

机械式自动变速器动力中断研究进展及解决方案

钟再敏¹, 孔国玲¹, 余卓平¹, 孔国平²

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 中国一汽, 吉林 长春 130000)

摘要: 阐述了机械式自动变速器固有缺陷产生的原因以及对车辆驾驶性能的影响;总结了目前国内外针对定轴式变速器动力中断问题的研究进展及方案,并在此基础上提出有源动力补偿以及无源动力补偿的概念;最后总结了机械式自动变速器未来发展趋势.

关键词: 机械式自动变速器; 动力中断; 动力补偿; 动力换挡; 混合动力

中图分类号: U 463

文献标识码: A

Review on Torque Interruption and Its Solution of Automated Mechanical Transmission

ZHONG Zaimin¹, KONG Guoling¹, YU Zhuoping¹, KONG Guoping²

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China FAW, Changchun 130000, China)

Abstract: The torque interruption is the inherent flaw due to the topological structure of automated mechanical transmission (AMT). First, a brief introduction is made to the cause and the influence of the vehicle drivability of the torque interruption, and then the research on torque interruption based on fixed-axle transmission is reviewed and the solutions are discussed. The concepts of powered torque gap filler and unpowered torque gap filler are presented. At last, the future development trends of AMT is concluded.

Key words: automated mechanical transmission; power interruption; torque gap filler; power shifting; hybrid power

机械式自动变速器(AMT)通过传统手动机械式变速器基础上加装一套自动执行机构,借助于自动控制系统实现线控换挡(shift-by-wire)和平稳起步,且能保持良好的燃油经济性.使用 AMT 比使用

手动变速器节油 3%~5%,目前在欧洲市场已经非常流行^[1].由于技术门槛低,而且变速器生产继承性很高,成本低等优点,AMT 在国内也受到众多厂商的追捧,目前已经有一汽解放、奇瑞、江淮、长安、长城等整车厂推出了装备有 AMT 的车型.国内外高校以及研究机构也针对 AMT 做了大量的研究,大体分为两类,一类针对 AMT 系统方案的设计与优化^[2-5];另一类针对 AMT 的控制算法研究,包括离合器的优化起步控制^[6-9],发动机优化控制^[10-11]以及系统协调控制^[12-14].

AMT 有效解决了手动变速器不能自动换挡以及自动变速器传动效率低的问题,但换挡过程中动力中断的固有缺陷并没有得到根本的解决,而且带来了换挡过程中换挡冲击以及起步不平顺的问题,严重制约了其发展及产业化空间.众多汽车厂商以及学者也在摸索换挡动力不中断的解决方案,并取得一定进展.本文将分析动力中断产生的原因及其对车辆驾驶性能的影响,介绍 AMT 动力中断的解决方案及研究进展.

1 AMT 动力中断产生原因及其对整车性能影响

为了满足不断变化的工况以及提高燃油经济性,AMT 需要频繁换挡以满足行驶性能和经济性的需求.换挡过程类似手动变速器分为 5 个过程:分离离合器—摘挡—选挡—进挡—结合离合器,其示意图如图 1 所示.离合器的分离中断了发动机传递至车轮的动力,使得车辆输出转矩降为零甚至出现负转矩,导致车辆在换挡期间失去加速度,引起车辆因加速度突变而产生的“顿挫感”.如果离合器结合控

收稿日期: 2010-10-22

第一作者: 钟再敏(1973—),男,副教授,硕士生导师,工学博士,主要研究方向为新能源汽车动力传动控制技术.

E-mail: zm_zhong@tongji.edu.cn

通讯作者: 孔国玲(1984—),男,博士生,主要研究方向为混合动力传动系统控制. E-mail: kongguoling@126.com

制不好还会造成传动系统冲击,严重影响车辆行驶平顺性以及动力性.

