

家庭卫士智能管家机器人结构设计与分析



胡延杰, 王月华*, 李晓骞, 魏宗杰, 李潇, 杨楠, 郭俊铄, 胡杰羽

临沂大学机械与车辆工程学院, 山东临沂 276000

摘要: 随着科技的进步和 AI 智能的发展, 单纯的清扫已不在是人们对家庭清洁机器人的唯一需求, 基于居家生活环境结合智能 AI 控制的多功能管家机器人家庭卫士成为了新的研究方向。通过对现有家用清洁机器人的分析总结, 市场对清洁机器人的要求是尽短的时间高效的完成对地面的清洁工作, 但清洁效率的提高会严重影响机器人结构的使用寿命。为此在完成家用清扫机器人结构设计的同时, 考虑对关键零部件进行刚度计算和静力学分析。通过行走、清扫和吸尘装置的结构设计保证机器人可以通过移动完成清扫、吸尘等功能, 利用 AI 智能管家功能对机器人的路径规划, 提高机器人的清洁效率。通过对传动机构中齿轮和传动杆的刚度计算和静力学分析验证设计的可行性, 以及对后期机器人的制造进行结构优化和材料选择提供技术指导。将 AI 智能控制与机器人结构设计相结合, 不断优化机器人性能, 以确保机器人在高效完成清洁任务的同时, 具备较长的使用寿命, 满足人们对家庭清洁机器人的需求。

关键词: 管家机器人; 家庭卫士; 智能家居; Solidworks 三维建模; 静力学分析

DOI: [10.57237/j.mse.2024.02.002](https://doi.org/10.57237/j.mse.2024.02.002)

Structural Design and Analysis of Home Guard Intelligent Housekeeper Robot

Hu Yanjie, Wang Yuehua*, Li Xiaoqian, Wei Zongjie, Li Xiao, Yang Nan, Guo Junshuo, Hu Jieyu

School of Mechanical and Vehicle Engineering, Linyi University, Linyi 276000, China

Abstract: With the progress of science and technology and the development of AI intelligence, simple cleaning is no longer the only demand for home cleaning robots. The multifunctional housekeeper robot home guards based on home living environment and intelligent AI control have become a new research direction. Based on the analysis and summary of the existing household cleaning robots, the market demand for cleaning robots is to finish cleaning the ground efficiently in the shortest time, but the improvement of cleaning efficiency will seriously affect the service life of the robot structure. Therefore, when the structural design of household cleaning robot is completed, the stiffness calculation and static analysis of key components are considered. Through the structural design of walking, cleaning and vacuuming devices, the robot can complete cleaning and vacuuming functions by moving, and the path planning of the robot is made by using the AI intelligent housekeeper function to improve the cleaning efficiency of the robot. Through the stiffness calculation and static analysis of the gear and transmission rod in the transmission mechanism, the feasibility of the design is verified, and the technical

基金项目: 临沂大学大学生创新创业训练计划项目资助 (No. X202310452272).

*通信作者: 王月华, wangyuehua@lyu.edu.cn

guidance is provided for the structural optimization and material selection of the later robot manufacturing. Combining AI intelligent control with robot structure design, the robot performance is continuously optimized, so as to ensure that the robot has a long service life while completing cleaning tasks efficiently and meet people's demand for home cleaning robots.

Keywords: Housekeeper Robot; Home Guard; Smart Home; Solidworks 3D Modeling; Static Analysis

1 引言

随着生活水平的提高，人们对生活品质有了更高的追求。一个干净、整洁的居住环境不仅能够带来视觉上的享受，还能提升居住者的心情和幸福感[1]。因此，人们越来越注重家庭清洁，希望通过保持居家环境的卫生和整洁来提高生活质量。清洁的居家环境能够有效减少细菌、病毒等微生物的滋生，降低家庭成员患病的风险[2]。生活节奏的加快也促使人们更加依赖家庭清洁机器人等智能家居设备。这些设备能够自主完成清洁任务，节省人们的时间和精力，让人们有更多的时间去享受生活、陪伴家人或追求个人兴趣[3]。

