

爬壁机器人发展与关键技术综述*

聂佩晗 张雅婷 陈勇*

(南京林业大学机械电子工程学院, 江苏南京, 210037)

摘要: 爬壁机器人借助吸附力可以在斜度较大甚至垂直壁面和天花板上爬行作业, 其应用涉及较多领域, 是近年及未来的重点研究课题。针对目前国内外对爬壁机器人的研究现状和不足, 分别从吸附方式、行走方式、驱动方式和壁面过渡等方面进行了归纳总结, 论述了爬壁机器人面临的主要问题和发展趋势。分析结果表明: 爬壁机器人在吸附方式方面存在吸附性和机动性之间的矛盾, 在壁面过渡能力方面仍存在一定的局限性, 距离实际应用还存在一定差距。最后, 对爬壁机器人关键技术在未来的研究方向提出了展望。

关键词: 爬壁机器人; 关键技术; 吸附方式; 壁面过渡; 研究现状

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A

Review on the Development and Key Technology of the Wall-climbing Robot

NIE Peihan, ZHANG Yating, CHEN Yong*

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Wall-climbing robots can crawl on large slopes or even vertical walls and ceilings with the help of adsorption force. Its application involves many fields and is a key research topic in recent years and in the future. In view of the current research status and shortcomings of wall-climbing robots at home and abroad, the main problems and development trends of wall-climbing robots from the aspects of adsorption mode, walking mode, driving mode and wall transition were summarized. The analysis results show that the wall-climbing robot has a contradiction between adsorption and mobility in terms of adsorption methods, and there are still certain limitations in the wall transition ability, and there is still a certain gap between the practical application. Finally, the future research direction of the key technology of wall-climbing robot is proposed.

Key words: wall-climbing robot; key technology; adsorption mode; wall transition ability; research status

0 引言

随着科学技术的发展, 现代社会越来越追求智能化, 工业机器人可以把人类从繁琐、重复、危险的劳动作业中解放出来^[1]。其中爬壁机器人具有自动化程度高、能够代替人完成特殊场合下作业的特点, 因此近些年成为国内外学者的研究热点^[2]。爬壁机器人是一种工作在空间壁面环境中并携带特定作业工具以完成特定任务的特种机器人。它可以代替人类在高空等危险环境下有效完成各项工作, 如船舶业的除锈与喷涂^[3-4]、大型建筑物外表面的清洗^[5-6]、反恐侦察^[7]、石化行业的大型油罐的喷漆、检测探伤^[8-9]、金属罐容量计量^[10]、大型风电扇叶的维护^[11]等领域。在实际应用中, 爬壁机器人不仅需要在简单的壁面工作, 还需要应用于复杂的壁面环境, 如曲面、多壁面, 粗糙平面等。然而目前, 爬壁机器人行业在国内外范围内尚未成熟, 研究机构主要以科研院所及高校为主, 没有投放到市场, 存在功能性匹配度不高、安全稳定性低等制约因素。要尽快突

破这些瓶颈, 对爬壁机器人关键技术研究创新必不可少。^[12]

1 爬壁机器人的吸附方式

根据工作环境和介质介质的不同, 爬壁机器人吸附方式主要有: 负压吸附、磁吸附、仿生吸附、静电吸附、粘结剂吸附。

1.1 负压吸附

负压吸附的原理是在机器人内部产生真空或者负压, 利用机器人内外压力差实现吸附。负压吸附通常为吸盘结构, 它的优点是不受工作材料的限制。

图1为华南理工大学研发的一种多关节双足爬壁机器人W-Climbot, 它每只足有三个真空吸盘以增加冗余度, 提高吸附的可靠性。该机器人由五个关节模块和两个负压吸附模块组成, 在光滑表面移动性能优良, 也可完成吸附和操控物体的功能。^[13-14]

资助项目: 国家质量监督检验检疫总局(2017QK044); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(202010298011Z); 江苏省特种设备安全监督检验研究院(KJ(Y)2016019)

作者简介: 聂佩晗(1999-), 女, 本科生, 研究方向为测控技术。E-mail: nph1214@163.com

*通讯作者: 陈勇, 教授/博导, 研究方向: 智能识别与机器人技术。E-mail: chenyonjsnj@163.com

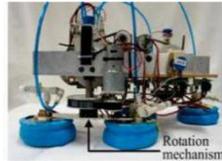
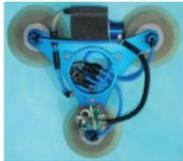


