

文章编号:1000-582X(2011)05-008-06

## 解决传动系统滞后的 CVT 速比控制策略

胡建军,李康力,刘永刚,罗 勇

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

**摘 要:**无级变速系统响应滞后导致发动机工作点偏离最佳经济性工作线,使车辆油耗增加。为减少系统响应滞后的影响,提出了在计算目标速比时,增加系统滞后时间参数的无级变速器(Continuously Variable Transmission, CVT)速比控制策略。仿真结果表明所提出的控制策略能很好地克服系统响应滞后的影响,使发动机有效跟踪最佳经济性曲线。将考虑系统滞后的控制策略与传统控制策略在 10 循环工况下进行仿真对比,结果显示所提出的控制策略比传统控制策略油耗降低 2.85%。

**关键词:**车辆;无级变速传动;控制;系统响应;滞后

**中图分类号:**U463.2

**文献标志码:**A

## Ratio control strategy for solving system response lag of continuously variable transmission system

HU Jian-jun, LI Kang-li, LIU Yong-gang, LUO Yong

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University,  
Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Generally, there's a system response lag in the continuously variable transmission system, and this leads to a deviation of the engine work point from the optimal operation line of the minimum fuel consumption. To reduce the influence of system response lag, a new CVT ratio control strategy with the system response lag parameter during computing target ratio is proposed. Simulation results indicate that the proposed control strategy can overcome the effect of system response lag, so as to keep the engine work point on the optimal operation line effectively. A comparison of fuel consumption is made between the proposed control strategy and the traditional one by simulation, and results indicate that the proposed control strategy reduces the fuel consumption of the system by 2.85%.

**Key words:** vehicle; continuously variable transmission; control; system response; lag

无级变速器(Continuously Variable Transmission, CVT)是车辆理想的传动系统,自汽车诞生以来一直是人们追求的目标<sup>[1]</sup>。无级变速器具有连续改变传动比的能力,理论上可使发动机始终在理想工作线上运行,从而提高车辆的动力性和经济性,随着世

界能源的紧缺和汽车排放标准的提高,无级变速传动越来越受到人们的重视<sup>[2]</sup>。经过多年努力,无级变速器已经成功实现商业化,但省油效果并未达到预期水平,导致消费者对其接受程度并不高,如何改进无级变速系统的经济性已经成为该领域最重要的

收稿日期:2010-12-18

基金项目:重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC, 2010BB4233)

作者简介:胡建军(1973-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事车辆传动系统及其控制、性能仿真分析等研究,  
(E-mail) hujianjun@cqu.edu.cn。

研究内容之一<sup>[3-5]</sup>。

无级变速系统理想的控制策略是通过连续改变速比使发动机始终沿着最佳经济线运行,从而提高车辆经济性。国内外文献通常的做法是根据当前车速和节气门开度计算使发动机工作在最佳经济性工作点的目标速比,再通过控制执行机构使目标速比得以实现<sup>[6]</sup>。但是在实际运行中,由于无级变速传动系统自身的结构特点,导致整车在动态工况下对加速踏板响应存在迟滞现象。当 CVT 速比达到目标速比时,系统状态已经改变,使得发动机转速偏离最佳经济性工作线,车辆并未实现最佳经济性运行<sup>[7-8]</sup>。要提高无级变速系统的经济性,就必须考虑系统响应滞后对速比控制的影响,对速比控制过程加以改进。笔者以装备金属带式无级变速器的车辆为研究对象,对考虑系统响应滞后的无级变速器速比控制方法进行研究,并通过建模与仿真对新的控制策略进行验证。

