

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.050

基于分步式递阶反馈的井下四足机器人行走姿态控制

郭爱军¹, 吴松松²

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017209;

2. 北京智能开诚特种机器人科技有限公司, 北京 100176)

摘要: 由于井下探测四足机器人在行走过程中, 采用传统控制方法稳定性差, 故提出基于分步式递阶反馈的井下四足机器人行走姿态稳定控制方法。基于地面惯性参考系构建机器人的运动学模型, 利用齐次变换矩阵描述机器人躯干的位姿, 通过向量加法和旋转矩阵计算出单个腿末端位置向量, 将其作为姿态稳定控制的输入。计算控制律用于减小逼近误差, 实现姿态控制, 并计算控制律用于减少行走时的抖动。在分层控制基础上, 引入中枢模式生成器递归反馈模型, 设计自适应稳定行走姿态生成器, 给出适应度较高的稳定行走姿态。实验结果表明: 经过所提控制方法的应用, 在井下沙地和石子地上行走, 井下四足机器人翻滚角和俯仰角波动范围始终保持在 $-0.03^{\circ} \sim 0.03^{\circ}$, 满足了机器人行走稳定平衡要求。

关键词: 分步式递阶结构; 反馈模型; 井下四足机器人; 行走姿态; 动力学模型; 稳定控制

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0245-06

Walking Posture Control of Underground Quadruped Robot Based on Distributed Hierarchical Feedback

GUO Aijun¹, WU Songsong²

(1. Guoneng Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017209, China;

2. Beijing Intelligent Kaicheng Special Robot Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: To improve the poor stability of underground quadruped robot in its walking process by traditional control methods, a stable walking posture control method for underground quadruped robots based on distributed hierarchical feedback is proposed. On the ground inertial reference frame, the kinematic model of the robot is constructed, and the posture of the robot's torso is described using a homogeneous transformation matrix. The position vector of a single leg end is calculated through vector addition and rotation matrix, which is used as input for attitude stability control. Computational control laws are applied to reduce approximation errors, achieve attitude control and reduce chattering during walking. On the basis of hierarchical control, a central pattern generator recursive feedback model is introduced to design an adaptive stable walking posture generator, providing a stable walking posture with high adaptability. The experimental results show that with the application of the proposed control method, the fluctuation range of the rolling and pitching angles of the downhole quadruped robot remains between -0.03° and 0.03° when walking on sandy and gravel ground underground, which meets the requirements for stable and balanced robot walking.

Keywords: distributed hierarchical structure; feedback model; underground quadruped robot; walking posture; dynamic model; stability control

0 引言

井下四足机器人是一种能够承担起诸多精细且危险工作的机械设备。通过控制机器人在煤矿事故现场行走, 它能够有效地勘察现场的地形与环境, 为制定科学且高效的事故应对策略提供便利。然而, 由于井下的工作环境相当复杂, 当机器人的足端受到地面扰动时, 常常导致其行走姿态

的不稳定^[1], 从而无法进行正常的四足行走。因此, 如何解决井下四足机器人行走姿态稳定性问题就显得极为重要。

文献[2]深入分析机器人运动模式, 建立机器人拖拽运动, 观察其运动过程中的受力情况。依托于双延迟深度确定性策略梯度算法, 设计机器人运动姿态控制模型, 将实时运动姿态输入到模型中, 即可自动生成控制策略。测试结果表明,

第一作者简介: 郭爱军(1970—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 教授级高工, 硕士, 研究方向为煤矿机电及其自动化, zzyn147258369@163.com。

该控制策略的训练周期较长。文献[3]采用时标分解法对当前机器人运行状态进行分析,明确稳定控制要求,搭建串-并联 PID 控制结构,将奇异摄动法引入其中,根据当前运动姿态实现自适应姿态稳定控制。文献[4]通过惯性测量单元,获取机器人运动姿态参数,基于此推理出机器人行走轨迹,再从机器人足端位置、躯干姿态两方面入手,设计基于虚拟斜坡的自适应姿态调整算法,满足机器人行走稳定控制要求。

