

文章编号:1000-582X(2011)07-028-06

回流式无级变速传动系统效率优化匹配策略

尹燕莉, 孙冬野, 林歆悠, 郝允志

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:针对回流式无级变速传动系统效率变化幅度大,传统无级变速系统匹配控制策略无法确保整个系统处于理想状态,提出了基于系统效率优化的匹配控制策略。建立了发动机、变速器效率数值模型和整车优化模型,利用 Matlab/Simulink 仿真平台,对优化模型进行求解,得到了发动机目标节气门开度控制表和变速器目标速比控制表,对设计样车的燃油经济性进行了欧洲市区与城郊行驶循环(ECE+EUDC)工况仿真验算,结果表明:基于系统效率优化的匹配控制策略可提高整车燃油经济性1.5%左右。

关键词:汽车;回流式无级变速传动系统;传动效率;燃油经济性

中图分类号:U462.3

文献标志码:A

Efficiency optimization matching strategy of continuously variable transmission system with reflux power

YIN Yan-li, SUN Dong-ye, LIN Xin-you, HAO Yun-zhi

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

Abstract: To solve the problem that the transmission efficiency of continuously variable transmission system with reflux power varies in a great range, and the traditional control strategy can't make sure that the overall system is under ideal conditions, an economy control method based on system efficiency optimization is put forward. The engine/transmission efficiency numerical model and system optimization model are built. Taking Matlab/Simulink as the platform, objective throttle position control table and objective ratio control table are obtained by solving the optimization model. Furthermore, ECE+EUDC drive cycle simulation based on the fuel economy of sample car is carried out, and the simulation results indicate that the method of system efficiency optimization make fuel consumption reduce by more than 1.5%.

Key words: vehicles; continuously variable transmission system with reflux power; transmission efficiency; fuel economy

与传统的金属带无级变速传动系统 CVT (Continuously Variable Transmission)相比,回流式无级变速传动系统具有速比变化范围宽,承载能力大,传动效率高等特点,可以获得纯 CVT 所不能达

到的最佳经济性、最佳排放性等优化控制目标。

目前,国内外针对回流式无级变速传动系统经济性控制策略,主要采用传统 CVT 最佳经济性控制方法^[1-4],即通过调节变速器的目标速比,使发动机

收稿日期:2011-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075410);重庆市科技攻关计划项目(2010AC6049)

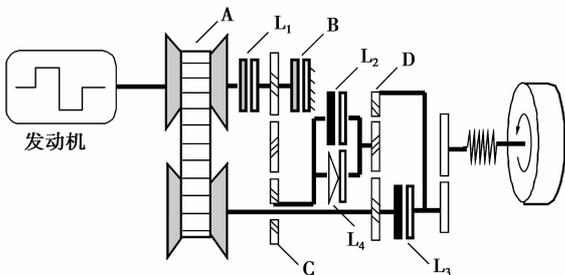
作者简介:尹燕莉(1980-),女,重庆大学博士研究生,主要从事汽车动力传动与控制研究。

孙冬野(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)dysun@cqu.edu.cn。

工作在高效率区域上,但仅仅考虑发动机效率是不能保证整车燃油消耗量最低,油耗量还与变速器效率有关。文献[5]指出无级变速传动系统的效率在 70%~90%之间,而回流式无级变速传动系统的工作模式不仅包括了纯无级变速传动系统工况(高速挡),也有回流式无级变速传动工况(低速挡),高速挡时变速器的效率在 70%~90%之间,低速挡时由于定速比齿轮副和行星排参与工作,传动系统效率的上限可以达到 90%以上,因此,回流式无级变速传动系统效率不能只作为一恒定值来考虑,其对整车经济性的影响是不能忽视的。笔者将综合考虑发动机效率和变速器效率,在确保整车系统效率最优的前提下,对回流式无级变速传动系统进行经济性匹配研究。

