

# 铰接式电动轮原地转向动力学联合仿真分析

申焱华, 韩丽, 金纯

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)



**摘要:** 建立了铰接式电动轮液压转向与整车多体动力学的联合仿真模型, 通过仿真给出了铰接车原地转向过程中轮胎与地面的作用关系; 基于工程车辆的复杂工况条件, 讨论了后车体质心位置及载重量等因素对前后车体转向性能的影响。同时, 分析了不同情况下液压转向系统中流量和输出力的变化规律。

**关键词:** 铰接车; 原地转向; 液压转向系统; 联合仿真

中图分类号: U461.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2013) 07-1691-05

## Co-simulation Analysis of In-situ Steering Dynamics of Articulated Motor-driven Vehicle

SHEN Yan-hua, HAN Li, JIN Chun

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The model of articulated motor-wheeled vehicle is co-simulated with hydraulic steering mechanics and multi-body dynamics. The relationships between tires and the ground were proposed while the articulated vehicle turning at standstill. The structural parameters, such as center mass location and load of rear body, were discussed to show their influence on the turning performance of front and rear bodies. Simultaneously, the flow rate and output force of hydraulic steering cylinder during the vehicle turning could also be achieved under different working conditions.

**Key words:** articulated vehicle; in-situ steering; hydraulic steering system; co-simulation

### 引言

铰接式自卸车前后车体可围绕铰接体实现原地相对回转, 转弯半径小, 是一种适宜在泥泞路面及空间狭小条件下工作的工程车辆。考虑到铰接车转向过程中运动学及受力特性的复杂, 人们根据数学模型分析了原地转向的车轮滑移现象<sup>[1,2]</sup>, 给出了原地转向过程中最大转向阻力矩计算方法<sup>[3-5]</sup>; 并通过液压仿真, 从液压元件的物理层次研究了铰接车的液压转向系统的性能<sup>[6,7]</sup>。以上研究对铰接车原地转向的规律有了较好的描述, 但没有考虑不同工况下, 铰接车转向过程中轮胎与地面间的作用关系。

铰接式电动轮自卸车为双动力交流驱动车辆, 即由发

动机根据不同工况下各轮所需驱动力的大小, 带动发电机发电, 并通过逆变器驱动轮边电机工作。每个车轮由一个交流电机驱动, 可有效利用电机快速响应、精确控制的特点, 独立控制各轮的运动。本文以六轮铰接式电动轮为研究对象, 建立整车多体动力学与液压转向系统耦合的联合仿真模型, 模拟分析转向过程中轮胎与地面间的作用关系, 了解前后车体的转向运动特性, 以便制定相应的电子差速控制策略, 降低轮胎与地面的磨损。

### 1 六轮铰接车原地转向联合仿真模型的建立

三轴六轮铰接式电动轮自卸车, 取消了传统汽车的离合器、变速器、传动轴、等速万向节及差速器等部件, 由发动机带动发电机为整车提供功率需求。不同于铰接式装载机, 其前轴通过两油气悬架与前车架相连, 中、后两轴通过悬架和平衡梁与后车架连接, 平衡梁通过与后车架的转动铰连接, 可相对后车架在纵向面内实现一定角度转动, 同时也实现了两后轴相对后车架的运动。该结构保证其在

收稿日期: 2011-11-23 修回日期: 2012-04-22

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2008BAB32B03)

作者简介: 申焱华(1968-), 女, 河南, 博士, 副教授, 研究方向为车辆动力学及虚拟样机技术; 韩丽(1986-), 女, 山东人, 硕士, 研究方向为车辆动力学与控制; 金纯(1975-), 男, 河南人, 博士, 讲师, 研究方向为非公路车辆设计及仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1691 •

不平道路上行驶时全轮着地,使各轮胎受力均衡,并且几乎消除后车架行驶中所受到的全部扭转与剪切应力。

根据整车结构设计图纸,在SolidWorks中建立六轮铰接车的实体模型,并将其导入到Adams/View环境中,建立整车的虚拟样机模型,此模型中包括前后车架、铰接体、回转支撑、悬架系统、货箱等24个构件,9个旋转副(Revolute Joints),3个球副(Spherical Joints),6个滑移副(Translational Joints),2个固定副(Fixed Joints),共计39个自由度。选用UA轮胎模型,可将转向过程中轮胎-地面的非线性作用关系考虑进来。图1为铰接车的拓扑结构图。

