

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.001

不平整路面履带车辆动力传动系统扭转随机激励研究*

刘辉 符升平 项昌乐

(北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081)

【摘要】 为计算分析履带车辆传动系统扭转随机激励,以标准路面不平度统计特征为基础,实现路面激励时频转换。同时分析扭转随机激励产生机理,提出其理论计算公式,并且通过对相关部件模型的数学抽象,建立不同路面下履带整车动力学模型。通过实例仿真得到某履带车辆扭转随机激励谱,探讨了路面不平度、车速和预张紧力对其产生的影响。研究表明,路面不平度和车速是影响扭转随机激励的主要因素。

关键词: 路面不平度 履带车辆 传动系统 扭转随机激励

中图分类号: TH132; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0001-06

Torsional Random Excitation of Tracked Vehicle Powertrain System Caused by Road Roughness

Liu Hui Fu Shengping Xiang Changle

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract

To analyze the torsional random excitation of tracked vehicle powertrain system, the road surface excitation was transferred from frequency region to time region based on given the statistical characteristics of road roughness. The root of torsional random excitation was investigated and theoretic calculating formula was proposed. Then the dynamics model of tracked vehicle was constructed under different road surface by abstracting each element of the vehicle mathematically. The torsional random excitation spectrum was numerically calculated. The effects of road roughness, vehicle velocity and pre-tension having on torsional random excitation were deeply studied. The investigated results indicated that the road roughness and tracked vehicle speed were the main factors to determine the value of torsional random excitation.

Key words Road roughness, Tracked vehicle, Powertrain system, Torsional random excitation

引言

在履带车辆行驶过程中,普遍存在着由路面不平度引起的动力传动系统扭转随机振动,并且影响传动系统的动态性能和使用寿命。在以往路面激励研究中^[1~3],主要集中对各种路面下整车的平顺性、通过性和转向性进行讨论,即分析路面激励对整车各方向动态性能的影响,没有把路面当作动力传动系统扭转随机激励源来处理;在以往动力传动系统

扭振外部激励研究中^[4~5],只对引起周期扭振的发动机波动扭矩进行分析计算,忽略不平路面引起的随机扭振。因此研究不同路面下履带车辆动力传动系统扭转随机激励,对深入分析传动系统扭振特性以及疲劳载荷有一定的价值。

履带车辆是一复杂的非线性多体系统,对其进行必要简化后,通过履带的传递,路面激励对主动轮产生一反力矩,其在理论上即为传动系统扭转随机激励,因此激励大小和分布与履带动态张紧力有关。

收稿日期:2009-12-17 修回日期:2010-02-05

* 基础预研基金项目(40402060103)

作者简介:刘辉,副教授,主要从事车辆传动系统振动与应用研究,E-mail:lh@bit.edu.cn

本文以某履带车辆为例,通过路面不平度的时频转换,在 Recurdyn 中建立整车和路面模型,对不同路面、车速和预张紧力下的扭转随机激励进行对比分析。

1 路面不平度的时频转换

采用时域分析法对整车进行动力学计算时,需要得到路面不平度输入的时域值,因此需要对路面不平度的频域表达式进行时频转换。作为输入的路面不平度,主要采用路面功率谱密度描述其统计特性^[6]。大量试验测量表明,路面不平度是具有零均值、各态历经的平稳高斯随机过程^[7],且路面功率谱密度拟合公式为

$$G_q(n) = G_q(n_0)(n/n_0)^{-W} \quad (n_l \leq n \leq n_u) \quad (1)$$

式中 n ——空间频率, m^{-1} , $n > 0$

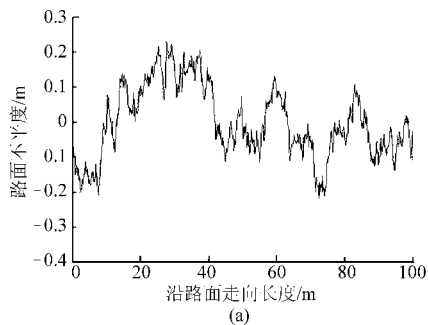
n_0 ——参考空间频率, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$

