

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.001

# 重型混合驱动车辆换挡过程主动调速控制技术\*

王伟达<sup>1</sup> 李宏才<sup>1</sup> 项昌乐<sup>1</sup> 韩立金<sup>1</sup> 刘亚辉<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学车辆传动国家重点实验室,北京 100081; 2. 清华大学汽车工程系,北京 100084)

**【摘要】** 混合驱动车辆由于具有多个动力源从而使主动调速控制难度增大。研究了减小换挡操作元件操作冲击的主动调速控制算法,提出了采用双环控制结构的主动调速控制。该算法包括两个层次的转速调节:外环的换挡制动器/离合器主、被动端速差调节采用增量式PID控制;内环的发动机、电动机、发电机部件的目标转速调节采用模糊控制。通过开发的混合驱动控制器ECU对算法进行了在线台架试验标定与验证。试验结果表明,设计的主动调速控制方法实现了调速部件的协同控制,可以保证换挡过程快速、平顺地完成,换挡时间与冲击度等指标符合系统要求。

**关键词:** 混合驱动车辆 主动调速控制 换挡过程

**中图分类号:** U463.212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0001-05

## Active Speed-tuning Control in the Process of Gearshift for Heavy PSHEV

Wang Weida<sup>1</sup> Li Hongcai<sup>1</sup> Xiang Changle<sup>1</sup> Han Lijin<sup>1</sup> Liu Yahui<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Vehicle Transmission, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Department of Automotive Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

### Abstract

The active speed-tuning control in the process of gearshift can ensure the ideal gear-shifting quality and the driving performance. For parallel and series hybrid electric vehicle (PSHEV), the control is more difficult because of the multi-powers. The active speed-tuning control algorithm used to reduce the impingement of components and the dual-loop control algorithm was presented in this paper. The outer control loop based on the increment PID algorithm controlled the speed error between the active and passive components; the inner control loop based on the fuzzy control logic controlled the regulation of the engine, electric motor and the generator. The online tests on the bench were carried on using the ECU of PSHEV. The test results indicated that the active speed-tuning control algorithm could control the components working harmoniously and ensure a fast and smooth gearshift.

**Key words** Parallel and series hybrid electric vehicle, Active speed-tuning control, Gearshift

### 引言

通过功率分流与耦合装置将动力分为机械功率流和电力功率流进行传递与驱动的车辆混合驱动技术可以显著提高能量利用效率与降低排放,且不依赖电池的功率与容量特性<sup>[1]</sup>。与小型车辆不同,大功率的重型车辆混合驱动装置输出的转速与转矩还

不能满足车辆的驱动需求,一般需要在混合驱动装置中集成专门的变速器,将混合驱动车辆动力源的动力变速变矩后传递至驱动车轮,同时完成发动机与电动机动力的分配与耦合。机械式自动变速器(AMT)以其传动效率高、成本低和易于制造等优点在混合驱动车辆上得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。一汽“都市MM”混合动力客车、东风公司的EQ6110混合动

收稿日期:2010-01-28 修回日期:2010-04-12

\* 国家自然科学基金资助项目(50905018)

作者简介:王伟达,讲师,主要从事车辆传动、车辆动力学及其控制研究, E-mail: wangwd0430@163.com

通讯作者:李宏才,讲师,主要从事机电复合传动系统设计与控制技术研究, E-mail: armwtank@bit.edu.cn

力大型公交车都安装了具有自主知识产权的AMT<sup>[3]</sup>。本文研究的混合驱动系统即采用机械式自动变速器。

AMT换挡过程需要对发动机、变速器等进行协调控制,才能获得良好的换挡品质与驾驶性能。对于混合驱动车辆,则需要对发动机、发电机与电动机等进行综合控制,换挡过程控制与混合驱动系统的能量管理策略耦合在一起,更增加了控制的难度。对于普通车辆的AMT换挡过程控制国内外已有较深入的研究,国内有许多研究成果<sup>[4-5]</sup>。专门针对混合驱动车辆换挡的研究还较少<sup>[6-7]</sup>。

