

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.007

# 连通式油气悬架升降同步控制\*

杜恒 魏建华 孔晓武

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027)

**【摘要】** 提出了一种基于调速阀和压力跟随元件的改进型连通式油气悬架系统。利用调速阀和压力跟随元件的有效组合,完成了系统刚性状态间的平稳切换,实现了大型工程车辆整车的同步升降。建立油气悬架系统AMESim仿真模型,对变负载工况下系统同步升高进行了仿真。搭建相关试验台,对该改进型系统进行试验研究,其升高过程的同步误差小于2.5 mm,刚性状态切换平稳,悬架缸无抖动现象。试验与仿真结果吻合,既验证了改进型连通式油气悬架系统的可行性,又验证了仿真模型的正确性。

**关键词:** 油气悬架 同步升降 平稳切换 仿真

**中图分类号:** U463.33<sup>+</sup>4.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0029-04

## Lifting Synchronization Control for Interconnected Hydro-pneumatic Suspension

Du Heng Wei Jianhua Kong Xiaowu

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

### Abstract

Based on flow control valve and pressure following element, an improved interconnected hydro-pneumatic suspension was presented. The suspension system achieved rigid-flexible status switching smoothly through effective combination of flow control valve and pressure following element, lifting synchronization of heavy construction vehicle was finally realized. Hydraulic system simulation model of interconnected hydro-pneumatic suspension was established in AMESim and simulation analyses for synchronization performance were carried out at variable load conditions. The test bench was set up and the experimental research was performed. Experimental results showed that synchronization error was less than 2.5 mm in the lifting process and suspension cylinder did not appear jitter when rigid-flexible status switching. The agreement between the simulation results and the experimental data proved the feasibility of the improved interconnected hydro-pneumatic suspension and the accuracy of the simulation model.

**Key words** Hydro-pneumatic suspension, Lifting synchronization, Smooth switch, Simulation

### 引言

工程车辆常用的油气悬架系统的油路连接形式有独立式和连通式两种。与独立式油气悬架相比,连通式油气悬架不仅可以降低车辆的固有频率,还可以提高车辆的侧倾刚度,减小车辆转弯时产生的侧倾角,改善车辆行驶的稳定性。所以工程车辆上

多采用连通式油气悬架系统<sup>[1-5]</sup>。

虽然连通式油气悬架具有诸多优点,但目前大型工程车辆所使用的连通式系统在车身姿态调整方面存在不足,如整车升降同步性能不理想,升降过程中抖动明显,使得车辆的乘坐舒适性及安全性有所降低。

本文从分析工程车辆传统连通式油气悬架系统

收稿日期: 2009-05-04 修回日期: 2009-08-03

\* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ12B08)

作者简介: 杜恒, 博士生, 主要从事大型工程机械电液控制系统研究, E-mail: duheng20082008@126.com

无法实现同步升降的原因着手,对传统系统进行改进和优化。提出基于调速阀和压力跟随元件组合的改进型油气悬架系统的技术方案,建立改进型系统的仿真模型并进行仿真与试验研究,验证新系统是否可以同时满足升高同步性和刚柔性状态间平稳切换的要求。

## 1 工作原理分析

在整车油气悬架系统中,各轴的液压系统基本相同,因此,可以从分析单轴液压系统的升降特性着手,进而分析整车的升降同步特性。由于升高与降低类似,本文仅分析升高工况,故系统分析中仅保留与升高同步相关的元件。传统连通式油气悬架系统简图如图1所示。蓄能器是油气悬架系统中重要的弹性元件,可使悬架系统刚度降低且具有变刚度特性,在柔性状态时可提高车辆的平顺性<sup>[6-7]</sup>。但是,在调整整车姿态如整车升高时,由于系统中的蓄能器抗负载能力差,而升高过程中负载又是变化的,进而易导致升降的不同步。可见,蓄能器在两种工况下,所起作用是不同的。由上述分析可知,传统系统不同步的原因是:升高过程中系统的抗负载能力差;升高过程中缺少流量控制元件。

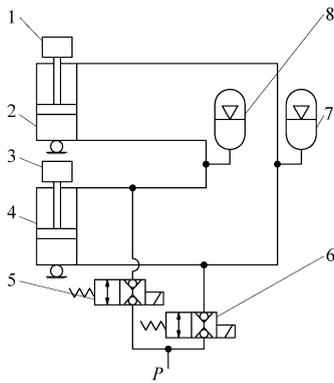


图1 传统连通式油气悬架系统简化原理图

Fig.1 Simplified schematic diagram of conventional interconnected hydro-pneumatic suspension

