

大功率拖拉机悬浮式前桥悬架插装式比例阀建模与设计

顾进恒^{1,2} 傅生辉^{1,2} 刘长卿^{1,2} 李臻^{1,2} 朱忠祥^{1,2} 毛恩荣^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 悬浮式前桥作为大功率轮式拖拉机的关键零部件,对衰减因路面扰动激励而产生的振动有着重要作用,而插装式比例阀为悬浮式前桥系统的振动控制过程提供了重要保障。本文设计了用于前桥悬架系统的插装式比例阀液压系统回路,并对工作机理进行了分析,建立了非线性数学模型,明确了设计部件与悬架性能之间的内在关联,通过部件参数的设计优化,可实现多种模式的前桥悬架阻尼调节。为降低设计参数的不确定性及设计方案的重复性,采用田口设计方法,选择蓄能器状态、节流阀孔径等因素作为设计因子,以阶跃和正弦激励作为噪声因子,设计了6因子混合水平的田口实验方案,并对设计方案进行信噪比和均值的方差分析。结合 AMEsim 仿真模型对设计方案进行验证分析,得到基于悬架输出力、簧载质量振动加速度评价指标的最优配置设计,并对其设计方案进行动态特性分析。结果表明:当负载阶跃变化时,约2 s内,液压油缸两腔压力可调整至平衡位置;当路面阶跃激励时,插装式比例阀可快速响应,调整时间小于0.5 s,系统可达到稳定状态,满足大功率轮式拖拉机前桥悬架运输作业工况下的减振需求。

关键词: 大功率轮式拖拉机; 前桥悬架系统; 插装式比例阀; 田口设计方法; 最优配置; 动态特性

中图分类号: U463.33; S219.033 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0542-08

Modeling and Design of Cartridge Proportional Valve of Front Axle Suspension for High-power Wheeled Tractor

GU Jinheng^{1,2} FU Shenghui^{1,2} LIU Changqing^{1,2} LI Zhen^{1,2} ZHU Zhongxiang^{1,2} MAO Enrong^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As a key component of a high-power wheeled tractor, the front axle suspension plays an important role in absorbing the vibration caused by random road excitation, and the plug-in proportional valve provides an important support for the vibration control of the front axle suspension system. For developing the design capability of exclusive agricultural machinery, a hydraulic system circuit of the plug-in proportional valve for the front axle suspension system was developed, and its structure mechanism was analyzed to construct the front axle suspension system that can be opened in time. On the basis of this situation, a nonlinear mathematical model was established to clarify the inherent relationship between design component and suspension performance. And then, various modes of front axle suspension with adjustment damping can be realized via the design optimization of the component parameters. In addition, in order to reduce the uncertainty of the design component parameters and the repeatability of the design schematic, Taguchi design method was introduced to implement and take the accumulator, throttle valve size, proportional valve as design factors. Step and sinusoidal excitation were regarded as noise factor. A 6-factor mixed level Taguchi experimental design schematic was developed. Subsequently, the variance analysis of the signal to noise ratio and mean value of each design scheme were derived. Combined with the AMEsim simulation model, the optimal design scheme was analyzed and verified on the basis of the evaluation indicator with suspension output force and sprung mass vibration acceleration, the sprung mass vibration acceleration can be reduced, which can effectively

收稿日期: 2020-08-01 修回日期: 2020-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700101)

作者简介: 顾进恒(1989—),男,博士生,主要从事农机装备智能化设计和拖拉机振动控制研究,E-mail: gujinheng@126.com

通信作者: 毛恩荣(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计、液压传动和自动控制研究,E-mail: gxy15@cau.edu.cn

improve the driving comfort of the tractor. On the basis of the AMEsim simulation model, the dynamic property of the optimal design scheme was analyzed. When the load was changed, the pressure of the two chambers of the hydraulic cylinder can be adjusted to the equilibrium position with about 2 s; when the road was excited by step, the plug-in proportional valve can respond quickly, the adjustment time was less than 0.5 s, which can promote the ride comfort of the wheeled tractor, thereby enhancing the design capability and providing the reference for the design and development of the front axle suspension system for high-power wheeled tractor.

Key words: high power wheeled tractor; front axle suspension; cartridge proportional valve; Taguchi design method; optimal configuration design; dynamic property

0 引言

悬浮式前桥悬架作为大功率轮式拖拉机的关键部件,能够缓和凹凸不平地面引起的冲击载荷对拖拉机机体的冲击,衰减由于路况与行驶速度相互作用而产生的低频振动^[1-2],以适应拖拉机高速运输作业的市场需求^[3];而田间作业时,拖拉机的锁定机构使弹性元件不起缓冲作用,从而减少机体俯仰振动对作业质量的影响^[4]。同时,拖拉机前桥悬架减振机构可有效衰减拖拉机行驶过程中的颠簸振动,降低对驾驶员的危害,改善拖拉机的行驶平顺性和驾驶舒适性^[5-6]。而插装式比例阀作为前桥悬架的核心液压零部件,用于控制液压悬架系统的振动衰减,其性能的优劣直接影响了拖拉机前桥振动控制的质量和效率。

