

分类号：TH212.6

密 级：公开

学校代码：10363

学 号：221012015



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 变斜面光伏组件清扫机
机器人除尘机构研究

论 文 作 者 王伟振
校 内 导 师 梁艺（副教授）
校 外 导 师 杨鸥（高级工程师）
专业学位类别 机械(工程硕士)
研究方向（领域） 智能装备

论文提交日期：2024 年 5 月 30 日

分类号：TH212.6

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210120156

变斜面光伏组件清扫机器人除尘机构研究

RESEARCH ON DUST REMOVAL MECHANISM OF VARIABLE SLOPE PHOTOVOLTAIC MODULE CLEANING ROBOT

论文作者：王伟振

校内导师：梁艺（副教授）

校外导师：杨鸥（高级工程师）

专 业：机械（工程硕士）

研究方向：智能装备

论文提交日期：2024 年 5 月 30 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：王伟振

日期：2024年 5月 30日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在____年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☐。

学位论文作者签名：

王伟振

指导教师签名：

梁艺

日期：2024年5月30日

日期：2024年5月30日

变斜面光伏组件清扫机器人除尘机构研究

摘 要

随着全球气候变暖的加剧，对碳排放的要求越来越高，光伏发电作为节能减排的有效手段，近年来产业发展迅速。而随着工业化进程的加快，我国对电力的需求逐渐增大，光伏电站建设规模与日俱增。在光伏行业，高效清洗装置与方法的使用也越来越频繁，在智能光伏运维中发挥着重要作用。由于变电站中光伏板的“堰塞湖”自然积尘产生热斑效应影响发电效率、组件寿命。当前人工清洗费时费力，并且会浪费大量水资源。机器人清洗应用场景比较单一，安装维护成本高，对场地空间有一定要求。本文以全向移动清扫机器人为研究对象，研究内容包括建立运动学模型，负压内部压力场分析；控制系统方案设计；扬尘以及吸尘机构流场研究，验证结构参数的合理性；优化扬尘和吸尘结构参数，研究非线性拟合方程对工作参数优化的作用。具体工作过程和结论如下：

（1）清扫机器人除尘机构方案分析和建模。针对光伏组件灵活清扫问题，根据清扫机器人结构设计指标，设计了一种全向移动式光伏清扫机器人构型，采用四轮差速建模法，通过分析运动学模型，速度简化模型，确定了机器人构型的合理性。针对现有移动式清扫方式的局限性，通过对比传动清扫方式，研究了新型滚刷除尘、管道吸尘同步清扫方法。利用三维软件对相关结构进行建模，确定结构参数。解析清扫机器人工作时受力情况，增加负压吸附装置实现机器人在 30° 以内倾角的光伏组件上自由移动。利用 **Fluent** 软件对负压装置产生负压大小以及内部流体运动情况进行仿真计算。由于清扫机器人可能会在工作过程中越出边界，造成其从光伏组件上坠落，故设计安全制动装置，作为紧急保护措施。

（2）清扫机器人除尘机构的控制系统设计。分析清扫机器人行走模块和清扫模块系统设计，针对光伏组件清扫机器人在光伏板上的工作方式设计控制系统，选择相应的电器元件，在满足工作要求的前提

下，实现成本的最优化，设计控制流程图，并根据流程图设计控制流程。

（3）清扫机器人除尘机构基于 $k-\epsilon$ 模型的内部流场研究。对清扫机器人滚刷清扫和吸尘结构使用 $k-\epsilon$ 双方程模型开展流体仿真计算，利用迭代残差方法判断计算结果，通过仿真图，分析流场仿真数据。利用 Fluent 软件对滚刷清扫结构和吸尘结构进行仿真，通过粒子矢量图和流场迹线图进行可视化分析，判断粒子在流场中运行的轨迹和速度，以及粒子通过流场时是否有残留。根据仿真结果对两个结构进行优化，并且通过仿真实验进一步验证结构参数的合理性。

（4）光伏组件清扫机器人实验研究及工作参数优化。在合理的结构参数的基础上，完成对清扫机器人工作参数的研究与优化。根据优化之后的结构参数，搭建实验平台，进行清扫机器人参数优化。分别进行负压斜面测试、清扫机器人负压吸附和行进速度实验，负压装置能够满足最大 30° 清扫要求，工作参数实验时，确定这两个重要工作参数的最优值范围，最后再对滚刷转速和吸尘转速进行对比实验，然后利用非线性拟合方程，建立非线性规划问题的数学模型，绘制非线性曲面图，最后通过计算得到最优的工作参数，将吸尘率由最高 94.47% 提升至 97.13%。

关键词：光伏组件，清扫机器人，干式除尘，结构优化，流场仿真

RESEARCH ON THE DUST REMOVAL MECHANISM OF TILTED SOLAR PANEL CLEANING ROBOTS

ABSTRACT

With the intensification of global warming, the demand for carbon emissions reduction is increasing. Photovoltaic power generation, as an effective means of energy conservation and emission reduction, has developed rapidly in recent years. With the acceleration of industrialization, the demand for electricity in China is gradually increasing, and the scale of photovoltaic power station construction is expanding day by day. In the photovoltaic industry, the use of efficient cleaning devices and methods is becoming more and more frequent, playing an important role in intelligent photovoltaic operation and maintenance. Due to the natural dust accumulation on photovoltaic panels in substations, which results in the hot spot effect affecting power generation efficiency and component lifespan, manual cleaning is currently time-consuming, laborious, and wasteful of water resources. Robot cleaning has a relatively narrow application scenario, high installation and maintenance costs, and certain requirements for site space. This paper focuses on omni-directional mobile sweeping robots, including establishing kinematic models, analyzing negative pressure internal pressure fields, designing control system schemes, studying dust and suction mechanism flow fields, and verifying the rationality of structural parameters. Optimization of dust and suction structural parameters and the study of the role of nonlinear fitting equations in optimizing working parameters are also conducted. The specific work process and conclusions are as follows:

(1) Analysis and modeling of the dust removal mechanism of the sweeping robot. In response to the flexible cleaning of photovoltaic components, a configuration of an omni-directional mobile photovoltaic

sweeping robot was designed based on the structural design indicators of the sweeping robot, employing a four-wheel differential speed modeling method. The rationality of the robot configuration was determined through the analysis of kinematic models and the simplification of speed models. To address the limitations of existing mobile cleaning methods, a novel synchronous cleaning method using rolling brush dust removal and pipeline suction was studied in comparison to conventional transmission cleaning methods. Three-dimensional software was utilized to model relevant structures and determine structural parameters. The force analysis of the sweeping robot during operation was conducted, and a negative pressure adsorption device was added to enable the robot to move freely on photovoltaic components within a 30° inclination angle. Fluent software was employed for simulation calculations of the magnitude of negative pressure generated by the negative pressure device and the internal fluid movement. To prevent the sweeping robot from falling off photovoltaic components during operation, a safety braking device was designed as an emergency protective measure in case of boundary exceeding.

(2) Design of the control system for the dust removal mechanism of the sweeping robot. Analysis of the walking module and cleaning module system design of the sweeping robot, designing a control system for the photovoltaic component sweeping robot to operate on photovoltaic panels. Selection of corresponding electrical components to optimize costs while meeting operational requirements, designing a control flowchart, and developing control processes based on the flowchart.

(3) Research on internal flow field of cleaning robot dust removal mechanism based on $k - \varepsilon$ model. Use a dual $k - \varepsilon$ equation model for fluid simulation calculation of the rolling brush cleaning and vacuum structure of the cleaning robot, use iterative residual method to judge the calculation results, and analyze the flow field simulation data through simulation diagrams. Using Fluent software to simulate the rolling brush cleaning structure and vacuum suction structure, visualizing the particle vector diagram and flow field trace diagram to determine the trajectory and

velocity of particles in the flow field, as well as whether there are residues when particles pass through the flow field. Based on the simulation results, optimize the two structures and further verify the rationality of the structural parameters through simulation experiments.

(4) Experimental research and optimization of working parameters for photovoltaic component sweeping robots. Based on reasonable structural parameters, the study and optimization of working parameters for the sweeping robot are completed. According to the optimized structural parameters, an experimental platform is constructed to optimize the parameters of the sweeping robot. Separate tests are conducted for negative pressure inclined surface, negative pressure adsorption, and traveling speed of the sweeping robot. The negative pressure device can meet the maximum 30° sweeping requirement. During the experiments on working parameters, the optimal value range for these two important parameters is determined. Subsequently, comparative experiments are conducted on the rotating speed of the brush and the suction speed. Then, using a nonlinear fitting equation, a mathematical model for the nonlinear programming problem is established, and a nonlinear surface plot is generated. Finally, through calculations, the optimal working parameters are obtained, increasing the dust removal rate from the highest 94.47% to 97.13%.

Keywords: Photovoltaic components, Sweeping robots, Dry dust removal, Structural optimization, Flow field simulation.

目录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题的研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 光伏组件清扫机器人研究现状	3
1.2.2 光伏组件清扫方法研究现状	7
1.3 研究内容及章节安排	10
1.3.1 主要研究内容	10
1.3.2 章节安排	10
1.4 本章小结	11
第 2 章 清扫机器人结构设计	12
2.1 引言	12
2.2 清扫机器人移动底盘设计	13
2.2.1 清扫机器人运动方案选择	13
2.2.2 移动底盘运动学分析	16
2.3 清扫机器人除尘机构设计	20
2.4 清扫机器人安全制动分析	24
2.5 清扫机器人负压吸附分析	26
2.6 本章小结	31
第 3 章 清扫机器人控制系统设计	32
3.1 行走模块系统设计	32
3.2 清扫模块系统设计	33
3.3 控制方案设计	34
3.4 硬件系统设计	35
3.5 软件系统设计	38
3.6 本章小结	43
第 4 章 清扫机器人除尘特性研究	44
4.1 流场分析理论	44

4.2 管道吸尘仿真分析	46
4.3 扬尘机构仿真分析	49
4.4 本章小结	51
第 5 章 清扫机器人参数优化及实验研究	52
5.1 扬尘结构优化设计	52
5.2 实验系统搭建	54
5.3 负压吸附与除尘机构清扫效果实验	57
5.4 除尘机构工作参数优化实验	60
5.5 本章小结	62
第 6 章 结论与展望	63
6.1 本文总结	63
6.2 工作展望	64
参考文献	65
攻读硕士学位期间的成果	71
致谢	72

插图清单

图 1-1 太阳能发电装机容量分布图	1
图 1-2 机器人三维模型	3
图 1-3 运动模式示意图	3
图 1-4 清扫小车（左）、换行小车（右）	4
图 1-5 全向移动构型简图	4
图 1-6 清扫机器人	5
图 1-7 整体系统控制框图	5
图 1-8 多悬挂装置示意图	6
图 1-9 西安运维光伏清扫机	6
图 1-10 车载式光伏清扫车	7
图 1-11 EDS 薄膜	7
图 1-12 周期清扫模拟器	8
图 1-13 不同清扫介质降低玻璃样品最大透射率的百分比	8
图 1-14 ANN 方法对比输出功率	9
图 1-15 日本 Sinfonia Technology 公司清扫机器人	9
图 2-1 两轮差速机器人	13
图 2-2 阿克曼结构	14
图 2-3 麦克纳姆轮结构	15
图 2-4 全向轮结构	15
图 2-5 清扫机器人模型	16
图 2-6 左侧车轮纵向分速度模型	18
图 2-7 前端车轮横向分速度模型	19
图 2-8 清扫机器人速度简化模型	19
图 2-9 滚刷扬尘结构示意图	21
图 2-10 管道吸尘结构	23
图 2-11 清扫机器人总体结构模型	23
图 2-12 制动器实物图	24
图 2-13 移动底盘速度与时间关系	26
图 2-14 负压装置结构图	27
图 2-15 清扫机器人受力	28

图 2-16 负压腔结构示意图	29
图 2-17 缝隙压强分布	30
图 2-18 负压腔内部仿真实验	31
图 3-1 实物连线图	32
图 3-2 行走模块动作流程图	32
图 3-3 清扫模块动作流程图	33
图 3-4 软硬件系统结构图	35
图 3-5 STM32F103RCT6 示意图	36
图 3-6 电机调速示意图	36
图 3-7 直流电机驱动板原理图	37
图 3-8 陀螺仪模型和 MPU6050 实物图	38
图 3-9 MPU6050 原理图	39
图 3-10 OLED 实物图	41
图 3-11 清扫机器人控制流程图	41
图 3-12 光伏组件清扫机器人通信方案	42
图 4-1 扬尘机构网格模型和网格质量图	46
图 4-2 迭代残差曲线	47
图 4-3 吸尘管道流场仿真图	48
图 4-4 扬尘机构网格模型	49
图 4-5 网格质量图	49
图 4-6 清扫机构流场仿真图	51
图 5-1 滚刷扬尘机构优化模型图	52
图 5-2 扬尘机构网格模型和质量图	53
图 5-3 清扫机构优化仿真图	53
图 5-4 质量流率	54
图 5-5 光伏组件清扫机器人系统组成	55
图 5-6 清扫机器人系统室内场景	55
图 5-7 程序调试界面	57
图 5-8 斜面吸附实验	58
图 5-9 清扫实验效果	60
图 5-10 工作参数散点图	61
图 5-11 工作参数拟合图	61

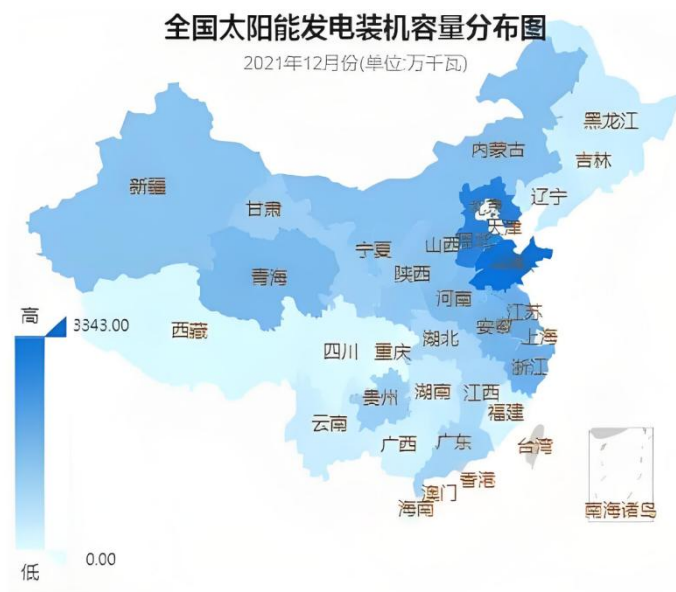
查表清单

表 1-1 光伏板清洁发电量对比表	2
表 2-1 设计指标	12
表 2-2 滚刷电机基本参数	21
表 2-3 吸尘电机基本参数	22
表 2-4 制动器基本参数	24
表 2-5 离心风机基本参数	27
表 3-1 行走模块 OLED 显示	33
表 3-2 清扫模块 OLED 显示	34
表 3-3 工作参数	37
表 3-4 数据位说明	38
表 5-1 清扫机器人主要机械结构说明	54
表 5-2 清扫机器人引脚分配	56
表 5-3 移动速度和吸尘率之间的关系	59
表 5-4 吸尘率与滚刷转速、吸尘转速之间的关系	60

第1章 绪论

1.1 课题的研究背景与意义

近年来，全球能源市场受多重因素影响，包括国际政治经济形势、全球气候变化、国际金融危机和地缘政治问题，导致市场不断波动和不确定性增加^[1,2]。同时，全球能源消费结构也呈现出低碳和清洁化的发展趋势，为可再生能源和新能源的发展提供了新的机遇^[3]。



数据来源于中研网

图 1-1 太阳能发电装机容量分布图

在可再生能源中，光伏发电作为一种直接将太阳能转化为电能的技术，具有环保、可再生、零排放的特点，逐渐崭露头角^[4]。全球范围内，光伏发电的装机容量呈快速增长趋势，成为清洁能源领域的中流砥柱^[5]。然而，随着光伏电站的运营，光伏组件表面会积累灰尘、污垢、鸟粪等，直接影响光的透过率，从而降低光伏组件的发电效率^[6]。传统上，光伏组件的清洁通常采用人工清扫或水冲洗的方式。然而，这种方法存在一系列问题。首先，人工清扫需要大量人力，尤其是在大规模光伏电站中，成本较高，而且容易受到天气条件的限制。其次，水冲洗在水资源短缺的地区不太适用，并且会造成水资源浪费。因此，迫切需要一种高效、经济、环保的清洁方法。为了应对这一挑战，光伏组件清扫机器人的研究应运而生^[7]。

为解决传统清扫方法的不足，光伏组件清扫机器人成为一种备受瞩目的解决方案。这些机器人能够自主在光伏组件表面移动，通过各种技术手段清除附着的

污染物，包括机械刷、气流吹扫、光子清洁等。光伏组件清扫机器人不仅能够提高清洁效率，降低清洁成本，还可以适应不同气候条件，实现全天候、全自动的清洁操作。光伏组件表面的积尘和污染物直接影响光的透过率，从而降低发电效率。通过引入光伏组件清扫机器人，能够及时有效地清理光伏组件表面，保持其高透过率，提高发电效率^[8-10]。据研究显示，定期清洁光伏组件可以使其发电效率提高 5% 以上^[11]，还能消除“堰塞湖”效应^[12]，对于光伏电站的经济运行具有显著的意义。

表 1-1 光伏板清洁发电量对比表

记录时间	已清洗区域发电量		未清洗区域发电量	
	1 号逆变器发电量	2 号逆变器发电量	1 号逆变器发电量	2 号逆变器发电量
8:00	5.3	4.9	3.6	4
9:00	97.5	87.4	76.9	81.8
10:00	316.8	290.8	263.8	280.1
11:00	658.3	618.8	563.8	597
12:00	1070.7	1033.8	929.9	984
13:00	1518.1	1489.1	1336	1412.7
14:00	1973.5	1959.7	1748.3	1846
15:00	2402.6	241402	2134.4	2252.9
16:00	2772.0	2804.3	3460.2	2596.8
17:00	3043.6	3092.1	2692.2	2841
18:00	3183.1	3241.2	2807.6	2963.9

数据来源于百度文库《光伏板清洗发电量对比表》

光伏电站分布在不同的地理环境和气候条件下，包括沙漠、高山、寒冷地区等，传统的清洁方式在这些极端环境下存在一定的困难^[13,14]。而光伏组件清扫机器人可以通过技术创新，适应不同的环境，保证清洁操作的顺利进行，为光伏电站的可持续发展提供了有力支持。通过提高光伏发电效率、降低运维成本，光伏组件清扫机器人的研究不仅有助于光伏电站的经济运行，还有助于推动清洁能源的更广泛应用^[15]。清洁能源的普及对于减缓气候变化、改善环境质量具有积极的社会影响，光伏组件清扫机器人在其中扮演着关键的角色。光伏组件清扫机器人的研究具有重要的背景和深远的意义，它不仅解决了光伏组件清洁的难题，提高了发电效率，同时也推动了清洁能源技术的发展。如今的清扫机器人已经能基本替代繁重的人工清扫，但是轨道式清扫机^[16]需要安装行走轨道，极大地增加了使用成本，并且其只能在 x 轴上移动^[17]，灵活度低。车载式清洗设备^[18]大多外设机械

臂进行清洗，此类设备移动底盘过于庞大，并且结构复杂，鉴于光伏电站光伏板间的有限间距，此类设备的实用性有限。

本课题所研究的全向式移动结构的清扫机器人，可以实现全场景的路径清扫，不需要外加辅助设备，并且能应用于集中式、分散式等多种光伏发电场景。对于不同纬度倾斜度不同的光伏组件都能清扫，采用无水清扫方式，能够适应偏远缺水地区的使用^[19]，在降低发电成本的同时提高光伏组件发电效率。

1.2 国内外研究现状

光伏组件清扫机器人其实就是服务型机器人的一种^[20]，其用于光伏组件表面灰尘清扫，能显著提高光伏组件光电转化效率，以及防止电池板积灰产生热斑效应，因此国内外都积极参与到光伏组件清扫机器人的研制上，也有出现了许多切实可行的方案。

1.2.1 光伏组件清扫机器人研究现状

张经纬等^[21]针对光伏组件清扫机器人的轻量化问题提出了一种驱动结合清扫的集成系统，通过对清扫机器人结构的优化，将清扫圆盘与驱动装置相结合，利用四驱装置，通过联轴器使电机和圆盘连接，改变清扫圆盘的旋转方向达到定向移动的目的，如图 1-2、1-3 所示。此种清扫方式采用干式圆盘清扫，其只能应用于水平放置的光伏组件上，并且其行走的稳定性较差。

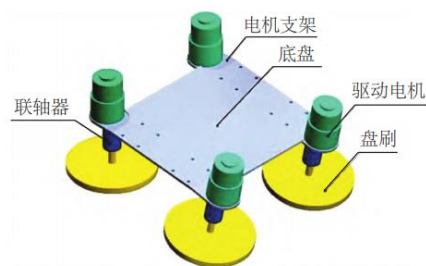


图 1-2 机器人三维模型

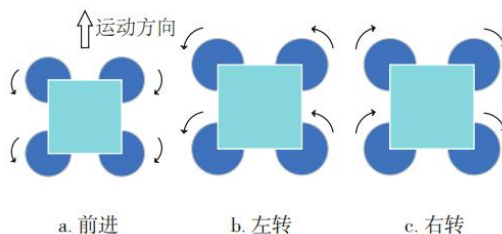
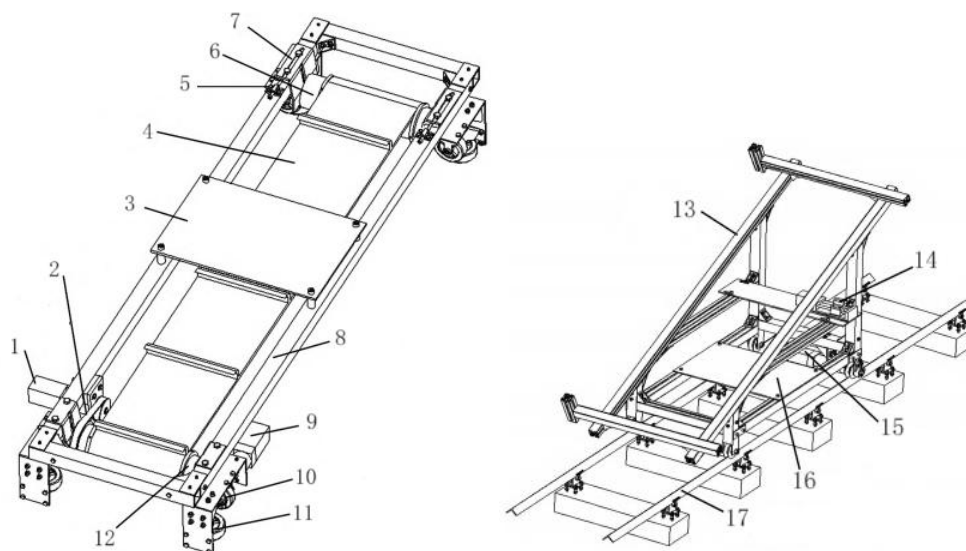


图 1-3 运动模式示意图

对于大型光伏发电场景，周亦瞿等^[22]提出了一种换行清扫的方法，该方法能够

使清扫机器人打破单排清扫的限制，进行多排、全场景的清扫工作。该方法由清扫小车和换行小车两个装置组成，如图 1-4 所示，清扫小车用于清扫光伏组件，换行小车则用于携带清扫小车沿着轨道移动到另一排光伏组件上。然而，这种机器人需要人工安装在光伏面板两侧，还需额外安装过桥导轨，安装工作量较大，尤其在大型光伏电站使用，安装维护都非常不便，不适合大规模推广使用。



1.清扫电机、2.同步带、3.置物板、4.皮带刷、5.张紧装置、6.从动辊、7.挂耳、8.主框架、9.行走电机、10.行走轮、11.限位轮、12.主动辊、13.小车框、14.锁紧机、15.行走电机、16.置物板、17.换行轨道

图 1-4 清扫小车（左）、换行小车（右）

针对变斜面光伏组件上清扫机器人行走的问题，梁艺等^[23]利用数学建模和仿真实验的手段对可变斜面光伏清扫机器人行走特性进行了深入分析。在全向移动结构的基础上，如图 1-5 所示，分析姿态角的变化对行走速度和电机力矩控制的关系，实验表明通过使用双 PI 控制方法能够减少速度偏差和功耗。

