

# 绿色矿山

JOURNAL OF GREEN MINE

厚植绿色底色  
打造一流期刊

## 基于数字孪生的多功能煤矿四足机器人实验系统设计

谢嘉成 张佳鹏 刘曙光 王学文 黄卓 秦浪 肖智杰

### Design and verification of a multifunctional coal mine quadruped robot system based on digital twin

XIE Jiacheng, ZHANG Jiapeng, LIU Shuguang, WANG Xuwen, HUANG Zhuo, QIN Lang, XIAO Zhijie

在线阅读 View online: [http://lks.xml-](http://lks.xml-journal.net/article/shaid/89bb19cb0666b0e14d7d6d5aee788ea38156d192338970e5da2897cf0d4902dc)

[journal.net/article/shaid/89bb19cb0666b0e14d7d6d5aee788ea38156d192338970e5da2897cf0d4902dc](http://lks.xml-journal.net/article/shaid/89bb19cb0666b0e14d7d6d5aee788ea38156d192338970e5da2897cf0d4902dc)

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 煤矿开采覆岩拱壳结构演化及其控制研究进展

Research progress on the evolution and control of overlying rock arch structure in coal mining

绿色矿山. 2024, 2(4): 357-367.

#### 煤炭开采技术的人工智能应用

Artificial intelligence applications in coal mining technology

绿色矿山. 2025, 3(1): 63-72.

#### 基于压力状态响应模型和多源遥感数据的矿区生态风险评价

Ecological risk assessment of mining area based on pressure-state-response model and multi-source remote sensing data: A case study of Gaotouyao Coal Mining area

绿色矿山. 2025, 3(1): 51-62.

#### 煤矿采动导水裂缝带高度的预测及探测方法进展

Progress of prediction and detection methods for the height of fractured water-conducting zone in coal mines

绿色矿山. 2025, 3(1): 1-13.

#### 岩体力学参数旋切钻进测试方法研究进展

Research progress on rotary cutting drilling testing method for rock mechanics parameters

绿色矿山. 2024, 2(4): 333-343.



关注微信公众号，获得更多资讯信息

# 基于数字孪生的多功能煤矿四足机器人实验系统设计

谢嘉成<sup>1,2</sup>, 张佳鹏<sup>1,2</sup>, 刘曙光<sup>1,2</sup>, 王学文<sup>1,2</sup>, 黄卓<sup>1,2</sup>, 秦浪<sup>1,2</sup>, 肖智杰<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学机械工程学院, 山西太原 030024; 2. 煤矿综采装备山西省重点实验室, 山西太原 030024)

**摘要:**近年来, 因煤矿井下特殊的工作环境, 煤矿井下机器人成为各国研发人员关注的焦点。四足机器人作为机器人中的一种, 因其简单结构和高适应能力, 得到了国内外大量关注。为了辅助工人在井下工作, 完成危险的工作任务, 进行了面向煤矿井下巡检、搬运等复杂任务的四足机器人系统设计。首先完成相关基础理论分析, 包括四足机器人本体设计、四足机器人运动学建模以及四足机器人静步态规划; 其次, 对面向煤矿井下复杂作业场景的多功能机器人的自主感知、自主决策、自主控制相关关键技术进行了研究; 最后构建了四足机器人虚拟仿真规划系统、四足机器人虚拟监控系统以及四足机器人物理系统。制作了四足机器人实体样机, 并完成系统集成试验。结果表明: 四足机器人结构合理、功能完善, 具有对井下复杂地质条件的良好适应能力, 能够在井下未知环境中完成环境感知与自适应避障行走, 并且能够完成复杂工作。虚拟仿真规划系统为机器人的自主执行提供信息与参考, 虚拟监控系统为机器人提供三维的运行状态监测以及远程可视的人机交互接口。虚拟维度的设计为井下复杂作业提供了数字孪生平台支撑和解决方案, 对煤矿智能化和无人化的开采有一定的积极作用。

**关键词:** 煤矿机器人; 四足机器人; 数字孪生; 虚拟规划; 虚拟监控

中图分类号: TD421; TP242 文献标志码: A 文章编号: 2097-3357(2024)04-0457-14

## Design and verification of a multifunctional coal mine quadruped robot system based on digital twin

XIE Jiacheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiapeng<sup>1,2</sup>, LIU Shuguang<sup>1,2</sup>, WANG Xuewen<sup>1,2</sup>, HUANG Zhuo<sup>1,2</sup>, QIN Lang<sup>1,2</sup>, XIAO Zhijie<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Fully-Mechanized Coal Mining Equipment, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In recent years, due to the special working environment in coal mine, coal mine underground robot has become the focus of R&D personnel all over the world. As a kind of robot, quadruped robot has attracted a lot of attention at home and abroad because of its simple structure and high adaptability. In order to assist people to work underground and complete dangerous tasks, a quadruped robot system for complex tasks such as underground inspection and handling in coal mine is designed. Firstly, complete the relevant basic theoretical analysis, including quadruped robot body design, quadruped robot kinematics modeling and quadruped robot static gait planning; Secondly, the key technologies related to autonomous perception, autonomous decision-making and autonomous control of multi-functional special quadruped ro-

收稿日期: 2024-11-03 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 李雅楠

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52474178); 中央引导地方科技发展资金资助项目 (YDZJSX2022A014); 山西省科技重大专项揭榜挂帅资助项目 (202301010101002)

作者简介: 谢嘉成 (1989—), 男, 山西晋城人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: xiejiacheng@tyut.edu.cn

通讯作者: 王学文 (1979—), 男, 山西长治人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: wxuew@163.com

引用格式: 谢嘉成, 张佳鹏, 刘曙光, 等. 基于数字孪生的多功能煤矿四足机器人实验系统设计[J]. 绿色矿山, 2024, 2(4): 457-470.

XIE Jiacheng, ZHANG Jiapeng, LIU Shuguang, et al. Design and verification of a multifunctional coal mine quadruped robot system based on digital twin[J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(4): 457-470.



移动阅读

bot in coal mine are studied; Finally, the virtual simulation planning system of quadruped robot, the virtual monitoring system of quadruped robot and the physical system of quadruped robot are constructed. The solid prototype of quadruped robot is made, and the system integration test is completed. The results show that the quadruped robot has reasonable structure and perfect function, has good adaptability to complex geological conditions underground, can complete environmental perception and adaptive obstacle avoidance walking in unknown underground environment, and can complete complex work. The virtual simulation planning system provides information and reference for the autonomous execution of the robot, and the virtual monitoring system provides three-dimensional running state monitoring and remote visual human-computer interaction interface for the robot. The design of virtual dimension provides digital twin platform support and solution for underground complex operation, and plays a positive role in intelligent and unmanned mining of coal mine.

**Key words:** coal mine robot; quadruped robot; digital twin; virtual planning; virtual monitoring and control

## 0 引言

为了满足煤炭行业高质量发展的需求,实现安全、高效、绿色开采的发展目标<sup>[1-2]</sup>,智能化已经是煤炭行业高质量发展的重要技术支持<sup>[3]</sup>。智能化代表着煤炭工业发展的未来,煤矿机器人应用则是煤矿开采技术革命的重要标志,因为超六成煤矿人员从事危险繁重工作,为避免人与灾害“短兵相接”,发展机器人已成刚需<sup>[4]</sup>。我国对煤矿机器人的需求量和迫切度大,我国是世界第一大产煤国因此需要很多采矿工人,而采矿作业对人体的危害极大,而煤矿机器人可以很好的解决这个问题。

四足机器人控制技术应用于煤炭领域,可以应用于井下设备监控、维护、操作。在克服目前主流监控系统的缺陷和不足之外,还可解决监控过程中过于依赖操作人员经验而造成的迟缓操作、失误操作或者错误操作等问题,大幅减少综采设备运行中的不良状态,实现少故障、少停机,从而提高设备寿命,从技术上保证综采设备的安全运行,也可极大提升综采运行管理信息化水平,为综采自动化、智能化、无人化开辟了一条全新思路和可行的路径,有着巨大的科技、经济和社会效益。

目前,国内外也对煤矿机器人进行了大量的研究。张明路等<sup>[5]</sup>对移动机器人机构、机电一体化集成等方面的发展趋势进行了展望。董挺<sup>[6]</sup>介绍了我国制定特种机器人标准的必要性,并对可行性进行了简要分析。王晓明等<sup>[7]</sup>综述了国内外发射场特种机器人的研究与应用现状。张树生等<sup>[8]</sup>设计了一种柔性轨道式综采工作面巡检机器人系统,朱华等<sup>[9]</sup>以中国矿业大学CUMT-V系列煤矿环境探测与救援机器人的研发为例,从行走机构、结构轻量化、通信方法、传感探测和智能化等方面进行了相关技术和理论研究。陈杨阳等<sup>[10]</sup>系统性阐述煤矿运输机器人的未来发展趋势和关键技术;徐轶群等<sup>[11]</sup>对四足行走机器人的步态及

