

[文章编号] 1007-7405(2016)06-0453-06

三轴车辆连通式油气悬挂系统的综合特性

王云超, 刘金强, 李彦晨, 徐 坤, 王成志

(集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了探讨油气悬挂系统连通方式与整车操纵稳定性和行驶平顺性的关系, 针对三轴车辆油气悬挂系统的6种连通方式进行研究。在双气室油气悬挂系统仿真分析和实验验证的基础上, 利用ADAMS和AMESim建立各种不同连通方式的油气悬挂系统整车联合仿真模型, 主要讨论了各连通方式的油气悬挂系统垂直、侧倾以及俯仰的刚度和阻尼尼特性。仿真研究结果表明, 各连通形式中L3型油气悬挂系统综合特性更好。

[关键词] 油气悬挂系统; 连通方式; 刚度; 阻尼; 联合仿真

[中图分类号] TH 213.6

Comprehensive Characteristics of Interconnected Hydro-pneumatic Suspension System for Three-axle Vehicle

WANG Yun-chao, LIU Jin-qiang, LI Yan-chen, XU Kun, WANG Cheng-zhi

(School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To discuss the relationship between interconnected modes of hydro-pneumatic suspension and multi-axle vehicle handling stability, riding comfort, 6 interconnected modes of hydro-pneumatic suspension of a 3-axle vehicle were studied. Based on the results from the simulation and the experiments of a double chamber hydro-pneumatic suspension system, the co-simulation models of the vehicle with different interconnected modes of hydro-pneumatic suspension were set up by ADAMS and AMESim software. Furthermore, the vertical, rolling and pitch stiffness and damping characteristics of every suspension system were given. The simulation results showed that interconnected mode L3 of a hydro-pneumatic suspension system has better comprehensive performance.

Key words: hydro-pneumatic suspension; the interconnected mode; stiffness; damping; co-simulation

0 引言

随着大型工程车辆对自身承载能力、操稳性、平顺性等要求的不断提高, 油气悬挂系统被越来越多地应用于多轴重型车辆^[1]。连通式油气悬挂系统是在独立式油气悬挂系统基础上发展起来的新型悬挂结构, 通过油管将同轴或不同轴上油气悬挂进行连通, 使得单轮油气悬挂的运动对其他交连油气悬挂的输出特性产生影响^[2]。相对于独立式油气悬挂系统, 连通式油气悬挂系统可以通过采用不同的连通方式达到平衡轴荷、抗侧倾、抗俯仰等功能。

目前对连通式油气悬挂系统的研究主要集中在单轴或双轴连通油气悬挂系统^[3-7], 而对于多轴连通油气悬挂系统的研究很少^[8-12], 尤其缺少针对各种连通方式的油气悬挂系统的综合特性的深入分

[收稿日期] 2016-06-21

[修回日期] 2016-08-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51575233); 集美大学优秀青年骨干教师基金(2011B001)

[作者简介] 王云超(1976—), 男, 教授, 从事多轴车辆的转向系统和悬挂系统研究。

析。本文利用 AMESim 和 Adams 联合仿真方法对三轴整车油气悬挂系统多种连通方式的系统刚度和阻尼特性进行分析，对比各连通方式油气悬挂系统的综合特性。

1 悬挂缸的仿真分析和实验验证

1.1 仿真模型建立

双气室油气悬挂系统主要参数如下：缸筒内径为 40 mm；活塞杆直径为 32 mm；液压缸行程为 110 mm；油管长度为 0.5 m；油管内径为 10 mm；阻尼孔直径为 3 mm；单向阀开启压力为 0.04 MPa；蓄能器容积为 0.4 L；蓄能器充气压力为 4 MPa。