1 系统效率对整车燃油消耗量的影响

回流式无级变速传动系统主要是由金属带无级变速装置、定速比齿轮副、行星排传动装置、3 个湿式离合器、1 个单向离合器和 1 个制动器组成(见图 1)。



A. 金属带无级变速装置; B. 制动器; C. 定速比齿轮副; D. 行星排传动装置; L₁、L₂、L₃ 为湿式离合器; L₄ 为单向离合器

图 1 回流式无级变速传动系统结构简图

回流式无级变速传动系统经济性控制策略是使发动机每个时刻都工作在最高效率区^[6],即 b_e 最小,而未考虑发动机功率,不能保证整车燃油消耗量最小。因此,要使整车油耗最小,就需保证 $b_e P_e$ 最小^[7-8],即

$$\min b_e P_e, \quad (1)$$

$$\text{其中, } P_e = P_d / \eta_g, \quad (2)$$

$$b_e = 3.6 \times 10^6 / (\eta_e R), \quad (3)$$

式中: P_e 为发动机功率, kW; b_e 为燃油消耗率, g/(kW·h); P_d 为需求功率, kW; η_e 为发动机热效率; η_g 为回流式无级变速传动系统效率; $R = 4.6 \times 10^4$ kJ/kg。

由公式(1)-(3)可以得到 $\min b_e P_e = \min 3.6 \times 10^6 P_d / (\eta_e \eta_g R)$,那么,在一定的需求功率下,为达到整车油耗量最小,就需要 $\eta_e \eta_g$ 最大,即 $\max \eta_e \eta_g$ ($\eta_e \eta_g$ 称为系统效率)。

由于变速器效率变化幅度大,其对整车燃油消耗量的影响是不可忽略的,因此整车经济性控制的目标要综合考虑发动机效率和变速器效率^[9-10],使系统效率达到最大。

2 传动系统效率模型

2.1 整车性能参数

本文研究对象是装备回流式无级变速传动系统的羚羊轿车,其主要性能参数如表 1 所示。

表 1 整车性能参数

名称	数值
整车整备质量/kg	1 180
轮胎半径/m	0.274
发动机型号	JL472Q1
额定功率(6 000 r/min)/kW	49±2.45
最大扭矩(4 500~5 000 r/min)/(N·m)	82±4.1
主减速器速比	4.99
变速器最小传动比	0.498
变速器最大传动比	3.56
行星排结构参数	2.517 2
定速比齿轮传动速比	2.470 4

2.2 发动机效率模型

通过发动机试验,利用 3 次样条插值拟合,得到发动机有效燃油消耗率与发动机转速和转矩的关系曲线,然后,利用发动机效率计算公式得到发动机效率数值模型(如图 2)。

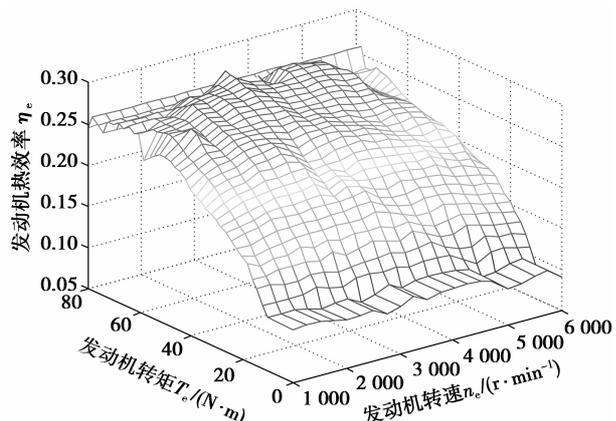


图 2 发动机热效率模型

2.3 变速传动系统效率模型

2.3.1 低速挡效率模型

图3是回流式无级变速传动系统低速挡工作模式情况,根据功率流传递关系和行星传动扭矩特性方程^[11],得到回流式无级变速传动系统效率为

$$\eta_g = \frac{(1+\alpha)i_{cvt} - i_f}{(1+\alpha)i_{cvt} - i_f \eta} \quad (4)$$

