

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.007

# 基于多学科协同仿真的液压 系统性能匹配研究\*

陈飞云<sup>1</sup>, 李光<sup>2</sup>, 吕晓林<sup>2</sup>, 余翊妮<sup>1</sup>, 宁晓斌<sup>1\*</sup>

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 太原重工股份有限公司 技术中心, 山西 太原 030023)

**摘要:**针对正铲挖掘机液压系统与工作装置负载的性能匹配问题,提出了多学科协同仿真方法,并应用于整机系统的性能仿真研究。为准确模拟挖掘机工作过程中各子系统的性能参数变化,基于多刚体动力学软件 ADAMS 建立了工作装置的机构仿真模型,并利用离散元仿真软件 EDEM 模拟了挖掘机不同进给深度的实际挖掘负载;然后,根据液压系统原理及控制方式,以 AMESim 为主仿真平台,建立了复合控制泵模型;最后,构建了全系统机液协同仿真模型。分别对液压系统工作过程中液压泵和各液压缸的性能参数进行了仿真验证,并模拟了不同挖掘负载对液压系统性能参数的影响变化。研究表明,该协同仿真方法能够用于对复杂系统进行准确、有效地建模,并验证了所设计的液压系统在多变负载工况下性能匹配参数的合理性。

**关键词:** 液压挖掘机; 协同仿真; 液压系统; 性能匹配

中图分类号: TH122; TD422

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)05-0573-05

## Matching performances for hydraulic system based on multi-disciplinary collaborative simulation

CHEN Fei-yun<sup>1</sup>, LI Guang<sup>2</sup>, LV Xiao-ling<sup>2</sup>, SHE Yi-ni<sup>1</sup>, NING Xiao-bin<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Technical Center, Taiyuan Heavy Industry Co. Ltd., Taiyuan 030023, China)

**Abstract:** Aiming at the performance matching problem between the working attachments and the hydraulic system of face-shovel hydraulic excavator, the multidisciplinary collaborative simulation method was proposed, and which was applied to performance studies of the whole engine system simulation. To accurately simulate the change to the performance parameter of each subsystem in the work process of the hydraulic excavator, the working attachment mechanism simulation model was built based on the multi-body dynamics simulation software ADAMS, and the modeling method of the digging resistance was put forward by using extended discrete element method (EDEM) software. Then, according to the hydraulic system principle and the control mode of the hydraulic excavator, the integrated simulation model, with the compound control pump, was established by using main simulation platform AMESim. Through the performance parameter of the hydraulic main pump and the hydraulic cylinder were validated in the whole operation cycle of the hydraulic excavator, the influence of the hydraulic system performance in different digging resistance load was analyzed. The results indicate that it is an effective and accurate method for modeling complex systems. And the rationality of the matching performance parameters of the designed hydraulic system is validated with the multidisciplinary collaborative simulation method.

**Key words:** hydraulic excavator; collaborative simulation; hydraulic system; matching performances

收稿日期: 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375452)

作者简介: 陈飞云(1987-), 男, 河南濮阳人, 主要从事液压挖掘机机电液系统方面的研究. E-mail: 13906536993@163.com

通信联系人: 宁晓斌, 男, 副教授, 硕士生导师. E-mail: nxb@zjut.edu.cn

## 0 引 言

随着科学技术的进步和大型露天矿山建设的需要,液压挖掘机逐渐向高速、高压、大斗容、大功率发展。目前,国外对于大型液压挖掘机的研制技术比较成熟,而国内在大吨位的液压挖掘机领域还处于起步阶段,并且在研究设计与仿真技术方面,大多只关注液压挖掘机的某一个或某几个方面的研究,缺乏整体性能的研究手段<sup>[1-2]</sup>。