目前,国外大功率轮式拖拉机均装配有前桥悬架^[7-8],主要为液压悬架系统,可根据路面工况进行压力和流量补偿,以实现悬架刚性和柔性的自动调整,直接提升拖拉机前轮与地面的接触效率,增加拖拉机的行驶速度和稳定性^[9-10]。而国内由于核心零部件研发能力的不足,拖拉机前桥系统仍多数采用刚性前桥系统,由于缺乏衰减振动的有效部件,很大程度上制约着拖拉机舒适性的提升,已难以适应高端农机的发展需求^[11-12]。此外,国内学者对拖拉机前桥悬架系统及关键技术的研究仍处于起步阶段,且主要集中在悬架特性分析方面,而对于插装式比例阀建模与设计分析方面研究相对不足^[13-15]。王增全等^[16]研究了参数变化对连通式油气悬架刚度与阻尼特性的影响。GOBBI等^[17]分析了前桥悬架对拖拉机驾乘舒适性的影响。赵建军^[18]对重型拖拉机比例提升阀进行了数学建模与性能分析。可见,对于大功率轮式拖拉机前桥悬架插装式比例阀结构部件的设计与参数优化研究不足。

因此,本文设计用于前桥悬架系统的插装式比例阀液压系统,分析其在大功率轮式拖拉机中的工作原理,在分析插装式比例阀结构基础上,建立非线性数学模型,通过 AMEsim 搭建仿真模型,结合田口

设计方法,对各设计方案进行仿真分析,分析影响系统性能的设计控制因子,以期得到最优的部件参数,并对插装式比例阀的动态特性进行分析验证。

1 悬浮式前桥悬架系统结构及工作原理

图 1(图中 A 为集成阀块,P 为进油口,T 为回油口)为大功率轮式拖拉机悬浮式驱动前桥悬架系统及其液压系统原理图。主要由蓄能器、节流阀、液压油缸、插装式比例阀等组成。通过开启比例换向阀 9、11,液压油经进油口流入液压缸无杆腔,提升拖拉机前部。通过开启比例换向阀 8、10,液压缸内液压油回流到油箱,降低拖拉机前部高度。通过调节比例阀 3、4 和节流阀 5、6、7 的节流孔径,实现对悬架刚度和阻尼的调节。此外,当在田间作业时,关闭蓄能器和插装式比例阀,实现悬架系统的锁止。

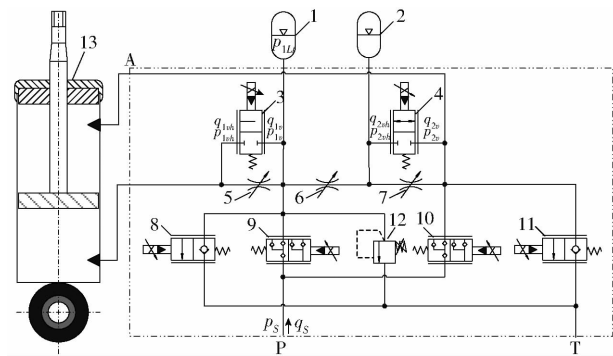


图 1 悬浮式驱动前桥悬架系统原理图

Fig. 1 Schematic of front axle suspension

1、2. 蓄能器 3、4. 两位三通比例阀 5、6、7. 节流阀 8、11. 两位三通比例换向阀 9、10. 两位三通比例换向阀 12. 溢流阀 13. 液压油缸

当两位三通比例换向阀和两位三通比例换向阀不通电时,经由蓄能器对液压油的储存和释放,通过节流阀孔的调节,实现前桥悬架限定位置范围内的悬浮功能。当两位三通比例换向阀和两位三通比例换向阀通电时,通过对液压油缸的充放油,实现前桥悬架的位置调节功能。当悬架系统处于锁止状态时,前桥悬架不起缓冲作用,以保持前桥刚性,进而减少机体俯仰振动对田间作业质量的影响。最终,形成适时开启的前桥悬架系统,既保障田间作业的

高操纵性,又可以提升运输作业的驾乘舒适性,满足大功率轮式拖拉机田间和高速转场运输作业的需求。

2 前桥悬架插装式比例阀数学建模与分析

对于大功率轮式拖拉机前桥悬架系统,其水平位置调节功能主要由两位三通比例换向阀和两位两通比例换向阀的开、关来实现,其建模过程已有相关研究^[19-21],考虑到拖拉机前桥悬架系统是一个叠加在限定位置控制上的减振系统,因此,采用已有的两位三通比例换向阀和两位两通换向阀模型,不再对其详细描述,只对减振回路部分进行建模。

2.1 蓄能器至液压油缸部分数学模型建立

2.1.1 蓄能器数学模型

根据隔膜式蓄能器内部结构,可将其简化为气体弹簧-阻尼模型。以蓄能器1为例,蓄能器内力平衡方程为

$$(p_{1Lt} - p_{1Ut})A_{1a} = C_{1a} \frac{\dot{V}_{1t}}{A_{1a}} + K_{1a} \frac{V_{1t}}{A_{1a}} \quad (1)$$

