

管道爬壁机器人的结构及吸附稳定性设计

刘晨炫, 杨一凡, 陈烜, 李明邗, 周坤
中国计量大学机电工程学院, 浙江杭州, 中国

【摘要】针对石化管道高危环境下的智能巡检需求与变径曲面易引发的吸附失效问题, 本文提出一种基于永磁吸附的管道爬壁机器人总体设计方案。在磁吸附机构设计中, 采用 Halbach 阵列优化磁路拓扑结构以聚焦磁感线, 使单模块最大吸附力可达 900N。为提升表面适应能力, 设计了具备角度调节功能的曲率适应结构, 同时结合高摩擦系数橡胶轮, 实现了对曲率半径 200~250mm 管壁的稳定贴合。在吸附稳定性分析方面, 构建了系统力学模型, 并以倒悬(垂直朝下)为典型工况从法向脱离方面进行了详细分析, 推导出系统在倒悬工况下的最小安全吸附力阈值为 160N。计算表明单轮实际吸附力为 450N, 远大于理论需求值 40N, 系统具有充足的安全裕度。本研究论证了变径管道爬壁机器人的机械构型与力学边界, 为极端工况下的高可靠特种装备研发提供了理论支撑与工程参考。

【关键词】管道爬壁机器人; 永磁吸附; 曲率适应结构; 吸附稳定性建模

【基金项目】国家级大学生创新训练计划项目(202510356022); 浙江省研究生教育学会资助项目(2024-007); 2025 中国计量大学重点规划教改项目(HEX2025021); 浙江省教育科学规划重点课题(2025SB154)

1. 引言

石化工业中的金属管道网络是能源输送的重要载体, 承担着石油、天然气等介质的远距离运输任务。这些管道长期处在高压、高温、强腐蚀的极端工况下, 管道表面容易产生应力腐蚀裂纹、焊缝缺陷以及局部壁厚减薄等问题, 如果不能及时发现并处理, 可能引发泄漏甚至爆炸等严重安全事故[1]。传统的“人工+脚手架”检测方式不仅效率低、覆盖盲区多, 而且在高空环境下作业存在较大的人身安全风险。因此, 开发能够替代人工完成管道表面自动化巡检的智能装备已成为石化行业的迫切需求[2]。

爬壁机器人作为一种特种机器人, 能够在垂直壁面或倾斜面上自主移动, 完成检测、清洁、喷涂等作业任务。在管道检测领域, 爬壁机器人可以搭载摄像头、超声波传感器或红外热像仪等检测设备, 对管道外表面进行全方位的无损检测, 在石油化工、核工业、电力设施及大型建筑等领域具有广阔的应用前景[3]。按照吸附方式的不同, 爬壁机器人主要可以分为真空吸附型、磁吸附型和推力吸附型等几类。其中, 磁吸附爬壁机器人利用永磁体或电磁铁产生的磁力实现对铁磁性壁面的可靠附着, 具有负载能力强、吸附稳定性高、能耗低、结构紧凑且运行噪音小等突出优点, 成为铁磁性管道表面作业

的主要选择[4]。

近年来, 国内外学者在爬壁机器人领域开展了大量的研究工作。赵晓燕等[1]研究了软体爬壁机器人的设计制造及控制方法, 探索了柔性材料在爬壁机器人中的应用潜力。吕程等[2]针对磁化阵列涡流爬壁机器人的关键技术进行了深入研究, 为磁吸附技术的工程应用提供了参考。张明路等[5]对爬壁机器人在不同壁面环境下的越障技术进行了综述, 指出变曲率管道表面的适应性仍是当前研究的难点之一。然而, 现有研究多集中在平面壁面或大曲率半径的简单曲面上, 对管道外壁变曲率(半径 200-250mm)、焊缝障碍及竖直-水平过渡等特殊工况的适应性还不够充分[6]。另一方面, 磁吸附力会随着磁体与壁面之间气隙的增大而明显衰减, 当气隙仅为 5mm 时吸附力衰减可达 30% 以上, 同时机器人还面临倾覆和打滑的风险[7]。现有的稳定性评估模型多局限于静态平面受力分析, 难以全面反映越障及过渡工况下的三维受力情况。

针对上述问题, 本文提出一种具备变曲率适应能力的永磁吸附管道爬壁机器人方案。在结构设计上, 通过优化 Halbach 磁极排列来提升吸附效果, 并设计了可适应不同管径的曲率适应底盘结构。在稳定性分析中, 建立了覆盖倒悬、竖直、越障等多种工

