

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.042

车辆换挡系统调压阀优化设计与试验

魏列江¹ 李 维¹ 刘增光¹ 罗小梅² 安一超¹ 项 可¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 中国北方车辆研究所车辆传动重点实验室, 北京 100072)

摘要: 针对车辆换挡充油过程中离合器充油压力曲线的实际值与理想值之间存在偏差的问题,建立了包含供油单元、电磁换向阀、调压阀和离合器的换挡系统仿真模型,采用 AMESim 对充油过程进行仿真分析。以充油压力为优化目标,应用误差积分准则确定优化函数,通过 Pareto 图得到调压阀中影响充油压力的关键参数为阀口开度、弹簧预紧力和阻尼孔直径。分别采用二次拉格朗日非线性规划算法 (Non-linear programming by quadratic Lagrangian, NLPQL) 和遗传算法 (Genetic algorithms, GA) 对上述参数进行优化。对比优化后的仿真充油曲线与理想充油曲线,可知遗传算法为最优算法,并确定了调压阀的最优结构参数。根据控制变量法设计试验方案,结果表明,采用遗传算法优化后,换挡系统的稳定性在一定程度上得到提高,其充油过程更加符合理想充油过程,换挡品质得到改善。

关键词: 车辆换挡系统; 调压阀; 充油过程; AMESim; 优化

中图分类号: U463.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)10-0360-07

Optimum Design of Pressure Regulating Valve in Vehicle Shift System

WEI Liejiang¹ LI Wei¹ LIU Zengguang¹ LUO Xiaomei² AN Yichao¹ XIANG Ke¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. National Key Laboratory of Vehicular Transmission, China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: During the progress of oil filling in the vehicle, the deviation between actual pressure and ideal pressure always affects the shift quality. For enhancing the shift quality, the model for simulation of the vehicle shift system was established, which included fuel supply unit, electromagnetic reversing valve, pressure regulating valve and clutch. The oil filling progress was simulated and analyzed in AMESim. Taking the oil filling pressure as optimization target, the optimized function was obtained on the basis of the error integral criterion. In pressure regulating valve, the key parameters affecting the oil filling pressure were obtained by the Pareto diagram as follows: the opening of the valve, the spring preloading force and the diameter of damping hole. Non-linear programming by quadratic Lagrangian and genetic algorithms were respectively applied to optimize parameters above. According to the comparison between the optimized simulation oil filling curve and the ideal oil filling curve, the genetic algorithm was defined as the optimal algorithm, and the optimal structural parameters of the pressure regulating valve were determined. Based on the variable controlling approach, the experimental schemes were designed. The results of the experiments showed that the stability of the optimal shift system was improved to some extent, and the optimal oil filling process was more close to the ideal oil filling process, providing a reliable reference for improving the shift quality.

Key words: vehicle shift system; pressure regulating valve; oil filling process; AMESim; optimization

0 引言

换挡系统作为车辆的关键组成部分,其性能直

接影响车辆传动平稳性和乘坐舒适性^[1]。通过接收相应的接合指令,换挡系统控制离合器充油^[2-3]。在充油过程中,如果离合器内油压升高过快,会加剧

收稿日期: 2019-05-15 修回日期: 2019-07-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(51765033)
作者简介: 魏列江(1972—),男,教授,博士,主要从事电液控制研究,E-mail: weiliejiang@126.com

离合器摩擦片的滑摩,产生剧烈的换挡冲击,从而降低摩擦片的使用寿命^[4-5]。为了使充油过程尽量快速且平稳,需要改善车辆的换挡品质^[6-9]。影响换挡品质的因素有换挡动作、离合器油压、车辆本身的惯性以及换挡规律等^[10-12]。国内外主要通过液压缓冲阀、脉宽调制(PWM)高速开关阀和调压阀对离合器油压进行控制^[13]。其中,液压缓冲阀控制简单、性能可靠、成本低廉,但在弹簧刚度和弹簧预紧力不变的情况下,难以满足不同挡位对离合器缓冲特性的要求^[14];脉宽调制高速开关阀响应迅速、易于微机控制,但允许通过的流量较小,应用范围有限^[15];调压阀的综合性能好,控制精度高,能适应恶劣的工作环境,其动静态特性可以满足大多数工业应用要求,是重型车辆控制元件的首选^[16-19]。目前调压阀相关研究已经取得了一定的进展^[20-22],但大多集中于单参数、单优化方案,而对于多参数、多优化方案的研究仍较少。考虑到充油压力曲线可以在一定程度上反映换挡过程中油压特性的变化规律,本文将以换挡系统充油压力作为优化目标,采用多种算法对调压阀进行多参数的优化设计,选出最优算法,确定调压阀最优结构参数,并加以试验验证,以期提高换挡系统的稳定性并改善换挡品质。

