

管道清理机器人设计与通过性分析

李振祥, 王 昌, 李建龙

内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古 包头

收稿日期: 2025年3月30日; 录用日期: 2025年4月23日; 发布日期: 2025年4月30日

摘 要

为提高中大型运输管道内壁结垢的清理效率, 本文设计了一种能在800~1200 mm直径管道中工作的履带管道清理机器人。针对具体情况确定管道机器人的整体结构设计, 使得机器人能够通过不同的组装形式适应不同的工作环境, 并介绍了机器人的工作原理, 对可变径的履带式行走机构及机器人的管径适应性进行了通过性分析, 同时分析了机器人在管道中的几何约束运动和运动情况, 并在ADAMS中分析了机器人在管道中的通过性。结果表明: 管道机器人的设计合理, 相关几何约束以及运动约束条件正确, 机器人能够在设定管径范围内的直管与L形弯管中正常行走。

关键词

管道清洁机器人, 结构设计, ADAMS, 通过性分析

Design and Passability Analysis of Pipeline Cleaning Robot

Zhenxiang Li, Chang Wang, Jianlong Li

School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia

Received: Mar. 30th, 2025; accepted: Apr. 23rd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

To enhance the cleaning efficiency of scaling deposits on the inner walls of medium-to-large transportation pipelines, a track-type pipeline cleaning robot capable of operating in pipelines with diameters ranging from 800~1200 mm has been designed in this paper. The overall structural design of the pipeline robot is determined based on specific working conditions, enabling the robot to adapt to diverse operational environments through different assembly configurations. This paper elaborates on the operational principles of the robot and conducts passability analysis on both the flexible diameter-adaptive crawler-type locomotion mechanism and the pipeline diameter adaptability of the robot. The

geometric constraint motion and kinematic behavior of the robot within pipelines are systematically investigated, and robot's passability is performed through ADAMS simulations. Results demonstrate that the robot design is reasonable, with validated geometric constraints and motion boundary conditions. The robot exhibits stable locomotion capabilities in both straight pipelines and L-shaped bends within the specified diameter range.

Keywords

Pipeline Cleaning Robot, Structural Design, ADAMS, Passability Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加快和工业管网的复杂化,管道清理机器人在市政工程、石油化工、能源输送等领域的重要性日益凸显[1]。传统的人工清理方式存在效率低、安全隐患大、难以适应复杂管道环境等问题,而机器人技术凭借其自主性、适应性和高效性,逐渐成为管道维护的核心解决方案。管道清理机器人的设计需兼顾结构灵活性、环境感知能力与作业效率,而其“通过性”——即在不同管径、材质、堵塞物及复杂弯道中的运动能力——是决定其实际应用价值的关键因素。因此,本研究聚焦于管道清理机器人的创新设计与通过性优化,旨在为复杂管道环境下的高效维护提供理论支持与技术参考[2] [3]。

国外管道机器人研究始于 20 世纪 40~50 年代,早期以拖拽式设备为主;90 年代后,随着传感器和驱动技术的进步,轮式、履带式、多足式等自主移动机器人逐步成熟。如日本立命馆大学 Kakogawa 等人提出了一种履带式管道机器人[4],由其普通结构变化为四边形结构增强其稳定性,但不适用于长时间作业,并且由于履带足太长,只适用于直线管道运动,有一定的局限性。加拿大的公司 INUKTUN,主要产品易拆装更换的集成化履带式管道机器人,多用于在水平管道中的检测、维护工作[5] [6]。国内研究起步较晚,但近年发展迅速,如哈尔滨工业大学研制的一种自适应管道机器人[7],可实现对弯曲管道的适应性,但负载能力较弱,越障能力不足。浙江工业大学李斌学者研制了一种用于地下管道检测的管道机器人,可以对多种有毒气体进行实时监控,在使用过程中使用电缆实现供能和信号的传递,保证了上位机与机器人本体之间通讯的高效性和准确性[8]。

基于上述研究,本文比较国内外已有管道机器人的优缺点,综合考虑直管、弯管、垂直管道以及变径管道等多工况条件,针对现有设备在缺陷检测、内壁清理及管道适应性方面存在的技术瓶颈,提出一种新型自适应管道清理机器人设计方案。通过构建机器人运动学模型,深入解析其几何约束条件、运动学特性,建立基于多体动力学的管道适应能力体系。在此基础上,采用数值仿真与 ADAMS 虚拟样机技术相结合的方法,对机器人结构合理性及复杂管道通过性进行双重验证,形成具有工程应用价值的管道机器人设计理论框架。

2. 管道清理机器人的整体结构设计

本文通过研究管道机器人的设计需求和目的,结合现有国内外管道机器人的各项优缺点,采用模块化设计思路设计出了管道机器人主要的三大模块,分别是驱动模块、自适应模块以及清理模块。方案设计需克服传统履带式管道机器人过弯能力弱、灵活性低的难点,并且机器人需具备一定的适径能力。机

机器人总体结构如图 1 所示。

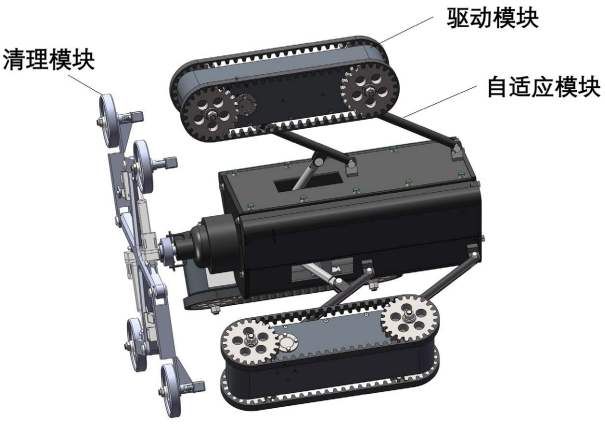


Figure 1. Overall structure of the pipeline cleaning robot
图 1. 管道清理机器人总体结构

驱动模块是管道机器人的动力系统，是机器人在管道中运行的保障。自适应模块可以使管道机器人拥有更好的灵活性，帮助管道机器人快速、稳定地通过存在弯道、变径管接口的特殊管道。清洁模块能够适应圆形管道环境，利用高速电机冲刷管道异物，从而最大程度使得机器人完成管道疏通任务。中间的机体具有极大的空间，可以放置控制器、传感器等多种电子元件。三大模块虽然相互独立设计，但在机器人行进中可以相互配合、相互联系，使机器人拥有更好的工作姿态，更加有效地完成在管道内的作业。