1) 液压系统建模

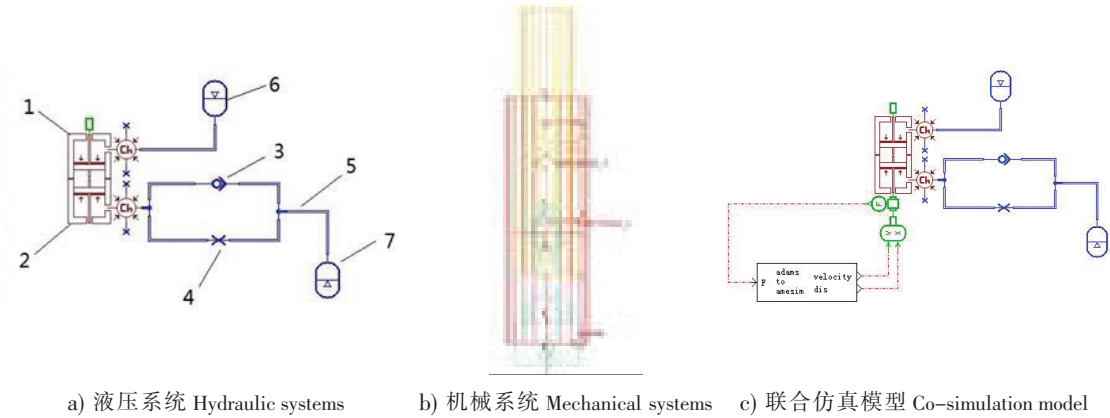
根据双气室油气悬挂系统结构和工作原理，搭建了基于 AMESim 的双气室油气悬挂液压系统模型，如图 1a 所示，仿真模型中无杆腔和有杆腔组合成油缸，蓄能器 6 通过油管连接到油缸无杆腔，阻尼孔和单向阀用油管并联接到油缸有杆腔和蓄能器 7 之间，各元件组合构成双气室油气悬挂系统。

2) 机械系统建模

基于 Adams 软件的单缸油气悬挂的机械模型如图 1b 所示，缸筒与地面固定约束，活塞杆与缸筒间移动副约束并添加正弦位移驱动。缸筒与活塞杆间摩擦主要是密封圈摩擦阻力，而密封圈阻力是油气悬挂阻尼的组成部分，随负载的变化而变化，忽略摩擦力作用会影响系统分析的准确性，因此，在活塞杆与缸筒移动副上添加摩擦力，根据液压缸密封圈摩擦阻力计算方法设置摩擦系数为 0.3。

3) 联合仿真模型

图 1c 是双气室油气悬挂联和仿真模型，仿真以 AMESim 为主控软件。



说明:1—无杆腔;2—有杆腔;3—单向阀;4—阻尼孔;5—油管;6、7—蓄能器
Notes:1—camber without cylinder rod;2—camber with cylinder rod;3—check valve;4—dumping hole;
5—pipeline;6、7—energy accumulator

图 1 双气室油气悬挂 AMESim 和 Adams 联合模型

Fig.1 Co-simulation model of hydro-pneumatic suspension with dual air cambers

对于 Adams 机械系统模型，将活塞杆与缸筒相对速度、位移信号作为输出变量，AMESim 活塞杆与缸筒间相对作用力作为输入变量，编译生成包含 Adams 运行路径、求解器需要信息、输入输出变量数量和名称等接口相关信息的文件，通过 AMESim 主菜单中 Import Adams model 选项将 Adams 模型导入 AMESim 中进行计算。

1.2 实验测试和验证分析

双气室悬挂缸实验台如图 2 所示。



图 2 双气室悬挂缸实验台

Fig.2 Test rig of a hydro-pneumatic suspension system with dual air cambers

在频率 0.5 Hz 和幅值 10 mm 的正弦信号作用下, 对比了油气悬挂位移和速度特性的仿真实验结果, 如图 3 所示, 对比结果验证了联合仿真模型是正确的。

