时, 先分别计算属性矩阵 A 和约束矩阵 C 的加权矩阵 A_w 和 C_w , 其中权重矩阵 W 的每个元素表示该属性或约束对相似度贡献的权重。计算公式如下所示, 得到一个 $n \times n$ 的相似度矩阵 $S_{i,j}$ 。 $S_{i,j}$ 表示第 i 个磨抛工艺和第 j 个磨抛工艺之间的相似度。

$$S_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n W_k A_{w,k,i} A_{w,k,j}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n W_k A_{w,k,i}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n W_k A_{w,k,j}^2}} \times \frac{\sum_{k=1}^m W_k C_{w,k,i} C_{w,k,j}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m W_k C_{w,k,i}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^m W_k C_{w,k,j}^2}} \quad (2-6)$$

其中， n 和 m 分别表示属性矩阵和约束矩阵的维度， W_k 表示第 k 个属性或约束的权重， $A_{w,k,i}$ 和 $A_{w,k,j}$ 表示第 i 个和第 j 个磨抛工艺的第 k 个属性的加权值， $C_{w,k,i}$ 和 $C_{w,k,j}$ 表示第 i 个和第 j 个磨抛工艺的第 k 个约束的加权值。

当磨抛工艺数字化表征为高维矩阵时，需要通过降维处理，以便更好地研究分析磨抛工艺之间的关系。可以采用主成分分析(PCA)法等降维算法处理，得到低维的磨抛工艺矩阵。然后，特征矩阵、属性约束矩阵和相似度矩阵加权运算，得到最终的磨抛工艺表征矩阵。

综上所述，研究提出了一种基于矩阵数字化表征磨抛工艺知识的方法。该方法将磨抛工艺知识表示成属性矩阵、约束矩阵和相似度矩阵三种矩阵，从而更加准确地描述磨抛工艺间的特征和关系。

2.1.4 机器人磨抛过程表示

磨抛加工使用的六轴机器人，如图 2-3 所示。



图 2-3 六轴机器人

在机器人磨抛加工过程，根据机器人运动学研究机器人位置和姿态，根据加工环境的不同，建立合适的机器人坐标系，基于笛卡尔直角坐标系，分别建立了如图 2-4 所示各坐标系。机器人磨抛加工，主要控制末端执行器(磨头)在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴运动。

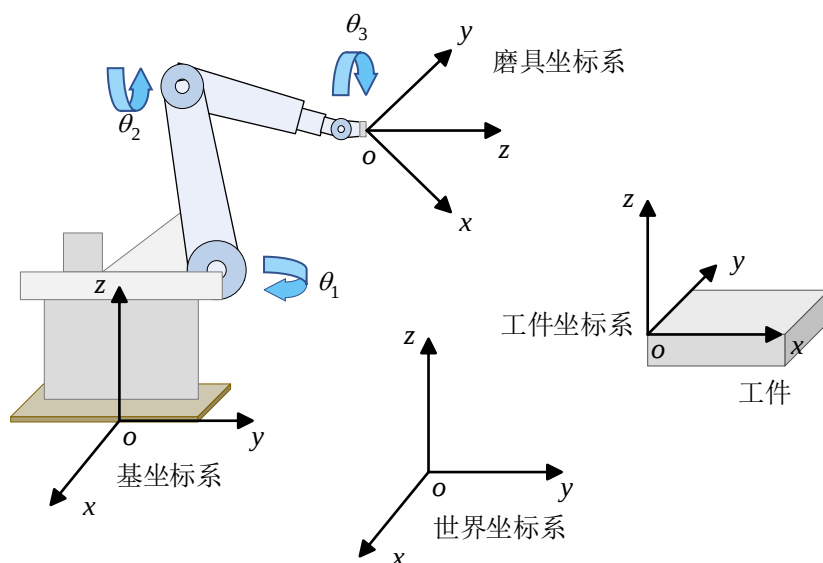


图 2-4 机器人各坐标系示意图

假设磨抛机器人执行磨抛加工时，使用欧拉角表示磨头的位姿(位姿变量和关节变量)，用笛卡尔坐标表示磨头位置，即使用一个 4×4 的变换矩阵 T 来表示磨头的位姿。如式(2-7)所示，磨头位姿矩阵前三列表示机械臂间的旋转矩阵，最后一列表示磨头位移向量。

$$T = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

其中， R_{ij} 表示旋转矩阵中的元素， P_x 、 P_y 、 P_z 表示磨头相对于基坐标系下的位移向量。通过使用符号和矩阵的方法表示磨头在空间中的位姿，方便接下来进一步的计算和处理。

当涉及到复杂的磨抛工艺过程时，也可以通过矩阵表示整个磨抛轨迹中磨头连续变换的位姿和坐标。这种表示方式可称为轨迹规划矩阵 (Trajectory Planning Matrix)。

假设某一磨抛过程完成的磨抛轨迹中，工件表面包含多个磨头轨迹点，每个轨迹点磨头在空间中的位置和姿态都不相同。则可以按照工艺顺序，将每个磨头路径点的位姿表示为一个 4×4 的变换矩阵，然后将这些矩阵组合成一个大的矩阵，表示整个磨抛工艺过程中磨头的运动轨迹。

假设一个磨抛工艺过程中磨头路径包含 n 个路径点，分别用 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ 来表示各个轨迹点的位姿矩阵，那么整个磨抛加工过程的轨迹规划矩阵可以用如下表示。

$$M = T_1 \times T_2 \times T_3 \times \dots \times T_n \quad (2-8)$$

其中, $\times$ 表示矩阵的乘法, 即表示磨头的位姿矩阵的连续变换。同理, 在多机协同作业中, 包含多个磨头位姿的磨抛轨迹规划矩阵也可以这样表示。

2.2 磨粒与工件干涉机理分析

磨抛工件表面是一个复杂的形成过程, 该过程需要大量随机分布的磨料颗粒进行相当大的刮擦。下列通常分析单颗磨料刮擦过程, 简化说明磨抛过程中磨料颗粒和工件之间的相互干涉作用^[78]。

磨抛过程有三段磨粒与工件表面相互作用的过程, 即滑擦、耕犁和切削, 如图 2-5 所示。作用过程随着磨粒切入工件后 a_g (磨粒的切削深度), 由 0 增大到 $a_{g\max}$ (最大未变形切屑厚度), 然后 a_g 逐渐减小到磨粒切出工件表面^[79]。作用过程表明了磨抛过程磨粒与工件表面在不同磨抛阶段的相互作用与磨削时的切屑厚度有关。其中, 能产生切削作用的最小切入量表示为临界切削厚度, 它与工件材料、磨抛加工速度和磨粒磨刃状态等因素有关, 而与磨粒种类无关。

根据塑性堆积和材料断裂去除机理^[80], 可得以下结论。

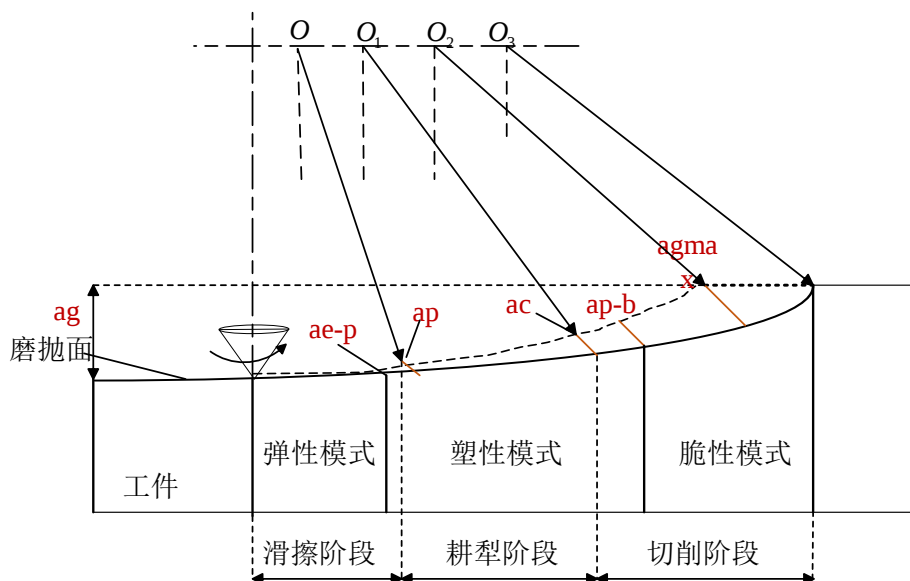


图 2-5 磨抛过程磨粒与工件表面相互作用过程

(1) 当磨粒的切屑厚度 $a_g < a_{e-p}$ (弹塑性转变的临界切屑厚度) 时, 工件材料处于弹性摩擦模式; 当磨粒的切屑厚度 $a_{e-p} < a_g < a_p$ (犁削状态的临界切屑厚度) 时, 工件材料处于塑性摩擦模式。在磨粒的切屑厚度 $a_g < a_p$ 的情况下, 磨粒处于滑擦阶段, 此阶段由于磨粒切削刃开始接触工件表面, 导致工件发生轻微的弹性变形, 磨粒只在工件表面滑动, 而不切削。

(2)当磨粒的切屑厚度 $a_p < a_g < a_c$ (切削状态的临界切屑厚度)时, 工件材料经历塑性犁削模式。此时磨粒处于耕犁阶段, 该阶段内当磨粒和工件之间的应力超过弹性极限时, 切削刃被压入塑性基体中, 导致工件材料经塑性形变, 被推向磨粒的侧面及前方, 从而在加工表面上形成凹槽。

(3)当磨粒的切屑厚度 $a_c < a_g < a_{p-b}$ (塑性-脆性转变的临界切削厚度)时, 工件材料以塑性模式被磨粒去除; 相反地, 当磨粒的切屑厚度 $a_g > a_{p-b}$ 时, 工件材料以脆性模式被去除。此时磨粒处于切削阶段, 此状态下同时存在塑性堆积和材料断裂去除。当工件材料不能再承受撕裂应力时, 就会形成切屑。该阶段内存在一个临界磨削深度, 促使磨屑生成并切除工件材料。磨粒的切削刃推动工件材料流动, 形成前方隆起和两侧面沟壁, 随后沿切削刃前面滑出。

综上所述, “切削”是整个磨抛过程中去除工件材料最有效的方法。

2.3 基于 Preston 方程的材料去除模型

2.3.1 磨抛接触区域分析

通过分析磨抛过程磨抛接触区域, 了解材料去除模型的建立与磨抛接触时的力和速度有关, 分析磨抛接触区域的应力场和速度场, 可得到如图 2-6 和 2-7 所示的相关结论。

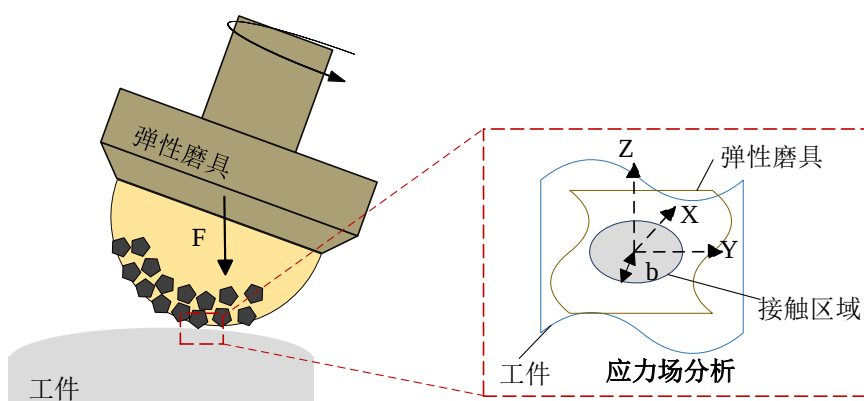


图 2-6 弹性磨具与工件接触区域应力场分析

根据图 2-6, 通过分析弹性磨具与工件接触区域应力场, 由 Hertz 接触理论可以得出, 在椭圆接触区域内应力场分布与接触区域的压力有关, 公式如下。

$$\sigma(x, y) = \frac{3F}{2\pi b^2} \left(1 - \frac{x^2}{b^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-9)$$

根据图 2-7，分析弹性磨具与工件接触区域速度场可得，速度分布与磨具几何尺寸、进动角和转速等因素有关，公式如下。

式中, w 表示磨具的转速, θ 表示磨具磨抛时的进动角大小。

根据著名的 Preston 方程^[81]，建立磨抛工件材料去除率(Material Removal Rate,MRR)模型。即在广泛的数值范围内，材料去除模型可以表示为一个磨抛压力及相对运动速度有关的方程，公式如下。

其中, $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ 表示磨抛点的材料去除量; p 表示接触压力; v 表示进给速度; k 表示

根据公式(2-11)可知,在磨抛加工过程工艺参数和工况确定的条件下,工件材料表面的去除率 MRR 表示公式如下。

式中, $\sigma(x,y)$ 表示接触区域的应力分布; $v(x,y)$ 表示相对速度分布。

此外，通过引入有效磨粒数量和粒径等因素，修正 Preston 常数，建立材料去除模型。将公式(2-9)和(2-10)带入公式(2-12)中，得到修正后表的材料去除模型，公式如下。

$$\frac{\Delta H(x, y)}{\Delta t} = k_1 \cdot \omega \cdot \frac{3F}{2\pi b^2} \left(1 - \frac{x^2}{b^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[(y \cos \theta)^2 + (x \cos \theta + (R^2 - b^2)^{\frac{1}{2}} \sin \theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-13)$$

其中, 修正 Preston 系数 $k_1 = k \cdot N_c(d_p)$, N_c 为磨削层中的磨粒数量, 磨削层定义为磨具最外层厚度为 d_p 的体积空间, 可由下式表示。

$$N_c = \frac{N \cdot S_c}{S_p} = \frac{N \cdot 2R(R - \sqrt{R^2 - b^2})}{2\pi R^2} = \frac{4c(R^3 - (R - d_p)^3)(R - \sqrt{R^2 - b^2})}{\rho d_d^3 R} \quad (2-14)$$

17

2.4 基于 Hertz 弹性理论的轨迹模型

2.4.1 磨抛轨迹模型建立

在磨抛加工中, 磨粒轨迹直接影响工件表面质量。磨粒轨迹的形成源于磨具和工件的相对运动, 其中磨具运动包括自转和进给。控制磨抛轨迹分布可调整磨抛进动角、自转速度和进给速度等加工参数。

根据 Hertz 弹性理论^[82], 由于应力分布和变形的对称性, 磨抛接触区域的形状往往呈现出椭圆形状^[83], 如图 2-8 所示。

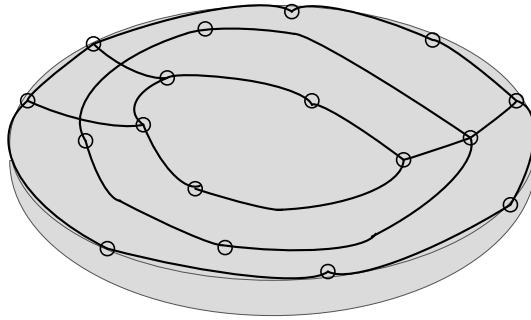


图 2-8 磨抛接触区域运动轨迹示意图

描述磨抛接触区域轮廓可以用如下公式表示。

$$\begin{cases} a = \left[\frac{3k^2 \varepsilon(k) F R_c}{\pi E_c} \right]^{\frac{1}{3}} \\ b = \left[\frac{3\varepsilon(k) F R_c}{\pi E_c} \right]^{\frac{1}{3}} \end{cases} \quad (2-15)$$

其中, a 表示椭圆的长半轴, b 表示椭圆的短半轴, F 表示磨具与工件间的接触力; R_c 为相对曲率半径; E_c 表示磨具与工件材料的相对杨氏模量。这些参数可由以下公式确定。

$$R_c = \frac{1}{k_1 + k_2} \cdot \frac{1}{E_c} = \frac{1 - \nu_1}{E_1} + \frac{1 - \nu_2}{E_2} \quad (2-16)$$

$$k \approx 1.0339 \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^{0.636} \quad (2-17)$$

$$\varepsilon(k) = 1.003 + 0.5968 \left| \frac{k_1}{k_2} \right| \quad (2-18)$$

其中, E_1 表示磨具的杨氏模量, ν_1 表示磨具泊松比, E_2 表示工件的杨氏模量, ν_2 则表示工件的泊松比, k_1 表示磨具的曲率, k_2 表示工件表面加工接触点的曲率, $\varepsilon(k)$ 表示第二类椭圆积分。

根据弹性力学理论, 接触区域内磨抛轨迹点的位移用下式计算。

$$\delta = \frac{4F}{3E_c} \left(\frac{R_c}{\sqrt{a}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2-19)$$

其中, δ 是接触点的位移。

假设磨料的初始位置为 (x_0, y_0) , 计算磨料在工件表面上的轨迹公式如下。

$$\begin{cases} x = x_0 + \int_0^t \frac{\partial \delta}{\partial x} dt \\ y = y_0 + \int_0^t \frac{\partial \delta}{\partial y} dt \end{cases} \quad (2-20)$$

其中, x 和 y 分别是磨料在工件表面上的位置坐标。

2.4.2 磨抛轨迹表示评估

用轨迹规划矩阵表示磨抛工艺过程, 不仅可以直观地了解整个磨抛工艺过程中磨头的运动轨迹, 也方便磨抛机器人执行轨迹自主规划、碰撞检测等工艺分析和优化等操作。

为了获取更多的磨抛轨迹信息, 还可以量化磨头磨粒的运动轨迹。即将磨抛区域划分为若干个单位面积的网格, 其中每个网格都包含了特定区域内的磨粒轨迹信息。

假设将工件表面磨抛区域划分为 $m \times n$ 个网格, 第 i 行第 j 的网格用 G_{ij} 表示, 其面积为 A_{ij} 。

对于每个网格 G_{ij} , 记录磨头磨粒在该网格内的运动轨迹。设在网格 G_{ij} 内磨粒的数量为 N_{ij} , 则磨粒在该网格内的密度 ρ_{ij} 可以用下式表示。

$$\rho_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_{ij}} (d_k - \mu_{ij})^2}{N_{ij}}} \quad (2-21)$$

其中, d_k 表示第 k 磨粒在网格 G_{ij} 内的密度, μ_{ij} 表示网格 G_{ij} 内所有磨粒密度的平均值。

最后, 评估磨抛轨迹分布的均匀性, 可以用磨粒轨迹密度的离散程度量化。计算磨抛轨迹密度的离散程度指标, 可以量化磨粒在磨抛区域内分布的均匀性。较小的离散程度表明磨粒轨迹密度分布较为均匀, 有利于提高材料去除率和改善表面质量; 而较大的离散程度则可能导致加工过程中出现材料去除不均匀或表面质量不佳的情况。常见的离散程度指标包括标准差 σ_{ij} 、方差 σ_{ij}^2 和信息熵 H_{ij} , 可用下式表示。

$$\text{标准差} \quad \sigma_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (2-22)$$

其中, N 表示网格数量, x_i 表示第 i 网格内的磨粒轨迹密度, μ 表示所有网格内磨粒轨迹密度的平均值。

$$\text{方差} \quad \sigma_{ij}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (2-23)$$

$$\text{信息熵} \quad H_{ij} = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2(p_i) \quad (2-24)$$

其中, p_i 表示 i 个网格内磨粒轨迹密度占总磨抛区域内磨粒轨迹密度的比例。

综上所述, 标准差衡量了磨粒轨迹密度在各个网格内的波动程度。标准差越小, 表示磨粒轨迹密度越均匀。方差是标准差的平方, 也可用于衡量磨抛轨迹密度的分散程度。方差越小, 表示磨粒轨迹密度越均匀。信息熵可用于衡量系统的不确定性, 即磨粒轨迹密度的随机性。信息熵越大, 表示磨粒轨迹密度越不均匀。以上利用了矩阵表示磨抛轨迹, 并通过磨抛轨迹密度的离散程度指标客观评估了磨抛轨迹分布的均匀性, 为磨抛加工的轨迹规划和优化奠定了理论基础。

2.5 本章小结

本章节首先阐述了磨抛过程的工作原理, 并依据磨抛加工原理和磨抛工艺知识, 提出了一种结合符号和矩阵数字化表征磨抛工艺知识的方法。接着分析了磨抛加工中磨头磨粒与工件干涉的机理, 分析磨粒与工件表面相互作用的三段过程, 即滑擦、耕犁和切削。然后基于磨头磨粒与工件干涉的机理, 结合 Preston 方程, 建立了磨抛加工

材料去除模型，引入有效磨粒数量和粒径等因素，修正 Preston 常数，建立了的材料去除模型。最后基于 Hertz 弹性理论，描述了磨抛轨迹形状，建立了磨抛轨迹模型，运用量化评估方法表示磨头磨粒的运动轨迹，为下一章节磨抛轨迹自主规划提供研究基础。

第3章 融合强化学习的机器人磨抛轨迹规划

3.1 磨抛轨迹规划方法

3.1.1 马尔可夫决策过程

研究机器人磨抛轨迹规划问题，选择强化学习方法，强化学习原理如图 3-1 所示，主要通过智能体与环境交互学习实现。

21

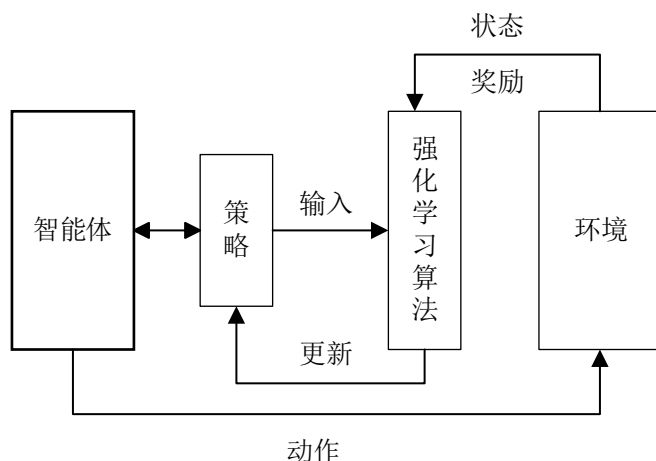


图 3-1 强化学习模型框架

解决强化问题的经典数学模型是马尔可夫决策过程(Markov Decision Process, MDP)是一种它是基于马尔可夫链的扩展，结合了随机性和决策性。

在 MDP 中，环境被建模为一组状态(states)，智能体(或决策者)根据状态采取行动(actions)。每个状态下采取的行动都会影响到下一个状态，同时也可能产生一定的奖励(rewards)。这种行为的结果和奖励是通过一个转移函数(transition function)和一个奖励函数(reward function)来描述的。MDP 组成内容如表 3-1 所示。

表 3-1 MDP 组成内容

内容	含义
状态(States)	描述环境的所有可能情况。智能体在每个时间步都处于某个状态。
行为 (Actions)	描述智能体在每个状态下的可选行动。
转移函数(Transition Function)	描述智能体在行动后从一个状态到另一个状态的概率，概率未知。
奖励函数(Reward Function)	描述智能体在各状态下采取特定行动后获得的奖励。奖励可以是正、负或零，用来评估智能体的行为。
策略(Policy)	定义智能体在每个状态下应该采取的行动。策略可以是确定性(每个状态给出一个确定的行动)或随机性(每个状态给出一个行动的概率分布)。

