

履带式推土机动力传动系统推土工况建模与仿真

孙 强, 白书战, 李国祥^{*}, 闫伟

(山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061)

摘 要: 为实现履带式推土机的快速建模, 该文从工作方式、系统结构、动力学等多个角度对履带式推土机进行了分析研究。进一步利用 Matlab\Simulink 对 Cruise 进行二次开发, 在 Cruise 环境中添加了动载荷模块、履带模块、分动箱模块及液压模块。在此基础上, 结合 Cruise 中完善的动力传动系统模型, 实现了履带式推土机直行推土工况的快速建模。利用实车参数对模型标定后进行仿真。推力的仿真结果与试验数据相比, 有 99.2% 的仿真结果误差小于 1%; 滑转率的仿真结果与试验数据相比, 有 71.8% 的仿真结果误差小于 1%。对比结果表明, 模型能够对履带式推土机的直行推土工况进行准确地模拟。

关键词: 模型, 仿真, 履带式推土机, 动载荷, 滑转

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.07.010

中图分类号: U415.51[†]2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-07-0057-05

孙 强, 白书战, 李国祥, 等. 履带式推土机动力传动系统推土工况建模与仿真[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 57-61.

Sun Qiang, Bai Shuzhan, Li Guoxiang, et al. Modeling and simulation of power transmission of crawler bulldozer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 57-61. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

目前, 已经有 Cruise、ADVISOR、PSAT、CarSim 等多种针对轮式车辆仿真的商业软件, 极大地方便了轮式车辆的开发和优化工作^[1-4]。而履带式车辆的动力学建模主要通过 Matlab/simulink 进行, 这些 Simulink 中的模型能够计算履带车辆的各种动力性能参数且计算值与试验值符合良好^[5-10], 但这些模型存在着建模过程繁琐、开发周期长、通用性差的缺点, 目前没有专门针对履带式车辆的快速建模软件。

本文利用 Cruise 结合 Matlab\simulink 实现了履带式车辆的快速建模。由于 Cruise 是针对轮式车辆设计, 故在履带式车辆的建模仿真时不可避免的遇到履带车辆特有的问题, 如: 履带的模拟、动载荷的添加、分动箱及液压模块的模拟以及转向方式的不同等^[11]。本文就前 3 个问题的进行研究并建立了履带式推土机直行工作的整车模型。

1 动载荷的添加

轮式车辆行所受的阻力主要有滚动阻力、空气阻力、坡道阻力和加速阻力, Cruise 对这些阻力均建立了相应的模型。履带式推土机工作时速度低 ($\leq 5 \text{ km/h}$) 可以忽略

空气阻力的影响, 水平地面上工作时推土机受力主要有: 行走阻力、加速阻力和推土阻力。其中行走阻力、加速阻力均可采用 Cruise 中的模型。针对 Cruise 中没有的推土阻力, 本文通过力学上的等效, 对车轮作用进行重定义, 向前轮引入额外的扭矩来实现推土阻力的添加。

模型中的履带车辆模型虽有 4 个车轮, 但模型中车轮的作用即不同于轮式车辆车轮又不同于履带式车辆的驱动轮和导向轮。轮式车辆中前轮的主要作用是引导车辆转向, 后轮驱动车辆前行 (后驱车辆)^[12]; 在履带式车辆中导向轮的作用是铺设链轨并张紧履带, 驱动轮的作用是驱动履带^[13-15]。本模型通过力学效果上的等效对两前轮的作用进行了重新定义: 两前轮的主要作用是与 Flange 模块、Simulink\DLL 模块配合, 将 Cruise 无法模拟的动载荷添加到模型之中: 推土动载荷经 DLL 模块转换为相应的扭矩信号, 传递到连接在前轮的 Flange 模块上并转化为施加在前轮上的扭矩, 为克服这个扭矩前行, 车身必须提供一个大小与推土载荷相等的力来克服这个扭矩, 以此来达到引入推土动载荷的目的。为防止 Flange 模块施加扭矩时造成前轮滑转, 在模型设置时需要将前轮滑移设置应设为 “without slip”。为进一步说明推土机受力情况, 对直行推土工况进行受力分析, 如图 1 所示。