## 1 响应滞后对 CVT 速比控制的影响

图 1 为系统响应滞后对 CVT 速比控制的影响示意图。

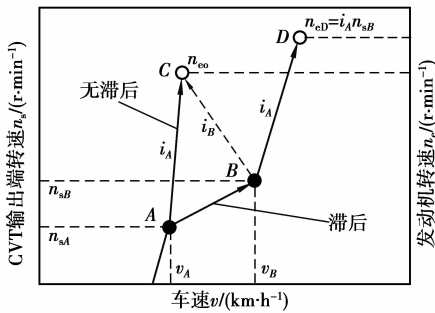


图 1 系统响应滞后对 CVT 速比控制的影响

如图 1 所示,当节气门开度为某一固定值  $\alpha$  时,发动机最佳经济性目标转速为  $n_{co}$ ,如图中 C 点所示。当车辆工作在点 A 时,CVT 输出轴转速为  $n_{sA}$ ,此时 CVT 目标速比  $i_A = n_{co}/n_{sA}$ ,如果速比变化没有滞后,则 CVT 速比到达  $i_A$  时,车辆仍工作在 A 点的状态,发动机工作在其最佳经济性工作点  $n_{co}$ 。但实际系统速比变化往往有滞后现象,在速比到达  $i_A$  时车辆工作状态已经由 A 点变化到 B 点。B 点的 CVT 输出轴转速为  $n_{sB}$ ,若此时 CVT 速比才到达  $i_A$ ,则发动机最终到达的转速为  $n_{cd} = i_A n_{sB}$ ,如图中点 D 所示,可见由于系统滞后现象的影响,发动机实际到达的转速  $n_{cd}$  已经偏离了最佳经济性目标转速  $n_{co}$ ,从而使系统燃油经济性下降。同理,当系统检测到 B 点的车速为  $v_B$ ,重新将目标速比设定为

$i_B = n_{co}/n_{sB}$ ,则  $i_B$  也不能立刻实现,需要有一段时间的延迟,当速比到达  $i_B$  时车辆已经不再工作在 B 点的状态。从上述的分析可知,若采用传统的控制策略,设定的目标速比总是在系统延迟之后实现,发动机工作点总是与最佳经济性工作点之间存在一定偏离。

要改善上述状况,就需要在车辆工作在 A 点时,就根据车辆加速度预测速比到达目标速比时车辆的工作状态 B 的车速,在 A 点处设定 CVT 目标速比为  $i_B$ ,则当 CVT 速比到达  $i_B$  时,车辆正好运行到 B 点,则发动机工作点正好在  $n_{co}$  处。笔者将按照上述策略制定新的控制算法,并对其控制效果与传统控制进行仿真对比分析。

## 2 传动系统滞后对系统性能的影响

在完成系统响应滞后对 CVT 速比控制的影响进行理论分析的基础上,需要进一步建立系统仿真模型,并研究系统滞后对车辆系统动态性能的影响,以验证理论分析的正确性,同时为制定新的控制算法提供指导。

### 2.1 无级变速系统动态模型

无级变速系统结构如图 2 所示,其中  $\omega_e$  和  $T_e$  分别为发动机转速和转矩,  $I_e$  为飞轮及 CVT 输入轴转动惯量,  $T_p$  为 CVT 输入转矩,  $i$  为 CVT 速比,  $I_s$  为 CVT 输出轴转动惯量,  $\omega_s$  与  $T_s$  分别为 CVT 输出轴转速与转矩,  $i_o$  为主减速比,  $I_v$  为与整车平移质量等效的转动惯量以及车轮转动惯量之和,  $T_d$  为车辆驱动转矩,  $\omega_v$  为车轮角速度,  $T_{load}$  为车辆负载转矩。

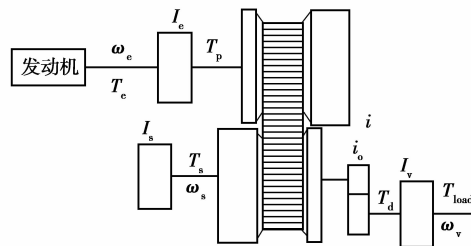


图 2 无级变速系统结构简图

根据图 2 中系统传动关系可以列出系统动力学方程如下<sup>[9-10]</sup>:

$$T_e - T_p = I_e \frac{d\omega_e}{dt}, \quad (1)$$

$$T_s = T_p i, \quad (2)$$

$$T_s - \frac{T_d}{i_o} = I_s \frac{d\omega_s}{dt}, \quad (3)$$

$$T_d - T_{load} = I_v \frac{d\omega_v}{dt}, \quad (4)$$

$$\omega_e = i\omega_s, \quad (5)$$

$$\omega_s = i_o\omega_v. \quad (6)$$

## 2.2 发动机数值模型与最佳经济性匹配策略

研究表明,发动机输出转矩是节气门开度和发动机转速的函数,即  $T_e = f(\alpha, n_e)$ 。通过实验测定不同节气门开度和转速下发动机输出转矩,用插值方法建立发动机输出转矩数值模型,如图 3 所示。

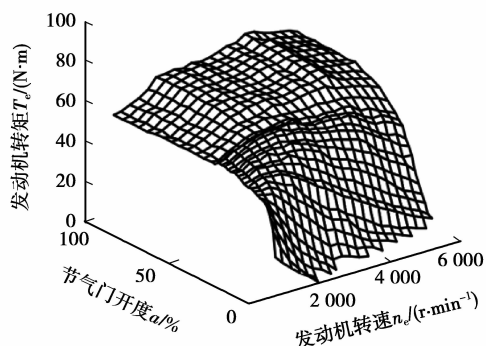


图 3 JL472Q1 发动机的稳态输出扭矩

根据上述方法建立的发动机数值模型仅表示发动机在稳态工况下的输出转矩,考虑到动态过程中存在响应滞后,发动机动态特性可表示为具有滞后的一阶惯性环节<sup>[11]</sup>:

$$T_{ed} = e^{-\tau_e s} \frac{1}{k_e s + 1} T_e, \quad (7)$$

式中:  $k_e$  为动态特性的拟合系数;  $\tau_e$  为滞后时间;  $s$  为拉氏变换因子;  $T_{ed}$  为发动机动态输出转矩;  $T_e$  为发动机稳态输出转矩。

发动机比燃油消耗率是其转速和功率的函数,即  $g_e = f_1(n_e, p_e)$ , 可以通过试验得出比燃油消耗率与发动机转速和功率的关系,经插值处理得到发动机比燃油消耗率模型,如图 4 所示。由于发动机动

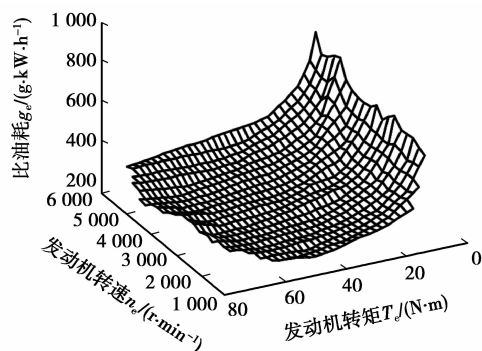


图 4 JL472Q1 发动机燃油消耗模型

态特性对发动机的燃油消耗率影响不大,可以用稳态的油耗数值模型近似代替其动态油耗模型。

如果要求将发动机特性场上每一个响应的功率都保持在最低燃油消耗的转速下工作,则可以实现发动机按最佳经济性工况运行,此时最佳经济性转速是节气门开度的函数,即  $n_{et} = f_2(\alpha)$ , 最佳经济性曲线如图 5 所示。

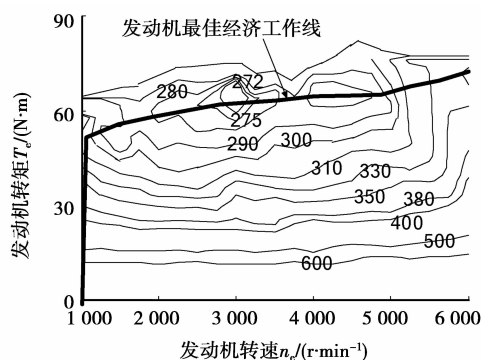


图 5 JL472Q1 发动机万有特性图

发动机实际转速是车速的函数,可表示为  $n_e = f_3(v)$ , 则 CVT 目标速比  $i_{cvtid} = f_4(\alpha, v)$ 。根据上述关系可得到 CVT 最佳经济性目标速比与节气门开度和车速的关系<sup>[12]</sup>, 如图 6 所示。