现有的清洁机器人作为一种智能家居设备，已经在很多家庭中得到应用。通过搭载传感器和智能算法，自主感知周围环境并进行有效的清洁工作[4]。根据实际情况调整清扫路径，确保每处都得到彻底清洁。不仅如此还能够轻松应对各种类型的地板和地毯，配备多个刷头和吸尘器，具备高吸力和高效过滤功能，可以彻底清除地板上的细小灰尘和杂物[5]。在自动进行清洁工作，无需人工参与，从而节省了大量的时间和精力。人们可以设置机器人在特定时间进行清洁，例如离家后或家庭成员睡觉期间，回到家即可享受干净的环境[6]。一些高端清洁机器人还具备智能地图绘制功能，能够了解家里的每个角落，并保存清洁路径，以便未来更加高效地进行清洁。但是其缺点也显而易见，尽管清洁机器人可以自动清扫地面，但其清扫效果可能不如人工清扫彻底[7]。例如对于一些顽固污渍或特定区域的清洁，可能需要人工进行辅助或二次清洁。其次清扫范围受到其设计和电池寿命的限制。对于较大的房间或复杂的地形，机器人可能无法覆盖到每一个角落，导致清洁效果不佳[8]。与传统的清洁工具相比，清洁机器人的价格通常较高。对于一些家庭来说，这可能构成一定的经济负担。此外，机器人的维护和保养也需要一定的费用，例如更换滤网和清洁刷头等。部分清洁机器人在工作时可能会产生一定的噪音，影响人们的办公等[9]。

1956 年被视为人工智能的元年，这一时期的代表性神经网络包括感知器、反向传播神经网络和 Hopfield 神经网络[10]。随后 AI 领域的研究逐渐深入，探索了各种算法和技术，为后续的快速发展奠定了基础。进入 21 世纪，特别是近年来，AI 技术被广泛应用于各个领域，如自动驾驶、智能家居、医疗健康等[11]。

本设计研究的是 AI 智能管家机器人，适用于城市家庭内部房屋的清洁工作。首先对 AI 智能管家机器人的总体方案及进行设计[12]，全面考虑到经济性、实用性和可行性。引入 AI 技术进行数据分析与优化，使其与普通清洁机器人有更快速地完成清洁任务，减少清洁时间和人力成本[13]。通过集成先进的传感器、算法和控制系统，能够实时感知和分析环境信息，实现自主导航、障碍物识别和路径规划。从而具备易于操作、安全可靠的特性，对其使用寿命得以延续[14]。其次对 AI 智能管家机器人的结构部分进行设计，包括行走装置，清扫装置、吸尘装置等。通过对 AI 智能管家机器人的关键结构和零部件进行详细的设计计算，使得 AI 智能管家机器人具备更强的结构性能和运动灵活性[15]，能够更好地适应各种环境和任务需求。能够保证 AI 智能管家机器人完成对家庭内部的任务。

2 智能管家机器人整体结构设计

在总体设计时，考虑到 AI 智能管家机器人的实用性、经济性和可行性，经过查阅相关资料和进行分析最终确认如下方案。本设计的 AI 智能管家机器人基本结构组成主要由机械结构及控制系统等部分，其中机械结构主要由吸尘装置、清洗装置、传动系统三个部分组成，外形使用圆形结构。AI 智能管家机器人由塑料外壳，底盘，两个驱动轮和一个万向轮组成。适合采用三轮移动方式，重心相对低，负载稳定并且中心位置变化细微。用差动轮实现差速转向，转向精度为机器人在工作中避障和路径规划奠定基础。如图 1 所示。

