

# 智能环境感知四足巡检机器人设计与分析



卢元奎, 胡延杰, 张超, 刘佳佳\*, 张成雷, 李晓骞, 宋宝, 盛大钟, 盛国栋, 周逸飞, 尹德龙, 李昊原

临沂大学机械与车辆工程学院, 山东临沂 276000

**摘要:** 随着科学技术的不断革新, 智能机器人领域的研究和在未来的发展趋势一直以来备受外界关注。其中, 如何实现四足机器人在复杂多变的环境下顺利完成被交付的任务成为未来一直研究的主要方向。因此, 本设计以相关理论知识为基础, 设计一种能够在复杂环境下工作的智能环境感知小型四足机器人。本设计首先对四足机器人的研究发展现状和趋势进行了分析, 对设计的内容和达到的目标有了一定的了解。通过相关资料, 确定了四足机器人整体的设计方案。分别对四足机器人的机械结构进行设计, 在机械零部件结构设计完成之后, 对重要零部件进行了校核计算, 并对四足机器人相关零部件进行静力学分析。本设计的四足机器人通过简化设计实现了结构紧凑、简便, 对四足机器人的研究具有一定参考意义。

**关键词:** 四足机器人; 机构设计; 腿部结构; SolidWorks; 静力学分析

**DOI:** [10.57237/j.mse.2024.01.003](https://doi.org/10.57237/j.mse.2024.01.003)

## Design and Analysis of An Intelligent Environment-Aware Quadruped Inspection Robot

Lu Yuankui, Hu Yanjie, Zhang Chao, Liu Jiajia\*, Zhang Chenglei, Li Xiaoqian, Song Bao, Sheng Dazhong, Sheng Guodong, Zhou Yifei, Yin Delong, Li Haoyuan

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

**Abstract:** With the continuous innovation of science and technology, the research and future development trends of intelligent robots have been attracting much attention. Among them, how to realize the quadruped robots to complete the delivered tasks in complex and changing environments has become the main direction of research in the future. Therefore, this design is based on relevant theoretical knowledge to design an intelligent environment-aware small quadrupedal robot that can work in complex environments. This design firstly analyzes the current status and trend of the research and development of quadrupedal robots and has a certain understanding of the content of the design and the objectives to be achieved. Through relevant information, the overall design program of the quadruped robot is determined. The mechanical structure of the quadruped robot is designed separately, and after the design of the mechanical parts structure is completed, the important parts are calibrated and calculated, and the relevant parts of the quadruped robot are analyzed statically. The designed quadrupedal robot realizes the compact and simple structure

基金项目: 临沂大学大学生创新创业训练计划项目资助 (No. X202310452507), (No. X202310452272), (No. X202210452442).

\*通信作者: 刘佳佳, [liujiajia@lyu.edu.cn](mailto:liujiajia@lyu.edu.cn)

收稿日期: 2023-12-14; 接受日期: 2024-01-24; 在线出版日期: 2024-02-04

<http://www.mechscieng.com>

through simplified design, which is of certain reference significance to the research of quadrupedal robots.

**Keywords:** Quadruped Robot; Mechanism Design; Leg Structure; Solidworks; Hydrostatic Analysis

## 1 引言

随着技术的发展和需求的不断上升,四足机器人的发展迅速,其凭借着良好的性能,在安防巡逻、防疫保障、空间探索和无人完成任务等方面备受关注。[1]四足机器人通常有三种驱动方法:液压驱动、气压驱动、电力驱动。电动式传动具有很高的控制精度,但是所能承受的负荷很小;空气动力传动系统的非线性,使其控制困难;液压传动因其功率大而被广泛采用。[2]由于四足机器人具有适应复杂环境的能力,因此具有广泛的应用前景。[3]然而,四足机器人的发展还不成熟,大多数仍处于实验室的探索阶段。[4]

