

9-15-2024

Modeling and Simulation of Pipeline Cable Inspection Robot Based on Omnidirectional Wheel

Chao Yuan

Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Yao Zhang

Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Yadong Zhao

Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Dawei Xu

Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Modeling and Simulation of Pipeline Cable Inspection Robot Based on Omnidirectional Wheel

Abstract

Abstract: Aiming at the problem that the inner space of underground pipeline cable is narrow and closed, which cannot be inspected by humans, and the existing pipeline robot cannot adapt to the special environment of pipeline cable, a miniaturized, compact pipeline cable inspection robot is designed. This robot is capable of operating within the underground pipeline where cables have already been laid to inspect the inner wall of the pipeline and the working condition of the cables. According to the requirements of the working conditions, the whole three-dimensional model of the robot has been established. The mapping relationship between the omnidirectional wheel velocity and the system velocity has been analyzed, as well as the variable diameter support capacity and tractive force of the robot inside the pipeline, and the mathematical model has been established. The simulation results show that the robot can directly pass through the underground pipeline laying YJLV22-3300 cable, and can adjust its posture to avoid obstacles and continue to complete the inspection task. The simulation results are basically consistent with the theoretical calculations, verifying the correctness of the dynamic model.

Keywords

pipeline robot, pipeline cable, omnidirectional wheel, dynamics, ADAMS simulation

Authors

Chao Yuan, Yao Zhang, Yadong Zhao, Dawei Xu, Jing Yuan, and Yongjie Zhai

Recommended Citation

Yuan Chao, Zhang Yao, Zhao Yadong, et al. Modeling and Simulation of Pipeline Cable Inspection Robot Based on Omnidirectional Wheel[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2100-2112.

基于全向轮的排管电缆巡检机器人建模及仿真

苑朝¹, 张耀^{1*}, 赵亚冬¹, 徐大伟^{1,2}, 苑晶³, 翟永杰¹

(1. 华北电力大学 自动化系, 河北 保定 071003; 2. 中国科学院 自动化研究所 复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190;
3. 南开大学 人工智能学院, 天津 300071)

摘要: 针对地下排管电缆内部空间狭小密闭, 人工无法巡检, 现有管道机器人无法适应排管电缆这一特殊环境的问题, 设计了一款小型化、紧凑型且能够在已敷设电缆的地下排管内实现运行的排管电缆巡检机器人, 用以对排管内壁及电缆工况进行检测。根据工况需求, 建立机器人整体三维模型。分析全向轮速度与系统速度的映射关系, 分析机器人在排管内部的变径支撑能力和牵引力大小, 建立数学模型。仿真结果表明: 该机器人能够在敷设电缆型号为 YJLV22-3×300 的地下排管内直行通过, 且能进行姿态调整, 避过障碍物继续直行, 完成巡检任务。仿真结果与理论计算基本一致, 验证了动力学模型的正确性。

关键词: 管道机器人; 排管电缆; 全向轮; 动力学; ADAMS 仿真

中图分类号: TP242.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)09-2100-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0536

引用格式: 苑朝, 张耀, 赵亚冬, 等. 基于全向轮的排管电缆巡检机器人建模及仿真[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(9): 2100-2112.

Reference format: Yuan Chao, Zhang Yao, Zhao Yadong, et al. Modeling and Simulation of Pipeline Cable Inspection Robot Based on Omnidirectional Wheel[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 2100-2112.

Modeling and Simulation of Pipeline Cable Inspection Robot Based on Omnidirectional Wheel

Yuan Chao¹, Zhang Yao^{1*}, Zhao Yadong¹, Xu Dawei^{1,2}, Yuan Jing³, Zhai Yongjie¹

(1. Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Aiming at the problem that the inner space of underground pipeline cable is narrow and closed, which cannot be inspected by humans, and the existing pipeline robot cannot adapt to the special environment of pipeline cable, a miniaturized, compact pipeline cable inspection robot is designed. This robot is capable of operating within the underground pipeline where cables have already been laid to inspect the inner wall of the pipeline and the working condition of the cables. According to the requirements of the working conditions, the whole three-dimensional model of the robot has been established. The mapping relationship between the omnidirectional wheel velocity and the system velocity has been analyzed, as well as the variable diameter support capacity and tractive force of the robot inside

收稿日期: 2023-05-08 修回日期: 2023-07-25

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目重点支持项目(U21A20486); 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室开放课题(20220102)

第一作者: 苑朝(1985-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为机器人学、传感器系统设计。

通讯作者: 张耀(1996-), 男, 硕士生, 研究方向为机器人结构设计与系统仿真、嵌入式开发。

the pipeline, and the mathematical model has been established. The simulation results show that the robot can directly pass through the underground pipeline laying YJLV22-3300 cable, and can adjust its posture to avoid obstacles and continue to complete the inspection task. The simulation results are basically consistent with the theoretical calculations, verifying the correctness of the dynamic model.

Keywords: pipeline robot; pipeline cable; omnidirectional wheel; dynamics; ADAMS simulation

0 引言

排管电缆输送电力作为一种重要的输电方式,在电网系统输电中起着重要作用^[1]。我国排管电缆输电量巨大,电缆自身长时间满负荷运行,且处于密闭空间,电缆热量不能充分散发,导致电缆本体温度升高,而电缆温度一旦过高会加速电缆绝缘层老化,缩短电缆使用寿命,严重时甚至会导致火灾的发生,运维人员无法深入排管内检测电缆工况^[2-5],因此,排管电缆巡检机器人用于电缆巡检工作成为必要需求。

排管电缆巡检机器人属于管道机器人范畴。文献[6]开展了轮式管道机器人系统研究,形成了MRINSPECT系列管道机器人,其中,MRINSPECT VII机器人能够通过复杂机械结构调节行走速度,不需要额外的控制输入,即可自动分配扭矩。文献[7]设计了轮式管道泄漏检测机器人,机器人6个滚轮与管道内壁保持接触,确保其稳定性,同时需要在机器人身上安装多个压力传感器,对所处空间有一定要求。文献[8]研究的管道机器人,通过控制算法对管道机器人进行定位和导航,保证机器人能够在管内复杂的情况下实现无线通信。文献[9]设计的轮履组合式管道机器人用于弯曲处的拐角方向检测,以此来预估未知管网中的弯管参数,避免出现问题。文献[10]设计的蛇形机器人利用复杂的控制算法在管道内运动,来完成不同的任务。

文献[11]研制了一种三轴差动式管道机器人,以此来提高机器人通过弯管时的运动柔顺性。文献[12]提出一种体积微小的无损伤内外螺旋管道机器人,建立了机器人在液体管道中运行时的动力学方程,运用计算流体力学方法,数值仿真机器

人系统的流体流场,分析了机器人动力学特性以及环境特征参数对机器人运行性能的影响。文献[13]设计了一种由液压驱动的主动螺旋式自适应爬行结构,但机器人携带作业工具进入窄小管道较为困难。文献[14]研制出一种管道清淤机器人,用来增强其运动的协调性和可控性,具有较好的管道清淤能力。文献[15]设计了蠕动式管道机器人,用以对管道内壁的损伤及管体腐蚀开裂情况进行离线检测,可实现复杂工况下的运行和检测。

国内外管道机器人大多用于检测、维修管道本身或清理管道内杂物等,对所处空间以及操作控制有一定要求,且均不能在敷设电缆这类所剩空间不规则、狭窄的排管中运行和进行姿态调整用以检测电缆工况。

