

多足PE管道内检机器人机构设计

王钧锂¹, 蒋梦琳², 王 洋²

¹西安西材三川智能制造有限公司, 陕西 西安

²新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年6月5日; 录用日期: 2025年7月21日; 发布日期: 2025年7月31日

摘 要

针对燃气管道内部老化缺陷人力检测困难的问题, 提出了一种可在燃气管道内自主变径的管道机器人机构。该机器人基于管道机器人的基本结构, 能自主适应管径的变化, 以解决当前机器人通过人为控制支撑机构造成的控制复杂、控制精度不高等问题。本文使用UG对机器人进行了三维建模和仿真, 分析了机器人的工作机理, 在电机的驱动下完成自适应过程, 并依赖丝杆螺母和连杆来实现变径。经仿真测试, 机器人高度为270 mm, 质量为0.5 kg, 主动轮外径可调节范围为270~360 mm, 空载行进速度为0.1 m/s, 支撑结构均满足设计要求, 为管道机器人的创新设计提供了有效解决方案。

关键词

管道机器人, 多足式, 缺陷检测, 自适应调节

Mechanism Design for Internal Inspection of Multi-Legged PE Pipe Robot

Junli Wang¹, Menglin Jiang², Yang Wang²

¹Xi'an Xicai Sanchuan Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²School of Transportation Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

Received: Jun. 5th, 2025; accepted: Jul. 21st, 2025; published: Jul. 31st, 2025

Abstract

For the problem of difficult human detection of aging defects inside gas pipelines, a pipeline robot mechanism that can autonomously change the diameter inside gas pipelines is proposed. The robot is based on the basic structure of the pipeline robot, and can autonomously adapt to the change of the pipe diameter, in order to solve the complexity of control and low control accuracy caused by the current robot through human control of the support mechanism. In this paper, 3D modelling

文章引用: 王钧锂, 蒋梦琳, 王洋. 多足 PE 管道内检机器人机构设计[J]. 人工智能与机器人研究, 2025, 14(4): 1044-1051. DOI: 10.12677/airr.2025.144099

and simulation of the robot was carried out using UG, and the working mechanism of the robot was analysed to complete the self-adaptation process under the drive of the motor and rely on the screw nut and connecting rod to achieve the diameter change. After the simulation test, the robot height is 270 mm, the mass is 0.5 kg, the adjustable range of the outer diameter of the active wheel is 270~360 mm, the no-load travelling speed is 0.1 m/s, and the support structure meets the design requirements, which provides an effective solution for the innovative design of the pipeline robot.

Keywords

Pipeline Robot, Pulti Legged Pose, Defect Detection, Adaptive Adjustment

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

管道作为重要输送设施，在各个行业上都得到了广泛应用。管道一般情况下常埋在地下或架设在空中，形成比较复杂的管网，人工缺陷检测和维修成本较高。为了解决上述问题。胡啸等人对履带式机器人在管道内的运动进行了分析，提出变径机构的设计方案[1]。常生等人设计了一种履带式的变径管道机器人能适应不同直径的输油管道[2]。研发出性能完善与成熟的管道机器人，代替人工作业，可以提高管道缺陷检测与管道作业的精确性、可靠性及工作效率。传统相关机器人研究大多集中在机器人在各种环境下的工作实验，如负载试验，坡度试验等[3]。而对于管道机器人缺乏相应的研究，由于管径大小都不统一，市面上多足式管道机器人大部分都是针对于某个特定的管道而设计的[4]。为解决管道机器人的通用性的问题，使其在适当范围管径内实现变径及电机的驱动。参考市场上的可变径管道机器人的结构，满足设计条件对多足式管道机器人进行结构设计，最后完成管道机器人的三维模型的建模以及装配，可用来作为城镇燃气老化缺陷检测设备的载体机器人。

2. 管道机器人方案设计

多足机器人根据腿部数量不同，可分为双足、四足、六足和八足[5]。其中八足机器人虽然抗干扰能力和载物运输能力强，但由于其体型庞大，并需要同时操控 8 条机械腿进行移动，控制系统相当复杂，因此并未得到广泛的应用[5]-[8]。根据管道机器人的设计特点和管道应用的要求，设计多足式爬行管道机器人应用于管道的直径为 270~360 mm 管道中，作业环境要求整个结构的尺寸应尽可能的小并且具备一定的牵引力。机器人的移动方式选择了多足轮式结构，传动方式选择了电动驱动，经过筛选变径结构选择了丝杠螺母副的变径结构。