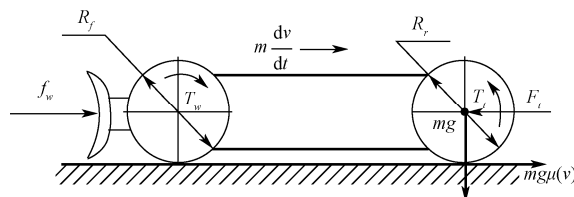


图 1 直行推土受力分析

Fig.1 Analysis of working straightly

收稿日期: 2011-08-11 修订日期: 2011-12-14

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2011BAG04B00); 国家自然科学基金重点项目 (61034007); 山东大学研究生自主创新基金 (YZC10063)

作者简介: 孙 强 (1987-), 男, 山东潍坊人, 博士生, 主要从事商用车及工程机械油电混合动力方面的研究。济南 山东大学能源与动力工程学院, 250061。Email: sunqiangsdu@163.com

*通信作者: 李国祥 (1966-), 男, 山东蓬莱人, 教授, 博士生导师, 主要从事发动机 CAE、新能源汽车方面的研究。济南 山东大学能源与动力工程学院, 250061。Email: liguox@sdu.edu.cn

图中, m 为推土机质量, kg; g 为重力加速度, m/s^2 ; v 为 t 时刻车辆速度, km/h; $\mu(v)$ 为速度为 v 时履带的滚动阻力系数; R_f 为导向轮直径, m; T_w 为两导向轮阻力矩, N·m; f_w 为推土阻力, N; F_t 为推土机工作时驱动力, N; μ_1 为履带与地面的摩擦系数; C_s 为滑转修正系数。对于直工作的任意时刻 t , 以上各量应满足以下约束:

$$F_t = mg\mu(v) + m \frac{dv}{dt} + f_w \left(\int_0^t v dt \right) \quad (1)$$

$$T_w = f_w \left(\int_0^t v dt \right) \times \frac{R_f}{2} \quad (2)$$

$$F_t = C_s \times \mu_1 \times mg \quad (3)$$

推土机是一种循环作业的铲土运输机械, 可以用典型工作循环替代对整个工作过程的仿真^[16-18]。因此引入推土阻力之前首先通过试验的方法获得推土机一个作业循环的载荷谱^[19-21]。本例中采用山推工程机械股份有限公司的 SD-22 载荷谱如图 2 所示。

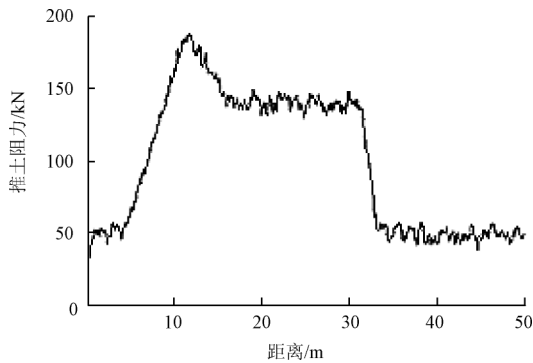


图 2 SD-22 某工况下的推土阻力

Fig.2 Loading curve of SD-22 under a certain working condition

2 履带模型的建立

履带是推土机的行走和动力输出装置, 是履带式车辆动力性建模的重要组成部分^[22], Cruise 中没有现成的履带模型。但是, 履带建模和轮胎建模过程中, 与动力性直接相关的参数是一致的, 这些参数包括: 与地面的摩擦系数、滚动阻力系数和滑转率。这些参数在履带车辆和轮式车辆上具有相同的定义和物理意义, 因此, 从力学角度分析, 可以用经履带参数标定的轮胎模型来模拟履带的行走和动力输出特性。

本模型中, 用履带的摩擦系数、滚动阻力系数和滑转率来设定轮胎模型的参数, 用两个后轮用来模拟履带, 实现履带滑转的模拟和驱动力输出。在设置时, 需要将车辆重心设置在模型后轴上, 同时两后轮的基准载荷 (reference load) 应设置为整车质量的一半。用山推工程机械股份有限公司提供的 SD-22 型推土机实测的驱动力-滑转率数据来标定 Cruise 中的特殊牵引力-滑转率谱 (traction map), 实现履带滑转的模拟。Cruise 中特殊牵引力 (specific traction) 指的是车轮产生的牵引力与其载荷的比值, 如图 3 所示。

