

2001 年上海大学博士学位论文

20

机器人壁面自动清洗 系统的工程研究

作者：张海洪

专业：机械电子工程

导师：龚振邦



上海大学出版社

2001 年上海大学博士学位论文

机器人壁面自动清洗系统的工程研究

作者：张海洪

专业：机械电子工程

导师：龚振邦

上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation(2001)

Auto-Cleaning Wall-climbing Robot System

Candidate: Zhang Haihong

Major: Mechatronics Engineering

Supervisor: Prof. Gong Zhenbang

Shanghai University Press

Shanghai

上海大学

本论文经答辩委员会全体成员审查, 确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

主任:	马培芬	教授, 上海交通大学	200032
委员:	程均实	教授, 上海交通大学	200030
	谈大龙	研究员, 沈阳自动化所	110015
	华大年	教授, 东华大学	200051
	钱晋武	教授, 上海大学	200072
	陈慧宝	教授, 上海大学	200072
导师:	龚振邦	教授, 上海大学	200072

评阅人名单:

马培荪	教授, 上海交通大学机器人研究所	200030
姚志良	研究员, 上海富安自动化公司	200041
王越超	研究员, 中科院沈阳自动化所	110015

评议人名单:

谭 民	研究员, 中科院北京自动化所	100080
贾培发	教授, 清华大学计算机系	100084
邓志东	教授, 清华大学计算机系	100084
刘建平	教授, 长沙国防科技大学	410073
王金友	研究员, 机械部北京自动化所	100081

答辩委员会对论文的评语

张海洪同学的博士学位论文：“机器人壁面自动清洗系统的工程研究”立足于“国家 863 计划”课题，在阅读大量相关文献后，对国内外相关技术进行了深入的对比分析，针对吸附、移动和高效清洗上的技术难点，从工程实用的角度出发，有创新的研制了一套单吸盘轮式爬壁机器人系统，开发了一种集刷洗、刮洗、冲洗于一体，并能自动回收清洗污水的壁面清洗装置。并获得了具有自主知识产权的全方位越障车轮组专利（实用新型专利号为：ZL 99 2 40034.1）和壁面清洗装置专利（实用新型专利号为：ZL 00 2 18321.8）。作者利用 Sheth-Uicker 规则和 Appell 方程建立了运动学模型和动力学方程，为单吸盘轮式爬壁机器人系统的运动进行了理论分析。

研究工作量大，论文内容充实，理论分析和实验验证相结合，既有理论深度，又有工程实用价值。

论文条理清晰，层次分明，文笔流畅，实验可靠，反映出作者掌握了坚实宽广的基础理论和系统深入的专业知识，具有很强的独立从事科学研究工作的能力。

答辩中思路清晰，回答问题正确。

经答辩委员会表决，一致同意通过论文答辩，建议授予博士学位。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决，六票全票一致同意通过论文答辩，建议授予博士学位。

答辩委员会主席：**马培芬**

2001 年 4 月 20 日

摘 要

高层建筑物的壁面清洗是一项量大面广的作业,迄今为止,国内外基本上还停留在人工清洗阶段,壁面清洗自动化亟待解决。壁面自动清洗的两大关键技术是:壁面移动技术和壁面清洗技术。本文研究的机器人壁面自动清洗系统属于国家“863”计划资助项目,研究的目的是为高层楼宇平直外壁面的自动清洗提供一套机器人作业系统,提高清洗工作效率,降低清洗费用,彻底改善清洗人员的工作条件,具有很高的推广应用价值。本文对该机器人系统的行走装置、清洗作业装置、真空吸附装置、供水及污水循环装置、控制系统等方面的关键技术进行了系统深入的研究。

