

多桥驱动车辆越障时轴荷动态分配研究*

魏道高¹ 区颖刚² 杨丹彤² 刘庆庭²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009;
2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

【摘要】 轴荷动态分配规律是影响多桥驱动非路面车辆可靠性的主要因素,为了获得越障时的轴荷,建立了四桥驱动越障时轴荷动态分配动力学模型。对某型四桥驱动山地车辆进行了计算与分析,获得附着系数 φ 为 0.1~1.0 越障时各桥轴荷分配量,结果表明,该车辆越障时轴荷动态分配值差异较大,第4桥轴荷总是呈现较大值,导致各桥的疲劳寿命不一致。

关键词: 非路面车辆 越障 轴荷 可靠性
中图分类号: U463.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)02-0039-04

Calculation of Dynamic Axle-load of 4-axle Driven Vehicle Crossing Obstacle

Wei Daogao¹ Ou Yinggang² Yang Dantong² Liu Qingting²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China
2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract

A 4-axle driven hill-terrain vehicle was made in China. To improve the vehicle fatigue strength and reliability, the dynamics models of 4 axle-load were founded when it crossing obstacle. According to the dynamics models, the axle-load distributions of the vehicle crossing obstacle were calculated when off-road adhesion coefficient φ is 0.1~1.0. The results showed its axle-load distributions had more different among 4-axle when the vehicle crossing obstacle, the distribution law was analyzed. The design of 4-axle different strength and improving the 4-axle strength was put forward. The paper provided a mathematic model for reliability design and optimizing distribution of torque when the hill-ground crossing obstacle.

Key words Off-road vehicle, Crossing obstacle, Axle-load, Reliability

引言

公路车辆可靠性试验与理论研究起步较迟,但发展很快,而非路面车辆对此研究进展较缓^[1-2]。我国有大面积的滩涂与丘陵有待开发,需要耐久性与通过性较好的非路面车辆,对于多桥驱动山地越野车,越障是其主要行驶工况,越台阶时各桥动态轴荷差异较大,导致各桥所受动载荷与驱动能力有较大差异,车桥受到的冲击载荷是导致其疲劳损伤的主要因素,而对轴荷动态分配值的精确计算一直是

难题^[3-5]。本文通过建立四桥驱动车辆越障时轴荷动态分配的动力学模型,对该山地越野车辆进行数值计算与分析,为车桥的可靠性设计提供理论依据^[2,6]。

1 越障动力学模型

该四桥驱动车辆左右对称,可简化为图1所示的1/2模型,设相邻两桥轴距相等,为 L_1 ,忽略阻尼作用,将轮胎和悬架线刚度简化为弹簧,整车质量简化为集中质量。为了分析各桥越障轴荷动态分配规律,分别建立各桥车轮越台阶时动力学模型。

收稿日期: 2009-12-10 修回日期: 2010-02-10
* 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室开放基金资助项目(KF200707)
作者简介: 魏道高,副教授,主要从事车辆设计及系统动力学研究,E-mail: weidaogao@163.com

1.1 第 1 桥越障轴荷计算模型

该车辆第 1 桥越台阶物理模型如图 1a 所示。以 O_1 为坐标原点,建立直角坐标 XO_1Y ,由 $\sum F_x = 0$ 、 $\sum F_y = 0$ 和 $\sum M_{O_1} = 0$ 建立其力与力矩动力学平