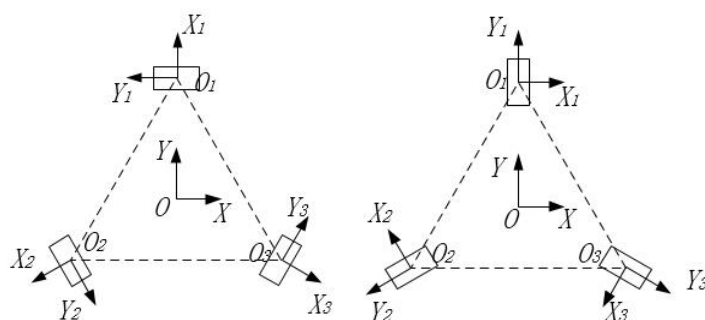


图 1-5 全向移动构型简图

S. Santosh Kumar 等^[24]设计了一种利用高压气体结合喷水和刮水器进行清扫的机器人，能够定期自主清扫光伏组件，并且利用物联网技术进行控制，可以同时多台清扫机器人远程控制。

Omur Akyazi 等^[25]设计了一种轻量化的清扫机器人，其主体框架能够沿光伏组件横向移动，清扫机构在主体框架上下运动，利用清扫机构上的旋转滚刷清扫整个光伏组件表面。其结构如图 1-6 所示。

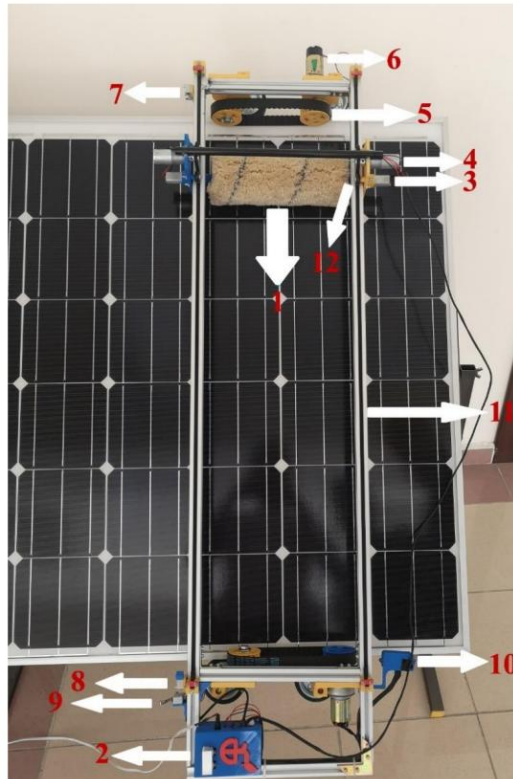


图 1-6 清扫机器人

G. Aravind 等^[26]提出了一种自主清洁的方法，通过清扫机器人和拓展坞两个子系统共同实现，清扫机器人清扫后进入拓展坞充电，拓展坞能读取清扫机器人相关工作参数，并进行相应判断。其整体系统控制框图如图 1-7 所示。

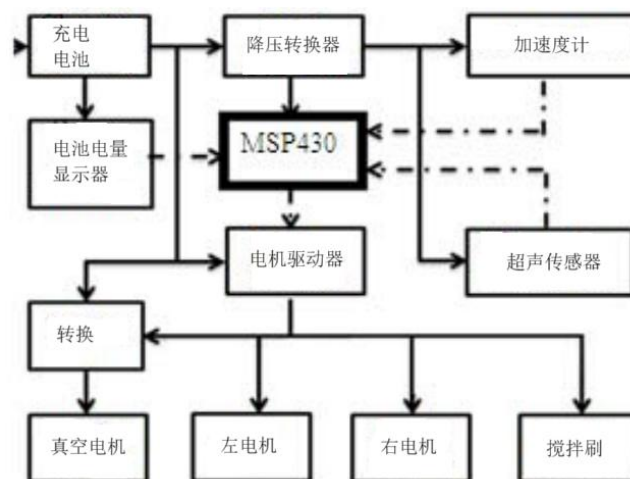


图 1-7 整体系统控制框图

清扫机器人在光伏组件表面工作时，会产生振动，对光伏组件结构寿命和发电

效率影响较大,对此 Nhut Thang Le 等^[27]提出了一种应用于清扫机器人的履带多悬挂装置,履带中间的多悬挂装置能增加行走轮与光伏板表面的接触面积,并且平缓过度高度差,多悬挂装置能最大减少 72.63%的振动,结构如图 1-8 所示。但这种履带多悬挂装置结构复杂,同时也会导致清扫机器人自重较大,从而对光伏组件承重要求更高。

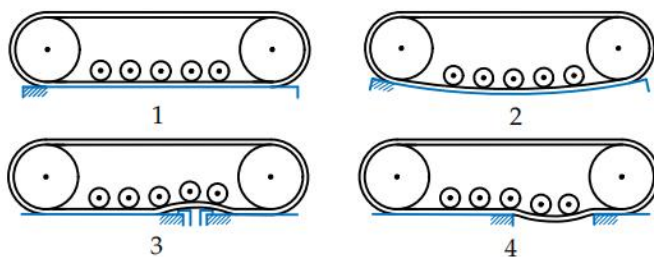


图 1-8 多悬挂装置示意图

西安运维电气科技有限公司推出了一款清扫机器人^[28,29]该款机器人分为清扫单元,行走单元,控制单元,供电单元等部分,在结构上,该款机器人横跨整个光伏板上下两端,整体与光伏板平行放置,由上下两端的行走单元实现机器人在光伏板上的行走,清扫单元实现对光伏板表面的无水清洁,清扫部分采用由高分子材料制成的柔软螺旋毛刷,不会损坏光伏组件表面的钢化玻璃。但需要为其安装独立的停机坪,其干式单滚刷清扫方式使其清洁率不高。



图 1-9 西安运维光伏清扫机

宣化泰达机械设备制造有限公司研发了一款车载式光伏清扫车^[30]。该清扫车在行走底盘上安装了一个机械臂,机械臂末端搭载一个清扫结构。由于车载式光伏清扫车采用燃油驱动,所以能长时间进行清扫作业,其能在 -15°C 至 50°C 温度范围内,4000m 海拔以下的复杂场景中正常作业,行进速度为 $4\text{--}7\text{km/h}$,在进行正常清扫作业时的清扫效率大约为 $10000\text{ m}^2/\text{h}$,清扫效率较高^[31]。但车载式光伏清扫车体积庞大,对于光伏组件间狭窄的间隙而言行动不便,其复杂的机械结构和人工操作的方式使其成本高昂,也不利用后期维护保养工作。



图 1-10 车载式光伏清扫车

1.2.2 光伏组件清扫方法研究现状

N. F. Zainuddin 等^[32]将清扫机器人和光伏组件进行整合, 提出融合反馈控制的方法, 开发一种清扫机, 在清扫的同时能够检测光伏组件的发电量, 通过反馈控制进行精确清扫。

K. Mazumder 等^[33]研究了高表面温度和灰尘在光伏组件上的长时间停留会对光伏组件产生影响, 提出了 EDS 的方法用以无水清洁光伏组件, EDS 由夹在两个透明介电层之间的一排排透明、导电、平行的电极组成, 通过激活电极使灰尘带有静电从而清除灰尘。但其对粉尘种类有要求, 不是所有粉尘都适用于静电除尘, 对环境要求较高, 不同的温度湿度, 所得到的除尘效果也会有所不同, 而且设备的安装维护成本较高。

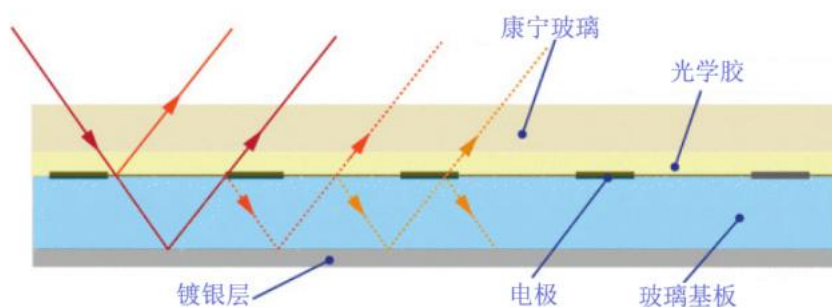


图 1-11 EDS 薄膜

Sheheri A A 等^[34]研究了干式清扫光伏表面的使用效果, 同时研究了清扫对光伏组件发电效率的影响。通过研究证明, 利用尼龙毛刷进行无水清扫不会对光伏组件转换太阳能的光学性质产生明显的损伤, 虽然尼龙毛刷不如使用水洗, 但其能节约大量水资源, 并且模拟使用场景 20 年, 尼龙毛刷对光伏组件表面玻璃依然没有显著损伤。

S. Bhaduri 等^[35]研究了不同刷子的设计对刷子本身的磨损和对光伏板的损害,利用一种周期清扫的模拟装置,模拟在刷子清扫光伏组件过程中所受的各种应力。利用线性刷和滚刷两种刷子进行模拟,结果显示线性刷对组件表面施加的压力更大,在经历 3700 次磨损循环后线性刷的磨损更严重。

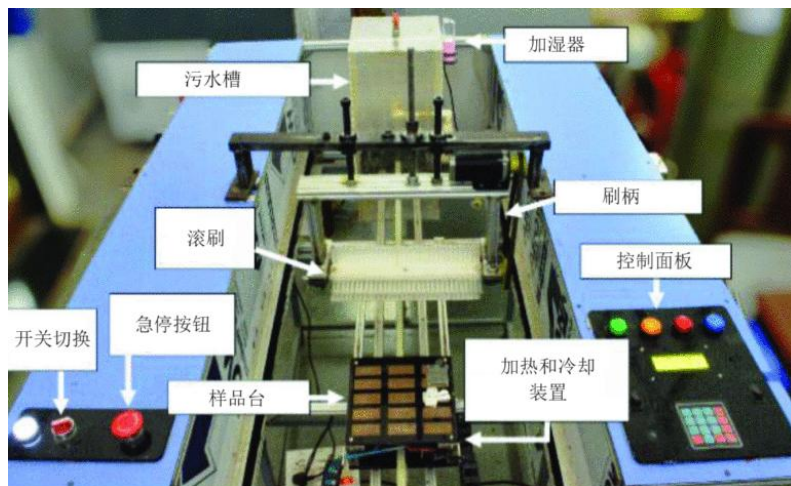


图 1-12 周期清扫模拟器

对于更多清洗介质对光伏组件表面的影响,J. A. P. Rodrigues 等^[36]进行了探究,所使用的清洁介质分别为水(MB I)、压缩空气(MB II)、水和尼龙鬃毛刷(MS I)、水和尼龙粗毛和细刷子(MS II)、硅胶刷毛(MS III)浇水和刷子、水和聚氨酯海绵(MM II)以及水和研磨性合成树脂海绵(MM I)。通过实验表明,利用水和压缩空气的方式能够得到最佳的清洗效果,而使用合成树脂海绵对光伏组件表面的损伤最大。对于环境恶劣、风沙较大的地区,使用水和尼龙粗毛和细刷子的清扫方法更加行之有效。但是对于沙漠或偏远缺水、用水困难地区水清扫方法的使用仍需要谨慎。

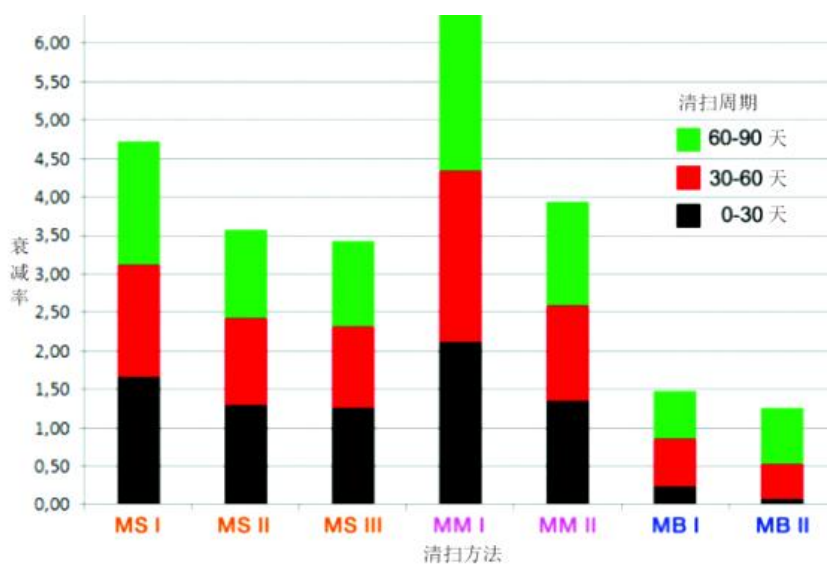


图 1-13 不同清扫介质降低玻璃样品最大透射率的百分比

M. Mokhtar 等^[37]提出了一种基于 ANN 的光伏组件清洁方法,该方法利用反馈控制,通过检测光伏组件发电功率、当地气温和太阳照射强度,对比无遮挡时数据,综合计算后控制清扫机器人进行清扫作业,基于该方法能减少 60%的灰尘覆盖,降低 80%的清扫成本,发电对比图如图 1-14 所示,a 为不清洁,b 为每天清洁,c 为基于 ANN 方法的清洁

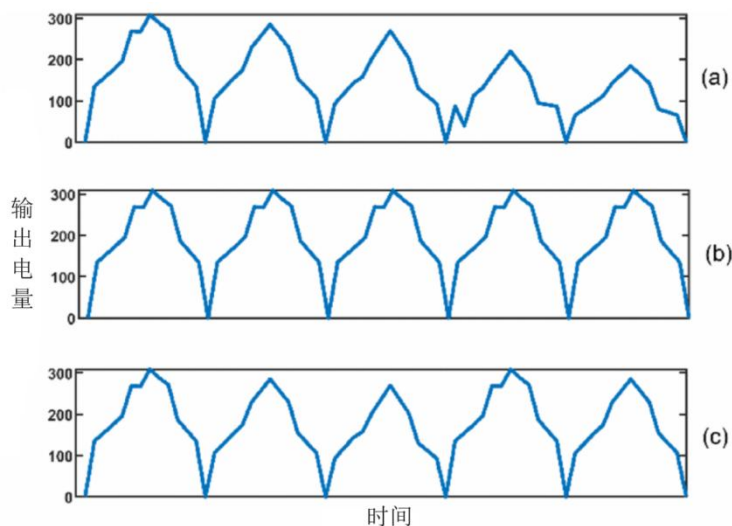


图 1-14 ANN 方法对比输出功率

日本 Sinfonia Technology 公司 2013 年开发出了供百万瓦级光伏电站使用的自动行走式光伏组件清扫机器人,该清扫机器人采用湿式清扫方式,内置清洗液罐,工作时清洗液不断喷洒到光伏组件上湿润灰尘,然后利用旋转毛刷进行清扫,最后利用刮板清除光伏组件上的顽固污渍和灰尘。该种清扫机器人清扫时需要喷水,随车携带的水箱和清洗液罐增加了机器人自重,并且水清洗对于水资源缺少地区不适用。



图 1-15 日本 Sinfonia Technology 公司清扫机器人

综合国内外光伏清扫机器人技术的发展现状，可以知道机器人技术在光伏清扫领域的应用已经成为共识。但是国内外对于应用何种清扫方案结构不一而论，用于各地区场景不同，光伏板安装方式，倾斜角度各不相同。需要对清扫机器人运动方式、扬尘、吸尘和吸附等结构开展详细的研究。

1.3 研究内容及章节安排

1.3.1 主要研究内容

通过了解国内外光伏清扫机器人的发展现状，以及分析光伏组件发电场景，可以看出光伏清扫机器人的一些特点，安全性高，成本低，清扫效率高，适应性好，操作简单。本文以光伏组件清扫为应用背景，设计了变斜面光伏组件清扫机器人，建立移动底盘运动模型，分析移动底盘做转弯、原地掉头动作时整体速度和各轮分速度的关系，并解算各轮速度。对比清扫机器人各种清扫方式，选择滚刷清扫和管道吸尘相结合的方式，利用三维软件进行结构建模，确定结构参数。根据变斜面清扫特点，分析清扫机器人受力情况，增加负压吸附装置，并利用 Fluent 软件开展仿真分析。为防止机器人越过边界从光伏组件上掉落，为各驱动轮安装制动装置。分析气固两相流理论，利用仿真软件对清扫机器人滚刷和吸尘结构开展流场仿真，通过仿真结果对结构进行优化，根据优化后的结构参数搭建实验平台，完成清扫机器人工作参数研究和优化，利用非线性拟合优化结果。

1.3.2 章节安排

第 1 章，通过绪论阐述了本课题的研究背景和意义，分析了国内外光伏组件清扫机器人研究现状，以及各种构型的清扫机器人结构特点和优缺点，从而提出本课题的研究内容，并对其中的创新点展开分析。

第 2 章，根据光伏组件清扫机器人工作工况分析，对其结构部分完成三维建模设计，包括移动底盘，滚刷扬尘、管道吸尘、安全制动和负压吸附等结构，实现清扫机器人功能和安全辅助。

第 3 章，分析清扫机器人行走模块和清扫模块系统设计，针对光伏组件清扫机器人在光伏板上的工作方式设计控制系统，根据清扫机器人功能特点，结合清扫场景，设计运行稳定、成本合理、控制方便的控制方案

第 4 章，论述气固两相流理论，对清扫机器人滚刷结构和管道吸尘机构流场开展仿真，分析 Fluent 软件仿真结果，提出结构参数设计缺陷。

第 5 章，根据流场仿真结果对滚刷和管道吸尘结构开展优化，并完成仿真对

比优化结果，搭建光伏组件清扫机器人实验平台，利用对比实验法完成对各组工作参数实验，最后利用非线性拟合对工作参数展开优化，得到最佳工作参数。

第 6 章，结论与展望。

1.4 本章小结

本章主要描述了光伏发电作为一种可再生能源的应用前景，以及光伏发电当前所面临的光伏组件表面清扫的问题。光伏组件长期不进行清扫不仅会造成其发电效率降低，还会因为电池板积灰产生热斑效应影响光伏组件寿命。分析国内外光伏组件清扫机器人的研究现状可以看出，当前的光伏组件清扫机器人能够实现对人工清扫的替代，但在清扫成本，维护复杂度，灵活性和安全性方面还有所欠缺，因此有必要针对这些特点进行深入研究，最后阐述了本文的主要研究内容和创新点。

第 2 章 清扫机器人结构设计

2.1 引言

光伏组件清扫机器人整体包含移动底盘载体，滚刷，管道吸尘和软硬件控制系统，移动地盘是清扫机器人的运动主体，为清扫机器人提供行进的动力，滚刷和管道构成其基本功能结构。清扫机器人设计需要满足其工作场景，符合一定的设计指标，分析其工作场景如下：

(1) 本文所对应的天合光能光伏组件单个尺寸为 $2000\text{mm} \times 1200\text{mm}$ ，一组光伏板是由若干个单板组成，各单板之间利用铝合金檩条连接和承重。光伏板中间是一种薄膜太阳能片^[40,41]，由两片薄钢化玻璃加持。光伏组件的整体结构决定了其承重能力，清扫机器人对光伏组件的直接作用力要尽可能小，设计尺寸也要紧凑，满足光伏组件上各位置的清扫需要，并且工作过程中不会对其表面造成损害。

(2) 当前光伏发电为实现发电量的最大化，普遍开始装备具有可变支架角度可调的光伏发电板^[42]，其倾斜角度在 $-60^\circ \sim 60^\circ$ 之间变化，由于白天光伏组件发电量较大，而清扫光伏板会对其发电量造成一定程度影响，故清扫时间一般放在夜晚。夜晚由于月球对太阳光线的反射作用，光伏组件依然可以利用月光进行发电，而且夜晚光伏组件倾斜角度在 $-30^\circ \sim 30^\circ$ ，更利于清扫机器人作业，但同样要求清扫机械人具备在变斜面光伏组件上工作的能力。

(3) 由于光伏组件是多个单光伏板拼装而成，安装过程中会有一定的误差，清扫机器人进行清扫工作时会造成光伏板产生变形，从而使两块光伏板之间产生大约 10mm 左右的高度差，有时高度差甚至可达 20mm ，这就要求清扫机器人要具备一定的越障能力，以及减震能力，确保清扫机器人能在光伏组件上稳定工作^[43]。

根据以上几点分析，以及针对沙漠地区灰尘聚集特性、可变斜面稳定清扫要求，全向移动光伏清扫机器人结构设计指标如表 2-1 所示。

表 2-1 设计指标

类别	参数
倾斜角	$0^\circ \sim 30^\circ$
自由度	x,y 向移动，z 向转动
速度	$0.2 \sim 0.8 \text{ m/s}$
尺寸	$\leq 800 \times 400 \times 300 \text{ mm}$
重量	自重 $< 25 \text{ kg}$ ，负载 $< 5 \text{ kg}$

2.2 清扫机器人移动底盘设计

清扫机器人移动地盘的运动模式多样，在光伏组件上路径规划和灵活度不同，使得不同的运动方式对清扫机器人的清扫效率影响较大^[44]，故选择合适的运动方式，对于清扫机器人移动底盘来说至关重要。

2.2.1 清扫机器人运动方案选择

当前移动底盘的运动方式主要有两轮差速结构^[45]、阿克曼转向结构^[46]、麦克纳姆轮结构^[47]、全向轮结构^[48]以及四驱结构^[49]，需要根据应用场景选择最适合的结构类型，下面对这五中类型进行分析。

(1) 两轮差速结构

两轮差速式机器人是比较常见的轮式机器人，它控制最为简单。两轮指的是它只有两个驱动轮，它的特点是从动轮为全向轮或者万向轮等可以进行全向移动的轮子，因此只需要控制两个驱动轮的速度存在差异，即两轮差速，即可控制机器人实现无滑动摩擦的旋转^[50]，也可以实现零半径转弯。下图 2-1 (a)、2-1 (b) 分别为全向轮、万向轮两轮差速式机器人，两者相比较，全向轮的特点是控制比较稳定，但是负载能力相对较弱，万向轮的控制不稳定体现在急转向的时候会有有一定的甩尾效应^[51]。

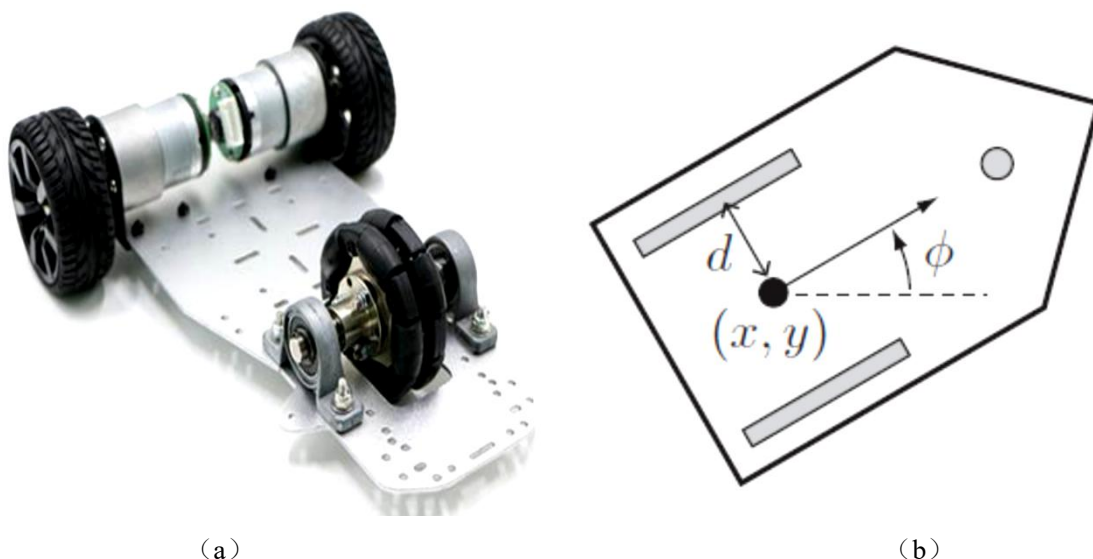


图 2-1 两轮差速机器人

两轮差速结构能够在光伏板上灵活移动，并且实现无死角清扫，但万向轮对于光伏组件之间的缝隙通过性较低，甚至有可能卡在缝隙里，并且其较弱的负载能力不适用于光伏组件清扫。万向轮两轮差速结构在清扫作业时由于滚刷清扫会产生震动，造成前轮的万向轮发生旋转，导致降低清扫效果。

(2) 阿克曼转向结构

阿克曼转向结构其实就是现代汽车的转向结构，阿克曼转向与两轮差速结构类似，如下图 2-2 所示，为阿克曼式机器人转向时的状态，要求 4 个轮子运动方向的垂线相交于一点，即 4 个轮子围绕同一个圆心进行旋转。