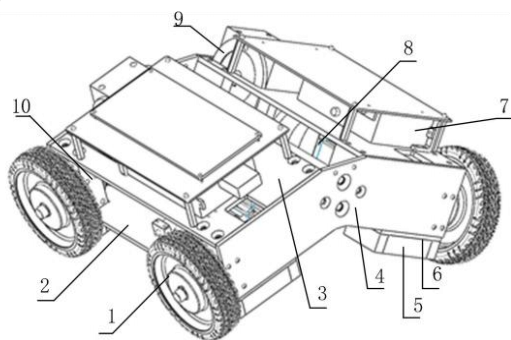
况的空间力学模型，重点从法向脱离和纵向倾覆两个方面对倒悬工况进行了详细分析，推导出系统在各种工况下所需的最小安全吸附力。研究成果可为管道爬壁机器人在石化场景中的工程应用提供理论依据和设计参考。

2.结构设计

2.1 设计要求与总体方案

石化管道巡检作业环境具有高空、曲面变径以及管道表面存在焊缝余高等特点，属于典型的非结构化作业环境[7]。为保证机器人在各种位姿下都能稳定、可靠地附着在管壁上并完成巡检任务，其机械结构需要满足以下几方面的设计要求：第一，能够在曲率半径 200-250mm 的变径管道上实现多点稳定接触，适应管壁曲率的变化；第二，能够平稳跨越管道表面高度约 10mm 的焊缝[8]；第三，能够承载至少 5kg 的有效负载，用于搭载无损检测传感器等设备；第四，在越障等极端工况下仍能保持足够的吸附力和抗倾覆能力。

综合考虑法向吸附和切向牵引的需求，本文设计了一种基于永磁吸附的双侧对称四轮驱动爬壁机器人。该机器人的总体结构如图 1 所示，主要由变曲率自适应底盘、Halbach 永磁吸附单元和高附着力轮式行走机构三大部分组成。底盘采用双侧对称布局，四个驱动轮分布在机器人的四角位置，这种布局方式有利于降低整机重心并使载荷均匀分布，从而提高机器人在管壁上行驶时的方向稳定性[9]。每个驱动轮均由独立的电机通过减速器驱动，可以实现前进、后退和转向等基本运动。永磁吸附单元安装在底盘下方，负责提供将机器人吸附在管壁上的法向力。



1.橡胶轮；2.下部固定板；3.上部固定板；4.前后固定板；5.永磁体；6.磁轭；7.电机驱动器；8.电机；9.减速器；10.支撑座

图 1.爬壁机器人机械结构总设计方案图

爬壁机器人的整体机械结构方案如图 1 所示。该机器人采用双侧对称的四轮驱动布局，底盘中央安装永磁吸附模块，四角各设置一个由电机和减速器驱动的橡胶轮。上部固定板和下部固定板通过前后固定板连接，共同组成可调节角度的底盘框架。支撑座位于底盘中部，用于搭载检测设备和传感器。

2.2 磁吸附机构

管道爬壁机器人的吸附方式直接决定了其在管壁上的承载能力和运动可靠性。目前常见的壁面吸附方式主要包括真空吸附、磁吸附和推力吸附等几种[10]。真空吸附通过在机器人与壁面之间形成负压来产生附着力，虽然吸附力较大，但对壁面的平整度要求较高，不适合粗糙或有焊缝的管道表面。推力吸附利用螺旋桨或喷气装置产生的推力将机器人压在壁面上，结构相对简单但附着力较小且能耗较高。磁吸附利用永磁体或电磁铁产生的磁力实现对铁磁性壁面的附着，具有吸附力大、不需要外部能源持续供给、对壁面粗糙度适应性好等优点。由于本文设计的机器人主要在钢制管道表面作业，管道材质为铁磁性材料，因此选择永磁吸附作为机器人的附着方式。

本系统的单侧磁吸附模块由四块尺寸为 50×50×20mm 的 N52 永磁体与高导磁率的磁轭组装而成[11]。磁轭在磁路中起到关键的磁通引导作用，它能够将非工作侧的磁通沿设定路径引导回工作面，减少磁场向空气中的泄漏，从而提高永磁体的利用效率。整个吸附模块通过螺纹紧固方式安装在底盘调节板上，便于拆卸和维护。单个磁铁吸附单元的结构如图 2 所示。