在导师龚振邦教授和谈士力副教授的悉心指导下,查阅了大量国内外文献资料,系统地综述了国内外爬壁机器人和壁面清洗技术研究现状,基于技术实现和市场应用两方面的考虑,深入分析了机器人壁面自动清洗系统在理论和实际开发中存在的技术难点,并针对现场作业的特殊情况,研制了以单吸盘轮式爬壁机器人作为该系统的移动平台和任务搭载平台;开发了集冲洗、刷洗、刮洗联合作业于一体,并能自动回收清洗污水的清洗作业装置;基于 PLC 的主控制器直接安装在移动平台上,通过手动遥控盒或上位计算机进行远程遥操作,所研制的机器人壁面自动清洗系统具有清洗效率高、清洗效果好、没有污水泄漏等优点,并且移动平台能够跨越一定高度的规则障碍(如窗框),提高了系统的壁面适应能力。

机器人壁面自动清洗系统主要包括爬壁机器人本体、控制系统、清洗作业装置、安全保险装置四大部分。爬壁机器人作为移动平台和任务搭载平台,实现机器人系统在壁面上的吸附和移动功能,它包括吸附系统和移动系统两大部分。机器人移动系统采用的是无轨吊索和轮式全方位移动相结合的方式,保证机器人系统在壁面上自由运动。本文成功地开发了一种集移动、转向和越障功能于一体的全方位越障车轮组机构,四套车轮组机构构成了爬壁机器人的行走装置。

为了解决机器人系统在壁面上的吸附和密封问题,成功地设计了气囊弹簧组合式密封机构,使机器人能够很好地适应各种材质的壁面(如瓷砖或粉墙壁面等),利用流体网络理论分析了吸盘在抽风机启动、关闭和遇障碍时吸盘内真空度的动态变化,得出了吸盘内真空压力的变化与吸盘结构参数间的相互关系,为此类吸盘的设计提供了理论依据。

在解决了机器人系统壁面吸附和移动功能后,合理设计清洗作业装置是解决壁面自动清洗问题的关键,本文有针对性地设计了高压水冲洗+滚刷刷洗+刮板刮洗+污水自动回收的清洗作业装置,在分析影响清洗效率和效果的诸多因素基础上,规划了清洗工艺,实验表明该清洗装置能够高效地彻底清洁壁面。

机器人系统运动学和动力学的分析建模是实现机器人控制的基础,论文利用适合于高副连接的多闭环系统的 Sheth-Uicker 方法,建立了系统的运动学模型,并得出了运动学正问题和逆问题的最小二乘解,为机器人的运动控制提供了理论依据;由于机器人系统是一个非完整约束系统,利用 Appell 方程建立了机器人的动力学模型,并针对各个车轮组在实际运动中的不同分工,分别建立了驱动轮、导向轮的动力学方程,为将来的加速度控制

打下了基础。

控制系统主要须完成对机器人行走、吸附、清洗、安全等装置的控制，必须具有操作简单、方便的特点。我们采用的是上位计算机和 PLC 两级控制方式。上位机系统主要用来完成对机器人路径规划运算、运动控制运算、位姿控制运算、信息存储、离线仿真、状态可视化处理，并对 PLC 发出一系列的命令，最终实现对机器人的实时监控。下位机（PLC）主要是完成输出动作控制、数据采集及状态判别等工作，操作时可以使用上位计算机直接遥控，也可以通过操作盒进行遥控。

总体性能实验结果表明，该壁面自动清洗机器人系统达到了国家“863”合同书的任务要求，该系统已于 2000 年 10 月通过国家“八六三”课题组专家验收。

关键词 爬壁机器人，清洗机器人，全方位移动机构，负压吸附

Abstract

It is tedious, dangerous and awkward to clean the facades of skyscrapers. Even to present, all the work is done by workers in suspended scaffoldings. It is quite urgent to realize the automation of façade cleaning. Two key technique questions should be solved in the cleaning automation process. They are wall-moving technique and wall-cleaning technique.

The Auto-cleaning Wall-climbing Robot System discussed in this dissertation is supported by “863” National High -tech Plan, aiming at providing city construction industry with a highly efficient wall-climbing robot for cleaning glass or tile wall automatically. In this dissertation, the moving system, suction system, cleaning system, sewage recycling system, control system are studied with reference to relevant research works.