式中: i_{cvt} 为金属带的速比; i_f 为定速比齿轮传动速比; α 为行星排结构参数; η_{cvt} 为金属带传动效率。

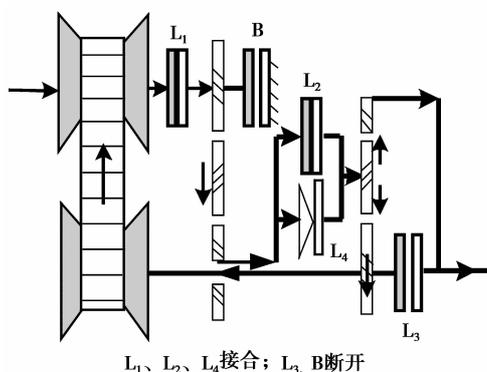


图3 低速挡工作模式

2.3.2 高速挡效率模型

图4是回流式无级变速传动系统高速挡工作模式情况,高速挡与纯无级变速传动工作情况一样,因此,传动系统效率与纯无级变速器效率相同,即

$$\eta_g = \eta_{cvt} \quad (5)$$

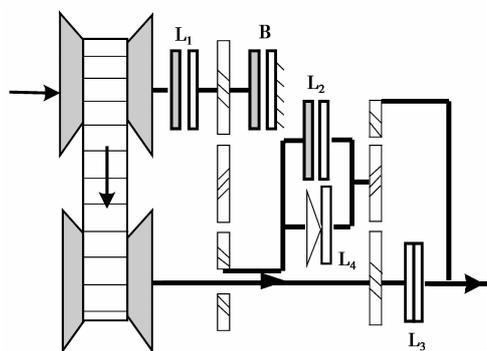


图4 高速挡(纯无级变速)模式

2.3.3 传动系统效率模型

金属带无级变速传动系统效率主要与速比、输入转矩有关,通过试验可以建立无级变速装置效率数值模型。回流式无级变速传动系统效率,在无级变速装置效率数值模型的基础上,通过公式(4)、(5)计算得到传动系统效率模型,如图5。

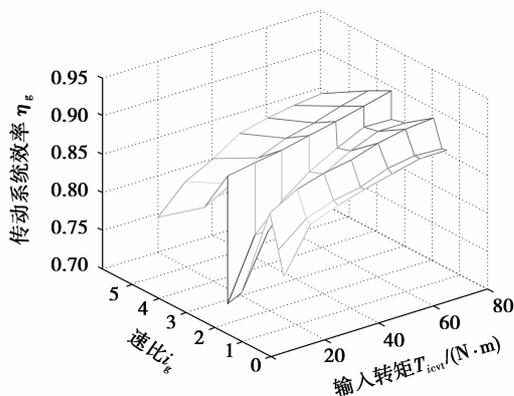


图5 传动系统效率模型

3 传动系统效率优化

3.1 目标函数的建立

设定需求功率 P_d 和车速 v 作为车辆运行状况参数。那么,在一定的 P_d 和 v 下,并根据前面分析的结果可以得到目标函数^[12]

$$\max \eta_e \eta_g \quad (6)$$

约束条件:

$$\left. \begin{aligned} T_t &\geq T_f, \\ 0 < T_e &\leq T_{e,max}, \\ n_{e,min} &\leq n_e \leq n_{e,max}, \\ i_{g,min} &\leq i_g \leq i_{g,max} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: T_t 为整车驱动扭矩, $N \cdot m$; T_f 为整车阻力扭矩, $N \cdot m$; T_e 为发动机扭矩, $N \cdot m$; n_e 为发动机转速, r/min ; i_g 为变速器速比。

3.2 优化计算过程

由于回流式无级变速传动系统在速比0.498~3.560之间存在2种工作模式:低速挡时的纯无级变速模式和高速挡时的回流式无级变速模式。这2种工作模式计算系统效率的过程是不同的,因此将分别进行计算。

3.2.1 纯无级变速模式系统效率计算

1)在一定 P_d 、 v 下, i_g 在0.498 0~2.470 4以0.001步长变化。

2)由公式 $T_{ocvt} = \frac{3600P_d r}{vi_0}$,得到无级变速装置输出转矩。

3)根据 T_{ocvt} 和 i_{cvt} ,查无级变速装置效率图6,得到无级变速装置效率 η_{cvt} ,即变速器的效率 $\eta_g = \eta_{cvt}$ 。