n_u, n_l ——路面谱的上、下限空间频率

$G_q(n_0)$ ——参考空间频率 n_0 下的路面功率谱密度, m^3 , 其大小由路面等级确定

W ——频率指数, 取 $W = 2$

由于计算快,精度高,采用文献[7]提出的路面不平度模拟方法。基于功率谱密度 $G_q(n)$ 、路面不平度采样值 q_m 及其离散傅里叶变换 Q_k 之间的数学关系,直接对功率谱密度进行研究。



$$\begin{cases} Q_k = \sum_{m=0}^{N-1} q_m e^{-\frac{j2\pi km}{N}} & (k = 0, 1, \dots, N-1) \\ |Q_k| = \sqrt{\frac{N}{2\Delta l} G_q(n_k)} & (k = 0, 1, \dots, N/2) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$n_k = k\Delta n$$

式中 N ——采样点数

Δl ——采样间隔

Δn ——采样的空间频率分辨率

由于式(2)只能计算路面不平度的幅值,因此再通过相位的随机取样以及采样数据的修补等处理得到路面不平度的时域值 q_m , 其结果能反映其幅值和相位等重要特征。

根据国标 GB/T7031—2005,路面不平度按路面功率谱密度分为 A~H 共 8 个等级。履带车辆经常进行试验的田野地相当于 F 级,碾压损坏的路面相当于 G 级^[8]。因此以 F、G 路面为例,利用上述方法在 Matlab 中进行数值模拟,得到路面不平度在时域上的数学描述,如图 1 所示。

对数值模拟得到的随机路面谱进行功率谱分析得到功率谱密度曲线,如图 2 所示。由图可知,通过功率谱密度理论值与数值计算值的对比,模拟精度均较高,说明通过此方法可以对路面不平度进行很好的模拟。

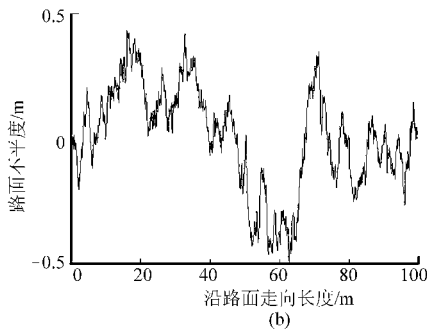


图 1 F 和 G 级路面不平度时域曲线

Fig. 1 Road roughness of F and G grade

(a) F 级路面 (b) G 级路面

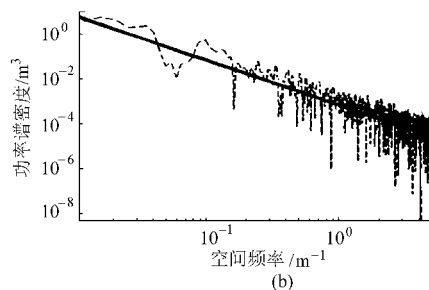
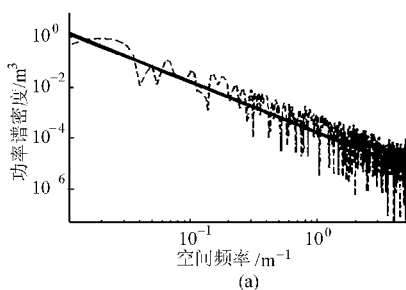


图 2 F 和 G 级路面理论与数值模拟功率谱密度对比图

Fig. 2 Contrast of theoretic PSD and that of numerical simulation

(a) F 级路面 (b) G 级路面

2 扭转随机激励理论分析

由于无法直接求解扭转随机激励,因此需对其进行理论分析,提出计算方法。动力力矩由发动机通过动力传动系统传递到主动轮上,驱使履带车辆运动,在车辆行驶时,路面通过履带给主动轮施加一反力矩,因此通过主动轮的动力学模型(图 3 所示)来分析路面对传动系统产生的扭转随机激励。

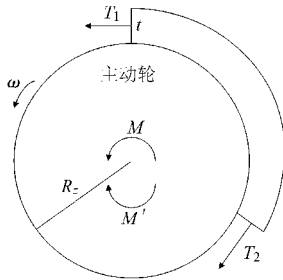


图 3 主动轮动力学模型

Fig. 3 Dynamics model of driver

假设履带与主动轮之间没有滑动,有

$$\begin{cases} (T_1 - T_2)(R_z + t/2) = M' \\ M - M' = J_z \dot{\omega} \end{cases} \quad (3)$$

