

For citation: Sun Yonghao. The structural design of a family cleaning robot // Grand Altai Research & Education — Выпуск 2 (25)'2022 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2025.02) — EDN: <https://elibrary.ru/HEYWEY>

UDK 658.512.2

## THE STRUCTURAL DESIGN OF A FAMILY CLEANING ROBOT

Sun Yonghao<sup>1</sup>

1 Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, School of Mechanical Engineering and Automation,  
Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China  
E-mail: 13125060270@163.com

**Abstract.** With the improvement of the global per capita economic level, intelligent family cleaning robots are increasingly favored by people. Compared with the traditional manual cleaning method, cleaning robots are more suitable for narrow spaces such as under the bed, and can free people's hands from daily household chores. In response to the problems of low working efficiency and easy dust blockage of traditional cleaning robots, this paper proposes a structural design scheme for a cleaning robot. This paper divides the transmission part of the cleaning robot into cleaning module, moving module, dust collection module, and wiping module, and analyzes and designs each module, including motor selection, size design calculation, and structural design modeling.

**Keywords:** Cleaning Robot; Cleaning; Structure

## 一种家庭清扫机器人的结构设计

孙永豪<sup>1</sup>

1 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 机械工程与自动化学院, 武汉 430073  
E-mail: 13125060270@163.com

**摘要:** 随着全球人均经济水平的提高, 智能家庭清扫机器人越来越受到人们的青睐。比起传统的人工清扫方式, 清扫机器人更适用于床底等狭窄空间, 可以将人们的双手从日常的家务工作中解放出来。针对传统清扫机器人存在的工作效率低, 灰尘易堵塞风道等问题, 本文提出了一种清扫机器人的结构设计方案。本文将清扫机器人传动部分细分为清扫模块, 移动模块, 吸尘模块, 擦拭模块, 并对各模块进行分析设计, 包括电机选型, 尺寸设计计算, 结构设计建模。

**关键词:** 清扫机器人; 清扫; 结构

## 0 引言

目前国内外基本尚处于人工清洗阶段 [1]. 日常家务清扫是一项重复性高且耗时的工作, 尽管市面上吸尘器的功能繁多, 但仍需要人们自主操作吸尘器完成清扫工作。人工清洁多采用手持机械设备进行清洗, 清洁效果好, 但是清洗效率低, 人工成本高 [2]. 此外, 吸尘器在应对床底, 洗衣机底等狭窄空间时, 往往难以发挥效用, 存在明显的局限性。

清扫机器人作为清扫理念与机器人技术的融合产物, 其设计涉及多个学科领域的深度交叉。目前, 清扫机器人的发展正在朝着产业化和模块化的方向发展, 机器人技术的进步极大地推动了机器人在该领域的智能化发展 [3]. 从技术层面来说, 清扫机器人凸显了移动机器人的多项前沿功能, 如自主导航, 避障, 路径规划等, 充分展现了其技术上的先进性与代表性。从市场前景的角度来看, 清扫机器

人的出现减轻了人们的劳动负担, 分担了部分劳动强度, 提高了清扫效率。其应用范围广泛, 不仅适用于家庭, 办公室等私人场景, 还能在图书馆, 展览馆等各种室内公共场所中进行清扫工作。因此, 该类型机器人具有较好的应用前景, 多所机构对其相关技术进行了研究, 开发了多款机器人产品 [4]。清扫机器人具有研究的价值的同时, 更展现出了巨大的市场潜力。

## 1 清扫机器人的模块化方案设计

### 1.1 清扫机器人结构模块化及各模块功能

将机械结构模块化有利于对机械设备后续的维修与更换, 本文将所设计的清扫机器人结构分为以下几个模块, 整体结构如图 1 所示:

(1) 移动模块: 为清扫机器人提供移动动力, 具有一定的爬越门槛或地毯边缘的能力。

(2) 清扫模块: 利用两个电机传递转矩, 驱动左右两侧的两个清扫刷, 使得左清扫刷以顺时针方向旋转, 右清扫刷以逆时针方向旋转, 这样可在清扫灰尘污垢时将灰尘污垢推至吸尘口下方处, 以备吸存灰尘污垢;

(3) 吸尘模块: 利用风机产生强大的吸力, 可将吸尘口处的灰尘污垢吸入灰尘储存处;

(4) 擦拭模块: 在使用清扫模块和吸尘模块进行初步清扫地面后, 使用底盘下安装的抹布擦拭地面, 以确保清洁工作的质量;

(5) 电源模块: 由锂电池为正常工作所需能量的来源 [5].

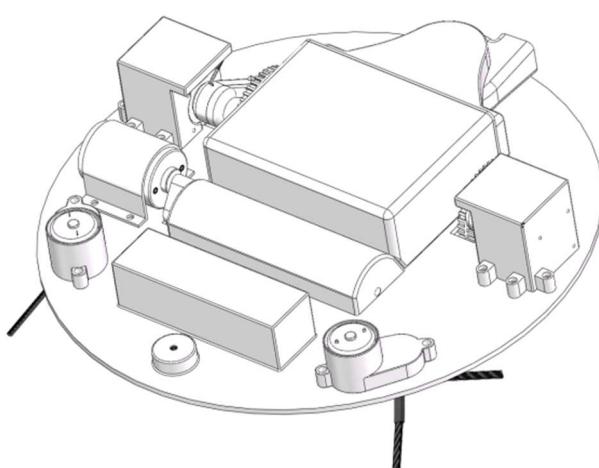


图 1 清扫机器人整体结构示意图  
Figure 1. Overall Structure Diagram of the Cleaning Robot

### 1.2 各模块设计

#### 1.2.1 移动模块设计

根据不同设计的使用需求不同, 在常见的设计方案中, 机器人的移动方式可以将其大致划分为轮式移动, 履带式移动和步式移动三种类型。轮式和履带式机器人适合路面平整度较好的环境, 而步式机器人更适用于路面条件恶劣的环境。本文研究的清扫机器人应用于室内环境, 路面工作条件良好, 且轮式移动结构相对简单, 可以满足大部分日常清洁需求, 故本文选择采用轮式移动机构。

根据不同设计的使用需求不同,在常见的设计方案中,可以将轮式移动机器人大致划分为三轮式,四轮式和六轮式三种移动结构方案设计。三轮移动机器人相对于四轮和六轮移动机器人机构较简单,成本较低,重心更低,稳定性较好,但负载有一定的限制。本文所研究的清扫机器人的重量不大,工作条件良好,且采用圆形结构负载稳定,中心位置基本没有变化。故本文选择采用圆形外形结构的三轮移动机器人即可以满足需求。

在常见的设计方案中,可以将三轮转向装置结构主要分为两类:

(1) 铰链轴转向: 将转向轮安装在转向铰链轴上, 电机通过机械连杆机构控制铰链轴, 利用铰链轴与固定轴之间形成的角度达到转向的效果, 例如汽车的转向方式就使用的铰链轴转向。

(2) 差速转向: 对驱动轮分别使用独立的驱动电机进行控制, 利用控制系统对左右两轮的电机的运转与否进行控制来达成转向效果, 例如需要机器人进行左转向时, 使左轮电机停止旋转, 右轮电机正常旋转。

铰链轴转向容易控制, 但精度上却有所欠缺; 而差速转向虽然在控制方面较为复杂, 但拥有较高的精度。考虑到作为一种服务机器人, 清扫机器人的控制应有更高的精度, 高精度的转向能力不仅有助于机器人按照拟定的清扫路径移动, 还可以更有效地避免与障碍物发生碰撞。本文移动机构转向方式选择差速转向式。选择使用小型直流无刷电机加上三级减速齿轮组驱动移动模块, 直流无刷电机具有可调速, 控制角度高, 续航长, 噪声低, 寿命长等特性, 更适用于家庭使用场景。