衡方程式,以及由各悬架弹簧变形量与车辆结构参数关系得到的补充方程联立方程组,求解车辆第 1 桥越台阶时各桥轴荷分配,具体推导过程见文献[3,7]。

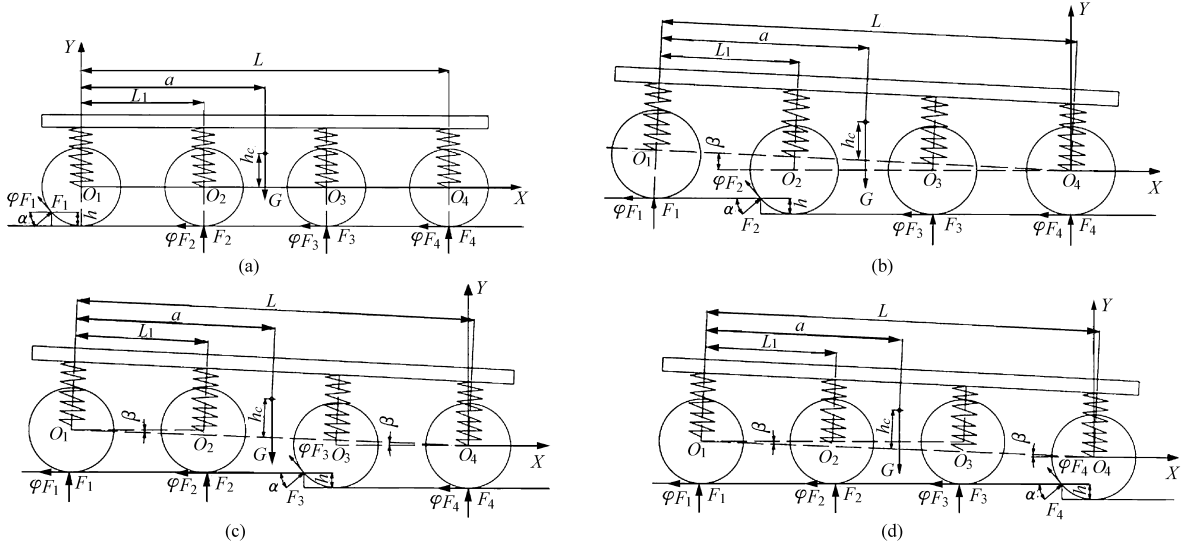


图 1 各桥依次越台阶受力分析图

Fig.1 Schematic chart of force with 4-axle crossing obstacle

(a) 第 1 桥 (b) 第 2 桥 (c) 第 3 桥 (d) 第 4 桥

$$\begin{cases} F_1(\varphi \sin \alpha - \cos \alpha) + \varphi(F_2 + F_3 + F_4) = 0 \\ F_1(\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) + F_2 + F_3 + F_4 - G = 0 \\ (F_1 + F_2 + F_3 + F_4)\varphi R - \\ (F_2 + 2F_3 + 3F_4)L_1 + Ga = 0 \\ (L - L_1)F_1(\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) - LF_2 + L_1F_4 = 0 \\ (L - 2L_1)F_1(\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) - LF_3 + 2L_1F_4 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} G_{11} = F_1(\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) \\ G_{12} = F_2 \\ G_{13} = F_3 \\ G_{14} = F_4 \end{cases} \quad (2)$$

式中 G_{11} 、 G_{12} 、 G_{13} 、 G_{14} ——第 1 桥越台阶时各桥轴荷, N

式(1)、(2)即为动力学模型。

1.2 第 2、3、4 桥越障轴荷计算模型

根据图 1,同理 1.1 节,可得第 2、3、4 桥越台阶时各桥轴荷分配的动力学模型。

1.2.1 第 2 桥计算模型

第 2 桥越台阶时,建立其力与力矩动力学平衡方程式,以及各悬架弹簧变形量与车辆结构参数关系补充方程的联立方程组

$$\begin{cases} \varphi(F_1 + F_3 + F_4) + F_2(\varphi \sin \alpha - \cos \alpha) = 0 \\ F_1 + F_2(\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) + F_3 + F_4 - G = 0 \\ F_1(\varphi R \sin \alpha + L \cos \beta) + F_2[(L - L_1) \cos \beta(\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) + \\ \varphi R] + \varphi R(F_3 + F_4) - G[(L - a) \cos \beta - h \sin \beta] = 0 \\ F_1(\cos \beta - \varphi \sin \beta)(L_1 - L) + F_2[\sin(\alpha + \beta) + \varphi \cos(\alpha + \\ \beta)]L - F_4(\cos \beta - \varphi \sin \beta)L_1 + L(L - L_1) \tan \beta = 0 \\ F_1(\cos \beta - \varphi \sin \beta)(2L_1 - L) + F_3(\cos \beta - \varphi \sin \beta)L - \\ 2F_4(\cos \beta - \varphi \sin \beta)L_1 + L(L - 2L_1) \tan \beta = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\alpha = \arcsin\left(1 - \frac{h}{R}\right)$