2.1. 移动方式

多足式管道爬行机器人在运行过程中，要达到稳定可靠的要求，必须能够适应管道中的各种环境。管内可能会出现凸凹不平以及转弯的情况，如果机器人在运动过程中产生旋转或由于重心偏移而使得机器人的轴线与管道的中心线产生偏转角，载体可能会卡在管道内无法取出，严重时不得不破坏管道取出机器人。因此机器人应具备越障能力及管道适应性和定心性[9]。常见的履带式对不平路面的适应性强，缺点是体积大、不易实现转弯；支腿式对粗糙表面性能较好，缺点是其控制系统、机械结构均复杂；轮式移动方式速度快，转弯容易，对中性好，缺点是着地面积相对较小，维持附着牵引力较困难[10]。为保

证机器人在运行过程中心轴线与管道轴线保持一致，管道机器人采用多足轮式结构。

2.2. 传动方式

传动系统是将动力进行传递与分配，对整部机器的性能、成本以及整体尺寸的影响都较大，因此合理地设计传动系统是一重要部分。传动方案应首先满足工作机械的性能要求，然后满足工作可靠、结构简单、体积小、传动效率高、使用维护方便、技术经济性好的要求。机器人常用的驱动方式有三种：液压驱动、气动驱动和电动驱动[11]。电动驱动的原件主要包括步进电机、直流伺服电机和交流伺服电机。液压和气动方式对环境要求较高，实现较为复杂。电机驱动结构简单，易于实现密封和速度控制。通过各种方案的对比，选用步进电机作为机器人本体的驱动电源，机器人的足轮由单独的电机驱动。

2.3. 自适应结构方案

管道在使用时因结锈或压力过大而产生变形或者内表面存在杂物，机器人在碰到变形部位和杂物时，由于阻力而使支撑臂收缩，可在驱动力的作用下通过变形部位，当再次达到管道正常段时，支撑臂能够在弹簧的作用下像伞一样张开使机器人重新恢复原来的平稳状态，即机器人的自适应过程[12]。对于自适应性的设计主要包括两种方式：各支腿单独调整和支腿整体调整。

根据前后支腿的特性要求，设计选用丝杠螺母副调节方式。具体设计图如图 1 所示。其工作原理为安装在轴套和丝杠螺母之间的压力传感器间接检测驱动车轮和管道内壁之间的压力 F_y ，并实时将压力值回馈回监控装置，当压力 F_y 的值小于所允许的最小压力值 F_y 时，连杆 AB 的一端和车轮轴铰接在一起，另一端铰接在固定支点 A，推杆 CD 与连杆 AB 铰接在 C 点，另一端铰接连接在 D 点，螺母连接块在圆周方向相对固定，滚珠丝杠的转动将带动丝杠螺母沿轴线方向在滚珠丝杠上来回滑动，从而带动推杆运动，进而推动连杆 AB 绕支点 A 转动，使车轮撑开或者紧缩以达到适应不同的管径的目的。

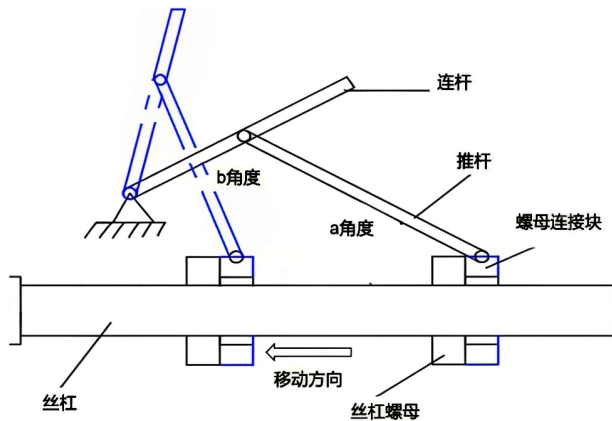


Figure 1. Lead screw and nut self-adjusting mechanism diagram
图 1. 丝杠螺母副自适应调节原理图

3. 关键传动部分设计

3.1. 管道机器人的整体设计

对管道机器人的关键传动部分进行设计及力学分析，确定了电机大小及功率，丝杠的螺距等重要参数，管道机器人适用于 270~360 mm 的管道，整体上采用了多足式的结构设计，自适应机构采用了丝杠螺母式变径结构。

