

For citation: Tang Li. Wall climbing mechanical trolley structure design // Grand Altai Research & Education — Issue 1 (19)'2023 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2023.01) — EDN: <https://elibrary.ru/llhrkr>

UDK 629.3.022

WALL CLIMBING MECHANICAL TROLLEY STRUCTURE DESIGN

*Tang Li*¹

1 Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, China
E-mail: 2502083583@qq.com

Abstract. A wall climbing trolley designed with a booster fan as the adsorption device and a wheel type as the moving mechanism has the advantages of simple structure and good flexibility of movement. This paper analyses the advantages and disadvantages of various adsorption and movement mechanisms, and uses modeling and simulation software such as SolidWorks and ANSYS to analyze the design. The design of the booster fan reduces the overall weight of the wall climbing trolley, making it lighter, and the wheeled design improves the flexibility of the trolley.

Keywords: wall climbing trolley, thrust adsorption, wheeled mobility, motion simulation

爬墙机械小车结构设计

*唐力*¹

1 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 武汉
E-mail: 2502083583@qq.com

摘要: 以增压风扇为吸附装置, 车轮式为移动机构设计的爬壁小车, 具有结构简单, 运动灵活性好等优点. 本文分析了各种吸附机构和移动机构的优缺点, 利用 SolidWorks 和 ANSYS 等建模仿真软件进行分析设计. 增压风扇的设计减轻了爬壁小车整体重量, 使小车更轻便, 车轮式的设计使小车在运动灵活性方面有很大提升.

关键字: 爬墙小车; 推力吸附; 轮式移动; 运动仿真

0 引言

爬墙小车由于其能在垂直的墙面上工作超出了人类的极限 [1], 能代替人类完成在核工业领域 [2], 石化工业 [3], 建筑领域 [4], 消防领域 [5] 等危险环境下的工作, 具有非常广的使用范围和很高的实用价值. 以前爬墙小车的研究开发都是针对某一种或者多种相似的任务, 具有很强的针对性, 不具备普遍适用性, 通用化程度低. 爬墙小车设计重点在于小车的吸附装置与移动装置的设计. 主要难

点在于墙面环境复杂多变, 墙面材料多样, 平整度不一. 吸附机构吸附力大小不一, 难以控制. 车身体积大, 移动机构运动灵活性差, 避障能力差等. 针对以上问题, 本文提出了一种增压风扇加车轮式爬壁小车的设计方案. 方案以直升机螺旋桨的运动为灵感, 利用高速旋转的螺旋桨产生的负压作为吸附推力, 用时考虑到爬壁小车的运动灵活性, 选择车轮式移动机构作为移动装置, 最终实现了经济型结构简单的爬墙小车设计, 具有现实意义.

1 爬墙小车吸附机构与移动机构方案选择

爬墙小车的吸附机构使爬墙小车克服重力而不下坠, 这是爬墙小车在墙面运动的基础. 爬墙小车根据吸附原理的不同, 可以分为以下三种: 负压吸附 [6-7], 磁性吸附, 特种吸附. 各吸附方式各有特点同时都有着自身的局限性. 因此应用于不同的场景其吸附机构的选择也不同. 表1 为各吸附机构的优缺点比较.

表1 吸附机构的优缺点比较表

Table 1. Comparison of the advantages and disadvantages of the adsorption mechanism