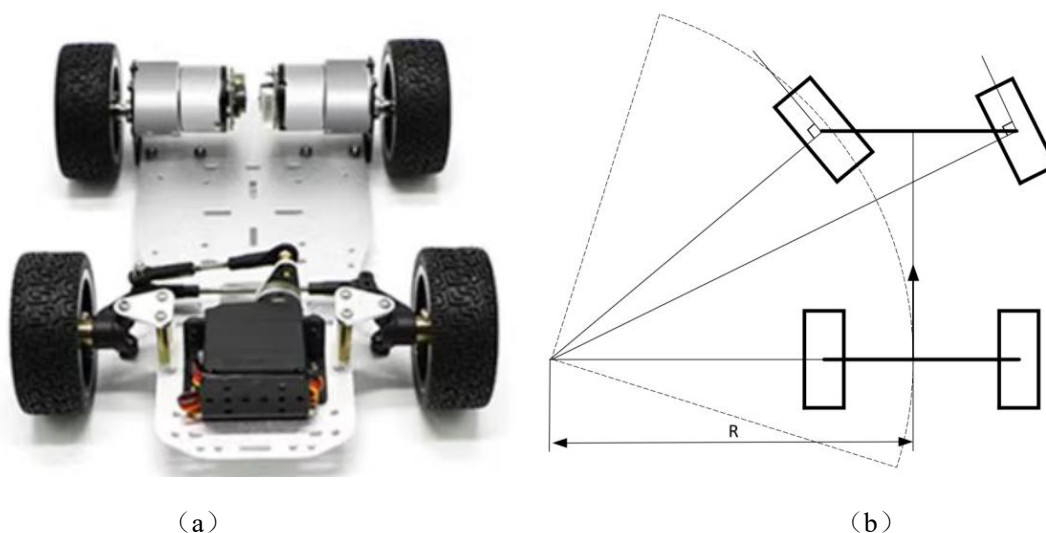


图 2-2 阿克曼结构

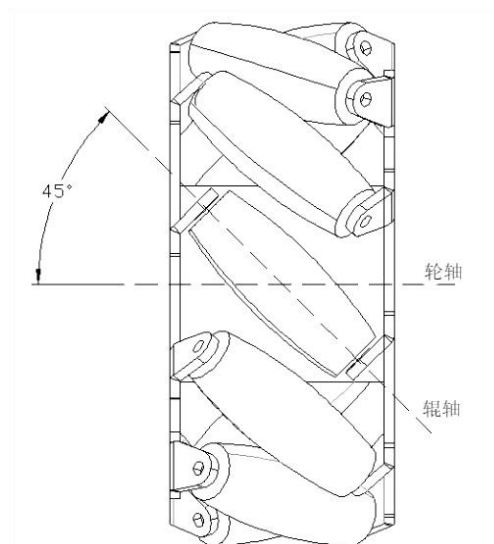
阿克曼转向结构依靠驱动轮的差速实现转弯，但是转弯的同时还需要控制前轮的转角进行配合，否则前轮角度与底盘运动方向产生夹角，导致前轮与地面的摩擦力将会非常大，严重影响机器人转向运动以及磨损轮胎。阿克曼转向式的优点是可以使用普通轮子，不需要使用全向轮，可以提高机器人整体强度和减低成本，缺点则是受限于前轮的转角幅度，无法进行原地转向，导致其在光伏组件进行清扫作业时，运动轨迹规划较为复杂，复杂的运动轨迹不仅增加设计的工作量还会增加电能消耗，导致续航减短，阿克曼转向结构边界处的清扫的运动也会增加清扫机器人坠落的风险。

(3) 麦克纳姆轮结构

麦克纳姆轮(Mecanum Wheel)，又称为艾隆轮(Ilion Wheel)。其由轮毂和固定在外周的许多小辊子构成，轮轴和辊轴之间的夹角通常为 45° ，如下图 2-3 (a)、2-3 (b) 所示。每个轮子具有三个自由度，分别是绕轮轴转动，沿垂直于与地面接触的辊子的辊轴方向移动，绕轮子和地面的接触点转动。其稳定性好，控制简单，还具备较好的载重能力。



(a)



(b)

图 2-3 麦克纳姆轮结构

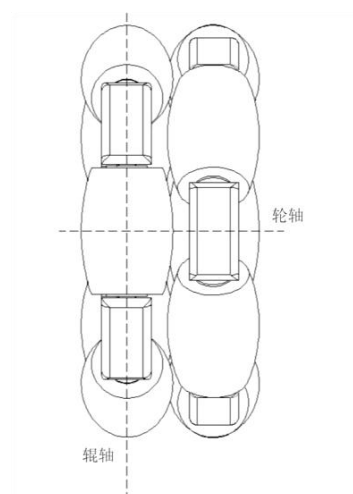
光伏组件各单板之间存在缝隙，并且有一定的高度差，麦克纳姆轮在表面行走其固定在外周的小辊子有可能卡在缝隙中。麦克纳姆轮与光伏组件表面为点接触，导致行走时摩擦阻力较小，而清扫机器人工作时滚刷旋转会产生一个与行进方向相反的力，可能导致麦克纳姆轮打滑，使光伏清扫机器人不能正常工作。

(4) 全向轮结构

全向轮由轮毂和固定在外周的许多小辊子构成，轮轴和辊轴之间的夹角为 90° ，如下图 2-4 所示。每个轮子具有三个自由度，分别是绕轮轴转动，沿垂直于与地面接触的辊子的辊轴方向移动，绕轮子和地面的接触点转动。在全向轮结构中，只需要三个轮子就可以实现全向移动。



(a)



(b)

图 2-4 全向轮结构

全向轮结构应用于清扫机器人上一般使用三个驱动轮，可在光伏组件上进行灵活移动，甚至进行原地转向，能对光伏组件进行无死角清扫，但其缺点和麦克纳姆轮类似，其辊轮容易卡在光伏组件的缝隙中，并且易打滑。

(5) 四驱结构

四驱结构清扫机器人是由四个驱动轮提供动力，驱动轮一般使用橡胶轮，每个驱动轮的转速和方向能够单独进行控制，能够进行灵活运动。四驱结构驱动轮构造简单，和普通轮胎没有差别，载重能力较好。

综合考虑两轮差速结构、阿克曼转向结构、麦克纳姆轮结构、全向轮结构以及四驱结构，结合清扫机器人应用场景，两轮差速结构和阿克曼转向结构灵活性较差，不能进行原地转向，会增加路径规划的复杂性。麦克纳姆轮结构和全向轮结构在光伏组件上移动，对于缝隙和落差的通过性较差，轮子的防滑性能较低，不利于清扫机器人的光伏组件上清扫作业。四驱结构简单的轮胎构型能够为清扫机器人提供良好的通过性，对四个驱动电机进行单独控制使其具备原地转向的能力，能极大提高清扫效率，并且能同时保证防滑性能。

2.2.2 移动底盘运动学分析

移动底盘采用四驱结构，各驱动轮速度和整体运动速度，根据运动方式的不同，满足一定的相互关系，因此需要对关键运动方式中的速度分配进行分析，建立运动学模型^[52]，研究轮距、轴距和运动方式与速度的关系。根据机器人整体结构，对其原地转向及圆弧转向的运动规律进行分析，使其满足运动学原理。机器人原地转向时，绕图 2-5 中 O 点旋转，并以 O 点建立坐标系，将移动底盘的刚体运动线性分解为 Y 轴和 Z 轴两个方向的分量。

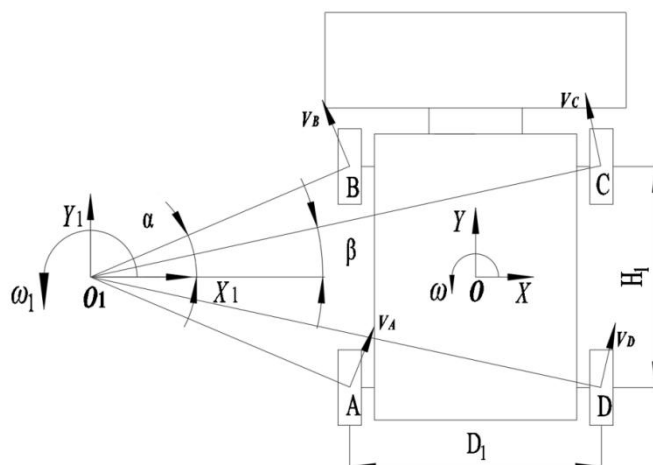


图 2-5 清扫机器人模型

其中 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 、分别表示为 A、B、C、D 四个轮子的前进或后退速度，

V_Y 为移动底盘沿 Y 轴的平移速度， ω 为移动底盘沿中心轴线 Z 轴自转的旋转速度， $a = D_1/2$ 为移动底盘轮距 D_1 的一半， $b = H_1/2$ 为移动底盘轴距 H_1 的一半。

当移动底盘沿 Y 轴做平移运动时：

$$\begin{cases} V_A = +V_Y \\ V_B = +V_Y \\ V_C = +V_Y \\ V_D = +V_Y \end{cases} \quad (2-1)$$

当移动底盘绕 Z 轴旋转时：

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{a^2 + b^2} \\ -\sqrt{a^2 + b^2} \\ \sqrt{a^2 + b^2} \\ \sqrt{a^2 + b^2} \end{bmatrix} \omega \quad (2-2)$$

将 2-1、2-2 两组方程合并，即可根据移动底盘的运动状态解算出四个轮子的速度：

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \end{bmatrix} = V_Y + \begin{bmatrix} -\sqrt{a^2 + b^2} \\ -\sqrt{a^2 + b^2} \\ \sqrt{a^2 + b^2} \\ \sqrt{a^2 + b^2} \end{bmatrix} \omega \quad (2-3)$$

移动底盘做圆弧转向时，围绕移动底盘外一点进行移动，故四个轮胎的合成速度方向均与旋转半径的径向方向垂直，并且可以将各合成速度分解成轮胎前进方向的纵向分速度，以及平行于传动轴的横向分速度。可根据左右两侧中的前后两个车轮 Y 轴的分速度相同，前后两端中的左右两个车轮 X 轴分速度相同分析横纵两个分速度。分析如下：

(1) 左侧车轮纵向分速度分析

如图 2.5 所示，车轮绕 O_1 点转动的角速度为：

$$\omega_1 = \frac{v_A}{r_A} = \frac{v_B}{r_B} \quad (2-4)$$

其中， v_A 、 v_B 代表车轮 A、B 与地面接触点的合速度，m/s；

r_A 、 r_B 代表车轮 A、B 的绕 O_1 的旋转半径，m。

对公式 2-4 进行变换如下：

$$\frac{V_A}{L/\cos\alpha_2} = \frac{V_B}{L/\cos\alpha_1} \quad (2-5)$$

对公式 2-5 进行化简如下：

$$V_{AY} = V_A \cos\alpha_2 = V_B \cos\alpha_1 = V_{BY} \quad (2-6)$$

其中 V_{AY} 、 V_{BY} 分别为 V_A 、 V_B 的纵向分速度，m/s。

由以上分析可得，移动地盘左侧车轮最高点速度的 Y 轴方向分速度前后两轮相同，同理可得右侧车轮最高点速度的 Y 轴方向分速度前后两轮也相同，但左侧轮和右侧轮的纵向方向分速度不同。

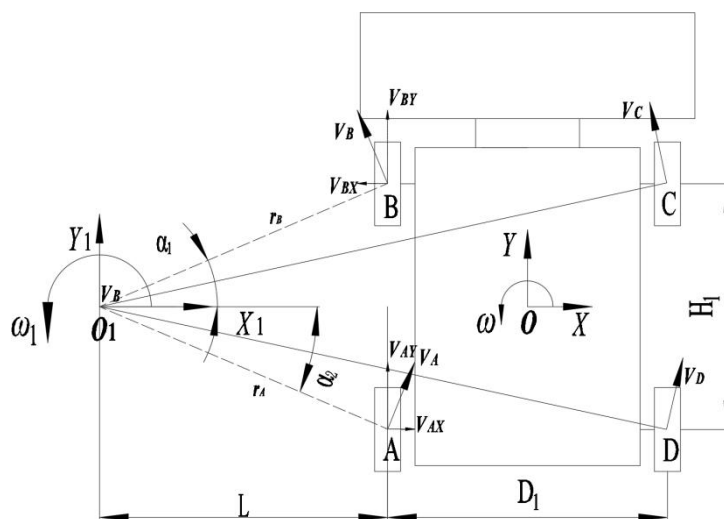


图 2-6 左侧车轮纵向分速度模型

(2) 前端车轮横向分速度分析

如图 2-7 所示，前端车轮横向分速度的分析可以仿照两侧纵向分速度的分析方法，则前端两轮最高点的角速度为：

$$\omega_1 = \frac{v_B}{r_B} = \frac{v_C}{r_C} \quad (2-7)$$

其中， v_B 、 v_C 代表车轮 B、C 与地面接触点的合速度，m/s；

r_B 、 r_C 代表车轮 B、C 的绕 O_1 的旋转半径，m。

对公式 2-7 进行变换如下：

$$\frac{v_B}{H_1/2\sin\alpha_1} = \frac{v_C}{H_1/2\sin\alpha_3} \quad (2-8)$$

对公式 2-5 进行化简如下：

$$V_{BX} = V_B \sin\alpha_1 = V_C \sin\alpha_3 = V_{CX} \quad (2-9)$$

其中 V_{BX} 、 V_{CX} 分别为 V_B 、 V_C 的横向分速度，m/s。

由以上分析可得，移动地盘前端两车轮最高点速度的 X 轴方向分速度左右两轮相同，同理可得后端两轮车轮最高点速度的 X 轴方向分速度左右两轮也相同，但前端和后端轮的 X 轴方向分速度不同。

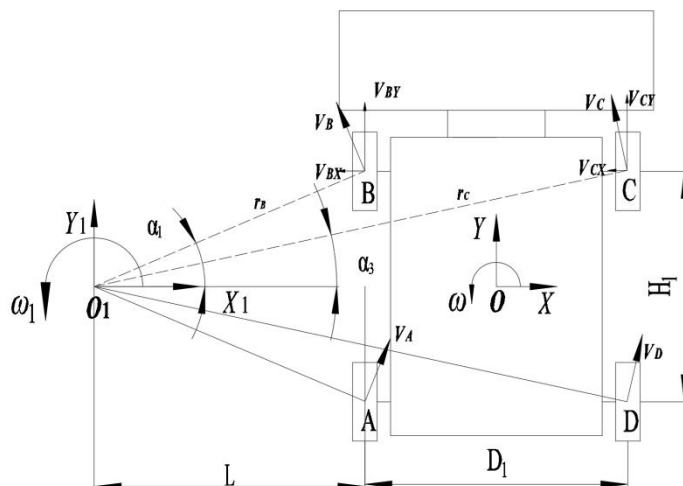


图 2-7 前端车轮横向分速度模型

总结以上两点规律，因内侧轮转弯半径相同，故两轮速度 v_A 、 v_B 相同，同理外侧两轮速度 v_C 、 v_D 同样相同，而由于内外侧转弯半径不同，则其速度也不同。根据上述结论可简化运动模型，将内侧相同速度的 A、B 轮简化为一个，外侧的 C、D 轮简化为一个，可得简化图形如图 2-8 所示：

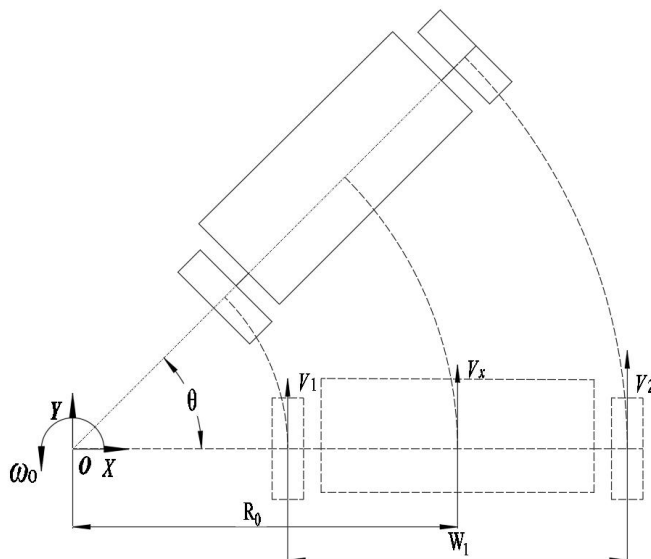


图 2-8 清扫机器人速度简化模型

简化正运动学模型可表示为：

$$\begin{bmatrix} V_x \\ \omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_1+V_2}{2} \\ \frac{V_2-V_1}{W_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{W_1} & -\frac{1}{W_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_1 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

简化逆运动学模型可表示为：

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x + \frac{W_1}{2} \omega_0 \\ V_x - \frac{W_1}{2} \omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{W_1}{2} \\ 1 & -\frac{W_1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ \omega_0 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

通过公式 2-10、2-11 可知，当需要移动地盘运动时，可根据移动底盘给定速度结合移动地盘结构参数，确定轮胎最高点线速度，从而根据轮胎半径解算出电机所需的转速，实现对清扫机器人的精确控制。

2.3 清扫机器人除尘机构设计

1. 清扫机器人滚刷扬尘机构设计

清扫机器人滚刷扬尘机构能够将附着在光伏组件表面的灰尘扬起，从而让吸尘结构更容易将灰尘吸入集尘腔内，滚刷扬尘机构的构型对于最后的清扫效果起着重要作用。根据清扫机器人工作场景，滚刷扬尘机构在清扫过程中应该始终平行于光伏组件表面，滚刷刷毛紧贴表面，并且能够提供稳定的可持续的清扫工作。当前清扫机器人扬尘机构有多种类型，单滚刷、圆盘刷以及滚刷加喷水装置。

单滚刷结构是由一根圆柱体上安装尼龙丝^[53]，通过电机带动滚刷高速转动，许多小型清扫机器人都应用了单滚刷结构，使其造型结构简单，采用全向轮结构，运动灵活，体积小巧，全重不超过 25kg，能够在屋顶等多种复杂条件下工作和移动，但此类单滚刷清扫效果较差，清扫效率较低。为了改善单滚刷清扫效果不好的缺点，当前单滚刷结构大多结合喷水的湿式清扫方案^[54]。单滚刷湿式清扫车由直径达 1m 的滚刷高速转动进行清扫，同时结合喷淋系统，提升清扫效果。由履带式底盘提供动力，带动滚刷沿光伏组件持续清扫，能一次清扫整排光伏组件，清扫效率较高。但湿式清扫方案对于水资源是个极大的浪费，对于中东等光伏发电普及率较高的沙漠地区，其推广难度较大。光伏电站环境较为复杂，履带式底盘移动时会根据地形的不平产生一定的摆动^[55]，从而使滚刷设计时采用较长的尼龙丝，防止滚刷撞击或离开光伏组件表面，但较长的滚刷尼龙丝在工作时，会因底盘的摆动和光伏组件表面的接触量发生变化，造成清洁效果的不同，极大影响

整体的清洁效率。

采用双圆盘刷结构^[56]，利用喷淋装置辅助清扫。两个圆盘刷旋转方向相反，通过高速转动将灰尘扫起，再利用水将灰尘冲走，这种清扫方式多用于道路清扫车，用来清扫路面上顽固和大体积垃圾，用其来清扫光伏组件效率较低。

通过对比现有的多种清扫结构，总结各种结构的优缺点，本文扬尘机构设计如图 2-10 所示，采用双滚刷结构^[57]，能在一次清扫的前提下加倍实现光伏面板的洁净度。根据光伏面板灰尘的特点，采用无水、无清洁剂的技术，两个滚刷将灰尘扫起后，由上方的吸尘口吸走灰尘，而对于滚刷上粘连的灰尘，特别设计了除尘丝。除尘丝安装在两个滚刷转动方向靠近吸尘口一侧，当滚刷转动时会不断扫过除尘丝，以使刷毛颤动将粘连在滚刷上的灰尘抖落，并且灰尘抖落位置位于吸尘口附近，利于吸尘机构将灰尘及时吸出，避免二次污染。

滚刷电机基本参数如表 2-2 所示：

表 2-2 滚刷电机基本参数

类别	参数
额定电压	24V
额定电流	2.3A
额定扭矩	13.5kg.cm
转速	325r/min

滚刷扬尘结构示意图如图 2-9 所示：

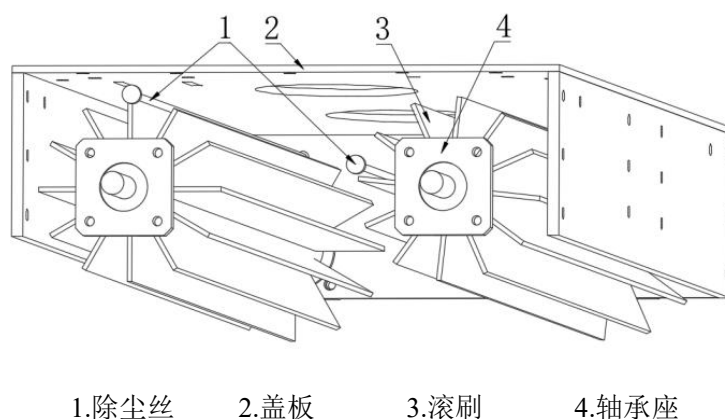


图 2-9 滚刷扬尘结构示意图

吸尘口风量为：

$$Q = 3600AV_{pl} \quad (2-12)$$

其中， Q ——吸尘口风量， m^3/h ；

3600 表示常数；

A 表示吸尘口面积, m^2 ;

V_{pl} 表示吸尘口平均风速, m/s 。

2.清扫机器人管道吸尘机构设计

现阶段许多类型的清扫机器人将光伏组件表面的灰尘用滚刷扬起后不做进一步处理^[58], 导致扬起的灰尘有一部分重新落在光伏组件上, 降低了清扫效率。本文采用管道吸尘方式, 将滚刷扬起的灰尘利用风机产生的负压, 通过管道进行运送, 经过滤网将灰尘收集, 其原理就是通过把风机旋转的机械能转变成流体压力, 从而使空气裹挟着灰尘具备持续的流动动力^[59]。在风机选型过程中, 着重依据除尘过程中所需要风量、风压, 还要考虑风机电压、电流等因素, 做到整体协同。在除尘工作中, 管道内气体密度一定, 管道中的固体流量为 Q , 会有一定的压力损失, 随着流量的改变, 压力损失也会随之变化, 变化关系如下:

$$\frac{\text{阻力}_i}{\text{阻力}} = \frac{\text{压力}_i}{\text{压力}} = \left(\frac{Q_i}{Q} \right)^2 \times \frac{\text{气体密度}_i}{\text{气体密度}} \quad (2-13)$$

光伏组件清扫机器人吸尘电机的选型要注重能耗、噪音等问题, 不能一味选择风量大、吸尘效果好的, 应该在电机满足工作条件下, 选择最具性价比的, 在考虑综合下电机选择如图 2-11 所示, 采用铝合金机身, 无刷电机驱动, 工作过程中运行平稳, 噪音小, 凭借较小的机身体积提供较大风量^[60]。

吸尘电机基本参数如表 2-3 所示:

表 2-3 吸尘电机基本参数

类别	参数
尺寸	120×120*38mm
电压	24V
电流	2.0A
功率	48W
转速	6000r/min
风量	442m ³ /h
风压	340Pa
噪音	64dB(A)
重量	400g

最终设计管道吸尘结构三维图如图 2-10 所示:

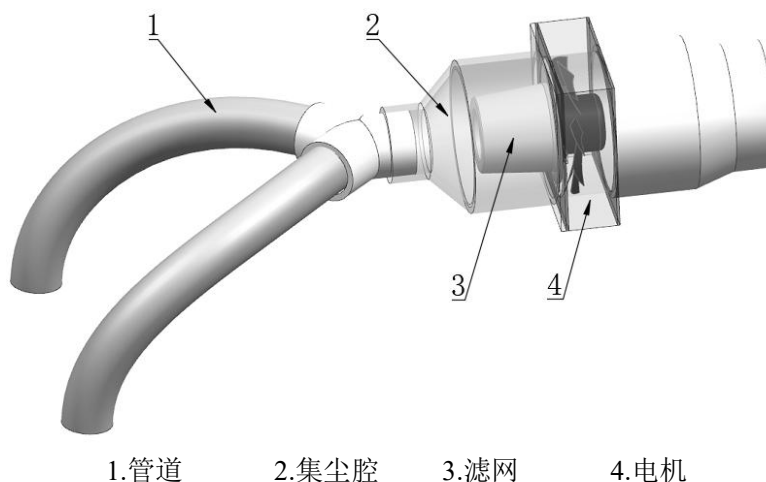
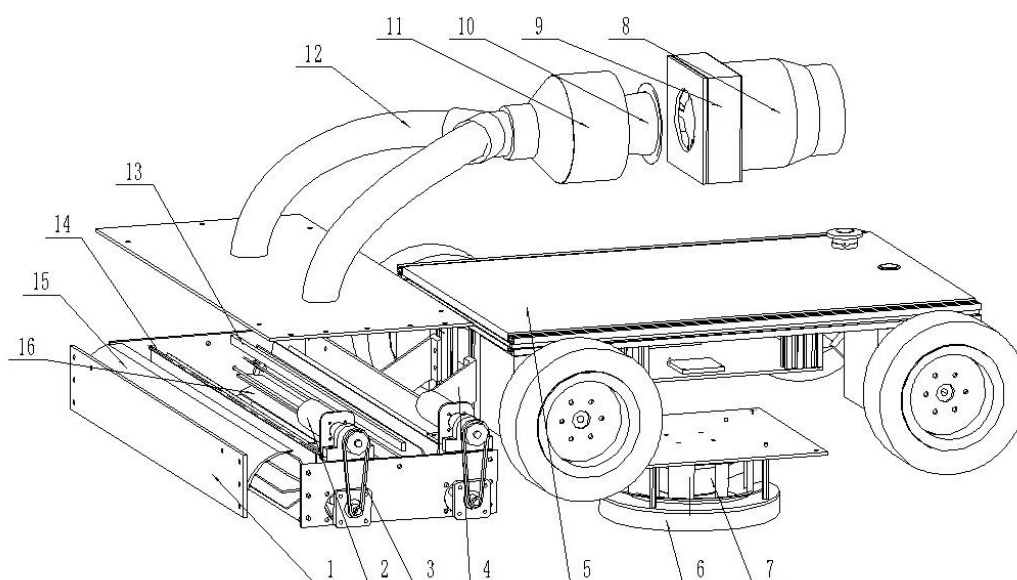


