

doi: 10.7690/bgzdh.2019.09.018

变电站巡检机器人结构设计与分析

董龙飞, 陶卫军

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对机器代替人在变电站巡检的发展需求, 设计一款带云台升降功能的巡检机器人, 代替人工对变电站进行日常巡检。介绍机械结构设计、控制系统搭建, 建立机器人运动学和动力学模型, 运用 Matlab 进行稳定性仿真分析, 将实验得到的各行走电机驱动力矩与仿真得到的各行走电机驱动力矩进行对比。结果表明: 该设计模型正确、样机稳定, 可为巡检机器人在执行巡检任务过程中在不同行驶坡度下控制升降杆高度和行驶加速度提供理论依据。

关键词: 巡检机器人; 运动学; 动力学; 稳定性

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Structural Design and Analysis of Substation Inspection Robot

Dong Longfei, Tao Weijun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aimed at the development requirement of robot replacing human beings for substation routine inspection, a robot which has a pan-and-tilt with the function of ascending and descending is designed to conduct routine inspections of substation instead of manual operation. In this paper, an introduction to mechanical structure design, establishment of control system, and models of kinematics and dynamics models is given, then simulation analysis is carried out on its stability using Matlab. At last, the actual torque of each driving motors acquired through experiments and the simulating ones acquired via simulation are compared, which shows the correctness of the designed model and the stability of the prototype, thus the feasibility of providing theory foundation for the control of driving acceleration and lifting lever height when the robot is moving at inclined road with different slope degree during its inspection tasks.

Keywords: inspection robot; kinematics; dynamics; stability

0 引言

变电站巡检机器人的目的是代替人工对变电站内仪器仪表、绝缘子温度等进行日常巡检^[1-3]。目前, 巡检机器人大多不配备升降杆, 云台不具有升降功能, 而且大多数仪器仪表装在成人站立方便检测的位置, 由于机器人整体高度较低, 云台中的可见光摄像机所拍照片会变形, 从而减弱了视觉识别的可靠性^[4-6]。带云台升降的巡检机器人设计是目前的发展方向, 对有云台升降功能的巡检机器人进行运动学、动力学与稳定性分析非常有必要。

1 巡检机器人结构与控制系统设计

1.1 巡检机器人结构设计

巡检机器人的运动功能由底盘上的 4 个行走伺服电机和 4 个转向伺服电机驱动, 可以实现机器人任意方向运动。底盘上搭载有电池、升降杆、云台、工控机、行走电机驱动器、转向电机驱动器、测距传感器、激光传感器和外壳等, 设计装配时保证机器人整体重心尽可能地靠近几何中心位置, 巡检机

器人结构如图 1 所示。

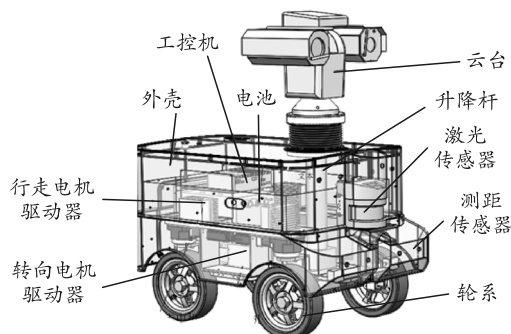


图 1 巡检机器人结构

如图 2 所示, 底盘下方对称分布 4 组轮系。每组轮系由行走伺服电机、减速器、保持架、铜套、导向柱、压缩弹簧、法兰、车轮、L 形转接架、转台和转向伺服电机等组成。压缩弹簧对称分布于保持架两侧使车轮受力均匀, 转向伺服电机输出轴绕 X 轴方向旋转, 经过转台减速实现车轮整体绕 Z 轴方向旋转。4 组轮系模块化安装在机器人底盘机架上, 可以较好地吸收地面不平造成的车体振动, 构成独立减震。

收稿日期: 2019-04-30; 修回日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275244)

