

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.002

可变直径轮全地形车辆越障性能分析*

药晓江 高峰 周煜 陈新波 徐国艳 崔莹

(北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 阐述了后轮驱动及四轮驱动两种驱动方式下可变直径轮全地形车辆的越障性能。首先在 RecurdynV7R5 软件中建立可变直径轮与普通轮胎模型, 并对其越障特性进行了分析。以此为基础建立了后驱及四驱车辆前后轮径变化对越障性能影响的力学模型, 进行了理论计算, 结果表明车辆驱动方式以及车辆轮径的变化对车辆的越障性能具有很大影响。又在 RecurdynV7R5 软件中建立了后驱及四驱 2 种驱动方式下的整车模型, 调整车轮直径模拟分析其越障性能, 并与理论计算进行了对比。最后, 实验验证了理论计算与仿真分析的结果是可信的。

关键词: 全地形车辆 可变直径轮 越障 通过性

中图分类号: U463 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0006-06

Analysis of Obstacles Climbing Performance for Diameter-variable Wheel All-terrain-vehicle

Yao Xiaojiang Gao Feng Zhou Yu Chen Xinbo Xu Guoyan Cui Ying

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The obstacle climbing performance was discussed for variable diameter wheel all-terrain-vehicle (ATV) with two kinds of drive mode: rear wheel drive mode and four-wheel drive mode. In RecurdynV7R5 software models of the diameter-variable wheel and a normal tire were built to analyze the climbing obstacles characteristics. On this basis, the vehicle model which would be driven by rear wheel or four wheels mechanical was set up, and the calculation was executed. The results showed that the driving way and the variation of wheel diameter play an important role for obstacle climbing performance. In RecurdynV7R5 software the whole vehicle model with rear wheel drive mode or four wheel drive mode was built, and obstacle climbing performance was simulated in the condition of adjusting the wheel diameter size. Then, the calculation and the simulation were compared. In the end, experimental results verify the reliability between the theoretical calculation and the simulation analysis.

Key words: All-terrain-vehicle Diameter-variable wheel Obstacle climbing Trafficability

引言

越障性能是衡量全地形车辆通过性的重要指标。研究表明, 车辆传动系形式以及行驶机构对车辆越障性能影响较大, 是探测车辆研究的核心内容之一^[1]。国内外学者为此研发了不同的行驶机构, 如轮腿式车辆^[2~4]、多轴车、履带式车辆、行星轮式车辆等, 并对其越障性能进行了仿真分析^[5~9]。崔

莹等研究了可变直径轮探测车的车身姿态以及车轮形态对越障通过性的影响^[10~11]。以上研究大都集中在特种行驶机构对越障性能的影响, 很少同时涉及传动系型式和特种行驶机构。本文提出一种四轮驱动可变直径轮行驶机构, 通过研究车辆的驱动方式以及轮径变化探讨该行驶机构对提高车辆越障能力的贡献。用理论计算和仿真的方法分析后轮驱动车辆和四轮驱动车辆车轮直径的改变对越障性能的

收稿日期: 2012-02-14 修回日期: 2012-03-14

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA11Z244、2010AA101405-1)

作者简介: 药晓江, 博士生, 主要从事特种车辆及其动力学研究, E-mail: yaoxiaojiang01@163.com

影响。

1 可变直径轮全地形车构型

可变直径轮全地形车适用于沼泽、沙地、丘陵以及公路等越野路面的行驶。根据路面工况的变化,车轮直径大小进行相应调整。当车辆在公路上行驶时,车轮抱成整圆以便提高车辆舒适性和操纵性;当车辆在复杂的非公路路面行驶时,车轮直径增大,且由连续的整圆变为离散的圆形轮子,以提高车辆对路面的适应性和通过性。