上述控制方法均取得了一定的成果,但因为井下环境复杂,缺少可预见性,传统方法以单层、单点、多次控制理论为基础,缺少对复杂环境的应对能力。为此,本文提出了一种基于分步式递阶反馈的井下四足机器人行走姿态稳定控制方法,通过分层协调控制和反馈自适应调整,保证了机器人能够适应各种不同的环境,从而顺利进行井下工作。

1 井下四足机器人行走姿态稳定控制方法设计

1.1 构建井下四足机器人运动学模型

在实现井下四足机器人行走姿态稳定控制之前,需要先观察机器人运动状态,并推导其动力学方程,明确机器人行走过程中的受力特点^[5]。针对机器人运动区域建立一个地面惯性参考系,并设置整体运动势能为 0 的四足机器人一般约束条件,其表示为

$$\frac{1}{t} \begin{pmatrix} A \\ \alpha_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} A \\ \beta_i \end{pmatrix} = \chi_i, \quad i=1,2,\dots,I \quad (1)$$

式中: t 表示运动时间; A 表示系统动能; α 表示广义坐标约束; β 表示广义速度约束; χ_i 表示广义矢量约束; i 表示约束条件编号; I 表示系统运动过程中约束数量。

以式(1)为约束可以推理出井下四足机器人行走的动力学方程。其中,涉及到的系统动能可以通过式(2)计算。

$$A = \frac{1}{2} \int_m S_j \times S_j m \quad (2)$$

式中: m 表示系统分布质量; j 表示任意点标记; S 表示运动速度。在机器人运动分析过程中,引入约束,结合自然正交补法和拉格朗日公式,即可生成井下四足机器人运动学方程:

$$H(C_0, \theta) \dot{q} + G(C_0, \theta) + D(C_0, \theta) = \chi_i(C_0, \theta) \quad (3)$$

式中: H 表示机器人质量矩阵; G 表示非线性速度集的向量; D 表示重力参数; C_0 表示机器人当前所在位置和方向的矢量矩阵; θ 表示关节位置向量; q 表示广义坐标矢量。通过上述操作,得到井下四足机器人运动学模型,将其作为行走姿态稳定控制的基础。

1.2 基于运动学模型姿态稳定控制输入的获取

在设计机器人姿态稳定控制方案时,首先可以基于运动学模型描述机器人的运动和姿态变化。通过绘制井下四足机器人的结构简图,可以确定关节之间的连接和转动关系,如图 1 所示。

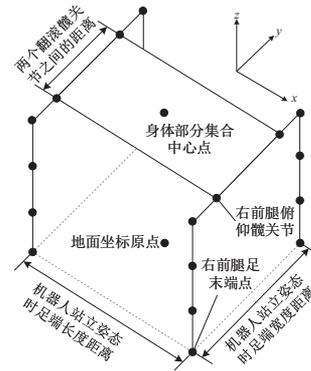


图 1 四足机器人结构简图

通过图 1 可知,可将其骨架分解为若干个关节,每个关节具有一定的自由度。对于每个关节,使用欧拉角或四元数来描述其姿态。根据机器人的骨架结构和运动学模型,建立起每个关节的齐次变换矩阵。通过该矩阵,能够描述机器人躯体在世界坐标系中的位姿。在设计姿态稳定控制方案时,关键是要保证机器人髋关节与地面之间的相对关系能够维持稳定。

在机器人行走控制时,需要考虑机器人躯体的姿态变化,保证躯干部位的位姿参数符合平衡控制要求,从而达到提升机器人行走姿态稳定性的目的。依托于机器人正运动学解算原理,建立式(4)所示的齐次变换矩阵,以此来描述机器人躯干位姿。

$$R = \begin{bmatrix} {}^0\phi_H & {}^0\phi_G \\ {}^0\phi_D & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: T 表示齐次变换矩阵; R 表示旋转矩阵; ${}^0\phi_H$ 、 ${}^0\phi_G$ 、 ${}^0\phi_D$ 分别为身体部分集合中心点在运动模型约束下地面坐标系中的三维坐标。对井下四足机器人单腿末端位置向量进行求解时,运用向量加法计算得出:

$$\mathbf{O}'\mathbf{Q}^0\phi_H\mathbf{T}+\mathbf{Q}\mathbf{K}^0\phi_C\mathbf{T}=\mathbf{O}'\mathbf{Q}^0\phi_H\mathbf{T}+\mathbf{O}\mathbf{K}^0\phi_D\mathbf{T} \quad (5)$$