吸附方式	优点	缺点	适用场景	
磁力吸附	永磁铁吸附	永久吸附, 安全性高, 吸附力大, 吸附可靠性高	吸附力大小不可调节, 且只能吸附于导磁材料的墙面, 与墙面分离较难	适用场景较少, 只能用于导磁性材料墙面
	电磁铁吸附	永久吸附, 吸附力大小可调, 吸附力大, 吸附容易	磁吸控制复杂, 可能出现断电消磁现象, 安全性差, 只能吸附导磁性材料	适用场景较少, 只能用于导磁性材料墙面
负压吸附	真空吸附	吸盘式工作, 吸附力大, 噪声小, 负载力大, 具有较好的避障功能	对墙面环境需求高, 运动较慢, 控制复杂. 需要外接辅助设备工作	窄, 必须为光滑的墙面
	离心风扇吸附	吸附力一般, 不受墙面因素影响. 整体结构简单, 吸附可靠	负载能力一般, 越障能力一般, 总体尺寸大	适用场景较广, 几乎适用于所有墙面
	推力吸附	不需要负压腔, 不会出现失压, 泄漏等情况, 越障能力强	体积大, 噪声特别大, 负载能力小, 工作效率低, 能耗大, 稳定性能差	适用场景较广, 几乎适用于所有墙面
特种吸附	仿生吸附	对墙壁适应性能广, 噪声低, 能耗小	技术不成熟, 负载能力差, 控制方式复杂	适用场景较广, 几乎适用于所有墙面
	静电吸附	体积小, 能耗十分低, 噪声小	技术不成熟, 吸附力较小, 负载能力差, 工作环境有限, 只适用于干燥的墙面	适用场景较窄, 必须为干燥环境

通过分析比较几种吸附方式, 再结合爬墙小车应用环境, 最后选择负压吸附中推力吸附方法.

吸附机构仅仅使爬墙小车吸附在墙面上, 移动机构才能使爬墙小车移动到需要的地点进行工作. 爬墙小车移动机构目前可分为三大类: 车轮式, 履带式 [8] 和足式 [9-10]. 表2 为爬墙小车移动机构优缺点比较.

表2 移动机构优缺点比较表

Table 2. Comparative table of advantages and disadvantages of mobile bodies

移动机构	车轮式	履带式	足式
优点	结构简单, 移动速度快, 转弯灵活, 机动性能强	移动平稳, 面接触	面接触, 越障能力强, 吸附力强
缺点	点接触, 摩擦力小, 容易发生打滑, 越障能力一般	摩擦力大, 转弯能力差, 越障能力差, 移动速度一般	控制复杂, 运动速度慢, 只能线性运动
适用场景	应用范围较广	应用范围较窄	应用范围较广

综上所述, 对比分析了几种移动机构, 再结合爬墙小车的使用场景, 选用车轮式移动机构.

2 爬墙小车运动学分析

当爬墙小车沿墙面向上运动时, 前进动力由车轮与墙面间的摩擦力提供, 爬墙小车竖直运动时受力分析, 如图1.

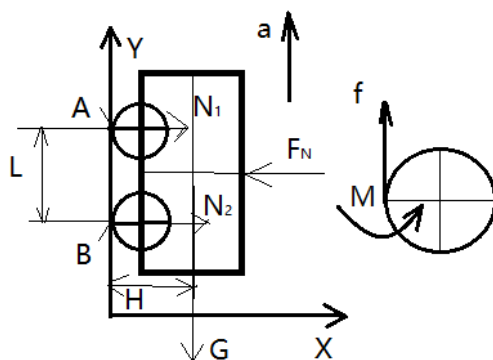


图1 爬墙小车运动状态受力分析图

Figure 1 Analysis of the forces in the motion of the wall climbing trolley

由图可知, 小车运动时需满足以下方程

$$F_N \geq \frac{G}{\mu} \quad (1)$$

$$M \geq GH \quad (2)$$

其中: F_N — 小车所受正压力;

M — 后轮驱动力矩;

μ — 车轮与墙面的滑动摩擦系数;

G — 小车整体重量;

H — 小车重心到墙面的距离

为了防止爬墙小车在运行中出现车轮打滑现象, 我们还要对驱动车轮进行受力分析, 得到防滑时最小驱动力矩 T_c . 爬墙小车驱动车轮受力如图2.