式中 T_1, T_2 ——履带张紧力

R_z ——主动轮半径

t ——履带厚度

M' ——履带对主动轮反力矩

M ——主动力矩

J_z ——等效主动轮转动惯量

ω ——主动轮转速

从式(3)看出,路面不平度通过履带传递给主动轮反力矩 M' ,且与履带动态张紧力和主动轮运动状态有关。因此,通过修改主动轮运动学参数以及调整履带预张紧力,研究不同条件对动力传动系统扭转激励的影响。

3 履带车辆动态模型

由于本文主要研究不同路面对履带车辆动力传动系统产生的随机扭转激励,因此与研究关系较小的炮塔、武器系统、防护系统质量等效到视为刚体的车体上。建立系统多体动力学模型时,利用模块化建模思想,首先对各子系统进行分析,然后通过相关运动约束的施加,使之合为一体化。

3.1 各部件模型抽象

3.1.1 推进装置模型

推进装置是保证车辆正常行驶,提高越野能力和机动性能的主要部件。由于自铺路面的特殊性,履带车辆地面接触力学有别于轮式和轨道车辆。地面、履带与负重轮之间存在复杂的接触动态特性;履

带直接接受与调节地面接触力;通过履带的传递,负重轮间接与地面相互作用。假设地面为硬路面,每块履带板为刚体,建立如图 4 所示的推进装置模型,并且对履带板之间的相互作用和地面-履带-负重轮之间的相互关系进行数学描述。

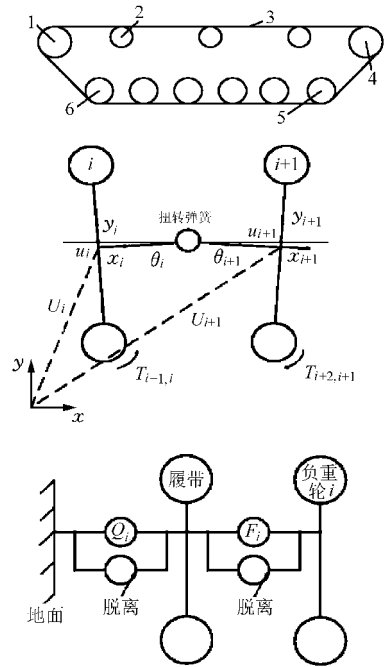


图 4 推进装置模型

Fig. 4 Dynamic model of pushing mechanism

1. 主动轮 2. 拖带轮 3. 履带 4. 诱导轮 5. 负重轮 6. 负重轮 1

每块履带视为刚体,各履带板之间相互作用等效为转动副连接,用扭转弹簧控制两履带板相对角位移的关系。履带板间的约束关系为

$$\begin{cases} U_i + P_i u_i = U_{i+1} + P_{i+1} u_{i+1} \\ T_{i+2,i+1} + T_{i-1,i} = k_{i,i+1}(\theta_{i+1} + \theta_i) \end{cases} \quad (4)$$

式中 U_i ——第 i 块履带板的相对坐标系在整体坐标系中的位置

P ——坐标转换矩阵

u_i ——第 i 块履带板在相对坐标系中的位置

$T_{i,j}$ ——第 i 块履带板对第 j 块履带板的转矩

$k_{i,i+1}$ ——扭转第 i 块和 $i+1$ 块履带板间的弹簧刚度

θ_i ——第 i 块履带板在整体坐标系中的转角

在车辆行驶过程中,由于路面、履带和负重轮相互碰撞,三者之间相互接触或者分离。只有当履带与负重轮接触时,才产生接触力 F_i ,其大小对履带运动稳定性有很大影响^[9],且第 i 负重轮与履带之间的摩擦力大小为

$$F_i = \text{sign}(\dot{u}) f_r |F_{pi}| \quad (5)$$

其中 $\text{sign}(\dot{u}) = \begin{cases} 1 & (\dot{u} \geq 0) \\ -1 & (\dot{u} < 0) \end{cases}$