1 调压阀工作原理

图 1 为调压阀原理图,由比例溢流阀作先导阀,减压阀作主阀构成。通过控制调压阀的输出压力,可以调节进入离合器的油压。其中,主阀进口压力

为 p_1 ,出口压力为 p_2 ;先导阀进口压力为 p_3 。当先导阀进口压力小于其设定压力时,先导阀关闭,主阀阀口为最大开度,不起减压作用,即主阀进出口压力相等($p_1 = p_2$);当先导阀进口压力大于其设定压力时,先导阀开启,主阀阀口开度减小,此时主阀的出口压力小于进口压力,其值约为先导阀进口压力($p_3 \approx p_2 < p_1$)。通过调节先导阀的控制电流,可以呈比例地控制调压阀的输出压力。

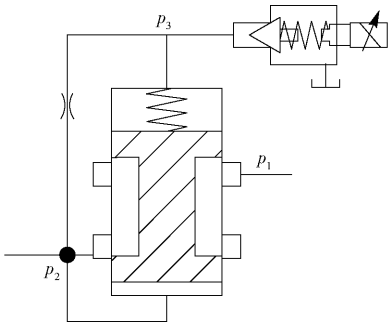


图 1 调压阀原理图

Fig. 1 Schematic of pressure regulating valve

2 换挡系统仿真建模与分析

2.1 AMESim 建模

在 AMESim 元件库中选择相应的元件进行连接,可得到换挡系统的 AMESim 仿真模型,如图 2 所示。供油单元的油液依次通过电磁换向阀和调压阀进入离合器。电磁换向阀控制充放油状态,调压阀调节充油压力,离合器进行换挡。表 1 为换挡系统 AMESim 模型的主要参数。

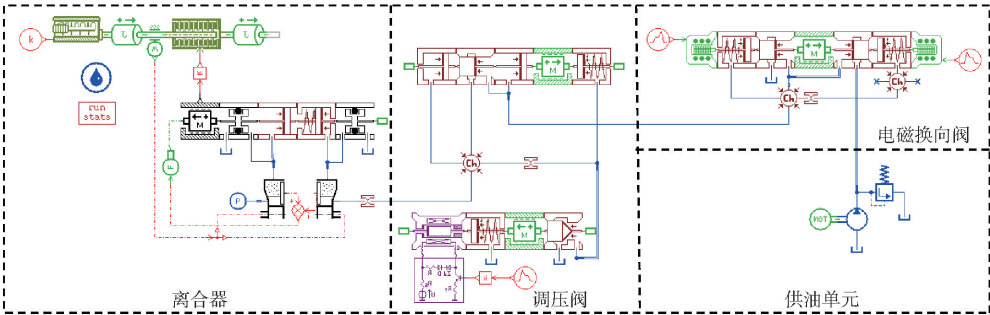


图 2 换挡系统 AMESim 仿真模型

Fig. 2 AMESim simulation model of shift system

表 1 换挡系统 AMESim 模型主要参数

Tab.1 Main parameters in AMESim model of shift system

参数	数值
溢流阀设定压力 p/MPa	2.00
电机额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 500
调压阀阀芯直径 D/mm	18
调压阀阀口开度 x/mm	1.7
调压阀弹簧预紧力 F/N	400
调压阀阻尼孔直径 d/mm	0.8

2.2 仿真充油曲线与理想充油曲线的对比

图 3 为理想充油曲线。根据离合器油缸内充油压力的变化情况,整个充油过程分为 3 个主要工作阶段^[23]:

(1)快速充油阶段(0 ~ a 段):油液进入离合器油腔,克服弹簧预紧力,消除间隙,直到摩擦片贴合为止。该阶段需要快速起步,以缩短时间,减小功率损失;压力由离合器贴合时分离弹簧的张力以及离

合器油缸的承压面积来决定。

(2)缓冲升压阶段($a \sim b$ 段):摩擦片刚贴合时,主动摩擦片转速较高,从动摩擦片转速较低,经过滑摩过程,最终同步运动。充油过程主要控制该阶段,要求必须确保油压的精确控制,从而减缓摩擦片的接合速度,降低滑摩扰动,实现平稳换挡。该阶段的时间不宜过短,压力由离合器传递的摩擦力矩来决定。

(3)阶跃升压阶段($b \sim c$ 段):为了提高换挡效率,此阶段离合器的充油压力应快速升至系统压力,对换挡品质的影响极小。该阶段升压较快,耗时较短;压力由离合器传递的摩擦力矩来决定。

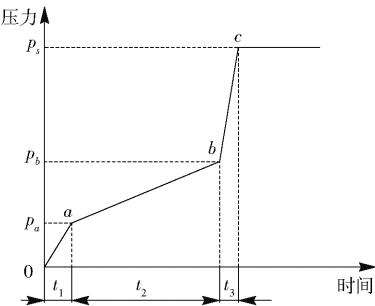


图3 理想充油曲线
Fig. 3 Curve of ideal oil filling

图3中, p_a 和 p_b 分别为缓冲升压阶段的初始压力和终止压力, p_s 为系统压力; t_1 为快速充油时间, t_2 为缓冲升压时间, t_3 为阶跃升压时间。

如图4所示,设置运行时间为3.5 s,对充油过程进行仿真分析。快速充油阶段从0开始,经过0.03 s进入缓冲升压阶段,持续1.51 s后到达阶跃升压阶段,最终经过0.08 s后,充油压力稳定在1.50 MPa。其中,在缓冲升压阶段中,初始压力约为0.69 MPa,终止压力约为1.04 MPa。在阶跃升压阶段,出现了明显的压力波动。

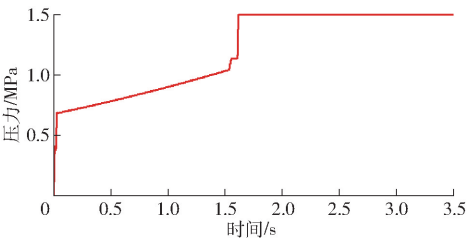


图4 仿真充油曲线
Fig. 4 Curve of simulated oil filling

充油曲线参数理想值与仿真值的对比如表2所示,在仿真充油曲线中,符合理想充油曲线要求的参数较少,且充油过程应尽量避免压力波动的产生。

3 调压阀优化设计

3.1 目标函数

误差积分准则是期望值与实际值之间偏差的函

表2 充油曲线参数的理想值与仿真值的对比

Tab.2 Contrast between ideal and simulated values of parameters in oil filling curve

参数	理想值	仿真值
t_1/s	0 ~ 0.20	0.03
t_2/s	0.50 ~ 1.50	1.51
t_3/s	0.02	0.08
p_a/MPa	0.35 ~ 0.40	0.69
p_b/MPa	0.75 ~ 0.80	1.04
p_s/MPa	1.20 ~ 1.60	1.50

数积分形式,可以用来衡量系统性能的优良程度^[24]。采用误差积分准则所设计的系统,瞬态响应的振荡性小,对参数具有较好的选择性,其计算式为

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$
 (1)

式中 t ——响应时间

$e(t)$ ——响应误差

针对调压阀的结构优化问题,将调压阀的输出油压 $p(t)$ 作为优化目标,可得

$$e(t) = \frac{p(T) - p(t)}{p(T)}$$
 (2)

式中 $p(T)$ ——调压阀最终稳定时的输出压力

将式(2)代入式(1)可得

$$J = \int_0^{\infty} t \left| \frac{p(T) - p(t)}{p(T)} \right| dt$$
 (3)