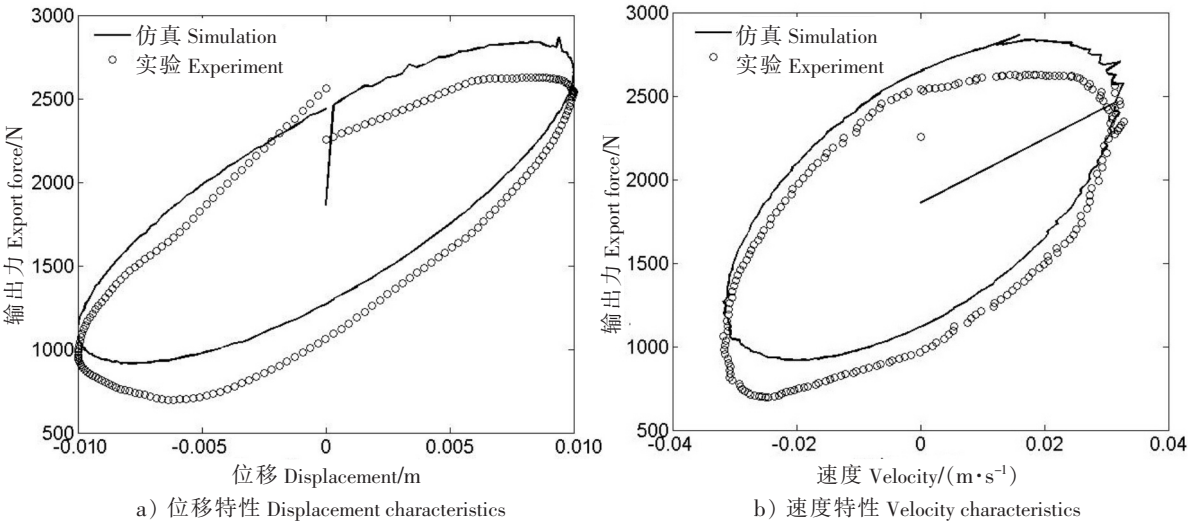


图 3 位移特性和速度特性 ($A=10\text{ mm}$, $f=0.5\text{ Hz}$)
Fig.3 Displacement and velocity characteristics