本文设计出一种能在敷设电缆的排管内运行并能够进行姿态调整的电缆巡检机器人,该机器人具有小型化、紧凑型、姿态可调、操作简单等特点,可对电缆测温,检查工况,具有人工不可替代的优越性,可以提高检测效率,为确保电力系统的安全稳定运行提供有效保障。

1 工况需求分析及机器人结构

1.1 工况需求分析

本文针对的排管电缆是现场敷设10 kV大十线与10 kV大庆线的电缆,其中,10 kV大十线总长为4.6 km,10 kV大庆线总长为2.467 km。机器人巡检的排管内径为 $\Phi 180$ mm,外径为 $\Phi 190$ mm,排管壁厚为5 mm,内部敷设电缆的型号为YJLV22-3 \times 300,外径为 $\Phi 80$ mm,如图1所示。



图 1 现场采集的地下排管电缆
Fig. 1 Underground pipeline cable drawings collected on site

在电缆位于排管底部中心位置时，排管内部剩余空间高度为 100 mm，如图 2 所示，黑色阴影部分为机器人机构可用空间，在最大利用机器人机构可用空间的基础上，留出一定空间，避免机器人本体与排管或电缆形成干涉。根据实际情况，排管内会有土块、沙石等障碍物或电缆排布不规则等情况，如图 3 所示，会阻碍机器人前进，因此，机器人应具备姿态调整能力。

基于工况需求进行机器人设计，要求机器人主体尺寸最大高度 < 100 mm，最大宽度 < 180 mm，质

量 ≤ 8 kg，运动速度可调且不低于 100 mm/s，搭载各种电路板、传感器等部件，可以实现直行、后退、停止和自身姿态调整功能，同时避免对电缆造成损伤。

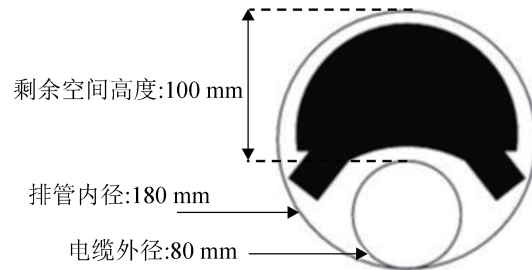


图 2 排管可用空间
Fig. 2 Available space of pipeline

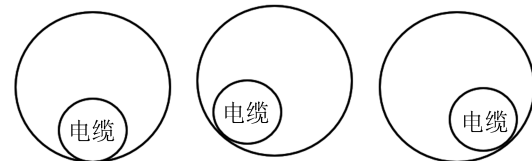


图 3 电缆位置分布
Fig. 3 Cable position distribution

1.2 机器人整体结构

排管电缆巡检机器人整体结构如图 4 所示，主要由 4 个部分组成：支撑行走部分、电磁锁紧部分、驱动传动部分、保护部分。驱动传动部分由电机 A、电机 B 和齿轮传动机构组成，电机 A 直接驱动机器人运行，电机 B 驱动齿轮传动机构实现姿态调整。

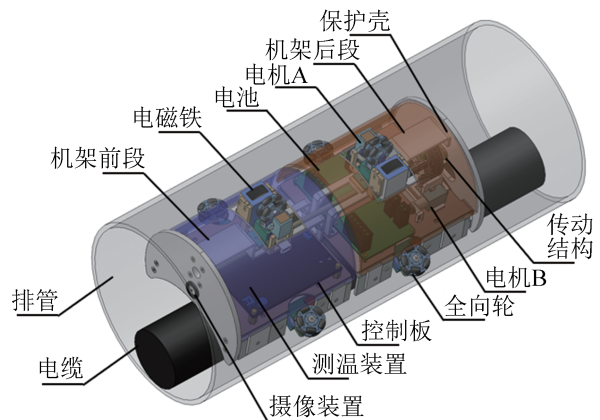


图 4 机器人整体结构三维图
Fig. 4 3D diagram of overall structure of robot

机器人整体结构为二段式机构, 移动方式为支撑轮式, 属于六点支撑方式, 其优势在于不但可以增强机器人在管道内的稳定性, 而且可以提高机器人在进行姿态调整时的自锁性。

2 工作原理及支撑行走机构

2.1 工作原理

定义机器人前半部分为机体1, 后半部分为机体2。机体1、2上方各有一个主动全向轮, 两侧各有4个被动全向轮。电机A分别安装在机体1、2上方, 用来驱动主动全向轮带动整体运动, 电机B用于调整机体姿态。

机器人初始以水平姿态运行, 沿管道轴线方向前进或运动到指定位置; 当摄像装置发现前方有障碍物(土块、沙石等)或电缆排布不规则时, 机体2上的电磁铁上电, 锁紧机体2, 断开电机A, 启动电机B, 使机体1周向旋转到可以避过障碍物的角度, 此角度定义为姿态角 ψ , 而后, 机体2上的电磁铁断电, 机体1上的电磁铁上电, 锁紧机体1, 再次启动电机B, 使机体2周向旋转到相同的姿态角 ψ , 由此, 机器人整体完成姿态调整, 继续移动, 避过障碍物。

避过障碍物后, 机体反向旋转复位, 电磁铁与电机B断电, 电机A重新上电启动, 机器人重新回到初始水平姿态, 继续前进执行巡检任务。图5为机体姿态调整示意图。

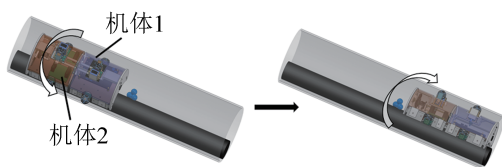


图5 姿态调整

Fig. 5 Attitude adjustment

机器人状态与电机和电磁铁间关系见表1。

表1 机器人状态
Table 1 Robot state

机器人状态	电机A	电机B	电磁铁
直行状态	开	关	关
姿态调整	关	开	开/关
停止状态	关	关	关

2.2 顶支撑行走机构

图6为机器人的顶支撑机构。支撑行走部分采用被动调节式弹簧预紧机构, 确保各个全向轮与管壁接触并获得足够的正压力, 增强机器人适应性^[16-17]。本文采用2个自由度的全向轮^[18], 以适应排管曲面的限制和姿态调整要求, 提高机器人的行走能力和对管壁的适应能力。

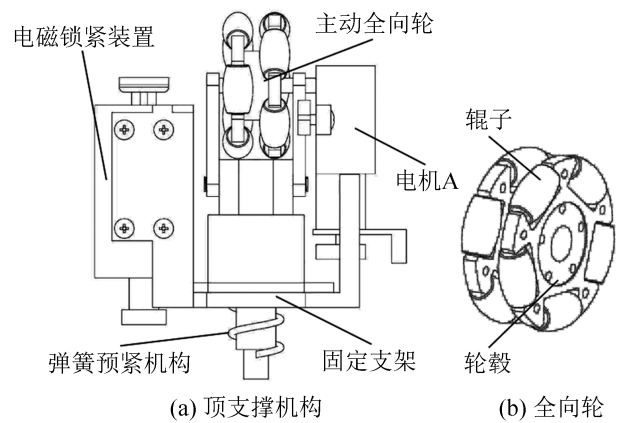


图6 机器人顶支撑行走机构

Fig. 6 Robot roof support walking mechanism

3 机器人运动学动力学分析

3.1 全向轮速度与系统速度映射关系

为了说明全向轮在某一时刻的瞬时速度与电缆巡检机器人整个系统速度的映射关系, 本文以主动全向轮 o_i 为例, 建立电缆巡检机器人中心坐标系 $O_M X_M Y_M$ 和主动全向轮中心坐标系 $o_i x' y'$, 如图7所示。