使用弹簧将减速器外壳前端与电机固定外壳连接, 可在进行爬越门槛时将车轮沿电机轴以圆弧的运动轨迹向上收缩, 使得更容易地通过门槛高度, 并在成功爬越后将车轮复位, 如图 2 所示。

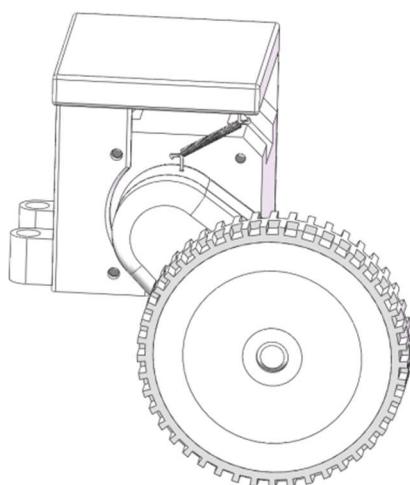


图 2 移动模块示意图  
Figure 2. Schematic Diagram  
of the Mobile Module

### 1.2.2 清扫模块设计

对于清扫模块, 由于无需对边刷进行调速以及高精度的控制, 选择直流有刷电机加上二级减速齿轮组即可满足其使用需求, 结构如图 3 所示。

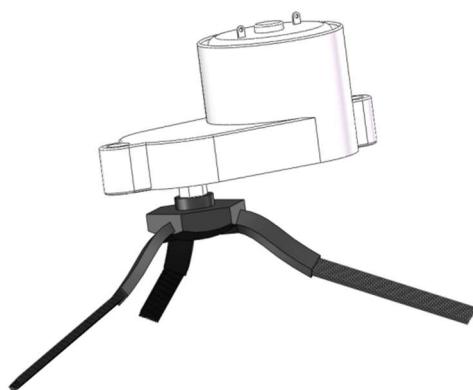


图 3 清扫模块示意图  
Figure 3. Schematic Diagram  
of the Cleaning Module

### 1.2.3 吸尘模块设计

传统顶吸式风机结构设计，即将风机、灰尘盒置于吸尘口正上方的设计，存在吸入灰尘盒的灰尘堵塞在风机与灰尘盒中间滤网的问题。本文采用一种侧吸式风机结构设计，即将风机置于吸尘口侧方，灰尘盒置于吸尘口正上方的设计，如下图 4 所示。同时为了配合风机吸尘和防止头发缠绕，在进风口下方安有一根滚刷，使用直流无刷电机加上二级减速器来驱动滚刷，可以对直流无刷电机进行调速以达到不同的清扫效果。

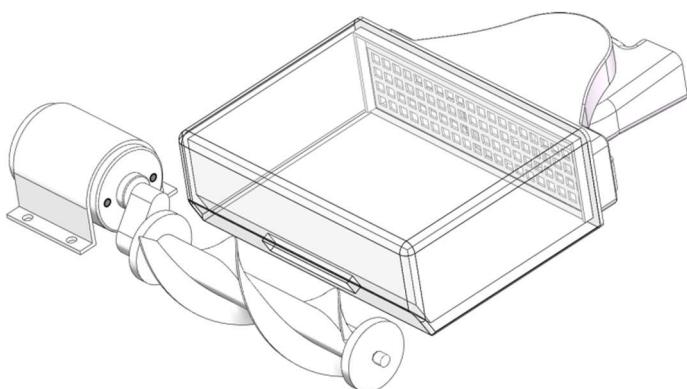


图 4 吸尘模块示意图  
Figure 4. Schematic Diagram  
of Dust Collection Module

## 2 清扫机器人各模块的选型与尺寸计算

### 2.1 移动模块的选型与尺寸计算

机器人底盘应至少高于地面 10mm，选定车轮半径为 34mm，速度  $v=0.5\text{m/s}$ 。

车轮角速度为  $\omega=v/r=0.5/0.034=14.71\text{ rad/s}$ 。

车轮转速为  $n_0=60\omega/2\pi=60\times14.71/(2\times3.14)=140\text{r/min}$ 。

初步估计机器的总重量为 3 千克，采用两台电机对左右两边进行驱动，对称步骤假设每台电机承重 1.5 千克，对于家庭硬地板或短毛地毯，滚动阻力系数取  $\mu=0.1$ 。

