

文章编号:1671-1637(2016)05-0066-08

## 液力变矩器的闭锁控制

惠记庄,郭云欣,郑恒玉,张泽宇,胡 浩

(长安大学 公路养护装备国家工程实验室,陕西 西安 710064)

**摘 要:**以某型号工程车辆为研究对象,针对其工况特点,以闭锁控制原理为基础,计算并选择在不同油门开度下的常用闭锁点。以油门开度和涡轮转速为基础,以制动信号、档位信号和冷却水温度信号为辅助,设计了多参数闭锁控制策略,并建立了相应的闭锁流程。运用 MATLAB/Simulink 软件建立了由闭锁控制模型、发动机模型、液力变矩器模型、液力变矩器输出模型、变速箱模型和外界阻力模型组成的整车模型,并对整车模型进行仿真。仿真结果表明:闭锁信号能对水温与档位信号做出正确响应,车辆在设定的闭锁点处实现闭锁;闭锁控制模型符合制定的闭锁控制策略,且其传动系统的输出模型符合实际工况,为车辆的闭锁控制提供了理论依据,也为车辆传动效率的提高与车辆节能减排提供了一种新方案。

**关键词:**车辆工程;液力变矩器;Simulink;闭锁控制;涡轮;泵轮

**中图分类号:**U463.22

**文献标志码:**A

## Locking control of hydraulic torque converter

HUI Ji-zhuang, GUO Yun-xin, ZHENG Heng-yu, ZHANG Ze-yu, HU Hao

(National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Equipment,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** A type of engineering vehicle was used as research object, its characteristics of working condition were considered, and the common locking points at different throttle openings were calculated and selected based on the locking control principle. Based on throttle opening and turbine speed, brake signal, gear signal and cooling water temperature signal were considered, a multi-parameters locking control strategy was designed, and the corresponding locking flow was set up. Whole vehicle model composed of locking control model, engine model, hydraulic torque converter model, the output model of hydraulic torque converter, transmission model, and external resistance model, was built and simulated by using MATLAB/Simulink software. Simulation result shows that the locking signal responds correctly with the change of water temperature and gear signal, and the vehicle is locked at the setting locking point. The locking control model accords with the established locking control strategy, and the output model of transmission system is in line with the actual working conditions, which provides a theoretical basis for the locking control of vehicle and proposes a new scheme for improving the transmission efficiency, energy saving and emission reduction of vehicle. 1 tab, 17 figs, 24 refs.

**Key words:** vehicle engineering; hydraulic torque converter; Simulink; locking control; turbine; pump wheel

**Author resume:** HUI Ji-zhuang(1963-), male, professor, PhD, +86-29-82334315, wsjdb01@

收稿日期:2016-07-16

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAF07B00);陕西省自然科学基金项目(2015JM5216)

作者简介:惠记庄(1963-),男,陕西富平人,长安大学教授,工学博士,从事车辆与机械工程研究。

chd. edu. cn.

## 0 引 言

液力变矩器能使车辆起步平稳,换挡平顺,操作方便,防止过载停机,但是也存在工作效率低的问题。对液力变矩器进行适时闭锁控制,能提高传动系统的效率,降低燃油油耗。根据发达国家的调查取证,在相同情况下,使用闭锁控制的工程车辆比不使用液力变矩器闭锁控制的车辆燃油消耗低 10% 左右。

王松林等对带闭锁离合器的装载机与传统装载机进行比较,验证了液力变矩器的闭锁技术能够显著提高装载机的动力性、经济性和工作效率<sup>[1]</sup>;张炳力等研究了某车辆的闭锁规律,制定了车辆闭锁控制策略,并通过建模实现了该控制策略<sup>[2]</sup>;陈礼光等根据车辆传动系统动力学模型,对不同控制油压条件下的闭锁过程进行了仿真,验证了方法的正确性<sup>[3]</sup>;雷雨龙等在汽车的发动机、液力变矩器与闭锁离合器的共同工作过程中,研究其动态特性,重点解决起步工况下实施闭锁离合器滑差控制的可行性、工作区域划分、控制目标与控制算法等 4 个问题<sup>[4]</sup>;高树文对某型号推土机的闭锁条件进行了研究,并对闭锁点进行了计算和优化<sup>[5]</sup>;Umemura 等在液力变矩器闭锁控制系统中,采用非线性输出变量调节理论方法替代以涡轮转速作为参数的线性变化理论方法,并试验验证了该理论方法的优越性<sup>[6]</sup>。

闭锁离合器不完全闭锁可以大幅度降低传动的振动和噪声,使闭锁领域得到充分的扩展,由于液力传动和机械传动联合作用,使滑摩传动时的传动效率比纯液力传动时更高,实现了提高系统传动效率的目的<sup>[7-10]</sup>。国内外对闭锁控制方面的研究大多数还是停留在汽车等工况变化不大的车辆上,对作业于复杂工况的工程车辆研究比较少。

