Mechanical Engineering and Technology 机械工程与技术, 2026, 15(5), 637-646
Published Online October 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/met
https://doi.org/10.12677/met.2026.155060

Hans汉斯

履带式管道机器人行走机构设计与有限元分析

王　衍，蔡　伦，陈鑫雨，耿金萍

江苏师范大学科文学院电气与智能制造学院，江苏　徐州

收稿日期：2026年9月30日；录用日期：2026年10月23日；发布日期：2026年10月29日

摘　要

针对老旧小区DN300-DN400污水管道人工巡检效率低、作业风险高，且现有管道机器人对变径段与弯管节点通过能力不足的问题，设计了一款摆臂式履带管道机器人的行走机构与车体结构。行走系统采用三组履带足沿机架圆周120°均布的布局形式，由独立电机分别驱动；变径机构采用丝杠螺母主动调节结合交叉连杆随动支撑的复合方案，可实现260~370 mm管径自适应调节。完成了主传动轴、直齿轮副与锥齿轮副的参数设计及弯扭组合强度校核，建立变径机构力学模型并完成丝杠驱动电机的选型匹配。借助SolidWorks Simulation对关键承载部件及整机开展静力学有限元分析，同时完成90°弯管通过性动力学仿真验证。研究结果可为复杂污水环境下管道机器人行走机构的优化设计提供理论依据与数据支撑，对地下排水管网自动化运维装备研发具有工程参考价值。

关键词

管道机器人，履带行走机构，摆臂式变径，有限元分析，弯管通过性

Design and Finite Element Analysis of Traveling Mechanism for Crawler-Type Pipe Robot

Yan Wang, Lun Cai, Xinyu Chen, Jinping Geng

School of Electrical and Intelligent Manufacturing, Jiangsu Normal University KeWen College, Xuzhou Jiangsu

Received: September 30, 2026; accepted: October 23, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

Aiming at the problems of low efficiency and high operation risk of manual inspection for DN300–DN400 sewage pipelines in old residential communities, as well as the insufficient passing capacity of existing pipe robots at diameter-variable sections and elbow joints, this paper designs the

文章引用: 王衍, 蔡伦, 陈鑫雨, 耿金萍. 履带式管道机器人行走机构设计与有限元分析[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(5): 637-646. DOI: 10.12677/met.2026.155060

traveling mechanism and vehicle body structure of a swing-arm tracked pipe robot. The traveling system adopts a layout with three sets of tracked feet uniformly distributed at 120˚ intervals along the frame circumference, each driven by an independent motor. The diameter-varying mechanism adopts a composite scheme of active lead screw-nut adjustment combined with cross-link follow-up support, realizing adaptive diameter adjustment in the range of 260~370 mm. The parameter design and combined bending-torsion strength check of the main transmission shaft, spur gear pair and bevel gear pair are completed, the mechanical model of the diameter-varying mechanism is established, and the selection and matching of the lead screw drive motor are fulfilled. Static finite element analysis is carried out on key load-bearing components and the whole machine via SolidWorks Simulation, and dynamic simulation verification of 90˚ elbow passability is completed simultaneously. The research results can provide theoretical basis and data support for the optimal design of pipe robot traveling mechanisms in complex sewage environments, and have engineering reference value for the research and development of automatic operation and maintenance equipment for underground drainage pipe networks.

Keywords

Pipe Robot, Crawler Traveling Mechanism, Swing-Arm Diameter Variation, Finite Element Analysis, Elbow Passability

Copyright © 2026 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

随着城镇老旧小区改造工程被纳入国家“十五五”规划重点任务，地下污水管网的周期性检测与运维已成为城市公共安全治理的现实需求。DN300~DN400 口径的污水支管是老旧小区接驳市政主干管网的核心通道，基于全国 15 个老旧小区改造项目统计，其应用覆盖率接近 100%，其管内淤积、管壁锈蚀等病害直接影响排水系统运行效能[1]。

按照行走机构形式划分，主流管道机器人可分为轮式、履带式、蠕动式三大类[2]。为清晰对比各类方案的技术特点与适用场景，选取国内外 4 种典型管道机器人方案，从行走方式、变径支撑方式、驱动方式及核心优缺点进行归纳，如表 1 所示。