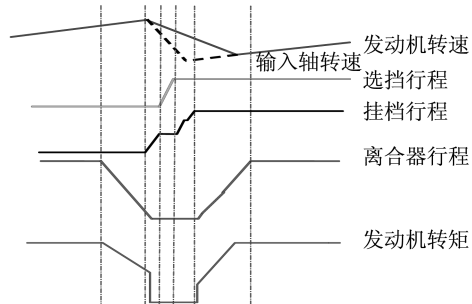


图 1 AMT 典型换挡过程

Fig.1 AMT typical shift process

2 动力中断解决方案分类

动力中断是 AMT 结构性的固有缺陷,仅仅通过控制算法的改进无法从本质上解决.双离合自动变速器(DCT)技术的出现为传动系统带来了曙光,是对 AMT 技术的一种升级,可以实现动力换挡,而且换挡舒适性也得到极大地提高,但该系统结构复杂,关键零部件对设计、加工制造技术要求非常高,导致 DCT 技术门槛以及成本很高,限制了其广泛应用的潜力.DCT 并不是解决动力中断问题的唯一途径,若能对以 AMT 为技术基础的传动系统进行合理的结构优化,开辟另一条动力传递路线实现换挡过程中的动力不中断,可以对 AMT 技术的广泛应用起着极大的促进作用.现有的解决方案根据是否增加除发动机以外的动力源分为无源动力补偿和有源动力补偿,如图 2,3 所示.

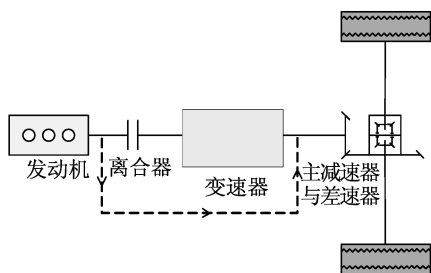


图 2 无源动力补偿传动方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of non-powered powertrain

3 无源动力补偿方案

无源动力补偿通过改进传动系统结构,在换挡过程中将发动机转矩通过另外一条动力传递路线传递到车轮,实现动力不中断.

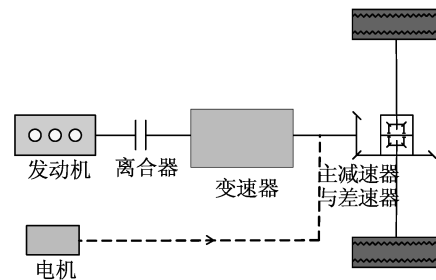


图 3 有源动力补偿传动方案示意图

Fig.3 Schematic diagram of powered powertrain

3.1 日立新型转矩辅助 AMT 装置

Hiroshi Kuroiwa 等人开发了一套新型的转矩辅助 AMT^[15],其机构示意图如图 4 所示,它仅仅在现有手动变速器的高速齿轮端增加了一个辅助离合器.为了使变速器能自动换挡,转矩辅助 AMT 采用了 3 种执行机构:一种用来控制原有离合器,一种用来控制选、换挡齿轮,还有一种用于控制辅助离合器.执行机构采用电机驱动方式.

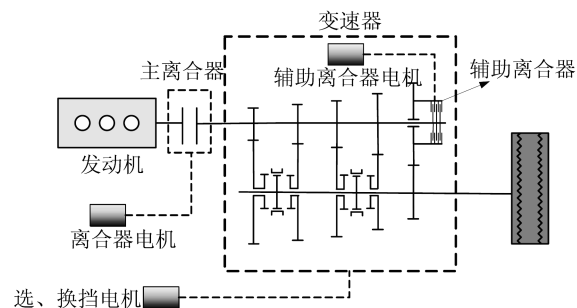


图 4 转矩辅助 AMT 结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of torque assist AMT

由图 4 可知,变速器共有 5 挡,其中 1~4 挡为行车挡,5 挡为转矩补偿挡.换挡过程中,通过结合辅助离合器,从而开辟第 2 条动力传递路线,经过第 5 挡将发动机动力传递到车轮,弥补换挡过程中的动力中断.

因此换挡过程中传递到车轮的转矩有

$$T_{\text{tire}} = T_e \cdot i_5 \cdot i_0 \quad (1)$$

式中: T_{tire} 为车轮驱动转矩; T_e 为发动机转矩; i_5 为 5 挡速比; i_0 为主减速器速比.

以 1 挡换 2 挡为例,换挡过程中车轮上的转矩如图 5 所示.

该方案通过在高挡增加一个辅助离合器实现换挡动力不中断,结构紧凑,改装成本低,但对控制要求比较高,特别对同步器切换与离合器切换时序配合控制要求很高,否则容易引起传动系统干涉.