1.1 整车构型

全地形车车体采用钢管车架,结构简单、体积小、质量轻,传动采用链传动与齿轮传动相结合的H型四轮驱动的方式,变速器为机械式无级变速器CVT,实物照片如图1所示。当车轮为合拢状态时,车辆的平顺性好,适合于公路行驶;当车轮为张开状态时,增强了软土路面的驱动能力;车辆的离地间隙增大,提高了凹凸路面的通过能力。即整车兼顾了公路和越野路面的行驶工况,具有较强的路面适应能力。

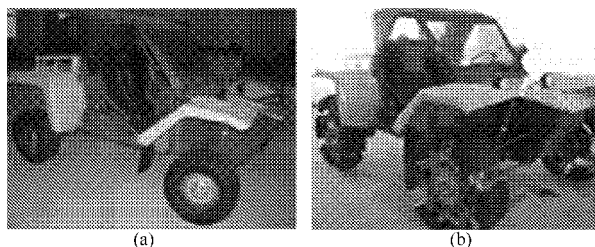


图1 可变直径轮全地形车实物图

Fig.1 Real photo of variable diameter wheel ATV

(a) 轮子合拢状态 (b) 轮子张开状态

1.2 可变直径轮

全地形车所采用车轮为液压驱动可变直径轮,当轮径收缩时可收缩为整圆,适于车辆在公路上高速行驶的工况,以减小路面的冲击(图2a);当轮径增大时轮子为不连续轮缘,适于车辆在越野路面行驶的工况,可以提高车辆的通过性(图2b)。

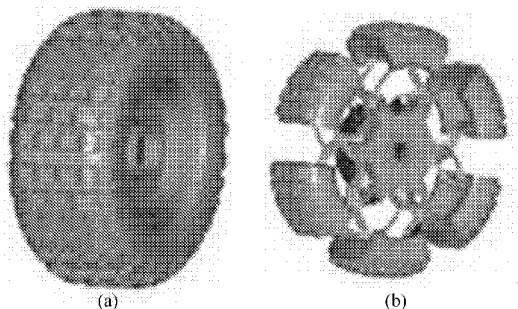


图2 可变直径轮三维设计图

Fig.2 Design picture of variable diameter wheel

(a) 合拢状态 (b) 张开状态

2 可变直径轮车辆越障力学分析

2.1 可变直径轮越障特性仿真

首先对可变直径轮与普通轮胎越障特性进行对比分析。在多体动力学软件 RecurdynV7R5 中分别建立可变直径轮与普通轮胎模型及相同的障碍物模型,如图3所示。对所建立模型进行越障仿真分析,结果如图4所示。

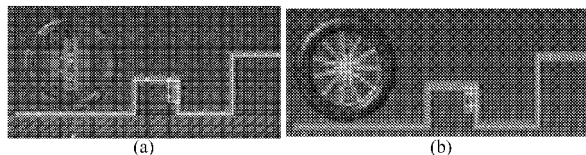


图3 单轮对比仿真图

Fig.3 Simulation pictures of single wheel

(a) 可变直径轮 (b) 普通轮子

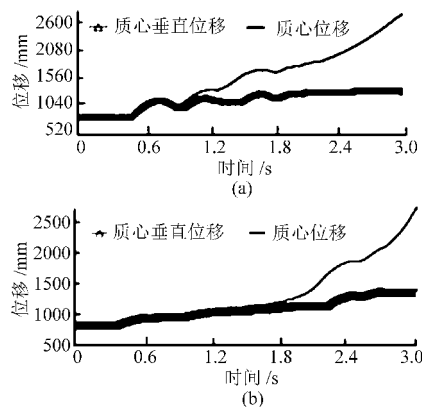


图4 单轮越障分析轮心位移曲线

Fig.4 Simulation curves of single wheel center

(a) 可变直径轮 (b) 普通轮子

由图4分析知,可变直径轮可越过与其直径相同的普通轮子能越过的障碍物,且其攀越特性与普通轮子类似。

2.2 力学模型的建立

建立硬路面上可变直径轮车辆越过台阶时的力学模型,如图5所示。

由图5a可知,前轮碰到垂直障碍且刚刚离地时,力学平衡方程式为

$$\begin{cases} F_1(\varphi \sin\alpha - \cos\alpha) - \varphi F_2 = 0 \\ F_1(\sin\alpha - f\cos\alpha) + F_2 - G = 0 \\ fF_1R_1 - (\varphi R_1 + L\cos\beta)F_2 + G(a\cos\beta + h_0\sin\beta) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\sin\alpha = 1 - \frac{h_w}{R_1}$ $\sin\beta = \frac{|R_1 - R_2|}{L}$