式中: \mathbf{O} 表示地面坐标原点; \mathbf{O}' 表示身体部分集合中心点; \mathbf{Q} 表示右前腿俯仰髌关节点; \mathbf{K} 表示右前腿足末端点; $\mathbf{O}'\mathbf{O}$ 表示两个中心点之间的位置向量; $\mathbf{Q}\mathbf{K}$ 表示髌关节点与足末端点之间的位置向量; $\mathbf{O}'\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{O}'\mathbf{O}$ 分别表示身体部分集合中心点与髌关节点、足末端点之间的位置向量。在坐标约束下, y 和 z 轴的位置向量一致,可保证稳定性。随后,将旋转矩阵引入到其中,得到改写后的单腿末端位置向量求解公式,将求解结果作为姿态稳定控制的输入。

$$\mathbf{Q}\mathbf{K}\phi_H\mathbf{T}=\mathbf{O}'\mathbf{O}\mathbf{T}+\mathbf{O}\mathbf{K}\phi_C\mathbf{T}-\mathbf{R}\times\mathbf{O}'\mathbf{Q}\phi_D\mathbf{T} \quad (6)$$

通过上述计算,可以推导出机器人躯干不同部分之间的位姿关系,并为后续的控制策略设计提供基础。

1.3 基于分步式结构的姿态控制方法

在井下四足机器人行走姿态稳定控制的实现中,由于需要多个关节共同配合,使得控制系统相对复杂^[6]。因此,本研究提出了一种基于分步式递阶结构的姿态控制系统,如图2所示。

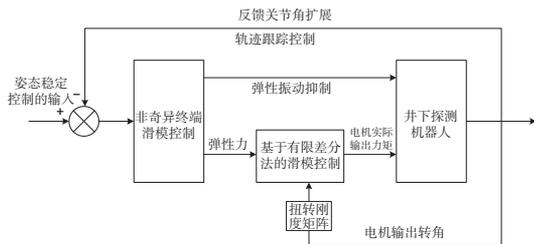


图2 基于分步式递阶结构的姿态控制

如图2所示,该姿态控制主要通过分步式的形式完成。主要包括两个控制步骤:基于非奇异终端滑模控制和基于有限差分法的滑模控制^[7]。这些控制步骤的设计旨在实现机器人行走姿态的稳定控制。首先,在基于非奇异终端滑模控制中,可以利用机器人腿的末端位置向量来评估当前的姿态偏差,并根据该偏差调整控制算法中的模糊逻辑参数。这样控制器可以根据机器人的实际姿态变化来自适应地调节控制策略。其次,在基于有限差分法的滑模控制中,可以使用机器人腿的末端位置向量来计算当前姿态的速度和加速度。这些信息可以用于确定滑模控制器中的切换阈值或控制增益,以提供更精确的控制效果。假设控制变量为电机输出转角,则

$$\mathbf{M}(\mathbf{u})\mathbf{u}''+\boldsymbol{\gamma}(\mathbf{u},\mathbf{u}')\mathbf{u}'+[0,\boldsymbol{\theta}]=[0,\boldsymbol{\varpi}] \quad (7)$$

式中: $\mathbf{M}(\mathbf{u})$ 表示坐标约束矩阵; $\boldsymbol{\gamma}$ 表示离心力、科氏力向量; \mathbf{u} 、 \mathbf{u}' 、 \mathbf{u}'' 表示空间站载体姿态角与关节角组成的向量; $\boldsymbol{\theta}$ 表示反馈关节角; $\boldsymbol{\varpi}$ 表示电机输出转角。