刘静等<sup>[3]</sup>利用 ADAMS 软件和 Matlab 软件建立挖掘机的机械、液压等子模型,利用参数关联和模型集成技术,建立了挖掘机虚拟样机技术,其通过一系列数学微分方程和代数方程对液压系统模型进行求解,但由于液压系统的高复杂性和非线性,因而求解难度大。秦成<sup>[4]</sup>、时培成等<sup>[5]</sup>利用 ADAMS 建立挖掘机机器人的机械、液子系统模型,从而建立挖掘机液压与机械一体化的虚拟样机模型,但 ADAMS 的液压模块的功能不完善,无法准确建立复杂的液压泵变量机构与多路阀控制模型,所以不能准确分析挖掘机液压系统的特性与作业效率、能耗<sup>[6]</sup>等。另外,对于挖掘机挖掘阻力模型的研究,由于挖掘过程的复杂性,很难对挖掘阻力进行直接分析,也没有准确的经验公式可循<sup>[7-8]</sup>。

为克服以上研究方法的不足,本研究提出多学科协同仿真方法,以液压仿真软件 AMESim 为基础仿真平台,利用 ADAMS 软件建立机械系统模型,并从离散元仿真软件 EDEM 的模拟挖掘过程中得到准确的挖掘阻力模型,从而为大型正铲液压挖掘机的性能匹配和优化设计提供有效的模型理论和技术参考。

## 1 协同仿真原理

在挖掘机的设计过程中,为验证和优化所开发机型液压系统与工作装置负载的各项性能匹配参数,本研究基于 AMESim 与 ADAMS 仿真软件,建立了机液协同仿真模型,协同仿真原理如图 1 所示。

首先,笔者在 ADAMS 中建立挖掘机的机械仿真模型,进行运动学分析验证;然后,基于 AMESim 建立液压系统模型,并以复合控制泵的实际参数变化验证所建立模型的准确性;最后,通过协同仿真接口模块,将 AMESim 液压系统中测得液压缸的速度值输入到 ADAMS 机械动力学模型中,并将 ADAMS 中负载力的变化及机构的转动惯量转化为每个液压缸上所受的力,反馈至 AMESim 中液压系统中的液压缸模型中,从而通过实时的数据交换,将挖掘机的液压系统与机械

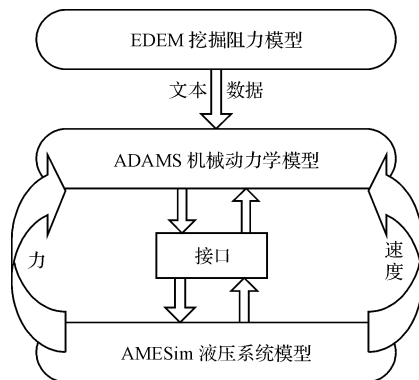


图 1 协同仿真原理

仿真模型耦合起来。

同时,笔者在 EDEM 中建立实际工况下的矿石料堆模型,以模拟整个挖掘过程,测试铲斗所受到矿石的总阻力,将得到的挖掘阻力文本数据导入 ADAMS 中,并以加载力的方式添加到挖掘机铲斗机构上,从而能够为协同仿真提供可靠的挖掘阻力模型。

## 2 建模与仿真

### 2.1 ADAMS 动力学建模

考虑到 ADAMS 建模功能较弱以及挖掘机物理样机的复杂性<sup>[9]</sup>,本研究对挖掘机工作装置的销、板等结构进行简化,并利用 UG 软件建立挖掘机各部件具有质量和转动惯量等物理特征的三维实体模型和装配图,然后将模型转成 parasolid 文件导入 ADAMS 中,添加约束和运动关系,并根据挖掘轨迹定义载荷,各执行油缸与马达的液压驱动力随挖掘机运动和负载的变化而变化,在 ADAMS 中通过函数 VARVAL 获取各执行部件的液压力数据,实现各执行器的驱动,所建立的动力学模型仿真模型如图 2 所示。