针对重型混合驱动车辆换挡过程中的品质控制问题,本文进行减小换挡操作元件操作冲击的主动调速控制算法研究,通过开发的混合驱动控制器ECU对算法进行在线台架试验标定与验证。

## 1 混合驱动系统结构

混合驱动系统由发动机、电动机、发电机、能量耦合机构、行星变速器及离合器、换挡装置(制动器、离合器)等组成,其机械连接如图1所示。通过耦合机构进行功率分流与汇流控制,实现车辆的混合驱动。

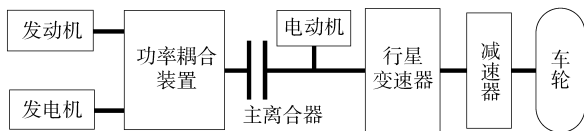


图1 混合驱动系统连接图

Fig.1 Structure of the hybrid driving system

行星变速器位于主离合器之后,电动机与主减速器之间。通过变速器自动调整传动比,实现车辆的驱动转矩需求与车速区间。变速器换挡通过行星齿轮机构上的制动器或离合器实现(研究的系统一挡、二挡通过操作相应制动器实现,三挡通过操作相应离合器实现)。变速器结构如图2所示。

由于系统可以实现主动调节制动器/离合器主被动端转速,所以变速器设计时,取消了转速同步装置。进行换挡操作时,制动器/离合器的主、被动端分别与前面的能量耦合机构、主减速器相连。被动部分和车轮转速有特定的传动比关系,所以制动器/

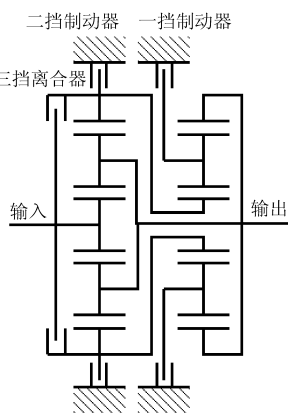


图2 行星变速器原理图

Fig.2 Schematic of the planetary transmission

离合器进行接合前,需要调整前端的主动部分转速消除与被动部分的速差,才能实现较小冲击下的接合换挡。如断开主离合器,变速器换挡进行同步调速时,只需调整电动机转速即可,换挡完毕需要接合主离合器。事实表明,这样做会增加换挡时间,影响车辆动力性能。如不断开主离合器,换挡制动器/离合器接合后,即可实现车辆的混合驱动,可大大改善车辆的动力性能。但这样做需要在调速时,对发动机、电动机、发电机进行复杂的精细控制,实现三者转速的协调配合,才能保证调速的快速实现,从而接合换挡制动器/离合器,车辆从换挡状态迅速进入驱动状态。否则,不断开离合器可能会适得其反,使系统长时间处于调速状态而不能完成换挡,车辆失去驱动力。下面研究的自动换挡控制将着重解决三者的协同控制问题。

## 2 主动调速控制方法

### 2.1 主动调速控制结构

通过设定发动机、电动机、发电机3个部件的目标转速即可实现主动调速控制。但这种以最终结果为目标的控制不能精细控制调速过程,调速时间完全由部件的调速性能实现,难以保证调速过程时间短、冲击小、无相互干涉。

本文采用的主动调速控制采用双环控制结构,包括两个层次的转速调节:外环的换挡制动器/离合器主、被动端速差调节;内环的发动机、电动机、发电机部件的目标转速调节。根据最终调速目标,外环控制器计算换挡操作元件主被动端的转速调节控制量;内环控制器将其转换为3个部件的转速调节控制量,最终实现换挡操作元件的无差速或小差速接合。根据实际情况,外环控制器的输出决定接合过程是否平稳、快速,采用增量式PID控制可以满足要求;内环控制器决定各部件控制量时,要保证3个部件转速调节过程的相互协同,对保证调节过程无相互干涉、减小冲击具有决定性意义,需综合考虑多种影响因素。智能控制在解决此类问题具有较大的优势。但是,一般智能控制算法比较复杂,难以在当前基于微控制器的ECU中实现,而兼具智能控制的优点且可通过特定的编程方法容易在ECU软件中实现的模糊控制方法被选定作为内环控制器的核心算法。双环控制器结构如图3所示。

