工业设计

高层外墙清洗机器人的设计

张利霞[1]，杨志成[2]，张景胜[2]，张文阁[1]
（1.北京联合大学 北京市信息服务工程重点实验室，北京 100101；2. 北京联合大学 生物化学工程学院，北京 100023）

摘要：目的 设计一种可以为高层建筑外墙进行清洗的机器人，其主体结构包括行走机构和机器手机构。**方法** 针对高层建筑外墙清洗作业需求，设计了基于电磁吸盘原理机器人的爬墙行走机构。采用PLC三轴联动位控单元技术，设计了具有清扫功能的机器手。**结论** 利用行走机构中的电磁吸盘技术，克服了机器人墙壁拐角、墙缝行走效果不理想、行走速度慢等缺点，丰富了机器人工作环境，提高了清洗机器人的工作质量。

关键词： 高层外墙；爬墙机器人；机器手；电磁吸盘；PLC
中图分类号： TB472 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2014)16-0022-04

Building External Walls Cleaning Robot Design

ZHANG Li-xia[1], *YANG Zhi-cheng*[2], *ZHANG Jing-sheng*[2], *ZHANG Wen-ge*[1]
(1.Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China;
2. Biochemical Engineering College of Beijing Union University, Beijing 100023, China)

ABSTRACT: Objective It introduced a robot of building external walls cleaning job, whose main structure are composed of walking mechanism and robotic arms. **Methods** According to the requirements of building external walls cleaning job, it designed the climbing walking mechanism based on electric magnetic chuck principle, and machine hand with cleaning function using PLC three axis position control unit technology. **Conclusion** With the cleaning function of the machine hand, it solved the robot wall corner, wall joint walking poor, slow and other shortcomings, enriched the robot working environment, and improved the quality of cleaning robot.

KEY WORDS: building exterior wall; climbing robot; machine; electric magnetic chuck; PLC

随着我国城市化的快速发展，更多的高层建筑拔地而起，而糟糕的空气质量使得高层外墙披上了褴褛的外衣，严重影响了居民的生活质量与城市形象。一些公司不得不花高薪雇用“蜘蛛侠”从事外墙清洗这一高危工作。然而，越来越多的外墙清洗工作与少数愿意从事“蜘蛛侠”这种高危工作的人员之间形成了矛盾[1-2]。随着机器人技术的发展，爬墙机器人已经成为机器人自动化技术领域的一门重要技术，如果将自动化清洗技术与爬墙机器人技术相结合，由高层外墙清洗机器人替代“蜘蛛侠”从事这一高危工作，将改善找不到“蜘蛛侠”清洗外墙这一问题，因此，优化外墙清洗机器人的机械机构设计，改善机器人的控制器功

收稿日期： 2014-03-05
基金项目： 北京市信息服务工程重点实验室资助项目(Zk20201304)
作者简介： 张利霞(1975—)，女，甘肃人，硕士，北京联合大学讲师，主要研究方向为智能控制。

能，具有重要的现实意义[3]。我国在这方面的研究还很少，这里为解决这一矛盾提供了方法。

1　外墙清洗机器人的结构设计

机器人整体结构主要包括：爬墙行走机构和机器手机构，其总体结构见图1。为提高外墙清洗机器人机械系统的控制性能，要求机械传动部件的转动惯量小、阻尼比合理、刚度大，并满足体积小、质量轻、高速、低噪音和高可靠性等要求[4]。由此可见，合理设计驱动方式和机械传动是保证整个机器人伺服控制性能的基本要求。