式中 F_1 ——台阶作用于第 1 桥车轮地面的反作用力, N

F_2 、 F_3 、 F_4 ——第 2、3、4 桥车轮所受地面垂直反力,数值上等于各桥轴荷

φ ——地面附着系数

R ——轮胎半径, m

L_1 ——第 1 桥至第 2 桥轴距, m

L ——车辆第 1 桥至第 4 桥总轴距, m

a ——整车质心到第 1 桥轴心距离, m

α ——台阶对轮胎反作用力与水平面夹角, rad

h ——第 1 桥在一定的地面附着系数工况下越障高度, m

由式(1)可求得第 1 桥越台阶时,各桥轴荷为

其中

$$\beta = \arcsin \frac{h}{L}$$

式中 F_2 ——台阶作用在第 2 桥车轮的地面反作用力, N

F_1 、 F_3 、 F_4 ——第 1、3、4 桥车轮所受地面垂直反力, 数值上等于各桥轴荷, N

β —— O_1O_4 连线与水平面夹角, rad

h_c ——整车质心到 O_1O_4 连线的垂直距离, m

由式(3)可求得第 2 桥越台阶时, 各桥轴荷为

$$\begin{cases} G_{21} = F_1 \\ G_{22} = F_2 (\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) \\ G_{23} = F_3 \\ G_{24} = F_4 \end{cases} \quad (4)$$

式中 G_{21} 、 G_{22} 、 G_{23} 、 G_{24} ——第 2 桥越台阶时各桥轴荷, N

1.2.2 第 3 桥计算模型

第 3 桥越台阶时, 建立其力与力矩动力学平衡方程式, 以及各悬架弹簧变形量与车辆结构参数关系补充方程的联立方程组

$$\begin{cases} \varphi(F_1 + F_2 + F_4) + F_3(\varphi \sin \alpha - \cos \alpha) = 0 \\ F_1 + F_2 + F_3(\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) + F_4 - G = 0 \\ F_1(\varphi R \sin \alpha + L \cos \beta) + F_2[\varphi R \sin \alpha + (L - L_1) \cos \beta] + \\ F_3[(\sin \alpha + \varphi \cos \alpha)(L - 2L_1) \cos \beta + \varphi R] + \\ \varphi R F_4 - G[(L - a) \cos \beta - h_c \sin \beta] = 0 \\ F_1(\cos \beta - \varphi \sin \beta)(L_1 - L) + F_2(\cos \beta - \varphi \sin \beta)L - \\ F_4(\cos \beta - \varphi \sin \beta) - LL_1 \tan \beta = 0 \\ F_1(\cos \beta - \varphi \sin \beta)(2L_1 - L) + F_3[\sin(\alpha + \beta) + \varphi \cos(\alpha + \beta)]L - 2F_4(\cos \beta - \varphi \sin \beta)L_1 + 2LL_1 \tan \beta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 F_3 ——台阶作用在第 3 桥车轮的地面反作用力, N

F_1 、 F_2 、 F_4 ——第 1、2、4 桥车轮所受地面垂直反力, 数值上等于各桥轴荷, N

由式(5)可求得第 3 桥越台阶时, 各桥轴荷为

$$\begin{cases} G_{31} = F_1 \\ G_{32} = F_2 \\ G_{33} = F_3 (\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) \\ G_{34} = F_4 \end{cases} \quad (6)$$