图 2-10 管道吸尘结构

3. 清扫机器人总体结构设计

光伏清扫机器人总体结构模型如图 2-11 所示，由移动底盘、清扫机构、负压吸附和制动机构五部分组成。其中移动底盘采用四驱结构，能实现原地转向和调速。对于变斜面光伏组件采用负压吸附装置，考虑到移动底盘在光伏面板上移动，在电机断电后移动底盘，仍然会依靠惯性向前或向后方行驶一段距离，为保证在光伏面板上清扫的可靠性，光伏清扫机器人在四个轮子处，均加装了电磁制动器，当电机断电，电磁制动器收到信号后会，在几十毫秒内工作并使移动底盘完全停止移动。



1. 外罩 2. 电机 3. 同步带 4. 连接支架 5. 景深摄像头 6. 激光雷达 7. 小车 8. 吸尘机 9. 吸尘管道
10. 电磁制动器 11. 除尘丝 12. 滚刷

图 2-11 清扫机器人总体结构模型

2.4 清扫机器人安全制动分析

清扫机器人工作时需要行走在具有一定高度的光伏组件上，通过对清扫机器人的操控，实现对光伏组件无死角清扫。在清扫过程中，清扫机器人行驶在光伏组件中央位置时无风险，但在光伏组件边界区域工作时，可能会由于轨迹规划问题，越过边界，导致清扫机器人损坏。由于当前可再生能源对人类发展起到至关重要的作用，光伏发电对于太阳能的利用率也使得人们格外关注，而可变斜面光伏组件能跟随太阳的移动调节角度，能最大限度提高太阳能的利用率^[6]。清扫机器人在清扫变斜面的光伏组件时，可能面临摩擦力不够造成的滑落问题，这些问题都需要进行研究分析。

制动器基本参数如表 2-4 所示。

表 2-4 制动器基本参数

类别	参数
电压	24V
功率	11W
转速	6000r/min
额定扭矩	5N.m

制动器实物图如图 2-12 所示：



图 2-12 制动器实物图

传统清扫机器人没有单独的制动系统，其减速方式为对电机进行断电，依靠车轮对地的摩擦，在车的惯性中减速。该种减速方式，制动距离长可根据移动底盘计算其转动惯量 J 如下：

$$J = (m_1 + Km_2)a^2 + (1-K)m_2b^2 \quad (2-14)$$

其中, m_1 、 m_2 表示底盘前、后轴上的轴载质量, kg;

a 、 b 表示底盘质心至前、后轴距离, m;

K 表示经验系数, 取 0.35。

变斜面光伏组件清扫机器人制动设计, 设计目标为工作条件下制动距离小于 1m, 减速度大于 2m/s^2 , 制动效能恒定性大于 60%, 制动方向稳定性小于 0.1m。轮组驱动采用功率为 35W 直流电机, 整车重量为 12kg, 考虑工作条件, 设置移动底盘最高速度为 2.2m/s , 行驶地面材质为环氧地坪, 移动底盘行驶的运动特性如图 2-15 (a) 所示。分析移动底盘运动结果, 速度采集的时间间隔为 0.05s, 移动底盘在一次启动, 到最后完全停止的惯性减速曲线。移动底盘在 1.7s 内达到最大速度, 由最大速度减速到静止的时间为 2.4s。在移动底盘前进的 5.5m 路程中减速的距离为 1.9m, 占总距离的 35.5%, 如若将其放置在光伏面板上进行工作, 移动底盘较长的减速距离会给行驶安全造成一定危害。

衔铁与摩擦片摩擦产生与电机转动方向相反的转矩为制动转矩, 制动转矩是衡量电磁制动器制动效果的一个重要参数^[62], 其计算方法为:

$$T_f = \int_{R_{1u}}^{R_2} \mu f \times 2\pi r dr + \int_{R_{1d}}^{R_2} \mu f \times 2\pi r dr \quad (2-15)$$

其中, μ 表示摩擦片与衔铁、盖板之间的摩擦系数;

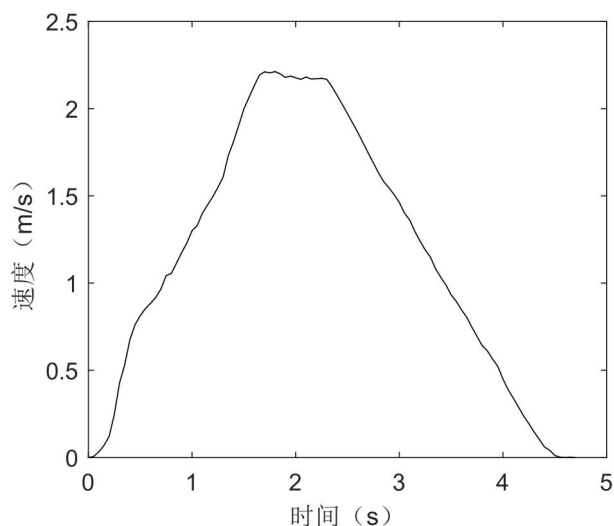
f 表示弹簧片弹力, N;

R_{1u} 表示盖板内径, m;

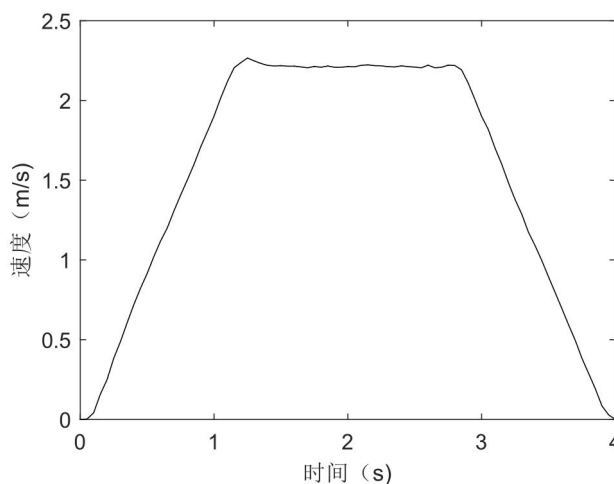
R_2 表示摩擦片外径, m;

R_{1d} 表示衔铁内径, m。

由公式 2-14 可以得出, 当加工条件一定, 摩擦系数确定, 产品尺寸不变的条件下, 制动转矩取决于弹簧片的弹力。为观察电磁制动器的制动效果, 将移动底盘最高速度设置为 2.2m/s , 行驶地面材质为环氧地坪, 设置电磁制动器在移动底盘最高速度左右工作, 采集移动底盘里程计数据, 制成移动底盘制动曲线如图 2-13(b)所示, 电磁制动器在移动底盘行驶速度为 2.2m/s 时开始工作, 当其工作后移动底盘速度急速下降, 使其电机失能后所行驶的距离大大缩短, 和图 2-13(a)对比后, 得出微型智能车即使重量和体积较小, 安装制动保护也能提供较好的制动效果, 并且能对在一定危险环境中工作的移动底盘提供安全保护。



(a) 惯性减速曲线



(b) 制动曲线

图 2-13 移动底盘速度与时间关系

根据实验可得出结论，微型智能车即使重量和体积较小，安装制动保护也能提供较好的制动效果，并且能对在一定危险环境中工作的移动底盘提供安全保护。

2.5 清扫机器人负压吸附分析

对于光伏组件清扫机器人用于变斜面场景上，能够持续稳定的在不同倾角光伏组件上移动，是进行清扫工作的前提。负压装置结构设计的好坏直接决定清扫机器人清扫工作的稳定性，而负压发生装置起到至关重要的作用。本文负压装置采用离心风机作为动力^[63]，离心风机是一种常见的风动设备，广泛应用于工业设备、集成电路、建筑和其他领域，用于排除和循环空气，其主要优点如下：

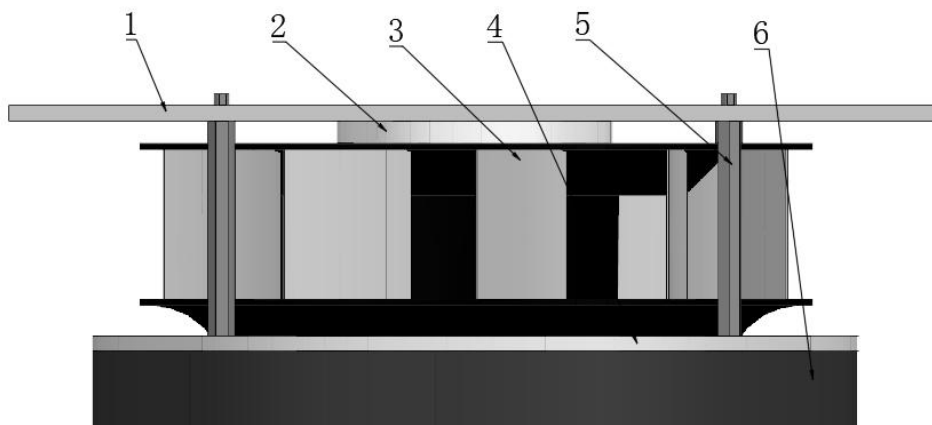
(1) 高效能：离心风机具有高效能的特点，能提供较大的风量和负压，能够满足工业生产和通风的需求。

(2) 可调节性：控制灵活，可通过调节叶轮转速和调整离心风机进出风口的开口面积调整风机的风量和负压大小，以满足不同的工作场景。

(3) 运行稳定：离心风机采用无刷电机直接驱动或者皮带传动，运行平稳、噪音较低，能够显著减少震动和工作时机械故障的风险。

(4) 结构紧凑：离心风机的构成简单，内部结构设计紧凑，对于在清扫机器人上应用占用空间小。

选用离心风机进行设计，负压装置结构如图 2-14 所示，



1.上固定板 2.电机 3.叶轮 4.下固定板 5.六角铜柱 6.高密海绵

图 2-14 负压装置结构图

离心风机基本参数如表 2-5 所示：

表 2-5 离心风机基本参数

类别	参数
额定电压	24V
额定功率	44W
转速	3100r/min
重量	600g

光伏组件清扫机器人吸附装置的工作原理是将动能转换为压力，电机带动叶轮高速旋转，将气体加速，然后再减速，改变气体的流向，使动能转换为负压。在本文中使用的离心风机为单级离心风机，空气从高密海绵下方轴向进入叶轮，流过叶轮后改变成径向方向。空气在流动过程中改变了方向，并且在其流动过程中横截面积增大，使空气流速变慢，这种减速作用将动能转换为压力能。

根据清扫机器人整体重量，橡胶轮胎与光伏板摩擦力大小，可计算出清洁机器人吸附装置所需压力大小。对清扫机器人进行受力分析可得图 2-15，

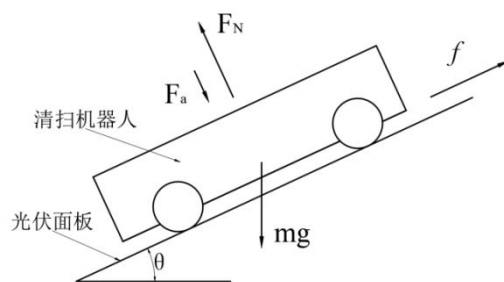


图 2-15 清扫机器人受力

通过对图 2-15 分析, 利用公式 2-16 进行计算可得到清扫机器人负压装置在倾斜光伏组件上应提供的负压大小。

$$\begin{aligned}
 F_a &= \frac{mg}{\mu} (\sin\theta - \mu\cos\theta + k) \\
 &= \frac{mg}{\mu} \left[\sqrt{1+\mu^2} \sin(\theta - \arctan\mu) + k \right] \quad (2-16)
 \end{aligned}$$

其中, F_a 表示清扫机器人的吸附力, N;

m 表示清扫机器人的质量, kg;

μ 表示清扫机器人与光伏组件的摩擦系数;

θ 表示光伏组件倾斜角度;

k 为清扫机器人加速度 a 与重力加速度 g 的比值。

空气在负压装置内的流动主要在高密海绵和光伏组件表面之间的缝隙中, 以及负压装置内部。在研究负压装置内部流场时, 一般忽略空气阻力, 认为叶轮所提供的负压就是负压腔内的负压, 故只需研究高密海绵和光伏组件表面缝隙之间的空气流动。在分析高密海绵和光伏组件表面缝隙之间的空气流动时, 要先分析空气作为流体的流动状态, 流体的流动状态分为层流和湍流^[64]。流体流动时, 如果流体质点的轨迹是有规则的光滑曲线, 则为层流, 而没有这种流动性质的叫做湍流。层流和湍流的判断方式是通过对比雷诺数 Re 的大小^[65], 当 $Re < 2000$ 时, 流体做层流运动, 当 $2000 < Re < 4000$ 时, 流体由层流向湍流过渡, 当 $Re > 4000$ 时, 流体做湍流运动。

通过公式 2-17 来计算雷诺数 Re ,

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2-17)$$

其中, v 为流体的流速, m/s;

ρ 为流体的密度, kg/m³;

μ 为黏性系数;

d 为特征长度, 例如流体流过圆形管道, 则 d 为管道的当量直径。

同理，对于非标准结构的特征长度，可根据公式 2-18 计算^[66]，

$$d = 4 \frac{A}{S} \quad (2-18)$$

其中，A 为流体流过截面的面积， m^2 ；

S 为截面面积内周长和外周长之和，m。

本文清扫机器人的负压装置，采用圆形负压腔，负压腔结构如图 2-16 所示，

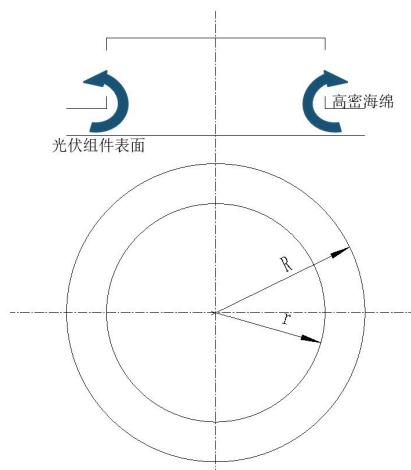


图 2-16 负压腔结构示意图

由图 2-16 可知，负压腔的特征长度 d 为：

$$d = 4 \frac{A}{S} = 4 \frac{\pi R^2 - \pi r^2}{2\pi R + 2\pi r} = 2(R - r) \leq 0.1m \quad (2-19)$$

高密海绵和光伏组件表面缝隙之间的流速较低，取 0.1m/s，由公式 2-17 可得 $Re=389 < 2000$ ，所以高密海绵和光伏组件表面缝隙之间的流动为层流。

则根据纳维-斯托克斯方程（N-S 方程）可得：

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho f - \nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (2-20)$$

其中， ρ 为空气密度，在常温条件下为 $1.205kg/m^3$ ；

u 为流体流速，在坐标轴上的分量分别为 u_x 、 u_y 和 u_z ；

∇ 为梯度符号；

p 为高密海绵与光伏组件表面之间的压强，Pa；

μ 为空气的动力粘度，在常温条件下为 $1.827 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ ；

f 为单位质量力，在坐标轴上的分量分别为 f_x 、 f_y 和 f_z 。

选择 x 轴方向为空气运动方向，则 u_x 不为 0，且 $\partial u / \partial x = 0$ ， u_y 和 u_z 都等于 0，y 和 z 方向上的纳维-斯托克斯方程为：

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0, \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2-21)$$

由公式 2-19 可得，压强与 y 、 z 无关， $p=p(x)$ 。

设定高密海绵和光伏组件表面缝隙处的空气不能压缩，可得：

$$\nabla u = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2-22)$$

$$f_x = f_y = f_z = 0 \quad (2-23)$$

将方程 2-21、2-22 和 2-23 带入 2-20 中，可得：

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (2-24)$$

对公式 2-24 二次积分可得结果如下：

$$u = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \left(\frac{z^2}{2} + Cz + D \right) \quad (2-25)$$

其中， C 、 D 为积分常数，积分的边界条件为：

$$\begin{cases} z = 0, u = 0 \\ z = \delta, u = 0 \end{cases} \quad (2-26)$$

将 2-26 带入方程 2-25，可得：

$$u = \frac{1}{2\mu} z(z - \delta) \frac{dp}{dx} \quad (2-27)$$

则通过高密海绵和光伏组件之间缝隙进入负压装置内部的空气流量 q 为：

$$q = 8 \int_0^\delta u R dz = \frac{2\delta^2 R (p_0 - p_1)}{3a} \quad (2-28)$$

其中， p_0 为标准大气压；

p_1 为负压装置内部压强，Pa。

缝隙内部压强^[67]分布如图 2-17 所示，

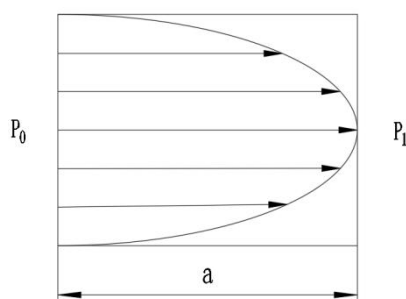


图 2-17 缝隙压强分布

由图 2-17 所示，负压装置外部压强为 P_0 ，而装置内部的压强为 P_1 ，产生了 $\Delta p = p_0 - p_1$ 的压差，则缝隙处的合力 F 为：

$$F = \frac{\pi(p_0 - p_1)}{2} \cdot (R^2 - r^2) \quad (2-29)$$

负压装置内部压强 F_p 为:

$$F_p = \pi r^2 (p_0 - p_1) \quad (2-30)$$

通过仿真软件对负压装置进行流体分析如图 2-18 所示:

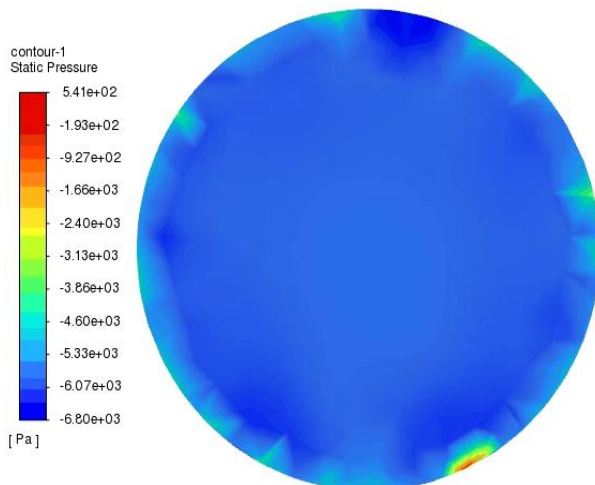


图 2-18 负压腔内部仿真实验

根据图2-18可得,负压装置内部负压分布均匀,可计算出负压装置能提供 167N 负压,而清扫机器人在 30° 斜面上只需要 119N 的负压,工作的最大角度能提供足够的负压力。

2.6 本章小结

本章内容主要是对清扫机器人移动底盘进行分析,并且设计除尘机构各结构参数。通过对比各移动地盘优缺点,选择了四驱运动结构,同时利用逆运动学矩阵,解析整体运动和各轮转速之间的关系。选用双滚刷加除尘丝的扬尘机构设计,利用无水清扫,高效环保。设计了管道吸尘机构,将滚刷扬尘机构扬起的灰尘进行处理,过滤掉其中的灰尘,使清扫过程无二次污染问题。针对清扫过程中涉及的边界安全问题,设计安全制动装置,防止光伏组件清扫机器人在工作时发生坠落危险。负压吸附装置的设计为变斜面光伏组件除尘提供了额外的负压力,通过流体仿真,清扫机器人能够在倾斜度为 30° 的斜面上正常工作。

第3章 清扫机器人控制系统设计

3.1 行走模块系统设计

清扫机器人在光伏组件上的移动依赖于行走模块，行走模块包括移动底盘、负压吸附、制动和边界检测等，其部分连线图如图 3-1 所示。

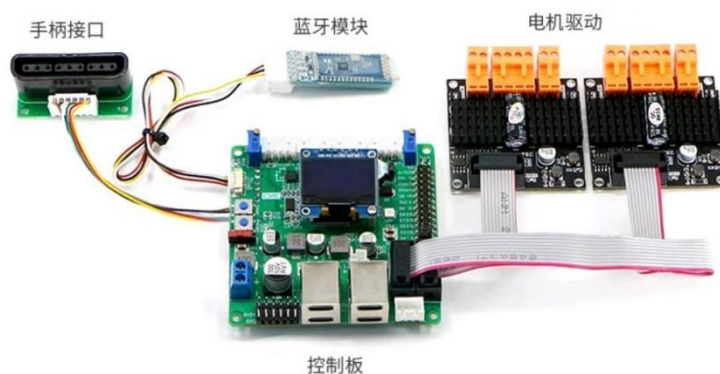


图 3-1 实物连线图

由蓝牙、手柄或者上位机控制控制板，驱动移动底盘，负压装置根据陀螺仪测量角度调节负压大小。当边界检测的超声波装置检测到边界时，通电使制动器工作。动作流程图如图 3-2 所示。

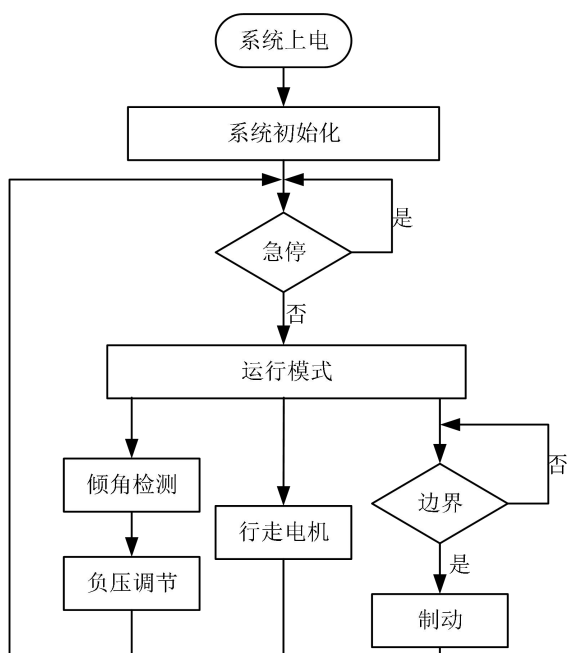


图 3-2 行走模块动作流程图

行走模块动作流程图执行过程为：清扫机器人行走模块控制板系统上电；执行系统初始化程序，对外设和相应功能进行初始化；判断是否有中断急停任务；检测运行模式；根据光伏组件角度调节负压力大小，控制行走模块进行移动，当处于边界时进行制动。

为了便于了解移动底盘的运行情况，使用 OLED 屏幕显示当前传感器和执行部件的信息，显示情况如表 3-1 所示。

表 3-1 行走模块 OLED 显示

GZ	30	第一行：倾斜角度
+0	+0	第二行：行走模块速度目标值和测量值
+0	+0	第三行：负压转速目标值和测量值
P	24V	第四行：制动状态和电池电压

3.2 清扫模块系统设计

清扫模块作为清扫机器人的工作模块为便于控制板上资源的分配和控制其单独使用一个控制器，清扫模块包括滚刷电机和吸尘电机，其控制流程图如图 3-3 所示。

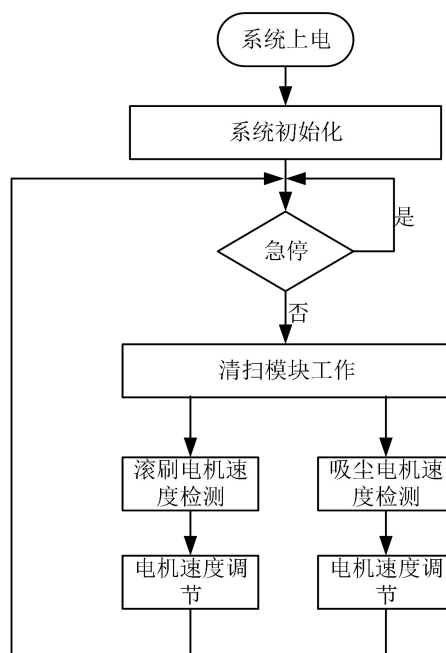


图 3-3 清扫模块动作流程图

清扫模块动作流程图执行过程为：清扫机器人清扫模块控制板系统上电；执行系统初始化程序，对外设和相应功能进行初始化；判断是否有中断急停任务；清扫模块工作时编码器检测电机速度，与目标速度进行比较，利用 PID 控制滚刷