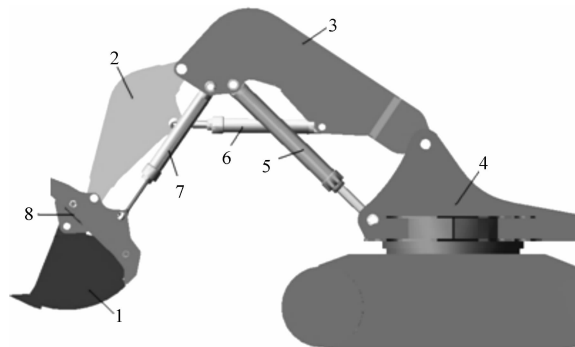


图 2 液压挖掘机的 ADAMS 动力学模型

1—铲斗;2—斗杆;3—动臂;4—转台机构;5—动臂油缸;  
6—斗杆油缸;7—铲斗油缸;8—开斗油缸

### 2.2 EDEM 挖掘阻力模型

在挖掘机液压系统的设计过程中,实际挖掘阻力

是验证液压系统的各性能参数匹配是否合理的重要模型依据<sup>[10]</sup>。大型正铲挖掘机的挖掘对象主要是爆破后的矿石或岩石(非均质各向异性材料),在实际挖掘过程中由于随机因素较多和情况复杂,导致挖掘过程中的载荷情况复杂。这里利用离散元仿真软件 EDEM 模拟挖掘过程的负载,阻力模型如图 3 所示。



图3 挖掘机 EDEM 挖掘阻力模型

笔者根据离散元素法建立矿石颗粒模型<sup>[11]</sup>,通过导入真实颗粒的 CAD 模型准确描述颗粒形状大小,并添加力学性质、物料性质和其他物理性质的参数,最后在 EDEM 中模拟挖掘工况,测量挖掘轨迹上铲斗的受力,从而能够得到准确可靠的挖掘阻力。

## 2.3 基于 AMESim 平台的协同仿真

挖掘机液压系统主要由主泵、主控制阀和执行器等构成。本研究在 AMESim 仿真软件中分别建立上述液压元件子模型,并通过接口控制模块 ADAMS/Controls,构建了全系统机液协同仿真模型。

### 2.3.1 复合控制泵建模

该型挖掘机采用某型号液压泵,液压系统压力流量特性只与主泵的外特性有关,而与主泵的内部结构无关。所以笔者只关心变量泵的外部特性对液压系统的影响,而对变量泵的内部变量实现过程和其效率变化过程并不关注。因此可以根据液压泵的外特性建立主泵的简化模型。主泵控制方式为恒功率曲线控制,并具有压力切断功能,调速方式为容积调速,以保证挖掘机工作时系统在各工况下的工作效率和节能要求。

恒功率控制时主泵出口流量  $Q_h$  与泵出口压力  $P$  之间的关系为:

$$Q_h = \begin{cases} Q_{\max}, P < P_s \\ W/P, P \geq P_s \end{cases} \quad (1)$$

压力切断控制时泵出口流量  $Q_q$  与泵出口压力  $P$  之间的关系为:

$$Q_q = \begin{cases} Q_{\min}, P > P_c \\ Q_{\max}, P \leq P_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Q_{\max}$ 、 $Q_{\min}$ —泵出口最大、最小流量, L/min;  $W$ —主泵调定功率, kW;  $P_s$ —恒功率控制的启调压力, MPa;  $P_c$ —压力切断阀控制压力, MPa。

当恒功率控制信号、压力切断控制信号以及手柄控制信号共同作用在主泵的调节器上,泵的流量在三者控制下取小值  $Q$ 。其数学模型为:

$$Q = \min\{Q_h, Q_q, Q_p\} \quad (3)$$

式中: $Q_p$ —手柄控制时泵的出口流量, L/min。

根据上述液压泵的数学模型,本研究在 AMESim 中建立主泵的仿真模型并进行封装,以手柄最大摆角信号输入,仿真输出主泵的压力与流量关系,与试验测试结果对比,验证了所建立复合控制泵模型的准确性。

### 2.3.2 协同仿真模型

由于篇幅限制,挖掘机液压系统中的其他子模型建立过程从略<sup>[12]</sup>。本研究在 ADAMS 中定义输入、输出状态变量,生成 ADAMS 与 AMESim 两软件的接口,在挖掘机 AMESim 液压模型中,加载接口模块,所建立的全系统机液协同仿真模型如图 4 所示。