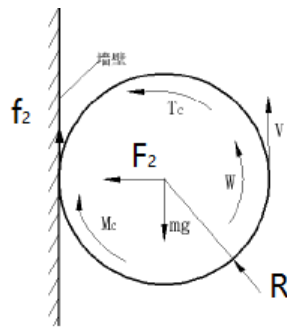


图2 驱动车轮受力图

Figure 2. Force diagram for driving wheels

因此，爬墙小车在竖直方向进行移动过程中，驱动轮不发生打滑的临界条件为：

$$T_c = \mu F_2 R + M_c + \frac{mR^2 \alpha}{2} \quad (3)$$

其中：\$T_c\$ — 驱动轮所受电机的驱动力矩；

\$F_2\$ — 驱动轮所受轴心正压力；

\$R\$ — 车轮半径；

\$M_c\$ — 驱动轮在运动过程中的所受的阻力矩；

\$\alpha\$ — 驱动轮的角加速度。

3 爬墙小车吸附机构设计

吸附机构产生一个垂直墙面的正压力，使爬墙小车克服重力吸附在墙面上。本文爬墙机器人采用负压吸附方式中推力吸附，利用反作用原理，螺旋桨给空气动力，空气反作用于螺旋桨一个压力。选用增压风扇作为正压力的发生装置。增压风扇的转速大小决定了正压力的大小。吸附原理图如图3。

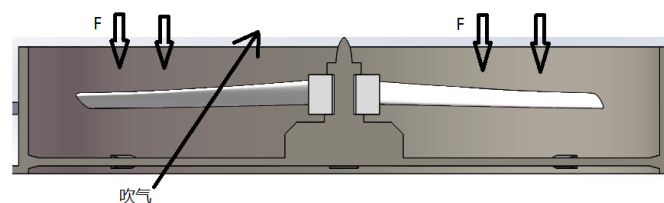


图3 吸附机构示意图

Figure 3. Schematic diagram of the adsorption mechanism

螺旋桨推力计算公式：

$$F = \frac{\rho V^2 \pi R^2 q}{2} \quad (4)$$

其中：\$F\$ — 螺旋桨产生的推力；

\$\rho\$ — 空气密度；

\$V\$ — 螺旋桨外圈线速度；

\$R\$ — 螺旋桨扇叶半径；

\$q\$ — 桨叶升力系数。

假设爬墙小车整体质量为 1kg, 综合橡胶轮胎与水泥地的摩擦系数 0.24-0.4, 和与玻璃的摩擦系数 0.2-0.3. 为了方便计算, 我们取摩擦系数为 0.3, 则由公式 (1) 知, 螺旋桨推力, $F_N \geq 32.7N$. 取安全系数为 1.5, 则 $F_N \geq 49.05N$.

初步假设螺旋桨直径为 150mm, 由升力系数曲线图, 取升力系数 q 为标识点 (2), 为 1.1. 空气近似认为不可压缩气体, 其密度为 $1.2kg/m^3$. 车轮直径 D 为 40mm 则由公式 (4) 可知求空气流速 V :

$$V = \sqrt{\frac{2F}{\rho\pi R^2 q}} = 64.8m/s$$

4 螺旋桨仿真分析

由于本文作者熟练运用了三维建模软件 SolidWorks, 使用本文作者在 SolidWorks 中对螺旋桨进行建模后再导入 ansys 软件. 然后进行一些必要的初始设置, 如流体空间创建, 流体入口与出口等. 分析计算仿真模块为 fluent, 其是专门解决流体力学仿真的软件. 后处理为仿真结果图表可视化, 其提供多种仿真结果查看形式. 分别对螺旋桨转速为 6000r/min 和 3000r/min 两种常见转速进行仿真. 仿真结果图如下.