式中 u ——负重轮与履带接触点相对速度
 f_r ——履带与负重轮之间的摩擦因数
 F_{pi} ——第 i 负重轮与履带接触正压力
 当路面与履带接触时,采用基于 Hertz 接触理论的碰撞力计算公式^[2]

$$F_{pi} = -k'(q - q_0)^n - cq \quad (6)$$

式中 k' ——碰撞刚度
 c ——碰撞阻尼
 q_0 ——两物体间初始距离
 q ——两物体碰撞时实际距离
 n ——碰撞力指数

k' 、 c 可根据碰撞物体的形状及材料参数确定,试验研究表明当 n 为 2~3 时,所建模型能够较快地收敛^[2]。

3.1.2 悬挂装置模型

悬挂装置能够实现推进装置和车体间的弹性连接,传递力和力矩,减弱车体的振动,一般由弹性元件、减振器和其他辅助零件组成。根据所研究履带车辆悬挂系统的布置特点,即在首尾负重轮上采用油气悬挂,且安装有减振器,在其他负重轮上采用扭杆式悬挂,采用弹簧阻尼器模拟弹性阻尼元件(图 5 所示)。

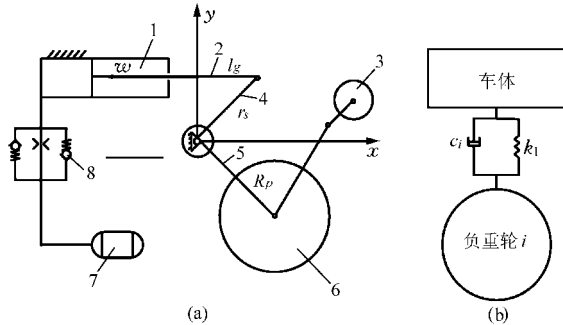


图 5 首尾负重轮悬挂装置模型

Fig. 5 Dynamic model of suspension
 (a) 结构简图 (b) 悬架动力学模型

1. 动力缸 2. 连杆 3. 减振器 4. 曲柄 5. 平衡肘 6. 负重轮 i
7. 储能器 8. 减振阀

根据弹簧阻尼串并联关系有

$$\begin{cases} \frac{1}{k_i} = \frac{1}{k_1} \\ c_i = c_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中 k_1 ——油气悬挂对应的悬挂刚度
 c_3 ——减振器对应的悬挂阻尼系数
 油气悬挂装置刚度表达式为

$$k_i = C'_r i_1^2 + F_i \frac{di_1}{dh} \quad (8)$$

式中 C'_r ——气体弹簧刚度

i_1 ——油气悬挂对应杠杆比

油气悬挂装置有非线性和变刚度的特性,为了简化计算,采用其平均悬挂刚度参与计算。

对于一具体的悬挂装置,用其本身弹性刚度、悬挂装置杠杆系统参数以及负重轮的等效载荷(F_i)来求取悬挂装置的刚度^[8]。扭杆悬挂装置刚度的一般计算式为

$$k_2 = C_r i_2^2 - F_i \frac{di_2}{dh} \quad (9)$$

其中 $\frac{di_1}{dh} = \frac{\sin(\beta_0 - \alpha)}{R_p \cos(\beta_0 - \alpha)}$

式中 C_r ——扭杆刚度
 i_2 ——扭杆杠杆系统杠杆比
 h ——负重轮垂直位移
 β_0 ——平衡肘初始角位移
 α ——平衡肘角位移
 R_p ——平衡肘长度

由于液压减振器本身具有非线性特点,因此首尾负重轮上为可调阻尼,且有

$$c_3 = \lambda c_v \quad (10)$$

式中 λ ——阻尼比

c_v ——履带车辆悬挂设计阻尼系数

因为不同路面最佳阻尼的选取是一个反复计算和试验验证的问题,所以不考虑其变化,且取 $c_3 = c$ 。

在首尾负重轮以外的其他负重轮上方没有设置减振器,参考文献[10],其阻尼系数设为 c_3 的 5%。

3.2 系统模型建立

综合数值计算所得到的路面不平度以及各部件抽象后的数学模型,在 Recurdyn 高速履带模块中,建立某履带车辆多刚体模型。在保证影响计算结果的参数不变的条件下,对某些复杂几何外形的零部件进行简化。通过对各个零部件之间运动约束的施加,以及路面条件和刚度阻尼等内部激励因素的确定,建立履带车辆多体模型,如图 6 所示。