式中 F_1 、 F_2 ——前、后轮地面支撑反力
 f ——滚动阻力系数 G ——汽车总重力
 φ ——路面附着系数
 L ——轴距 h_0 ——车辆质心高度

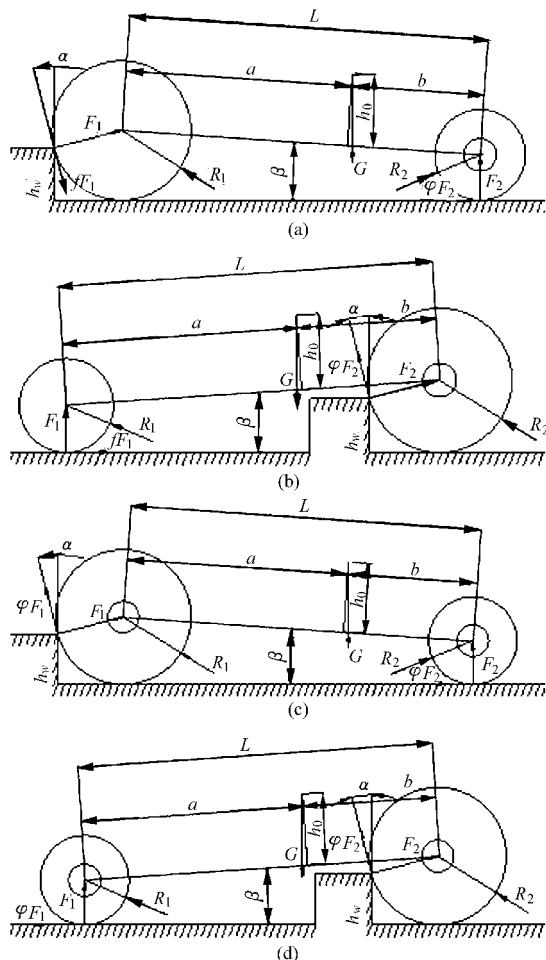


图5 可变直径轮车辆越障力学模型

Fig. 5 Mechanical models of variable diameter vehicle

- (a) 后驱车辆前轮越障 (b) 后驱车辆后轮越障
(c) 四驱车辆前轮越障 (d) 四驱车辆后轮越障

a ——前轮中心到质心的距离

β ——前、后轮中心连线与水平面的夹角

α ——轮子切线与垂直面夹角

R_1 、 R_2 ——前、后轮可变半径

h_w ——障碍物高度

将方程式(1)化简得

$$\left[-\frac{f}{\varphi} + \frac{R_1 f}{L \cos \beta} + \frac{(a + h_0 \tan \beta) f}{\varphi L} + \frac{a + h_0 \tan \beta}{L} \right] \sin \alpha - \left[-\frac{R_1}{L \cos \beta} + \frac{1}{\varphi} + \frac{(a + h_0 \tan \beta) f}{L} - \frac{a + h_0 \tan \beta}{\varphi L} \right] \cos \alpha = \frac{R_1 f}{L \cos \beta} \quad (2)$$