本设计的四足机器人可以负重,以便后续扩充安装其他元件。在设计上可以实现机器人的较为平稳的运行,使得该机器人可以承担一定的工作任务。[5]在以后的设计中,可以继续搭载视觉检测单元和其他传感器,可以通过手机、电脑等设备控制,便可使得机器人的应用性更强。[6]

自机器人出现至今,已有数十年的历史,并逐步由原始的示教复现向智能机器人的方向发展,与之相适应的技术也得到了快速的发展。[7]美国 GE 公司设计了一款能够在复杂环境下帮助士兵运输装备的机器人 Walking Truck。[8]

2005 年,波士顿动力公司研制了一种较为先进的四足机器人,被命名为 Big Dog 1st。[9]。2008 年,波士顿动力公司设计了第二代 Big Dog [10]。2010 年,Semini 在意大利理工学院高级机器人学系 Caldwell 的指导下,设计了液压驱动的四足机器人 HyQ [11]。北京理工大学于 2014 年开发出一款电动并联轮足机器人。“赤兔”是浙江大学和南江机器人技术研发中心在 2016 年的国际互联网大会上展示的一款四足机器人。[12]同时,一系列科技公司纷纷开始涉足四足机器人领域。[13]其中,宇树科技和杭州云深处科技等公司初露头角,宇树科技推出的莱卡狗具有较高的稳定性和较强的传动系统,能在行走时达到六个姿态的完全控制。[14]能在高低不平的道路上行走。[15]小米公司在 2021 年推出了自家首款仿生四足机器人“Cyber Dog”。[16]

## 2 四足巡检机器人整体结构设计

本文通过对国内外对四足机器人的研究,结合文献,对四足机器人的研究进展进行了综述。确定了四足机器人结构设计的重要参数,其中包括了机器人整体的结构尺寸、腿部结构的尺寸、机体结构的尺寸,以及对舵机的选择,以及相关零部件的选型和校核计算等。四足机器人机械结构的设计主要分为总体结构的设计,腿部结构的设计,机体结构的设计三部分。四足机器人的建模与优化,通过对四足机器人进行建模,可以对机器人装配时存在的干涉和尺寸等问题进行更正,并将其与已有的其他四足机器人展开对比和分析,以此来找出本设计存在的问题,进而对本设计的四足机器人进行优化,最后在在一定程度上达到本设计所要求的目标,实现一种有一定应用性的四足机器人的设计。如图 1 所示。

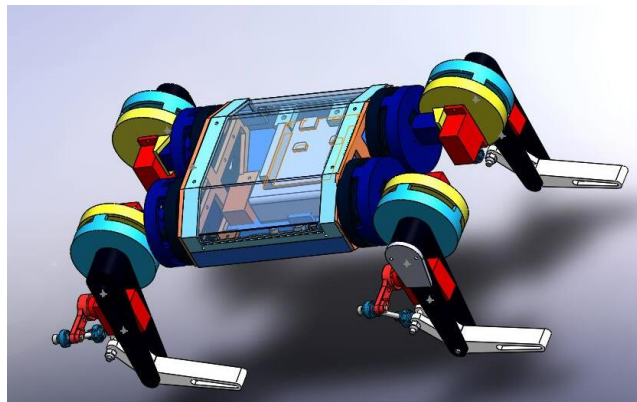


图 1 四足机器人整体结构图

### 2.1 四足机器人腿部和肩部结构设计

本设计腿部采用全肘式构型,虽然并联腿在受力上比串联腿更好,但是从腿部活动空间上考虑,本设计采用串联式,每条腿具有 2 个自由度,共 8 个自由度。采用模块化、对称式设计方案,分为前、中、后三个部分,腿部、肩部和机体结构可进行独立的拆装,以保证互换性,并且由于腿部是主要的受力部分,这样可以保证未来零件的更换与维修。

