中 文 摘 要

挖掘机作为应用最广泛的机械设备，在工程领域中发挥着无可替代的作用。近年来随着现代科学技术的发展，以及作业环境愈加复杂化，智能化挖掘机逐渐成为工程领域的研究重点。智能化挖掘机的出现将无线通信、环境感知和轨迹规划等技术相结合，即使在面对复杂恶劣的环境时也能实现稳定可靠的作业效果。

本文以 PC1012 小型挖掘机作为实际研究对象，以实现挖掘机的远程控制为目的，分析具体需求和挖掘机性能参数后设计了基于无线通信的挖掘机远程控制系统。将系统架构分为遥控平台端、云服务器和挖掘机控制端三部分，根据其工作流程对远程控制系统中各硬件模块进行了选型、介绍及配置；完成了基于 TCP 网络通信、CAN 通信和串口通信的终端间通信链路软件开发以及基于 PyQt5 的上位机监测界面开发。

其次，对挖掘机工作装置进行运动学分析，根据建立的运动学模型列出了工作装置 D-H 参数表，求解得出工作装置的运动学正、逆解通式，确定了挖掘机工作装置驱动空间和关节空间的转换关系。此外，基于 MATLAB 完成了工作装置作业范围的求取以及仿真模型的建立。

然后，对轨迹规划方法进行了概述，在关节空间中对三次、五次以及分段多项式的轨迹函数进行求解，并针对具体路径点信息，仿真得出关节角度、角速度和角加速度的运动曲线，经过比较后选用 3-5-3 分段插值法作为连续路径的规划方法，并基于粒子群算法进行时间最优的轨迹优化研究。结果表明优化后的动作时间得到缩短，关节角速度和角加速度也符合约束条件。

最后，通过实车功能测试，验证了本文设计的挖掘机远程控制系统能够实现信息实时上传，控制指令下发执行等功能，且能够实现良好的控制效果，系统整体延时控制在 1s 以内，具有较好的实时性，能够满足挖掘作业的控制需求。

关键词：挖掘机；远程控制；粒子群算法；轨迹规划

ABSTRACT

Excavators, as the most widely used mechanical equipment, play an irreplaceable role in the engineering field. In recent years, with the development of modern science and technology, as well as the increasingly complex working environment, intelligent excavators have gradually become a research focus in the engineering field. The emergence of intelligent excavators combines technologies such as wireless communication, environmental awareness and trajectory planning, enabling stable and reliable operation even in complex and harsh environments.

This article takes the PC1012 small excavator as the actual research object, with the purpose of achieving remote control of the excavator, after analyzing the specific requirements and excavator performance parameters, a wireless communication based excavator remote control system was designed. The system architecture is divided into three parts: remote control platform end, cloud server, and excavator control end. Based on its workflow, various hardware modules in the remote control system were selected, introduced and configured; completed the development of communication link software between terminals based on TCP network communication, CAN communication and serial communication, as well as the development of upper computer monitoring interface based on PyQt5.

Secondly, the kinematic analysis of the excavator working device is carried out, and according to the established kinematic model, a table of D-H parameters of the working device is listed, the kinematics forward and inverse solutions of the working device are obtained, and the conversion relationship between the drive space and joint space of the excavator work unit is determined. In addition, the calculation of the operating range of the working device and the establishment of a simulation model were completed based on MATLAB.

Then, the trajectory planning methods are summarized, the trajectory functions are solved in joint space for cubic, quintuple and segmented polynomials, and the motion profiles of joint angles, angular velocities and angular accelerations are simulated for specific path point information. After comparison, the 3-5-3 piecewise interpolation method is selected as the continuous path planning method, and the time optimal trajectory optimization research is conducted based on particle swarm optimization. The results show that the optimized action time is shortened, and the joint angular velocity and angular acceleration also meet the constraints.

Finally, through actual vehicle functional testing, it was verified that the excavator remote control system designed in this article can achieve real-time information upload, control command issuance and execution functions, and can achieve good control effects. The overall delay control of the system is within 1 second, which has good real-time performance and can basically meet the control requirements of excavation operations.