本文针对某工程车辆的实际工况,计算出不同油门开度下的闭锁点,并且设计了相应的控制策略。基于 MATLAB/Simulink 建立了系统闭锁控制模型和整车传动模型,并进行了仿真。

## 1 液力变矩器闭锁机理

### 1.1 液力变矩器闭锁控制原理

闭锁式液力变矩器是根据外界工况实现闭锁或解锁,当外界工况不必使用液力传动时,可以控制闭锁离合器闭锁,泵轮和涡轮成为运行状况相同的一

个整体,传动方式变为机械传动,从而提高传动效率,而在需要液力传动的情况下控制闭锁离合器解锁。带有闭锁离合器的液力变矩器结构见图 1。

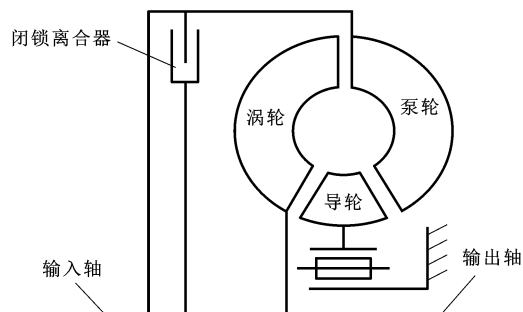


图 1 闭锁式液力变矩器结构

Fig. 1 Structure of locking type hydraulic torque converter

### 1.2 液力变矩器闭锁规律

常用的液力变矩器的闭锁规律一般有单参数的闭锁规律、双参数的闭锁规律和性能要求闭锁规律<sup>[11-12]</sup>。本文根据车辆的实际工况,采用基于油门开度和涡轮转速的双参数控制方法进行闭锁控制,主要控制参数有油门开度、涡轮转速、档位信息、发动机内水温和制动信息。

#### 1.2.1 闭锁条件

本文采用油门开度和涡轮转速的双参数闭锁规律,还应该满足工程车辆的一般闭锁要求<sup>[13-14]</sup>。

(1)发动机内水温不能过低或者过高,过低闭锁会影响发动机的寿命,并且容易导致熄火;过高解锁容易造成发动机零部件的致命损毁。

(2)车速不能太低,车速太低进行闭锁,此时传动系统不稳定,容易产生发动机的波动和爆燃。

(3)当涡轮转速和泵轮转速在闭锁后能够平稳时,才能闭锁,这样才能保证车辆的平稳性和舒适性。

(4)为了保证换挡时传动系统的平稳性和变速箱的寿命,换挡时要解锁。

(5)发动机制动时不能闭锁,因为此时闭锁,会给发动机造成冲击,破坏发动机的零部件。

#### 1.2.2 常用闭锁点的计算

液力变矩器原始特性曲线见图 2,可以确定耦合点的工况对应的转速比为 0.842,在高效区(液力变矩器传动效率不低于 75%),涡轮转速较小点转速比为 0.458,涡轮转速较高点转速比为 0.917 以及其对应的最高的效率点转速比为 0.700。根据计算出的转速比和不同油门开度下发动机与液力变距

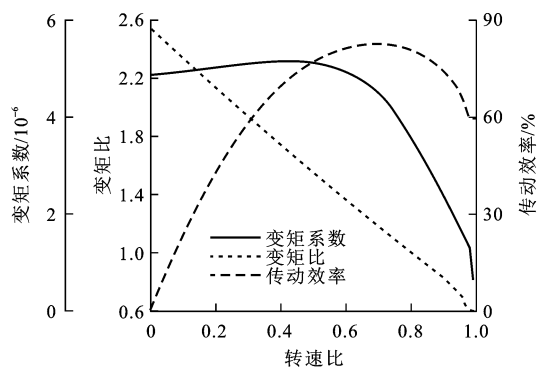


图 2 液力变矩器原始特性曲线

Fig. 2 Initial characteristic curves of hydraulic torque converter  
器的联合输入曲线,得出发动机在不同油门开度下的液力变矩器涡轮的转速,即闭锁点,见表 1。

表 1 不同工况下液力变矩器的闭锁点

Tab. 1 Locking points of hydraulic torque converter under different working conditions

油门开度/%	不同工况对应的转速比下液力变矩器闭锁点的涡轮转速/(r·min <sup>-1</sup> )			
	0.842	0.458	0.917	0.700
40	770	412	847	634
50	954	508	1 050	784
60	1 136	602	1 254	930
70	1 315	694	1 455	1 075
80	1 492	785	1 652	1 217
90	1 666	874	1 847	1 358
100	1 838	860	2 040	1 402

### 1.2.3 闭锁控制方案

本文选用的某型号工程车辆采用的是前进 3 档、后退 3 档的变速箱,根据上文确定的闭锁条件和闭锁点,制定了如下控制方案。

(1)由于前进 1 档和前进 2 档一般为牵引工况,在牵引工况下,车辆的外界负荷变化比较复杂,为了提高传动系统对外界载荷不断变化的适应能力,增加整机牵引性能,将闭锁点取在耦合工况,用来保证车辆所需要的牵引力,使其传动系统平稳。