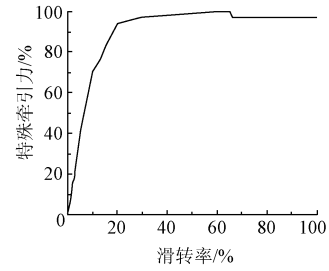


图 3 由试验数据换算得到的 Traction Map

Fig.3 Traction map attained by test measurement

3 分动箱及液压模块建模

分动箱和液压模块是推土机传动系统中的重要部件。其中, 分动箱的作用是: 将发动机输出的动力按需求分配给液力变矩器、风扇液压泵、转向液压泵、工作液压泵和回油泵。Cruise 中没有现成的分动箱模型, 接下来通过对分动箱数学模型的分析, 结合 Cruise 中的差速器及减速器模块完成分动箱模型的建立。

分动箱是一个扭矩分配及速比变换部件, 它应满足以下约束:

$$T_{in} - (\alpha_1 T_{out1} + \alpha_2 T_{out2} + \alpha_3 T_{out3} + \alpha_4 T_{out4}) = I_{in} \omega_{in}^2 \quad (4)$$

$$N_{in} = \frac{1}{\alpha_1} N_{out1} = \frac{1}{\alpha_2} N_{out2} = \frac{1}{\alpha_3} N_{out3} = \frac{1}{\alpha_4} N_{out4} \quad (5)$$

$$T_{out1} - \frac{1}{\alpha_1} (T_{in} + \alpha_2 T_{out2} + \alpha_3 T_{out3} + \alpha_4 T_{out4}) = I_{out1} \omega_{out1}^2 \quad (6)$$

$$T_{out2} - \frac{1}{\alpha_1} (T_{in} + \alpha_1 T_{out1} + \alpha_3 T_{out3} + \alpha_4 T_{out4}) = I_{out2} \omega_{out2}^2 \quad (7)$$

$$T_{out3} - \frac{1}{\alpha_1} (T_{in} + \alpha_1 T_{out1} + \alpha_2 T_{out2} + \alpha_4 T_{out4}) = I_{out3} \omega_{out3}^2 \quad (8)$$

$$T_{out4} - \frac{1}{\alpha_1} (T_{in} + \alpha_1 T_{out1} + \alpha_2 T_{out2} + \alpha_3 T_{out3}) = I_{out4} \omega_{out4}^2 \quad (9)$$

$$\omega = \frac{dN}{dt} \quad (10)$$

式中, α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为四个输出轴相对输入轴的速比; T_{in} 、 T_{out1} 、 T_{out2} 、 T_{out3} 、 T_{out4} 分别为输入轴、4 个输出轴扭矩, N/m²; N_{in} 、 N_{out1} 、 N_{out2} 、 N_{out3} 、 N_{out4} 分别为输入轴、4 个输出轴转速, r/min; I_{in} 、 I_{out1} 、 I_{out2} 、 I_{out3} 、 I_{out4} 分别为输入端、4 个输出端转动惯量, kg/m²; ω_{in} 、 ω_{out1} 、 ω_{out2} 、 ω_{out3} 、 ω_{out4} 分别为输入端、4 个输出端角加速度 rad/s²。

对与推土机中的转向液压系统、铲斗工作液压系统、风扇液压系统和回油液压系统, 本模型仅从能量传递的角度对液压部件进行建模。液压泵在分动箱处消耗能量, 经过液压系统的传递, 在液压马达处做功, 完成能量的传递; 液压泵消耗能量的大小由液压马达对外做功大小及液压系统效率来决定, 即液压系统应满足以下约束

$$P_{H_mot_in} = \eta_{H_mot} \times T_{H_mot} \times N_{H_mot} \quad (11)$$

$$P_{H_pmp_in} = \eta_{H_pmp} \times \frac{P_{H_mot_in}}{\eta_{H_ppe}} \quad (12)$$

$$T_{H_pmp} = \frac{P_{h_pmp_in}}{N_{H_pmp}} \quad (13)$$

式中， $P_{H_pmp_in}$ 为液压泵消耗功率，W； $P_{H_mot_in}$ 为液压马达输入功率，W； η_{H_mot} 为相应转速、扭矩下液压马达的效率； η_{H_pmp} 为相应转速、扭矩下液压泵的效率； η_{H_ppe} 为液压管路的传输效率； T_{H_mot} 为液压马达扭矩， N/m^{-1} ； N_{H_mot} 为液压马达转速， rad/s ； T_{H_pmp} 为液压泵扭矩， N/m^{-1} ； N_{H_pmp} 为液压泵转速， rad/s 。