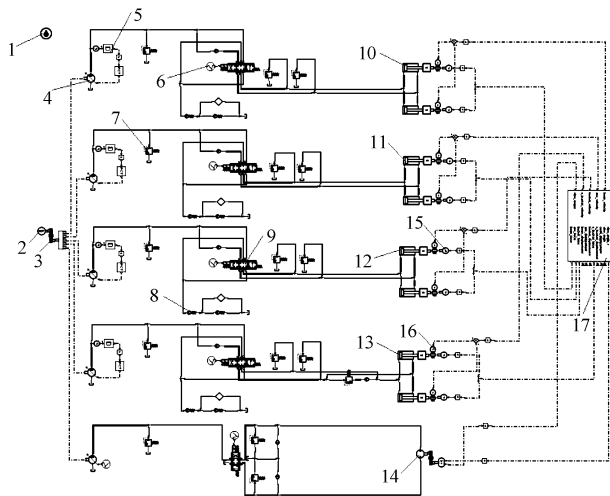


图4 挖掘机机液协同仿真模型

1—液压油;2—电动机;3—减速装置;4—液压泵;5—变量机构;6—输入信号;7—溢流阀;8—背压阀;9—多路阀组;10—动臂液压缸;11—斗杆液压缸;12—铲斗液压缸;13—开斗液压缸;14—回转马达;15—负载力;16—速度传感器;17—协同仿真接口模块

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 典型工作循环分析

各液压缸位移曲线如图 5 所示。由图 5 可知,挖掘机调整挖掘初始姿态后,从 6.5 s 开始斗杆挖掘,挖掘持续时间 6 s 后结束,流量最大时速度达到 0.28 m/s,并调整铲斗姿态,保持最佳挖掘后角。挖掘结束后,动臂

开始满斗举升,动臂液压缸 7.5 s 后伸至最长,速度达到 0.22 m/s,并调整铲斗,以免物料洒落,此时回转马达使回转机构运动,到达指定卸载位置。30 s 后开斗缸打开,物料卸载,卸载完毕,开斗关闭,并进入下一工作循环。

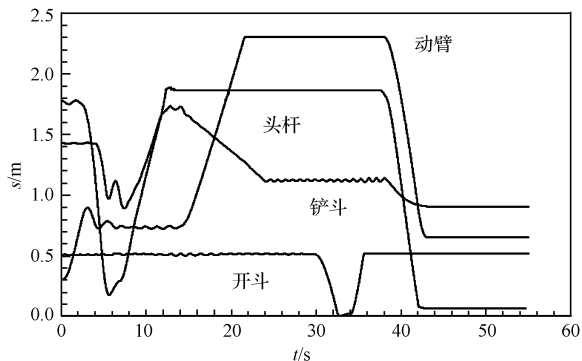


图 5 各液压缸位移曲线

整个挖掘工作循环过程分析结果表明,液压系统的液压泵、多路阀、液压缸的参数与压力变化、工作装置各液压缸的伸长回缩速度、挖掘时间、流量分配情况等均符合实际挖掘需求,并验证了挖掘机所设计液压系统的各元件(变量泵、多路阀、液压缸等)参数匹配的合理性。

### 3.2 不同负载工况液压系统参数匹配分析

挖掘机工作过程中的挖掘阻力随挖掘姿态和矿石颗粒大小的变化而变化,并因影响液压系统的各向性能参数。挖掘机不同负载下的 EDEM 挖掘阻力曲线如图 6 所示。

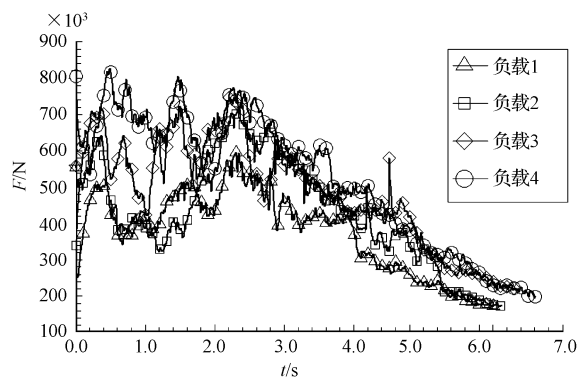


图 6 挖掘机不同负载下的 EDEM 挖掘阻力曲线

挖掘机斗杆挖掘工况时,挖掘机初始的挖掘姿态位置分别为铲斗进入矿石料堆的深度变化,即从负载 1 到负载 4 铲起的矿石厚度逐渐增加,挖掘阻力相对增大,并可以看到挖掘过程中挖掘阻力波动较大,并随斗杆液压缸的不断伸长,阻力开始减少,是因为 3 s 后掘削的矿石颗粒层变薄,此时动臂也开始逐步提升。

