

文章编号: 1671-251X(2024)S2-0195-04

悬线式矿用巡检机器人结构设计

刘雨格

(新罗大学 设计学院, 韩国 釜山 46958)

摘要:煤矿井下工人巡检安全隐患大、劳动强度高、时效性差,而现有巡检机器人受地形环境条件影响较大,动作控制复杂,需要提前设计大量的定轨,成本高,占用巷道空间资源。针对上述问题,设计了一种不受复杂地形结构和设备、人员分布影响的悬线式矿用巡检机器人。重点研究了该机器人的行走模块、夹紧模块和避障模块的机械结构设计,在 ADAMS 软件中建立了矿用机器人虚拟样机模型,对机器人在水平轨道和坡道轨道中运动状态进行了仿真分析。仿真结果表明:矿用巡检机器人最大巡检速度为 3 m/s,正常巡检速度在 0.8~2.3 m/s 之间;机器人沿水平轨道运动时不会发生剧烈波动,能够稳定运行;机器人在坡道轨道运行时,没有发生明显的前后摇晃现象,具有良好的稳定性。

关键词:巡检机器人;悬线式机器人;机械结构;行走模块;夹紧模块;避障模块

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Structure design of suspended line inspection robot for mining

LIU Yuge

(College of Design, Silla University, Busan 46958, Korea)

0 引言

在矿山作业环境中,安全巡检一直是确保生产安全与效率的关键环节。然而,传统的人工巡检方式面临安全隐患大、工人劳动强度高及巡检时效性差等问题,严重制约了矿山作业的安全管理与效率提升。

近年来,随着机器人技术的迅猛进步与广泛应用,国内众多学者将目光投向了煤矿巡检这一特殊领域,致力于研发能够胜任复杂矿井环境巡检任务的特种机器人。姜效星^[1]设计了一种挂轨式巡检机器人,配置了多种类传感器,用于煤矿变电室的日常巡检。郝铁琼^[2]设计了轨道式巡检机器人,搭载多种智能传感器和图像处理算法,实现了自主式巡航,对井下带式输送机进行巡检。然而以上 2 种巡检机器人属于轨道式机器人,受地形环境条件影响较大,动作控制复杂。胡盼^[3]应用 AI 算法,结合嵌入式技术设计了一款用于井下巡检的履带式机器人。姜俊英等^[4]设计了一款用于煤矿巷道巡检的机器人,该机器人不受外界环境影响,在巷道中能够灵活自由行动,提高了巡检效率。张海峰^[5]设计了一种挂轨式巡检机器人系统,该系统由巡检机器人、充电

站、巡检轨道、通信网络和远程管控平台组成,用于井下带式输送机的日常巡检工作。然而以上巡检机器人需要提前设计大量的定轨,成本高,占用巷道空间资源。

为有效克服地形结构复杂、设备和人员分布不均等难题,本文设计了一种悬线式矿用巡检机器人。对机器人的行走模块、夹紧模块及避障模块进行了优化设计,利用 ADAMS 软件建立了机器人虚拟样机模型,分别模拟了机器人在水平轨道和坡道轨道运行过程中的动态表现,仿真结果证明了其机械结构和物理参数设计的合理性与优越性。

1 巡检机器人关键结构设计

悬线式矿用巡检机器人三维结构模型如图 1 所示。该巡检机器人核心构成涵盖 4 个功能模块:行走模块、夹紧模块、避障模块及机器人主体机箱。这 4 个模块均配备独立的电动机驱动系统,彼此协同而又独立工作,确保了机器人在遭遇复杂障碍时能够迅速响应,以更加高效灵活的方式实现越障,显著提升了井下巡检作业的整体效能。