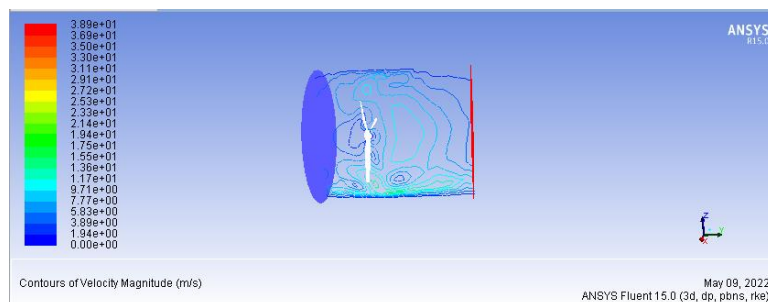


图4-1 螺旋桨转速为 3000r/min 仿真结果图

Figure 4-1. Simulation results for a propeller speed of 3000r/min

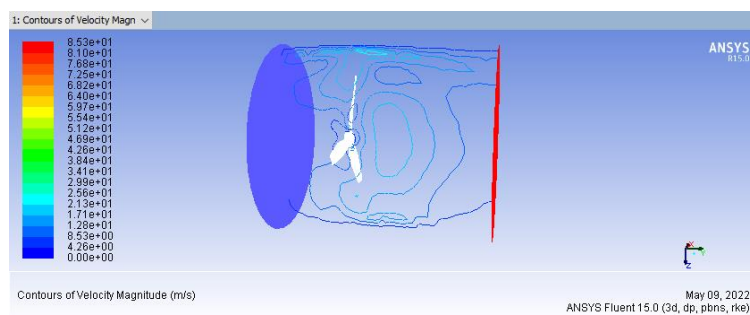


图4-2 螺旋桨转速为 6000r/min 仿真结果图

Figure 4-2. Simulation results for a propeller speed of 6000r/min

从图可知, 3000r/min 出口流速只有 $38.9m/s < 64.8m/s$, 不符合要求, 但 6000r/min 出口流速达到 $85.3m/s > 64.8m/s$. 完全符合. 此时推力为 84N.

综上所述, 在选用的螺旋桨转速为 6000r/min 时符合要求.

再对车身进行校核, 根据众多前人设计经验, 爬墙小车车身选用 PA 材料. 其有着比重轻, 抗拉强度高, 耐磨, 抗冲击性能良好等优点. 我们利用 SolidWorks 软件中 simulation 插件对车身进行简单的静力学分析. 仿真图5如下.

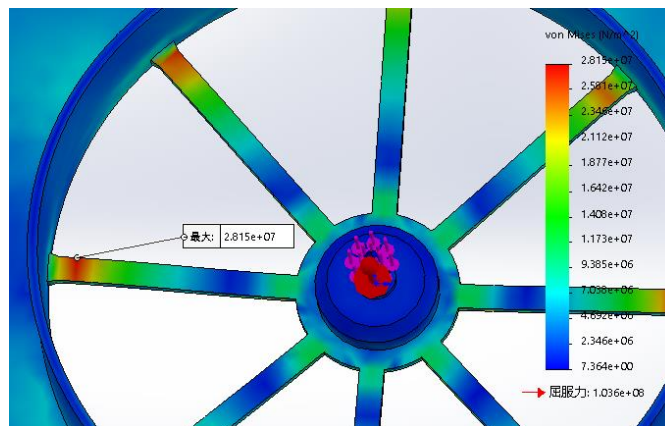


图5 车身静力学仿真图

Figure 5. Static simulation of the vehicle body

从图5 中可以明显看到, 最大应力出现在风扇架的横条上, 为 28.15 Mpa, 而材料的屈服力为 103.6 Mpa, 完全符合要求.

5 爬墙小车移动机构设计

此爬墙小车采用两轮驱动中的后轮驱动设计方案. 驱动方式主要有电机驱动, 液压驱动, 气压驱动等. 其中电机驱动较其他几种驱动方式有明显优点, 体积小, 质量轻, 反应快, 可控性能好, 可实现正反转等. 同时电机驱动很好的符合爬墙小车的轻量化, 小型化的要求. 电机选用直流减速电机, 体积小, 控制简单. 后两轮采用两个独立的电机控制, 在转向时可实现差速运动. 电机输出的驱动力将通过四级减速器来传递. 同时将转向机构设置在前轮. 前轮由舵机控制.

根据本文设计要求及材料选择, 我们初定本文设计的爬墙小车基本数据为:

平均速度 $V=1\text{m}/\text{min}$, 爬墙小车总质量 $m=1\text{kg}$, 车轮直径 D 为 40mm, 重心高 H 取 35mm. 小车电机功率:

$$P_d = \frac{MV}{H\eta} \quad (5)$$

其中: η — 传动系统总传动效率;

V — 小车移动速度.