式中 G_{31} 、 G_{32} 、 G_{33} 、 G_{34} ——第 3 桥越台阶时各桥轴荷, N

1.2.3 第 4 桥计算模型

第 4 桥越台阶时, 建立其力与力矩动力学平衡方程式, 以及各悬架弹簧变形量与车辆结构参数关系补充方程的联立方程组

$$\begin{cases} \varphi(F_1 + F_2 + F_3) + F_4(\varphi \sin \alpha - \cos \alpha) = 0 \\ F_1 + F_2 + F_3 + F_4(\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) - G = 0 \\ F_1(\varphi R \sin \alpha + L \cos \beta) + F_2[\varphi R \sin \alpha + (L - L_1) \cos \beta] + \\ F_3[\varphi R \sin \alpha + (L - 2L_1) \cos \beta] + \\ \varphi R F_4 - G[(L - a) \cos \beta - h_c \sin \beta] = 0 \\ F_1(\cos \beta - \varphi \sin \beta)(L_1 - L) + F_2(\cos \beta - \varphi \sin \beta)L - \\ F_4[\sin(\alpha + \beta) + \varphi \cos(\alpha + \beta)]L_1 - LL_1 \tan \beta = 0 \\ F_1(\cos \beta - \varphi \sin \beta)(2L_1 - L) + F_3(\cos \beta - \varphi \sin \beta)L - \\ 2F_4[\sin(\alpha + \beta) + \varphi \cos(\alpha + \beta)]L_1 - 2LL_1 \tan \beta = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 F_4 ——台阶作用在第 4 桥车轮地面的反作用力, N

F_1 、 F_2 、 F_3 ——第 1、2、3 桥车轮所受地面垂直反力, 数值上等于各桥轴荷, N

由式(7)可求得第 4 桥越台阶时, 各桥轴荷为

$$\begin{cases} G_{41} = F_1 \\ G_{42} = F_2 \\ G_{43} = F_3 \\ G_{44} = F_4 (\sin \alpha + \varphi \cos \alpha) \end{cases} \quad (8)$$

式中 G_{41} 、 G_{42} 、 G_{43} 、 G_{44} ——第 4 桥越台阶时各桥轴荷, N

2 样车越障动态轴荷计算与分析

2.1 样车越障动态轴荷计算

以国产某型四桥驱动的山地越野车作为计算实例, 地面附着系数 φ 取为 0.1 ~ 1.0, 计算样车越障动态轴荷所需参数为: $G = 27 \text{ kN}$; $L_1 = 800 \text{ mm}$; $L = 2400 \text{ mm}$; $a = 1240 \text{ mm}$; $h_c = 740 \text{ mm}$; $R = 318 \text{ mm}$ 。应用所建立的该车越台阶动力学表达式(1) ~ (8), 计算样车第 1、2、3、4 桥分别越台阶时各桥轴荷与附着系数关系如图 2 所示。

2.2 计算结果分析

由图 2a 可见, 第 1 桥越台阶时, 第 3、4 桥轴荷随着地面附着系数增加而增加, 其中第 4 桥增加的趋势最大。第 1、2 桥轴荷随地面附系数增加而减小, 其中第 1 桥减小的趋势最大。在 φ 为 0.1 时各桥轴荷分别为 $G_{11} = 6425 \text{ N}$ 、 $G_{12} = 6642 \text{ N}$ 、 $G_{13} = 6858 \text{ N}$ 、 $G_{14} = 7075 \text{ N}$, 可见各桥轴荷相近。在 φ 为 1.0 时各桥的轴荷分别为 $G_{11} = 1579 \text{ N}$ 、 $G_{12} = 5026 \text{ N}$ 、 $G_{13} = 8474 \text{ N}$ 、 $G_{14} = 11922 \text{ N}$, 其中第 4 桥较第 1 桥轴荷大 10343 N, 可见第 1、4 桥轴荷随着附着系数增加, 轴荷变化差异更大。

由图 2b 可见, 第 2 桥越台阶时, 第 1、3、4 桥轴荷随着地面附着系数增加而增加, 其中第 3、4 桥增加的趋势相近。第 2 桥轴荷随地面附着系数增加而