其中

$$K_{1a} = \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{d(p_{1Ut}A_{1a})}{d\left(\frac{V_{1t}}{A_{1a}}\right)} = A_{1a}^2 \frac{dp_{1Ut}}{dV_{1t}} = A_{1a}^2 \frac{rp_{1a0}V_{1a0}^r}{V_{1t}^{r+1}} \quad (2)$$

$$C_{1a} = 8\pi\mu \frac{V_{1t}}{A_{1a}} \quad (3)$$

式中 p_{1Ut} ——蓄能器 t 时刻上腔气体压力,MPa

p_{1Lt} ——蓄能器 t 时刻下腔油液压力,MPa

A_{1a} ——隔膜受力面积, m^2

K_{1a} ——气体刚度系数

C_{1a} ——气体阻尼系数

r ——气体多变指数

μ ——气体粘度系数

p_{1a0} ——蓄能器1初始充气压力

V_{1a0} ——蓄能器1初始充气体积

V_{1t} —— t 时刻蓄能器内气体体积

假设流入蓄能器进油阀末端的流量为 q_{1at} ,即油腔油液流量变化和蓄能器气腔体积变化的关系为 $q_{1at} = -\Delta V_{1t}/\Delta t$,且气体体积变化和油液流量变化相反。此外,对于蓄能器进油口,将其视为短孔,则

$$q_{1at} = -\dot{V}_{1t} \quad (4)$$

$$q_{1at} = \text{sign}(p_{1at} - p_{1Lt}) C_{1d} A_{1d} \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{1at} - p_{1Lt}|} \quad (5)$$

式中 p_{1at} ——蓄能器1进油口压力,Pa

A_{1d} ——进油口面积, m^2

C_{1d} ——进油口流量系数,取0.82

ρ ——油液密度,取 900 kg/m^3

$\text{sign}(\cdot)$ ——符号函数

2.1.2 两位两通比例阀数学模型

以比例阀3为例,两位两通比例阀节流口模型如图2所示。

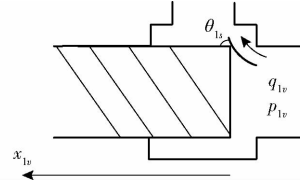


图2 两位两通比例阀节流口模型

Fig. 2 Orifice model of two position two-way proportional directional valve

(1) 比例阀压力-流量方程

流入比例阀的流量 q_{1v} 为

$$q_{1v} = \text{sign}(p_{1v} - p_{1at}) C_{3d} A_{1v} \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{1v} - p_{1at}|} \quad (6)$$

式中 C_{3d} ——节流口流量系数,取0.65

A_{1v} ——进油口通流面积, m^2

p_{1v} ——比例阀出口压力,MPa

(2) 比例阀流量连续方程

忽略比例阀内部间隙处的油液泄漏,则

$$q_{1v} - q_{1vh} = \frac{V_{1v}}{\beta_{1v}} \dot{p}_{1v} \quad (7)$$

式中 q_{1vh} ——流入液压缸流量, m^3/s

V_{1v} ——比例阀腔内容积, m^3

β_{1v} ——油液的体积模量,Pa

(3) 主阀芯力平衡方程

主阀芯主要受到静压力,忽略受到的瞬态液动力和干摩擦力等,则

$$F_{1v} - p_{1v} A_{1es} = m_{1v} \ddot{x}_{1v} + B_{1v} \dot{x}_{1v} + K_{1vs} x_{1v} + F_{1vs} \quad (8)$$

其中 $F_{1v} = K_f(u - K_{1vs} \dot{x}_{1v}) \quad (9)$

$$F_{1vs} = 2C_{1v} C_{3d} A_{1es} |p_{1v} - p_{1at}| \cos\theta_{1s} \quad (10)$$

式中 C_{1v} ——主阀芯流速系数

θ_{1s} ——节流口射流角,rad

A_{1es} ——阀芯作用面积, m^2

F_{1vs} ——稳态液动力,N

F_{1v} ——电磁力,N

m_{1v} ——阀芯质量,kg

x_{1v} ——比例阀阀芯位移,m

B_{1v} ——阀芯黏性阻尼系数, $N \cdot s/m$

K_{1v} ——比例阀回位弹簧刚度, N/m

u ——输入电压,V

K_f ——电磁铁驱动系数, N/V

K_{1vs} ——速度反电势系数, $V/(m/s)$

2.1.3 节流阀数学模型

所设计的节流阀孔为细长孔,此外,不考虑油液

的可压缩性以及油液温度升高的影响,则

$$q_i = \frac{\pi d_i^4}{128 \mu' L_i} (p_{h1} - p_{1at}) \quad (11)$$

式中 q_i ——节流阀的液压油流量, m^3/s

μ' ——液压油动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

d_i ——节流阀的孔口直径, m

L_i ——节流阀的孔口过流长度, m

p_{h1} ——液压缸无杆腔室压力, Pa

2.2 液压油缸部分数学模型建立

(1) 液压油缸压力-流量方程

减振过程中,前桥悬架液压油缸作往复运动,前桥悬架液压油缸流量 q_{h1} 、 q_{h2} 为

$$\begin{cases} q_{h1} = \text{sign}(p_{1vh} - p_{h1}) C_{h1} \frac{\pi d_{h1}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{1vh} - p_{h1}|} \\ q_{h2} = \text{sign}(p_{2vh} - p_{h2}) C_{h2} \frac{\pi d_{h2}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_{2vh} - p_{h2}|} \end{cases} \quad (12)$$