Table 1. Comparison of typical pipeline robot solutions
表 1. 典型管道机器人方案对比

方案来源	行走方式	变径/支撑方式	驱动方式	核心优缺点
PEARPOINT 轮式管道机器人	轮式	车轮被动支撑	单电机集中驱动	结构简单、行走速度快；管道通过性差，对管内环境要求高，淤泥环境易打滑
哈尔滨理工大学蠕动式管道机器人	蠕动式	支撑足 + 蠕动丝杠	丝杠驱动	管道通过性强、不易打滑；行走速度慢、牵引能力有限
山东大学履带式管道机器人	履带式	被动张紧支撑	单电机集中驱动	行走稳定可靠，不易陷入淤泥；被动变径精度低，管径突变处适应性不足
燕山大学 3-UPU 管道机器人	轮履复合	3-UPU 多自由度被动支撑	多电机驱动	姿态灵活、管道适应性强；结构复杂，控制难度高
本文设计	履带式	丝杠螺母主动调节 + 交叉连杆随动支撑	三组履带独立电机驱动	主动变径精度高、牵引力大、故障冗余性强，适配污水复杂工况

由表 1 可知，轮式、蠕动式、传统履带式及轮履复合方案各有适用场景：轮式机器人行走效率高，但在淤泥沉积、管壁凹凸的污水环境中抓地力不足，易发生打滑侧倾；蠕动式机器人通过性强，但行走速度慢、牵引能力有限，难以适配长距离连续巡检场景；履带式机器人凭借接地比压小、抓附力强的优势，在复杂管内环境中行走稳定性更优，是当前污水管道巡检的主流方案[3]。

但现有履带式管道机器人仍存在两处明显短板：一是关键承载传动部件的强度设计多依赖经验选型，缺少系统的静力学校核与仿真验证，复杂工况下的结构可靠性缺乏数据支撑；二是管径自适应机构多以弹簧被动张紧为主，面对管径突变段与 90˚弯管节点时，主动调节精度与姿态适配能力不足，限制了管网节点的通过性能[4]-[6]。

针对上述问题，本文设计了一种摆臂式履带管道机器人的行走机构与车体结构，采用丝杠螺母主动调节结合交叉连杆随动支撑的复合变径方案，实现 260~370 mm 管径自适应调节；完成主传动轴、直齿轮副、锥齿轮副等核心传动部件的参数设计与弯扭组合强度校核，并通过 SolidWorks Simulation 开展静力学有限元分析与弯管通过性动力学仿真。研究结果可为复杂污水环境下管道机器人行走机构的工程化设计提供理论依据与数据支撑。

2. 行走传动系统设计

管道机器人行走机构采用三组履带足沿机架圆周 120˚均布的布局方案，每组履带由独立直流减速电机单独驱动，可通过差速控制实现转向，且单侧电机故障时仍可依靠其余履带完成原路回撤，提升作业可靠性。本次设计整机核心指标为：牵引力 400~500 N、整机质量 ≤15 kg，力学计算取基准质量 10 kg；管内额定行走速度 0.1 m/s，最大适应爬坡角度 15˚。下文依次完成驱动电机选型、齿轮传动副参数设计、主传动轴强度校核及同步带选型，形成完整的传动系统设计方案。

2.1. 行走驱动电机选型

行走总阻力由直管内摩擦阻力与坡道重力分量两部分构成，同时考虑管内壁淤积附着物造成的附加阻力，按最不利工况进行电机转矩与功率核算。

水平直管工况下，行走机构内摩擦阻力由齿轮啮合、轴承摩擦及履带与驱动轮的接触损耗共同构成，按下式计算：

$$F_1 = kmg$$

式中：k 为内阻力系数，综合各类传动损耗取 $k=0.05$；m 为整机质量，取 10 kg；g 为重力加速度，取 10 m/s^2。代入计算得水平内摩擦阻力 $F_1 = 5$ N。

坡道工况下，机器人需同时克服内摩擦阻力与沿坡道向下的重力分量。按最大爬坡角度 15˚计算，重力沿坡道分力约为 25.9 N，叠加内阻后理论爬坡阻力约为 31 N。考虑污水管道内淤泥粘附、管壁结垢凹凸、局部越障等极端工况带来的附加冲击阻力，引入安全余量后，取机器人的总阻力 $F_0 = 120$ N。三组履带均分，每条履带所收到的阻力 $F = 40$ N。

