

# 轮腿式全地形移动机器人位姿闭环控制

马芳武<sup>1,2</sup>,倪利伟<sup>1,2</sup>,吴 量<sup>1,2</sup>,聂家弘<sup>1,2</sup>,徐广健<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022)

**摘 要:**轮腿机器人在越障及振动时,不可避免地会出现位姿(质心位置和俯仰、侧倾姿态)的变化。为实现对其位姿的控制,将汽车的多连杆悬挂系统应用到轮腿机器人设计当中,设计了一款新型轮腿式全地形移动机器人,降低复杂地面对轮腿机器人姿态的影响,保证轮腿机器人在复杂环境下自身姿态的稳定性。首先,建立了轮腿机器人的单腿运动学模型,并搭建了单腿试验台架,验证了模型的正确性。接着,针对轮腿机器人的位姿问题分别建立俯仰和侧倾模型,并对轮腿机器人的位姿进行解耦运算,在满足轮腿机器人各质心位置分量( $x$ 、 $y$ 、 $z$ )不变的情况下实现其姿态的闭环控制。然后,采用比例控制(P控制)在Simulink中搭建轮腿机器人位姿控制策略。最后,在Adams中创建轮腿机器人虚拟样机,并建立适用于大外倾角的PAC轮胎模型,利用Simulink与Adams联合仿真验证轮腿机器人在立体坡面上的位姿控制效果,仿真结果表明,本文控制算法对轮腿机器人的质心位置和姿态均有很好的跟踪效果,可将质心位置误差、姿态误差分别控制在4.3%和5%以内,验证了本文控制算法的有效性。

**关键词:**车辆工程;轮腿机器人;位姿模型;控制算法;联合仿真

**中图分类号:**U469.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2019)06-1745-11

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb20180699

## Position and attitude closed loop control of wheel-legged all terrain mobile robot

MA Fang-wu<sup>1,2</sup>, NI Li-wei<sup>1,2</sup>, WU Liang<sup>1,2</sup>, NIE Jia-hong<sup>1,2</sup>, XU Guang-jian<sup>1,2</sup>

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** When the wheel-legged robot is in the state of obstacle crossing, it is inevitable to change the attitude and position (centroid position and pitch and roll attitude). In order to control its position and attitude, the multi-link suspension system of automobile is adopted to design a new wheel-legged robot to ensure the stability in complex environment. Firstly, the single leg kinematics model of the wheel-legged robot is established, and a single leg test bench is built to verify the correctness of the model. Then, the pitching and rolling model is established for the position and attitude of the wheel-legged robot, and the position and attitude of the wheel-legged robot are decoupled. the closed-loop control of the robot is

**收稿日期:**2018-07-09.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51705185);国家重点研发计划项目(2017YFC0601604).

**作者简介:**马芳武(1960-),男,教授,博士生导师.研究方向:智能化、轻量化、电动化车辆.E-mail:mikema@jlu.edu.cn

**通信作者:**吴量(1983-),男,讲师,在站博士后.研究方向:智能化移动平台.E-mail:jluniliwei@163.com

realized in the condition that the position components of the center ( $x, y, z$ ) of the wheel-legged robot are constants. Then, the proportional control (P-control) is used to build the control strategy of the wheel-legged robot in Simulink. Finally, the virtual prototype of the wheel-legged robot is created in Adams, and the PAC tire model is built for the large outer angle, and the joint simulation model of Simulink and Adams is used to confirm the effectiveness of the control strategy on the three-dimensional slope. Simulation results show that the centroid position and attitude of the wheel-legged robot have good tracking effect, and the position error and attitude error are controlled within 4.3% and 5% respectively, so the effectiveness of the control strategy of the wheel-legged robot is verified.

**Key words:** vehicle engineering; wheel-legged robot; position and attitude model; control algorithm; joint simulation

## 0 引言

轮腿机器人作为轮式与腿足式机器人的结合体,兼顾了两者的优势,具有机动性能好、环境适应性强等优点,这使其在资源勘探、军事侦察、精准农业等领域有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>。随着应用的深入其姿态控制问题愈发显得重要,例如轮腿机器人在越障、爬坡或自身存在振动时会引起其位姿(质心位置和姿态)的变化<sup>[4,5]</sup>,若没有姿态控制进行干预将直接导致作业精度降低、负载平稳性差、能源消耗增大等问题<sup>[6,7]</sup>,因此对机器人的姿态进行控制显得尤为重要。

若想实现机器人的姿态控制,必须建立合适的姿态控制数学模型。文献[8]将一维俯仰和二维侧倾进行解耦分析,对四足移动平台在立体坡面上的姿态进行主动干预,显著提升了其行走稳定性和负载平稳性。文献[9]基于NESM判据调整质心位置及足端坡面适应度,实现了机器人在复杂路面的稳定行走。文献[10]利用位姿变换方程推导摇臂机器人质心姿态与轮心相对位置之间的运动学关系,然后设计了非线性规划遗传算法,减小了机器人在越障时侧倾角与质心高度的变化量。文献[11]运用两级滑模方法对球形机器人的俯仰和侧倾角进行抑制,提高了机器人在水中的运动稳定性。文献[12]应用速度模型对Hylos轮腿机器人在复杂立体路面上的轨迹和姿态进行跟踪,取得了良好的控制效果。

综上所述,机器人姿态控制方法多样化,但系统总结可归为速度法、几何法和D-H法3种<sup>[13-16]</sup>。其中D-H法是目前机器人领域最常用的位姿控制方法,其基本思路是根据各关节所在坐标系建立机体与轮心之间的位姿变换关系,然后求出其

逆解,通过对各关节角的控制进行整车位姿控制,但是该建模方法对于多关节系统易存在多解。本文涉及的轮腿机器人为了便于隔振和调姿加入了多连杆(四连杆,下同)独立悬架系统,使各轮腿之间相互独立,互不干扰,有效降低了机体振动,缓解了地面对机体的冲击,提高了机器人的行驶稳定性和可靠性<sup>[17]</sup>。但这导致传统的机器人姿态控制方法不能直接用于本文涉及的模型,因此本文首先基于汽车设计理念对本文涉及的模型悬架系统进行等效<sup>[16]</sup>,将多连杆独立悬架等效为双横臂独立悬架,等效之后的悬架系统与之前的多连杆悬架系统具有相同的运动特性,而且便于分析。接着,建立单腿几何模型,根据机身、转向机构、悬架系统、三角架、作动器之间的几何关系,求出作动器伸长量与双横臂悬架相对车身转角之间的数学关系,并搭建单腿试验台架进行试验验证。然后,分析轮腿机器人在立体坡面抑制俯仰和侧倾时,俯仰角、侧倾角与各轮腿双横臂悬架相对车身转角之间的数学关系,并在此基础上建立整机姿态控制算法。最后,利用Simulink与Adams联合仿真,验证本文姿态控制算法的有效性。