式中 C_{h1} 、 C_{h2} ——液压油缸上、下腔通流口的流量系数

d_{h1} 、 d_{h2} ——液压油缸上、下腔通流口直径

p_{h2} ——液压缸有杆腔室压力, Pa

(2) 流量连续方程

忽略液压油缸活塞与密封圈间隙处的泄漏,经节流阀和比例阀进入液压油缸的流量,作用于液压油缸的有杆腔室和无杆腔室,一部分填充油缸容积变化,一部分补偿油液压缩变化量,则

$$\begin{cases} q_{h1} = A_{h1} \dot{x}_h + \frac{V_{h1}}{\beta_{he}} \dot{p}_{h1} \\ q_{h2} = A_{h2} \dot{x}_h - \frac{V_{h2}}{\beta_{he}} \dot{p}_{h2} \end{cases} \quad (13)$$

式中 V_{h1} ——无杆腔室容积, m^3

V_{h2} ——有杆腔室容积, m^3

β_{he} ——油液的体积弹性模量, Pa

x_h ——活塞杆位移, m

A_{h1} 、 A_{h2} ——无杆腔室、有杆腔室作用面积, m^2

(3) 液压缸力平衡方程

在液压缸往复运动过程中忽略油道阻力内泄漏的影响,则液压缸力平衡方程为

$$A_{h1} p_{h1} - A_{h2} p_{h2} = m_2 \ddot{x}_h + B_h \dot{x}_h + F_h \quad (14)$$

式中 B_h ——液压缸活塞粘性阻尼系数, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$

F_h ——负载力, N

m_2 ——负载质量, kg

2.3 前桥悬架插装式比例阀的 AMESim 建模

基于前桥悬架插装式比例阀数学模型,在 AMESim 中搭建前桥悬架系统的仿真模型,如图 3 所示。根据悬架插装式比例阀工作原理与结构特

点,AMESim 仿真模型主要参数如表 1 所示。

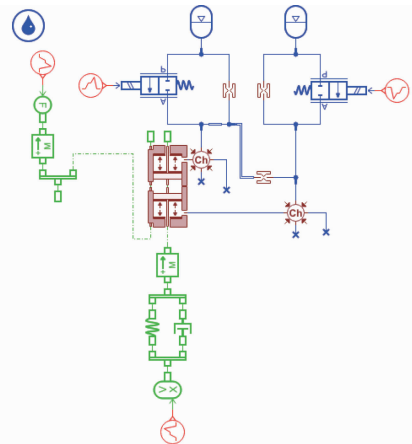


图 3 悬浮式驱动前桥悬架 AMESim 仿真模型

Fig. 3 AMESim simulation model of front axle suspension

表 1 悬浮式驱动前桥悬架 AMESim 仿真模型主要参数

Tab. 1 Key parameters used in AMESim of front axle suspension

参数	数值
液压油密度 $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	900
液压油体积弹性模量 β_e / Pa	1.7×10^9
节流阀 5 孔径 A_5 / mm	0 ~ 6
节流阀 6 孔径 A_6 / mm	0 ~ 6
节流阀 7 孔径 A_7 / mm	0 ~ 6
蓄能器 1, 2 初始充气压力 / MPa	6 ~ 10
蓄能器 1, 2 初始充气体积 / m^3	0.000 5 ~ 0.001 6
缸体内径 D / mm	63
活塞杆直径 d / mm	35
活塞杆行程 L / mm	150

2.4 多模式阻尼协调匹配设计

当节流阀 5、6、7 和比例阀 3、4 交叉作用,可实现多种模式的悬架阻尼调节。此外,通过蓄能器 2 的开关,可实现悬架刚度的调节。为重点分析插装式比例阀设计参数,基于振动过程中的悬架往复运动,引入悬架输出力和簧载质量振动加速度为评价指标,计算式为

$$\begin{cases} F_t = A_{h1} p_{h1} - A_{h2} p_{h2} \\ a_m = \ddot{x}_h \end{cases} \quad (15)$$

式中 F_t ——悬架输出力, N

a_m ——簧载质量振动加速度, m/s^2

为匹配合适的悬架阻尼,需要对各设计参数进行优化,因此,为有效降低设计重复率,采用田口方法^[22-25],对影响前桥悬架阻尼特性的节流阀、比例阀等设计因素进行分析与匹配,设计了 6 因子混合水平田口实验方案,以阶跃和正弦激励作为噪声因子,如表 2 (蓄能器和比例阀状态 1 表示关,0 表示开)所示。

表2 田口方法设计方案

Tab.2 Scheme of Taguchi design

序号	蓄能器2 状态	比例阀3 状态	比例阀4 状态	节流阀5 孔径/ mm	节流阀6 孔径/ mm	节流阀7 孔径/ mm
1	0	0	0	2	2	2
2	0	1	1	2	3	3
3	1	1	0	2	4	4
4	1	1	1	2	5	5
5	1	1	0	3	2	3
6	1	1	1	3	3	2
7	0	0	0	3	4	5
8	0	0	1	3	5	4
9	0	1	1	4	2	4
10	0	1	0	4	3	5
11	1	0	1	4	4	2
12	1	0	0	4	5	3
13	1	0	1	5	2	5
14	1	0	0	5	3	4
15	0	1	1	5	4	3
16	0	1	0	5	5	2