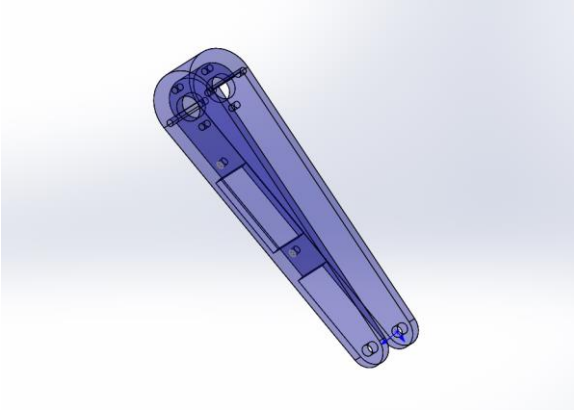


图2 腿部结构的结构图

本设计肩部装饰结构前后通用，以保证通用性，并且简化了 MIT 迷你猎豹的设计。肩部结构模仿 MIT 迷你猎豹的无刷电机的转动结构，通过特殊的结构实现外部的转子在运动时也在转动，具有一定的仿真性和装饰性。由于考虑到后续可以有 8 自由度更改为 12 自由度，故增加 4 组装饰结构，为了防止此时发生肩部结构和装饰结构在四足机器人运动衫发生干涉，通过调整装饰结构的间距即可。

考虑到四足机器人的性能，控制四足机器人的整体重量，方便后续材料加工，设计尽量采用薄壁结构，可以降低重量，壁厚 2-3mm，建立三维模型，以便后续可以直接进行 3D 打印。

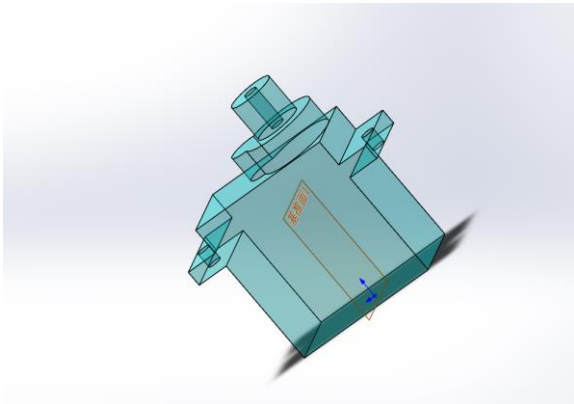


图3 肩部结构的结构图

机体选用长方形结构，只设计一定的孔位，以便后续安装电路板和各类模块，由于考虑到四足机器人整体的稳定性，采用对称式，中心大致保持在机体的中心位置。采用蓄电池进行供电，由于进行不设计具体电器件安装位置，只设计一定的孔位，因此为了确保足够的安装空间，所以机体相较于 MIT 猎豹四足机器人更厚。