在 MDP 中，定义了一个如式(3-1)的五元组公式表示，其主要包含如下内容。

$$M = \langle S, A, P, R, \gamma \rangle \quad (3-1)$$

其中, S 表示状态空间; A 表示行为空间; P 表示状态转移概率矩阵(State Transition Probability Matrix), 是状态转移时的概率分布, 用公式(3-2)表示; R 表示奖励函数, 其定义公式如 (3-3)所示; γ 表示未来收益在当前状态映射时的衰减系数(因子), 且 $\gamma \in [0,1]$ 。

$$P_{ss'} = P[S_{t+1} = s' | S_t = s] \quad (3-2)$$

其中, $S_t = s$ 表示当前状态, $S_{t+1} = s'$ 表示下一时刻的状态, $P_{ss'}$ 表示智能体当前状态转移到下一时刻状态的概率。

$$R_s = E[R_{t+1} | S_t = s] \quad (3-3)$$

其中, R_s 表示在状态 s 下获得的期望奖励。

此外, MDP 还涉及几个重要概念如下。

(1) 马尔可夫奖励过程(Markov Reward Process, MRP)

在 MDP 中, MRP 的定义公式如(3-4)所示。

$$MRP = \langle S, P, R, \gamma \rangle \quad (3-4)$$

(2) 奖励收益总和

在 MRP 中, 智能体从 $t=0$ 时刻到终止状态时与环境交互获得奖励, 这些奖励有衰减收益总和为 G_t , 其定义公式如下。

$$G_t = R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \cdots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} \quad (3-5)$$

其中, γ 体现了当前时刻未来奖励的价值比例, G_t 从 t 时刻到终止状态, 可能会有多条路径。

(3) 价值函数(Value Function)

在一个 MRP 中, 某一状态的价值函数表示为从该状态开始获得的 R_s 。价值函数表示为 $V(s)$, 价值函数给出了智能体某一状态或某一行为的长期价值, 其定义公式如下。

$$V(s) = E[G_t | S_t = s] \quad (3-6)$$

3.1.2 MDP 最优策略

MDP 的目标是找到一个最优策略, 使得智能体在长期累积的奖励最大化。

(1) 基于策略 π 的奖励过程

给定一个 MDP($M = \langle S, A, P, R, \gamma \rangle$) 和一个策略 π , 状态序列 $S_1, S_2, \dots$ 是一个 MP($\langle S, P^\pi \rangle$); 状态和奖励序列 $S_1, R_2, S_2, R_3, S_3, \dots$ 构成一个 MRP($\langle S, P^\pi, R^\pi, \gamma \rangle$), 满足以下两个方程。

$$P_{s,s'}^\pi = \sum_{a \in A} \pi(a|s) P_{s,s'}^a \quad (3-7)$$

式(3-7)表示执行策略 π 时, 状态从 s 转移至 s' 的概率是执行某一个行为的概率与该行为引起状态转移概率的乘积之和。

其奖励函数公式表示如下。

$$R_s^\pi = \sum_{a \in A} \pi(a|s) R_s^a \quad (3-8)$$

式(3-8)表示在当前状态 s 下执行指定策略得到的即时奖励, 是该策略下所有可能行为得到的奖励与相应行为发生概率的乘积之和。

Policy 在 MDP 中至关重要, 决定了智能体在特定状态下的行为选择, 从而导致不同的 $P_{ss'}$ 和 R_s , 从而得到各种 MP。每个由 Policy 生成的 MP 都是一个 MRP, 其不同之处在于不同选择导致不同的 s 和相应的 R 。

(2) 基于策略 π 的价值函数

MDP 下, 策略 π 全面定义了智能体的行为方式, 包括在各个状态下可能的行为及其概率, 其定义公式如下。

$$\pi(a|\pi) = P[A_t = a | S_t = s] \quad (3-9)$$

其中, 策略 π 是概率的集合或分布, 表示在既定状态下行为的分布, 其元素 $\pi(a|s)$ 为对过程中的某一状态 s 采取可能的行为 a 的概率。

定义 $v_\pi(s)$ 是在 MDP 下的基于策略 π 的状态价值函数, 在策略 π 下, 将公式(3-5)带入公式(3-16)中, 推理计算可得状态价值函数 $v_\pi(s)$ 如下。

$$\begin{aligned} v_\pi(s) &= E_\pi[G_t | S_t = s] \\ &= E_\pi[R_t + \gamma R_{t+1} + \gamma^2 R_{t+2} + \dots | S_t = s] \\ &= E_\pi[R_t + \gamma(R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \dots) | S_t = s] \\ &= E_\pi[R_t + \gamma G_{t+1} | S_t = s] \\ &= E_\pi[R_t + \gamma v_\pi(S_{t+1}) | S_t = s] \end{aligned} \quad (3-10)$$

定义 $q_\pi(s, a)$ 为行为价值函数, 表示在执行策略 π 时, 当前状态下执行 a 的价值期望。行为价值函数一般都是与某一特定的状态相对应的, 其可以描述为状态行为对价值函数。

同理可得，在策略 π 下，推理计算可得行为价值函数 $q_\pi(s, a)$ 如下。

$$\begin{aligned} q_\pi(s, a) &= E_\pi[G_t | S_t = s, A_t = a] \\ &= E_\pi[R_{t+1} + \gamma q_\pi(S_{t+1}, A_{t+1}) | S_t = s, A_t = a] \end{aligned} \quad (3-11)$$

(3) 贝尔曼期望方程(Bellman Expectation Equation)

贝尔曼期望方程是用来描述 MDP 中状态值函数的一组方程，根据公式(3-3)、(3-7)、(3-8)、(3-9)和(3-10)可得如下公式。

$$\begin{aligned} V_\pi(s) &= E_\pi[R_t + \gamma V_\pi(S_{t+1}) | S_t = s] \\ &= R(s) + E_\pi[\gamma V_\pi(S_{t+1}) | S_t = s] \\ &= R(s) + \gamma \sum_{s' \in S} P(s' | s) V_\pi(s') \\ &= \sum_{a \in A} \pi(a | s) + \gamma \sum_{s' \in S} \left(\sum_{a \in A} \pi(a | s) V_\pi(s') \right) \\ &= \sum_{a \in A} \pi(a | s) \sum_{s', r} p(s', r | s, a) [r + \gamma V_\pi(s')] \end{aligned} \quad (3-12)$$

公式(3-12)为 MDP 中的 Bellman 等式，此等式在 $\forall s$ 都适用。

其中， $V_\pi(s)$ 表示在策略 π 下状态 s 的值。 $\pi(a | s)$ 是在状态 s 下采取动作 a 的概率。 $p(s', r | s, a)$ 是在状态 s 下执行动作 a 后转移到状态 s' 并获得奖励 r 的概率。 γ 是折扣因子，用于衡量长期奖励的重要性。

贝尔曼方程表达了状态值函数 $V_\pi(s)$ 的更新状态：它等于在该状态执行所有可能动作后所获得的期望奖励，其中考虑了下一个状态的值，并根据策略 π 权衡了所有可能的动作选择。

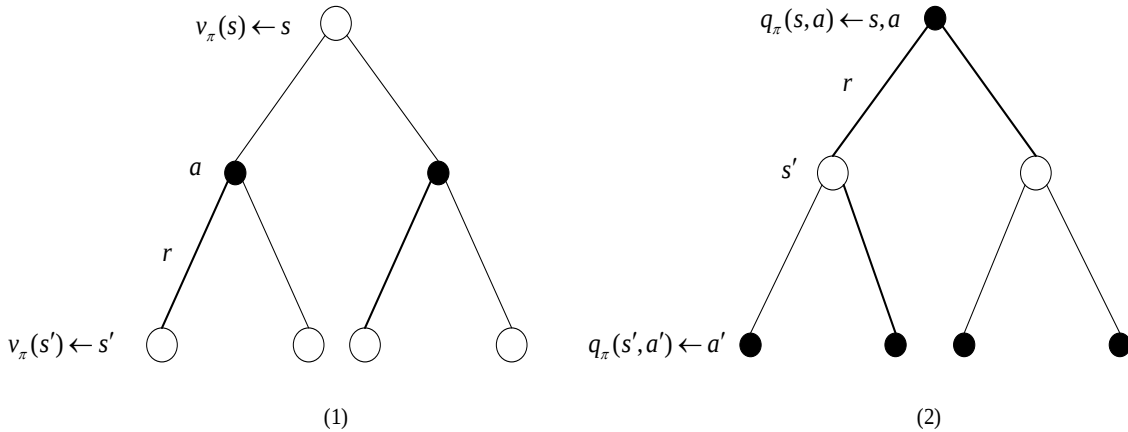


图 3-2 MDP 中贝尔曼期望方程求解 v, q

如图 3-2(1)所示，结合 Bellman 方程，求解 $v_\pi(s)$ 可得公式如下。

$$v_\pi(s) = \sum_{a \in A} \pi(a | s) (R_s^a + \gamma \sum_{s' \in S} P_{ss'}^a v_\pi(s')) \quad (3-13)$$

如图 3-2(2)所示，结合 Bellman 方程，求解 $q_\pi(s, a)$ 可得公式如下。

$$q_{\pi}(s, a) = R_s^a + \gamma \sum_{s' \in S} P_{ss'}^a \sum_{a' \in A} \pi(a' | s') q_{\pi}(s', a') \quad (3-14)$$

综上所述，贝尔曼方程描述了最优值函数之间的关系，可以用来找到最优值函数和最优策略，表明对于最优策略，每个状态的值函数都满足一定的条件。

(4)最优策略

最优策略表明在任何状态下，智能体都会选择相同的动作，与状态无关。对于任何一个 MDP，都存在一个最优策略，可以通过寻找最大化 $q_*(s, a)$ 来找到 $\pi_*(a | s)$ 。

$$\pi_*(a | s) = \begin{cases} 1, & a = \arg \max q_*(s, a) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-15)$$

3.1.3 磨抛轨迹规划策略

工业机器人磨抛过程建模为 MDP，在磨抛加工过程中，机械臂末端磨具的位置和姿态可以作为状态；机器人末端磨具的运动可以作为动作；如选择不同的磨抛策略、完成磨抛任务所需的时间，工具损耗和加工精度等可以作为奖励函数，反馈给智能体。最后，根据机器人磨具的运动和相邻状态之间的关系，可以定义状态转移概率。如图 3-2 所示为机器人磨抛加工示意图。

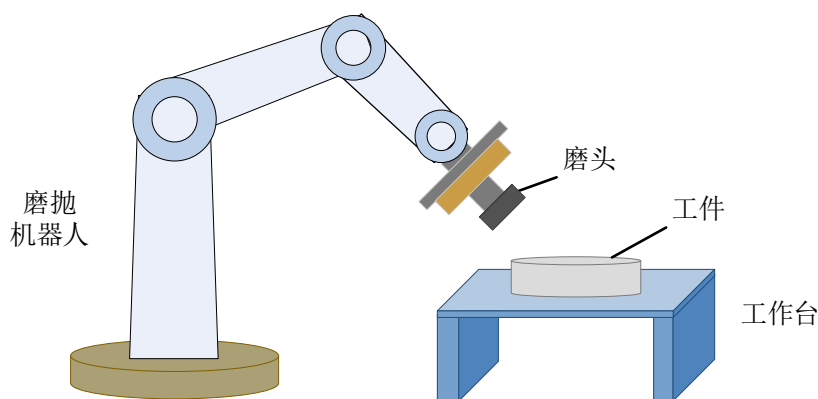


图 3-2 机器人磨抛加工示意图

在机器人磨抛加工过程，工件表面形成磨抛轨迹路线，从磨抛轨迹中可以提取特定时间点的轨迹位置，记录磨抛轨迹中轨迹点位置表示，此时可得磨头的位姿和相关磨抛工艺参数。

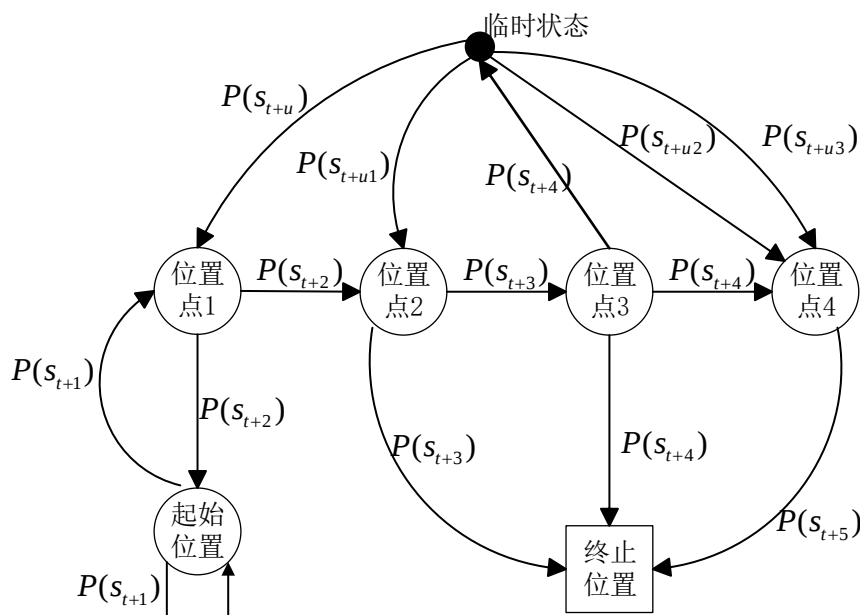


图 3-3 基于 MDP 的磨抛轨迹规划方法

如图 3-3 所示，圆圈代表磨抛加工过程的磨头状态；方格代表一个终止状态(自循环状态)，也就是终止状态的下一个状态 100%是本身；文字表示机器人磨抛加工过程中采取的行为，箭头表示状态之间的转移， $P(s_t)$ 表示当前状态转移到下一状态的概率，且概率之和为 1。黑圆点表示磨抛加工过程中的一个临时状态， $P(s_{t+u})$ 表示临时状态转移到加工状态的转移概率。当机器人行为发生异常时，进入一个临时状态，而后被环境随机分配给另外的状态。综上，从起始位置到终止位置点排序和连接生成一条磨抛轨迹。

综上所述，磨抛轨迹规划转化为 MDP 解决步骤如下。

表 3-2 磨抛轨迹规划方法步骤

步骤	方法	内容
1	定义 S	确定问题中所有可能的状态集合。状态可以是系统所处的任何情况或配置，它们是描述环境的基本要素。
2	定义 A	确定在每个状态下可用的所有可能的行动或决策。动作是智能体可以执行的操作，它们会影响环境的状态转移。
3	设计 R	制定一个函数评估智能体在每个状态下采取每个动作的即时奖励。奖励函数可以是确定性，也可以是随机性。
4	定义 P	在智能体执行一个动作后，确定环境将处于新状态的概率分布。建模时这个概率为在给定状态和动作下进入下一个状态的概率。
5	定义 γ	衡量未来奖励的重要性，以平衡即时奖励和长期回报之间的权衡。 $\gamma \in [0,1]$ 。
6	制定 Policy	制定一个策略* 指导智能体在不同状态下应该采取的动作。

步骤	方法	内容
		策略可以是确定性或随机性，指定从状态到动作的映射关系。
7	计算 $v(s) + q(s, a)$	计算状态价值函数 $v(s)$ 和行为价值函数 $q(s, a)$ ，得到在该策略下 $\pi(a s)$ 的 G_t 值。
8	寻找 $\max_{\pi} \pi(a s)$	MDP 最终目标是得到智能体 $\max G_t$ 。

综上所述，磨抛轨迹规划强化学习方法实现的流程如图 3-4 所示。

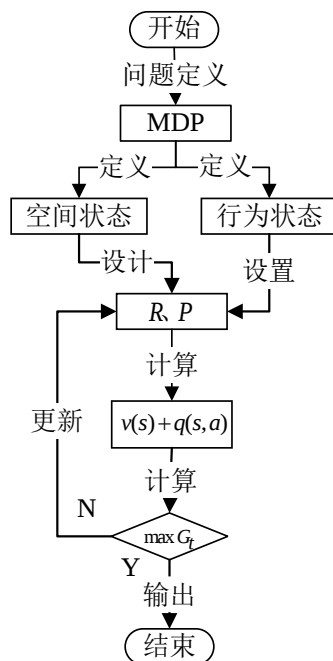


图 3-4 磨抛轨迹规划方法流程图

3.2 基于 CCPP 的磨抛轨迹规划

3.2.1 CCPP 算法原理解析

CCPP 是一种路径规划算法，其主要目标是机器人覆盖整个区域而不遗漏任何部分，确保机器人能够完整地覆盖给定区域^[84]。研究基于 CCPP 算法完成磨抛轨迹自主规划，以确保磨抛加工工件表面能完全被磨抛机器人的磨头轨迹覆盖。基于 CCPP 的磨抛轨迹规划的算法实现伪代码如下表 3-3 所示。

表 3-3 CCPP 伪代码

CCPP 伪代码
(1) 初始化路径 P 为空集合
(2) 将待覆盖区域地图 Map 划分为可管理的子区域(网格划分)
(3) for each 子区域 Submap in Map do

CCPP 伪代码

- (4) 使用最短路径规划算法 A*生成子区域的覆盖路径 Subpath
- (5) 将 Subpath 添加到路径 P 中
- (6) end for
- (7) 将路径 P 中的各个子路径连接起来，确保路径连续且没有遗漏部分
- (8) 返回完整覆盖路径 P

基于 CCPP 的磨抛轨迹规划的算法实现伪代码如下表所示。

表 3-4 磨抛轨迹规划实现伪代码

CCPP 算法伪代码

- (1) 初始化路径规划器 Planner，设置初始位置为 Start
- (2) 利用 CCPP 算法规划完整覆盖路径，得到路径 Path
- (3) 初始化轨迹生成器 TrajectoryGenerator
- (4) for each point P in Path do
- (5) 生成从当前机器人磨头位置到点 P 的轨迹段 T
- (6) if T 不与障碍物相交 then
- (7) 将轨迹段 T 添加到 Trajectory
- (8) 移动机器人磨头至点 P
- (9) else
- (10) 根据轨迹段 T 重新规划路径
- (11) end if
- (12) end for
- (13) 返回 Trajectory

其中，算法的输入为磨抛表面地图 Map，磨抛机器人起始位置 Start，CCPP 算法参数。输出为机器人的轨迹 Trajectory。

3.2.2 状态空间定义

将磨抛轨迹和路径规划问题转化化为强化学习问题，完成建模，明确定义磨抛轨迹规划过程的状态空间和动作空间。

状态空间表示磨抛过程中可能出现的各种状态。在磨抛轨迹规划问题中，状态可以包括以下内容。

磨具状态包含磨抛过程中磨具的位置、姿态、速度等。其定义内容如下。

将工件表面视为状态空间，每个状态表示为机器人末端执行器(磨具)当前的位置和姿态。磨具位姿状态定义为一个元组，包含机器人的位置和姿态信息，如下式所示。

$$P_{s,t} = (x_t, y_t, z_t, \phi_t, \theta_t, \psi_t) \quad (3-16)$$

式中 (x_t, y_t, z_t) 表示在笛卡尔坐标系下磨具在工件上的位置， $(\phi_t, \theta_t, \psi_t)$ 表示在笛卡尔坐标系下磨具相对于工件表面的姿态。

同理可得，磨具的速度和角速度在状态空间可定义为如下公式。

$$V_{s,t} = \left(\frac{dx_t}{dt}, \frac{dy_t}{dt}, \frac{dz_t}{dt} \right) \quad (3-17)$$

$$W_{s,t} = \left(\frac{d\phi_t}{dt}, \frac{d\theta_t}{dt}, \frac{d\psi_t}{dt} \right) \quad (3-18)$$

工件表面状态包含工件表面的几何形状、表面粗糙度等。

$$R_{s,t} = (R_a, R_h, R_p) \quad (3-19)$$

其中， R_a 表示表面的平均粗糙度、 R_h 表示最大切削量、 R_p 表示峰谷高度。

此外还包含加工环境的温度、湿度等环境状态。

$$E_{s,t} = (T_t, U_t, \dots) \quad (3-20)$$

其中， T_t 表示环境温度状态， U_t 表示环境湿度状态。

表示机器人磨抛轨迹规划任务的状态，需要将连续的状态空间离散化为有限数量的离散状态，可以网格化磨抛加工的工作空间^[85]。将连续的位置坐标映射到离散的网格单元，每个网格单元作为一个离散状态。如图 3-5 所示，将真实世界的状态空间转换成离散的固定尺寸的地图(13×13)，定义机器人磨抛加工过程的网格世界状态空间为 $s=\{1,2,3,\dots,169\}$ 。

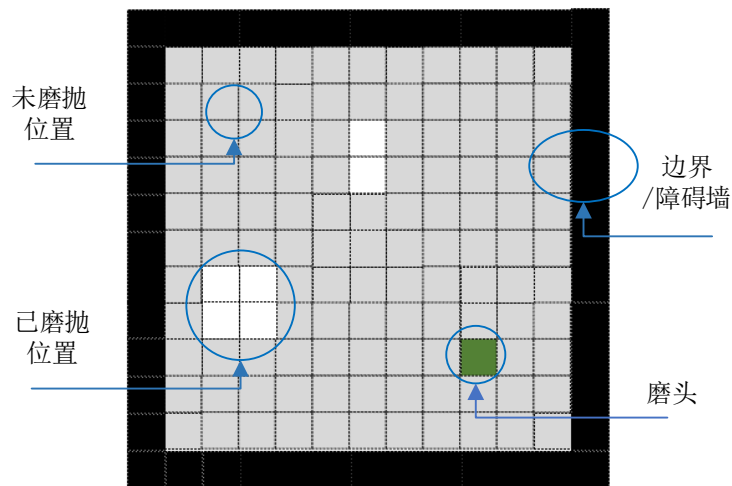


图 3-5 磨抛轨迹网格化状态空间表示

图中绿色格子表示磨头；黑色格子表示磨抛加工工件表面的边界；白色格子表示磨头在工件表面已磨抛区域；灰色格子表示未磨抛区域，需要磨头磨抛。

3.2.3 动作空间定义

将机器人的动作定义为在当前位置附近选择下一个轨迹点。这种方法可以使机器人在执行磨抛任务时，通过调整下一个轨迹点来控制其在工件表面的运动。及定义动作表示磨具在当前位置附近选择下一个路径点的位移向量。

定义磨抛轨迹规划中的动作，可以将连续的动作空间离散化为有限数量的离散动作。即可以将机器人在各状态下存在的运动行为（如前进、后退、左转、右转等）离散化为一组有限的动作集合。如图 3-6 所示，定义磨抛轨迹网格化上机器人在动作空间上的移动行为方向。

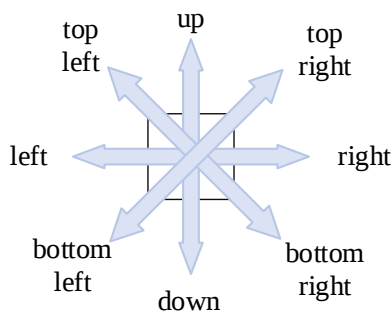


图 3-6 动作空间中磨具可移动方向

为了生成磨抛轨迹，磨抛机器人的动作空间是离散化的，这意味着单个动作不能是多种运动类型的组合。动作的成本取决于机器人为执行特定动作而移动的总距离。计算每个块的起始位置 (x_i, y_i) 和结束位置 (x_j, y_j) 之间的欧几里得距离确定磨具移动函数。