作者简介: 董龙飞(1991—), 男, 安徽人, 硕士, 从事智能机械与机器人应用技术研究。E-mail: 1430953806@qq.com。

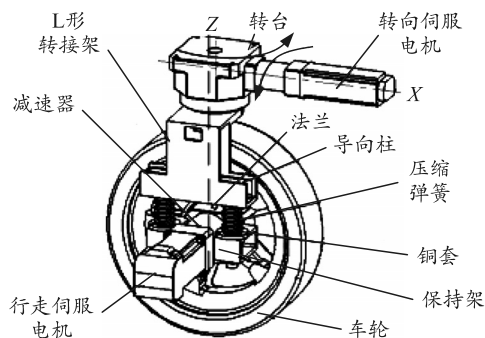


图 2 轮系结构

1.2 巡检机器人控制系统设计

控制系统主要用来对机器人底盘、升降杆和云台进行运动控制实现变电站的巡检。如图 3 所示，控制系统采用 UNO-2483G 工控机、后台 PC 端作为上位机，下位机由 STM32-407 作为主控芯片通过网口接收上位机指令一方面下发至行走、转向伺服电机驱动器，控制机器人底盘运动；另一方面下发至升降杆控制运动。通过测距传感器、激光传感器对外界信息进行检测，实现避障与导航。通过云台内置可见光摄像机和红外热像仪对变电站仪器仪表、绝缘子温度等进行检测。

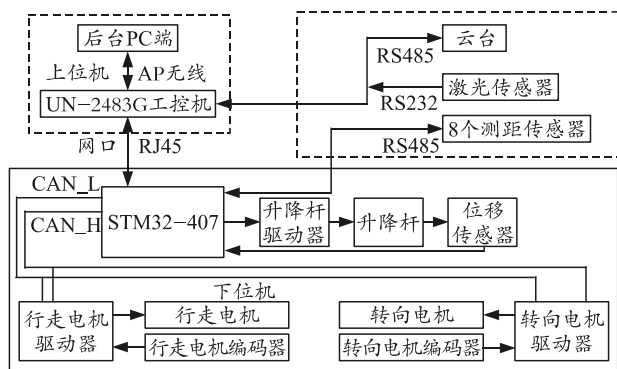


图 3 控制系统构成

2 运动学模型

巡检机器人的控制需要协调好各车轮的转向角防止运动卡死，因此需要建立运动学模型，为运动控制提供理论依据。在建立运动学模型前，先作以下假设：1) 忽略地面的不平度；2) 忽略轮胎形变；3) 车轮和地面之间满足纯滚动条件。

如图 4 所示，带转弯半径运动学模型是巡检机器人运动学模型的一般情况。前方 2 个车轮均向右转动，后方 2 个车轮均向左转动。其中： L 为前后两侧车轮的轮距； W 为左右两侧车轮的轮距； R 为机器人转弯半径， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别为 4 个车轮绕瞬时转动中心 O_R 的转动半径； α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为 4 个车轮的转向角； v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 分别为 4

个车轮的切向速度； v 、 ω 分别为机器人的速度和转向角速度。

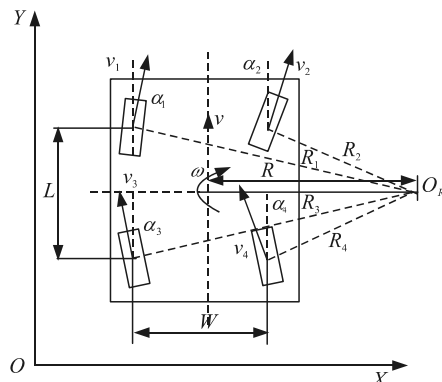


图 4 带转弯半径运动学

4 个车轮转向时各转角满足：

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 = \alpha_3 = \arctan(L / (2R + W)) \\ \alpha_2 = \alpha_4 = \arctan(L / (2R - W)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

机器人转弯半径：

$$R = v / \omega \quad (2)$$

4 个车轮转动半径：

$$\left. \begin{aligned} R_1 = R_3 = (2R + W) / (2 \cos \alpha_1) \\ R_2 = R_4 = (2R - W) / (2 \cos \alpha_2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

