

文章编号:1000-582X(2010)03-001-06

# 无级变速汽车最佳动力性优化控制策略

罗 勇,孙冬野,胡丰宾,邓 涛

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

**摘 要:**无级变速器(Continuously Variable Transmission, CVT)效率对汽车驱动功率的大小有直接影响,需要在最佳动力性控制中加以考虑。在分析 CVT 效率对汽车驱动功率影响机理的基础上,以驱动功率最大为优化目标,对各节气门开度和车速下的 CVT 目标速比进行优化计算。建立系统仿真模型,对优化前后的控制效果进行了仿真对比分析,结果表明,优化后系统百公里加速时间减少约 0.63 s。

**关键词:**汽车;无级变速器;效率;动力性

**中图分类号:** TH132

**文献标志码:** A

## Optimal control strategy of CVT equipped vehicle for maximum power performance

LUO Yong, SUN Dong-ye, HU Feng-bin, DENG Tao

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

**Abstract:** Continuously Variable Transmission (CVT) equipped vehicle improves its power performance by ensure the engine works on its peak power point under each throttle angle. This method didn't pay any attention to the CVT efficiency, which also has influences on power performance of the system. Based on the analysis of how CVT efficiency influences power performance of the system, an optimal algorithm is proposed to calculate the target CVT ratio to achieve maximum power performance with consideration of CVT efficiency. A simulation model is established to validate the optimal algorithm. Simulation results indicate that the acceleration time from 0 km to 100 km of the system veduced by 0.63 s.

**Key words:** vehicles; continuously variable transmission; efficiency; power performance

无级变速器(Continuously Variable Transmission, CVT)具有连续可变的速比,可使发动机按预先确定的理想工作线运行。国内外对 CVT 系统的研究多集中在改进其经济性上,有的通过综合控制发动机与 CVT 提高经济性<sup>[1]</sup>,有的通过将 CVT 引入混合动力系统以提高其性能<sup>[2]</sup>,有的针对速比波动提出离散化的速比控制<sup>[3]</sup>,但对提高 CVT 车辆动力性的研究不多。有研究显示, CVT 车辆动力性不足是

导致其接受程度不高的重要原因<sup>[4]</sup>,如何提高 CVT 车辆的动力性是目前急需解决的问题。

传统的无级变速汽车最佳动力性速比控制规律的制定原则是在每一节气门开度下都使发动机在其功率最大的转速下工作<sup>[5]</sup>,实际上,车辆驱动功率是发动机功率与 CVT 效率的乘积, CVT 效率随其工作状况在 70%~95%间变化<sup>[6]</sup>,发动机功率最大并不能保证汽车驱动功率就一定最大。因此,有必要

收稿日期:2009-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475066)

作者简介:罗勇(1983-),男,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。

进一步在考虑 CVT 效率的情况下对如何获取系统最佳动力性速比控制规律进行研究。

笔者以装备 JL472Q1 发动机与金属带式无级变速器的 SC7101 羚羊轿车为设计对象,对考虑 CVT 效率的最佳动力性控制规律进行研究。

## 1 CVT 效率对车辆驱动功率的影响

无级变速汽车最佳动力性控制的目标是在任意节气门开度和车速下汽车都能获得可能的最大驱动功率,在不考虑主减速器效率的情况下驱动功率为

$$P_d = P_e \eta_{\text{CVT}}, \quad (1)$$

式中: $P_d$  为汽车驱动功率; $P_e$  为发动机发出功率; $\eta_{\text{CVT}}$  为 CVT 效率。

由式(1)可以看出,汽车所获得的驱动功率等于发动机发出功率与无级变速器效率的乘积,无级变速器效率随其工作状态的变化在 70%~95% 之间变化,所以,发动机发出功率最大并不能保证汽车所获得的驱动功率最大。传统的最佳动力性速比控制规律忽视了 CVT 效率对驱动功率的影响,并不能保证在所有情况下系统驱动功率最大。要实现最佳动力性控制,需要考虑 CVT 效率对驱动功率的影响,以驱动功率最大为目标函数,对各节气门开度和车速下的目标速比进行计算。