1、3. 悬架缸簧载质量 2、4. 悬架缸 5、6. 电磁换向阀 7、8. 蓄能器

针对上述不足,对传统系统进行优化改进。首先,在升高时,切断蓄能器,使系统处于刚性状态,消除蓄能器抗负载能力差的影响;升高完毕后再将蓄能器接入系统,使其处于柔性状态便于车辆行驶,这样既能保证升高同步也可保证车辆行驶平顺性。但是,由于升降完毕后,蓄能器和悬架缸内压力不同,简单的切换会造成压力冲击进而带来整车的抖动。为了消除冲击和抖动,在系统中加入压力跟随元件。该元件可使蓄能器中压力随时跟踪悬架缸内压力,可实现切换过程无压力冲击,保持车身的稳定。其

次,新增加的调速阀,分别控制进入两支油路的流量,由于蓄能器已被切断,整个悬架系统处于刚性状态,抗负载能力很强,流量的调控可实现两缸的同步升高<sup>[8]</sup>。改进型的系统如图2所示。

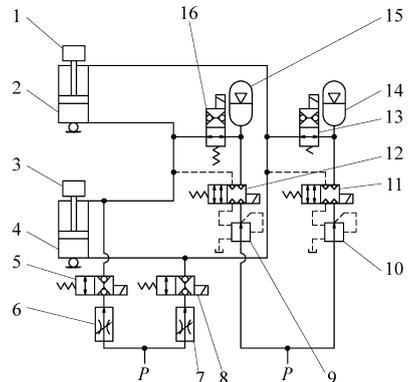


图2 改进型连通式油气悬架系统简化原理图

Fig.2 Simplified schematic diagram of improved interconnected hydro-pneumatic suspension

1、3. 悬架缸簧载质量 2、4. 悬架缸 5、8、13、16. 电磁换向阀 6、7. 调速阀 9、10. 压力跟随元件 11、12. 两位四通电磁球阀 14、15. 蓄能器

如图2所示,改进型系统同步升高的工作原理是:当整车从最下端升高时,电磁阀5、8、11、12、13、16均得电,高压油液推动悬架缸升高,由于此时蓄能器被切断以及调速阀6、7的流量控制,则可实现同步升高;当升高到位时,电磁阀5、8、11、12、13、16失电,关闭高压油口,将蓄能器接入系统转成为柔性状态,由于压力跟随元件的作用,蓄能器内压力始终跟踪悬架缸内的压力,即使升高过程中悬架缸内压力的变化,也不影响切换过程的平稳性。实现了刚、柔性状态的无冲击切换,使悬架缸保持了无抖动的平稳性。

## 2 液压系统模型建立与仿真分析

液压油的可压缩性、液压元件的非线性特性及泄漏、库仑力等因素对液压系统的控制效果均产生影响,为了使液压系统的仿真模型尽可能地切合实际,本文采用专用的液压系统建模仿真平台AMESim,该系统充分考虑了液压系统特性并具有强大的解算能力<sup>[9]</sup>。

建模时,首先对系统中重要的液压元件建模,然后,由元件模型搭建成系统的参数化模型。考虑到大型工程车辆系统对调速阀流量-负载调节刚性要好、阀的体积要小的要求,采用压力补偿器加固定液阻来实现调速阀功能。其仿真模型如图3中元件15、16。压力跟随元件模型采用HCD (hydraulic component design) 库建模,仿真模型如图3中元件13、14,图中的A口压力始终跟踪X口