腿-脚系统的运动关系进行了深入的研究,提出了四足行走机器人的两条腿结构及其驱动控制方法。苏晓东等<sup>[12]</sup>组建了一种结合了分层式控制系统和分布式控制系统优势的复合式控制系统。郭建等<sup>[13]</sup>对四足机器人进行运动学建模和分析,推导了运动学的正解和逆解;计算了四足机器人对角步态和三角步态的驱动函数。王丹等<sup>[14]</sup>针对四足机器人的直行和转弯运动,以爬行步态为基础,进行步态规划,对规划的步态进行稳定性评价。MIT推出了Cheetah机器人的第二代与第三代产品<sup>[15-16]</sup>。SEMINI等<sup>[17]</sup>设计了液压驱动四足机器人HyQ2Max。KAU等<sup>[18]</sup>发明了四足机器人Stanford Doggo。

然而就目前而言,煤矿机器人功能单一、适应性差、远程监控智能化程度低,因此面对太过复杂的地下工作环境时,煤矿机器人往往不能有效的工作,因此要把数字孪生技术与机器人融合起来更好的解决当前存在的问题。

数字孪生(Digital Twin,DT)技术,字面意思是数字化映射,它利用物理模型,传感器传输的数据,能在模拟环境中将现实物理模型准确的表示出来,最开始运用于军事领域。近年来,数字孪生技术在智能制造领域得到了广泛关注<sup>[19]</sup>,数字孪生技术作为跨现实世界与虚拟世界的桥梁。将物理世界的数字模型映射在虚拟空间,并在虚拟空间中实时感知、诊断和预测物理实体对象的状态,通过优化和指令来调控物理实体<sup>[20-22]</sup>。数字孪生以其高保真度、多物理、多尺度映射的特性,在工业设备的监控仿真和智能管理等领域具备巨大的潜力,也逐渐在煤矿领域开展应用<sup>[23-25]</sup>。国内外对数字孪生技术也有一定的研究。

张超等<sup>[26]</sup>提出了一种基于数字孪生技术的煤矿井下智能掘进机器人监控技术。王彤等<sup>[27]</sup>通过数字孪生实现构建了完整的隧道智能多功能机器人研发体系。关志阳等<sup>[28]</sup>提出了一种虚拟控制系统。HASSEL等<sup>[29]</sup>在Unity仿真环境中训练强化学习模型,然

后将训练好的模型被转移到现实世界的场景中,并用于控制物理机器人。GARG 等<sup>[30]</sup>实现了 FANUC 机器人的数字孪生。

笔者要首先完成相关基础理论分析,包括四足机器人本体设计、四足机器人运动学建模以及四足机器人静步态规划;其次,对面向煤矿井下复杂作业场景的多功能机器人的自主感知、自主决策、自主控制相关关键技术进行了研究;然后基于数字孪生技术构建了四足机器人虚拟仿真规划系统、四足机器人虚拟监控系统以及四足机器人物理系统。并制作了四足机器人实体样机,并完成系统集成试验。

### 1 总体研究内容

如图 1 所示,笔者首先对机器人的结构进行设计,

确定机器人各个部位的尺寸,同时选择机器人的硬件完成对四足机器人的实体制作;然后进一步对机器人进行研究设计以保证机器人更好的实现相关动作,包括机器人的运动学建模以及静步态规划方法;接着进一步对机器人的感知决策控制等关键技术进行设计;同时在基于数字孪生技术的基础上基于 unity3D 以及 webot 平台对四足机器人进行虚拟模型的建模导入以及仿真监控实验来验证制作的四足机器人实体的功能性及可能性,同时基于数字孪生技术在 unity3D 等软件的基础上构建了虚拟仿真规划系统、机器人物理系统以及虚拟监控系统;四足机器人的物理维度与数字孪生技术的空间维度相融合,三系统相耦合更好的实现对四足机器人的规划与监控。

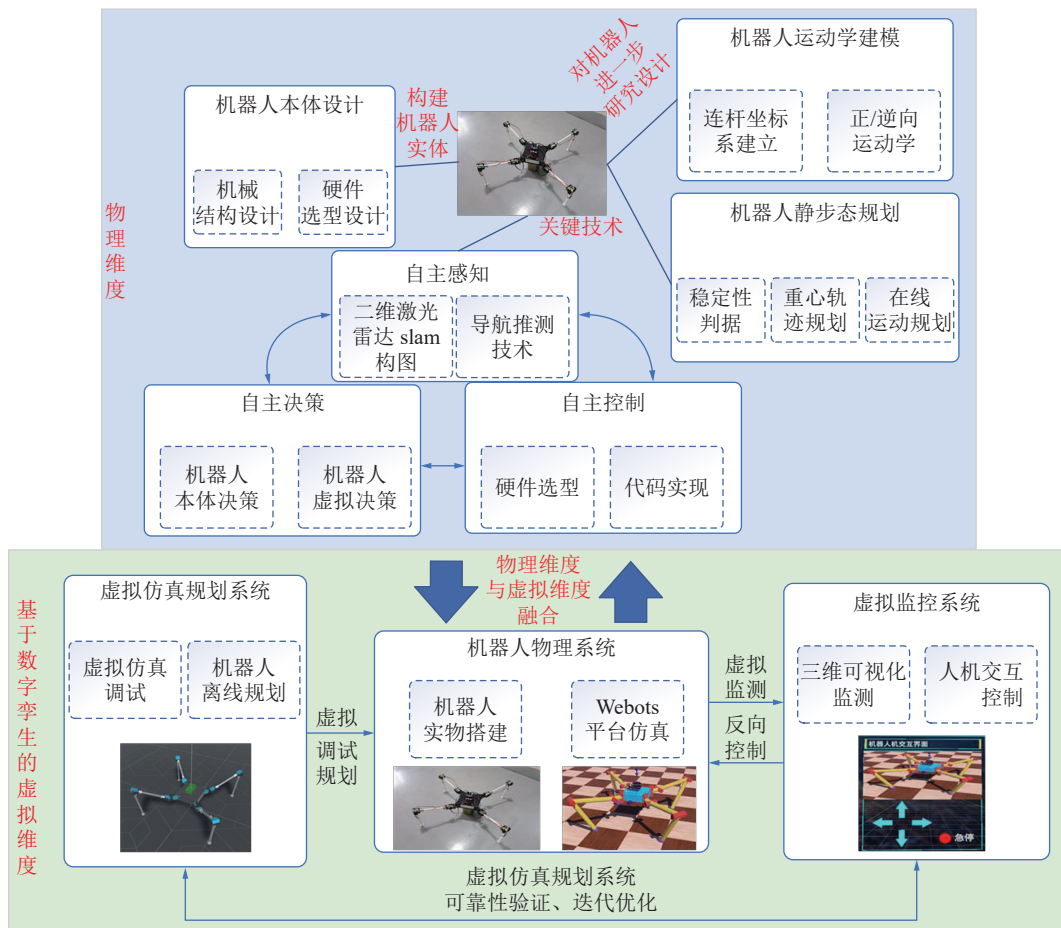


图 1 机器人总体框架

Fig.1 General framework diagram

## 2 机器人基础理论分析

### 2.1 机器人结构设计

四足机器人的躯干采用正方形结构设计,四足机器人腿部均匀分布在正方形 4 个直角处,布置方式为包围式。通过参考昆虫腿部结构和成熟机械案例,并对比多足机器人腿部数据,计算结果得:取髌部、大腿、

小腿的长度比为 0.09 : 0.455 : 0.455。

腿部与躯干相连部分为髌部,髌部绕垂直于躯干方向水平旋转,其旋转关节称为基础关节。基础关节旋转轴线与髌关节旋转轴线距离为 63 mm。尺寸设计:本项目选用 35 KG UART 串行总线舵机。

大腿两旋转轴之间距离为 273 mm,小 U 支架底面到舵机旋转轴心距离为 36 mm,大腿上部和大腿

下部两个小 U 支架分别到两个舵机旋转轴心距离总共为 72 mm, 故 2 个小 U 支架底面之间距离为 201 mm。

小腿尺寸设计: 小腿旋转轴至足端距离为 273 mm, 大 U 支架底面到舵机旋转轴轴心距离为 27 mm, 足端硅胶球半径 15 mm, 大 U 支架到足端硅胶球中心距离为 231 mm。按如上结构设计出的四足机器人如图 2 所示。

## 2.2 四足机器人运动学建模

(1) 正运动学: 给定腿部各关节变量, 求解足端的位置和姿态;

(2) 逆运动学: 与正运动学相反, 给定足端的位置



图 2 四足机器人实物

Fig.2 Quadrupedal robot object

和姿态, 求解腿部各关节变量。

面向煤矿井下复杂作业场景的多功能机器人的连杆关节模型如图 3 所示。定义如下坐标系和方向:

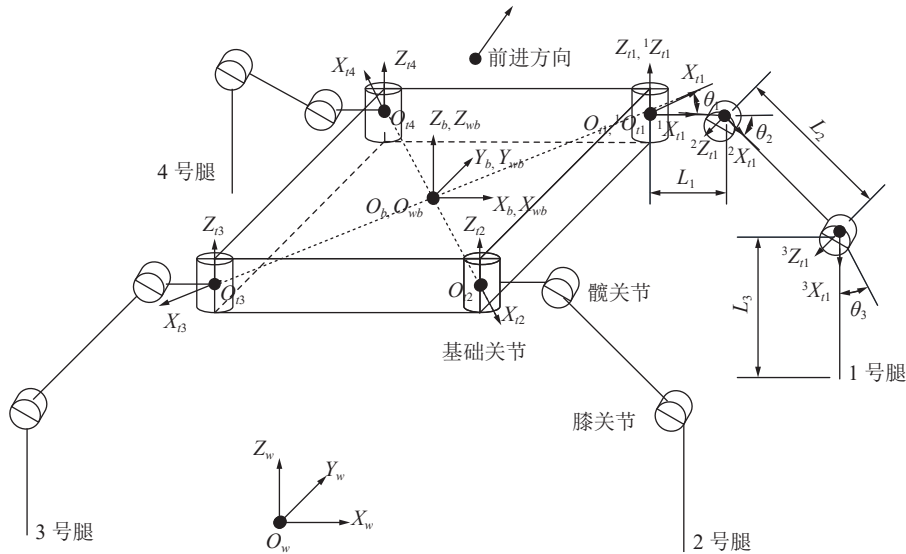


图 3 连杆关节模型

Fig.3 Rod joint model

前进方向: 垂直于 1、4 号腿基础关节在机身所在平面内的连线, 并指向机身外侧的方向。

机体坐标系  $\{B\}$ : 原点附在四足机器人机身的几何中心处,  $Z_b$  垂直于机身所在平面且方向向上,  $Y_b$  与四足机器人前进方向平行,  $X_b$  根据右手定则确定。

机体世界坐标系  $\{W_b\}$ : 原点附在机器人机身的几何中心处,  $Y_{wb}$  为前进方向投影在水平面上的方向,  $Z_{wb}$  指向重力相反方向,  $X_{wb}$  依据右手定则确定。

世界坐标系  $\{W\}$ : 原点位于空间一固定点, 各轴方向与初始时刻机体世界坐标系  $\{W_b\}$  平行。

过渡坐标系  $\{T_k^i\}$  ( $k=1,2,3,4$  表示四支腿的序号): 其中坐标系  $\{T_k\}$  的原点位于机器人髋关节处,  $X_{tk}$  与机身对角线连线平行, 并指向机身外侧,  $Z_{tk}$  与机体坐标系的  $Z_b$  平行,  $Y_{tk}$  由右手定则确定。

完成四足机器人连杆坐标系的建立后, 其腿部各连杆参数见表 1。

表中各参数定义如下:

杆件长度  $a_{i-1}$ :  $Z_{i(i-1)}$  沿  $X_{i(i-1)}$  方向平移到  $Z_i$  的距离;

杆件扭角  $\alpha_{i-1}$ :  $Z_{i(i-1)}$  绕  $X_{i(i-1)}$  旋转到  $Z_i$  的角度;

关节平移量  $d_i$ :  $X_{i(i-1)}$  沿  $Z_i$  方向平移到  $X_i$  的距离;

关节转角  $\theta_i$ :  $X_{i(i-1)}$  绕  $Z_{i(i-1)}$  旋转到  $X_i$  的角度。

四足机器人的单腿在过渡坐标系下可视为 1 个 3 自由度机械臂, 其正向运动学是指根据 3 个关节角, 推算出足端的位置和姿态的方法。本设计可感知关节转角, 正运动学可用于将反馈关节角转换为当前的足端坐标, 辅助步态的在线规划。由于四足机器人足端与地面为点接触, 足端的姿态对机器人机身运动无

表 1 四足机器人关节连杆参数

Table 1 Parameters of the joint linkage of quadruped robot

杆件 $i$	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	变量 $\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	L1	90°	0	$\theta_2$
3	L2	0	0	$\theta_3$
足端	L3	0	0	—

影响, 故只需考虑运动学正解中足端的位置解。

在图3所示的连杆关节模型中, 过渡坐标系 $\{T_i\}$ 相对于 $\{T_{i-1}\}$ 的变换关系可用连杆变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ 来描述:

$${}^{i-1}T_i = Rot(x, \alpha_{i-1})Trans(l_i - 1)Rot(z, \theta_i)Trans(0, 0, d_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & l_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过矩阵变换计算可知此四足机器人运动学正解为:

$$\begin{cases} x = c_1 [L_1 + c_2 L_2 + (c_2 c_3 - s_2 s_3) L_3] \\ y = s_1 [L_1 + c_2 L_2 + (c_2 c_3 - s_2 s_3) L_3] \\ z = s_2 L_2 + (s_2 c_3 + c_2 s_3) L_3 \end{cases} \quad (2)$$

逆运动学和正运动学互为逆运算, 具体为根据过渡坐标系下的足端坐标计算出相应的关节角度。三

自由度连杆系统的运动学方程具有唯一逆解, 解法相对简单。通过反变换法求得运动学逆解, 设足端坐标 $P_0 = (x, y, z)^T$ , 则运动学逆解为:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{y}{x} \\ \theta_2 = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 - L_1}} + \arccos \frac{u^2 + L_2^2 - L_3^2}{2uL_2} \\ \theta_3 = -\arccos \frac{u^2 + L_2^2 - L_3^2}{2L_2 u} - \arccos \frac{u^2 - L_2^2 + L_3^2}{2uL_3} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $u = \sqrt{(\sqrt{x^2 + y^2 + L_1})^2 + z^2}$ , 参数 $L_1, L_2, L_3$ 表示连杆长度。

### 2.3 四足机器人静步态规划

笔者选用静步态规划方法, 以及采用绝对稳定裕度作为稳定性判据。

本设计采用3-4-2-1的迈步顺序(图4a), 相较于四足机器人其他非奇异静步态迈步顺序, 此顺序稳定裕度最优。

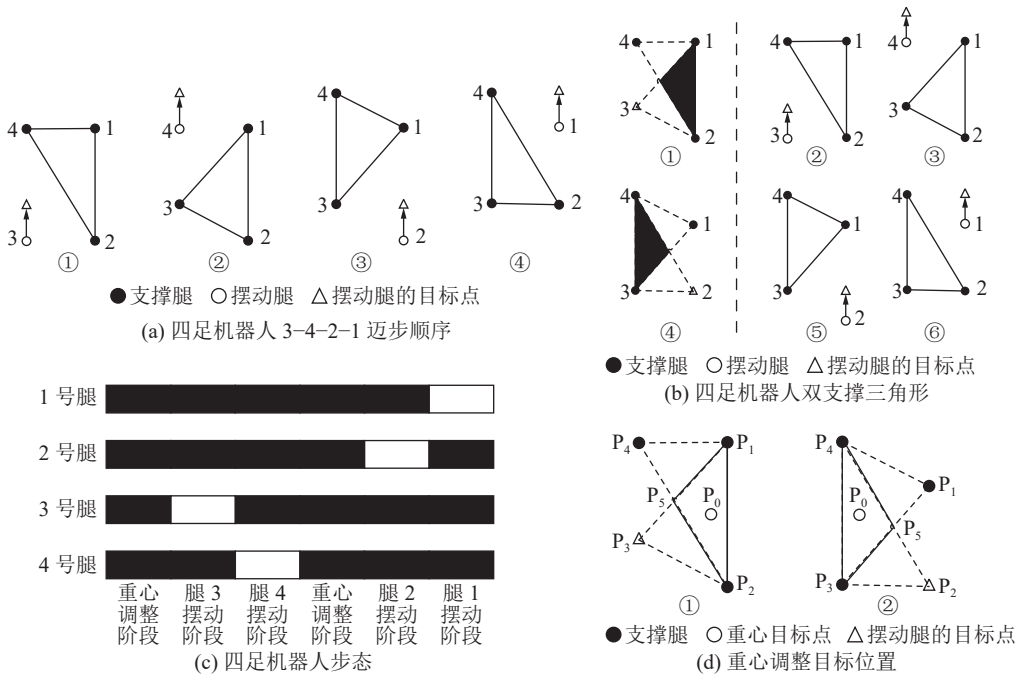


图4 稳定性判据及重心轨迹规划

Fig.4 Stability criterion and centre of gravity trajectory planning

在3-4-2-1迈步顺序下, 四足机器人同侧腿由后向前依次摆动, 形成2个不同的支撑三角形, 这2个支撑三角形的重合部分为双支撑三角形(图4b)。当重心在水平面的投影位于该区域内时, 可连续摆动同侧的两条腿, 不需要再次调整重心。为了减少重心调整次数, 减少不必要的重心移动, 将双支撑三角形定为稳定性判定区域。

在摆动腿抬起前, 机身重心投影应位于双支撑三角形内, 为了保证机器人运动的稳定性, 在后侧腿的

摆动阶段之前添加重心调整阶段, 此阶段四足同时支撑地面, 完成机身重心的调整; 进入摆动腿阶段之后, 机身重心相对地面保持静止。

综合迈步顺序和重心调整方案, 我们可得到步态图(图4c)。

机器人重心规划轨迹(图4d): 由爬行步态图4c可知, 四足机器人的状态可分为2类: 摆动腿阶段(三足支撑)和重心调整阶段(四足支撑)。在摆动腿阶段, 机身重心保持相对地面静止, 3个支撑腿足端始终

