

自适应主动避障管道机器人结构设计及运动分析^①

还梦媛¹, 朱子辰², 曾宪勇³

1. 重庆机电职业技术大学 工商管理学院, 重庆 402760; 2. 重庆大学 机械与运载工程学院, 重庆 400044;
3. 重庆机电职业技术大学 机械工程学院, 重庆 402760

摘要: 对于城市中的市政排污水管道检测, 现有管道机器人存在管道适应性差、越避障能力不足的缺点. 结合市政管道检测工况分析现有管道机器人设计的不足, 设计了一款管道适应性好、越避障能力较强的轮式偏转越障可変径管道机器人. 结合检测工况要求, 所设计的机器人采用滚珠丝杠螺母副和剪叉臂相结合的变径机构, 机器人具有运动模块的偏转机构, 可实现管道内灵活转向、避障以及运动位姿变换. 基于所设计的管道机器人结构, 对机器人的运动性能进行了分析, 提出了机器人运行时的越避障运动方案, 实现在市政排污管道中灵活避障和越障.

关键词: 市政管道检测; 自适应管道机器人; 管内避障; 越障; 运动分析

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2023)06-0012-13

Structural Design and Motion Analysis of an Adaptive Obstacle-Crossing In-Pipe Robot

HUAN Mengyuan¹, ZHU Zichen², ZENG Xianyong³

1. College of Business Administration, Chongqing Vocational and Technical University of Mechatronics, Chongqing 402760, China;

2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Faculty of Mechanical Engineering, Chongqing Vocational and Technical University of Mechatronics, Chongqing 402760, China

Abstract: For urban sewage and drainage pipeline fault detection, the pipeline robots currently in use generally have poor adaptability and insufficient obstacle-crossing ability. Considering the critical inner conditions of municipal pipelines, this paper first analyzed the shortcomings of the current designs of pipeline robots. Based on the pipeline detection conditions, a flexible wheeled robot with strong pipeline adaptability and obstacle-crossing ability was designed. The robot was composed of a diameter adaptation mechanism which was a combination of a ball screw nut pair and adaptive arms. In order to achieve flexible movement posture transformation in pipeline, a rotation mechanism of the motion module with steering wheels was proposed. Based on the designed pipe robot motion mechanism, a barrier avoidance motion scheme to cross obstacles in urban sewage and drainage pipes was analyzed. The theoretical analysis and calculation of the parameters of the obstacle avoidance movement were discussed.

Key words: urban pipeline inspection; adaptive in-pipe robot; in-pipe obstacle-crossing; motion analysis

① 收稿日期: 2022-09-17

作者简介: 还梦媛, 讲师, 加拿大渥太华大学硕士, 主要从事机器人技术、市政管道非开挖修复机器人、市政管道维护技术及产业现状研究.

管道运输系统使用机器人进行检测已有数十年的历史,而在诸多的管道检测作业中,市政下水管道系统的检测工作是城市污水排水处理的重要保障. 目前我国的市政管道检测已尝试使用管道机器人下管检测,并形成了相关行业规范^[1]. 我国的市政排水管道系统大多为铺设长度数十米的水平直管,直径范围为 200 mm 到 1 m 以上^[1-2]. 管道材质可能为铸铁、混凝土、PE 管等. 管道系统一般无弯道,直管相接处设置方形窨井连接. 管道内部工况复杂,可能存在管道破裂、变形、腐蚀、起伏脱节等结构性缺陷,以及沉积、结垢、障碍物、树根等功能性缺陷^[1]. 另外,我国各地的市政下水管道系统建成时间不一,采用形制不同,管道直径规格不同. 这给下管检测工作和检测设备设计造成了困难.

尽管适应不同类型管道的机器人种类繁多,但出于市政管道本身工况,目前国内外成熟的市政污水排水管道检测机器人设计多以四轮小车或履带轮压壁式机器人为载体^[3-9],其上搭载检修设备. 四轮检测小车在管道底部行进,难以通过淤泥沉积的管道,也不能避开底部的石块和树根;对于管壁上阻碍压壁通行的障碍物,履带轮式机器人缺乏改变压壁位置,在管道中主动避障的能力. 在适用于其他类型管道检测的机器人中,存在管内位姿调整较灵活的轮履带式机器人设计^[10-17],近年来越避障性能独特的磁吸式、多足式和流体机器人设计也层出不穷^[18-20],但这些设计的机构运动原理并不能完全适应市政管道的越避障工况和驱动性能需求.

本研究基于现有管道机器人存在的不足,设计一种具有管内主动变径和避障功能的机器人结构,对机器人在管内运行情况分类分析,并提出机器人在管道行驶的越避障运动方案. 所设计机器人的运动模块能沿管周偏转,快速实现管内位姿偏转和运动模式变换,满足市政管道检测的越避障需求.

1 机器人结构原理和机构设计

1.1 主要机构设计

如图 1 所示,所设计的机器人采用双驱动轮双转向轮设计. 主体结构分为 3 个部分:中心模块和两侧的运动模块. 中心模块布置有正反牙对称滚珠丝杠、两个花键滑轨、丝杠电机和模块偏转电机及其传动机构;运动模块装备有一个转向轮和一个驱动轮,以及转向伺服电机和驱动电机;中心模块和两个运动模块间由变径机构剪叉臂连接. 管道机器人各机构主要尺寸见表 1.

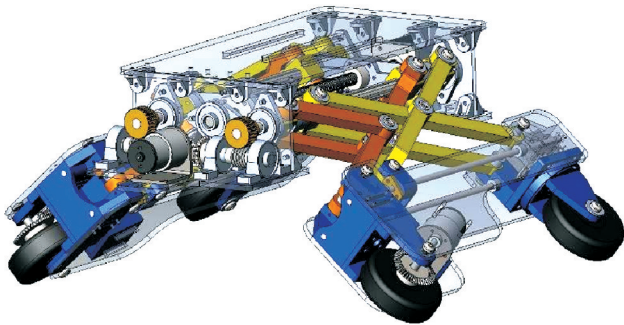


图 1 管道机器人模型

表 1 管道机器人主要机构尺寸参数表

尺寸参数	参数值/mm
平地行驶外形尺寸(长×宽×高)	477×190×[285.5, 355.5]
中心模块外形尺寸(长×宽×高)	477×190×91
丝杠长度	300
花键轴导轨长度	227
两侧花键轴间距	115
变径机构臂杆长度	230
单侧变径机构臂杆伸缩范围	[100, 170]
运动模块外形尺寸(长×宽×高)	365×85×140
车轮直径	80
单侧运动模块前后轮间距	285

所设计的机器人能够在圆形管道内一定高度处实现压壁行走,能够通过运动模块的偏转经方形联通管井进入圆形管道,结合转向轮实现沿管道周向旋转,从而实现避障功能.