其中, J 越小,响应时间和超调量越小,调压阀的性能越好,优化效果越好。故目标函数为

$$\min J = \int_0^{\infty} t \left| \frac{p(T) - p(t)}{p(T)} \right| dt$$
 (4)

3.2 设计变量及边界约束

调压阀作为换挡系统的关键部件,可以对离合器的油压进行精确控制,从而提高换挡品质。调压阀主要参数取值范围如表3所示。

表3 调压阀主要参数取值范围

Tab.3 Main parameters range of pressure regulating valve

参数	初始值	取值范围
D/mm	18	16 ~ 22
x/mm	1.7	0.4 ~ 4.4
F/N	400	170 ~ 710
d/mm	0.8	0.5 ~ 1.5

图5为Pareto图,表示调压阀中相关参数对充油压力的影响程度。Pareto图既可以表示单参数对充油压力的影响程度(如 D 表示阀芯直径对充油压力的影响程度),也可以表示复合参数对充油压力的影响程度(如 d/x 表示在阻尼孔直径和阀口开度这两个参数的共同作用下,对充油压力的影响程度)。

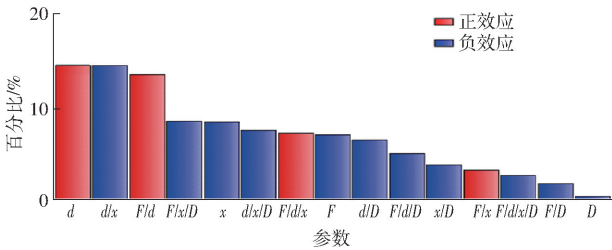


图 5 Pareto 图

Fig. 5 Pareto chart

如图 5 所示, 阀芯直径对充油压力的影响程度很小, 可以忽略不计。阻尼孔直径、阀口开度和弹簧预紧力对充油压力的影响较大, 故本文仅对这 3 个参数进行优化。图 6 为调压阀关键参数的结构示意图。

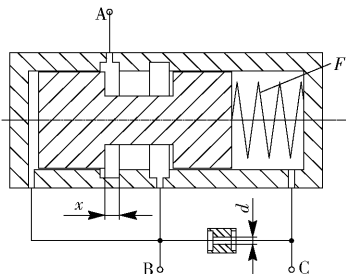


图 6 调压阀结构图

Fig. 6 Structure chart of pressure regulating valve

边界约束 $g(X)$ 可以表示为

$$\begin{cases} g_1(X) = (x - 0.4)(4.4 - x) \geq 0 \\ g_2(X) = (F - 170)(710 - F) \geq 0 \\ g_3(X) = (d - 0.5)(1.5 - d) \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

故充油压力的目标函数为

$$\min J(x, F, d) \quad (6)$$

3.3 优化算法及其对比分析

工程问题的优化往往比较复杂, 其设计变量和约束函数可能是线性或非线性、连续或离散的。为了提高参数辨识的速度和精度, 本文采用两种算法对调压阀进行多参数的结构优化。二次拉格朗日非线性规划算法 (NLPQL) 可将约束条件线性化, 通过二阶泰勒级数的方法展开目标函数, 采用二次规划法得到新的点进行线性搜索, 利用函数导数、梯度等数学方法, 实现高效的优化^[25]。遗传算法 (GA) 效仿生物进化过程中遗传繁殖的规律, 对优化问题中的个体进行编码和优化 (如交叉、选择、变异等), 通过迭代的方法从新种群中找出较优解或最优解的组合^[26]。两组优化后调压阀的结构参数如表 4 所示。

在换挡系统 AMESim 模型中应用两组优化数据进行仿真, 可得优化后的充油曲线, 将其与优化前的曲线进行对比, 如图 7 所示。由图 7 可知, 在快速充油阶段, 优化前后的时间基本一致; 在缓冲升压阶

表 4 优化前后调压阀的关键参数			
Tab. 4 Value of key parameters in pressure regulating valve before and after optimization			
参数	优化前	优化后	
		NLPQL	GA
x/mm	1.7	0.9	0.5
F/N	400	185	200
d/mm	0.8	1.4	1.0