### 2.2 外环控制算法

外环控制器采用增量式PID控制方法即可满足要求。PID控制算法简单,鲁棒性好和可靠性高,控制参数经过较好的整定后可以达到良好的动态和静态性能。普通的PID进行积分运算时,每个控制循

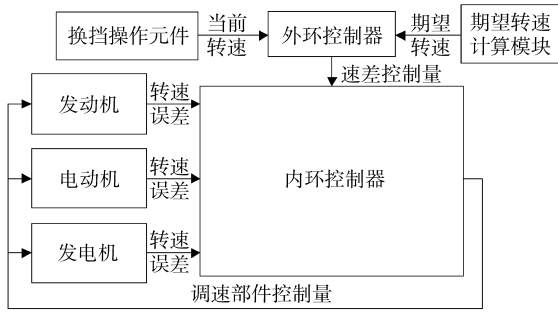


图 3 双环控制器结构图

Fig. 3 Structure of the dual-loop controller

环都需要对误差进行累加,因此每次输出均与所有过去的状态有关,控制容易受随机干扰的影响。所以采用增量式 PID 的形式,表达式为

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (1)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (2)$$

式中  $u(k)$ 、 $u(k-1)$ —— $k$ 、 $k-1$  时刻控制量

$\Delta u(k)$ —— $k$  时刻的控制量增量

$e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ ——各时刻误差值

$K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ——PID 控制比例、积分、微分系数

混合驱动系统可测量的转速信号有:发动机转速、电动机转速、发电机转速与驱动车轮转速。由于一档、二档换挡操作元件为制动器,所以主动端目标转速为零,三档离合器主动端目标转速由车轮转速决定。由图 2 所示的行星变速器结构,可得各换挡操作元件主动端目标转速与实际转速计算公式为

$$n_{D\_B1} = 0 \quad (3)$$

$$n_{D\_B2} = 0 \quad (4)$$

$$n_{D\_C3} = v_v / i_g \quad (5)$$

$$n_{P\_B1} = \{ K_2 v_v / i_g + [(1 + K_1) v_v / i_g - n_{P\_m}] / K_1 \} / (1 + K_2) \quad (6)$$

