

爬壁清洗机器人研究现状及发展趋势

李磊^{1,3},杨幸²,秦绪杰²,王雅倩³

- (1. 北方工业大学 机械与材料工程学院,北京 100144;
2. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院,北京 100083;
3. 北京工业职业技术学院 机电工程学院,北京 100042)

摘要:爬壁清洗机器人凭借其自身的爬壁优势和多样用途,取得了飞速的发展,并被广泛应用于高空作业。通过对当前国内外关于爬壁清洗机器人应用的分析,从不同类型机器人的吸附方式、行走方式、技术应用等方面进行归纳分析,总结出不同类型机器人的优缺点,并根据当前爬壁清洗机器人的局限性,对爬壁清洗机器人未来的发展趋势提出了安全性、可靠性、轻量型及全自动化等方面的建议。

关键词:爬壁机器人;清洗机器人;吸附方式;行走方式

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)01-0001-06

Research Status and Development Trend of Wall-climbing Cleaning Robots

LI Lei^{1,3}, YANG Xing², QIN Xujie², WANG Yaqian³

- (1. College of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;
2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China)

Abstract: Wall-climbing cleaning robots, relying on their own unique wall-climbing advantages and diverse uses, have achieved rapid development and have been widely used in high-altitude applications. By analyzing the current application of wall-climbing cleaning robots at home and abroad, this paper summarizes and analyzes the adsorption methods, walking methods, and technical applications of different types of robots, and sums up the advantages and disadvantages of different types of robots. With regard to the limitations of current wall-climbing cleaning robots, suggestions for their future development trend with higher safety, reliability, light weight, and full automation are put forward.

Keywords: wall-climbing robot; cleaning robot; adsorption method; move method

0 引言

随着我国城市化进程速度加快,城区高层建筑的数量随着经济发展逐步增长,除居住用的房屋建筑外,增长建筑较多的为高层办公写字楼。高层办公写字楼应用较多的为光滑的玻璃幕墙,作为一种户外墙体,空气中的尘埃、飞禽的排泄物等难免会吸附或堆积于外墙表面,使得玻璃幕墙不美观、景观通透性变差。因此,玻璃幕墙需要定期清洗来守护城市的形象^[1-2]。

目前我国各地高层建筑外墙清洗工作的自动机械化普及程度比较低^[3],清洗工作主要由人工来完成,也就是由被称为“蜘蛛人”的高空作业清洁工人^[4]来完成。人工清洗的方式是,清洁工人乘坐吊篮在高空外墙上用清洁工具进行外墙清洗,其清洗难度大,清洁效率低,人工成本高,最主要的是人工清洁极具危险性,当高空空气乱流侵扰吊篮时,吊篮左右晃动失去平衡,易造成清洁工人出现意外事故或吊篮撞击建筑外墙而损坏墙体。因此,采用智能爬壁清洗机器人代替传统的人工高空清洁十分重要,爬

壁清洗机器人相较于人工清洁具有更高的安全性、更高的清洁效率、更低的作业成本等优势^[5]。设计开发爬壁清洗机器人具有广阔的市场前景并可以带来较高的经济价值和社会价值^[6]。

当前国内外研究的爬壁清洗机器人都取得了一定的成果,但在某些特殊工作环境下仍然存在不足^[7],如在工作壁面表面缺陷、有障碍物等特殊环境下,机器人无法完成清洁任务甚至可能出现故障或坠落。因此,研究爬壁清洗机器人以实现各种特殊环境下的安全应用十分重要,同时爬壁清洗机器人在不同的应用场景都有着极大的发展空间。

1 爬壁清洗机器人的吸附方式

在常规工况下,爬壁清洗机器人通常在大于60°倾角以及90°垂直的墙面上进行爬行作业。因此,爬壁清洗机器人的工作核心在于其对工作壁面的吸附能力,吸附力对机器人系统的整体作用力要大于机器人自身重力及其负载。传统的重力做功机器多为类似卷扬机的升降装