挖掘机不同负载下的斗杆液压缸的压力变化如图

7 所示。从图 7 中负载 1 到负载 4 的压力曲线变化可以看出,斗杆液压缸压力随负载的增加有变大的趋势,因矿石颗粒大小不同导致的挖掘过程阻力的变化,使得压力有一定的波动和振荡,但能够保持在限定压力 32 MPa 的合理范围内,此时动臂液压缸闭锁,动臂上、下浮动范围很小,没有溢流现象。

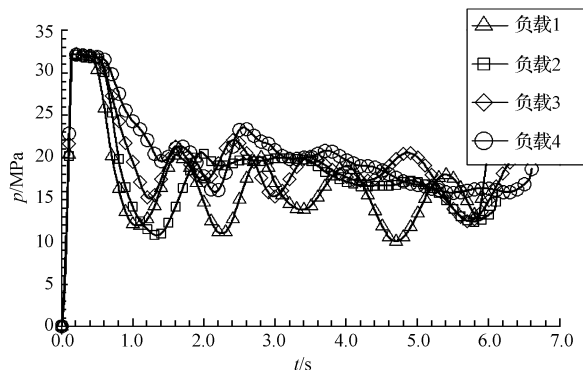


图 7 挖掘机不同负载下的斗杆液压缸的压力变化

液压泵的输出功率以输出压力、流量关系计算得出,挖掘速度的调节由恒功率控制液压泵的输出流量来确定。当负载 1 较小时,泵以最大流量输出,速度基本恒定,但挖掘过程负载变化较大,导致功率有明显的波动。研究表明,挖掘机液压系统流量调节方式、功率变化等满足实际挖掘工况需求,并为进一步改进和优化液压系统与工作装置提供技术思路。

## 4 结束语

(1) 本研究提出了完善的协同仿真方法,并在 EDEM 中建立了挖掘阻力模型。仿真结果表明:机液协同仿真模型较真实的模拟挖掘机的工作负载和挖掘工况,为液压系统的性能匹配及优化提供设计参考模型。

(2) 本研究对比不同挖掘负载的仿真结果,所设计的液压系统能够适应复杂的挖掘负载工况,液压泵功率变化及其它液压元件的各向性能参数匹配合理,且挖掘效率及速度变化等性能均满足实际挖掘需求。

(3) 与此同时,液压系统和各液压元件参数,还需进一步完善,各元件压力损失、系统发热及温升情况有待进一步分析,为挖掘机液压系统设计提供更精确的设计依据。

### 参考文献 (References):

[1] 邸彦强,李伯虎,柴旭东,等. 多学科虚拟样机协同建模与仿真平台及其关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(7): 901-908.  
 [2] KIM S Y. A Development of the virtual design system for the