当机器人磨头移动方向为 up、down、left、right 时，两点间距离计算公式如下。

$$C_{translation} = \sum_{i,j \in E} \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (3-21)$$

当机器人磨头移动方向为 top left、bottom left、top right、bottom right 时，两点间距离计算公式如下。

$$\begin{aligned} C_{tilt} &= \sqrt{\left(\frac{x_j - x_i}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{y_j - y_i}{\sqrt{2}}\right)^2} \\ &= \sqrt{\frac{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}{2}} \end{aligned} \quad (3-22)$$

综上，机器人磨头移动方向的综合计算公式如下。

$$C_{total}(a_t) = \begin{cases} C_{translation} & \text{if } a_t \in \{up, down, left, right\} \\ C_{tilt} & \text{if } a_t \in \{top\ left, bottom\ left, top\ right, bottom\ right\} \end{cases} \quad (3-23)$$

综上所述，将磨抛轨迹规划问题的环境定义为状态空间和动作空间，可以利用强化学习方法寻找最优的磨抛轨迹规划策略，实现工件表面的高效加工。

3.2.4 奖励函数设计

在磨抛轨迹规划问题中，奖励函数对于模型的优化训练至关重要。基于 CCPP 方法，定义当机器人完全覆盖可磨抛加工区域时，可以给予奖励。然而，这种稀疏的奖励函数会导致模型很难达到收敛状态。因此，覆盖每个新网格也会随着完全覆盖而获得奖励，与单块的覆盖物相比，覆盖面要大得多。如果没有覆盖新网格，则总体奖励为负数，可以防止机器人回溯或卡住。

当设置覆盖一块网格的奖励高于移动成本，这促使机器人可以做出多个动作到达一个新的位置。对于磨抛机器人在工件外范围工作的非法行为，这可能包括与工件边界的碰撞，将其设置为负面奖励，定义当算法选择执行负奖励行为，不会执行任何动作。因而设置单个动作的整体奖励如下公式所示。

$$R(a_t) = (N_{new} \times R_{new}) + (status \times R_{final}) - (illegal \times R_{illegal}) \quad (3-24)$$

其中， N_{new} 表示覆盖新图块的数量， R_{new} 表示覆盖新图块的奖励， $status$ 表示磨抛加工是否完成状态， R_{final} 表示完成磨抛加工的奖励， $illegal$ 是布尔值，描述操作是否非法， $R_{illegal}$ 表示任何非法操作的惩罚。这些奖励值通过实验确定。

3.3 基于网格的表示建模

3.3.1 网格分解策略

网格分解策略旨在将一个复杂的工作空间划分为可以由特定形状的多米诺平铺来覆盖的子空间。使用多米诺平铺理论^[86]生成一个表示空间所需形状的图块集，确保了每个子空间都可以被特定形状的多米诺瓷砖完全覆盖。这意味着机器人磨头在移动和操作时不会遇到无法解决的障碍。通过事先生成图块集并确定每个图块的位置，可以为机器人磨头规划磨抛轨迹，磨头可以移动到所选图块集的每个图块位置，使其能够有效地覆盖整个工作空间。这种方法可以确保工件表面的工作空间完全由机器人磨头运动平铺覆盖。网格分解策略算法步骤如表 3-5。

表 3-5 网格分解策略算法步骤

网格分解策略算法步骤
(1) 生成图块集
使用多米诺平铺理论，生成表示空间所需形状的图块集，包含多个引理。
(2) 分解工作空间
将工作空间划分为小块，每个小块的尺寸与图块集中的某个图块的尺寸相匹配。
将工作空间划分为网格或使用其他方法，确保每个小块都可以由一个图块完全覆盖。
(3) 对每个小块执行以下步骤
选择一个图块
从图块集中选择一个与当前小块匹配的图块。
规划路径
使用路径规划算法确定机器人在当前小块中的起始位置和目标位置。
确保路径覆盖当前小块，并且机器人可以转换为所选图块的形状。
执行路径
控制机器人按照规划好的路径移动到目标位置。
如果需要，进行形状转换，以实现当前小块的完整覆盖。
(4) 完成覆盖
当所有小块都被覆盖时，完成工作空间的覆盖。
(5) 结束

3.3.2 贪婪策略搜索

使用贪婪策略搜索，排序连接图块集生成机器人磨抛轨迹。有一组工作空间的图块，每个图块都有一些连接点，贪婪策略目标是按照某种顺序连接这些图块，使得连接的轨迹尽可能地短，从而提高机器人效率。如表 3-6 所示为贪婪策略算法实现代码。

表 3-6 贪婪策略算法伪代码

贪婪策略算法伪代码
(1) 初始化一个空的轨迹列表 T
(2) 从工作空间的图块中选择一个起始图块 V_start，并将其添加到轨迹列表 T 中。
(3) 当还有未连接的图块时，执行以下步骤
在当前轨迹列表 T 的末尾选择一个图块 V_current

贪婪策略算法伪代码

在未连接的图块中选择与 V_{current} 最近的图块 V_{next}

将 V_{next} 添加到轨迹列表 T 的末尾，并将其标记为已连接

(4) 返回轨迹列表 T

利用 Python 编程实现贪婪策略搜索，代码如图 3-7 所示。

33

```
main.py
1  from turtle import distance
2
3
4  def calculate_distance():
5      pass
6
7
8  def greedy_path_search(blocks):
9      # 初始化轨迹为空
10     path = []
11     # 选择起始图块
12     current_block = blocks[0]
13     # 将起始图块添加到轨迹中
14     path.append(current_block)
15     # 从图块集中移除已经使用的起始图块
16     blocks.remove(current_block)
17
18     # 循环直到所有图块都连接完毕
19     while blocks:
20         # 初始化最短距离为无穷大
21         shortest_distance = float('inf')
22         # 初始化下一个连接点为 None
23         next_connection = None
24
25         # 遍历当前图块的所有连接点
26         for connection_point in current_block.connection_points:
27             # 在剩余的图块中找到与当前连接点相连的图块
28             for block in blocks:
29                 if connection_point in block.connection_points:
30                     # 计算当前连接点到该图块的距离
31                     calculate_distance()
32                     # 如果距离比当前最短距离小，则更新最短距离和下一个连接点
33                     if distance < shortest_distance:
34                         shortest_distance = distance
35                         next_connection = (block, connection_point)
36
37         # 将下一个连接点的图块添加到轨迹中
38         path.append(next_connection[0])
39         # 从图块集中移除已经连接的图块
40         blocks.remove(next_connection[0])
41         # 更新当前图块为下一个连接点的图块
42         current_block = next_connection[0]
43
44     return path
45
```

图 3-7 贪婪策略搜索程序

3.3 磨抛轨迹规划决策网络

3.3.1 Actor-Critic 决策网络模型

在磨抛轨迹规划的决策网络设计中，由于磨抛任务的特点，如状态和动作空间的大量组合以及完全覆盖的需求，传统的基于模型的强化学习技术往往不可行。因此，采用无模型的强化学习方法来训练决策网络。

此外，考虑到每种状态都可能大量的动作选择，且磨抛任务目标是完整覆盖工

件表面，即不仅需要考虑当前的动作选择，还需要考虑未来的奖励，因而选择策略梯度方法。策略梯度能够预测任何状态下最有价值的行动。从而确保长期的优化目标得以实现。CCPP 采用了考虑未来奖励的策略梯度方法，使该模型能够实现高效的完全覆盖磨抛轨迹规划。

综上，采用 Actor-Critic 模型，结合了价值估计(Critic)和策略学习(Actor)的强化学习框架^[87]。模型包括两部分——决定策略的 Actor 网络和评估政策决定的 Critic 网络。Actor 网络负责根据当前状态选择动作，而 Critic 网络则负责评估这些动作的价值，即预期的未来奖励。通过这种方式，Actor 可以根据 Critic 的反馈进行训练，以优化长期奖励。

基于 Actor-Critic 模型，引入长短期记忆（LSTM）网络和卷积神经网络（CNN）来构建决策网络。CNN 部分有 3 个卷积层，每个卷积层具有不同的内核大小，用于从环境状态中提取关键特征。这些特征通过带有 ELU 激活函数的全连接层进行处理，并最终传递给 LSTM 层。LSTM 有助于学习可用于覆盖特定对象模式的动作序列，并避免覆盖已经覆盖的区域。

通过 CNN LSTM 网络确定任何状态下动作的概率函数。其网络架构如图 3-8 所示。

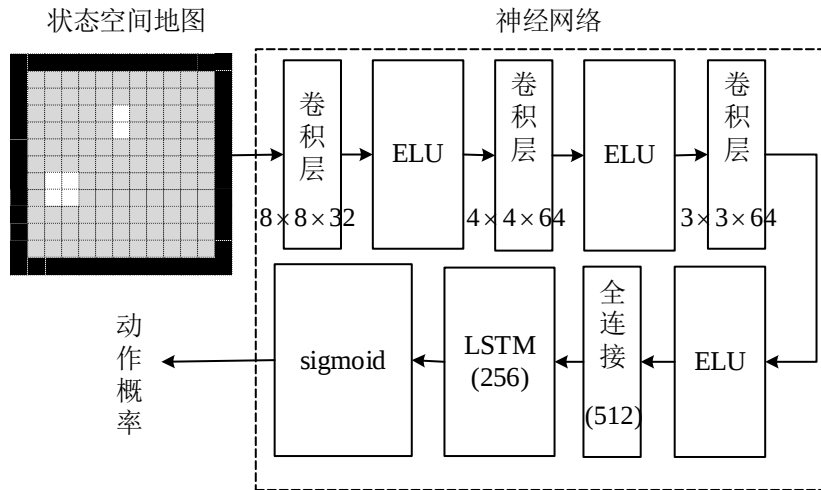


图 3-8 决策网络模型

其中，ELU 激活功能由定义公式如式(3-25)，sigmoid 激活函数定义公式如式(3-26)。

$$f(x) = \begin{cases} \alpha(e^x - 1), & \text{当 } x \leq 0 \\ x, & \text{当 } x > 0 \end{cases} \quad (3-25)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3-26)$$

3.3.2 ACER 训练网络

训练网络使用 ACER (Actor-Critic with Experience Replay) 算法^[88]。ACER 是一种结合了经验回放技术的 Actor-Critic 模型^[89]，它使用经验回放缓冲区记录训练期间的状态、行为和奖励。ACER 通过从经验回放缓冲区中随机抽取样本进行训练，能够提高样本的利用效率和学习稳定性。它能够打破数据之间的时间相关性，使训练过程更加高效。ACER 算法使用边际值函数近似策略梯度。ACER 算法训练流程如图 3-9 所示。

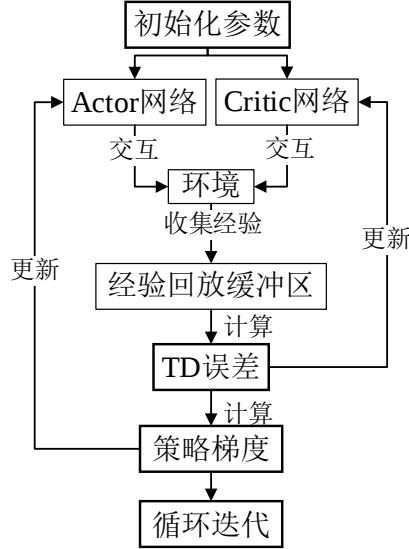


图 3-9 ACER 算法训练网络流程

对于任何带有策略函数 θ 的策略 π ，在时间 t 时，给定状态 s_t 和动作 a_t 的边际价值策略梯度由 g_{mar} 得到，计算公式如下。

$$g_{mar} = E_{s_t, a_t} [\rho_t \times \nabla_{\theta} \times \log(\pi_{\theta}(a_t | s_t)) \times Q(s_t, a_t)] \quad (3-27)$$

其中， ρ_t 表示重要性权重， E 表示期望值。为了提高训练过程中的稳定性，ACER 算法优化三项功能。首先，ACER 算法使用回溯 q 价值估计训练 Critic。使用回溯 q 值而不是标准 q 值函数，可显著减少策略外更新期间的偏差。回溯估计器的计算方式如下。

$$\begin{aligned} Q_{retrace} &= r_t + \gamma \times \rho_{t+1} \times [Q_{retrace}(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_{t+1}, a_{t+1})] + \gamma \times E[s_{t+1}] \\ &= r_t + \gamma \times \{ \rho_{t+1} \times [Q_{retrace}(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_{t+1}, a_{t+1})] + E[s_{t+1}] \} \end{aligned} \quad (3-28)$$

其中， γ 是折扣因子， Q 是标准的 q 值估计值， E 是期望的 Q 值。另外两个优化旨在减少训练过程中的方差。前者涉及对截断的重要性权重 ρ 偏差校正，从而减少 ρ 值对最终边际值函数的影响，该概念被添加到公式(3-27)中。后者在训练期间利用信任区域策略优化。信任区域策略优化(TRPO)^[90]使用优化器优化的 blackKullback-Leibler(KL)

散度计算损失。ACER 算法修改了 Trust Region Policy Optimization(TRPO)，提高了效率。

3.3.3 Loss 优化

均方根传播(RMS Prop)是一种自适应学习率优化算法，用于调整每个参数的学习率^[91]，使用 RMS Prop 优化器优化 Loss 函数。

设 θ 是要更新的参数， g 是当前批次的梯度， ρ 是衰减率（通常取值为 0.9）， η 是初始学习率。 ϵ 是一个很小的数（通常取值为 10^{-8} ，以防止分母为零）。

指数平均值公式如下。

$$E(g_t) = \rho E(g_{t-1}) + (1 - \rho)g_t^2 \quad (3-29)$$

$$\Delta \theta^{rms} = -\frac{\eta}{\sqrt{E(g_t) + \epsilon}} \times g_t \quad (3-30)$$

$$\theta_{t+1}^{rms} = E(g_t) - \frac{\eta}{\sqrt{E(g_t) + \epsilon}} \times g_t \quad (3-31)$$

以上，RMSProp 维护了一个梯度平方的指数加权移动平均，用于调整每个参数的学习率。

3.4 仿真实验与结果分析

3.4.1 磨抛实验设置

本文磨抛实验运用六轴机器人执行磨抛加工，磨抛实验的主要工艺参数包括弹性磨具半径、杨氏模量、泊松比、磨粒粒度、初始压力、主轴转速、进给速度和磨抛进动角等。如表 3-7 表示磨抛工艺参数。

表 3-7 实验使用的磨抛工艺参数

参数名称	参数值	单位
弹性磨具半径	15.00	R / mm
杨氏模量	6.00	E / MPa
泊松比	0.47	—
磨粒粒度	200#	S / mm
初始压力	6.00	N
主轴转速	200-1200	$\omega(r / min)$
进给速度	1-3	$v / (mm / s)$
磨抛进动角	0-30	$\alpha(^{\circ})$

如表 3-8 为磨抛轨迹规划实验的软、硬件配置。

表 3-8 实验软、硬件配置

环境	配置
服务器操作系统	Windows11
计算机 CPU	Intel CORE i7 12700H
计算机 GPU	NVIDIA GeForce RTX 3060
实验平台	Anaconda+PyCharm
编程语言	Python
图工具	MATLAB/Origin

3.4.2 仿真环境设置

实验设置机器人磨头磨抛工件表面区域为一块规则的分布面，用网格分割工件表面，结果显示为 13×13 磨抛加工仿真环境，如图 3-10，设置两种不同磨抛加工环境模型，模型 (a) 磨抛区域只有规则边界障碍，模型 (b) 磨抛区域包含不规则的边界和障碍。

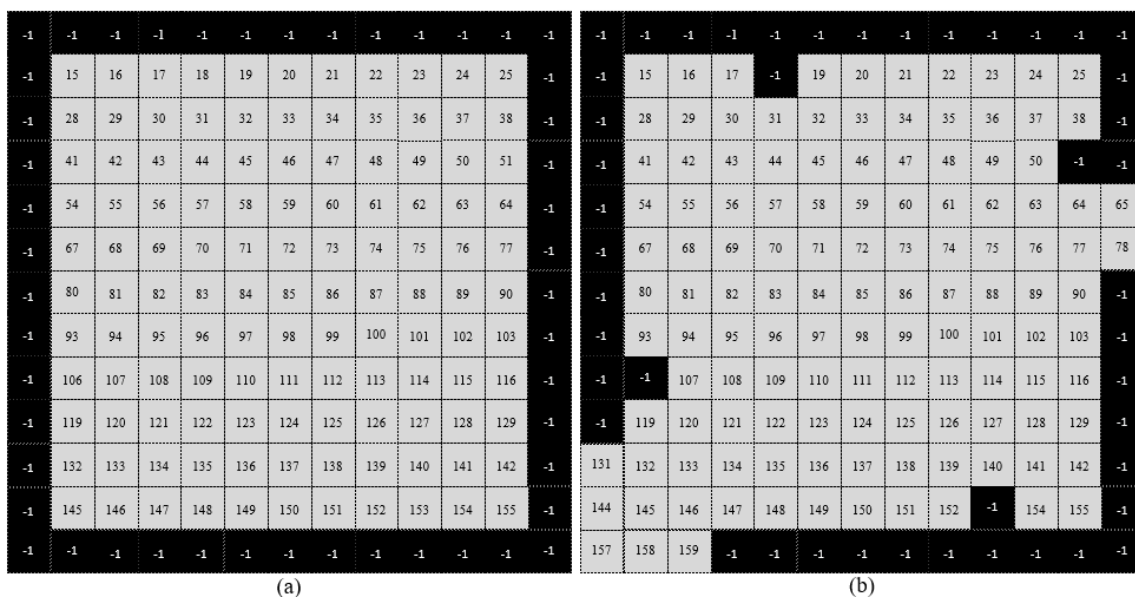


图 3-10 13×13 仿真环境

地图构建完成后，硬编码预定义的航点指示位置，并设置所需的形状，然后存储在机器人导航计划中。由于地图布局相同，因此轨迹规划只从模拟结果中复制，但确切的航点位置根据预构建地图及时调整。在 CCPP 算法生成航点后，机器人磨头开始在预构建地图中移动，实时监控磨头位置，并自主发出导航方向和形状命令，以控制磨头移动至所有预定义的航点。

3.4.3 实验结果及分析

针对磨抛加工，机器人磨头磨抛工件表面时，根据磨头状态和加工环境状态的不同，分情况验证磨抛轨迹规划方法如下。

(1) 设置机器人在磨抛加工环境(a)下，磨抛轨迹导航路线如下图。

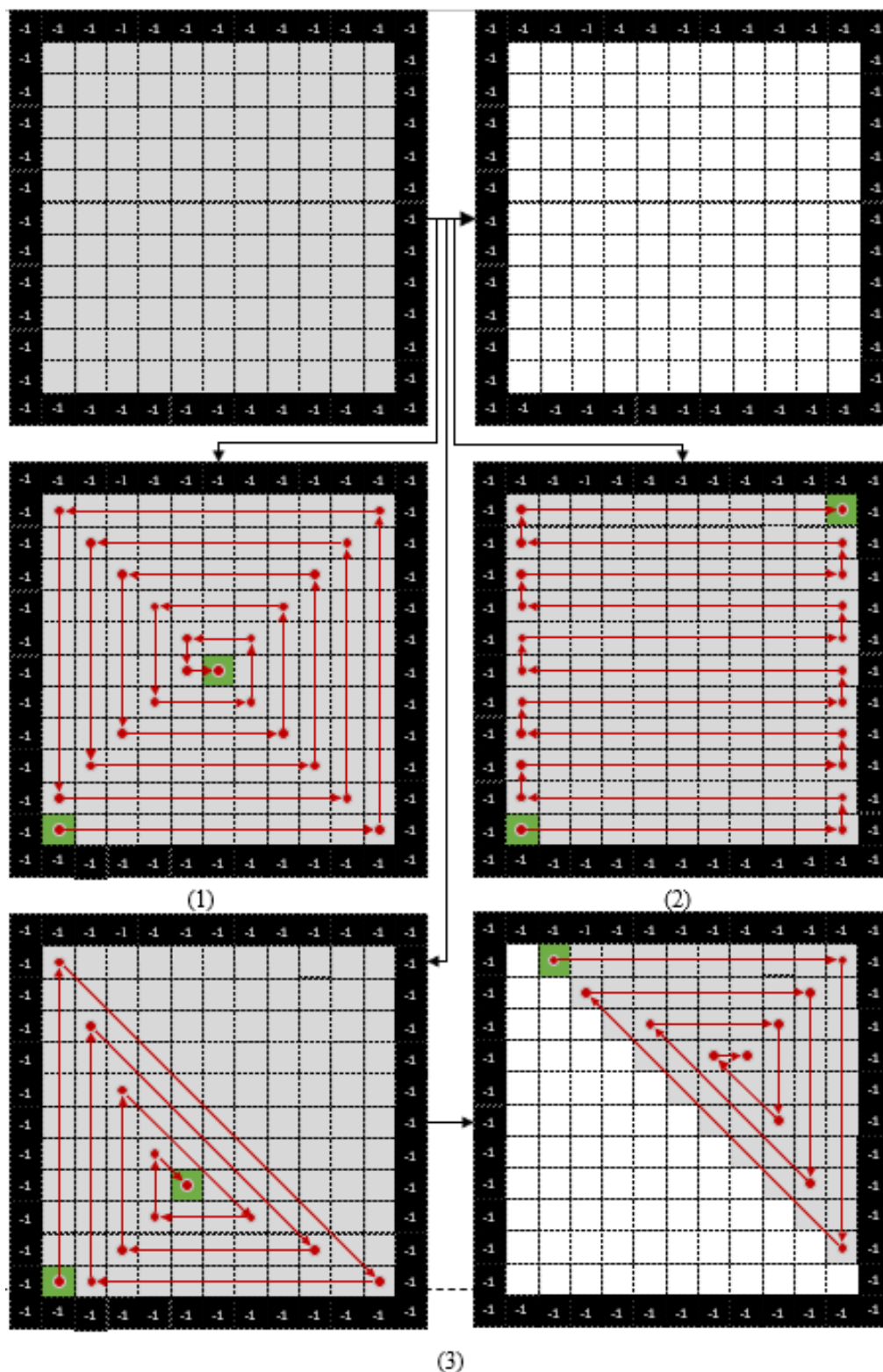


图 3-11 加工环境(a)下磨抛轨迹

由图 3-11 可得, 在工件表面, 当磨头占据网格数与分割地图网格大小一样, 根据设置的动作空间, 磨头磨抛一次且完全覆盖工件表面, 有两种轨迹模拟导航路线形状如(1)和(2); 如(3)所示是磨头磨抛两次, 磨抛模拟导航路线也完全覆盖了磨抛区域。