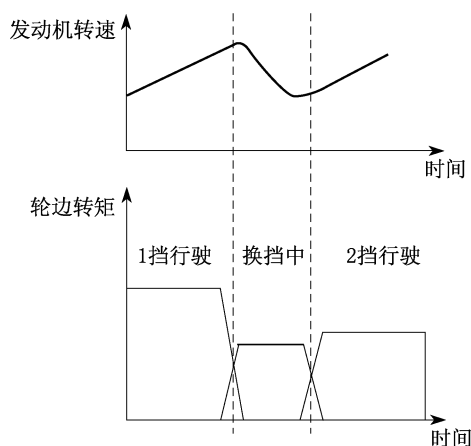


图 5 转矩辅助 AMT 换挡过程车轮驱动转矩

Fig.5 Torque transmitted to wheel during shift process of torque assist AMT

3.2 LuK 动力不中断自动变速器

LuK 公司基于 AMT 的混合动力传动系统开发出换挡动力不中断变速器^[16], 结构如图 6 所示. 该传动方案类似 DCT 的“双离合系统”, 采用两个离合器, 一个起步离合器, 一个换挡离合器, 并且两离合器采用一个执行器, 换挡过程中无需分离起步离合器, 两离合器转矩特性如图 7 所示; 变速器一共分为 6 挡以及倒挡, 其中 1~5 挡为行车挡, 6 挡为换挡动力不中断专用挡, 电机与变速器输入轴进行动力耦合.

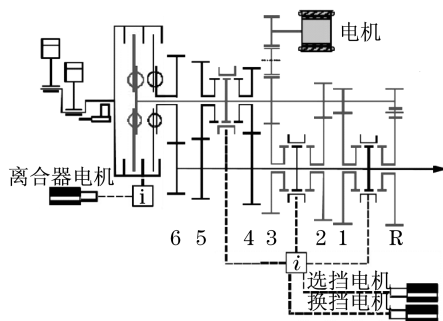


图 6 LuK 动力不中断 AMT 结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of LuK torque un-interruption AMT

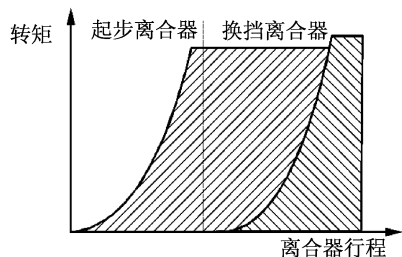


图 7 起步和换挡离合器传递转矩特性曲线

Fig.7 The torque transfer character of launch and shift clutch

该方案通过增加一个离合器, 实现换挡过程中将发动机转矩直接经过第 6 挡传递到输出轴, 该方案是上述日立转矩辅助 AMT 的升级版, 将起步离合器与换挡离合器集成在一起, 采用同一个执行器作动, 使系统更加集成化, 控制也相对简单.

3.3 DTI 公司的动力换挡 AMT

DTI 公司在传统 AMT 传动系统基础上开发出动力换挡 AMT^[17], 如图 8 所示, 该方案采用连接了惯性飞轮的行星齿轮动力分流机构, 加装在基于传统 AMT 的传动系统中, 其中行星齿轮组安装于发动机与变速器输出轴之间, 发动机与齿圈相连, 惯性飞轮与太阳轮相连, 变速器输出轴与行星架相连, 太阳轮与惯性飞轮的连接轴上装有制动器. 其原理是通过行星齿轮机构实现另一条转矩传递路线, 换挡过程中当制动器结合时, 发动机可将动力通过行星齿轮传递到车轮, 从而实现动力换挡, 同时惯性飞轮可起到稳定传动系统转矩的作用, 提高行驶平顺性. 换挡过程与传统 AMT 车辆加速度对比曲线如图 9 所示. 此外行星齿轮机构在锁止太阳轮后还可充当一个更高挡的超速挡, 有助进一步提高车辆燃油经济性.