## 1 运动学建模

### 1.1 工作原理

图1为本文涉及的轮腿机器人,具有主动调姿、四轮转向、全轮驱动等功能,整机尺寸为1200 mm×900 mm×600 mm,主要由作动器、三角架、弹簧阻尼、多连杆独立悬架(四连杆)、转向系统、机体、轮腿机构等组成(见图2)。具体工作原理是由作动器伸缩带动三角架转动,从而带动各轮腿机构上、下伸缩以调整整机的位姿<sup>[18-20]</sup>。

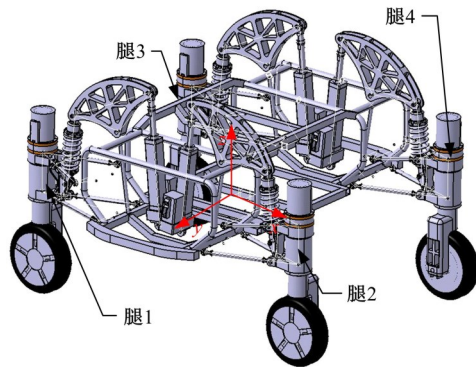
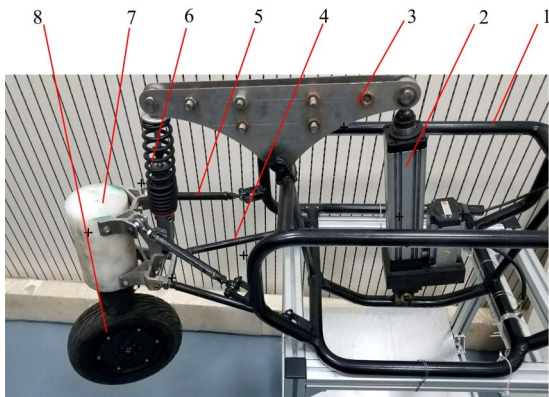


图 1 轮腿式全地形机器人结构图

Fig. 1 Structure diagram of all terrain wheel-legged robot



1-机体; 2-作动器; 3-三脚架; 4-多连杆独立悬架(下); 5-多连杆独立悬架(上); 6-弹簧阻尼; 7-转向机构; 8-轮腿机构

图 2 1/4 台架模型

Fig. 2 1/4 platform model

## 1.2 单腿运动学

### 1.2.1 理论分析

为了降低各轮腿之间相互干扰,有效改善机体振动,缓解地面冲击,将具有良好行驶稳定性和可靠性的汽车多连杆独立悬架引入到轮腿机器人设计当中。为便于分析,在不影响悬架运动性能的前提下将多连杆悬架等效为双横臂悬架,其中上控制臂 $d$ 等效为 $AH$ ,下控制臂等效为 $BG$ ,具体等效方式如图3所示。

等效后整机的1/4简图如图4所示,其中, $DF$ 为作动器; $ECD$ 为三脚架; $BC$ 为弹簧阻尼; $AH$ 、 $BG$ 为等效双横臂悬架; $AB$ 为转向机构; $BG$ 为轮腿机构; $\phi$ 为悬架与机身之间夹角; $\epsilon$ 为 $BG$ 与水平面夹角。

若想通过作动器实现对机身位姿的控制,必须知道作动器 $DF$ 伸长量与 $\alpha$ 之间的关系。由图4分析可知, $ECBG$ 可等效为图5所示的四连杆机构,根据其几何关系可求出 $\alpha$ 与 $\phi$ 之间的数学关

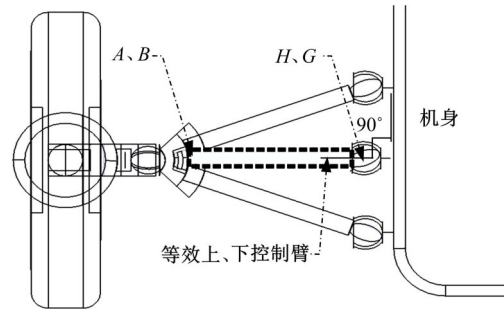


图 3 多连杆悬架等效为双横臂悬架俯视示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vertical view of multi-link suspension is equivalent to double wishbone suspension

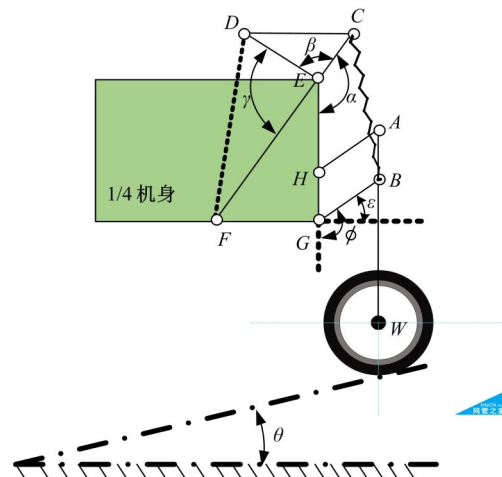


图 4 固定质心的机器人俯仰姿态示意图

Fig. 4 Pitching schematic diagram of robot with fixed center of mass

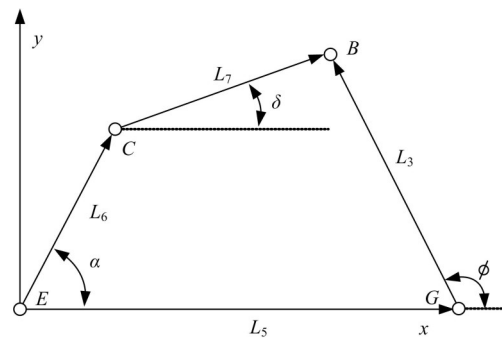


图 5 四连杆模型

Fig. 5 Equivalent four bar linkage model

系,又因为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 之和为定值,可得出 $\gamma$ 与 $\phi$ 之间的关系,根据三角函数边角关系确定作动器 $DF$ 伸长量与 $\gamma$ 之间的数学关系,进而确定 $DF$ 伸长量与 $\phi$ 之间的运动学联系,具体推导过程如下所示。