(2) 不改变磨抛加工环境, 将磨头状态定义等比放大 2 倍的 4 个单位网格, 磨抛轨迹导航路线如下图。

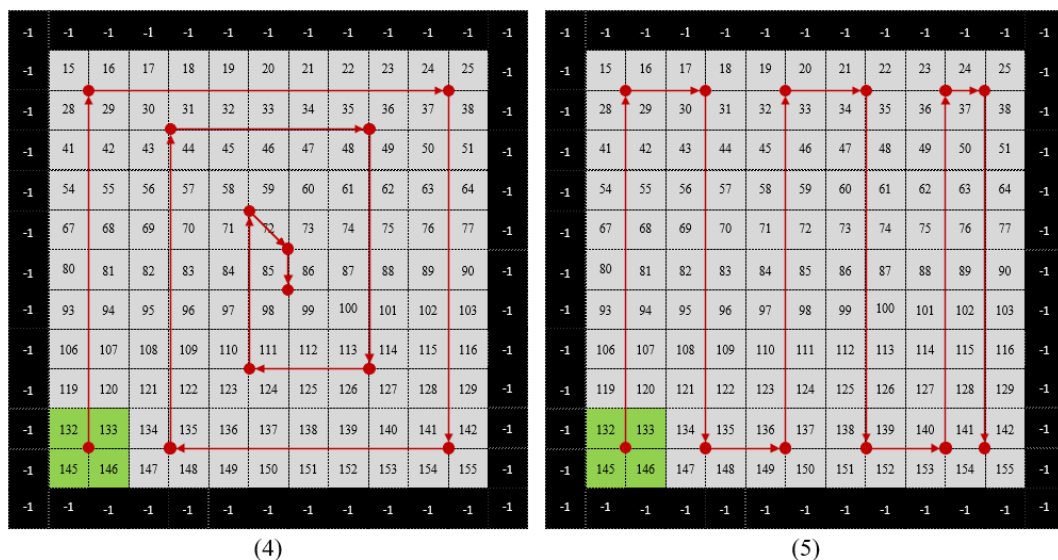


图 3-12 加工环境(a)下磨抛轨迹

由图 3-12 可得, 在一个工件表面, 磨头占据网格数与分割地图网格大小不一样, 确保磨抛轨迹可以完全覆盖工件表面, 磨抛轨迹路线导航点位置、磨抛轨迹长度发生改变。

(3) 改变磨抛加工环境, 在磨抛加工环境(b)下, 磨头状态仍定义为 4 个单位网格, 磨抛轨迹导航路线如下图。

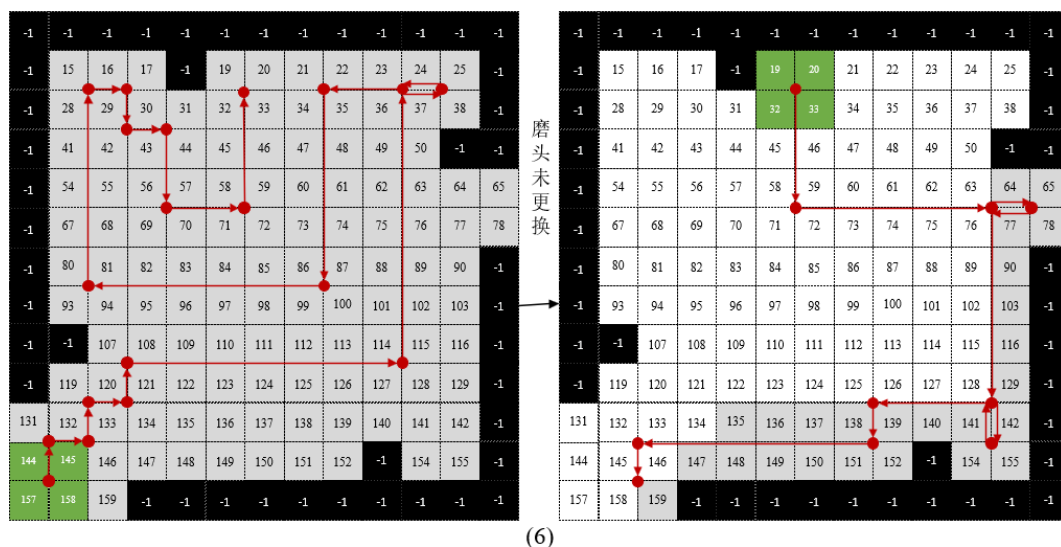


图 3-13 加工环境(b)下磨抛轨迹

由图 3-13 可得, 改变磨抛加工环境, 磨头占据网格数与分割地图网格大小也不一样时, 需要磨抛两次, 确保磨抛轨迹可以完全覆盖工件表面。

以上结果表明, 研究提出的具有预训练 RL 模型的 CCPP 是一种可在真实环境中应用, 实现磨抛轨迹规划覆盖工件表面的方法。评估磨抛轨迹规划策略, 一般采用机器人磨抛效率、磨抛覆盖面积百分比等指标。通常, 磨抛效率可以用路径规划算法完成任务的总时间或占用资源量衡量; 覆盖面积百分比表示轨迹规划策略生成的轨迹覆盖了地图的总体百分比, 可以计算生成路径所覆盖的地图区域与整个地图区域的比率。

如表 3-9, 比较上述不同的磨抛轨迹模拟导航, 得到在各磨抛轨迹路线的磨抛效率、地图覆盖率、轨迹长度。

表 3-9 不同的磨抛轨迹路线比较

磨抛轨迹路线	磨抛效率	地图覆盖率	轨迹长度
(1)	90.232%	100%	121
(2)	90.232%	100%	121
(3)	88.675%	100%	158.225
(4)	94.521%	100%	63.414
(5)	94.536%	100%	63
(6)	93.873%	100%	77

由表分析可得, 磨抛加工地图覆盖率都能达到 100%的情况下, 磨抛轨迹(1)和(2)的磨抛效率和轨迹长度相同; 轨迹(3)的磨抛轨迹长度较长, 加工效率最低; 而轨迹(4)、(5)、(6)的磨抛效率较高, 轨迹长度较短。比较以上不同的磨抛轨迹规划路线, 表明当加工环境相同时, 磨抛轨迹长度越短, 磨抛效率越高; 当加工环境不同时, 比较复杂环境下磨抛效率降低。此外, 在加工环境网格化大小一致时, 磨具占据网格大小也影响磨抛, 在保证磨抛精度要求的前提下, 磨头占据网格数多些可以缩短轨迹长度, 提高磨抛效率。

3.5 本章小结

本章节研究讨论了基于强化学习的 MDP 方法, 提出了磨抛轨迹规划策略。再融合 MDP 的 RL 方法, 提出一种基于 CCPP 的磨抛轨迹规划方法。根据解析 CCPP 算法原理, 定义了磨抛轨迹规划中的状态空间、行为空间和奖励函数。在网格分解表示和贪婪策略搜索下, 网格化表示了磨抛轨迹规划工作空间。通过 ACER 训练了磨抛轨迹规

划的 Actor-Critic 决策网络模型，使用 RMS Prop 优化器优化了损失函数。最后完成仿真实验，分析实验结果，得到了在不同磨抛加工环境下磨抛轨迹规划路线的磨抛效率、覆盖率和轨迹长度的差异，验证了机器人磨抛轨迹自主规划方法的可行性。

第4章 基于知识图谱的磨抛工艺知识可视化

4.1 磨抛工艺知识图谱构建

4.1.1 磨抛工艺知识图谱结构设计

采用自顶向下和自底向上结合的方法构建磨抛工艺知识图谱，构建内容如图 4-1 所示，包括知识获取、知识结构建模和知识图谱构建。

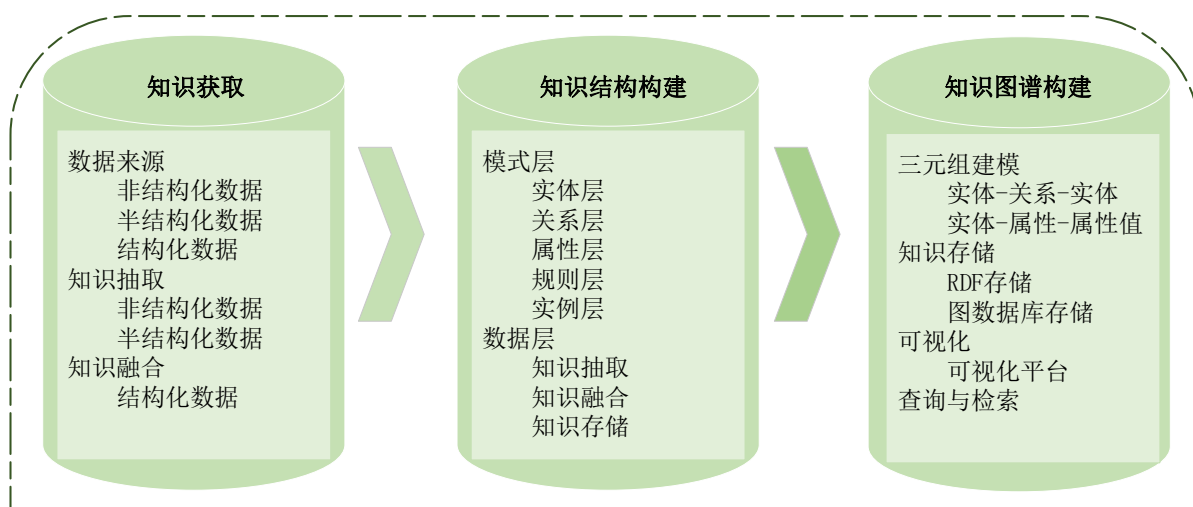


图 4-1 磨抛工艺知识图谱构建内容

磨抛工艺数据类型分为非结构化、半结构化和结构化。非结构化数据主要来源于图像、文件和音频等数据；半结构化数据主要来源于 XML、JSON、日志文件和配置文件等数据；结构化数据则主要来源于实验数据和传感器数据、及生产过程记录的数据等。结构化数据具有易于管理分析、准确性高和数据定义明确等优点，可以直接用于构建知识结构。然后完成三元组建模，将磨抛工艺知识归属于实体、关系、属性和属性值类别中，并存储。

知识图谱的逻辑结构包含包括模式层(实体层、关系层、属性层、规则层和实例层)和数据层(知识抽取、知识融合和存储)。在知识图谱的数据层，知识数据通常表示为一个知识图谱 G ， G 中包含一系列三元组，用下式表示。

$$G = \{(h, r, t) \in E \times R \times E\} \quad (4-1)$$

$$G = \{(e, p, v) \in E \times P \times V\} \quad (4-2)$$

其中 E 和 R 分别表示实体集和关系集， P 和 V 分别表示属性集和属性值的集合。

根据知识图谱数据结构，表 4-1 和 4-2 列举展示了部分三元组表示的磨抛工艺知识。

表 4-1 部分磨抛工艺知识三元组表示结构示例

Entity	Relation	Entity
磨抛工艺	包含	工艺步骤
磨抛耗材	类型	砂轮砂粒
砂轮速度	属于	工艺参数

表 4-2 部分磨抛工艺知识三元组表示结构示例

Entity	Attribute	Attribute value
砂轮砂粒	规格	0.125mm
砂轮速度	参数	200mm/s
磨抛机器	型号	MP-2S

然后, 根据磨抛工艺知识的三元组建模结构, 磨抛工艺知识存储在图数据库, 再结合可视化平台, 构建知识图谱可视化。

4.1.2 磨抛工艺知识图谱可视化框架

在明确知识存在形式的基础上, 知识形式化用三元组表示, 完成磨抛工艺知识从本体到图谱映射的可视化。利用知识图谱统一表达磨抛工艺知识可实现知识可视化, 磨抛工艺知识图谱可视化框架如图 4-2 所示。

知识图谱驱动的磨抛工艺可视化框架分为三个层次, 即知识层、映射层和图谱层。

(1) 知识层。磨抛工艺知识的物理存储层, 包括磨抛工艺的知识 and 信息, 磨抛工艺知识包含行业规范、技术标准、工艺步骤、磨抛路径、磨抛轮廓、工艺参数、加工策略、质量标准、故障处理等内容。初始的工艺知识通常以自然语言或非结构化数据的形式存在。

(2) 映射层。表达磨抛工艺知识, 将知识抽取为知识特征向量, 表示为三元组结构, 知识层中的知识映射到向量空间或模型中, 有助于知识量化, 并支持推理。

采用向量表示知识特征, 定义一个简单的机理模型, 实体由各属性加权和组成。设 E 为实体, A 为属性, V 为向量表示, ω 为权重, 实体 E 的表示 V_E 可以用下式表示。

$$V_E = \sum_{i=1}^n w_i \cdot V_{A_i} \quad (4-3)$$

其中, n 为属性的数量, V_{A_i} 为属性 A_i 的向量表示。

(3) 图谱层。建立在映射层之上, 将磨抛工艺知识从本体映射到图谱。构建知识图谱, 其中实体和关系的三元组形式被明确表示为图结构。这是机器可理解的结构化知

识。

在图谱层，需要考虑关系的影响，假设关系对实体之间的连接有贡献。设 R 为关系， V_R 表示关系向量，那么实体 E_1 和 E_2 之间的关系表示 $V_{E_1 E_2}$ 可以用下式表示。

$$V_{E_1 E_2} = V_{E_1} \cdot V_R \cdot V_{E_2}^T \quad (4-4)$$

其中， V_{E_1} 和 V_{E_2} 分别是实体 E_1 和 E_2 的向量表示， T 表示转置。

44

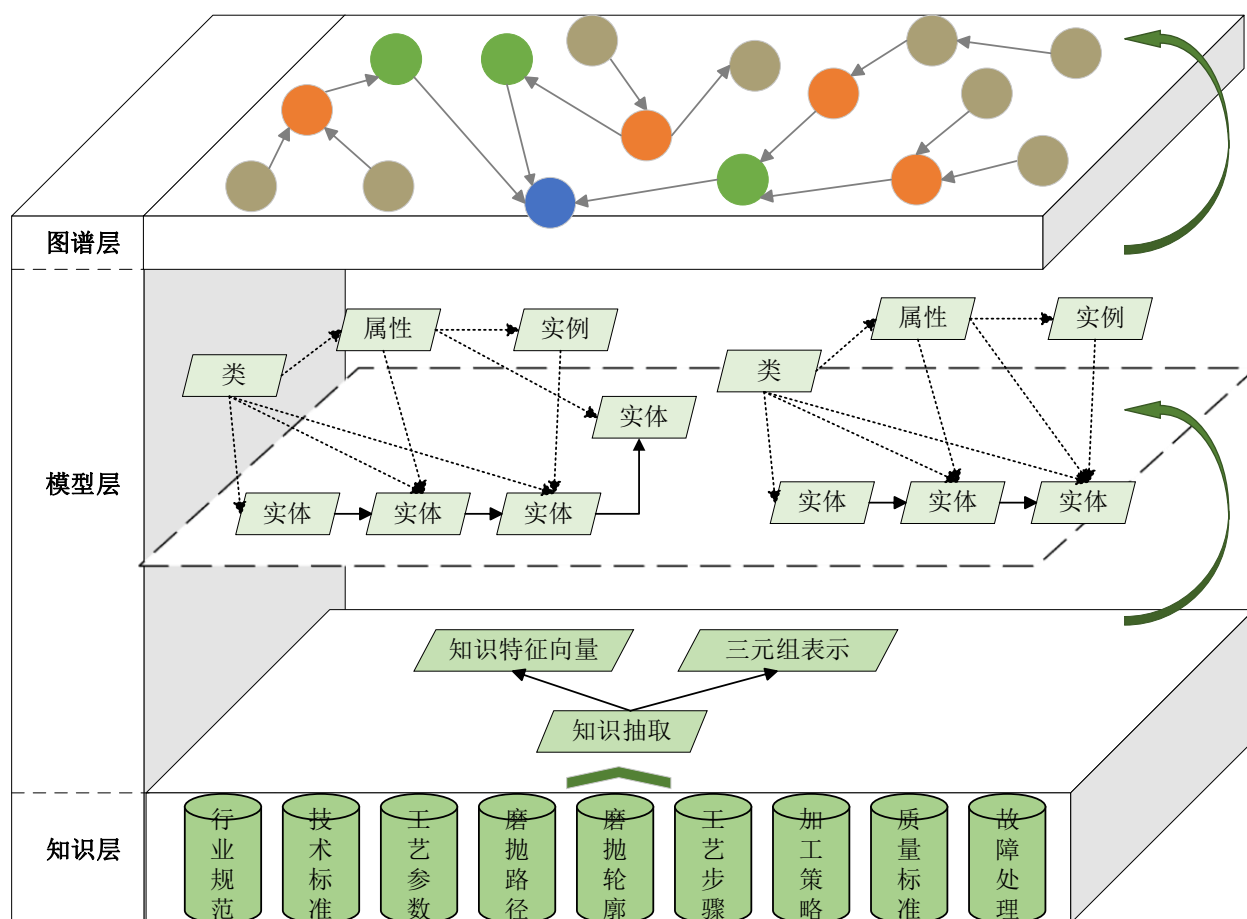


图 4-2 磨抛工艺知识图谱可视化框架

4.2 磨抛工艺知识图谱模式层构建

4.2.1 磨抛工艺知识图谱模式层结构

知识图谱的模式层用于描述实体之间的关系和属性，结合磨抛工艺的实际情况，构建磨抛工艺知识图谱的模式层，定义图谱的结构，包括实体、关系、属性等元素。建立清晰而有层次的知识模型。

构建磨抛工艺知识图谱的模式层，实体概念、关系、属性、规则和实例的集合。构建磨抛工艺知识图谱模式层的内容如表 4-3。

表 4-3 磨抛工艺知识图谱模式层构建内容

内容	含义	举例
定义实体类型	确定知识图谱中存在哪些类型的实体。每种实体类型都应该有明确定义的名称和属性特征。	从磨抛工艺知识中抽取“工件”、“产品”、“工艺步骤”、“加工策略”、“设备工具”、“工艺参数”和“磨抛材料”等实体。
定义关系类型	关系类型应该清晰地描述两个实体之间的关系，并可以通过属性加以详细描述。	“工艺步骤”和“工艺参数”有关系类型，如“使用”。
定义实体属性	定义各实体类型的属性。属性是实体的特征或特性，如文本、数字、日期等类型的数据。	“设备工具”实体，有属性“名称”、“型号”和“编号”等。
确定约束条件	定义知识图谱中实体和关系的约束条件，包括必填属性、唯一性约束等。每个磨抛工艺知识定义的实体必须有名称属性。	定义磨具实体名称为“磨头”，且名称属性在整个知识图谱中唯一。
建立层次结构	在知识图谱构建需要的情况下，可以为实体类型建立层次结构。便于知识图谱更灵活地组织和查询数据。	“工艺参数”实体类型分为“进给速度”、“转速”、“表面粗糙度”等多个子类型。

根据以上知识图谱模式层的构建要求，本文构建出来的磨抛工艺知识图谱模式层包含工艺流程、加工策略、加工规则、故障处理、缺陷检测、应用领域、设备工具、工艺参数和磨抛材料 9 类一级实体，而后向下延伸构建，如图 4-3 所示。

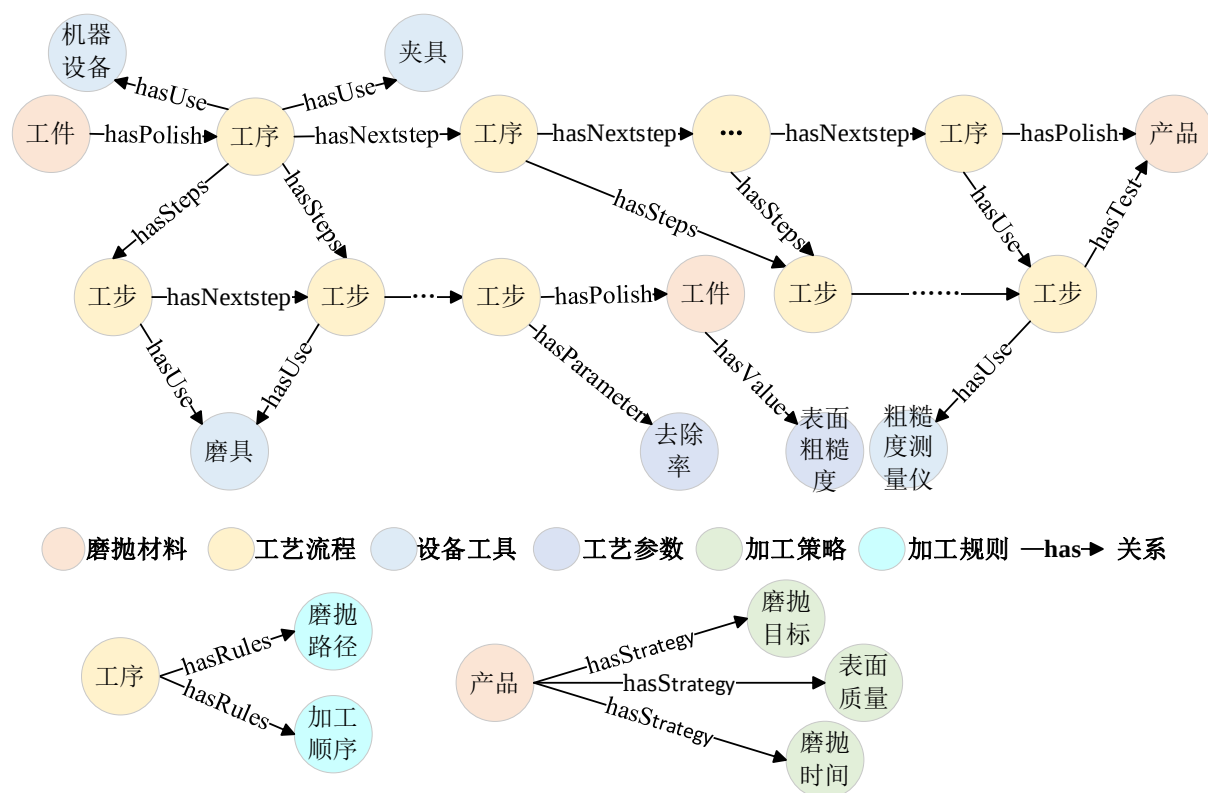


图 4-3 磨抛知识图谱模式层结构设计

根据磨抛工艺知识图谱模式层结构, 模式层的内容定义为实体概念层、关系层、属性层、规则层和实例层。

磨抛工艺知识图谱的实体概念层包含实体概念、磨抛现象和工艺流程等。实体概念指描述磨抛作业的工艺概念和相关专业术语，例如磨抛、工艺步骤和设备工具等。磨抛现象指描述磨抛作业过程客观存在的表现形式，如粗磨、磨削和抛光等。工艺流程根据不同的磨抛任务要求，如磨抛目标和磨抛结果、磨抛规则等组成的磨抛加工的工作流程。再逐级向下建立实体层，根据上下规则的约束，按不同的层次划分为多个实体的集合。例如，磨抛工艺知识图谱实体层有“磨抛工艺步骤、材料、设备工具等”等内容。如图 4-4 所示。

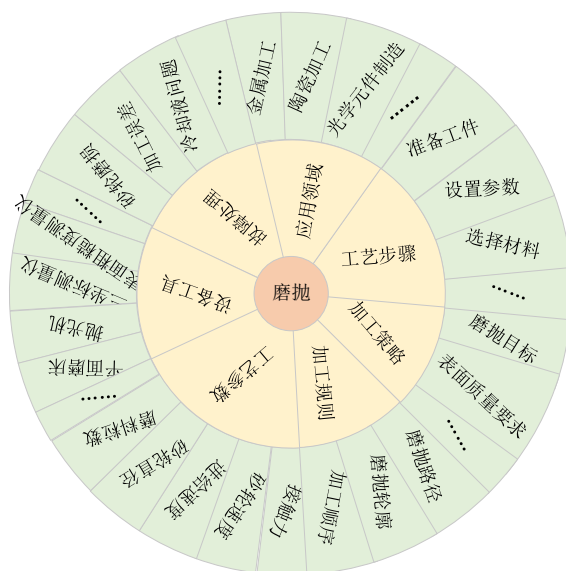


图 4-4 磨抛工艺知识图谱实体层(部分)