定义一个非奇异滑模面,引入非奇异滑模控制原理,推算出第一步控制律,如式(8)所示。其中,利用机器人腿的末端位置向量评估当前的姿态偏差结果,并利用权值向量自适应律调整控制策略。

$$[0,\boldsymbol{\varpi}_1]=[0,\boldsymbol{\theta}]+\boldsymbol{\sigma}+\left[\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{p}}\mathbf{u}e^{2-\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{p}}}\right]+[\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\psi})]+d\boldsymbol{\Gamma}(\boldsymbol{\nu}) \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\varpi}_1$ 表示第一步对应的控制变量; $\boldsymbol{\sigma}$ 表示逼近偏差; \mathbf{p} 表示对角矩阵; \mathbf{u} 表示扭转刚度; e 表示底数; $\boldsymbol{\Phi}$ 表示关节转角误差; $\boldsymbol{\psi}$ 表示指数趋势项; d 表示趋近速度; $\boldsymbol{\Gamma}$ 表示切换饱和函数; $\boldsymbol{\nu}$ 表示等速趋近项。

第二步有限差分法控制的主要目的是减少机器人行走产生的抖振,其产生的具体控制律为

$$\boldsymbol{\kappa}=-\boldsymbol{\mathcal{D}}[f_2+\mathbf{X}(\boldsymbol{\varpi}-f_1)]+\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{\varpi}_1-\boldsymbol{\theta})-\boldsymbol{\psi}-d\boldsymbol{\Gamma}(\boldsymbol{\nu}) \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\kappa}$ 表示输出力矩; $\boldsymbol{\mathcal{D}}$ 表示关节驱动电机端惯性阵; f_1 、 f_2 表示有限差分法计算出的两个虚拟控制变量; \mathbf{X} 表示对角、正定常值矩阵; $\boldsymbol{\xi}$ 为扭转刚度矩阵。

通过稳定性理论,设置第一步控制律涉及的权值向量自适应律,并推导出第二步控制律汇总的增益切换自适应律。综上所述,基于分步式结构的姿态控制系统可以实现井下四足机器人行走姿态的分层稳定控制。其中,利用机器人腿的末端位置向量作为输入,在后续的控制过程中通过有限差分法进行控制参数的调整,以实现机器人行走姿态的稳定控制。

1.4 基于递归反馈模型姿态生成器

针对井下四足机器人设计的CPG递归反馈模型主要包括3层反射机制,如图3所示。其中,高层反射结构主要依托于视觉传感器和听觉传感器获取行走环境^[8],并将其以递归的形式反馈给控制层,以便给出更加合适的控制策略。中层反射控制结构的核心是压力传感器和陀螺仪等传感器,在明确井下四足机器人实时行走姿态和行走位置后,将其传输给姿态生成器,以此来合理调节CPG参数,协调机器人多个关节运动,进一步保证机器人行走姿态的稳定。最后的底层反射控制结

构,主要负责观察机器人足端压力或姿态信息,将这部分信息传递到 CPG 与被控对象之间,从而调整 CPG 输出信号符合外界行走环境。

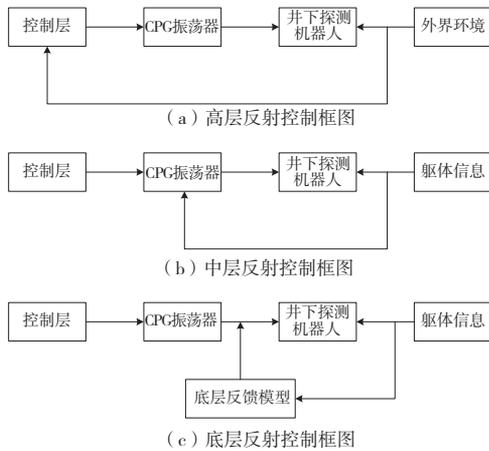


图3 高层、中层和底层反射递归控制框图

依托于上述反射控制结构生成机器人行走稳定步态时,起到主导作用的是 CPG 反射模型,本研究在考虑井下四足机器人基本节律步态后,给出由两个 1 阶微分方程组成的姿态生成器,如式(10)所示。

$$\begin{cases} l' = v_1(\rho - l^2 - v^2)l - \partial v \\ v' = v_2(\rho - l^2 - v^2)v - \partial l \end{cases} \quad (10)$$