在 Cruise 中，液压泵、液压马达的转速、扭矩由 Flange 模块来模拟，系统效率则在 Function 模块中实现。按照以上原则在 Cruise 中建立的分动箱、液压模块模型如图 4 所示。

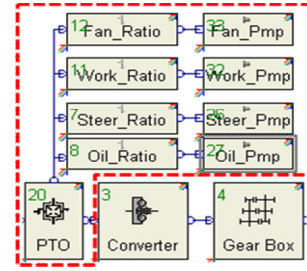


图 4 分动箱及液压模块的 Cruise 实现
Fig.4 Model of transfer case and hydraulic module in Cruise

4 模型建立及仿真验证

按照 Cruise 建模的一般要求及上文对特定问题的解决手段，针对 SD-22 在 Cruise 中建立整车模型。SD-22 为配备额定功率 179 kW，1 900 r/min 柴油机及 6 档机械变速箱的液力机械式推土机，使用质量为 28 t。Cruise 建立的模型如图 5 所示。

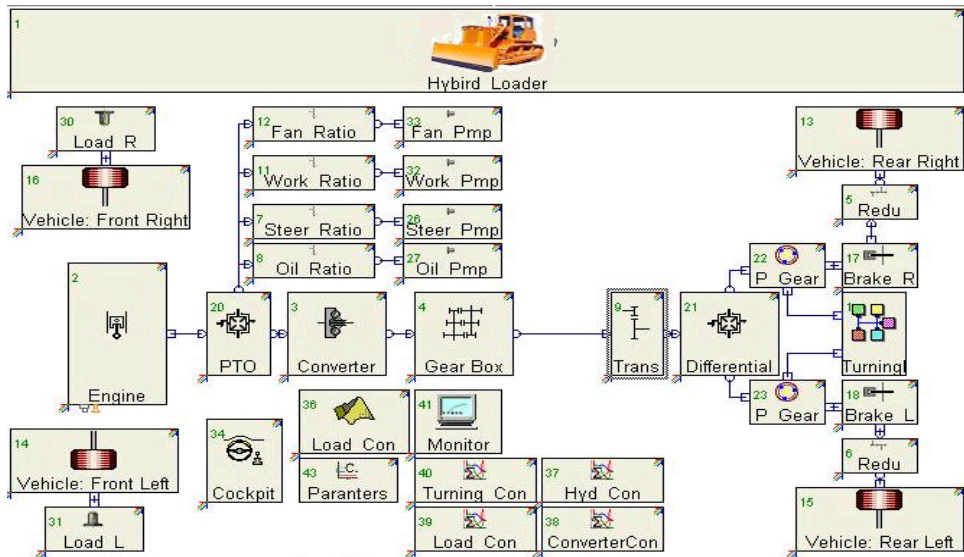


图 5 推土机模型在 Cruise 中的实现
Fig.5 Model of bulldozer in Cruise

针对推土工况添加计算任务，推土循环工况中速度如图 6 所示。仿真结果中输出推力与划转率如图 7 所示。

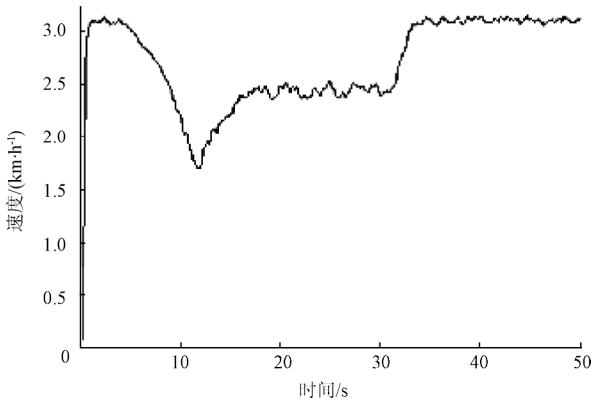


图 6 推土机推土循环工况速度曲线
Fig.6 Velocity curve of bulldozer work cycle