2 三轴整车油气悬挂缸连通方式分析建模

2.1 连通方式分析

本文共提出了 6 种三轴整车油气悬挂缸连通方式, 各连通方式具体结构如图 4a ~ 4f 所示。

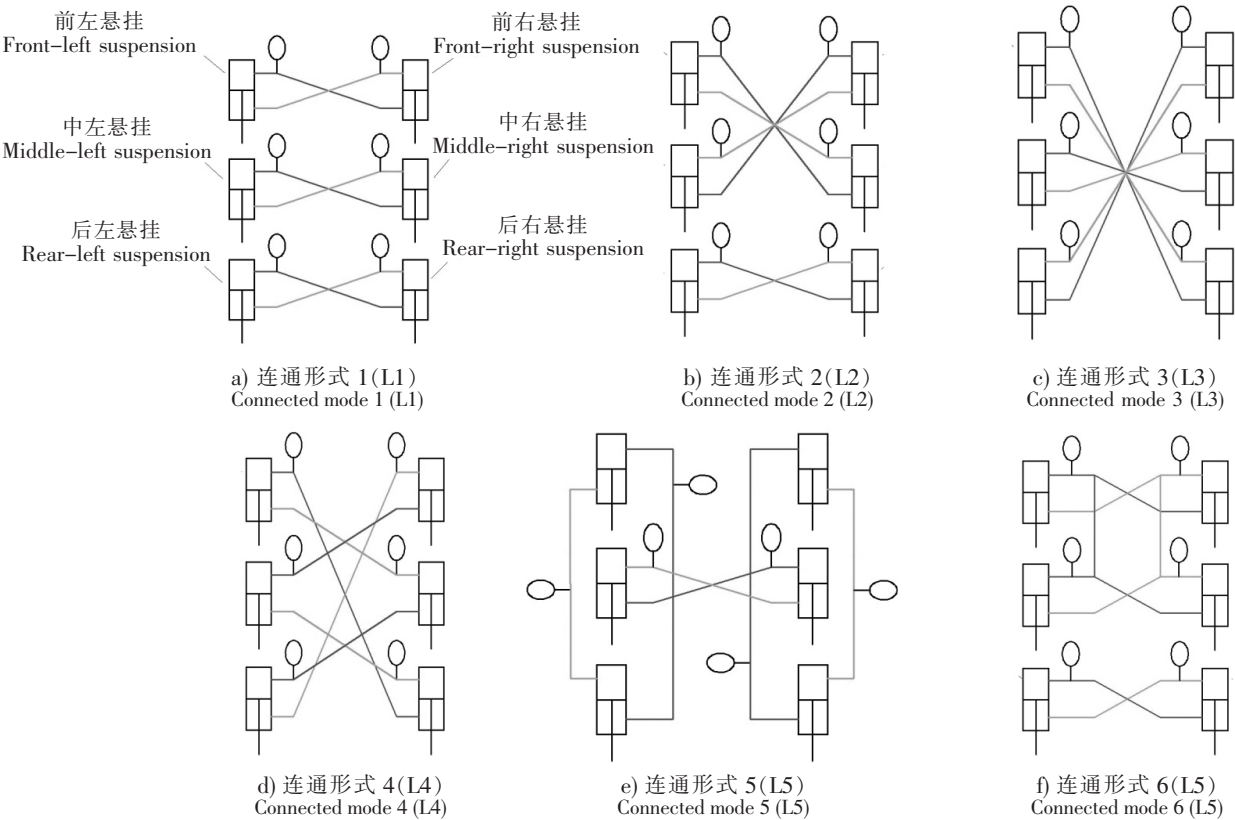


图 4 各种连通方式的油气悬挂系统

Fig.4 Connected modes of hydro-pneumatic suspension systems

2.2 油气悬挂缸连通方式的仿真建模

在双气室悬挂缸模型的基础上，运用 Adams 与 AMESim 对各连通方式的油气悬挂系统进行更加完整的仿真研究^[13-14]。

图 5 所示为 L1 连通形式油气悬挂系统整车联合模型，Adams 模型中各轴油气悬挂位移和速度变量作为 AMESim 液压系统输入，油气悬挂液压系统输出力变量作为 Adams 模型输入，通过接口变量交换实现液压系统与机械系统联合仿真。