置^[8],随着爬壁机器人吸附设备的发展,当前爬壁机器人的壁面吸附方式主要分为4种:磁吸附方式、真空吸附方式、气流负压吸附方式和特殊材料吸附方式^[9-10]。

1.1 磁吸附方式

磁吸附方式可以分为永磁吸附和电磁吸附两种方式^[11]。该吸附方式能产生强有力的吸附力使得机器人本体吸附在工作壁面上稳定作业,吸附效果好,且能应用于不同形状的壁面环境,能在有瑕疵裂缝或凸起点壁面上稳定工作。已有应用的机器人比如墙体除锈爬壁机器人、焊接爬壁机器人等。

1996年,上海交通大学研究了一款用于检测油罐容积的爬壁机器人^[12-13],如图1所示。该机器人的吸附装置为永磁铁制作的磁吸盘元件,磁吸盘连接在链条上,有一个特殊磁路产生磁力使得机器人被吸附在壁面上。该机器人质量为14.6kg,可负重20kg的载荷,1m内的行程偏差小于10mm,能耗小,吸附稳定。但其上下行程仅为15m~18m,运动范围小。磁吸附方式还有致命的缺点:只能在特定的金属材料壁面上进行吸附,能耗较高,能量利用率低,而且吸附力大时机器人移动一定距离所消耗能量更多。

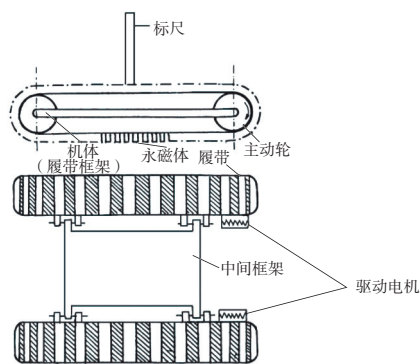


图1 油罐容积检测爬壁机器人

1.2 真空吸附方式

真空吸附方式是利用真空发生装置(如真空泵)来使吸附装置(如吸盘)内处于负压状态,依靠外部大气压作用使机器主体紧紧吸附在工作壁面上。真空吸附方式与磁吸附方式不同的是,可以吸附在任何材料的壁面上。真空吸附能产生较大的吸附力,吸附能力强且能耗较小。

2020年,新加坡科技设计大学设计了一款小型轻便的双吸盘式爬壁清洗机器人“Wall-C”^[14]。如图2所示,该机器人安装有2个真空吸盘,2个真空吸盘吸附墙壁后与壁面产生摩擦力,机器人中心有1个圆形刷子将真空室与外界环境隔开,真空吸盘和圆形刷子一起作为机器人的真空密封机构。机器人使用两个高效的8kPa容量的无刷电机鼓风机(BLW)产生吸力,同时电机驱动轮子转向和移动,保证了机器人在没有额外基础设施支持的情况下能在壁面上导航行走。机器人真空室中有1个压力传感器,用于测量压差,以便在故障时采取必要的控制措施,其稳定工作的压差范围在3.1kPa~3.7kPa。机器人体积小,尺寸仅为235mm×230mm×70mm,其密封圈直径为

200mm,刷圈的直径为180mm。机器人的移动速度为12.5cm/s。但Wall-C几乎无法承担额外的负载,无法装载水箱,这也是它的弊端所在,故机器人在用水清洁时需要手动供应水或清洁剂。



图2 Wall-C爬壁清洗机器人

2013年,中国计量大学设计了一款间歇式单吸盘爬壁机器人^[15-16],主体结构采用550mm×370mm的ABS塑料板,如图3所示。该机器人的独特之处在于它的吸附机构,吸附机构采用的密封方式与常规的被动吸附方式完全不同。该密封机构离心风扇排出的气体进入特殊导流机构后与通过墙壁缝隙进入机器人的泄漏气体相碰撞,产生一定的冲击,从而阻挡小部分气体通过缝隙进入机器人内部腔室,进而确保了吸盘内外真空压差的稳定,使得气体的泄漏量在一个相对稳定的状态。机器人采用的离心风扇转速达6500r/min,吸盘直径为400mm。离心风扇入口直径为58mm,出口直径为208mm。当吸盘与壁面缝隙在6mm时,整个吸附装置的空气泄漏量最小。这种真空吸盘的密封机构与滑动壁面无需直接接触就可以实现密封的效果,称之为间歇式真空吸盘结构。