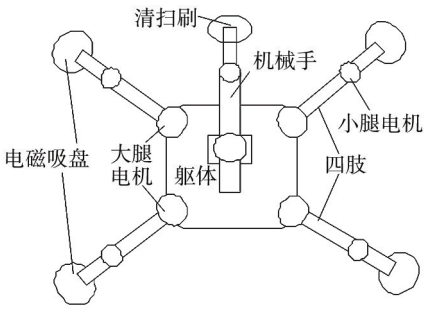

图1　总体结构

Fig.1　The overall structure diagram

1.1　现有爬墙机器人行走机构分析

高层外墙清洗机器人尚处在研究阶段，它的行走机构是爬墙机器人。现有的爬墙机器人按腕足分为5足[5]、6足[6]和多足[7-8]，按吸附原理分为磁吸式、吸气式和吸盘式。磁吸式用于金属结构外墙，靠履带式磁铁行走，金属外墙不多见，不作为研究重点。吸气式机器人腹部大部分身体接触墙面，依靠气泵将腹部空气抽走形成负气压，当背部大气压大于腹部大气压时，机器人被压在墙上，而这样导致的结果是排气电机不停地高速排气，行进中机器人与墙面之间的摩擦力大、动作慢，致命弱点是不能跨越各式墙角和不平墙面。吸盘式机器人是仿生机器人，其足部吸盘接触墙面，根据是否自备气泵又分自备气泵机器人和远程导管机器人。自备气泵机器人气泵质量大、负载能力差、行动慢、效率低；远程导管机器人质量轻、移动快速，但受到管线长度限制行动区域小，且容易缠绕。行走机构对比分析见表1，通过对墙面光洁度、墙面材质、是否自备气泵（或风机）、跨越障碍性能、作业面积和行走速度等方面进行分析，电磁吸盘式行走机构有明显的优势。

表1　行走机构对比分析

Tab.1　The comparison analysis of walking mechanism

行走机构原理	单吸气盘轮式	多吸盘式	磁吸式	电磁吸盘式
对墙面光洁度要求	一般	高	低	一般
对墙面材质要求	不高	不高	钢铁金属	不高
是否自备气泵（或风机）	带	带/不带	不带	不带
跨越障碍性能	低	一般	高	高
作业面积	一般	大/小	小	大
行走速度	一般	慢	慢	快
对墙面伤害度	一般	小	大	小

1.2　机器人的爬墙行走机构设计

这里设计的机器人的行走机构主要包括吸盘和旋转关节，根据外层高墙的清洗要求，外层清洗机器人主要采用四腿仿生机构，此结构具有结构紧凑、稳定性好、承载能力大等特点。机器人有4条腿，每条腿由3个自由度的机械机构组成。电磁吸盘结构设计见图2，每条腿有3个自由度，分别由两个伺服电机和一个电磁吸盘组成。电磁吸盘为电磁系统和吸盘相结合，它不需要自备气泵，也不需要远程导气管。其特点是机器人在爬墙移动时质量轻、吸盘吸气和排气快捷，行进时机器人的4条腿交替接触墙面。足部接触墙面时，电磁铁断电，复位弹簧复原，推动衔铁，衔铁通过连杆拉动活塞向上运动，活塞上部和外壳上部分别有分排气孔和排气孔，避免了压缩空气阻滞活塞向上运动，提高了效率。连杆拉动形成活塞内部瞬间真空，活塞内部瞬间真空先使内侧密封裙边迅速压紧墙面，连杆的体积小于活塞的体积，使得外侧裙边动作慢于内侧密封裙边压紧墙面，并且对内侧密封裙边形成密封保护。吸盘内多活塞设计，避免了机器人足部踩在墙缝漏气抓墙不牢的危险。抬足时，电磁铁机构通电，吸盘及时分离墙面，不会摩擦墙面从而行动快捷。腿部采用四肢机构，其特点是机器人足部吸盘在吸附墙面时，其中两足静止，另外两足运动，始终能保