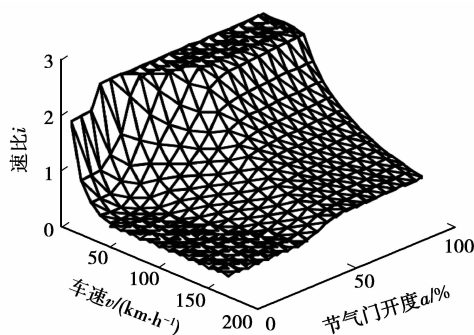


图 6 最佳经济性目标速比

## 2.3 仿真分析

在无级变速传动系统中,由于节气门开度响应滞后、发动机转矩响应滞后、CVT 响应滞后及驱动转矩响应滞后等因素将引起的整个系统的滞后,从驾驶员踩下油门踏板到驱动转矩有几毫秒的延迟,系统动态模型必须考虑系统响应滞后的影响<sup>[13]</sup>。根据相关资料<sup>[14-15]</sup>,取系统总滞后时间  $\tau = 500$  ms, 以最佳经济性匹配规律控制 CVT 速比,对系统加速减速过程进行仿真,结果如图 7 所示。

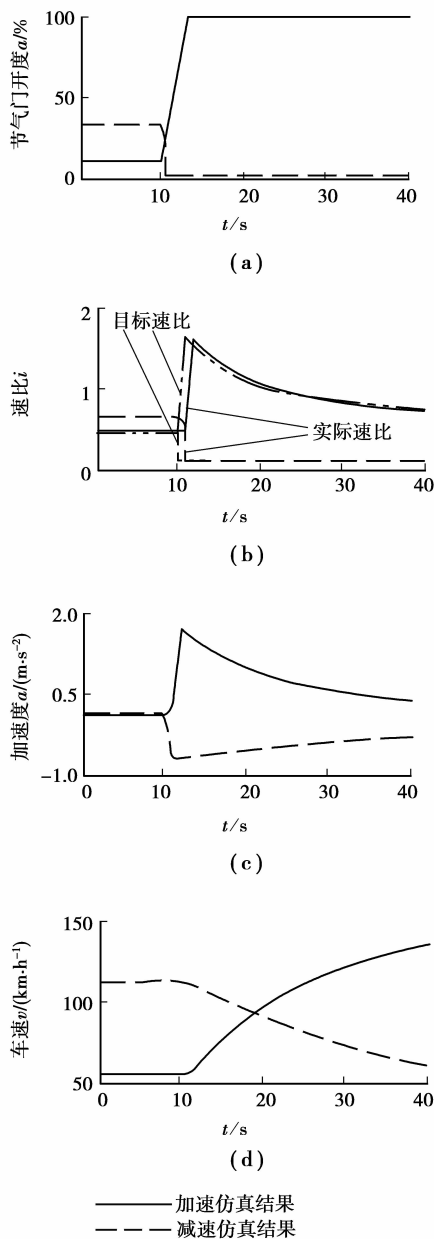


图 7 系统有滞后时加减速过程仿真

从理论分析可知,在速比上升过程中,根据某一个采样点的发动机目标转速得到 CVT 目标速比,由于系统滞后的影响,该目标速比不能立刻达到,当实际速比达到该目标速比时车辆速度已经增加,此时的目标速比大于 CVT 实际速比。同理,在减速过程中 CVT 目标速比总是小于实际速比。从图 7 可以看出,无论是加速过程还是减速过程,由于系统滞后的影响,在速比增加时实际速比总是小于目标速比,在速比减小时,实际速比总是大于目标速比。理论分析与仿真结果相一致,验证了模型的正确性。