(2)在前进 3 档行驶和后退档时,一般为行驶档,车辆处于行驶档时,外界阻力变化不大,闭锁点可以取高效区的较低涡轮转速点,在保证车辆的正常行驶情况下,提高了燃油经济性。

(3)在非制动状态的情况下,闭锁离合器可以允许闭锁。

(4)当发动机内水温高于预设的最高水温时,无论此时液力变矩器处于何种工况,液力变矩器都会强制闭锁。同理,当发动机内水温低于预设的最低水

温时,无论此时液力变矩器处于何种工况,变矩器都会强制解锁。而如果发动机内水温为 60℃~90℃时,液力变矩器保持原来模式。

(5)当驾驶人试图换档,系统采集到换档信号时,液力变矩器要处于解锁状态。

### 1.3 液力变矩器闭锁过程

由制定的闭锁方案,设计出了闭锁控制流程,为后续控制模块的建立提供了理论和逻辑依据,见图 3。

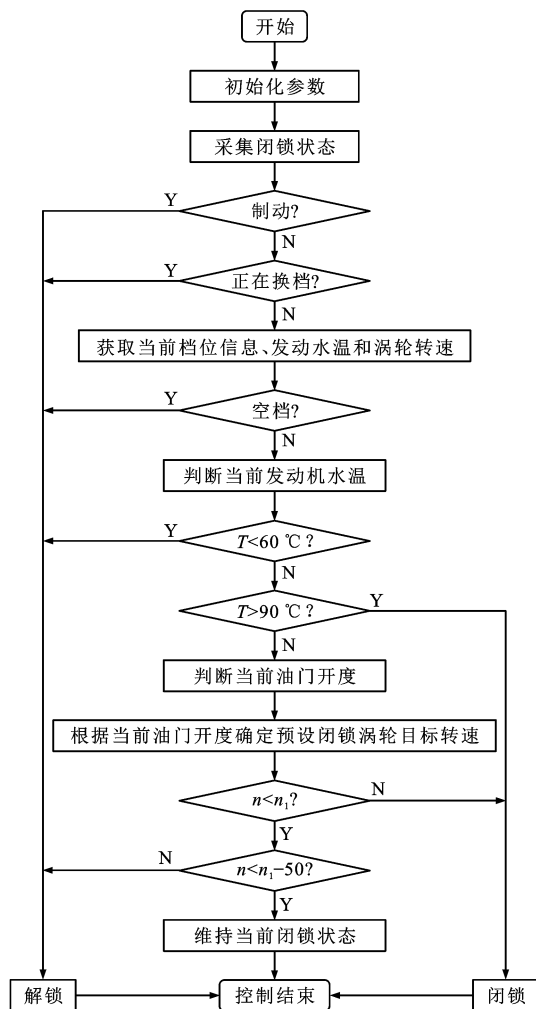


图 3 闭锁控制流程

Fig. 3 Flow of locking control

闭锁控制系统开始通电后,首先对各个模块进行初始化,并判断初始后各个模块中的状态参数是否需要重新设定,如需要重新设定,则按照预置条件进行重新设定,然后再执行 Step 1,预置条件可以根据实际应用的需要进行设定,具体执行步骤如下。

Step 1:采集闭锁状态,确定当前的闭锁模式,如果闭锁模式为自动模式,则继续执行 Step 2。

Step 2:若有制动,则进入解锁模式,若没有制

动,进行 Step 3。

Step 3:若有换档,进入解锁模式,若非换档,则进行 Step 4。

Step 4:获取此时档位信息、发动机水温  $T$  以及涡轮转速  $n$ 。

Step 5:若是空档,进入解锁模式,若不是空档,进行 Step 6。

Step 6:比较发动机水温  $T$  与最低水温阈值  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,若  $T < 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,进入解锁模式,若  $T \geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,则进行 Step 7。

Step 7:比较发动机水温  $T$  与最高水温阈值  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,若  $T > 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,进入闭锁模式,若  $T \leq 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,则进入 Step 8。

Step 8:根据当前油门开度和档位信息获得预设闭锁涡轮目标转速  $n_1$ 。

Step 9:对得到的预设闭锁涡轮目标转速  $n_1$  与 Step 4 得到的涡轮转速  $n$  进行比较,若  $n \geq n_1$ ,控制闭锁式液力变矩器进行闭锁,若  $n < n_1$ ,则进行 Step 10。