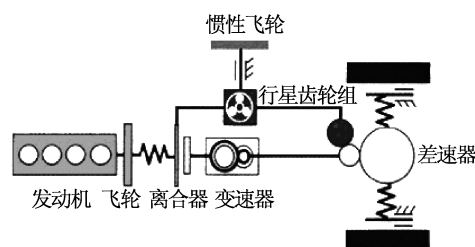


图 8 DTI 动力换挡 AMT 结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of DTI powershift AMT

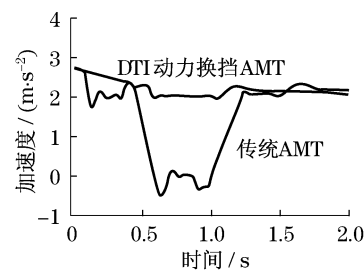


图 9 动力换挡 AMT 与传统 AMT 换挡过程转矩比较曲线

Fig.9 Comparison of torque transmitted between powershift AMT and conventional AMT in shifting

4 有源动力补偿方案

有源动力补偿利用第二动力源如电机、飞轮等, 将其动力通过另一条动力传动路线输出到车轮, 从而在换挡过程中动力的不中断传递. 与无源动

力补偿相比,有源动力补偿灵活性更强,控制也更为容易和精确.

4.1 福特动力补偿并联混合动力传动系统

福特公司在基于 AMT 的传动系统基础上增加一条由电机传递到半轴的动力传递路线,开发出动力补偿并联混合动力传动方案^[18],如图 10 所示.

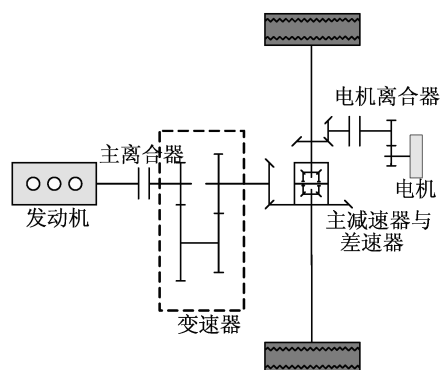


图 10 福特动力补偿并联混合动力传动系统示意图
Fig. 10 Schematic diagram of Ford parallel hybrid system

电机通过一对减速齿轮与电机离合器相连,并通过安装在半轴上的锥形齿轮将动力传递到车轮,电机离合器可以根据传动系统的要求在纯发动机模式、纯电动模式以及混合动力模式之间进行切换,纯电动还可以弥补在换挡过程中动力中断的缺陷,有效提高行驶平顺性.换挡过程半轴转矩的仿真与实车测试曲线如图 11 所示.该方案优点是可以保留原车传动系统而不做大的改动,缺点是系统集成性差,安装空间需求大.

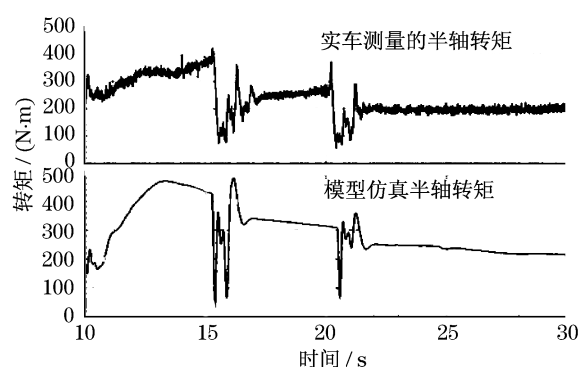


图 11 动力补偿方案半轴转矩的仿真与实车测试
Fig. 11 Torque comparison of results of simulation and vehicle test for the power compensation scheme

4.2 上海交通大学 E. T. Driver 系统

上海交通大学董悦航等人提出一种应用于混合动力客车的电动变速驱动单元,并称之为 E. T. Driver^[19],该系统特点是在启动/发电一体化电机

(ISG)式轻混传动系统基础上加装驱动电机,该驱动电机通过行星齿轮安装于变速器输出轴上,如图 12 所示. ISG 通过倒拖发电使得发动机工作于燃油经济区;驱动电机通过行星齿轮的减速增扭作用将转矩耦合到变速器输出轴,实现联合驱动,另外在换挡过程中还可以直接将驱动电机输出转矩传递到车轮,实现动力不中断换挡.

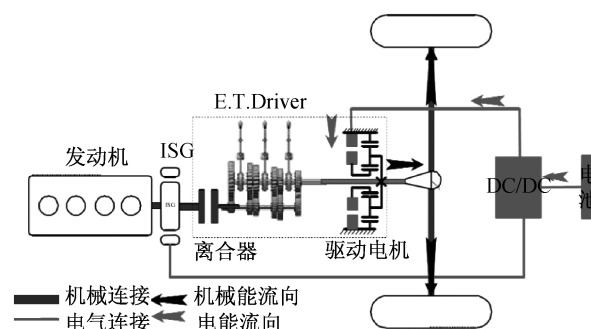


图 12 E. T. Driver 传动系统结构示意图
Fig. 12 Schematic diagram of powertrain of E. T. Driver

换挡过程中传递到车轮的驱动转矩为

$$T_{\text{tire}} = T_m \cdot i_p \cdot i_0 \quad (2)$$

式中: T_m 为驱动电机转矩; i_p 为行星齿轮速比.