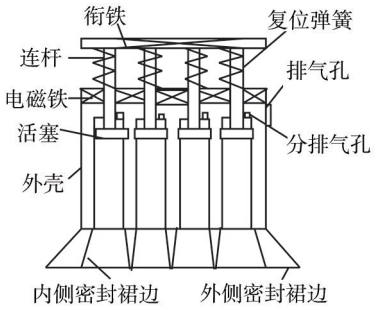

图2 电磁吸盘结构设计

Fig.2 The electromagnetic sucking disc structure design

证机器人有两足吸盘与墙面相连，且吸盘受力方向与水平面保持垂直，提高机器人的负载能力，可减少因机器人重力较大，造成机器人下滑错位、跌落等伤害。

1.3 机器手的机构设计

外墙清洗机器人工作原理是由爬墙机器人结合一个拥有4个自由度的机器手来完成，机器手的结构设计见图3。用于检测洁净度的摄像头装在肘部前端，便于观察。机器手是机器人自带的一个自动清洗装置，机器手执行机构包括：肩部电机、肘部电机、腕部电机和清扫电机。由于清扫电机只完成单一清扫任务，对清扫位置影响不大，因此末端执行机构是腕部电机。自动清洗装置采用四连杆机构设计，其特点是一方面机器人在竖直、倒立运动时，机器手始终能保证清洗机器人前部和左右两部的墙面；另一方面可以减少机器人空间位置姿态控制自由度，从而降低机器人的控制难度[9-10]。

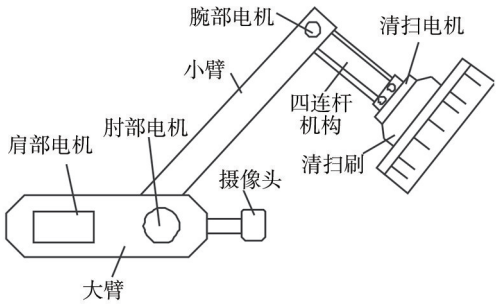

图3 机器手的结构设计

Fig.3 Structure design of the machine hand

四连杆机械设计实施方法是将腕部电机输出轴的半径设计为四连杆机械的一杆。当末端执行机构清扫转动时，能够保证前端的刷子与墙面保持垂直，从而最大面积地接触被清洗的墙面，提高工作效率。

在机械运动控制中，由于受到自身重力等因素影响到控制精度，需要进行运动补偿。运动补偿主要是直线补偿和弧度补偿，机械力学的运动补偿是控制中的难题。PLC的三轴联动位置控制单元技术（简称位控单元），具有先进的电机控制技术，尤其是运动补偿。如果将PLC的三轴联动位控单元技术移植到机器手控制单元上，移植时根据客观需要自我改良，使三轴控制单元分别控制肩部电机、肘部电机以及腕部电机，会减轻电器控制难度。补偿包括机器手各个关节的长度、质量、各个伺服电机的转动力矩等。补偿参数可以根据数学模型推算，再经过现场实验的方法调测。

2 机器人控制器系统设计

2.1 PLC控制器的选择

根据机器人的工作需要，机器人四腿运动是复杂的联动过程，在以往的机器人规划运动控制中，对计算机的运算速度、I/O接口数目、模拟量运算精度、PWM输出、时钟中断等方面的要求很高，松下可编程控制器（PLC-FP2）不仅满足机器人运算速度、充足的I/O单元、模拟量控制单元，而且有先进的二轴、三轴联动位置控制单元。由于控制单元可以直接设置相关的电机的运动极限位置、控制器的控制参数，这将大大减少机器人的开发时间，减少机器人的控制难度。

松下可编程控制器选用FP2型CPU单元，扩展模块数量可达到7个。机器人控制系统结构见图4。CPU单元自带数字量I/O接口（8入8出）一个，其中4点输入用于检测位置传感器的信号，4点输出用于控制4个电磁吸盘。16位模拟量（2入1出）模块一个，两路输入模块分别用于机器手末端位置角度检测和墙面洁净度检测；输出模块用于控制清扫电机的转速。二轴位控单元模块4个，用于控制机器人的4条腿。三轴联动位置控制单元1个，控制机器手的肩部、肘部和腕部电机。