关系层主要描述概念之间的相互作用。在磨抛工艺中，可以包含磨料关系，连接工艺步骤和磨料实体；使用设备关系，连接工艺步骤和设备实体；生成产品关系，连接工艺步骤和产品实体等。语义关系可以包括设备之间的同义关系、近义关系，例如，磨石机/磨片机/研磨机。

属性层用于描述每个概念的内在和外在特征。以磨抛工艺中的设备为例展示属性

层，包含了设备名称、设备类型、设备规格等核心必填属性，同时可能包含了制造商、操作要求等辅助选填属性。子概念应自动继承父概念的属性。

(4) 规则层

在磨抛工艺中，用于定义磨抛工艺步骤和使用的设备之间的关系，例如，定义设备规则：如果工艺步骤是粗磨，使用设备应该是粗磨机。如果工艺流程是精磨，那么使用的设备应该是精磨机。如果工艺步骤是抛光，也需要使用规定的抛光机。或定义磨料使用规则：不同类型的工艺流程可能需要不同类型的磨料，规则定义了每种磨料适用于工艺流程和磨抛对象。

(5) 实例层

实例层包含具体实体的对象，例如特定的磨抛工艺过程、设备、原材料等。如表 4-4，此磨抛工艺加工流程为例，展示磨抛工艺知识实例层，描述加工对象的名称、加工工序、使用的设备、所需的材料和加工参数等。

表 4-4 磨抛工艺知识实例

工件名称	加工工序	使用设备	使用材料	表面粗糙度/微米	加工时间/分钟
陶瓷器	粗磨-精磨	研磨机	陶瓷砂	2	100
陶瓷器	抛光	抛光机	抛光颗粒	0.51	40

4.3 磨抛工艺知识图谱数据层构建

4.3.1 基于 Bi-LSTM-CRF 模型的命名实体识别

命名实体识别（Named Entity Recognition, NER）又称为实体抽取，在知识图谱中，NER 通常用于从文本中提取实体，构建或更新图谱的实体节点。NER 常用模型综合性能较好的是 Bi-LSTM 与 CRF 组合的 Bi-LSTM-CRF 模型^[92]，本文磨抛工艺知识图谱数据层实体抽取任务使用该模型，完成序列标注。

Bi-LSTM-CRF 模型的作用机制是，输入层将文本序列中的每个单词映射为词向量；在 Bi-LSTM 层通过前向和后向 LSTM 捕捉单词的上下文信息，形成双向上下文表示；在全连接层将 Bi-LSTM 的输出映射为标签空间，为每个标签分配得分；在 CRF 层利用条件随机场考虑标签之间的依赖关系，计算全局最优标签序列。图 4-5 为 Bi-LSTM-CRF 模型框架。

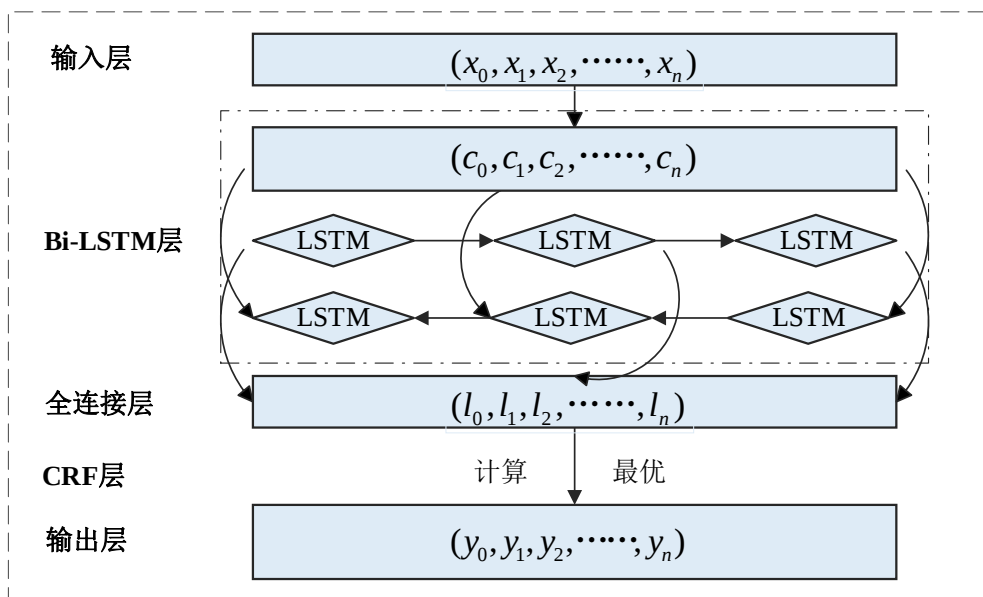


图 4-5 Bi-LSTM-CRF 模型框架

(1) 双向长短时记忆网络(Bi-LSTM)

Bi-LSTM 架构主要由前向 LSTM 和后向 LSTM 组成。前向 LSTM 接受输入序列，从左到右逐步处理，捕捉每个时间步的上下文信息；后向 LSTM 以相反的顺序处理输入序列，从右到左逐步捕捉上下文信息。Bi-LSTM 作用机理利用 LSTM 包含的记忆单元，能够在处理序列时记住长期依赖关系。通过遗忘门、输入门和输出门控制信息流动，允许模型决定何时记住、忘记或输出信息。

Bi-LSTM 的前向和后向计算公式如下。

$$\text{前向计算} \quad \vec{h}_t = \text{LSTM}(\vec{h}_{t-1}, x_t) \quad (4-5)$$

$$\text{后向计算} \quad \overleftarrow{h}_t = \text{LSTM}(\overleftarrow{h}_{t+1}, x_t) \quad (4-6)$$

这里 $\vec{h}_t$ 和 $\overleftarrow{h}_t$ 分别表示前向和后向 LSTM 在时间步 t 的隐藏状态， h_{t-1} 是输入序列前一时刻的隐层状态， x_t 是输入序列在时间步 t 的表示。

(2) 条件随机场(CRF)

CRF 常用于实体类标记任务，它通过处理前一模块的输出结果，获取具有最高准确性的标签序列。CRF 的架构主要由全连接层和 CRF 层组成。全连接层将 Bi-LSTM 的输出映射到标签空间；CRF 层利用条件随机场建模标签之间的依赖关系，考虑整个序列的标签排列概率。CRF 作用机理考虑相邻标签之间的转移概率，确保预测标签序列合理。并全局归一化所有可能的标签序列，CRF 层推动模型学习全局最优的标签序列。

全连接层标签得分计算公式如下。

$$s_t = W \cdot [\vec{h}_t; \vec{h}_t] + b \quad (4-7)$$

其中, W 是权重矩阵, b 是偏置向量, $\cdot$ 表示向量相乘。

在 CRF 中, 预测标签序列概率的输入公式如下。

$$P(y|x) = \frac{\exp(\sum_{t=1}^T \alpha_t(y_t))}{Z(x)} \quad (4-8)$$

其中, $P(y|x)$ 表示在给定输入序列 x 的条件下预测标签序列 y 的概率。

$\alpha_t(y_t)$ 是在时间步 t 预测标签 y_t 的局部分数 (local score), 通常为前一模块 (如全连接层) 输出的得分。

$Z(x)$ 是归一化项, 它是所有可能的标签序列的分数之和, 确保了概率的总和为 1。

输出序列概率分布公式通常表示如下。

$$P(Y|X) = \frac{\exp(\sum_{t=1}^T (\sum_i \lambda_i f_i(y_t, y_{t-1}, X, t) + \sum_i \mu_i g_i(y_t, X, t)))}{Z(X)} \quad (4-9)$$

其中, Y 是标签序列, X 是输入序列。 λ_i 和 μ_i 是模型参数。

$Z(X)$ 表示归一化因子, 确保所有可能标签序列的概率之和等于 1。

$f_i(y_t, y_{t-1}, X, t)$ 定义在标签 y_t 和 y_{t-1} 上的特征函数。

$g_i(y_t, X, t)$ 定义在标签 y_t 上的特征函数。

在条件随机场(CRF)的训练过程中, 常用损失函数通常是负对数似然损失函数 (Negative Log Likelihood, NLL), 也称为交叉熵损失函数。负对数似然损失函数衡量了模型对于真实标签序列的预测概率的不确定性。

假设 Y^* 是真实的标签序列, $P(Y^*|X)$ 是模型对于真实标签序列的概率分布, 损失函数 L 可以定义为负对数似然, 如下公式所示。

$$L(\theta) = -\log P(Y^*|X) \quad (4-10)$$

其中, θ 表示模型的参数。

在条件随机场(CRF)中, 译码选择最优标签序列时, 通常使用维特比算法 (Viterbi Algorithm)。维特比算法通过动态规划来寻找具有最大概率的标签序列。

最优标签序列的计算公式如下。

$$\hat{Y} = \arg \max_Y P(Y|X) \quad (4-11)$$

使用维特比算法, 上述公式可以转化为如下公式。

$$\hat{Y} = \arg \max_Y \prod_{t=1}^T P(y_t | y_{t-1}, X, t) \quad (4-12)$$

$\hat{Y}$ 表示最优标签序列, $P(y_t | y_{t-1}, X, t)$ 表示条件概率, 可由模型的输出得到。

磨抛工艺知识图谱实体抽取任务定义为, 借助高效的 Bi-LSTM-CRF 模型, 从源数据中准确识别与磨抛工艺相关的实体, 涵盖磨抛设备、工艺参数、工艺故障、工艺故障现象、工艺故障原因、工艺处理方案、质量监测工具等多方面信息。如表 4-5 为磨抛工艺知识实体抽取示例。

表 4-5 实体抽取示例

源数据	实体抽取
磨抛机在操作时出现异常声音, 导致磨抛效果不佳	设备名称“磨抛机”, 工艺故障“异常声音”, 工艺现象“磨抛效果不佳”
抛光液供给不足, 导致磨抛片无法正常运行	磨抛工具“磨抛片”, 工艺故障“抛光液供给不足”, 故障现象“无法正常运行”

通过实体抽取, 能够系统地整理和抽象磨抛工艺相关的知识, 为构建全面且高效的知识图谱打下坚实基础, 方便精准从磨抛工艺数据中获取有用信息。

4.3.2 基于 Attention-Bi-LSTM 模型的关系抽取

知识图谱中的关系抽取是自然语言处理和信息抽取领域的一个重要任务, 其目标是从文本中提取实体之间的关系。关系抽取是一个复杂的任务, 有多种方法可以提取文本中实体之间的关系。传统模板方法存在构建代价大、可移植性差、难以维护等问题。为了解决这一难题, 引入了基于模型学习的方法, 将关系抽取视为关系分类过程, 利用机器学习技术在标注语料上训练分类器, 以判断关系类型。实践证实^[93-94], 基于注意力机制的 Bi-LSTM 关系抽取模型^[95]在英文和中文数据处理上都取得了良好效果。因此, 本文磨抛工艺知识图谱数据层关系抽取任务选用 Attention-Bi-LSTM 模型。

如图 4-6, Attention-Bi-LSTM 模型包含输入层、嵌入层、双向 LSTM 层、注意力层、输出层五个部分。

(1) 输入层(Input Layer)

接收原始文本数据或者预处理后的文本, 将文本序列输入到模型中, 设文本序列长度为 T 。

(2) 嵌入层(Embedding Layer)

输入的文本序列映射为低维稠密向量, 通常使用词嵌入技术。有助于模型理解词语之间的语义关系。

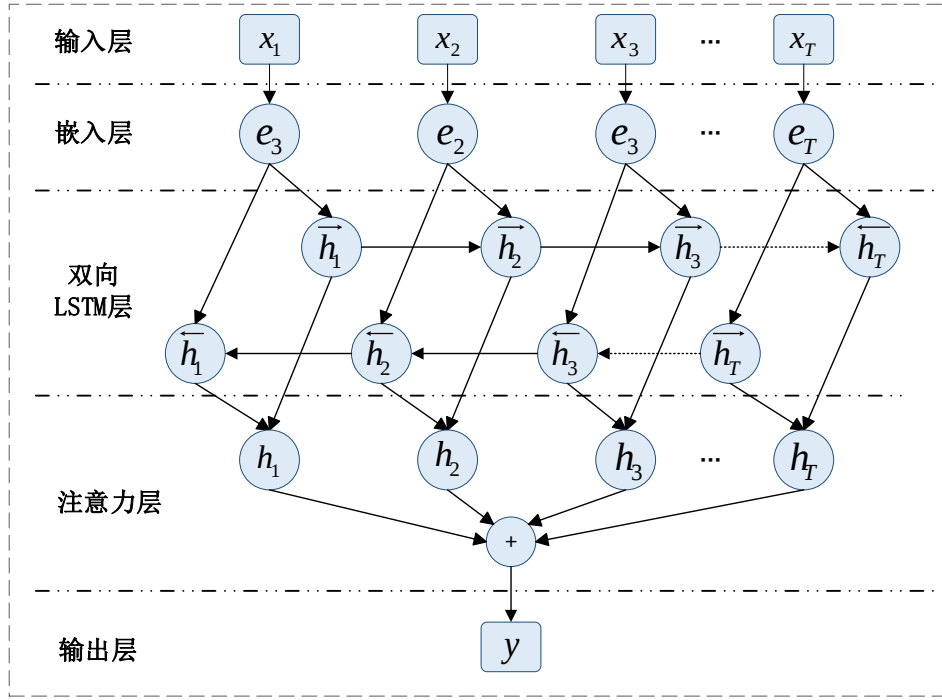


图 4-6 Attention-Bi-LSTM 模型框架

(3) 双向 LSTM 层(Bidirectional LSTM Layer)

使用双向 LSTM 结构序列建模。包括两个 LSTM，一个正向顺序处理输入序列，另一个逆向顺序处理输入序列。正向 LSTM 和逆向 LSTM 的隐藏状态拼接在一起，提供整个上下文信息的全面理解。构建句子特征 H 表示如下公式所示。

$$H = [h_1, h_2, h_3, \dots, h_T] \quad (4-13)$$

(4) 注意力层(Attention Layer)

注意力机制用于在序列中赋予不同部分的输入文本不同的注意力权重。对于每个时间步，模型计算一个注意力权重，用于聚焦在输入序列的特定位置。这通过计算当前时间步的 LSTM 输出与所有时间步的 LSTM 输出之间的权重获得。模型能够更加关注与任务相关的信息，提高了处理长距离依赖关系的能力。对于每个时间步 t ，需要计算注意力权重 $\alpha_{t,i}$ 如下。

注意力分数(score)计算公式如下。

$$\text{score}(h_t, h_i) = \tanh(W_h h_t + U_h h_i) \quad (4-14)$$

注意力权重计算公式如下。

$$\alpha_{t,i} = \frac{\exp(\text{score}(h_t, h_i))}{\sum_{i=1}^T \exp(\text{score}(h_t, h_i))} \quad (4-15)$$

其中， W_h 和 U_h 是可学习的参数， T 是序列长度。

利用注意力权重调整编码器的输出，如下公式。

$$c_t = \sum_{i=1}^T \alpha_{t,i} h_i \quad (4-16)$$

(5) 输出层(Output Layer)

注意力机制的输出 c_t 送入全连接层，最终输出关系抽取的结果。输出层通常使用 **softmax** 激活函数，模型的输出映射为各类别的概率分布。模型输出层可用如下公式表示。

$$y = \text{softmax}(W \cdot c_t + b) \quad (4-17)$$

式中的 W 表示权重矩阵， b 表示偏置向量。

磨抛工艺知识图谱关系抽取任务中，本文定义任务目标为，利用关系抽取算法，从源数据中识别与磨抛工艺相关的内容，包括使用设备、设备组合、参数设置、包含关系、故障关系、处理方法关系、应用关系等，并将其作为实体的关系部分。如表 4-6 为磨抛工艺知识图谱关系抽取示例。

表 4-6 关系抽取示例

源数据	关系抽取
“由于磨抛设备过载，且冷却系统未能及时散热，导致磨抛机械结构损坏，温度过高，系统报警，应当检查冷却系统是否正常运行，若冷却剂不足应当及时添加。”	实体“磨抛设备”与实体“冷却系统”之间存在的“故障关系”；实体“冷却系统”和实体“冷却剂”之间存在“包含关系”。

通过关系抽取，可以提取出源数据中实体对之间的关联信息，为磨抛工艺知识图谱的构建提供有力支持。

4.3.3 基于规则匹配方法的属性抽取

在知识图谱中，实体表示现实世界事物，而属性表示事物的特征或属性。磨抛工艺知识图谱中属性抽取从文本数据中抽取磨抛实体的属性信息，为磨抛实体节点和概念节点添加更多的语义信息，如图 4-7，从磨抛工艺信息文件抽取属性。

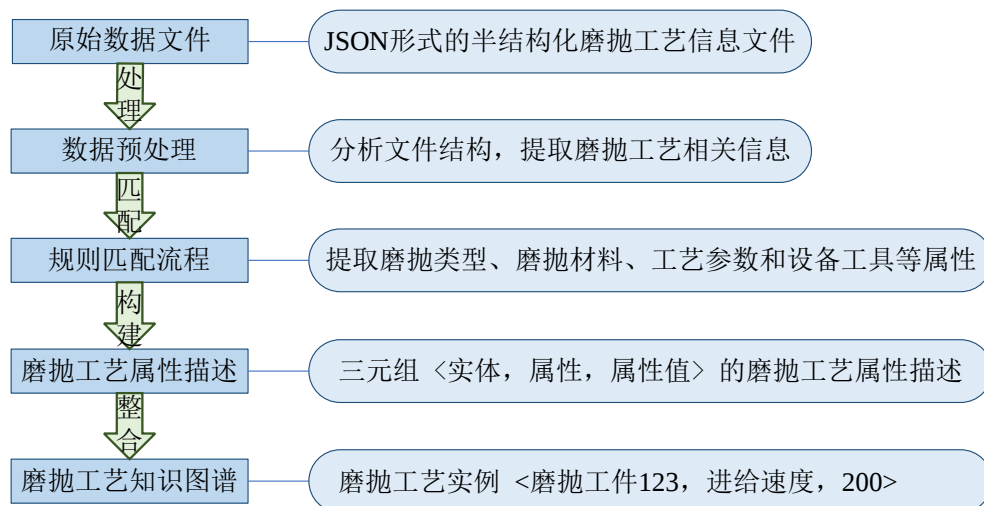


图 4-7 磨抛工艺信息文件属性抽取

使用基于规则的匹配方法完成磨抛工艺知识图谱中的属性抽取任务。通过分析源数据文件，将磨抛工艺知识图谱属性抽取任务定义为，包括磨抛工艺类型、磨抛材料、磨抛速度、磨抛时间、磨抛压力等属性信息。考虑到磨抛工艺知识图谱中实体属性信息主要源自 Json 格式的半结构化文件，因此采用规则匹配的方法解析这些数据文件，提取磨抛工艺类型、磨抛材料、磨抛速度、磨抛时间、磨抛压力等属性信息，构建磨抛工艺属性描述，采用<实体，属性，属性值>的表达形式。研究可以从磨抛工艺知识文本信息中抽取出<磨抛工件 123，进给速度，200>、<磨抛工件 123，磨抛时间，30>、<磨抛工件 123，磨抛材料，陶瓷>与<磨抛工件 123，磨抛工艺类型，湿磨>等属性信息。

4.3.4 磨抛工艺知识融合

(1) 实体对齐

实体对齐匹配和对应不同数据源或知识图谱中的相似实体。在磨抛工艺中，实体可以包括不同材料、设备、工艺参数等。实体对齐通过识别和建立实体之间的关系，整合不同数据源的信息。这有助于消除信息孤岛，提高数据的一致性和完整性。在磨抛工艺中，实体对齐可以帮助确定不同材料的物理性质、设备之间的关联，从而优化工艺参数。

在磨抛工艺中，可以通过分析材料的物理化学性质、设备的工作原理等方面的信息评估实体之间的相似度。通过计算相似度，采用图匹配算法等方法对齐实体。综合使用这些算法，先用相似度计算排除不够相似的实体，再用语义匹配和图匹配更深层次对齐。

相似度计算用于衡量两个实体之间的相似程度。该方法基于实体属性或特征的数

学计算，确定它们的相似程度和对齐操作。使用余弦相似度方法，该模型将实体表示为特征向量，两个向量点乘数值(余弦相似度)反映了实体相似度。计算公式如下。

$$\text{Cosine Similarity}(A, B) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \cdot \|B\|} \quad (4-18)$$

其中， A 和 B 是两个实体的特征向量， $A \cdot B$ 是向量内积， $\|A\|$ 表示向量的模。

语义匹配关注实体之间的语义相似性，而不仅仅是基于属性值的相似度。将实体的语义信息转化为向量，并计算它们之间的相似度。Word Embeddings 通过实体描述文本映射到高维向量空间，可以利用向量之间的距离或相似度度量语义相似性。

图匹配关注实体之间的结构和拓扑关系。将实体及其关系表示为图，通过比较两个图的结构，找到相匹配的节点和边，从而确定实体之间的对应关系。图匹配算法中的子图同构算法(Subgraph Isomorphism)，通过寻找两个图之间的同构关系确定相似性。

综上所述，磨抛工艺知识融合实体对齐实现过程，研磨材料 A (Abrasive Material A) 定义为实体 1，其具有的物理性质有硬度、颗粒大小和成分，主要由制造商提供数据；磨抛工艺参数 B (Polishing Parameters B) 定义为实体 2，进给速度、接触力和加工时间，主要由工控系统提供数据。通过实体对齐，匹配研磨材料 A 和磨抛工艺参数 B ，建立它们间的关系。通过比较研磨材料的硬度和磨抛工艺的压力，可以确定在何种压力下研磨材料效果更佳。

(2) 关系关联

关系关联是在实体对齐的基础上，进一步建立实体之间的关系。在磨抛工艺中，关系可以包括材料与工艺参数的关联、设备之间的耦合关系等。关系关联揭示了实体之间的内在联系，为系统提供更全面的知识。通过关系关联，可以发现不同材料在特定工艺参数下的性能变化规律，也可以分析不同设备之间的协同效应，从而更好地调控整个磨抛工艺。

在磨抛工艺中，可以通过分析历史数据，挖掘不同实体之间的关系规律。同时，利用图分析算法，构建实体之间的关系网络，帮助理解实体间的复杂关系。

磨抛工艺知识融合关系关联实现过程，将研磨材料 A 与磨抛机械参数 B 的关系定义为关系 1，分析不同硬度的研磨材料在不同工作速度下的磨损情况。得出硬度较高的研磨材料在高速度下可能更有效，但也可能导致设备磨损的知识。将研磨工艺参数 $B1$ 与磨抛工艺参数 $B2$ 的关系定义为关系 2，其探讨了在一定温度范围内，不同的工作速度和压力如何影响研磨效果。得到高速度可能会提高研磨效率，但需要调整其他参数

以避免过度加热的知识。通过关系关联，建立了研磨材料与工艺参数之间的关系模型。这有助于优化磨抛工艺，例如选择合适的材料与参数组合，以提高生产效率同时确保产品质量。

通过实体对齐和关系关联，不同应用领域的磨抛工艺知识有机地整合，为磨抛加工提供了更全面的支持。

4.4 磨抛工艺知识存储

4.4.1 RDF 存储

传统的知识存储常使用资源描述框架(resource description frameworks , RDF) 本体网络语言 (Ontology Network Language, OWL) 等方式，表示知识图谱^[96]，具体形式为 SPO(subject, predicate, object)三元组。