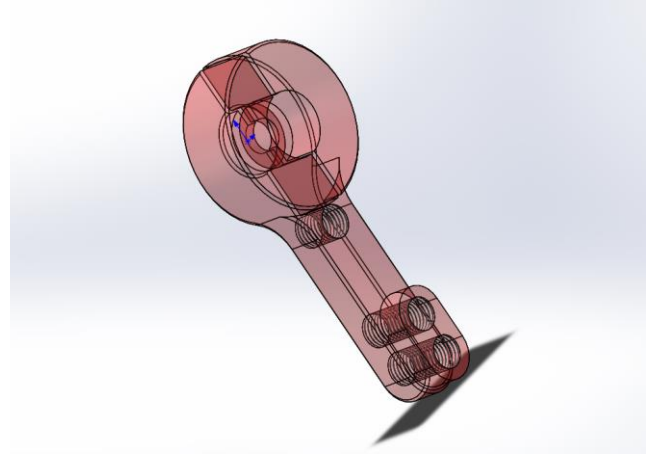


图4 舵尾摆件结构图

## 2.2 四足机器人核心部件设计计算

### 2.2.1 电动机输出端轴的校核计算

#### 1、计算轴的支撑反力

由力矩平衡方程可以计算水平面支撑反力得：

$$\frac{\pi d^3}{32}(1-v^4) \sim 0.1d^3(1-v^4) \left(v = \frac{d_0}{d}\right)$$

由力矩平衡方程可以计算出垂直面支撑反力得：

$$\frac{\pi d^3}{16}(1-v^4) = 0.2d^3(1-v^4)$$

#### 2、轴的弯矩图

图 5、图 6、图 7 分别为垂直面弯矩图、水平面弯矩图和合成弯矩图；

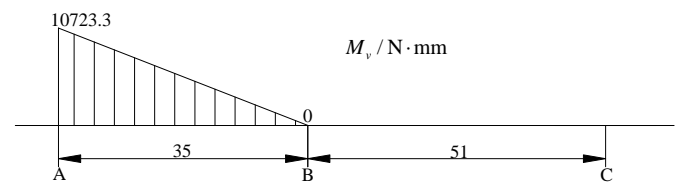


图5 垂直面弯矩图

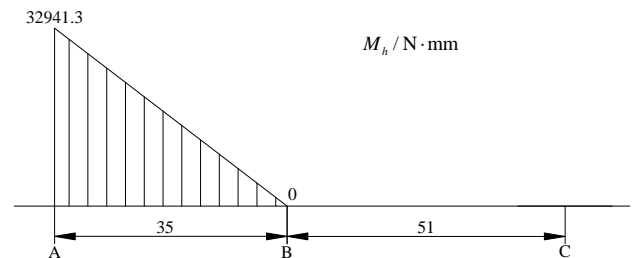


图6 水平面弯矩图

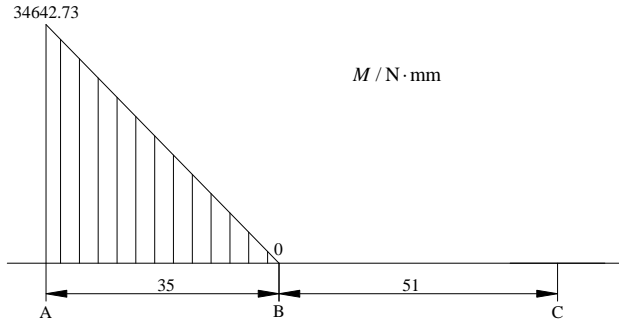


图 7 合成弯矩图

### 3、画轴的扭矩图

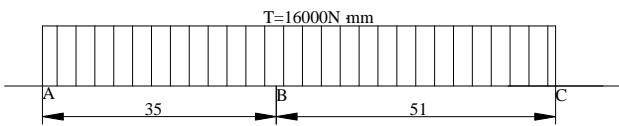


图 8 扭矩图

通过查阅手册可得许用应力为:

$$\frac{\pi d^3}{32} - \frac{bt(d-t)^2}{2d}$$

从而有折合系数为:

$$\frac{\pi d^3}{16} - \frac{bt(d-t)^2}{2d}$$

## 2.2.2 电机输出端轴轴承的寿命校核计算

本设计参考 MIT 猎豹四足机器人, 在大腿电机输出端设计有轴承, 此轴承选用深沟球轴承, 轴承以径向载荷为主, 即  $P = Fr$ 。从最不利的受力考虑, 计算出径向力:

$$\frac{\pi d^4 + bx_s(D-d)(D+d)^2}{16D}$$

可以得到转速为  $n \leq 52.62 \text{ r/min}$ , 进行间断工作。

所选用的轴承为 6704ZZ。

根据轴承参数确定基本额定载荷为:

$$\frac{\pi d^3}{32} - \frac{bt}{\frac{(d-t)^2}{d}}$$

确定当量动载荷:

$$\frac{\pi d^3}{32} (1 - 1.54 \frac{d_0}{d})$$

计算寿命: 因为有轻微的冲击, 所以选取载荷系数查手册可以确定得:

$$\frac{\pi d^4 + bx_s(D-d)(D+d)^2}{32D}$$

通过对设备的运行情况的分析, 得出了设备的期望寿命。因此, 选择的轴承满足了设备的使用要求。

## 2.2.3 连杆强度校核

### 1、确定连杆杆身的最小截面

(1) 由于连杆的杆身在交变载荷下工作, 所以其受到截面以上惯性、力的拉伸和压力的作用, 得知工况时的惯性力为:  $F = Ma$

其中,  $M$  是截面以上连杆的小头重量

### (2) 确定断面杆身的应力

#### ① 惯性力的拉伸在断面引起的应力

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma}{\beta \epsilon_\sigma} \sigma_\alpha + \psi_\sigma \sigma_\alpha}$$