4)由公式 $T_e = T_{icvt} = \frac{T_{ocvt}}{i_{cvt} \eta_{cvt}}$, $n_e = \frac{vi_0 i_{cvt}}{0.377r}$ 得到发动机转矩和转速 T_e 、 n_e 。

5)根据 T_e 、 n_e 查发动机热效率图得到 η_e 。

6) 根据公式 $\eta_s = \eta_e \eta_g$, 得到系统效率。

3.2.2 回流式无级变速模式系统效率计算

1) 在一定 P_d, v 下, i_g 在 2.470 4~3.560 0 以 0.001 步长变化。

2) 由公式 $T_o = \frac{3\ 600P_d r}{v i_o}$, 得到变速器输出转矩; 由公式 $T_{ocvt} = \frac{3\ 600P_d r}{\alpha v i_o}$, 得到无级变速装置输出转矩, 由公式 $i_{cvt} = \frac{1}{1 + \alpha - \frac{\alpha}{i_g}}$, 得到无级变速装置

速比。

3) 根据 T_{ocvt} 和 i_{cvt} , 查无级变速传动装置效率图 6 得到 η_{cvt} 。

4) 由公式 $\eta_g = \frac{(1 + \alpha)i_{cvt} - i_f}{(1 + \alpha)i_{cvt} - i_f \eta_{cvt}}$ 得到变速器效率。

5) 根据公式 $T_e = \frac{T_o}{i_g \eta_g}$ 和 $n_e = \frac{v i_o i_g}{0.377 r}$ 得到发动机转矩和转速 T_e, n_e 。

6) 根据 T_e 和 n_e , 查发动机热效率图得到 η_e 。

7) 根据公式 $\eta_s = \eta_e \eta_g$ 得到系统效率。

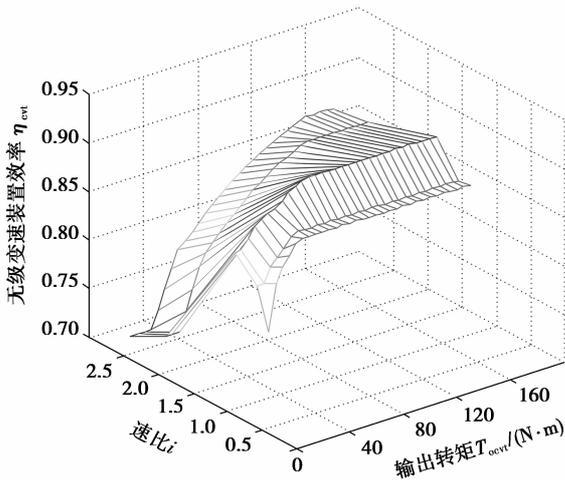


图 6 无级变速传动装置效率图

3.2.3 目标速比和节气门计算

结合 2 种不同模式下的计算过程, 得到在整个速比范围内, 对于不同的速比, 需求功率 P_d 和车速 v 所对应的系统效率 η_s , 从中找出系统效率最大时^[13], 所对应的目标速比 i_{gm} 和节气门开度 α_m , i_{gm} 和 α_m 将作为指定需求功率和车速下的目标速比和发动机目标节气门开度。具体计算过程如图 7 所示。