Key words: Excavator; Remote control; Particle swarm optimization; Trajectory planning

目 录

第一章 绪论 1
1.1 研究背景和意义 1
1.2 智能挖掘机的发展与研究现状 2
1.2.1 国内研究现状 2
1.2.2 国外研究现状 4
1.3 挖掘机工作装置轨迹规划算法研究现状 6
1.4.本文主要研究内容 7
第二章 挖掘机远程控制系统总体方案设计 9
2.1 挖掘机远程控制系统需求分析 9
2.2 系统架构与其工作流程 9
2.3 系统的关键技术 11
2.3.1 CAN 总线技术 11
2.3.2 无线通信技术 12
2.4 挖掘机工作装置液压系统方案设计 13
2.5 本章小结 14
第三章 挖掘机远程控制系统硬件选型及软件开发 15
3.1 遥控平台端硬件设计与选型 15
3.1.1 PC 处理器选型 15
3.1.2 操作手柄选型 15
3.1.3 手柄信号采集传输模块选型 16
3.2 挖掘机端硬件设计与选型 17
3.2.1 嵌入式主控器选型 17
3.2.2 5G 模组选型 18
3.2.3 电源模块选型 19
3.2.4 电液比例阀控制器选型 19
3.2.5 位移传感器选型 20
3.2.6 传感器信号转换模块选型 21
3.2.7 摄像头选型 21

3.2.8 CAN 通信模块选型.....23
3.3 系统通信链路设计与软件开发.....23
3.3.1 无线网络通信开发.....23
3.3.2 CAN 通信开发.....26
3.3.3 串口通信开发.....27
3.3.4 云服务器搭建.....28
3.3.5 上位机监测界面设计.....28
3.4 本章小结.....30
第四章 挖掘机工作装置运动学建模分析.....31
4.1 挖掘机工作装置运动学建模.....31
4.1.1 工作空间描述.....31
4.1.2 连杆坐标系的建立.....32
4.1.3 运动学基本方程.....33
4.2 挖掘机工作装置运动学解析.....34
4.2.1 运动学正解.....34
4.2.2 运动学逆解.....35
4.3 关节空间与驱动空间的转换关系.....37
4.4 挖掘机工作装置运动学问题仿真实现.....38
4.4.1 挖掘机仿真模型构建.....38
4.4.2 挖掘机工作空间求解.....39
4.5 本章小结.....40
第五章 挖掘机作业轨迹规划与优化研究.....41
5.1 轨迹规划概述.....41
5.2 基于多项式函数插值的关节空间轨迹规划.....42
5.2.1 三次多项式插值.....42
5.2.2 五次多项式插值.....44
5.2.3 分段多项式插值.....45
5.3 基于改进粒子群算法的轨迹优化.....49
5.3.1 粒子群优化算法简述.....49
5.3.2 构建时间最优问题模型与约束条件.....49

5.3.3 时间最优轨迹规划问题求解步骤 50
5.3.4 时间最优轨迹规划仿真结果分析 52
5.4 本章小结 53
第六章 挖掘机远程控制实现与测试 55
6.1 挖掘机远程控制数据采集测试 55
6.1.1 串口功能测试 55
6.1.2 控制指令传输测试 55
6.1.3 上位机界面采集功能测试 56
6.1.4 远程通信延时测试 58
6.2 挖掘机远程控制测试 59
6.3 本章小结 61
第七章 总结与展望 63
7.1 总结 63
7.2 展望 64
参 考 文 献 65
致 谢 69
附 录 71

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

挖掘机，又称挖掘机械，广泛应用于资源开采、建筑施工和抢险救灾等领域，发挥着不可替代的作用。传统的挖掘机结构包括工作装置、回转机构、行走机构和传动机构等[1]。近年来挖掘机在工程机械中的使用率在不断提高，而且拥有十分可观的全球市场份额，故挖掘机也被誉为工程机械中“皇冠上的明珠”。