式中: l 、 v 分别表示递归控制后的姿态输入向量, l' 、 v' 分别表示输出姿态向量; v_1 、 v_2 分别表示收敛系数; ρ 表示振荡控制器的幅值约束; ∂ 表示频率。在稳定控制过程中,通过结合 CPG(中央模式产生器)递归反馈模型,可以实时获取井下四足机器人的行走环境。同时,在分步式递阶控制系统的指导下,基于这些实时环境信息,机器人能够实现适应外界环境的自适应性运动,从而实现其在复杂环境下行走姿态的稳定。

2 实验

2.1 实验环境

在进行井下四足机器人行走姿态稳定控制的实验中,本研究创建了一个模拟井下环境的实验区域。实验区域具有以下特点。

地面条件:由多种不同类型的障碍物构成,包括坑洞、凸起、不规则的表面和斜坡等。这些障碍物模拟了井下复杂地形,对机器人的姿态稳定性提出了挑战。

视觉传感器:安装适当的摄像设备,如高分辨率摄像头,以获取机器人周围的视觉信息。这些

摄像设备可以用于检测障碍物、监控机器人行走姿态和环境识别。

传感器布局:在机器人的身体和腿部上布置压力传感器、陀螺仪等传感器,以获取实时的姿态和运动信息。这些传感器为中层反射控制结构提供了关键的数据反馈。

控制系统:设计并构建了一个强大且可编程的控制系统。该系统可以接收和处理传感器数据,并根据 CPG 反馈模型的算法对机器人的行走姿态进行稳定控制。

实验对象及相关参数设置:本研究所选择的井下四足机器人为四足式结构,采用主从式遥控操作,最大操作距离不小于 1 km。机器人本体上安装有热成像仪,在浓烟、浓雾等情况下,可以实现正常的远程操作;在机器人本体上还安装有井下环境信息综合检测系统,可对井下的温度、气体组成等信息进行采集和分析。其实物及控制器如图 4 所示。



(a) 四足井下探测机器人 (b) TX2控制器

图4 实验装置

为了便于观察,在实验开始之前对井下四足机器人的运行参数进行随机化处理,将关节转动惯量、关节摩擦等参数控制在一定变化范围内,如表 1 所示。

表1 机器人参数变化范围

参数	最低值	最高值
关节转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.8×原值	1.2×原值
机身质量/kg	0.8×原值	1.2×原值
关节摩擦因数	0.5	1.5
电机摩擦因数	0.01	0.05
各传感器噪声/dB(A)	0.95×原值	1.05×原值

控制器:选择了图 4(b)所示的 TX2 控制器,作为另一个关键实验装置,该控制器可以搭载强化学习策略网络,帮助姿态稳定控制方法的顺利应用。

2.2 姿态稳定控制结果

在上述准备完成后,实验环境模拟井下的复

杂地形和不平稳的地面,使用不同类型的障碍物、倾斜的地面或崎岖的表面来模拟不同的情境。应用所提方法进行姿态稳定控制,观察控制后姿态变化,以此来体现所提控制方法的优越性。井下以沙土地和石头地为主,在所提出的稳定控制方法应用后,得到井下沙地环境中机器人行走姿态变化如图 5 所示。