图 1 W-Climbot 图 2 真空吸盘式爬壁机器人

日本东北大学发明的一种基于新型真空吸盘的爬壁机器人，如图 2 所示^[15]，其吸盘有可随接触表面变形的裙部以避免漏气。这种多吸盘脚式爬壁机器人的稳定性吸附稳定可靠，但其移动是间断的，且移动速度受到限制，控制难度大。

负压吸附方式虽然可以不受壁面材料的限制，但对壁面的粗糙程度要求较高，只能用于连续光滑的壁面。若壁面上凹凸不平或者有裂缝，会削弱吸盘的吸附能力，给爬壁机器人正常作业造成影响。

1.2 磁吸附

磁吸附又分为电磁吸附和永磁吸附。这种吸附方式能产生很大的吸附力，不受凹凸或裂缝的限制，也不受物体表面状态（粗糙度、湿度、温度）的影响。

西班牙的Grieco J C等人研制出了一种具有大负载能力的六足电磁吸附式机器人REST^[16]，如图 3 所示。西班牙CSIC大学工业自动化研究所研制出两种足式电磁吸附爬壁机器人^[17-18]，采用直流电机和齿轮驱动。电磁吸附可以通过对电源的控制实现吸附力大小的调节，但同时也存在断电时机构容易发生坠落的风险。

上海交通大学采用稀土永磁吸盘作为壁面吸附机构，研制了一种应用于油罐容积检测的爬壁机器人，如图 4 所示，该机器人设有两个旋转和一个直线运动关节，能越过15mm高的障碍^[19-20]。清华大学利用永磁吸附装置研制出非接触式吸盘，设计了多体柔性永磁吸附爬壁机器人，能在复杂空间曲面上可靠吸附和灵活运动^[21]。永磁吸附具有结构小、吸附力大以及不需要提供额外电源的优点，但永磁吸附的磁力大小不能调节，吸附力有时会成为爬壁机器人运动时的阻力。

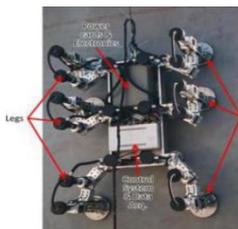


图 3 全地形六足爬壁机器人 图 4 永磁吸附履带模块

磁吸附方式只能应用于导磁体表面，如果壁面上出现锈蚀或者有螺丝松动，爬壁机器人在移

动过程中可能会吸走铁锈或者螺丝，导致磁铁吸附力下降，也会给被检测设备带来安全隐患。

1.3 仿生吸附

科学家受到自然界某些动物（如蚂蚁、壁虎等）能在三维空间壁面上自由行走的启发，参照其骨骼和运动机制以及足端的爪刺结构，研制出基于仿生技术的爬壁机器人。其吸附原理是利用纳米级人造仿生纤毛材料通过范德华力吸附于壁面。

美国斯坦福大学一个研究小组开发出了一种仿壁虎机器人Stickybot如图 6 所示，它的四个趾底布满了数百万根人造橡胶制成的用于粘附的毛发，能轻松地实现脚足与附着面的吸附与脱附，该机器人的外形、运动方式、吸附原理都与真实的壁虎非常相似，但吸附能力比起真实壁虎还是相差很多，而且加工不易却容易损耗。

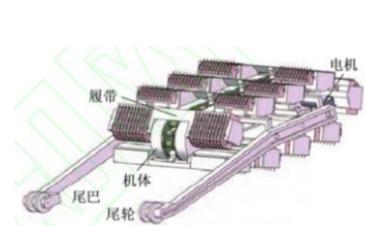


图 6 Stickybot 图 7 仿生爪刺式履带爬壁机器人

国内，南京航空航天大学仿生研究所开发了一种四足仿壁虎爬壁机器人^[22-23]，这种机器人每条腿有六个自由度，足端采用一种仿壁虎的粘附阵列。图 7 是西安理工大学提出的一种仿生爪刺式履带爬壁机器人，通过机构设计模仿昆虫足部粘附、脱附动作，实现在履带旋转过程中爪刺足稳定粘附、轻松脱附^[24]，为设计高效运动的仿生爪刺式爬壁机器人提供了思路。

上述仿生吸附的方式可在粗糙壁面利用毛刺（爪刺）吸附，其应用前景十分广阔，然而这种吸附方式的吸附力有限，对壁面的要求也很高，其足部纳米级结构的人工纤毛韧性和强度不足且制作成本较高，距离实际应用还有很大差距。

1.4 静电吸附

爬壁机器人可以通过静电吸附的方式吸附在竖直壁面或者天花板上。这种方式主要利用静电吸盘与壁面之间的电场力作为机器人的吸附力，可作用于各种壁面材料，具有重量轻，功耗低，噪音小，结构简单，对壁面无损伤，吸附力可控等优点。