3.2. 自适应机构的设计

自适应机构选择了丝杠螺母方式实现变径，丝杠螺母上有轴套(螺母连接块)，螺母和连接块固定在一起，电机开始转动并通过联轴器与丝杠连接，丝杠带动螺母移动，螺母上有螺母连接块移动支腿进行一个向前的推动，改变角度来实现变径。

3.2.1. 自适应机构部分电机的选择

因脉冲当量 $\delta \leq 0.02$ ，假设 $P = 4$ ：

$$\frac{\alpha}{360^\circ} = \frac{\delta}{P} \quad (1)$$

式中： α 为步距角； P 为螺距； δ 为脉冲当量；

$$\text{代入 } \frac{\alpha}{360^\circ} = \frac{0.02}{4}$$

得 $\alpha = 1.8$

电机工作扭矩的计算：

$$T_b = \frac{F_b}{2\pi n} * b_p \quad (2)$$

式中： T_b 为电机工作扭矩； F_b 为工作力； b_p 为丝杠的导程； n 为丝杠机械效率；

车轮与管壁的摩擦系数 $\mu = 0.8$ ，车体的重量为 10 kg。

得

$$mg = 10 * 10 = 100N \quad (3)$$

车体对管壁的正压力为压紧力的两倍所以 $N = 200N$

则

$$F = \mu * N = 0.8 * 200 = 160 \quad (4)$$

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件。在非超载的情况下，电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数，而不受负载变化影响，当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度，称为“步距角”，它的旋转是以固定的角度一步一步运行的。同时可以通过控制脉冲来控制电机转动的速度和加速度，达到调速的目的。驱动器就是为步进电机分时供电的多相时序控制器。根据设计要求以及计算部分得到的步距角选择 42 步进电机，由电机参数表确定电压为 12 型号的电机。如表 1 所示。

3.2.2. 丝杠选择

丝杠螺母机构的主要作用是将旋转运动变为直线运动或将直线运动变为旋转运动。有以传递能量为主的(如螺旋压力机)，也有以传递运动为主的。考虑物体的重量、运行模式、进给速度、安装方向、丝杠轴转速、行程、定位精度、寿命时间等因素。根据管道机器人的设计要求以及管道机器人车身的设计选择 M12 丝杠，螺距为 4 mm,总长度为 80 mm,两边的光轴长度为 5 mm。

转一圈的脉冲为：

$$\frac{360}{0.9} = 400 \quad (5)$$

丝杠的螺距取 4 mm，每转一圈就走 4 mm，每一步进就是：

$$\frac{\text{螺距}}{\text{脉冲}} = \frac{4}{400} = 0.01 \text{ mm}$$

(6)

3.2.3. 丝杠螺母副的选择

丝杠螺母副具有传动效率高,运行平稳的特点[13]。经过计算以及相关参数丝杠螺母副的大小确定为:大圆直径 D1 为 32,小圆直径 D 为 16,高度 L1 为 19,片厚 T 为 4,中心距为 24,如图 2 所示:

Table 1. Motor parameters
表 1. 电机参数表

电机型号	电压	电流/相	电阻/相	电感/相	静力矩	转动惯量	定位力矩
SL42STH40-	6	0.8	7.5	6.7	3.6	54	150
SL42STH40-	12	0.4	30	30	3.6	54	150

Table 2. Coupling parameters
表 2. 联轴器参数

序号	型号	直径 D	L	成型孔径	L1	L2	S	L3	拧紧螺丝
1	LM-30	30	35	5-16	11	10	1.5	5	M4
2	LM-30	30	42	5-16	13	10	1.5	5	M4