令 $DF=L$ ;  $O'G=L_1$ ;  $EF=L_2$ ;  $BG=L_3$ ;  $DE=L_4$ ;  $EG=L_5$ ;  $EC=L_6$ ;  $BC=L_7$ 。

将各连杆表示为杆矢量,则有:



$$\vec{L}_6 + \vec{L}_7 = \vec{L}_5 + \vec{L}_3 \quad (1)$$

其复数形式为:

$$L_6 e^{i\alpha} + L_7 e^{i\delta} = L_3 e^{i\phi} + L_5 \quad (2)$$

应用欧拉公式  $e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$  将式(2)实部与虚部分离得:

$$\begin{cases} L_6 \cos\alpha + L_7 \cos\delta = L_5 + L_3 \cos\phi \\ L_6 \sin\alpha + L_7 \sin\delta = L_3 \sin\phi \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\phi$ 、 $\delta$  分别为向量  $\vec{L}_6$ 、 $\vec{L}_3$ 、 $\vec{L}_7$  相对水平面的运动角。

化简式(3)可得:

$$L_7^2 = L_5^2 + L_6^2 + L_3^2 + 2L_3 L_5 \cos\phi - 2L_5 L_6 \cos\alpha - 2L_3 L_6 \cos(\phi - \alpha) \quad (4)$$

对于封闭三角形 DEF 来说,由三角函数边角关系可知:

$$\cos\gamma = \frac{L_1^2 + L_2^2 - L^2}{2L_1 L_2} \quad (5)$$

$$\sin\gamma =$$

$$\frac{\sqrt{2L_1^2 L_2^2 + 2L_2^2 L^2 + 2L_1^2 L^2 - L_1^4 - L_2^4 - L^4}}{2L_1 L_2}$$

又因为:

$$\begin{cases} \alpha + \beta + \gamma = 11\pi/6 \\ \cos\alpha = \cos(11\pi/6 - \beta - \gamma) \\ \sin\alpha = \sin(11\pi/6 - \beta - \gamma) \end{cases}$$

所以:

$$\cos\alpha = A_1^* + B_1^* \quad (6)$$

$$\sin\alpha = A_2^* - B_2^* \quad (7)$$

式中:

$$A_1^* = \cos(11\pi/6 - \beta) \frac{L_4^2 + L_2^2 - L^2}{2L_4 L_2};$$

$$A_2^* = \sin(11\pi/6 - \beta) \frac{L_4^2 + L_2^2 - L^2}{2L_4 L_2};$$

$$B_1^* = \sin(11\pi/6 - \beta) A_0^*;$$

$$B_2^* = \cos(11\pi/6 - \beta) A_0^*;$$

$$A_0^* = \frac{\sqrt{2L_4^2 L_2^2 + 2L_2^2 L^2 + 2L_4^2 L^2 - L_4^4 - L_2^4 - L^4}}{2L_4 L_2}$$

将式(6)(7)代入式(4)可求得作动器伸长量  $DF(L)$  与  $\phi$  之间的关系式为:

$$0 = -L_7^2 + L_5^2 + L_6^2 + L_3^2 + 2L_3 L_5 \cos\phi - 2L_5 L_6 (A_1^* + B_1^*) - 2L_3 L_6 \cos\phi (A_1^* + B_1^*) - 2L_3 L_6 \sin\phi (A_2^* - B_2^*) \quad (8)$$

对式(8)求导可得到作动器运动速度  $\dot{L}$  与角速度  $\dot{\phi}$  之间的数学关系式为:

$$0 = -2L_3 L_5 \dot{\phi} \sin\phi - 2L_5 L_6 (\dot{A}_1^* + \dot{B}_1^*) + 2L_3 L_6 \dot{\phi} \sin\phi (A_1^* + B_1^*) - 2L_3 L_6 \cos\phi (\dot{A}_1^* + \dot{B}_1^*) - 2L_3 L_6 \dot{\phi} \cos\phi (A_2^* - B_2^*) - 2L_3 L_6 \cos\phi (\dot{A}_1^* - \dot{B}_1^*) \quad (9)$$

同理,可求出其余 3 条腿作动器伸长量与  $\phi$  的运动关系式,在此不再列出。需要指出的是,若悬架相对水平面向下运动,则  $\epsilon$  为负值;。

### 1.2.2 试验验证

作动器  $DF$  伸长量与  $\phi$  之间的正确关系是确保机器人位置调整的关键,因此在理论分析的基础上需要试验验证式(8)的正确性和可靠性。试验所需器材主要有试验台架(见图 2)、欧姆龙编码器(E6B2-CWZ3E)、电推杆(上海格吉 SEC61-R268)及配套控制器、数据采集卡、上位机(见图 6)等,其中编码器布置在下控制臂与转向机构铰接处。

试验过程中通过数据采集卡将电推杆运动行程和编码器角度信号上传给上位机,两者数据分



(a)主要试验器材



(b)试验台架

图 6 试验器材及台架

Fig. 6 Test equipment and bench

别对应 $L$ 和 $\epsilon$ ;之后通过Matlab对数据进行处理,以曲线方式显示 $L$ 与 $\epsilon$ 之间的关系。为了方便与理论分析结果(式(8))进行对比,以 $\epsilon$ 表示 $\phi$ , $\phi = \pi/2 + \epsilon$ , $BG$ 处于水平方向时编码器旋转角度标定为 $0^\circ$ (即 $\epsilon=0$ )。当 $BG$ 处于水平面上方时, $\epsilon$ 大于 $0$ ;相反,则 $\epsilon$ 小于 $0$ 。表1为轮腿机器人单腿主要尺寸参数。

表1 轮腿机器人单腿主要尺寸参数

Table 1 Main dimension parameters of single leg of robot

参 数	数值
多连杆悬架长度/mm	264
车轮半径/mm	130
作动器工作长度 $L$ 初始值/mm	502
三角架DEC三条边长度/mm	388/234/205
三脚架支点与作动器支点距离 $EF$ /mm	370
等效双横臂悬架 $BG$ 长度/mm	200
机身厚度 $EG$ /mm	300
弹簧阻尼 $BC$ 长度/mm	270
轮腿长度 $AW$ /mm	400
多连杆夹角/ $^\circ$	37.5

### 1.2.3 仿真与试验对比分析

作动器初始长度为427 mm,最大行程为150 mm。为了提高试验精度,试验过程中作动器的有效行程设置为100 mm,伸长范围为450~550 mm,作动器每伸长10 mm,计算一次转角 $\phi$ ,以此得到作动器伸长量 $L$ 与 $\phi$ 之间关系的试验数据,重复试验取平均值可提高试验精度。将表1数据代入式(8)可得到作动器伸长量 $L$ 与 $\phi$ 之间的理论运动学关系。