该系统通过增加一个驱动电机实现动力换挡,有效提高汽车动力性以及平顺性,但需要额外增加一套行星齿轮机构以及一个大功率的电机,结构复杂,成本也有所增加.

4.3 功率分流动力补偿 AMT

混合动力是未来传动系统的一种趋势,电机与定轴式齿轮变速器的耦合方式是一种技术门槛相对较低、成本也较低的耦合方案.电机可以安装于变速器输入轴和输出轴,前者可以利用变速器的传动比,有效调节发动机工作区域以提高燃油经济性,但无法弥补动力中断的缺陷;后者可以一定程度解决动力中断问题,但电机功率需求大,利用率低.一种采用行星齿轮的传动方案将电机转矩同时传递到变速器输入轴和输出轴以弥补以上两种方案的缺陷的结构如图 13 所示.

电机通过行星齿轮安装于输入轴末端,电机与齿圈相连,行星架与输入轴相连,而输出轴与太阳轮相连,通过行星齿轮可将 35% 的转矩传递到输入轴,65% 的转矩传递到输出轴.换挡过程中可将 65% 的转矩传递到输出轴从而实现动力不中断.

换挡过程中传递到车轮的转矩有

$$T_{\text{tire}} = 0.65 T_m \cdot i_p \cdot i_0 \quad (3)$$

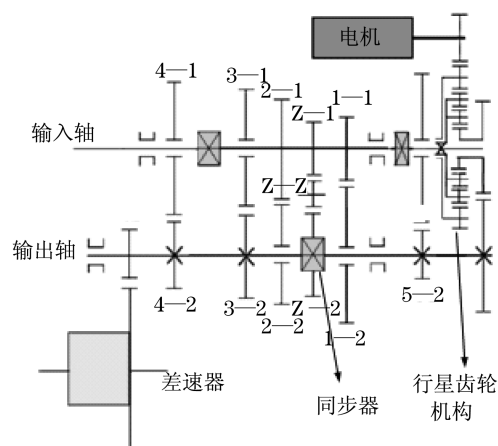


图 13 功率分流 AMT 结构示意图

Fig.13 Schematic diagram of power splitting AMT

4.4 飞轮动力补偿 AMT

意大利学者 E. Galvagno 等人提出一种通过飞轮来补偿动力中断的 AMT^[20]. 该装置通过在发动机输出轴与变速器输出轴之间安装飞轮以及一套行星齿轮机构来连接传动系统, 如图 14 所示. 汽车加速过程中可将一部分动力储备到飞轮当中, 在换挡过程中可将储备的动力释放出来, 通过行星齿轮将发动机和飞轮动力传递到变速器输出轴, 实现换挡过程动力不中断, 各种工况下的转矩流如图 15 所示.

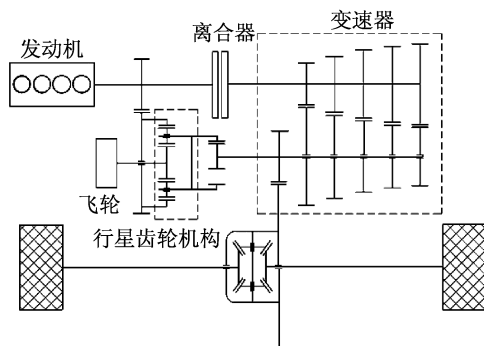


图 14 飞轮动力补偿 AMT 机构示意图

Fig.14 Schematic diagram of flywheel assisting AMT

4.5 慕尼黑工业大学新型混合动力传动系统

B. - R. Höhn 教授提出一种电机与定轴式齿轮变速器一体化的混合动力传动系统^[21],如图 16 所示。变速器采用新颖的三轴式结构,电机安装于中间轴末端,变速器一共有 4 个挡位, $Z_1 \sim Z_{10}$ 为各挡齿轮,电机可以通过结合同步器 K_1, K_2 或 K_3 将转矩传递到输入轴,实现电机与发动机转矩耦合,也可以通过只结合 K_4 将转矩传递到输出轴,因此可以通过合理的同步器切换时序,实现电机动力在变速器输入轴与输出轴之间进行切换,在离合器分离之后,可将

电机动力切换到输出轴,从而方便地实现换挡动力不中断.