3. 管道内通过性分析

3.1. 机器人过弯尺寸约束分析

管道机器人的几何尺寸会影响其过弯性能。以机器人一个单元为研究对象，进行几何约束分析，确保机器人在几何尺寸上满足过弯条件。管道弯曲的情况有很多，其中，机器人通过 90 度的直角弯管时，对机器人的整体尺寸要求最高[9][10]。如图 2 为机器人在弯管中的极限几何位置。

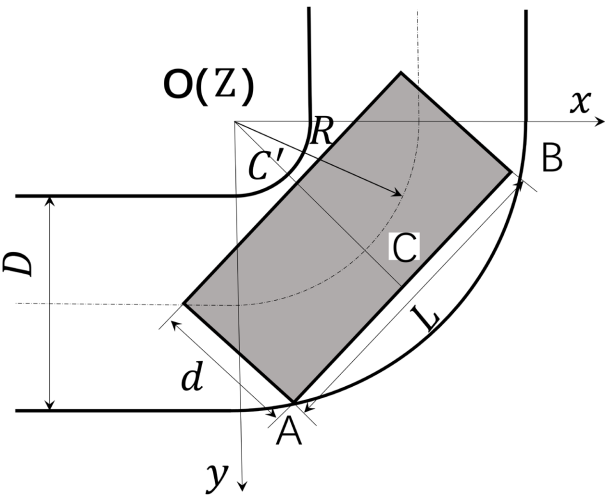


Figure 2. Geometric position of the robot within a curved pipe
图 2. 机器人在弯管中的几何位置

设弯管转弯中心为 $O(Z)$ ，管道转弯半径为 R ，矩形长 L 表示机器人通过部分的长度，宽 d 代表机器人在管道中的最大直径， $O(Z)$ 到 $\overline{AB}$ 的垂线为 $\overline{OC}$ ， $\overline{OC}$ 与管道内侧壁交于点 C' 。

由分析可知, 若要保证机器人顺利通过圆角弯, 应该满足:

$$\overline{OC} - \overline{OC'} \geq s \quad (1)$$

其中：

$$\overline{OC'} = R - \frac{D}{2} \quad (2)$$

$$\overline{OC} = \sqrt{OA^2 - AC^2} = \sqrt{\left(R + \frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (3)$$

最终得出 d 和 L 的关系:

$$d \leq \sqrt{\left(R + \frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} - R + \frac{D}{2} \quad (4)$$

3.2. 管道清理机器人弯管中的状态分析

从直管运动到弯管再到直管的过程中,管道机器人要经历过渡阶段和旋转阶段 2 种不同的运动状态 [11] [12]。

1) 过渡阶段

机器人过渡阶段的速度特征可用刚体平面运动来分析。机器人管道运动状态如图 3 所示。以后端面旋转支点 $O_r(z')$ 为坐标原点, 坐标轴分别平行于 xyz 轴, 建立 $Or-XYZ'$ 坐标系。

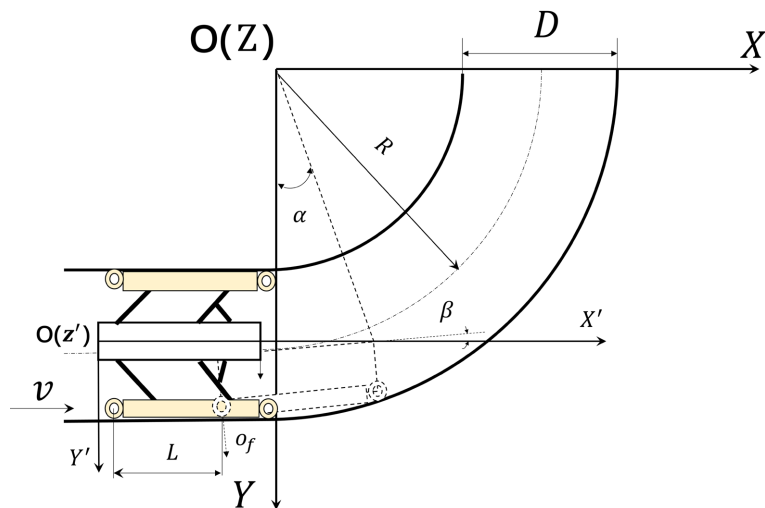


Figure 3. Schematic diagram of the transition phase for pipeline cleaning robot
图 3. 管道清理机器人过渡阶段示意图

履带模块前后轮与管道内壁接触点坐标在机器人坐标系下的矩阵表示为:

$$\mathbf{W}'_{\text{F1}} = \begin{bmatrix} L & L & L \\ 0.5D \cos \gamma & 0.5D \cos(120^\circ + \gamma) & 0.5D \cos(240^\circ + \gamma) \\ 0.5D \sin \gamma & 0.5D \sin(120^\circ + \gamma) & 0.5D \sin(240^\circ + \gamma) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{W}'_{R1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.5D \cos \gamma & 0.5D \cos(120^\circ + \gamma) & 0.5D \cos(240^\circ + \gamma) \\ 0.5D \sin \gamma & 0.5D \sin(120^\circ + \gamma) & 0.5D \sin(240^\circ + \gamma) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: L 表示履带模块前后轮轴间距; γ 为进入弯管时的姿态角; α 为机器人前端面中心在弯管中转过角度; β 对应机器人坐标系绕管道轴线产生的旋转变换角度。前后驱动轮与弯管内壁接触点的坐标如式(5)、(6), 设履带轮接触弯管时, 前轮与管壁接触点的坐标用 $\mathbf{W}'_{F1}$ 表示, 后轮与管壁接触点的坐标用 $\mathbf{W}'_{R1}$ 表示, 矩阵中, 每一列代表一个履带车坐标, 其中第一列代表初始状态下在水平管中运动时位于顶部的履带车的坐标[11]。

根据几何关系则有:

$$L \sin \beta = R(1 - \cos \alpha) \quad (7)$$

机器人驱动轮在弯管中的内管壁的平移坐标 P 为:

$$\mathbf{P}' = \begin{bmatrix} R \sin \alpha - \sqrt{L^2 - R^2(1 - \cos \alpha)^2} \\ R \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

