

湿式双离合器自动变速器起步控制*

程秀生 冯巍 陆中华 王印东

(吉林大学汽车工程学院, 长春 130025)

【摘要】 针对装有湿式双离合器自动变速器的起步控制问题,根据起步控制评价指标,制订起步控制策略,提出了基于模糊PID控制离合器压力的控制方法,实现了离合器压力的精确控制,给出起步控制流程。通过3种不同油门开度的起步试验和短时间连续起步停车试验,验证该控制策略。试验结果表明,该控制策略能够适应不同工况的起步要求,离合器油温得到良好控制。

关键词: 双离合器自动变速器 湿式离合器 起步控制 模糊PID控制

中图分类号: U463.212; TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)01-0018-05

Starting Control Based on Wet Dual Clutch Transmission

Cheng Xiusheng Feng Wei Lu Zhonghua Wang Yinshu

(College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

Aimed at the problem of starting control of dual clutch transmission equipped with wet clutch, the starting strategy was developed on the basis of clutch control evaluation and dynamics analysis about transmission. The clutch pressure control method was proposed based on fuzzy PID control, and the detailed fuzzy control process was developed. The control flow of DCT starting was determined so that the clutch actual pressure got better control. Starting experiments of three different throttle and continuous start-stop experiments in a short time were executed. The experimental results verified the rationality of the control strategies. It could meet the requirements of smooth and rapid vehicle starting, and establish the foundation for the further development of DCT.

Key words Dual clutch transmission, Wet clutch, Starting control, Fuzzy PID control

引言

双离合器自动变速器(dual clutch transmission, 简称DCT)的核心和难点是车辆起步过程中的离合器控制^[1],其控制目标既要保证车辆起步过程的平顺性,防止冲击度过大,保证发动机稳定运转,又要保证起步过程的快捷性。离合器接合速度过快,引起发动机转速产生较大波动,造成发动机颤振、熄火,破坏起步的平顺性;离合器接合速度过慢,滑摩功将迅速增加,降低离合器使用寿命,不能满足起步的快捷性。本文改进起步控制策略,应用模糊PID

算法控制离合器实际压力,通过离合器压力传感器形成闭环控制,以协调起步过程的平顺性和快捷性,通过实车试验进行验证。

1 起步过程的评价指标

车辆起步的离合器控制是根据路况和驾驶者意图,合理控制离合器的接合过程,使车辆按驾驶者意图起步。离合器控制应满足:①避免发动机熄火。②避免产生使乘员感到不舒适的抖动、冲击。③避免传动系统中产生过大的动载荷。④有利于延长离合器的使用寿命。⑤充分体现驾驶者的意图。

收稿日期: 2009-04-15 修回日期: 2009-07-06

* 国家“863”高新技术研究发展计划资助项目(2006AA110109)

作者简介: 程秀生,教授,博士生导师,主要从事汽车自动变速理论与控制研究,E-mail: xiushengcheng@yahoo.com.cn

起步过程理论上的评价指标主要有冲击度

$$j = \frac{d^2 v}{dt^2} \approx \frac{1}{\delta m} \frac{i_i i_0 \eta_i}{r_d} \frac{dT_c}{dt} \quad (1)$$

滑摩功

$$L = \int_{t_0}^{t_1} T_c (\omega_e - \omega_c) dt \quad (2)$$

式中 v ——车速

ω_e ——离合器从动片转速

δ ——汽车旋转质量换算系数

m ——整车质量 i_0 ——主减速比

i_i ——起步挡位速比

η_i ——变速器传动效率

r_d ——车轮滚动半径 ω_e ——发动机转速

T_c ——离合器摩擦力矩

t_0 ——起步开始时间

t_1 ——起步结束时间

由式(1)可得冲击度 j 与离合器摩擦力矩的变化率 dT_c/dt 相关,而 dT_c/dt 与离合器接合压力直接相关,即控制冲击度必须控制离合器压力变化率;由式(2)可得滑摩功 L 与离合器主从动盘转差、离合器摩擦力矩和滑摩时间相关。在湿式离合器中,离合器油温与滑摩功密切相关,滑摩功越大,油温越高,因此本文用离合器油温来体现滑摩功。