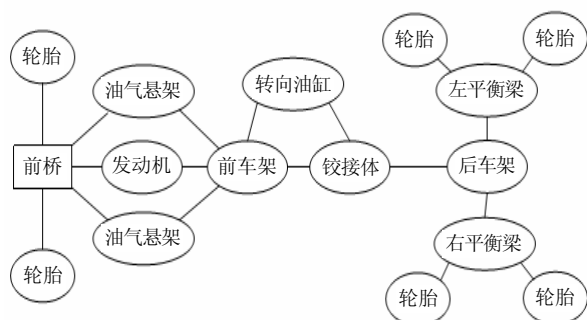


图1 铰接车多体模型拓扑关系

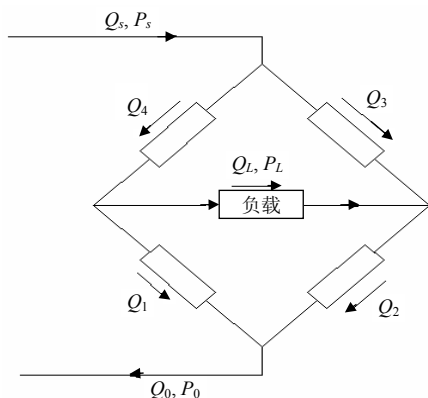


图2 液压转阀等效原理图

铰接式矿用自卸车采用全液压动力转向系统,一般由转阀式全液压转向器、转向油缸等组成,在转向盘与转向操纵机构之间没有连杆连接。转阀式全液压转向器采用4个对称结构的可变节流口,按照惠斯登桥路原理连接而成(图2),方向盘输入信号可改变节流口的开闭以及过流面积的大小,实现车辆的转向。

根据流量平衡模型,根据流量平衡模型,由图2列出当转阀阀芯相对于阀套逆时针转动时的流量方程如公式(1):

$$\begin{cases} Q_3 + Q_4 = Q_s \\ Q_4 - Q_1 = Q_{L1} \\ Q_2 - Q_3 = Q_{L2} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $Q_s$ —流入转阀的液压油流量,  $m^3/s$ ,  $Q_i(i=1,2,3,4)$ —流经第  $i(i=1,2,3,4)$  个阀孔的流量,  $m^3/s$ ,  $Q_{L1}$ 、 $Q_{L2}$ —液压油缸的进、油流量,  $m^3/s$ 。

流经转阀各阀口有油液的流量与压力差的关系可以按照薄壁小孔流量的计算公式进行计算,即如公式(2):

$$Q_i = C_d A_i \sqrt{2\Delta p_i / \rho} \quad (2)$$

式中  $C_d$ —流量系数;  $A_i$ —第  $i$  个阀孔的节流面积,  $m^2$ ;  $\Delta p_i$ —第  $i$  个阀孔两侧的压力差,  $Pa$ ;  $\rho$ —液压油的密度,  $kg/m^3$

本文采用液压模型等效方式,利用Amesim软件中的三位四通阀模拟整车转向过程中对液流的控制。

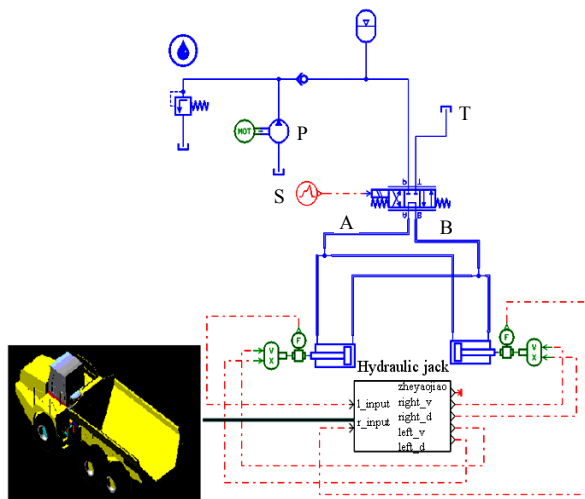


图3 铰接车原地转向联合仿真模型

构建 Amesim 与 Adams 软件的同步数据传输通道,以 Amesim 中左右活塞杆的力作为输入,实现 Adams 中的整车原地转向功能。基于实时联合仿真的铰接车辆转向模型(图3),较好地实现了液压系统与多体机构运动的耦合,可更为真实地反映液压缸运动与整车-地面运动的相互作用关系。