图5b、5c、5d所示可变直径轮车辆越过障碍物力学模型简化后的方程式分别为

$$\left[-1 + \frac{R_2 f}{L \cos \beta} + \frac{(b + h_0 \tan \beta) f}{\varphi L} + \frac{b + h_0 \tan \beta}{L} \right] \sin \alpha - \left[\frac{R_2 f}{\varphi L \cos \beta} - \frac{1}{\varphi} - \frac{(b + h_0 \tan \beta) f}{L} + \frac{b + h_0 \tan \beta}{\varphi L} \right] \cos \alpha = \frac{R_2 f}{L \cos \beta} \quad (3)$$

式中 b ——后轮中心到质心的距离

$$\left(\frac{R_1 \varphi}{L \cos \beta} - 1 \right) \sin \alpha - \left[\frac{R_1}{L \cos \beta} - \frac{1}{\varphi} + \frac{(a + h_0 \tan \beta) \varphi}{L} + \frac{a + h_0 \tan \beta}{\varphi L} \right] \cos \alpha = \frac{R_1 \varphi}{L \cos \beta} \quad (4)$$

$$\left(\frac{R_2 \varphi}{L \cos \beta} + 1 \right) \sin \alpha - \left[\frac{R_2}{L \cos \beta} + \frac{1}{\varphi} - \frac{(b + h_0 \tan \beta) \varphi}{L} - \frac{b(b + h_0 \tan \beta)}{\varphi L} \right] \cos \alpha = \frac{R_2 \varphi}{L \cos \beta} \quad (5)$$

2.3 全地形车力学分析

可变直径轮全地形车实车参数如表1所示,分别将其代入以上力学方程式,视前轮半径 R_1 与后轮半径 R_2 为自变量,越障高度 h_w 为因变量,得出后轮驱动与四轮驱动两种模式下前、后轮越障高度与轮胎直径的关系,如图6所示。

表1 全地形车实车参数

Tab. 1 Real parameter of all-terrain-vehicle

参数	数值
滚动阻力系数 f	0.015
附着系数 φ	0.7
车轮半径 R/mm	315
前轮可变半径 R_1/mm	315 ~ 445
后轮可变半径 R_2/mm	315 ~ 445
汽车总质量 m/kg	1200
质心到前轴的距离 a/mm	1368
质心到后轴的距离 b/mm	684
轴距 L/mm	2052
质心高度 h_0/mm	360

由图6分析可知,四轮驱动时车辆越过台阶的能力与后轮驱动相比,前轮越障高度提高约50%,而后轮提高约68%,且前轮越过台阶的高度比后轮高得多。后驱车辆与四驱车辆前轮越障时,越障高度与前轮半径呈线性正比关系增加,斜率约为0.92,而后轮半径的变化对越障高度影响不大;后轮越障时,越障高度与后轮半径呈线性正比关系增加,斜率约为0.24,而前轮半径的变化对越障高度影响不大。

3 可变直径轮车辆越障仿真

在 RecurdynV7R5 软件中分别建立后轮驱动与四轮驱动的整车模型,按分析要求设置轮胎半径,并建立具有台阶的路面模型(图7),对整车分别在后轮驱动与四轮驱动情形下越过台阶的情形进行仿真分析。