2 起步控制策略

以往研究多以发动机恒转速控制来达到平稳起步的目的,实际上这种控制策略存在缺陷,尤其在中等以上油门开度起步时会造成滑摩功过大,离合器油温迅速升高等严重问题。

从实际应用角度出发,本文采用以发动机转速、离合器从动盘转速、油门开度、制动踏板信号和离合器油温为参考输入的控制参数,以离合器压力为输出,以离合器压力传感器信号为反馈的闭环控制。其中发动机转速要实时监控,以防止起步接合过程中发动机转速过低,造成发动机熄火或抖动;油门开度和制动踏板信号是驾驶者起步意图的最重要体现;而离合器主从动盘转差、油门开度、发动机转速和离合器油温是确定离合器接合压力的参数。

起步过程的评价指标有冲击度 j ,滑摩功 L ,起步时间 t 。其中 j 对应起步平顺性; L 主要与 t 和离合器传递扭矩有关, t 越长, L 越大,因此 L/t 对应起步快捷性;起步平顺性和快捷性都与离合器压力变化率 ΔP 相关^[2],因此起步控制的关键是根据不同的油门开度和离合器主从动盘转速差 Δn 选择不同的 ΔP 。起步过程的另一个关键问题是离合器油温控制,起步过程要求平稳舒适,必须要通过离合器滑

摩来实现,然而离合器滑摩时间相对传递扭矩过长,会造成离合器油温快速升高,导致湿式离合器的扭矩传递特性急剧下降^[3-4],甚至烧毁摩擦片,起步舒适性无法保证。因此起步过程的平稳舒适性要求与离合器油温控制是两个相互矛盾的指标,在选择 ΔP 时要保证两者平衡。在不导致离合器油温过高的情况下,应选择较小的 ΔP ,以保证起步舒适性;若离合器油温过高,为使传递扭矩不至于下降,应增加 ΔP 。

ΔP 的理论计算:离合器在滑摩情况下,传递的扭矩为

$$T_c = \frac{2}{3} \mu S Z P \frac{R_0^3 - R_1^3}{R_0^2 - R_1^2} \quad (3)$$

式中 S ——单片摩擦片的有效摩擦面积

P ——离合器压力

Z ——离合器摩擦副数

R_0 ——摩擦片外径 R_1 ——摩擦片内径

μ ——离合器摩擦片的静态摩擦因数

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{2}{3} \mu S Z \frac{R_0^3 - R_1^3}{R_0^2 - R_1^2} \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

目标压力更新周期为 T_1 ,因此

$$\frac{dP}{dt} \approx \frac{\Delta P}{T_1} \quad (5)$$

由式(1)、(3)、(4)、(5)得

$$j = \frac{1}{\delta m} \left(\frac{2}{3} \mu S Z \frac{i_i i_0 \eta_i R_0^3 - R_1^3}{r_d R_0^2 - R_1^2} \frac{\Delta P}{T_1} \right) \quad (6)$$

冲击度 j 根据不同离合器主从动片转速差和油门开度确定,由式(6)计算出 ΔP 的初值,通过实际试验进行不断修正,得到油温 T 在 $60 \sim 100^\circ\text{C}$ 时的离合器压力增量,如图1所示。

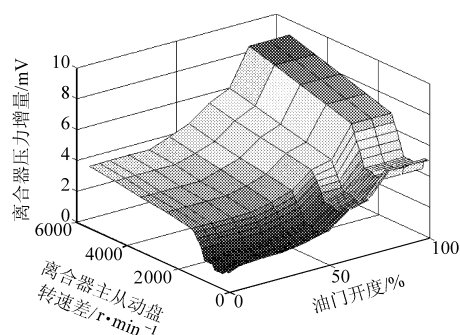


图1 离合器压力增量图

Fig. 1 Clutch pressure increment graph

理论计算的前提是假设 μ 不变,实际上 μ 是不断变化的量,与离合器主从盘转速差、离合器压力、离合器油温相关。其中油温变化对 μ 影响较大,因此进行近似的线性修正

$$\Delta P = \begin{cases} \Delta P_n & (60^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}) \\ \Delta P_n - K_{11} T & (T \leq 60^\circ\text{C}) \\ \Delta P_n + K_{h1} T & (T \geq 100^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (7)$$