表2为作动器伸长量 $L$ 与 $\phi$ 之间的试验数据与理论数据对比表,图7为结果对比图。分析可知,两者变化趋势基本一致,数据基本吻合,最大误差为1.5%。误差存在的主要原因是加工精度、编码器同轴度、装配误差等造成的。综上分析,式(8)能够可靠、正确地反映作动器伸长量 $L$ 与 $\phi$ 之间的关系。

### 1.3 整机位姿分析

#### 1.3.1 弹簧阻尼对姿态的影响

在对整机位姿模型分析之前考虑弹簧阻尼是否对整机姿态有明显影响,可分析以下两种具有代表性的极端行驶工况。工况一:极端坏路面上全速前进(H级路面)。工况二:无路状态下的载荷极端转移(发生倾覆)。分析以上两种极端工况

表2 理论分析与试验对比表

Table 2 Comparison table of theoretical analysis and test

分析类型	序号	作动器工作长度/mm	转角/ $^\circ$
试验	1	450	103.501
	2	460	101.085
	3	470	98.996
	4	480	96.096
	5	490	93.709
	6	500	90.711
	7	510	87.889
	8	520	84.524
	9	530	81.495
	10	540	77.971
	11	550	74.311
理论	12	参照式(8)	

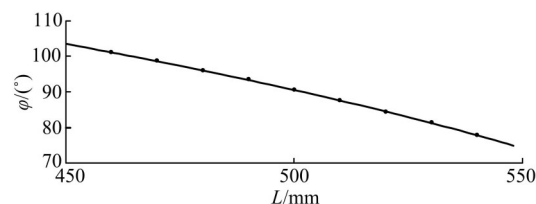


图7 理论数据与试验数据对比图

Fig. 7 Comparison diagram of theoretical and experimental data

下悬架的动行程,通过悬架动行程的变化量即可得知弹簧阻尼的伸缩量。

工况一 建立如图8所示的1/4机器人模型,其中, $x_0$ 为路面位移; $x_1$ 为轮胎位移; $x_2$ 为机身位移。

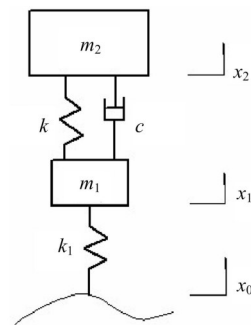


图8 1/4机器人模型

Fig. 8 1/4 robot model

由拉格朗日动力学方程可知:

$$\begin{cases} m_2 \ddot{x}_2 = -k_2(x_2 - x_1) - c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \\ m_1 \ddot{x}_1 = k_2(x_2 - x_1) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_1(x_1 - x_0) \end{cases} \quad (10)$$

则状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + F\omega \\ y = Cx \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $x$  为系统状态变量;  $\omega$  为高斯白噪声;  $A$  为系统矩阵(4×4);  $F$  为路面扰动矩阵(4×1);  $C$  为输出单位矩阵(4×4)。

$$A = \begin{bmatrix} -c/m_2 & -k_2/m_2 & c/m_2 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ c/m_1 & k_2/m_1 & -c/m_1 & -1/m_1 \\ 0 & 0 & k_1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -2\pi n_0 k_1 \sqrt{G_0 V_0} \end{bmatrix};$$

$$x = [\dot{x}_2 \quad x_2 - x_1 \quad \dot{x}_1 \quad k_1(x_1 - x_0)]^T$$

中国将路面划分为 8 个等级(A~H), 大部分中国路面为 B 或 C 级。路面输入通常可用路面功率谱密度函数、速度和加速度功率谱密度表示, 当车速一定时, 高程可由谱密度为常数的白噪声通过一个积分器产生, 即路面输入为  $\dot{x}_0(t)$ , 具体为:

$$\begin{cases} G_q(n) = G_q(n_0)(n/n_0)^{-W} \\ G_{\dot{q}}(n) = (2\pi n)^2 G_q(n) \\ G_{\ddot{q}}(n) = (2\pi n)^4 G_q(n) \\ \dot{x}_0(t) = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) V} \omega(t) \end{cases} \quad (12)$$

在 Matlab 中搭建如图 9 所示的 Simulink 模型。设置车速  $v=0.5$  m/s(轮腿机器人的最高车速); 路面等级为 H 级(最低等级路面); 采样点为 10 001 个; 采样时间为 0.005 s; 仿真时间为 30 s。具体参数如表 3 所示, 仿真结果如图 10 所示。分析可知: 轮腿机器人在 H 级路面全速前进的悬架动行程最大值为 0.01 m, 这相对于 1.2 m 的车身以及 0.27 m 的弹簧阻尼来说变化量很小, 对整车车身姿态的影响也非常小。并且在实际行驶过程中 H 级路面条件相当恶劣, 轮腿机器人不可能以最高速度行驶。同时, 为了便于控制和节省能源, 在机身姿态不超过阈值时, 作动器是不参与工作的。

工况二 模型所用弹簧阻尼为日本进口沙滩车用液压减震, 阻尼和预载荷均可调, 默认预载荷  $F_0=500$  N。在无路状态下, 轮腿机器人车身姿态可能会发生极端俯仰和侧倾, 本文将轮腿机器人发生载荷极端转移时的俯仰或侧倾作为分析条件。

轮腿式机器人在无路状态下行驶速度非常缓

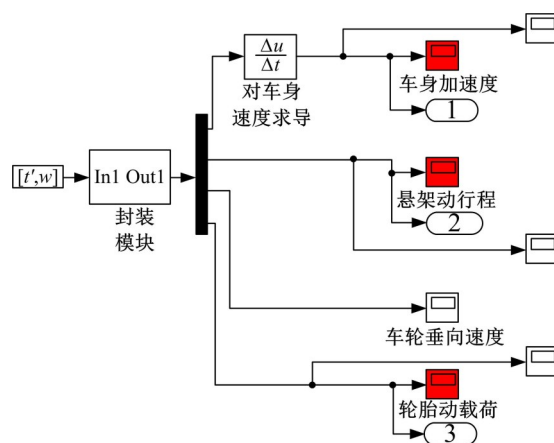


图 9 机器人 1/4 动力学 SIMULINK 仿真模型

Fig. 9 Simulink simulation model of 1/4 robot dynamics

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数	符号	数值	单位
路面不平度	$G_0$	0.262	$m^3$
参考空间频率	$n_0$	0.1	$m^{-1}$
行驶速度	$v$	0.5	m/s
频率指数	$W$	2.0	—
弹簧弹性系数	$K_2$	20 000	N/m
阻尼系数	$C$	1 000	N·m/s
1/4 整车簧上质量	$m_2$	40	kg
1/4 整车簧下质量	$m_1$	10	kg
轮胎弹性系数	$K_1$	180 000	N/m