则滚动阻力  $F_r=\mu\times m\times g=0.1\times1.5\times9.8=1.47\text{N}$ 。

清扫机器人有爬越门槛或地毯边缘，设定可越障高度为 1cm。越障时所需牵引力显著提高，将越障过程简化为爬一个角度为  $\theta$  的斜坡的过程，当车轮开始爬越障碍时，接触点到车轮中心的连线与垂直方向夹角满足： $\cos\alpha=(r-h)/r$ 。

计算可得斜坡角度  $\theta=90^\circ-\alpha=90^\circ-45.1^\circ=44.9^\circ$ .

越障时的峰值牵引力  $F_p=m\times g\times \sin\theta=1.5\times 9.8\times \sin(44.9^\circ)=10.4N$ .

考虑到实际越障时还有其他阻力, 取安全系数为 1.5.

实际越障时的峰值牵引力  $F=F_p\times S=10.4\times 1.5=15.6N$ .

所需扭矩  $T=F\times r=15.6\times 0.034=0.53N\cdot m$ .

则机器人在水平面上移动的功率  $P_w=T\times \omega=0.53\times 14.71=7.8W$ .

机械效率  $\eta=\eta_1\eta_2\eta_3=0.96\times 0.96\times 0.96=0.88$ .

输出功率  $P=P_w/\eta=7.8/0.88=8.9W$ .

选用直流无刷电机 OK42BLS61-240A, 额定功率 10w, 额定转速 1500 转, 在符合使用需求的情况下尺寸最小, 故选用.

电机的转速  $n_a=1500 r/min$ .

车轮的转速  $n_0=140 r/min$ .

减速系统的总传动比  $i=n_a/n_0=1500/140=10.71$ .

选用三级圆柱齿轮减速器的展开式设置, 如图 5 所示, 由  $i=i_1i_2i_3=10.71$ , 选择各级传动比分别为高速级  $i_1=2$ , 中间级  $i_2=2.1$ , 低速级  $i_3=2.55$ .

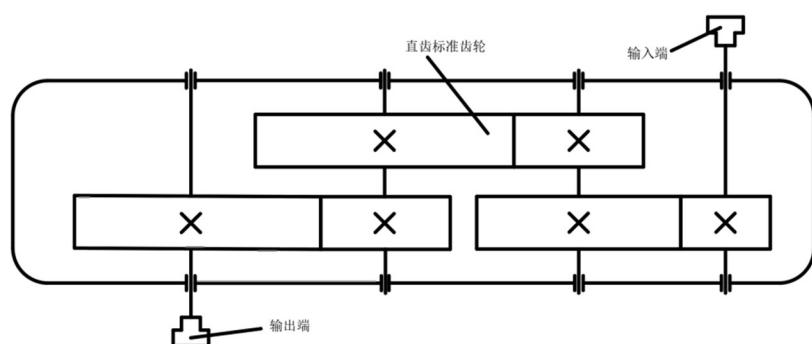


图 5 展开式三级齿轮减速器示意图  
Figure 5. Schematic Diagram of the Expanded Three-stage Gear Reducer

各参数如下表 1 所示.