## 2 发动机转矩输出模型与 CVT 效率模型

以装备无级变速器的羚羊轿车为对象,对考虑 CVT 效率时的最佳动力性速比控制规律进行优化计算。对象系统的主要性能参数为:整车整备质量  $m=1\ 180\ \text{kg}$ ,车轮半径  $r=0.274\ \text{m}$ ,发动机型号为 JL472Q1,发动机最大输出功率为 45 kW,发动机最大输出转矩为 80 N·m,CVT 速比  $i$  的变化范围为 0.5~2.5,主减速比  $i_0=5.993\ 4$ 。

要对系统进行优化,首先需要建立发动机转矩和 CVT 效率的数值模型。

### 2.1 发动机转矩输出数值模型

研究表明,发动机转矩是发动机节气门开度和发动机转速的函数<sup>[7]</sup>,即  $T_e = f(\alpha, n_e)$ 。由于发动机工作过程复杂,难以精确建模,通常是经过试验测得若干节气门开度和转速下的发动机转矩,通过插值建立发动机转矩输出数值模型<sup>[8]</sup>。JL472Q1 发动机的数值模型如图 1 所示。

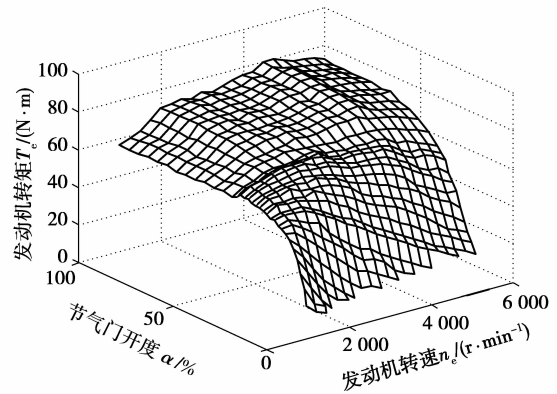


图 1 发动机转矩输出模型

### 2.2 CVT 效率数值模型

研究发现金属带无级变速器效率主要是其速比和输入转矩的函数<sup>[9-12]</sup>,即  $\eta_{\text{CVT}} = f(i, T_e)$ 。通过试验获得 CVT 效率与其速比和输入转矩的关系,建立起 CVT 效率的数值模型,如图 2 所示。

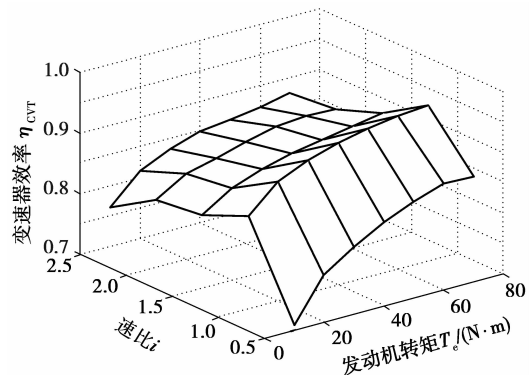


图 2 CVT 效率模型

## 3 考虑 CVT 效率的最佳动力性速比控制规律

在考虑 CVT 效率的情况下求取巡航工况最佳动力性速比控制规律的问题可以归结为一个优化问题,该优化问题可定义为:在某一节气门开度  $\alpha$  和车速  $v$  下,求使驱动功率  $P_d$  最大的 CVT 速比  $i$ 。将该速比作为目标速比对 CVT 进行控制,就可以使系统在任意节气门开度和车速下都获得最大可能的驱动功率。

优化的目标函数为: $\max P_d$ 。

约束条件为

$$\left. \begin{aligned} T_e &\leq T_{\text{emax}}(n_e), \\ n_{\text{emin}} &\leq n_e \leq n_{\text{emax}}, \\ i_{\text{cvtmin}} &\leq i \leq i_{\text{cvtmax}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $T_{\text{emax}}$  为某一转速下发动机能发出的最大扭矩;  $n_{\text{emin}}$ 、 $n_{\text{emax}}$  分别为发动机最大和最小转速;  $i_{\text{cvtmax}}$ 、 $i_{\text{cvtmin}}$  分别为 CVT 最大和最小速比。