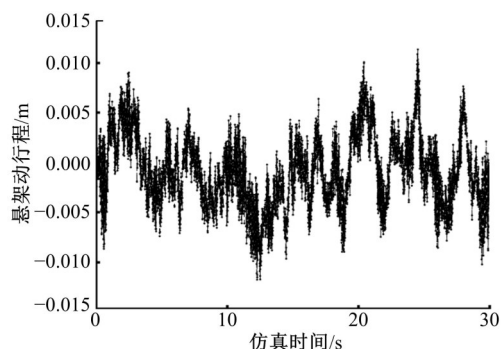


图 10 悬架动行程仿真结果

Fig. 10 Simulation result of suspension dynamic displacement

慢, 此时可以忽略路面对机身的冲击, 而只考虑载荷转移对机身姿态的影响。当发生极端俯仰时, 假设机身质量全部转移到一侧, 此时弹簧阻尼的压缩量为  $S = (2m_2 - F_0)/k_2$ , 代入数值得  $S = 0.015$  m。此压缩量对于整车或者弹簧阻尼来说变化量很小, 对整车姿态影响也很小, 并且文中假设的为极端工况, 在实际行驶路况中只有发生前后翻及侧翻时才会出现。同理, 在机身发生极端

侧倾时,弹簧阻尼压缩量同样很小,对整车姿态影响不大。

综上所述可知,由于轮腿机器人车速较低、机身较轻、弹簧刚度相对较大,在以上两种极端工况下弹簧阻尼的变化量都很小,普遍在0.01 m左右,整体对机身姿态影响很小,因此,为了便于姿态分析,可将弹簧阻尼视作刚性杆。

### 1.3.2 俯仰和侧倾

图11和图12分别为轮腿机器人在角度为 $\theta$ 和 $\delta$ 立体坡面上时的俯仰和侧倾姿态控制示意图,其中 $OO_1$ 的高度为定值。分析可知,坡度 $\theta$ 、 $\delta$ 与 $\varepsilon/\varepsilon'$ 之间有如下关系:

$$\tan\theta = \frac{L_3 \sin\varepsilon}{S - L_3(1 - \cos\varepsilon)} = \frac{L_3 \sin\varepsilon'}{S - L_3(1 - \cos\varepsilon')} \quad (13)$$

$$\tan\delta = \frac{L_3 \sin\varepsilon}{S_1} = \frac{L_3 \sin\varepsilon'}{S_1} \quad (14)$$

式中: $\varepsilon = \varepsilon'$ ;  $S$ 为1/2车身长; $S_1$ 为1/2车宽。

### 1.3.3 俯仰、侧倾之间的耦合关系

如图13所示, $VV_1$ 、 $PP_1$ 分别为机体在水平姿

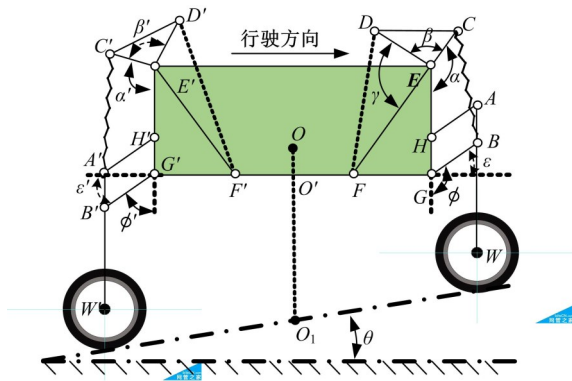


图11 斜面上俯仰姿态控制示意图

Fig. 11 Schematic diagram of pitching attitude control on slope

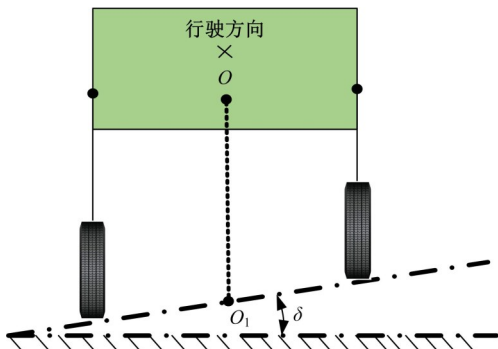


图12 斜面上侧倾姿态控制

Fig. 12 Rolling attitude control on the slope

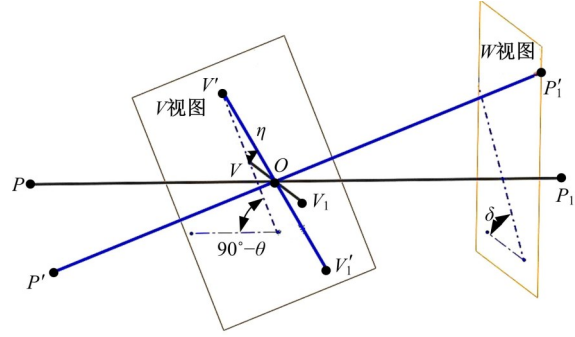


图13 机体姿态投影图示意图

Fig. 13 Schematic diagram of robot body attitude projection

态时的机身横轴和纵轴; $V'V_1'$ 、 $P'P_1'$ 分别为机身经过俯仰、侧倾后的机身横轴和纵轴; $\eta$ 为机体经过俯仰后 $VV_1$ 绕轴 $P'P_1'$ 旋转到 $V'V_1'$ 的旋转角度; $V'V_1'$ 在 $V$ 视图上的投影与 $V$ 视图内水平线的夹角为 $90^\circ - \theta$ ;同理, $V'V_1'$ 在 $W$ 视图上的投影与 $W$ 视图内水平线的夹角为 $\delta$ 。

为了方便求出俯仰、侧倾之间的耦合关系,将图13做适当变形得到图14,分析可知 $\theta$ 、 $\delta$ 、 $\eta$ 之间存在如下关系: $\tan\delta = \tan\eta \cos\theta$ 。因此,轮腿机器人在实现角度为 $\theta$ 、 $\delta$ 的俯仰和侧倾时可先实现 $\theta$ 度的侧倾,之后绕机身自身纵轴 $MM_1$ 旋转 $\eta$ 即可实现 $\delta$ 的侧倾。