1.2 变径机构

现有管道机器人常用的变径机构主要有 3 类:蜗轮蜗杆、升降机式和滚珠丝杠螺母副^[20].本研究设计双剪叉臂和滚珠丝杠螺母副以实现机器人越障及管道适应性,具备结构紧凑、力学性能好的特点.

在中心模块上布置丝杠驱动电机,在花键轴和运动模块上分别布置滑动和固定铰接座(图 2),使各变径臂铰接成剪叉结构,通过丝杠电机作用,驱动丝杠螺母和滑块直线移动,改变机器人支腿长度,从而适应不同管径.

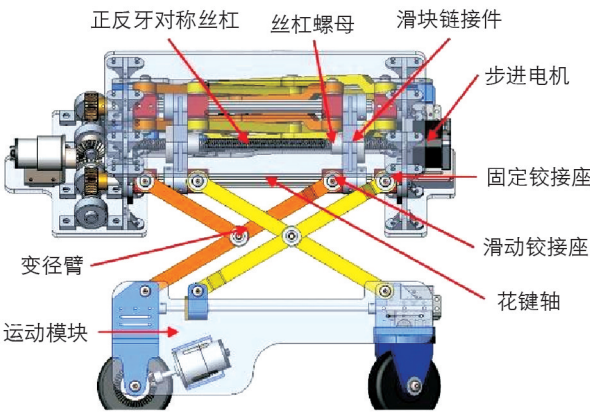


图 2 管道机器人变径机构模型

1.3 模块偏转机构

现有的运动模块偏转设计多使用连杆和齿轮传动^[4,9],而这些设计中不含主动变径机构.本研究设计的偏转机构结合剪叉式变径机构,考虑中心模块上滑块直线移动需要,使用花键轴同时提供导轨和传递力矩,再结合空间尺寸布置传动链,将变径机构和偏转机构有效地结合起来,实现机器人紧凑结构设计.

如图 3 所示,在机器人中心模块上布置直流减速电机,经锥齿轮、蜗轮蜗杆传动,向两侧的花键轴传递力矩,此时花键轴作为偏转力矩传动件使用,变径臂和运动模块随花键轴旋转,直至运动模块偏转至指定角度,运动模块偏转后不同位姿见图 4.

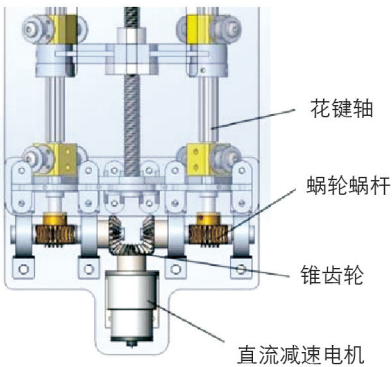


图 3 管道机器人模块偏转机构模型

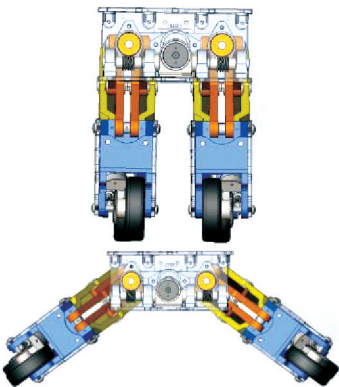


图 4 运动模块偏转后不同位姿示意

1.4 运动模块

如图 5 所示,运动模块由一个转向轮和一个驱动轮构成,舵机布置在前轮上方控制车轮转向,直流减速电机经锥齿轮传动驱动后轮.前后轮架由两根光轴固定连接,光轴同时作为变径机构滑轨滑移.当转向轮偏转一定角度,运动模块便会在机器人整体前进的同时相对于管壁作转向运动,两模块运动的组合可使机

器人完成越避障变换.

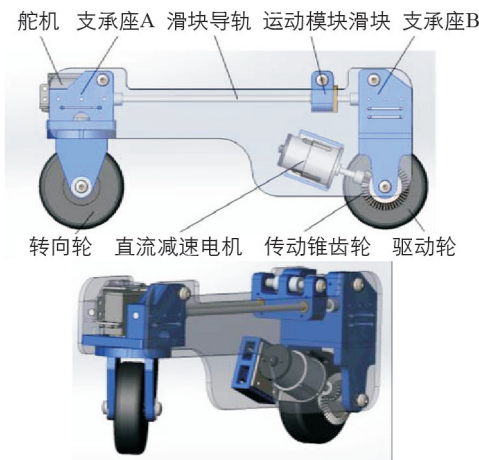


图 5 管道机器人运动模块模型

2 机器人管径适应性分析

2.1 变径机构几何参数计算

图 6 为机器人剪叉式变径机构简图. 以 B 点为原点, 设 BA 方向为 x 轴正方向, BD 方向为 y 轴正方向. 其中, A 和 A' 点为花键轴滑块铰接点, B 和 B' 点为花键轴固定铰接点, C 点为运动模块滑块铰接点, D 和 D' 点为运动模块固定铰接点, E 点为两臂铰接点; α 为 AD 臂与花键轴夹角; L_0 为单臂长度.