表 1 各轴动力学参数表  
Table 1. Dynamic Parameters of Each Shaft

| 轴/参数 | 功率 $P(W)$ | 转矩 $T(N\cdot mm)$ | 转速 $n(r/min)$ | 传动比 $i$ |
|------|-----------|-------------------|---------------|---------|
| 电机轴  | 10        | 62.5              | 1500          | 1       |
| 输入轴  | 9.6       | 125               | 750           | 2       |
| 中间轴  | 9.2       | 262.5             | 357           | 2.1     |
| 输出轴  | 8.8       | 669               | 140           | 2.55    |

选择齿轮为直齿圆柱齿轮传动; 因机器人移动速度不快且为一般工作, 故选择精度等级为 7 级; 齿轮材料选择为小齿轮 40Cr (调质), 以及大齿轮 45 钢 (调质). 高速级选小齿轮齿数  $z_1=12$ , 大齿轮齿数  $z_2=12\times 2=24$ , 中间级选小齿轮齿数  $z_1=13$ , 大齿轮齿数  $z_2=13\times 2.1=27$ , 低速级选小齿轮齿数  $z_1=13$ , 大齿轮齿数  $z_2=13\times 2.55=33$ , 如表 2 所示.

表2 各级齿轮参数表  
Table 2. Parameters of Gears at All Levels

| 齿轮/参数  | 模数 $m$ | 齿数 $z$ | 分度圆直径 $d(\text{mm})$ | 齿宽 $B(\text{mm})$ | 中心距 $a(\text{mm})$ |
|--------|--------|--------|----------------------|-------------------|--------------------|
| 高速级小齿轮 | 0.5    | 12     | 6                    | 6.5               | 9                  |
| 高速级大齿轮 | 0.5    | 24     | 12                   | 5.4               | 9                  |
| 中间级小齿轮 | 0.6    | 13     | 7.8                  | 8.4               | 12                 |
| 中间级大齿轮 | 0.6    | 27     | 16.2                 | 7                 | 12                 |
| 低速级小齿轮 | 0.7    | 13     | 9.1                  | 9.8               | 16.1               |
| 低速级大齿轮 | 0.7    | 33     | 23.1                 | 8.2               | 16.1               |

## 2.2 清扫模块的选型与尺寸计算

对于清扫机器人的边刷电机, 要求其转速偏低, 对转矩没有过多要求。故选用直流有刷电机 JL-520, 额定功率 4.2W, 额定电压 12V, 额定电流 350mA, 额定转速 4897 转, 额定转矩 5.292N mm, 选择减速齿轮组减速比 20:1, 输出轴转速 245 转, 满足使用要求。

电机的转速  $n_a = 4897 \text{ r/min}$ .

输出的转速  $n_0 = 245 \text{ r/min}$ .

减速系统的总传动比  $i = n_a/n_0 = 4897/245 = 20$ .

选用二级圆柱齿轮减速器的展开式设置, 由  $i = i_1 i_2 = 20$ , 如图 6 所示, 选择各级传动比分别为高速级  $i_1 = 4$ , 低速级  $i_2 = 5$ .

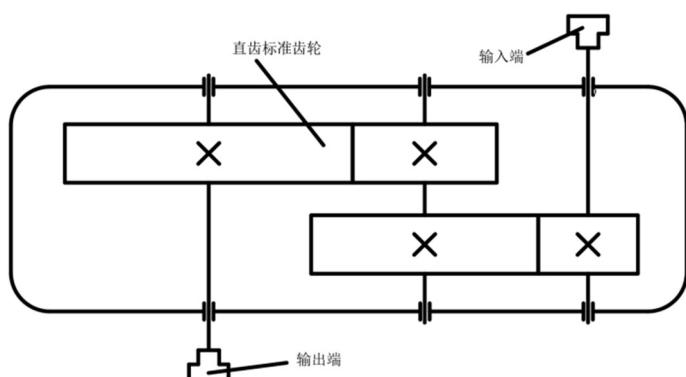


图 6 展开式两级齿轮减速器示意图

Figure 6. Schematic Diagram of Two-stage Gear Reducer with Expansion Design

各参数如下表 3 所示.