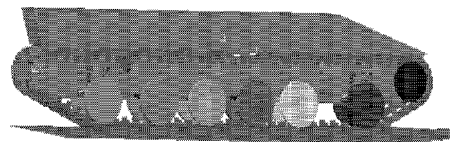


图 6 履带车辆多体模型

Fig. 6 Multi-body model of tracked vehicle

4 实例仿真

基于所建履带车辆整车虚拟样机模型,根据与之匹配的动力系统将动力施加在主动轮上,使车辆保持一定速度行驶;通过改变路面、预张紧力和车速等条件对扭转随机激励进行研究。由于扭转随机激

励与履带动态张紧力有紧密联系,先对在 F 级路面上, $v = 30 \text{ km/h}$ (图 7 所示)、预张紧力为车重 10% 条件下的履带张紧力进行分析 (图 8 所示)。

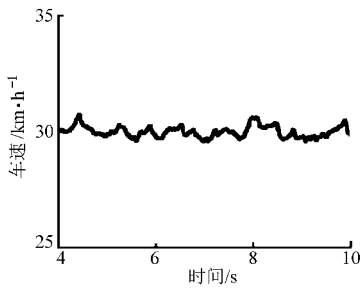


图 7 车辆行驶车速

Fig. 7 Vehicular velocity

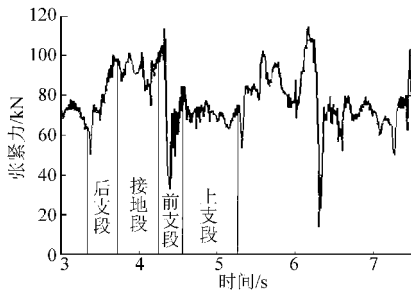


图 8 履带动态张紧力

Fig. 8 Dynamic track tension

由图 7 所示,车辆基本能稳定在某一车速下行驶,其最大误差为 4.73%,符合行驶要求。履带动态张紧力随履带行驶按一定规律运动。图中标出履带各段张紧力变化,由于路面起伏和悬挂装置影响,接地段比上支段波动剧烈。所研究车辆主动轮前置,由图 8 可知,张紧力最小值出现在前支段,即主动轮与负重轮间履带,则此处履带最易脱落。

4.1 路面对扭转随机激励的影响

当车速 $v = 20 \text{ km/h}$ 和预张紧力为车重 10% 时,对比在 A、C 和 F 级路面上动力传动系统受到的扭转随机激励,如图 9 所示,扭转激励受路面影响随机振荡,且在同一车速下其幅值随路面的恶化而明显增加,波动也越剧烈。因为履带动态张紧力随路面恶化加剧呈上升趋势,造成履带与主动轮之间运动关系不稳定,增大了两者相互作用力,即动力传动系

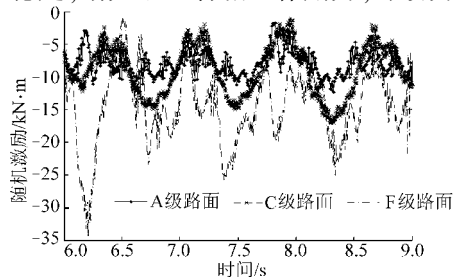


图 9 不同路面下的扭转随机激励

Fig. 9 Random torsional excitation under different road surfaces

统扭转随机激励增大。

4.2 车速对扭转随机激励的影响

使车辆在不同挡位下在 F 级路面上行驶,对应的速度分别为 10 km/h 、 20 km/h 和 30 km/h ,对应的动力扭矩按照发动机净外特性和传动比加载到主动轮上。

由图 10 可知,与不同路面对扭转激励的影响相比较,车速对其幅值影响相对较小。但是在同一路面下,随着车速增加扭转随机激励峰值出现的频率明显增多,这是因为履带运动周期随车速增加而减小。