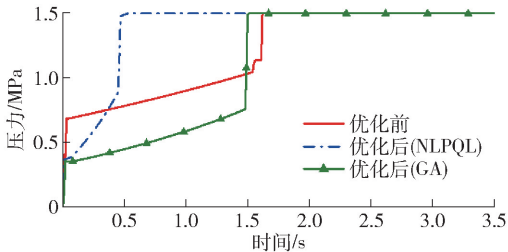


图 7 优化前后充油曲线的对比

Fig. 7 Comparison of curves of oil filling before and after optimization

段, 优化后的时间和始末压力均有所降低, NLPQL 耗时最短; 在阶跃升压阶段, 优化前后的充油压力最终稳定在 1.50 MPa, 优化后的充油压力达到稳定值的时间均减少, 且优化后的压力波动消失。

表 5 为充油曲线参数的理想值与优化值的对比。由表 5 可知, 优化后充油过程的各项参数均得到一定程度的改善。NLPQL 优化后充油曲线中只有部分参数符合理想充油曲线要求; 而 GA 优化后各项参数均符合要求。故 GA 优化效果更好。

表 5 充油曲线参数的理想值与优化值的对比				
Tab. 5 Contrast between ideal value and optimized value in oil filling curve				
参数	理想值	优化前	优化后	
			NLPQL	GA
t_1/s	0 ~ 0.20	0.03	0.02	0.02
t_2/s	0.50 ~ 1.50	1.51	0.42	1.46
t_3/s	0.02	0.08	0.03	0.02
p_a/MPa	0.35 ~ 0.40	0.69	0.36	0.36
p_b/MPa	0.75 ~ 0.80	1.04	0.87	0.76
p_s/MPa	1.20 ~ 1.60	1.50	1.50	1.50

4 换挡系统试验

4.1 试验原理

图 8 为换挡系统的试验原理图。液压泵由电动机驱动旋转, 从油箱中吸油, 向电磁换向阀供油。溢流阀用来调定系统压力。电磁换向阀用来控制离合器的充放油状态。调压阀用来调节离合器的充油压力。其中, 传感器用来采集离合器的油压, 通过信号

采集器传输到工控机。将工控机上采集到的信号进行运算处理后,通过控制器来控制调压阀,从而实现
对充油压力的调节。

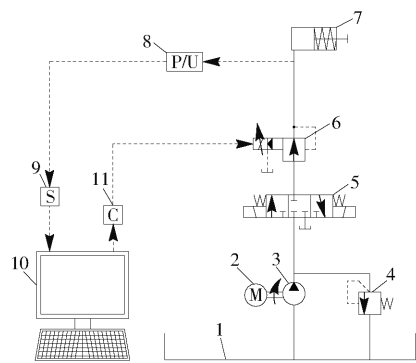


图 8 试验原理图

Fig. 8 Experimental schematic diagram

1. 油箱 2. 电动机 3. 液压泵 4. 溢流阀 5. 电磁换向阀
6. 调压阀 7. 离合器 8. 传感器 9. 信号采集器 10. 工控机
11. 控制器