表3 仿真结果

Tab.3 Results of simulation

序号	$a_m / (m \cdot s^{-2})$		F_i / N	
	阶跃激励	正弦激励	阶跃激励	正弦激励
1	4.16	3.32	11 226	26 247
2	3.98	2.53	11 741	24 667
3	2.82	2.91	13 986	25 360
4	1.48	3.11	17 136	25 834
5	5.61	2.42	17 803	24 274
6	4.18	2.59	11 199	24 993
7	2.17	2.65	15 281	24 778
8	1.43	2.29	16 758	24 256
9	3.87	3.08	11 865	25 744
10	3.35	2.92	12 935	25 460
11	2.42	2.64	15 165	24 962
12	1.43	2.67	17 432	24 907
13	5.63	2.62	17 401	24 856
14	4.03	2.55	11 558	24 722
15	1.74	2.66	16 291	24 951
16	1.22	2.27	16 413	24 197

3 仿真分析

3.1 田口方法设计方案仿真分析

采用表2所示的设计方案进行 AMESim 仿真分析,得到田口方法设计方案仿真结果如表3所示。

为更全面分析插装式比例阀设计方案对前桥悬架减振特性的影响,选择望目特性的信噪比计算方法,以信噪比和均值的主效应分析,观测不同仿真设计方案下设计因子对悬架减振特性影响的显著性,结果如图4、5所示。

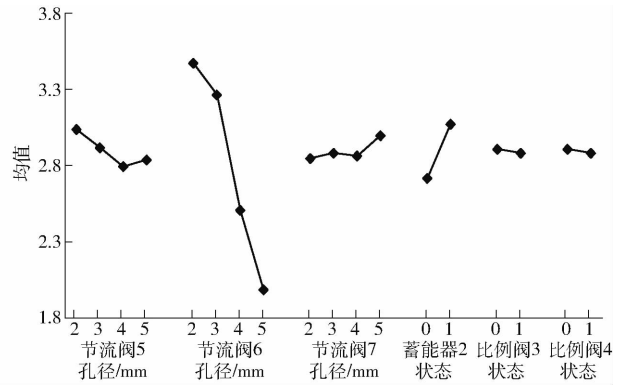
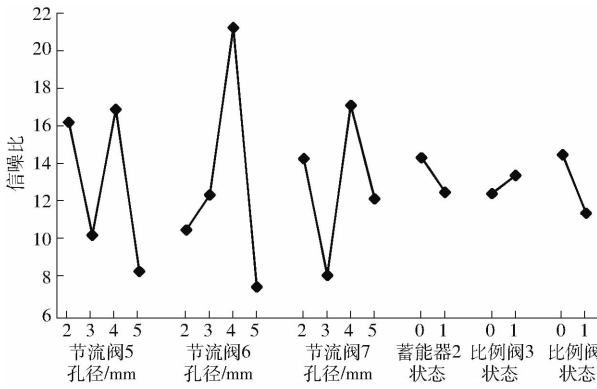


图4 a_m 仿真结果

Fig.4 Simulation results of a_m

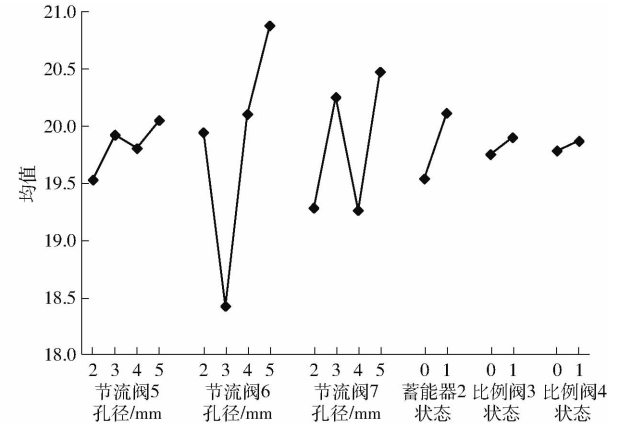
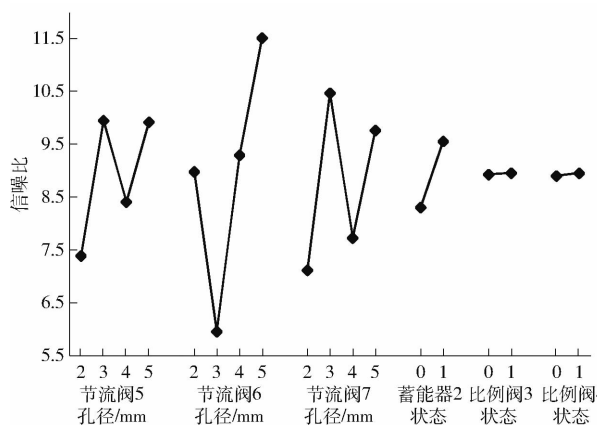