$$n_{P\_B2} = [(1 + K_1) v_v / i_g - n_{P\_m}] / K_1 \quad (7)$$

$$n_{P\_C3} = n_{P\_B2} \quad (8)$$

式中  $n_{D\_B1}$ 、 $n_{D\_B2}$ 、 $n_{D\_C3}$ ——一挡制动器、二挡制动器、三挡离合器的期望转速值

$n_{P\_B1}$ 、 $n_{P\_B2}$ 、 $n_{P\_C3}$ ——一挡制动器、二挡制动器、三挡离合器的实际转速值

$K_1$ 、 $K_2$ ——两个行星排的特性参数

$v_v$ ——车辆速度  $i_g$ ——主减速比

$n_{P\_m}$ ——电动机当前转速

### 2.3 内环控制算法

内环控制器采用模糊控制方法。研究表明,需要大量知识与经验,需要模拟人根据多种影响因素进行智能决策的控制系统,采用模糊控制方法具有

很大的优越性。模糊控制器不要求掌握受控对象的精确数学模型,只需根据人工控制规则组织控制决策表并由该表决定控制量的大小<sup>[8]</sup>。

内环控制器有 4 个基本输入变量,即外环控制器输出量,发动机、电动机、发电机目标转速与实际转速的误差。由于转速误差的变化率反映了部件的转矩情况,考虑误差变化率可以更为精确地控制转矩,但是这样内环模糊控制器将有 7 个输入变量,模糊推理规则将非常复杂,所以在设计模糊控制器时,没有设置 3 个部件转速误差变化率变量,代之以换挡操作元件速差变化率。操作元件速差变化率反映了 3 个部件调速结果的综合,一定程度上包含了相关转矩信息,为一种较好的折衷方案。综上所述,内环控制器的输入变量为 5 个,分别是:外环控制器输出量、换挡操作元件速差变化率、发动机转速偏差、电动机转速偏差与发电机转速偏差。输出变量为 3 个,分别是:发动机、电动机、发电机的转速调节量。

模糊控制器设计包括:输入量(精确量)的模糊化处理、模糊规则设计、模糊推理方法确定及输出量的模糊判决(反模糊化)。

由于设计的控制器输入变量较多,为简化推理逻辑,采用“正大”(PB)、“正小”(PS)、“零”(O)、“负小”(NS)、“负大”(NB)5 个语言变量值来描述。语言变量值在论域上的模糊子集由隶属函数描述,隶属函数的形态对控制效果有明显的影响。本文采用复合高斯隶属函数,该隶属函数控制精度较高。并且,在系统偏差较小或接近零时,采用具有高分辨率的窄型隶属函数,提高控制的灵敏度;在偏差较大的范围内,采用具有低分辨率的宽型隶属函数,提高控制的稳定性。

采用 Mamdani 型模糊推理方法进行模糊逻辑运算,采用重心法进行反模糊化计算。

利用 Matlab 中的 Fuzzy Logic Toolbox 设计了模糊控制器。

发动机、电动机、发电机的转速都有专门的传感器测量得到。下面讨论目标转速的计算方法。

发动机目标转速由整车综合能量管理控制器计算,这里不做详细讨论。

电动机与换挡操作元件的主动端直接机械连接,在不同挡位时满足不同的比例关系,电动机各挡目标转速为

$$n_{D\_m1} = (1 + K_1 + K_1 K_2) v_v / i_g \quad (9)$$

$$n_{D\_m2} = (1 + K_1) v_v / i_g \quad (10)$$

$$n_{D\_m3} = v_v / i_g \quad (11)$$

式中  $n_{D\_m1}$ 、 $n_{D\_m2}$ 、 $n_{D\_m3}$ ——电动机在换挡时的期望转速值

确定发动机、电动机的目标转速后,发电机目标转速由行星机构满足的转速关系式计算得到。

## 2.4 ECU 设计

在上述算法研究基础上,设计了混合驱动综合控制器电子控制单元(ECU),其软硬件包含换挡过程主动调速控制。主动调速控制硬件需要实现转速信号采集与处理、换挡操作元件液压电磁阀驱动以及通过 CAN 总线和系统其他 ECU 进行信息交换。软件包括轮速信号采集与处理、CAN 通讯控制与信息提取、控制决策、各部件调速指令发送、换挡元件电磁阀操作指令发送等功能。软件控制流程如图 4 所示。

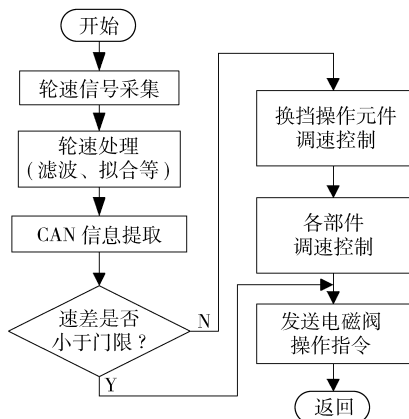


图 4 主动调速控制软件流程图

Fig. 4 Software flow of the active speed-tuning control

## 3 硬件在环仿真测试

### 3.1 车辆系统建模

实际车辆系统中,车轮转速传感器由整车综合控制器 ECU 采集,其他部件的转速、转矩信息通过 CAN 发送给综合控制器。控制信号中电磁阀驱动信号通过驱动电路发出,调速信号等通过 CAN 发送给各部件 ECU。