RDF 定义了一组标准类及属性的层次关系词汇，构建轻量级的本体。使用 RDF 存储磨抛工艺知识本体库，则可利用 Protégé 软件描述并存储磨抛工艺知识的 OWL 本体，利用 Protégé 存储磨抛工艺知识本体概念类、关系、属性和实例的构造。如图 4-8 所示。

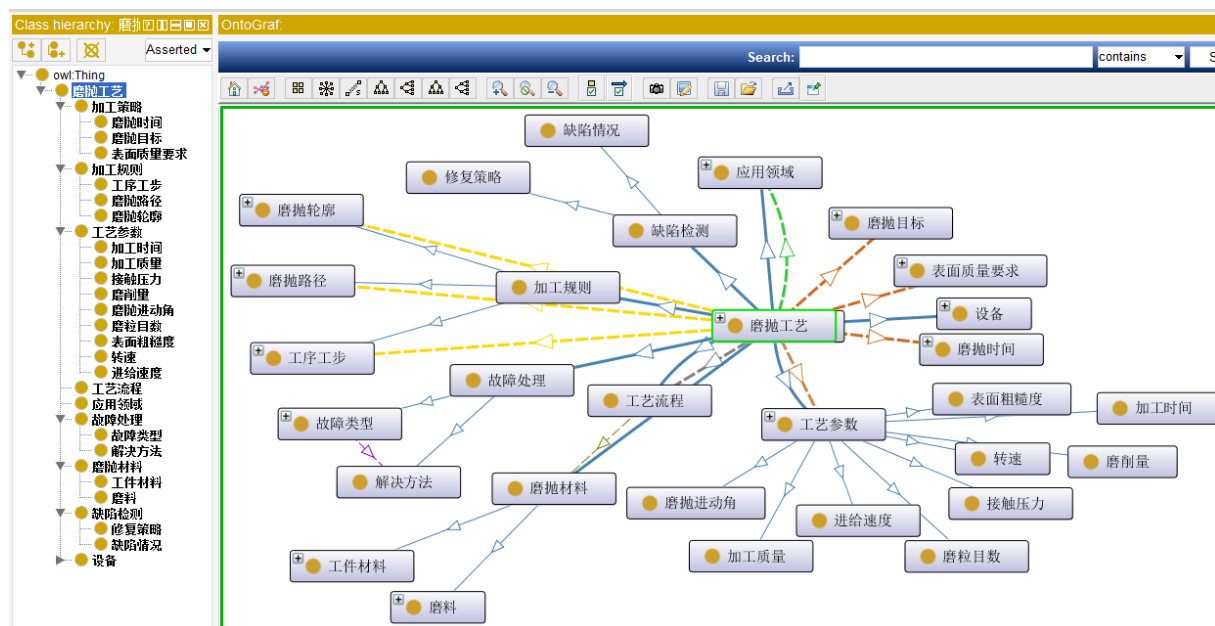


图 4-8 磨抛工艺知识本体库

4.4.2 Neo4j 存储

管理知识图谱数据层中的数据，图数据库存储知识图谱方法十分广泛，是一种基于图模型的数据存储方法，数据存储为节点、属性和关系，本研究选用 Neo4j 原生图数据库完成磨抛工艺知识的存储^[97]。

Neo4j 通过节点与边的结构存储知识，具有直观、可视、层次清楚等优点，提高了

图形数据建模的效率和灵活性。编程实现过程既可以直接将 Protégé 导出的 .owl 文件，转换为 .turtle 格式导入 Neo4j 中，达成一步写入所有三元组知识内容；也可以使用逗号分隔值 (comma-separated values, CSV) 文件批量导入知识数据。使用 Cypher 语言编程操作构建存储知识图谱信息，磨抛工艺知识抽取生成的所有三元组，运用 Neo4j 图数据库实现磨抛工艺知识存储和可视化。如图 4-9，存储的部分磨抛工艺知识图谱内容。

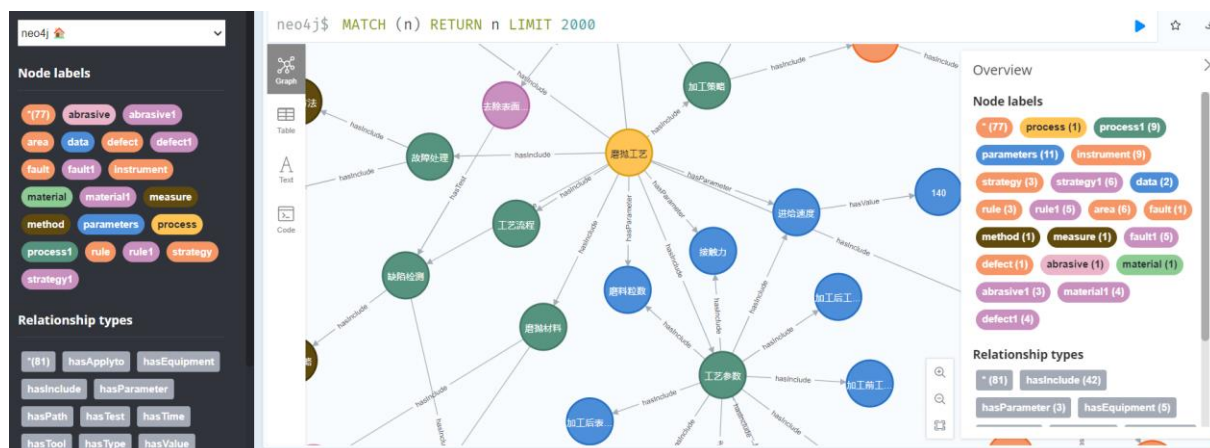


图 4-9 磨抛工艺知识图谱 Neo4j 存储(局部)

4.5 基于 Neo4j 的磨抛工艺知识图谱可视化

4.5.1 磨抛工艺知识获取

知识从多方面获取、不同角度提取，形成结构化数据，最终存入知识图谱。在实际应用中，可以根据具体情况选择最合适的知识获取方式。在大规模知识图谱的构建过程中，尤其需要在高效性和准确性之间找到平衡点，以确保知识获取的结果既具备较高的质量，又能够在合理的时间内完成，为智能决策和应用提供可靠的知识基础。

因而，为了实现磨抛工艺知识可视化过程，构建磨抛工艺知识图谱，本文从一些磨抛加工过程日志抽取磨抛工艺知识；收集一些磨抛机器人在磨抛加工过程中工控系统里的数据，根据数据结构类型，分析缺失值处理、数据格式标准化等预处理源数据。最终获取结构化的磨抛加工工艺知识信息。

以某碳化硅晶片磨抛加工为例，将加工工艺流程、方案和技术标准导入系统，提取磨抛工艺中的实体及其关系，并以三元组形式存入知识库。如表 4-7 所示，共抽取了 45 种实体类型和 65 种实体间关系。

表 4-7 抽取的实体类型及对应数量

实体类型	工件	设备工具	材料型号	工艺流程	工艺参数	参数值	产品
实体数量	1	6	8	6	7	16	1

4.5.2 实体和关系标签创建

在磨抛工艺知识图谱添加实体和关系时，需为它们创建相应的名称标签。如表 4-8，包含抽取的实体和关系标签及数量，序号 1-7 为磨抛工艺实体标签，序号 8-15 为磨抛工艺实体间关系标签。这样做不仅清晰说明了实体在知识图谱中的含义，也便于后续检索相关工艺知识内容。

表 4-8 抽取的实体和关系标签及数量

序号	类型	标签	数量
1	工件	workpiece	1
2	工艺流程	process/worksteps	1/5
3	工艺参数	parameters	7
4	参数值	values	16
5	磨抛材料	material/slurry/abrasive	7/2/1
6	设备型号	device/specifications	4
7	产品	product	1
8	工步	hasSteps	5
9	下一工步	hasNextstep	4
10	加工	hasPolish	5
11	使用	hasUse	13
12	有参数	hasParameters	13
13	数值是	hasValue	15
14	类型	hasType	8
15	检测	hasTest	2

根据上述磨抛工艺知识图谱模式层和数据层的构建，碳化硅晶片磨抛加工过程工艺知识图谱的实体创建 11 类实体标签和 8 类关系标签，如图 4-10。

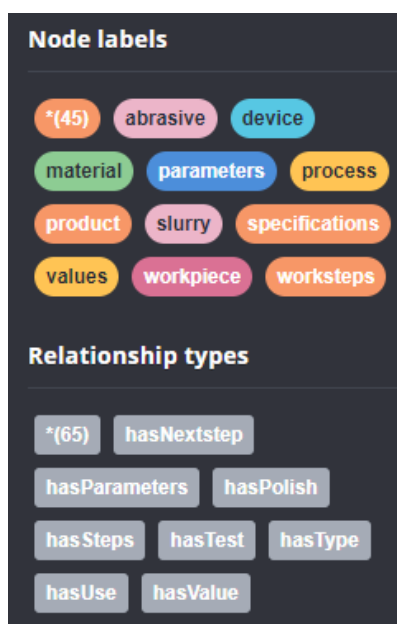


图 4-10 磨抛工艺知识图谱实体和关系标签创建

4.5.3 磨抛工艺知识图谱可视化

Neo4j 能够创建由顶点和边构建的有向图，直观展示数据之间的连接关系。编程实现图数据库中创建、修改、删除和检索实体和关系等。研究利用 Neo4j 图数据库构建和存储上述碳化硅晶片磨抛工艺知识图谱。实现知识图谱可视化的 Cypher 语句如下。

(1) 建立实体节点及其属性

create (n:实体标签 1{标题名称:' 属性名称 1',属性 1:' 属性值 1',属性 2:'属性值 2',.....,属性 n: '属性值 2'}),

(:实体标签 2{标题名称:' 属性名称 1',属性 1:' 属性值 1',属性 2:'属性值 2',.....,属性 n: '属性值 2'})

(2) 建立关系

match (a: 实体标签 1),(b:实体标签 2)

where (a.标题名称 1 = '实体名称 1' and b.标题名称 1 = '实体名称 2')

create(a)-[r: 关系名称]->(b) **return** r

(3) 显示所有实体节点及其关系

match (n:实体标签) **return** n

利用上述 Cypher 语句，在 Neo4j 存储图数据库中，创建碳化硅晶片磨抛加工实例，包含实体、属性和实体间关系等数据，构建的碳化硅晶片磨抛工艺知识图谱，可视化存储如图 4-11。

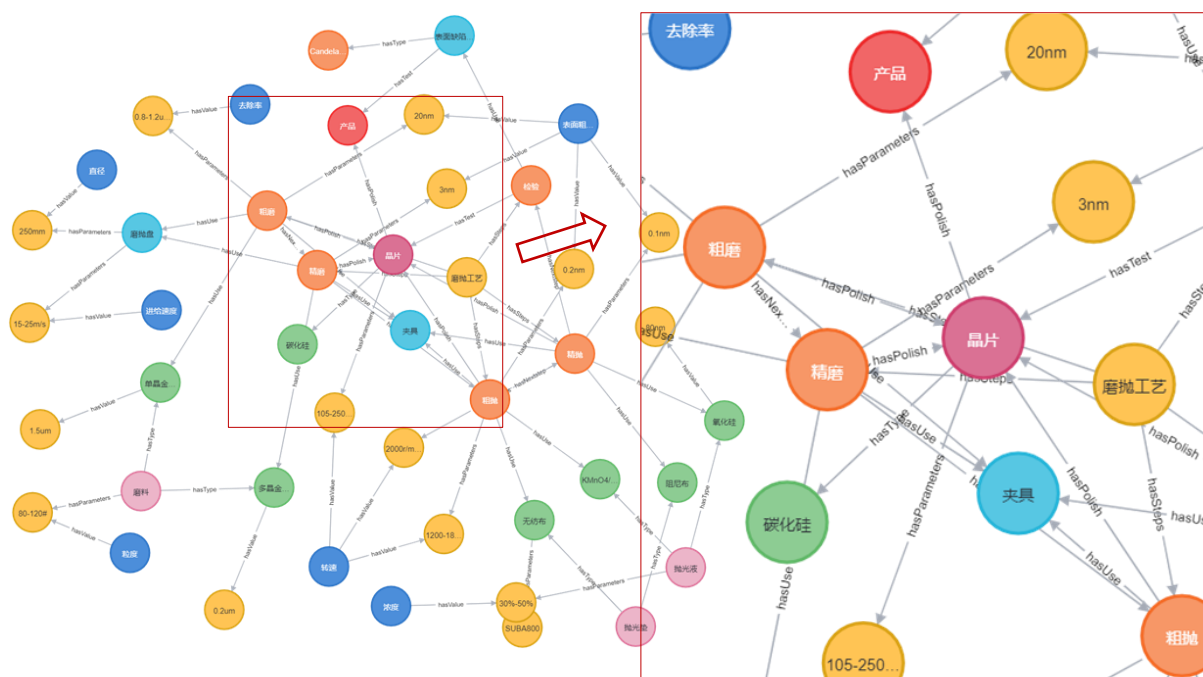


图 4-11 碳化硅晶片磨抛工艺知识图谱构建

4.6 本章小结

本章节根据磨抛工艺知识图谱结构和磨抛工艺知识图谱可视化框架，定义了磨抛工艺知识图谱模式层的内容为实体概念层、关系层、属性层、规则层和实例层，完成了知识图谱数据层的构建。在构建知识图谱数据层中，利用 Bi-LSTM-CRF 模型完成磨抛工艺知识的命名实体识别；使用 Attention-Bi-LSTM 模型完成关系抽取；基于匹配规则的方法抽取实体属性，完成了磨抛工艺知识融合。运用 RDF 存储和 Neo4j 图数据库存储磨抛工艺知识。基于 Neo4j，获取碳化硅晶片磨抛加工过程的工艺数据，编程存储在图数据库中，完成了碳化硅晶片磨抛工艺知识图谱构建和可视。

第5章 基于 Unity3D 的磨抛工艺知识可视化系统

5.1 可视化实现相关技术

5.1.1 KG 技术

知识图谱（KG）技术通过图形化方式展现数据，是一种复杂的数据结构。可视化技术使用户能更直观、快速地了解 KG 中的实体、属性和关系。用户可方便挖掘和分析数据，通过搜索、筛选、排序等操作高效发现模式和规律。交互式操作支持放大、缩小、旋转等，甚至编辑和增删改操作，提供更灵活使用体验。对于大规模复杂的 KG，可视化技术支持分层、分区、聚焦展示，帮助用户掌握和理解数据的本质和关系。随着人工智能和大数据技术发展，KG 应用日益广泛，成为重要的可视化研究方向之一。

如图 5-1 为 KG 实现可视化的关键过程，其中关键部分包含知识获取，KG 的构建更新和知识存储及可视化。

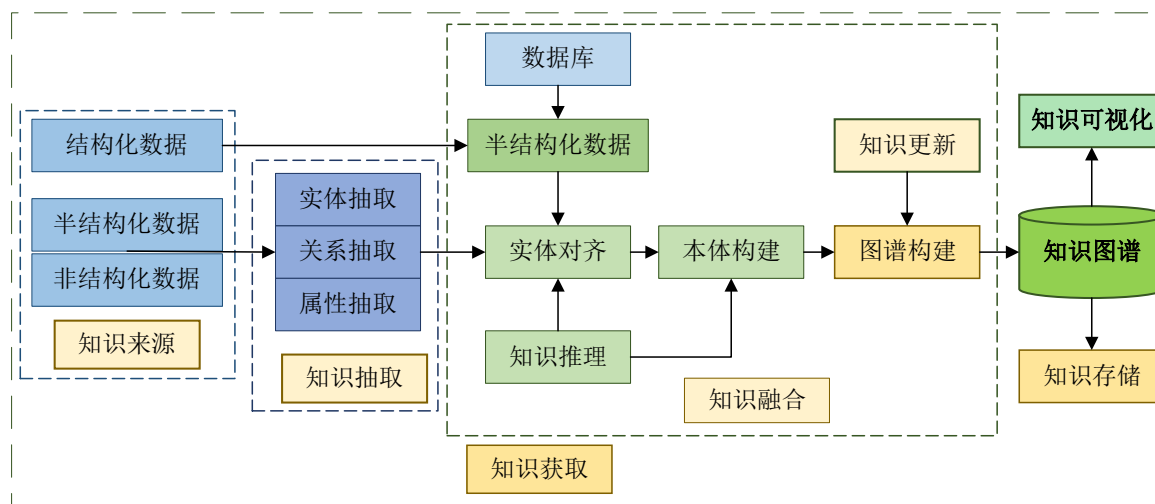


图 5-1 KG 可视化实现过程

5.1.2 三维可视化技术

通过计算机图形学和计算机视觉技术在三维空间中动态呈现工艺过程的方法称为三维可视化技术。这种技术能够帮助用户更直观地理解和分析复杂的工艺过程，从而做出更明智的决策。

在磨抛加工领域，三维可视化动态呈现磨抛工艺过程，再耦合磨抛工艺过程与工艺参数，用户可以更好地直观理解和学习磨抛加工过程的工序和工步，提高生产效率和产品质量；通过三维可视化工件的磨抛产品表面，发挥实时监控作用，用户可以更容易地检测到可能存在的缺陷、瑕疵或不均匀性，从而及早采取措施进行修正。综上，

系统使用三维可视化技术，在用户登录系统的时候可以操作仿真磨抛过程，有助于更深入地了解磨抛工艺原理。

利用三维可视化技术通过驱动可视化场景，实现磨抛加工过程全生命周期三维模拟。利用三维图形变换方法实现三维模型的平移、缩放和旋转等变换，变换原理如下。

在三维空间坐标系中，将点 (x, y, z) 沿着向量 (dx, dy, dz) 平移得到新的点 (x', y', z') ，运用如下公式。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

在三维坐标系中，将点 (x, y, z) 沿着三个轴向分别缩放，得到新的点 (x', y', z') ，运用如下公式。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & dx \\ 0 & S_y & 0 & dy \\ 0 & 0 & S_z & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

其中， S_x 、 S_y 和 S_z 分别表示沿 x 、 y 、 z 轴上的缩放因子。

在三维坐标系中，将点沿着某个轴旋转一定角度得到新的点，则用以下公式。

绕 x 轴旋转 θ 度，运用下式。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

绕 y 轴旋转 θ 度，运用下式。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

绕 z 轴旋转 θ 度，运用下式。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

综上，为了优化操作步骤，实现自由灵活的可视化操作界面，可以将平移、旋转和缩放变换组合成一个综合变换矩阵，综合变换矩阵计算可以通过矩阵相乘实现。比如对于一个沿 i 向量平移、绕 j 轴旋转，再进行 k 轴缩放的综合变换，则可按照下式计算。

$$M = T_i * R_j * S_k (j, k = x, y, z) \quad (5-6)$$

其中，表示 T_i 表示沿 i 向量平移的变换矩阵， R_j 表示绕 j 轴旋转的变换矩阵， S_k 表示进行 k 轴缩放变换矩阵， $*$ 表示矩阵相乘操作。

5.1.3 KG 与可视化系统的通讯方法

实现知识图谱与可视化系统间的通讯，需要在保证 Neo4j 图数据库正常运行的前提下，通过 Unity3D 的脚本结合 C# 编程中 WebRequest 类，实现了 Neo4j 图数据库与 Unity3D 平台的有效连接^[98]。再通过 IO 流来读取所需数据，然后将读取内容以 JSON 文件的形式传送至 Unity3D 平台。在 Unity3D 平台上解析 JSON 文件，并依据特定的类（如 Node、NodeProperties、Relationship、RelationshipProperties 等），分别存储相关数据。这样的数据结构支持 UI 界面的实时更新，同时也能实现节点和关系物体的自动创建。如图 5-2 为系统通讯功能流程图。

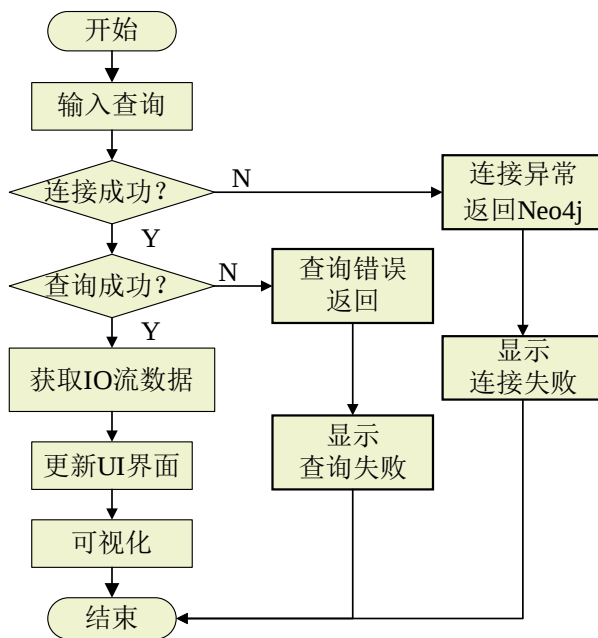


图 5-2 系统通讯功能流程图

5.1.4 基于 OPC UA 的设备间通讯

为有效解决设备间数据及时传输问题，实现工艺过程信息数据集成和可视化，采用 OPC UA（Open Platform Communications Unified Architecture）通讯协议^[99]。OPC

UA 通常采用 C/S 服务架构，即由两部分组成，一个是 OPC UA 服务器，另一个是 OPC UA 客户端。基于 OPC UA 协议的通信方式，通过 socket 输出数据，使用 OPC Quick Client 连接交换数据，如图 5-3 为 OPC UA 客户端的信息配置图。