巡检机器人采用独特的双臂对称设计,配备有前后 2 个功能强大的爬行臂。每个爬行臂的顶端都

收稿日期:2024-10-25;责任编辑:盛男。

作者简介:刘雨格(1996—),女,山东临沂人,博士研究生,研究方向为工业产品,E-mail:missliuyuge2001@163.com。

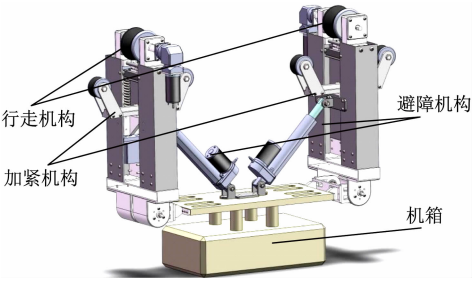


图 1 悬线式矿井下巡检机器人三维结构模型

安装有 1 对精密的行走轮,这些行走轮不仅能够沿着预设线路平稳行进,还能够气动滑台的精准驱动下,实现对称式开合动作,极大增强了机器人的适应性和灵活性。在机械臂的中段,设置有 1 个高效的加紧机构,该机构能够根据需要进行上下升降运动,为巡检任务提供了更多的操作可能性。此外,2 个爬行臂与机器人底部的坚固箱体之间,通过 2 个高性能的电动推杆实现灵活连接。这一设计使得机器人在面对障碍物时,能够通过电动推杆的精准控制,轻松实现俯仰运动,从而以更高的效率和稳定性跨越各种复杂地形,确保巡检任务顺利进行。

1.1 行走模块结构设计

行走模块结构设计的目的为矿用巡检机器人提供稳定、可靠的抓取力和滚动向前的运动方式。为实现较稳定的运动方式,巡检机器人利用滚轮与线缆接触。在行走轮和线缆上喷涂聚氨酯材料以提供更大的抓力,增强二者接触的摩擦力。

行走模块主要由爬行臂、行走轮支撑杆、行走轮轴、行走轮支座、从动轮、主动轮、轴承、减速器固定支架、减速器、行走电动机、气爪抓手等部件构成,如图 2 所示,其中行走轮由 2 台 maxonRE35 型直流电动机进行驱动,搭载 MHZ2-35D2 型气爪手驱动机器人行走轮的开合。

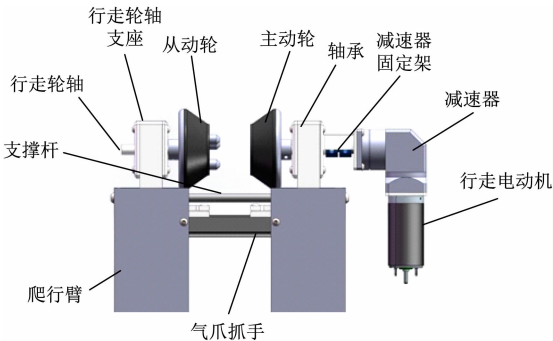


图 2 行走模块结构

1.2 夹紧模块结构设计

在机器人进行越障作业的过程中,单个爬行臂沿线行走的策略显得尤为重要。为实现稳定且高效的移动,夹紧模块发挥着不可替代的作用。具体而言,夹紧模块采用左右 2 个夹紧轮,这 2 个轮子与位于线缆下方的行走轮共同构成了一个稳固的三角形

支撑结构。这种设计不仅通过增加接触点的方式显著提升了行走轮与线缆之间的摩擦力,确保了机器人在行进过程中的稳定性和连续性,且极大增强了机器人的整体结构稳定性,有效防止了因单臂行走而导致的机器人倾斜、晃动乃至脱线等潜在风险,从而保障了作业的安全性和准确性。此外,夹紧模块还具备应对紧急情况的能力。在一些不可预见的危急时刻,夹紧模块能够迅速响应,通过夹紧轮施加更大的夹紧力,瞬间将机器人牢固地锁定在线缆上,充当起紧急刹车装置的角色。这一功能对于保护机器人免受意外损伤至关重要,它能够在关键时刻提供额外的安全保障,确保机器人及其携带的设备免受损害,同时也为后续的故障排查和修复工作创造了有利条件。