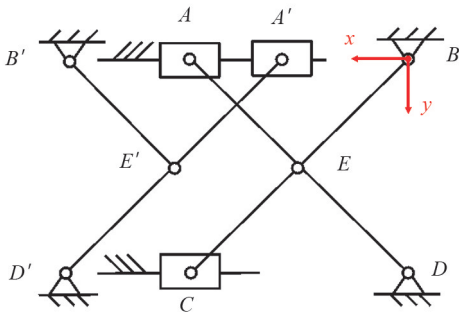


图 6 剪叉式变径机构分析

机器人机构对称, 单独研究 AD 臂, 机构几何参数关系式为:

$$\begin{cases} y_D = L_0 \sin \alpha \\ x_A = L_0 \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

其中: y_D 为单侧变径长度值, 不同夹角 α 下 x_A 的差值为滑块移动距离.

此次设计采用的具体数据为: $L_0 = 230 \text{ mm}$, 花键滑轨总长度为 227 mm . 为避免内部构件干涉, 单侧机构实际变径范围为 $L_s = [100, 170] \text{ mm}$, 变径长度与运动模块总长 L_a 范围为 $[240, 310] \text{ mm}$, 变径臂与花键轴夹角 α 范围为 $[26.25^\circ, 47.63^\circ]$.

2.2 管径适应性分析

所设计机器人可适应的管径范围为 450 mm 以上. 对于直径 612 mm 以上的管道(图 7a 为 650 mm 管道, 图 7b 为 1000 mm 管道), 机器人运动模块沿管道径向压壁, 越过底部淤泥和障碍物, 此时机器人的运动性能和稳定性较好. 变径机构长度改变, 所设定的运动模块偏转角的价值随管径增大而减小, 以扩大管径适应的最大范围.

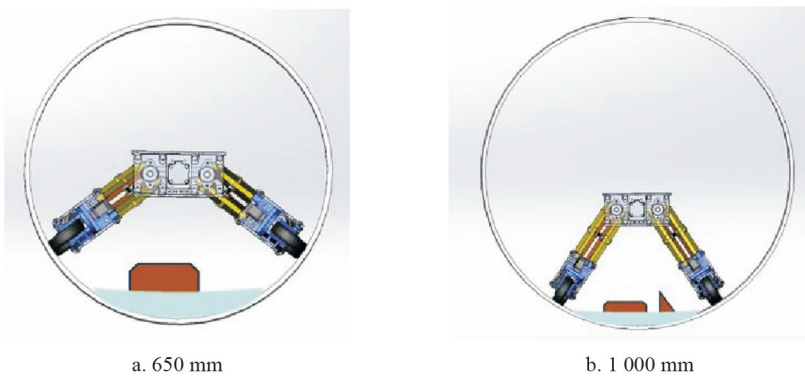


图 7 在直径 612 mm 以上的管道内机器人行进示意

对于 450~612 mm 直径管道(图 8a 为 450 mm 管道, 图 8b 为 600 mm 管道), 机器人摆臂偏转角度较小, 变径机构长度固定, 所设定的运动模块偏转角随管径减小而减小. 在这一变径范围内, 同一管径的运动模块偏转角的存在多解.

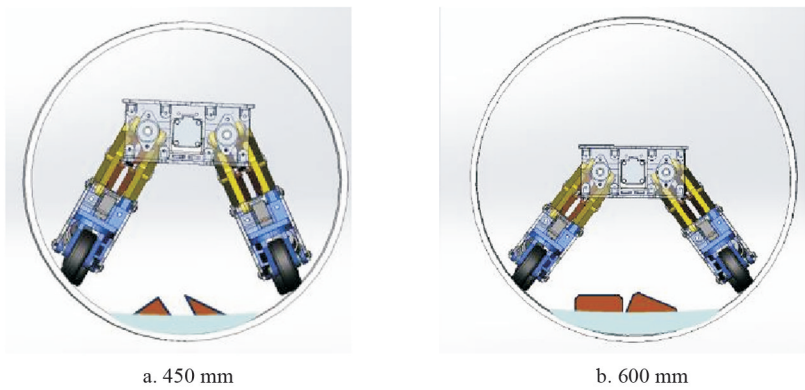


图 8 在 450~612 mm 管道内机器人行进示意

对于这两种不同的管径范围, 视运动模块垂直为默认姿态, 简化机器人在管道横截面上的结构, 可做出管径适应性几何分析图(图 9). 其中点 O 为管道中心; L_p 为两花键轴间距, 设计参数为 115 mm; L_a 为变径长度和运动模块总长度, 其最小值 $L_{a\min}$ 为 240 mm; R 为管道半径, 运动模块偏转角 φ 为运动模块所在平面与机器人对称平面夹角.

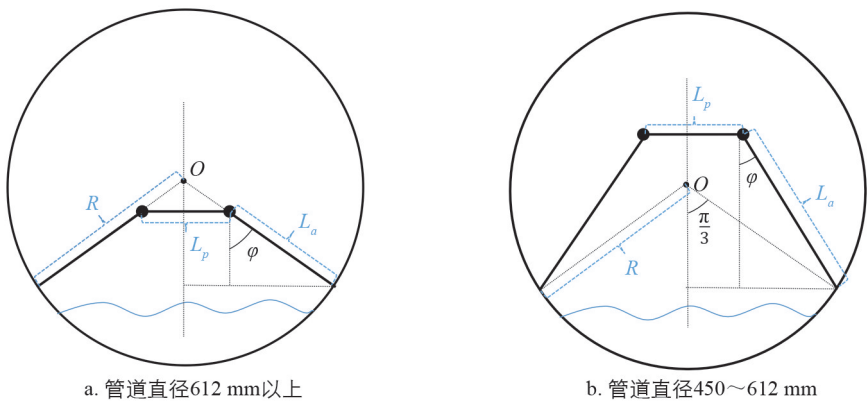


图 9 管道内机器人管径适应性分析

考虑使管径适应范围尽可能大, 同时使机器人行进稳定, 由图 9 几何分析可知, 运动模块偏转角 φ 分别满足几何数值关系:

$$\begin{cases} \varphi = \sin^{-1} \left(\frac{L_p/2}{R - L_a} \right) \\ \varphi = \sin^{-1} \left(\frac{R \sin \frac{\pi}{3} - \frac{L_p}{2}}{L_{a \min}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