搭建了以实时仿真系统 dSPACE 为核心的硬件在环仿真平台模拟实际系统。车辆模型在 dSPACE 中运行,由 dSPACE 通过 CAN 发出各部件转速、转矩等信号并生成接近真实传感器信号的轮速脉冲,接收综合控制器 CAN 发来的部件控制信号及电磁阀操作信号。台架系统接入加速踏板与制动踏板,由驾驶员进行操作。踏板上装有相应的位置传感器,信号由综合控制器采集,用来计算驾驶员操作意图。综合控制器 ECU 还将采集由 dSPACE 将轮速转化成的电信号、接收 CAN 信息,通过控制运算,将电磁阀操作信号和部件控制指令发出。硬件在环仿真测试台架构成如图 5 所示。本文利用该台架测试换挡过程的主动调速控制算法。

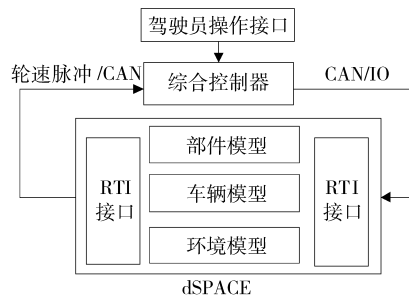


图 5 混合驱动系统硬件在环仿真台架原理图

Fig. 5 Schematic of the HILS bench of hybrid driving system

除了接入部分实物外,提高硬件在环仿真精度的主要途径是建立较为精确的车辆系统模型,如图 6 所示。

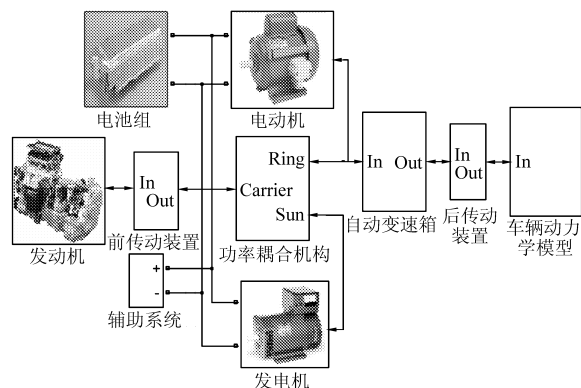


图 6 车辆系统模型

Fig. 6 Models of the vehicle system

发动机、电动机、发电机、电池、车辆负载等模型根据其响应特性通过计算公式或查表进行建模,耦合机构、变速器传动部件通过 Matlab 中的 SimDriveline 模块进行建模。SimDriveline 模块建模精度高,运行过程也十分接近实际的机械系统。限于篇幅,各模型不再一一详述。