Step 10:若  $n \geq n_1 - 50$ ,控制闭锁式液力变矩器进行解锁,若  $n < n_1 - 50$ ,维持当前状态不变,控制结束。

## 2 闭锁控制模型与动力传动系统模型建立

### 2.1 闭锁控制模型建立

依据前文的闭锁控制流程与闭锁过程分析,建立闭锁控制模型见图 4,模型由闭锁控制触发子模块和闭锁判断子模块组成。闭锁控制触发子模块用于获取闭锁式液力变矩器的控制参数,控制参数主要包括制动信息、档位信息、发动机水温、油门开度与涡轮转速等;闭锁判断子模块用于根据闭锁控制触发子模块获取的控制参数对闭锁式液力变矩器进行闭锁控制,闭锁判断子模块包含制动判断子模块、换档判断子模块、空档判断子模块、发动机水温判断子模块、涡轮转速判断子模块。

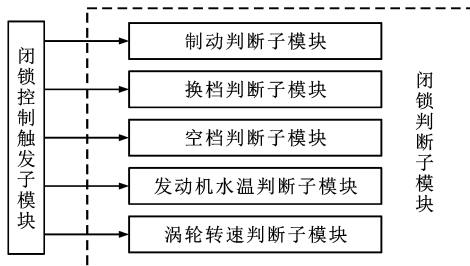


图 4 闭锁控制模型

Fig. 4 Locking control model

### 2.2 发动机模型的建立

由发动机的试验数据拟合出调速特性曲线,即得到发动机转矩  $M_1$  与发动机角速度  $\omega_1$  之间的关系,并建立发动机的动力性数学模型,表示为

$$I \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 - M_2 - M_3 \quad (1)$$

式中: $I$  为发动机飞轮的转动惯量; $M_2$  为发动机的外界阻力转矩; $M_3$  为辅助装置对发动机的力矩; $t$  为时间。

根据发动机的动力性数学模型在 MATLAB/Simulink 中建立发动机模型,见图 5。

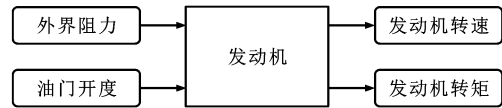


图 5 发动机模型

Fig. 5 Engine model

### 2.3 液力变矩器模型的建立

液力变矩器的原始特性计算公式一般是转速比的函数,其数学公式为

$$\begin{cases} i_1 = \frac{n}{n_2} \\ \eta_1 = \frac{-M_4}{M_5 n_2} = K \\ \lambda = \frac{M_5}{\rho g n_2^2 D^5} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_1$  为液力变矩器的转速比; $n_2$  为泵轮转速; $\eta_1$  为变矩器传动效率; $\lambda$  为变矩器的变矩系数; $M_4$  为泵轮转矩; $M_5$  为涡轮转矩; $K$  为变矩器的变矩比; $\rho$  为工作液体密度; $g$  为重力加速度; $D$  为液力变矩器有效直径。

对液力变矩器的试验数据,采用最小二乘法进行拟合可以得到其原始特性的数学模型,应用 MATLAB/Simulink 库中的一维插值函数模块,使不同转速比作为输入,转矩系数和变矩系数作为检索输出,得到液力变矩器的转矩函数模块与变矩函数模块,依据泵轮的转矩和泵轮的转速,计算液力变矩器涡轮的转矩和转速,建立液力变矩器仿真模型见图 6。

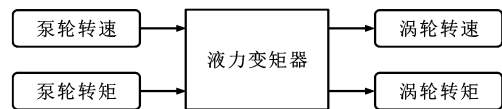


图 6 液力变矩器模型

Fig. 6 Model of hydraulic torque converter

### 2.4 变速箱模型的建立

依据力学原理,车辆变速箱输出的转速和转矩

可以分别表示为

$$\begin{cases} M_6 = i_2 M_7 \\ \omega_2 = \omega_3 / i_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $M_6$  为变速箱的输出转矩;  $M_7$  为液力变矩器的输出转矩;  $\omega_2$  为变速箱的输出角速度;  $\omega_3$  为液力变矩器的输出角速度;  $i_2$  为变速箱该档位的转速比。

根据变速箱输出的转矩和转速式(3), 变速箱模型的输入为档位信号、涡轮转速和涡轮转矩。各档位转速比信号采用一维插值模块, 根据输入的档位信号, 检索出该档位下的转速比。变速箱的输出转速和转矩与当前档位的转速比进行数学计算, 获得该档位下的变速箱输出的转矩与转速, 变速箱模型见图 7。



图 7 变速箱模型

Fig. 7 Transmission model

## 2.5 外界阻力模型建立

车辆在工作中需要克服各种阻力, 包括地面滚动阻力、坡道阻力、惯性阻力与工作阻力<sup>[15-19]</sup>, 车辆驱动力与各阻力分别为

$$\begin{cases} P_1 = M_8 r \eta_2 \\ P_2 = f_1 G \cos(\alpha) \\ P_3 = \pm G \sin(\alpha) \\ P_4 = \sigma \frac{G}{g} v \\ P_5 = f_2 G \\ G = mg \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_1$  为车辆的驱动力;  $P_2$  为滚动阻力;  $P_3$  为坡道阻力;  $P_4$  为惯性阻力;  $P_5$  为工作阻力;  $M_8$  为主动轮输出转矩;  $r$  为主动轮半径;  $\eta_2$  为行走装置效率;  $f_1$  为滚动阻力系数;  $m$  为车辆质量;  $\alpha$  为坡度;  $\sigma$  为质量增加系数;  $v$  为车辆直线行驶速度;  $f_2$  为等效工作阻力系数。