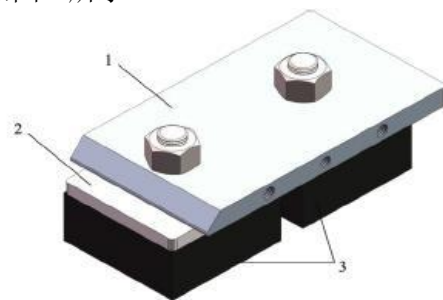


图 2.磁铁吸附单元机构

在多磁体阵列的设计中，磁极的排列方式对磁场分布和吸附力的大小有决定性的影响。本文对比了三种典型的磁极排列方式：同向排列、同侧同向两边反向排列以及交叉反向排列，如图 3 所示。利用 ANSYS Maxwell 有限元仿真软件，在管径 55cm、壁

厚 5mm 的边界条件下进行了三维静磁场分析 [12]。选择这一壁厚参数的原因是, 如果在此薄壁条件下系统仍能保持良好的吸附效果, 那么对于壁厚更大的工业管道必然也能满足要求。

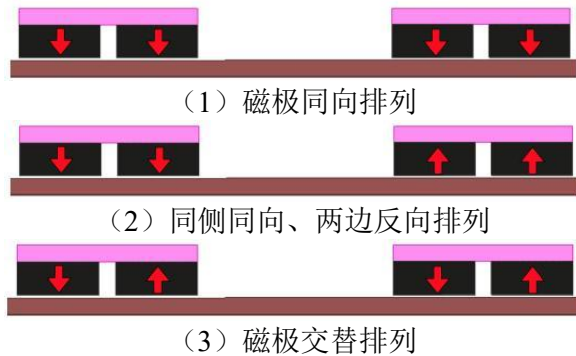


图 3. 三种磁极排列拓扑

图 3 展示了三种不同的磁极排列方式的示意图。图 3 (1) 为所有磁极方向相同的同向排列; 图 3 (2) 为同一侧磁极方向相同但两边方向相反的排列; 图 3 (3) 为相邻磁极方向交替变化的交叉排列。不同的排列方式决定了磁力线在管壁中的分布路径, 从而影响吸附力的大小和均匀性。

仿真结果表明, 三种排列方式的磁场分布差异明显。同向排列时, 由于所有磁极方向一致, 大量磁感线从磁体的一端出发后向管壁外侧发散, 无法在管壁内部形成有效的闭合回路, 导致磁能利用率很低。同侧同向两边反向排列的情况有所改善, 但仍有较多磁感线通过空气返回, 吸附效率依然不理想。只有交叉反向排列展现出良好的磁场聚焦效果——磁场高度集中在相邻两块永磁体与管壁之间的区域, 形成了紧凑且封闭的磁回路 [12]。这种排列方式不仅最大程度地利用了磁能, 还降低了外部磁场泄漏对周围传感器的干扰。三种排列方式的磁感应强度分布仿真结果如图 4 所示。

其中颜色越深 (红色区域) 表示磁场强度越大。从上图中可以清楚地看到, 交叉排列方式在管壁内部的磁场强度明显高于其他方式, 磁力线集中分布在永磁体正下方的管壁区域内, 形成了高效的磁回路。

结合机器人橡胶轮的几何尺寸和底盘的结构设计, 最终确定永磁体与管壁之间的额定工作气隙为 7mm [13]。在此工作气隙下, 单个吸附模块可以输出约 900N 的稳定吸附力, 能够满足机器人在各种复杂工况下的吸附需求。