表3 各轴动力学参数表  
Table 3. Dynamic Parameters of Each Shaft

| 轴/参数 | 功率 $P(\text{W})$ | 转矩 $T(\text{N}\cdot\text{mm})$ | 转速 $n(\text{r}/\text{min})$ | 传动比 $i$ |
|------|------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------|
| 电机轴  | 4.2              | 5.29                           | 4897                        | 1       |
| 输入轴  | 4                | 21.17                          | 1224                        | 4       |
| 输出轴  | 3.8              | 105.85                         | 245                         | 5       |

选择齿轮为直齿圆柱齿轮传动; 选择精度等级为 7 级; 齿轮材料选择为小齿轮 40Cr (调质), 以及大齿轮 45 钢 (调质). 高速级选小齿轮齿数  $z_1=10$ , 大齿轮齿数  $z_2=10\times 4=40$ , 低速级选小齿轮齿数  $z_1=11$ , 大齿轮齿数  $z_2=11\times 5=55$ , 如表 4 所示.

表4 各级齿轮参数表  
Table 4. Parameters of Gears at All Levels

| 齿轮/参数  | 模数 $m$ | 齿数 $z$ | 分度圆直径 $d(\text{mm})$ | 齿宽 $B(\text{mm})$ | 中心距 $a(\text{mm})$ |
|--------|--------|--------|----------------------|-------------------|--------------------|
| 高速级小齿轮 | 0.5    | 10     | 5                    | 5.4               | 12.5               |
| 高速级大齿轮 | 0.5    | 40     | 20                   | 4.5               | 12.5               |
| 低速级小齿轮 | 0.5    | 11     | 5.5                  | 6                 | 16.5               |
| 低速级大齿轮 | 0.5    | 55     | 27.5                 | 5                 | 16.5               |

## 2.3 吸尘模块的选型与尺寸计算

### 2.3.1 风机的选型

风机选择型号为 MI-VX20HM0K1 的小型无刷电机高速涡轮风机, 可调速, 最大功率为 25W, 工作电压 16V, 电流 1.6A, 转速 16600 转.

### 2.3.2 滚刷电机与减速器的选型与计算

对于清扫机器人的滚刷电机, 要求其转速高, 转矩大, 配合吸尘风机完成吸尘任务. 故选用直流无刷电机, 额定功率 24W, 额定电压 12V, 额定电流 2A, 额定转速转, 额定转矩 39.2N mm, 选择减速齿轮组减速比, 输出轴转速转, 满足使用要求.

电机的转速  $n_a = 6000 \text{ r/min}$ .

输出的转速  $n_0 = 1490 \text{ r/min}$ .

减速系统的总传动比  $i = n_a/n_0 = 6000/1490 = 4.025$ .

选用二级圆柱齿轮减速器的展开式设置, 如图 5 所示, 由  $i = i_1 i_2 = 4.025$ , 选择各级传动比分别为高速级  $i_1 = 1.75$ , 低速级  $i_2 = 2.3$ .

各参数如下表 5 所示.

表5 各轴动力学参数表  
Table 5. Dynamic Parameters of Each Shaft

| 轴/参数 | 功率 $P(\text{W})$ | 转矩 $T(\text{N}\cdot\text{mm})$ | 转速 $n(\text{r/min})$ | 传动比 $i$ |
|------|------------------|--------------------------------|----------------------|---------|
| 电机轴  | 24               | 39.2                           | 6000                 | 1       |
| 输入轴  | 23.04            | 68.6                           | 3429                 | 1.75    |
| 输出轴  | 21.12            | 157.78                         | 1490                 | 2.3     |

选择齿轮为直齿圆柱齿轮传动; 选择精度等级为 7 级; 齿轮材料选择为小齿轮 40Cr (调质), 以及大齿轮 45 钢 (调质). 高速级选小齿轮齿数  $z_1=12$ , 大齿轮齿数  $z_2=12 \times 1.75 = 21$ , 低速级选小齿轮齿数  $z_1=13$ , 大齿轮齿数  $z_2=13 \times 2.3 = 29.9$ , 取 30, 如表 6 所示.