日本东京大学A.Yamamoto等学者最先尝试将静电吸附技术应用于爬壁机器人，采用柔性电路板制作了两款爬壁机器人样机^[25]如图 8 所示，采

用双电极静电吸盘，通过尺蠖方式在垂直导体壁面上行走，II型样机将双电极结构改进成了梳妆叉指电极结构，使其实现在绝缘壁面上行走。

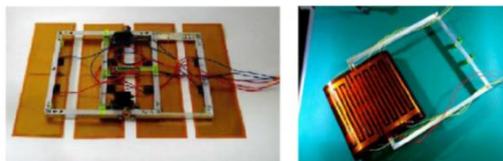


图 8 东京大学爬壁机器人I型(左)、II型(右)



图 9 双履带的静电爬壁机器人

哈尔滨工程大学采用铝箔作为电极，研发了国内首款单履带结构的静电吸附式爬壁机器人，通过在电极上施加高压使其能够在石灰壁面上进行移动^[26]。北京航空航天大学研制的静电吸附爬壁机器人^[27-28]，可在倾角为30°的壁面上实现转弯。华南理工大学的王黎明等人，研制出双履带的静电爬壁机器人如图 9 所示^[26]。该样机两侧履带均由静电吸附膜构成，通过左右电极速度的调控，使两侧履带形成速度差，实现爬壁机器人的直线行走、转向掉头等运动。

静电吸附方式中使用的柔性电极吸附膜与电机带动的轱轴之间是通过摩擦带动的，故而电极膜容易被磨损，使吸附性降低。此外，静电吸附方式不适用于在潮湿工作环境中。

1.5 粘结剂吸附

粘结剂吸附方式通常采用粘性材料，利用分子间的范德华力，可以在很小的接触面上产生巨大的吸力且不受壁面材料和粗糙程度的影响。

美国卡内基·梅隆大学研制了一种采用扁平粘合弹性材料的小型机器人Waalbot^[29]。它的每个脚上呈三角分布着三个粘性足盘，由电机驱动实现爬升和转向。韩国蔚山国立科学技术研究所展示了一种壁虎式四足机器人，如图 10 所示^[30]。它的四个足带有蘑菇形微柱的聚二甲基硅氧烷粘合垫，可以在天花板和不同角度的墙壁上行走。

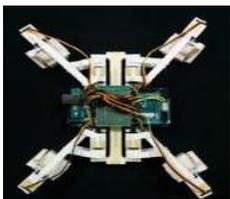


图 10 壁虎式四足机器人



图 11 Mini-Whegs机器人

美国克利夫兰大学设计了采用专利技术的爬壁机器人Mini-Whegs，如图 11 所示^[31]，它的每个轮子上面装有四个具有特殊粘性的高分子材料制

成的长条片状结构。同轴上两个轮子的叶片与接触面成一定角度并相互交错，以此来保证在行进时至少有一个轮子的叶片与壁面相接触。

粘结剂吸附方式常与仿生吸附相结合，采用这种吸附方式，虽然不受工作壁面的限制，但粘性材料很容易受到环境中灰尘的影响，使得吸附力下降。

1.6 吸附方式总结

综上所述，不论是哪种吸附方式，在为爬壁机器人提供吸附力以保证其安全移动的过程中，吸附力总会成为爬壁机器人移动的阻力，吸附性与机动性如何统一成为关键问题。南京林业大学研制了一种采用新型电磁吸附结构的爬壁机器人，如图 12 所示^[32]。这种电磁结构能让分别与电磁铁正负极相连的小滑轮沿着只有下侧部采用导电材料制成的两条环形导电槽移动，当同步带轮被驱动旋转时，电磁铁将依次与导电槽接触和脱离。根据这种方案，磁力只是吸附力而不会成为机器人运动过程中的阻力。试验验证了这种方案的可行性。

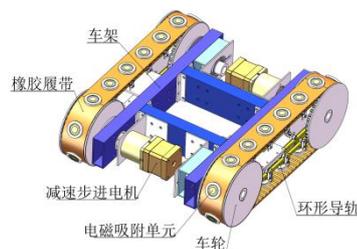


图 12 电磁吸附爬壁机器人

2 爬壁机器人的行走方式

爬壁机器人常见的行走方式有多足式、轮式、框架式和履带式等等，其中轮式和履带式最为常见，这些行走方式各具优缺点。

如图 10 所示的四足式爬壁机器人，能够在粗糙壁面上稳定爬行，具有一定的越障能力。这种多足步行式爬壁机器人常采用仿生吸附的方式，转向灵活，壁面过渡性好，但移动速度慢且控制难度大。