图 9 为系统试验装置图,通过操控平台可以测
量和控制阀组,用于调节换挡过程中的充油压力。

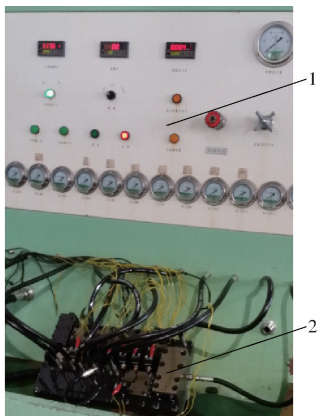


图 9 系统试验装置图

Fig. 9 Graph of systematic experiments

1. 操控平台 2. 阀组

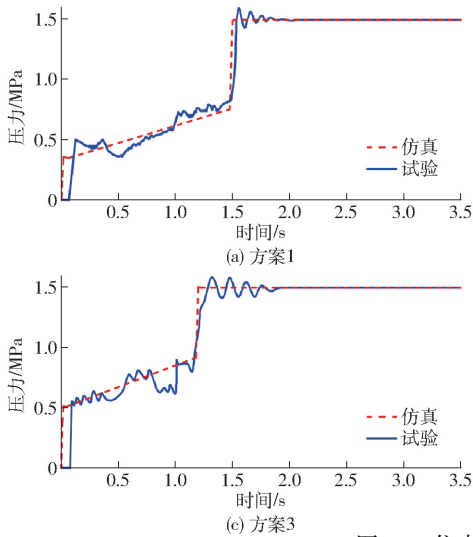


图 10 仿真和试验对比曲线

Fig. 10 Contrasts between simulated and experimental curves

4.2 试验结果及分析

根据控制变量法所设计的试验方案如表 6 所示。表 6 中方案 1 为 GA 的参数。在方案 1 的基础上,方案 2 将阀口开度由 0.5 mm 调至 0.7 mm,方案 3 将弹簧预紧力由 200 N 调至 280 N,方案 4 将阻尼孔直径由 1.0 mm 调至 0.8 mm。在每组试验方案中,除阀口开度、弹簧预紧力、阻尼孔直径这 3 个参数参照表 6 取值,其他参数均与优化前保持一致。

表 6 试验方案

Tab. 6 Experimental scheme

方案 序号	参数		
	x/mm	F/N	d/mm
1	0.5	200	1.0
2	0.7	200	1.0
3	0.5	280	1.0
4	0.5	200	0.8

根据表 6 的试验方案,分别进行 4 组试验,所得
试验结果如图 10 所示。由于试验过程中受油液泄
漏等影响,试验曲线存在一定的波动;但总体而言,
各组试验曲线和仿真曲线的趋势基本一致,验证了
仿真模型的正确性。方案 1 中,试验曲线与仿真曲
线较为贴合,满足理想充油曲线的要求。以方案 1
为研究对象,分别对比分析方案 2、3、4 与方案 1 之
间的差异,可知:方案 2 中,阀口开度的增加,导致缓
冲升压阶段后期的压力明显偏离仿真曲线,缓冲升
压阶段和阶跃升压阶段出现剧烈波动,压力稳定之
前其超调量较大;方案 3 中,弹簧预紧力的增加,导
致缓冲升压阶段的始末压力均升高,超出理想充油
压力的取值范围;方案 4 中,阻尼孔直径的减小,导
致充油时间增加,超出理想充油时间的取值范围。
综上所述,遗传算法优化后的调压阀,所得的试验曲

线（方案 1）波动较少,各阶段的时间和压力均符合理想充油曲线的要求,进而提高了换挡系统充油过程的稳定性,改善了换挡品质,验证了优化设计的合理性。

5 结论

- (1) 基于误差积分准则,分析了换挡充油过程的 Pareto 图,得到调压阀中影响充油压力的关键参数为阀口开度、弹簧预紧力及阻尼孔直径。
- (2) 采用二次拉格朗日非线性规划算法和遗传

算法对调压阀的 3 个结构参数进行优化,对比分析优化后的仿真充油曲线与理想充油曲线可知,遗传算法为最优算法。经遗传算法优化后,调压阀的阀口开度约为 0.5 mm,弹簧预紧力约为 200 N,阻尼孔直径约为 1.0 mm。

(3) 根据控制变量法,对遗传算法优化后的换挡系统进行试验,由试验结果可知,优化后的调压阀能够提高换挡系统的稳定性,其充油过程更加符合理想充油过程,改善了换挡品质,验证了优化设计的可行性及合理性。

参 考 文 献

[1] GALVAGNO E, VELARDOCCHIA M, VIGLIANI A. Dynamic and kinematic model of a dual clutch transmission[J]. Mechanism & Machine Theory, 2011, 46(6): 794 – 805.

[2] 王娟,陈慧岩,许诺. 装有液力机械自动变速箱的军用履带车辆提高加速性的方法研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(4): 385 – 389.

WANG Juan, CHEN Huiyan, XU Nuo. Research on the method of improving the acceleration performance of tracked vehicle with hydrodynamic mechanic automatic transmission[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(4): 385 – 389. (in Chinese)

[3] 孙文涛,陈慧岩. 电控自动变速器换挡过程控制策略[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 23 – 26.