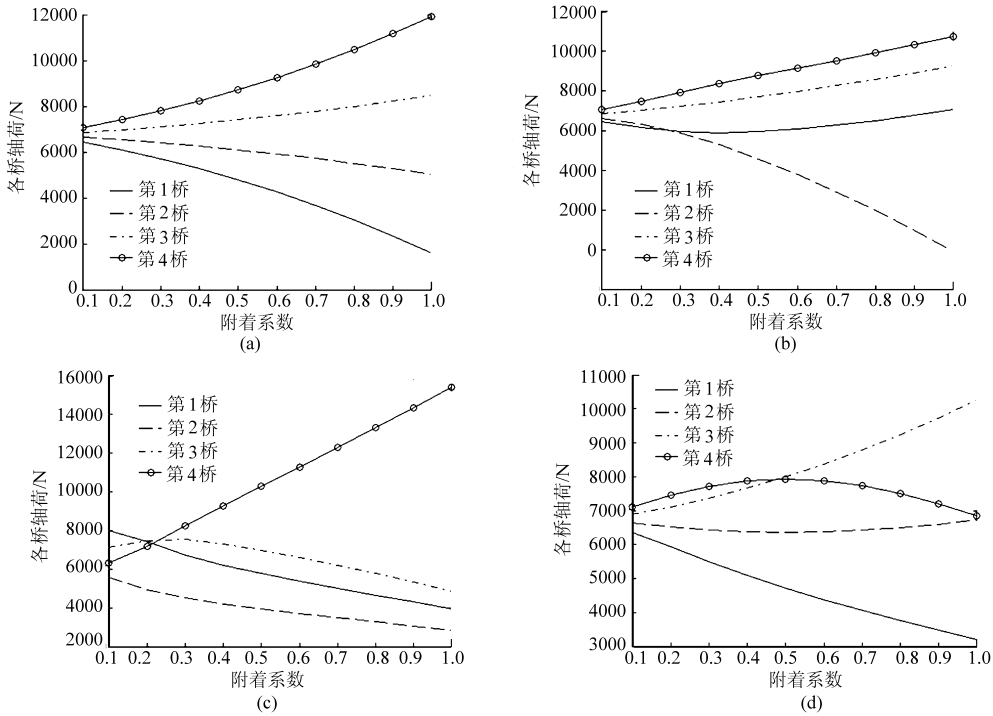


图 2 各桥分别越台阶时轴荷与附着系数关系曲线

Fig. 2 Relationships between axle-load and adhesion coefficient with 4-axle crossing obstacle

(a) 第 1 桥 (b) 第 2 桥 (c) 第 3 桥 (d) 第 4 桥

急剧下降。在 φ 为 0.3 时各桥的轴荷差异不大,在 $\varphi=0.6$ 时各桥的轴荷分别为 $G_{21}=6\ 085\text{ N}$ 、 $G_{22}=3\ 772\text{ N}$ 、 $G_{23}=7\ 983\text{ N}$ 、 $G_{24}=9\ 160\text{ N}$,其中第 2 桥轴荷低于第 1、3、4 车桥,且随着附着系数增加与其他桥轴荷差异逐渐加大。

由图 2c 可见,第 3 桥越台阶时,第 1、2、3 桥轴荷随着地面附着系数增加而减小,而且变化的趋势相近,第 4 轴荷随着地面附着系数增加而急剧上升,但在 φ 为 0.3 之前各桥的轴荷差异不大,在此值之后第 1 桥与第 2、3、4 桥差异加大。 $\varphi=0.6$ 时各桥的轴荷分别为 $G_{31}=5\ 382\text{ N}$ 、 $G_{32}=3\ 715\text{ N}$ 、 $G_{33}=6\ 612\text{ N}$ 、 $G_{34}=11\ 292\text{ N}$,其中第 4 桥较第 2 桥轴荷大 $7\ 577\text{ N}$,在 $\varphi=0.6$ 之后第 4 桥与第 1、2、3 桥轴荷差异逐渐加大。

由图 2d 可见,第 4 桥越台阶时,第 1 桥轴荷随着地面附着系数增加而急剧地近似线性下降。第 2 桥轴荷变化很小,在 φ 为 0.1~1.0 范围内 $G_{42}=(6\ 400\pm100)\text{ N}$ 。第 3 桥轴荷随着地面附着系数增加而增加。第 4 桥轴荷在 φ 为 0.5 之前随着地面附着系数增加,在 φ 为 0.5 之后随地面附着系数增加

而减小,在 φ 为 0.4、0.5、0.6 时 G_{44} 分别为 $7\ 876\text{ N}$ 、 $7\ 925\text{ N}$ 、 $7\ 874\text{ N}$,呈现出以 (0.5, 7 925) 为顶点、开口向下的抛物线型非线性变化趋势。