中国计量大学研制的一种轮式爬壁机器人如图 13 所示^[33]，具有运动灵活、耗能少、体积小、质量轻、移动速度快等优势。但轮式爬壁机器人车轮与壁面的接触面积小，容易打滑，虽然可以通过增加辅助机构以提高其吸附能力，但会引起自重的增加，因此轮式爬壁机器人的负载性能不好。

框架结构是一种比较平稳的结构，图 14 为北

京理工大学设计的框架式爬壁机器人^[34]，该机器人利用两层或者多层框架交替运动来实现机器人本体的前进，控制简单，吸附能力较强，但其移动速度慢且不易转向。

以图 9 所示的双履带式爬壁机器人为例，这种爬壁机器人与壁面接触面积大，自身吸附力较强，可供负载大，但在转向时需要较大的转矩，壁面过渡能力也较弱。



图 13 可折叠轮式爬壁机器人 图 14 框架式爬壁机器人

在爬壁机器人研究中，常选择多种行走方式结合的方法来实现壁面过渡。上海交通大学研制的轮足组合式自主焊接爬壁机器人 WCWR^[35]，综合了轮式和足式的优点，性能大大提高。

3 爬壁机器人的驱动方式

驱动方式决定了机器人的运动状态。常见的驱动方式有气压驱动、液压驱动和电机驱动，原理是将气压、液压或者电机等的能量转化为机器人直线或者旋转运动所需能量。

3.1 气压驱动

气压驱动是采用气动马达或者气缸压缩气体实现能量传输，在工业上应用很广。其优点在于原理简单，便于操作、易于编程，空气作为工作介质取之不尽用之不竭，制造成本低，输入力大且具有良好的缓冲作用。图 15 所示的气压驱动爬壁机器人^[35]，气缸用于将压缩空气的压力能转换为机械能以驱动机器人运动。其缺点在于需要配置空气压缩机，导致其噪音较大，且具有强烈的非线性，控制困难。

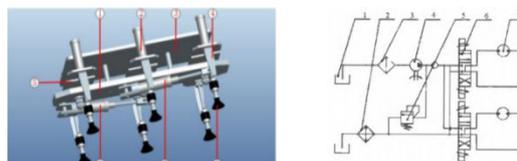
3.2 液压驱动

液压驱动以液压油作为工作介质，把油压泵产生的压力转换为机器人运动过程中所需要的扭矩和力，通过液压油缸或液压马达来控制执行机构的运动，稳定性较强。具有动力大、力矩与体积之比大、响应速度高等优点。图 16 所示为液压驱动重载爬壁机器人的液压系统^[37]，以液压系统控制动力驱动单元的液压马达减速装置，为重载爬壁吸附机构提供行走的驱动力，同时控制液压马达减速装置形成差速工况，实现整套重载爬壁吸附机构的转向行走。液压驱动需要设计体积较大的液压动力源设备和复杂的管路，工作效率较低，维修技术要求高，系统噪声大，还存在油液泄漏的危险，在一定程度上影响机器人的稳定性

和控制精度，因此液压驱动常用在大型动力机械上。

3.3 电机驱动

电机驱动基本原理一般是通过电机和减速器之间的配合来驱动负载，可以分为普通电机驱动、直流电机驱动和步进电机驱动。电机驱动具有效率高、响应快、体积小、重量轻等优点，但在提供大推力时成本较高，且经常需要配合减速器的使用，降低速度需要很大的力矩，力矩与质量之比较低，这是电机驱动的一大弊端。图 17 所示电机驱动式爬壁机器人^[38]启动时，伺服电动机直驱主动轮，电动机输出的牵引力需要克服静摩擦力与重力沿船体分量，从而完成行进动作。目前，电机发展趋势为小型化、大功率，扩展了电机驱动的应范围和场合。



1 主连接板 2 脚气缸 3 上托板
4 护脚板 5 脚连接板 6 转向气缸
7 直行气缸 8 真空吸盘
1 油箱 2 冷却器 3 精密过滤器
4 油泵 5 电磁比例调压器
6 电磁比例方向器 7 液压马达

图 15 气动六足式爬壁机器人 图 16 爬壁机器人液压系统



图 17 电机驱动式爬壁机器人

4 爬壁机器人的壁面过渡结构

爬壁机器人不仅需要在单一壁面上工作，而且会在阶梯壁面、存在一定角度的壁面或者复杂曲面环境中工作，这就要求爬壁机器人具有在三维空间壁面过渡的能力。然而这个问题始终没有得到很好的解决，这在很大程度上制约了爬壁机器人进一步的发展和应用。