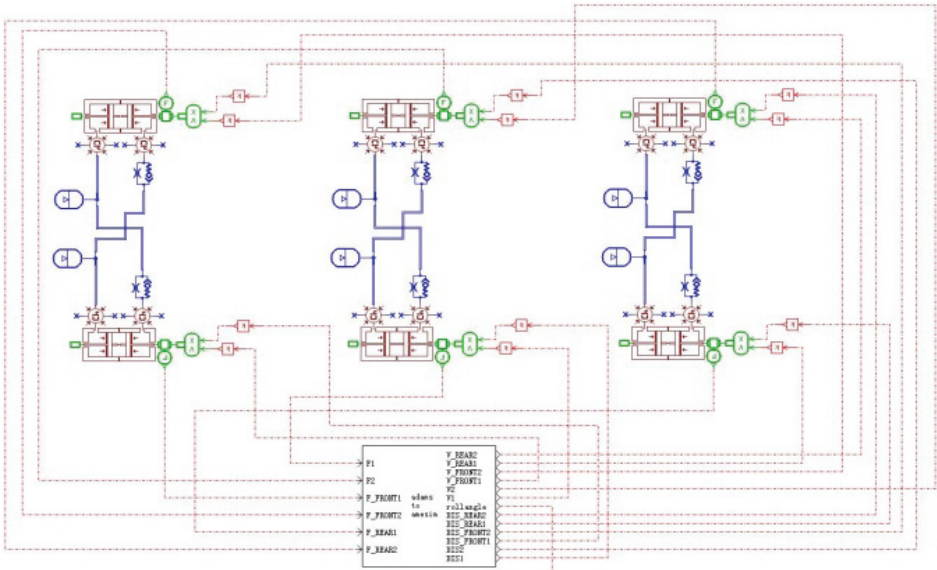


图 5 L1 油气悬挂系统联合模型

Fig.5 Co-simulation model for hydro-pneumatic suspension systems

联合模型中三轴油气悬挂系统测试平台主要参数见表 1。

表 1 三轴油气悬挂系统测试平台主要参数

Tab.2 Main parameters of three – axle test platform for hydro – pneumatic suspension systems

参数 Parameter	簧载质量 Sprung mass /kg	质心高度 Height of mass center /m	轮距 Wheelspan /m	1、2 轴轴距 Wheel-base between 1 and 2 axle/m	2、3 轴轴距 Wheel-base between 2 and 3 axle/m	侧倾转动惯 量 Rolling movement of inertia /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	俯仰转动惯 量 Pitching movement of inertia /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	横摆转动惯量 Yaw movement of inertia /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
数值 Value	2300	1.2	1.4	1.0	1.0	182.0	505.5	323.5

3 各连通形式整车油气悬挂系统综合特性分析

3.1 垂直刚度和阻尼分析

车身垂向运动特性主要由悬挂系统垂直刚度和阻尼决定，影响车辆的平顺性。在整车联合仿真模型质心施加一个 2 kN 的垂直方向的阶跃力，如图 6 所示。各连通方式油气悬挂系统整车车身位移响应曲线如图 7 所示，其中 0 ~ 4.5 s 为重力作用车身平衡响应曲线，4.5 s 后为垂向力作用下车身最终达到平衡的位移响应，两平衡位置间相对位移量即为垂向力作用下各油气悬挂系统垂向变形量。由图 7 可以看出，L1 ~ L6 各种连通方式的油气悬挂系统垂直刚度和阻尼特性无明显

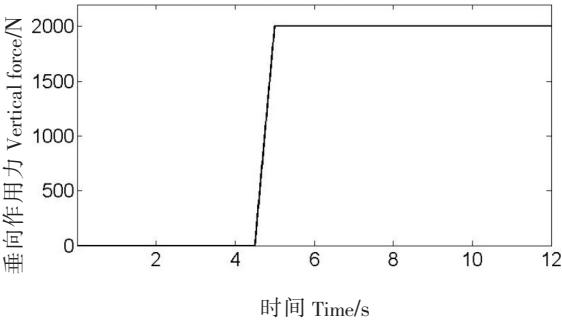


图 6 垂向作用力曲线

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb> Fig.6 Curve of vertical force

区别,并小于独立式油气悬挂系统。

为了更全面反映悬挂系统的垂直特性,通过给整车联合模型车身施加1~3 kN 6种不同垂向力,仿真计算得出各油气悬挂系统的稳态垂向变形量,并作出各油气悬挂系统垂直刚度曲线,如图8所示。

图8直观地显示了各油气悬挂系统垂直刚度大小,L1~L6连通式油气悬挂系统的垂直刚度无明显差异,但相对于独立式油气悬挂系统,则明显减小,因此L1~L6连通形式有利于提高车辆平顺性。