可令 x 方向坐标为 0, 从而可得机器人的最大旋转角为:

$$\alpha_m = \arccos \left(1 - \frac{L^2}{2R^2} \right) \quad (9)$$

则由式(8)、(9)可得最大偏转角为:

$$\beta_m = \arcsin \left(\frac{L}{2R} \right) \quad (10)$$

为方便换算, 可以对机器人做坐标变换, 将机器人履带车前后轮在管道内壁中的接触点 $O_r - XYZ'$ 坐标换算成前后轮在管道坐标系 $o - xyz$ 下的坐标。分别做相对应的平移变换和旋转变换(坐标绕 $O_r(z')$ 旋转)。旋转变换矩阵为 R_o , 平移变换矩阵为 T_r 。机器人履带模块前后轮与管道内壁接触点的坐标在管道坐标系下可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{W}_{F1} = R_o(Z', -\beta) \mathbf{W}'_{F1} + T_r \\ \mathbf{W}_{R1} = R_o(Z', -\beta) \mathbf{W}'_{R1} + T_r \end{cases} \quad (11)$$

其中, $T_r = [P'P'P']$ 为平移矩阵;

$$R_o(Z', -\theta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

对 $\mathbf{W}_{F1}$ 和 $\mathbf{W}_{R1}$ 关于时间求导得:

$$\frac{d\mathbf{W}_{F1}}{dt} = \begin{bmatrix} v_{fx1} & v_{fx2} & v_{fx3} \\ v_{fy1} & v_{fy2} & v_{fy3} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\frac{d\mathbf{W}_{R1}}{dt} = \begin{bmatrix} v_{rx1} & v_{rx2} & v_{rx3} \\ v_{ry1} & v_{ry2} & v_{ry3} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:该矩阵的第一行和第二行分别对应前后轮与管道内壁接触点的速度矢量在 X 轴和 Y 轴方向的分量。前后轮与管道内壁接触点的绝对速度为该点处 X 轴与 Y 轴速度分量的合成,即:

$$\begin{cases} v_{fi} = \sqrt{v_{fxi}^2 + v_{fyi}^2} \\ v_{ri} = \sqrt{v_{rx i}^2 + v_{ry i}^2} \end{cases} \quad (15)$$

因此,为减少机器人在过渡阶段的非必要能量损耗,通过构建动态转速比调控策略,使其转速比为:

$$n_{f1}:n_{f2}:n_{f3}:n_{r1}:n_{r2}:n_{r3} = v_{f1}:v_{f2}:v_{f3}:v_{r1}:v_{r2}:v_{r3} \quad (16)$$

当驱动轮满足式(16)的要求时,机器人在过渡阶段不会发生由于履带轮小车各驱动轮速度不协调而导致的运动轨迹偏移,有利于机器人顺利完成管道内壁的行走动作[13]。

2) 旋转阶段

如图4所示,机器人从过渡阶段进入旋转阶段后,履带模块前后轮的速度是相同的,机器人在此过程中不产生内耗。

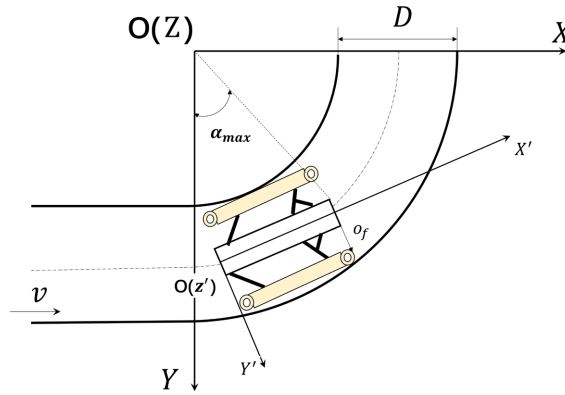


Figure 4. Schematic diagram of the rotational phase for pipeline cleaning robot

图4. 管道清理机器人旋转阶段示意图

在旋转阶段,履带模块前后轮与弯管内壁接触点的坐标如下:

$$W_{F1} = \begin{bmatrix} x_{f1} & x_{f2} & x_{f3} \\ y_{f1} & y_{f2} & y_{f3} \\ 0.5D \sin \gamma & 0.5D(120^\circ + \gamma) & 0.5D(240^\circ + \gamma) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$W_{R1} = \begin{bmatrix} x_{r1} & x_{r2} & x_{r3} \\ y_{r1} & y_{r2} & y_{r3} \\ 0.5D \sin \gamma & 0.5D(120^\circ + \gamma) & 0.5D(240^\circ + \gamma) \end{bmatrix} \quad (18)$$

基于机器人绕 Oz 轴旋转的运动学特性分析,各履带模块在弯管接触点处的线速度与其所处位置的曲率半径呈正比例关系。为实现机器人平稳通过弯管段,需使各驱动单元转速比与对应曲率半径比相等。据此推导的旋转阶段运动协调模型可表述为:

$$n_1:n_2:n_3 = R_1:R_2:R_3 \quad (19)$$

式中: n_1 、 n_2 和 n_3 表示三组驱动履带模块的速度参数; R_1 、 R_2 和 R_3 分别对应各履带单元与弯管接触点的曲率半径。基于履带的模块化设计特征,其传动机构具有等传动比特性,因此通过式(19)来协调控制3

组履带模块的速度，机器人便能平稳、无内耗地通过旋转阶段。

4. 通过性仿真研究

通过虚拟样机仿真软件 ADAMS，对机器人在管道中的运动进行分析。采用 Belt 模块创建机器人履带，结合宏命令添加履带和管壁间接触力[14]。其中，机器人的主要参数如表 1 所示。

Table 1. Main parameters of the pipeline cleaning robot
表 1. 管道清理机器人的主要参数

参数名称	数值
机器人长度/(mm)	962
机器人质量/(kg)	50
机器人最小直径/(mm)	800
管道内径/(mm)	1000
电机最大扭矩/(kN·mm)	8
管径适应范围/(mm)	800~1200

仿真实验中 L 形管道设置曲率半径为 1.5 D，行走管道的动摩擦因数设置为 0.1，静摩擦因数设置为 0.3。在驱动轮上添加旋转运动，在函数(时间)处修改为 $360 d \times \text{time}$ ，表示驱动轮每秒旋转 360°，完成有关驱动轮驱动的创建(见图 5)。



Figure 5. Schematic diagram of the drive system for pipeline cleaning robot
图 5. 管道清理机器人驱动示意图