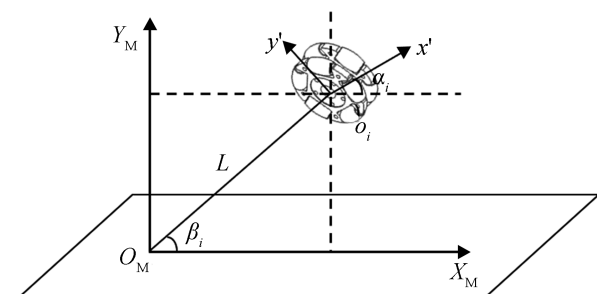


图7 机器人中心与全向轮中心的位置关系

Fig. 7 Position relationship between robot center and omnidirectional wheel center

由图 7 可知, $o_i x' y'$ 相对 $O_M X_M Y_M$ 的位姿为 $(L \cos \beta_i, L \sin \beta_i, \alpha_i)$, 设 (v_x, v_y, ω) 为电缆巡检机器人中心在 $O_M X_M Y_M$ 中的速度, $(v'_{ix'}, v'_{iy'}, \omega'_i)$ 为主动全向轮中心 o_i 在 $o_i x' y'$ 中的速度, $(v_{ix'}, v_{iy'}, \omega_i)$ 为 o_i 在 $O_M X_M Y_M$ 中的速度, 由此可得关系表达式^[19-20]:

$$\begin{cases} v_{ix'} = v_x - L\omega \sin \beta_i \\ v_{iy'} = v_y + L\omega \cos \beta_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} v_{ix'} = v'_{ix'} \cos \alpha_i - v'_{iy'} \sin \alpha_i \\ v_{iy'} = v'_{ix'} \sin \alpha_i + v'_{iy'} \cos \alpha_i \end{cases} \quad (2)$$

$$v'_{ix'} = -r_i \dot{\gamma}_i \quad (3)$$

$$v'_{iy'} = r_i \dot{\phi}_i \quad (4)$$

式中: ω 为机器人绕 O_M 点的角速度; $\dot{\phi}_i$ 为主动全向轮 i 的旋转速度; $\dot{\gamma}_i$ 为主动全向轮辍子的速度; r_i 为主动全向轮 i 的半径; r_r 为主动全向轮辍子的半径。

同时将式 (3) (4) 代入式 (1) (2) 中, 消去 $(v_{ix'}, v_{iy'}, \omega_i)$, 可得机器人系统速度与主动全向轮速度的关系表达式:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -L \sin \beta_i \\ 0 & 1 & L \cos \beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_i \sin \alpha_i & -r_r \cos \alpha_i \\ r_i \cos \alpha_i & -r_r \sin \alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_i \\ \dot{\gamma}_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

主动全向轮的速度可控, 但是辍子的速度无法进行直接控制。因此, 在建立双方速度之间的关系时, 需要考虑系统的逆运动学方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{R} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & L \cos(\beta_1 - \alpha_1) \\ -\sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & L \cos(\beta_2 - \alpha_2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: \mathbf{R} 为逆运动学矩阵。

3.2 机器人变径支撑能力分析

支撑稳定性对运动载体稳定驱动至关重要。由于机器人二段式结构的对称性, 进行受力分析

时, 只需要研究两个主动全向轮中的一个即可。

假设机器人以恒定速度 v 行驶, 机身作为固定件, 建立坐标系 Ozy (z 轴通过管道轴线, y 轴通过机器人质心 O 点), 如图 8 所示。 N_{t1} 为由弹簧预紧机构作用产生的管壁对全向轮产生的正压力, F_{t1} 为管壁对全向轮产生的摩擦力, F_{st1} 为预紧弹簧对构件 $A_{t1} B_{t1}$ 的作用力, T 为主动全向轮所受的驱动转矩, α_{t1} 为坐标系 z 轴与 OA_{t1} 的结构夹角, β_{t1} 为坐标系 z 轴与 OB_{t1} 的结构夹角, L_{t1} 为机器人质心 O 到端点 B_{t1} 的长度, L'_{t1} 为机器人质心 O 到端点 A_{t1} 的长度。

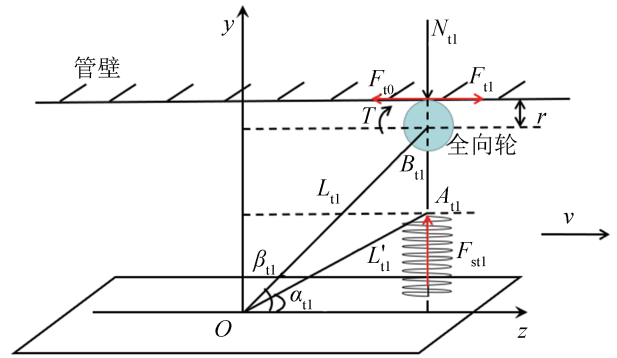


图 8 弹簧预紧机构受力分析
Fig. 8 Force analysis of spring preload mechanism

$$\begin{cases} y_{B_{t1}} = L_{t1} \sin \beta_{t1} \\ y_{A_{t1}} = L'_{t1} \sin \alpha_{t1} \\ z_{B_{t1}} = L_{t1} \cos \beta_{t1} \end{cases} \quad (8)$$

根据虚位移原理, 管壁对主动全向轮的正压力 N_{t1} 、弹簧力 F_{st1} 与牵引力 F_{t1} 在该位置由微小位移引起的虚功之和应为 0, 可得到方程:

$$N_{t1} \delta y_{B_{t1}} - F_{st1} \delta y_{A_{t1}} - F_{t1} \delta z_{B_{t1}} = 0 \quad (9)$$

对式(8)进行微分可得:

$$\begin{cases} \delta y_{B_{t1}} = L_{t1} \delta \beta_{t1} \cos \beta_{t1} \\ \delta y_{A_{t1}} = L'_{t1} \delta \alpha_{t1} \cos \alpha_{t1} \\ \delta z_{B_{t1}} = -L_{t1} \delta \beta_{t1} \sin \beta_{t1} \end{cases} \quad (10)$$

同时:

$$F_{t1} = \mu N_{t1} \quad (11)$$

式中: μ 为全向轮与管壁之间的滑动摩擦系数。

将式(10)和式(11)带入式(9)可得

$$N_{t1} = \frac{L'_{t1} \alpha_{t1} \cos \alpha_{t1}}{L_{t1} \beta_{t1} \cos \beta_{t1} (1 + \mu \tan \beta_{t1})} F_{st1} \quad (12)$$

根据三角形正弦定理, 在 ABO 中满足

$$\frac{L'_{t1}}{\sin(90^\circ - \beta_{t1})} = \frac{L_{t1}}{\sin(90^\circ + \alpha_{t1})} \quad (13)$$

由此可知, 机体1上主动全向轮 O_{t1} 所在弹簧预紧机构作用产生的正压力为

$$N_{t1} = \frac{\cos \alpha_{t1}}{\cos \beta_{t1} + \mu \sin \beta_{t1}} F_{st1} \quad (14)$$

