

整车油气悬挂系统性能实验台

魏彬, 王云超, 王成志, 刘金强

(集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了模拟车辆侧倾运动、俯仰运动及垂向运动, 通过使用 Pro/E 三维软件开发设计了整车油气悬挂系统的测试平台。该实验台可用于分析在多种不同工况下油气悬挂系统的整车耦合特性, 并研究油气悬挂缸安装角度对悬挂系统性能的影响。通过 ADAMS 和 AMESim 的联合仿真, 验证了实验台设计的合理性与可行性。

[关键词] 车辆; 油气悬挂; 实验台; 运动模拟; 悬挂缸安装角度

[中图分类号] U 463.33

Study on Experimental Platform for Testing Characteristics of Hydro-pneumatic Suspension Systems of Overall Vehicles

WEI Bin, WANG Yunchao, WANG Chengzhi, LIU Jinqiang

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

Abstract: There is a lack of experimental platform for testing the characteristics of hydro-pneumatic suspension system of overall vehicle currently at home and abroad. This severely restricts the research on the coupling characteristics of the suspension system of overall vehicles. Therefore, to meet the goal of simulating the vehicle's roll motion, pitch motion and vertical motion, the suspension cylinder installation angle can also be adjusted. The experimental platform for the overall vehicle hydro-pneumatic suspension system was designed by using Pro/E three-dimensional software. The experimental platform can be used to analyze the characteristics of the hydro-pneumatic suspension system under a various operating conditions, and to study the effect of the installation angle of suspension cylinders on the characteristics of the hydro-pneumatic suspension system. The rationality and feasibility for the design of experimental platform was finally the verified by the co-simulation of ADAMS and AMESim.

Keywords: hydro-pneumatic suspension; experimental platform design; simulation of vehicle movement; installation angle of hydro-pneumatic suspension cylinders

0 引言

悬挂是车架与车桥之间一切传力连接装置的总称, 起到缓冲、减震、导向的作用^[1]。悬挂系统对于车辆的操纵稳定性、平顺性以及乘坐舒适性等有着决定性的影响, 是整车中不可或缺的组成部分^[2]。油气悬挂即油气弹簧悬挂, 是一种采用油气弹簧的悬挂装置, 它以气体作为弹性介质, 液体

[收稿日期] 2018-08-08

[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项目(2011B001)

[作者简介] 魏彬(1993—), 男, 硕士生, 研究方向为多轴转向及油气悬架技术。通信作者: 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。E-mail: ychaowang@jmu.edu.cn

作为传力介质,不但具有良好的缓冲能力,还具有减振作用,同时还可调节车架的高度,适合重型车辆和大客车使用^[3]。

国内外关于油气悬挂的研究较多,单缸油气悬挂方面,Joo^[4]建立了单缸油气悬挂的非线性模型,对油气悬挂缸的动力学特性进行了研究,比较了不同激励作用下油气悬挂系统的输出特性。Moulton等^[5]从理论和实验上对油气悬挂系统的减振特性展开了充分的分析与验证。封士彩等^[6]通过 MATLAB/SIMULINK 软件建立了单缸油气悬挂系统的非线性数学仿真模型,并应用仿真和试验相结合的手段研究了单缸油气悬挂系统的特性。吴智仁^[7]对单缸油气悬挂特性进行了仿真和试验研究,并建立了不同结构型式油气悬挂侧倾特性模型。

双缸油气悬挂方面,Felez 等^[8]采用功率键合图法建立了连通式油气悬挂的非线性数学模型,并对油气悬挂系统的侧倾特性进行了研究。Geoff Rideout 等^[9]对连通式油气悬挂系统进行了动态和静态试验研究,并利用实验所得的相关数据建立了连通式油气悬挂惯性数学模型、线性与双线性数学模型。Liu 等^[10]提出左右互连油气悬挂系统方案,并利用数值仿真的手段对独立油气悬挂系统、带横向稳定杆的独立式油气悬挂系统和互连油气悬挂系统的侧倾、垂向刚度以及阻尼特性进行了对比与分析。