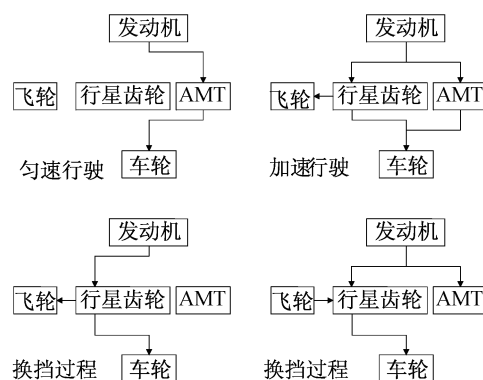


图 15 不同工况转矩流图

Fig.15 Torque flow of different working conditions

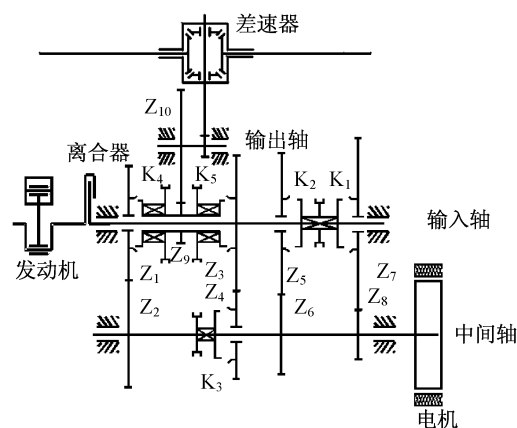


图 16 新型并联混合动力传动方案结构示意图

Fig.16 Schematic diagram of new type hybrid powertrain

5 结语

传动系统的自动化是未来中国汽车工业的发展趋势,变速器的自动化技术是其关键技术,机械式自动变速器(AMT)虽然存在换挡冲击以及动力中断等缺陷,但是它具有其他自动变速器无可比拟的优势:成本低,结构简单,生产继承性强,在中低挡轿车以及商用车上有着极大的应用前景. 本文主要针对AMT的动力中断问题进行了阐述,列举了国内外在该领域的研究进展以及解决方案,未来动力不中断技术与AMT技术的结合必将掀开自动变速器领域新的篇章.

参考文献:

- [1] Joachim Holzner. The AMT reliability and efficiency will be the

- key of the Chinese promotion[J]. Spare Parts and Components, 2008(8):193.
- [2] 席军强,陈慧岩,丁华荣. 电机驱动式自动离合器可行性研究[J]. 车辆与动力技术,2001(2):1.
XI Junqiang, CHEN Huiyan, DING Huarong. Feasibility research on ASS driven by DC moto[J]. Vehicle & Power Technology, 2001(2):1.
- [3] 张雄华,周雅夫,宋振寰. 电机驱动式自动离合器控制与试验[J]. 天津汽车,2005(1):29.
ZHANG Xionghua, ZHOU Yafu, SONG Zhenhuan. Control and experimental research of DC motor driven automatic clutch[J]. Tianjin Auto, 2005(1):29.
- [4] 魏黎. 基于无刷直流电机的 AMT 选换挡控制系统研究[D]. 长春:吉林大学汽车学院,2007.
WEI Li. Research on AMT gear shift control system based on BLDC motor [D]. Changchun: Jilin University. College of Automotive Studies, 2007.
- [5] 任玉平,葛安林. 全电式 AMT 选换挡系统模糊控制方法[J]. 汽车技术,2004(8):11.
REN Yuping, GE Anlin. Fuzzy control method for the electronic control led and electric gear selecting and shifting system of AMT[J]. Automobile Technology, 2004(8):11.
- [6] 席军强,陈慧岩,丁华荣. 自动机械传动系统起步过程中离合器的自适应控制策略研究[J]. 兵工学报,2004,25(6):657.
XI Junqiang, CHEN Huiyan, DING Huarong. Self-adaptable control strategy of the clutch in the starting phase for the AMT of vehicles[J]. Acta Arm AmentarII, 2004, 25(6):657.
- [7] 黄建明,曹长修,苏玉刚. 汽车起步过程的离合器控制[J]. 重庆大学学报,2005,28(3):91.
HUANG Jianming, CAO Changxiu, SU Yugang. Clutch control for automotive start-up process [J]. Journal of Chongqing University, 2005, 28(3):91.
- [8] 赵永胜,张云清,任卫群,等. 汽车 AMT 自动离合器的改进模糊滑模控制[J]. 汽车工程,2006,28(8):750.
ZHAO Yongsheng, ZHANG Yunqing, REN Weiqun, et al. Modified fuzzy sliding mode controller for automatic clutch of AMT vehicle[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(8):750.
- [9] 雷雨龙,李永军,葛安林,等. 机械式自动变速器起步过程控制[J]. 机械工程学报,2000,36(5):69.
LEI Yulong, LI Yongjun, GE Anlin, et al. Starting process control for automatic mechanical transmission [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 36(5):69.
- [10] 何忠波,白鸿柏,张培林. 提高 AMT 车辆换挡品质控制策略与试验研究[J]. 汽车工程,2006,28(9):839.
HE Zhongbo, BAI Hongbai, ZHANG Peilin. An experimental study on control strategy for improving shift quality of AMT vehicle[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(9):839.
- [11] 何忠波,席军强,陈慧岩,等. 发动机断油控制对 AMT 换挡品质的影响[J]. 北京理工大学学报,2004,24(1):48.
HE Zhongbo, XI Junqiang, CHEN Huiyan, et al. Effects of fuel stop valve for diesel engine on the shift quality of an automatic mechanical transmission[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(1):48.
- [12] 阴晓峰,谭晶星. AMT 换挡过程发动机转速 Fuzzy - BangBang 双模态控制[J]. 机械工程学报,2004,40(2):157.
YIN Xiaofeng, TAN Jingjing. Fuzzy-BangBang dual mode control for engine rotate speed in the shift process of automatic mechanical transmission [J]. China Mechanical Engineering, 2004, 40(2):157.
- [13] 文凌波,王玉海,李兴坤. 基于 MATLAB/STATEFLOW 的 AMT 控制策略仿真系统[J]. 车辆与动力技术,2005(1):18.
WEN Lingbo, WANG Yuhai, LI Xingkun. AMT control strategy simulation system based on MATLAB/STATEFLOW [J]. Vehicle & Power Technology, 2005(1):18.
- [14] 何忠波,梁宪福,韩正军. AMT 换挡过程动力学建模及换挡品质影响因素分析[J]. 机械工程学院学报,2004,16(6):45.
HE Zhongbo, LIANG Xianfu, HAN Zhengjun. Dynamic model of shifting process and analysis of the main factors affecting shift quality for AMT vehicle[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2004, 16(6):45.
- [15] Hiroshi Kuroiwa, Naoyuki Ozaki, Takashi Okada, et al. Next-generation fuel-efficient automated manual transmission [J]. Hitachi Review, 2004, 53(4):205.
- [16] G Hirt, R Fischer, R Berger. The future of ASG — the uninterrupted shifted gearbox (USG) and the electrical shifted gearbox (ESG)[J]. Vdi Berichte, 1999, 15(6):1553.
- [17] Viet ND, Hofman T, Steinbuch M, et al. Shifting strategy for step change transmission vehicle — a comparative study and design method[J]. EVS24, Stavanger, Norway, 2009:1.
- [18] Baraszu R C, Cikanek S R. Torque fill-in for an automated shift manual transmission in a parallel hybrid electric vehicle[C]// Proceedings of the American Control Conference. Anchorage: AK, 2002:1431.
- [19] 董悦航. 基于 AMT 的混合动力汽车电动变速驱动单元_E. T. Driver_控制策略研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2008.
DONG Yuehang. Research on control strategy of E. T. driver based on AMT in parallel hybrid electric vehicles [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [20] Galvagno E, Velardocchia M, Vigliani A. A model for a flywheel automatic assisted manual transmission [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44:1294.
- [21] Höohn B R. Automatisiertes schaltgetriebe ohne zugkraftunterbrechung[J]. VDI - Berichte 1827, 2004:749.