4.1. 机器人主体的运动轨迹分析

仿真设计的管道为 1000 mm 无障碍直管水平放置。如图 6 所示，为管道清理机器人车身主体模型在管道中的位移变化曲线。

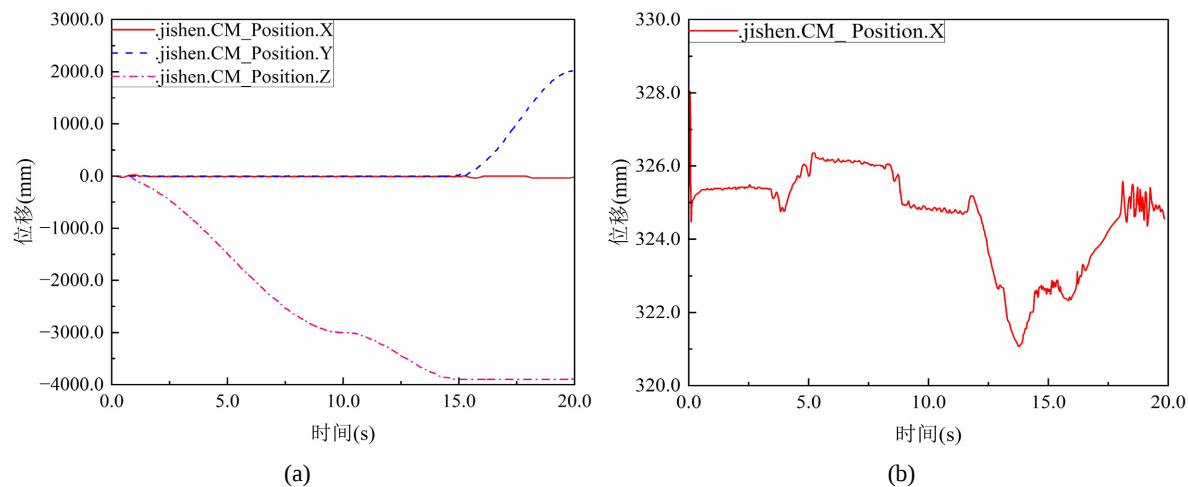


Figure 6. Displacement variation curve of a pipeline cleaning robot within the pipeline structure: (a) Displacement variation curve of the main structure; (b) Displacement variation curve along the X-axis

图 6. 管道清理机器人在管道中的位移变化曲线: (a) 主身的位移变化曲线; (b) X 方向的位移变化曲线

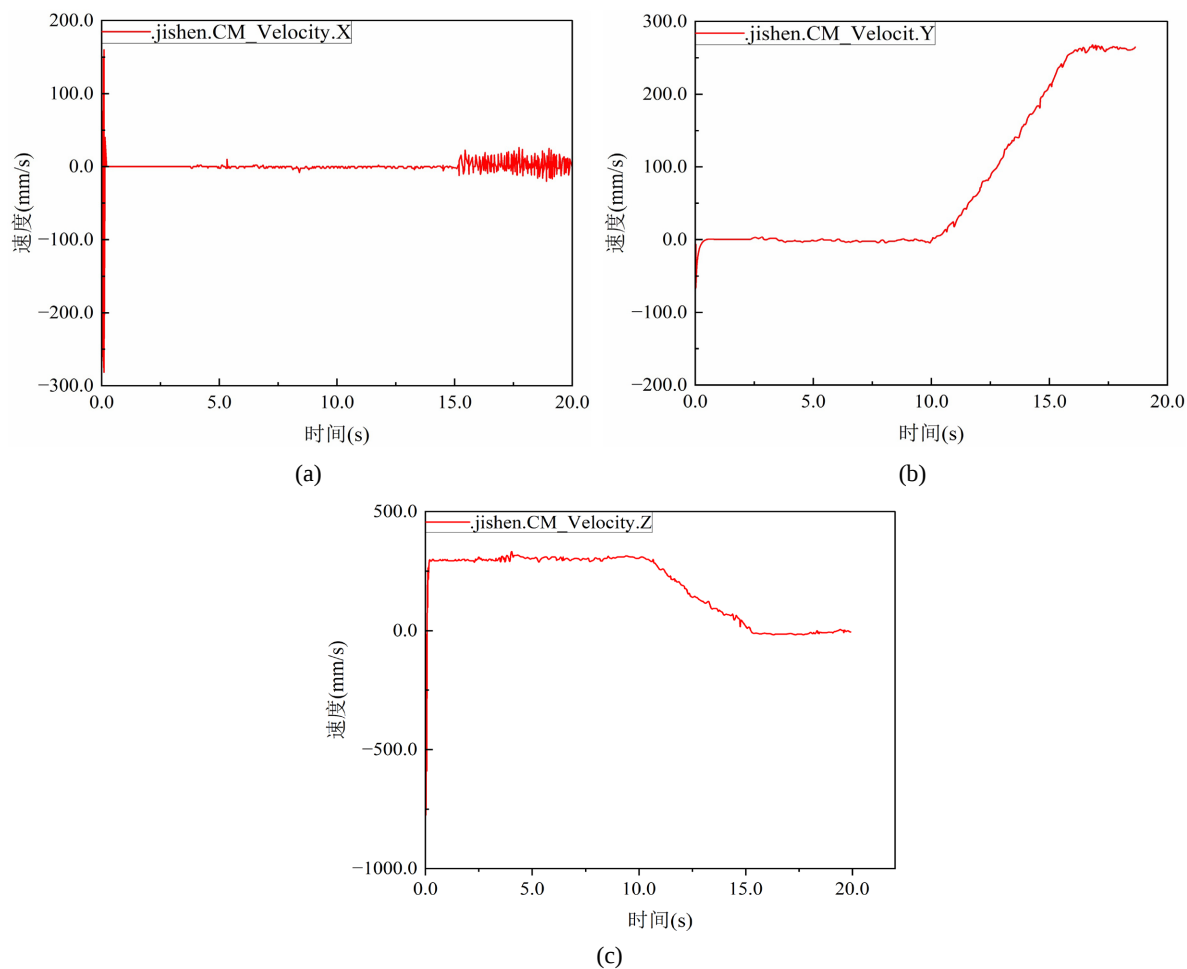


Figure 7. Velocity variation curves of a pipeline cleaning robot within the pipeline: (a) Velocity variation curve in the X-axis; (b) Velocity variation curve in the Y-axis; (c) Velocity variation curve in the Z-axis

图 7. 管道清理机器人在管道中的速度变化曲线: (a) X 方向速度变化曲线; (b) Y 方向速度变化曲线; (c) Z 方向速度变化曲线

机器人重力方向沿 $-Y$ 轴,在水平管道移动阶段,机器人沿 Z 轴负方向移动,在弯管阶段,机器人沿着 Y 轴和 Z 轴分别移动。在宏观角度,机器人在 X 轴的移动可以忽略不计。但从微观上,如图6(b)所示,在运动过程中,车身会有绕 X 轴扰动,这是由于当机器人刚接触管壁时,机器人与管壁之间存在拓扑载荷,各履带车与管道内壁的接触载荷有所不同会使得机器人产生绕轴向的转动。