## 2 铰接车原地转向的仿真分析

### 2.1 铰接车原地转向轨迹

通过液压油缸的做动,铰接车前、后车体围绕铰接体实现最大达 $45^\circ$ 的原地转向。为清楚说明铰接车各个轮胎与地面的作用关系,整车模型中各轮胎符号标识如图4,仿真模型中后车体载重5吨。

通过仿真,可得到各轮纵向力和侧向力在转向过程中

随铰接角的变化。随铰接角的增大, 六个轮胎所受的侧向力逐渐增大, 但增大的幅度不一致。转向过程中, 中间轮 bb、ee 和后轮 cc、dd 所受的侧向力较大, 而前轮 aa、ff 侧向力则比较小。中间两个轮 bb、ee 侧向力方向与其它四轮的方向不一致, 说明中间轮的运动方向与其它四轮相反, 此为六轮铰接车不同于四轮铰接车的一处。

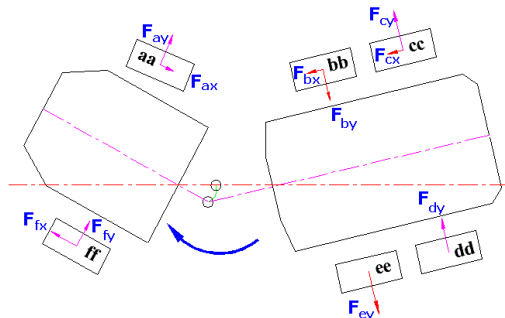


图 4 原地转向过程轮胎受力

前车体内外车轮所受纵向力的方向相反, 内侧车轮 aa 受到的是制动力, 作用在外侧车轮 ff 上的是牵引力。相比于前轮两个轮胎, 后四个轮胎的纵向力很小, 后车体外侧的两个轮 dd 轮和 ee 轮的纵向力近似为 0, 可以忽略。可以说, 在原地转向过程中, 后车体外侧两轮只受侧向力的作用。图 4 为原地转向中各轮胎受力大小及方向的示意图。

通过对各轮垂向力的分析, 内侧车轮的垂向力明显大于外侧车轮, 整车在转向过程中存在着明显的侧倾现象。

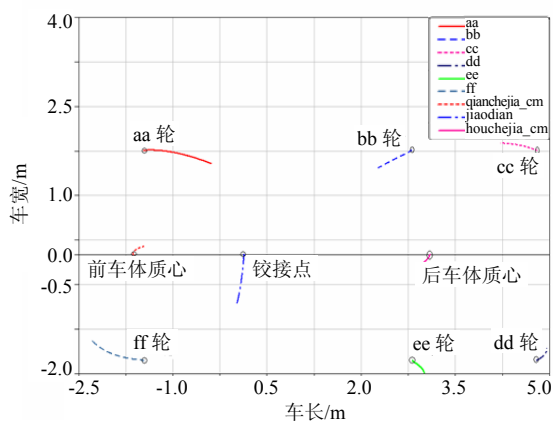


图 5 原地转向过程整车运动轨迹示意图

图5给出了前后车体质心和铰接点随铰接角度变化的运动轨迹, 其中每条线上的圆圈是该物体的起始位置。仿真结果显示: 前两轮运动方向相反, 中间两轮 bb 轮向前的位移较大, 而 ee 轮的位移较小, 这是由于外侧车轮 ee 轮受

的纵向力几乎为零。后车体内、外轮的运动方向同前车体的相反, 导致前后车体发生相向运动。

由于电动轮没有机械差速装置, 通过了解整车转向过程中各轮胎与地面的相互作用关系, 如轮胎接地点的轨迹, 轮胎的滑移/滑转现象, 可以为电动轮的差速设计提供理论依据, 实现以液压转向系统为主、电机差速转向为辅的转向控制策略, 减少轮胎与地面的磨损, 以及降低转向的阻力矩。