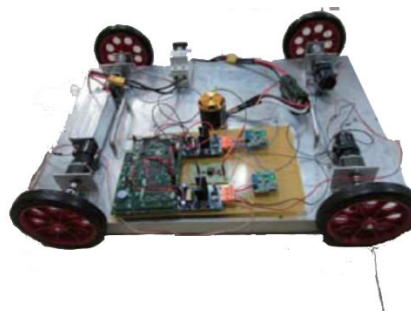


图3 间歇式单吸盘爬壁机器人

真空吸附方式的适用场景多,但对吸附壁面的条件要求较高,当工作壁面不平整或出现裂缝时,易导致吸附装置出现泄漏现象,直接导致吸附功能降低甚至失效而使得机器人掉落,出现安全事故。所以真空吸附方式对吸附装置的密封性要求较高。

1.3 气流负压吸附方式

气流负压吸附是通过风机装置(如涡轮)产生与壁面相对方向的高速气流使得机器人吸附模块区域的压强降低,从而在机器人吸附模块内部和机器人外部产生较大的气压差,使得机器人紧紧吸附在工作壁面上。

2017年,泰国农业大学设计一种双螺旋桨式爬壁机器人^[17]。如图4所示,机器人由2个螺旋桨和4个自由轮组成。每个轮子的质量仅为47g,机器人整体质量为

1.35 kg,并用12V的直流无刷电机驱动螺旋桨转动。螺旋桨旋转使得外部空气压强大于机器人内表面压强而产生一个垂直于壁面的力,实现机器人在壁面的吸附功能;由电机驱动自由轮转向和移动,从而实现机器人在壁面的自由移动,再加装轻型的清洁装置后可实现任意壁面清洁工作。



图4 双螺旋桨式爬壁机器人

气流负压吸附方式能应用的环境较多,在凹凸不平和有细小裂缝的壁面上都可以实现吸附,且具有较强的越障能力。但该吸附方式需要同时克服摩擦力和机器自身重力做功,且风机装置应用于爬壁的能耗较大,效率低,承载能力差。与真空吸附相同,气流负压吸附的风机装置需要每时每刻都处于工作状态,否则会造成吸附力直接消失而出现坠落。

1.4 特殊材料吸附方式

特殊材料吸附方式中的吸附机构采用的是一种干性黏附材料,以斯坦福大学研制的 Sticky Bot 系列仿壁虎爬行机器人为例。如图5所示,该机器人脚掌为模拟壁虎脚掌的干性黏附材料,该材料为一种微纳米尺寸的仿生刚毛,能实现机器人脚趾的外翻和内收,紧紧吸附在工作壁面上。单根刚毛的最大吸附力为(194±25)μN,当仿生壁虎脚掌绒毛与壁面夹角大于30°时即可发生脱附现象,且脱附过程只要15ms,就能有效避免脚掌脱离时产生的拉力作用。



图5 斯坦福大学的 Sticky Bot 机器人

南京航空航天大学和中国科学院大学均在2008年研究了仿壁虎型爬壁机器人^[18-19],如图6所示。该机器人采用四足机构,且四足对称分布,每个足部都具有3个转动的自由度。机器人足部采用 Sylgard184 有机硅胶阵列,

大小为20mm×30mm,该硅胶弹性模量为2.53MPa,微纳米阵列的力学性能为6N/cm²,每平方厘米面积可负重3N。机器人所有电机无需减速及换向,可直接驱动足部关节运动,能有效简化机器人的结构并减轻整体的负重。

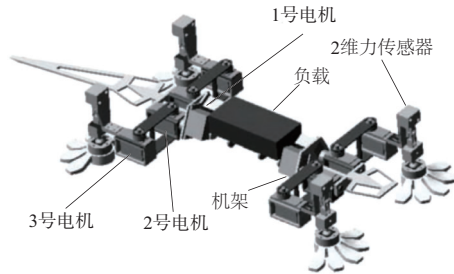


图6 仿壁虎型爬壁机器人

壁面吸附方式的优点是可以适用于任意工作壁面,但吸附力弱,承载能力小,且材料制作价格昂贵。目前还处于初步研究阶段,当前该壁面吸附方式还没有应用于清洁作业中。

2 爬壁清洗机器人的行走方式

爬壁清洗机器人的行走方式与地面机器人行走方式相同,主要有轨道式、车轮式、履带式、腿足式和框架式。

2.1 轨道式

轨道式外墙清洗机器人需要安装特定的预设轨道,如图7所示。此机器人工作运行稳定,且移动迅速高效,但对墙体要求较高,墙体需要承受的负载远大于其他墙面行走方式,故建造成本较高,且不具备越障能力,应用范围窄,作业效率低。