SUN Wentao, CHEN Huiyan. Control strategy as shifting progress with an electronic automatic transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 23 – 26. (in Chinese)

[4] KIM D C, KIM K U, PARK Y J, et al. Analysis of shifting performance of power shuttle transmission[J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(1): 111 – 122.

[5] 李和言,王宇森,熊潞博,等. 离合器配对摩擦副径向温度梯度对接触比压的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(1): 136 – 143.

LI Heyan, WANG Yusen, XIONG Cenbo, et al. Effect of radial temperature gradient on interface pressure of clutch friction pair[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(1): 136 – 143. (in Chinese)

[6] WHEALS J C, CREWE C, RAMSBOTTOM M, et al. Automated manual transmissions—a European survey and proposed quality shift metrics[C]//SAE World Congress & Exhibition, 2002.

[7] GOKA H. Speed change control system of automative transmission: US7317979B2[P]. 2008 – 01 – 08.

[8] 陈清洪,秦大同,叶心. 液力变矩器闭锁离合器的最优滑摩控制[J]. 中国机械工程, 2009, 20(22): 2663 – 2667.

CHEN Qinghong, QIN Datong, YE Xin. Optimal slip control about lock-up clutch of torque converter[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(22): 2663 – 2667. (in Chinese)

[9] 项昌乐,何韡,刘辉,等. 履带车辆传动系统换挡工况瞬态动力学分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 288 – 293.

XIANG Changle, HE Huai, LIU Hui, et al. Transient dynamic analysis of tracked vehicle transmission during gear shift process [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 288 – 293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160438&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 04. 038. (in Chinese)

[10] 朱镇,陈龙,曹磊磊,等. 液压机械无级变速器换挡品质因素分析[J]. 机械设计, 2018, 35(1): 39 – 45.

ZHU Zhen, CHEN Long, CAO Leilei, et al. Analysis on the shift quality of hydro-mechanical continuously variable transmission[J]. Mechanical Design, 2018, 35(1): 39 – 45. (in Chinese)

[11] SUN Z, HEBBALE K. Challenges and opportunities in automotive transmission control[C]// American Control Conference. IEEE, 2005: 3284 – 3289.

[12] 张金乐,马彪,张英锋,等. 双离合自动变速器换挡特性与控制仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 6 – 11.

ZHANG Jinle, MA Biao, ZHANG Yingfeng, et al. Simulation on shift dynamics and control of dual clutch transmissions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 6 – 11. (in Chinese)

[13] LI K, MANNAN M A, XU M, et al. Electro-hydraulic proportional control of twin-cylinder hydraulic elevators[J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(4): 367 – 373.

[14] 吕庆军,周广明,李明全. 一种车辆液压缓冲阀研究[J]. 车辆与动力技术, 2006(3): 31 – 34, 54.

LÜ Qingjun, ZHOU Guangming, LI Mingquan. The research of a hydraulic buffer [J]. Vehicle and Power Technology, 2006 (3): 31 – 34, 54. (in Chinese)

[15] WANG F, LIN Yigu, YING Chen. A continuously variable hydraulic pressure converter based on high-speed on-off valves[J]. Mechatronics, 2011, 21(8): 1298 – 1308.