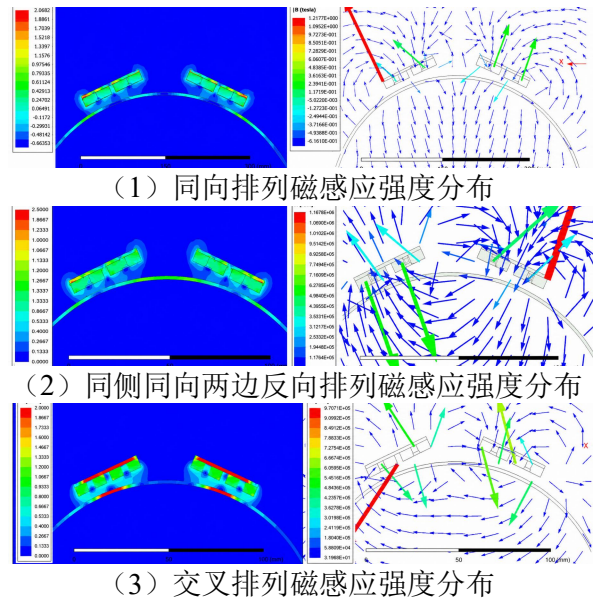


图 4. 三种排列方式的磁感应强度仿真云图

2.3 曲率适应结构

在实际的管道巡检作业中, 管壁的几何曲率会随管径的变化而不同。如果采用纯平面的刚性底盘, 当机器人从一种管径的管道转移到另一种管径时, 底盘与管壁之间会产生几何干涉, 导致部分驱动轮无法与管壁良好接触, 永磁体与管壁之间的气隙也会随之增大, 造成吸附力的急剧下降 [14]。为解决这一问题, 本文设计了一种刚性可调的曲面适应机构。

该曲率适应机构在结构上由上下部固定板、前后侧固定板以及核心支撑座三个主要部分组成。支撑座作为底盘的核心连接件和力学承载中枢, 将纵向和横向的固定板牢固地连接成一个整体的承载框架。支撑座的中间位置还预留了标准螺孔, 用于安装红外检测设备和环境感知传感器 [15]。前后侧固定板的结构如图 5 所示。

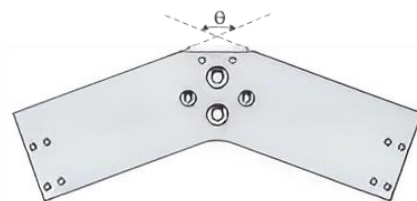


图 5. 前后侧固定板结构

针对不同管径的作业需求, 该机构通过更换不同角度的固定板来实现曲率适应。具体做法是: 根据目标管道的曲率半径, 预先加工好对应角度的调节板, 作业前将其替换安装到底盘上即可。这种设计的核心目的是从几何上保证两侧驱动轮的接地面始终与目标管壁的径向法线方向保持垂直, 使轮壁接

触处的正压力方向始终指向管道轴心。

3. 吸附稳定性分析

3.1 力学模型建立

为了准确评估爬壁机器人在管壁上不同位姿下的吸附可靠性和运动安全性，需要建立系统在三维空间中的静力学模型[3]。以管道轴线方向及其法线方向为基础建立全局坐标系，同时以机器人本体的几何中心为原点建立局部坐标系 $O_R - X_R Y_R Z_R$ 。机器人在管壁上的空间位姿模型如图6所示。其中 α 为管道倾斜角，表示管道轴线与水平面的夹角； φ 为圆周偏转角，表示机器人在管道横截面上相对于最低点的位置角度。 G 为机器人整机重力，始终竖直向下。通过 α 和 φ 两个参数可以完整描述机器人在管壁上的任意空间位姿。

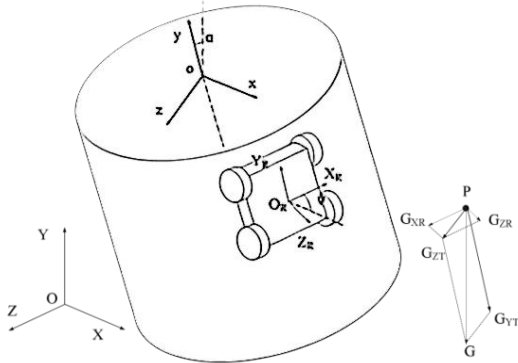


图6. 爬壁机器人空间位姿模型

机器人在管壁上的空间位姿可以用管道倾斜角 α 和圆周偏转角 φ 两个独立参数来描述。在此几何约束下，将竖直向下的整机重力 G 通过坐标变换进行分解，可以得到作用在机器人本体上的三个互相垂直的分力：沿管道周向的切向分力 G_{XR} ，沿管道轴向的纵向分力 G_{YR} ，以及垂直于管壁向外的法向分力 G_{ZR} 。重力分解的数学表达式如下：

$$G_{XR} = G \cdot \cos\alpha \cdot \sin\varphi \quad (1)$$

$$G_{YR} = G \cdot \sin\alpha \quad (2)$$

$$G_{ZR} = G \cdot \cos\alpha \cdot \cos\varphi \quad (3)$$

在机器人实际运行过程中（如上行、下行或周向移动），上述三个重力分量与机器人质心高度和轮距的共同作用，会引起三种基本的力学失稳模式：滑移失稳、纵向倾覆和横向倾覆[3]。