图7 轨道式行走爬壁机器人

2.2 车轮式

车轮式清洗机器人通常以真空吸盘或磁性装置的方式吸附在玻璃幕墙上,通过驱动轮可以实现机器人本体在任意方向的连续移动,完成壁面的清洗,如图2、图3中的车轮式行走机器人。但其工作功耗大,对工作面要求高,且无越障能力。

2.3 履带式

履带式清洗机器人可以分为真空吸附履带清洗机器人和磁吸附履带清洗机器人,通常以两条履带的不断转动实现

机器人的连续移动,履带下方配置有一定数量的真空吸盘或磁性装置来完成机器人在壁面的吸附,进而完成玻璃幕墙或光伏表面^[20]的清洗。

兰州理工大学设计了一款旋翼负压混合吸附的爬壁清洗机器人^[21-22],如图8所示。该机器人外形尺寸小于380 mm×270 mm×100 mm,爬行速度约45 mm/s,自质量为5 kg,负载能力大于60 N。该机器人采用多边形履带,具备较强的越障能力,越障高度大于10 mm。机器人在越障时通过旋翼进行吸附力的补偿,使得机器人在移动装置和提升装置的驱动下稳定运行,不发生侧翻和无效滑动。

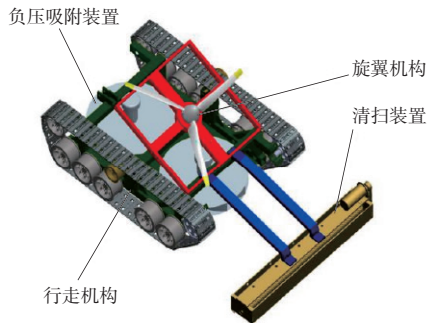


图8 旋翼负压混合吸附的爬壁清洗机器人

2.4 腿足式

腿足式清洗机器人根据腿的数量可以分为双足、四足和多足清洗机器人,相较于地面行走的腿足式机器人不同的是爬壁机器人的各个腿部末端配置有吸附机构,通过配合腿部的往复摆动来实现机器人在工作壁面上的移动。

东京电机大学设计了一种具有双足结构的玻璃外墙清洗机器人^[23],如图9所示。该机器人总质量1.438 kg,采用MX-106和RX-28伺服执行器分别作为基座和手臂的执行机构,可越过6 mm高、20 mm宽的障碍物;采用DP0125真空泵,吸盘在垂直状态下的吸附力为135 N。该机器人配置有自主导航模块,由逆运动学、第五运动学插值和顺序控制,通过使用主动吸盘贴在玻璃墙上,并采用机械联动方式在玻璃表面导航执行打扫,同时该机器人能够通过克服玻璃面板中的正面和负面障碍,具有较好的越障能力。

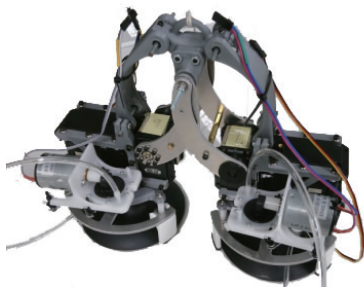


图9 腿足式爬壁清洗机器人

2.5 框架式

框架式清洗机器人的移动常采用双层框架交替移动的方式,框架下方通常配置有一定数量的真空吸盘,配合

真空吸盘的交替循环吸附完成清洗机器人在壁面上的整体移动,如图10所示。该机器人为北京工业职业技术学院当前研发产品,尺寸大小为800 mm×100 mm×120 mm,自质量18 kg,具备70 mm的越障功能。