3.3 优化计算结果

图 8 是将优化后的系统效率与优化前系统效率

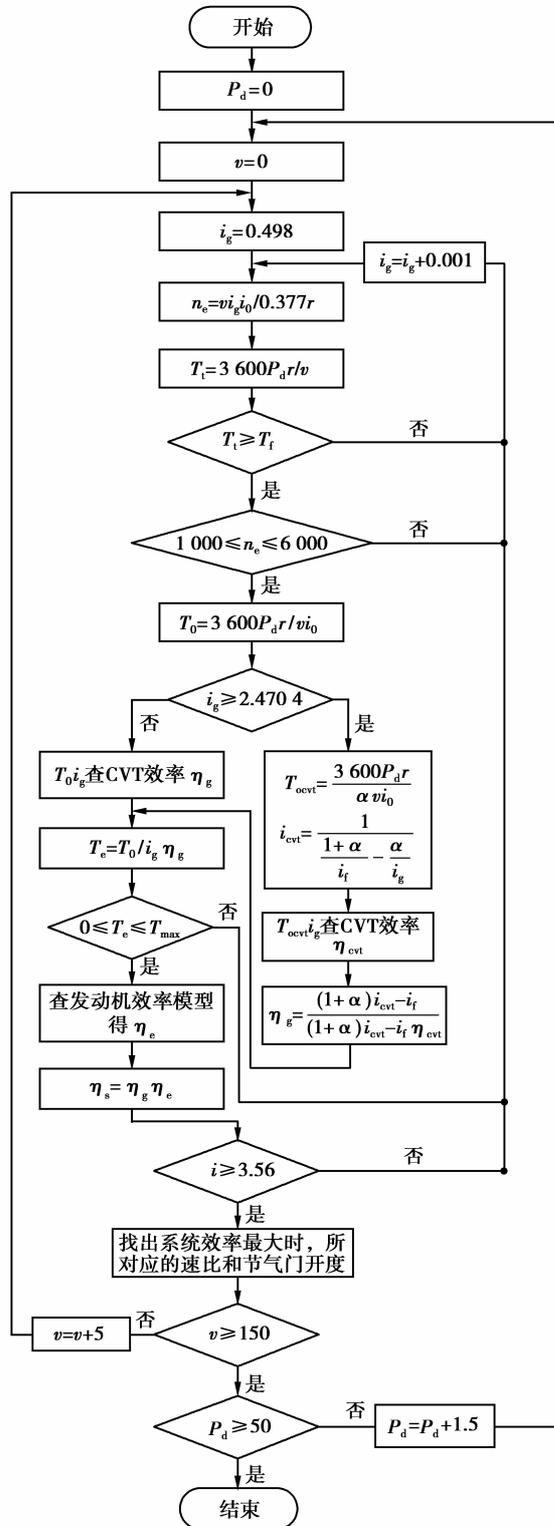


图 7 系统效率优化计算流程图

进行差值的结果, 可以看到优化后的系统效率较优化前的系统效率有所提高。

图 9 是系统效率优化后最佳经济性目标速比图, 其将作为目标速比表存储在仿真控制系统中。根据汽车的行驶情况, 通过控制无级变速器传动比, 就可以控制发动机的工作点。