3.1 后轮驱动车辆越过台阶仿真

设置轮胎半径为350mm,台阶高度为180mm,对前轮越过台阶的情形进行仿真,得出车辆质心位

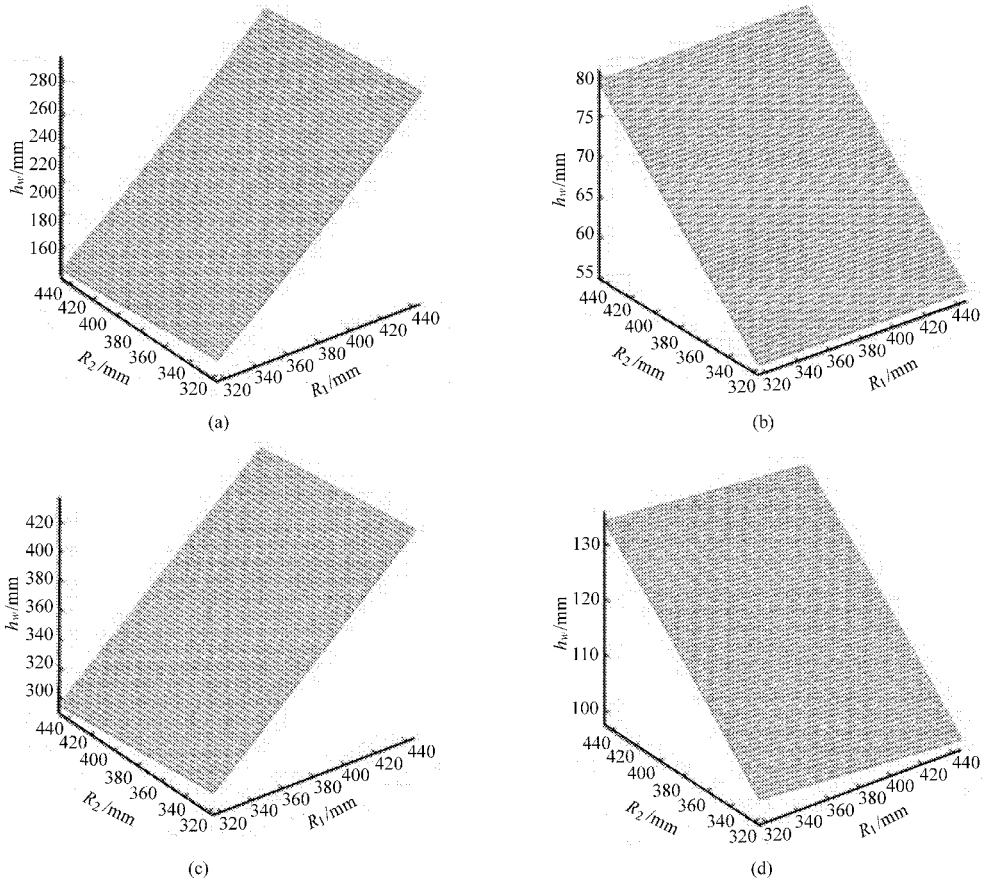


图 6 越障高度与轮胎直径的关系曲面

Fig. 6 Relevance between high of obstacle and size of wheel diameter

(a) 后驱车辆前轮越障 (b) 后驱车辆后轮越障 (c) 四驱车辆前轮越障 (d) 四驱车辆后轮越障

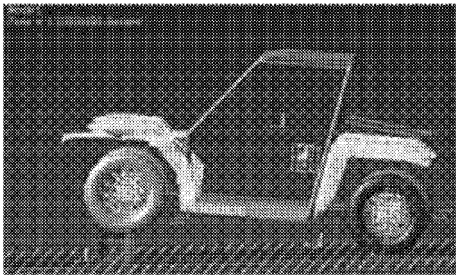


图 7 整车越障仿真分析

Fig. 7 Obstacle simulation of whole vehicle

移和质心垂直位移随时间变化的关系曲线,如图 8a 所示,车辆质心加速度和质心垂直加速度随时间变化的关系曲线,如图 8b 所示。

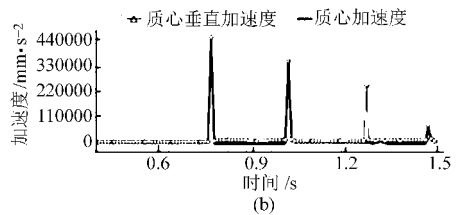
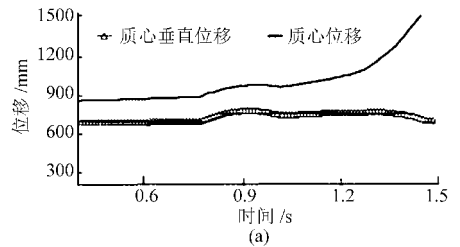