保持静止,在重心调整阶段,机器人平行地移动4个足端,将机身重心投影移动到双支撑三角形内,为进入摆动腿阶段做好准备。

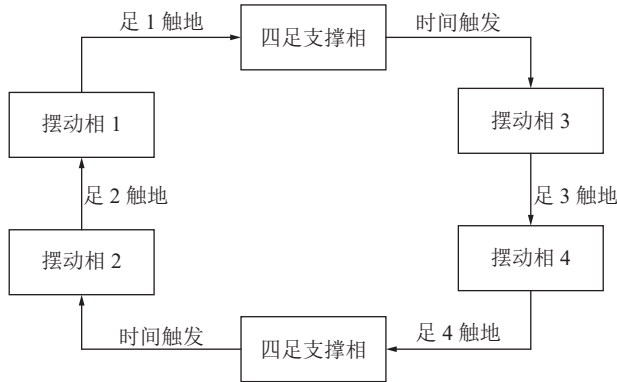
四足机器人左右两侧的双支撑三角形分别如图4b中①、②实线区域所示。以图4b①为例,从图中可知,1、2、4号腿为支撑腿,其足端坐标可由正运动学推算得到,只要确定3号腿的目标落足点,即可确定双支撑三角形的位置。选取双支撑三角形的内心作为机体重心的目标点位,此处稳定裕量最大,且计算量较小。

接下来进行双支撑三角形内心的具体计算,左侧腿和右侧腿摆动时所对应的双支撑三角形及其内心位置如图4d中的①和②所示。现以左侧为摆动腿为例,给出其双支撑三角形内心的计算公式以及重心运动轨迹方程。

由三角形内心计算公式可得双支撑三角形 $\Delta P_1P_2P_5$ 内心 $P_0(x_0, y_0)$ 的坐标:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{|L_{12}|x_5 + |L_{15}|x_2 + |L_{25}|x_1}{|L_{12}| + |L_{15}| + |L_{25}|} \\ y_0 = \frac{|L_{12}|y_5 + |L_{15}|y_2 + |L_{25}|y_1}{|L_{12}| + |L_{15}| + |L_{25}|} \end{cases} \quad (4)$$

式中:



(a) 四足机器人状态转移图

$$|L_{12}| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

$$|L_{15}| = \sqrt{(x_1 - x_5)^2 + (y_1 - y_5)^2}$$

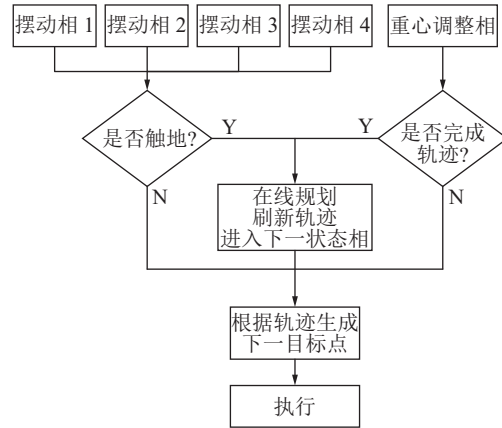
$$|L_{25}| = \sqrt{(x_2 - x_5)^2 + (y_2 - y_5)^2}$$

设重心移动前后的速度与加速度均为0,即可求得重心轨迹方程:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{6x_0}{T^5}t^5 + \frac{-15x_0}{T^4}t^4 + \frac{10x_0}{T^3}t^3 \\ y(t) = \frac{6y_0}{T^5}t^5 + \frac{-15y_0}{T^4}t^4 + \frac{10y_0}{T^3}t^3 \end{cases}, t \in [0, T] \quad (5)$$

式中:  $T$ 为重心调整阶段所用时间;  $x_0, y_0$ 为双支撑三角形内心坐标。

在线运动规划是实现复杂地形自适应的基础,机器人根据传感器数据和既定参数,在机器人运动的过程中进行步态规划。由爬行步态图(图4c),可以把一个步态周期划分为6个相:重心调整相、摆动相3、摆动相4、重心调整相、摆动相2、摆动相1。其中摆动相 $i$ 表示第 $i$ 号腿为摆动腿时的相位。引入基于时间触发和事件触发相结合的状态机进行步态控制,在摆动相,摆动腿触地触发下一状态相;在重心调整相,根据预定时间触发下一状态相,如图5a所示。



(b) 在线规划流程图

图5 四足机器人在线规划框架

Fig.5 Online planning framework for quadruped robots

在实际操作过程中,机器人不会始终保持前进状态,当期望移动速度的方向改变时,相应的步态也需要进行调整,否则在重心调整过程中,会出现重心向期望速度相反方向移动的情况,导致运动效率变低。

为此我们在每一次步态周期结束时,比较当前的期望移动速度在机体坐标系 $\{B\}$  $x, y$ 轴的2个分量,取绝对值大的分量,若该分量为正值,则取该分量所在坐标轴的正方向为移动主方向,否则取反方向。再根据所取前进方向选择相序,前进方向与相序对应关系

见表2。

四足机器人在线运动规划流程如图5b所示,在摆动相,程序实时监控摆动腿足端是否触地;在重心调整相,程序实时监控当前轨迹是否完成;若是,则机器人进入在线规划阶段,根据当前机器人运动数据按照既定算法生成下一状态的足端运动轨迹;否则根据当前的足端轨迹获得期望足端坐标。四足机器人按照图5a四足机器人状态转移图所示顺序进入下一个状态相。

表 2 相序对应

Table 2 Phase Sequence Correspondence Table

移动主方向	相序
y轴正方向	重心调整相 > 摆动相3 > 摆动相4 > 重心调整相 > 摆动相2 > 摆动相1
y轴负方向	重心调整相 > 摆动相1 > 摆动相2 > 重心调整相 > 摆动相4 > 摆动相3
x轴正方向	重心调整相 > 摆动相4 > 摆动相1 > 重心调整相 > 摆动相3 > 摆动相2
x轴负方向	重心调整相 > 摆动相2 > 摆动相3 > 重心调整相 > 摆动相1 > 摆动相4

### 3 虚拟仿真、规划与调试

#### 3.1 虚拟仿真

笔者采用 Unity3D 软件来进行虚拟仿真, 建立四足机器人模型并导入 Unity3D 软件中, 设置好机器人部件之间的父子关系等进行仿真; 编程方法采用逆解计算器和差值计算器, 如图 6 所示。

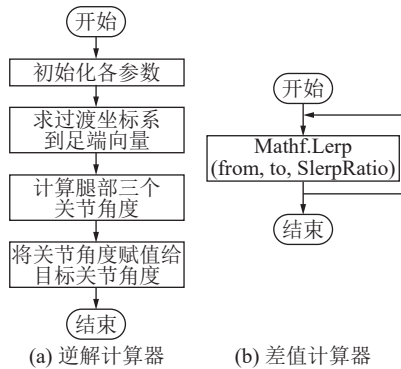


图 6 虚拟仿真编程方法

Fig.6 Virtual simulation programming method

#### 3.2 单腿规划

1) 角度模式。如图 7a 所示, 选择单腿角度模式后, 选择腿的序号, 拖动滑动条可以改变单腿 3 个关节的角度, 改变好之后记录下角度, 即为关键帧, 然后继续拖动, 记录关键帧。点击播放, 关节将按照一定时间间隔在 2 个关键帧之间插值, 即可完成相应的预设动作。也可以改变一条腿的角度之后, 改第二条腿、第三条腿和第四条腿, 插值后将会显示多条腿一起运动的效果。

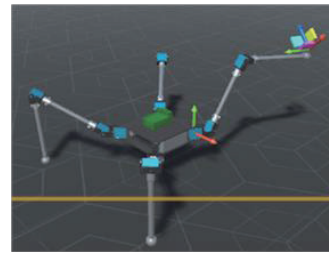
2) 浮点模式。如图 7b—图 7c 所示, 选择单腿—浮点模式, 选择腿序号, 机器人被选择的腿的足端会出现坐标轴, 改变足端位置后, 记录关键帧同单腿—角度模式, 可点击其他腿同时改变足端位置, 记录好一系列关键帧后点击播放即可, 观察多条腿按预设轨迹运行的效果。