4.1 多段式结构

国内外的学者们大多数采用双段式或多段式结构来解决爬壁机器人的壁面过渡问题。韩国首尔国立大学采用柔性连接的自适应运动研制了爬壁机器人 Combobot^[39]。美国斯坦福大学基于拉格朗日公式研制了一种磁履带式多体爬壁机器人，如图 18 所示^[40]，可实现在垂直壁面间的过渡。

中国计量大学研制了利用扭簧连接的双履带式磁吸附爬壁机器人和永磁吸附的可折叠的轮式爬壁机器人，它们分别如图 19^[41]和图 14^[35]所示。



图 18 磁履带式多体爬壁机器人



4.2 连杆结构

哈尔滨工业大学采用三自由度机械臂吸盘和四轮滑动吸附机构相结合的方案，研制了轮足混合双吸盘爬壁机器人，如图 20 所示^[42]。轮式移动方式下，吸盘为滑动吸附状态，机器人能够在平整壁面上快速移动；双足运动方式下，吸盘为静止吸附状态，可实现机器人地壁过渡、越障等运动。南京理工大学采用复合连杆机构加丝杆驱动来实现爬壁机器人在各种墙面障碍上的尺蠖式仿生式移动^[43]。

韩国首尔国立大学采用多连杆轨道机构和气动粘合技术，解决壁面过渡问题。印度拉姆斯瓦密纪念大学研究了一个连杆式爬壁机器人，将三个吸盘呈三角形放置在连杆两端，其结构如图 21 所示^[44]。



图 20 轮足混合双吸盘

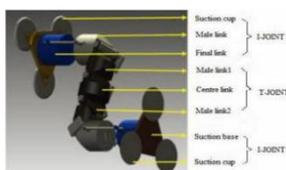


图 21 连杆式爬壁机器人

4.3 其他结构

除了上述结构，学者们还在其他结构上针对壁面过渡问题做了一些研究。

瑞士联邦理工学院洛桑分校采用钝角三角形结构和磁吸附履带结构相结合的方案研制的爬壁机器 TRIPILLAR，如图 22 所示^[45]。在内侧墙角时，驱动轮通过履带将动力传递至辅助轮，辅助轮与壁面间的摩擦力对机器人产生的反转力矩将机器人的本体抬起，以达到壁面过渡的目的。

中国科学院沈阳自动化研究所针对具有双足轮混合动力运动机构的具有壁面过渡能力的爬壁机器人的步态规划问题，提出了一种采用插值方案和 BP 神经网络的在线自适应算法^[46]。北京信息大学设计了一种可以实现内直角壁面过渡的混合磁吸附爬壁机器人模型^[47]。中国科学院大学研制了一种由一个行星轮系结构将负压模块和真空模块结合在一起的轮足复合式爬壁机器人，如图 23 所示^[39]。两种运动方式相互配合，利用复合运动模式可实现交叉面跨越等。

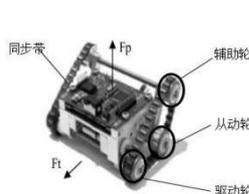


图 22 TRIPILLAR

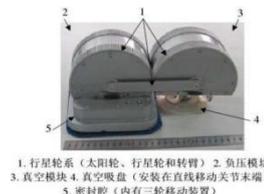
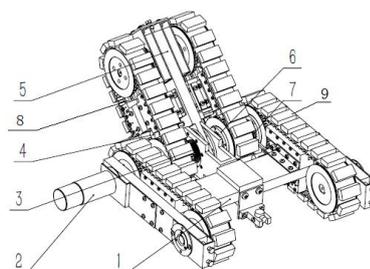


图 23 行星轮系结构机器人

现有的这些关于壁面过渡的研究，大多数还停留在模型仿真阶段或实验室研究阶段，少数有实物的成果中，大部分只具有单一的过渡能力，即只能进行壁面凹过渡或壁面凸过渡，并不能满足复杂壁面上的移动。南京林业大学研制了一个带有偏转离合机构的两段式磁吸附爬壁机器人，如图 24 所示^[48]，它具有行走转向和壁面的凹过渡和凸过渡的功能。前后两车段间连接有能维持一定偏转角度以完成爬壁机器人在不同夹角壁面上过渡行走的定位机构。其行走转向和换壁动作主要是依靠伺服电机和四个小型步进电机驱动花键齿轮与内齿轮的啮合与离开的相互协调完成。