图5 F_i 仿真结果

Fig.5 Simulation results of F_i

3.2 仿真结果分析

图 4、5 为基于评价指标 a_m 、 F_i 的信噪比和均值主效应。此外,分别对仿真结果的均值和信噪比进行方差分析,结果如表 4、5 所示。

表 4 a_m 均值和信噪比方差分析

Tab. 4 ANOVA analysis of means and S/N of a_m

参数	自由度	平方和	均方和	F	P
蓄能器 2 状态	1	2.23	2.23	0.13	0.744
比例阀 3 状态	1	3.73	3.73	0.21	0.675
比例阀 4 状态	1	37.11	37.11	2.13	0.241
节流阀 5 孔径	3	216.87	72.29	4.15	0.137
节流阀 6 孔径	3	409.47	136.49	7.83	0.062
节流阀 7 孔径	3	168.14	56.05	3.22	0.181
蓄能器 2 状态	1	0.47	0.47	34.62	0.010
比例阀 3 状态	1	0.01	0.01	0.10	0.776
比例阀 4 状态	1	0.01	0.01	0.07	0.805
节流阀 5 孔径	3	0.13	0.04	3.32	0.175
节流阀 6 孔径	3	8.03	2.68	198.14	0.001
节流阀 7 孔径	3	0.04	0.01	1.18	0.447

注: $P < 0.05$ 表示差异显著,下同。

表 5 F_i 均值和信噪比方差分析

Tab. 5 ANOVA analysis of means and S/N of F_i

参数	自由度	平方和	均方和	F	P
蓄能器 2 状态	1	6.24	6.23	1.56	0.300
比例阀 3 状态	1	0.02	0.03	0.01	0.981
比例阀 4 状态	1	0.01	0.01	0.01	0.990
节流阀 5 孔径	3	18.91	6.30	1.58	0.358
节流阀 6 孔径	3	62.01	20.67	5.18	0.105
节流阀 7 孔径	3	23.79	7.93	1.99	0.293
蓄能器 2 状态	1	1.21	1.20	3.61	0.153
比例阀 3 状态	1	0.10	0.10	0.29	0.628
比例阀 4 状态	1	0.02	0.02	0.07	0.806
节流阀 5 孔径	3	0.59	0.20	0.60	0.659
节流阀 6 孔径	3	12.69	4.23	12.70	0.033
节流阀 7 孔径	3	4.65	1.55	4.65	0.119

由表 4 可知,在 a_m 的信噪比方差分析中,各设计因素的显著性不明显。在 a_m 的均值方差分析中,蓄能器 2 状态和节流阀 6 孔径的显著性和 F 值较高,且节流阀 6 孔径的影响最大,其余设计因子影响较小。由表 5 可知,在 F_i 的信噪比方差分析中,各设计因素的 P 值均大于 0.05,显著性不明显。在 F_i 的均值方差分析中,节流阀 6 孔径的显著性和 F 值较高,而其他设计因子的显著性较差。因此,节流阀 6 孔径对设计性能的影响最大,蓄能器 2 状态次之,其余设计因子影响较小,这也说明了通过节流阀 6 孔径、蓄能器 2 状态的调节,可实现悬架输出力和阻尼力的切换调整。综上所述,节流阀 6 孔径的 4 个水平中,选择最优水平为 4 mm;而蓄能器 2 状态的两

个水平分别对应悬架的不同刚度模式;节流阀 5、7 孔径由于作用不明显,可结合应用性进行选择,均选择 3 mm 水平;比例阀 3 与 4 由于作用不明显,可综合配置的经济性、实用性选择是否配置。由此,得到最优配置为蓄能器 2、比例阀 3 与 4 状态为开,节流阀 5、6、7 孔径分别为 3、4、3 mm。

3.3 插装式比例阀动态特性仿真分析

(1) 负载压力阶跃变化

在 2.5 s 时,簧载质量增加 500 kg,液压缸腔室内压力变化如图 6 所示。由图可知,负载增加的一瞬间,液压缸腔室压力迅速增加,直至平衡位置,调整时间小于 2 s,系统响应迅速。

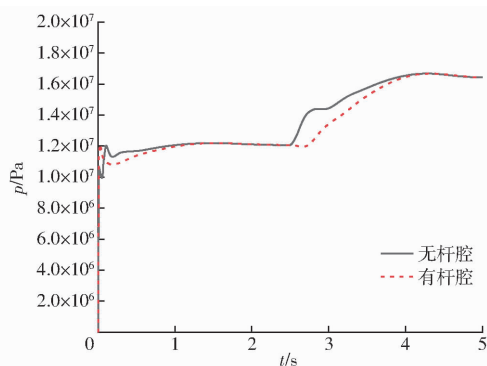


图 6 负载阶跃时液压缸压力变化曲线

Fig. 6 Pressure curves of hydraulic cylinder with step change in load

(2) 路面激励阶跃变化

在 2.5 s 时,路面凸起 40 mm,液压缸腔室内压力变化如图 7 所示。由图可知,路面激励发生的时刻,液压缸腔室压力快速变化,达成减振效果,调整时间小于 0.5 s,系统达到稳定状态。