单腿—浮点控制面板显示了各足端相对于基础关节坐标轴的坐标值, 次面板只显示坐标值。不能更改坐标值, 在机器人模型上拖动改变坐标值。

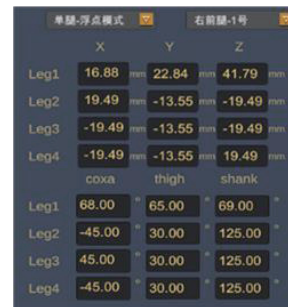
3) 自主模式。如图 7d 所示, 自主模式下可以选



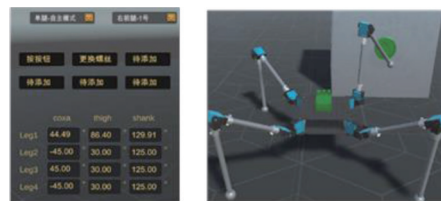
(a) 单腿—角度模式控制面板



(b) 单腿—浮点模式实际效果



(c) 单腿—浮点模式控制面板



(d) 单腿—自主模式控制面板及效果

图 7 单腿规划仿真调试

Fig.7 Single leg planning simulation tuning attempt

择设定好的功能, 比如按按钮、更换螺丝等。

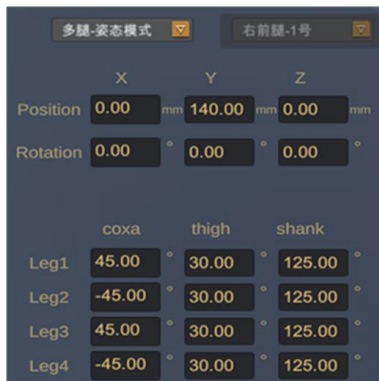
#### 3.3 多腿规划

1) 步态模式。如图 8a 所示, 在步态模式控制面板下选择, 足端轨迹可以是半圆也可以是矩形, 半圆设置其半径; 矩形设置其抬腿高度和前进长度, 设置

好之后点击确定,再使机器人前后左右移动足端轨迹会变化。



(a) 多腿-步态模式控制面板



(b) 多腿-姿态模式控制面板



(c) 多腿-自主模式控制面板

图8 多腿规划仿真调试

Fig.8 Multi-leg planning simulation tuning attempt

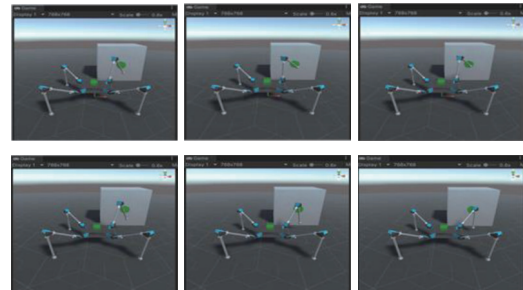
2) 姿态模式。如图 8b 所示,姿态模式下可以看到机器人机身坐标系相对于基础坐标系的位置和姿态。

3) 自主模式。如图 8c 所示,多腿-自主模式下可以完成需要多条腿协同工作的固定功能,比如避障行走、整体巡检、搬运货物等,以避障行走为例阐述主要流程。选择多腿-自主模式后,选择腿数下拉框被覆盖,无法选择,控制面板有主要功能按钮和各轴角度实时数据。

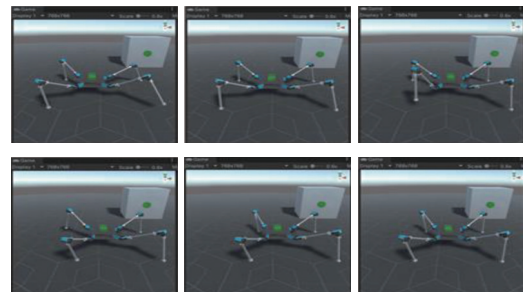
### 3.4 单、多腿仿真调试

如图 9 所示,通过对所设计的四足机器人单腿、

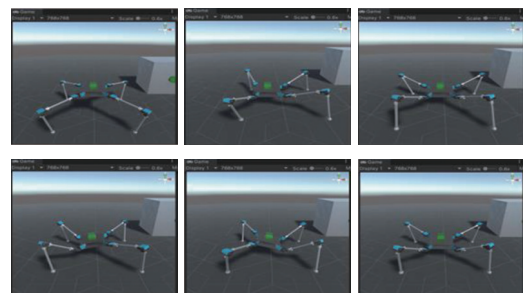
多腿多种模式的测试,验证了笔者的虚拟规划系统可以成功的实现在虚拟空间中对机器人各部分动作的规划和调试,进一步可以与真实物理机器人联动,实现了基于数字孪生的虚实融合。



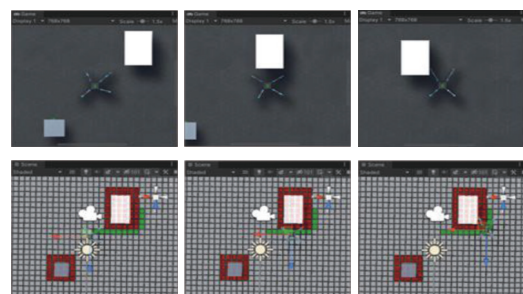
(a) 单腿-自主模式测试



(b) 多腿-步态模式测试



(c) 多腿-姿态模式测试



(d) 多腿-自主模式测试

图9 基于 unity 的虚拟仿真规划系统测试

Fig.9 Test diagram of unity-based virtual simulation planning system

## 4 四足机器人感控系统设计

### 4.1 地图绘制技术

SLAM 技术就是去绘制地图的一种技术,在这过程中,让机器人实现自主或者半自主绘制地图,所谓

的自主完成绘制就是不接受人为的干预,而半自主就是人会介入其中。SLAM的含义是“同步定位和绘制地图”:简单来说就是在一块机器人没有探测过的区域,通过机器人对周边环境以及物体的感知,实现绘制地图,以及在地图中找到自己的位置的技术。笔者选用二维激光雷达,完成了机器人基于激光雷达的自主建图。

#### 4.2 导航推测技术

对周围环境构图完成后,机器人若想要实现移动的功能,导航则会是其非常重要的技术,而且导航也可以说是移动机器人的“眼睛”,用来指引机器人移动的方向。因此,导航技术就显得十分的重要,也是不可或缺的部分。机器人能够实现对自身当前的姿态进行测量,而测量的量分为2个部分,第一个是位置的测量,第二个是方向的测量,导航推测技术是较为广泛运用的一个技术。

在行驶的时候,一般会认为 $D$ 是机器人左右2个腿部之间的距离, $r$ 为机器人腿部的长度。在设定的 $T_e$ 段时间内,命令机器人行驶,并且在机器人行驶的一小段距离内,通过电机的数据,可以得知电机的旋转量信息,其中编码器的值 $E_r$ ,这样使用者就可以得出机器人左右腿部的行驶速度( $v_l, v_r$ ):

$$v_l = \frac{(E_{lc} - E_{lp})}{T_e} \times \frac{\pi}{180} (\text{radian/sec}) \quad (6)$$

$$v_r = \frac{(E_{rc} - E_{rp})}{T_e} \times \frac{\pi}{180} (\text{radian/sec}) \quad (7)$$

按照上面的公式我们可以求出机器人左右腿部的速度 $V_l, V_r$ ,以及机器人的行驶速度 $V_k$ ,和机器人的转动速度 $W_k$ 。

$$V_l = v_l r (\text{meter/sec}) \quad (8)$$

$$V_r = v_r r (\text{meter/sec}) \quad (9)$$

$$v_k = \frac{(V_r + V_l)}{2} (\text{meter/sec}) \quad (10)$$

$$w_k = \frac{(V_r - V_l)}{D} (\text{radian/sec}) \quad (11)$$

计算出以上的数值后,可以利用如下公式得出机器人下一时刻的位置( $X_{(k+1)}, Y_{(k+1)}$ )和方向 $\theta_{(k+1)}$ 。

$$ds = v_k T_e d\theta = w_k T_e \quad (12)$$

$$x_{(k+1)} = x_k + ds \cos \left( \theta_k + \frac{d\theta}{2} \right) \quad (13)$$

$$y_{(k+1)} = y_k + ds \sin \left( \theta_k + \frac{d\theta}{2} \right) \quad (14)$$

$$x_{(k+1)} = x_k + ds \cos \left( \theta_k + \frac{d\theta}{2} \right) \quad (15)$$

$$\theta_{(k+1)} = \theta_k + d\theta \quad (16)$$

其中, $k$ 表示机器人的当前时刻, $k+1$ 表示机器人的下一时刻。通过上述的导航推测技术,可以更好的实现机器人导航技术,其自身利用导航功能能够自主的能够自主计算出最优行动路线并且行驶的功能,并且通过安装在其身上的传感器,自主感知识别各种障碍物。

#### 4.3 硬件系统设计

笔者设计采用树莓派4B作为主机,操作系统选用Raspberry Pi OS(64-bit),编程语言选择Python3.9。动力设备选择35 kg总线舵机,姿态传感器选择mpu6050,无线串口选用HC-12无线模块,如图10所示。

#### 4.4 软件系统设计

本设计控制核心为树莓派,选用python作为编程语言。综合分析面向煤矿井下复杂作业场景的多功能机器人的功能需求,建立其程序文件结构如图11所示。

#### 4.5 通信系统设计

如图12所示,树莓派或Webots仿真平台通过无线串口与Unity3D上位机通信,要求无线串口传输距离远,数据传输可靠,同时驱动程序简单,价格实惠。

### 5 虚拟监控及集成实验

#### 5.1 虚拟监控系统

四足机器人的控制模式分为离线模式与在线模式,离线模式有任务规划和作业培训2个方面作用;而在线模式可以监测机器人实时位姿,即虚拟调试和虚拟监控。

此虚拟监控系统可以对四足机器人进行虚拟仿真、人机交互以及利用无线串口,使PC端与机器人端通信的功能。人机交互可以通过UI人机界面交互如图13所示,或者使用键盘、鼠标发送控制指令。