和吸尘电机转速。

为了便于观察清扫模块运转情况，同样使用 OLED 显示相关数据，显示情况如表 3-2 所示。

表 3-2 清扫模块 OLED 显示

MOTOR	ON	第一行：电机使能
+0	+0	第二行：1 号滚刷电机速度目标值和测量值
+0	+0	第三行：2 号滚刷电机速度目标值和测量值
+0	+0	第四行：吸尘电机速度目标值和测量值

3.3 控制方案设计

光伏组件清扫机器人采用四轮驱动方案，能实现清扫机器人在光伏组件上稳定工作的需要，滚刷扬尘机构由两个电机带动，结合吸尘电机，对光伏组件表面进行清扫，当清扫机器人工作在倾斜表面上时，离心风机为负压机构提供负压，保证其在倾斜表面稳定工作，清扫机器人因操作失误越过边界，会触发超声波传感器，启动制动系统，紧急停车。同时其软硬件系统还要实现对电机速度和其他传感器的读取工作，并将相应信息输出到 OLD 显示屏上，根据这些信息调整清扫机器人工作参数，故清扫机器人软硬件系统应该满足以下几点要求。

（1）实时接收终端指令并实现动作

清扫机器人通过蓝牙和终端连接，利用十六进制传输命令，控制器接收命令后进行解析，将命令转换为各执行部件的相应动作，接收到控制移动底盘的命令，控制器还需将接受到的速度转换为各电机的转速。

（2）检测清扫机器人实时状态

清扫机器人通过各类传感器读取自身的各类信息，包括各电机的实时转速，清扫机器人在变斜面光伏组件上的清扫角度，当前电池的剩余电量等，为清扫机器人解算和操作人员操控提供必要信息。

（3）具有人机交互界面

当前设备发展的趋势是操作简单化，信息明确化，一个简单的人机交互界面就能满足这两点，操作人员能够根据显示界面直接读取清扫机器人当前的状态信息，并且根据这些信息确定清扫机器人的运行情况，预测续航时间，以及当前工况是否能正常工作。

（4）能进行反馈控制

清扫机器人需要具备一定的信息感知以及反馈控制的能力，其自身需要安装

多种传感器，使其能够根据当前工作情况进行一定的调整，防止电机实际转速和目标转速不同，并且接收超声波传感器信息，实现清扫机器人的安全制动，防止其从光伏组件上坠落。

软硬件系统结构如图 3-4 所示：

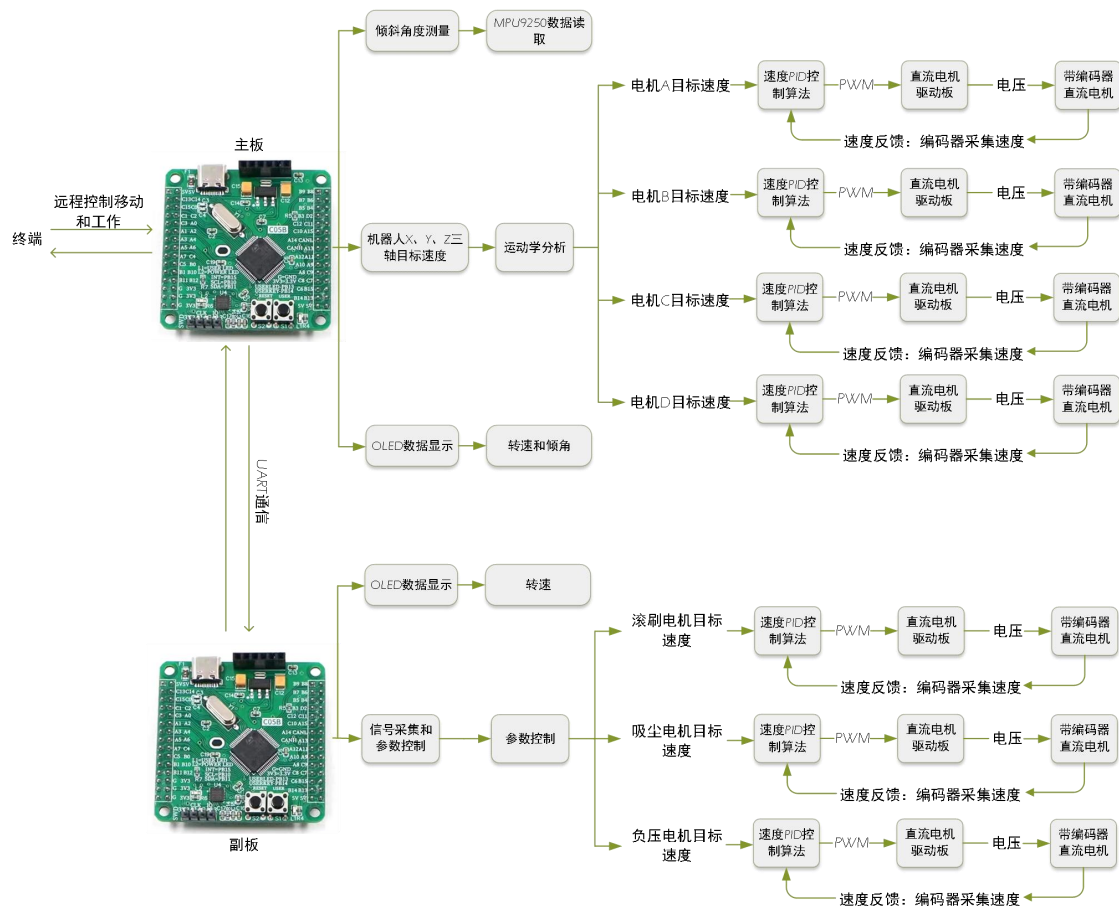


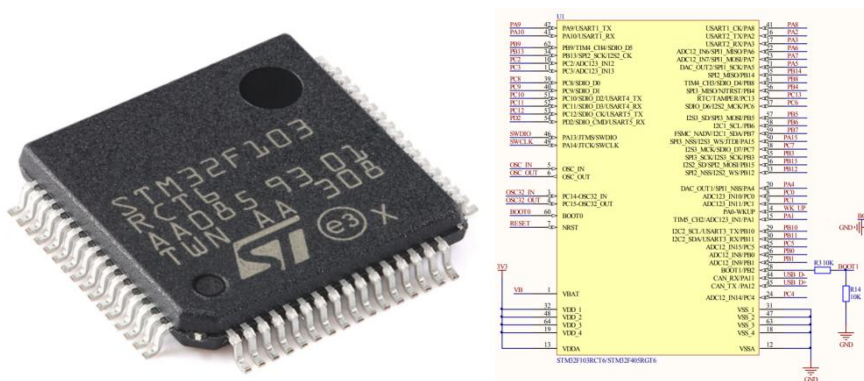
图 3-4 软硬件系统结构图

3.4 硬件系统设计

清扫机器人硬件系统设计包括控制器选型，电机驱动器选型，以及各传感器的选择，通过线路将硬件系统的各部分利用各种传输协议进行连接，实现清扫机器人硬件系统采集、传输、处理和执行的整个过程。

控制器是接收命令、处理信号和输出参数的核心，为了达到高效低成本的目的，选择 STMicroelectronics 公司的 STM32F103RCT6 型处理器，处理器性能出色、价格低廉、开发方式友好并且能够运行实时操作系统，对于提高运行速度有明显帮助。该处理器采用 32 位 ARM Cortex-M3 内核，主频高达 72Mhz，具有 64 个引脚，能够满足驱动电机和信号采集的需要，处理器实物图及引脚图如图 3-5（a）、

3-5 (b) 所示。



(a) STM32F103RCT6 实物图

(b) STM32F103RCT6 引脚图

图 3-5 STM32F103RCT6 示意图

电机驱动器的选择需要满足电机正常工作以及最大负载时的各项参数，电机调速方案如图 3-6 所示，

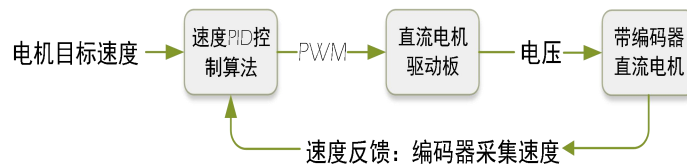


图 3-6 电机调速示意图

为了实现清扫机器人的各项功能，电机驱动器需要具备以下性能：

- (1) 清扫机器人车载电池额定电压为 24V，正常工作时的电压在 20-25.8V，电机额定电压也为 24V，所以要求电机驱动器能在此电压下控制电机正常工作。
- (2) 电机驱动器要能和控制传输信号，由于电机编码器的信号是由控制器直接读取并且转换，因此电机驱动器只需要具备接收控制器命令的能力，并处理相关命令。

光伏组件清扫机器人共有六个电机需要电机驱动器，移动底盘共有四个电机，滚刷扬尘机构安装有两个电机，控制器需要同时控制这六个电机，负压和吸尘电机自带驱动器。

电机驱动器控制方案一般有两种，一种为单路驱动^[68,69]，一种为多路驱动^[70]。单路驱动时，一个直流电机驱动 IC 只控制一个电机，该种驱动方式操作简单，逻辑清晰，能有效避免各电机信号之间的干扰，但单路控制驱动板多，占用空间大，成本相对较高。多路驱动时，一个直流电机驱动 IC 能控制多个直流电机，该驱动方式安装维护简单，占用空间少，由于多个电机只需要一个驱动 IC，故成本较低，但高集成度的电路，使其运行的稳定性较单路驱动较差

综合考虑光伏组件清扫机器人的稳定性、操控性能、体积以及成本，选用控制方案为一个直流电机驱动 IC 控制两个电机，以平衡各种优缺点，直流电机驱动

板原理图如图 3-7 所示。

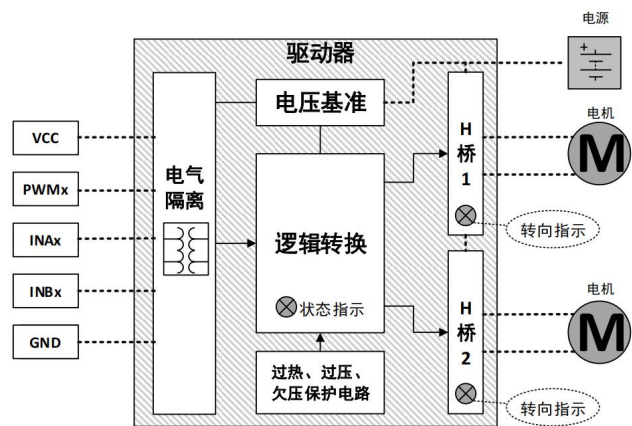


图 3-7 直流电机驱动板原理图

采用双路 H 桥驱动，驱动 IC 为 50P06-15L，电机驱动器参数如表 3-3 所示。

表 3-3 工作参数

参数项	条件	最小值	典型值	最大值	单位
功率电源电压		6.5		28	V
过压保护值			28.5		
欠压保护值			6.3		
单通道持续输出电流	VP=24V 阻性负载			12	A
单通道峰值输出电流	VP=24V t=100ms			70	A
PWM 输入频率			18	60	kHz
PWM 最小脉宽	正、负向脉冲		2		uS

变斜面光伏组件清扫机器人需要在不同倾角的光伏组件上进行清扫作业，清扫机器人需要具备对角度的感知能力。

选用六轴传感器^[71]检测清扫机器人工作姿态，不断调整负压机构的负压力大小六轴传感器选择应用广泛和可靠性较好的 MPU6050，它集成了 3 轴 MEMS 陀螺仪，3 轴 MEMS 加速度计。MPU6050 使用了三个 16 位的 A/D 转换器，将其测量陀螺仪和加速度计模拟量转化为可输出的数字量。为了满足不同用户的需求，可根据物体运动速度的快慢，精确调整传感器的测量范围。陀螺仪的测量范围为±250°/s、±500°/s、±1000°/s 和±2000°/s，加速度计的测量范围为±2g、±4g、±8g 和±16g^[72]。在当前工作环境下陀螺仪选择 2000°/s，加速度计选择 16g。本文中虽然设定了加速度计量程但并未使用，只使用了陀螺仪进行角度测量。如图 3-8(a)、

3-8 (b) 为陀螺仪模型和 MPU6050 实物图。

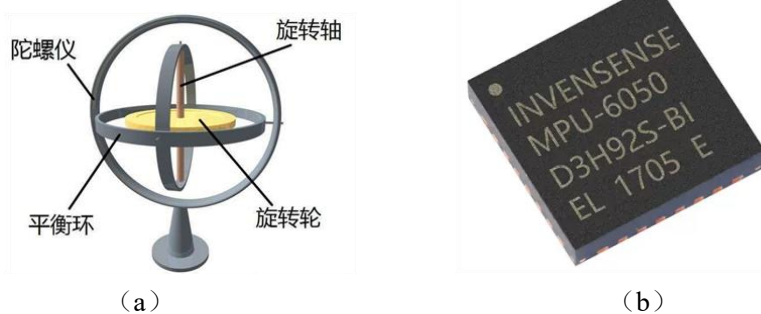


图 3-8 陀螺仪模型和 MPU6050 实物图

3.5 软件系统设计

变斜面光伏组件清扫机器人软件系统为各硬件之间通信协议，以及对相关采集数据的转换。清扫机器人在控制器上搭建实时操作系统，将各工作部件创建为不同任务，利用实时操作系统的特性，对清扫机器人进行实时控制。

(1) 无线通信

终端通过无线通信与清扫机器人连接，利用蓝牙模块将串口通信进行转换，并将信息进行收发，串口通信分为同步和异步通信，同步通信需要时钟信号来同步传输，异步通信则不需要。异步串口通信只需要两根数据线，一根 TXD 用于发送，一根 RXD 用于接收，其之间的传输依赖于发送设备和接收设备之间预定义的配置。对于发送设备和接收设备来说，两者的串行通信配置应该设置为完全相同，如表 3-2 为数据位说明。

表 3-4 数据位说明

起始位	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	奇偶校验位	停止位
-----	----	----	----	----	----	----	----	----	-------	-----

起始位：表示数据传输的开始，电平逻辑为“0”。

数据位：可能值有 5、6、7、8、9，表示传输这几个 bit 位数据。一般取值为 8，因为一个 ASCII 字符值为 8 位。

奇偶校验位：用于接收方对接收到的数据进行校验，校验“1”的位数为偶数（偶校验）或奇数（奇校验），以此来校验数据传送的正确性，使用时不需要此位也可以。

停止位：表示一帧数据的结束。电平逻辑为“1”。

(2) MPU6050 数据读取

清扫机器人控制器与六轴传感器通过 I2C 协议通信，六轴传感器原理图如图 3-9 所示。

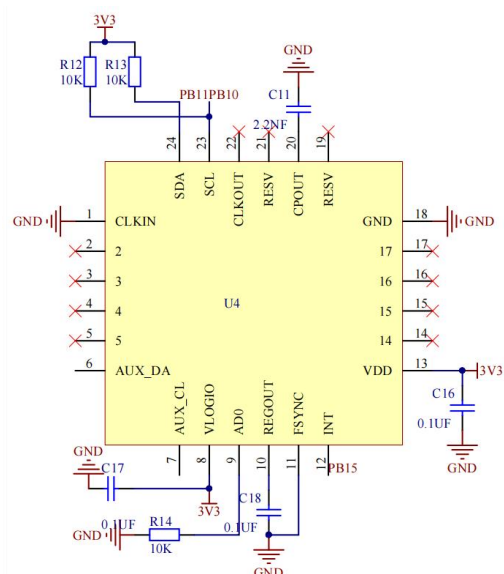


图 3-9 MPU6050 原理图

如图 3-9，六轴传感器通过 SDA 线传输串行数据，SCL 线产生同步时钟脉冲，控制器通过发送传感器地址来建立连接。利用陀螺仪测量轴转动的角速度，再对角速度积分，即可得到相应轴的旋转角度。

传感器中陀螺仪在第 n 个时刻的姿态角度为 r 、 p 、 y ，即绕 x 轴旋转 r 度，绕 y 轴旋转 p 度，绕 z 轴旋转 y 度。当计算 $(n+1)$ 时刻时，其姿态角为 $r+\Delta r$ 、 $p+\Delta p$ 、 $y+\Delta y$ 。角度的变化量可以通过角速度与时间积分，如公式 3-1：

$$\begin{cases} \Delta r = \frac{dr}{dt} \Delta t \\ \Delta p = \frac{dp}{dt} \Delta t \\ \Delta y = \frac{dy}{dt} \Delta t \end{cases} \quad (3-1)$$

推导角速度还需要用到 3 个坐标变换的旋转矩阵，公式 3-2、3-3 和 3-4 分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴坐标变换：

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & \sin r \\ 0 & -\sin r & \cos r \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} \cos p & 0 & -\sin p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin p & 0 & \cos p \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$M_z = \begin{bmatrix} \cos y & \sin y & 0 \\ -\sin y & \cos y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

根据公式 3-1, g_x 、 g_y 和 g_z 分别代表 x 轴、y 轴和 z 轴角速度, 推导陀螺仪角速度如下:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} &= M_x \cdot M_y \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} + M_x \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{dp}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{dr}{dt} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & \sin r \\ 0 & -\sin r & \cos r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos p & 0 & -\sin p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin p & 0 & \cos p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & \sin r \\ 0 & -\sin r & \cos r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{dp}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{dr}{dt} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin p \\ 0 & \cos r & \cos p \cdot \sin r \\ 0 & -\sin r & \cos p \cdot \cos r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dr}{dt} \\ \frac{dp}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} \quad (3-5) \end{aligned}$$

再将旋转后的状态理解为时刻 n, 则根据 n 时刻读到的陀螺仪数据, 反过来求解角速度数据, 即公式 3-6:

$$\begin{bmatrix} \frac{dr}{dt} \\ \frac{dp}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin p \cdot \sin r}{\cos p} & \frac{\cos r \cdot \sin p}{\cos p} \\ 0 & \cos r & -\sin r \\ 0 & \frac{\sin r}{\cos p} & \frac{\cos r}{\cos p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

根据以上公式, 再利用控制器所读取数据的时钟频率, 可计算出 x 轴角度偏移量, 即光伏组件倾斜角度。

(3) 屏幕信息显示

光伏组件清扫机器人工作过程中需要了解其工作参数, 用来调整清扫机器人的运行状态。本文使用 OLED 屏幕显示, 使用 SPI 总线通信, SPI 是一种高速的, 全双工, 同步的通信总线, 并且在芯片的管脚上只占用四根线。本文使用 0.96 寸

OLED 显示屏，点阵屏像素按 128 列×64 行排列，四线 SPI 工作模式。屏幕如图 3-10 所示：

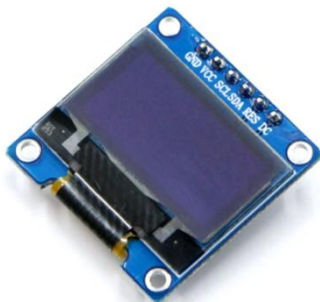


图 3-10 OLED 实物图

模块共有 6 个引脚，分别为：

VCC：电源 3.3V 供电；

GND：地线，须与通信设备共地；

SCL：OLED 从时钟信号；

SDA：数据线，该设备为单工通信，只需从主机接收数据/命令，接 MOSI；

RST：硬复位 OLED；

DC：命令/数据标志，主机通过该信号告知驱动芯片当前发的是数据还是命令（0，写命令；1，写数据）。

控制原理是通过驱动芯片接收控制器发送的数据和指令，指令控制 OLED 刷新率等，数据是 128×64 点阵屏上具体点的亮灭信息。

光伏组件清扫机器人控制系统需要将软硬件结合起来，实现清扫机器人的各项功能。清扫机器人控制流程图如图 3-11 所示：

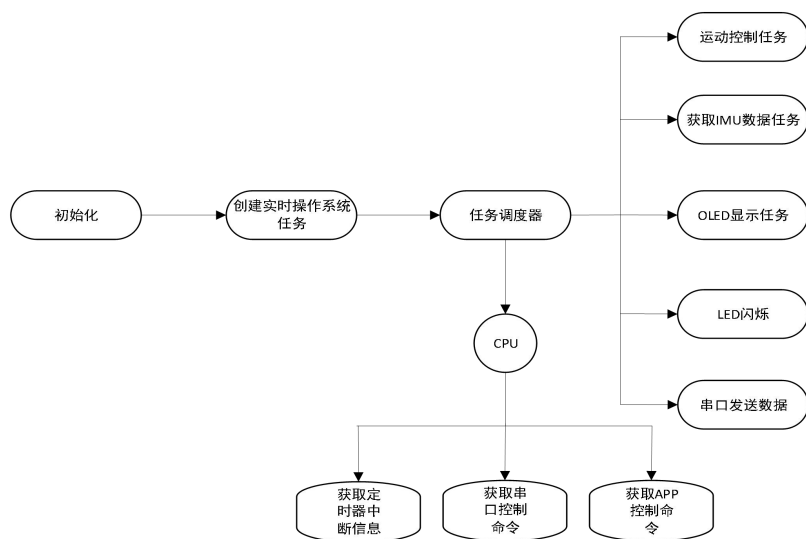


图 3-11 清扫机器人控制流程图

实时操作系统任务调度器根据任务的优先级决定任务的执行顺序，图 3-8 中的任务排序不代表任务优先级，具体任务优先级需要查看程序中优先级的设定。每个任务执行的时间很短，因此几乎等效于所有任务同时执行，期间如果发生中断则去响应中断。

光伏组件清扫机器人利用 STM32F103RCT6 控制器与各传感器通信，为了高效利用控制器资源，各模块通信协议有所不同，具体通信方案如图 3-12 所示，

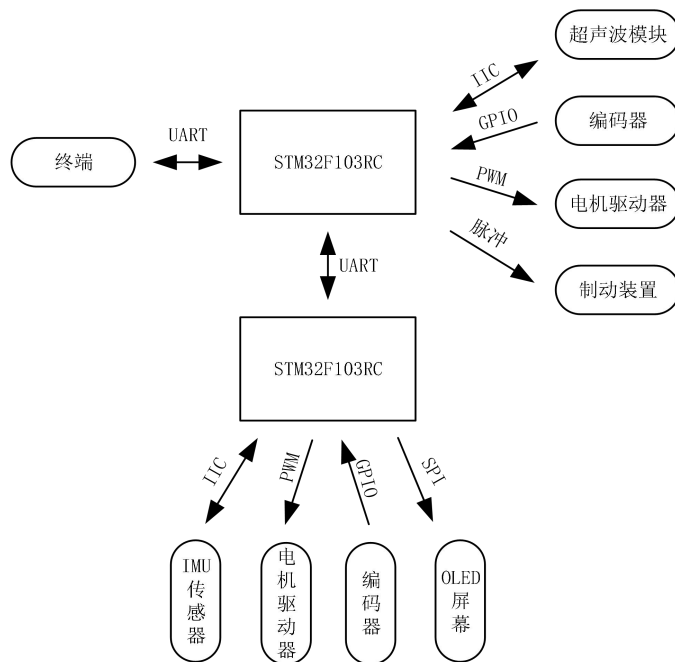


图 3-12 光伏组件清扫机器人通信方案

在图 3-12 光伏组件清扫机器人通信方案中，控制器读取编码器信息得到电机转速，给电机驱动器发送信号控制电机转动，并不是两个单独的进程，而是一个反馈控制的过程，即 PID 控制，由于本文只需要控制电机转速，故选择速度 PID 控制，控制原理见公式 3-7。

$$Pwm += Kp * [e(k) - e(k-1)] + Ki * e(k) + Kd[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3-7)$$

其中， $e(k)$ 表示本次偏差；

$e(k-1)$ 表示上次偏差；

$e(k-2)$ 表示上上次偏差；

Kp 表示比例项参数；

Ki 表示积分项参数；

Kd 表示微分项参数；

Pwm 表示增量输出。

电机速度控制流程图如图 3-13 所示，

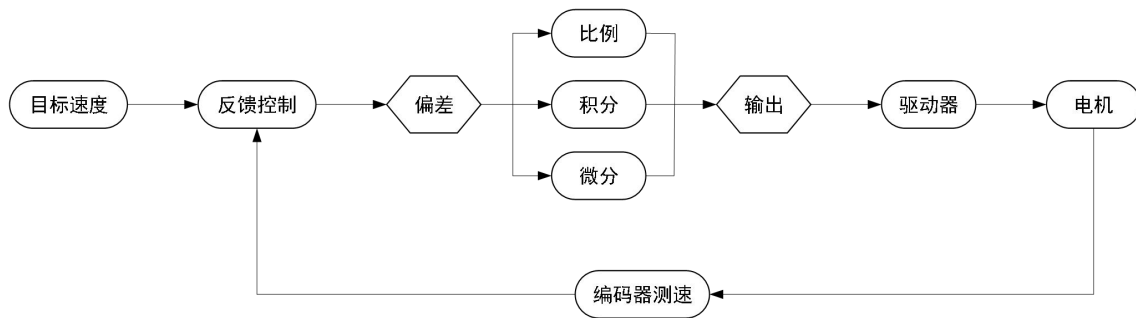


图 3-13 电机速度控制流程图

控制器通过输入信号获取电机目标速度，根据编码器脉冲数量计算测量速度，再比较电机目标值和测量值得出偏差，导入公式 2-20。根据公式 2-20 所计算的 Pwm 输出值控制输出到驱动器的信号，最后驱动器放大控制信号输出给电机，实现电机的闭环控制。