此外,如图7所示是机器人在各方向的角速度变化曲线,可以看到机器人在直管和弯管中沿 Y 、 Z 方向的角速度较小,对机器人姿态的影响可以忽略,从而认为机器人在管道中特别是过渡阶段能够保持姿态角相对稳定,从而有利于实现机器人在弯管中的平顺性。

4.2. 各履带车的运动分析

履带车在自适应平面采取 120° 均匀分布的形式与管道内壁接触,通过测量三个履带车的速度曲线可以间接反映机器人整体运动的平顺性,并验证机器人管道通过性分析理论。图8为履带车在各项管道中

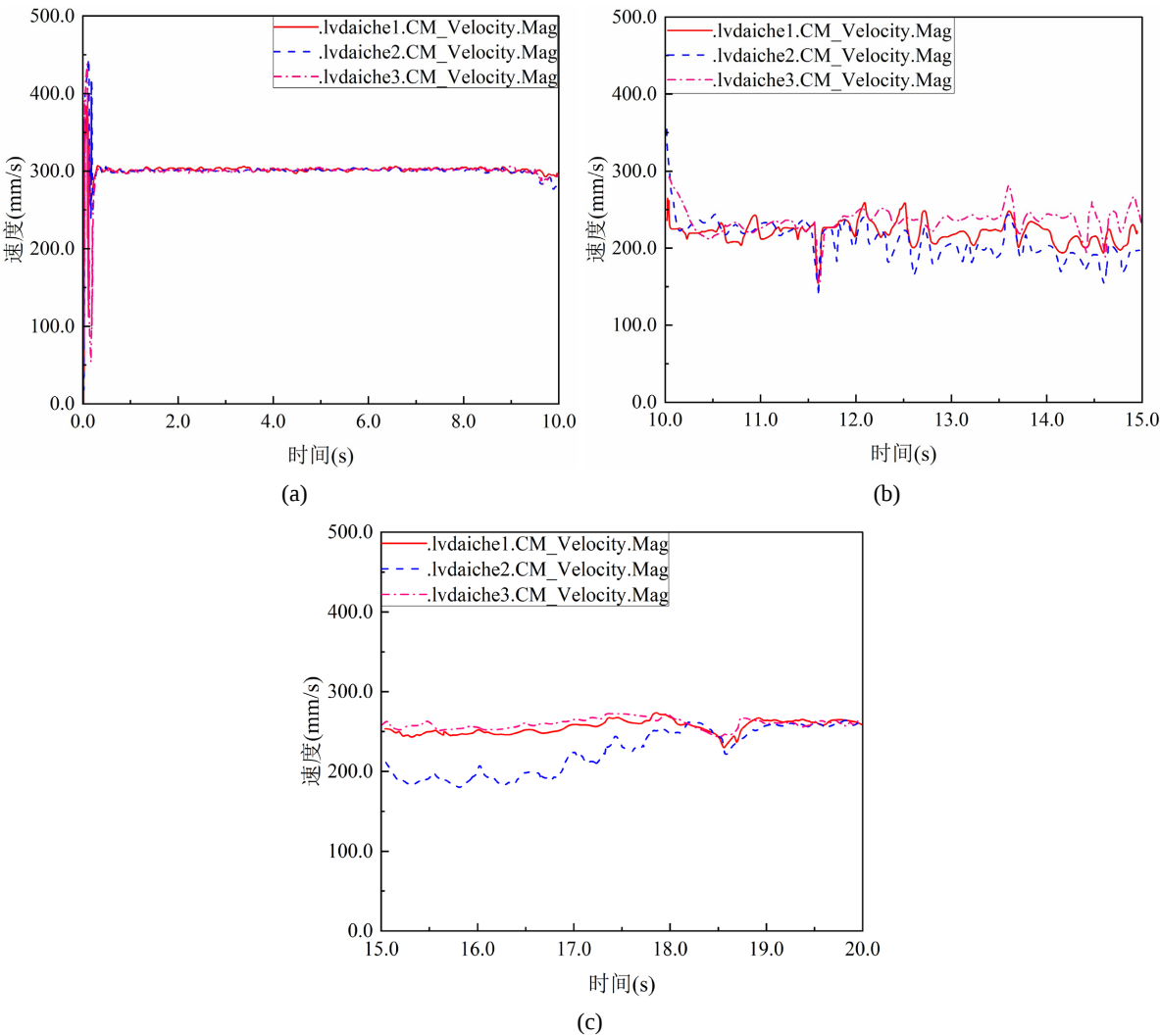


Figure 8. Velocity variation curves of tracked vehicles across diverse pipeline configurations: (a) Velocity variation curve of the tracked vehicle in a horizontal straight pipeline; (b) Velocity variation curve of the tracked vehicle in the curved pipeline; (c) Velocity variation curve of the tracked vehicle in the vertical pipeline
图 8. 履带车在各项管道中的速度变化曲线: (a) 履带车在水平直管中的速度变化曲线; (b) 履带车在弯管中的速度变化曲线; (c) 履带车在竖直管道中的速度变化曲线

的速度变化曲线。

图 8(a)为履带车直管中的速度曲线,忽略前期短暂的由于自适应机构使履带轮与管壁接触而引起的震荡,在机器人稳定运行后,三个履带车速度趋于一致,机器人沿着 Z 轴负方向平稳运行。

图 8(b)为履带车弯管中的速度曲线,速度波动原因分析是刚进入过渡阶段和退出过渡阶段,进入到旋转阶段后,车轮速度波动在正常范围内,直到驶出弯曲管道,验证机器人在弯曲管道中行走稳定。

图 8(c)为履带车在竖直接管道中的速度曲线,在过渡阶段会由于姿态调整发生一定的速度调整,待机器人姿态调整后,三履个带车的平均速度恢复同步,机器人在竖直接管道沿 Y 轴正方向的速度保持稳定。

4.3. 履带车的接触力分析

在对其履带车与管壁接触力分析时,其中履带车 1 代表机器人在水平直管中行走时位于机器人顶部的履带车。履带车 2 和履带车 3 由于重力影响,应力较大,对应的与管壁的接触应力也较大,由于履带车在过渡阶段姿态相对稳定,分析方法相同。本文重点选取履带车 2 作为研究对象。图 9 为履带车 2 的