车辆工作时动态模型可描述为

$$v = \frac{g}{\sigma} \left[ \frac{M_8 r \eta_2}{G} - f_1 \cos(\alpha) - \sin(\alpha) - f_2 \right] \quad (5)$$

根据车辆工作时动态模型, 建立车辆外界阻力模型见图 8。

## 2.6 转矩输出模型建立

当工况处于液力传动工况时, 根据发动机与液力变矩器匹配后计算涡轮输出的转矩<sup>[20-22]</sup>。当液

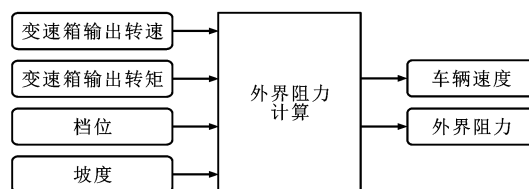


图 8 外界阻力模型

Fig. 8 Model of external resistance

力变矩器闭锁时, 液力变矩器处于机械传动状态, 液力变矩器涡轮转矩不能再根据上面的理论方法进行计算, 此时, 液力变矩器的涡轮输出转矩应该等于发动机的输出转矩, 由此建立液力变矩器输出模型见图 9。



图 9 液力变矩器输出模型

Fig. 9 Output model of hydraulic torque converter

## 2.7 整车模型建立

将以上得到的各个模型整合起来, 得到整车仿真模型见图 10。

## 3 液力变矩器闭锁控制系统仿真分析

对各个模型进行参数赋值, 然后进行整车仿真<sup>[23-24]</sup>。首先, 对冷却水温度控制应用周期函数激励闭锁控制模型中的触发控制模块, 冷却水温度变化见图 11。可以看出: 当仿真时间为 1.696 s 时, 正弦函数的幅值第 1 次超过高温极限 90 °C; 当仿真时间为 5.233 s 时, 正弦函数的幅值第 1 次低于低温极限 60 °C; 当仿真时间为 7.976 s 时, 正弦函数的幅值第 2 次超过高温极限 90 °C。

图 12 为冷却水温对应的闭锁信号, 其中闭锁信号为 0 时, 表示液力变矩器处于解锁; 闭锁信号为 1 时, 表示液力变矩器处于闭锁。

档位变化与闭锁信号的关系见图 13。用斜坡函数对动力系统进行激励, 采集涡轮转速, 涡轮转速曲线见图 14。

取油门开度为 80%, 档位为 2 档, 制动器处于非制动状态, 冷却水温为 70 °C 为基本参数, 对闭锁控制模型进行仿真分析。图 15 为涡轮转速的闭锁信号, 图 16 为泵轮与涡轮转速曲线, 图 17 为泵轮与涡轮输出转矩曲线。由前文可知该条件下闭锁涡轮转速为 1 492 r · min<sup>-1</sup>。由档位的闭锁信号可以看出: 当液力变矩器涡轮转速在闭锁时间为 0.961 s