Guided by my tutors Prof. Gong Z.B. and associate Prof. Tan S.L., based on lots of reference, this paper presents the classification and features of wall-climbing robot and introduces the development situation of wall-climbing robot and wall cleaning technique in detail. With considerations of both techniques and practical application, we discussed the technical difficulties in developing the Auto-cleaning Wall-climbing Robot System. Then the dissertation presents a prototype model. The system includes a single-suction cup wheel-moving type wall-climbing robot which worked as mobile platform and working platform, a combined cleaning device which can flush, scrub, scrape the wall surface and be able to collect sewage automatically, and a control system which was installed on the wall-climbing robot directly. The whole system can be

manipulated by up-computer or hand-holding control-box remotely.

The wall-climbing robot makes the whole system stick and move on the surface. It consists of suction system and moving system. The moving system combines non-rail sling driving mode and omni-directional wheel driving mode together. A new type of omni-directional wheel, which have three functions: driving, turning and overstepping, had developed. Four sets of this kind of omni-directional wheel consist the mobile platform of the wall-climbing robot, which makes the whole system move on the wall surface freely.

To solve the suction and sealing problem on the wall surface, the air spring made of spring and air cell is designed as the sealing mechanism. The sealing mechanism can adapt to different kinds of wall surface such as tile surface or concrete surface. On the basis of flow net theory, the suction models while the air pump starts and stops suddenly or the suction cup encounters obstacles are established. The effect between pressure inside the suction cup and structure parameter of suction is studied. Then some rules for design this kind of suction cup are discussed in detail.

A reasonable designed cleaning device is necessary for implementing the cleaning task. A multi-functions cleaning apparatus is designed. This apparatus combined the flushing, scrubbing and scraping cleaning modes. It is able to collect the sewage so that no sewage leaks from the gap between suction cup and wall surface to pollute the cleaned surface again. The different factors which influence the cleaning effect and efficiency have been studied in detail. Based on this study, the cleaning technology has been programmed.

The kinematics and dynamics equations are necessary for the robot control. Because there are multi-closed loops and multiple dot-connect links, the Sheth-Uicker transform is used to build the

kinematics equation of wall climbing robot. The positive and inverse solutions of the kinematics equation are gained. These solutions provide the theory support for motion control of the wall-climbing robot. The wheel driven wall-climbing robot is an non-integrity system, Appell equation is used to established the dynamics model of the wall-climbing robot. In fact, a given wheel serves as driving wheel or turning wheel during moving period. Based on this pointed, the dynamics equations for driving wheel and turning wheel are built respectively.

The control system accomplishes the control tasks of driving device, suction device, cleaning device and safety device . It must be operated simply and conveniently. Two stage computer processing system has been adapted. The up-grade computer is an home PC and accomplishes planning routine, creating motion and posture control commands, storing data, emulating off-line and visualizing states. It can supervise and change information with the low-grade computer. The low-grade computer is a PLC which accomplishes carrying out command, gathering state data and changing information with up-grade computer and so on. The working characteristics of Auto-cleaning Wall-climbing Robot System required remote control. It is realized through wireless communication between low-grade computer and up-grade computer.

The test shows that the robot system has fulfilled the technical requirement of the "863" contract. The project had passed the check by 863 professional group in October 2000.

Key words wall-climbing robot, cleaning robot, omni-directional mechanism, negative pressure suction

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 爬壁机器人的分类及特点	2
1.3 国外爬壁机器人的发展概况	4
1.4 国内爬壁机器人的发展概况	20
1.5 壁面清洗技术发展概况	23
1.6 本文的主要研究内容	24
第二章 机器人壁面自动清洗系统的总体设计	27
2.1 引 言	27
2.2 机器人壁面自动清洗系统的组成	28
2.3 机器人壁面自动清洗系统的控制系统总体设计	33
2.4 本章小结	35
第三章 爬壁机器人本体结构设计	36
3.1 引 言	36
3.2 爬壁本体结构	36
3.3 爬壁机器人静力分析及可靠吸附与移动条件	39
3.4 爬壁机器人的密封装置设计	44
3.5 爬壁机器人的移动装置设计	67
3.6 本章小结	82
第四章 清洗作业装置的设计	84
4.1 引 言	84
4.2 清洗作业装置的总体设计	84
4.3 设计实例	98
4.4 壁面清洗工艺分析	100