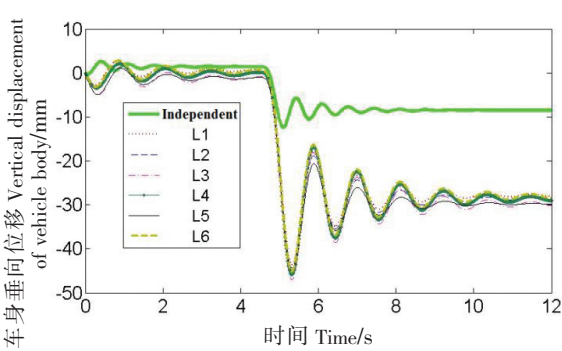


图7 车身垂直位移响应曲线

Fig.7 Vertical displacement response curve of car body

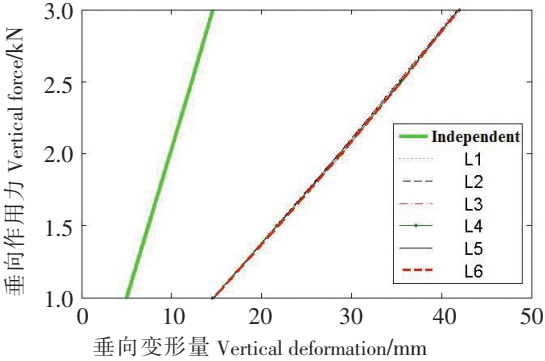


图8 垂直刚度曲线

Fig.8 Curve of vertical stiffness

3.2 侧倾刚度和阻尼分析

车身侧倾运动特性主要由悬挂系统侧倾刚度和阻尼决定,影响车辆转向性能。对整车联合模型质心处施加一个6 kN 等效离心力,阶跃如图9所示。仿真分析获得各连通形式油气悬挂系统的车身响应曲线,如图10所示。

从图10可以看出,L5连通式车身侧倾角最大,响应曲线波动最明显,即侧倾阻尼最小;L1~L4和L6侧倾角基本重合,并最小,因此其侧倾刚度和阻尼最大,独立式侧倾刚度和阻尼处于中间。