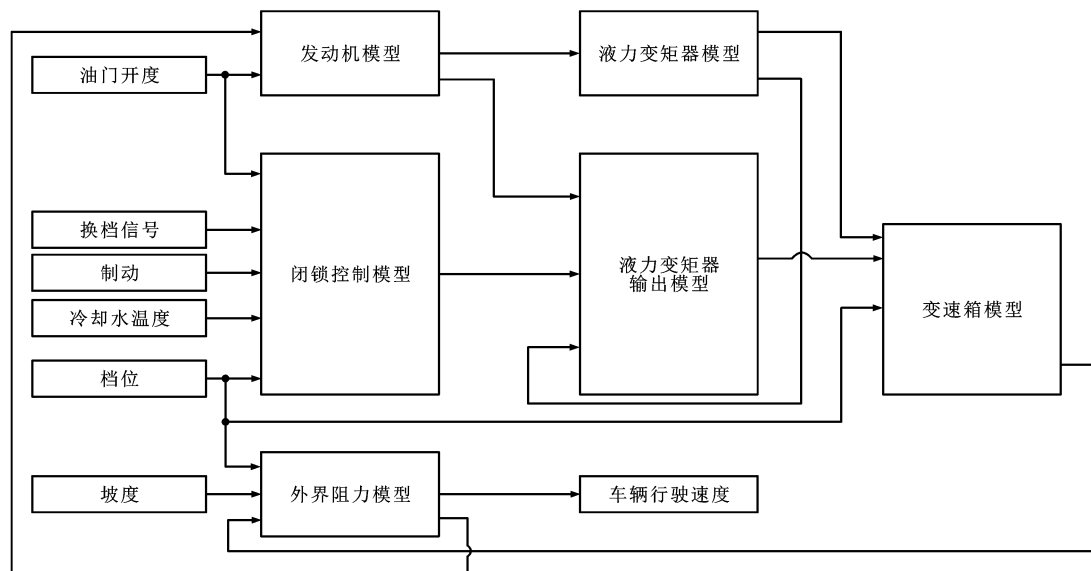


图 10 整车仿真模型

Fig. 10 Simulation model of whole vehicle

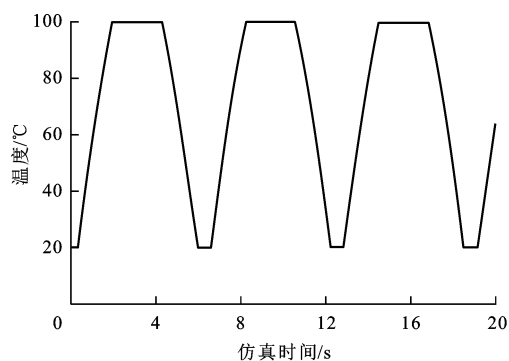


图 11 冷却水温度

Fig. 11 Temperature of cooling water

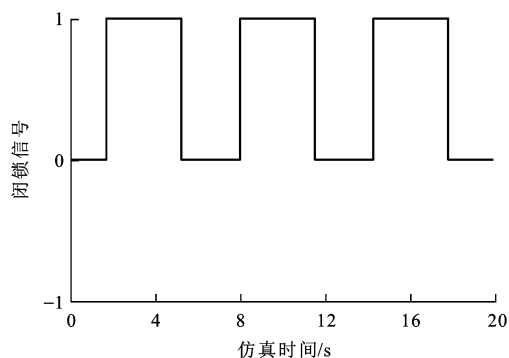


图 12 冷却水温度的闭锁信号

Fig. 12 Locking signals of cooling water temperature

时达到闭锁的涡轮转速。由涡轮转速的闭锁信号可以看出:当闭锁时间为 0.961 s 时,液力变矩器闭锁信号为 1,液力变矩器处于闭锁状态。从图 16、17 中可以看出:在闭锁时间为 0.961 s 时,液力变矩器泵轮转速、转矩和涡轮转速、转矩相等,且此时涡轮转速为  $1\,492\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

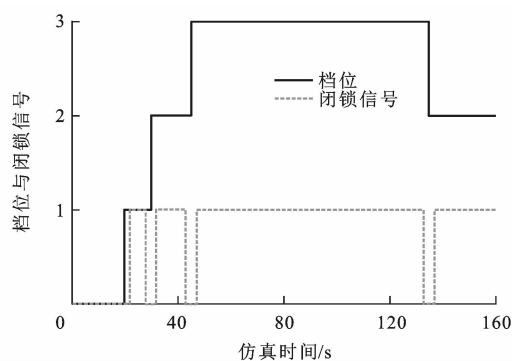


图 13 档位与闭锁信号

Fig. 13 Gear and locking signals

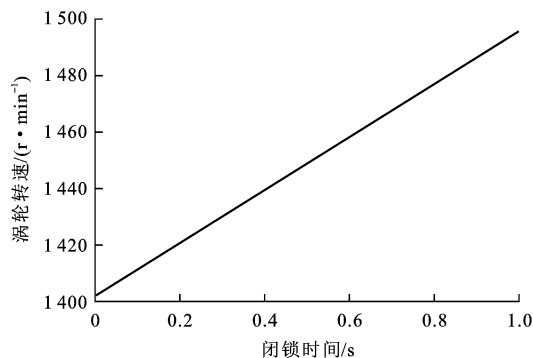


图 14 涡轮转速曲线

Fig. 14 Curve of turbine speed

## 4 结 语

(1)取油门开度为 80%,档位为 2 档,制动器处于非制动状态,冷却水温为  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  为参数,对整车模型进行仿真分析,得出了冷却水温度变化与闭锁信号的曲线、档位与闭锁信号的曲线、泵轮和涡轮转