由(2)式可得, 管径 450~612 mm 范围内模块偏转角 φ 范围为从 35°到 60°递增; 管径 612~850 mm 范围内模块偏转角 φ 范围为从 60°到 30°递减, 两侧运动模块夹角为偏转角的两倍, 其范围为从 120°到 60°递减。

3 管道机器人运动分析

3.1 管内压壁行驶运动简化模型

本研究所设计的管道机器人可避开管道障碍物, 以一定姿态角利用运动模块着力于管道侧面压壁行驶。在管道横截面上将机器人简化为如图 10 和图 11 所示的三杆系统, 进行运动位姿分析, 将机器人部件视为刚体, 同时忽略车轮厚度。

在机器人所能运行的管径范围内, 可根据行驶时的压壁情况分为两类。

1) 在直径 612 mm 以上的管道中, 机器人可做到车轮正对管道内壁行驶, 此时管道中心 O 在运动模块中心 P 之上(图 10)。

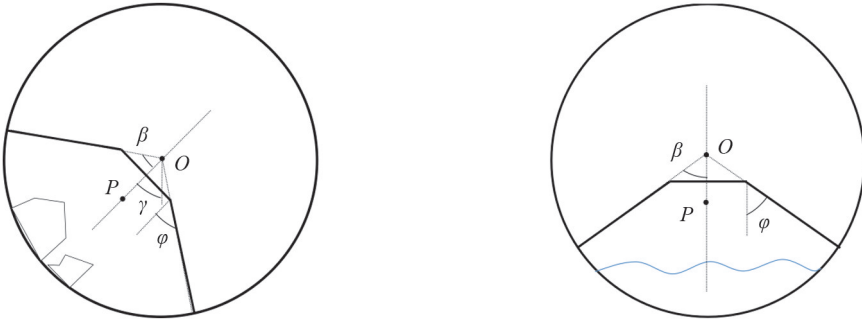


图 10 在直径 612 mm 以上的管道内机器人行驶位姿

2) 在 450~612 mm 直径管道中, 此时管道半径中心在运动模块中心之下(图 11)。

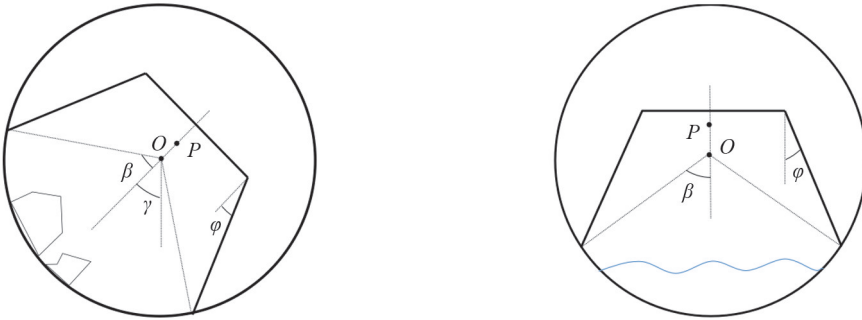


图 11 在 450~612 mm 管道内机器人行驶位姿

在图 10 和图 11 中, 以水平和竖直方向分别作为 x 和 y 轴方向, O 点为管道横截面圆心, P 点为机器人机身模块重心(考虑到机器人为对称结构, 其机身模块重心必定在机器人的对称平面上); h_p 为 O, P 两点连线距离; γ 角为 O, P 连线与竖直平面夹角, 称为姿态角; φ 角为运动模块所在平面与 O, P 连线(即机器人对称平面)夹角, 称为模块偏转角; β 为压壁点与管道横截面圆心连线夹角的 1/2, 称为张角(直径为 612~850 mm 的管道中, $\beta = \varphi$; 直径为 450~612 mm 的管道中, β 设为 60°)。

3.2 越避障运动方案

为适应市政管道检测工况, 机器人具有几种运动模式: 用于适应窖井行驶的平地行驶, 管内压壁正常行驶, 从窖井底部平地行驶转变为管内行驶的管外—管内越障变换, 通过周向旋转躲避障碍物的管内避障变换. 本研究将具体分析机器人通过转向轮和模块偏转机构进行管内主动越避障运动的运动变换方案.

将管道内表面转化为如图 12 所示的展开平面^[10], x 轴方向沿管道中轴线, y 轴方向沿展开的管道圆周线. 为简化分析, 将运动模块与管道半径视为处于同一平面上, 此时运动模块垂直于展开平面, 如此可将机器人车轮在管道内表面上的运动转化为在展开平面上的平面运动.

将单一运动模块视为具有一个驱动轮和一个转向轮的运动系统, 其在展开平面上的运动可视为平面上的转向运动(图 13). 其中, W_A 点为前轮中心, W_B 点为后轮中心, W_C 点为前后轮接触点连线中点在展开平面上的投影, O_W 点为转向运动圆心, L_f 为 $W_A W_B$ 距离, L_b 为 $W_B W_C$ 距离, V 为 W_C 点速度, δ_f 为前轮转角, δ_m 为质心速度与后轮所指方向夹角, δ_c 为后轮所指方向与 x 轴夹角, R_z 为转向运动半径. 其中 L_f 和 L_b 等几何参数为已知量, 运动参数设定值有 2 个: 转向轮转向角度 δ_f , 驱动轮转速 $V_b = V \sin \delta_m$.