### 3.1 优化算法

优化计算过程如图 3 所示,其总体思路为:节气门开度变化范围为 0~100%,将其以  $\Delta\alpha$  为步长等分,对象车辆车速范围为 0~150 km/h,将其以  $\Delta v$  为步长等分;在每一节气门开度和车速下, CVT 速比在其范围 0.5~2.5 内以  $\Delta i$  为步长变化,计算出每一速比下车辆实际获得的驱动功率  $P_d$ ;取  $P_d$  最大处的 CVT 速比作为指定节气门开度和车速下的目标速比,存储在数表中。

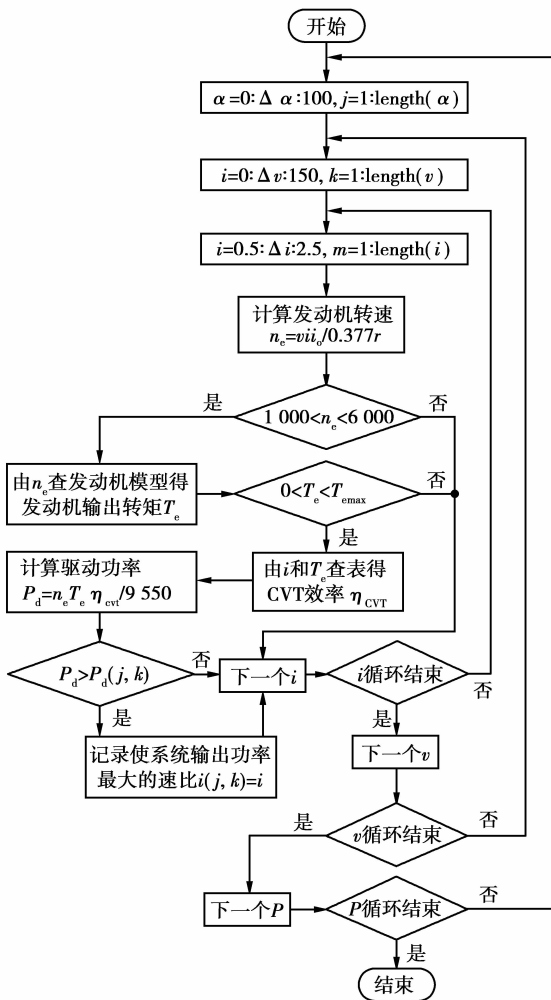


图 3 优化计算过程图示

在某一节气门开度  $\alpha$  和车速  $v$  下,当 CVT 速比为  $i$  时,计算车辆驱动功率  $P_d$  的具体步骤为:

1) 根据车速和速比计算发动机转速,并判断发动机转速范围是否满足约束条件,满足则继续下一

步的计算,否则计算下一个速比。根据车速和速比计算发动机转速的公式为

$$n_e = \frac{vi}{0.377r} \quad (3)$$

2) 根据节气门开度和发动机转速查发动机输出转矩模型,得到发动机输出转矩  $T_e$ ,并判断发动机输出转矩是否满足约束条件,满足则继续下一步的计算,否则计算下一个速比。

3) 根据发动机输出转矩  $T_e$  和速比  $i$  查 CVT 效率模型得到 CVT 效率  $\eta_{\text{CVT}}$ 。

4) 根据发动机输出转矩  $T_e$ 、发动机转速  $n_e$  和 CVT 效率  $\eta_{\text{CVT}}$  计算车辆获得的驱动功率  $P_d$ ,计算公式为

$$P_d = \frac{n_e T_e \eta_{\text{CVT}}}{9550} \quad (4)$$

根据以上步骤计算出所有速比下的驱动功率  $P_d$ ,取  $P_d$  最大处的 CVT 速比作为指定节气门开度和车速下的目标速比。

### 3.2 优化计算结果

取  $\Delta\alpha=2$ ,  $\Delta v=3$ ,  $\Delta i=0.001$  进行优化计算,得到考虑 CVT 效率后的最佳动力性目标速比图,如图 4 所示。在实际控制中,根据车辆实际节气门开度和车速,由图 4 确定 CVT 目标速比,进而对 CVT 速比实施控制,可以保证车辆在任意工况下系统均能获得最大可能的驱动力,实现最佳动力性控制的目标。