与垂直刚度特性分析方法相同,给整车联合模型车身施加2~10 kN 5种不同大小等效离心力,并作出各油气悬挂系统侧倾刚度曲线,如图11所示。

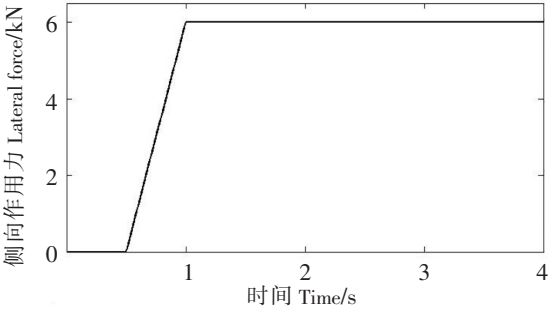


图9 侧向作用力曲线

Fig.9 Curve of lateral force

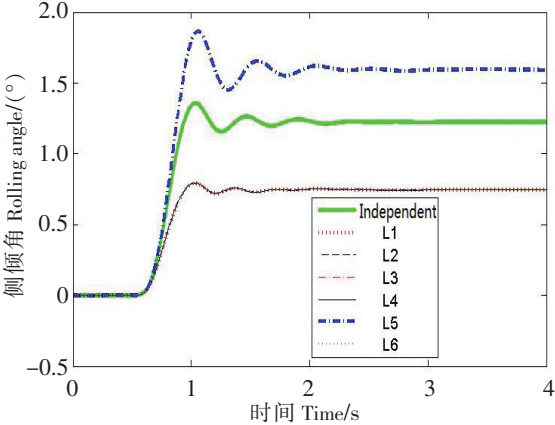


图10 车辆侧倾角响应曲线

Fig.10 Response curve of vehicle rolling angle

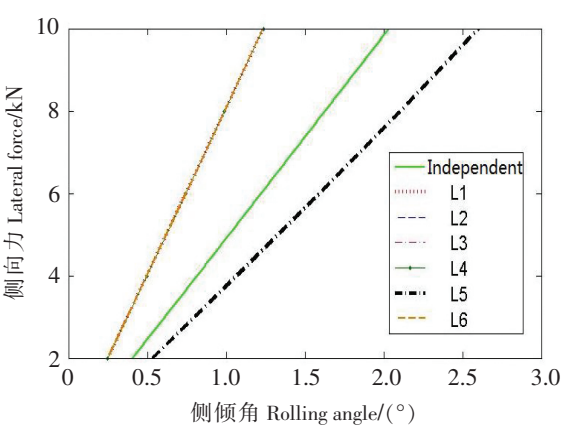


图11 侧倾角刚度曲线

Fig.11 Curve of rolling stiffness

从图11可以看出,L5连通式悬挂系统的侧倾刚度最小,L1~L4和L6侧倾刚度最大,独立式处于中间。通过各油气悬挂系统垂向、侧倾的刚度和阻尼分析可知,L1~L4和L6连通方式在减小系统垂直刚度的条件下增大了系统侧倾角刚度,因此L1~L4和L6 5种连通形式可以较好地平衡车辆转向性能

与平顺性之间的矛盾。

3.3 俯仰刚度和阻尼分析

车身俯仰运动特性主要是由悬挂系统俯仰刚度和阻尼决定的，影响车辆的抗点头性能。对整车联合模型质心施加一个 15 kN 纵向惯性力，阶跃如图 12 所示。

从图 13 可以看出各油气悬挂系统中 L6 车身俯仰角最大，曲线波动最大，所以 L6 俯仰角刚度和阻尼最小；L3 和 L5 俯仰角响应曲线重合且俯仰角最小，曲线基本无波动，说明 L3 和 L5 俯仰角刚度和阻尼最大；各轮独立和 L4 俯仰角响应曲线基本重合，小于 L2，L2 小于 L1。

对整车联合模型质心施加 5 ~ 25 kN 的 5 种不同纵向惯性力，仿真作出各油气悬挂系统俯仰角刚度曲线，如图 14 所示。

从图 14 可以看出，相对于其他连通形式，L3 和 L5 连通方式油气悬挂系统俯仰角刚度最大，抗点头性能最好。

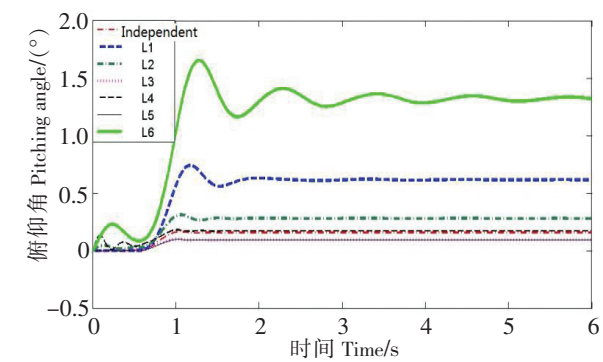


图 13 车辆俯仰角响应曲线

Fig.13 Response curve of vehicle pitching angle

综合分析各油气悬挂系统垂向、侧倾和俯仰的刚度和阻尼特性可知，连通方式中 L3 型油气悬挂系统综合性能最优。

4 总论

文中建立了三轴车辆的各种不同连通方式的油气悬挂系统联合仿真模型，并分别分析了各连通形式油气悬挂系统的垂向、侧倾、俯仰的刚度和阻尼特性，可以得到以下结论：

- 1) 针对多轴车辆，提出 6 种三轴整车油气悬挂系统连通方式。
- 2) 提出了多轴整车油气悬挂系统刚度和阻尼特性的分析方法。
- 3) 联合仿真分析结果表明，相对各轮独立油气悬挂系统，L1 - L4 和 L6 连通形式在降低系统垂直刚度和阻尼的条件下，增大系统侧倾角刚度和阻尼，较好地平衡了车辆平顺性与转向性能之间的矛盾。
- 4) 综合各油气悬挂系统垂向、侧倾和俯仰的刚度和阻尼分析结果可知，L3 型油气悬挂系统综合特性最优。