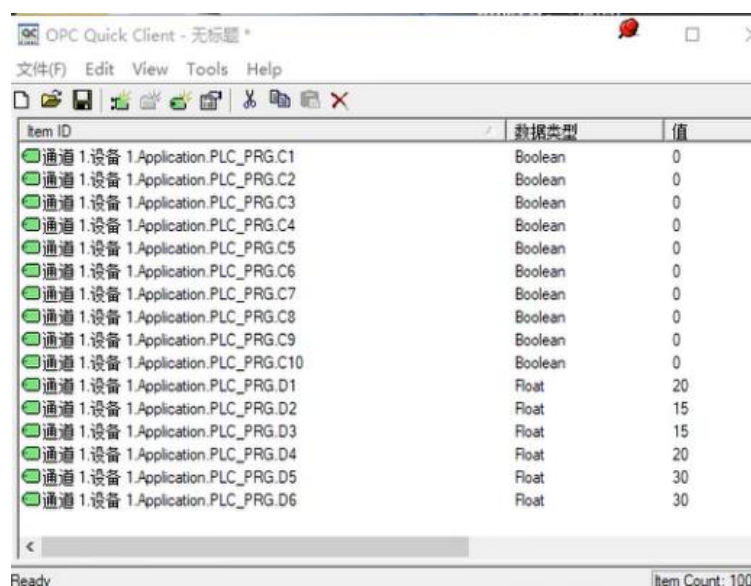


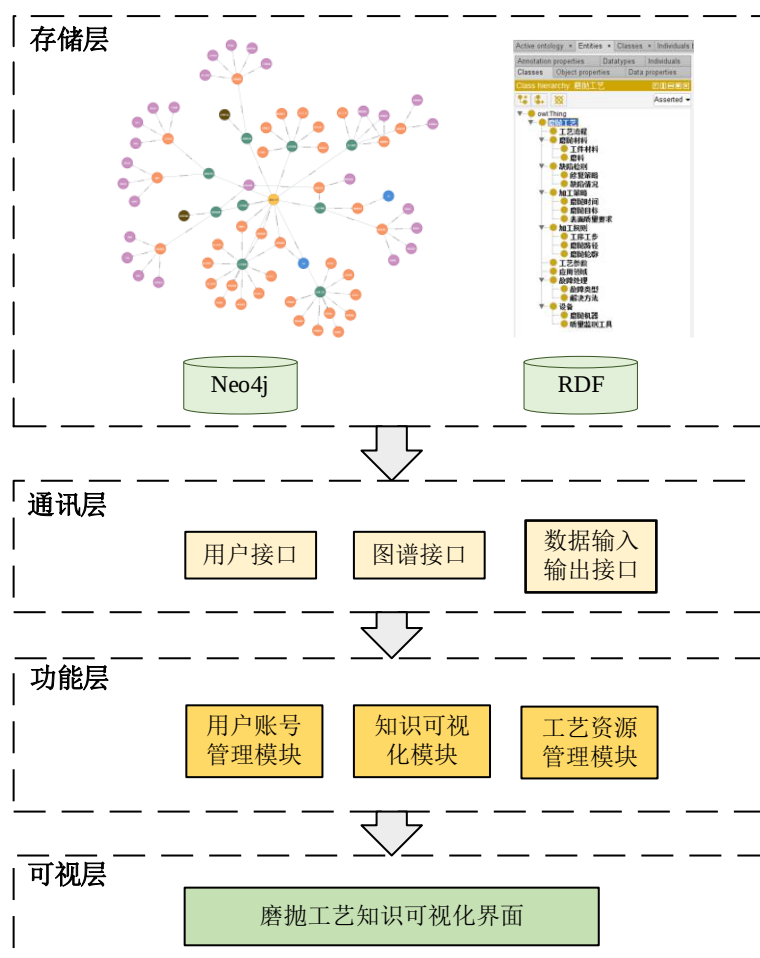
图 5-3 OPC UA 客户端信息配置图

通过 OPC UA 协议实现不同设备之间的数据集成和共享，不仅建立了 OPC UA 服务端和客户端的交互，还将磨抛工艺数据、信号传输到可视化系统。根据可视化和交互功能需求，利用可视化工具开发磨抛工艺知识可视化系统，可视化呈现实时磨抛工艺数据和状态信息。

5.2 可视化系统总体设计

5.2.1 系统框架设计

如图 5-4 所示，磨抛工艺知识可视化系统采用 VUE 功能模块，将可视化系统框架分为存储层、通讯层、功能层和服务层。其中，存储层包含磨抛工艺知识存储的图谱库和本体库；通讯层定义了用户接口，图谱接口和数据的输入输出接口；系统的功能层主要包含用户账号管理模块、知识可视化模块和工艺资源管理模块；服务层呈现磨抛工艺知识可视化界面。



5-4 磨抛工艺知识可视化系统框架

5.2.2 系统功能实现

根据可视化系统框架，设计系统的功能模块，如图 5-5，磨抛工艺知识可视化系统包含三个功能模块，分别为登录管理模块、知识图谱可视化模块和工艺资源管理模块。

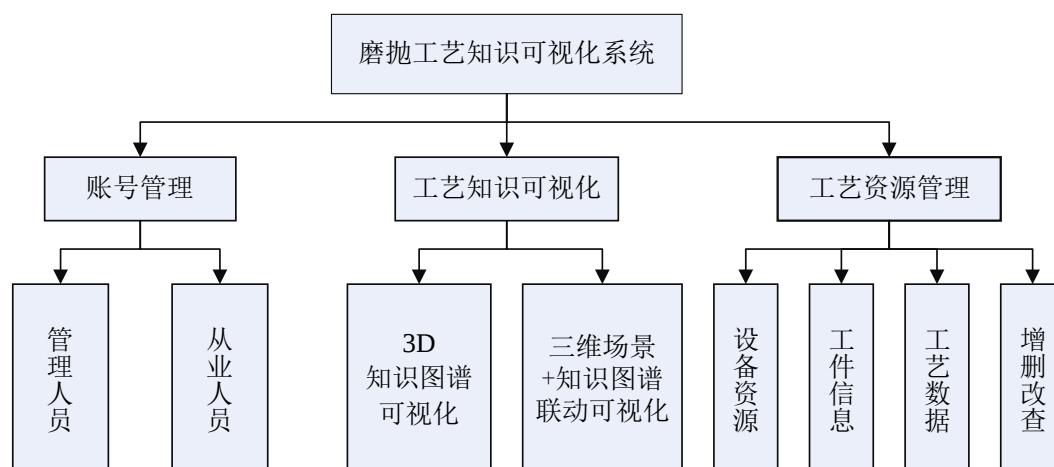


图 5-5 磨抛工艺知识可视化系统功能模块图

其中，各功能模块的内容如下所示。

(1) 账号管理模块。系统的账号管理界面支持不同用户类型，系统管理员能够定义不同的用户角色，将登录的账号分为管理部门和从业部门两个主要部门，并为每个角色分配特定的权限。管理部门用户应该具有更高级别的权限，包括对系统内部数据的增删改查操作权限；而从业部门用户应该只具有浏览系统内容的权限，无权操作系统内部数据。

(2) 知识图谱可视化模块。利用 3D 可视化技术实现磨抛加工相关的工艺知识图谱可视化，同时联动磨抛加工三维场景和知识图谱，并可视化展示，提供更好的可视化效果。

(3) 工艺资源管理模块。系统管理人员管理设备资源、工件信息和工艺数据等工艺资源，提供浏览、查询、增删和更新数据等操作，保证磨抛工艺系统运行的实时性和高效性。

在系统环境布局中，可视化系统采用 Unity3D 内置的 UGUI 系统，通过其完整的组件和事件机制，包括画布、按钮、文本框以及滚动条等，通过巧妙的组件和脚本协作，构建 UI 界面，满足可视化系统的功能需求。

在显示区域内，预制体自动加载所有节点，节点同时附加 Mesh Collider 碰撞体和相应的 C#脚本。功能显示为当鼠标移动到任意节点上时，系统触发碰撞检测，节点的外围圆环会立即变成设置的另一种颜色，直观地提示用户该节点可以被点击。用户操作鼠标左键点击节点时，可以轻松访问该节点的详细属性面板。可视化界面中的详细属性面板可以控制预编辑文字显示，此功能采用 Scroll View 组件的垂直滚动条。此设计巧妙地应用了滚动条，清晰而完整地展示重要的磨抛工艺知识。

综上所述，磨抛工艺知识可视化系统 UI 界面和交互设计美观易用，用户能够轻松理解和操作可视化系统，也提供了高效而直观地学习磨抛工艺知识，便于磨抛工艺知识的管理和应用。

5.2.3 系统环境设置

依据磨抛工艺知识可视化系统框架开发需求，匹配使用合适的软、硬件设备，表 5-1 为可视化系统开发的环境配置。

表 5-1 开发软、硬件环境配置

环境	配置
服务器操作系统	Windows11
客户端操作系统	Windows11

环境	配置
前端开发平台	Neo4j+Unity3D
后端开发平台	IDEA+VS Code+ Visual Studio
开发语言	Cypher / C# / java
计算机 CPU	Intel CORE i7 12700H
计算机 GPU	NVIDIA GeForce RTX 3060
计算机内存	16GB DDR5 4800MHz

5.3 可视化系统实现

5.3.1 系统首页功能定义

如图 5-7 为磨抛工艺知识可视化系统首页。



图 5-6 可视化系统首页

在 Unity 3D 中定义几个主要场景为可视化系统主界面“Main”，在可视化系统首页的主菜单中定义了登录界面“Login”、可视化界面“Visualization”和磨抛资源管理界面“Manage”。系统各可视化场景生成设置如图 5-7，方便编程和各可视化场景的转换。

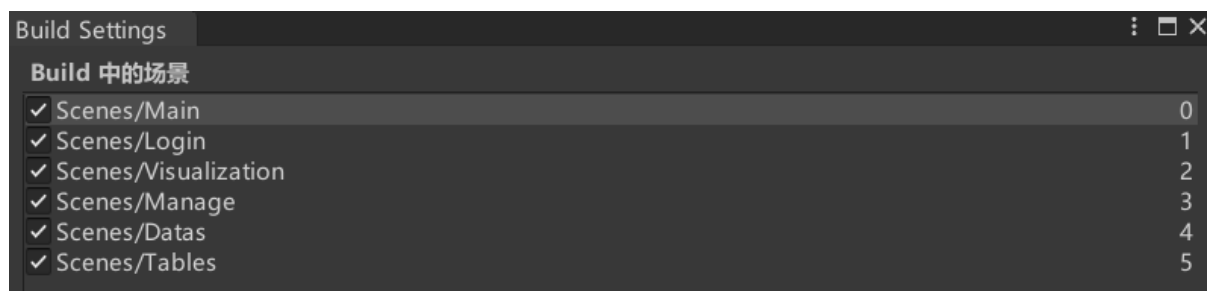


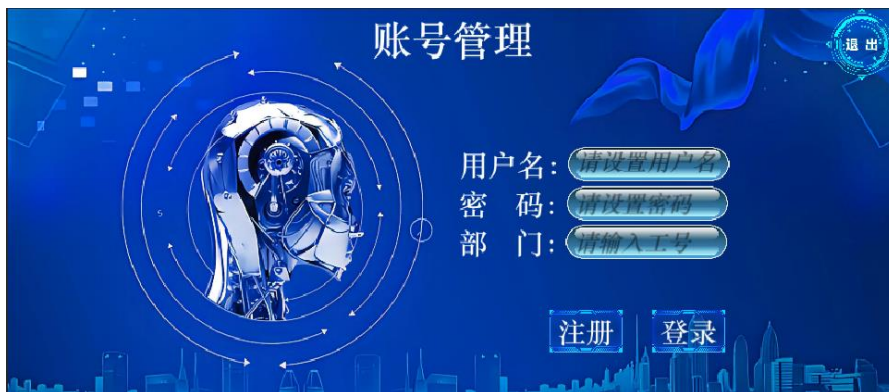
图 5-7 可视化场景生成设置

编程调用 `UnityEngine.SceneManagement()`命名空间，实现各场景间的跳转。

5.3.2 用户账号管理界面

磨抛工艺知识可视化系统的用户登录界面主要的功能需求是“注册账号”和“登录”，新用户注册账号后可以直接登录，同时在注册信息时，能记录用户的姓名、密码和所属部门等信息，设置密码保证系统的安全性，设置不同部门用户权限内容，编程实现用户管理界面的相关内容，如图 5-8 为用户账号注册管理界面。

67



(1) 账号注册



(2) 注册成功

图 5-8 用户注册界面

用户账号注册完成，系统用户登录可视化界面显示如下图。



图 5-9 用户登录界面

依据以上账号管理界面的功能需求，定义编程功能函数如下表。

表 5-2 账号管理界面编程功能函数定义

函数	功能
ConnectedServer()	连接服务器
CreateUserAccount()	新用户注册账户
username	用户名
password	密码
department	用户所属部门
ChangePassword()	更改密码
UserLogin()	用户登录函数，验证用户凭据并返回登录状态
AssignUserRole()	为用户分配角色或权限
UpdateUserRole()	更新用户的角色或权限

5.3.3 磨抛工艺知识可视化

在磨抛工艺知识可视化界面，主要由磨抛工艺知识图谱结合三维可视化组成，如图 5-10 为磨抛工艺知识图谱三维可视化界面。

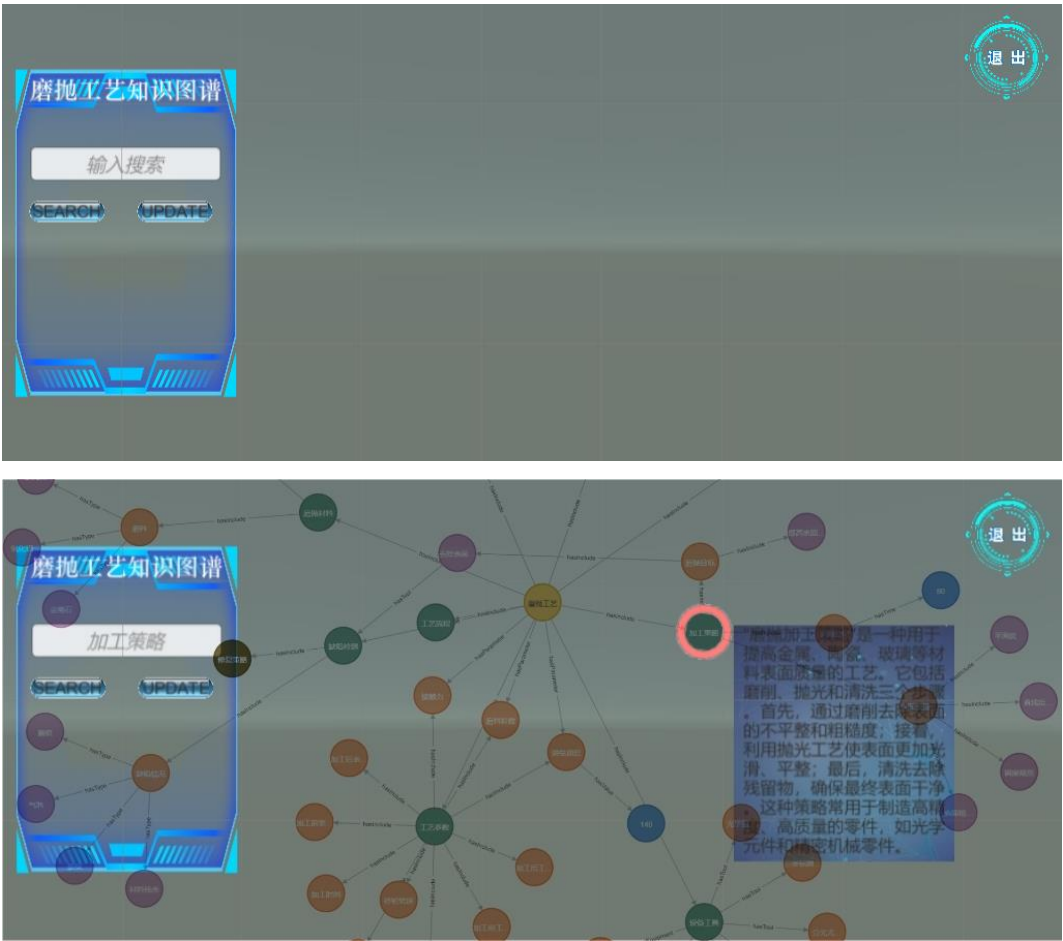


图 5-10 磨抛工艺知识图谱可视化

使用 Unity3D 的 3D 图形引擎，驱动知识图谱的节点和关系，使用球体 3D 对象表示知识图谱中的节点，使用线条或连接节点表示知识图谱中节点间的关系。

在可视化界面中，磨抛工艺知识图谱可视化增加了搜索节点时，选中节点在界面上高亮显示。同时，搜索到的节点旁边显示了注释信息。其中，编程中定义的一些功能函数如下表。

表 5-3 编程定义的功能函数

函数	功能
init_Node()	初始化定义节点
def search_node(node_name)	模拟搜索节点(节点名称)
show_data_in_ui()	在 UI 操作界面中显示信息数据
search_and_show_node(node_name)	搜索并显示节点信息
highlight_node()	节点高亮显示定义
show_comment()	节点注释信息显示

此外，采集的磨抛工艺数据，如机器人磨抛加工前后，工件表面质量的变化过程，可以使用 Unity 3D 的可视化图表插件 Xcharts，绘制 LineChart 图，动态呈现磨抛工艺数据变化。如图 5-11，在 Unity 3D 中插入 Xcharts。

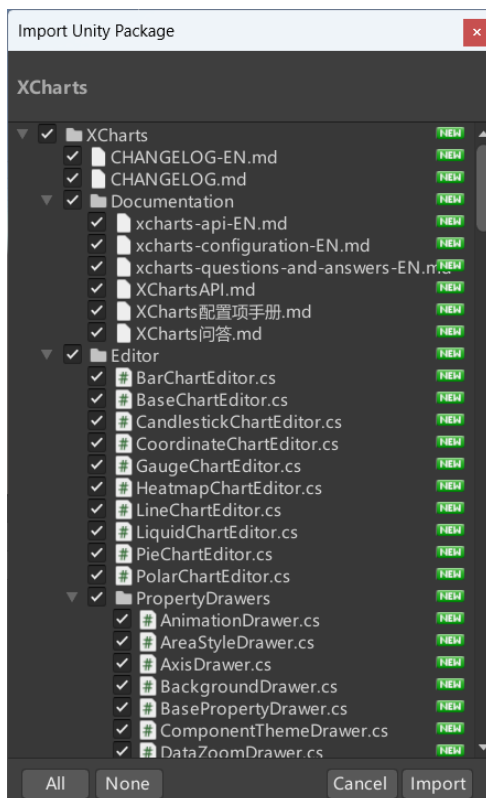


图 5-11 Unity 3D 中插入可视化图表插件 Xcharts

实现 Xcharts 可视化图表，编程定义 Xcharts 的功能函数如表 5-4，此外可直接在 Hierarchy 面板设置可视化图表的一些简单内容和参数。

表 5-4 定义 Xcharts 的功能函数

函数	功能
SeriesDataUpdate()	更新图表数据
AddSerie()	向图表中添加新的系列(Series)
UpdateData()	更新图表中的数据
SetYAxis()	设置 Y 轴的属性
SetXAxis()	设置 X 轴的属性
SetTooltip()	设置图表的提示框(Tooltip)属性
SetLegend()	设置图例(Legend)的属性

如图 5-12 为磨抛加工过程的三维可视化界面，可视化呈现机器人磨抛加工过程及表面质量加工前后变化。

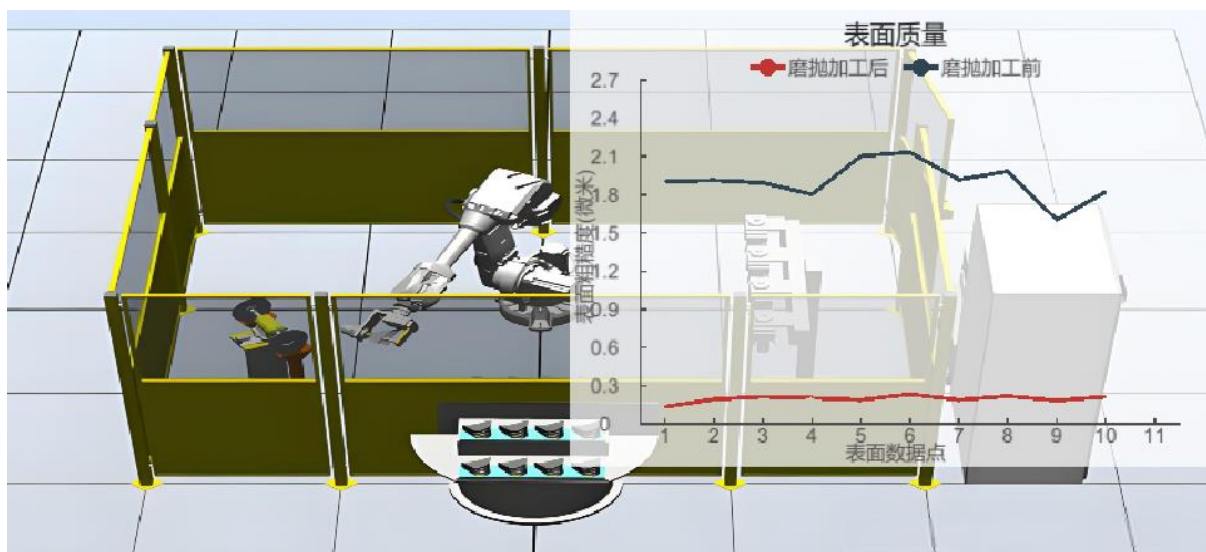


图 5-12 机器人磨抛加工前后表面质量变化

在编程调用 API 和表 5-5 为可视化功能函数，在可视化界面动态呈现机器人磨抛工艺过程信息。

表 5-5 编程定义的功能函数

函数	功能
ConnectedServer()	连接服务器

函数	功能
ShowInf()	界面显示数据信息面板
FindRobotAxis()	初始化时定位机器人模型轴的对象
RobotGetDatas()	机器人模型获得 OPC UA 服务器数据
ReadValue()	从 OPC UA 服务器中读取指定位置的值
CylinderGetDatas()	获得 OPC UA 服务器的机器人信号值
ShowDatas()	UI 操作界面中显示信息数据
PlotProcessData()	绘制磨抛工艺过程中的数据曲线
UpdateProcessParameter()	更新磨抛工艺的参数

5.3.4 磨抛工艺资源管理可视化

如图 5-13，磨抛工艺资源管理可视化分为 8 部分内容。根据磨抛工艺资源管理功能，磨抛工艺资源管理可视化如图 5-14。其中，部分磨抛工艺数据的可视化呈现如图 5-15。

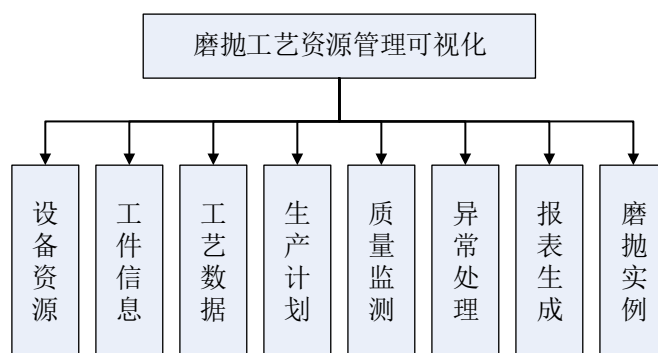


图 5-13 磨抛工艺资源管理可视化内容



图 5-14 磨抛工艺知识管理界面

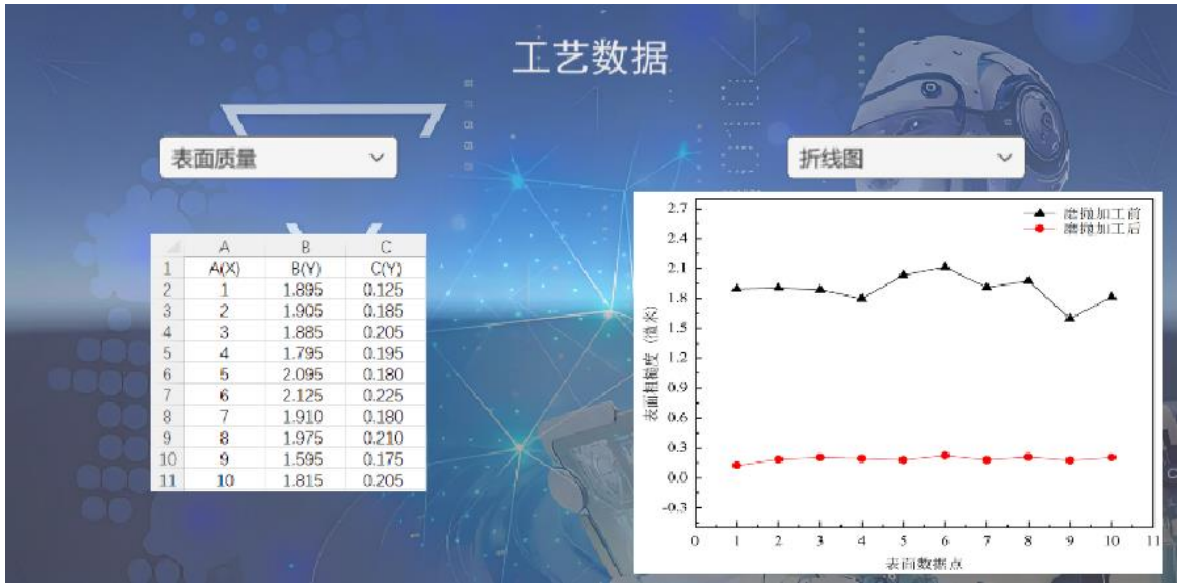


图 5-15 磨抛工艺数据管理界面

以上磨抛工艺知识可视化管理界面，方便用户管理分和使用磨抛工艺知识。在磨抛工管理可视化界面中，设计了表 5-6 所示功能函数。

表 5-6 编程定义的功能函数

函数	功能
AddProcessKnowledge()	向数据库中添加新的磨抛工艺知识
DeleteProcessKnowledge()	删除指定的磨抛工艺知识
SearchProcessKnowledge()	根据特定条件搜索磨抛工艺知识数据
GetProcessKnowledgeByID()	根据唯一标识符获取特定磨抛工艺知识
SaveProcessData()	保存磨抛工艺过程中的数据到文件中
UpdateProcessParameter()	更新磨抛工艺的参数
ExportProcessData()	从数据库中提取工艺数据
ViewProductionLog()	检索生产日志信息
SetProductionReminder()	设置生产过程中的提醒和警报
ManageProcessSchemes()	查看和编辑不同的工艺方案
ExecuteFaultDiagnosis()	启动设备故障诊断功能