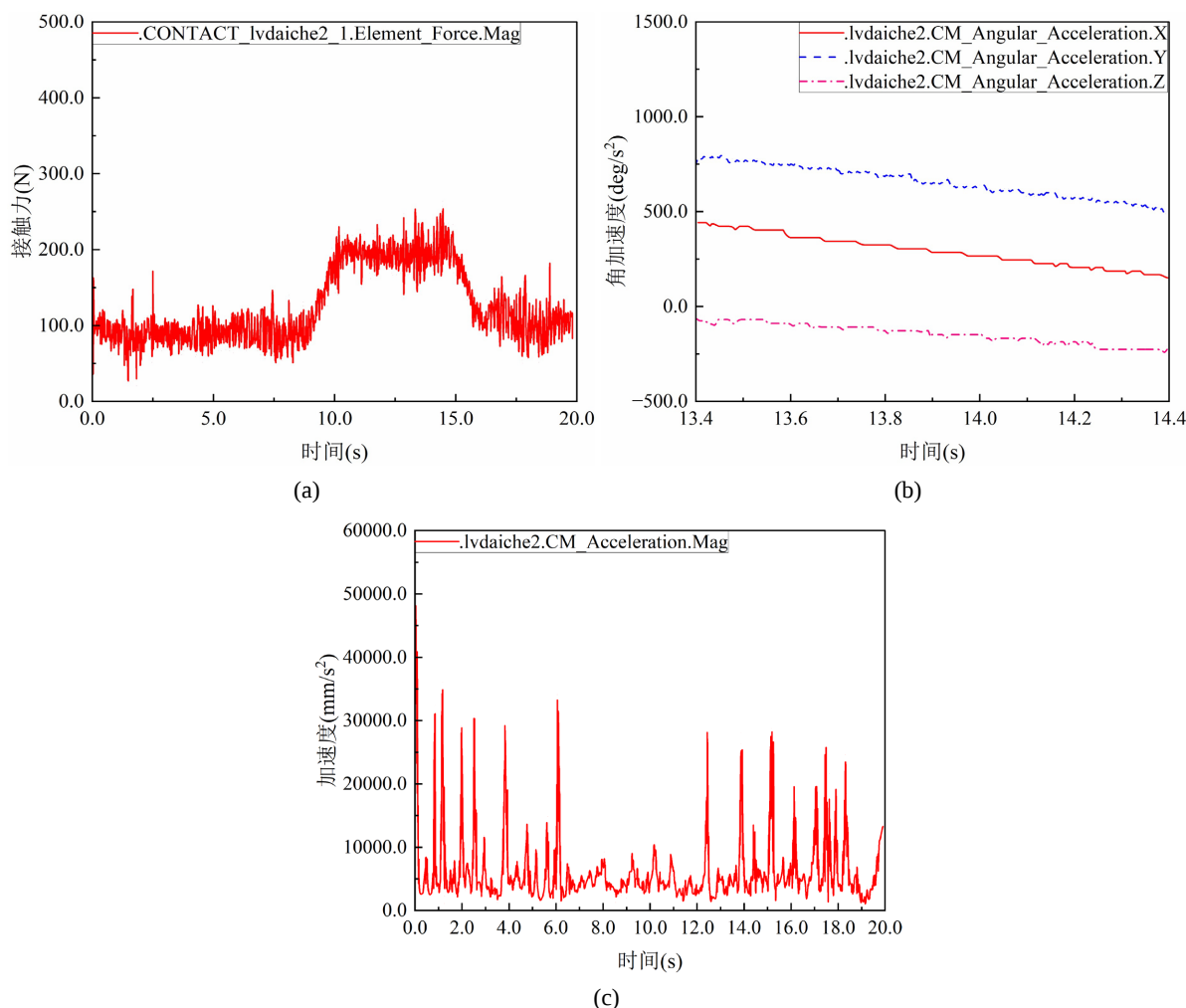


Figure 9. Variation curves corresponding to the contact between the track of Tracked Vehicle No. 2 and the pipeline wall: (a) Variation curve of track-pipe wall contact force for Tracked Vehicle No. 2; (b) Variation curve of angular acceleration for Tracked Vehicle No. 2 under maximum contact force condition; (c) Acceleration variation curve of Tracked Vehicle No. 2

图 9. 履带车 2 的履带与管壁接触所对应的变化曲线: (a) 履带车 2 履带与管壁接触力变化曲线; (b) 接触力最大时履带车 2 角加速度变化曲线; (c) 履带车 2 加速度变化曲线

履带与管壁接触所对应的变化曲线。

如图 9(a)所示为履带车 2 的履带与管壁接触力变化曲线, 相对于机器人进入竖直管道的运动, 在水平直管中受重力影响对应的与管壁的接触应力也较大。在进入弯管后, 弯管段的曲率半径较小, 机器人需要通过转向或被动适应路径变化。此时, 机器人本体或驱动部件与管道内壁的接触点会因路径弯曲而被迫挤压管壁, 导致法向接触力增大。进入以及退出弯道时, 机器人姿态突变可能导致瞬时冲击力。由于机器人姿态调整会出现较大的接触力波动, 特别在过渡阶段前后会有较大的速度波动, 但均属于工件可正常工作振动范围。在直管中由于底部履带车受重力影响, 在水平直管中的接触力较竖直管道中的接触力大。随着接触力的加大, 履带车与管道间的摩擦力也在增大, 在 13.9 s 时接触力达到最大值 257.43 N, 当接触力达到最大值时, 履带车的加速度同样增大, 待履带车完全进入弯管后, 随着重力对履带车的影响减小, 履带接触力逐渐减小, 加速度有所减小。

如图 9(b)所示, 履带车运动过程中有沿 X、Y、Z 方向的角加速度, 由于角加速度产生的合力较小, 且在接触力最大时, 履带车加速度也较大, 如图 9(c)所示, 则可得到接触力最大时履带车 2 履带的合力大小和方向近似关于履带车对称。

在 10 s 到 15 s 内, 机器人逐渐完成在弯管中的姿态调整与运动, 又由于履带与管壁接触力会发生频繁扰动。当机器人完全进入竖直管道后, 又趋于稳定, 接触力大小只与机器人自重和自身运动有关。至此, 管道机器人完成了从水平直管到 90° 竖直弯管再到竖直管道的步态转换。