本文为多轴整车油气悬挂系统刚度和阻尼特性研究提供了有效的方法，同时可为多轴油气悬挂系统连通方式的设计与选取提供参考。

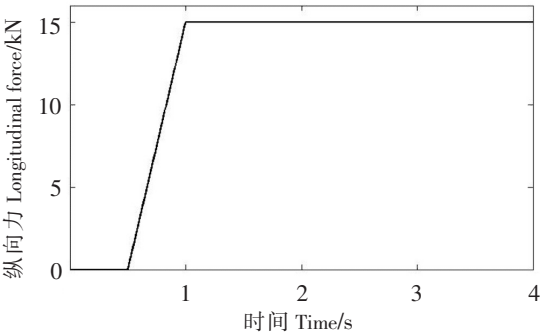


图 12 纵向作用力曲线

Fig.12 Curve of longitudinal force

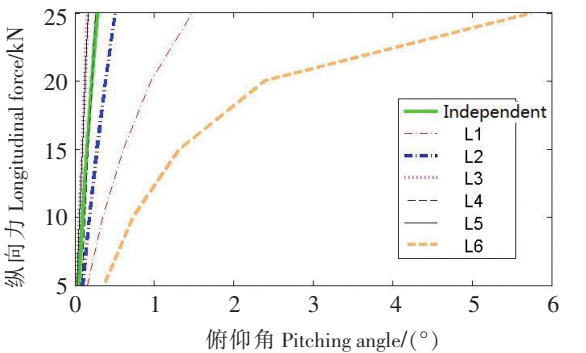


图 14 俯仰角刚度曲线

Fig.14 Stiffness curve of pitching angle

[参考文献]

- [1] 吴仁智. 油气悬架系统动力学建模仿真和试验研究. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [2] 刘刚. 重型多轴越野车辆互联油气悬架系统研究. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [3] CAO D P, RAKHEJA S, SU C Y. Roll-and pitch-plane-coupled hydro-pneumatic suspension. Part 1: Feasibility analysis and suspension properties. *Vehicle System Dynamics*. 2010, 48(3): 361-386.
- [4] CAO D P, RAKHEJA S, SU C Y. Roll- and pitch-plane-coupled hydro-pneumatic suspension. Part 2: Dynamic response analyses. *Vehicle System Dynamics*. 2010, 48(4): 507-528.
- [5] 魏建华, 杜恒, 方向, 等. 基于 ADAMS/Simulink/AMESim 的油气悬架道路友好性分析. *农业机械学报*, 2010, 4(10): 11-17.
- [6] 杜恒, 魏建华. 基于遗传算法的连通式油气悬架平顺性与道路友好性参数优化. *振动与冲击*, 2011, 3(8): 133-138.
- [7] 王增全, 申焱华, 杨珏. 连通式油气悬架数学模型及特性分析. *农业工程学报*, 2012, 8(5): 60-65.
- [8] 王云超. 多轴转向车辆转向性能研究. 长春: 吉林大学, 2007.
- [9] 王云超, 高秀华, 杨旭, 等. 油气悬挂系统参数对多桥转向特性的影响. *吉林大学学报 (工学版)*, 2007, 37(2): 269-274.
- [10] 王汉平, 张聘义, 邵自然. 混合连通式油气悬挂重型车辆的振动性能研究. *导弹与航天运载技术*, 2003(4): 7-11.
- [11] 张军伟. 多轴重型车辆互连式油气悬架系统特性研究. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [12] 林国问, 马大为, 朱忠领. 基于多轴连通式油气悬架的导弹发射车振动性能研究. *振动与冲击*, 2013, 32(12): 144-149.
- [13] 付永领, 祁晓野. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真参考手册. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [14] 李剑锋, 汪建兵, 林建军, 等. 机电系统联合仿真与集成优化案例解析. 北京: 电子工业出版社, 2010.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)