将加减速过程发动机工作点表示在发动机万有特性图上,如图 8 所示,从该图可以看出,由于系统滞后效应的影响,实际速比不能准确跟踪目标速比,

使得发动机工作点偏离了最佳经济性工作线,加减速过程发动机工作点在最佳经济性工作线附近波动,导致系统经济性下降。

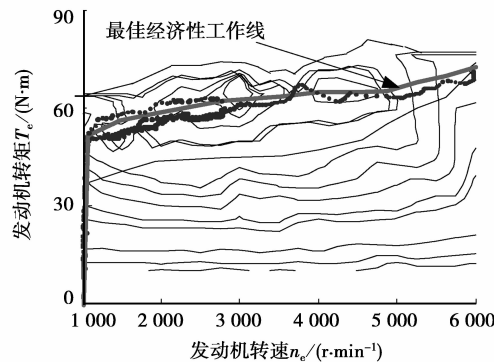


图 8 普通控制策略下加减速过程发动机工作轨迹

### 3 考虑传动系统滞后的速比控制策略

仿真与分析显示,由于系统滞后的影响,采用传统的速比控制算法时发动机工作点将偏离最佳经济性工作线,需要制定新的控制策略改善上述状况,提高系统经济性。

#### 3.1 考虑系统滞后的速比控制算法

在传统的控制方法中,CVT 目标速比根据实时测量的节气门开度得到,若节气门开度为  $\alpha$ ,则发动机最佳经济性工作转速可通过其最佳经济性曲线获得,记为  $n_{et} = f_2(\alpha)$ 。将其转化为角速度的形式,用  $\omega_{eo}$  表示,有

$$\omega_{eo} = \frac{\pi n_{et}}{30} \quad (8)$$

CVT 输出轴角速度  $\omega_s$  可通过实际测量到的车速  $v$  计算获得

$$\omega_s = \frac{v i_o}{3.6 r}, \quad (9)$$

式中  $r$  为车轮半径。

传统控制方法中 CVT 目标速比  $i_{cvt d}$  的确定方法为<sup>[16]</sup>

$$i_{cvt d} = \frac{\omega_{eo}}{\omega_s} \quad (10)$$

在实际应用中,由于无级变速传动系统存在传动滞后,由此引起发动机转速偏离了最佳经济性工作曲线。为了提高汽车行驶时的经济性,在计算目标速比时要考虑 CVT 系统动力传动的滞后影响。设车轮瞬时角加速度为  $a$ ,传动系统响应滞后时间为  $\tau$ ,则经过系统滞后时间  $\tau$  后 CVT 输出轴角速度  $\omega_s^*$  可表示为

$$\omega_s^* = \omega_s + i_o a \tau \quad (11)$$

将公式(10)中的  $\omega_s$  替换为公式(11)中的  $\omega_s^*$ ,

得到考虑传动系统滞后以后的目标速比  $i_{cvt}^*$

$$i_{cvt}^* = \frac{\omega_{e0}}{\omega_s^*} = \frac{\omega_{e0}}{\omega_s + i_o \alpha \tau}, \quad (12)$$

式中 CVT 输出轴角速度和车轮角加速度分别由车速传感器和加速度传感器测得。以式(12)计算 CVT 目标速比对速比进行控制,可以在系统延迟后使 CVT 达到的实际速比正好使发动机工作在最佳经济性工作线上。