4.4. 机器人变径功能的运动学仿真

图 10 所示为机器人在变径管道中行走时的状态, 包括两个阶段: 第一个阶段是机器人在 $\varnothing 900\text{ mm}$ 扩大到 $\varnothing 1100\text{ mm}$ 的过程, 第二阶段是机器人通过变径结构缩小车身尺寸由 $\varnothing 1100\text{ mm}$ 缩小到 $\varnothing 1000\text{ mm}$ 的过程, 不同尺寸管道中间设有过渡尺寸, 防止发生刚性碰撞, 每一节过渡阶段的管道长度设置为 5000 mm。仿真前分别给三组履带轮创建相同的转矩, 丝杆螺母创建扭矩, 使得车轮结构紧贴内壁, 点击运行仿真模型, 可以看到机器人能顺利通过管道, 下面两张图分别是机器人通过两个过渡阶段的模型状态图。

图 11 是机器人在通过两个过渡阶段的轴向位移图, 可以看出机器人在管道的一端行进到管道的另一端, 车轮结构是呈先扩张后缩小的趋势, 7 s 时进入变径管道, 车轮结构在 Y 轴的位移增加, 从 350 mm 增加到 450 mm, 符合单个车轮变径在 0~100 mm 的范围内, 进入到 $\varnothing 1100\text{ mm}$ 的管道内, 此时机器人变径范围最大, 18 s 后, 机器人进入另一个过渡阶段, 车轮结构发生缩小, 直径由 $\varnothing 1100\text{ mm}$ 缩小至 $\varnothing 1000\text{ mm}$ 。清理结构如车轮结构类似, 只是旋转作业呈周期状, 通过电缸调节作业呈先扩张后缩小的趋势, 符合机器人变径结构由图可知。机器人变径效果理想, 验证变径结果正确。

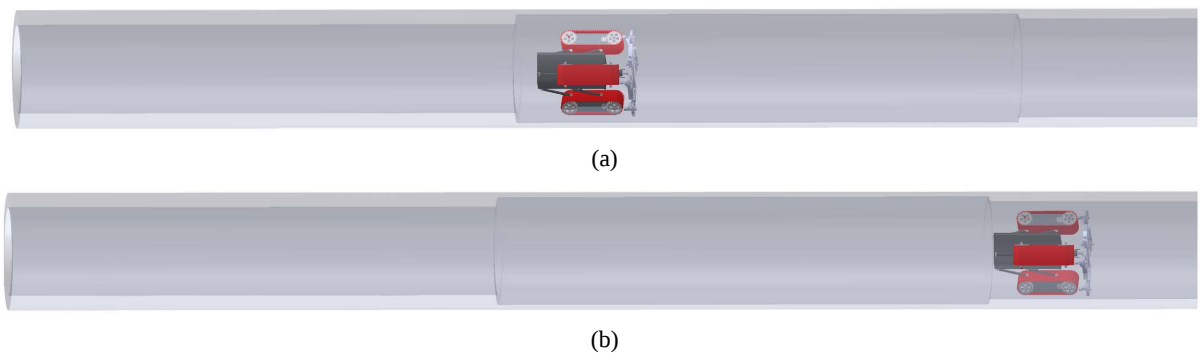


Figure 10. Simulation diagram of robot trajectory: (a) The first phase; (b) The second phase
图 10. 机器人行走位置模拟图: (a) 第一阶段; (b) 第二阶段

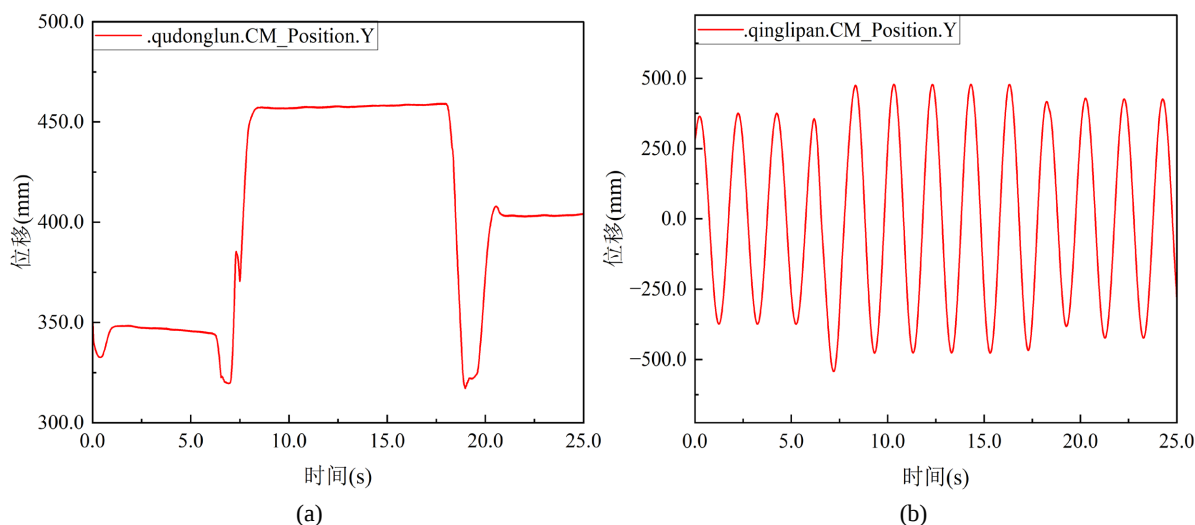


Figure 11. Robot variable diameter range curves: (a) Variable diameter range curves of traveling structure; (b) Variable diameter range curves of cleaning structure