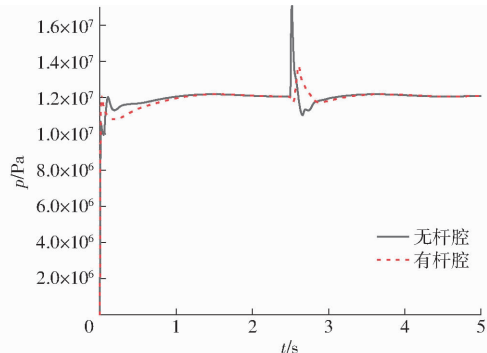


图 7 路面激励阶跃时液压缸压力变化曲线

Fig. 7 Pressure change curves of hydraulic cylinder with step change in road excitation

4 结论

(1) 前桥悬架作为大功率轮式拖拉机的关键部件,影响多工况下拖拉机效能的提升。为降低田间作业下的前轴负载波动和衰减运输作业下的路面激

励振动,设计了用于前桥悬架系统的插装式比例阀液压系统回路,并构建了插装式比例阀的数学模型,明确设计因素与悬架性能之间的内在关系。

(2)基于所设计的前桥悬架插装式比例阀,构建 AMEsim 仿真模型,并引入田口设计方法,设计了6因子混合水平正交试验方案,在阶跃和正弦激励下,结合 a_m 和 F_i 为参考量的评价指标,分析影响前桥悬架性能的插装式比例阀设计因子,确定了最优

的设计方案,最优配置为蓄能器2、比例阀3与4状态为开,产流阀5、6、7孔径分别为3、4、3 mm。

(3)基于 AMEsim 对振动过程仿真,结果表明:系统均能分别在约2 s和小于0.5 s内迅速响应负载压力阶跃增加和路面凸起激励。此外,对于前桥悬架插装式比例阀的建模与设计,有利于明确设计部件间关系,降低设计开发周期和成本,为大功率轮式拖拉机前桥悬架系统的开发提供设计参考。

参 考 文 献

- [1] CUONG D M, ZHU Sihong, ZHU Yue. Effects of tyre inflation pressure and forward speed on vibration of an unsuspended tractor[J]. *Journal of Terramechanics*, 2013,50(3):185-198.
- [2] CUONG D M, ZHU Sihong, NGOC N T. Study on the variation characteristics of vertical equivalent damping ratio of tire-soil system using semi-empirical model[J]. *Journal of Terramechanics*, 2014,51:67-80.
- [3] ANTHONIS J, DEPREZ K, RAMON H. Design and evaluation of a low-power portable test rig for vibration tests on mobile agricultural machinery[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002,45(1):5-12.
- [4] HEIßING B, ERSOY M. Chassis handbook: fundamentals, driving dynamics, components, mechatronics, perspectives[M]. Springer Science & Business Media, 2010.
- [5] LILJEDAHL J B, CARLETON W M, TURNQUIST P K. Tractors and their power units[M]. Wiley, 1979.
- [6] AHMED O B, GOUPILLON J F. Predicting the ride vibration of an agricultural tractor[J]. *Journal of Terramechanics*, 1997, 34(1):1-11.
- [7] 伊力达尔·伊力亚斯. 前桥悬架对拖拉机振动特性的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2015.
YILIDAER·Yiliyasi. The influence of front axle suspension on tractor vibration characteristics [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [8] 王兴伟. 147~221 kW 国外拖拉机技术特点及发展趋势[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2016(5):6-10.
WANG Xingwei. Technical feature and development tendency of 147~221 kW foreign tractors [J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2016(5):6-10. (in Chinese)
- [9] CUTINI M, COSTA C, BISAGLIA C. Development of a simplified method for evaluating agricultural tractor's operator whole body vibration[J]. *Journal of Terramechanics*, 2016,63:23-32.
- [10] PARK M S, FUKUDA T, KIM T G, et al. Health risk evaluation of whole-body vibration by ISO 2631-5 and ISO 2631-1 for operators of agricultural tractors and recreational vehicles[J]. *Industrial Health*, 2013,51(3):364.
- [11] 袁加奇, 朱思洪, 高强, 等. 拖拉机前桥油气弹簧的设计与特性研究[J]. *南京农业大学学报*, 2017,40(1):176-185.
YUAN Jiaqi, ZHU Sihong, GAO Qiang, et al. Design and characteristic study of tractor front axle hydro-pneumatic spring [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017,40(1):176-185. (in Chinese)
- [12] GROTT M, BIRAL F, SORNIOTTI A. Vehicle Simulation for the development of an active suspension system for an agricultural tractor[J]. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 2010,2(1):12-25.
- [13] 伊力达尔·伊力亚斯, 朱思洪, 徐刚, 等. 拖拉机前桥悬架参数匹配及其对振动特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10):29-36.
YILIDAER·Yiliyasi, ZHU Sihong, XU Gang, et al. Front axle suspension parameters match and its impact on vibration characteristics of tractor[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(10):29-36. (in Chinese)
- [14] 马然, 朱思洪, CUONG D M. 拖拉机前桥半主动悬架特性参数匹配与控制[J/OL]. *农业机械学报*, 2013,44(12):6-10,5.
MA Ran, ZHU Sihong, CUONG D M. Parameters matching and control of tractor front axle semi-active suspension[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(12):6-10,5. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131202&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2013.12.002. (in Chinese)
- [15] 谢斌, 武仲斌, 毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J/OL]. *农业机械学报*, 2018,49(8):1-17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8):1-17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180801&journal_id=jcsam DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2018.08.001. (in Chinese)
- [16] 王增全, 申焱华, 杨珏. 连通式油气悬架数学模型及特性分析[J]. *农业工程学报*, 2012,28(5):60-65.
WANG Zengquan, SHEN Yanhua, YANG Jue. Mathematical model and characteristics analysis of interconnected [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(5):60-65. (in Chinese)
- [17] GOBBI M, GIANPIERO M, GIORGIO P. Farm tractors with suspended front axle: anti-dive and anti-lift characteristics[J]. *Journal of Terramechanics*, 2014,56(1):157-172.
- [18] 赵建军. 重型拖拉机电液提升器比例控制阀设计与特性研究[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
ZHAO Jianjun. The design and characteristics research of proportional control valve for the electro-hydraulic hitch of heavy tractor[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [19] 华博, 赵建军, 刘长卿, 等. 重型拖拉机电液提升器插装式比例提升阀性能仿真与试验[J]. *农业工程学报*, 2019,