压力,模型参数均根据实物阀设置的。在建立负载模型时,由于悬架缸负载较大,单缸承重约有 5 t,考虑采用活塞缸对顶悬架缸加载,活塞缸加载

模型即为加载系统的仿真模型,如图 3 中元件组 1 所示。改进型连通式油气悬架液力系统的仿真模型如图 3 所示。

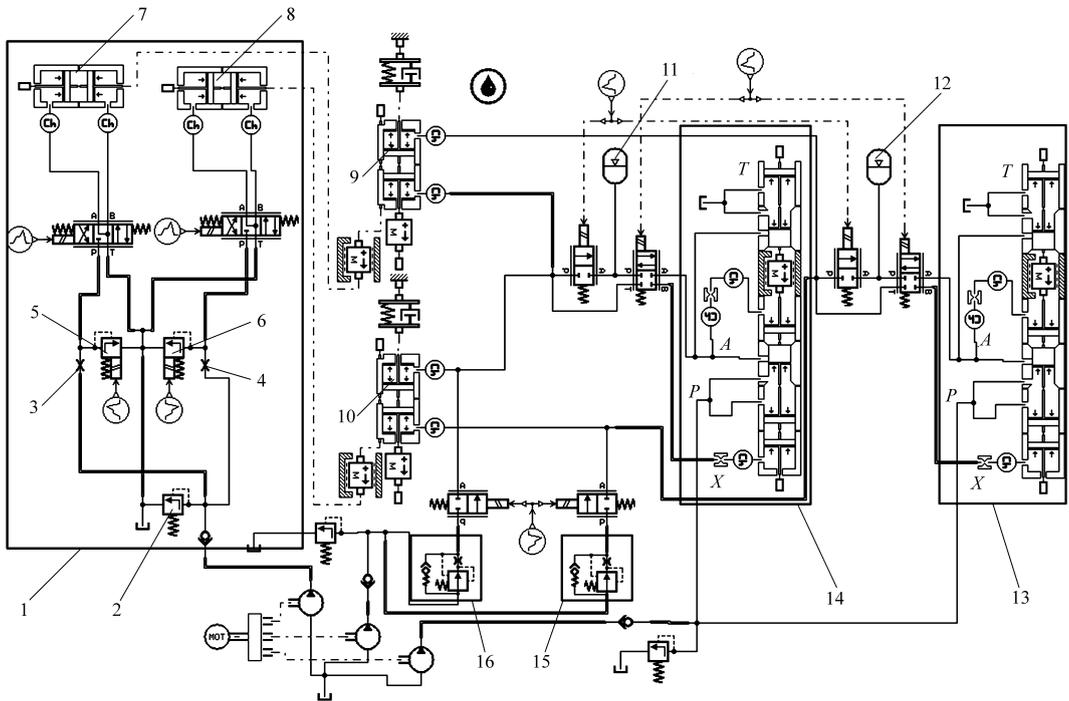


图 3 改进型连通式油气悬架系统仿真模型

Fig. 3 Simulation model of improved interconnected hydro-pneumatic suspension

1. 负载元件组 2,5,6. 溢流阀 3,4. 液阻 7,8. 加载缸 9,10. 悬架缸 11,12. 蓄能器 13,14. 压力跟随元件 15,16. 调速阀

本文对最复杂的变负载工况下升高同步特性进行分析。参见图 3,为了模拟变负载,一侧加载缸 7 中的大腔加载压力恒定为 8 MPa,另一侧加载缸 8 的大腔加载压力从 13 MPa 变化到 8 MPa。若要产

生上述压力变化,可调节溢流阀 2 压力 15 MPa,由于两个液阻 3,4 与溢流阀节流口构成液阻网络,此时分别调整溢流阀 5,6,即可产生上述的变负载压力。主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 连通式油气悬架系统仿真模型参数

Tab.1 Simulation model parameters of interconnected hydro-pneumatic suspension

参数	悬架缸缸径/mm	悬架缸缸杆径/mm	悬架缸缸行程/mm	加载缸缸径/mm	加载缸缸杆径/mm	加载缸缸行程/mm	调速阀调定压差/MPa	调速阀固定液阻孔径/mm	蓄能器初始充气压力/MPa	蓄能器总容积/L	调压液阻孔径/mm	仿真时间/s
数值	115	95	350	75	40	300	0.55	1.5	5	4.5	2	50

从第 5 秒开始进行同步升高,此时图 3 中加载缸 8 开始变负载,升高 40 s 后,停止同步升高,该加载缸停止变负载,可得到两加载缸的大腔加载压力变化如图 4 所示,可见,悬架缸在升高过程中负载是变化的。悬架缸同步升高的位移曲线如图 5,由图 5 可知从第 5 秒开始升高到第 45 秒升高结束的过程中,两悬架缸的同步性能良好,基本无同步误差。可见,改进系统同步升高过程中抗变负载能力较强,负载变化对其同步性能基本无影响。升高结束时将蓄能器接入系统,悬架缸未出现抖动情况,可见加入压力跟踪系统后,能很好实现刚性与柔性状态之间的

平稳切换。

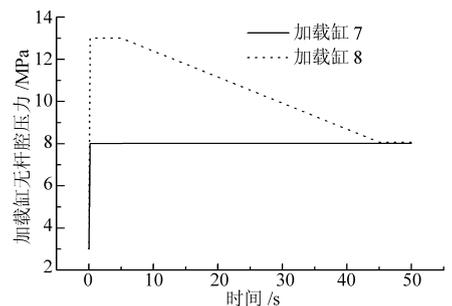


图 4 加载缸加载压力仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of load pressure