- attachments of a hydraulic excavator[J]. **SAE International Journal of Commercial Vehicles**, 2012, 5(1):327-332.
- [3] 潘双夏,刘静,冯培恩,等. 挖掘机机器人虚拟样机的机电液一体化建模与仿真[J]. 中国机械工程学报, 2003, 1(1):49-53.
- [4] 秦成. 基于 ProE/ADAMS/Matlab 挖掘机虚拟样机研究[J]. 机械与液压, 2008, 36(9):133-134.
- [5] 时培成,王幼民,王立涛,等. 挖掘机液压-机械复合系统建模与仿真研究[J]. 机械传动, 2007, 31(3):26-29.
- [6] 陈桂芳,郭勇,刘锋,等. 挖掘机液压系统建模仿真及能耗分析[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(5):99-103, 108.
- [7] FRIMPONG S, HU Y, INYANG H. Dynamic modeling of hydraulic shovel excavators for geomaterials[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2008, 8(1):20-29.
- [8] 陈进,李维波,张石强,等. 大型矿用正铲液压挖掘机挖掘阻力试验研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(5):518-521.
- [9] 林慕义,史青录. 单斗液压挖掘机构造与设计[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
- [10] FRIMPONG S, HU Y. Parametric simulation of shovel-oil sands interactions during excavation[J]. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, 2004, 18(3):205-219.
- [11] KOIZUMI T, TSUJIUCHI N, TOMITA Y, et al. Evaluation Process of Digging Performance for Hydraulic Excavator Using DEM[C]// Proceedings of the 16th INTERNATIONAL CONFERENCE of the International Society Terrain Vehicle Systems. Tokyo: [s. n.], 2008:427-433.
- [12] 何清华,郝前华,李铁辉,等. 挖掘机液液耦合复杂系统仿真分析及试验验证[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(12):87-92.

[编辑:张翔]

## 本文引用格式:

陈飞云,李光,吕晓林,等. 基于多学科协同仿真的液压系统性能匹配研究[J]. 机电工程, 2014, 31(5):573-577.

CHEN Fei-yun, LI Guang, LV Xiao-ling, et al. Matching performances for hydraulic system based on multi-disciplinary collaborative simulation[J]. Journal of Mechanical &amp; Electrical Engineering, 2014, 31(5):573-577.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 562 页)

- [24] 申永军,杨绍普,潘存治,等. 参外联合激励下直齿轮副的非线性动力学[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(1):69-73.
- [25] 刘振皓,巫世晶,王晓笋,等. 基于增量谐波平衡法的复合行星齿轮传动系统非线性动力学[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3):117-122.
- [26] 高阳,王三民,刘晓宁. 一种改进的增量谐波平衡法及其在非线形振动中的应用[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(6):663-665.
- [27] 严刚峰,黄显核. 基于遗传算法的改进谐波平衡算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(10):96-100.
- [28] 尚志勇. 转子—轴承系统的非线性动力学分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学能源科学工程学院, 2006.
- [29] 陈会涛. 风力发电机齿轮传动系统随机振动分析及动力可靠性概率优化设计[D]. 重庆:重庆大学机械传动国家重点实验室, 2012.
- [30] 周志刚. 随机风作用下风力发电机齿轮传动系统动力学及动态可靠性研究[D]. 重庆:重庆大学机械传动国家重点实验室, 2012.
- [31] 陈小安. 基于有限单元法的多间隙耦合齿轮传动系统非线性动态特性分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2):46-49.
- [32] 马锐,陈予恕. 含裂纹故障齿轮系统的非线性动力学研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21):84-90.
- [33] 周长江,唐进元,钟志华,等. 齿轮传动齿面摩擦因数计算方法的研究[J]. 润滑与密封, 2006(10):185-191.
- [34] 韩志武,吕尤,马荣峰,等. 仿生表面形态对齿轮动力学性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(6):806-810.
- [35] 林腾蛟. 多级齿轮传动系统耦合非线性振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(17):1-7.
- [36] 崔亚辉,刘占生,叶建槐,等. 复杂多级齿轮-转子-轴承系统的动力学建模和数值仿真[J]. 机械传动, 2009, 33(6):44-48.
- [37] 闵海涛,高娟,马天飞. 汽车变速器箱体结构强度分析与优化设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23(20):2514-2519.
- [38] 李强军. 重型汽车变速器直齿行星副变速器动力学研究[D]. 重庆:重庆大学机械传动国家重点实验室, 2012.
- [39] 寇海江. 汽车变速器齿轮传动系统非线性动力学特性研究[D]. 沈阳:东北大学理学院, 2011.
- [40] 陈玉祥,臧孟炎,陈勇,等. 基于虚拟样机技术的手动变速器换挡力分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(8):996-1000.
- [41] 崔传宝. 机械式变速器换挡性能评价方法的初步研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院, 2011.

[编辑:张翔]