整车油气悬挂方面,Dongpu Cao 等^[11]提出了一种紧凑型互连油气悬挂系统,并通过仿真分析了该悬挂系统的刚度和阻尼特性。刘刚^[12]以不同工况下车辆行驶平顺性和操纵稳定性有效协调为目标,提出了一种互连式油气悬挂系统,并研究了结构等相关参数对其刚度特性及阻尼特性的影响。田文朋等^[13]搭建了整车的 Simulink/AMESim 联合仿真模型,进行整车联合仿真和实际道路试验研究,并分析对比了仿真数据与试验数据的质心加速度均方根和功率谱密度峰值。

根据目前检索的文献来看,国内外并没有用于测试整车油气悬挂系统耦合特性的实验平台,现有与油气悬挂相关的研究大多是从理论和仿真上着手,有些油气悬挂实验研究只限于单个或单桥悬挂系统,极少部分的整车油气悬挂特性测试实验也只是将车辆进行实际道路实验或将车辆直接置于振动实验台上测试,其实验车辆的侧倾及俯仰转动轴线并不固定,侧倾、俯仰力矩及相关特性的分析比较复杂,不利于油气悬挂系统整车耦合特性的研究。

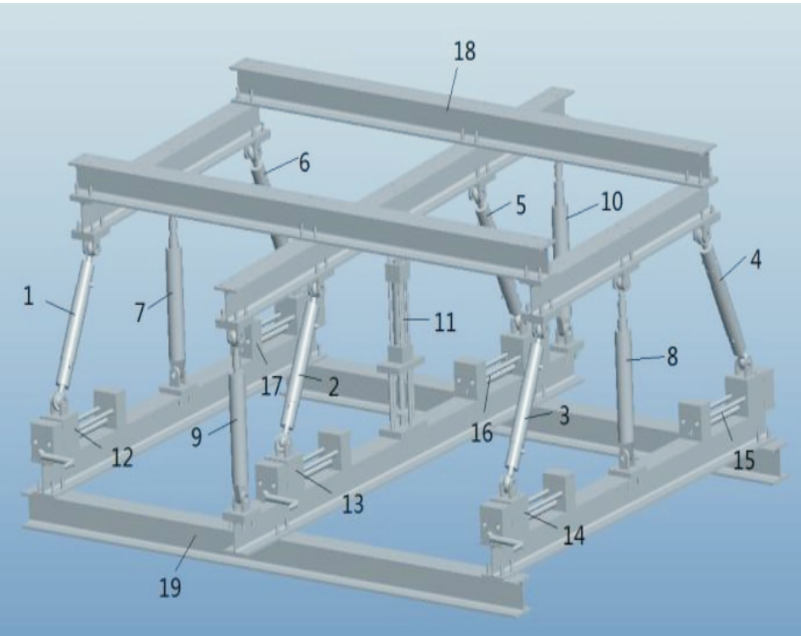
因此,本文设计了整车油气悬挂系统实验台,实验台可模拟车辆在转弯时的侧倾运动,制动或启动时的俯仰运动和遭遇路面不平时的垂向运动等工况,从全方位分析、研究整车悬挂系统的耦合特性。与此同时,实验台上设计的悬挂缸安装角度调节装置(用于调节悬挂缸轴线与水平面之间的夹角),可用于研究油气悬挂缸安装角度对悬挂系统性能的影响。

1 实验台结构设计与工作原理

1.1 整车油气悬挂系统实验台结构设计

整车油气悬挂系统实验台的设计在满足模拟车辆侧倾运动、俯仰运动及垂向运动的同时,还需调节悬挂缸的安装角度。方案经过多次修改并使用相关软件进行运动仿真,最终确定相关结构设计如图 1 所示。