3.6 本章小结

本章内容主要是根据清扫工作需要确定其软硬件系统方案。设计软硬件系统，对清扫机器人进行控制，对控制器、电机驱动器、以及相关传感器进行选型，选型过程中充分考虑硬件的性能以及成本，选择合适的硬件，恰当的搭配方案，使清扫机器人在操作和维护上都更简单化。利用实时操作系统，设计控制方案，充分利用系统的实时性，提高清扫机器人灵敏度。

第4章 清扫机器人除尘特性研究

4.1 流场分析理论

结构设计过程中，需要对设计方案进行仿真分析，评判方案的优缺点，流场分析理论为流场仿真提供理论基础。

类似一般计算，流场分析计算过程中，遵循着最基本的守恒定律，主要有质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。在利用这三大守恒定律进行计算时，一般采用偏微分方程的形式^[73,74]，使用偏微分形式表示流场控制方程有以下三种。

(1) 连续性方程

在进行流场仿真计算时，连续性方程作为质量守恒定律在流体力学中的表达方式。在使用时有限制条件，流场中的介质模型为连续性模型，其速度和密度都是空间坐标上的可微函数。相同时间内从单元体内流出的流体静质量总和与同时时间内该单元体减少的质量相等。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4-1)$$

利用散度公式：

$$\text{div}(\rho \vec{v}) = \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \quad (4-2)$$

可得到公式 4-3，

$$\text{div}(\rho \vec{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4-3)$$

其中， v 为流体流速，m/s；

ρ 为空气密度，kg/m³。

(2) 动量守恒方程

进行流场仿真分析时，还必须遵循牛顿第二定律，因此需要满足流体的动量守恒。指单位体积流体内的动量对时间的变化率等于外界作用在单位体积流体上的各力之和。在直角坐标系可进行如下表示，

在 x 轴方向上：

$$F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4-4)$$

在 y 轴方向上：

$$F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \quad (4-5)$$

在 z 轴方向上:

$$F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4-6)$$

其中, F_x 、 F_y 和 F_z 分别为单位质量在 x、y 和 z 轴方向上的投影;

ρ 为空气密度, kg/m^3 ;

p 为流体动量, $\text{kg}\cdot\text{m/s}$;

μ 为流体动力粘度。

(3) 能量守恒方程

能量守恒的本质是热力学第一定律, 是包含有热交换的流动系统必须满足的基本定律。该定律内容为单位流体的内能增长速率等于进入微元中的净热流量与所有外力对微元做的功。流体的内能和温度之间具有一定的关系, 即 $i = TC_p$, C_p 为比热容, 则变量为温度的能量守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) = \rho(Q + u_i f_i) + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} u_i) \quad (4-7)$$

其中, ρ 为流体密度, kg/m^3 ;

x_i 为流体微元坐标;

u_i 为流体微元速度, m/s ;

p 为压强, Pa ;

Q 为外热能, J ;

H 为总焓, $H = h + \frac{1}{2}u_i^2$;

τ_{ij} 为应力张量, $\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$;

q_i 为热通量向量, $q_i = -\frac{\partial T}{\partial x_i}$ 。

在清扫机器人内部流场中, 气流在刷体内部和吸尘管道内的流动较为复杂, 很多部位存在涡流, 故选择标准 $k - \varepsilon$ 双方程模型, 增加了一个表示湍流动能耗散率 ε 的方程, 忽略气流流动因分子粘性产生的影响, 将流动设为完全湍流。其方程式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_g k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g V k) - \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) &= p - \rho_g \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho_g \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g V \varepsilon) - \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) &= C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho_g \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4-8)$$

其中, k 为湍流动能, J;

ε 为湍流动能耗散率;

σ_k 、 σ_ε 为湍流普朗特常数;

C_1 、 C_2 为修正系数。

4.2 管道吸尘仿真分析

将吸尘管道三维模型导入软件中, 并采用 ICEM 划分其内部流域的网格, 对滚刷扬尘机构进行网格划分, 并利用纵横比作为网格度量标准, 结果如下图所示:

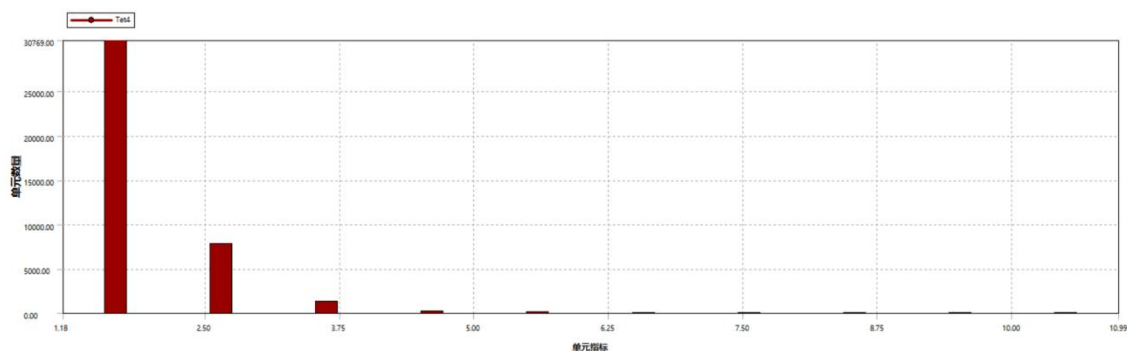
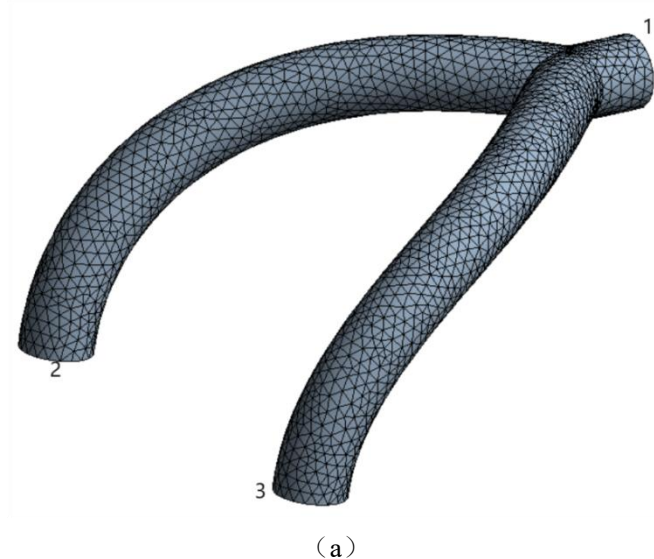


图 4-1 扬尘机构网格模型和网格质量图

由于管道吸尘结构整体分布均匀, 网格划分时进行均匀划分, 增加了管道交

汇处的网格数量和密度，网格划分后纵横比最大为 10.9，最小为 1.2，并且网格绝大多数集中在 1-3，平均纵横比为 1.9，网格质量较优。设定边界条件，根据管道吸尘结构工作时的实际情况进行设定，由于截面 1 连接吸尘机，灰尘排入过滤装置中，故将其作为出口，截面 2 和 3 连接扬尘机构，故将这两个截面作为入口，其余表面设置为壁面。

在 Fluent 中选择压力基求解器，选择稳态模拟，由于在清扫时灰尘颗粒较大，不能忽略重力进行模拟，根据吸尘管道安装姿态设置 z 轴方向的重力加速度为 9.8m/s^2 。选择标准壁面方程，计算模型选择 Realizable k -epsilon 湍流模型，Realizable k -epsilon 湍流模型可以在雷诺应力上保持与真实湍流一致，能够更加准确的模拟平面和圆形射流的扩散速度^[75]。在流场中灰尘颗粒与空气之间的作用力较小，不考虑颗粒相和流体相之间的相互作用。吸尘管道入口处与扬尘机构相连，其内部流场速度未知，但扬尘机构入口与大气连通，设置边界入口条件静压力为 0，边界出口与吸尘机相连，吸尘机最大吸力为 430Pa，设置出口压力。壁面边界条件设置为静止壁面，剪切条件为无滑移，并且为标准粗糙度模型。对模型迭代残差曲线进行分析，设置迭代次数为 500 次，报告间隔为 1 次，对吸尘管道进行流场模拟，如图 4-2 为迭代残差曲线，大概在第 230 次迭代后迭代残差曲线开始收敛。

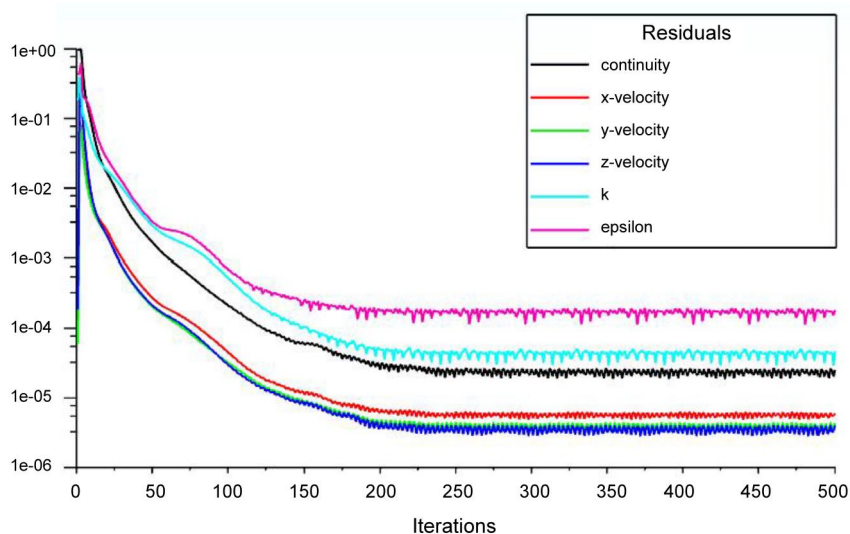
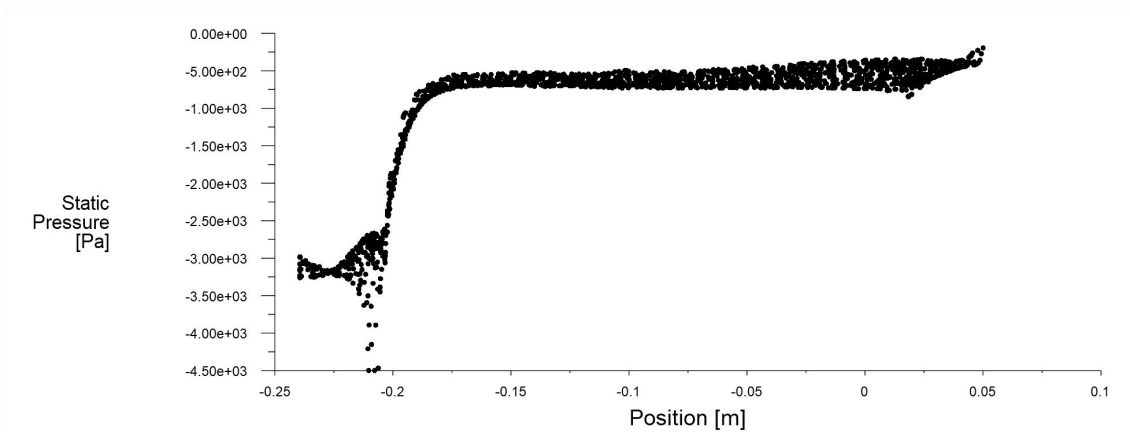
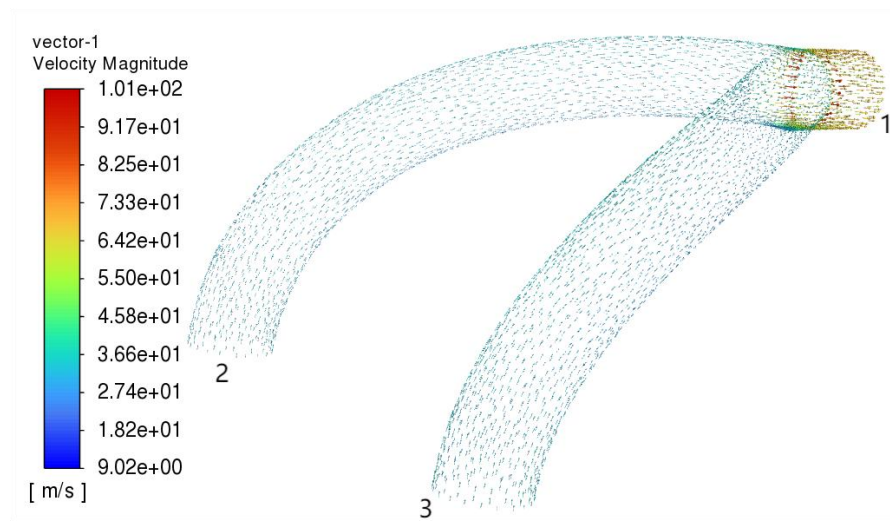


图 4-2 迭代残差曲线

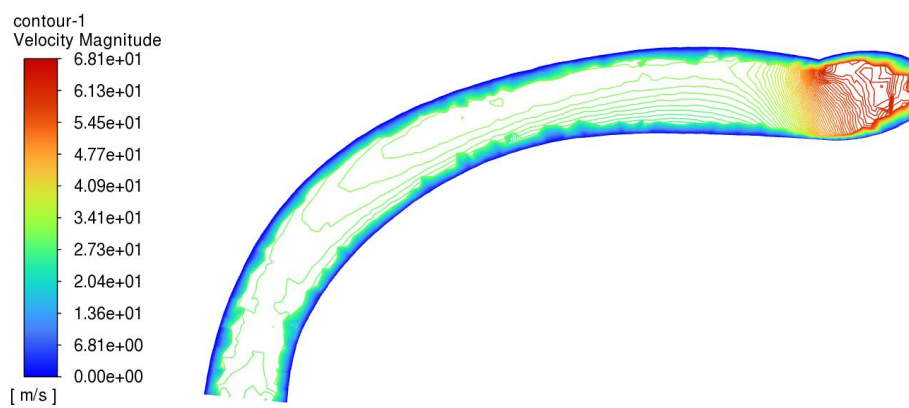
通过图 4-3 可以看出，流体在通过吸尘管道时比较顺畅，在管道交汇之前压力较大，流体流速较小，交汇之后压力骤然变小，流速变大，截面 2 和 3 压力和流速相差不大，交汇之前流速 25m/s ，交汇之后流速为 55m/s 。吸尘管道的压力沿 x 轴方向不断减小，特别在管道交汇之后管道内的压力在静压力图上有较大变化，不过实际相差很小，因此该结构的设计较为合理。



(a) 静压力图



(b) 矢量速度图



(c) 吸尘管道内部云图

图 4-3 吸尘管道流场仿真图

颗粒进入入口到出口，几乎全部能逃逸，总粒子数为 11880，逃逸 11847，未逃逸 33 个，未逃逸的粒子数占总粒子数的 0.28 %，并且输入与输出的质量流率相差 7.93×10^{-7} ，管道的通过率可以达到设计要求。

4.3 扬尘机构仿真分析

滚刷扬尘机构作为除尘效果的关键结构，其流场分析至关重要，通过分析清扫机构工作方式，模拟滚刷和吸尘机工作时其内部流场情况，对除尘机构除尘效果进行分析，并且可以根据除尘的效果对结构进行优化。

采用 ICEM 划分其内部流域的网格，网格模型如图 4-4 所示，

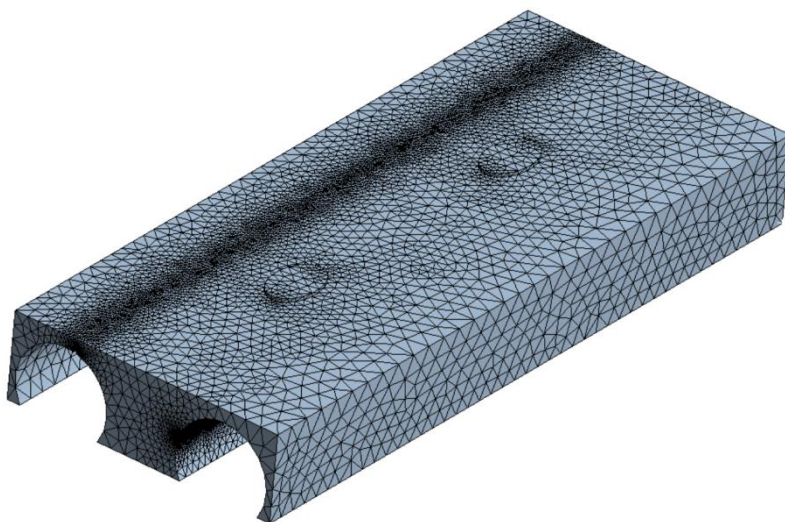


图 4-4 扬尘机构网格模型

图 4-5 为网格单元质量图，网格划分后纵横比最大为 9.8，最小为 1.2，并且网格绝大多数集中在 1-3，平均纵横比为 1.9，网格质量较优。

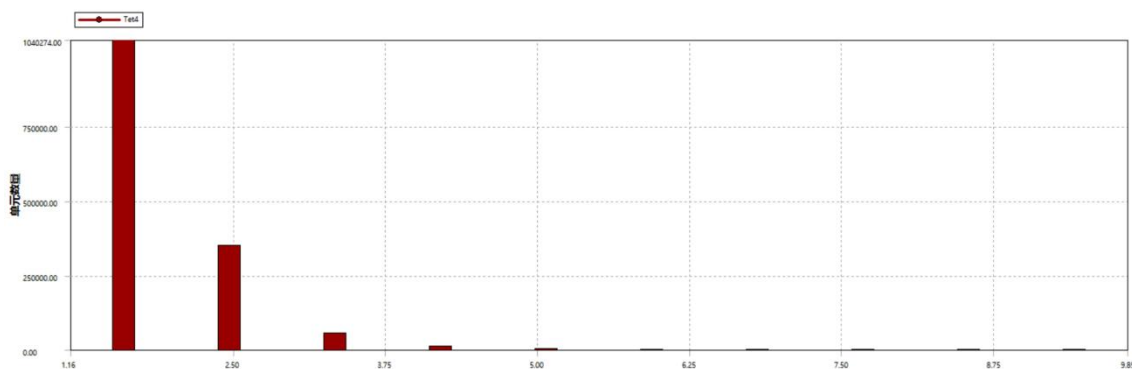


图 4-5 网格质量图

在 Fluent 中选择压力基求解器，设置和上节相同。截面 2 和 3 连接吸尘管道，滚刷为同方向旋转，将截面 6 作为出口，截面 4 和 5 作为入口，将划分网格后的模型导入 Fluent 中。由图 4-6 (a)、(b) 和 (c) 可以看出流场情况，粒子迹线由截面 4 和截面 5 进入，进入清扫机构后由截面 2、3 和截面 6 流出。

根据伯努利方程：

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = c \quad (4-9)$$

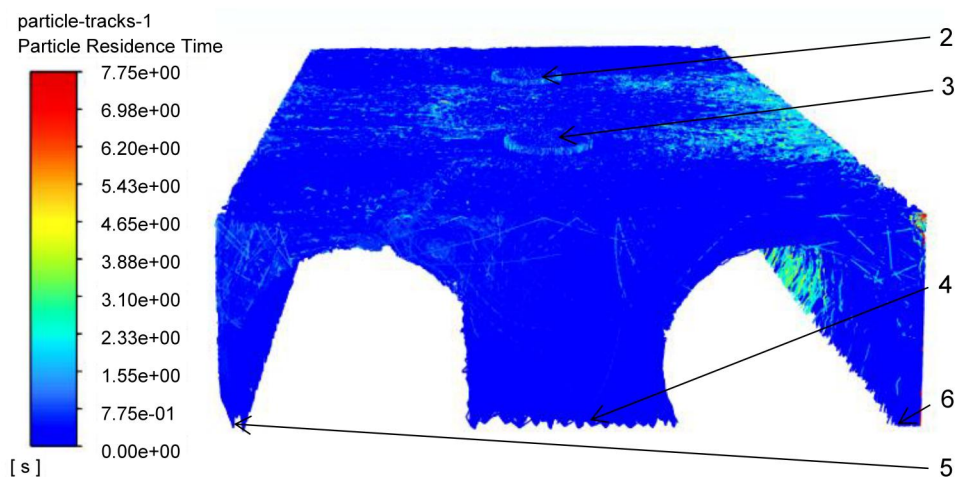
式中, p 为流体压强, Pa; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; v 为线性速度, m/s ; h 为铅锤高度, m ; c 为常量。

再根据流量与速度关系:

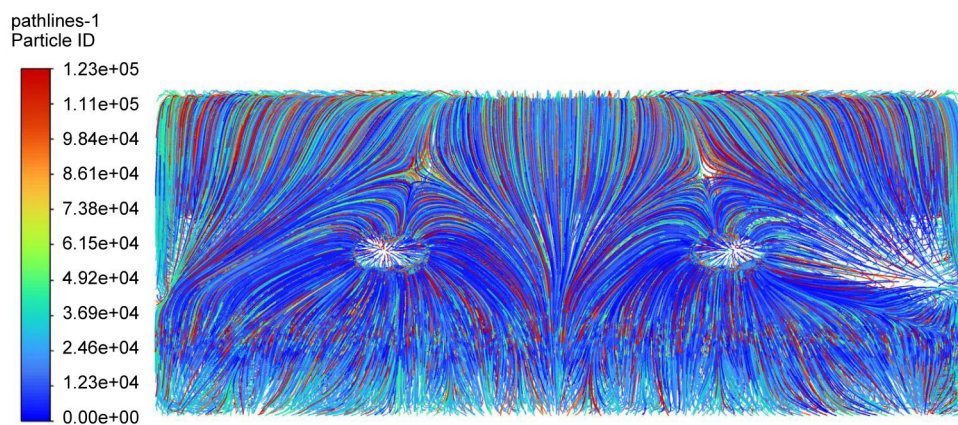
$$q = vs \quad (4-10)$$

式中, q 为流量, m^3/s ; s 为截面积, m^2 。

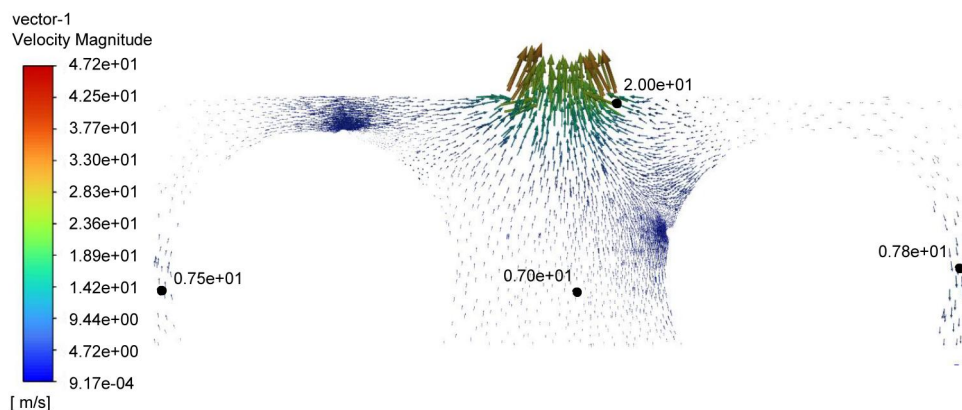
算出清扫机构截面 2 和 3 的压强, 得出图 4-6 (c) 粒子矢量图, 清扫机构截面 4、5 和截面 6 的大部分速度为 7 m/s , 而截面 2 和 3 的速度可达到 20 m/s 。根据通量计算, 入口和出口的质量流率相差 3.36×10^{-6} , 充分验证清扫机构能够达到清扫要求。但根据迹线图粒子轨迹, 粒子通过外罩直角后轨迹发生混乱, 可以看出外罩直角结构对流场内空气和灰尘流动不利。并且截面 6 在光伏面板清扫机工作时也会喷出少量灰尘, 占总灰尘量的 7.1% , 对于清扫效果产生一定影响, 故需要对清扫机构的结构进行设计优化。