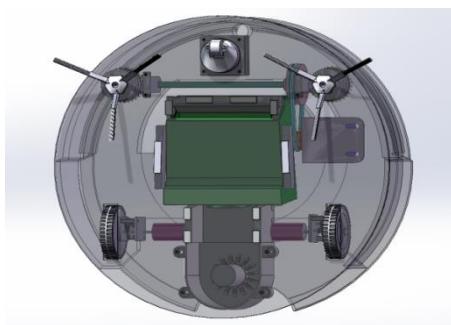


图 1 智能管家机器人整体结构图

2.1 管家机器人行走装置和清扫装置、吸尘装置的结构设计

驱动轮底盘行走结构主要由两个驱动轮和一个万向轮组成。两个驱动轮位于吸尘装置的两侧，万向轮位于两个边刷电机的中间位置。三个轮子呈三角形式分布，用于分担整机的重量。驱动轮底盘结构简图如图 2 所示。

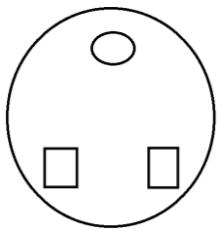


图 2 驱动轮底盘结构示意简图

因为 AI 智能管家机器人的零部件安装在行走结构上面，所以行走结构必须有足够的强度和大的承载能力。驱动轮依靠电机进行驱动，采用差速装置，可以实现差速配合，完成小距离情况下的转向操作，使其行走更加灵活，面对不同的室内布置可以保证机器的正常运转。行走装置结构图如图 3 所示。

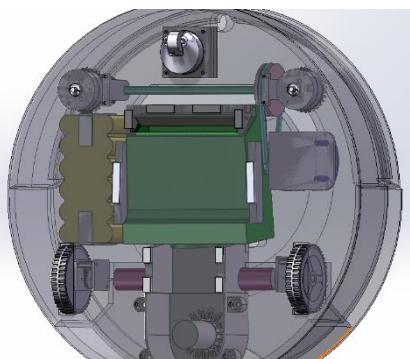


图 3 行走装置结构图

通过电动机通过伞齿轮传动控制动力轮转动来实现机器人的移动动作，根据控制方法的不同，机器人的转速或者方向也有所不同。

清扫装置由驱动电机进行驱动，带轮把动力传递给主轴两端的两个锥齿轮，边刷顶部安装一个大锥齿轮啮合。从而实现稳定的传输，而且锥齿轮所占的体积很小，可以有效地节约吸尘器机器人的内部空间。

小带轮由电机带动，小带轮上的动力传动到主轴上从而将主轴上的两个锥齿轮带动，在大锥齿轮上的传动轴带动两旁的边刷旋转，完成对地面的清洁。边刷清扫装置布置在万向轮的两侧。如图 4 所示为清扫装置结构图。

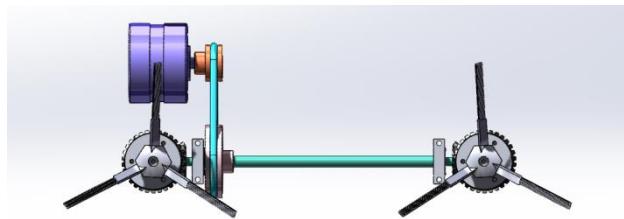


图 4 清扫装置结构图

吸尘装置包括收集装置，收集装置位于其中间位置，负责收集由吸尘装置收集到的尘土。

吸尘装置直接影响清扫的效率和质量，它位于 AI 智能管家机器人内部两个驱动轮的中间位置。本设计将风扇安装在收集装置的上部，并在风扇上覆盖一个薄壁腔，薄壁腔留有气孔。收集装置上部开两个长方形孔并用隔尘罩覆盖。通过风扇的旋转带动收集装置内的空气，又通过收集装置内的腔体吸附边刷清洁时引起的灰尘，在清洁过程中带有灰尘的空气通过吸尘装置将灰尘留在收集装置的灰尘盒中，过滤后的空气会通过吸尘装置上方的气孔排出，以期达到吸尘目的。吸尘装置结构图如图 5 所示。