式中 ΔP_n ——油温 T 在 $60 \sim 100^\circ\text{C}$ 时的离合器压力增量

K_{ll} ——低温修正系数

K_{hl} ——高温修正系数

除压力变化率 ΔP 外,起步过程的离合器压力控制还涉及到另一个重要参数,即不同油门开度和发动机转速的离合器压力极值 $P_{\max}$,根据发动机部分负荷特性,计算离合器要完全传递这个扭矩所需要的压力值即为 $P_{\max}$ 。如果控制过程中离合器压力值超过 $P_{\max}$,会造成发动机转速迅速下降,甚至导致发动机熄火,起步舒适性下降。 $P_{\max}$ 与油门开度和发动机转速的关系如图 2 所示(油温为 $60 \sim 100^\circ\text{C}$)。 $P_{\max}$ 除与油门开度和发动机转速有关外,还与离合器油温密切相关,当离合器油温升高时,离合器传递扭矩能力下降,因此 $P_{\max}$ 要随离合器油温的升高而增加, $P_{\max}$ 随离合器油温 T 的变化关系为

$$P_{\max} = \begin{cases} P_{n\max} & (60^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}) \\ P_{n\max} - K_l T & (T \leq 60^\circ\text{C}) \\ P_{n\max} + K_h T & (T \geq 100^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $P_{n\max}$ ——油温 T 在 $60 \sim 100^\circ\text{C}$ 时的离合器压力极值

K_l ——低温修正系数

K_h ——高温修正系数

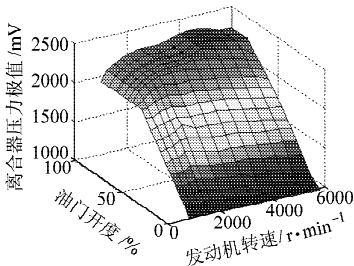


图 2 离合器压力极值图

Fig.2 Clutch pressure extremum graph

离合器压力值是指离合器压力传感器的输出电压值,单位 mV。

根据以上控制策略,可以得到离合器的目标压力值。本文采用模糊 PID 控制方法,根据实际压力值与目标压力的差值及其变化率调整 PID 的控制参数 K_p 、 K_i 、 K_d 实现 PID 控制参数的自动修正,完成目标压力实时随动控制^[5]。程序控制流程如图 3 所示,参数自调整 PID 控制流程图如图 4 所示, K_p 模糊规则表如表 1 所示, K_i 模糊规则表如表 2 所示, K_d 模糊规则表如表 3 所示,误差及其变化率的隶属函数如图 5 所示, K_p 、 K_i 、 K_d 的隶属函数如图 6 所示,本文的非模糊化方法采用 MIN-MAX-重心法。