图 11. 机器人变径范围曲线图: (a) 行走结构变径范围曲线图; (b) 清理结构变径范围曲线图

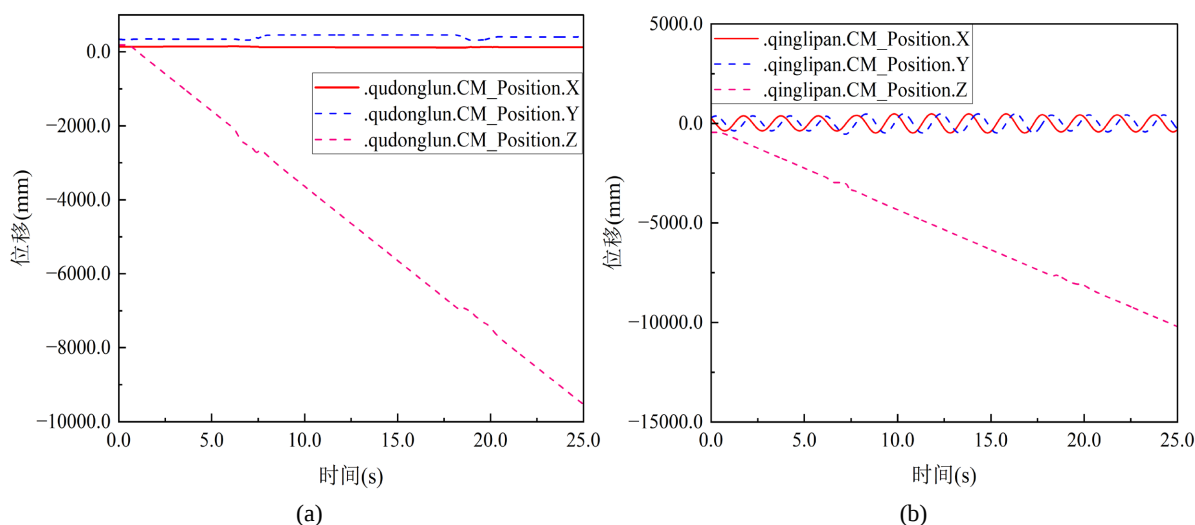


Figure 12. Displacement curves of movement in three-axis directions: (a) Displacement curves of the wheel structure moving in three-axis directions; (b) Displacement curves of the cleaning structure moving in three-axis directions

图 12. 三轴方向运动的位移曲线图: (a) 车轮结构在三轴方向运动的位移曲线图; (b) 清理结构在三轴方向运动的位移曲线图

图 12 是虚拟样机在管道行进过程中 X 轴、Y 轴、Z 轴的位移曲线图, 机器人在 X 轴方向的行进路线趋近于 0, 因此在仿真模拟过程中, 机器人在管道中并未发生相对偏移, 姿态角保持稳定, 因此, 车轮机构对于管道内壁保持足够的压力, 验证模型正确。

图 13 是虚拟样机在 X 轴、Y 轴、Z 轴的速度曲线, 由图看出机器人在刚进入变径管道过渡位置时, X 轴和 Y 轴方向的速度是趋近于 0 的, 此时机器人并无明显偏移, 在 7 s 和 18 s 时, 机器人 Z 方向的速度突然增大, 观察机器人仿真模拟时, 在过渡阶段到 $\varphi 1100$ mm 管道时, 车轮机构的前后会出现一个真空倾角, 机器人前轮不能紧贴管道内壁, 后轮紧贴过渡阶段, 导致速度会有一个较大的波动, 当前轮和后轮全部紧贴管道内壁时, 速度曲线趋于正常, 此波动在此结构中无法避免, 属于正常现象, 因此也符合行走要求。

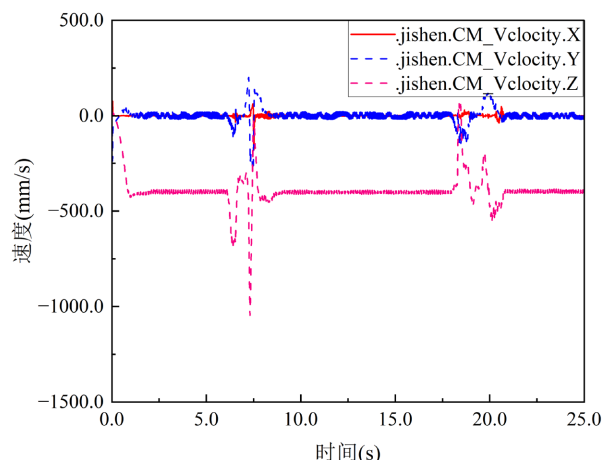


Figure 13. Velocity curves of the robot's motion along the three-axis directions

图 13. 机器人在三轴方向运动的速度曲线图

5. 结论

经过仿真建模与数值分析, 本研究成功获取了管道清理机器人在典型管道工况(90°弯管、竖直弯管、水平直管以及变径管道)下的运动特性参数。通过建立多体动力学仿真模型, 系统解算了机器人位移、速度、角速度的动态响应特性, 并同步获取了履带-管壁接触力的时域分布特征。研究结果表明:

- 1) 仿真数据有效验证了管道机器人弯管通过性运动学理论, 揭示了单步态周期内机构运动参数的演化规律, 为复杂管道环境的自适应运动控制奠定了理论基础。
- 2) 基于接触力动态响应的定量分析, 构建了关键承力部件的载荷谱数据库, 为后续结构强度优化及可靠性设计提供了重要的输入参数。

基金项目

内蒙古自治区科技计划项目(2022LHMS05001)。

参考文献

- [1] 陈赛. 进口短缺情景下我国石油能源系统韧性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- [2] 闫宏伟, 刘翼, 李健, 等. 埋地管道泄漏自适应封堵机器人设计及研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(1): 68-74.
- [3] 白承栋. 内径自适应管道机器人设计与运动性能分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [4] Kakogawa, A., Ma, S. and Hirose, S. (2014) An In-Pipe Robot with Underactuated Parallelogram Crawler Modules. 2014 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, 31 May-7 June 2014, 1687-1692. <https://doi.org/10.1109/icra.2014.6907078>
- [5] Moghaddam, M.M., Arbabtafti, M. and Hadi, A. (2011) In-Pipe Inspection Crawler Adaptable to the Pipe Interior Diameter. *International Journal of Robotics and Automation*, **26**, 135-145. <https://doi.org/10.2316/journal.206.2011.2.206-3078>
- [6] Ciszewski, M., Buratowski, T. and Giergiel, M. (2018) Modeling, Simulation and Control of a Pipe Inspection Mobile Robot with an Active Adaptation System. *IFAC-PapersOnLine*, **51**, 132-137. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.530>
- [7] 唐德威, 李庆凯, 姜生元, 等. 具有差动运动功能的管道机器人设计与分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 1-8.
- [8] 李斌. 一种面向地下管道的履带式智能机器人设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [9] 郭忠峰, 陈少鹏, 毛柳伟, 等. 主动变径管道机器人结构设计及其 ADAMS 仿真研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(15): 21-23, 48.
- [10] 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.

- [11] 胡文君, 李著信, 苏毅, 等. 管道机器人在三通处的通过性分析[J]. 后勤工程学院学报, 2005, 21(3): 49-53, 62.
- [12] 许冯平, 邓宗全. 管道机器人在弯道处通过性的研究[J]. 机器人, 2004, 26(2): 155-160.
- [13] 孟浩龙, 王菊芬. 管内检测机器人在弯管处的通过性能研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(13): 1531-1535, 1551.
- [14] 三维书屋工作室. ADAMS 2012 虚拟样机从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社: 2013: 377.