图 5 井下沙地环境中机器人行走姿态

同时,观察石子地环境中机器人某一刻行走姿态变化情况,如图 6 所示。



图 6 井下石子地环境中机器人行走姿态

从图 5 和图 6 可以看出,新研究的姿态稳定控制方法的使用可以保证控制机器人行走姿态,使其适应不同的井下地形环境,证明了所提出的控制方案是有效的。

2.3 分步式递归控制下的关节参数测试

将四足动物在自主运动时 DIP 关节的运动角度轨迹与在四足机器人辅助下的进行对比,实验结果如图 7 所示。

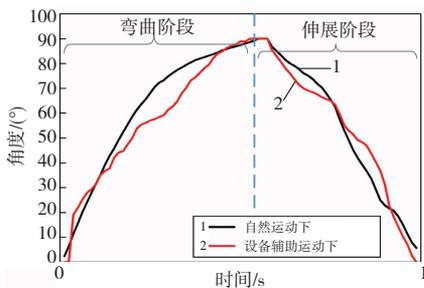


图 7 关节运动轨迹控制对比

图 7 实验中的运动过程包括两个阶段:关节的弯曲阶段和伸展阶段,两条曲线的控制范围均在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间。图中垂直虚线表示正常关节弯曲阶段与关节伸展阶段的分界线。从图中可以看出:正常关节弯曲的速度明显比伸展的速度要慢。另外当关节完全伸展时并没有出现负角度,因此

说明本文设计的控制算法解决了四足机器人关节过度伸展问题,从而保证了使用的安全性。

2.4 控制方法应用性能分析

将基于强化学习的控制方法、基于奇异摄动法的控制方法作为对照组,在同样的环境下进行姿态稳定控制实验,并统计使用不同方法控制后,机器人运动过程中的翻滚角与俯仰角变化,得到图 8 和图 9 所示的对比结果。

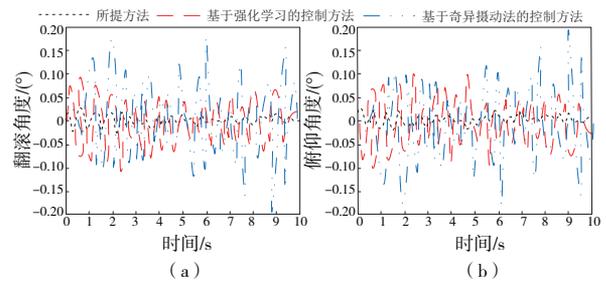


图 8 沙地上控制后机器人翻滚角、俯仰角变化

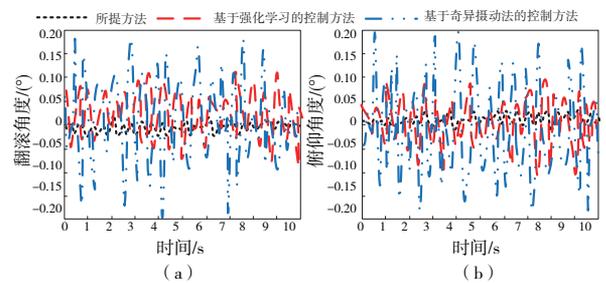


图 9 石子地上控制后机器人翻滚角、俯仰角变化

从图 8 和图 9 可以看出,应用所提方法后,机器人在沙地、石子地上行走,翻滚角和俯仰角波动范围均保持在 $-0.03^{\circ} \sim 0.03^{\circ}$ 之间;而其他两种方法控制完成后,翻滚角和俯仰角波动范围分别为 $-0.1^{\circ} \sim 0.1^{\circ}$ 、 $-0.2^{\circ} \sim 0.2^{\circ}$ 。机器人在复杂地形上行走时产生的翻滚角、俯仰角波动明显更加剧烈,这一对比结果证明了所提方法具有更优的稳定控制效果。

3 结语

针对井下四足机器人行走姿态稳定控制问题进行研究,提出了一种新型的控制方法。在该控制方法中,分层递归控制系统的不同层次相互协作,使得机器人能够根据环境信息动态调整姿态。同时,CPG 反馈模型充分利用实时感知的环境信息,以自适应的方式调节机器人的行走姿态,确保其在复杂环境下的稳定性。实验结果表明,该方法通过结合分步式递阶结构和 CPG 反馈模型,能

够有效地解决机器人行走姿态稳定控制问题。

参考文献:

- [1] 范振,陈乃建,董春超,等. 基于深度强化学习的单臂机器人末端姿态控制[J]. 济南大学学报(自然科学版),2022,36(5):616-625,634.
- [2] 秦建军,孟圆,曹钰,等. 基于强化学习的四足机器人牵引运动控制研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2022,36(12):80-90.
- [3] 王鸿儒,刘云平,马金虎,等. 基于奇异摄动法的水下机器人串-并联 PID 控制[J]. 空间控制技术与应用,2021,47(3):40-48.
- [4] 梁启星,李彬,李志,等. 基于模型预测控制的四足机器人斜坡自适应调整算法与实现[J]. 山东大学学报(工学版),2021,51(3):37-44,51.

- [5] 马飞越,刘佳豪,赵涛,等. 电力巡检机器人运行姿态的终端滑模控制[J]. 西南大学学报(自然科学版),2021,43(12):172-179.
- [6] 廖发康,周亚丽,张奇志. 考虑摆动腿动态的变长度柔性双足机器人步态切换控制研究[J]. 力学与实践,2022,44(3):605-617.
- [7] 李昂,杨泓渊,雷小萌,等. 基于等效连杆模型的六足机器人行进姿态闭环控制[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(7):1696-1708.
- [8] 付苗苗,沈红伟. 基于激光与视觉感知的机器人姿态自动控制研究[J]. 激光杂志,2021,42(5):138-142.

收稿日期:2023-10-17

(上接第 234 页)

从而达到更稳定的控制性能,但无法获得理想的跟随精度。需结合实际控制需求进行调整,在保证稳定性的前提下实现检测精度与响应速度的相互平衡。

3 应用

本研究成功后在很多配电输电线上进行了应用,可以在 1 m 左右保证 ± 5 mm 以内的定位精度,取得很好的效果。可以实现综合 1 cm 以内的作业精度,对导线定位提供很好的工作环境,实验照片如图 10 所示。



图 10 应用照片

4 结语

本文设计出一套纯机械式的位移反馈高空带电机器人控制装置,并对该系统响应性能进行仿真测试。取得如下有益结果:

- 1) 阀芯防误触行程越大,系统稳定时间越短,系统波动越小,响应时间越少;
- 2) 当防误触行程变大时,伸缩杆跟随性能降低,产生相位差,优点是动作平滑稳定。

该研究对优化配电网人工难作业监测环境控制提供了理论参考,但面对恶劣环境时尤其是雾霾天气作业下存在视觉定位的不足,后续需要加入双目视觉效果来进行加强。

参考文献:

- [1] 朱凯,姜文东,方玉群,等. 基于改进 Hough 变换的输电线路带电作业机器人检测方法[J]. 制造业自动化,2022,44(6):186-189,203.
- [2] 胡子琦,苑晶,公岩松,等. 面向配网带电作业机器人的输电线引线重建[J]. 控制工程,2021,28(11):2123-2130.
- [3] 高晓科,孙亮,张伟军. 高压带电引流作业机器人系统的设计与开发[J]. 机械设计与研究,2021,37(5):10-14,20.
- [4] 姜鹏,吴功平,杨松,等. 220 kV 带电线路树枝修剪机器人结构设计及实现[J]. 机械设计与制造,2021,366(8):152-156.
- [5] 胡仕成,陈志高,黎新齐. 高空带电机器人臂架稳定性优化控制仿真研究[J]. 机床与液压,2021,49(23):7-12.
- [6] 柏光瑞,郑育祥,吴凯,等. 面向配网带电作业机器人的导线识别定位方法[J]. 电网技术,2023,47(6):2604-2611.
- [7] 徐善军,任书楠,杜婧,等. 协作机器人在高压带电作业中的应用研究[J]. 制造业自动化,2021,43(9):106-110.
- [8] 王林,王洪光,景凤仁,等. 一种悬垂绝缘子带电清扫机器人机构设计[J]. 机械设计与制造,2019(1):232-235.

收稿日期:2023-05-09