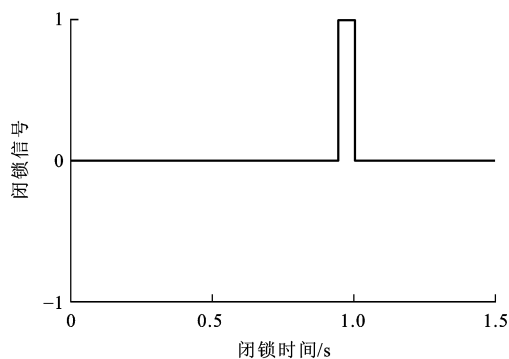


图 15 涡轮转速的闭锁信号

Fig. 15 Locking signals of turbine speed

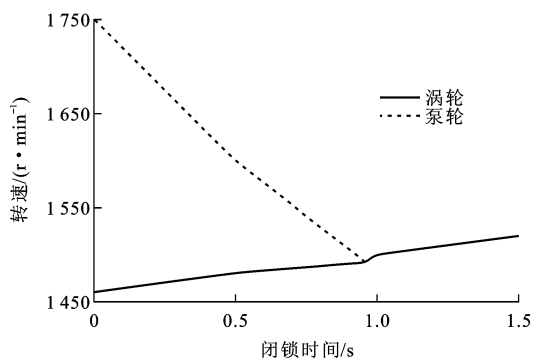


图 16 泵轮和涡轮转速曲线

Fig. 16 Curves of pump wheel and turbine speeds

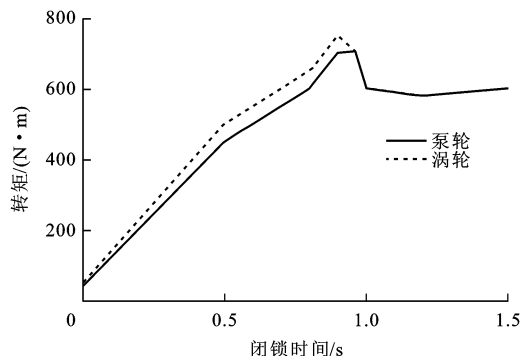


图 17 泵轮和涡轮输出转矩曲线

Fig. 17 Output torque curves of pump wheel and turbine

速与闭锁时间曲线以及泵轮和涡轮转矩与闭锁时间曲线。

(2)对比分析了冷却水温度变化曲线与冷却水温度的闭锁信号曲线,当冷却水温在  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上时,冷却水温的闭锁信号为 1,变矩器闭锁,当水温为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,闭锁信号为 0,变矩器解锁,这符合闭锁方案中的冷却水温度闭锁控制规律。另外通过档位与闭锁信号图,当车辆换挡时,闭锁信号变为 0,液力变矩器解锁。以上两点分别证明了闭锁判断子模块中发动机水温判断子模块和换挡判断子模块的正确性。

(3)对比了涡轮转速曲线与涡轮转速对应的闭锁信号,当闭锁涡轮转速达到闭锁转速  $1\,492\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,即在  $0.961\text{ s}$  时,实际涡轮转速等于闭锁涡轮转速,此时,液力变矩器闭锁,证明了闭锁判断子模块中的涡轮转速判断子模块的正确性。

(4)分析了泵轮和涡轮转速,在  $0.961\text{ s}$  时,涡轮转速为  $1\,492\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ;分析了泵轮和涡轮输出转矩,在  $0.961\text{ s}$  之前,涡轮转矩大于泵轮转矩,这是因为液力变矩器的增矩作用,在  $0.961\text{ s}$  时,因为发动机转速下降泵轮转矩有一个急剧增加,之后泵轮转矩相等。这两点都符合液力变矩器实际工况,证明了动力传动系统模型的正确性。

(5)以上仿真结果充分说明了闭锁控制模型符合制定的闭锁控制策略,以及液力变矩器闭锁控制在整车上应用的正确性,实现了提高了车辆传动效率的目的。本文对影响液力变矩器闭锁品质的因素没有进行研究,这将是下一步研究的重点。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 王松林, 马文星, 初长祥, 等. 装载机液力变矩器闭锁技术的动力性和经济性分析[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(9): 907-911.  
WANG Song-lin, MA Wen-xing, CHU Chang-xiang, et al. Analysis of power performance and fuel economy of loader with torque converter lock-up technology[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(9): 907-911. (in Chinese)
- [2] 张炳力, 宋振翔, 赵 韩. 基于 Simulink 的液力变矩器闭锁性能仿真[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2010, 33(9): 1281-1284.  
ZHANG Bing-li, SONG Zhen-xiang, ZHAO Han. Simulation of torque converter locking performance based on simulink[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2010, 33(9): 1281-1284. (in Chinese)
- [3] 陈礼光, 刘世明, 郑亚飞, 等. 液力变矩器闭锁过程仿真与实验[J]. 液压与气动, 2012(4): 27-29.  
CHEN Li-guang, LIU Shi-ming, ZHENG Ya-fei, et al. Simulation and test of the lock process for hydrodynamic torque converter[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2012(4): 27-29. (in Chinese)
- [4] 雷雨龙, 刘振杰, 郑宏鹏, 等. 起步工况液力变矩器闭锁滑差控制及滑摩温度[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2013, 34(5): 497-501.  
LEI Yu-long, LIU Zhen-jie, ZHENG Hong-peng, et al. Slip temperature and lock-up control of torque converter clutch under launching conditions[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2013, 34(5): 497-501. (in Chinese)
- [5] 高树文. 履带式车辆液力变矩器闭锁点优化及闭锁动态特性