笔者所设计的虚拟系统对实际数据的响应效率及准确性关键在于通信系统的设计,通信系统为树莓派或Webots仿真平台通过无线串口与Unity3D上位机通信,采用的无线串口模块为HC-12,HC-12无线串口通信模块是一款多通道嵌入式无线数传模块。无线工作频段为433.4~473.0 MHz,可设置多个频道,步进是400 KHz,总共100个。模块最大发射功率为100 mW(20 dBm),在5000 bps空中波特率下其接收灵敏度为-116 dBm,开阔地形可保证1000 m的通信

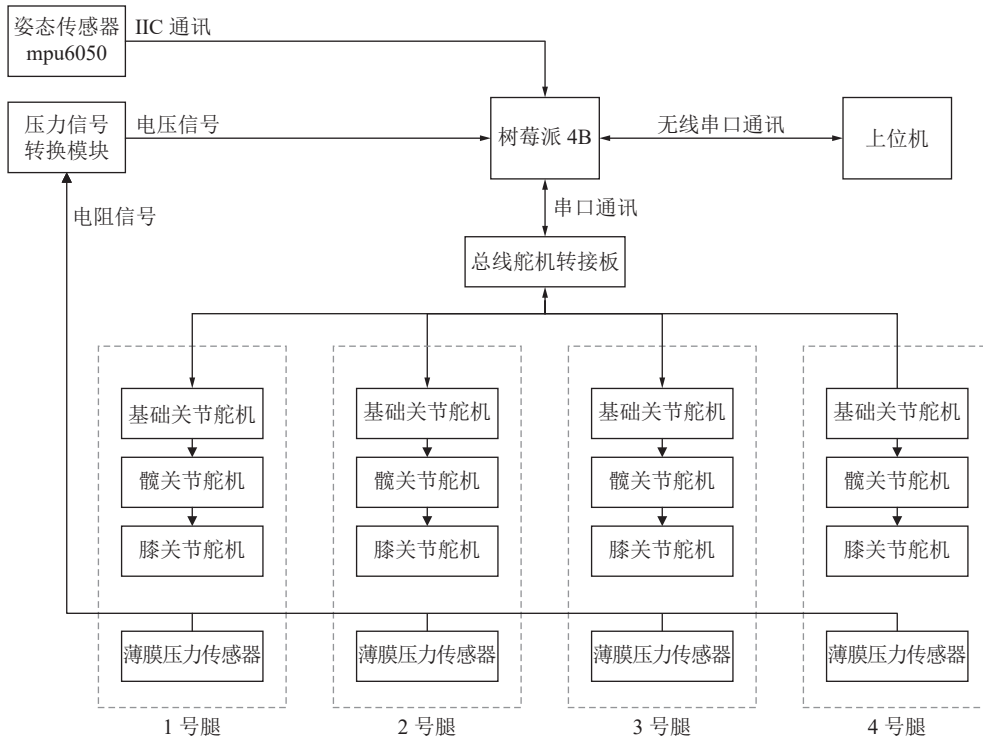


图 10 四足机器人硬件系统示意

Fig.10 Schematic diagram of quadruped robot hardware system

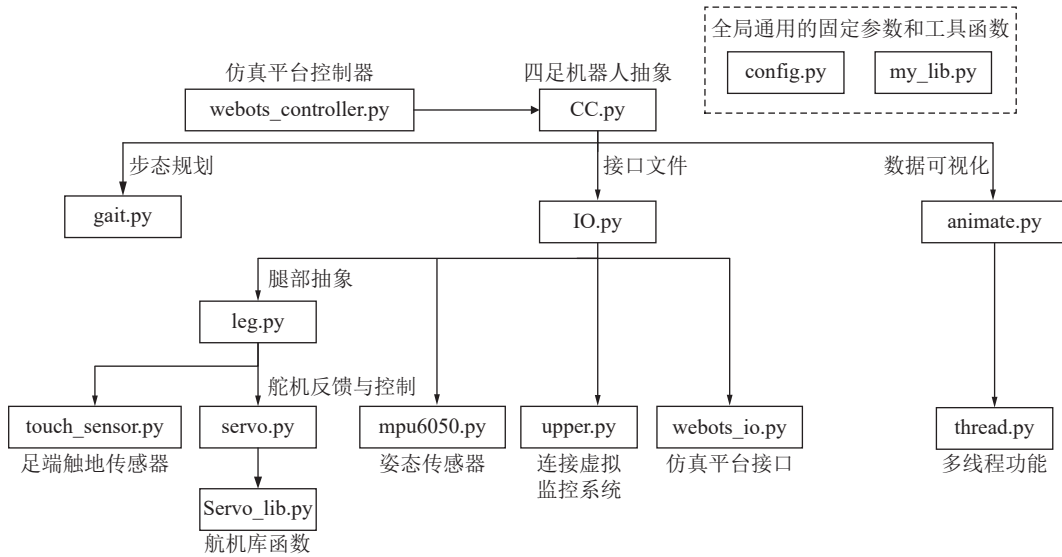


图 11 四足机器人程序文件结构关系

Fig.11 Relationship of quadruped robot programme file structure

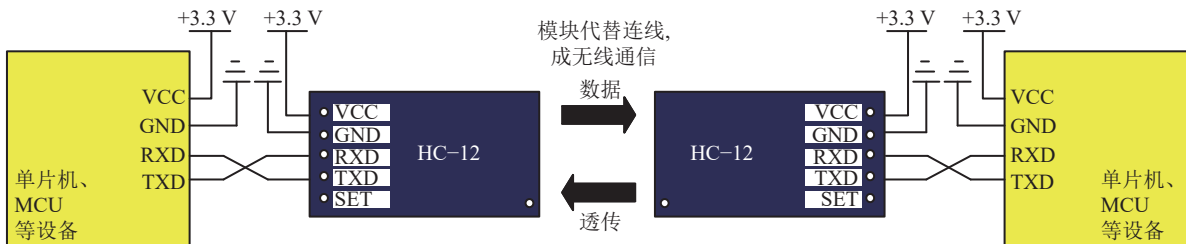


图 12 无线串口工作原理

Fig.12 Working principle of wireless serial port



图 13 人机交互界面

Fig.13 Human-computer interface

距离。模块内部含有 MCU, 用户无需对模块另外编程, 各种透传模式只管收发串口数据即可, 使用方便。模块采用多种串口透传模式, 用户可以根据使用要求用 AT 指令进行选择。4 种模式 FU1、FU2、FU3、FU4 的空闲状态下平均工作电流分别为 3.6 mA、80  $\mu$ A、16 mA 和 16 mA, 最大工作电流为 100 mA(最大功率发射状态下)。基于此串口模块构建通讯系统, 此通讯系统可以保证通讯延迟极低, 基本可以实现同步控制运行, 延迟可达 1 ms 以内, 基于此通讯系统构建的各个虚拟系统可保证高的响应效率及稳定性。

在虚拟仿真监控系统中把机器人实物模型导入, 开始对机器人进行虚拟仿真监控实验。

### 5.2 虚拟监控实验

#### 1) 面向平坦地面行走实验

如图 14 所示为笔者设计的四足机器人在平坦路面的实验场景, 当前机身姿态通过机身搭载的惯性单元测量得到。图 14b 分别展示了四足机器人在平坦路面爬行时, 其俯仰角、横滚角、偏航角随时间的浮动变化。图中虚线部分为姿态角的测量值, 实横线为姿态角的期望值。如图 14 所示, 在四足机器人爬行过程中, 机身姿态角整体浮动不大, 俯仰角与偏航角的幅值在  $0.5^\circ$  左右, 横滚角的幅值在  $1^\circ$  左右。总体而言, 四足机器人在平坦地面爬行姿态较平稳, 可以满足设计需求。

#### 2) 面向复杂路面行走实验

四足机器人通过 4 个离散的点支撑地面, 面对煤矿井下的各种复杂地形, 如坑洼、铁轨、石块等, 均可以解构成台阶地形与斜坡地形的组合, 笔者通过散落地面的长方体方块模拟煤矿井下未知的崎岖路面环境, 验证四足机器人面向复杂地形的行走能力。

如图 15a 所示, 在 Webots 仿真平台内, 构建一平坦地面, 随机布置长方体障碍块, 2 种障碍块的几何尺寸分别为  $200\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 、 $200\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ , 四足机器人在此地面直线行走, 观察模型状态以及其机身姿态角、机身高度等参数。