图 1 中 1~6 为被测油气悬挂缸(各个悬挂缸之间通过油管与蓄能器相互连接),悬挂缸上端通过球铰与车架 18 连接,下端通过球铰与滑台 12~17 连接;滑台与底架 19 连接,滑台滑块可沿着其导轨进行滑动,进而调整悬挂缸轴线与水平面之间的夹角,即实际车辆中悬挂缸轴线与车轮轴之间的夹角,夹角调节范围为 65°~90°;图 1 中 7~10 为激励液压缸,其上端通过球铰与车架连接,下端通过铰链与底架连接,控制各个激励液压缸缸杆的伸缩运动,从而实现车身在不同工况作用下运动的模拟;在实验台中心设计一个导向液压缸 11,导向液压缸可增强实验台的整体稳定性,并和激励液压缸联合使用,起到控制实验台运动的作用。



1~6-油气悬挂缸 Hydro-pneumatic suspension cylinder;7~10-激励液压缸 Exciting cylinder;;11-导向液压缸 Guide cylinder;12~17-滑台 Slide table;18-车架 Frame;19-底座 Base

图 1 实验台三维图

Fig.1 Three-dimensional diagram of the experimental platform

1.2 整车油气悬挂系统实验台设计

将控制设备及测量仪器与整车油气悬挂系统实验台连接，并按测试要求连接好相应油管。启动油泵，打开相关油路开关，通过控制设备控制 4 个液压激励缸的伸缩，与此同时摇动滑台手柄，调节悬挂缸的安装角度，使得 6 个悬挂缸都伸缩到中间行程位置，然后将全部液压缸进出油口关闭，并为油气悬挂缸充油。

车辆转弯时油气悬挂系统的侧倾运动特性如图 2 所示。各个字母代表机构连接副的节点，关闭激励液压缸 NO_1 （即节点 N 至节点 O 之间所表示的液压缸，其余同理）、 PO_3 及导向液压缸 QO_2 的进出油口（即液压缸整体长度保持不变），控制激励液压缸 MG 和 RH 的缸杆伸缩，从而使实验台车架侧倾。

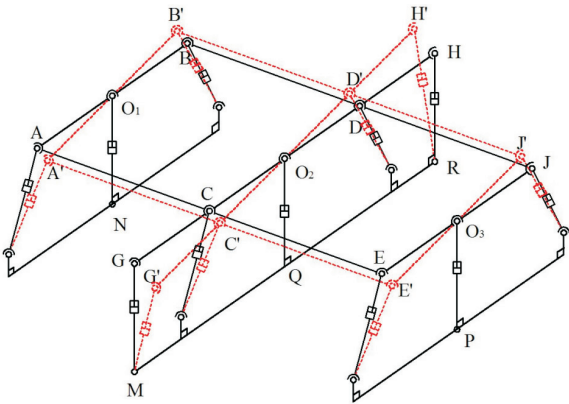


图 2 实验台侧倾运动示意图

Fig.2 Schematic diagram of the roll motion of the experimental platform

车辆制动或启动时油气悬挂系统的俯仰运动特性如图 3 所示。关闭激励液压缸 MG、RH 及导向液压缸 QO_2 的进出油口，控制激励液压缸 NO_1 和 PO_3 的缸杆伸缩，实验台车架做俯仰运动。

车辆遭遇不平路面时油气悬挂系统的垂向运动特性时如图 4 所示。打开导向液压缸 QO_2 的进出油口，同步控制激励液压缸 NO_1 、 PO_3 、MG 和 RH 的缸杆伸缩，从而达到使实验台车架整体上下平移做垂向运动的目的。

实验测试流程图如图 5 所示。工控机发送理想位移信号，伺服放大器对信号进行放大，油泵提供压力油，伺服阀根据信号控制油路开口度，激励液压缸驱动车架作出相应运动，油气悬挂、缸蓄能器和油路控制阀块等组成的悬挂系统作出响应，压力传感器检测悬挂缸压力信号，位移传感器检测到悬

挂缸实时位移信号(与此同时位移传感器采集的实时位移反馈到工控机, 和理想位移进行比较, 作出PID调节), 根据采集到的压力信号和位移信号通过相应计算处理, 得到整车油气悬挂系统的特性。