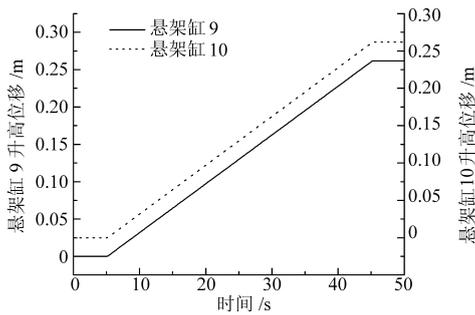


图5 悬架缸同步升高位移仿真曲线

Fig. 5 Lifting synchronization displacement simulation curves of suspension cylinder

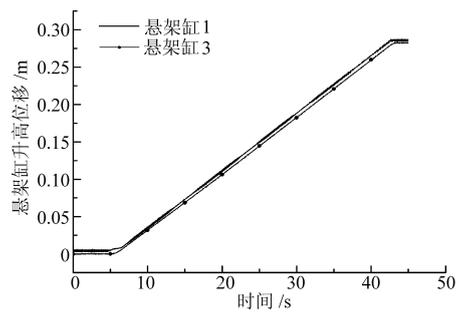


图7 改进连通式油气悬架同步升高试验位移曲线

Fig. 7 Lifting synchronization displacement test curves of improved interconnected hydro-pneumatic suspension

### 3 试验验证

为了测试改进型油气悬架系统实际升高同步特性及验证仿真模型的正确性,搭建的试验台原理图如图6所示,试验方法与仿真方法相同。

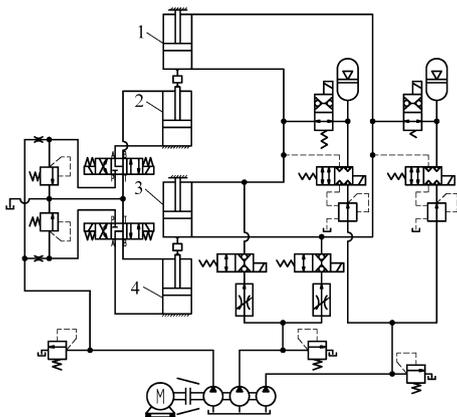


图6 试验台液压原理图

Fig. 6 Test hydraulic diagram

1、3. 悬架缸 2、4. 加载缸

试验时悬架缸活塞缸筒装有外置式磁滞伸缩位移传感器,使用 LabView 及研华 4711 采集系统采集位移数据。悬架缸 1、3 的位移同步试验曲线如图7所示,由试验曲线可知,在变负载工况下升高时,同步性能良好。两悬架缸去除初始偏差后的同步误差如图8所示,其最大位移同步误差约为 2.5 mm,可满足工程应用的需求。当试验进行至第 42 秒时,由刚性状态转变为柔性状态,悬架缸未出现抖动,可见加入压力跟踪系统后,可实现刚柔性状态间的平稳切换。试验结果与仿真结果基本吻合,验证了仿真模型的正确性和改进型系统的可行性。

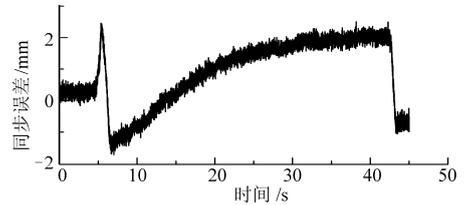


图8 悬架缸升高位移同步误差曲线

Fig. 8 Lifting synchronization error curve of suspension cylinder

### 4 结论

(1) 提出了一种有工程实用价值的改进型连通式油气悬架系统。该系统增加了调速阀控制各悬架油缸的升降速度,同时也加入了压力跟随系统,以提高悬架系统升降过程的抗负载刚度,并使得系统刚性与柔性状态间实现无冲击切换,最终实现悬架系统的同步升降。

(2) 利用建立的 AMESim 仿真模型,对改进型连通式油气悬架系统的同步升高特性进行了仿真,仿真结果表明,该系统在升高阶段抗负载能力强,同步性好,能实现刚性与柔性状态间的无冲击切换。

(3) 搭建试验台,对改进型油气悬架系统进行了试验,试验表明同步误差小于 2.5 mm,停止升高时的悬架缸无抖动,实现了刚性与柔性状态间无冲击切换。试验结果既验证了改进型连通式油气悬架系统方案的可行性,也验证了仿真模型的正确性。

(4) 采用基于压力跟随无冲击切换方式,使柔性元件在系统中既保持柔性作用,又可消除柔性元件造成系统抗负载能力差的影响,提高了系统的工程适用性。

### 参考文献

- 1 Moulton A E, Best A. Hydragas suspension [C]. SAE Paper 790374, 1979.
- 2 Rideout G, Anderson R J. Experimental testing and mathematical modeling of the interconnected hydragas suspension system [C]. SAE Paper 2003-01-0312, 2003.