我国经济迅速发展的同时，为实现“中国制造 2025”强国策略，在近几年加大了对道路交通、能源、水利和城建等领域的建设和投资，这些项目出现了越来越多挖掘机的“影子”。其次，中国工程机械行业研究报告显示，许多公司已经将重点放眼于海外市场，比如“一带一路”建设政策带动了沿线许多项目的开展，这也使得中国公司有机会推广自己的挖掘机产品，间接的增加了挖掘机的使用量和销售量[2]。根据 2022 年最新数据显示，国内市场受疫情影响动力不足，但整体销售量呈现回暖态势；海外市场出口量同比增加 64.9%，已经形成一定的规模。由此分析，挖掘机每年的市场需求量将继续扩大，挖掘机作为工程机械领域最重要的“尖兵”，仍然具有很大的发展潜力。

随着新型基础设施建设的大力推进，挖掘机的施工环境变得越来越复杂，人类对于挖掘机作业精度、效率和能耗的要求也越来越高。传统的液压挖掘机便显得捉襟见肘，无法满足基本的施工需求，由此便凸显出一系列问题。例如：在矿山开采和土方挖掘时，驾驶员往往需要在恶劣的工作环境中进行长时间工作，大量的灰尘和煤炭粉末会对驾驶员的身体健康造成损害；在抢险救灾的任务中，驾驶员需要操作挖掘机进入危险和复杂的地区中，随时可能面临塌方等问题，驾驶人员的生命安全和工作效率都无法得到相应的保障；还有在某些极端天气下，操作员的可视距离会大大缩短，无法直观的判断出具体的挖掘方位和深度，施工效率也会受到影响。

针对上述问题，对传统挖掘机进行智能化改进是较为理想的解决方法。一方面，通过挖掘机的智能化和数字化研究，将现阶段无线通信技术、多传感器融合技术、无人驾驶技术和远程监测技术等应用在挖掘机上，即利用激光雷达、传感器和摄像头等设备监测机身状态并采集周围环境信息，实现挖掘机的远距离控制。另一方面，对挖掘机的工作装置进行轨迹规划研究，得出其关节角度、角速度和角加速度等随时间的变化量，使工作装置能够按照预设的挖掘路径完成作业，并保持整体动作的平滑连续，无较大冲击。将二者结合起来，最终可实现挖掘机的远程控制和智能控制，有利于推动工程机械设备向智能化领域发展。

利用智能化挖掘机进行施工作业，不仅可以将操作员从危险复杂的环境中解放出来，减少其身心健康受到损害的概率，而且可以提高挖掘机的施工效率和精度，节省花在时间和人工上的成本。针对一些困难的工程项目，将不再依赖驾驶员的驾驶水平。所以，无论从其经济效益还是社会效益的角度来看，将传统挖掘机发展为智能挖掘机是十分必要的。

综上所述，在现阶段发展智能化挖掘机是推动我国挖掘机市场产业结构走向高端的关键所在。从整体来看，挖掘机向高端智能化这一方向发展的态势已经基本定型，而且未来数字化、网络化和智能化也将加速工程机械装备行业转型升级。

1.2 智能挖掘机的发展与研究现状

智能挖掘机是多种高新技术融合的产物，在作业精度以及作业范围方面远远领先于传统挖掘机。目前，有关智能化挖掘机的研究逐渐成熟，国内外的研究机构主要集中于一些高校和公司等，比如国外的德国慕尼黑工业大学、斯坦福大学、首尔科技大学、美国卡特彼勒公司、日本小松公司和瑞典沃尔沃公司等；国内的浙江大学、吉林大学、中南大学、三一重工、徐工和柳工等。现阶段主要研究方向也集中在远程控制、轨迹规划和轨迹跟踪等几个方面[3]。