## 2.2 液压转向系统仿真

铰接车液压转向联合仿真过程中, 液压油缸根据给定的铰接角, 形成一定的输出力, 用于克服轮胎的原地转向阻力矩。铰接车在接受到转向信号开始转向时, 液压油缸的进、出口处的油液流量在经过少许的波动后, 开始逐渐增大; 与此同时, 活塞杆的输出力在开始的 0.3s 内从 0 跃升到  $70 \times 10^3 \text{N}$ , 用于克服轮胎原地起始转向的阻力矩, 并随着铰接角的增大而增大。

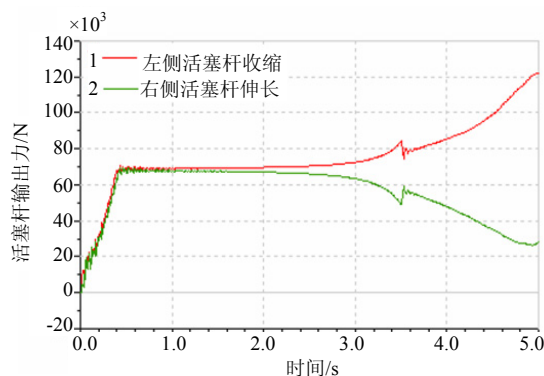


图 6 原地转向过程中活塞杆输出力

图6显示原地转向过程中内侧油缸活塞杆的受力大于外侧油缸的, 表明随着原地转向过程中铰接角的增大, 活塞杆收缩端的油缸内部油液受压缩, 造成油压上升, 活塞杆受力大; 而右侧活塞杆伸长, 油缸内部油压减小, 活塞杆受力较小。

## 3 不同工况下原地转向特性分析

铰接式电动轮主要用于矿石的装载、运输, 鉴于其工作特点, 需要综合考虑不同工况下整车结构参数的变化对原地转向性能的影响。

### 3.1 后车体质心位置对转向的影响

铰接车在装载过程中, 后车质心位置会发生变化。当后车体质心位置后移、远离铰接点时, 两前轮的垂向力减小, 后四轮的垂向力均增大, 且后四轮的垂向力波动比较

频繁。若后车体质心位置前移,则情况相反。同时,轮胎垂向力的变化同样改变了转向油缸活塞杆的输出力,无论当后车体质心前移或后移时,油缸活塞杆输出力都有所增大(图7),特别是质心后移时,油缸输出力明显增大,因此对转向油缸负荷的需求增大。

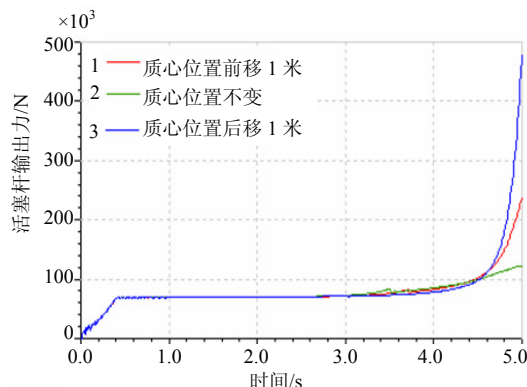


图7 原地转向过程中左侧油缸活塞杆输出力

后车体质心位置后移时,两前轮侧向力随铰接角的变化幅值比原来质心位置时要平缓,而两中轴轮(bb、ee轮)侧向力则略有增加,后两轮(cc、dd轮)侧向力的变化则较中间两轮增加的幅值要大些。当后车体质心位置前移时,上述趋势相反。

### 3.2 原地转向过程中铰接体的受力

原地转向过程中,后车体质心处于两后轴中间位置时,铰接体所受的纵向力和横向力均较小。当后车体质心自此位置前移或后移1m时,在转向角度较大时(大于23度),铰接体所受的纵向力均出现减小趋势(图8),而横向力增大。特别当质心位置后移时铰接体的横向受力情况更为恶劣。