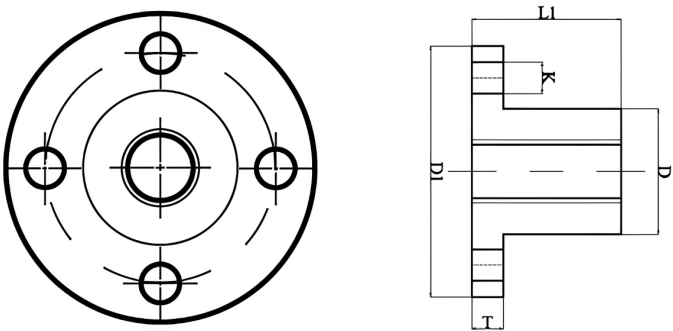


Figure 2. Lead screw and nut assembly dimension diagram
图 2. 丝杠螺母副的尺寸图

3.3. 联轴器的选型

联轴器是将两轴轴向联接起来并传递扭矩及运动的部件,具有一定的补偿两轴偏移的能力以及一定的缓冲减震性能,同时也兼有过载安全保护作用。梅花型联轴器的结构简单,径向尺寸小,重量较轻,转动惯量小,而且无间隙[14]。具有很好的平衡性,适用于高转速的应用,最高转速可以达到 15000 转/分钟。根据要求选择 42 步进电机和梅花联轴器,由联轴器参数表选择联轴器为序号 2 的。如表 2 所示。

3.4. 管道机器人的足腿连杆设计

管道通常都是 360°的一个空间,足腿连杆设计采用十二轮全驱动的驱动方案。机器人支腿部分由三个足共六个连杆组成,根据设计需求管道机器人是圆形所以每个足都 120°来设计。足腿部分有三组连杆组成,如图 3 所示,安装在丝杠螺母上的一个连接块推动车身上的一个连杆做一个角度的调整,两个连

杆跟着轮组一块调节，丝杠螺母也跟着一起被动地调节，变径机构上连杆的推动，使得车身上的两个连杆跟着角度变动，从而发生一个水平方向的变化，满足管道内行走的基本条件。

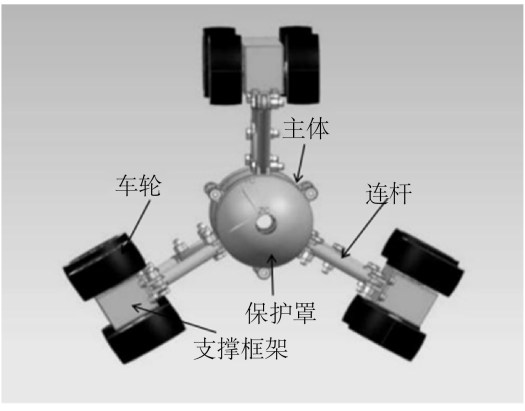


Figure 3. Foot-leg and wheel assembly diagram
图 3. 足腿及轮组图

4. 装配及仿真

4.1. 变径结构的装配

变径结构选择丝杠螺母副结构，实现多足式爬行管道机器人适应不同管径的工作。变径结构主要是由电机带动丝杠螺母，丝杠螺母上的连接块使连杆的角度发生变化来实现变径，如图 4 所示。

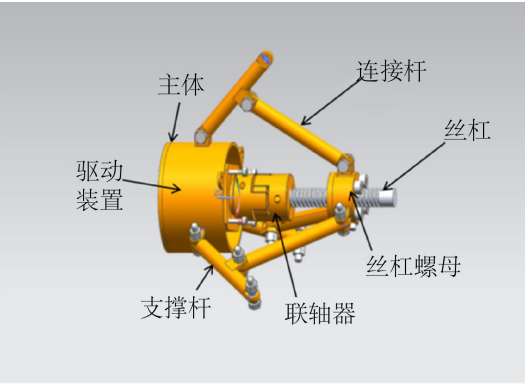


Figure 4. Reducing structure assembly diagram
图 4. 变径结构装配图

4.2. 整体的数字化装配

根据设计计算对各个零件进行三维建模，全部零件完成建模后进行数字化装配。

4.3. 对样机进行仿真

对装配进行大量分析工作，验证运动机构设计的合理性，并利用图形输出功能捕捉相应参数，如位移、速度等，对设计进行优化。在仿真过程中确定好约束点及运动的形式。管道机器人最小管径如图 5 所示，最大管径如图 6 所示。