1.2.1 国内研究现状

针对挖掘机远程遥控的研究，我国最早开始于一些重点高校，以及工程类机械类研究所。例如，哈尔滨工业大学机器人研究所的杜志江和路同浚教授研发了一种新型的CAN 总线控制系统，可用于挖掘机的现场控制，相比传统的集中控制系统，提高了系统的稳定性以及控制速度[4]。浙江大学的冯培恩教授带领团队研发了挖掘机器人分布式控制系统，系统内部又具体划分为决策系统、伺服系统和通信系统等三个子系统，实现了挖掘机的分布式实时控制。中南大学以山河智能 SWE230 挖掘机作为载体，设计了嵌入式控制器核心电路和外围电路，并对 Linux 内核构架进行了开发，最终实现短距离的无线遥控[5]。除此之外，华侨大学和吉林大学等高校对于挖掘机远程控制系统也展开过深入研究。青岛理工大学的韩斌、高公如等人展开相应研究后设计了一种基于轨迹规划的挖掘机遥控系统。该系统首先建立了挖掘机仿真模型，对其挖掘动作进行分析，得出轨迹规划结果；其次，完成了以无线电为通信载体的遥控系统硬件平台搭建和软件开发，最后经过测试表明整体挖掘动作较为平顺，可以顺利完成多种动作，验证了此系统的可靠性，对于挖掘机的智能化研究具有重要意义[6]。

在科技强国战略的引领下，众多企业纷纷响应国家号召，在挖掘机智能化领域展开深度研究。2017 年 9 月在北京举行的第十四届中国国际工程机械展会上，三一重工携带

多种高科技工程机械亮相展会，其中最吸引的人是 SY215 VR 远程遥控挖掘机，这已经是三一重工研发的第三代具有远程立体视觉的挖掘机。SY215 具备常规操作、近程遥控器操作和远程操控舱操作等多种模式。其中，远程模式使用高清摄像系统采集挖掘机周边的影像，通过双目 VR 眼镜和 360 度全景图像，使操作员在远程操控室获得与原驾驶室同等视觉效果[7]。



图 1.1 SY215 VR 远程遥控挖掘机

Figure 1.1 SY215 VR remote control excavator

拓疆者公司和徐工机械针对一些艰苦危险的施工环境，共同研发了挖掘机远程智能遥控套件，并应用于徐工 XE950DA 型挖掘机上，实现设备在 4G 和 5G 环境中进行无距离限制的远程驾驶操作。除了基于 5G 网络的低延时传输系统外，该系统还增加了人员识别和挖掘机姿态监测等安全预警功能，充分保障了施工过程中周边人员和设备的安全。



图 1.2 拓疆者智能遥控套件

Figure 1.2 Tuojiang Intelligent Remote Control Kit

此外，山河智能也是较早开始研究智能挖掘机的企业之一，例如山河 SWE215ERC 和 SWE-17E 智能遥控挖掘机。山河智能通过无线通信技术、传感器技术和智能化控制技术等多种技术的融合，实现了 5G 远程遥控驾驶，可广泛应用于煤矿开采和抢险救灾等大型施工项目和危险环境中[8]。SWE215ERC 支持本地、近程遥控器和远程遥控舱三种操作模式，具有视频监控、三维姿态、虚拟仪表和辅助施工人机交互系统；可远程控制距离超过 2 千米，延时小于 50ms。



图 1.3 山河智能遥控挖掘机

Figure 1.3 Shanhe intelligent remote control Excavator

1.2.2 国外研究现状

国外针对此方面的研究起步较早，早在上世纪 80 年代，美国 John Deere 公司就已研制出可无线遥控的 690 CR 液压挖掘机，该液压挖掘机的硬件系统主要由主控器、无线收发器和音视频解码模块构成，通过控制端和车载端进行数据交互，可实现在 1500 米内的遥控作业[9]。

进入 21 世纪后，伴随无线通信和智能控制等技术的快速发展，在远程遥控和无线通信方案的选择上也变得丰富起来，在工程机械领域中，最具竞争力的如国外卡特彼勒、沃尔沃和小松等公司都研制了自己的远程遥控产品。

作为行业领先者的卡特彼勒公司，在 2016 年实现了对卡特 D8T 履带式推土机的远程控制，其最大有效控制距离可达 2,200 公里，相当于从北京到广州的距离。同年，卡特彼勒对于远程控制的研究更进一步，在大型推土机 D11 上对其最新研发的远程操作系统 Command 进行验证，该系统可以使操作者同时管理三台 D11 推土机[10]。操作者可以使用便携式的控制台实现所有操作功能，包括发动机的前进、转向、加速、减速和制动等；此外，推土机的速度和发动机转速等关键仪表数据也可以使用控制台进行查看，一定程度上地减少了驾驶员在危险环境下的工作时间。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/375100001023011131