已知驱动轮外径 $d = 32$ mm，则单组履带所需驱动轮输出阻力矩为：

$$T = F \times \frac{d}{2} = 40 \times 0.016 = 0.64\text{N}\cdot\text{mm}$$

由行走速度 $v = 0.1$ m/s，换算驱动轮转速：

$$n = \frac{v}{\pi d} \times 60 = \frac{0.1 \times 60}{\pi \times 0.032} \approx 60\text{r/min}$$

得到功率为：

$$p=\frac{Tn}{9550}=4.01\text{W}$$

综合考虑传动效率损耗与启动冲击载荷，选用宁波拓尔 PG32GR 系列直流电机，型号为 GR127000。电机额定电压 12 V，空载转速 7000 r/min，电机轴输出负载转矩 79.7 gf·cm；配套 3 级标准配合齿轮箱，减速比为 72，减速箱输出额定转矩 25.0 kgf·cm，远大于 0.64 N·m 的工况需求，功率与转矩裕度充足，满足设计要求。

2.2. 齿轮传动副参数设计

行走传动链采用“锥齿轮副 + 直齿轮副”两级串联布置：锥齿轮副为第一级，实现动力 90˚转向传递；直齿轮副为第二级，与驱动轮同轴布置，两级传动比均取 1。

直齿轮副选用模数 m = 1、压力角 α = 20˚的标准渐开线直齿圆柱齿轮，主、从动齿轮齿数均为 32。经几何参数计算：分度圆直径 d = 32 mm，齿顶高 h_a = 1 mm，齿根高 h_f = 1.25 mm，齿顶圆直径 d_a = 34 mm、齿根圆直径 d_f = 29.5 mm、基圆直径 $d_b \approx 30.07$ mm，全齿高 h = 2.25 mm。

锥齿轮副采用等顶隙收缩齿直齿锥齿轮，主、从动齿轮齿数均为 20，轴交角 Σ = 90˚。经计算：分度圆直径 $d_1 = d_2$ = 20 mm，分锥角 $\delta_1 = \delta_2$ = 45˚，齿顶高 h_a = 1 mm，齿根高 h_f = 1.2 mm，对应齿顶圆直径 $d_a \approx 21.41$ mm、齿根圆直径 $d_f \approx 18.30$ mm，齿顶角 $\theta_a \approx 4.05$˚、齿根角 $\theta_f \approx 4.85$˚。

2.3. 主传动轴强度校核

主传动轴总长 55 mm，两侧轴承均采用凸缘外圈深沟球轴承 F617-8，轴段左侧安装锥齿轮、右侧安装直齿轮，动力通过平键进行传递。该轴同时承受弯矩与转矩作用，采用第三强度理论对其进行强度校核。

由 2.1 节选定的减速电机参数，经两级传动比为 1 的齿轮副传递后，主传动轴输入转矩与减速箱输出转矩一致，即：

$$T=9550\times\frac{P}{n}=646\text{N}\cdot\text{mm}$$

根据齿轮受力关系，锥齿轮啮合处的周向力为：

$$F_{t1}=\frac{2T}{d_1}=64.6\text{N}$$

直齿轮端周向力为：

$$F_{t2}=\frac{2T}{d_2}=40.4\text{N}$$

对应两处齿轮的径向力分别为：

$$F_{r1}=F_{t1}\tan 20^{\circ}=23.5\text{N},$$

$$F_{r2}=F_{t2}\tan 20^{\circ}=14.7\text{N}$$

分别对传动轴竖直、水平方向建立静力学平衡方程，求解两端轴承支座反力并绘制双向弯矩图，确定危险截面位于直齿轮安装轴肩处，该位置轴径 d = 10 mm，截面最大合成弯矩 $M_{\max}$ = 195 N·mm。

实心圆轴的抗弯截面系数：

$$W=\frac{\pi\alpha}{32}=98\text{mm}^3$$

依据第三强度理论，弯扭组合下的当量应力为：

$$\sigma_{r3}=\frac{\sqrt{M^2+T^2}}{W}=6.9\text{MPa}$$

主传动轴材料选用 6063-T5 铝合金，材料许用正应力[σ] = 55 MPa，计算得安全系数约为 8.0。机械设计规范中，一般轴类零件的安全系数要求为 1.5~2.0，本设计安全系数远高于规范下限，表明主传动轴的弯扭组合强度可满足管道机器人长期连续作业的使用要求。