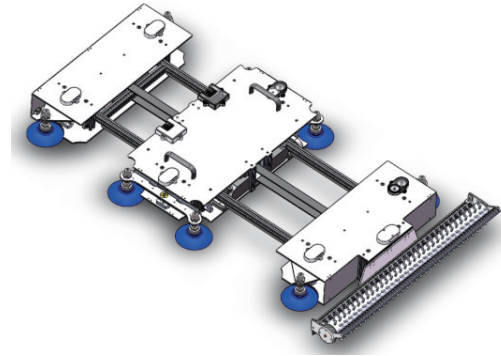


图10 框架式爬壁清洗机器人

3 吸附方式和行走方式的优劣势

3.1 吸附方式的优劣势

磁吸附方式、真空吸附方式、气流负压吸附方式和特殊材料这4种吸附方案是目前的主流吸附方式,都能够达到稳定吸附的目的,但由于工作环境的不同,它们也有各自的优缺点,具体如表1所示。在表1中,真空吸附方式细分为单吸盘吸附和多吸盘吸附,磁吸附方式细分为永磁式磁吸附和电磁式磁吸附。

表1 吸附方式优劣势对比

吸附方式	优点	缺点
单吸盘吸附	对工作壁面材料要求较低,结构简单	吸附稳定性差
多吸盘吸附	对工作壁面材料要求较低,移动性能好,吸附稳定性高	结构复杂,体积较大
永磁式磁吸附	结构简单,吸附力大,越障能力强	工作面须为导磁性材料,磁力不易于调节
电磁式磁吸附	吸附力大小可调节,控制简单	工作面必须为导磁性材料,结构复杂
仿生吸附	移动灵活,对工作壁面材料要求较低	制作成本高
气流负压吸附	对工作壁面材料要求较低	吸附稳定性差,控制难度较大

3.2 行走方式的优劣势

轨道式、车轮式、履带式、腿足式和框架式5种行走方式是目前的主流爬壁清洗机器人的行走方式,都能实现机器人在工作壁面上的行走,但在灵活性和控制性能上差异较大,具体优劣势如表2所示。

表2 行走方式优劣势对比

行走方式	优点	缺点
履带式	运动连续,负载能力强	结构复杂,体积大,能耗较大
车轮式	运动灵活,转向能力强	不易越障
框架式	越障能力强,控制简单	运动不连续,移动速度较慢
腿足式	越障能力及壁面适应性强	控制复杂
轨道式	运动平稳,速度快	成本过高,无法大众化推广

4 爬壁清洗机器人的清洁方式

以清洁剂分类将清洗方式分为干式清洗方式和湿式清洗方式^[24]。干式清洗方式在户外高空作业的清洁效果差,爬壁清洗机器人主要采用湿式清洗方式。其中可以应用于爬壁清洗机器人的湿式清洗方式为喷射清洗、高压水射流清洗、雾流清洗、刷洗工艺清洗。

4.1 喷射清洗方式

喷射清洗方式将一定压力的清洁液体喷射到工作壁面,产生机械和化学反应的作用使附着在壁面的污垢被清除。喷射清洗方式是爬壁清洗机器人采用的最常用清洗方式,但该清洗方式容易造成二次污染。

4.2 高压水射流清洗方式

高压水射流清洗在喷射水射流的基础上对清洁液进一步加压,使喷出液体具有较高动能,能对壁面上的污垢产生一定的冲击作用,从而达到清洁的目的。但该方式对机器人结构的反冲击力较大,在高空作业时具有一定的危险性。

4.3 雾流清洗方式

雾流清洗方式通过在导管末端安装喷嘴装置使得管内液体喷出时转变为雾流的气液混合物,使之与污垢产生化学反应从而实现清洁作用。雾流清洗方式更多应用在户外的降尘作业。

4.4 刷洗工艺清洗方式

刷洗工艺清洗方式通过安装滚刷、刮板等装置来清洁污垢。按毛刷的清洗方式可分为滚筒刷洗、涡旋刷洗、移动刷洗。

4.5 组合清洗方式

最常用的组合清洗方式为喷射清洗方式与刷洗工艺清洗方式的结合使用。通过喷射清洁液体来实现一次清洁,运用滚刷或刮板来实现二次清洁,这种结合方式有效保证了清洁的有效性,且不会出现因污渍遗漏而导致的二次污染。