通过前人研究经验, 通过仔细考量, 初步选定扭矩为 1.72Nm 额定输出功率为 17w 的冯哈勃 2342L012CR 直流减速电机. 此直流减速电机有许多优点, 质量轻的同时输出力矩大, 结构紧凑等. 另外此电机自带行星减速齿轮和光电编码器部分.

由公式 (2) 知驱动轮力矩 $M=9.8*0.035=0.343\text{Nm}$, 小于 1.72Nm, 符合要求, 同时由公式 (5) 可知 (取 η 为 0.98) 小车电机功率 $P_d=9.8/(60*0.98)=0.167\text{w}$, 小于 17w, 符合要求.

6 结束语

本论文主要围绕用于建筑墙面爬行的爬墙小车展开, 结合实际, 运用计算机辅助设计软件对爬墙小车进行仿真分析, 并设计了主要机构, 本文设计的小车具有运动灵活, 质量轻便, 结构简单等优点, 具有一定的实际意义.

参考文献

- [1] Weisbin C., et al. Miniature robots for space and military missions [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, vol.6, №3, pp.9-18. 1999: 9-18.
- [2] Briones L., Bustamante P., Serna M.A. Wall-climbing Robot for Inspection in Nuclear Power Plants [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994: 1409-1415.
- [3] Fujita A., et al. Development of inspection Robot for Spherical gas storage tanks [C]. proceedings of the 16th International Symposium on Industrial Robots, 1986: 1185-1194.
- [4] 刘海波, 武学民. 国外建筑业的机器人化; 国外建筑机器人发展概述 [J]. 机器人. 1994, 16(2): 119-128.
- [5] 沈家栋, 郭傲龙. 爬墙机器人设计 [J]. 科教文汇, 2015.
- [6] 付宜利. 爬墙机器人的研究进展 [J]. 机械设计, 2008(04): 1-5.
- [7] 刘淑霞, 王炎, 徐殿国等. 爬墙机器人技术的应用 [J]. 机器人, 1999, 21(2): 148-155.
- [8] 黄文攀, 戴永雄, 范茂飞, 等. 爬墙机器人研究与制作 [J]. 淮海工学院学报 (自然科学版), 2010.
- [9] 蒋超, 吴静青, 朱昱淇等. 爬墙机器人运动方式的研究 [J]. 自动化应用, 2018.
- [10] 付宜利, 李志海. 爬墙机器人的研究进展 [J]. 机械设计, 2008, 25(4):1-5.

References

- [1] Weisbin C., et al. Miniature robots for space and military missions [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, vol.6, №3, pp.9-18. 1999: 9-18.
- [2] Briones L., Bustamante P., Serna M.A. Wall-climbing Robot for Inspection in Nuclear Power Plants [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994: 1409-1415.
- [3] Fujita A., et al. Development of inspection Robot for Spherical gas storage tanks [C]. proceedings of the 16th International Symposium on Industrial Robots, 1986: 1185-1194.
- [4] Liu Haibo, Wu Xuemin. Robotization in the construction industry abroad; an overview of the development of construction robots abroad [J]. Robotics. 1994, 16(2): 119-128.
- [5] Shen Jiadong, Guo Aolong. Design of a wall-climbing robot[J]. Science and education literature, 2015.
- [6] Fu Yili. Advances in wall climbing robots [J]. Mechanical Design, 2008(04): 1-5.
- [7] Liu Shuxia, Wang Yan, Xu Dianguo, et al. Application of wall-climbing robotics [J]. Robotics, 1999, 21(2): 148-155.
- [8] Huang Wenpan, Dai Yongxiong, Fan Maofei, et al. Research and production of wall-climbing robot [J]. Journal of Huaihai Engineering College (Natural Science Edition), 2010.
- [9] Jiang Chao, Wu Jingqing, Zhu Yuqi. et al. Research on the motion mode of wall climbing robot [J]. Automation Applications, 2018.
- [10] Fu Yili, Li Zhihai. Research progress of wall climbing robot [J]. Machine Design, 2008, 25(4):1-5.