- 研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2009.
- GAO Shu-wen. Research on lock-up point optimum and lock-up dynamic characteristic of torque converter used in tracked vehicle[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] UMEMURA Y, SAKAMOTO N. Optimal servo design for lock-up slip control for torque converter-nonlinear output regulation approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(4): 1587-1593.
- [7] SHANG Tao, ZHAO Ding-xuan, ZHANG Yuan-kun, et al. Method of internal 3D flow field numerical simulation for hydrodynamic torque converter[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2008, 3(1): 86-90.
- [8] MA Wen-xing, LIU Hao, LIU Chun-bao, et al. Measurement and analysis of the internal flow field in the hydrodynamic torque converter with adjustable guide vanes[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(6): 1-13.
- [9] WU Guang-qiang, WANG Li-jun. Application of dual-blade stator to low-speed ratio performance improvement of torque converters[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 293-300.
- [10] 胡建军, 秦大同, 蒋小华. 液力变矩器锁止离合器性能及滑差控制[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2004, 27(2): 1-5.
- HU Jian-jun, QIN Da-tong, JIANG Xiao-hua. Performance and slip control of torque converter lock-up clutch[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(2): 1-5. (in Chinese)
- [11] 张新荣, 黄宗益. 液力变矩器的闭锁及其控制研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2002, 19(2): 7-9.
- ZHANG Xin-rong, HUANG Zong-yi. Torque converter clutch slip control system[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2002, 19(2): 7-9. (in Chinese)
- [12] LIU Y F, LAKSHMINARAYANA B, BURNINGHAM J. Flow field in the turbine rotor passage in an automotive torque converter based on the high frequency response rotating five-hole probe measurement[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2001, 7(4): 253-269.
- [13] 谢 硕, 丁玉兰, 吴光强, 等. 汽车液力传动系统滑摩离合器设计[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001, 29(12): 1420-1424.
- XIE Shuo, DING Yu-lan, WU Guang-qiang, et al. Approach to design slipping clutch in automotive hydraulic transmission[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(12): 1420-1424. (in Chinese)
- [14] 李秀兰, 杨宏韬. 装载机液力变矩器闭锁控制[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2013, 34(2): 151-154.
- LI Xiu-lan, YANG Hong-tao. Locking control for hydraulic torque converters on loader[J]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 34(2): 151-154. (in Chinese)
- [15] 赵克利, 白秀超, 刘宇飞, 等. 推土机动力传动系统的合理匹配仿真研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 183-190.
- ZHAO Ke-li, BAI Xiu-chao, LIU Yu-fei, et al. Simulation study on reasonable matching of power train system for crawler bulldozer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 183-190. (in Chinese)
- [16] 汤久望, 何绍华, 高久好, 等. 液力传动工程机械推土作业过程动态仿真与分析[J]. 中国工程机械学报, 2006, 4(4): 410-414.
- TANG Jiu-wang, HE Shao-hua, GAO Jiu-hao, et al. Dynamic simulation of bulldozing process for hydraulic transmission vehicles[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2006, 4(4): 410-414. (in Chinese)
- [17] LIU Chun-bao, LIU Chang-suo, MA Wen-xing. Rans: detached eddy simulation and large eddy simulation of internal torque converters flows; a comparative study[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2015, 9(1): 114-125.
- [18] 高树文, 吕爱玲, 徐 刚. 推土机液力变矩器及其闭锁控制[J]. 建筑机械化, 2008, 29(10): 31-35.
- GAO Shu-wen, LU Ai-ling, XU Gang. The use and lock-up control about torque converter in dozer[J]. Construction Mechanization, 2008, 29(10): 31-35. (in Chinese)
- [19] 刘存波. 推土机液力变矩器闭锁离合器控制系统研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2009.
- LIU Cun-bo. Research on the control system of lock-up clutch in bulldozer's torque converter[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [20] 骆清国, 王旭东, 张更云, 等. 装甲车辆动力性能联合仿真技术研究[J]. 机械设计与制造, 2013(1): 75-77.
- LUO Qing-guo, WANG Xu-dong, ZHANG Geng-yun, et al. Dynamical performance co-simulation technology of the armored vehicle[J]. Machinery Design and Manufacture, 2013(1): 75-77. (in Chinese)
- [21] EJIRI E. Analysis of flow in the lock-up clutch of an automotive torque converter[J]. JSME International Journal, Series B: Fluids and Thermal Engineering, 2006, 49(1): 131-141.
- [22] 蒋小华. 液力变矩器闭锁离合器滑摩控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- JIANG Xiao-hua. Research on slip control of lock-up clutch in torque converter[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [23] JANG J D, LEE I T, KIM W J, et al. Effect of a piston hole under the slip control condition of the lock-up clutch in a torque converter[J]. International Journal of Automotive Technology, 2015, 16(1): 139-144.
- [24] KIM S J, KIM C H, JUNG S Y, et al. Shape optimization of a hybrid magnetic torque converter using the multiple linear regression analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(3): 1-4.