式中: $0 < \alpha_{t1} < \beta_{t1} < 90^\circ$ 。

3.3 机器人牵引力分析

图9为机体1在管道 xy 截面且静止状态下的受力图。其中, N_{t1} 为机体1上主动全向轮所受正压力; N_1 、 N_2 为机体1的2个从动全向轮所受支撑力; θ_1 、 θ_2 为2个从动全向轮支撑连杆与水平方向夹角; $G/2$ 为机体1重力; O_1 为管道 xy 截面圆心; O_2 为电缆 xy 截面圆心。

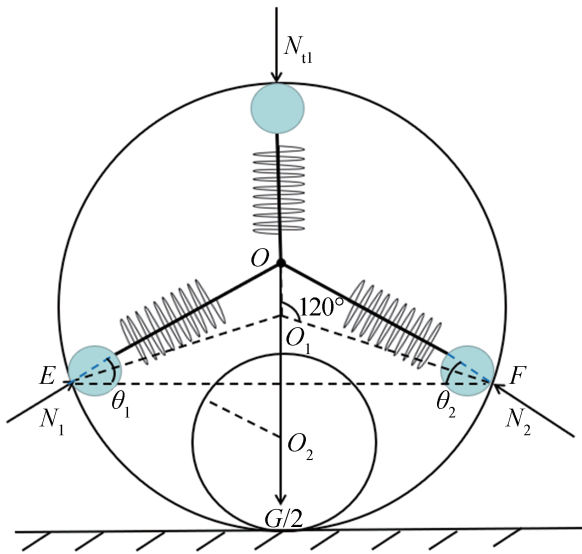


图9 机体1在管道 xy 截面的受力分析

Fig. 9 Force analysis of body 1 in xy section of pipeline

根据图9可得出机体1受力平衡方程为

$$\begin{cases} N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2 - N_{t1} - G/2 = 0 \\ N_1 \sin \theta_1 - N_2 \sin \theta_2 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15)可得

$$\begin{cases} N_1 = \frac{\tan \theta_2 (2N_{t1} + G)}{2 \cos \theta_2 (\tan \theta_1 + \tan \theta_2)} \\ N_2 = \frac{\tan \theta_1 \tan \theta_2 (2N_{t1} + G)}{2 \sin \theta_2 (\tan \theta_1 + \tan \theta_2)} \end{cases} \quad (16)$$

机器人在水平姿态时, $\theta_1 = \theta_2$, 从而可得

$$N_1 = N_2 = \frac{2N_{t1} + G}{4 \cos \theta_1} \quad (17)$$

由于机器人整体结构为二段式结构, 前后对称, 因此, 机器人整体受到的支撑力为

$$N_{\text{总}} = 2(N_{t1} + N_1 + N_2) \quad (18)$$

由式(14)可得 N_{t1} , 带入式(18)可得

$$N_{\text{总}} = \frac{2 \cos \alpha_{t1} (\cos \theta_1 + 1) F_{st1} + (\cos \beta_{t1} + \mu \sin \beta_{t1}) G}{(\cos \beta_{t1} + \mu \sin \beta_{t1}) \cos \theta_1} \quad (19)$$

前方有障碍物(土块、沙石等)或电缆排布不规则时, 机体进行姿态调整, 转动 ψ 角度后($0 \leq \psi < \pi/3$), 机体1的受力分析图如图10所示。

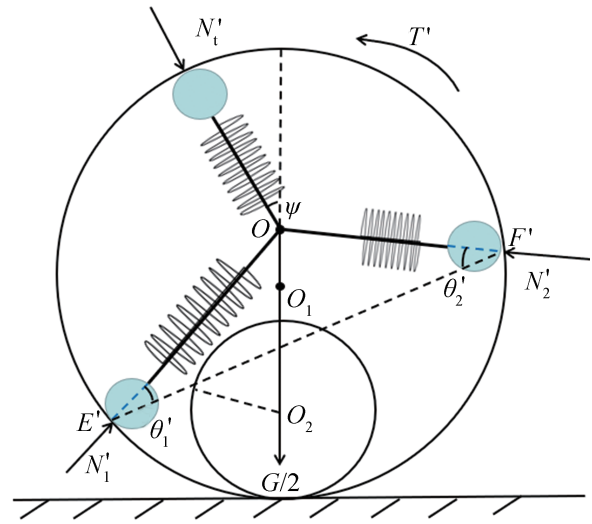


图10 机体1转动 ψ 角度后的受力分析

Fig. 10 Force analysis of body 1 after rotation ψ angle

机体1旋转 ψ 角度后的受力平衡方程:

$$\begin{cases} N'_1 \sin \psi_1 - N'_2 \sin \psi_2 - N'_{t1} \cos \psi - G/2 = 0 \\ N'_1 \cos \psi_1 - N'_2 \cos \psi_2 + N'_{t1} \sin \psi = 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\psi_1 = \psi + \theta_1$, $\psi_2 = \theta_2 - \psi$ 。

同理可得, 机器人进行姿态调整转动 ψ 角度

后受到管道内壁对机器人的总支撑力为 $N_{总}^i$ 。

电缆巡检机器人整体在管道内静止时的受力分析如图 11 所示。图中机器人与管道的接触点一共为 6 个，其中， N_{t1} 、 N_{t2} 、 $N_1 \sim N_4$ 分别为 6 个接触点处管壁对机器人提供的压力，各接触点受到的摩擦力分别为 f_{t1} 、 f_{t2} 、 $f_1 \sim f_4$ 。

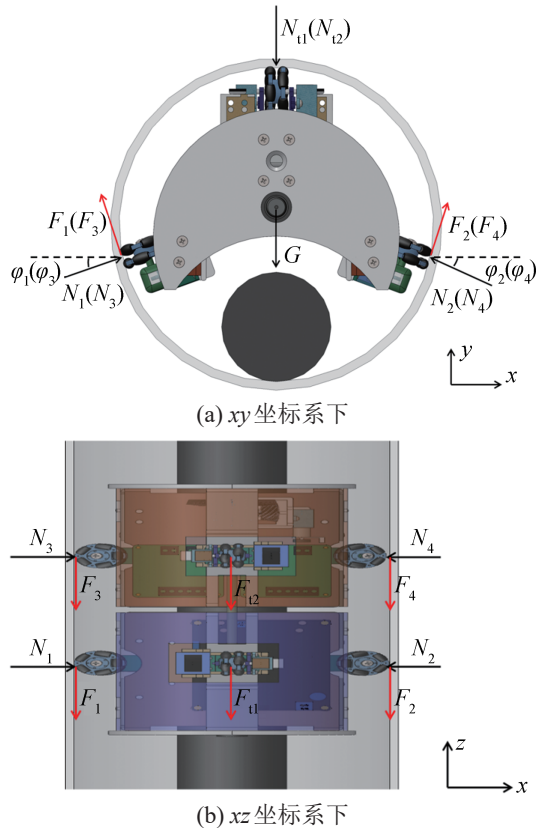


图 11 机器人整体受力分析
Fig. 11 Robot overall force analysis

由于全向轮处为滚动摩擦，其滚动摩擦阻力可以忽略不计，因此各接触点受到管壁向前的推动力为 F_{t1} 、 F_{t2} 、 $F_1 \sim F_4$ ，则机器人的牵引力可近似认为等于 2 个主动全向轮受到的推动力与 4 个从动轮受到的推动力之和。