夹紧模块是机器人越障作业中的关键组成部分,其结构设计精细且功能多样,主要包括夹紧轮、夹紧支座、滚珠丝杠及夹紧驱动电动机等核心部件,如图 3 所示。在夹紧轮的设计上,选用轻质而坚固的铝合金作为主体材料,不仅减轻了整体质量,还确保了足够的强度和耐久性。为进一步增强夹紧效果并保护线路表面,夹紧轮表面还特别喷涂了一层聚氨酯涂层。这种涂层不仅能显著加大摩擦力,使夹紧更加牢固可靠,还能有效防止在夹紧过程中对线路造成损伤,确保了作业的安全性和线路的完整性。夹紧支座同样采用铝合金材质,通过精密的加工和装配,与滚珠丝杠的滑块紧密相连。在滑块的带动下,夹紧支座能够做竖直方向的升降运动,从而实现夹紧轮与线缆之间距离的灵活调整。这种设计不仅提高了夹紧机构的适应性,还确保了在不同作业环境下都能保持稳定的夹紧效果。在驱动结构的选择上,滚珠丝杠因其高精度和自锁功能而备受青睐。一方面,滚珠丝杠的旋转轴由步进电动机精确控制,可以实现精确的行程量调整,确保了夹紧机构的精准定位。另一方面,通过在电动机和滚珠丝杠之间的联轴器上添加抱闸机构,使得夹紧机构具备自锁功能。这一功能在机器人单臂行走时尤为重要,它能够承受线缆向下的压力,保护电动机的同时确保夹紧机构稳定停留在原处。这不仅节省了巡检机器人的能源消耗,还提高了作业效率,使机器人能够更好地完成巡检任务。

1.3 避障模块结构设计

巡检机器人在执行任务时,面临着复杂多变的作业环境。它不仅需要在无障碍的架空地线上保持稳定的行走姿态,以确保巡检工作的顺利进行,同时,在遇到各种障碍物时,机器人还需具备快速识别障碍物的能力,并能迅速作出反应,采取安全稳定的

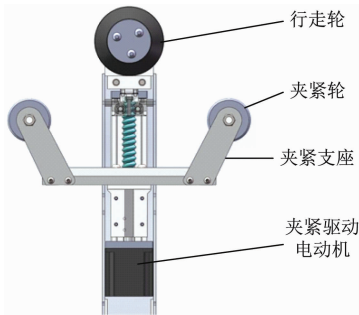


图 3 夹紧模块结构

策略跨越障碍物。这就要求巡检机器人必须配备先进的越障机械结构,以适应不同地形和障碍物的挑战。此外,一个精确高效的控制系统也是必不可少的,它能够根据实时获取的障碍物信息,迅速调整机器人的行走路径和越障策略,确保机器人在跨越障碍物的过程中始终保持稳定和安全。因此,越障机械结构与精确高效控制系统的完美配合,是巡检机器人能够成功完成复杂巡检任务的关键。避障模块结构如图 4 所示。

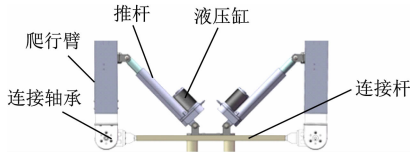


图 4 避障模块结构

避障模块主要由驱动构件和旋转构件两大核心部分构成。在驱动构件方面,电动推杆与机器人的爬行臂之间通过特制的不锈钢连接块实现牢固连接,同时,电动推杆的底部则与机器人底部箱体紧密相连,形成稳定的结构支撑。当巡检机器人遇到障碍物时,电动推杆会迅速响应,通过伸长其推杆部分,带动爬行臂向下运动。这一动作使得行走轮能够顺利脱离线缆,为机器人越过障碍物提供了必要的空间。当机器人成功跨越障碍物后,电动推杆则会执行相反的动作,即收缩推杆,使机器人重新回归线缆并夹紧,从而完成整个越障过程。在该过程中,旋转构件同样发挥着不可或缺的作用。它主要由旋转轴、轴承及连接配件等关键部件组成,这些部件协同工作,实现了爬行臂与机器人底部机箱之间的灵活旋转。为保证连接处的刚度和旋转时的强度,连接配件特别采用了不锈钢材质进行制造,不仅提高了旋转构件的耐用性,还确保了机器人在越障过程中能够保持稳定和可靠的性能。因此,避障模块通过驱动构件和旋转构件的紧密配合,为巡检机器人提供了强大的越障能力。