2.4. 同步带选型

引入工况系数对额定功率进行修正，得到设计功率：

$$P_d=P\times k_a=5.52\text{W}$$

式中：k_a 为工况系数，轻载工况下取 1.2。

根据设计功率与工作转速，选用 3M 型圆弧齿同步带，配套同步带轮齿数 z = 36，节圆直径约 35 mm。结合机器人整体尺寸与中心距要求，选定带的节线长度为 633 mm，带宽为 36 mm。为提升履带与管壁的附着摩擦力，避免管内湿滑工况下打滑，采用胶面开槽型同步带作为行走履带。

3. 变径机构力学建模

为实现管道机器人在 DN300~DN400 管径内的自适应支撑与稳定行走，设计了“丝杠螺母主动调节 + 交叉连杆随动支撑”的复合摆臂变径机构。通过建立运动学模型与静力学模型，推导变径过程中摆臂角度、径向伸缩量与丝杠轴向力的定量关系，完成驱动系统的扭矩计算与元器件选型。

3.1. 变径机构运动学关系

变径机构由三组独立的丝杠－摆臂单元沿主体机架圆周 120˚对称布置，每组单元对应一套履带足。其中滚珠丝杠副为主动驱动件，通过螺母的轴向移动带动主动摆臂绕铰点摆动，推动履带足沿径向伸缩；交叉连杆为随动支撑件，约束履带足仅沿径向平动，抑制周向偏转，提升变径与行走过程的姿态稳定性。

设定主动摆臂长度 L = 100 mm，丝杠螺母处于初始位置时，摆臂与丝杠轴向的最小夹角 $\theta_{\min}=15^\circ$；螺母行进至最大行程处时，摆臂最大工作夹角 $\theta_{\max}=49^\circ$。对应履带足的径向伸缩范围为 260~370 mm，覆盖 DN300~DN400 标准污水管道内径区间，同时预留管壁附着物与淤积层的冗余空间。

结合变径机构的运动参数要求与机身狭小空间的安装约束，选用 THK 公司 SDA-V 系列微型滚珠丝杠，丝杠公称直径 10 mm，有效工作行程 57 mm。该系列丝杠采用钢球循环传动结构，承载能力强、反向间隙小、传动平稳，适配管道机器人的内部安装空间与变径驱动精度要求。

3.2. 摆臂机构静力学建模

建立单组摆臂机构的静力学模型，分析径向支撑载荷与丝杠轴向负载的传递关系。设单组履带足承受的径向总载荷为 F_N，包含机器人自重的径向分力与管内支撑反力；该载荷通过履带足支架作用于摆臂末端，分解为沿摆臂轴向的压力与垂直于摆臂的弯矩。

由力矩平衡关系，以摆臂与机架的铰点为转轴，丝杠轴向力 F_a 对铰点的力矩与径向载荷 F_N 对铰点的力矩平衡：

$$F_a\cdot L\cdot\sin\theta=F_N\cdot L\cdot\cos\theta$$

化简得丝杠轴向力与径向支撑力的定量关系：

$$F_a=F_N\cdot\cot\theta$$

式中：θ 为摆臂与丝杠轴向的夹角；F_a 为丝杠所受轴向力；F_N 为履带足承受的径向支撑力。

由公式可知：摆臂夹角 θ 越小，相同径向载荷下丝杠所需轴向力越大，因此最小夹角 15˚工况为丝杠受力的最不利工况。代入单组履带足的径向载荷计算，得丝杠最大轴向工作负载 F_a = 8 N，与最不利工况的受力分析结果一致。

交叉连杆作为随动支撑结构，主要承担径向倾覆力矩，可降低摆臂铰点的弯曲载荷，提升机构整体的径向刚度与抗偏载能力。

3.3. 丝杠驱动扭矩计算与电机选型

3.3.1. 驱动扭矩计算

为消除丝杠副传动间隙、提升变径位置控制精度，对滚珠丝杠副施加预紧力 $F_p = 10$ N，因此丝杠总轴向负载为工作负载与预紧力之和：

$$F_{tal} = F_a + F_p = 18\text{N}$$

丝杠所需驱动扭矩计算公式为：

$$T = \frac{F_{tal} \cdot P_h}{2\pi\eta}$$

式中：T 为丝杠驱动扭矩(N·m)；P_h 为丝杠导程(m)；η 为滚珠丝杠传动效率，此处 η 为变径机构的总传动效率。参考《机械设计手册》中滚珠丝杠传动系统总效率的取值规范，本设计取 $\eta = 0.25$ 为保守取值，以保证电机转矩裕度。结合本次选用滚珠丝杠的结构参数，代入计算得丝杠所需驱动扭矩 $T = 0.023$ N·m