- Wu Yulin, Ge Liang, Chen Naixiang. Large eddy simulation of silt-liquid two-phase flow through a centrifugal pump impeller [J]. Tsinghua University: Sci. & Tech., 2001, 41(10):93~96. (in Chinese)
- 7 刘栋,杨敏官,李辉,等.化工泵叶轮内部固液两相流场的研究[J].水泵技术,2007(3):16~19.  
Liu Dong, Yang Minguan, Li Hui, et al. Solid-liquid two-phase study in impeller of a chemical centrifugal pump [J]. Pump Technology, 2007(3):16~19. (in Chinese)
- 8 刘栋,杨敏官,高波.离心泵叶轮内部伴有盐析流场的PIV试验[J].农业机械学报,2008,39(1):55~58,63.  
Liu Dong, Yang Minguan, Gao Bo. PIV measurement of flow with salt-out in centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1):55~58,63. (in Chinese)
- 9 Schilling Rudolf, Frobenius, Moritz. Numerical simulation of two-phase flow in centrifugal pump impellers [C] // Proceedings of the 2002 ASME Joint U.S - European Fluids Engineering Conference, Simposia, 2002.
- 10 Shi Depan, Luo Zhenghong, Zheng Zuwei. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow in a tubular loop polymerization reactor [J]. Power Technology, 2010, 198(n1):135~143.
- 11 陈次昌,杨昌明,熊茂涛.低比转速离心泵叶轮内固液两相流的数值分析[J].排灌机械,2006,24(6):1~3.  
Chen Cichang, Yang Changming, Xiong Maotao. Numerical analysis on two-phase flow through impeller of low-specific-speed centrifugal pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(6):1~3. (in Chinese)

(上接第32页)

- 3 刘凤国,王晓燕,封士彩.连通式油气悬挂车辆三种行驶状况下数学模型的建立[J].机械制造与自动化,2006,35(3):36~40.  
Liu Fengguo, Wang Xiaoyan, Feng Shicai. The math-model's found of interconnect oil-air suspension vehicle in three exercise state [J]. Machine Building & Automation, 2006, 35(3):36~40. (in Chinese)
- 4 卢毅非.连接式油气悬架的特性分析[J].工程机械,1995,26(4):11~14.  
Lu Yifei. Characteristic analysis of connection type oil-gas suspension [J]. Construction Machinery and Equipment, 1995, 26(4):11~14. (in Chinese)
- 5 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[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(2):269~274.  
Wang Yunchao, Gao Xiuhua, Yang Xu, et al. Effect of hydro-pneumatic suspension parameters on steering characteristics of multi-axle-steering vehicle [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(2):269~274. (in Chinese)
- 6 吴仁智.混合与分离式油气悬架动力学试验研究[D].上海:同济大学,2003.  
Wu Renzhi. Testing & research on dynamics of the mixed & separated hydro-pneumatic suspension [D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- 7 杨杰,陈思忠,吴志成,等.油气悬架可控刚度阻尼设计与试验[J].农业机械学报,2008,39(10):20~24.  
Yang Jie, Chen Sizhong, Wu Zhicheng, et al. Design and testing on the hydro-pneumatic suspension with controllable stiffness and damping [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10):20~24. (in Chinese)
- 8 苏东海,韩国惠,于江华,等.液压同步控制系统及其应用[J].沈阳工业大学学报,2005,27(4):364~367.  
Su Donghai, Han Guohui, Yu Jianghua, et al. Design and application of hydraulic synchronization control system [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2005, 27(4):364~367. (in Chinese)
- 9 卢宁,付永领,孙新学.基于AMESim的双压力柱塞泵的数字建模与热分析[J].北京航空航天大学学报,2006,32(9):1055~1058.  
Lu Ning, Fu Yongling, Sun Xinxue. Digital modeling of double press axial piston pump and its thermal analysis basing on AMESim [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(9):1055~1058. (in Chinese)