- [16] 李哲,魏志军,张平. 自力式调压阀变开度流场及特性分析[J]. 推进技术, 2008, 29(5): 622–626.
LI Zhe, WEI Zhijun, ZHANG Ping. Analysis of characteristic and flow field of self operated pressure-regulating valve[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(5): 622–626. (in Chinese)
- [17] 侯良学,崔晓春,陈志敏. 环状缝隙调压阀的一种设计方法和特性计算[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(6): 1005–1009.
HOU Liangxue, CUI Xiaochun, CHEN Zhimin. Design and characteristic study of an annular ring pressure-regulating valve[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(6): 1005–1009. (in Chinese)
- [18] 陶刚,黎晓然,杨桦,等. 履带车辆综合传动数字控制换挡[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(7): 701–705.
TAO Gang, LI Xiaoran, YANG Hua, et al. Digital control for gear shift of tracked vehicle integrated transmission[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(7): 701–705. (in Chinese)
- [19] 冯广斌,侯玉杰,孙华刚. 装甲车传动装置换挡缓冲调压仿真研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(11): 19–23.
FENG Guangbin, HOU Yujie, SUN Huagang. Simulation analysis of the gear shift buffer of the armored vehicles[J]. Computer Simulation, 2018, 35(11): 19–23. (in Chinese)
- [20] 李政,陈天毅,张新明. 调压阀快速开关定位控制算法研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(1): 98–101.
LI Zheng, CHEN Tianyi, ZHANG Xinming. Research on quickly positioning algorithm for an air pressure regulating valve[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(1): 98–101. (in Chinese)
- [21] 吴国洋,何泽银,李国云,等. 调压阀内流道流场分析及阀芯结构改进[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(3): 38–42.
WU Guoyang, HE Zeyin, LI Guoyun, et al. Flow field analysis of internal flow passage in pressure-regulating valve and spool structure improvement[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(3): 38–42. (in Chinese)
- [22] 张仪,周瑞祥,王文平,等. 飞机燃油加注系统中调压阀结构的优化改进[J]. 机床与液压, 2016(2): 113–117.
ZHANG Jin, ZHOU Ruixiang, WANG Wenping, et al. Structure improvement and optimization of the pressure-regulating valve in an aircraft fuel injection system[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2016(2): 113–117. (in Chinese)
- [23] 马彪,叶明,陈民鉴. 车辆自动换挡缓冲控制设计[J]. 兵工学报(坦克装甲车与发动机分册), 1994(4): 58–62.
- [24] 宋俊,殷庆文,刘树敏,等. 液压系统优化[M]. 北京:机械工业出版社, 1996.
- [25] 赖宇阳,姜欣. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2012.
- [26] 付永玲,祁晓野. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真参考手册[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011.

(上接第 359 页)

- [28] 杨森. ROS/MPTP 介导肌细胞凋亡在大鼠失神经骨骼肌萎缩中的实验研究[D]. 太原:山西医科大学, 2011.
YANG Sen. ROS and MPTP mediated apoptosis in denervated skeletal muscle atrophy in rats[D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2011. (in Chinese)
- [29] WANG L L, YU Q L, HAN L, et al. Study on the effect of reactive oxygen species-mediated oxidative stress on the activation of mitochondrial apoptosis and the tenderness of yak meat[J]. Food Chemistry, 2017, 244: 394–402.
- [30] TAHA A, AMIN T, FERESHTEH R, et al. Oscillation of apoptosome formation through assembly of truncated Apaf-1[J]. European Journal of Pharmacology, 2015, 760: 64–71.
- [31] 宋兵兵. 四种典型茶类诱导 HepG2 人肝癌细胞凋亡及绿茶作用分子机制研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2017.
SONG Bingbing. Studies on apoptosis of HepG2 human hepatocellular carcinoma cells induced by four typical tea and molecular mechanism of action of green tea[D]. Xi'an: Shanxi Normal University, 2017. (in Chinese)
- [32] YARON F, HERMANN S. Live to die another way: modes of programmed cell death and the signals emanating from dying cells[J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2015, 16(6): 329–344.
- [33] REYNA D E, GAVATHIOTIS E. Liposomal permeabilization assay to study the functional interactions of the bcl-2 family: methods and protocols[J]. Methods in Molecular biology, 2019, 1877: 111–119.
- [34] CHEN L, FENG X C, LU F, et al. Effects of camptothecin, etoposide and Ca^{2+} on Caspase-3 activity and myofibrillar disruption of chicken during postmortem ageing[J]. Meat Science, 2011, 87(3): 165–174.
- [35] 刘彩宏,呼海燕. 茶多酚抑制过氧化氢诱导的牙周膜细胞损伤[J]. 口腔医学, 2017, 37(1): 24–27.
LIU Caihong, HU Haiyan. Inhibitory effect of tea polyphenols on H_2O_2 induced human periodontal cell injury [J]. Stomatology, 2017, 37(1): 24–27. (in Chinese)