5.4 本章小结

本章节运用 Unity 3D 平台搭建磨抛工艺知识的可视化系统，利用知识图谱和三维可视化技术，图形化动态呈现磨抛工艺知识，同时利用可视化图表插件 Xcharts，直观清晰地表达磨抛加工过程数据变化，便于用户直观理解和管理磨抛工艺知识。此外，

利用 OPC UA 通讯方法解决了设备间的数据交换，利用 IO 流数据连接解决了 KG 与可视化系统之间的联通，采用 VisualStudio 编程实现磨抛工艺数据联通和可视化功能。

第 6 章 总结与展望

6.1 论文工作总结

本研究以工业机器人磨抛工艺知识自主学习和可视化为研究内容，系统地探讨了磨抛工艺知识的表征方法、机器人磨抛轨迹规划、基于知识图谱的磨抛工艺知识可视化，以及磨抛工艺知识可视化系统构建等关键问题，取得了一定的成果。论文研究工作总结如下。

(1) 运用符号参数和矩阵相结合的数字化方法表征磨抛工艺知识。分析单个磨粒与工件表面的干涉作用机理，建立了 Preston 材料去除模型和 Hertz 弹性理论的磨抛轨迹模型。

(2) 磨抛机器人自主学习轨迹规划方法。融合强化学习 MDP，开发了基于 CCPP 的磨抛轨迹规划决策算法，利用网格分解策略和贪婪策略，通过 ACER 算法训练决策网络，实现了机器人自主决策磨抛轨迹规划方法，选择几种典型轨迹路线，开展对比实验研究验证了算法的有效性。

(3) 磨抛工艺知识可视化。运用知识图谱技术，构建了磨抛工艺知识图谱，并使用 Neo4j 实现了知识图谱可视化存储。最后利用知识图谱技术和三维可视化技术，选用 Unity 3D 构建了磨抛工艺知识可视化系统，为磨抛加工工艺知识提供了一种直观高效的学习、管理工具。

6.2 未来展望

尽管本研究在磨抛工艺知识自主学习和可视化方面取得了一定成果，但仍存在一些改进和深入研究的内容如下。

(1) 磨抛轨迹规划算法。强化学习算法可以进一步优化，进而提高磨抛轨迹规划的覆盖效率和精度，适应更复杂的磨抛工业场景。也可以使用迁移学习，将机器人在磨抛轨迹规划任务上学到的知识迁移到另一个任务上，改善磨抛加工任务的性能。

(2) 磨抛工艺知识图谱。需要及时更新和拓展磨抛工艺知识图谱，拓展磨抛应用场景，满足不同的行业需求。

(3) 磨抛工艺知识可视化系统。将磨抛工艺知识可视化系统拓展至更多的工业领域，为不同行业的生产提供定制化解决方案，提高系统的适用性和可扩展性。

(4) 界面友好性。应优化系统的用户交互界面，丰富系统界面呈现的可视化内容，进一步帮助用户直观有效理解和管理磨抛工艺知识。

(5) 成果应用。将研究成果应用于实际生产是最终目标，推动磨抛工业智能化和产业升级，为磨抛领域工业制造提供更智能、高效的解决方案。

参考文献

- [1] Lishu Lv, Zhaohui Deng, Tao Liu, et al. Intelligent technology in grinding process driven by : A review. Journal of Manufacturing Processes, Volume 58, 2020, Pages 1039-1051.
- [2] Yang Z, Xu X, Zhu D, et al. On energetic evaluation of robotic belt grinding mechanisms on single spherical abrasive grain model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5):9-12.
- [3] Wei J, Wang L. Industrial Robotic Machining: A Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1-4):1239-1255.
- [4] W. Ji and L. Wang, "Industrial Robotic Machining: a Review," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 103, Issue 1-4, pp. 1239-1255, Jul. 2019.
- [5] 马飞, 焦锐丽, 李阁. 智能制造背景下工业机器人新技术的应用与发展现状[J]. 湖北农机化, 2020, (04):64.
- [6] 闫娜, 张红曼, 杨慧芬. 我国智能制造发展现状分析[J]. 机械工业标准化与质量, 2022, (09):13-15+18.
- [7] 许清海. 基于智能制造环境下的装备制造业产业升级研究[J]. 内燃机与配件, 2021(02):158-160.
- [8] 余久方, 尧海昌. 基于改进融合深度强化学习的机器人路径规划[J]. 组合机床与自动化技术, 2023, (05):19-22+26.
- [9] 刘检华, 孙清超, 程晖等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程, 2018, 54(11):2-28.
- [10] 刘晶, 卞蓉蓉, 李尧等. 基于知识可视化工具对植入类医疗器械所用涂层材料的国内研究热点和风险分析[J]. 世界最新医学信息文摘, 2018, 18(A5):222-223.
- [11] 赵国庆. 知识可视化 2004 定义的分析与修订[J]. 电化教育研究, 2009(03):15-18.
- [12] 皮勇伟. 针对复合材料曲面件打磨机器人平台设计与研究[D]. 中国民航大学, 2023.
- [13] 穆煜, 裴丽蓉, 高永卓. 基于 ROS 的磨抛机器人系统设计[J]. 制造业自动化, 2023, 45(12):123-126.
- [14] Chen Y, Dong F. Robot machining: recent development and future research issues[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9):1489-1497.
- [15] Wei J, Wang L. Industrial Robotic Machining: A Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1-4):1239-1255.

- [16] 郝大贤,王伟,王琦珑,等.复合材料加工领域机器人的应用与发展趋势[J].机械工程学报,2019,55(03):1-17.
- [17] Chen X, Gong Z, Huang H. Development of Robotic System for 3D Profile Grinding and shing[J]. Singapore Institute of Manufacturing Technology, 2008, 12: 1-8.
- [18] Huang H, Gong Z M, Chen X Q, et al.Robotic grinding and polishing for turbine-vane overhaul[J].Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127(2):140-145.
- [19] 张铁,吴圣和,蔡超.基于浮动平台的机器人恒力控制研磨方法[J].上海交通大学学报,2020,54(05):515-523.
- [20] 张春涛,王勇.工业机器人六维力传感器在线标定方法研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(06):161-168.
- [21] Kodama H, Okazaki S, Jiang Y, et al. Thermal Influence on Surface Layer of Carbon Reinforced Plastic (CFRP) in Grinding[J].Precision Engineering, 2020, 65:53-63.
- [22] 涛冯. 机械工程自动控制技术现状与趋势[J]. 智能城市应用, 2023, 6(12): 48-50.
- [23] Han J, Seo Y. Mobile robot path planning with surrounding point set and path rovement[J]. Applied Soft Computing, 2017, 57: 35-47.
- [24] 曲永涛.六自由度机械臂避障的路径规划算法及其评价方法研究[D].重庆理工大学,2022.
- [25] 何利,赵臣,臧军旗等.基于几何学的路径规划方法[J].哈尔滨工业大学学报,2005,(07):947-949.
- [26] 伍洲,杨寒石,邬俊俊等.进化迁移优化算法综述[J].计算机工程,2023,49(01):1-14.
- [27] 罗中凯,张立波.学习路径规划方法[J].中国科学院大学学报,2024,41(01):11-27.
- [28] 彭建文,刘越,赵真,等.工业机器人加加速度连续的关节轨迹规划[C]//第二十届中统仿真技术及其应用学术年会.合肥,中国:中国科学技术大学出版社,2019:435-442.
- [29] 蒋承杰,朱华,谢瑶等.基于改进 A*算法的移动机器人的路径规划[J/OL].制造技术与:1-5[2024-03-18].
- [30] Wang J, Liu J, Chen W, et al. Robot path planning via neural-network-driven prediction[J]. IEEE transactions on artificial intelligence, 2021, 3(3): 451-460.
- [31] 吴雷,方卿.基于改进粒子群算法的学习路径优化方法[J].系统科学与数学,2016,36(12): 2-2281.
- [32] 王萍,潘树国,蔚保国,等.基于 RSS_GN RRT 算法的狭长空间路径规划[J].电子测量器学报,2024(03):1-1.

- [33] 王逸潇,俞桂英,丁烨等.轮毂曲面机器人力控磨抛路径规划方法[J].机械与电子,2021,39(04):70-75.
- [34] 任利娟,陈恪,闫伟健等.4+2 自由度叶片抛磨专用机器人轨迹规划方法研究[J].制造技术机床,2024(03):16-21.
- [35] 胡建玥.基于力觉伺服轨迹规划的磨抛工业机器人曲面跟踪控制研究[J].机械制造与化,2024,53(01):196-201.
- [36] You C, Lu J, Filev D, et al. Advanced planning for autonomous vehicles using force learning and deep inverse reinforcement learning[J]. Robotics and Autonomous systems, 2019, 114: 1-18.
- [37] Lobos-Tsunekawa K, Leiva F, Ruiz-del-Solar J. Visual navigation for biped humanoid robots using deep reinforcement learning[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(4): 3247-3254.
- [38] Niroui F, Zhang K, Kashino Z, et al. Deep reinforcement learning robot search and rescue applications: Exploration in unknown cluttered environments[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2): 610-617.
- [39] Panov A I, Yakovlev K S, Suvorov R. Grid path planning with deep reinforcement learning: Preliminary results[J]. Procedia computer science, 2018, 123: 347-353.
- [40] Konar A, Chakraborty I G, Singh S J, et al. A deterministic improved Q-learning for path planning of a mobile robot[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 3, 43(5): 1141-1153.
- [41] Low E S, Ong P, Cheah K C. Solving the optimal path planning of a mobile robot using improved Q-learning[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 115: 143-161.
- [42] Cruz D L, Yu W. Path planning of multi-agent systems in unknown environment with kernel smoothing and reinforcement learning[J]. Neurocomputing, 2017, 233: 34-42.
- [43] 梅泽伟,李天任,朱佳琳,等.基于 DQN 变动力智能决策的轨迹规划[J/OL].兵工学报:1-024-03-19].
- [44] Anirudh Krishna Lakshmanan, Rajesh Elara Mohan, Balakrishnan Ramalingam, et al. Complete coverage path planning using reinforcement learning for omnino based cleaning and maintenance robot, Automation in Construction, Volume 2020, 103078, ISSN 0926-5805.
- [45] Lakshmanan A K, Mohan R E, Ramalingam B, et al. Complete coverage path planning using reinforcement learning for tetromino based cleaning and maintenance robot[J]. Automation in Construction, 2020, 112: 103078.

- [46] E. Galceran, M. Carreras, A survey on coverage path planning for robotics[J]. *Robotics Autonomous systems*, 2013, 61(12): 1258-1276.
- [47] Moravec H, Elfes A. High resolution maps from wide angle sonar[C]//*Proceedings. 1985 E international conference on robotics and automation. IEEE*, 1985, 2: 116-121.
- [48] Choset H. Coverage for robotics—a survey of recent results[J]. *Annals of mathematics and icial intelligence*, 2001, 31: 113-126.
- [49] Manimuthu A, Le A V, Mohan R E, et al. Energy consumption estimation model for plete coverage of a tetromino inspired reconfigurable surface tiling robot[J]. *Energies*, 9, 12(12): 2257.
- [50] Yang S X, Luo C. A neural network approach to complete coverage path planning[J]. *E Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2004, 34(1): 724.
- [51] Gabriely Y, Rimón E. Spiral-STC: An on-line coverage algorithm of grid environments by a mobile robot[C]//*Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292). IEEE*, 2002, 1: 954-960.
- [52] 方勤, 吴艺韞. 知识经济时代的设计学研究概况及发展趋势——基于 CNKI 硕博士学位论文数据的可视化分析[J]. *设计艺术研究*, 2020.
- [53] 朱晓峰, 蒋旭牧, 张卫. 领域知识组织研究的历史演化与未来展望[J]. *情报资料工作*, 2021, 42(5): 23-31.
- [54] 孙小强, 高秀云, 王玉梅. 制造业数智化融合转型发展的关键要素, 机理分析及评价指标研究[J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(2): 323-332.
- [55] 陈思涛, 韩文强, 温良等. 面向航空制造企业的工艺技术知识管理 [J]. *工具技术*, 2021, 55(02): 76-79.
- [56] 周洪宇, 徐莉. 新工业革命与第三次教育革命[M]. 华中科技大学出版社, 2021: 9-192.
- [57] 石滨. 信息可视化在知识组织领域中的应用[J]. *中国管理信息化*, 2013 (12): 81-82.
- [58] 王建翔. 基于“互联网+”的移动学习体系开发与设计——评《基于数字媒体技术的移动学习设计与优化》[J]. *中国科技论文*, 2023, 18(04): 478.
- [59] 赵志耘, 林子婕. 元宇宙与智慧图书馆: 科技赋能文化新路径[J]. *图书情报知识*, 2023, 39(6): 6-16.
- [60] 韩晴晴, 郭举. 传统制造行业数字化转型中的数据可视化研究[J]. *起重运输机械*, 2021, (S1): 118-122.
- [61] 杨超. 面向工业大数据的可视化系统设计与实现[D]. 电子科技大学, 2019.
- [62] Wo Woo-Jae, Jin-Ho Lee. A study on the PLC-based pre-validation simulation design

- method for smart factory[J].Korea Industrial Technology Convergence Society,2021,26(3):2671-6321.
- [63] 赵浩然,刘检华,熊辉,等.面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J].计算机集成制造系统,2019,25(06):1432-1443.
- [64] FENG Hao,YINChenbo,JIAWenhua,etal.Robotic excavator trajectory control and motion visualiza-tion[J].Computer Integrated Manufacturing System,2019,25(02):447-453.
- [65] 洪辉武.工业机器人远程监控与诊断系统的设计与实现[D].江南大学,2021.
- [66] 朱安庆,王金龙,姚飏.基于数字孪生的分段建造可视化系统设计[J].船海工程,2024,53(01):36-40.
- [67] 陈虢,刘灿由,寇静行等.航天测控任务三维场景可视化的设计及实现[J].计算机仿真,2023,40(11):16-21+33.
- [68] 廖帅,黄海聪,吕卉等.我国企业数字化转型研究的演化路径与热点趋势——基于知识图谱的可视化分析[J].老字号品牌营销,2023(09):115-119.
- [69] 李亚宁,周勇.FDI 与碳排放研究进展及热点前沿分析——基于知识图谱可视化研究[J].上海节能,2023(04):413-424.
- [70] Shamsuzzoha A, Ferreira F, Azevedo A, et al. Collaborative smart process monitoring within virtual factory environment:an implementation issue[J].International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2017, 30(1): 167-181.
- [71] Sivabalakrishnan R, Kalaiarasan A, Ajithvishva M S, et al. IoT visualization of Smart Factory for Additive Manufacturing System (ISFAMS) with visual inspection and material handling processes[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 995(1): 012027.
- [72] Kim J W, Park J S, Kim S K. Application of FlexSim software for developing cyber learning factory for smart factory education and training[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79: 16281-16297.
- [73] 王勇超, 罗胜文, 杨英宝等. 知识图谱可视化综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(10): 1666-1676.
- [74] Besancon L, Ynnerman A, Keefe D F, et al. The state of the art of spatial interfaces for 3D visualization[C]//Computer Graphics Forum. 2021, 40(1): 293-326.
- [75] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
- [76] 郭磊,明子航,靳淇超等.弹性基体磨具的磨抛轨迹与表面加工质量研究[J].表面技

- 术,2022,51(12):255-268.
- [77] 郭磊,明子航,靳淇超等.弹性基体磨具的磨抛轨迹与表面加工质量研究[J].表面技术,2022,51(12):255-268.
- [78] Wei C, He C, Chen G, et al. Material removal mechanism and corresponding models in the grinding process: A critical review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 103: 354-392.
- [79] Jia D, Li C, Zhang Y, et al. Experimental research on the influence of the jet parameters of minimum quantity lubrication on the lubricating property of Ni-based alloy grinding[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82 (1-4):617-630.
- [80] Zheng Z, Huang K, Lin C, et al. An analytical force and energy model for ductile-brittle transition in ultra-precision grinding of brittle materials[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 220: 107107.
- [81] Preston F W. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. *Journal of the Society of Glass Technology*, 1927, 11: 214-256.
- [82] Gladwell G M L. Contact problems in the classical theory of elasticity[M]. Springer Science & Business Media, 1980.
- [83] Wang Y, Bo H, Wang F, et al. A controllable material removal strategy considering force-geometry model of belt grinding processes[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(1):241-251.
- [84] Xia X. Map Coverage for Mobile Robot Implemented with Reinforcement Learning[D]. Auburn University, 2020.
- [85] Le A V, Ku P C, Than Tun T, et al. Realization energy optimization of complete path planning in differential drive based self-reconfigurable floor cleaning robot[J]. *Energies*, 2019, 12(6): 1136.
- [86] Conway J H, Lagarias J C. Tiling with polyominoes and combinatorial group theory[J]. *Journal of combinatorial theory, Series A*, 1990, 53(2): 183-208.
- [87] Kober J, Bagnell J A, Peters J. Reinforcement learning in robotics: A survey[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(11): 1238-1274.
- [88] Mnih V, Badia A P, Mirza M, et al. Asynchronous methods for deep reinforcement learning[C]//International conference on machine learning. PMLR, 2016(48): 1928-1937.
- [89] Wang Z, Bapst V, Heess N, et al. Sample efficient actor-critic with experience replay[J]. arXiv preprint arXiv:1611.01224, 2016.
- [90] Hernández-Lobato J M, Gelbart M A, Hoffman M W, et al. Proceedings of the 32nd

- International Conference on International Conference on Machine Learning[J]. 2015.
- [91] Shi N, Li D. RMSprop converges with proper hyperparameter[C]//International Conference on Learning Representation. 2021.
- [92] 尚福华, 金泉, 曹茂俊. 基于 Senna-BiLSTM-CRF 的测井实体抽取方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(12): 180-186.
- [93] 谢腾, 杨俊安, 刘辉. 融合多特征 BERT 模型的中文实体关系抽取[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(5): 253-261.
- [94] 沈思, 胡业勋. 基于深度学习的食品安全事件实体自动抽取模型研究[J]. 信息与电脑, 2018 (23): 11-13.
- [95] 冀相冰, 朱艳辉, 李飞等. 基于 Attention-BiLSTM 的中文命名实体识别[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(05): 73-78.
- [96] Tomaszuk D, Hyland-Wood D. RDF 1.1: Knowledge representation and data integration language for the Web[J]. Symmetry, 2020, 12(1): 84.
- [97] Wangyan H E, Wei Z, Houzhi L I, et al. Deformation Prediction of Reservoir Landslides Using Knowledge Graph Optimized Kalman Filter[J]. Geological Journal of China Universities, 2023, 29(3): 372.
- [98] 陈瑞, 黄朝兵. 基于 Neo4j 和 Unity3D 的钻井知识图谱可视化系统[J]. 现代计算机, 2022, 28(12): 90-96.
- [99] 顾岩, 程免翀, 王震, 等. 基于 OPC UA 的 3D 实时监控系统设计及实现[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(11): 2767.

攻读硕士期间发表的学术论文

- [1] 陈清清,许德章.面向工艺过程的可视化研究[J].淮阴工学院学报,2024,33(2):68-73.

致谢

在本篇论文完成之际，我要向所有在我完成硕士学业的过程中给予我帮助和支持的人们致以最诚挚的感谢和敬意。

首先，我要感谢我的导师许德章教授，您是我学术道路上的灯塔，您的悉心指导和深厚学识让我受益匪浅。您不仅在学术上给予我耐心的指导和专业的建议，更在人生道路上给予我启迪，您的悉心指导和严谨治学的态度是我学习的榜样，您的言传身教将永远激励着我前行，我将终身受益于您的教诲。

在学术道路上，我还得到了梁利东老师的悉心引导。还有在芜湖安普机器人产业技术研究院有限公司实习期间，得到了李公文高工和乔文慧姐姐的帮助，他们的经验和见解为我提供了宝贵的参考和借鉴，让我少走一些弯路，更快地成长和进步。感谢你们的慷慨分享和无私支持，是你们的帮助让我在学术道路上走得更加坚定和自信。

我要感谢同一课题组的方庆大哥、欧阳俊祎和赵剑飞，还有给予我帮助的师兄们，在研究生期间，你们的合作与交流为我提供了宝贵的学习机会和思维碰撞，使我不断进步和成长。你们给予的关心和帮助让我在求学之路上不再孤单。祝愿我们课题组的伙伴们百尺竿头，更进一步。

在学术之旅的路途上，我有幸结识了机械学院研 21 的所有可爱的女生们，每一次与你们的交流都是我生活中最美好的时刻，你们的聪慧和智慧让我受益匪浅，让我不断追求进步和成长。在这里，我要向你们致以最诚挚的感谢和敬意。感谢你们在我求学之路上的陪伴和支持，感谢你们为我带来的欢笑和温暖，感谢给予我的鼓励和帮助。

最后，我要特别感谢我的家人，是你们在我求学道路上给予了无私的支持和鼓励，是你们的爱和理解让我有信心克服一切困难，努力向前。没有你们的支持，我将无法完成这段学术之旅。

三年时光匆匆而过，在研究生阶段，我有幸结识了这么多优秀的老师和同学们。在这个学术的殿堂里，我们相互学习、相互启发，共同探索着知识的边界。感谢你们的陪伴和支持，让我的学术之旅更加丰富多彩，更加充实而有意义。感谢你们一直以来的支持和鼓励，是你们的帮助让我能够顺利完成了这篇论文。愿我们携手并肩，共同追求梦想，创造更加美好的明天！再次向所有关心和支持我的人致以最诚挚的感谢！

作者：陈清清

日期：2024 年 5 月 15 日

尚德敏学 唯实惟新