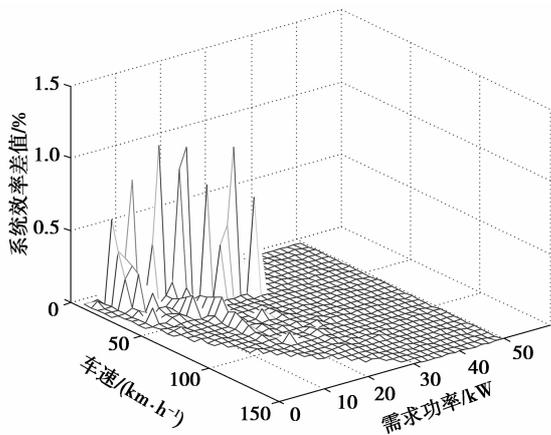


图 8 优化前后系统效率差值

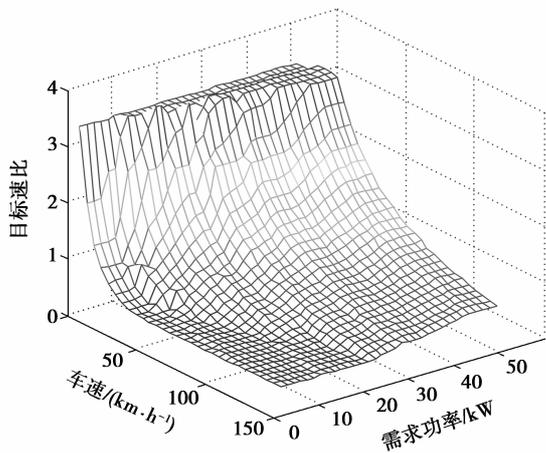


图 9 优化后目标速比图

图 10 是系统效率优化后目标节气门开度图, 其将作为目标节气门表存储在仿真控制系统中, 以控制发动机的节气门开度。

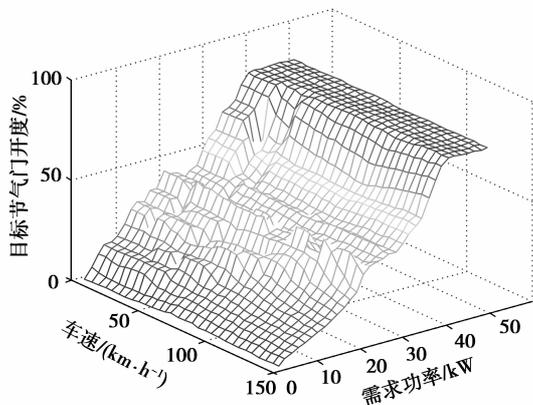


图 10 优化后目标节气门开度

4 系统建模与仿真分析

4.1 传动系统数学模型

回流式无级变速传动系统简化模型^[14]如图 11 所示。由图可得传动系统数学模型为

$$T_e - T_{in} = I_e \frac{d\omega_e}{dt}, \quad (8)$$

$$T_{out} = T_{in} i_0 i_g \eta_g, \quad (9)$$

$$T_{out} - \sum T_f = I_d \frac{d\omega_d}{dt}, \quad (10)$$

$$\omega_e = i_g i_0 \omega_d, \quad (11)$$

式中: T_e 为发动机扭矩, $N \cdot m$; T_{in} 为传动系统输入转矩, $N \cdot m$; T_{out} 为传动系统输出转矩, $N \cdot m$; I_e 为发动机与传动系统输入轴转动惯量, $kg \cdot m^2$; T_f 为整车阻力扭矩, $N \cdot m$; ω_e 为发动机输出轴角速度, rad/s ; i_g 为传动系统速比; i_0 为主减速器速比; ω_d 为车轮角加速度, rad/s ; I_d 为车体与传动系统输出轴转动惯量, $kg \cdot m^2$; η_g 为传动系统效率。

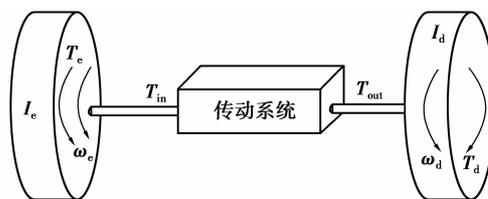
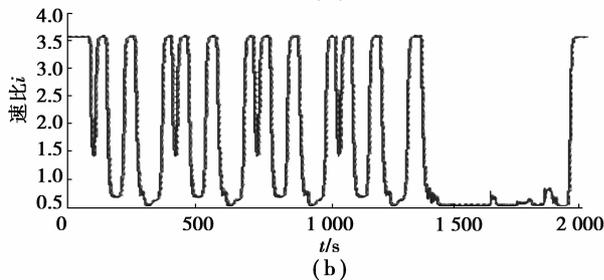
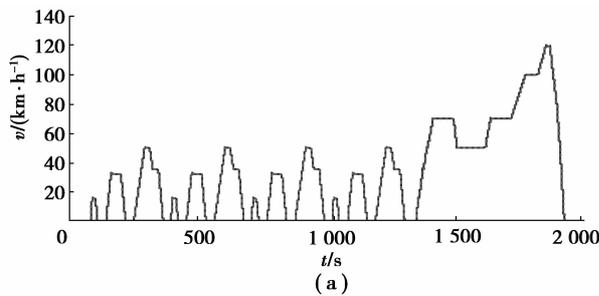


图 11 回流式无级变速传动系统模型

4.2 循环工况仿真分析

笔者选取了欧洲市区与城郊行驶循环(ECE+EUDC)工况, 对整车经济性进行了仿真和分析^[15-17]。

图 12 为循环仿真计算结果, 从图中可以看出优化前后实际车速、速比、瞬时燃油消耗量差值(优化前减优化后)和系统效率差值(优化后减优化前)情况。可以看出, 优化后的燃油消耗量低于优化前的燃油消耗量, 系统效率高于优化前。