2.2 控制器系统程序设计

系统程序由一个主程序和若干子程序组成，包括系统初始化程序、机器手控制程序和四腿行进程序。主程序流程见图5。

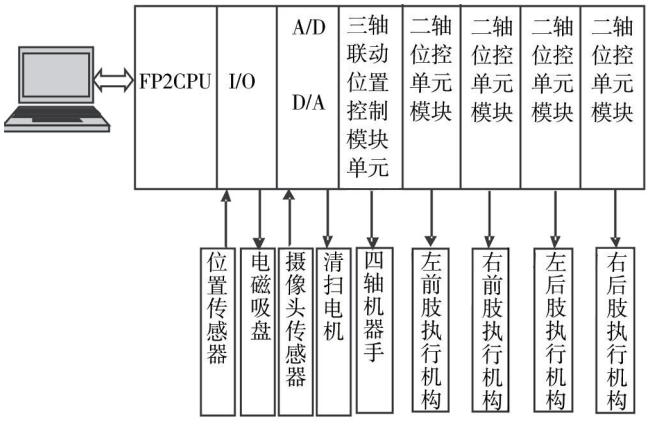

图4　机器人控制系统结构

Fig.4　The robot control system structure diagram

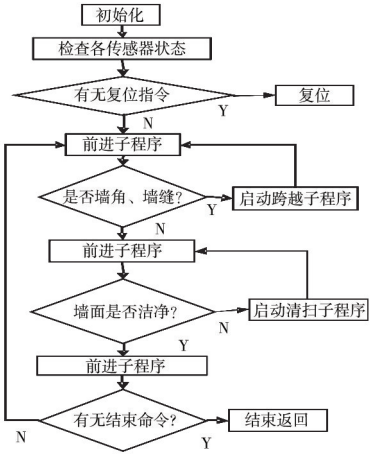

图5　主程序流程

Fig.5　The main program flow chart

1）系统初始化程序。主要包括传感器的参数检测、定时器、计数器等参数的初始值设定，执行机构位置复位，上位机与下位机通讯、报警等。

2）机器手控制程序。机器手的控制结构见图6，主要编写清扫子程序。机器手控制程序先是利用摄像头检测墙面的洁净度，再将视频信号通过专门电路LM1881转换成模拟量，输入PLC中的内置A/D模块和D/A模块。模拟量值与内部设定比较产生偏差，根据偏差值控制清扫电机启停转速，三轴联动位置控制模块是机器人位置控制的核心部件，它的使用将减小机器人的开发和控制难度，并能缩短项目的开发周期。

3）四腿行进程序。主要包括位控单元中大腿、小腿电机的速度控制，在程序中编写前进子程序、跨越障碍子程序、转弯子程序、墙角转弯子程序等。

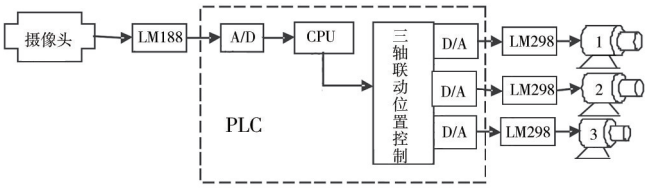

图6　机器手的控制结构

Fig.6　The control structure diagram of machine hand

3 结语

根据高层外墙清洗工作的需要，结合现有爬墙机器人的技术，提出一种以PLC为控制核心的高层外墙清洗机器人的设计方案，利用行走机构中的电磁吸盘技术和PLC的位置控制单元，优化了机器人墙壁不能拐弯、墙缝行走效果不理想、行走速度慢等缺点，丰富了机器人的工作环境，提高了清洗机器人的工作效率。

参考文献：

[1] 尧优生.基于“社会性设计”的产品创新设计分析[J].包装工程，2013，34（18）：99—102.
YAO You-sheng.Product Innovation Design Analysis Based on the "Social Design"[J].Packaging Engineering，2013，34（18）：99—102.

[2] 孟海涛.妥善处置事故 防止环境污染——从近期几起生产安全事故说开去[J].环境保护，2011（14）：51—53.
MENG Hai-tao.Proper Disposal of Accident Prevention of Environmental Pollution：Discussion on Recent Production Safety Accidents[J].Environmental Protection，2011（14）：51—53.

[3] 江旭.中国制造业碳排放强度的差异性分析[J].统计与决策，2012（17）：141—144.
JIANG Xu.Differences Analysis of China Manufacturing Carbon Emission Intensity[J].Statistics and Decision Making，2012（17）：141—144.

[4] 李成伟，贠超.码垛机器人机构设计与运动学研究[J].机械设计与制造，2009，6（6）：181—183.
LI Cheng-wei，YUN Chao.Palletizing Robot Mechanical Design and Kinematics[J].Mechanical Design and Manufacturing，2009，6（6）：181—183.