表6 各级齿轮参数表  
Table 6. Parameters of Gears at All Levels

| 齿轮/参数  | 模数 $m$ | 齿数 $z$ | 分度圆直径 $d(\text{mm})$ | 齿宽 $B(\text{mm})$ | 中心距 $a(\text{mm})$ |
|--------|--------|--------|----------------------|-------------------|--------------------|
| 高速级小齿轮 | 0.5    | 12     | 6                    | 6.5               | 8.25               |
| 高速级大齿轮 | 0.5    | 21     | 10.5                 | 5.4               | 8.25               |
| 低速级小齿轮 | 0.5    | 13     | 6.5                  | 7                 | 10.75              |
| 低速级大齿轮 | 0.5    | 30     | 15                   | 5.9               | 10.75              |

## 2.4 电池的选型

电池选择型号为 P2149-452P-MMBK 的可充式锂离子电池组, 标准电压为 14.4V, 容量为 9800mAh, 续航时间可达 2 小时.

## 3 结束语

本文主要的研究内容是进行一款清扫机器人的结构设计与计算, 其主要应用场景为室内家用. 清扫机器人整体由组成结构的机械部件和控制系统两部分组成. 按内外结构分, 外部结构包括外壳, 底盘, 清扫刷, 车轮, 内部结构包括灰尘盒, 吸尘风机, 电池和单片机控制系统等. 该机器人结构简单, 清扫能力强, 智能化程度较高, 市场应用前景广阔 [6].

## 参考文献

- [1] 庄子棟, 方嘉炜, 黃慶典, 等. 玻璃清洁机器人的研究和应用分析 [J]. 科技与创新, 2019(14):148-149.
- [2] 张婵, 朱琳, 韩谦, 等. 光伏清洁机器人的设计与清洁特性 [J]. 新型工业化, 2020, 10(4):82-84,103.
- [3] 龚航. 自主清扫机器人的局部路径规划与轨迹跟踪控制研究 [D]. 北京邮电大学, 2023.
- [4] 周亦瞿, 沈芳, 谷玉之, 瞿畅. 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.
- [5] 王冠杰, 邵千钧, 梁冬泰, 等. 基于 ADMAS 的光伏清洁机器人结构设计与分析 [J]. 计算机仿真, 2019, 36(8):342-347.
- [6] 时光升, 董慧芳, 杨佳宾, 王海波, 席盈盈, 王明鑫, 胡健. 一种高层建筑楼梯清扫机器人的结构设计 [J]. 科技风, 2022, (36):7-9.

## Reference

- [1] Zhuang Zhaoseng, Fang Jiawei, Huang Caizheng, et al. Research and Application Analysis of Glass Cleaning Robot [J]. Science and Technology Innovation, 2019(14): 148-149.
- [2] Zhang Chan, Zhu Lin, Han Qian, et al. Design and Cleaning Characteristics of Photovoltaic Cleaning Robot [J]. New Industrialization, 2020, 10(4): 82-84, 103.
- [3] Gong Hang. Research on Local Path Planning and Trajectory Tracking Control of Autonomous Cleaning Robot [D]. Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [4] Zhou Yiqiu, Shen Fang, Gu Yuzhi, Qu Chang. Design of Automatic Line Change Cleaning Robot for Photovoltaic Modules [J]. Mechanical Engineer, 2024, (02): 58-61+66.
- [5] Wang Guanjie, Shao Qianjun, Liang Dongtai, et al. Structural Design and Analysis of Photovoltaic Cleaning Robot Based on ADMAS [J]. Computer Simulation, 2019, 36(8): 342-347.
- [6] Gao Shizeng, Dong Huifang, Yang Jiabin, Wang Haibo, Xi Yingying, Wang Mingxin, Hu Jian. A Structural Design of Stair Cleaning Robot for High-rise Buildings [J]. Science and Technology Wind, 2022, (36): 7-9.