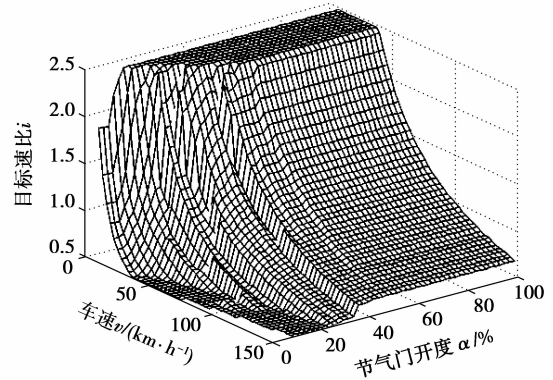
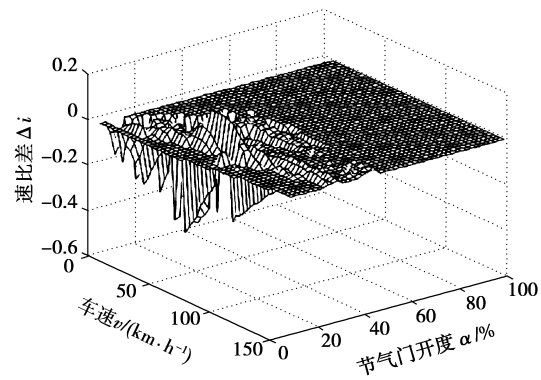
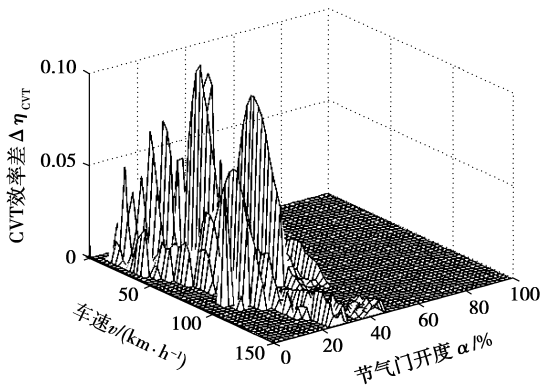


图 4 考虑 CVT 效率后最佳动力性目标速比图

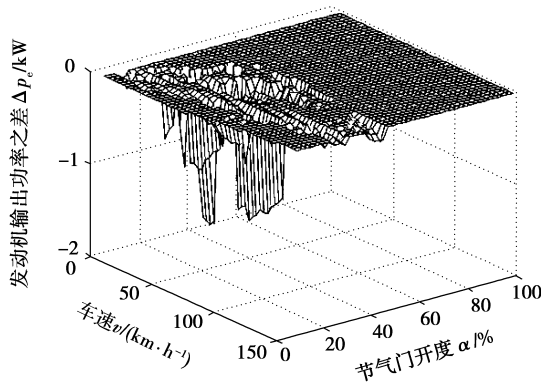
如果以发动机输出功率最大作为目标函数,则得到传统的最佳动力性控制规律,为进一步分析优化后的控制规律与传统控制规律的差别,对两者进行了对比,如图 5 所示。