[5] 高玮玮，陈再良，宦洪才.基于气压传动原理五足式爬墙机器人的设计与制作[J].苏州大学学报（工科版），2006（4）：22—24.
GAO Wei-wei，CHEN Zai-liang，HUAN Hong-cai.The De

（下转第45页）

Product[J].Packaging Engineering,2008,29(6):188—190.

[4] 畅明.成熟期的消费类数码产品开发策略探研[D].景德镇：景德镇陶瓷学院,2010.
CHANG Ming.Research on Development Strategy of Consumer Digital Product in Mature time[D].Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic Institute,2010.

[5] 王志强.基于乐活生活方式的数码产品设计研究[D].无锡：江南大学,2011.
WANG Zhi-qiang.Research of Digital Product Design Based on the Live Music[D].Wuxi:Jiangnan University,2011.

[6] 马蕾.可持续包装设计探讨[J].包装工程,2011,32(4):77—80.
MA Lei.Research on Sustainable Packaging Design[J].Packaging Engineering,2011,32(2):33—36.

[7] 李伟.针对职业女性的消费类数码产品设计研究[D].沈阳：沈阳航空航天大学,2013.
LI Wei.Research on Consumer Digital Product Design for the Professional Female[D].Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics,2013.

[8] 高峰.同质化背景下的消费类数码产品人机界面研究[D].无锡:江南大学,2004.
GAO Feng.Research on HMI of Consumer Digital Products Under the Homogeneity Background[D].Wuxi: Jiangnan University,2004.

[9] 李丹碧林,陶晋,洪华.基于可持续性设计思想的产品再设计[J].包装工程,2007,28(1):168—169.
LI Dan-bi-lin, TAO Jin, HONG Hua.Discussion on Product Redesign Based on Sustainable Idea[J].Packaging Engineering,2007,28(1):168—169.

[10] 陈敏.对中国可持续设计发展的浅思[J].美与时代,2010(7):45—48.
CHEN Min.Thought about the Development of Chinese Sustainable Design[J].Beauty and Age,2010(7):45—48.

(上接第25页)

sign and Manufacture of Five- foot Climbing Robot Based on the Principle of Pneumatic Transmission[J].Journal of Soochow University(Engineering Science Edition),2006(4):22—24.

[6] 魏武,李金龙,任回兴.基于吸盘负压吸附的六足爬墙机器人关节转矩优化分配[J].中国机械工程,2013,5(2):1289—1294.
WEI Wu, LI Jin-long, REN Hui-xing.Joint Torque Distribution of a Six-legged All-climbing Robot with Negative Pressure Adsorption Sucker[J].China Mechanical Engineering, 2013,5(2):1289—1294.

[7] 魏武,蔡钊雄,邓高燕.基于能耗目标优化的多足爬墙机器人足力控制研究[J].中国机械工程,2013,5(1):1099—1104.
WEI Wu,CAI Zhao-xiong,DENG Gao-yan.Research on Foot Force Control for Multi-legged Wall-climbing Robot Based on Optimal Target at Energy Consumption[J].China Mechanical Engineering,2013,5(1):1099—1104.

[8] 江丰元,安琦.多盘非接触吸附式爬墙机器人:中国,201010617410.2[P].2010-12-27.
JIANG Feng-yuan, AN Qi.Multi-disc Non-contact Adsorption Climbing Robot:China,201010617410.2[P].2010-12-27.

[9] 唐建敏.一种适用于爬墙机器人的履带吸盘组件:中国,201210299724.1[P].2012-08-21.
TANG Jian-min.A Crawler Chuck Assembly Suitable for Wall Climbing Robot:China,201210299724.1[P].2012-08-21.

[10] 韩丽娜,马咏梅.基于PLC控制系统的工业机械手研究[J].煤矿机械,2013(7):170—172.
HAN Li-na, MA Yong-mei.Industrial Robot Research Based on PLC Control System[J].Coal Mine Machinery, 2013(7):170—172.