机器人在水平管道内以水平姿态运行时的总牵引力为

$$F_{牵} = \sum_i^2 F_{ui} + \sum_j^4 F_j \quad (21)$$

$$\begin{cases} F_{ui} = f_{ui} = \mu N_{ui}, i = 1, 2 \\ F_j = f_j = \mu N_j, j = 1 \sim 4 \end{cases} \quad (22)$$

联立式(21)和(22)可得，机器人在水平管道内未调整姿态下的牵引力大小为

$$F_{牵} = \frac{2\mu \cos \alpha_{t1} (\cos \theta_1 + 1) F_{st1} + \mu (\cos \beta_{t1} + \mu \sin \beta_{t1}) G}{(\cos \beta_{t1} + \mu \sin \beta_{t1}) \cos \theta_1} \quad (23)$$

同理可得，机器人在姿态调整后的牵引力大小为 $F_{牵}^i$ 。由式(23)可以看出，该机器人的输出牵引力大小与参数 α_{t1} 、 β_{t1} 、 θ_1 和 μ 有关，进而可以根据机器人的运行速度及牵引力的设计要求优化机器人的结构以及选择合适的驱动电动机 A。对于电机 B，可参照螺旋管道机器人^[21]的驱动电机进行选型，这里不再赘述。

4 系统仿真实验及分析

总长约 4.6 km 的电缆线路排布实际情况如图 12 所示。

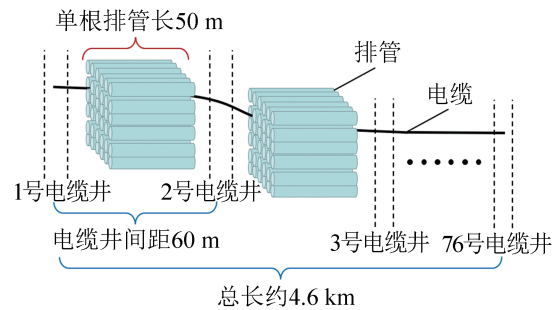


图 12 某条电缆线路排布图
Fig.12 Layout diagram of a certain cable route

根据 07SD101-8 《电力电缆井设计与安装》可知，2 个电缆井间距约为 60 m 左右，根据实地测量，电缆井内部长约 5 m，管道弯曲半径最小为 1 333 mm，而机器人外轮廓直径为 $\Phi 75$ mm，远远小于管道的弯曲半径，可近似认为机器人在直管道中运行。

2 个电缆井之间的单根排管长约为 50 m，机器人 1 天需要工作 8 h，计划 2 个月内完成总长约 4.6 km 的巡检。对于 76 个电缆井机器人每天最

多巡检2个, 而1个电缆井包含36根排管, 因此, 对于1个电缆井包含36根50 m的排管, 在没有障碍物的情况下需要在4 h内完成巡检, 机器人的平均速度至少需要125 mm/s。

为了分析电缆巡检机器人的动态特性, 缩短其设计周期, 在SolidWorks中合理简化机器人模型, 使用ADAMS进行仿真实验。根据机器人运动方向和管道的走向, 定义总体坐标系, 其原点是管道中轴线上的任意一点 O , 其中 yOz 平面与水平管道正截面垂直, xOz 平面与机器人水平管道前进方向平行, 而 xOy 平面与水平管道正截面重合, 同时仿真环境中设置模拟障碍物, 如图13所示, 相关仿真参数见表2。

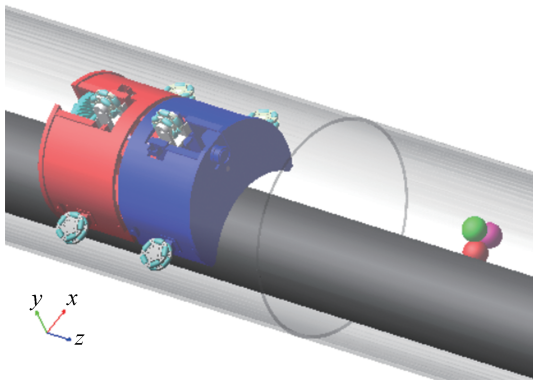


图13 ADAMS机器人仿真模型及环境

Fig. 13 ADAMS robot simulation model and environment

表2 相关仿真参数

Table 2 Correlation simulation parameter

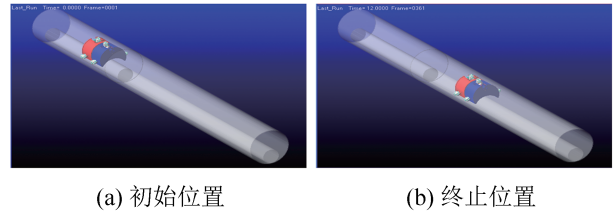
主要参数	量值
排管直径/mm	180
电缆直径/mm	80
机器人长度/mm	310
机器人平均速度/(mm·s ⁻¹)	140
机器人外轮廓直径/mm	75
弹簧刚度系数/(N·mm ⁻¹)	2
弹簧预载力/N	2
摩擦因数	0.75

4.1 机器人通过性仿真分析

4.1.1 无障碍物时通过性仿真分析

设置仿真时间为12 s, 进行无障碍物时机器

人通过性仿真分析, 如图14所示。



(a) 初始位置

(b) 终止位置

图14 无障碍物时通过性仿真

Fig. 14 Passability simulation when there are no obstacles

由图15可知, 机器人在 x 、 y 方向相对于管道位置不变, 而 z 方向上位置发生改变, 同时 z 方向上的质心位移曲线与时间成正比关系, 12 s内位移变化1 727 mm, 平均速度可达143.9 mm/s, 表明机器人与管壁接触良好, 可以实现稳定直行运动, 满足运行要求。

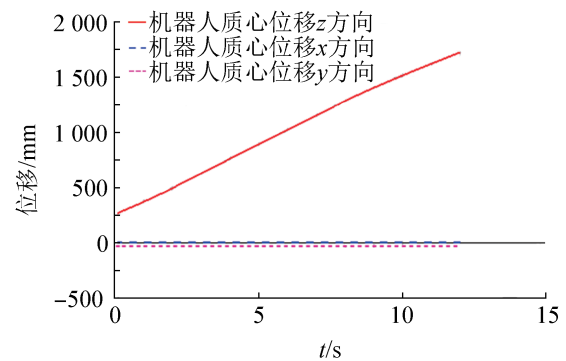


图15 无障碍物时仿真结果曲线

Fig. 15 Simulation result curve when there are no obstacles

4.1.2 有障碍物时通过性仿真分析

设置仿真总时间为36 s, 进行有障碍物时机器人通过性仿真分析, 如图16所示。

图16(a)为机器人在遇到障碍物之前进行直线行驶, 当遇到前方有障碍物时机器人暂停。图16(b)为机器人暂停后, 机体2上方电磁铁通电, 锁紧机体2使其保持不动, 然后控制机体1旋转一定角度。图16(c)为机体1稳定后, 机体2旋转到与机体1相同的旋转角度。机器人整体旋转了一定角度, 而后机器人直线行驶, 顺利避过障碍物。图16(d)~(f)为机器人避过障碍物后, 机体2上方电磁铁通电锁紧机体2, 控制机体1旋转恢复到原姿