4.5 本章小结	102
第五章 爬壁机器人运动学和动力学分析	103
5.1 引 言	103
5.2 爬壁机器人运动学建模	103
5.3 机器人的运动学模型的解	117
5.4 爬壁机器人运动方式分析	122
5.5 机器人的动力学建模及求解	126
5.6 本章小结	133
第六章 控制系统的设计	134
6.1 引 言	134
6.2 控制系统的硬件设计	135
6.3 机器人下位控制系统软件设计	144
6.4 软件系统可靠性设计	150
6.5 上位计算机对机器人的监控	151
6.6 抽风机的模糊变频控制	164
6.7 本章小结	171
第七章 实验分析	172
7.1 实验条件	172
7.2 性能测试	173
7.3 实验总结	182
第八章 结 论	184
8.1 主要研究结论	184
8.2 本文的创新之处	186
参考文献	189
致 谢	198

第一章 绪 论

1.1 课题研究背景

随着人类社会的不断进步,科学技术的日益发展,人们对生活质量和工作环境的要求越来越高,壁面移动机器人(简称爬壁机器人)作为高空极限作业的一种自动机械装置,越来越受到人们的重视,原因是使用爬壁机器人不仅可以代替人进行危险作业,而且可以把人们从恶劣的工作环境中解脱出来.特别是日本,爬壁机器人的研究处于领先水平^[1,2],早在1983年,日本通产省就制定了“极限条件下作业机器人”的国家研究计划,其中爬壁机器人被列为主要研究开发项目.目前国内外已有一定数量的爬壁机器人投入现场作业,概括起来主要应用于以下几个方面:

- 1) 核工业 对核废液储罐进行视觉检查、测厚及焊缝探伤等^[3,4].
- 2) 石化工业 对圆形或球形储罐的内外壁进行检查、喷沙除锈、喷漆防腐等^[5,6].
- 3) 建筑业 用于检测、清洗壁面等作业^[7-11].
- 4) 消防部门 用于传递救护物资,进行救援工作^[12].
- 5) 造船行业 用于喷涂船体或船舱内壁等^[13].

壁面自动清洗机器人(Wall Cleaning Robot)是一种移动式服务机器人(Service Robot),它可在垂直壁面或顶部移动,完成清洗物体外表面的作业任务,是极限作业机器人的一个分支.现代城市高楼林立,大厦壁面大多数采用瓷砖结构或玻璃幕墙结构,常年裸露在外,需要进行许多维护清洁工作.迄今为止,大楼壁面清洗的自动化设备尚没有得到很好解决,这类工作仍由人工搭乘吊蓝进行高空作业来完成,高空气流使吊蓝和工作人员难以平衡,对人身安全和大楼壁面构成很大的威胁,并且这种作业方式效率低、成本高.

高层建筑物的外壁面一般是由平面和曲面组合而成的,适合在曲面上作业的球形壁面移动机器人尚处于应用基础研究阶段,有许多理论及工程实际问题尚需解决,离工程应用还有相当的距离;适合在平整壁面上工作的爬壁机器人国内外展开了许多研究,虽然仍有一些技术及工程实际问题尚需作进一步的研究,但已有实际工程应用的成功范例,关键技术已趋于成熟,对此类机器人系统展开工程应用研究,可望解决工程实际问题,因此,本论文展开了适应于清洗高层建筑物平整外壁面的爬壁机器人系统的研究,论文的研究工作是结合国家 863 计划资助项目(863-512-9803-09)“机器人壁面自动清洗系统”来开展的,该项目的研制成功将会实现楼宇壁面清洗作业的自动化,给清洗业带来一次新的革命,同时通过更换周边设备可适应其他的作业任务.

1.2 爬壁机器人的分类及特点

机器人能够在壁面上自由移动并且进行作业,必须具备三大机能,即吸附机能、移动机能、作业机能^[14-16],爬壁机器人主要按吸附和移动机能来进行分类的.