2 巡检机器人性能模拟分析

在 SolidWorks 中建立矿用巡检机器人模型,将

模型导入 ADAMS 中,分别对正常巡检和爬坡巡检过程中机器人运行状况进行模拟,评估矿用巡检机器人性能。

2.1 水平轨道运动分析

经理论计算,行走轮的最大转速为 2 303 r/min,折算到驱动轮的速度最大值为 3.01 m/s,通过模拟实验观察巡检机器人在此转速下的驱动轮速度变化情况,如图 5 所示。可看出驱动轮在初期加速度较快,持续 0.3 s 后,机器人速度到达设计最大值 3 m/s,并在最大速度下保持基本平稳运行。

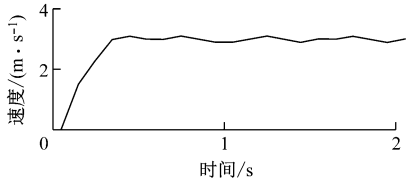


图 5 3.01 m/s 下驱动轮速度变化曲线

常规巡检状况下,巡检机器人的速度设计值在 0.8~2.3 m/s 之间,在此区间选取 1.3 m/s,观察巡检机器人速度变化情况,如图 6 所示。可看出巡检机器人达到设计速度 1.3 m/s 用时 0.2 s,加速期间行进距离约为 214 m,之后开始保持基本稳定运行。

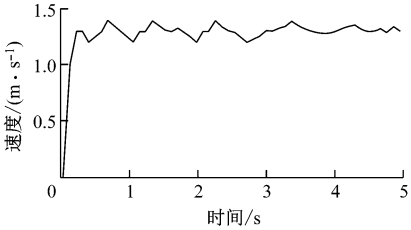


图 6 1.3 m/s 下巡检机器人速度变化曲线

2.2 坡道轨道运动分析

设坡角为 6°,分别在巡检机器人最大运行速度和常规巡检速度下测试其爬坡性能,结果分别如图 7、图 8 所示。

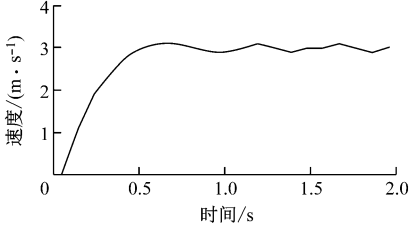


图 7 最大运行速度下巡检机器人爬坡速度变化曲线

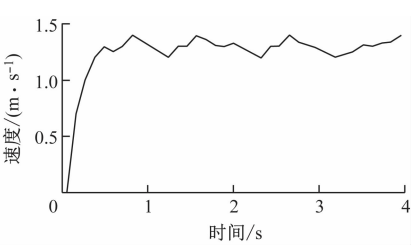


图 8 常规巡检速度下巡检机器人爬坡速度变化曲线

值。将变量 x 作为给水量设置,变量 y 作为阀门开度,实现给水量模糊控制。

4 仿真分析

引入模糊 PID 控制前后系统动态响应曲线如图 6 所示。可看出,引入模糊 PID 控制前超调量约为 $0.3\text{ m}^3/\text{s}$,系统收敛耗时约 4 s ;模糊 PID 控制下,系统的超调量约为 $0.2\text{ m}^3/\text{s}$,达到稳定状态耗时约为 2 s 。