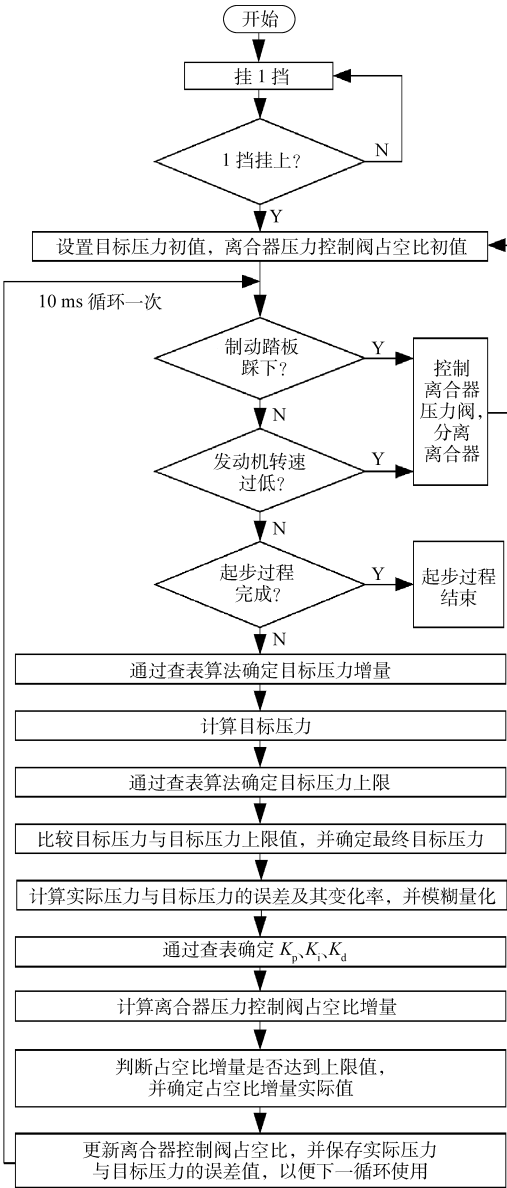


图 3 控制程序流程图

Fig.3 Process control flow diagram

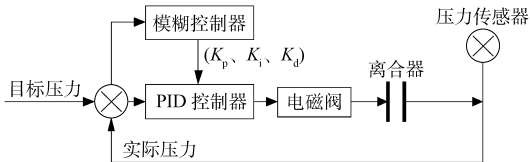


图 4 参数自调整 PID 控制示意图

Fig.4 Parameters adaptive adjustment of PID controller

表 1 K_p 模糊规则

Tab.1 K_p fuzzy rule

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PM	PS	PS	PM	PM
NM	PB	PM	PM	PS	PS	PM	PM
NS	PB	PM	PM	PS	PS	PM	PB
ZO	PB	PM	PS	ZO	PS	PM	PB
PS	PB	PM	PS	PS	PM	PM	PB
PM	PM	PM	PS	PS	PM	PM	PB
PB	PM	PM	PS	PS	PM	PM	PB

表 2 K_i 模糊规则
Tab.2 K_i fuzzy rule

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PM	ZO	ZO	ZO	ZO
NM	PM	PM	PS	ZO	ZO	ZO	ZO
NS	PS	PS	PS	ZO	ZO	ZO	ZO
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PS	PS
PM	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PM
PB	ZO	ZO	ZO	ZO	PM	PM	PB

表 3 K_d 模糊规则
Tab.3 K_d fuzzy rule

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PM	PM	PB	PB	PM	PM
NM	PS	PM	PM	PB	PB	PM	PM
NS	PS	PM	PM	PB	PB	PM	PS
ZO	PS	PM	PB	ZO	PB	PM	PS
PS	PS	PM	PB	PB	PM	PM	PS
PM	PM	PM	PB	PB	PM	PM	PS
PB	PM	PM	PB	PB	PM	PM	PS

3 实车试验

3.1 试验的硬件系统

试验车的控制器采用 INFINEON 的 XC164CS 16 位微处理器为主控芯片,模拟信号采用无源 RC 滤波电路进行信号滤波,脉冲信号采用光电隔离芯片进行隔离处理,采集的数据通过 CAN 通讯接口上传至计算机,以进行试验结果分析,硬件结构示意图如图 7 所示。