### 3.2 硬件在环仿真结果

换挡过程主动调速控制算法的控制效果通过换挡时间、冲击度、滑磨功来评价。换挡过程的硬件在环仿真测试结果如图 7~11 所示,其中“0”代表空挡。

图 7 为某驱动过程变速器输出转矩与挡位的变

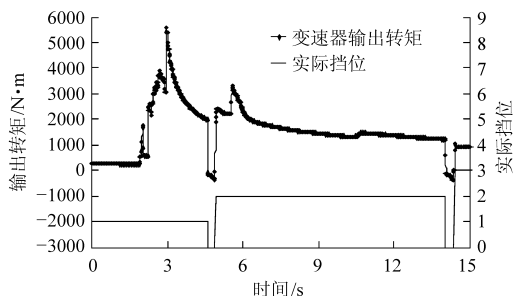


图 7 某驱动过程变速器输出转矩与挡位变化曲线

Fig. 7 Curve of the output torque and the gear

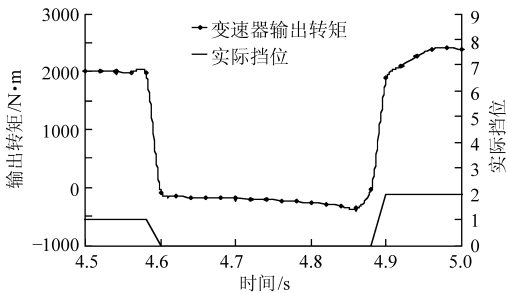


图 8 一挡换二挡过程曲线

Fig. 8 Process curve of gear I to gear II

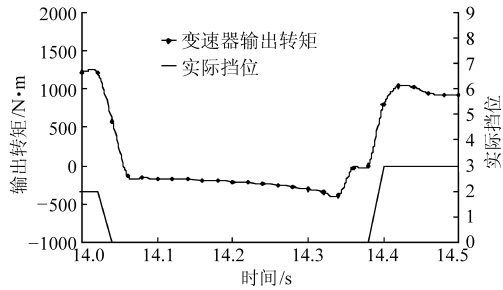


图 9 二挡换三挡过程曲线

Fig. 9 Process curve of gear II to gear III

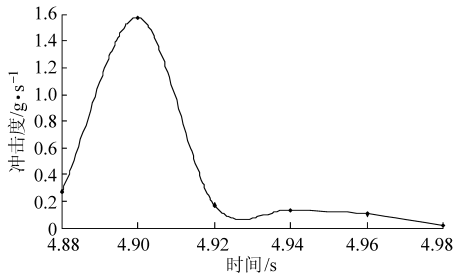


图 10 一挡换二挡过程冲击度曲线

Fig. 10 Jerk curve of the process of gear I to gear II

化曲线,由实际挡位曲线可以看到,过程涵盖了一挡换二挡、二挡换三挡的过程。本文针对的目标车辆变速器只有 3 个挡位,挡间比大,增加了控制的难度。换挡过程细节如图 8 与图 9 所示。一挡换二挡过程中,一挡制动器在 4.58 s 时刻断开,二挡制动器在 4.96 s 时刻完全接合,换挡过程持续 0.38 s。二挡换三挡过程中,二挡制动器在 14.02 s 时刻断开,三挡离合器在 14.42 s 时刻完全接合,换挡过程持续 0.40 s。由图 10 与图 11 可得,各时刻冲击度最大值

为 1.57 g/s (15.43 m/s<sup>3</sup>) 和 0.65 g/s (6.37 m/s<sup>3</sup>),符合国家推荐值要求。计算滑磨功分别得 600.7 J 和 248.1 J。换挡品质评价如表 1 所示。

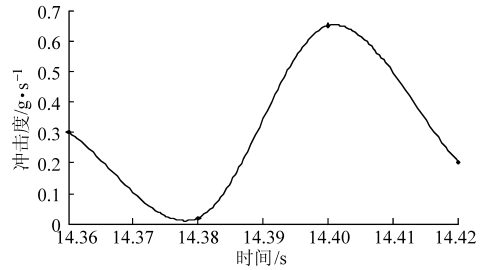


图 11 二挡换三挡过程冲击度曲线

Fig. 11 Jerk curve of the process of gear II to gear III

表 1 换挡品质评价指标

Tab.1 Index of gearshift quality

指标	换挡时间/s	冲击度/g·s <sup>-1</sup>	滑磨功/J
I → II	0.38	1.57	600.7
II → III	0.40	0.65	248.1

换挡品质评价指标表明,所研究的主动调速控制算法实现了预期的控制目标,保证了良好的换挡品质。

## 4 结论

(1) 硬件在环仿真结果表明,研究的换挡过程主动调速控制算法能够实现对混合驱动车辆换挡品质的有效控制,换挡时间、冲击度、滑磨功等指标符合相关要求。

(2) 提出的主动调速控制算法的双环控制结构,解决了多调速部件的相互协同问题,消除了部件调速时的相互干涉,减小了调节时间,保证了换挡品质。

(3) 硬件在环仿真方法可以快速、便捷地完成 ECU 的在线调试,缩短开发周期、节约试验费用。实际部件和数字模型结合使用,既提高了仿真精度,又方便观测一些实际系统中难以测量甚至无法测量的物理量,方便分析与评价。由于实车道路试验时工况更为复杂多变,所以还需要对开发的 ECU 进行实车试验以进一步验证控制效果。