4 个车轮切向速度：

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} (2R + W) / (2 \cos \alpha_1) \\ (2R - W) / (2 \cos \alpha_2) \\ (2R + W) / (2 \cos \alpha_1) \\ (2R - W) / (2 \cos \alpha_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)为带转弯半径运动学模型。

以下为带转弯半径运动学模型的特殊情况：

1) 原地自转。

当每个车轮的转动角度均为

$$\alpha = \arctan(L / W) \quad (5)$$

此时前侧左轮和后侧右轮沿顺时针方向转动 α ，前侧右轮和后侧左轮沿逆时针方向转动 α ，所有车轮转速相同。

2) 任意方向斜行。

所有车轮沿同一方向转动相同的角度且转速保持相同。

3 动力学与稳定性分析

不考虑机器人横向重心偏离，只考虑重心在纵向的偏离，可以将模型看成前后两轮进行分析。

3.1 动力学分析

不考虑风阻，对巡检机器人进行受力分析如图

5 所示, 设前车轮与接触面接触点为 B , 接触面与水平面夹角为 θ ; 后车轮与接触面接触点为 A , 接触面与水平面夹角为 γ , 机器人前进方向与水平面夹角为 β 。

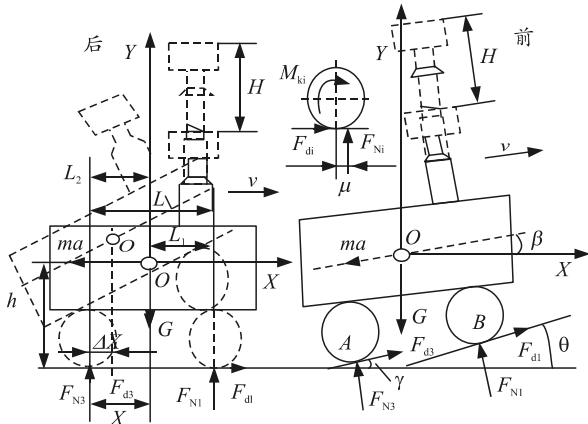


图 5 巡检机器人受力分析

由达朗贝尔原理:

$$\left. \begin{aligned} F_{d1} \cos \theta + F_{d3} \cos \gamma - F_{N1} \sin \theta - F_{N3} \sin \gamma &= ma_x \\ F_{d1} \sin \theta + F_{d3} \sin \gamma + F_{N1} \cos \theta + F_{N3} \cos \gamma - G &= ma_y \\ F_{d1} L \sin(\theta - \beta) + F_{N1} L \cos(\theta - \beta) + Gh \sin \beta - GL_2 \cos \beta + mah &= J_A \ddot{\beta} \\ F_{d3} L \sin(\beta - \gamma) + F_{N3} L \cos(\beta - \gamma) + Gh \sin \beta + GL_1 \cos \beta + mah &= J_B \ddot{\beta} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对单个驱动轮 i 分析:

$$\left. \begin{aligned} M_{ki} - M_{fi} - F_{di} R &= J_m \phi \\ M_{fi} &= F_{Ni} \mu \\ M_{ki} &= M_i i^m \eta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

前后轮地面附着率相等时前后轮转矩分配最合理^[7], 所以:

$$\frac{F_{d1}}{F_{N1}} = \frac{F_{d3}}{F_{N3}} \quad (8)$$

式(6)–(8)中: m 为机器人质量; G 为机器人重力; g 为重力加速度; a_x 为机器人沿 X 轴方向的加速度; a_y 为机器人沿 Y 轴方向的加速度; F_{di} 为地面对各轮胎的静摩擦力; F_{Ni} 为地面对轮胎的支反力; L 为前后轮轴线距离; L_1 为质心 O 到前轮轴线水平距离; L_2 为质心 O 到后轮轴线水平距离; h 为质心 O 到前后轮胎接触点 A 、 B 连线垂直距离; J_A 为机器人整体绕 A 点的转动惯量; J_B 为机器人整体绕 B 点的转动惯量; μ 为滚动摩擦系数; J_m 为轮子