3.3.2. 步进电机选型

参考《机械设计手册》中传动部件安全系数选取规范，考虑到管道机器人在污水管道内作业时，存在管壁冲击、越障振动、淤泥附加载荷、启动冲击等动载工况；同时变径机构为整机核心承载部件，其锁止可靠性直接影响管内支撑稳定性与防倾覆能力。因此取安全系数 $K_s = 2.5$，高于静载规范下限，以覆盖冲击、振动及偏载工况，保证机构运行可靠性。按安全系数修正后，最大需求扭矩 $T_{\max} = 0.058$ N·m。故选用雷赛 42CM06-BZ 型抱闸式步进电机，其额定静力矩为 0.6 N·m，转矩裕量充足。

该电机自带断电抱闸功能，可在机器人行走作业时锁定丝杠位置，避免变径机构受载松动，保证管内支撑姿态稳定，适配污水管道复杂颠簸的行走工况。

4. 有限元静力学分析

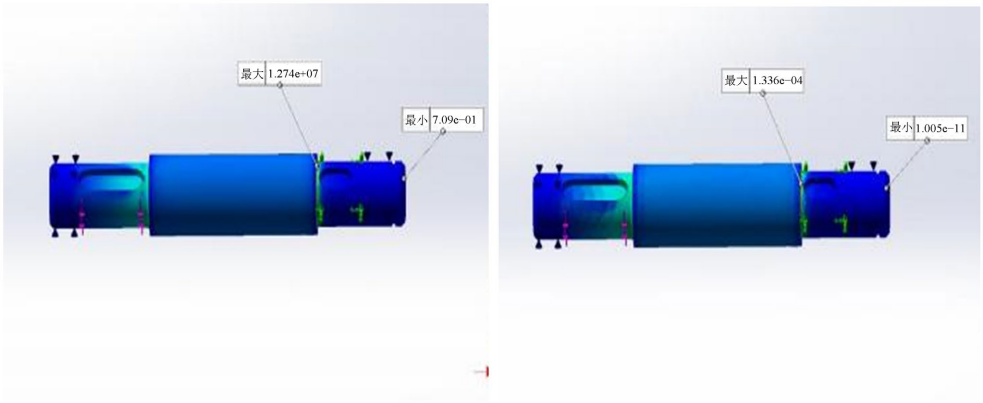
为验证关键承载部件的强度与刚度是否满足设计要求，采用 SolidWorks Simulation 软件对主传动轴、齿轮副及整机行走机构开展静力学有限元分析。

4.1. 主传动轴有限元分析

建立主传动轴三维简化模型，在两端轴承安装位置施加固定约束，在锥齿轮键槽位置施加额定转矩 T = 646 N·mm，模拟实际传动载荷。网格划分时，对轴肩、键槽等应力集中区域进行网格加密处理，求解等效应力与变形量。

主传动轴应力云图与应变云图如图 1 所示，根据云图可知，主传动轴所受最大应力位于直齿轮固定段以及锥齿轮固定端，这两段区域均作为主要的承受应力区域，据图可知，主传动轴最大等效应力数值为 12.47 MPa；最大变形量为亚微米级，约 10^{-4} mm。仿真最大应力远低于 6063-T6 铝合金 215 MPa 的屈服强度。此处有限元仿真采用峰值时效状态的 6063-T6，与前文所用的 6063-T5 为同系铝合金的不同时效

状态，T6 强度更高，校核结果偏安全，说明主传动轴的刚度与强度均满足设计要求。



(a) 应力云图　　(b) 应变云图

Figure 1. Stress and strain contour plots of the main drive shaft
图 1. 主传动轴应力应变云图