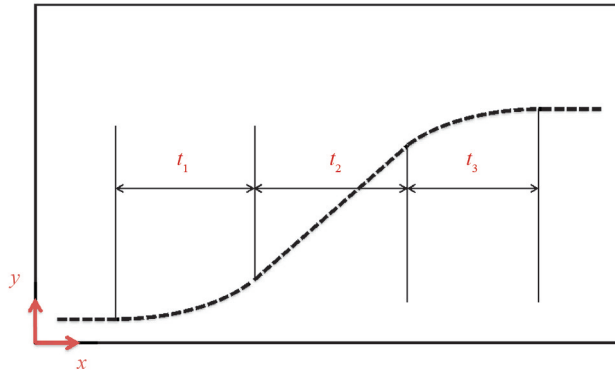


图 12 管道内表面展开平面和运动模块行进路线示意

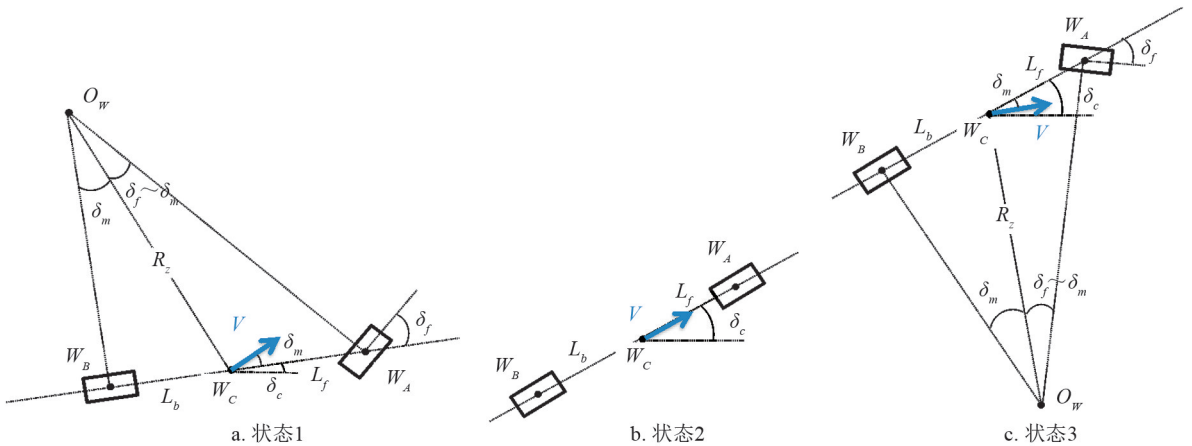


图 13 运动模块的几种运动状态分析

δ_m 可由三角函数求得:

$$\delta_m = \tan^{-1} \left(\frac{L_b \tan \delta_f}{L_f + L_b} \right) \quad (3)$$

转向运动半径 R_z 可由三角函数求得:

$$R_z = \frac{\sin \delta_m}{L_b} \quad (4)$$

则系统转向角速度, 即后轮所指方向与 x 轴夹角 δ_c 变化率 ω_{δ_c} 可表示为

$$\omega_{\delta_c} = \frac{V}{R_z} = \frac{V \sin \delta_m}{L_b} \quad (5)$$

运动模块沿 x 轴方向速度 V_x 、沿 y 轴方向速度 V_y 为:

$$\begin{cases} V_x = V \cos(\delta_c + \delta_m) \\ V_y = V \sin(\delta_c + \delta_m) \\ \omega_{\delta_c} = V/R_z = V \sin \delta_m / L_b \end{cases} \quad (6)$$

机器人越避障运动参数设计需要考虑车轮与管壁的摩擦力和机器人位姿倾斜重心, 以避免机器人避障时产生滑移或倾覆. 因此在进行运动时使用如下策略: 首先, 使转向轮向上偏转一定角度 δ_f , 经过时间 t_1 使运动模块转向角度达到一个较小角度 δ_{c1} ; 之后, 使 δ_f 变为 0, 使机器人向斜上方前进时间 t_2 ; 最终使转向轮向下偏转一定角度 δ_f , 相对于运动模块平面进行第 1 段运动的镜像运动, 使机器人位姿调平, 完成运动变换, 车轮接触点路径如图 12 虚线所示.

忽略可能存在的滑移, 可得第 1 段和第 3 段运动时间为:

$$t_1 = \frac{\delta_{c1}}{\omega_{\delta_c}} \quad (7)$$

代入前文公式, 可得到总运动距离 L_V 和 L_H .

$$\begin{cases} L_V = 2 \int_0^{t_1} V_Y dt + V t_2 \sin \delta_{c1} \\ L_H = 2 \int_0^{t_1} V_X dt + V t_2 \cos \delta_{c1} \end{cases} \quad (8)$$

在 y 轴方向总运动距离 L_V 已知的情况下, 可解得第 2 段运动时间为:

$$t_2 = \frac{L_V - 2 \int_0^{t_1} V_Y dt}{V \sin \delta_{c1}} \quad (9)$$

由(8)式求解机器人在进行越障变换时水平方向总运动距离 L_H . 对于机器人在管道中所进行的不同运动变换, 其 y 轴方向总路程是不同的.

3.2.1 管外—管内越障变换

机器人在进入管道前, 以小车方式在窖井底部平地中前进, 在进入圆形管道后, 依靠转向轮结构变换运动模式. 管道机器人在前进的同时, 两侧运动模块张开一定角度, 变换为压侧壁行进, 实现对管道底部杂质的越障(图 14).

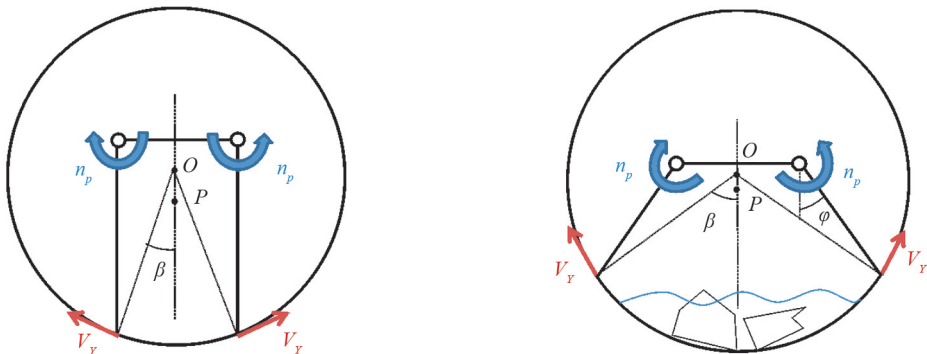


图 14 越障变换运动位姿

图 15 为机器人以本节所述方案在管道中进行越障变换示意图, 可注意到机器人的位姿变化与转向轮角度变化. 图 16 为按所述机器人结构所搭建的实物样机在 500 mm PE 圆筒管道内进行越障变换的位姿演

示,运动过程中车轮偏向异侧.该样机可作为位姿演示和机器人运动机构的验证,具体运动数据有待进一步测试研究.