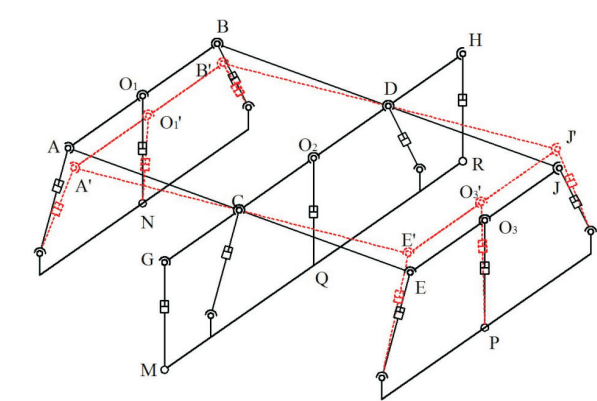


图 3 实验台俯仰运动示意图

Fig.3 Schematic diagram of the pitching motion of the experimental platform

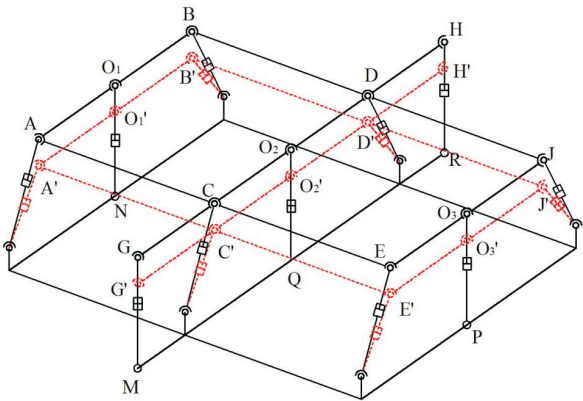


图 4 实验台垂向运动示意图

Fig.4 Schematic diagram of the bounce motion of the experimental platform

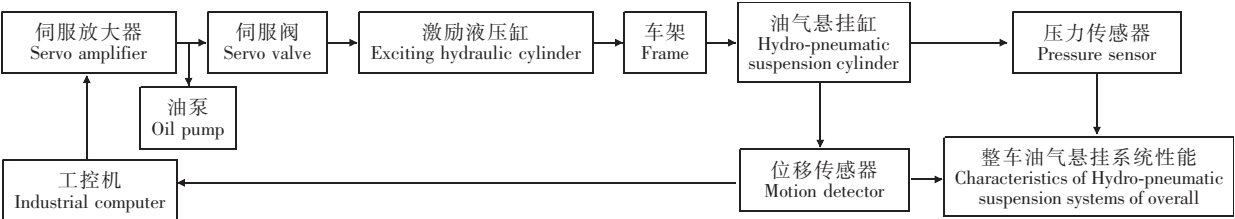


图 5 实验测试流程图

Fig.5 Flow diagram of the experimental test

2 仿真建模与分析

依据实验平台的设计方案, 使用 ADAMS 软件建立机械系统动力学模型, 并将相关构件进行参数化设置, 以满足模拟车辆运动及调节安装角度的要求。整车油气悬挂实验台的 ADAMS 模型图如图 6 所示。

根据李彦晨^[14]关于悬挂缸连通方式对悬挂系统性能影响的研究可知, L_3 型连通方式的油气悬挂系统综合特性较优, 所以此次仿真中各个悬挂缸间的连通方式选择 L_3 型, 如图 7 所示。



图 6 实验台 ADAMS 模型

Fig.6 ADAMS model of the experimental platform

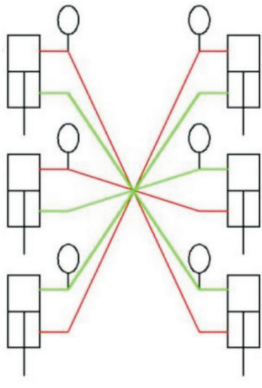


图 7 悬挂缸油路连通方式图

Fig.7 Connection diagram of the suspension cylinder oil circuit

使用 AMESim 软件建立液压系统及相关测试元器件模型，将元器件按要求合理连接、布置，并与 ADAMS 软件建立通信模块。整车油气悬挂系统 AMESim 模型如图 8 所示， F_1 至 F_6 为悬挂缸杆输出力， s_1 至 s_6 为悬挂缸杆位移， v_1 至 v_6 为悬挂缸杆运动速度， a 为车架转角。