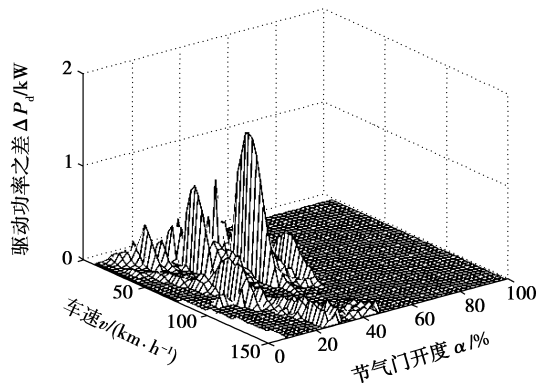
(a) 优化前后速比之差



(b) 优化前后CVT效率之差



(c) 优化前后发动机输出功率之差



(d) 优化前后驱动功率之差

图5 优化后的控制规律与传统控制规律对比

图5(a)是优化后目标速比与传统方法得出的目标速比之差,结合图5(a)与图4可以看出在车速较小( $i>1$ )的地方,优化后速比有所减小,在车速较大( $i<1$ )的地方,优化后速比有所增加,也就是说优化后的速比向 $i=1$ 靠近,而 $i=1$ 是CVT效率最高的速比,由此可以推测优化后CVT效率有所提高;图5(b)是优化后的工作点对应的CVT效率与传统控制规律对应的CVT效率之差,从图中可以看出优化后CVT效率普遍有所增加,与前面的推测相吻合;图5(c)是优化后发动机发出功率与传统控制规律发动机发出功率之差,可以看出优化后发动机发出功率普遍有所降低;图5(d)是优化后车辆获得的驱动功率与传统控制规律车辆获得的驱动功率之差,虽然优化后发动机发出的功率有所降低,但CVT效率增加更明显,使得优化后系统获得的驱动功率反而高于优化前,从而使动力性有所提高。对比结果与理论分析基本一致,从而证明笔者所提出的优化算法是正确有效的,也说明了按照所提出的控制方法确实可以增加车辆的驱动功率,提高动力性。

由图5可以看出,只有在节气门开度小于50%时,优化前后的控制规律才有差别,在节气门开度大于50%的地方优化前后的控制规律差别不明显。对象车辆的有效节气门开度通常在50%左右,所以,优化后的控制规律仍具有较强的实用价值。

#### 4 系统建模与仿真

为进一步验证考虑CVT效率的最佳动力性控制对改善动力性的效果,建立了系统仿真模型并对优化后的控制规律与传统控制规律进行对比分析。

##### 4.1 无级变速传动系统模型

无级变速传动系统简化模型如图6所示,模型中包括了CVT效率模型。

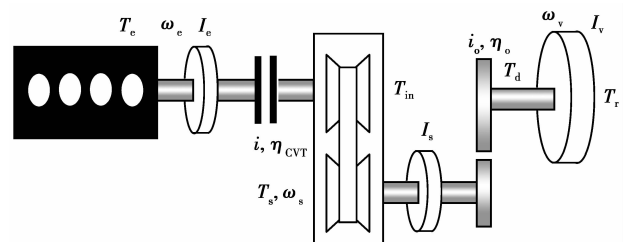


图6 无级变速传动系统模型

根据图中关系可以列出系统动力学方程<sup>[13-15]</sup>

$$T_e - T_{in} = I_e \frac{d\omega_e}{dt}, \quad (5)$$

$$T_s = T_{in} i \eta_{CVT}, \quad (6)$$

$$T_s - \frac{T_d}{i_o \eta_o} = I_s \frac{d\omega_s}{dt}, \quad (7)$$

$$T_d - T_r = I_v \frac{d\omega_v}{dt}, \quad (8)$$

$$\omega_e = i \omega_s, \quad (9)$$

$$\omega_s = i_o \omega_v. \quad (10)$$

式中:  $\omega_e$  为发动机输出轴角速度;  $I_e$  为发动机与 CVT 输入轴等效转动惯量;  $T_{in}$  为 CVT 输入轴转矩;  $T_s$  为 CVT 输出轴转矩;  $I_s$  为 CVT 输出轴转动惯量;  $T_d$  为驱动转矩;  $\omega_s$  为 CVT 输出轴角速度;  $\eta_o$  为主减速器效率;  $T_r$  为汽车阻力矩;  $\omega_v$  为车轮角加速度;  $I_v$  为车体转动惯量。