态角度，同理，机体2旋转恢复到原姿态角度，当机体1、2旋转恢复到水平姿态后，机器人继续直线行驶，执行巡检任务。

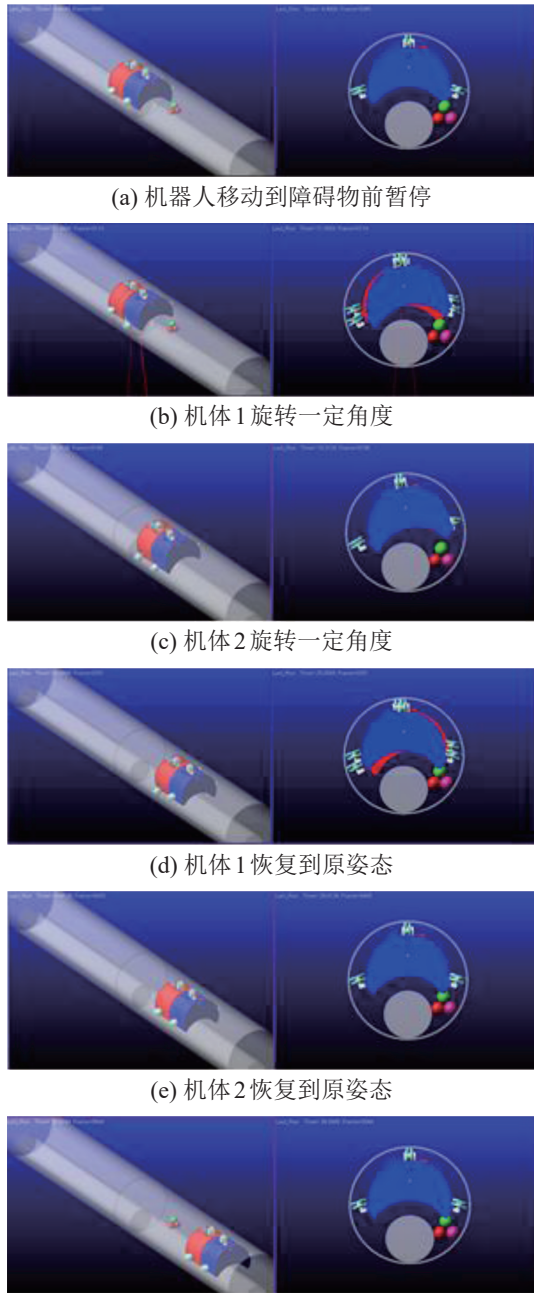


图 16 有障碍物时机器人通过性仿真
Fig. 16 Robot obstacle traversal simulation

以机器人质心为研究对象，分析机器人在0~36 s内的运动状态，以及分别在x、y、z三个方向上的位移变化曲线，如图17所示。

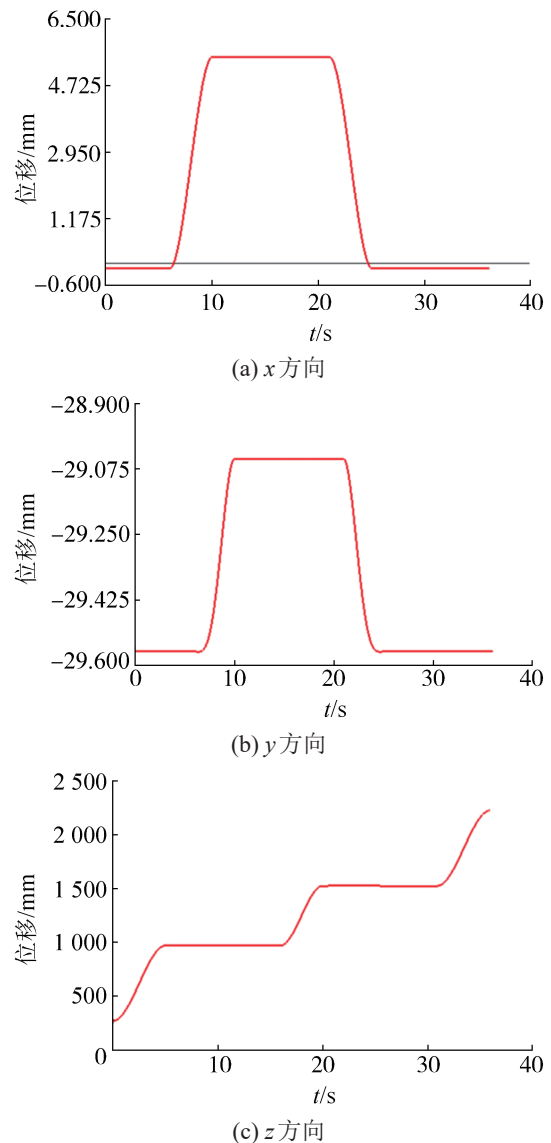


图 17 机器人质心在不同方向的位移曲线
Fig. 17 Displacement curve of centroid of robot in different directions

由图17可知，机器人平均速度在0~5 s内为140.7 mm/s、15~21 s内为138.9 mm/s、31~36 s内为140.4 mm/s，每个阶段的速度均可满足运行要求。

分析支撑行走机构弹簧t1和t2的弹力变化曲线，以及机体1、2的质心位移变化曲线，来验证机器人是否旋转一定角度进行姿态调整，从而完成避障，如图18~19所示。

从图18~19可以看出，在5~15 s内，机体1、

2 分别在 x 轴方向上相对位移逐渐增加, 弹簧 $t1$ 和 $t2$ 弹力分别由 0.212 N 减小到 0.128 N , 即机体 1 和机体 2 都旋转到相同角度, 在 $15\sim 21\text{ s}$ 内机器人在此角度下直行运动避过障碍物, 弹簧 $t1$ 和 $t2$ 弹力保持在 0.128 N 不变。在 $21\sim 31\text{ s}$ 内机器人反向旋转, 恢复初始姿态, 在 31 s 后机器人继续前进执行巡检任务。

2 种仿真情况下的平均运行速度均高于所需的机器人最低速度 125 mm/s , 表明本文设计的机器人的运行速度能够满足运行要求, 具有良好的通过性能, 能够在一定时间内完成巡检任务。

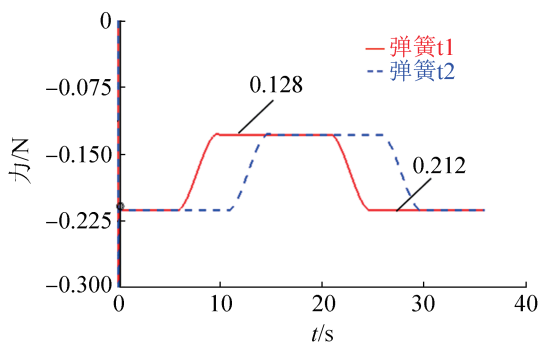


图 18 支撑行走机构弹簧 $t1$ 和 $t2$ 弹力变化曲线
Fig. 18 $t1$ and $t2$ elastic force change curve of spring of supporting walking mechanism

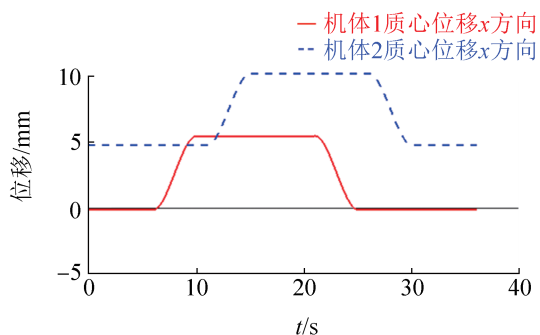


图 19 机体 1 和机体 2 的质心位移变化曲线
Fig. 19 Centroid displacement curve of body 1 and body 2