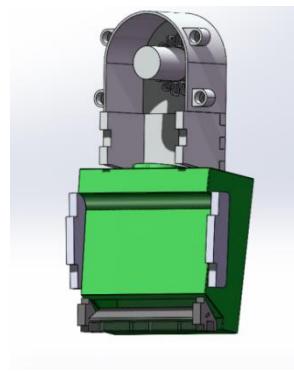


图 5 吸尘装置结构图

2.2 智能管家机器人关键零部件设计及其计算

考虑到工作时的应力变形等对各零部件的消耗磨损, 通过计算分析各零部件的受力等。

2.2.1 齿廓上啮合点刚度分析

齿轮的变形主要由剪切变形、接触变形和弯曲变形三部分组成。为简化刚度的计算, 忽略齿轮副的载荷分布不均匀、制造误差和安装误差。对于齿廓上某一啮合点[16], 矩形部分的弯曲变形 δ_{br} 计算公式为:

$$\delta_{br} = \frac{12F_n \cos^2 \phi}{b_m E s_c^3} [h_x h_r (h_x - h_r) + \frac{h_r^3}{3}] \quad (1)$$

式中, E 为弹性模量。

梯形部分的弯曲变形 δ_{bi} 计算公式为:

$$\begin{aligned} \delta_{hi} &= \frac{6F_n \cos^2 \phi}{b_m E s_j^3} \left[\frac{h_i - h_x}{h_i - h_r} \left(4 - \frac{h_i - h_x}{h_i - h_r} \right) - \right. \\ &\quad \left. 2 \& \ln \frac{h_i - h_x}{h_i - h_e} - 3 \right] (h_i - h_r)^3 \end{aligned} \quad (2)$$

剪切变形 δ_s 的计算公式为:

$$\delta_s = \frac{2(1+\nu)F_n \cos^2 \phi}{b_m E s_j} [h_i + (h_i - h_r) \ln \frac{h_i - h_x}{h_i - h_r}] \quad (3)$$

式中, ν 为泊松比。

接触变形 δ_p 的计算公式为:

$$\delta_p = \frac{4F_n(1-\nu^2)}{\pi b_m E} \quad (4)$$

齿根基体弹性倾斜变形 δ_g 为:

$$\delta_g = \frac{24F_n h_x \cos^2 \phi}{\pi b_m E s_f^2} \quad (5)$$

当一对轮齿啮合时, 某一啮合点沿着啮合线的总变形为两齿在该啮合点的变形之和, 即:

$$\delta_\Sigma = \delta_p + \sum_{i=1}^2 (\delta_{bri} + \delta_{bti} + \delta_{si} + \delta_{gi}) \quad (6)$$

直齿轮啮合过程中, 其接触迹线为平行于齿宽方向的无数条直线。直齿轮的重合度在 1~1.981 之间, 单双齿交替啮合。

对齿轮啮合过程进行受力分析, 其中, 喷合力为 F_n , 其在径向、切向和轴向上的分力分别为 F_r 、 F_t 和 F_a , 是喷合力在 x 轴、 y 轴、 z 轴上的分力, 计算公式为:

$$\begin{cases} F_x = F_r = F_n \sin \alpha_n \\ F_y = F_t = F_n \cos \alpha_n \cos \beta \\ F_z = F_a = F_n \cos \alpha_n \sin \beta \end{cases} \quad (7)$$

根据牛顿第二定律, 对斜齿轮建立其 6 自由度动力学方程。对于主动齿轮有:

$$\begin{cases} m_p \ddot{x}_p + c_{p\alpha} \dot{x}_p + k_{p\alpha} x_p + F_n \sin \alpha = 0 \\ m_p \ddot{y}_p + c_{p\alpha} \dot{y}_p + k_{p\alpha} y_p + F_n \cos \alpha \cos \beta = 0 \\ I_p \ddot{\theta}_p + T_p + c_p \dot{\theta}_p + k_{ip} \theta_p - F_n \cos \beta r_{bp} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