对于滑移失稳：当切向和纵向重力分量的合力超过了驱动轮与管壁之间的最大静摩擦力时，机器人会发生打滑。设轮胎与管壁之间的静摩擦系数为 μ ，则防止滑移所需的最小法向吸附力 F_{m_RS} 必须满足：

$$F_{m_RS} \geq \frac{\sqrt{G_{XR}^2 + G_{YR}^2}}{\mu} + G_{ZR} \quad (4)$$

对于纵向倾覆：当机器人沿管壁上行或下行时，重力的纵向分量会对机器人产生使其向后或向前翻转的力矩。设机器人质心到管壁的垂直距离为 H ，质心到前后倾覆边缘的纵向距离为 L_X ，永磁体作用中心到倾覆边缘的距离为 L 。在纵向倾覆的临界状态下，重力产生的倾覆力矩与永磁吸附力产生的稳定力矩相等，即 $F_m \cdot L = G_{YR} \cdot H + G_{ZR} \cdot L_X$ 。由此可得所需的最小吸附力为：

$$F_{m_RLO} \geq \frac{H \cdot G_{YR} + L_X \cdot G_{ZR}}{L} \quad (5)$$

对于横向倾覆：当机器人在管壁上偏转运行时，切向重力分量会产生使机器人侧翻的力矩。设左右驱动轮的间距为 d ，以单侧下方车轮的接触线为倾覆轴，力矩平衡方程为 $d/2 \cdot F_m = d/2 \cdot G_{ZR} + H \cdot G_{XR}$ ，由此得到抵抗横向倾覆所需的最小吸附力为：

$$F_{m_RCO} \geq \frac{2H \cdot G_{XR}}{d} + G_{ZR} \quad (6)$$

综合以上三种失稳模式的分析，在任意位姿角度 (α, φ) 下，系统需要提供的总吸附力必须同时大于上述三个最小值，即 $F_m > \max(F_{m_RS}, F_{m_RLO}, F_{m_RCO})$ 。这一空间静力学模型建立了结构重力、位姿角度与磁吸附力之间的定量关系，为后续各种典型工况下的稳定性评估提供了数学基础。

3.2 倒悬壁面稳定性

倒悬壁面是爬壁机器人运行中受力最为恶劣的工况之一。此时机器人位于管道的上方或管道底部朝上的区域，整机重力完全或大部分指向远离管壁的方向，对磁吸附系统提出了最为严格的要求。下面分别从法向脱离和纵向倾覆两个方面对倒悬工况进行详细分析。

当机器人完全处于倒悬状态时，即管壁位于机器人的正上方，此时对应的位姿参数为管道倾斜角 $\alpha = 0$ 、圆周偏转角 $\varphi = \pi$ 。将这组参数代入重力分解公式(1)~(3)，可以得到：

$$G_{XR} = G \cdot \cos 0 \cdot \sin \pi = 0 \quad (7)$$

$$G_{YR} = G \cdot \sin 0 = 0 \quad (8)$$

$$G_{ZR} = G \cdot \cos 0 \cdot \cos \pi = -G \quad (9)$$

其中 G_{ZR} 的负号表示法向分力的方向指向远离管壁的方向，即有将机器人从管壁上拉开的趋势。此时切向分力和纵向分力均为零，因此滑移风险不存在，系统面临的主要失稳模式是法向脱离——即机器人被整体从

管壁上拉脱。要防止法向脱离，永磁体提供的总吸附力 F_m 必须大于整机重力 G ：

$$F_m \geq G = mg \quad (10)$$

取机器人整机质量 $m = 16\text{kg}$ ，为计算与分析方便，本文重力加速度近似取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ，则 $G = mg = 16 \times 10 = 160\text{N}$ 。根据前文磁场仿真结果，交叉排列 Halbach 阵列在 7mm 工作气隙下单个吸附模块可输出约 900N 的吸附力。机器人底盘两侧共搭载两组吸附模块，根据力的矢量合成可得，系统的总吸附力可达 1800N ，远大于 160N 的整机重力。法向安全系数为 $1800/160 = 11.25$ ，说明系统在纯倒悬状态下具有充分的法向安全裕度，不会发生法向脱离失稳。倒悬状态的受力分析如图 7 所示。