4.2 机器人牵引力仿真分析

为测试机器人在上述条件下的牵引力大小, 在机器人尾部与大地之间添加一作用方向与机器人前进方向相反且预紧力为 0 的虚拟测试弹簧并进行仿真, 仿真环境如图 20 所示。

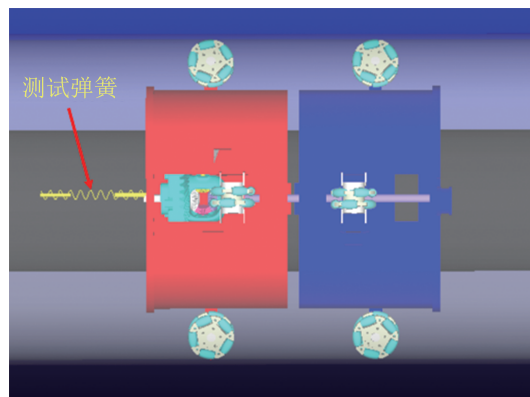


图 20 添加测试弹簧进行仿真
Fig. 20 Add a test spring for simulation

随着机器人前进, 测试弹簧被拉伸且对机器人的拉力逐渐增大, 当机器人直行出现打滑时, 此时的测试弹簧拉力即为机器人最大牵引力^[22]。

4.2.1 水平姿态时的牵引力仿真分析

由图 18 可得机器人水平姿态运行时支撑行走机构内的弹簧弹力大小, 即 $F_{st1}=0.212\text{ N}$, 同时测得 $\alpha_{t1}=26.97^\circ$ 、 $\beta_{t1}=39.18^\circ$ 、 $\theta_1=37.47^\circ$, 带入式(23)中可得牵引力理论值为 4.805 N 。机器人水平姿态时的牵引力仿真结果如图 21 所示。

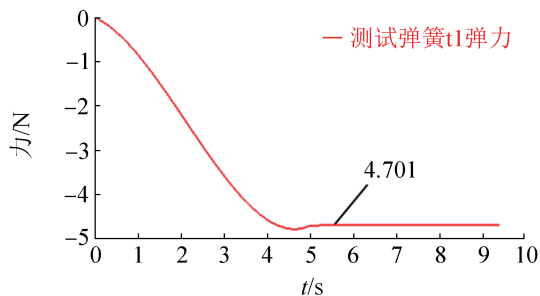


图 21 机器人水平姿态时牵引力仿真结果
Fig. 21 Simulation results of traction force when robot is in a horizontal posture

根据图 21 可知, 机器人向前移动使测试弹簧拉伸, 导致测试弹簧弹力由 0 逐渐增大到 4.701 N , 此后由于机器人无法继续前进而负载弹簧弹力保持不变, 则机器人所需最大牵引力即为 4.701 N 。由于机器人在运行过程中, 两侧从动全向轮与管壁之间并不是纯滚动, 存在滑动现象, 产生少许阻力, 导致仿真值小于理论值, 存在 2.2% 的误

差,但整体参数设计满足机器人在水平姿态运行时的行走需求,因此,机器人在水平姿态时所需的最大牵引力为4.701 N。

4.2.2 姿态调整后的牵引力仿真分析

根据图2可知,机器人姿态调整的空间有限,存在最大姿态角 ψ_{\max} ,图22为机器人在最大姿态角 ψ_{\max} 下的示意图。

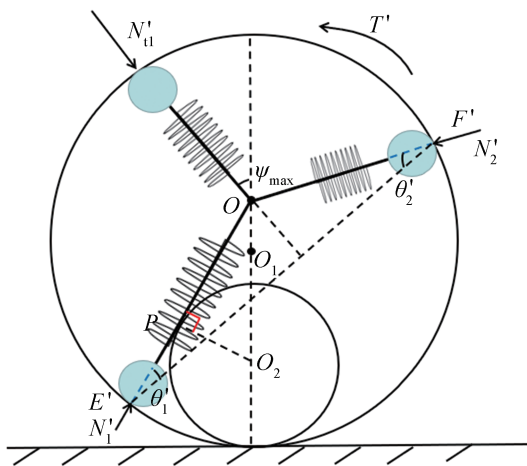


图22 最大姿态角下的示意图

Fig. 22 Diagram of maximum attitude angle

如图22所示,在 $\triangle OPO_2$ 中满足:

$$\sin(\pi/2 - \theta_1' - \psi_{\max}) = \frac{d/2}{L_{OO_1} + D/2 - d/2} \quad (24)$$

式中: D 为管道直径; d 为电缆直径。

测得 $\theta_1' = 33.92^\circ$, $L_{OO_1} = 25$ mm, 计算可得最大姿态角 $\psi_{\max} = 24.08^\circ$ 。仿真中测得机器人姿态角为 ψ_{\max} 时支撑行走机构内的弹簧弹力大小,即 $F'_{st1} = 0.128$ N, 同时测得 $\alpha_{t1}' = 13.15^\circ$, $\beta_{t1}' = 37.84^\circ$, $\theta_1' = 33.93^\circ$, 因此计算可得机器人在最大姿态角下运行所需的牵引力理论值为8.298 N。机器人姿态调整后的牵引力仿真结果如图23所示。

根据图23可知,机器人在最大姿态角下运行的牵引力所需最大牵引力为7.932 N, 由于机器人在姿态调整后,靠近电缆一侧的从动全向轮进一步接触并压紧管壁,同样在运动中存在滑动现象,产生一定阻力,导致仿真值小于理论值,存在4.4%的误差,同样可满足机器人在最大姿态角下

运行时的行走需求,因此,机器人在姿态调整后所需的最大牵引力为7.932 N。

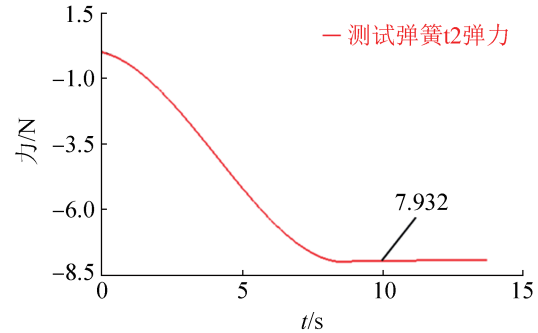


图23 机器人姿态调整后牵引力仿真结果

Fig. 23 Simulation results of traction force after robot's posture adjustment

由机器人输出牵引力方程可知,其大小与参数 α_{t1} 、 β_{t1} 、 θ_1 和 μ 有关,在机器人姿态调整后,参数 α_{t1} 、 β_{t1} 和 θ_1 均减小,摩擦因数 μ 不变,从而导致牵引力变大,理论分析与仿真分析基本相符,验证了本文建立的理论方程的正确性。

上述机器人系统在管道内通过性仿真、牵引力仿真结果表明,可以实现机器人在管道内的运行和姿态调整,同时ADAMS仿真结果曲线验证了建立的机器人动力学方程理论值与仿真值的一致性,证明了电缆巡检机器人结构设计的合理性、设计参数的有效性,以及运动方案的可行性,为物理样机的研制提供了参考。