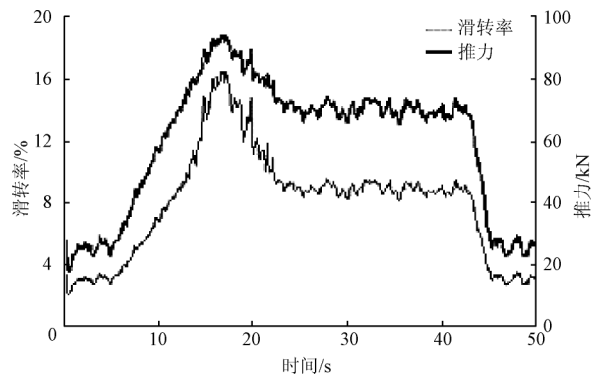


图 7 仿真中滑转率与输出推力
Fig.7 Simulated slip and work force curves

仿真结果中，滑转率随推力增大(或减小)而增大(或减小)，变化趋势与实际情况一致。下面将推力和滑转率

仿真结果与实测结果对比进行定量验证,如图8所示。

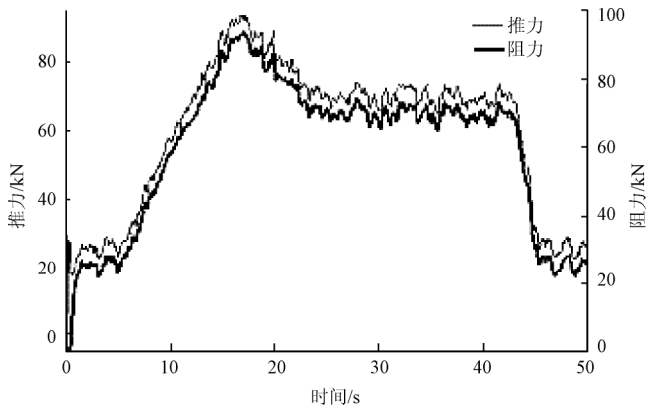


图8 仿真推力与实际工作阻力对比图(右侧履带)

Fig.8 Comparison of simulated work force with test value

图8中细实线为仿真得出的推力,粗实线为实测推土阻力(采用同一纵轴两线基本重叠,为区别两曲线采用次坐标轴显示实测阻力),与试验数据相比,有99.2%的仿真数据误差小于1%。造成误差的原因是试验数据为车辆输出的推力,而仿真计算得出的推力为履带与地面间的作用力,该作用力减去车辆加速阻力后的值才是车辆输出的推力,另一个能验证该误差分析的数据是车辆加速度的变化,车辆加速度如图9所示。

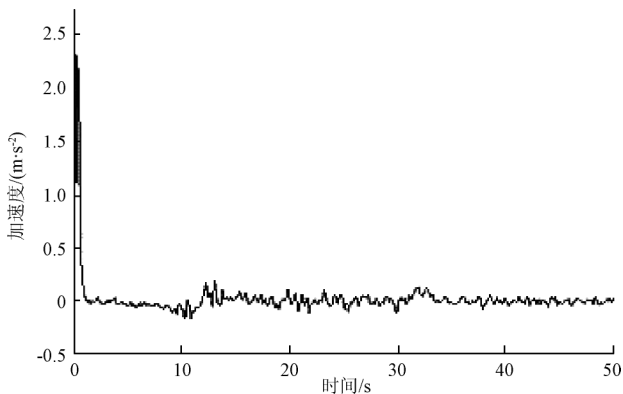


图9 工作过程中加速度变化

Fig.9 Acceleration curve in work cycle

在98.4%的时间点上加速度值小于 $\pm 0.4 \text{ m/s}^2$ 。此外,仿真值与实际值相差最大的点也是加速度最大的点,这也验证了以上的误差分析。