5 爬壁清洗机器人存在的关键技术难题

5.1 安全技术

爬壁清洗机器人在电源故障或驱动关节卡死时,紧贴

于工作壁面的吸附能力消失,此时会发生机体倾覆,若没有保护机制机器人将发生坠落,轻则摔坏机器人,重则出现砸伤事件。所以爬壁清洗机器人必须配备安全保护装置。当前的保护装置多以钢索悬吊的形式,仅能实现半空中将机器人锁死的功能,无法实现感知故障时机器人的自动缓降,也具有一定的危险性。

5.2 吸附方式

爬壁清洗机器人的吸附作用是机器人克服重力做功的前提,目的是使机器人在工作壁面上稳定地进行清洁作业。当前的爬壁机器人吸附方式都有一定的局限性,例如,吸盘吸附方式不能应用于有缝隙的工作壁面;磁吸附方式不能应用于非导磁体材料的工作壁面;气流负压吸附方式机器人移动受阻大,且不易控制;特殊材料吸附方式仅适用于质量轻盈的机器人,当前研究的特殊材料的吸附力还不足以完成爬壁机器人在壁面的清洁工作。

5.3 行走机构及控制

爬壁清洗机器人的行走机构使机器人移动到不同区域的工作壁面进行清洁工作。在吸附功能稳定的情况下,行走机构要具备一定的越障能力,例如清洗半隐框的幕墙清洗机器人,若采用车轮式的机器人行走方式就无法满足工作壁面的行走要求,极易发生侧翻。当工作壁面出现缝隙或沟槽时,机器人也应具备一定的越过能力,例如履带式行走的爬壁机器人就能轻松越过,但其他行走方式就难以越过。

爬壁清洗机器人的控制主要是由人遥控操作,或由常规的系统步态规划来控制行走路径。首先,爬壁清洗机器人工作在特殊的高空垂直环境,机器人的行走机构和吸附作用存在着耦合问题,有极高的控制反馈要求,控制系统需同时或交替实现爬壁清洗机器人的行走及吸附动作。其次,机器人行走遇障时,控制系统能否自动反馈并实现机器人的越障,这些都具有一定的挑战性。

5.4 负载及能耗

爬壁清洗机器人的作业环境为户外高空作业,且作业中途无法更换清洁液体。因此,尽可能地提升爬壁清洗机器人的负载容量有助于更快捷的清洗作业,减少机器人因频繁更换清洁液体而带来多余的能量损耗。当前户外爬壁清洗机器人的质量大多在20kg以上,在载满清洁液体的情况下整个系统的最大质量可达50kg,一旦发生故障而坠落,后果不堪设想。因此在保证爬壁清洗机器人稳定运行的情况下,尽可能地提升其负载容量,能有效地节省能量消耗及材料磨损。

6 爬壁清洗机器人未来发展趋势

1)多设备协同作业。就安全技术层面而言,当前普遍户外高空作业的爬壁清洗机器人体积大、质量大,若机器人发生电源或机构故障失去吸附功能,造成高空坠落,将具有极大的危险性。因此爬壁清洗机器人必须配备一定的安全装置,当电源或机构故障时,可以实现爬壁清洗

机器人的锁死及缓降功能,确保整个系统不会发生坠落且能安全缓降至地面。从负载及能耗方面而言,爬壁清洗机器人的负载能力弱,所产生的吸附力不足以承载过多容量的清洁液体,因此配备其他协作设备能有效提升爬壁清洗机器人的负载能力,以减少因频繁更换清洁液体带来的能量损耗。

2) 吸附技术发展。爬壁清洗机器人的核心在于其吸附能力,稳定的吸附是机器人开展后续工作的前提。当前主流的吸附技术受限于特殊工作环境,从而限制了爬壁清洗机器人在不同环境中的应用。因此,爬壁清洗机器人的吸附技术应朝着多环境使用特点的方向发展,同时应充分考虑吸附技术的能量损耗问题,尽可能在保证系统稳定吸附的情况下减少能量损耗,避免频繁更换电池。