图 8 后驱车辆前轮越过台阶仿真曲线

Fig. 8 Simulation curves of rear wheel drive vehicle climbing obstacle by front wheel

示,车辆质心加速度和质心垂直加速度随时间变化的关系曲线,如图 10b 所示。

设置轮胎半径为 410 mm,台阶高度为 85 mm,对后轮越过台阶的情形进行仿真,得出车辆质心位移和质心垂直位移随时间的变化关系,如图 11a 所示,车辆质心加速度和质心垂直加速度随时间变化的关系曲线,如图 11b 所示。

设置轮胎半径为 410 mm,台阶高度为 65 mm,对后轮越过台阶的情形进行仿真,得出车辆质心位移和质心垂直位移随时间的变化关系曲线,如图 9a 所示,车辆质心加速度和质心垂直加速度随时间变化的关系曲线,如图 9b 所示。

3.2 四轮驱动车辆越过台阶仿真

设置轮胎半径为 350 mm,台阶高度为 240 mm,对前轮越过台阶的情形进行仿真,得出车辆质心位移和质心垂直位移随时间的变化关系,如图 10a 所

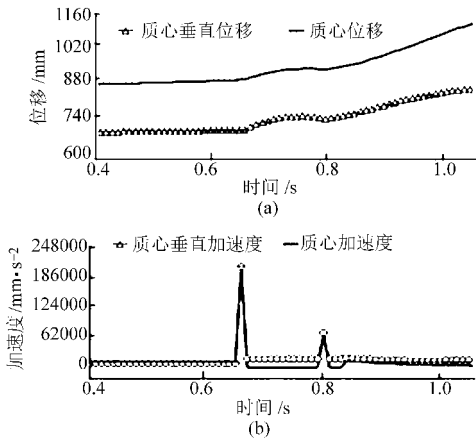


图9 后驱车辆后轮越过台阶仿真曲线

Fig. 9 Simulation curves of rear wheel drive vehicle climbing obstacle by rear wheel

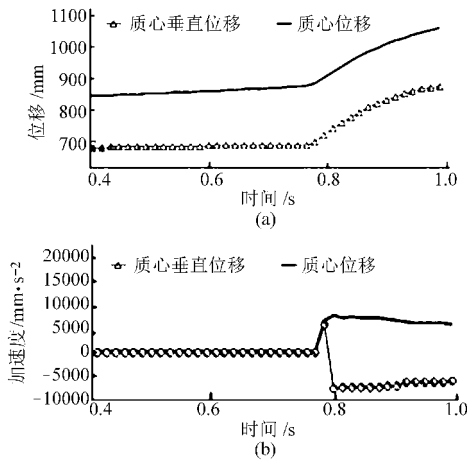


图10 四驱车辆前轮越过台阶仿真曲线

Fig. 10 Simulation curves of four-wheel drive vehicle climbing obstacle by front wheel

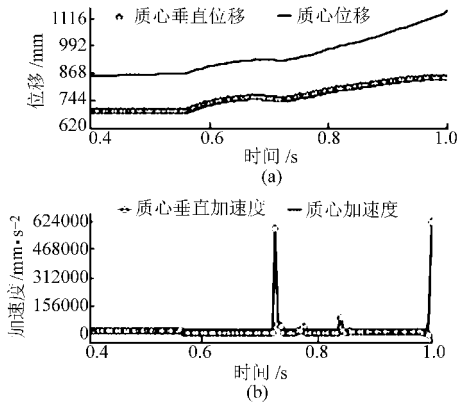


图11 四驱车辆后轮越过台阶仿真曲线

Fig. 11 Simulation curves of four-wheel drive vehicle climbing obstacle by rear wheel