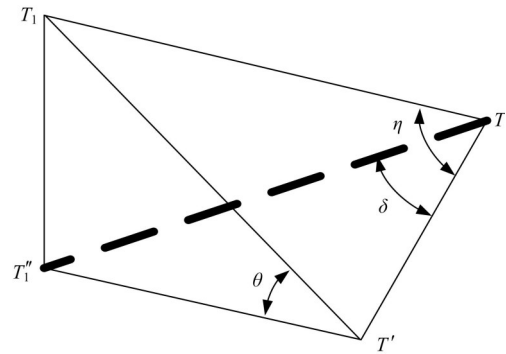


图14 机体姿态投影简化图

Fig. 14 Robot body simplified attitude projection

## 2 姿态闭环控制模型

轮腿机器人每条腿有两个旋转自由度,通过串联的方式与作动器相连,作动器又以伸缩的方式调整轮腿高度,进而调整机身姿态。本文涉及的目标控制量为5个:3个位置分量和2个姿态分量。

图15为本文设计的轮腿机器人位姿控制框图,包括位置和姿态两个控制环。位姿控制的基



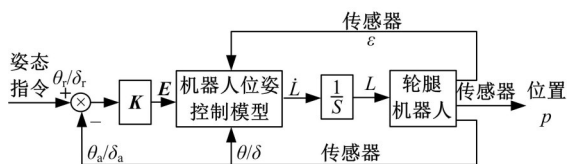


图 15 轮腿机器人位姿控制框图

Fig. 15 Position and posture control block diagram of wheel-leg

本思路为通过式(8)(13)(14)建立轮腿机器人位姿控制模型,当机身出现姿态变化时,传感器将获得的姿态数据反馈到位姿模型,通过逆运算获得关节角度 $\epsilon$ 和作动器伸长量 $L$ ,基于此对轮腿机器人姿态进行控制,并将控制结果实时与目标姿态进行对比,从而实现轮腿机器人位姿的闭环精确控制。其中, $E=K(K_r-K_a)$ ,  $K_a=[\theta_a \delta_a]^T$ ,  $K_r=[\theta_r \delta_r]^T$ ,  $K$ 为姿态闭环控制比例系数,  $K_a$ 为轮腿机器人通过传感器测得的姿态角矩阵,  $K_r$ 为目标姿态矩阵。

### 3 算法验证

#### 3.1 Simulink 与 Adams 联合仿真

为验证算法的有效性,基于前两部分的分析建立 Simulink 与 Adams 的联合仿真模型(见图 16),主要包括轮腿机器人运动学模型与 Adams 物理样机模型及立体坡面模型,其中路面俯仰角为 $6^\circ$ ,侧倾角为 $3^\circ$ 。具体联合仿真流程如下:传感器将测得的机身姿态角上传给 Simulink 模型,之后通过计算得到作动器行程并发送至 Adams 模型,根据输入的控制信号调整轮腿上、下运动,同时输出机器人位姿及各关节角度作为反馈,从而实现 Simulink 与 Adams 的联合仿真(见图 17)。

为了更加真实地模拟轮腿机器人在复杂路面的运动特性,建立了适用于大外倾角的 PAC 轮胎模型,并对轮胎参数进行修改。表 4 为轮腿机器人的主要结构参数,其中  $OO_1=H$ ,  $OO'=H_1$ ,  $AB=H_2$ ,  $AW=H_3$ 。表 5 为轮腿机器人初始位



图 16 Simulink 与 Adams 信息交互图

Fig. 16 Information interaction diagram of Simulink and Adams

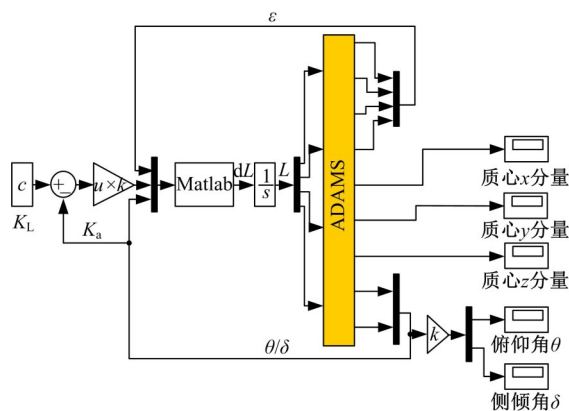


图 17 Simulink 与 Adams 联合仿真模型

Fig. 17 Simulink and Adams joint simulation

表 4 轮腿机器人结构参数

Table 4 Structural parameters of wheel-legged robot

参数	数值	参数	数值
$H/\text{mm}$	460	$L_3/\text{mm}$	200
$H_1/\text{mm}$	75	$L_4/\text{mm}$	230
$H_2/\text{mm}$	150	$L_5/\text{mm}$	300
$H_3/\text{mm}$	400	$L_6/\text{mm}$	200
$L_1/\text{mm}$	250	$L_7/\text{mm}$	270
$L_2/\text{mm}$	370		

表 5 轮腿机器人位姿参数

Table 5 Position and pose parameters of wheel-legged robot

位姿	位置参数			姿态参数		
	$x$ 分量/ mm	$y$ 分量/ mm	$z$ 分量/ mm	横摆 角/ $(^\circ)$	俯仰 角/ $(^\circ)$	侧倾 角/ $(^\circ)$
初始	450	0	0	0	6	3
目标	450	0	0	0	0	0

姿参数和目标位姿参数,姿态闭环比例控制系数矩阵  $K$  为:

$$K = \begin{bmatrix} 26 & 0 \\ 0 & 15 \end{bmatrix}$$

#### 3.2 结果分析

图 18 为轮腿机器人在立体坡面上的位姿调整过程,分析可知在位姿调整过程中存在超调,超调状态大致出现在 4~6 s,在 8 s 之后基本趋于收敛。

图 19 为轮腿机器人的位姿跟踪结果,观察可知超调极值点大致出现在 5 s 左右,这与图 18 反映的结果相吻合。

进一步观察还可知,在位姿调整过程中,机身俯仰角和侧倾角有很好的跟踪效果,但存在误差,误差值分别为  $0.2^\circ$  与  $0.15^\circ$ ,误差率为 3% 和 5%。同时,质心横摆角及位置坐标值( $x, y, z$ )也存在不