1-机器人宽段 2-伺服电机 3-花键齿轮 4-小型步进电机 5-机器人窄段
6-内齿轮 7-花键轴 8-导电铜板 9-电磁铁

图 24 两段式爬壁机器人结构示意图

5 结束语

爬壁机器人的吸附方式、行走方式、驱动方式和壁面过渡各自存在着优缺点，往往适用于不同的场合。其中吸附方式主要的技术瓶颈是吸附性和机动性的统一问题。吸附力越大，工作中的安全性越高，但同时受到的阻力也越大。由于无缆化是爬壁机器人的一个发展方向，因此多采用电池供电。在同等的供电条件下，阻力会导致爬壁机器人的损耗增加，续航能力下降。另外，实际应用中还需要爬壁机器人工作于复杂壁面环境，所以它还必须具有在不同工作壁面之间进行壁面过渡的能力。然而目前对爬壁机器人的研究尚未成熟，现有的技术并不能满足实际的需求。综上所述，如何更好地解决吸附性和机动性之间的矛盾以及如何提高爬壁机器人的壁面过渡能力，将会成为爬壁机器人领域在未来研究的关键技术。

参考文献：

[1] 姜树海, 张楠. 六足仿生森林消防机器人机构设计与分析[J]. 机械设计与制造. 2015(12):208-212.