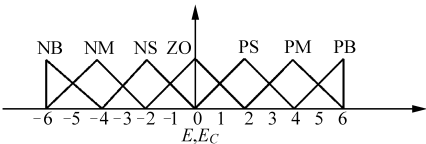


图 5 误差及其变化率的隶属函数
Fig.5 Error and rate error membership function

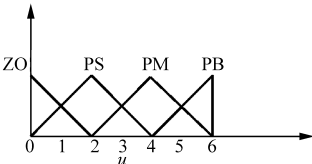


图 6 K_p, K_d, K_i 的隶属函数
Fig.6 K_p, K_d, K_i membership function

3.2 试验结果分析

图 8 ~ 11 是试验车在平坦沥青路面的起步试验曲线。图 8 是小油门开度起步过程,油门开度 2.4 s 后稳定在 10%,起步过程实际油压较好的跟随目标油压,发动机转速波动小,实现平稳起步,起步时间 3.5 s。图 9 是中油门开度起步过程,油门开度 1.5 s 后稳定在 23%,发动机转速和车速增加均匀,发动机转速保持在 1 500 ~ 2 700 r/min,发动机转速在 2 200 r/min 时完成起步过程,中油门开度起步过程中,起步平顺性和快捷性两个控制指标得到良好平衡,起步时间 3.2 s。图 10 是大油门开度起步过程,油门开度在 1 s 后稳定在 38%,起步时间 2.9 s。对比图 9 和图 10,大油门开度起步时,3.7 s 车速 30 km/h,中油门开度起步时,3.7 s 车速 21 km/h,因此大油门开度起步过程能够满足驾驶者对车速的要求。图 11 是对起步过程中油温的监测曲线,7 min 内进行不同油门开度的 18 次起步停车试验,离合器油温没有超过 100℃,证明起步过程离合器的滑摩控制合理有效,离合器没有产生较大滑摩功导致油