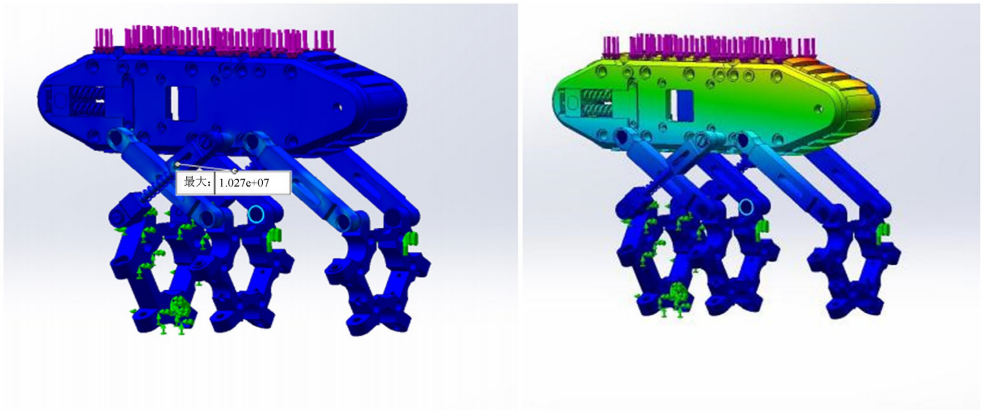
4.2. 齿轮副有限元分析

分别对单个锥齿轮、配对啮合锥齿轮副、单个直齿轮、配对啮合直齿轮副建立装配仿真模型，约束齿轮内孔轴配合面，在轮齿啮合位置施加理论计算得到的周向力与径向力。

仿真结果显示：单个锥齿轮最大应力位于齿根处，约 0.19 MPa；考虑配对啮合效应后，锥齿轮副最大应力增至约 0.6 MPa。单个直齿轮最大应力位于键槽处，约 1.95 MPa；直齿轮副最大应力约 3.0 MPa。两类齿轮副的最大应力均不足材料屈服强度的 2%，结构强度裕度充足；后续轻量化优化可适当减小齿轮模数，压缩履带足轴向尺寸，进一步缩小整机体积。

4.3. 整机行走机构有限元分析

组装三组履带足、变径摆臂、主体机架的完整整机模型，全局网格尺寸设为 6 mm，对铰链、摆臂连接等应力集中位置进行网格加密处理。约束三组履带底部支撑面，模拟管壁对履带的支撑状态；在履带足上表面均匀施加整机自重等效载荷，进行模拟分析，分析结果应力、应变云图如图 2 所示。



(a) 应力云图　　(b) 应变云图

Figure 2. Stress and strain contour plots from the analysis results
图 2. 分析结果应力、应变云图

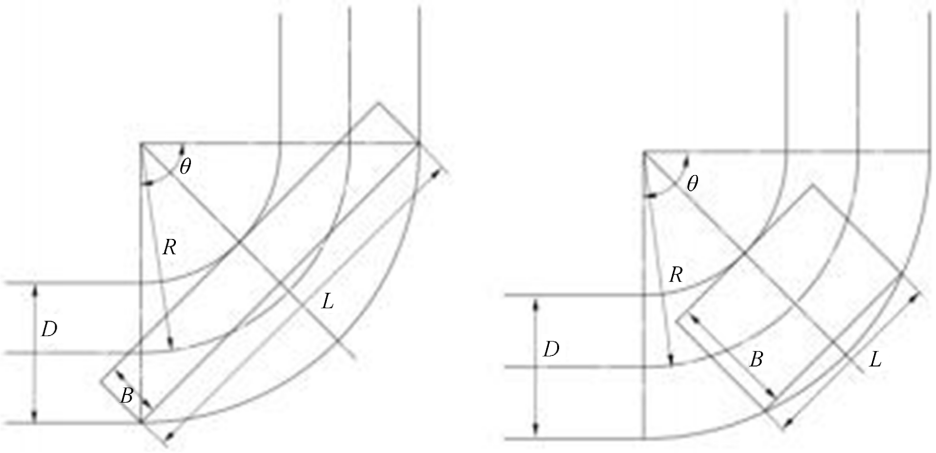
结果表明：整机最大等效应力出现在摆杆与履带足以及固定支座的铰链连接处，最大值为 10.27 MPa；整机最大变形区域为履带足的上端，变形量为 5.6 0 × 10^{-2} mm。应力与变形数值均处于安全区间，不影响机器人行走与变径稳定性。

5. 弯管通过性仿真

地下污水管网中大量存在的弯管节点是限制机器人管网通行能力的关键几何约束。本章从几何约束理论分析与运动学仿真验证两个层面，对机器人在标准管径下的弯管通过能力进行研究。