- JIANG Shu-hai, ZHANG Nan. Analysis and Design of Forest Fire-Fighting Hexapod Bionic Robot Mechanism[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(12):208-212.
- [2] 孙辉辉, 胡春鹤, 张军国. 移动机器人运动规划中的深度强化学习方法[J/OL]. 控制与决策.2021.
- [3] 白玉峰, 孙伟鹏, 郑相立, 等. 电厂钢结构除锈爬壁机器人的设计与分析[J]. 机床与液压, 2020, 48(5): 15—19. BAI Yufeng, SUN weipeng, ZHENG xiangli, et al. Design and Analysis of Rust RemoVal WaU Climbing Robot for Steel Structure of Power Plant[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(5):15-19.
- [4] 衣正尧, 林焰, 隋江华等. 船舶外板拖涂爬壁机器人设计[J]. 机床与液压, 2020, 48(5): 54-58. YI Zhengyao, LIN Yan, SUI Jianghua, et al. Design of a Wall-climbing Robot for Dragging and Coating Ship Outer Panel[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(5): 54-58.
- [5] 贺利乐, 黄天柱, 刘小罗. 玻璃幕墙清洗机器人爬行机构动力学分析[J]. 机械设计与制造, 2020, (10):265-269. HE Li-le, HUANG Tian-zhu, LIU Xiao-luo, Dynamic Analysis of Crawl Structure for Cleaning Glass-Curtain Wall Robot[J]. Machinery Design&Manufacture, 2020, (10):265-269.
- [6] 高九岗, 吴神丽, 李宏穆. 一种新型高楼清洗爬壁机器人的设计[J]. 机电工程技术, 2010, 39(6):66-67, 142.
- [7] 马亚健, 聂文忠, 李欧阳等. 履带式侦查排爆机器人的总体设计[J]. 机床与液压, 2019, 47(15): 33-37. MA Yajian, NIE Wenzhong, LI Ouyang, et al. Overall Design of Caterpillar-type EOD Robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(15):33-37.
- [8] 唐东林, 龙再勇, 汤炎锦等. 储罐检测爬壁机器人全遍历路径规划[J]. 工程设计学报, 2020(4):162-171. TANG Dong-lin, LONG Zai-yong, TANG Yan-jin, et al. Complete coverage path planning of oil tank detection wall climbing robot[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020(4):162-171.
- [9] 王凯, 孙磊, 何宏. 一种基于双相机焊缝跟踪的球形储罐爬壁机器人定位方法[J]. 现代制造工程. 2020, (05), 15-24. Wang Kai, Sun Lei, He Hong. A method of spherical tank wall-climbing robot location based on double camera weld tracking[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020, (05), 15-24.
- [10] 佟仕忠. 立式金属罐容量计量方法的研究[D]. 东北大学, 2012. Tong Shizhong. Research on Measuring method of Vertical Metal Tank Capacity[D]. Northeastern University, 2012.
- [11] 吕琼莹, 王晓博, 焦海坤等. 针对风电维护任务的小型磁力爬壁车的设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, (3):88-91. LV Qiongying, WANG Xiaobo, JIAO Haikun, et al. Design of a Small Magnetic Wall-climbing Car for the Wind Power Maintenance[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, (3):88-91.
- [12] 胡艳凯. 仿人型机器人结构综述[J]. 农机化研究, 2020年9月上: 65-67. Hu Yankai. Overview of Humanoid Robot Structure [J], Agriculture Mechanization Research, 2020:65-67.
- [13] Y. S. Guan, H. F. Zhu, W. Q. Wu, X. F. Zhou, L. Jiang, C. W. Cai, L. M. Cai, L. M. Zhang, H. Zhang. A modular biped wall-climbing robot with high mobility and manipulating function [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(6):1787-1798.
- [14] H. F. Zhu, Y. S. Guan, W. Q. Wu, L. M. Zhang, X. F. Zhou, H. Zhang. Autonomous pose detection and alignment of suction modules of a biped wall-climbing robot [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 20(2):653-662.
- [15] Fujita M, Ikeda S, Fujimoto T, et al. Development of universal vacuum gripper for wall-climbing robot[J]. Advanced Robotics, 2018, 32(6):1-14.
- [16] Grieco J C, Prieto M, Armada M, et al. A six-legged climbing robot for high payloads[C]. IEEE International Conference on Control Applications. IEEE, 1998:446-450 vol.1.
- [17] Armada M A, Santos P G D, Jimenez M A, et al. Application of CLAWAR machines[J]. International Journal of Robotics Research, 2003, 22(3):251.
- [18] Akinfiyev T, Armada M, Prieto M. Concerning a Technique for Increasing Stability of Climbing Robots[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2000, 27(1):195-209.
- [19] Xu, Zeliang, Ma, et al. A wall-climbing robot for labelling scale of oil tank's volume[J]. 2002, 20(2):209-212
- [20] 徐泽亮, 马培芬. 爬壁机器人履带多体磁化结构吸盘的设计及优化 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(3):168-172.
- [21] 桂仲成, 陈强, 孙振国等. 爬壁机器人永磁吸附装置的优化设计[J]. 电工技术学报, 2006, 21(11):40-46. Gui Zhongcheng, Chen Qiang, Sun Zhenguo, et al. Optimization of Permanent-Magnetic Adhesion Device for Wall-Climbing Robot [J]. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 2006, 21(11):40-46.
- [22] 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. RUAN Peng, YU Zhiwei, ZHANG Hao, et al. Gait Planning and Simulation of Gecko Inspired Robot Based on ADAMS[J]. ROBOT, 2010, 32(4):499-504.
- [23] 陈建敏, 俞志伟, 戴振东. 基于MATLAB的仿壁虎机器人天花板粘附运动仿真[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(4):254-260. CHEN Jianmin, YU Zhiwei, DAI Zhendong. Locomotion Simulation of Gecko Robot Moving on the Ceiling Based on MATLAB[J]. System Simulation Technology, 2011, 7(4):254-260.
- [24] 刘彦伟, 刘三娃, 梅涛等. 一种仿生爪刺式履带爬壁机器人设计与分析[J/OL]. 机器人. 2019. LIU Yanwei, LIU Sanwa, MEI Tao, et al. Design and Analysis of a Bio-Inspired Tracked Wall-Climbing Robot with Spines[J/OL]. ROBOT. 2019.
- [25] Yamamoto, T. Nakashima, T. Higuchi. Wall climbing mechanisms using electrostatic attraction generated by flexible electrodes [C]. International Symposium on Micro-Nanomechanics and Human Science, 2007:389-394.
- [26] 王黎明. 静电吸附式爬壁机器人的吸附机理及实验研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012. Wang Liming. Attachment mechanism research and experimental analysis for electrostatic wall climbing robot[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [27] R. Liu, R. Chen, H. Shen, R. Zhang. Wall climbing robot using electrostatic adhesion force generated by flexible interdigital electrodes [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 36(10):1-9.
- [28] R. Chen, R. Liu, H. Shen. Design of a double-tracked wall climbing robot based on electrostatic adhesion mechanism[C]. IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, 2013:212-217.
- [29] Murphy M P, Tso W, Tanzini M, et al. Waalbot: An Agile Small-Scale Wall Climbing Robot Utilizing Pressure Sensitive Adhesives[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006.
- [30] KoH, YiH, Jeong H E. Wall and ceiling climbing quadruped robot with superior water repellency manufactured using 3D printing (UNclimb)[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2017, 4(3):273-280.
- [31] Daltorio K A, Gorb S, Peressadko A, et al. A Robot that Climbs Walls using Micro-structured Polymer Feet[C]. International Conference on Climbing and Walking Robots. DBLP, 2005:131-138.
- [32] 洪晓玮, 陈勇. 一种新型电磁吸附式爬壁机器人的研制[J]. 机械科学与技术. 2020. Hong Xiaowei, Chen Yong. Development of an Innovative Wall-Climbing Robot using Electromagnetic Absorption [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering. 2020.
- [33] 吴善强, 陈莉, 胡素峰等. 壁面过渡爬壁机器人的设计与分析[J]. 煤矿机械, 2018, (5): 17-19. WU Shan-qiang, CHEN Li, HU Su-feng, et al. Design and Analysis of Wall-climbing Robot with Wall Transition[J]. Coal Mine Machinery, 2018, (5): 17-19.
- [34] 董寒, 崔登祺, 李方兴等. 多吸盘框架式爬壁机器人系统的设计与分析[J]. 制造业自动化, 2016, 38(6):59-69. DONG Han, CUI Deng-qi, LI Fang-xing, et al. Design and analysis on a wall-climbing robot with frame body and suction discs[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(6):59-69.
- [35] 杨保强. 壁面跨越磁吸附爬壁机器人机械系统设计与典型工况力学特性分析[D]. 江苏: 东南大学硕士学位论文, 2015.