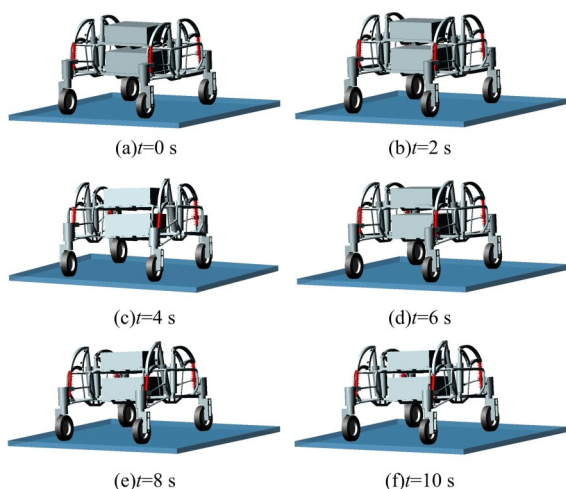


图 18 轮腿机器人位姿调整过程

Fig. 18 Position and posture adjustment process of wheel-legged robot

同程度的变化。理论上,在位姿调整过程中质心横摆角及坐标值( $x$ 、 $y$ 、 $z$ )是不应有变化的,但联合仿真过程中却存在偏差,其中横摆角存在 $0.06^\circ$ 的偏差量,质心 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 分量分别存在3、6、20 mm的变化量,误差率分别为2%、0.6%、1.2%、4.3%。表6为误差分析表。分析表6可知,误差存在的原因主要有以下3个方面:

(1)数学模型。在建立运动学模型时,将机身杆系及轮腿结构简化为直线是不严谨的,因为现实中这些构件是有几何尺寸的,尤其是在构件接触部位,同心度、同轴度等位置公差对建模精度是有影响的。

(2)结构设计。由于机械结构自身的局限性,会导致调姿过程中轮胎与地面的接触由面接

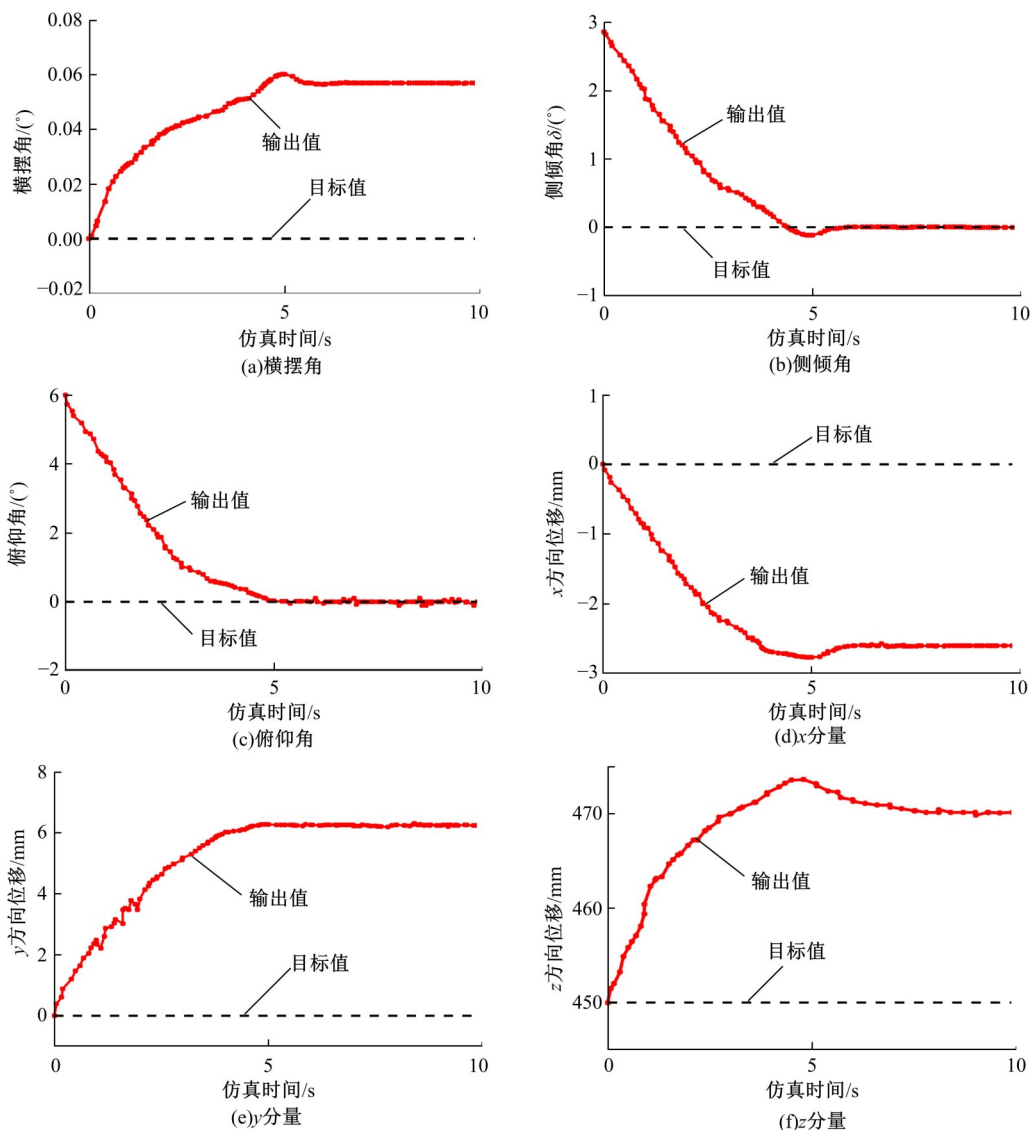


图 19 位姿跟踪结果

Fig. 19 Position and posture tracking results

表6 误差分析表  
Table 6 Error analysis table

跟踪误差参数	误差值	误差率/%
质心位置 $x$ 分量/mm	3	0.6
质心位置 $y$ 分量/mm	6	1.2
质心位置 $z$ 分量/mm	20	4.3
姿态俯仰角/(°)	0.2	3
姿态横摆角/(°)	0.06	2
姿态侧倾角/(°)	0.15	5

触过渡为点接触,这会在一定程度上导致机身质心高度的提升,也是联合仿真结果显示质心高度会升高20 mm的主要原因。虽然建立了适用于大外倾角的PAC轮胎模型,也只能改善这种情形,不能完全消除。