5.1. 几何约束条件

在分析时将机器人看作近似圆柱体的形状，那么在平面状态下会有着两种极限通过状态，一是长度过长直接卡死，一种是宽度太大卡死如图 3 所示。



(a) 机器人长度太长卡死　　(b) 机器人宽度太大卡死

Figure 3. Robot tube-bending constraint diagram
图 3. 机器人弯管约束图

图中：

L - 机器人总长

B - 机器人宽度

R - 弯管曲率半径

D - 管道尺寸

θ - 弯管的角度

管道机器人顺利通过弯管的几何约束条件为：

$$\begin{cases} (R+2D)\cos\dfrac{\theta}{2}-\left(R-\dfrac{D}{2}\right)<B<D \\ 0<L<2\sqrt{\left(R+\dfrac{D}{2}\right)^2-\left(R-\dfrac{D}{2}+\dfrac{B}{2}\right)^2} \end{cases}$$

式中：R 为弯管中心曲率半径；θ 为弯管角度；B 为机器人径向最大宽度。

以 DN350 标准污水管道为分析对象，管道内径 $D = 350$ mm；设计机器人机身总长 $L = 455$ mm，其径向最大宽度随变径姿态动态调整。受三组履带足 120°圆周对称布局的影响，机器人径向最大宽度可表示为：

$$B = \frac{D}{2} + \frac{D}{2}\cos 30$$

在 DN350 管道内作业时，计算得机器人最大宽度 B = 326.5 mm，为弯管通过性的最不利管径工况。将机器人总长与宽度参数代入约束方程验证，结果表明本设计机器人的长度与宽度均满足弯管的几何通过条件。

5.2. 动力学仿真

基于已构建的整机三维模型，开展弯管通过性运动学仿真分析：定义各零部件刚体属性、铰接副约束及履带与管壁的接触参数；设置仿真总时长为 38 s，机器人直行速度为 0.1 m/s，完成直管段、90˚弯管段、出弯直管段的全过程运动仿真。以丝杠质心为观测点，输出机器人 X、Y、Z 三个方向的速度与位移变化曲线，分别如图 4、图 5 所示。

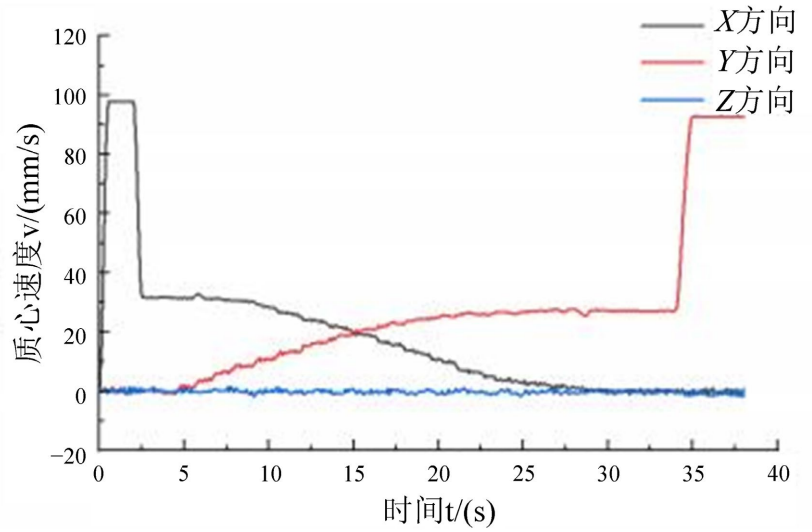


Figure 4. Velocity curves in various directions during robot cornering
图 4. 机器人过弯各方向速度曲线

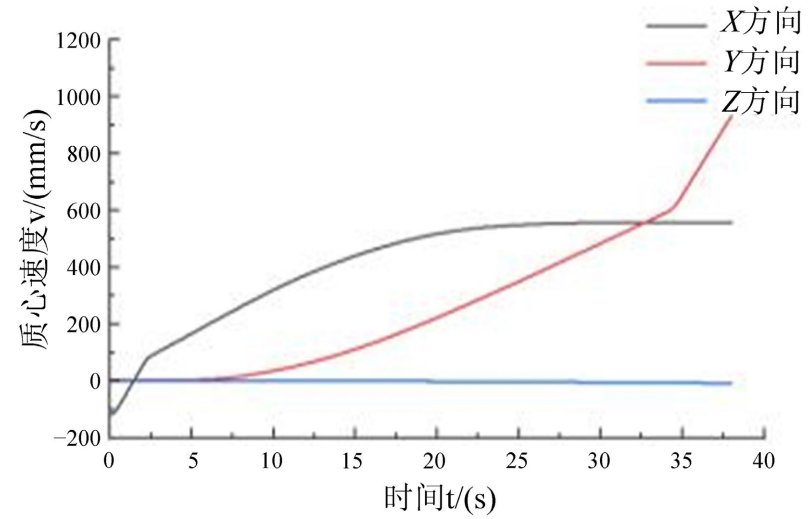


Figure 5. Displacement curves in various directions during robot cornering
图 5. 机器人过弯各方向位移曲线