#### 4.2 仿真结果与分析

对传统的最佳动力性控制规律和考虑 CVT 效率的最佳动力性控制规律进行仿真对比分析, 仿真采用定步长方式进行, 结果如图 7-9 所示。

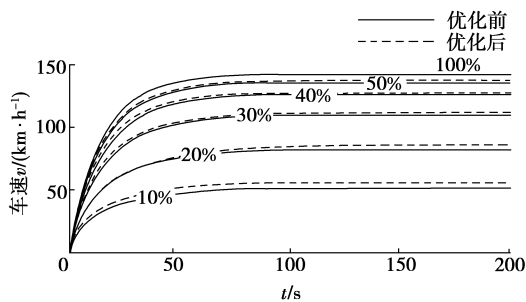


图 7 定节气门开度仿真结果

从图 7 可以看出, 当节气门开度在 10%~50% 时, 各节气门开度下的最高车速都有所增加, 车辆动力性提高, 而在节气门开度大于 50% 时, 车辆最高车速几乎不变, 这与前面的优化计算结果相吻合。图中还可以看出, 在小节气门开度下车速增加更明显, 这是由于小节气门开度下车速较小, 车辆阻力也小, 驱动功率的增加可以使车辆获得更大的加速度。笔者所采用的发动机其节气门开度的有效区间为 0~50%, 当节气门开度大于 50% 时, 发动机输出转矩增量非常小, 所以小节气门开度下动力性增加更明显, 有利于改善驾驶者对车辆动力性的主观评价。

图 8 是节气门渐开过程的仿真结果, 节气门开度变化过程如图 8(a), 8(b) 则显示了车速随时间的变化过程。

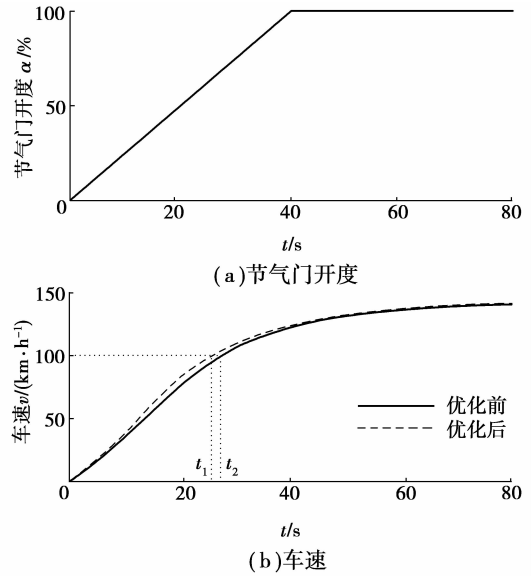


图 8 节气门渐开仿真结果

由图 8 可以看出, 优化后的最佳动力性控制规律在加速阶段车辆加速更快, 车速到达 100 km/h 的时间比传统的控制方法提高 0.63 s。

图 9 是一个简单的巡航工况仿真, 节气门开度变化如图 9(a) 所示, 车速的变化过程如图 9(b)。从图 9 可以看出, 按照优化后的控制规律控制车辆加速更快, 车速更高, 动力性有所提高。