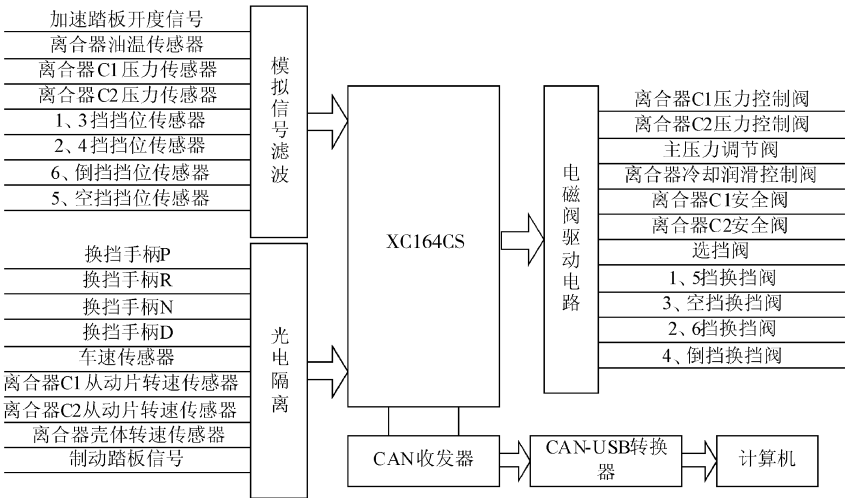


图 7 硬件结构示意图
Fig.7 Hardware structure chart

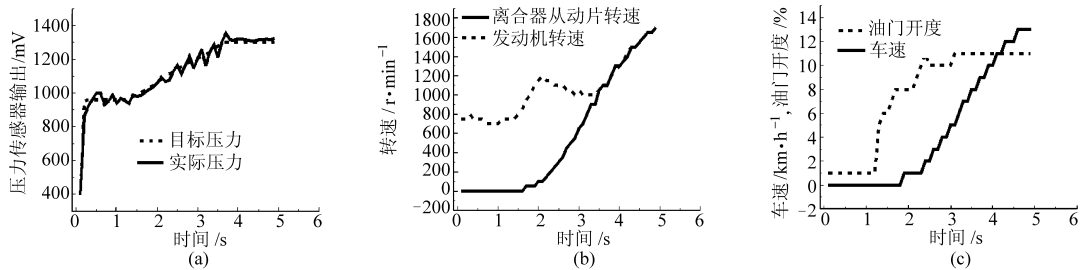


图 8 小油门起步过程
Fig. 8 Small throttle start process
(a) 离合器压力 (b) 转速 (c) 车速、油门开度

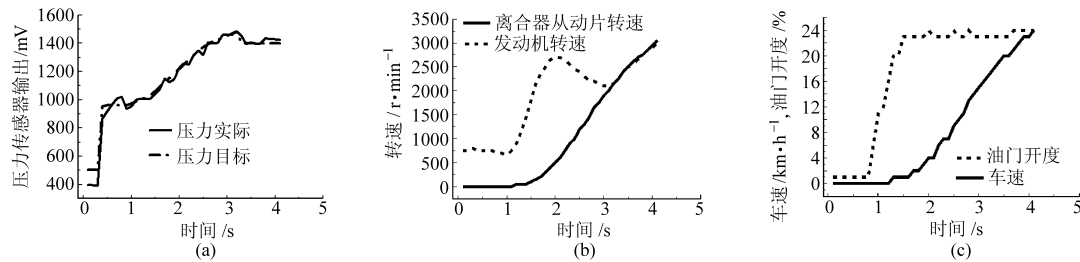


图 9 中油门起步过程
Fig. 9 Middle throttle start process
(a) 离合器压力 (b) 转速 (c) 车速、油门开度

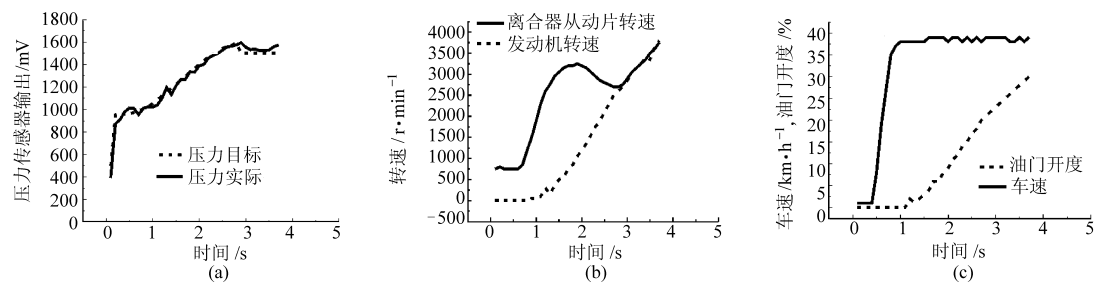


图 10 大油门起步过程
Fig. 10 Big throttle start process
(a) 离合器压力 (b) 转速 (c) 车速、油门开度

温过高,起步控制过程良好。

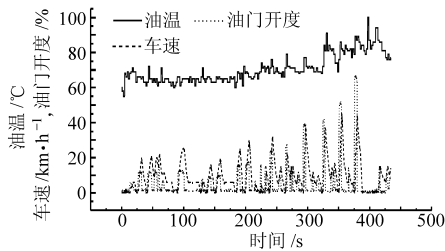


图 11 离合器油温变化过程
Fig. 11 Clutch oil temperature change chart

4 结束语

湿式离合器起步控制是一个复杂的非线性控制问题,试验结果表明,本文论述的湿式双离合自动变速器起步控制策略能够适应各种起步工况,起步控制效果良好。应用基于模糊逻辑的参数自调整 PID 控制方法,使离合器压力控制具有较强的自适应性,能够满足汽车起步过程的平顺性和快捷性要求,为解决湿式双离合自动变速器的起步控制问题提供了一种有效方法。

参 考 文 献

1 吴光强,杨伟斌,秦大同. 双离合式自动变速器控制系统的关键技术[J]. 机械工程学报,2007,43(2):13~19.
Wu Guangqiang, Yang Weibin, Qin Datong. Key technique of dual clutch transmission control system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(2):13~19. (in Chinese)

5 结束语

针对重型商用车辆装用的多挡位变速器,设计了具有可移植性的的气自动集成换挡执行机构。通过分析换挡评价指标的影响因素,明确换挡气缸设

计的优化目标,影响参数指标,并基于所建立的热力学模型,运用正交平衡优化方法,在 Simulink 仿真环境下完成了仿真优化试验。最终通过实车测试试验对所设计的气自动选换挡执行机构进行了匹配验证。试验证明该套执行机构工作可靠、稳定。