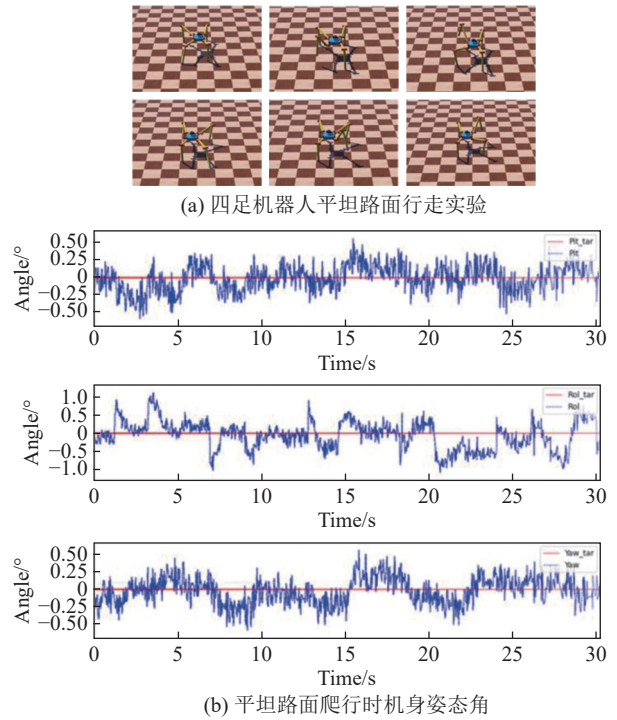


图 14 四足机器人平坦路面实验

Fig.14 Experimental diagram of quadrupedal robot on flat road surface

从上图可看出, 四足机器人在复杂路面行走时, 仍能维持机身姿态的稳定; 足端触碰到高于地面的障碍物时及时停止, 避免了机身的侧翻; 机器人还可根

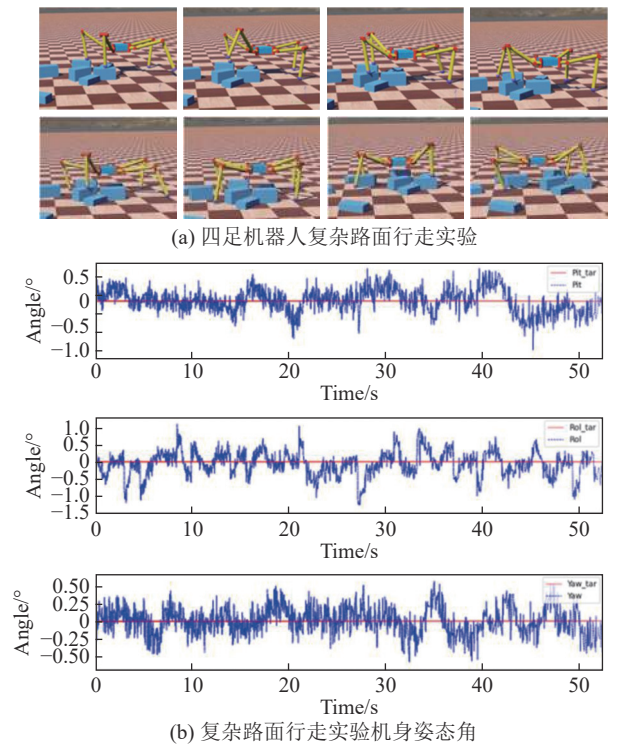


图 15 四足机器人复杂路面实验

Fig.15 Experimental diagram of quadrupedal robot with complex road surface

据环境调整机身高度,跨越障碍物的同时又保证了在崎岖地面下足端合适的可行域范围。

如图 15b 所示,四足机器人在复杂路面爬行时机身姿态角的浮动较小,与其在平坦地面爬行时无明显差异。本试验验证了高度在 100 mm 内的地面起伏对四足机器人爬行时的姿态稳定性几乎无影响,体现出四足机器人在复杂地形行走的平稳性。

### 3) 引面向 15° 斜坡地形行走实验

爬坡能力是衡量机器人移动性能的重要指标,在煤矿井下也存在起伏较大的地形,搭建 15° 斜坡地形,模拟煤矿井下的一般坡度地形。

在 Webots 仿真平台内,构建一坡度为 15° 的梯形斜坡,如图 16a 所示,四足机器人在此坡面爬行,观察模型状态以及其机身姿态角、机身高度等参数,验证四足机器人面向坡度地形的行走能力。机器人在仿真环境下的运动截图如图 16b 所示。当地面坡度较大时,四足机器人主动倾斜机身,保持机身与地面近似平行,以保证前后足端可行域的对称性,提高四足机器人适应坡面的能力。

观察图 16d,可发现四足机器人在爬坡过程中,其期望俯仰角从 0° 逐渐变成 15°,较准确的反应了坡面的倾斜角度。此外,当期望姿态角突变时,实际姿态角的跟随平稳且迅速,不存在超调或稳态误差。期望俯仰角第 1 次突变幅度较大,是因为设置了 10° 左右的阈值,当地面倾斜角度小于此阈值时,机身保持水平期望姿态角变化平稳。

图 16c 是机器人在 15° 坡面爬行时机身高度随时间的变化,可以看出机身高度的调节平稳且迅速,始终保持在期望高度附近。

上述试验结果验证了笔者所设计的四足机器人可以实现在 15° 坡面的平稳爬行。进一步对此四足机器人进行钻孔、搬运物体等实验,验证此四足机器人的多功能性。如图 17a—图 17c 所示,笔者所设计的多功能四足机器人结构合理,工作可靠,能够较好的完成搬运物体、钻孔等功能。

综上所述,四足机器人结构合理、功能完善,具有对井下复杂地质条件的良好适应能力,能够在井下未知环境中完成环境感知与自适应行走,并且能够完成钻孔、搬运货物等复杂工作,满足设计需求。

## 5.3 讨论

如今,煤矿机器人的设计与应用仍存在诸多不足,主要表现在以下方面:

- 1) 煤矿机器人功能单一:目前,井下机器人主要用于井下环境信息采集,智能化程度较低;
- 2) 煤矿机器人适应性差:现有井下机器人本体结

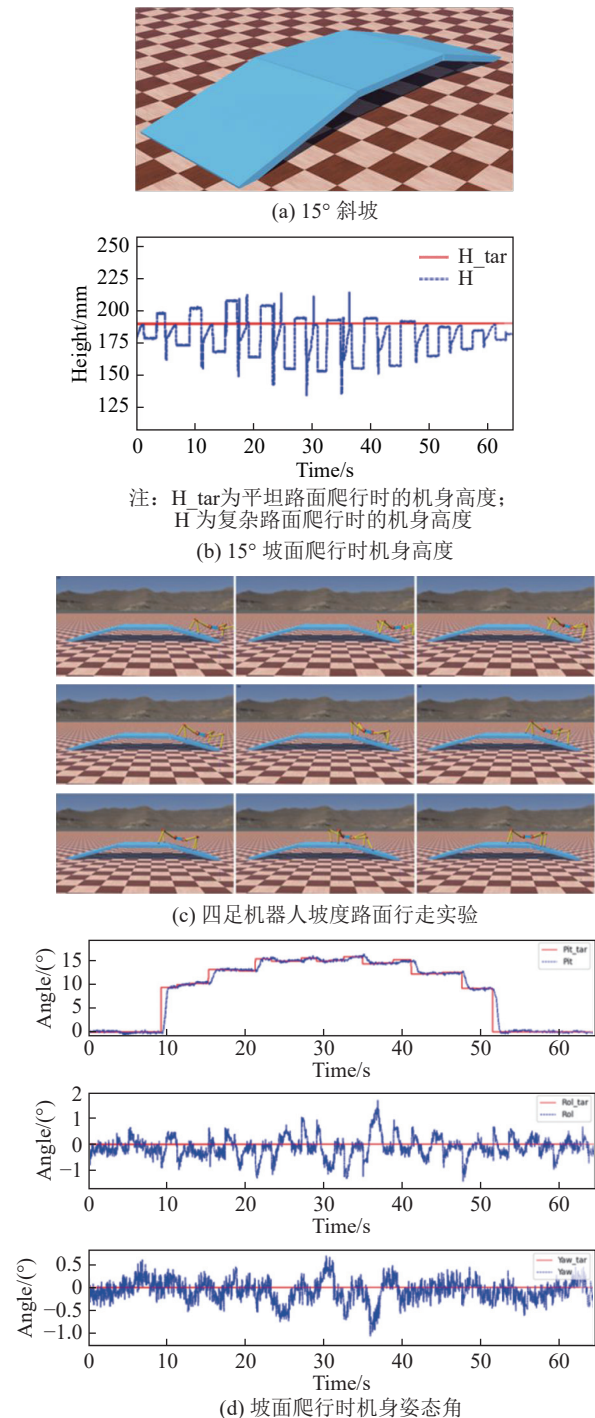


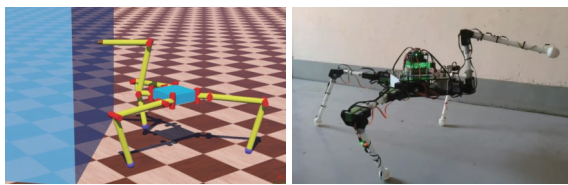
图 16 四足机器人坡度路面实验

Fig.16 Experimental diagram of a quadruped robot with sloping road surface

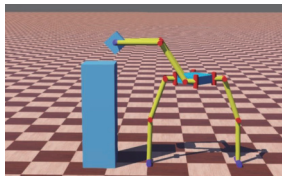
构大多比较笨重,灵活性较差,对井下复杂地质条件的适应性较差;

3) 煤矿机器人关键技术有待突破:井下机器人自主感知、自主决策、自主控制、定位导航等共性关键技术亟待提高;