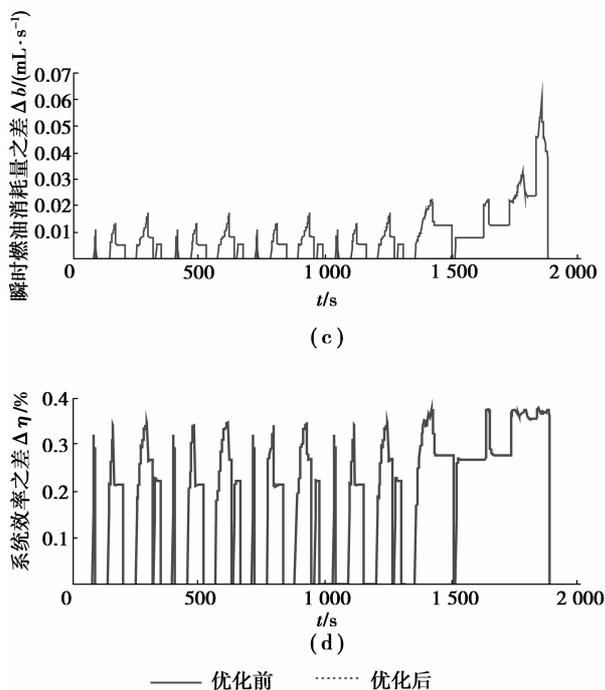


图 12 仿真结果

同时,通过循环工况仿真,得到优化前等效百公里油耗 5.958 L/100 km,优化后等效百公里油耗 5.869 L/100 km,优化后节油达到 1.5%,说明回流式无级变速系统效率优化方法对整车节油起到一定的作用,此方法是可行的。

5 结 论

1) 根据回流式无级变速传动系统效率计算方法,建立了传动系统的效率模型。

2) 提出了一种可以通过发动机节气门开度和传动系统速比调节,使整车系统效率达到最大的方法。

3) 对所设计的回流式无级变速传动汽车进行了ECE+EUDC循环工况仿真,结果表明:采用优化后控制策略的整车百公里燃油消耗量比优化前降低了1.5%,验证了方法的可行性。

参考文献:

[1] 钱立军,徐飞. 装备无级变速器的整车前向模型建立与仿真[J]. 农业机械学报. 2009,40(7):10-14.
QIAN LI-JUN, XU FEI. Forward modeling and simulation on vehicle equipped with CVT [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009,40(7):10-14.

[2] HOHN B, PFLAUM H, TOMIC D. Fuel consumption and energy balance of "Optimized CVT-Hybrid-Driveline" [C] // Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition, October 2006, Toronto, Canada. [S. l.]:SAE International, 2006-01-3259:230-246.

[3] BURTT D. Fuel economy benefits of a high torque infinitely variable transmission for commercial vehicles[C] // SAE 2007 Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition, October 2007, Rosemont, IL, USA. [S. l.]: SAE International, 2007-01-4206:125-137.

[4] 连素芳,孙冬野,秦大同. 回流式无级自动变速传动的结构参数设计[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2006, 29(2): 9-11.
ZE SU-FANG, SUN DONG-YE, QIN DA-TONG. Design on structural parameters of continuously variable transmission with reflux power[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(2): 9-11.

[5] 张伟华,巩云鹏,程乃士,等. 提高汽车金属带式无级变速器效率的途径[J]. 东北大学学报, 2009, 30(8): 1181-1184.
ZHANG WEI-HUA, GONG YUN-PENG, CHENG NAI-SHI, et al. Approach to improving transmission efficiency of MBCVT for automobiles[J]. Journal of Northeastern University, 2009,30(8):1181-1184.

[6] MORTEZA M, MOHANMAD A. Genetic-fuzzy shifting strategy for continuously variable transmission in parallel HEV [C] // Proceeding of the 5th international symposium on mechatronics and its applications, May 27-29, 2008, Amman, Jordan. [S. l.]:IEEE, 2008:1-6.

[7] BOYD S, NELSON D J. Hybrid electric vehicle control strategy based on power loss calculations[C] // SAE World Congress, April 14-17, 2008, Detroit, MI, USA. [S. l.]:SAE International, 2008: 34-41.