## 参 考 文 献

- 秦大同,游国平,胡建军. 新型功率分流式混合动力传动系统工作模式分析与参数设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 184 ~ 191.  
Qin Datong, You Guoping, Hu Jianjun. Operation mode analysis and parameters design of a novel power split hybrid transmission system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 184 ~ 191. (in Chinese)
- 葛安林. 车辆自动变速器理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1993.
- 王保华,罗永革,张建武. EQ6110 客车电动 AMT 换挡策略[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 38 ~ 41.  
Wang Baohua, Luo Yongge, Zhang Jianwu. Gear shifting rules of electric automatic mechanical transmission for EQ6110 bus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 38 ~ 41. (in Chinese)

- Wang Jixin, Wang Guoqiang, Liu Xiaoguang, et al. Plasticity limit characteristic of ZL80G wheel loader roll-over protective structure with lateral loading [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(6):903~907. (in Chinese)
- 5 Clark B J, Thambiratnam D P, Perera N J. Analytical and experimental investigation of the behaviour of a rollover protective structure[J]. Institution of Structural Engineers, 2006,84(1):29~34.
- 6 Clark B J, Thambiratnam D P, Perera N J. Enhancing the impact energy absorption in roll over protective structures[J]. International Journal of Crashworthiness, 2008, 13(2):167~183.
- 7 Clark B J. The behaviour of roll over protective structures subjected to static and dynamic loading conditions[D]. Brisbane: Queensland University of Technology, 2006:165~170.
- 8 于向军,王国强,王继新,等. 工程车辆 ROPS 动态仿真与试验研究[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(增刊1):188~191.
- Yu Xiangjun, Wang Guoqiang, Wang Jixin, et al. Research of roll-over dynamic simulation and test of engineering vehicle ROPS[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009,39(Supp.1):188~191. (in Chinese)
- 9 魏秀玲. 工程车辆翻车事故中司机保护系统性能研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
- Wei Xiuling. Study on the performances of the operator protection system for off-road vehicles in rollover accident[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 10 侯淑娟. 薄壁构件的抗撞性优化设计[D]. 长沙:湖南大学,2007.
- Hou Shujuan. Optimization design of the thin-walled components with crashworthiness criterion[D]. Changsha: Hunan University, 2002. (in Chinese)
- 11 TNO Road-vehicle research institute. MADYMO theory manual, Release 7.1[M]. Delft, The Netherlands: TNO Road - vehicles Research Institute, 2009.
- 12 Yuanzhi Hu, Clive E, Neal-Sturgess A M, et al. Modeling the effects of seat belts on occupant kinematics and injury risk in the rollover of a sports utility vehicle (SUV)[C]. SAE Paper 2007-01-1502, 2007.
- 

(上接第5页)

- 4 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)
- 5 Iannell L, Vacca V, Vasca F. Gearshift control for automated mechanical transmissions[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(1):17~26.
- 6 朱海涛,张俊智,廖承林,等. 混合动力电动汽车动力总成换挡过程协调控制仿真[J]. 公路交通科技,2005,22(8):131~134.
- Zhu Haitao, Zhang Junzhi, Liao Chenglin, et al. Simulation of integrated gear shifting control for hybrid electric vehicle[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(8):131~134. (in Chinese)
- 7 杨俊英. 重型商用车 AMT 换挡转速同步控制技术研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
- Yang Junying. Study on the synchronization technology of rotate speed of heavy-duty commercial vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- 8 曾光奇,胡均安,王东,等. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006.