3.3 极限越障高度仿真分析

改变可变直径轮车辆轮子的直径以及相对应台阶的高度,分别对整车后轮驱动与四轮驱动情形进

行仿真,得到如下结果:①后轮驱动车辆前轮越障,车轮半径为315 mm时越过台阶最大高度为152 mm,车轮半径为445 mm时越过台阶的最大高度为268 mm。②后轮驱动车辆后轮越障,车轮半径为315 mm时越过台阶的最大高度为60 mm,车轮半径为445 mm时越过台阶的最大高度为105 mm。③四轮驱动车辆前轮越障,车轮半径为315 mm时越过台阶的最大高度为270 mm,车轮半径为445 mm时越过台阶的最大高度为415 mm。④四轮驱动车辆后轮越障,车轮半径为315 mm时越过台阶的最大高度为115 mm,车轮半径为445 mm时越过台阶的最大高度为150 mm。

4 实验

在轮胎直径最小的状态下对后轮驱动车辆进行了越障验证实验,如图12所示。分别在普通路面和越野路面设置不同的台阶高度,驾驶车辆越过台阶以验证前、后轮的极限越障高度。

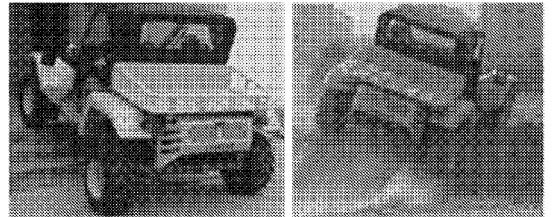


图12 实车实验图片

Fig. 12 Test pictures of real vehicle

实验结果:前轮越过障碍物的最大高度为180 mm,后轮越过障碍物的最大高度为65 mm。实际行驶中轮胎花纹提高了轮胎的附着力,因此比理论计算与仿真分析的结果均大,相对误差在15%以内。可见,理论计算与仿真分析的结果可信。

5 结论

(1) 推导了后驱及四驱可变直径轮车辆由于前后轮直径变化对越障高度影响的力学公式,并对实车进行了理论计算。结果表明:越障轮胎的轮径大小与越障极限高度呈线性正比关系,非越障轮胎的直径变化对极限越障高度影响不大;四轮驱动时车辆越过台阶的高度比后轮驱动高得多,前轮越过台阶的高度比后轮高得多。

(2) 在RecurdynR7V5软件中建立了后驱及四驱整车模型,并分别对其极限越障性能进行了仿真分析,理论计算与仿真分析的结果接近。

(3) 进行了实车验证实验,实验表明理论计算与仿真分析的结果真实可靠。

参 考 文 献

- 1 Gregory D, Michael J. Computational principles of mobile robotics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- 2 Lambrecht B G A, Horchler A D, Quinn R D. A Small insect inspired robot that runs and jumps[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, 2005: 1 240 ~ 1 245.
- 3 Allen T J, Quinn R D, Bachmann R J, et al. Abstracted biological principles applied with reduced actuation improve mobility of legged vehicles[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, LasVegas, 2003: 1 370 ~ 1 375.
- 4 陈殿生,黄宇,王田苗. 轮式腿型机器人的越障分析与仿真[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(3): 371 ~ 375.
Chen Diansheng, Huang Yu, Wang Tianmiao. Obstacle climbing analysis and simulation of wheel-legged robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(3): 371 ~ 375. (in Chinese)
- 5 魏道高,王霄锋,金达锋. 四桥独立悬架车辆越障性能计算研究[J]. 汽车工程,2007,39(6): 816 ~ 819.
Wei Daogao, Wang Xiaofeng, Jin Dafeng. A study on the calculation of the obstacle performance of 4-axle independent suspension vehicles[J]. Automotive Engineering, 2007, 39(6): 816 ~ 819. (in Chinese)
- 6 白琨. 履带式移动机器人越障能力的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学,2007.
Bai Kun. Research on obstacle performance for track mobile robot[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 7 邓宗全,高海波,王少纯,等. 行星轮式月球车的越障能力分析[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(3): 197 ~ 201.
Deng Zongquan, Gao Haibo, Wang Shaochun, et al. Analysis of climbing obstacle capability of lunar rover with planetary wheel [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(3): 197 ~ 201. (in Chinese)
- 8 于涌川,原魁,邹伟. 全驱动轮式机器人越障过程模型及影响因素分析[J]. 机器人,2008,30(1): 1 ~ 6.
Yu Yongchuan, Yuan Kui, Zou Wei. Dynamic model of all-wheel-drive mobile robot climbing over obstacles and analysis on its influential factors[J]. Robot, 2008, 30(1): 1 ~ 6. (in Chinese)
- 9 魏道高,区颖刚,杨丹彤,等. 多桥驱动车辆越障时轴荷动态分配研究[J]. 农业机械学报,2011, 42(2): 39 ~ 42.
Wei Daogao, Ou Yinggang, Yang Dantong, et al. Calculation of dynamic axle-load of 4-axle driven vehicle crossing obstacle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 39 ~ 42. (in Chinese)
- 10 崔莹,高峰. 可变直径轮月球探测车运动学建模与分析[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(3): 348 ~ 352.
Cui Ying, Gao Feng. Kinematic modeling and analysis of variable diameter wheeled lunar rover[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(3): 348 ~ 352. (in Chinese)
- 11 孙刚,高峰,孙鹏. 可变直径轮月球探测车及其越障能力分析[J]. 机械设计,2008,25(5): 21 ~ 23.
Sun Gang, Gao Feng, Sun Peng. Moon detection vehicle with diameter-variable wheels and its obstacle surmounting capability analysis[J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(5): 21 ~ 23. (in Chinese)