(3)弹簧阻尼。由于弹簧阻尼的存在,在载荷转移时会导致弹簧阻尼的长度有微小的变化,这也是导致误差的一部分原因。

综上所述,联合仿真结果虽然有误差存在,但基本控制在5%以内,且有些误差是不可避免的,仿真结果能够验证本文算法的有效性。

## 4 结束语

为更好地实现轮腿机器人的隔振和调姿,设计了一款具有汽车多连杆独立悬架系统的轮腿机器人,使各轮腿之间相互独立、互不干扰。为了验证所述运动学控制模型的正确性,加工了1/4轮腿模型,并进行试验验证,仿真结果与试验结果基本吻合。对轮腿机器人在立体坡面上的俯仰和侧倾进行整机运动学建模,并对轮腿机器人俯仰与侧倾之间的耦合关系进行分析,进而建立整机的闭环位姿控制模型。采用Simulink与Adams对算法进行联合仿真,结果表明本文算法对轮腿机器人的位置和姿态均有很好的跟踪效果,并对误差进行了分析,验证了本文算法的有效性。

### 参考文献:

- [1] Zhuang H C, Gao H B, Ding L, et al. Method for analyzing articulated torques of heavy-duty six-legged robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(4): 801-812.
- [2] 郑楚婷, 宋光明, 乔贵方, 等. 具有主动腰关节的四足机器人在间歇性对角小跑步态下的姿态平衡控制[J]. 机器人, 2016, 38(6): 670-677.  
Zheng Chu-ting, Song Guang-ming, Qiao Gui-fang, et al. Posture balance control of the quadruped robot

with an activewaist joint during intermittent trot locomotion[J]. Robot, 2016, 38(6): 670-677.

- [3] 罗陆锋, 邹湘军, 程堂灿, 等. 采摘机器人视觉定位及行为控制的硬件在环虚拟试验系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 39-46.  
Luo Lu-feng, Zou Xiang-jun, Cheng Tang-can, et al. Design of virtual test system based on hardware-in-loop for picking robot vision localization and behavior control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 39-46.
- [4] 王海燕, 李贻斌, 宁龙霄. 液压驱动双足机器人运动系统的设计及实现[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2014, 44(3): 750-756.  
Wang Hai-yan, Li Yi-bin, Ning Long-xiao. Design and implementation of a hydraulic actuated biped robot motion system[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2014, 44(3): 750-756.
- [5] 郭云龙, 刘少刚, 贾鹤鸣. 基于刚-柔并联连杆系统的越障机器人动力学分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(6): 1581-1588.  
Guo Yun-long, Liu Shao-gang, Jia He-ming. Kinematics analysis on obstacle-crossing robot based on rigid-flexible parallel linkage mechanism system[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2013, 43(6): 1581-1588.
- [6] 张帅帅, 荣学文, 李贻斌, 等. 崎岖地形环境下四足机器人的静步态规划方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(4): 1287-1296.  
Zhang Shuai-shuai, Rong Xue-wen, Li Yi-bin, et al. Static gait planning method for quadruped robots on rough terrain[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2016, 46(4): 1287-1296.
- [7] 李满天, 蒋振宇, 王鹏飞, 等. 基于多虚拟元件的直腿四足机器人Trot步态控制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(5): 1502-1511.  
Li Man-tian, Jiang Zhen-yu, Wang Peng-fei, et al. Trotting gait control of quadruped robot with straight legs based on virtual elements[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2015, 45(5): 1502-1511.
- [8] 苏文海, 李冰, 袁立鹏, 等. 立体坡面农业四足移动平台姿态控制策略与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 80-91.  
Su Wen-hai, Li Bing, Yuan Li-peng, et al. Strategy and experiment of attitude control for quadruped mobile platform walking on three-dimensional slope used

- for agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 80-91.
- [9] Bechar A, Vigneault C. Agricultural robots for field operations: concepts and components[J]. Biosystems Engineering, 2016, 149: 94-111.
- [10] 刘本勇, 高峰, 姜惠, 等. 平衡摇臂式移动机器人姿态控制算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(2): 391-398.
- Liu Ben-yong, Gao Feng, Jiang Hui, et al. Attitude control algorithm of balancing-arm mobile robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(2): 391-398.
- [11] 李艳生, 杨美美, 孙汉旭, 等. 一种摆式球形机器人水中俯仰运动的稳定控制方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 149-154, 189.
- Li Yan-sheng, Yang Mei-mei, Sun Han-xu, et al. A stability control method for pitching motion in water of a pendulum type spherical robot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 149-154, 189.
- [12] Grand C, Benamar F, Plumet F. Motion kinematics analysis of wheeled-legged rover over 3D surface with posture adaptation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(3): 477-495.
- [13] 常勇, 马书根, 王洪光, 等. 轮式移动机器人运动学建模方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 30-36.
- Chang Yong, Ma Shu-gen, Wang Hong-guang, et al. Method of kinematic modeling of wheeled mobile robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(5): 30-36.
- [14] Alamdari A, Krovi V N. Static balancing of highly reconfigurable articulated wheeled vehicles for power consumption reduction of actuators[J]. International Journal of Mechanisms and Robotic Systems, 2016, 3(1): 15-31.
- [15] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. Big-Dog, the Rough-Terrain Quadruped Robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2):10822-10825.
- [16] Zhuang Hong-chao, Gao Hai-bo, Ding Liang, et al. Method for analyzing articulated torques of heavy-duty six-legged robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(4): 801-812.
- [17] 潘希样, 徐坤, 王耀兵, 等. 具有悬挂系统的轮腿式机器人设计与分析[J]. 机器人, 2018, 40(3): 309-320.
- Pan Xi-yang, Xu Kun, Wang Yao-bing, et al. Design and analysis of a wheel-legged robot with a suspension system[J]. Robot, 2018, 40(3): 309-320.
- [18] 钟银辉, 李以农, 杨超, 等. 基于主动悬架控制轮边驱动电动车垂向振动研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(11): 242-247.
- Zhong Yin-hui, Li Yi-nong, Yang Chao, et al. Vertical vibration of in-wheel motor electric vehicles based on active suspension control[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(11): 242-247.
- [19] Park S, Lee Y J. Gait analysis of a quadruped walking robot with vertical waist-joint on slope[J] IFAC Proceedings Volumes, 2009, 14: 507-512.
- [20] Koopman B, van Asseldonk E H F, van der Kooij H. Speed-dependent reference joint trajectory generation for robotic gait support[J]. Journal of Biomechanics, 2014, 47(6):1447-1458.