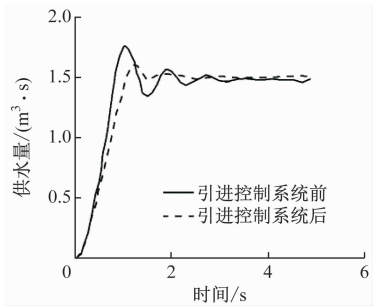


图 6 引入模糊 PID 控制前后供水量

引入模糊 PID 控制前后球磨机工作电流曲线如图 7 所示。可看出,球磨机电流的波动范围为 $28\sim 32\text{ A}$,即处在最佳工作区间内。

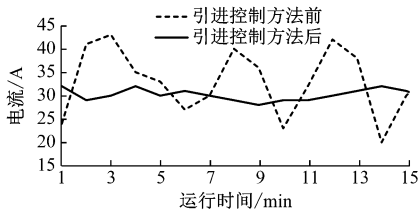


图 7 引入模糊 PID 控制前后球磨机工作电流曲线

5 结语

研究了选矿过程中磨矿环节的给水量和给矿量调节方法,利用串级连接调节供水量,利用副调节回路及时校正主输入量扰动,利用模糊 PID 控制调节供矿量,提高系统的自适应能力。仿真结果表明,该系统具有收敛速度快、抗干扰能力强等优点。

参考文献:

[1] 穆海芳,何康,李明. 基于模糊与 PID 控制的选矿生产过程研究[J]. 萍乡学院学报, 2019, 36(3): 51-54, 94.

[2] 张晓娟,王云鹤. 模糊 PID 串级控制在磨矿浓度实时监控中的应用[J]. 黄金, 2009, 30(9): 37-39.

[3] 王立凤. 基于三菱 PLC 的磨矿分级 PID 调节控制系统设计[J]. 无锡商业职业技术学院学报, 2020, 20(4): 102-106.

[4] 余刚,郑秉霖,柴天佑. 面向过程建模的选矿生产计划调度仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(3): 593-600.

[5] 杨文龙,石岩,宋旖. 基于模糊 PID 的悬浮液液位与密度耦合控制算法研究[J]. 江西冶金, 2024, 44(3): 204-210.

[6] 王国贝,郑灿辉,赵兵兵. PID 模糊控制系统在某白钨选矿厂生产中的应用[J]. 现代矿业, 2018, 34(8): 134-135, 137.

[7] 赵海利,赵建军,赵宇,等. BPSM-III 型粒度仪多模型建模在山东黄金某选矿厂的应用[J]. 中国矿业, 2016, 25(增刊 1): 447-450.

(上接第 197 页)

由图 7、图 8 可知,井下巡检机器人在攀爬 6° 的斜坡时,经过 0.5 s 达到最大巡检速度 3 m/s ,经过 0.4 s ,达到设计的常规巡检速度 1.3 m/s ,预定速度到达后均能维持稳定运行,说明巡检机器人在正常巡检遇到倾斜轨道时具备爬升能力。

3 结语

设计了一种适用于煤矿井下巡检的机器人,重点对机器人的行走模块、夹紧模块和避障模块的机械结构进行了设计,并在 ADAMS 中进行了仿真分析。仿真结果表明:矿用巡检机器人最大巡检速度为 3 m/s ,正常巡检速度在 $0.8\sim 2.3\text{ m/s}$ 之间;巡

检机器人在水平轨道和坡道轨道中均能达到预定速度,且能够保持稳定运行。

参考文献:

[1] 姜效星. 煤矿井下变电所挂轨式巡检机器人设计与实现[J]. 机械工程与自动化, 2024(1): 170-172.

[2] 郝轶琼. 煤矿井下带式输送机智能巡检机器人系统设计[J]. 现代矿业, 2024, 40(8): 19-22, 27.

[3] 胡盼. 煤矿井下履带式巷道巡检机器人系统设计[J]. 能源与节能, 2024(6): 158-160, 187.

[4] 姜俊英,周展,曹现刚,等. 煤矿巷道悬线巡检机器人结构设计及仿真[J]. 工矿自动化, 2018, 44(5): 76-81.

[5] 张海峰. 煤矿巡检机器人系统设计[J]. 煤矿机械, 2023, 44(8): 9-11.