绕中心转轴的转动惯量; a 为机器人加速度; ϕ 为车轮的角加速度; M_{ki} 为各行走电机经减速器后对车轮的驱动力矩; M_{fi} 为各行走电机驱动力矩; M_{fi} 为地面对各车轮的滚动摩擦力矩; i^m 为行走电机减速器减速比; R 为车轮半径; η 为行走电机经减速器输出效率; $i=(1,3)$ 。

特别地, 将巡检机器人运动过程分为 3 个阶段: (a) $\gamma = \beta = \theta = 0$ 水平地面平动过程; (b) $\gamma = 0$ 、 $\beta \neq 0$ 、 $\theta \neq 0$ 搭坡平面运动过程; (c) $\gamma = \beta = \theta \neq 0$ 爬坡平动过程。

3.2 稳定性分析

升降杆上升底端第 1 节不动, 第 2 节与第 3 节带动云台上升。设升降杆上升高度为 H , 则第 2 节上升高度为 $H/2$, 第 3 节上升高度为 H 。升降杆上升前建立坐标系 (X, Y, Z) , 设第 1 节和其他零部件质量为 m_1 , 其质心位置 (x_1, y_1, z_1) ; 第 2 节质量为 m_2 , 其质心位置 (x_2, y_2, z_2) ; 第 3 节质量为 m_3 , 其质心位置 (x_3, y_3, z_3) ; 云台质量为 m_4 , 其质心位置 (x_4, y_4, z_4) 。升降杆上升过程只有升降杆第 2 节、第 3 节和云台的质心位置在 Z 轴有变化, 在 X 、 Y 轴没有变化, 其他零部件质心不变。

设升降杆上升前后质心位置为 (x_c, y_c, z_c) , (x'_c, y'_c, z'_c) , 得:

$$\left. \begin{aligned} x'_c &= x_c = \left(\sum_{i=1}^4 m_i x_i \right) / \left(\sum_{i=1}^4 m_i \right) \\ y'_c &= y_c = \left(\sum_{i=1}^4 m_i y_i \right) / \left(\sum_{i=1}^4 m_i \right) \\ h_0 &= z_c = \left(\sum_{i=1}^4 m_i z_i \right) / \left(\sum_{i=1}^4 m_i \right) \\ h &= z'_c = \left(\sum_{i=1}^4 m_i z'_i \right) / \left(\sum_{i=1}^4 m_i \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 h_0 为升降杆原长时质心 O 到前后轮胎接触点 A 、 B 连线垂直距离。

$$\left. \begin{aligned} z'_1 &= z_1 \\ z'_2 &= z_2 + H/2 \\ z'_3 &= z_3 + H \\ z'_4 &= z_4 + H \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3.2.1 静态稳定性分析

只考虑重心变化对稳定性的影响, 针对(a)、(b)、(c) 3 个阶段运动过程, 结合图 5 通过重心投影法^[8-10]定义稳定度:

$$\text{Sta} = \Delta X / X \quad (11)$$

由几何关系可得:

$$\left. \begin{aligned} \text{Sta} &= \Delta X / X = L'_{OA} \cos(\beta + \phi_2) / L_2 \\ \phi_2 &= \arctan(h / L_2) \\ L'_{OA} &= \sqrt{(L_2^2 + h^2)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(11)、(12)中： ΔX 为机器人运动过程中质心 O 与后轮接触点 A 的水平距离； X 为水平地面静止状态机器人质心 O 与后轮接触点 A 的水平距离； L'_{OA} 为质心 O 与 A 点连线距离； ϕ_2 为 L'_{OA} 与 AB 之间夹角。 $\text{Sta} \in [0, 1]$ ，因此，可以用 Sta 的大小定量表明机器人稳定性好坏。