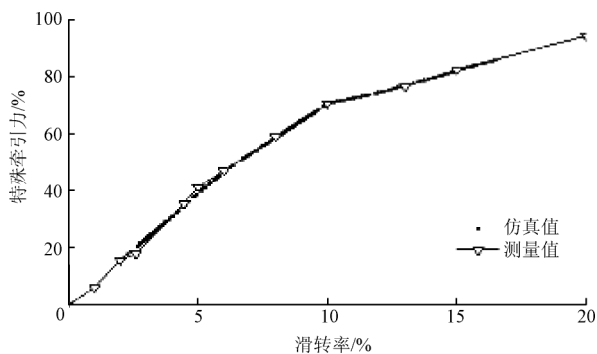


图10 滑转率仿真结果与实测结果对比图

Fig.10 Comparison of simulated slip with test value

图10中黑色圆点为仿真得出的滑转率,黑色实线为实测的滑转率曲线,其中黑色实线上的三角标志为实测点。与试验数据相比,有71.8%的仿真数据误差小于1%。

5 结论

1) 通过力学效果上的等效,并结合 Matlab\Simulink 生成的 DLL 模块可实现推土机工作过程中动载荷的添加。通过对 Cruise 模型中前后轮的重定义及设置,实现对推土机履带滑转的模拟。结合 Cruise 建模一般方法及以上对动载荷添加和履带滑转问题的解决手段在 Cruise 中建立推土机整车模型,实现了履带式推土机的快速建模,为履带式车辆的快速建模提供了一种新方法。

2) 与实测数据的比较:有99.2%的推土推力仿真结果误差小于1%,有71.8%的滑转率仿真结果误差小于1%,结果表明该模型能够准确的模拟推土机的工作状况。

[参考文献]

- [1] 王庆年,于永涛,曾小华,等.基于CRUISE软件的混合动力汽车正向仿真平台的开发[J].吉林大学学报:工学版,2009,39(6):1413-1419.
Wang Qingnian, Yu Yongtao, Zeng Xiaohua, et al. Development of forward-looking simulation platform for hybrid electric vehicle based on software CRUISE[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(6): 1413-1419. (in Chinese with English abstract)
- [2] Diego Feroldi, Maria Serra, Jordi Riera. Design and analysis of fuel-cell hybrid systems oriented to automotive applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 4720-4729.
- [3] Junmin Wang, Raul G. Longoria. Coordinated and reconfigurable vehicle dynamics control[J]. Ieee Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(3): 723-731.
- [4] Riccardo Marino, Stefano Scalzi, Giuseppe Orlando, et al. A nested PID steering control for lane keeping in vision based autonomous vehicles[C]//American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, 2009.
- [5] 毕小平,陈策,张更云,等.履带车辆动力性的计算机仿真[J].兵工学报,2001,22(2):266-269.
Bi Xiaoping, Chen Ce, Zhang Gengyun, et al. Computer simulation of power performance for tracklayers[J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(2): 266-269. (in Chinese with English abstract)
- [6] 鲁连军,孙逢春,翟丽.基于Matlab Simulink的电传动履带车辆转向性能仿真[J].兵工学报,2006,26(1):69-74.
Lu Lianjun, Sun Fengchun, Zhai Li. Steering performance simulation for electric drive tracked vehicle based on Matlab Simulink[J]. Acta Armamentarii, 2006, 26(1): 69-74. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王双双,张豫南,张朋,等.电传动履带式装甲车辆动力学建模与仿真[J].计算机仿真,2009,26(3):21-25.
Wang Shuangshuang, Zhang Yunan, Zhang Peng, et al. Modeling and simulation of dynamics of electric drive tracked armored vehicle[J]. Computer Simulation, 2009, 26(3): 21-25. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张宗涛.工程机械行驶驱动系统半物理仿真平台设计[D].