由图9看出,后车体质心前、后移动对于铰接体所受垂向力的影响很大。当质心位置前移时,铰接体所受垂向力增大,后车体在原地转向过程中通过铰接体对前车架位

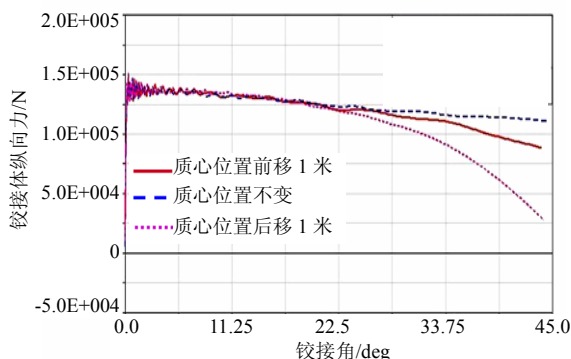


图8 原地转向过程中铰接体所受纵向力变化

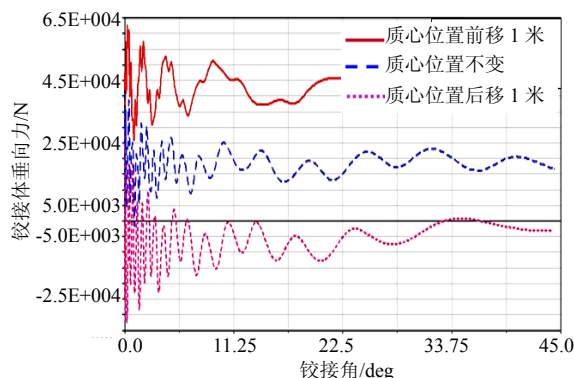


图9 原地转向过程中铰接体所受垂向力的变化

置处施加向上的力,导致前车体转向中出现一定的侧倾现象;当质心位置后移时,铰接体的垂向受力减小,且受力方向与前移时的相反,有利于转向过程中前车体姿态平衡。

### 3.3 不同工况下质心轨迹分析

原地转向过程中,后车体质心位置对轮胎-地面的作用关系产生影响,将会使前、后车体的质心轨迹、铰接体轨迹发生变化。当后车体质心后移时,后车体对质心位置的敏感性不是太大,而前车体相较于后车体的移动幅度比较大(如图10所示),也即铰接角度主要由前车体转向而完成。

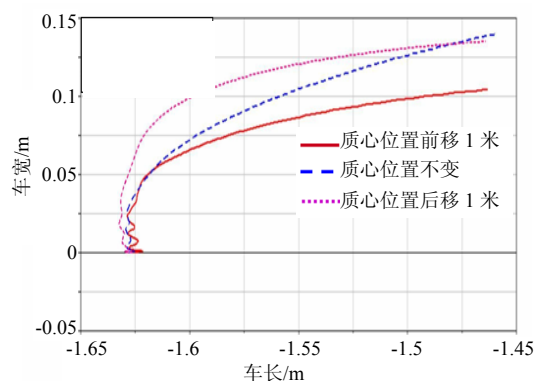


图10 原地转向过程中前车架质心位置变化

后车体的载重大小通过轮胎垂向力的变化,影响到轮胎-地面的转向阻力矩大小。将后车体载重量从5吨变化到最大30吨的情况,通过模拟可以看到前、后车体质心位置、铰接点位置的变化情况(如图11)。

随着后车体载重的增加,原地转向过程前车体质心愈加靠近铰接点,而后车体则远离铰接点,从而说明载重的增大,使得前车体更具有转向的趋势,而后车体则保持原地不动。



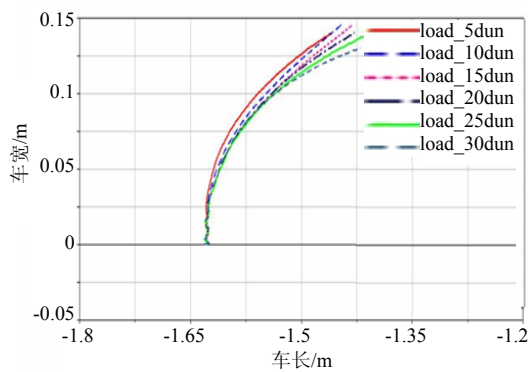


图 11 前车架质心位置随载重不同变化曲线

## 4 结论

通过液压转向与整车多体动力学的联合仿真, 显示三轴六轮铰接车其中间两轮在转向过程中所受侧向力的方向与其他四轮不同, 后车体外侧两轮只受侧向力的作用; 分析了转向过程中液压油缸的输出力、流量随前后车体铰接角度的变化关系, 可据此推算轮胎的转向阻力矩, 并对转向油缸的设计进行验证。