(上接第 37 页)

- 4 贾洪雷,陈忠亮,刘昭辰,等. 耕整联合作业工艺及配套机具的研究[J]. 农业机械学报,2001,32(5): 40 ~ 43.
Jia Honglei, Chen Zhongliang, Liu Zhaochen, et al. Study on technology and matching machine for rototilling-tillage combined operation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 40 ~ 43. (in Chinese)
- 5 许剑平,徐涛,毛俐. 1DF-7760 型复式少耕整地机的设计[J]. 农机化研究,2011,33(4): 93 ~ 95,99.
Xu Jianping, Xu Tao, Mao Li. The design of 1DF-7760 multiple-small-tillage equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4): 93 ~ 95,99. (in Chinese)
- 6 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:9 ~ 10, 37.
- 7 孙彦君,司振江,周宙,等. 新型保护性耕作蓄水保墒联合耕整地机械的研发[J]. 水利水电技术,2006, 37(12): 43 ~ 46.
Sun Yanjun, Si Zhenjiang, Zhou Zhou, et al. Development of new type conservative combined rototilling tillage machine for storage and preservation of soil moisture [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(12): 43 ~ 46. (in Chinese)
- 8 Li Y X, Tullberg J N, Freehaim D M. Wheel traffic and tillage effects on soil physical properties[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 97(2): 282 ~ 292.
- 9 Temesgen M, Hoogmoed W, Rockstrom J, et al. Conservation tillage implements for small holder farmers in semi-arid ethiopia [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004: 210 ~ 217.
- 10 Manian R. Development and evaluation of an active-passive tillage machine [J]. AMA,2001,33(1): 16 ~ 22.
- 11 陈智,麻硕士,赵永来,等. 保护性耕作农田地表风沙流特性[J]. 农业工程学报,2010,26(1): 118 ~ 122.
Chen Zhi, Ma Shuoshi, Zhao Yonglai, et al. Characteristics of drifting sand flux over conservation tillage field[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 118 ~ 122. (in Chinese)
- 12 William R G, Alvin C B, 杜森,等. 耙片曲率对入土性能的影响[J]. 粮油加工与食品机械,1983(8): 12.
- 13 张才权. 水田耙星形耙片几何参数的研究[J]. 农业机械学报,1979,10(2): 86 ~ 95.
Zhang Caiquan. Research of geometric parameters of star-shape disc for paddy field harrow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(2): 86 ~ 95. (in Chinese)