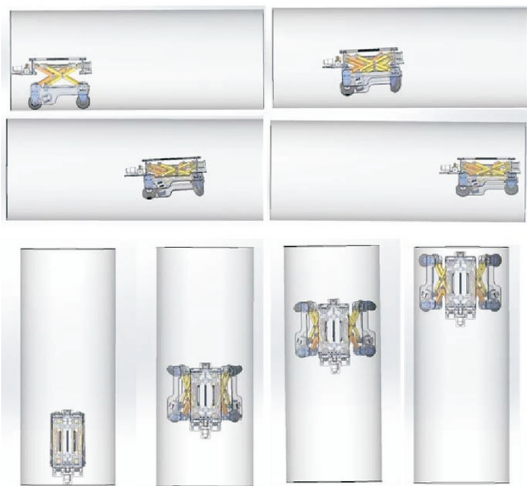


图 15 管道机器人越障变换示意

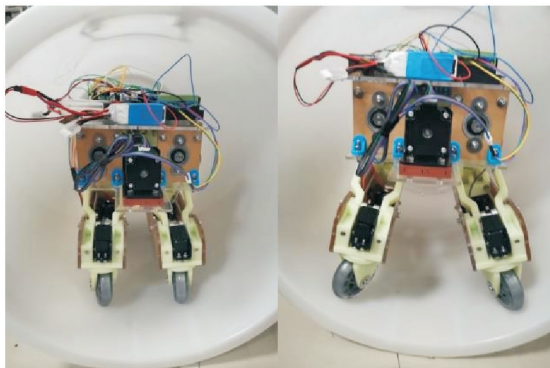


图 16 机器人样机 500 mm 管道内越障变换位姿

在越障运动中,机器人机身模块重心与管道半径重心不在同一平面上,这会使转向轮实际转角 δ'_f 与公式中的转角 δ_f 存在一定差值,该差值与管道半径和沿管周行进路程有关,并且受车轮与管道接触情况影响.在转角 δ_f 设定值较小的情况下,忽略这一差值影响,认为 δ'_f 与 δ_f 相等.

进行越障变换时, y 轴方向总路程已知,在 450~612 mm 直径管道中为:

$$L_v = D \left(\frac{\pi - 3\beta_0}{6} \right) \quad (10)$$

在 612~850 mm 直径管道中为:

$$L_v = D \left(\frac{\varphi - \beta_0}{2} \right) \quad (11)$$

其中, β_0 为各管径下张角 β 的初始值,设为:

$$\beta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{L_p}{D} \right) \quad (12)$$

3.2.2 管内避障变换

机器人在管道中正常运行时,姿态角 γ 为 0 向前运行,当管壁出现障碍物或破损、孔洞等管道缺陷,依靠两转向轮向同一方向偏转,实现机器人姿态角的偏转,以周向旋转的方式改变前进路线,避开障碍物(图 17).

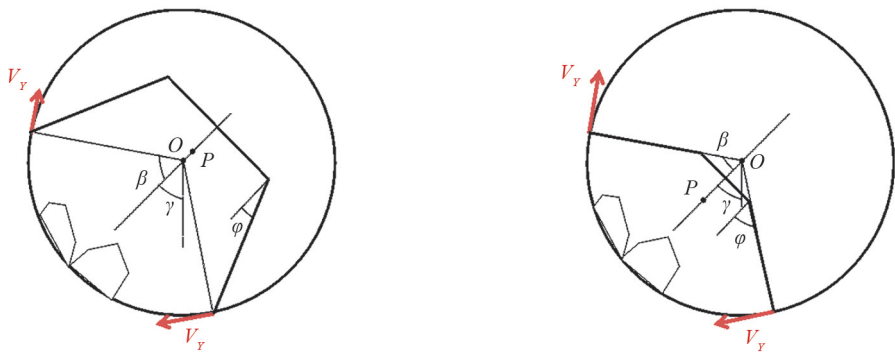


图 17 避障变换运动位姿

避障变换运动过程只需要转向轮角度变化, 不需要运动模块绕花键轴作相对偏转. 运动分析与越障变换相似, 公式通用. 区别在于, 进行避障变换时, 机器人沿管道周向总路程与所设定的姿态偏转角 γ 有关, 用

$$L_v = \pi D \frac{\gamma}{2\pi} = \frac{D\gamma}{2} \tag{13}$$

代替(10)和(11)式.

图 18 为机器人在管道中避障后以一定偏转位姿前进示意图. 图 19 为实物样机在 500 mm PE 圆筒管道内进行避障变换的位姿演示, 运动过程中车轮偏向同侧.



图 18 管道机器人避障运动示意

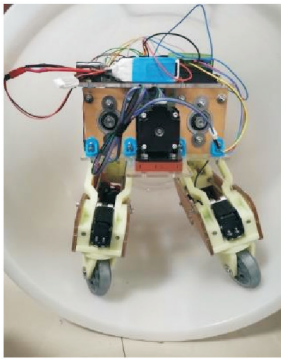


图 19 机器人样机 500 mm 管道内避障变换初始位姿

3.3 越避障运动参数计算分析

3.3.1 越避障运动参数随管径变化曲线

给定机器人越避障尺寸和运动参数见表 2, 利用前述理论公式计算, 在 MATLAB 中分别绘制越障运动和避障运动总运动时间、水平方向总运动距离随管径变化曲线(图 20—图 21).