2.2.2 拓扑修形齿轮三维模型

在 SolidWorks 软件中采用 Scan to 3D 插件, 输入 .txt 格式点云数据文件, 生成齿轮齿面。

根据斜齿轮齿面方程, 建立齿面模型, 得到齿面上拓扑点的笛卡尔坐标数据。斜齿轮齿面上拓扑点 x 、 y 、 z 参数方程为:

$$r(\phi_x, \varphi_x) = \begin{cases} x(\phi_x, \varphi_x) = r_k [\cos(\delta + \phi_x + \varphi_x) + \\ \phi_x \sin(\delta + \phi_x + \varphi_x)] \\ y(\phi_x, \varphi_x) = r_k [\sin(\delta + \phi_x + \varphi_x) - \\ \phi_x \cos(\delta + \phi_x + \varphi_x)] \\ z(\phi_x, \varphi_x) = r_k \varphi_x / \tan \beta_b \end{cases} \quad (9)$$

齿面拓扑点沿 x 、 y 、 z 方向的法向量分量公式为:

$$\begin{cases} n_x = pr_b u \sin(\sigma + u + \theta) \\ n_y = -pr_b u \cos(\sigma + u + \theta) \\ n_z = r_b^2 u \end{cases} \quad (10)$$

2.2.3 精度分析

精度分析揭示了工作空间内几何误差源对末端位姿误差的影响情况, 是后续精度综合的基础。基础精度:

$$\Delta\theta = K\xi \quad (11)$$

$$\xi = E_2(K^T K_{,\kappa}) \quad (12)$$

根据 $\Delta\theta = K\xi$ 得:

$$\Delta\theta^2 = \xi^T K^T K \xi = \sum_{\kappa=1}^9 \sum_{k=1}^9 \left(\sum_{g=1}^3 K_{k,\kappa} K_{k,h} \right) \xi_\kappa \xi_h \quad (13)$$

式中, $K_{k,\kappa}$ 为矩阵 K 的第 k 行第 g 列的元素。

假设 $\xi \sim N(0, \sigma^2(\xi))$, 则 $\Delta\theta \sim N(0, \sigma^2(\Delta\theta))$, $\Delta\theta$ 的方差可表示为:

$$D(\Delta\theta) = E(\Delta\theta^2) = \sum_{g=1}^9 \sum_{k=1}^3 K_{k,g}^2 E(\xi_g^2) \quad (14)$$

得 $\Delta\theta$ 的标准差为:

$$\sigma(\Delta\theta) = \sqrt{D(\Delta\theta)} = \sqrt{\sum_{g=1}^9 \sum_{k=1}^3 K_{k,g}^2 \sigma^2(\xi_g)} \quad (15)$$

$$\sigma_{ax} &= \frac{1}{2}(\sigma_{x\max} - \sigma_{min}) \quad (29)$$

$$\sigma_{ay} &= \frac{1}{2}(\sigma_{y\max} - \sigma_{min}) \quad (30)$$

2.2.4 传动杆校核

几何参数

传动杆[17]体总截面面积 F, f_0 传动轴截面:

$$F = BH - \pi R^2 - 2(B - b)(a - R) - \pi d^2/4 \quad (16)$$

$$I_x = \frac{1}{12}[BH^3 - (B - b)h^3] - \left(\frac{\pi}{64}d^4 + a^2f\right) \quad (17)$$

$$I = \frac{1}{12}[BH^3 - h(B - b)^3] - \frac{\pi}{64}d^4 \quad (18)$$

起动工况时传动杆强度

传动杆单纯压缩时:

$$\sigma = \frac{P_z}{F_{\min}} \quad (19)$$

弯曲时与压缩时的联合作用(朗肯公式):

$$\sigma_x = P_z \left(\frac{1}{F} + 0.000526 \frac{L^2}{I_x} \right) \quad (20)$$

$$\sigma_y = P_z \left(\frac{1}{F} + 0.000526 \frac{L_1}{4I_y} \right) \quad (21)$$

额定工况时的强度效验

所受最大压力(上止点时):

$$P_{cmax} = p_z \cdot F_p - \frac{G_p + G_{cj}}{g} R \omega^2 (1 + \lambda) \quad (22)$$