### 3.2 仿真对比分析

以考虑系统滞后效应的 CVT 速比控制算法对车辆加速减速过程进行仿真,并与传统控制方法下的仿真结果进行对比,仿真结果如图 9、10 所示。

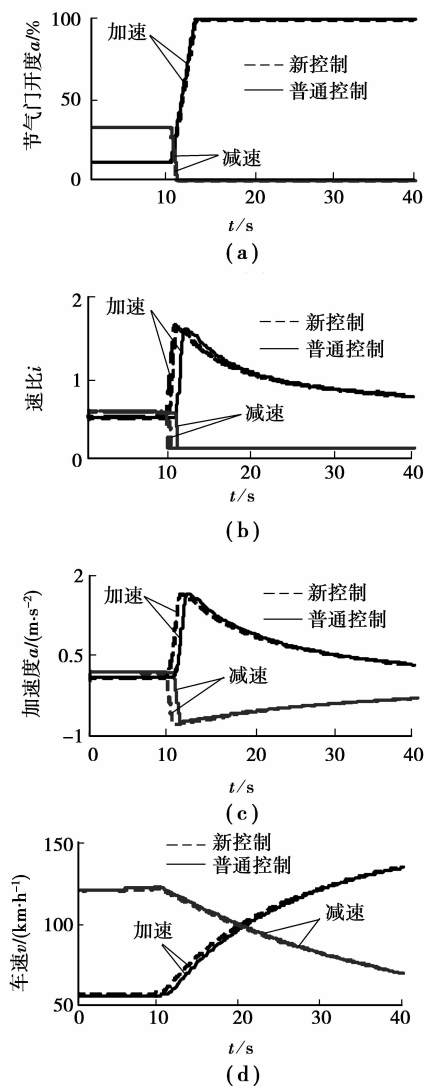


图 9 考虑滞后的控制策略与普通控制策略对比

由图 9 可看出,采用考虑滞后的控制策略后,系统实际速比良好地跟随了目标速比,系统响应滞后对速比控制的影响得到了有效克服。图 10 为采用考虑滞后的控制策略时加速减速过程发动机工作轨迹

图,可以看出采用新的控制策略后发动机工作点偏离最佳经济性曲线的情况得到有效克服。

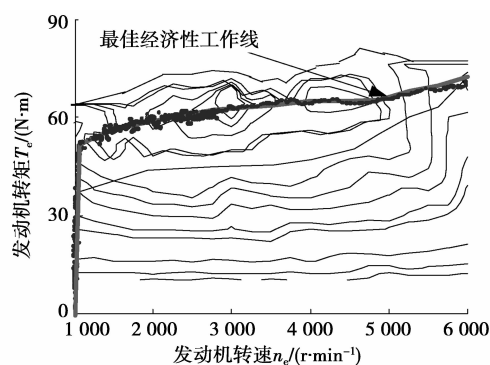


图 10 考虑滞后的控制策略下  
加速减速过程发动机工作轨迹

为验证新控制策略的节油效果,对 10 循环工况分别采用新旧控制策略进行仿真,结果如图 11。

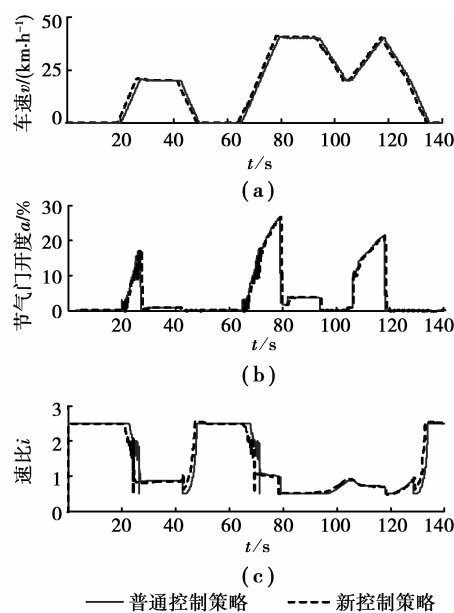


图 11 普通控制策略与考虑滞后的控制策略 10 循环工况仿真

图 12、13 分别为采用传统控制策略与考虑滞后的控制策略时 10 循环工况发动机工作轨迹图。从图上可以看出,采用传统控制策略时发动机工作点在最佳经济性工作线附近波动,经济性较差;采用考虑滞后的控制策略时发动机工作点很好地跟随了最佳经济性工作线,有利于提高系统经济性。