4) 煤矿机器人远程监控智能化程度低:井下机器人普遍采用不全面的传感信息进行远程监控,很难直



(a) 四足机器人钻孔



(b) 四足机器人搬运

图 17 机器人多功能实验

Fig.17 Robot multifunctional experiment diagram

观、全面地得到机器人工作状态。

笔者所设计的四足机器人功能丰富,且对于煤矿井下的不同地形的适应能力强,自主感知决策控制能力更加优越;同时设计的虚拟监控系统可以很好的对机器人工作状态进行监测智能化程度高,有较高的创新性和优越性。

## 6 结 论

1) 笔者通过机器人运动学建模以及静步态规划计算分析,所设计的四足机器人结构合理、功能完善,具有对井下复杂地质条件的良好适应能力,能够在井下未知环境中完成环境感知与自适应避障行走,并且能够完成钻孔、搬运货物、打锚杆等复杂工作。

2) 数字孪生技术与煤矿机器人相融合,将物理世界的机器人模型映射在虚拟空间,并在虚拟空间中实时感知、诊断和预测机器人的状态,通过优化和指令来调控物理实体机器人。虚拟仿真规划系统为机器人的自主执行提供信息与参考,虚拟监控系统为机器人提供三维的运行状态监测及人机交互接口。丰富了煤矿机器人的种类,为“人机共融机器人”的设计提供理论和技术基础。

3) 通过对四足机器人感决策关键技术进行分析研究设计,所设计的四足机器人有良好的作业能力以及面对不同作业环境的优越的环境适应性;面向煤矿井下复杂作业场景的多功能机器人将会在人类生活、工作等各个方面发挥巨大的作用。它的发展将会大大的解放了劳动力,促进社会化生产,创造巨大的社会财富。

4) 煤矿井下在生产过程中存在着瓦斯、煤尘等具有爆炸性的物质,为了安全生产,防止瓦斯、煤尘发生爆炸事故。为了使机器人能够在实际煤矿井下完成应用,在后续的研究过程中,还应当对机器人进行一

定的防爆改造。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平, 王金华, 申宝宏, 等. 煤炭开采新理念: 科学开采与科学产能[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1069-1079.  
XIE Heping, WANG Jinhua, SHEN Baohong, et al. New idea of coal mining: scientific mining and sustainable mining capacity[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1069-1079.
- [2] 姜德义, 魏立科, 王翀, 等. 智慧矿山边缘云协同计算技术架构与基础保障关键技术探讨[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 484-492.  
JIANG Deyi, WEI Like, WANG Chong, et al. Discussion on the technology architecture and key basic support technology for intelligent mine edge-cloud collaborative computing[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 484-492.
- [3] 王国法, 刘峰, 庞义辉, 等. 煤矿智能化: 煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 349-357.  
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization: The core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 349-357.
- [4] 葛世荣, 胡而已, 裴文良. 煤矿机器人体系及关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 455-463.  
GE Shirong, HU Eryi, PEI Wenliang. Classification system and key technology of coal mine robot[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 455-463.
- [5] 张明路, 彭平, 张小俊. 特殊环境下服役机器人发展现状及其关键技术研究[J]. 河北工业大学学报, 2013, 42(1): 70-75.  
ZHANG Minglu, PENG Ping, ZHANG Xiaojun. A study of the recent development and key technologies of advanced robots served in special circumstances[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2013, 42(1): 70-75.
- [6] 董挺. 我国制定特种机器人标准的必要性简析[J]. 机床与液压, 2017, 45(15): 71-73.  
DONG Ting. Brief analysis of the necessity of establishing special robot standard in China[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(15): 71-73.
- [7] 王晓明, 刘占卿, 滕飞, 等. 特种机器人及技术在航天发射场的应用研究[J]. 载人航天, 2021, 27(4): 522-529.  
WANG Xiaoming, LIU Zhanqing, TENG Fei, et al. Study on application of special robots in space launch site[J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(4): 522-529.
- [8] 张树生, 马静雅, 岑强, 等. 煤矿综采工作面巡检机器人系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 136-140.  
ZHANG Shusheng, MA Jingya, CEN Qiang, et al. Research on inspection robot system for fully-mechanized mining face in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 136-140.
- [9] 朱华, 由韶泽. 新型煤矿救援机器人研发与试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2170-2181.  
ZHU Hua, YOU Shaoze. Research and experiment of a new type of coal mine rescue robot[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2170-2181.
- [10] 陈杨阳, 霍振龙, 刘智伟, 等. 我国煤矿运输机器人发展趋势及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 233-242.

- CHEN Yangyang, HUO Zhenlong, LIU Zhiwei, et al. Development trend and key technology of coal mine transportation robot in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 233-242.
- [11] 徐铁群, 万隆君. 四足步行机器人腿机构及其稳定性步态控制[J]. *机械科学与技术*, 2003, 22(1): 86-87, 91.
- XU Yiqun, WAN Longjun. Leg mechanism of a quadruped walking robot and its stability gait control[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2003, 22(1): 86-87, 91.
- [12] 苏晓东, 罗庆生, 李华师, 等. 仿生四足机器人控制系统设计[J]. *机械设计与制造*, 2013(2): 16-19.
- SU Xiaodong, LUO Qingsheng, LI Huashi, et al. Design of a control system for bionic quadruped robot[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2013(2): 16-19.
- [13] 郭建, 郭焕彰, 赵易, 等. 基于步态规划的四足机器人运动学分析与研究[J]. *机床与液压*, 2021, 49(21): 67-72.
- GUO Jian, GUO Huanzhang, ZHAO Yi, et al. Kinematics analysis and research for quadruped robot based on gait planning[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(21): 67-72.
- [14] 王丹, 周德科, 杨家琪. 四足机器人在直行和转弯下的步态规划研究[J]. *机械传动*, 2021, 45(9): 47-55.
- WANG Dan, ZHOU Deke, YANG Jiaqi. Research on gait planning of quadruped robot in straight and turning[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2021, 45(9): 47-55.
- [15] BLEDT G, POWELL M J, KATZ B, et al. MIT cheetah 3: design and control of a robust, dynamic quadruped robot[C]//2018 IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain. IEEE, 2018: 2245-2252.
- [16] KATZ B, DI CARLO J, KIM S. Mini cheetah: a platform for pushing the limits of dynamic quadruped control[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, QC, Canada. IEEE, 2019: 6295-6301.
- [17] SEMINI C, BARASUOL V, GOLDSMITH J, et al. Design of the hydraulically actuated, torque-controlled quadruped robot HyQ2Max[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(2): 635-646.
- [18] KAU N, SCHULTZ A, FERRANTE N, et al. Stanford doggo: an open-source, quasi-direct-drive quadruped[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, QC, Canada. IEEE, 2019: 6309-6315.
- [19] 谢嘉成, 王学文, 李祥, 等. 虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(3): 53-59.
- XIE Jiacheng, WANG Xuwen, LI Xiang, et al. Research status and prospect of virtual reality technology in field of coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(3): 53-59.
- [20] 王学文, 刘曙光, 王雪松, 等. AR/VR融合驱动的综采工作面智能监控关键技术研究及试验[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 969-985.
- WANG Xuwen, LIU Shuguang, WANG Xuesong, et al. Research and test on key technologies of intelligent monitoring and control driven by AR/VR for fully mechanized coal-mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 969-985.
- [21] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1-18.
- TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18.
- [22] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1-18.
- TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1-18.
- [23] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 1925-1936.
- GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workplace: Technological frame and construction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1925-1936.
- [24] 张旭辉, 张超, 王妙云, 等. 数字孪生驱动的悬臂式掘进机虚拟操控技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(6): 1617-1628.
- ZHANG Xuhui, ZHANG Chao, WANG Miaoyun, et al. Digital twin-driven virtual control technology of cantilever roadheader[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(6): 1617-1628.
- [25] 迟焕磊, 袁智, 曹琰, 等. 基于数字孪生的智能化工作面三维监测技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(10): 153-161.
- CHI Huanlei, YUAN Zhi, CAO Yan, et al. Study on digital twin-based smart fully-mechanized coal mining workplace monitoring technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(10): 153-161.
- [26] 张超, 张旭辉, 毛清华, 等. 煤矿智能掘进机器人数字孪生系统研究及应用[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(5): 813-822.
- ZHANG Chao, ZHANG Xuhui, MAO Qinghua, et al. Research and application of digital twin system for intelligent tunneling equipment in coal mine[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(5): 813-822.
- [27] 王彤, 方立霞. 基于数字孪生的隧道智能多功能机器人开发体系构建[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(1): 162-168.
- WANG Tong, FANG Lixia. Development and design system of intelligent multi-functional tunnel robot based on digital-twin[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(1): 162-168.
- [28] 关志阳, 王龙鹏, 赵良, 等. 矿用探测机器人虚拟控制系统研究[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(1): 226-228.
- GUAN Zhiyang, WANG Longpeng, ZHAO Liang, et al. Research on virtual control system of mine detecting robot[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(1): 226-228.
- [29] HASSEL T, HOFMANN O. Reinforcement learning of robot behavior based on a digital twin[C]//International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods, 2020
- [30] GARG G, KUTS V, ANBARJAFARI G. Digital twin for FANUC robots: industrial robot programming and simulation using virtual reality[J]. *Sustainability*, 2021, 13(18): 10336.