-
- Yang Baoqiang. Mechanical System Design and Mechanical Property Analysis on Typical Working Conditions of Crossing-Corner Magnetic Adhesion Wall-Climbing Robot[D]. Jiangsu, School of Mechanical Engineering Southeast University, May 2015.
- [36] 杨慧斌,马春港,汪满等.气动六足壁面爬行机器人控制系统的开发[J].中国科技信息,2014,(22):30-31.
- [37] 郭红霞,王雄.重载爬壁吸附行走机构的设计与研究[J].控制工程,2015,22(2):356-359.
GUO Hong-xia, WANG Xiong. Research and Design on Magnetic Adhesion Mechanism with Heavy Load[J].Control Engineering of China,2015,22(2):356-359.
- [38] 姜红建,高振飞,杜镇韬等.面向船舶维护和监测的爬壁机器人设计[J].机械工程师,2018,(6):48-53.
JIANG Hongjian, GAO Zhenfei, DU Zhentao, et al. Design of Wall-climbing Robots for Ship Maintenance and Monitoring[J]. MECHANICAL ENGINEER,2018,(6):48-53.
- [39] 董伟光,王洪光,姜勇.一种轮足复合式爬壁机器人动力学建模与分析[J].机器人,2015,37(3):264-270.
DONG Weiguang, WANG Hongguang, JIANG Yong. Dynamics Modeling and Analysis of a Wall-Climbing Robot with Biped-Wheel Hybrid Locomotion Mechanism[J]. ROBOT, 2015, 37(3):264-270.
- [40] Nam S, Oh J, Lee G, et al. Dynamic analysis during internal transition of a compliant multi-body climbing robot with magnetic adhesion[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2014, 28(12):5175-5187.
- [41] 吴善强,陈莉,程楠.外直角壁面过渡爬壁机器人的研究[J].煤矿机械, 2017, 38(5): 174-176.
WU Shan-qiang, CHEN Li, CHENG Nan. Research on Wall-traversing Wall-climbing Robot with External Right Angle[J].Coal Mine Machinery, 2017, 38(5): 174-176.
- [42] 李志海.轮足混合驱动爬壁机器人及其关键技术的研究[D].哈尔滨工业大学, 2010.
Li Zhihai. STUDY ON WHEEL LEG HYBRID WALL CLIMBING ROBOT AND ITS KEY TECHNOLOGY[D]. Harbin Institute of Technology, 2010.
- [43] 朱健声,董宏林,张浩峰,等.一种爬壁机器人的运动机构:中国, CN202320571U[P]. 2012-02-05.
- [44] Kamalakannan S R , Ambigai R . Analysis of modular biped wall climbing robot with high mobility and effective transit mechanism[C]. International Conference on Computer. IEEE, 2017.
- [45] Patrick S, Frederic R, Truong-Dat N O, et al. TRIPILLAR: a miniature magneticcaterpillar climbing robot with plane transition ability1[J]. Robotica, 2011, 29(7):1075-1081.
- [46] Yong J, Yue Z, Dong W, et al. Gait planning of concave transition for a wall-climbing robot[C]. IEEE International Conference on Information and Automation. IEEE,2014:1284-1288.
- [47] 黄忠,刘泉,王茂.新型爬壁机器人设计与运动特性分析[J].煤矿机械, 2015, 36(12): 20-23.
HUANG Zhong, LIU Quan, WANG Mao. Design and Motion Analysis of New Wall-climbing Robot[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(12): 20-23.
- [48] 陈勇,孙焯,洪晓玮,等.一种两段结构的履带式爬壁机器人:中国, CN109109995A[P]. 2019-01-01.