仿真结果显示,采用传统控制策略时 10 循环工况等效百公里油耗为 5.326 L,采用考虑滞后的控制策略时 10 循环工况等效百公里油耗为 5.174 L,油

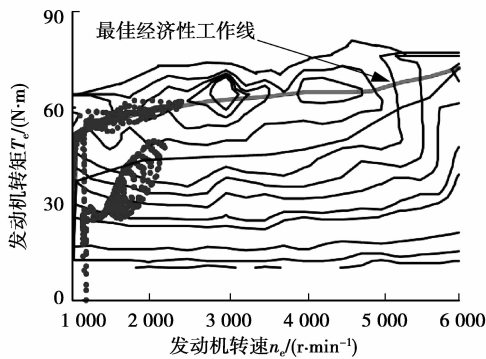


图 12 采用传统控制策略时  
10 循环工况发动机工作轨迹

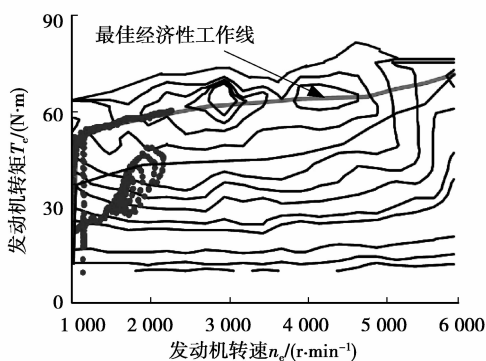


图 13 考虑滞后的控制策略下  
10 循环工况发动机工作轨迹

耗降低 2.85%，达到了较为理想的效果。

## 4 结 论

1) 在对系统响应滞后对 CVT 速比控制的影响进行理论分析的基础上,建立系统模型,对传统控制规律下系统响应滞后对系统性能的影响进行仿真分析,结果显示系统响应滞后使发动机偏离最佳经济性工作线,导致系统经济性降低。

2) 针对系统响应滞后的问题,提出考虑滞后的速比控制策略,并进行仿真分析,结果显示所提出的控制策略能很好地克服系统响应滞后的影响,在加减速过程中都能使发动机有效地跟踪最佳经济性工作线。

3) 为验证新控制策略的省油效果,对传统控制策略与考虑滞后的控制策略在 10 循环工况下的油耗情况进行仿真对比,结果显示考虑滞后的控制策略比传统控制策略油耗降低 2.85%,达到了较为理想的控制效果。

## 参考文献:

- [1] RONDINELL A, BALDISSERA P, DELPRETE C. Design, construction and experimental testing of an high efficiency continuously variable transmission [C] // SAE World Congress and Exhibition, April 16-31, 2009, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International, 2009.
- [2] 罗勇,孙冬野,胡丰宾,等. 无级变速汽车最佳动力性优化控制策略[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(3): 1-6. LUO YONG, SUN DONG-YE, HU FENG-BIN, et al. Optimal control strategy of CVT equipped vehicle for maximum power performance[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(3): 1-6.
- [3] YANG X H, CHENG N S, LI Z H. Electro-mechanical control devices for continuously variable transmission of vehicle [C] // 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, June 23-25, 2008, Shanghai, China. [S. l.]: SAE International, 2008.
- [4] SAITO T, MIYAMOTO K. Prediction of CVT Transmission efficiency by metal v-belt and pulley behavior with feedback control [C] // SAE 2010 World Congress and Exhibition, April 13-15, 2010, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International, 2010.
- [5] HWAN Y J. A Continuously variable transmission controlled by an electric motor [C] // Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting, June 15-17, 2009, Florence, ITALY. [S. l.]: SAE International, 2009.
- [6] 何仁,夏晶晶,张涌,等. 基于滞后特性的无级变速器速比控制策略 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(12): 1403-1407. HE REN, XIA JING-JING, ZHANG YONG, et al. Ratio control strategy of CVT on lagging characteristics [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(12): 1403-1407.
- [7] 薛殿伦,陈伟生,冯显武. 金属带式无级变速器速比匹配与控制研究 [J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 116-121. XUE DIAN-LUN, CHEN WEI-SHENG, FENG XIAN-WU. Study of speed ratio match and control of melt belt CVT [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 116-121.
- [8] YANG S P, LIU J G, ZHAO Y H, et al. Dynamic modeling and optimal design of the speed ratio control valve in CVT [C] // CAR' 10 Proceedings of the 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, March 6-7, 2010, Wuhan, China. [S. l.]: IEEE Press Piscataway, 2010.