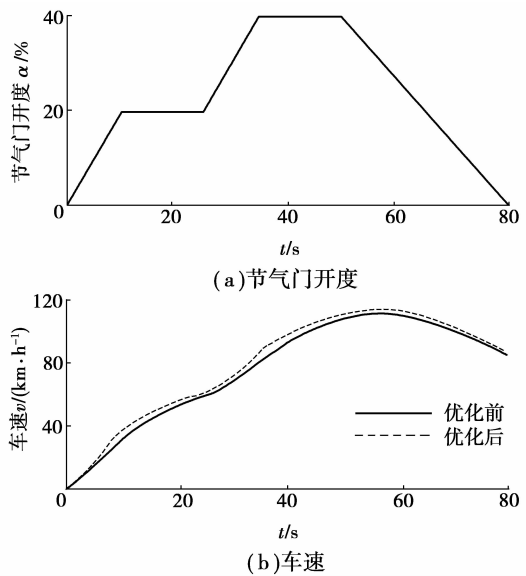


图 9 巡航工况仿真

优化后的控制规律仅通过改进算法就能提高系统的动力性, 而没有增加硬件成本, 这在竞争日趋激烈的汽车市场是很有现实意义的。

## 5 结 语

1) 针对传统最佳动力性控制规律的不足, 分析了 CVT 效率对系统动力性的影响, 以输出功率最大为目标函数, 求取了考虑 CVT 效率的无级变速汽车最佳动力性控制规律。

2) 优化及仿真结果表明, 与传统的最佳动力性控制相比, 优化后发动机发出功率有所降低, 但 CVT 效率提高更为明显, 车辆获得的驱动功率高于优化前, 优化后系统百公里加速时间减少约 0.63 s。今后可通过台架或装车试验对本文研究结果进行进一步验证。

### 参考文献:

- [1] MONTAZERI-GH M, ASADI M. 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.
- [2] THEO H, MAARTEN S, ROELL V, et al. Design of CVT-based hybrid passenger cars[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2): 572-587.
- [3] 孙冬野, 秦大同, 刘振军. 汽车无级变速传动系统离散化的速比控制策略[J]. 江苏大学学报, 2009, 30(4): 352-356.  
SUN DONG-YE, QIN DA-TONG, LIU ZHEN-JUN. Discrete ratio control strategy on automobile with continuously variable transmission system[J]. Journal of Jiangsu University, 2009, 30(4): 352-356.
- [4] DIPAK P. CVT cyber bulletin board study[C]//SAE World Congress and Exhibition, April 3-6 2006, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International, 2006: 60-72.
- [5] TANIQUCHI T, TSUKAMOTO K, HABUCHI R, et al. Toyota's new belt-drive continuously variable transaxle for 1.3-liter FWD cars [C] // SAE World Congress and Exhibition, April 3-6, 2006, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International, 2006: 287-290.
- [6] 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, CHEN NAI-SHI, et al. Approach to improving transmission efficiency of MBCVT for automobiles[J]. Journal of Northeastern University, 2009, 30(8): 1181-1184.
- [7] 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.
- [8] 卢廷辉. 双状态无级变速器综合控制策略研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
- [9] SONG J C, WANG C Z. Modeling and simulation of hydraulic control system for vehicle continuously variable transmission [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 7(12): 799-803.
- [10] AKEHURST S, VAUGHAN N D, PARKER D A, et al. Modeling of loss mechanisms in a pushing metal V-belt continuously variable transmission, part 1: torque losses due to band friction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2004, 218(D11): 1269-1281.
- [11] AKEHURST S, VAUGHAN N D, PARKER D A, et al. Modeling of loss mechanisms in a pushing metal V-belt continuously variable transmission, part 2: pulley deflection losses and total torque loss validation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2004, 218(11): 1283-1293.
- [12] PATEL D, ELY J, OVERSON M. CVT drive research study [J]. SAE International Special Publications, 2005, 1979: 131-138.
- [13] 孙冬野, 庄建兵, 秦大同. 回流式无级自动变速传动系统倒挡控制[J]. 汽车工程, 2009, 31(1): 52-55.  
SUN DONG-YE, ZHUANG JIAN-BING, QIN DA-TONG. Reversing control in continuously variable transmission system with reflux power[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(1): 52-55.
- [14] 孙冬野, 秦大同, 汪新国. 无级变速传动系统速比变化率的设计方法[J]. 汽车工程, 2006, 28(10): 910-913.  
SUN DONG-YE, QIN DA-TONG, WANG XING-GUO. Design method of ratio changing rate of continuously variable transmission system[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(10): 910-913.
- [15] DEUR J, PETRI J, ASGARI J, et al. Recent advances in control-oriented modeling of automotive power train dynamics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(5): 513-523.

(编辑 张 革)