(a) 粒子轨迹图



(b) 流场迹线俯视图



(c) 粒子矢量图

图 4-6 清扫机构流场仿真图

4.4 本章小结

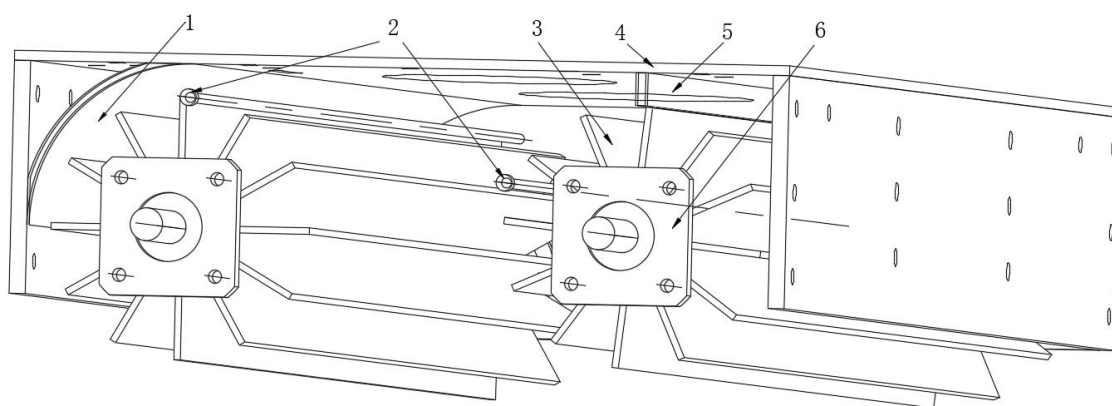
本章内容主要是对清扫机器人管道吸尘结构和扬尘机构进行仿真，并以此来分析结构参数设计是否合理，可根据仿真结果进行优化。

分析流畅理论，推导流体计算的相关理论公式。然后进行流场仿真，利用 **Fluent** 软件对吸尘管道划分网格模型，通过纵横比作为网格度量标准，判断网格划分质量。利用压力基求解器和稳态模拟对模型进行仿真，并且根据灰尘运动特点，使用 **Realizable k-epsilon** 湍流模型，考虑灰尘所受重力。仿真结果发现，管道模型流体通过顺畅，湍流较少，静压力变化合理，结构参数设计满足要求。在扬尘机构仿真中，通过对粒子轨迹、流场迹线和粒子矢量图进行分析，扬尘机构内部存在一些湍流，并且可能会在工作时产生二次污染，需要对扬尘机构进行优化。

第5章 清扫机器人参数优化及实验研究

5.1 扬尘结构优化设计

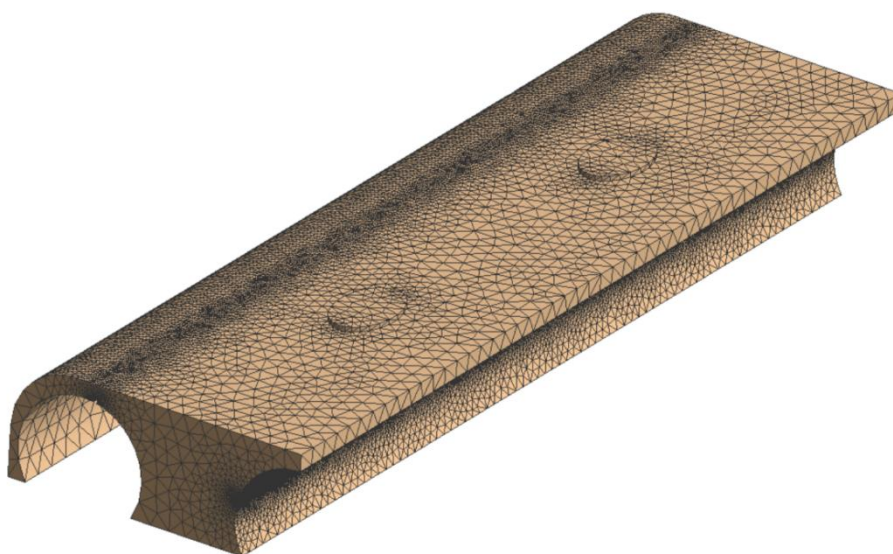
根据上章流场分析得出的结构缺陷，对此进行相应的优化设计，可得结构图 5-1。通过在右侧滚刷正上方加装一个挡板，左侧滚刷上加装一个弧形板，当滚刷工作时，经过除尘丝将吸附在滚刷上的灰尘除去，加装挡板除去后方出口后，滚刷上没有灰尘经过挡板，不会将清扫后的部位弄脏，使从两个入口进入的灰尘全部由出尘孔出口流出进入吸尘管道，以提升除尘效果。



1.弧形板 2.除尘丝 3.滚刷 4.盖板 5.挡板 6.轴承座

图 5-1 滚刷扬尘机构优化模型图

对滚刷扬尘机构进行网格划分，并利用单元网格质量作为网格度量标准，结果如下图所示：



(a)

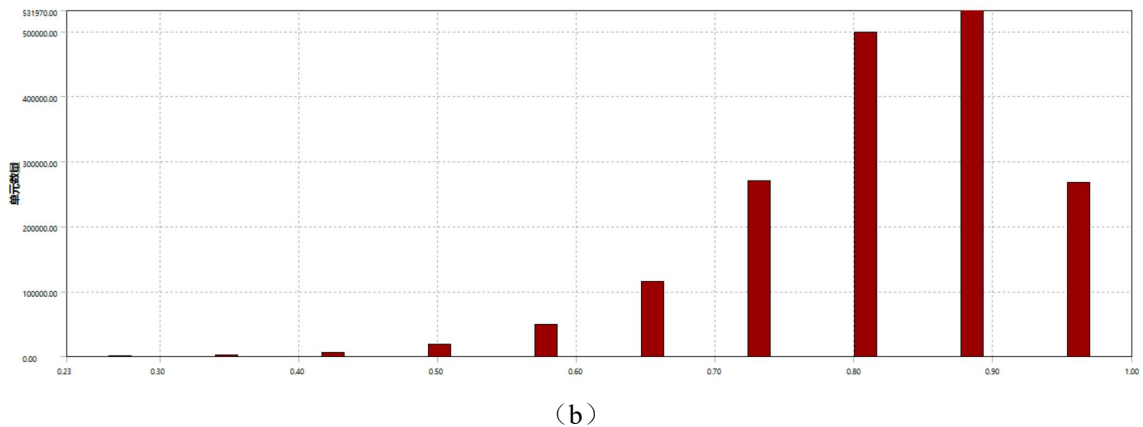
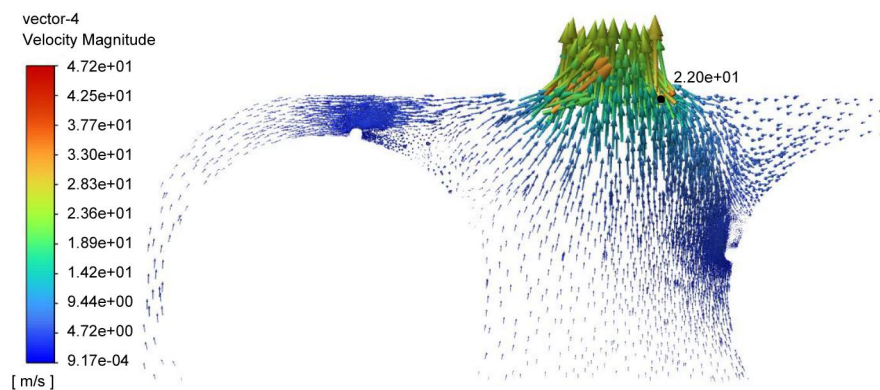
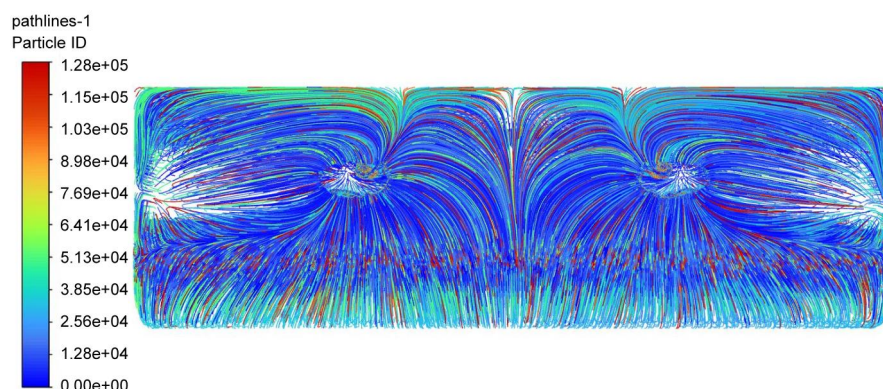


图 5-2 扬尘机构网格模型和质量图

网格划分后单元质量最大为 1，最小为 0.2，并且单元网格质量绝大多数集中在 0.7-1 之间，平均单元质量为 8.2，网格质量较优。根据结构优化进行流场仿真，可得图 5-3。根据图 5-3 所示可以看出粒子在优化过后的流场里轨迹更加平滑，弧形板的加入优化了粒子轨迹，从入口到出口的轨迹距离更加合理，粒子全部从上方出口喷出。图 5-3 所示粒子从 4.6 节图 4-6 (a) 截面 4、5 进入后大部分能以 22m/s 从截面 2、3 喷出，并且粒子几乎能全部进入除尘管道



(a) 粒子矢量图



(b) 流场迹线俯视图

图 5-3 清扫机构优化仿真图

图 5-4 为质量流率计算结果，在 Fluent 中，质量流率是指在进行流体模拟时，通过设定流体从入口处进入系统的质量流率来描述流体进场的方式，最终计算结果显示，入口和出口之间的质量流率相差 4.5×10^{-8} ，相差极小能够满足设计要求。将图 4-6 和图 5-3 综合分析可得，优化后的除尘机构更合理，并且优化后的模型在工作后不会对光伏面板产生二次污染。

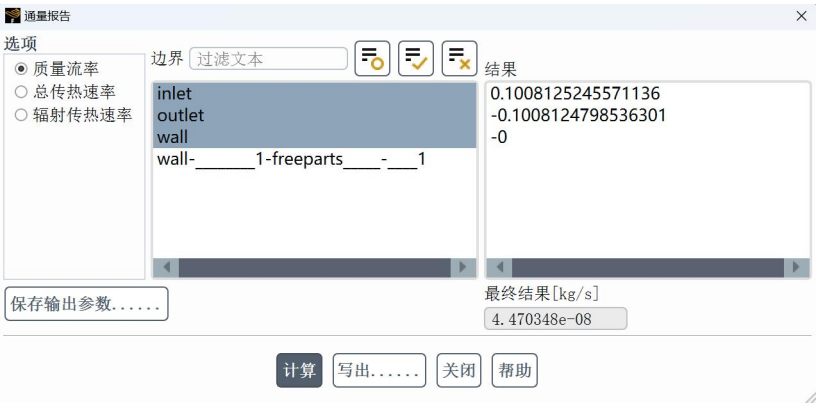


图 5-4 质量流率

5.2 实验系统搭建

1. 清扫机器人机构

图 5-6 为清扫机器人实验图，清扫机器人由移动底盘、扬尘机构、吸尘机构、制动机构和负压吸附机构组成，移动底盘为清扫机器人提供移动，扬尘机构将光伏组件表面灰尘扬起，再由吸尘机构过滤收集，负压机构保障变斜面光伏组件稳定工作，制动机构则为清扫机器人提供紧急制动。

表 5-1 清扫机器人主要机械结构说明

名称	装置	部件	作用
清扫机器人	移动地盘	直流电机	为底盘移动提供动力
		框架	为各种装置提供支撑
	扬尘机构	直流电机	为滚刷提供动力
		滚刷	扬起光伏组件表面灰尘
PWM 最小脉宽	吸尘机构	管道	将灰尘导引进集尘仓
		风机	提供负压为管道
	制动机构	制动器	为清扫机器人提供紧急制动
	负压吸附机构	离心机	使机器人始终贴合变斜面光伏组件

2. 清扫机器人系统

清扫机器人系统可概括为运动单元、感知单元和人机交互，光伏组件清扫机器人系统原理图如图 5-5 所示。

运动单元为电机，为清扫机器人各个运动部件提供动力。在感知单元中陀螺仪检测机器人速度角度信息，为清扫机器人行进速度和姿态控制提供数据，超声波传感器检测光伏组件边界，为制动器提供信息，电机编码器则记录电机转速。使用 STM32F1 接收数据并向控制器传送指令。

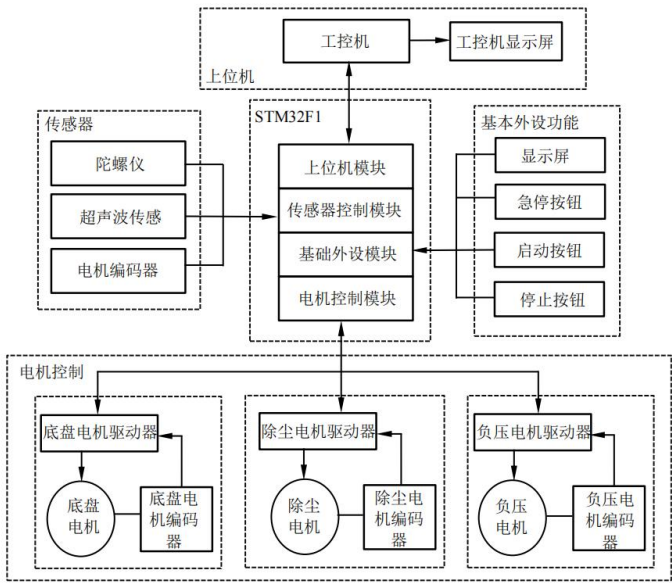


图 5-5 光伏组件清扫机器人系统组成

如图 5-6 所示为清扫机器人系统室内实验场景，其包括远程控制终端和清扫机器人样机，远程控制终端与清扫机器人样机通过局域网连接，终端操作系统为 Ubuntu，两者连接后，终端通过发送指令的形式控制清扫机器人的移动。可以在终端上更改清扫机器人移动速度，清扫机构工作参数等。

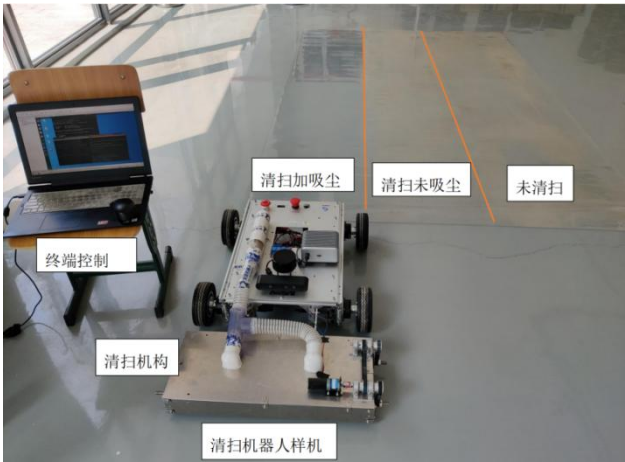


图 5-6 清扫机器人系统室内场景

STM32F1 采用 Cortex-M4 内核，结合开发板具体信息，利用通讯协议将各模

块与开发板引脚相对应，如表 5-2。

表 5-2 清扫机器人引脚分配

主控板引脚分配			
I0 编号	资源说明	外设	备注
A12	普通 IO	使能开关/急停开关	停止电机控制
A5	ADC_CH5	ADC 采集	电压测量
C9、C5、B1	PWMA、IO	底盘电机 A	电机速度方向
C8、C4、B0	PWMB、IO	底盘电机 B	电机速度方向
C7、C12、B5	PWMC、IO	底盘电机 C	电机速度方向
C6、D2 、B4	PWMD、IO	底盘电机 D	电机速度方向
A15、B3	定时器 2_CH1、CH2	电机 A 编码器	编码器采集
A6、A7	定时器 3_CH1、CH2	电机 B 编码器	编码器采集
B6、B7	定时器 4_CH1、CH2	电机 C 编码器	编码器采集
A0、A1	定时器 5_CH1、CH2	电机 D 编码器	编码器采集
A8、A9、A11	定时器 1_CH1	超声波	判断光伏组件边界
A9	定时器 1_CH2	制动器	
C10、 C11	串口 3	主控	两块控制板通信
A2、A3	串口 2	蓝牙	遥控小车
C0、C13、C14、C15	普通 IO	OLED 显示屏	显示数据信息
B10、B11	IIC 引脚	MPU6050	测量机器人速度角度
副板引脚分配			
C9、C5、B1	PWMA、IO	扬尘电机 A	电机速度方向
C8、C4、B0	PWMB、IO	扬尘电机 B	电机速度方向
C7、C12、B5	PWMC、IO	吸尘电机	电机速度方向
C6、D2 、B4	PWMD、IO	负压吸附电机	电机速度方向
A15、B3	定时器 2_CH1、CH2	扬尘电机 A 编码器	编码器采集
A6、A7	定时器 3_CH1、CH2	扬尘电机 B 编码器	编码器采集
B6、B7	定时器 4_CH1、CH2	吸尘电机编码器	编码器采集
A0、A1	定时器 5_CH1、CH2	负压吸附电机编码器	编码器采集
C10、 C11	串口 3	副板	两块控制板通信
C0、C13、C14、C15	普通 IO	OLED 显示屏	显示电机转速和倾角
B10、B11	IIC 引脚	MPU6050	测量光伏板倾角

将清扫机器人各模块引脚分配完成后，根据清扫功能要求，在软件中编写相应程序。本文使用 keil 软件编写 STM32 控制器程序，编写调试界面如图 5-7 所示。

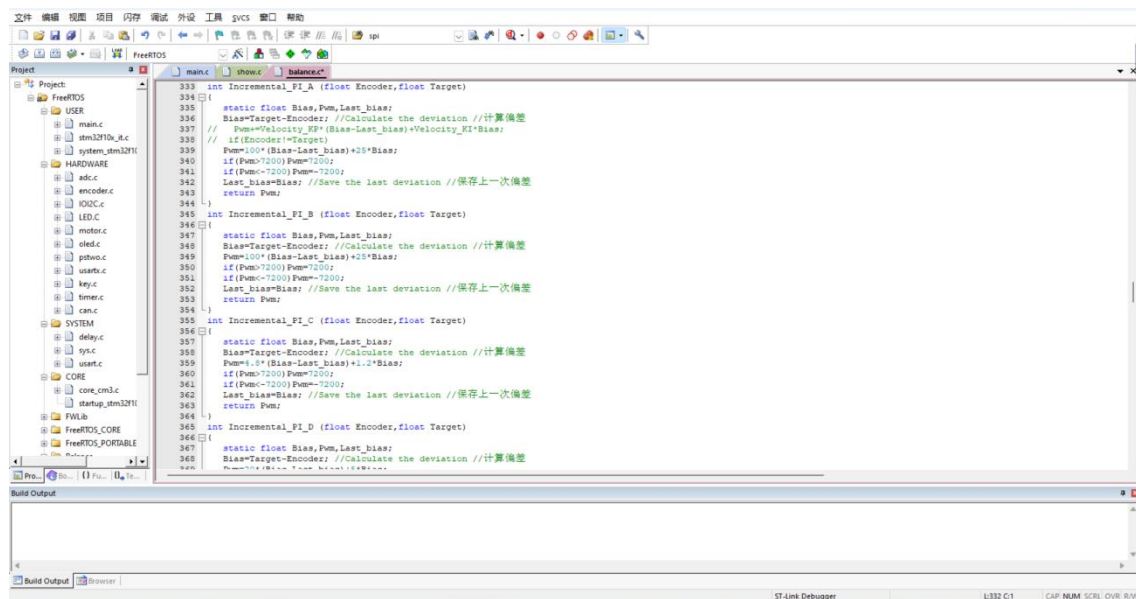


图 5-7 程序调试界面

5.3 负压吸附与除尘机构清扫效果实验

完成清扫机器人除尘机构整体系统搭建，对该清扫机器人包括清扫机器人光伏组件斜面负压吸附测试；清扫机器人行进速度测试；清扫机器人滚刷和吸尘工作参数测试。

(1) 实验设备

为了验证光伏清扫机器人的实际清扫效果，与仿真实验相配合，搭建实验环境，选用光伏组件，其与尼龙动摩擦系数和玻璃与尼龙动摩擦系数都在 0.5 左右，选用尺寸为 1.8×3m，选用电机功率为 35W，吸尘设备吸力为 430Pa，离心风机，通过终端对清扫机器人工作参数进行控制。

(2) 实验内容

- 1) 清扫机器人包括清扫机器人光伏组件斜面负压吸附测试；
- 2) 清扫机器人行进速度测试；
- 3) 清扫机器人滚刷和吸尘工作参数测试。

(3) 实验要求

- 1) 清扫机器人包括清扫机器人光伏组件斜面负压吸附测试
清扫机器人放置于光伏组件上，测试其负压吸附装置能达到的最大倾斜角度。
- 2) 清扫机器人行进速度测试

清扫机器人行进速度测试，其速度间隔设置不能过大，要保持均匀，但最小速度要大于 0.1m/s.

3)清扫机器人滚刷和吸尘工作参数测试

保持恒定的行进速度，各参数选择均匀合理，要测试多组数据，保证后续参数优化的准确性。

(4)实验方法和结果

1)清扫机器人包括清扫机器人光伏组件斜面负压吸附测试

将变斜面光伏组件调至水平，放置清扫机器人，开启负压吸附装置，并将转速调至最大，再逐渐改变光伏组件倾斜角度，直至清扫机器人开始下滑停止实验，清扫机器人斜面吸附实验如图 5-8 所示。

在实验过程中，光伏组件不断调整倾斜角度，清扫机器人能稳定吸附在组件表面，最终当组件角度为 34° 时清扫机器人开始下滑，故其能满足设定 30° 的最大清扫要求。



图 5-8 斜面吸附实验

2)清扫机器人行进速度测试

根据光伏面板实际使用环境，实验用灰尘采用粉状尘埃，经反复粉碎后，用铁丝网过滤使用，撒在实验平台上。清扫机器人根据不同工作参数清扫，计算清扫

效果，单次清扫公式如下：

$$\eta = \frac{A}{B-A} \times 100\% \quad (5-1)$$

式中， η 为吸尘率率； A 为光伏组件表面剩余的灰尘重量，g； B 为光伏组件表面上总的灰尘重量，g。

为了研究光伏组件清扫机器人移动速度对清扫效果的影响，设置实验常量为滚刷转速和吸尘转速，将清扫机器人前进速度设置为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6m/s，分别实验五次，并取平均值进行计算。分析实验结果，将实验数据整理成移动速度和吸尘率的关系曲线，如表5-3所示。在滚刷和吸尘转速一定的条件下，吸尘率随着滚刷移动速度的增大而不断降低，在0.1~0.3m/s之间吸尘率下降较快，0.3~0.5m/s之间下降缓慢，综合考虑清扫效率和清洁度，选择0.4m/s作为清扫机器人前进速度。

表 5-3 移动速度和吸尘率之间的关系

实验常量	前进速度 (m/s)	光伏面板	覆盖量 (g)	剩余量 (g)	吸尘率 η (%)
滚刷转速 500r/min 吸尘转速 5000r/min	0.1	最优速度 检测	4.64	0.12	97.41
	0.2		3.3	0.26	92.12
	0.3		4.5	0.42	90.67
	0.4		4.37	0.43	90.14
	0.5		3.86	0.39	89.89
	0.6		4.82	0.57	88.17

3)清扫机器人滚刷和吸尘工作参数测试

为了进一步分析光伏组件清扫机器人工作参数对吸尘率的影响，选取0.4m/s作为清扫机器人工作时的前进速度，分别在300、400、500、600、700、800r/min这六种滚刷转速下，设置吸尘转速为3000、4000、5000、6000r/min，并记录每次灰尘的覆盖量和清扫结束的剩余量。利用公式5-1计算吸尘率，每组工作参数分别实验五次，取平均值，结果如表5-4所示。由表5-4可知，当滚刷转速一定时，吸尘率随着吸尘转速的提升而增大，当吸尘转速一定时，吸尘率也会随着滚刷转速

的提升而增大，但滚刷转速的提升对吸尘率的影响更显著，尤其是 400~500r/min 之间，吸尘率变化最为明显。通过设置对比实验，实验效果如图 5-9 所示。

表 5-4 吸尘率与滚刷转速、吸尘转速之间的关系

吸尘率 η (%)		吸尘转速 (r/min)			
		3000	4000	5000	6000
滚刷转速 (r/min)	300	60.96	62.51	65.02	67.32
	400	67.37	71.65	76.93	79.75
	500	80.52	84.36	90.14	94.47
	600	90.71	92.97	93.45	93.56
	700	89.88	90.85	92.56	93.27
	800	89.13	90.46	91.63	92.38



图 5-9 清扫实验效果

5.4 除尘机构工作参数优化实验

在进行物理样机实验的基础上，利用非线性拟合^[76,77]对清扫机器人实验参数进行优化，完成滚刷转速和吸尘转速最优工作参数的配合。非线性拟合是一种统计方法，用于拟合数据集中的非线性关系。与线性拟合不同，非线性拟合通过使用非线性方程来逼近数据点，以更好地描述变量之间的关系。这种方法广泛用于科学、工程和统计学等领域，其中实际关系不能简单地由线性方程来表示。本文中的工作参数由于变量较多，不能使用简单的非线性曲线拟合，需要利用非线性曲面拟合方法，找出最大吸尘率的工作参数。