针对非公路车辆的不同工况, 研究了载重大小及后车体质心位置对各轮受力的影响, 通过前后车体质心轨迹的

(上接第 1690 页)

样机模型, 对弹射试验过程中出现的故障进行了虚拟复现, 得到了相关难于测量的关键设计参数数值, 对故障出现的原因进行了定位, 并提出了合理的改进建议。最后利用虚拟样机技术对改进方案的可行性进行了评定, 优化了设计方案。通过后续弹射试验的成功表明, 虚拟样机仿真技术是准确可靠的, 研究结果对发射系统的优化设计具有一定的现实指导意义。

## 参考文献:

- [1] 孙亚力. 俄罗斯的道尔-M1 地空导弹武器系统[J]. 中国航天. 1999, 13(12): 27-31.
- [2] 王国强, 张进平, 马若丁. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
- [3] 李伟, 马吉胜, 吴大林. 机械系统虚拟样机故障仿真技术研究[J]. 计算机工程与设计. 2011, 32(5): 1759-1761.
- [4] 袁曾凤. 火箭导弹弹射内弹道学[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1987.
- [5] 陈立平, 张云清. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

变化, 显示载重量增大具有使前车体转向趋势增大的现象; 后车体质心位置距离铰接点的距离, 使铰接体的受力在转向过程中发生了较大的变化, 从而影响了车辆转向过程中前车体的姿态, 在整车的结构设计中, 应尽量使后车体质心位置落在两后轴之间。

## 参考文献:

- [1] Piotr A Dudziński. Problems of turning process in articulated terrain vehicles [J]. Journal of Terramechanics (S0022- 4898), 1983, 19(4): 243-256.
- [2] Dudziński P. Wheel slips and slides during turning in articulated vehicles [J]. International Journal of Vehicle Design (S0143-3369), 1981, 2(4): 439-452.
- [3] 汪建春. 铰接式装载机原地转向力学分析[J]. 煤矿机械, 2009, 3(3): 85-87.
- [4] 汪建春. 铰接式车辆原地转向动态数学模型[J]. 建筑机械, 2008, 06(上半月刊): 86-90.
- [5] 郭凌汾, 黄海东, 秦四成, 成凯. 铰接式车辆静态转向阻力矩分析[J]. 农业机械学报, 1995, 26(1): 24-28.
- [6] 杨忠炯, 何清华. 铰接车辆液压动力转向系统动态特性仿真[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(1): 80-85.
- [7] 侯友山, 石博强, 肖成勇. 铰接车辆转向系统液路管动态特性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 112-116.
- [6] HE Zhao-xia, LIU Geng, WU Li-yan, WANG Yi, HE Ya-yin. Dynamics Simulation of Flexible-Rigid Mechanism Based on Virtual Prototyping Technology [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2008, 20(19): 5328-5331. (贺朝霞, 刘更, 吴立言, 王毅, 何亚银. 基于虚拟样机技术的刚柔耦合系统动力学仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(19): 5328-5331.)
- [7] 陈锦喜, 王瑞林, 李永建. 某型重机枪刚柔耦合多体发射动力学仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 1492-1494. (CHEN Jin-xi, WANG Rui-lin, LI Yong-jian. Simulation of Coupled Rigid and Flexible Multi-body Dynamics on Heavy Machine Gun [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2009, 21(5): 1492-1494.)
- [8] 傅德彬, 姜毅. 基于刚柔耦合模型的发射装置动力学仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(6): 1789-1791. (FU De-bin, JIANG Yi. Dynamics Simulation of Guided Missile Launcher Based on Coupled Rigid and Flexible Model [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2009, 21(6): 1789-1791.)
- [9] 诺曼·琼斯. 结构冲击[M]. 蒋平译, 王礼立校审. 成都: 四川教育出版社, 1994.
- [10] 毕世华, 王汉平, 梁征. 导弹垂直弹射过程中制动锥的动力学特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(9): 762-765.