仿真结果表明：机器人在直管段行驶时，X 方向速度稳定，位移随时间增加，Y 方向速度为 0；当机器人前端进入弯管段后，X 方向速度逐渐降低，位移增速放缓，Y 方向速度逐步增大；完全通过弯管后，X 方向速度趋近于 0，Y 方向速度保持稳定但略低于直管段 X 方向的稳定速度。整个运动过程中，Z 方向的速度与位移仅存在微小波动，基本保持稳定[6]，无卡滞与运动突变，验证了机器人弯管通过的稳定性。

6. 结论

针对老旧小区 DN300~DN400 污水管道人工巡检效率低、管网节点通过性不足的问题，本文设计了一种摆臂式履带管道机器人行走机构与车体结构，完成了传动系统参数设计、变径机构力学建模、关键部件静力学校核及弯管通过性仿真验证，主要结论如下：

(1) 行走传动系统采用三组履带足沿机架圆周 120˚均布、独立电机驱动的布局方案，完成了驱动电机匹配、齿轮副参数设计与主传动轴弯扭组合强度校核。主传动轴弯扭组合当量应力理论计算值(6063-T5)与有限元仿真值(6063-T6)均远低于对应材料的屈服强度，传动系统的强度与刚度满足设计要求。与传统单电机集中驱动的履带式机器人相比，三组独立驱动的布局具备故障冗余能力，单侧电机故障时仍可依靠其余履带完成原路回撤；系统的理论校核与仿真验证也弥补了现有设计依赖经验选型、结构可靠性缺乏数据支撑的不足。

(2) 摆臂式变径机构采用丝杠螺母主动调节结合交叉连杆随动支撑的复合方案，可实现 260~370 mm 管径自适应调节。建立了单组摆臂的静力学模型，推导了径向支撑载荷与丝杠轴向力的定量关系，明确最小摆角工况为丝杠受力最不利工况；完成了丝杠驱动电机的转矩校核与选型，抱闸式步进电机可同时满足变径驱动与位置锁止的需求。相较于弹簧被动张紧的传统变径结构，该主动变径方案对管径突变段与弯管节点的适配能力显著提升，解决了现有被动变径机构调节精度不足、姿态适配性差的问题。

(3) 静力学有限元分析结果表明：锥齿轮副与直齿轮副的最大啮合应力远低于对应材料的屈服强度，结构强度裕度充足；整机行走机构的最大应力出现在摆杆与履带足以及固定支座的铰链连接处，为整机结构的受力薄弱环节，各部件变形量均处于安全区间，不影响机构运行稳定性。与依赖经验选型的传统设计方法相比，通过系统的理论校核与有限元仿真验证，明确了关键部件的应力分布与薄弱环节，为结构优化与工程应用提供了量化数据支撑。

(4) 几何约束计算与动力学仿真共同验证，机器人可顺利通过 DN350 管道的 90˚弯管；弯管行驶过程中 Z 向速度与位移仅存在微小波动，三组履带 120˚对称布局的侧向支撑效果良好，行走姿态稳定。

本文研究结果可为复杂污水环境下管道机器人行走机构的工程化设计提供理论依据与数据支撑，对地下排水管网自动化运维装备的研发具有工程参考价值。

基金项目

国家级创新创业训练项目：基于数字孪生的智能化设备制造(项目编号：202413988002Z)。

参考文献

[1] 郭传斌. 基于图像处理技术的市政管道质量缺陷检测[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2024.

[2] 查益程, 陈炜峰, 刘雪飞, 等. 管道机器人研究综述[J]. 机械传动, 2025, 49(9): 175-192.

[3] 王国锐, 闫宏伟, 寇子明, 等. 一种矿用变形履带式管道机器人设计及牵引性能分析[J]. 工矿自动化, 2025, 51(6): 71-80.

[4] 刘城, 孙永站, 李军, 等. 履带式管道机器人的弯管通过性研究[J]. 机器人, 2025, 47(5): 657-667.

[5] 方天阳. 可变径履带式管道清洁检测机器人结构设计及动力学分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2025.

[6] 罗锦达. 履带式管道机器人结构设计与运动控制研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2025.