35(8):109-117.

HUA Bo, ZHAO Jianjun, LIU Changqing, et al. Performance simulation and test of plug-in proportional raising valve of electro-hydraulic hitch for heavy tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(8):109-117. (in Chinese)

- [20] 李明生, 宋正河, 迟瑞娟, 等. 大功率拖拉机电液提升器比例下降阀仿真与优化[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 1-5.
LI Mingsheng, SONG Zhenghe, CHI Ruijuan, et al. Simulation analysis on proportional lowering valve for high-power tractor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 1-5. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s01&journal_id=jcsam DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.001 (in Chinese)
- [21] 李明生, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 大功率拖拉机电液提升器比例提升阀设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 31-35.
LI Mingsheng, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Design of proportional raise valve in electro-hydraulic lifting mechanism of big-power tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 31-35. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121006&journal_id=jcsam DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.006. (in Chinese)
- [22] 王艾萌, 温云. 田口法在内置式永磁同步电机优化设计中的应用[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 39-44.
WANG Aimeng, WEN Yun. Application for optimal designing of interior permanent magnet synchronous machines by using Taguchi method[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2016, 43(3): 39-44. (in Chinese)
- [23] KACKA R, RAGHU N. Off-line quality control, parameter design, and the Taguchi method [J]. Journal of Quality Technology, 1985, 17(4): 176-188.
- [24] LIN M C, QIU Guopeng, ZHOU Xuehua, et al. Using Taguchi and neural network approaches in the optimum design of product development process[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020, 33(4): 343-359.
- [25] 张硕, 李臻, 朱忠祥, 等. 多因素影响下拖拉机侧向稳定性模型实验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 358-363.
ZHANG Shuo, LI Zhen, ZHU Zhongxiang, et al. Scale model experiment on lateral stability of tractor affected by multi-factors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 358-363. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171046&journal_id=jcsam DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.046. (in Chinese)

(上接第 534 页)

- [13] LIU Y, LIU Q, LÜ C, et al. A study on objective evaluation of vehicle steering comfort based on driver's electromyogram and movement trajectory[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2017, 48: 41-49.
- [14] KEMMETMÜLLER W, MÜLLER S, KUGI A. Mathematical modeling and nonlinear controller design for a novel electrohydraulic power-steering system[J]. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2007(12): 85-97.
- [15] ZHAO Wanzhong, ZHOU Xiaochuan, WANG Chunyan, et al. Energy analysis and optimization design of vehicle electro-hydraulic compound steering system[J/OL]. Applied Energy, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113713>.
- [16] HAN Jionggang, SHEN Rongwei, TAI Xiaohong, et al. Research on assist characteristic of electric power steering system based on adaptive neuro-fuzzy control[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2560(347): 357-361.
- [17] YAMAMOTO K, NISHIMURA H. Control system design of electric power steering for a full vehicle model with active stabilizer [J]. J. Syst. Des. Dyn., 2011(5): 789-804.
- [18] 郑太雄, 周花, 古宏鸣. 无传感器式交流电助力转向系统直接转矩控制[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 7-12.
ZHENG Taixiong, ZHOU Hua, GU Hongming. Direct torque control of sensorless AC electric power steering system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 7-12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140302&journal_id=jcsam DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.002. (in Chinese)
- [19] 李明生, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 大功率拖拉机电液提升器比例提升阀设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 31-35, 89.
LI Mingsheng, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Design of proportional lift valve for electro-hydraulic elevator of high-power tractor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 31-35. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121006&journal_id=jcsam DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.006. (in Chinese)
- [20] 唐世经. 工程机械底盘学[M]. 北京: 西南交通大学出版社, 2002.
- [21] NA Xiaoxiang, COLECOLE D J. Application of open-loop stackelberg equilibrium to modeling a driver's interaction with vehicle active steering control in obstacle avoidance[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2017, 47: 673-85.
- [22] 韩清振, 何仁. 车用永磁同步电机稳定性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 363-368.
HAN Qingzhen, HE Ren. Stability analysis of permanent magnet synchronous motor for vehicles [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 363-368. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161149&journal_id=jcsam DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.049. (in Chinese)