由以上分析可见,该类山地越野车在各桥分别越台阶时第 4 桥轴荷总是呈现较大值。因此,该样车车桥需要进行非等强度设计,加强第 4 桥的强度设计。

3 结论

(1)建立了四桥驱动车辆越障时轴荷动态分配计算数学模型。

(2)应用建立的计算模型对某型山地越野车越台阶时轴荷动态分配进行了数值计算,该车辆在同一附着系数下某桥越障时各桥轴荷分配差异较大,随着附着系数增加轴荷分配差异加大;当不同桥越障时轴荷分配差异不同,第 4 桥轴荷总是呈现较大值。需要对该样车车桥进行非等强度设计,加强第 4 桥的强度设计。

(3)获得的样车轴荷变化规律能为该类车辆越障时各桥功率优化分配提供数学模型。

参 考 文 献

1 魏道高. HN2500 滩涂车设计与试验研究[D]. 广州:华南农业大学,1999.
Wei Daogao. Research on the design of HN2500 shore-vehicle[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 1999.
(in Chinese)

- fluid dampers[J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5(5): 576 ~ 590.
- 4 刘伟,刘大维,陈焕明,等. 基于联合仿真的半主动悬架车辆行驶平顺性研究[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(6): 16 ~ 22.
Liu Wei, Liu Dawei, Chen Huanming, et al. Ride comfort of MR-damper semiactive suspension systems based on co-simulations[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(6): 16 ~ 22. (in Chinese)
- 5 周燕. 基于磁流变阻尼器的汽车半主动悬架的神经模糊控制[J]. *南京理工大学学报:自然科学版*, 2008, 32(6): 715 ~ 718.
Zhou Yan. Neuro-fuzzy control of semi-active vehicle suspension system with magneto-rheological-damper[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science*, 2008, 32(6): 715 ~ 718. (in Chinese)
- 6 Boada M J L, Calvo J A, Boada B L, et al. Modeling of a magnetorheological damper by recursive lazy learning[J]. *International Journal of Non-linear Mechanics*, In Press, Corrected Proof, 2008.
- 7 Kwok N M, Ha Q P, Nguyen T H, et al. A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132(2): 441 ~ 451.
- 8 杨礼康,潘双夏,王维锐,等. 磁流变减振器滞回特性试验及建模方法[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(11): 138 ~ 143.
Yang Likang, Pan Shuangxia, Wang Weirui, et al. Experiment and modeling research on hysteretic loop of magnetorheological damper[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(11): 138 ~ 143. (in Chinese)
- 9 Metered H, Bonello P, Oyadiji S O. The experimental identification of magnetorheological dampers and evaluation of their controllers[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(4): 976 ~ 994.
- ~~~~~

(上接第 42 页)

- 2 王霄锋. 汽车可靠性工程基础[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- 3 魏道高. 4×4 特种车辆横向与转向行驶稳定性计算及 8×8 车辆通过性研究[R]. 北京:清华大学博士后研究报告, 2006.
Wei Daogao. The calculation of stability of a 4×4 special vehicle steering run and across function of a 8×8 off-road vehicle [R]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
- 4 李幼德,李弼,邓怀庆. 松软地面驱动轴荷变化的研究[J]. *吉林工业大学学报*,1990,20(3):6 ~ 13.
Li Youde, Li Reng, Deng Huaiqing. Dynamic axle weightts of vehicles runing on soft surfaces[J]. *Journal of Jilin University of Technology*, 1990,20(3):6 ~ 13. (in Chinese)
- 5 魏道高,区颖刚,洪添胜. HN2500 滩涂车设计研究[C]//全国第 9 届土壤地面机器系统会议论文集,广州,1998.
Wei Daogao, Ou Yinggang, Hong Tiansheng. Research on the design of HN2500 shore-vehicle[C]//Proceeding of Ninth Terrain-Machinery System Conference, Guangzhou, 1998. (in Chinese)
- 6 Bekker M G. Prediction of design and performance parameters in agro-forestry vehiche[R]. National Research Council of Canada, Ottawa, 1983.
- 7 魏道高,王霄锋,金达锋,等. 四桥独立悬架车辆越障性能计算研究[J]. *汽车工程*,2007,29(3):816 ~ 818,822.
Wei Daogao, Wang Xiaofeng, Jin Dafeng, et al. A study on the calculation of the cross obstacle performance of 4-axle independent suspension vehicles[J]. *Automotive Engineering*, 2007,29(3):816 ~ 818,822. (in Chinese)