表 2 越避障运动参数设定值表

参数名称	参数值
管道直径 D/mm	450~850
前轮到中点距离 L_f/mm	170
后轮到中点距离 L_b/mm	170
变径长度和运动模块总长度 L_a/mm	240~310
两侧花键轴间距/mm	115
驱动轮转速 $V_B/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	754
转向轮转角 $\delta_f/^\circ$	10
车轮转向角度 $\delta_{c1}/^\circ$	10
避障运动姿态偏转角/ $^\circ$	30

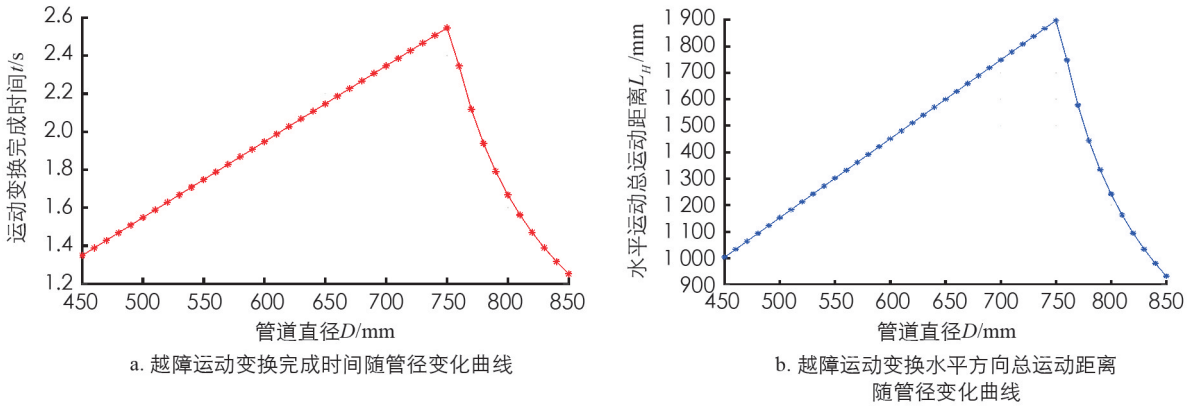


图 20 越障运动完成时间和水平方向总运动距离随管径变化曲线

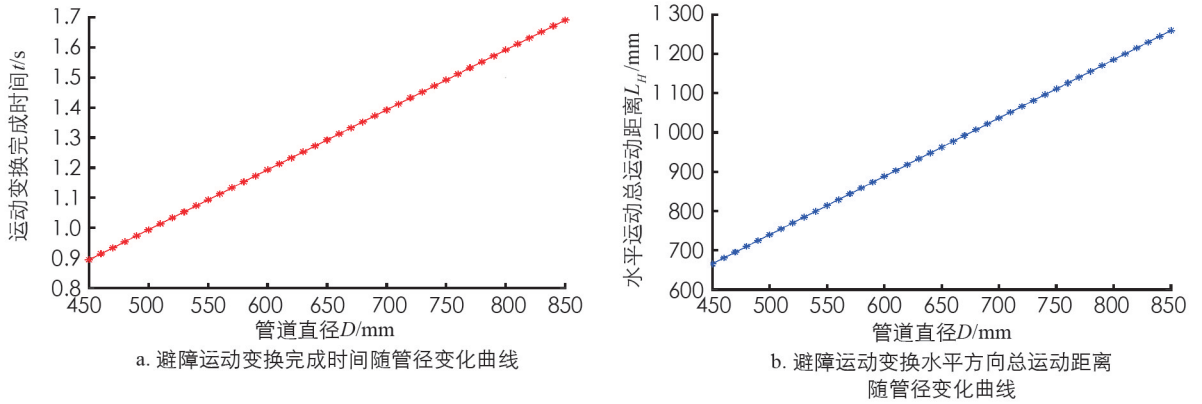


图 21 避障运动完成时间和水平方向总运动距离随管径变化曲线

由于对于不同管径采用同一转向轮转角,影响运动时间和水平运动距离的主要是前文运动方案的第 2 阶段.其中,管径小于 750 mm 的越障运动完成时间和水平运动距离随管径递增,管径大于 750 mm 的越障运动受周向行进路程下降影响,运动完成时间和水平运动距离随管径递减;避障运动完成时间和水平运动距离随管径递增.

在给定尺寸和运动参数值的条件下,机器人在 450~850 mm 管道中进行越障运动时间理论值在 1.2~2.6 s 之间,水平运动总距离理论值在 0.9~1.9 m 之间;机器人在管道中进行避障运动时间理论值在 0.9~1.7 s 之间,水平运动总距离理论值在 0.65~1.3 m 之间.理论值基本符合预期,在实际应用中,可根据障碍物和管壁情况,适当调整转向轮转角,以改变运行时间和水平运动距离,或调整驱动轮速度改变运行时间.

3.3.2 越障运动模块偏转电机转速曲线

在越障运动中,运动模块偏转角 φ 会随机器人位姿发生变化,驱动模块偏转机构的电机转速需要适配偏转角转速变化,以避免驱动轮电机和模块偏转电机提供的驱动力冲突,故需计算分析模块偏转电机转速随时间变化曲线.

运动模块偏转速度,即花键轴转速可对模块偏转角 φ 求导得到.机器人车轮沿半径 R 管道周向行驶 L'_v 距离时,模块偏转角 φ 为:

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{L_p}{2R} \right) + \frac{L'_v}{2R} \right) - \frac{L_p}{2R} \right) \quad (14)$$

花键轴转速 n_p 为:

$$n_p = \frac{\dot{\varphi}}{2\pi} \tag{15}$$

模块偏转电机转速 n_{mp} 为:

$$n_{mp} = \frac{n_p}{i_b i_w} = \frac{z_{b1} z_{w1}}{z_{b2} z_{w2}} n_p \tag{16}$$

其中: i_b 为锥齿轮传动比, z_{b1} 为主动轮齿数, z_{b2} 为从动轮齿数, i_w 为蜗轮蜗杆传动比, z_{w1} 为蜗杆头数, z_{w2} 为蜗轮齿数. 本设计中, 取 $i_b=1$, $i_w=1/25$.

利用前文公式计算, 绘制越障运动模块偏转电机转速随时间变化曲线(图 22), 管道直径 D 设为 750 mm, 其余设定参数值同表 2. 曲线图中出现的速度突变由转向轮转角突变造成, 在实际的模块偏转运动中, 可设置转向轮转角连续改变, 以减轻转速突变给电机造成的负担. 同时, 可通过调整驱动轮速度改变运行时间, 以适配模块偏转电机转速调节范围和反应速度.