5 结论

本文根据排管电缆巡检机器人管内受限空间运动的特点,设计了机器人的整体结构。分析了全向轮速度与系统速度的映射关系;利用虚位移原理建立动力学模型,推导出其动力学方程,并确定其影响因素,可为该类机器人的设计与研发提供一定的参考。

使用ADAMS建立仿真环境,对机器人系统在管道内进行了通过性和牵引力仿真实验,分析得出机器人在管内受限空间的最大姿态角 ψ_{\max} 。动力学仿真结果表明:在敷设电缆型号为

YJLV22-3×300且直径为Φ180 mm的地下排管内, 该机器人能够直行通过, 且在遇障碍物时, 也能够进行姿态调整以完成避障。牵引力仿真测试的结果与理论分析值误差较小, 验证了动力学模型的正确性, 说明设计的排管电缆巡检机器人具备足够的管道通过性和牵引能力。

未来可根据机器人的运行速度及牵引力的设计要求优化机器人的结构, 选择合适的电机A和电机B, 搭建控制平台, 研制物理样机进行实验验证, 有望实现机器人在敷设电缆的排管内运行和检测。

参考文献:

- [1] 马钊, 刘颖异, 尚宇炜, 等. CIGRE 2016未来电力系统及主动配电系统技术新动向[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 27-35.
Ma Zhao, Liu Yingyi, Shang Yuwei, et al. CIGRE 2016 Development Trends of Future Power System and Active Distribution System[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 27-35.
- [2] Tanachai Somsak, Thanapong Suwanasri, Cattareeya Suwanasri, et al. Remaining Useful Life Estimation for Underground Cable Systems Based on Historical Health Index[J]. Energies, 2022, 15(24): 9447.
- [3] 白承栋. 内径自适应管道机器人设计与运动性能分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
Bai Chengdong. Design and Kinematic Performance Analysis of Self-adaptive Inner Diameter Pipeline Robot [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [4] 米红甫, 张小梅, 杨文璟, 等. 城市地下综合管廊电缆舱火灾概率分析方法[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 165-172.
Mi Hongfu, Zhang Xiaomei, Yang Wenjing, et al. Fire Probability Analysis Method of Cable Cabin in Urban Utility Tunnel[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(1): 165-172.
- [5] 闫佳文, 黄继杰, 周磊, 等. 基于多时间尺度和VR的输电线巡检培训仿真[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(2): 212-220.
Yan Jiawen, Huang Jijie, Zhou Lei, et al. Transmission Line Operation and Inspection Training Simulation Based on Multiple Time Scales and VR[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(2): 212-220.
- [6] Yun Seok Choi, Ho Moon Kim, Hyeong Min Mun, et al. Recognition of Pipeline Geometry by Using Monocular Camera and PSD Sensors[J]. Intelligent Service Robotics, 2017, 10(3): 213-227.
- [7] Danial Waleed, Syed Hamdan Mustafa, Shayok Mukhopadhyay, et al. An in-pipe Leak Detection Robot with a Neural-network-based Leak Verification System [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(3): 1153-1165.
- [8] Kazeminasab S, Akbari A, Jafari R, et al. Design, Characterization, and Control of a Size Adaptable in-pipe Robot for Water Distribution Systems[C]//2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Piscataway: IEEE, 2021: 39-46.
- [9] Brown L, Carrasco J, Watson S, et al. Elbow Detection in Pipes for Autonomous Navigation of Inspection Robots [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 95(2): 527-541.
- [10] Ildar Nasibullayev, Oleg Darintsev, Dinar Bogdanov. In-pipe Modular Robot: Configuration, Displacement Principles, Standard Patterns and Modeling[C]// Electromechanics and Robotics. Singapore: Springer Singapore, 2022: 85-96.
- [11] 唐德威, 李庆凯, 姜生元, 等. 三轴差速式管道机器人过弯管时的差速特性及拖动力分析[J]. 机器人, 2010, 32(1): 91-96.
Tang Dewei, Li Qingkai, Jiang Shengyuan, et al. Differential Property and Traction Force of Tri-axial Differential Pipeline Robot in Elbow[J]. Robot, 2010, 32(1): 91-96.
- [12] 梁亮, 胡冠昱, 朱宗铭, 等. 内外螺旋管道机器人的动力学建模和数值仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2546-2551.
Liang Liang, Hu Guanyu, Zhu Zongming, et al. Dynamics Modeling and Numerical Simulation of Inner and Outer Spiral in-pipe Robots[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(11): 2546-2551.
- [13] 闫宏伟, 焦彪彪, 马建强, 等. 一种管道机器人的自适应主动螺旋式驱动机理分析[J]. 中国机械工程, 2018, 29(1): 21-29.
Yan Hongwei, Jiao Biaobiao, Ma Jianqiang, et al. Adaptive Active Screw Driving Mechanism Analysis for Pipeline Robots[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(1): 21-29.
- [14] 罗继曼, 戴璐璐, 印辉, 等. 管道清淤机器人协调运动控制系统的设计[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(3): 556-562.
Luo Jiman, Dai Lulu, Yin Hui, et al. Design on Coordinated Motion Control System of Pipe Dredging Robot[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2021, 37(3): 556-562.
- [15] 刘洪斌, 冀楠. 蠕动式管道机器人结构与运动特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(8): 1169-1177.
Liu Hongbin, Ji Nan. Structural Design and Motion

<http://www.china-simulation.com>

• 2111 •

- Characteristics Analysis of Peristaltic Pipeline Robots[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(8): 1169-1177.
- [16] 李智强, 李卫国, 冯志成, 等. 管道机器人结构与通过性分析[J]. 机械传动, 2021, 45(6): 146-152.
Li Zhiqiang, Li Weiguang, Feng Zhicheng, et al. Structural and Passability Analysis of Pipeline Robot[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(6): 146-152.
- [17] 陈潇, 吴志鹏, 何思宇, 等. 自适应支撑式管道检测机器人的通过性设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(12): 2953-2962.
Chen Xiao, Wu Zhipeng, He Siyu, et al. Passing Property Design of Adaptive Support Pipeline Detection Robot[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(12): 2953-2962.
- [18] Elena Rubies, Jordi Palacín. Design and FDM/FFF Implementation of a Compact Omnidirectional Wheel for a Mobile Robot and Assessment of ABS and PLA Printing Materials[J]. Robotics, 2020, 9(2): 43.
- [19] Masaaki Hijikata, Renato Miyagusuku, Koichi Ozaki. Wheel Arrangement of Four Omni Wheel Mobile Robot for Compactness[J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 5798.
- [20] 李颀, 汪伟. 多全向轮协同分拣平台的路径规划[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(3): 698-709.
Li Qi, Wang Wei. Path Designing of Multi-omnidirectional Wheel Collaborative Sorting Platform [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 698-709.
- [21] Tu Qing, Liu Qingyou, Ren Tao, et al. Obstacle Crossing and Traction Performance of Active and Passive Screw Pipeline Robots[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(5): 2417-2427.
- [22] 吴伟, 李博, 刘娜娜, 等. 轮式牵引机器人优化设计及运动特性分析[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 918-926.
Wu Wei, Li Bo, Liu Nana, et al. Optimization Design and Locomotion Characteristics Analysis of Wheeled Traction Robot[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 918-926.