3.2.2 动态稳定性分析

因为 $L_2 < L_1$ 机器人整体质心偏后，考虑机器人运动过程中的惯性力，针对(a)、(b)、(c) 3种运动过程，得纵向不倾覆条件为：

$$mah \leq GL_2 \cos \beta - Gh \sin \beta \quad (13)$$

解得

$$a \leq g(L_2 \cos \beta / h - \sin \beta) \quad (14)$$

4 Matlab 仿真与实验

从验证巡检机器人爬坡过程的动力学与稳定性角度出发，针对所设计的变电站巡检机器人进行 Matlab 仿真与实验。巡检机器人具体结构参数如下：

$m=100 \text{ kg}$, $R=100 \text{ mm}$, $L_1=285 \text{ mm}$, $L_2=265 \text{ mm}$, $L=550 \text{ mm}$, 升降杆上升高度 $H \in [0, 500] \text{ mm}$, $h_0=503 \text{ mm}$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$, $\theta=15^\circ$, $\beta \in [0^\circ, \theta]$, 橡胶轮胎与水泥沥青路面的滚动摩擦因数 $\mu=2 \text{ mm}$, $i^m=20$, $\eta=0.95$, $m_1=79 \text{ kg}$, $m_2=2 \text{ kg}$, $m_3=2 \text{ kg}$, $m_4=17 \text{ kg}$ 。

根据式(12)进行静态稳定性仿真，得出在爬坡过程中稳定度 Sta 大小随升降杆高度 H 和坡度 β 的变化如图 6 所示。根据式(14)进行动态稳定性仿真，得出在爬坡过程中保证机器人纵向不倾覆的最大加速度 a 大小随 H 和坡度 β 的变化范围如图 7。

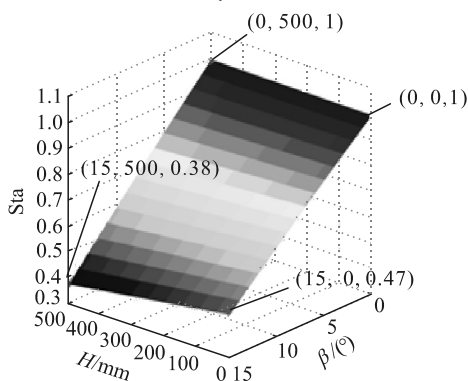


图 6 静态稳定性仿真结果

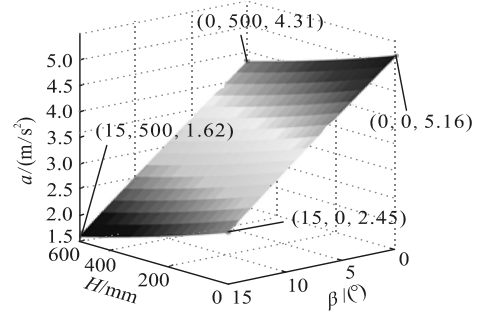


图 7 动态稳定性仿真结果

结合图 6 和图 7，可为巡检机器人在执行巡检任务过程中，在不同行驶坡度下控制升降杆高度和行驶加速度提供理论依据。

升降杆不升高，巡检机器人以 $v=0.2 \text{ m/s}$ 的速度爬坡 15° ，对(a)、(b)、(c) 3个运动过程进行仿真与实验，通过上位机将行走伺服电机的电流读取出来转换成驱动力矩，与仿真得到的行走伺服电机驱动力矩进行对比。

如图 8 所示， $M_i(i=1,2,3,4)$ 分别代表机器人前左、前右、后左、后右行走电机驱动力矩，设力矩方向逆时针为正。

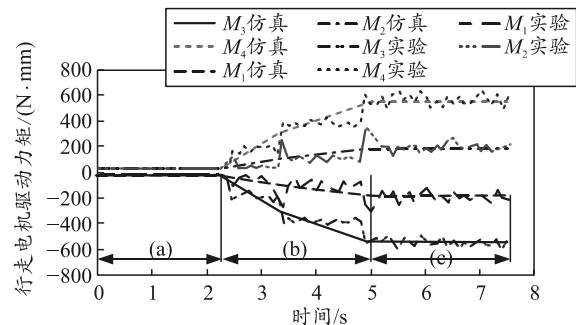


图 8 行走电机驱动力矩仿真与实验对比图

从图表明：(a)、(b)、(c)过程驱动力矩不断增大，(b)、(c)过程后轮电机驱动力矩明显大于前轮电机驱动力矩。由于仿真时没有考虑地面的不平度与机器人质心在横向偏离，因此与实验对比存在波动不大的误差。