3) 机器人主体优化发展。爬壁清洗机器人应尽可能轻量化、高效率、大容量,在满足结构承载能力的范围内尽可能地减少材料的使用。应研发新型的轻量化结构材料,提升整个机器人清洁系统的使用效率。此外,电池技术的发展也将进一步提升爬壁清洗机器人的续航能力。

4) 智能技术应用。将传感器技术、机器视觉技术、人工神经网络技术等应用于爬壁清洗机器人,精准实现机器人的探障与越障、行走纠正、污渍识别等功能。将多种智能技术应用于爬壁清洗机器人,推动机器人信息化、智能化的融合发展。

参考文献:

- [1] 杨小彪. 高层建筑清洗行业的现状与市场浅析[J]. 洗净技术, 2003(3): 46-48.
- [2] 丁官元. 高楼外墙清洁智能机器人的设计与实现[J]. 机电一体化, 2015, 21(5): 47-49, 58.
- [3] 魏洪波. 高处作业吊篮在 CCTV 新台址工程中的应用[J]. 建筑机械化, 2008, 29(4): 60-62.
- [4] 刘稚亚. 飞在高楼间的城市“蜘蛛人”[J]. 经济, 2013(9): 50-51.
- [5] 张子博, 刘荣, 杨慧轩. 用于玻璃幕墙清洗的爬壁机器人的研制[J]. 自动化与仪表, 2016, 31(5): 6-9, 28.
- [6] 贾强. 玻璃幕墙清洁机器人的模态分析及优化设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [7] 李雪新, 靳文停, 葛宜元, 等. 玻璃幕墙清洗机器人关键技术综述[J]. 木材加工机械, 2019, 30(6): 14-20.
- [8] 张德惠. 自升降带电作业机器人的机构分析[J]. 机械设计, 2012, 29(1): 40-43.
- [9] 刘淑良. 多功能履带式磁吸附壁面移动机器人及相关技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
- [10] 程思敏, 陈韦宇, 丛培杰. 爬壁机器人的研究现状[J]. 机电工程技术, 2019, 48(9): 6-10.
- [11] 姜爱民, 战强, 张印. 一种新型磁吸附爬壁机器人的研制[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(4): 146-148, 161.
- [12] 马培菘, 陈佳品, 俞翔. 油罐容积检测用爬壁机器人的研制[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(11): 159-164.
- [13] 马培菘, 刘臻. 油罐容积检测爬壁机器人的动态路径规划[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(3): 28-32.
- [14] MUTHUGALA M A V J, VEGA-HEREDIA M, MOHAN R E, et al. Design and control of a wall cleaning robot with adhesion-awareness[J]. Symmetry, 2020, 12(1): 122.
- [15] 吴善强, 武丽君, 黄佩佩. 爬壁机器人新型滑动式负压吸盘空气流场的数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2012(8): 173-175.
- [16] 武丽君, 吴善强. 间隙式单吸盘爬壁机器人动力特性分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(31): 8271-8275.
- [17] SUKVICHAI K, MAOLANON P, SONGKRASIN K. Design of a double-propellers wall-climbing robot [C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Macao, Macao, China: IEEE, 2017: 239-245.
- [18] 方晔, 汪小华, 梅涛. 仿壁虎爬壁机器人的结构及其控制系统研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2009(3): 17-19.
- [19] 阮鹏, 俞志伟, 张昊, 等. 基于 ADAMS 的仿壁虎机器人步态规划及仿真[J]. 机器人, 2010, 32(4): 499-504, 509.
- [20] 侯杰, 倪受东. 一种光伏清洁机器人的研究与设计[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(6): 162-166.
- [21] 何智, 黄华, 雷春丽, 等. 基于旋翼负压混合吸附的爬壁清洗机器人系统动力学性能研究[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(1): 32-37.
- [22] 何智. 高空复杂环境下壁面清洗机器人的关键技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [23] NANSAI S, ONODERA K, VEERAJAGADHESWAR P, et al. Design and experiment of a novel façade cleaning robot with a biped mechanism[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2398.
- [24] 王妹婷. 壁面自动清洗机器人关键技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2010.

收稿日期: 2021-09-14