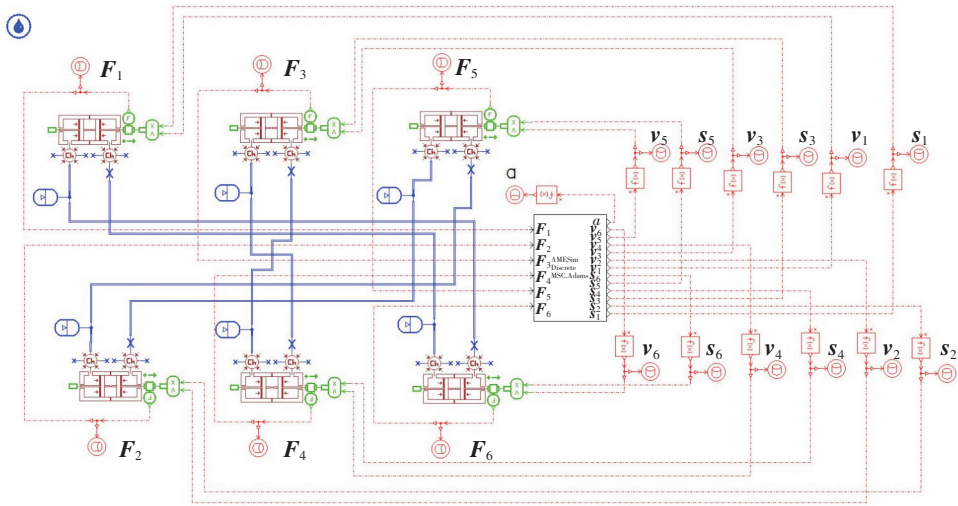


图 8 整车油气悬挂系统 AMESim 模型

Fig.8 AMESim model of hydro-pneumatic suspension systems of overall vehicles

根据设计及选用的元器件设置联合仿真模型相关参数，如表 1 所示，最后将 ADAMS 模型与 AMESim 模型进行联合运动仿真。

表 1 整车油气悬挂仿真模型参数

Tab.1 Simulation parameters of hydro - pneumatic suspension of overall vehicles

缸筒内径 Cylinder inner diameter /mm	活塞杆直径 Piston rod diameter /mm	液压缸行程 Hydraulic cylinder stroke /mm	阻尼孔直径 Damping hole diameter /mm	油管长度 Tubing length /m	轮距 Track /m	轴距 Wheelbase /m
40	32	110	4	2	1	1
油管内径 Tubing inner diameter /mm	气体多变指数 Gas variability index	蓄能器容积 Accumulator volume/L	蓄能器充气压力 Accumulator inflation pressure/MPa	平衡位置油压 Balance position oil pressure/MPa	悬挂缸初始长度 Suspension cylinder initial length/m	
10	1.4	0.4	2	5	0.5	

2.1 侧倾特性

设置 ADAMS 模型中构件的运动参数，使实验台车架侧倾转角按照正弦曲线变化，转角幅值为 0.05 rad，频率为 2 Hz（车架向右倾斜时转角值为正，向左倾斜时转角值为负）。检测 AMESim 中车架侧倾转角 a 和 6 个悬挂缸的输出力 F_1 至 F_6 （图 8 已标明），则可通过计算，得到油气悬挂系统侧倾力矩 M （侧倾力矩逆时针为正，顺时针为负）为：

$$M = F_1 \times L_1 + F_3 \times L_3 + F_5 \times L_5 - (F_2 \times L_2 + F_4 \times L_4 + F_6 \times L_6)。$$

式中： L_1 至 L_6 分别为 F_1 至 F_6 相对于转动中轴线的力臂。

悬挂缸安装角度分别为 70°、80°、90°时，车架侧倾转角与车架所受侧倾力矩的关系图如图 9 所示。从图 9 可知，在同一个运动周期内，由于阻尼孔及油管等产生的阻尼力作用，转角相等时，侧倾力矩不相等；车架的转速方向相同时（即阻尼力方向相同时），悬挂缸安装角度越大，其对应的侧倾力矩越大。