#### ② 压缩力在断面引起的应力

$$S = \frac{S_\sigma S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \geq (s)$$

#### ③ 确定杆身断面的安全系数:

$$\sigma_H = Z_H Z_E \sqrt{\frac{KF_t}{d_1 b}} \times \frac{u+1}{u} \leq [\sigma_H]$$

其中,  $\delta H$  系数是材料在拉伸和压缩时的疲劳极限,  $[\delta H]$  疲劳极限的许用值, 得知是符合要求的。

### 2、确定杆身中间断面的强度

#### (1) 确定杆身中间断面的受力

$$P_j = -(m_\Pi + m_{m\Pi}) r \omega^2 (1 + \lambda)$$

$$P_{CK} = P_z + P_j$$

#### (2) 确定杆身第二断面应力

拉应力

$$\sigma_H = Z_H Z_E \sqrt{\frac{KF_t}{d_1 b \epsilon_a}} \times \frac{u+1}{u} \leq [\sigma_H]$$

#### ② 压缩力引起的应力

计算摆动平面弯曲时压缩和纵向弯曲引起的合应力

$$\sigma_F = \frac{KF_t}{bm} Y_{Fa} Y_{Sa} \leq [\sigma_F]$$

其中,  $K$  是连杆的长度,  $F_t$  是系数。

$$c = \frac{\sigma}{\pi^2 E} = 0.0002 \sim 0.0005$$

$$I_x = \frac{1}{12} [BH^3 - (B-b)h^3]$$

确定垂直摆动平面的应力

$$\sigma_{y\max} = \frac{P_{ck2}}{F_{cp}} (1 + c \frac{L_1^2}{4I_y} F_{cp})$$

其中,  $I_y$  是 Y 轴惯性力矩

$$I_y = \frac{1}{12} [HB^3 - h(B-b)^3]$$

其中,  $L_1$  是连杆的长度减连杆大小头孔半径之和。

$$\sigma_F = \frac{KF_t}{bm_n \varepsilon_a} Y_{Fa} Y_{Sa} Y_{\beta} \leq [\sigma_F]$$

确定中间断面的安全系数

$$n_{\sigma x} = \frac{2\sigma_{-12}}{\sigma_{n_{x\max}} - \sigma_{x\min} + \psi_{\sigma x} (\sigma_{\alpha_{x\max}} + \sigma_{\beta\min})}$$

$$n_{\sigma y} = \frac{2\sigma_{-12}}{\sigma_{n_{y\max}} - \sigma_{y\min} + \psi_{\sigma y} (\sigma_{\alpha_{y\max}} + \sigma_{\beta\min})}$$