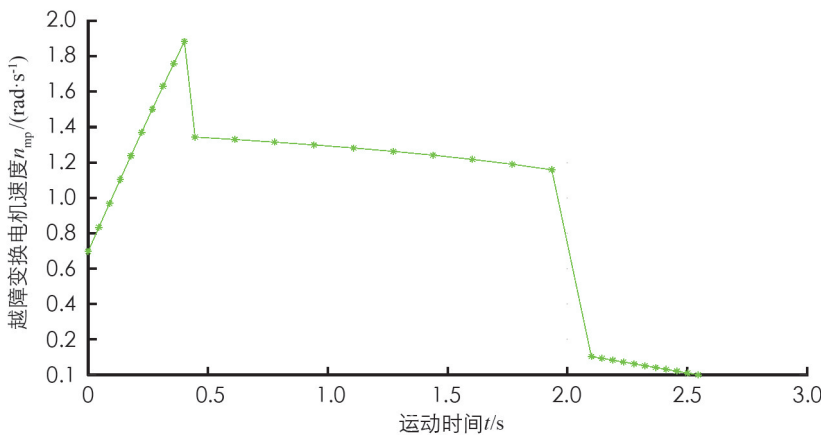


图 22 越障运动模块偏转电机转速随时间变化曲线

4 结论

为适应我国城市污水管道检测需求, 本研究设计了一种具有管内主动变径和避障功能的轮式管道机器人, 分析了机器人运动模块的详细设计方案, 阐明了变径机构和模块偏转机构运动机理和传动布置. 针对越障避障的运动适应功能要求, 本研究提出了一种基于模块偏转机构和运动模块转向轮的越避障运动控制方案, 建立了相关运动参数的计算模型, 并计算求解了越障避障运动总运动时间、水平方向总运动距离随管径变化曲线, 以及越障运动模块偏转电机转速随时间变化曲线. 分析结果表明, 所设计的机器人单侧剪叉机构变长度范围为 100~170 mm, 所设计的机器人可在 450 mm 以上管道中进行灵活越障及避障, 能够较好地满足市政管道爬管越障需求. 近年来, 管道检测的智能方法^[22]和有关管道机器人驱动元件的研究^[23]也层出不穷, 通过结合这些方法, 管道机器人必将在未来管道检测中持续大放异彩.

参考文献:

[1] 蒋瑞, 储征伟. 城市排水管道健康状况检测与评估内外业流程一体化方案设计与应用 [J]. 测绘通报, 2016(12): 90-95.

[2] 郭世强, 李令福. 民国西安下水道建构与城市排水转型研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 100-106.

[3] AB RASHID M Z, MOHD YAKUB M F, AHMAD ZAKI BIN SHAIKH SALIM S, et al. Modeling of the In-Pipe Inspection Robot: A Comprehensive Review [J]. Ocean Engineering, 2020, 203: 107206.

[4] Eddyfi Technologies. Platforms—Multi-mission modular robotic technology for remote industrial applications [EB/OL]. [2022-7-22]. <https://robotics.eddyfi.com/en/products>.

[5] KIM H M, SUH J S, CHOI Y S, et al. An In-Pipe Robot with Multi-Axial Differential Gear Mechanism [C]//2013

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. November 3-7, 2013, Tokyo, Japan. IEEE, 2014: 252-257.
- [6] 深圳市施罗德工业测控设备有限公司. S300E 管道检测机器人 [EB/OL]. 2022-07-02]. https://www.srodcn.com/ProductsStd_227.html.
- [7] 唐德威, 梁涛, 姜生元, 等. 机械自适应管道机器人的机构原理与仿真分析 [J]. 机器人, 2008, 30(1): 29-33.
- [8] NASSIRAEI A A F, KAWAMURA Y, AHRARY A, et al. Concept and Design of a Fully Autonomous Sewer Pipe Inspection Mobile Robot “KANTARO” [C]//Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. April 10-14, 2007, Rome, Italy. IEEE, 2007: 136-143.
- [9] CISZEWSKI M, BURATOWSKI T, GIERGIEL M. Modeling, Simulation and Control of a Pipe Inspection Mobile Robot with an Active Adaptation System [J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(22): 132-137.
- [10] OYA T, OKADA T. Development of a Steerable, Wheel-Type, In-Pipe Robot and Its Path Planning [J]. Advanced Robotics, 2005, 19(6): 635-650.
- [11] KWON Y S, LEE B E, WHANG I C, et al. A Flat Pipeline Inspection Robot with Two Wheel Chains [C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. May 9-13, 2011, Shanghai, China. IEEE, 2011: 5141-5146.
- [12] YE C L, LIU L, XU X J, et al. Development of an In-Pipe Robot with Two Steerable Driving Wheels [C]//2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). August 2-5, 2015, Beijing, China. IEEE, 2015: 1955-1959.
- [13] 陈还, 翟华, 陈梁玉, 等. 驱动轮转向可控管道机器人的设计与运动分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(6): 744-747, 811.
- [14] 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.
- [15] 郭忠峰, 辛鹏. 主动避障式管道机器人结构设计及动力学仿真 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23): 9349-9353.
- [16] 单彦霞, 付冰双, 李若松, 等. 基于并联机构的双重驱动管道机器人设计与研究 [J]. 机械设计, 2020, 37(6): 17-23.
- [17] 楼飞, 关静, 沈巍, 等. 多节式螺旋双驱动可变径管道机器人设计及其运动分析 [J]. 现代制造工程, 2021(8): 33-39.
- [18] DOYLE M J, XU X Y, GU Y, et al. Modular Hydraulic Propulsion: A Robot that Moves by Routing Fluid Through Itself [C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). May 16-21, 2016, Stockholm. IEEE, 2016: 5189-5196.
- [19] 尹海斌, 张罕, 曹建国. 磁力密度曲线的爬壁机器人统一优化设计 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(5): 99-108.
- [20] 吴国洋. 非结构化环境下四足机器人避障性能研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(5): 141-149.
- [21] 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, 12(1): 60-65.
- [22] 杜文飞, 李春光, 万四海. 管道漏磁检测的智能方法综述 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2022, 47(6): 1-7.
- [23] 张玉. 矿用管道机器人永磁同步电机的可拓优度模型 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(8): 107-115.

责任编辑 潘春燕