2.2 俯仰特性

同理, 使实验台车架俯仰转角按照正弦曲线变化, 转角幅值为 0.03 rad, 频率为 2 Hz (车架向前倾斜时转角值为正, 向后倾斜时转角值为负) 时, 检测 AMESim 中车架侧倾转角和 6 个悬挂缸的输出力, 则可通过计算得到油气悬挂系统俯仰力矩 M (俯仰力矩逆时针为正, 顺时针为负) 为:

$$M = F_1 \times L_1 + F_2 \times L_2 - (F_5 \times L_5 + F_6 \times L_6)。$$

悬挂缸安装角度分别为 70°、80°、90°时, 车架俯仰转角与车架所受俯仰力矩的关系图如图 10 所示。从图 10 可知, 在同一个运动周期内, 由于阻尼孔及油管等产生的阻尼力作用, 转角相等时, 俯仰力矩不相等; 车架的转速方向相同时 (即阻尼力方向相同时), 悬挂缸安装角度越大, 其对应的俯仰力矩越大。

2.3 垂向特性

同理, 使实验台车架位移按照正弦曲线变化, 位移幅值为 0.03 m, 频率为 2 Hz (车架在平衡位置以下时位移值为正, 车架在平衡位置以上时位移值为负), 检测 AMESim 中车架垂向位移和 6 个悬挂缸的输出力, 则可通过计算得到油气悬挂系统垂向力 F (垂向力向上为正, 向下为负) 为:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6。$$

悬挂缸安装角度分别为 70°、80°、90°时, 车架垂向位移与车架所受垂向力的关系图如图 11 所示。从图 11 可知, 在同一个运动周期内, 由于阻尼孔及油管等产生的阻尼力作用, 位移相等时, 垂向力不相等; 车架的速度方向相同时 (即阻尼力方向相同时), 悬挂缸安装角度越大, 其对应的垂向力越大。