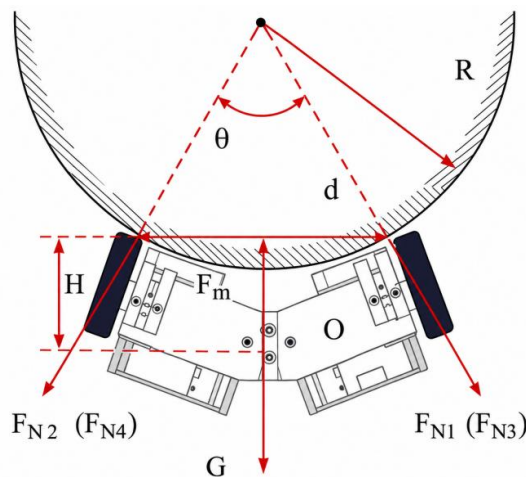


图 7.倒悬状态受力分析图

图 7 所示机器人在纯倒悬壁面（管壁在上方）时的受力情况。此时重力 G 完全沿法向方向向外作用，永磁体提供的吸附力 F_m 必须大于重力 G ，才能防止机器人从管壁上脱落。由于系统总吸附力 1800N 远大于重力 160N ，法向脱离在倒悬工况下不构成安全威胁。

将该理论需求与实际的磁吸附力输出进行对比验证：交叉排列 Halbach 磁路在 7mm 额定工作气隙下，系统总法向吸附力为 1800N ，均匀分配到四个独立驱动轮组后，每个轮获得的法向力为：

$$F_{m_actual} = \frac{1800}{4} = 450 \text{ N} \gg \frac{160}{4} = 40 \quad (11)$$

单轮实际分配的力法向磁吸附力（ 450N ）远大于理论需求值（ 40N ），安全系数约为 11.25 倍，说明系统具有非常充足的吸附力储备。这一力学冗余能够有效补偿管壁过渡段和越障过程中因气隙波动引起的吸附力下降，保证机器人在各种复杂位姿下的安全运

行。

4.结论

本文针对石化管道高危巡检环境的实际需求，设计了一种基于永磁吸附的管道爬壁机器人，完成了总体结构设计、磁吸附机构优化和多工况吸附稳定性分析，验证了该机器人方案在变径管道上运行的可行性和安全性。

参考文献

- [1] 赵晓燕, 刘志鹏, 徐林森.软体爬壁机器人设计制造及控制研究[J].江苏科技大学学报（自然科学版），2026，40（01）：43-50.
- [2] 吕程, 陈涛, 高彩霞, 李飞翔, 金辉.磁化阵列涡流爬壁机器人关键技术研究[J].中国特种设备安全，2025，41（S1）：59-63+77.
- [3] 林伟, 罗西强, 赖俊宏, 赵巧玲, 王建.大管径爬壁机器人设计与力学特性[J].科学技术与工程，2025，25（33）：14336-14345.
- [4] 刘涓, 陈鲤文, 张旺.一种金属壁面爬壁喷漆机器人的设计[J].电工材料，2025，（05）：103-105.
- [5] 张明路, 王子涵, 高春艳, 李满宏.爬壁机器人不同壁面环境越障技术综述[J].机械传动，2025，49（10）：168-176.
- [6] 王锋淮, 姚文胜, 陈兴阳, 杨敬鹏.基于超声导波及磁吸式爬壁机器人的工业管道腐蚀检测[J].管道技术与设备，2025，（05）：10-14.
- [7] 陈列, 陈长游, 李芝灿.爬壁机器人控制系统对管道检测效率的影响研究[J].科技与创新，2025，（14）：71-74.
- [8] 赵晓燕.软体爬壁机器人设计与制造研究[J].现代工程科技，2025，4（14）：1-4.
- [9] 赖志文, 周新波.大型管道检测中爬壁机器人的创新机构设计与实现[J].科技与创新，2025，（13）：52-55.
- [10] 于涛, 陶姬, 杨朋朋, 张永昌.面向狭小空间作业的线驱动连续体爬壁机器人设计与研究[J].机械设计与研究，2025，41（03）：279-284+292.
- [11] 李宇航.面向风电塔筒焊缝检测的爬壁机器人焊缝识别与跟踪技术研究[D].北京邮电大学，2025.
- [12] 刘尧.凝汽器换热器管束检测爬壁机器人

- 的设计与分析[D].西安石油大学, 2025.
- [13] 陶秋宇.自适应建筑物表面的负压吸附式爬壁机器人的设计与分析[D].江汉大学, 2025.
- [14] 刘斯达.一种飞行爬壁机器人设计及爬壁研究[D].重庆交通大学, 2025.
- [15] 王松.负曲率自适应爬壁机器人结构与试验研究[D].北部湾大学, 2025.