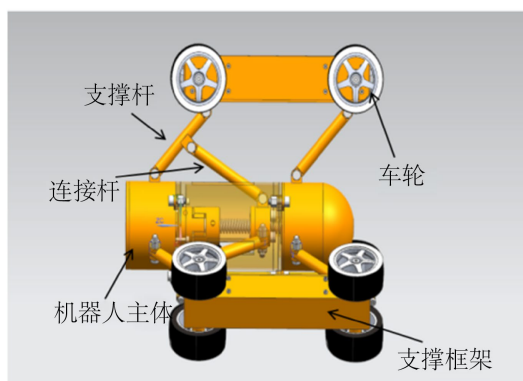


Figure 5. Minimum pipe diameter diagram
图 5. 最小管径图

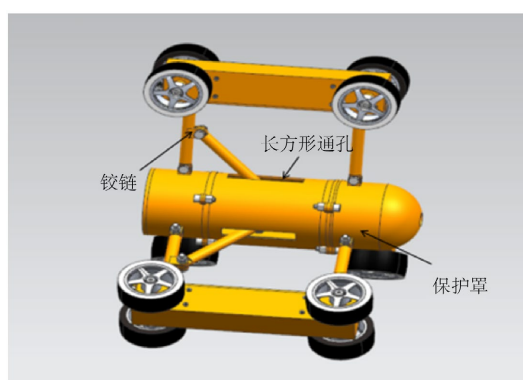


Figure 6. Maximum pipe diameter diagram
图 6. 最大管径图

5. 结论

多足式爬行变径管道机器人的设计, 解决了目前管道机器人不同管径的适应性问题。机器人具有结构简单, 移动速度快, 易转弯, 对中行好的特点, 能够保证机器人稳定良好的运行, 能够广泛运用于管道检测和维修等方面, 可作为城镇燃气光热老化缺陷检测设备的载体机器人。在多足式管道机器人的设计上提出自适应调整的结构, 可为管道机器人的发展与运用提供了良好的技术支持与研究方向。

参考文献

- [1] 胡啸, 史继新. 管道爬行机器人运动分析与变径结构设计[J]. 科技视界, 2019(13): 1-4.
- [2] 常生, 刘玉良, 王忠超. 新型变径管道机器人的设计[J]. 机械工程师, 2021(11): 64-65, 68.
- [3] 熊韬, 贾怡强, 叶繁, 等. 多足机器人的设计及实验研究[J]. 机械工程师, 2024(11): 92-94, 98.
- [4] 李龙辉, 张体刚, 高慧, 等. 管道机器人发展研究[J]. 机械制造, 2020, 58(10): 5-7.
- [5] 宋朋. 轮腿式六足机器人机构设计与分析[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [6] 张金柱. 易防护机械腿六足机器人机构学研究[D]: [博士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [7] 孙乔. 直立型并联腿式救灾六足机器人的机构设计与动态步态控制研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [8] 李党超, 朱爱斌, 李昊城. 一种适应崎岖地形的六足机器人实验平台设计[J]. 中国现代教育装备, 2022(9): 40-42.
- [9] 解旭辉, 王宏刚, 徐从启. 微小管道机器人机构设计及动力学分析[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(6): 98-101.

-
- [10] 段颖妮, 韩佐军, 李国柱, 等. 管道机器人移动牵引机构设计[J]. 机电一体化, 2012, 18(9): 71-73.
 - [11] 孙丽霞, 江旭东, 姜生元, 等. 机械自适应型管道机器人驱动单元的设计[J]. 机械设计, 2009, 26(10): 37-40.
 - [12] 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.
 - [13] 徐小云, 颜国正, 丁国清, 等. 管道机器人适应不同管径的三种调节机构的比较[J]. 光学精密工程, 2004(1): 60-65.
 - [14] 宣元, 何琳, 廖健. 梅花形弹性联轴器液压泵机组不对中故障振动分析[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(6): 94-99.