如图 9 所示，制作样机，在变电站运行实验。实验结果表明，机器人运行稳定。

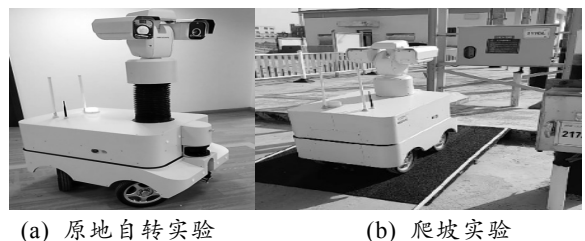


图 9 巡检机器人样机实验

[3] DUCCIO B, ZANGENEH M. On the Coupling of Inverse Design and Optimization Techniques for the Multiobjective, Multipoint Design of Turbomachinery Blades[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2009, 131(2): 1014-1030.

[4] 靳栓宝, 王永生, 刘承江. 高性能紧凑型水泵的三元设计方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 82-86.

[5] ZANGENEH M. A compressible three dimensional blade design method for radial and mixed flow turbomachinery blades[J]. Journal of Numerical Methods in Fluids, 1991, 13(5): 599-624.

[6] BONAIUTI D, ZANGENEH M. Parametric design of a waterjet pump by means of inverse design, CFD calculations and experimental analyses[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(1): 1-15.

[7] 罗兴琦. 混流式水轮机转轮的全三维反问题计算与优

化[D]. 北京: 清华大学, 1996: 23-35.

[8] 彭国义. 轴流式水轮机转轮三维反问题计算与优化[D]. 北京: 清华大学, 1996: 31-42.

[9] ZANGENEH M, GOTO A, TAKEMURA T. Suppression of secondary flows in a mixed-flow pump impeller by application of three-dimensional inverse design method: part1: design and numerical validation[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118(2): 536-543.

[10] TAN C S, HAWTHORNE W R, MCCUNE J E, et al. Theory of blade design for large deflections: part 2 annular cascades[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106(2): 354-365.

[11] 靳栓宝, 王永生, 丁江明. 混流式喷水推进泵三元设计及数值试验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(10): 1223-1227.

(上接第 81 页)

5 结束语

笔者设计一款带有云台升降功能的变电站巡检机器人, 进行了运动学、动力学、稳定性分析, 以及相关实验, 验证了模型的正确性和样机的稳定性。根据变电站巡检的发展需求可知, 该机器人具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 胡启明, 胡润滋, 周平. 变电站巡检机器人应用技术[J]. 华中电力, 2011, 24(5): 36-39, 43.

[2] 鲁守银, 张营, 李建祥. 移动机器人在高压变电站中的应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 276-284.

[3] WANG B, GUO R, LI B. An autonomous robotic system for inspecting substation equipment[J]. Journal of Field

Robotics, 2011, 29(1): 123-137.

[4] 蔡焕青, 邵瑰玮, 胡霖, 等. 变电站巡检机器人应用现状和主要性能指标分析[J]. 电测与仪表, 2017, 54(14): 117-123.

[5] 李祥, 崔昊杨, 曾俊冬, 等. 变电站智能机器人及其研究展望[J]. 上海电力学院学报, 2017, 33(1): 15-19.

[6] 张成巍, 岳湘. 智能巡检机器人研究现状与发展趋势[J]. 电工文摘, 2015(1): 9-12.

[7] 戚烈, 吕新民, 王立星. 全时四轮驱动车动力分配比的分析及仿真[J]. 机械设计与制造, 2011(8): 181-183.

[8] 付贵永, 周利坤. 机器人稳定性研究综述和展望[J]. 机械工程与自动化, 2013(2): 215-217.

[9] 陆震, 颜飙. 轮式移动机器人运动学逆问题及机体稳定性[J]. 北京航空航天大学学报, 1998(3): 339-341.

[10] 赵铁军, 孙健. 轮式移动机器人运动稳定性分析[J]. 机械工程与自动化, 2009(6): 17-19.