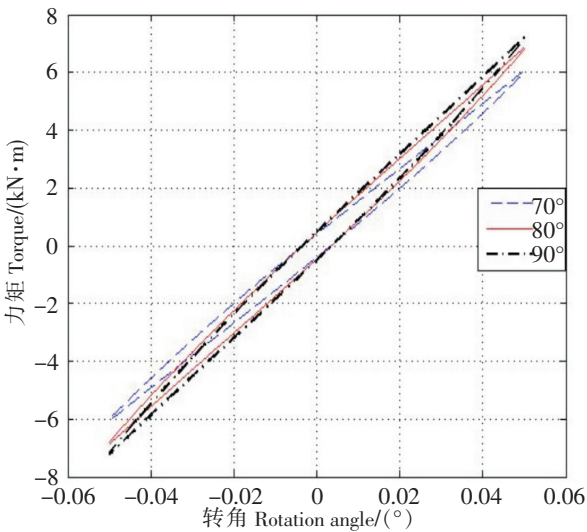


图 9 油气悬挂系统侧倾特性图

Fig.9 Rolling characteristics of hydro-pneumatic suspension systems

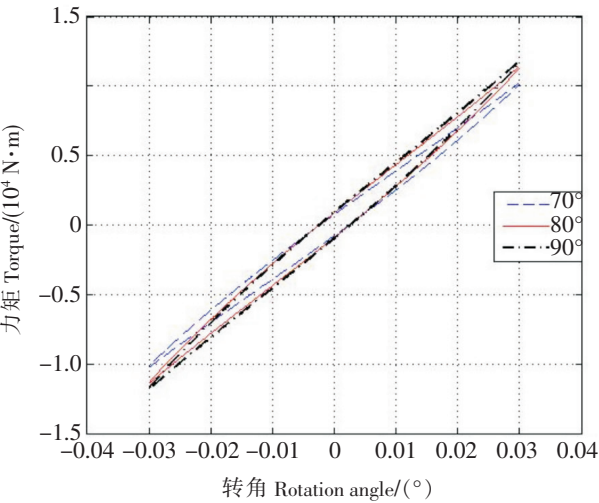


图 10 油气悬挂系统俯仰特性图

Fig.10 Pitching characteristics of hydro-pneumatic suspension systems

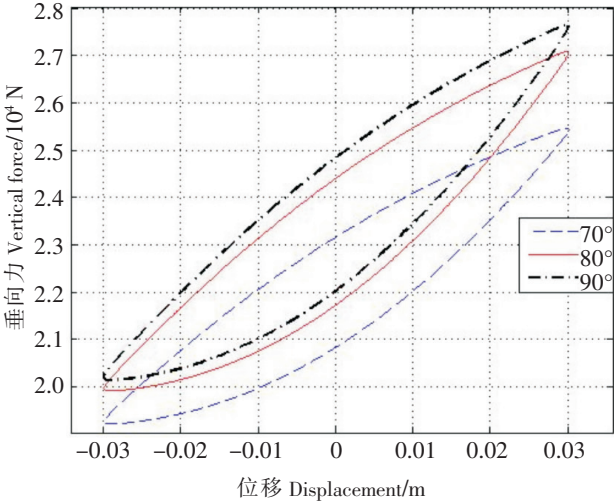


图 11 油气悬挂系统垂向特性图

Fig.11 Bouncing characteristics of hydro-pneumatic suspension systems

3 结论

1) 本文设计的实验台可以模拟车辆转弯时的侧倾运动, 刹车或启动时的俯仰运动, 以及遭遇路面不平时的垂向运动等, 进而分析在多种工况下油气悬挂系统的特性。

2) 实验台上设计的滑台可调节悬挂缸的安装角度, 即悬挂缸轴线与车轴之间的夹角, 调节范围 $65^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 从而研究悬挂缸安装角度对悬挂系统性能的影响, 这对油气悬挂缸在实际车辆上的安装具有一定的指导意义。

3) 通过 ADAMS 和 AMESim 的联合仿真, 验证了设计的合理性与可行性, 并对整车油气悬挂系统的性能有了初步的了解, 可以为进一步的实验研究提供参考。

[参考文献]

- [1] 马健. 基于某两款车型的悬架系统结构及操作稳定性分析 [J]. 企业技术开发, 2015(11): 87-88.
- [2] 何森东. 汽车弹性悬挂系统动态分析与改进设计 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [3] 刘雷. 重型车辆油气悬架非线性特性仿真研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [4] JOO F R. Dynamic analysis of a hydro-pneumatic suspension system [D]. Montreal: Concordia University, 1991.
- [5] MOULTON A E, BEST A. Hydragas suspension [R]. Warrendale: SAE Paper, 1979.
- [6] 封士彩, 吴仁智, 杨学良. 工程车辆油气悬挂性能的试验研究 [J]. 工程机械, 2000, 31(12): 9-11.
- [7] 吴仁智. 油气悬架系统动力学建模仿真和试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [8] FELEZ J, VERA C. Bond graph assisted models for hydro-pneumatic suspensions in crane vehicles [J]. Vehicle system dynamics, 1987, 16(5/6): 313-332.
- [9] RIDEOUT G, ANDERSON R J. Experimental testing and mathematical modeling of interconnected hydro-pneumatic suspension system [C]. Warrendale: SAE International, SAE2003-01-0312, 2003: 277-286.
- [10] LIU P J, RAKHEJA S, AHMED A K W. Properties of an interconnected hydro-pneumatic suspension system [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 1995, 19(4): 383-396.
- [11] CAO DONGPU, SUBHASH RAKHEJA, SU CHUNYI. Dynamic analyses of roll plane interconnected hydro-pneumatic suspension systems [J]. International Journal of Vehicle Design, 2008(47): 51-80.
- [12] 刘刚. 重型多轴越野车辆互联油气悬架系统研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [13] 田文朋, 易小刚, 郭磊, 等. 七桥混合耦合连油气悬架车辆仿真与试验 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(9): 1084-1089.
- [14] 李彦晨. 多轴车辆交连油气悬挂系统综合性能研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2016.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)