- 西安:长安大学, 2009.
- Zhang Zongtao. HILS Platform Design for Construction Machinery Running Driving System[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [9] 文明, 谷中丽, 孙逢春. 履带车辆电传动系统键合图建模与仿真分析[J]. 车辆与动力技术, 2003, 92(4): 42-45.
- Wen Ming, Gu Li, Sun Fengchun. Bond graph modeling and simulink simulation of electric drive system for tracked vehicles[J]. Vehicle and Power Technology, 2003, 92(4): 42-45. (in Chinese with English abstract)
- [10] 师永强, 穆希辉, 杜峰波, 等. 履带搬运车传动系统建模及仿真[J]. 机械传动, 2011, 35(2): 35-37.
- Shi Yongqiang, Mu Xihui, Du Fengbo, et al. Modeling and simulation of transmission system of tracked vehicle[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2011, 35(2): 35-37. (in Chinese with English abstract)
- [11] 袁豪杰, 张付军. 履带车辆动力性仿真及参数影响规律[J]. 车辆与动力技术, 2010, 117(1): 20-25.
- Yuan Haojie, Zhang Fujun. Simulation about power performance of tracked vehicles and analysis of parameters of the law[J]. Vehicle and Power Technology, 2010, 117(1): 20-25. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈家瑞. 汽车构造(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 247-252.
- [13] 赵瑜, 闫宏伟. 履带式行走机构设计分析和研究[J]. 数字技术与机械加工工艺装备, 2010(5): 50-53.
- Zhao Yu, Yan Hongwei. Design analysis and research on tracked walking mechanism[J]. New Technology and New Process, 2010(5): 50-3. (in Chinese with English abstract)
- [14] 迟媛, 蒋恩臣. 履带车辆转向时最大驱动力矩的计算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 74-78.
- Chi Yuan, Jiang Enchen. Method for calculating maximum tractive torque of tracked vehicle while steering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(3): 74-78. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张光裕. 工程机械底盘构造与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [16] 秦永刚. 推土机动力性、经济性模拟仿真方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- Qin Yonggang. The Research on Simulation Method for Power and Economics of Bulldozer[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [17] 石利敏. 410型推土机行走机构及其性能仿真研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- Shi Limin. Research on Structure and Performance Simulation of Crawler Equipment of 410 Bulldozer[D]. Jilin: Jilin University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李芳芳, 张宗涛, 任雪梅. TY140履带推土机外负荷特性研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008(8): 50-52.
- Li Fangfang, Zhang Zongtao, Ren Xuemei. Research on outer-loading property of TY140 bulldozer[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2008(8): 50-52. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张基全. 载荷谱的数据采集与处理技术[J]. 工程机械, 1996(6): 19-20.
- Zhang Jiquan. Data acquisition and processing techniques for load spectrum[J]. Construction Machinery and Equipment, 1996(6): 19-20. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘述学, 成凯, 郁工瑞, 等. 推土机现场作业时多参数的实时测试[J]. 农业工程学报, 1997, 13(1): 72-75.
- Liu Shuxue, Cheng Kai, Yu Gongrui, et al. The multi parameter test of dozer on the working spot the first paper of series "load spectrum study and development of dozer"[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1997, 13(1): 72-75. (in Chinese with English abstract)
- [21] 成凯, 杨永海, 黄奎英, 等. 推土机的外载荷测定与分析[J]. 农业工程学报, 1997, 13(1): 76-79.
- Cheng Kai, Yang Yonghai, Huang Kuiying, et al. Test and analysis of outer load on dozer the second paper of series "Load spectrum study and development of dozer"[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1997, 13(1): 76-69. (in Chinese with English abstract)
- [22] 韩宝坤, 李 Xiaolei, 王 Changtian. Track Model and Analysis of High-speed Tracked Vehicles[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(12): 1774-1777.

Modeling and simulation of power transmission of crawler bulldozer

Sun Qiang, Bai Shuzhan, Li Guoxiang^{*}, Yan Wei

(Shandong University, School of Energy and Power Engineering, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to modeling crawler bulldozer rapidly, systematical analysis was carried out based on several characteristics, including working mode, system construction and dynamics. Furthermore, crawler type module, dynamic load module, hydraulic module and transfer case were established by Matlab\Simulink and Cruise. Rapid modeling for crawler bulldozer can be achieved by combining works mentioned above and the drive train model in Cruise. Based on parameters from real vehicle, the model was calibrated and used in simulation. With comparison of simulated results and experimental data, the errors of thrust force within 99.2% simulation time were less than 1% and the errors of track slip rate value within 71.8% simulation time were less than 1%. The results indicate that the model based on Cruise and Simulink can simulates straight bulldozing condition of bulldozer properly.

Key words: models, computer simulation, crawler bulldozer, dynamic load, slip