得到  $[\eta] = 1.5 \sim 2.5$ , 是符合要求的。

### 3 四足机器人核心部件静力学分析

本文运用了 Solid Works 软件的 Simulation 对四足机器人核心部件结构进行了负载状态下的静力学特性进。

#### 3.1 肩部部件静力学分析

在约束和附加载荷的情况下, 肩部均匀分担荷载。选择最大载荷及其重力载荷, 对肩部进行静力学分析, 得到在承受一定载荷的条件下, 肩部应力变化图, 如图9所示。

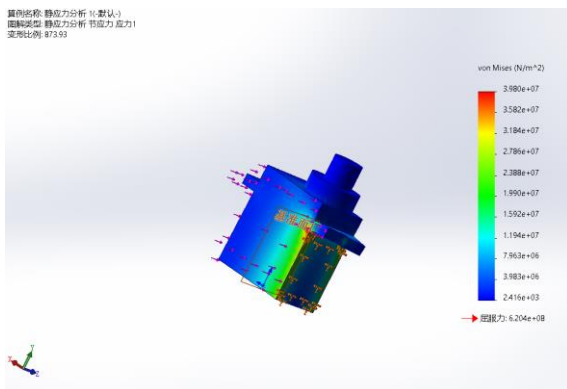


图9 肩部应力分析

如图 10 所示, 在施加负载的情况下, 对上凸轮结构的各方向应力变形进行静力分析, 确定接触点变形程度最大。

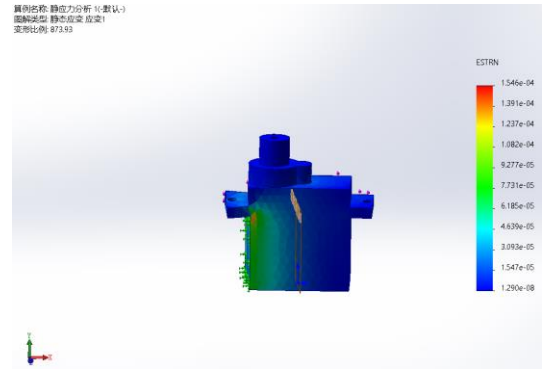


图 10 肩部应变分析

同样在负载下对肩部以下结构进行扭矩和静力分析, 确定扭矩造成的变形在肩部与机体连接处最大。

#### 3.2 腿部部件静力学分析

在负载的情况下, 腿部均匀分担载荷, 则可得出作用扭矩, 可以得到腿部的应力变形图, 如图 11 所示。

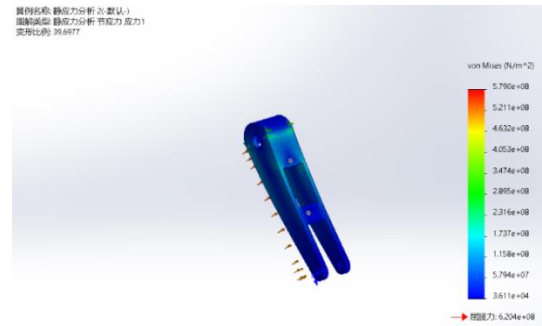


图 11 腿部应力变化分析

同样在负载下对腿部结构进行扭矩和静力分析, 确定扭矩造成的变形在足底处最大。

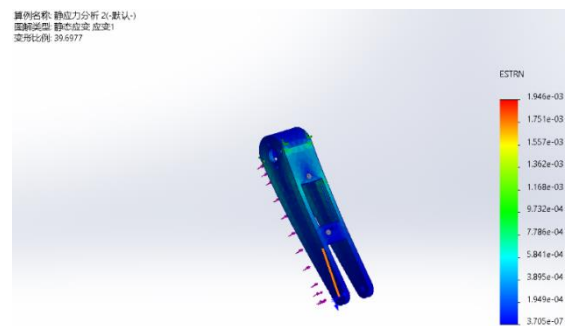


图 12 腿部应变分析



如图 12 所示，在施加负载的情况下，对腿部结构的各方向应力变形进行静力分析，确定接触点形变程度最大[14]。

3.3 舵尾摆件部件静力学分析

本文运用了 Solid Works 软件的 Simulation 对四足机器人核心部件结构进行了负载状态下的静力学特性进。

在施加了负载力和机器人自重的情况下，对机器人舵尾摆件应力变形情况进行分析。在静力学情况分析得出，在受载均匀分布情况下，舵尾摆件与整体的连接处最易发生应力变形。

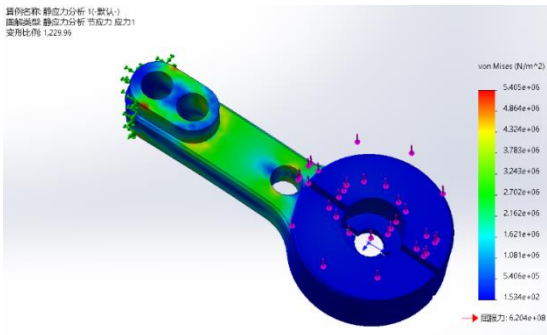


图 13 舵尾摆件应力分析

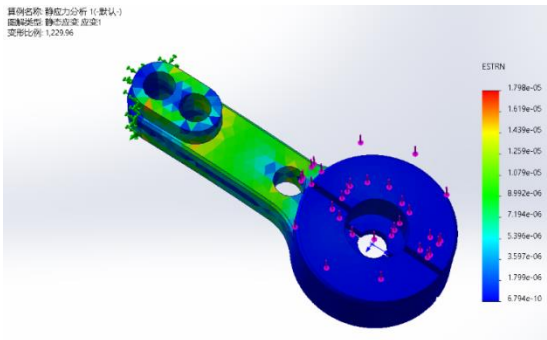


图 14 舵尾摆件应变分析

4 结语

本文设计一种智能环境感知四足巡检机器人，从结构紧凑和制造简便考虑，设计了一种能够平稳运行的四足机器人，对四足机器人的主要部件进行了校核和计算，并建立了四足机器人的三维模型，对四足机器人进行了机械结构的设计，并对其关键零件进行了

校核计算。对核心部件进行了静力学分析。

参考文献

[1] 魏玉虎, 张亮. 配电室轮式智能巡检机器人的智能升降结构总成: CN202110902339.0 [P]. CN115703229A [2023-12-14].