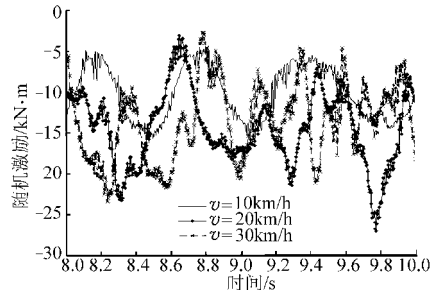


图 10 不同车速下的扭转随机激励

Fig. 10 Random torsional excitation under different vehicular velocity

4.3 预张紧力对扭转随机激励的影响

为了分析预张紧力对随机扭转激励影响,在 F 级路面上, $v = 20 \text{ km/h}$ 条件下,分别取预张紧力为车重的 5%、10% 和 20%。

如图 11 所示,3 条曲线随时间历程变化趋势大致相同,峰值出现的频率和时刻都基本吻合,说明所选路面和车速是决定扭转激励随机变化的主要因素。但是随着预张紧力的增加,扭转激励幅值增大,波动范围加宽,使动力传动系统扭振加剧,因此在保证履带不脱落的情况下,预张紧力越小越好。

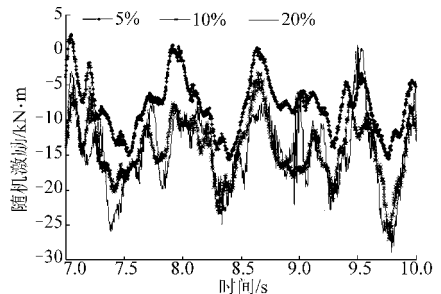


图 11 不同预张紧力下的扭转随机激励

Fig. 11 Random torsional excitation under different pre-tension

5 结论

(1) 提出动力传动系统扭转随机激励的理论计算方法,通过路面谱的时频转换和履带子模型的数学抽象,建立了考虑各内外部激励的履带多体动力学模型,并且基于此模型,对扭转随机激励进行了求解。

(2) 扭转随机激励幅值随所选路面不同而变化较大;车速对扭转随机激励幅值影响相对较小,车速增加使其峰值出现频率增多;预张紧力加大使扭转随机激励波动剧烈,幅值增加,但是不能改变其随时间波动的趋势。

参 考 文 献

- 1 韩宝坤,李晓雷,王昌田,等. 高速履带车辆平稳性能仿真及影响因素分析[J]. 兵工学报,2004,25(5):513~516.
Han Baokun, Li Xiaolei, Wang Changtian, et al. Simulation and analysis of influential factors of ride for high-speed tracked vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2004,25(5):513~516. (in Chinese)
- 2 周云波. 军用车辆机动性虚拟实验技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2007.
Zhou Yunbo. Research on military vehicle mobility virtual experiment technology [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- 3 马吉胜. 履带车辆路面激励响应仿真[J]. 系统仿真学报,2008,20(9):2494~2497.
Ma Jisheng. Simulation of response of tracked vehicle under road excitations[J]. Journal of System Simulation, 2008,20(9):2494~2497. (in Chinese)
- 4 李松和,俞小莉,周迅,等. 斯太尔WD615系列柴油发动机扭振测量与分析[J]. 内燃机工程,2006,27(2):78~80.
Li Songhe, Yu Xiaoli, Zhou Xun, et al. Measurement and analysis of torsional vibration of Syster WD615 series diesel engines [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2006,27(2):78~80. (in Chinese)
- 5 王文平,项昌乐,刘辉. 履带车辆动力传动系统扭振的时域仿真研究[J]. 中国机械工程,2006,17(17):1865~1868.
Wang Wenping, Xiang Changle, Liu Hui. Study on time domain simulation of torsional vibration of caterpillar's powertrain [J]. China Mechanical Engineering, 2006,17(17):1865~1868. (in Chinese)
- 6 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 7 刘献栋,邓志党,高峰. 公路路面不平度的数值模拟方法研究[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(9):843~846.
Liu Xiandong, Deng Zhidang, Gao Feng. Research on the method of simulation road roughness numerically[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003,29(9):843~846. (in Chinese)
- 8 丁发乾. 履带式装甲车辆悬挂系统动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- 9 Corina Sandu. Tracked vehicle modeling[D]. Iowa City, IA: The University of Iowa, 2000.
- 10 韩宝坤,李晓雷,孙逢春. 基于DADS的履带车辆多体模型仿真[J]. 系统仿真学报,2002,14(11):1531~1532.
Han Baokun, Li Xiaolei, Sun Fengchun. Multibody model and simulation of the tracked vehicles based on DADS[J]. Journal of System Simulation, 2002,14(11):1531~1532. (in Chinese)