[8] SEZER V, UYGAN I M C, HARTAVI A E, et al. Maximizing overall efficiency strategy (MOES) for power split control of a parallel hybrid electric vehicle [C] // SAE Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition, October 7-9, 2008, Chicago, IL, USA. [S. l.]:SAE International, 2008: 132-143.

[9] RYU W, KIM H. CVT ratio control with consideration of CVT system loss [J]. International Journal of Automotive Technology, 2008,9(4):459-465.

[10] 周美兰,王旭东,周永勤. 无级变速汽车动力传动系统控制策略研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(3): 217-220.
ZHOU MEI-LAN, WANG XU-DONG, ZHOU YONG-QIN. A control strategy of dynamical transmission system for CVT car[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009,41(3):217-220.

- YANG LI-BIN, ZHANG HUI, PENG DA-SHU. Study of mechanic behavior for 7050 aluminum alloy under hot-working conditions[J]. Hot Working Technology, 2002, 31(1):1-5.
- [9] VAZ M, DE SANTI JR N, VERRAN G O. Ductile fracture prediction in metal forming processes [J]. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 2008, 1(2/3):232-242.
- [10] KOMORI K. Effect of ductile fracture criteria on chevron crack formation and evolution in drawing[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45(1):141-160.
- [11] LADEMO O G, ENGLER O, KELLER S, et al. Identification and validation of constitutive model and fracture criterion for Al-Mg-Si alloy with application to sheet forming[J]. Materials and Design, 2009, 30(8): 3005-3019.
- [12] DORUM C, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T. Numerical modelling of magnesium die-castings using stochastic fracture parameters[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(14):2232-2248.
- [13] FAN W F, LI J H. An investigation on the damage of AISI-1045 and AISI-1025 steels in fine-blanking with negative clearance [J]. Materials Science and Engineering, 2009, 499(1/2):248-251.
- [14] LIANG X. Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(16): 5163-5181.
- [15] ZHANG X H, RUAN X Y, OSAKADA K. Forgeability of AZ31B magnesium alloy in warm forging [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(3):632-635.

(编辑 王维朗)

(上接第 33 页)

- [11] 杜爱民, 宋俊杰, 娄光. 混合动力汽车用行星齿轮结构参数优化及应用[J]. 同济大学学报, 2010, 38(1): 103-107.
- DU AI-MIN, SONG JUN-JIE, LOU GUANG. Optimization and application of planetary gear set for hybrid electric vehicle[J]. Journal of Tongji University, 2010, 38(1):103-107.
- [12] PARK J, PARK Y. Model based optimization of supervisory control parameters for hybrid electric vehicles[C]//SAE World Congress, April 14-17 2008, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International, 2008: 59-81.
- [13] 何仁, 马承广, 张涌, 等. 基于驾驶意图的无级变速器目标速比确定方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 16-20.
- HE REN, MA CHENG-GUANG, ZHANG YONG, et al. Method to determine target speed ratio of CVT based on driving intention [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):16-20.
- [14] DEUR J, PETRI J, ASGARI J, et al. Recent advances in control-oriented modeling of automotive power train dynamics[C/OL]// International IEEE Symposium on Industrial Electronics, Dubrovnik, Hrvatska, June 20-23, 2006. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01709856>.
- [15] 张兰春, 常思勤. 功率分流式无级变速器的整车经济性研究[J]. 南京理工大学学报, 2008, 32(3): 346-349.
- ZHANG LAN-CHUN, CHANG SI-QIN. Fuel economy of vehicle with power split CVT[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2008, 32(3): 346-349.
- [16] 刘振军, 郝宏伟, 董小洪, 等. 湿式双离合器自动变速器换挡控制与仿真分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(1): 7-14.
- LIU ZHEN-JUN, HAO HONG-WEI, DONG XIAO-HONG, et al. Shifting control and simulation of wet dual clutch transmission [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(1):7-14.
- [17] 舒红, 蒋勇, 高银平. 中度混合动力汽车模型预测控制策略[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(1):36-41.
- SHU HONG, JIANG YONG, GAO YIN-PING. Model predictive control strategy of a medium hybrid electric vehicle [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(1):36-41.

(编辑 张 莘)