传动杆所受最大应力(压缩或弯曲的联合作用):

$$\sigma_{y\max} = P_{cmax} \left(\frac{1}{F} + 0.000526 \frac{L_1^2}{4I_y} \right) \quad (23)$$

$$\sigma_{y\max} = P_{cmax} \left(\frac{1}{F} + 0.000526 \frac{L_1^2}{4I_y} \right) \quad (24)$$

传动杆所受最小应力(受拉):

$$P_{j\max} &= \frac{G_p + G_{cj}}{g} R \omega^2 (1 + \lambda) \quad (25)$$

$$\sigma_{min} &= \frac{P_{j\max}}{F} \quad (26)$$

传动杆平均应力:

$$\sigma_{mx} &= \frac{1}{2}(\sigma_{x\max} + \sigma_{min}) \quad (27)$$

$$\sigma_{my} &= \frac{1}{2}(\sigma_{y\max} + \sigma_{min}) \quad (28)$$

传动杆应力幅:

传动杆安全系数:

$$n = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_a + \psi_\varphi \sigma_m} \quad (31)$$

$$n_x = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_{ax} + \psi_\varphi \sigma_{mx}} \quad (32)$$

$$n_y = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_{ay} + \psi_\sigma \sigma_{ny}} \quad (33)$$

综上所述分析可得, 对于正常工作情况下, 各零部件的受力变形等在正常范围, 随着受力载荷等增加, 其零部件的疲劳寿命计算结果与预期结果趋于一致。

3 智能管家机器人核心部件静力学分析

本文运用 Solid Works 软件的 Simulation 对智能扫地机器人核心部件结构进行了负载状态下的静力学特性进行分析, 检测智能管家机器人在工作时的受力情况, 得出关键零部件的应变及抗压强度等。

3.1 直锥齿轮结构静力学分析

在负载的情况下, 得出上下直锥齿轮分担大的载荷, 则可得出作用扭矩, 可以得到上下直锥齿轮的相互啮合图, 如图 6 所示。



图 6 上下直锥齿轮的相互啮合

如图 7 所示, 在施加负载的情况下, 对上下直锥齿轮结构的各方向应力变形进行静力分析。

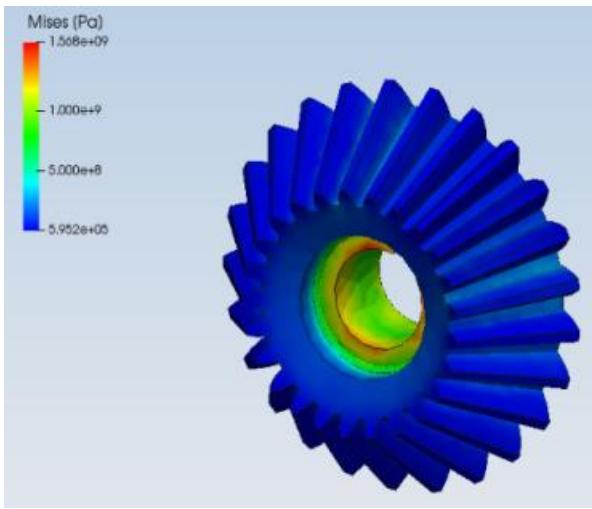


图 7 直锥齿轮应力变形

3.2 传动轴结构静力学分析

在约束和附加载荷的情况下, 传动轴的最大应力出现在轴端位置得到传动轴应力变形图, 如图 8 所示:

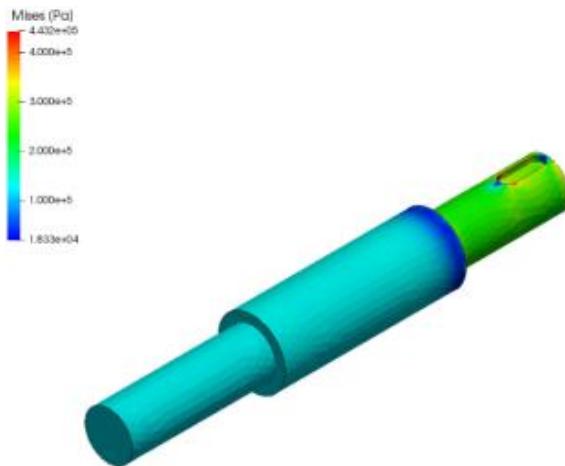


图 8 传动轴应力变形图

分析结果表明, 齿轮、转动轴等主要零部件结构强度等满足需求, 得到齿轮、传动轴的应力变形图, 有助于部分结构和强度的检验和改进。

4 结语

本文在扫地机器人的基础上, 提出的 AI 智能管家机器人不仅提升了家庭清洁效率, 也提供了便捷的生活方式。管家机器人将依靠 AI 技术不断智能化、多功能化, 将 AI 智能控制与机器人结构设计相结合, 不断优化机器人性能, 以确保机器人在高效完成清洁任务

的同时, 具备较长的使用寿命。为了兼顾清洁效率和机器人使用寿命, 在完成家用清扫机器人结构设计的同时, 对关键零部件进行刚度计算和静力学分析, 以确保机器人在执行清扫、吸尘等功能时, 能够稳定、可靠地工作。同时, 为后期的机器人制造提供结构优化和材料选择的科学依据。

参考文献

- [1] 张殿礼, 维拉. 你的智能机器人“管家” [J]. 城市开发, 2016(20): 36-37.
- [2] 苏晨, 彭欣颖. 智能管家机器人运动轨迹自动化控制模型设计 [J]. 制造业自动化, 2020(12): 143-146+151.
- [3] 孙秀秀. 智能管家机器人 [J]. 计算机产品与流通, 2019(10): 138.
- [4] 程丽霞. 智能扫地机器人系统设计 [J]. 机械工业标准化与质量, 2016 (9): 27-29.
- [5] 尹勇. 智能语音管家机器人的设计 [J]. 科技创新与应用, 2013(21): 47.
- [6] 黄巧巧, 李敏, 王献合. 基于互联网^{⁺的智能管家机器人的设计 [J]. 电子技术, 2020(02): 88-89.}
- [7] 张洪. 基于 Sphinx 语音识别的家庭管家机器人的设计 [D]. 2018.
- [8] Z. Wang, H. Xie, Z. Lin, TWen, C. Guo and H. Chen, "The Robot Path Planning Algorithm In Indoor Environment," IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2020, pp. 5350-5355.
- [9] 汪顺舟, 赵怀林, 郝旭耀, 李超. 智能管家机器人家电控制系统设计 [J]. 上海应用技术学院学报 (自然科学版), 2016(02): 170-174+188.
- [10] 杨雨洋. 智能扫地机器人 [J]. 科学启蒙, 2022(Z2): 100.
- [11] 王磊, 王前程, 王小妮, 江连海, 江艳飞, 胡菡静. 互联网 + 智能管家机器人的设计与实现 [J]. 信息记录材料, 2018(01): 57-59.
- [12] 郝迪迪, 陆子睿, 汤懿. 智能管家机器人设计 [J]. 设计, 2023, 36(18): 51+50.
- [13] 胡文峰, 王昊, 陈颖, 王鑫, 刘佳莹, 林盛昌. 基于 STM32F407 单片机的社区智能管家机器人设计 [J]. 无线互联科技, 2021(19): 51-52.
- [14] 屈世龙, 杨瑞青, 张庆晨, 张善群, 韩浩, 王玉飞. 智能教室管家机器人设计与研究 [J]. 装备制造技术, 2022, No. 329(05): 87-89+93.

- [15] B. Luo, Y. Huang, F. Deng, W. Li and Y. Yan, "Complete Coverage Path Planning for Intelligent Sweeping Robot," 2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC), 2021, pp. 316-321.
- [16] 田晓青, 李正兴, 韩江, 等. 基于齿轮齿变啮合过程的修形齿面设计方法研究 [J]. 机械传动, 2023, 47(2): 70-78.
- [17] 吴洁, 周瑞强, 崔仕武. 机械设计基础课程设计. 东北大学出版社, 沈阳. 202. 全国普通高校“十三五”规划教材. 2018. 02. ISBN 978-7-5517-1792-2.