- [10] KUO J H, SU H W. Approaches to parametric element constructions and dynamic analyses of spur/helical gears including modifications and undercutting [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2010, 46(12): 1106-1113.
- [11] 秦大同, 邢子坤, 王建宏. 基于动力学和可靠性的风力发电齿轮传动系统参数优化设计[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(7): 24-31.
- QIN DA-TONG, XING ZI-KUN, WANG JIAN-HONG. Optimization design of system parameters of the gear transmission of wind turbine based on dynamics and reliability [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(7): 24-31.
- [12] 朱才朝, 徐向阳, 王海霞, 等. 大功率船用齿轮箱结构优化[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(11): 1221-1225.
- ZHU CAI-CHAO, XU XIANG-YANG, WANG HAI-XIA, et al. Structural optimization of high-power marine gearbox[J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(11): 1221-1225.
- [13] WANG Y. Optimized tooth profile based on identified gear dynamic model [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2007, 42(8): 1058-1068.
- [14] DION J L, MOYNE S L, CHEVALLIER G, et al. Gear impacts and idle gear noise: experimental study and non-linear dynamic model[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(8): 2608-2628.
- [15] 蒋春明, 阮米庆. 基于 MATLAB 的斜齿轮传动多目标优化设计[J]. *传动技术*, 2006, 20(4): 7-9.
- JIANG CHUN-MING, RUAN MI-QING. Multi-objective optimal design of the helical gear transmission[J]. *Drive System Technique*, 2006, 20(4): 7-9.
- [16] 张庆伟, 张博, 王建宏, 等. 风力发电机齿轮传动系统的动态优化设计[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(3): 30-35.
- ZHANG QING-WEI, ZHANG BO, WANG JIAN-HONG, et al. Dynamic optimization design of gear transmission system for wind turbine. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(3): 30-35.

(编辑 张 苹)

(上接第 13 页)

- [9] 胡建军. 汽车无级变速传动系统建模、仿真及其匹配控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- HU JIAN-JUN. Study on modeling, simulation, matching and control strategy of vehicle with metal v-belt type continuously variable transmission system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.
- [10] 罗勇, 孙冬野, 秦大同, 等. 考虑 CVT 效率的无级变速车辆最佳经济性控制[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(4): 80-86.
- LUO YONG, SUN DONG-YE, QIN DA-TONG, et al. Fuel optimal control of CVT equipped vehicle with consideration of CVT efficiency [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(4): 80-86.
- [11] UNNO T, SAKAUE M, ISHIOKA K, et al. Development of electronically controlled CVT focusing on rider's intention of acceleration and deceleration [C] // *SAE Technical Paper*, October 30-November 1, 2007, Toki Messe, Niigata, Japan. [S. l.]: SAE International, 2007.
- [12] BONSEN B, STEINBUCH M, VEENHUIZEN P A. CVT ratio control strategy optimization [C/OL] // *Vehicle Power and Propulsion*, 2005 IEEE Conference, Chicago, September 7-9. [2005-12-12]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10416/33078/01554561.pdf>.
- [13] ERIC N, FRANCIS S, TORN D, et al. Innovative self optimizing clamping force strategy for the pushbelt CVT[C] // *SAE World Congress and Exhibition*, April 20-23, 2009, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International, 2009.
- [14] TOGAI K, KOSO M. Dynamic scheduling control for engine and gearshifts: consolidation of fuel-economy optimization and reserve power[J]. *Mitsubishi Motors Technical Review*, 2006(18): 24-31.
- [15] LEE H, KIM H. Improvement in fuel economy for a parallel hybrid electric vehicle by continuously variable transmission ratio control[J]. *Automobile Engineering*, 2005, 219(1): 43-51.
- [16] CARBONE G, MANGIALARDI L, BONSEN B, et al. CVT dynamics: theory and experiments[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2007, 42(4): 409-428.

(编辑 张 苹)