非线性曲面拟合采用 Polynomial 拟合函数，polynomial 拟合是一种基于多项式函数的拟合方法。它可以使用最小二乘法来拟合离散的数据点，从而得到一个较为平滑的曲线，通过调整多项式的次数，可以逐步优化拟合效果。非线性曲面拟合如公式 5-2 所示：

$$z = z_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + A_4x^4 + A_5x^5 + B_1y + B_2y^2 + B_3y^3 + B_4y^4 + B_5y^5 \quad (5-2)$$

将表 5-4 所得工作参数描绘在三维坐标图中, 可得图 5-10 所示工作参数散点图, 再利用方程 5-3 将图 5-10 中分布的散点进行非线性曲面拟合, 从而解算最优工作参数, 拟合效果如图 5-11 所示。

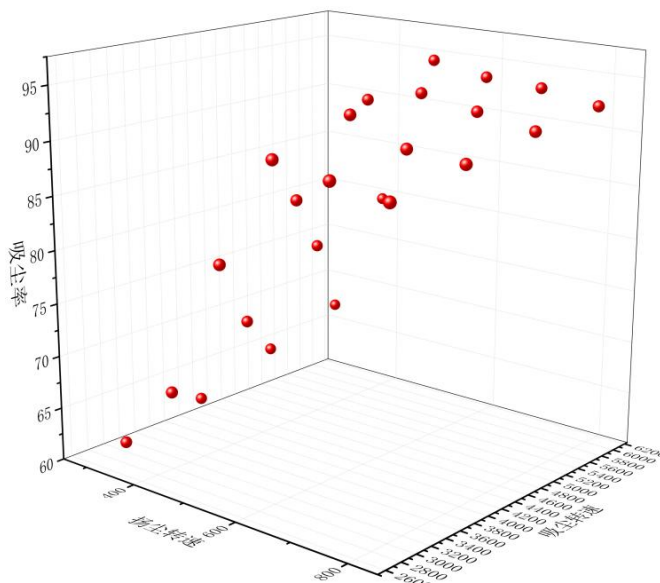


图 5-10 工作参数散点图

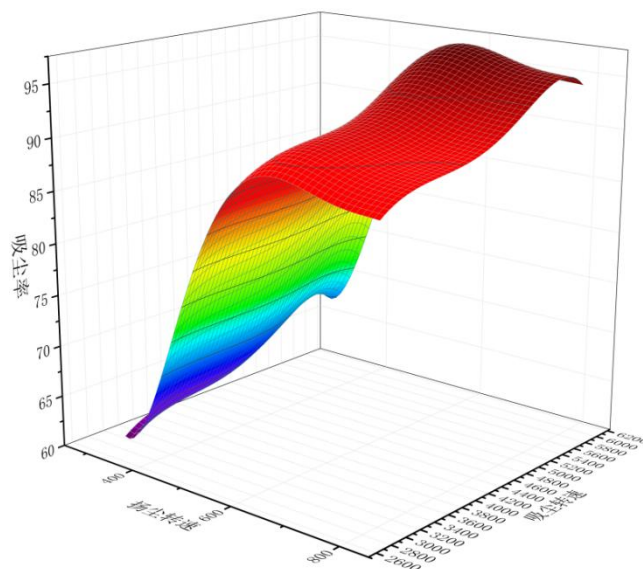


图 5-11 工作参数拟合图

通过对工作参数的非线性拟合可知, 当光伏组件清扫机器人扬尘滚刷转速 611r/min, 吸尘转速 5790r/min 时, 吸尘率最高, 可以达到 97.5%。这一吸尘率高于进行物理实验时所选定所有的 24 组工作参数, 将该工作参数进行实验, 吸尘率为 97.13%, 充分证明了利用非线性拟合优化工作参数的有效性。

5.5 本章小结

本章将扬尘机构结构参数进行优化，利用 **Fluent** 软件对优化结果进行仿真，可以验证优化后的结构内部流体运动更为合理，并且能避免工作时产生二次污染。根据优化后的结构制成样机，进行物理样机实验，负压装置能够满足最大 30° 清扫要求，工作参数实验时，设置多组工作参数，分别进行多次实验取平均值。将实验数据利用散点图绘制在三维坐标上，利用非线性曲面拟合方法，将分布在三维坐标上的散点进行拟合，根据拟合结果得出最高吸尘率为 97.5%，扬尘滚刷转速为 611r/min，吸尘转速为 5790r/min，将该工作参数进行实验后，吸尘率为 97.13%，高于选定的工作参数，证明了工作参数优化的有效性。

第 6 章 结论与展望

6.1 本文总结

太阳能发电一般处于偏远地区，由于长时间的经受复杂环境影响，光伏组件表面会覆盖大量灰尘，不仅影响发电效率，还会对组件表面造成损害。当前光伏组件清洗中机器应用较为广泛的为框架式和车载式，框架式清扫机器人清扫场景单一，安装和维护工作量大，车载式体积较大，对工作空间要求高，清扫效果不稳定，成本和维护代价较高。本文针对光伏组件清扫问题设计了变斜面光伏组件清扫机器人除尘机构，研究了清扫机器人机械结构、运动特性和清扫工作参数。创新的采用滚刷清扫和吸尘相结合的方式，提高清洁率，避免二次污染，并且设计负压吸附装置和独立安全制动装置，能够对不同倾斜角度的光伏组件进行安全清扫。围绕变斜面清扫机器人主题，对其除尘机构进行研究，包括扬尘机构、吸尘机构、负压机构和制动装置，并利用 Fluent 软件对机构内部流场进行仿真计算，分析流体在结构内部的运动情况。根据仿真结果对结构参数进行优化，利用优化的结构搭建实验平台，再利用非线性拟合方法优化工作参数，通过实验验证拟合出的参数，发现其清洁率更高。

将本文具体工作内容归纳如下：

(1) 分析两轮差速结构、阿克曼转向结构、麦克纳姆轮结构、全向轮结构以及四驱结构等，充分理解各种运动结构的优缺点，选择四驱结构作为驱动方式。建立数学模型，分析清扫机器人部分运动和整体之间的关系，利用速度简化模型，验证了清扫机器人构型的正确性。针对光伏组件清扫问题，为实现可持续、环保以及低成本的清扫方式选择双滚刷干式清扫方案，结合管道吸尘，避免二次污染。安全制动装置和负压吸附的设计为稳定和安全清扫提供保障，通过仿真分析可以看出负压装置能够提供足够的负压力，实验结果表明安全制动装置和负压吸附装置能够满足清扫机器人在光伏组件上正常工作的需要。

(2) 分析清扫机器人软硬件系统功能需求，根据功能需求选定相应传感器件和主控制器，分析各传感器之间传输协议，设计相应的控制系统方案，使各执行器满足清扫机器人工作要求。

(3) 分析流场理论，对清扫机器人管道吸尘和扬尘机构进行仿真，利用 Fluent 软件对结构模型进行网格划分，并且利用纵横比作为网格度量标准，评判网格划分质量。选择压力基求解器和稳态模拟，根据吸尘管道安装姿态设置 z 轴方向的

重力加速度为 9.8m/s^2 。选择标准壁面方程，计算模型选择 **Realizable k-epsilon** 湍流模型，**Realizable k-epsilon** 湍流模型可以在雷诺应力上保持与真实湍流一致，能够更加准确的模拟平面和圆形射流的扩散速度。分析相应的仿真数据发现管道吸尘结构流体通过顺畅，损失较小，能够达到设计要求，扬尘机构内部湍流较多，工作过程中会造成二次污染问题需要进行优化设计。

（4）对扬尘机构进行优化设计，将直角边框改为圆弧，取消后方出尘口，进行仿真分析发现，内部流场湍流明显减少，二次污染问题解决，质量流率提升一个数量级。将优化后的结构制作成样机进行实验，负压装置能够满足最大 30° 清扫要求，工作参数实验时，选定多组工作参数，实验并计算相应的吸尘率，然后利用非线性拟合方法，对工作参数进行优化，采用 **Polynomial** 拟合函数将散点图拟合为曲面图，并计算最高吸尘率，再将最高吸尘率所对应的工作参数进行实验可以验证工作参数优化的有效性，将最高清洁率由 94.47% 提高到 97.13% 。。

6.2 工作展望

本文研究变斜面光伏组件清扫机器人清扫机构，对其运动原理，机械结构进行分析，并利用非线性拟合方法计算最优工作参数。由于实验设备和时间问题，对本课题仍有许多问题需要进一步研究。

（1）清扫机器人工作在光伏组件连接处时，底部的负压机构内部负压腔压力会产生变化，影响吸附效果，因此需要对负压装置进行改进，分析其经过连接处内部压力的变化情况。

（2）由于成本有限，未能对移动地盘进行轻量化设计，扬尘机构也采用了铝合金装配，造成清扫机器人重量较重，可以采用模具开模的方式，利用注塑件减轻清扫机器人重量，能显著提高清扫性能。

（3）在电机控制中，只考虑了电机实际转速和目标转速的关系，没有考虑到电机控制和能耗优化的联系，在光伏组件清扫上，低能耗不仅是节能的需求也是长续航的现实需要。

（4）在智能化清扫上还有欠缺，由于时间问题，未能实现既定的边界视觉识别以及自动清扫，未来实现真正的无人化清扫是一个需要努力的方向。

参考文献

- [1] C. Guțu-Chetrușca , D. Braga. "Energy Crises - Energy Transition Driving Force," 2023 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2023, pp. 1-6.
- [2] V. I. Silaev, O. A. Gavrina , A. V. Kuzina. "The Problem of Renewable Energy Sources and Market Mechanisms in Various Energy Systems in the Era of Global Crises," 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2023, pp. 83-88.
- [3] D. Cilio. "The Energy of crisis. Towards Renewable Energy Community," 2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Bari, Italy, 2021, pp. 1-6.
- [4] 王长贵,王斯成.太阳能光伏发电实用技术(第二版)[M]. 北京:化学工业出版社, 2009.
- [5] 宋伟杰.光伏制造业现状前景及研究需求[J].太阳能产业论坛,2012,2:14-17.
- [6] 潘瞳,孙文雷,李红等.光伏组件智能清扫机器人设计[J].太阳能学报,2021,42(07):146-51.019-0387.
- [7] J. Rodrigues, A. S. A. C. Diniz , L. L. Kazmerski. "Evaluation of the Impacts of Various Cleaning Techniques on Photovoltaic Module Glass," 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Fort Lauderdale, FL, USA, 2021, pp. 0958-0960.
- [8] 柴亚盼.光伏发电系统发电效率研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- [9] 张利,钟云,张建成.考虑阴影影响的光伏电池组件实验研究[J].太阳能,2008(5),27-28.
- [10] 史君海,孙丽兵,张丽莹.提高并网光伏发电效率分析与建议[J].电力与能源,2015,34(4):402-404.
- [11] 岑先富,朱超林.光伏组件积尘对发电量的影响及自动清洁经济效益研究[J].太阳能,2013(21):25-48.
- [12] 孟伟君,朴铁军,司德亮等.灰尘对光伏发电的影响及组件清洗研究[J].太阳能,2015(2):22-27,34.
- [13] 刘世隆,邓薇.塔式太阳能热发电技术在我国发展现状与前景分析[J].电气技

- 术,2016(10):8-10,22.
- [14] 孙东方, 陈焕新, 申利梅等.太阳能热电发电技术研究现状与前景分析[J].制冷与空调,2018,18(12):71-76,83.
- [15] Bai K, Zhi L I, Zong J, etc. Influence of Dust on the Power Generation Performance of Photovoltaic Panels[J]. Power System and Clean Energy, 2014
- [16] J. Haydar, A. NourAldeen, H. Fayad, etc."A Low Cost Automated Cleaning System for Photovoltaic Panels," 2018 International Arab Conference on Information Technology (ACIT), 2018, pp. 1-3.
- [17] 巫江,龚恒翔,朱新才等.光伏组件自动除尘装置设计与研究[J].重庆理工大学学报(自然科学).2014(03)
- [18] 宁会峰,鄢之滨,程荣展等.光伏组件清扫机械臂动力力学建模与分析[J].太阳能学报,2020,41(12):0254-0096.
- [19] Muhammed J Adinoyi,Syed A M.Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules.Renewable Energy,2013,Vol.60:633-636
- [20] 方海婷.嵌入式清洁机器人系统设计与实现[D].南京理工大学,2009.
- [21] 张经炜,杨姣,高瑞光,等.盘刷式光伏清扫机器人结构与驱动设计研究[J].太阳能学报,2024,45(03):565-570.
- [22] 周亦瞿,沈芳,谷玉之,等.光伏组件自动换行清洁机器人设计[J].机械工程师,2024(02):58-61+66.
- [23] 梁艺,汪步云,全鹏,等.可变斜面光伏清扫机器人行走特性研究[J].兵器装备工程学报,2023,44(03):239-245.
- [24] S. Santosh Kumar, S. shankar , K. Murthy. "Solar Powered PV Panel Cleaning Robot," 2020 International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2020, pp. 169-172.
- [25] Omur Akyazi1 , Erdinc Sahin , Timur Ozsoy. A Solar Panel Cleaning Robot Design and Application. European Journal of Science and Technology Special Issue,October 2019,pp. 343-348.
- [26] G. Aravind, G. Vasan, T. S. B. G. Kumar,etc. "A Control Strategy for an Autonomous Robotic Vacuum Cleaner for Solar Panels," 2014 Texas Instruments India Educators' Conference (TIIEC), Bangalore, India, 2014, pp. 53-61.
- [27] Nhut Thang Le, Minh Duc Nguyen, Trung Dat Phan, etc. Development of a

Multi-Suspension Unit for Solar Cleaning Robots to Mitigate Vibration Impact on Photovoltaic Panels. *Applied Sciences*. 2023, 13, 12104.

- [28] 马凯凯.太阳能光伏板清洁机器人三维路径规划研究[D].兰州理工大学,2018.
- [29] 王海峰,李凤婷,贾言争等.适用于大规模光伏阵列的无水清扫机器人[J].可再生能源,2015,33(10):1439-1444.
- [30] 姜兆文.吸扫式扫路车总体设计及气力输送系统研究[D].长春:吉林大学,2013:5-13.
- [31] 汪继伟.太阳能光伏组件清洁机器人行程控制系统设计与实现[D].乌鲁木齐:新疆大学,2015.
- [32] N. F. Zainuddin, M. N. Mohammed, S. Al-Zubaidi ,etc. "Design and Development of Smart Self-Cleaning Solar Panel System," 2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), Selangor, Malaysia, 2019, pp. 40-43.
- [33] M. K. Mazumder. "Environmental degradation of the optical surface of PV modules and solar mirrors by soiling and high RH and mitigation methods for minimizing energy yield losses," 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), New Orleans, LA, USA, 2015, pp. 1-6.
- [34] Shehri A A,Parrott B,Carrasco P,etc. Impact of dust deposition and brush-based dry cleaning on glass transmittance for PV modules applications[J]. *Solar Energy*,2016,135:317-324.
- [35] S. Bhaduri, M. Farkade, R. Bajhal,etc. "Impact of different brush designs in robotic cleaning on the degradation of anti-soiling coatings," 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Fort Lauderdale, FL, USA, 2021, pp. 2434-2438.
- [36] J. A. P. Rodrigues, A. S. A. C. Diniz , L. L. Kazmerski. "Evaluation of the Impacts of Various Cleaning Techniques on Photovoltaic Module Glass," 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Fort Lauderdale, FL, USA, 2021, pp. 0958-0960.
- [37] M. Mokhtar , M. F. Shaaban. "A New ANN-Based Cleaning Approach for Photovoltaic Solar Panels," 2022 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), Alanya, Turkey, 2022, pp. 260-263.
- [38] Saito A, Nagayama K, Ito K, etc. Semi-Autonomous Multi-Legged Robot with Suckers to Climb a Wall [J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*,2018,30(1):24-3

2.

- [39] B. Lequesne. Dynamic model of solenoids under impact excitation, including motion and body currents. II[C].//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Pittsburgh, PA, USA: IEEE Industry Applications Society, 1988: 149-157.
- [40] Shin B, Gunawan O, Zhu Y, etc. Thin film solar cell with 8.4% power conversion efficiency using an earth-abundant $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ absorber[J].Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2013, 21(1):72-76.
- [41] Berginski M, Hupkes J, Schulte M, etc.The effect of front ZnO:Al surface texture and optical transparency on efficient light trapping in silicon thin-film solar cells[J].Journal of Applied Physics, 2007, 101(7):1-01.
- [42] 郑小帆,赵磊.基于嵌入式系统的光伏平单轴跟踪系统设计[J].科技与创新,2021(24):100-101.
- [43] 张越华,夏永添,张岩.屋顶光伏电站的自动清洗机器人设计[J].集成电路应用,2023,40(02):166-167.
- [44] 朱春松.新能源汽车底盘设计及发展趋势分析[J].汽车测试报告,2023(13):70-73.
- [45] 龙志浩,卢秋红,薛阳.两轮差速机器人路径跟踪方法研究[J].工业控制计算机,2023,36(12):18-20+23.
- [46] Z. M. U. Din, W. Razzaq, U. Arif,etc. "Real Time Ackerman Steering Angle Control for Self-Driving Car Autonomous Navigation,"2019 4th International Conference on Emerging Trends in Engineering, Sciences and Technology (ICEEST), Karachi, Pakistan, 2019.
- [47] 黄晓宇,孙勇智,李津蓉等.基于 MPC 的麦克纳姆轮移动平台轨迹跟踪控制[J].机械传动,2023,47(11):22-29.
- [48] 梁艺,汪步云,全鹏等.可变斜面光伏清扫机器人行走特性研究[J].兵器装备工程学报,2023,44(03):239-245.
- [49] 李荣,栾贻青,王海鹏等.全向四驱变电站巡检机器人运动控制系统设计[J].机床与液压,2020,48(08):112-116.
- [50] 李艺青,王建军,郁万涛.两轮差速移动机器人构型与运动学研究[J].成都航空职业技术学院学报,2022,38(04):59-62.
- [51] 宁晶.轻型卡车紧急制动时出现甩尾问题的分析解决[J].汽车工程师,2021(10):46-48.

- [52] A. I. Ivanov , K. V. Gritsenko. "Kinematic Analysis of a Five-link Parallel Manipulator," 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 666-669.
- [53] 韩建男,孙江宏,杜宏辰.清扫车滚刷运动仿真分析及刷毛材质影响[J].中国科技论文,2019,14(04):367-372.
- [54] Antonelli M G,Zobel P B,De M A, etc.Autonomous robot for cleaning photovoltaic panels in desert zones[J].Mechatronics,2020,68(01):1-3.
- [55] 邢玉东.光伏清洁机器人的设计与实现[D].天津:天津理工大学,2019.
- [56] 黄斌.一种应用于清扫机器人的可伸缩清扫机械手[P].中国:CN117266068A,2023.12.22.
- [57] 李晓辉; 李伟波.双滚刷清扫装置及扫地机器人[P].中国:CN213993446U,2021.08.20.
- [58] Mazumder MK,Horenstein MN,Heiling C,etc.Environmental degradation of the optical surface of PV modules and solar mirrors by soiling and high RH and mitigation methods for minimizing energy yield losses[C].Photovoltaic Specialist Conference.Portland:IEEE,2015:460-465.
- [59] Hilto J E, Cleary P W. The influence of particle shape on flow modes in pneumatic conveying[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 63(3): 231-240.
- [60] 陆俊楠,谭宇航. 无刷直流电机在现代机械中的应用与挑战[C]//广东省国科电力科学研究院.第四届电力工程与技术学术交流会议论文集.2023:2.
- [61] 王人杰.光伏阵列组件全局最大功率点跟踪控制方法[J].自动化应用,2023,64(24):193-194+197.
- [62] 陈博文, 吴建华, 孙庆国等.电磁制动器电磁吸力解析计算与设计优化[J].电机技术, 2018.
- [63] 吴虹飞.扫路车风机的选择[J].专用汽车, 2006,(05):45-46.
- [64] 李文科.工程流体力学 [M]. 中国科学技术大学出版社, 2007.
- [65] 郭曼丽,王园丁,谭俊杰等.N-S 方程耦合雷诺平均湍流模型无网格算法研究[J].南京理工大学学报,2019,43(05):548-555.
- [66] 于萍. 工程流体力学 [M]. 科学出版社, 2015.
- [67] L. A. Mpiana, Y. Hamam , A. M. Abu-Mahfouz. "Graph based hydraulic modelling of pressure in water distribution networks," 2017 IEEE AFRICON, Cape Town,

- South Africa, 2017, pp. 1558-1563.
- [68] Yan M, Zhang K, Jing G, etc. Design of the control system for a four-wheel driven micro electric vehicle[C]// IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference. 2009.
- [69] Han K L, Choi O K, Lee I, etc.Design and control of omni-directional mobile robot for Mobile Haptic Interface[C]// International Conference on Control. 2008.
- [70] 黄永志,陈卫东.两轮移动机器人运动控制系统的设计与实现[J]. 机器人,2004, 26(1):40-44.
- [71] D. Okumura, S. Sakaino , T. Tsuji. "High Dynamic Range Sensing by a.Multist-age Six-Axis Force Sensor with Stopper Mechanism," 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, QLD, Australia, 2018, pp. 4065-4070.
- [72] 常慧媛.倾转三旋翼无人机总体与控制系统设计[D].2018.
- [73] 张铁山,凌和平.中型道路清扫车的总体设计与研究[J].专用车,2015,8(2):18-20.
- [74] 张殿印,王纯.除尘工程设计手册[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [75] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamic s [M].World publishing Cooperation, 2017:132-137.
- [76] R. Sikora, P. Markiewicz, W. Pabjanczyk. "Surface polynomial fitting of controlled single-phase nonlinear load of input current total harmonic distortion," 2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts, Lodz, Poland, 2017, pp. 1-2.
- [77] 陈兵,燕纪威,尹忠俊等.基于 DEM 的高频振网筛多参数优化[J].工程科学学报,2021,43(06):852-861.DOI:10.13374/j.issn2095-9389.2020.04.16.005.

攻读硕士学位期间的成果

- [1] 梁艺,王伟振,汪步云等.全向移动光伏清扫机器人清扫特性分析与优化[J].太阳能学报,2024,45(1):32-38.
- [2] 王伟振,梁艺,张方圆.一种垂直横移立体车库[P].实用新型专利,公开号:CN216277169U.
- [3] 梁艺,王伟振,汪步云等.一种光伏面板清洁设备[P].实用新型专利,公开号:CN218610587U.

致谢

时光匆匆，我站在硕士论文完成的节点，回首这段充实而难忘的求学旅程，我深感无比幸运和感激。在这里，我要向所有支持、关心和帮助过我的人表示由衷的感谢。

首先，我要感谢我的导师，梁艺副教授。在我整个硕士研究生生涯中，梁老师给予了我无微不至的关怀和悉心指导。梁老师不仅在学术上为我提供了深厚的指导，还在生活中给予了我无私的支持。梁老师的鼓励一直伴随着我，让我能够克服各种困难，不断前行。这篇论文的完成离不开梁老师的悉心指导，对此我深感荣幸和感激。

同时，我要感谢我的室友任英虎、刘家豪和周焰生。与你们共度的每一个日夜都是我求学生涯中难以磨灭的记忆。在紧张的学术生活中，你们给予了我无尽的温暖和支持，成为我生活中不可或缺的一部分。与你们共同努力、共同奋斗的岁月是我人生中最珍贵的财富，感谢你们一路以来的陪伴和理解。

我衷心感谢许德章院长、汪步云老师、程军老师和程雷老师等对我科研上的指导和生活上的帮助。还要感谢师弟王绪波和孙俊杰对我的帮助，非常幸运能够遇见束勤平、徐腾、赵兵、耿郑一、刘蒙蒙和朱煜龙等同学，与你们一同学习、交流、进步的过程是我人生中宝贵的经历。大家相互之间的合作和协作，让我深刻体会到团队的力量。在学术上遇到问题时，有你们共同探讨、互相启发的时刻是我难以忘怀的经历。感谢你们在我求学过程中的陪伴和支持。

感谢我所在的学校，安徽工程大学提供了丰富的学术资源和良好的学习环境，为我提供了一个全面发展的平台。学校的教育理念和优良的学风潜移默化地影响着我，让我在这里获益匪浅。连同本科，我在安徽工程大学已经度过七年，人生最多十来个七年，而我在安徽工程大学度过了人生最美好岁月的七年，感谢安徽工程大学给我这段经历，也让我拥有立足社会的一技之长。

最后，感谢每一位在我求学过程中出现的人，是你们的支持和陪伴让我走得更加坚定。这段求学之旅充满了挑战，但也因为你们的存在变得更加丰富多彩。在未来的日子里，我将怀揣着对你们的感激之情，继续努力前行，为更美好的明天而努力奋斗。

尚德敏学 唯实惟新