参 考 文 献

1 席军强,丁华荣,陈慧岩. ASCS 与 AMT 的历史、现状及其在中国的发展趋势[J]. 汽车工程,2002,24(2):89~93.
Xi Junqiang, Ding Huarong, Chen Huiyan. The history and present status of ASCS and AMT and their development trend in China[J]. Automotive Engineering, 2002, 24(2): 89~93. (in Chinese)

2 何忠波,白鸿柏. AMT 技术的发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2007,38(5):181~186.
He Zhongbo, Bai Hongbai. Automatic mechanical transmission technique development actuality and expectation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5):181~186. (in Chinese)

3 刘振军,秦大同,胡建军. 重型车辆自动变速技术及发展趋势[J]. 重庆大学学报,2003,26(10):10~14.
Liu Zhenjun, Qin Datong, Hu Jianjun. Developing direction of the heavy-duty vehicles' automated transmission[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(10): 10~14. (in Chinese)

4 赵彤. 气动技术的发展及在新领域中的应用[J]. 液压气动与密封,2004(2):1~5.
Zhao Tong. The development of pneumatics and its applications in the new area[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2004(2):1~5. (in Chinese)

5 李小宁. 气动技术发展的趋势[J]. 机械制造与自动化,2003(2):5~7.
Li Xiaoning. The development for pneumatic drive[J]. Machine Building & Automation,2003(2):5~7. (in Chinese)

6 Wang Yang, Xi Junqiang, Chen Huiyan. A study of automatic mechanical transmission based on a twelve-speed gearbox[C]//The International Conference on Mechanical Transmission(ICMT'2006) Agents. Chongqing: Science Press, 2006;506~510.

7 王祖温,王海涛,包钢,等. 供气压力波动自适应缓冲高速气缸的研究[J]. 机械工程学报,2003,39(7):51~55.
Wang Zuwen, Wang Haitao, Bao Gang, et al. Study on high-speed pneumatic cylinder with cushion self-adapting to supply pressure fluctuation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2003,39(7):51~55. (in Chinese)

8 李建藩. 气压传动系统动力学[M]. 广州:华南理工大学出版社,1991.

9 王阳,席军强,刘富庆,等. 重型车辆整车一体化自动变速技术[J]. 农业机械学报,2009,40(1):15~19.
Wang Yang, Xi Junqiang, Liu Fuqing, et al. Auto-shift technology through integrated-control method based on heavy truck[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1):15~19. (in Chinese)

(上接第 22 页)

2 牛铭奎,程秀生,葛安林,等. AMT 离合器接合过程中的压力控制[J]. 吉林大学学报:工学版,2004,34(2):198~201.
Niu Mingkui, Cheng Xiusheng, Ge Anlin, et al. Pressure control of AMT clutch during engaging[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2004,34(2):198~201. (in Chinese)

3 Mikael Holgerson. Optimizing the smoothness and temperatures of a wet clutch engagement through control of the normal force and drive torque[J]. Journal of Tribology,2000,122(1):119~123.

4 Cameron T M, McCombs T, Devlin M, et al. ATF friction properties and shift quality[C]. SAE Paper 2004-01-3027, 2004.

5 朱伟兴,陈垠昶. 模糊 PID 控制在汽车 ABS 中的应用与仿真研究[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2004,25(4):310~314.
Zhu Weixing,Chen Yinchang. Application and simulation of automotive ABS using fuzzy PID control[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2004,25(4):310~314. (in Chinese)

6 杨启耀,周孔亢,张文娜,等. 半主动空气悬架 Fuzzy-PID 控制[J]. 农业机械学报,2008,39(9):24~29.
Yang Qiyao,Zhou Kongkang,Zhang Wenna, et al. Fuzzy-PID control on semi-active air suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(9):24~29. (in Chinese)