[2] 普子恒, 陈志刚, 史星涛, 等. 考虑合成电场影响的换流站直流场巡检机器人路径优化 [J]. 高压电器, 2023, 59(5): 178-184.

[3] 高正中, 张天航, 孙健, 等. 实验室安全巡检机器人设计与应用 [J]. 实验技术与管理, 2023, 40(1): 197-202.

[4] 周余, 吴功平, 杨松, 等. 巡检机器人塔上自主充电控制方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2023(3): 271-276.

[5] 张云珠, 王增光, 王元鹏, 等. 智能防爆巡检机器人检测炼化球罐液位高度的系统. CN202211250076.0 [2023-12-14].

[6] 公续银, 赵洪华, 鲁守银, 李沛然, 董茂起. 巡检机器人升降装置设计与分析 [J]. 制造业自动化, 2023, 45(3): 208-210.

[7] 叶俊杰, 郝亮超, 车红娟, 等. 六轮六驱火灾巡检机器人 [J]. 兵工自动化, 2023, 42(8): 86-90.

[8] 张博, 周红生. 基于 RL-APF 算法的巡检机器人避障研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(6): 7-10.

[9] 喻洋, 董明知. 光伏电站智能巡检机器人功能设计与实现 [J]. 电测与仪表, 2023, 60(6): 40-45.

[10] 徐波, 宋爱国. 基于点云配准改进的电力巡检机器人云台伺服技术 [J]. 供用电, 2023, 40(3): 95-101.

[11] Melsom B. FEAR AND THE IMPORTANCE OF SECURITY AWARENESS [J]. ITNOW, 2022.

[12] Lee S. EPA Grants Expose Cybersecurity, Trade Secrets to Foreign Threat [J]. Environment & Energy Report, 2023.

[13] Mattalian S. GAO Scrutinizes EPA's Contested Cybersecurity Mandate For Water Utilities [J]. Water policy report, 2023.

[14] (比) 克拉贝儿斯 金. 宇航员莱卡: 第一只进入太空的小狗 [M]. 贵州人民出版社, 2021.

[15] 李璨. 守望相助 别来无恙 [J]. 留学, 2020(24): 1.

[16] 乔喻. 太空勇士莱卡狗 [J]. 农村青少年科学探究, 2018(12): 1. DOI: CNKI: SUN: NCQS.0. 2018-12-007