

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.004

# 齿轮传动系统的动力学研究与展望综述\*

谭秀峰, 张国伟, 谢里阳, 何雪泓\*  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 齿轮传动系统应用十分广泛且常扮演重要设备中的关键角色, 其高转速下的振动问题、内部结构复杂性和各种非线性因素的存在, 给齿轮传动系统动力学分析、设计带来了巨大的困难, 针对上述问题, 对其动力学研究进行了具有理论指导意义的综述。根据对国内外齿轮传动系统动力学研究成果的分析总结, 阐述了齿轮传动系统非线性动力学理论的基本框架, 结果表明了其系统输入、系统模型和系统输出 3 部分的内容; 基于非线性系统的研究方法, 综述了 10 年来齿轮传动系统的非线性动力学研究的概况, 主要包括解析法、数值法和实验法; 分析总结了含多级齿轮传动的整体系统的动力学研究现状, 特别对典型的车用变速器动力学问题进行了分析, 指明了未来研究的重点; 最后, 针对变速器, 提出了其在动态性能、振动和噪声、故障诊断以及可靠性方面可能的研究热点和方向。

**关键词:** 齿轮传动系统; 非线性动力学; 非线性方法; 多级齿轮; 变速器

中图分类号: TH132.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)05-0559-05

## Summary and outlook on gear system's kinetic study

TAN Xiu-feng, ZHANG Guo-wei, XIE Li-yang, HE Xue-hong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Gear system is widely used and often act an important role in essential equipment. Aiming at the problem that its vibration problem at high rotation speed, interior complex structure and various nonlinear factors bring huge difficulty to its kinetic analysis and design, to summarize its kinetic study is of theoretical significance. Based on the analysis and summary on gear transmission's dynamics research achievements, the basic framework of gear system's dynamics theory was described, the results indicate that the content includes system input, system model and system output. According to the research methods of nonlinear systems, the study on gear system's nonlinear dynamics and the research status of whole multi-stage gear system during past ten years were summarized, especially the typical automotive transmission, and the focus of future research was shown. Finally, the possible research focus and directions in dynamic behavior, vibration and noise, fault diagnosis and reliability of the transmission were put forward.

**Key words:** gear system; non-linear dynamics; nonlinear methods; multi-stage gears; transmission

## 0 引 言

齿轮传动系统动力学是研究齿轮传动系统在动态激励作用下动力学行为的一门工程科学<sup>[1]</sup>。齿轮传动系统在车辆、电力系统、矿山设备等行业的重要设备中发挥着关键的作用。这些设备的安全、稳定、可靠运

行关系到经济效益及社会生活的各个方面。大型化工企业如果停产一天, 其损失可达上百万元<sup>[2]</sup>。我国水泥行业中应用较广泛的水泥磨齿轮箱, 其故障可造成水泥每年至少减产 200 万吨<sup>[3]</sup>。

齿轮传动系统有 3 个明显的特点:

(1) 系统的转速高。有的转速甚至达到了数 10

收稿日期: 2013-12-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2012AA040104)

作者简介: 谭秀峰(1990-), 女, 蒙古族, 内蒙古赤峰人, 主要从事转子动力学和可靠性分析方面的研究. E-mail: tx02051@sina.com

通信联系人: 何雪泓, 女, 博士后, 副教授, 硕士生导师. E-mail: hxhly001@163.com

万转/分,这会产生严重的振动,因此,振动问题一直是系统动力学的研究重点;

(2)建模困难。所涉及到的机械零部件有多级齿轮副、转子和轴承等,从传动结构上来分有变速箱、原动机和负载等;

(3)求解困难。齿轮的间隙、时变刚度和齿面摩擦等,轴承的间隙和不同结构形式带来的不同刚度形式等,转子(轴)的不同支撑形式和间隙带来的松动等,这些非线性因素使得系统的求解变得非常困难,如果再考虑到齿轮传动系统中可能存在的各种故障,则模型更为复杂<sup>[4]</sup>。

这些问题给齿轮传动系统动力学分析、设计带来了巨大的困难。

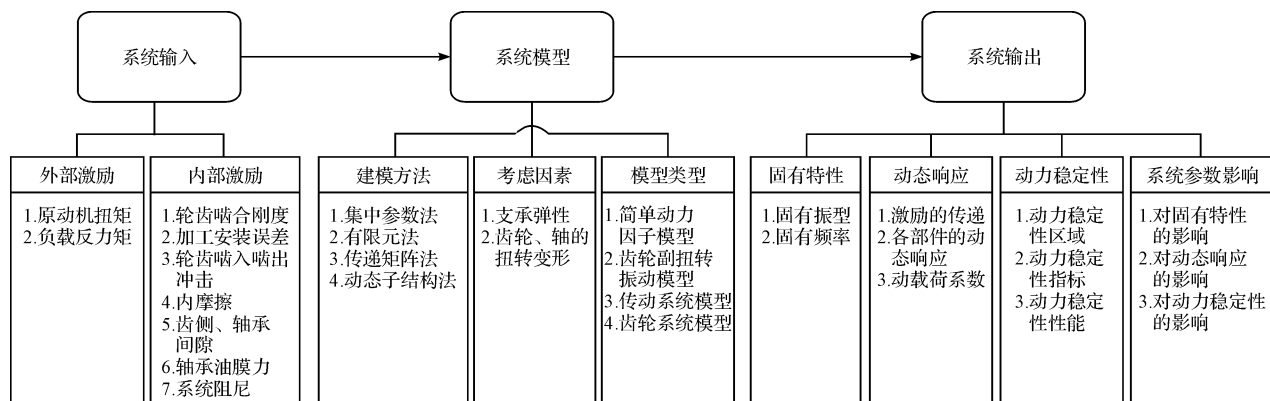


图1 齿轮传动系统理论体系

近30年来,非线性动力学的发展使人们不断把新观点、新方法引入到齿轮传动系统的动力学分析中。许多线性方法无法解释的分岔、跳跃、极限环、混沌等现象终于被揭示出来<sup>[6]</sup>。

非线性问题包括两种模型:

(1)非线性时不变模型。齿轮传动过程中,由于制造、安装以及润滑的需要,间隙是必然存在的,间隙可以是齿侧间隙或滚动轴承间隙<sup>[7-10]</sup>,这种非线性模型没有考虑啮合刚度的时变性<sup>[11-13]</sup>;

(2)非线性时变模型。这种模型在考虑间隙非线性的同时,也考虑了啮合刚度的时变性,从而把齿轮系统作为非线性的参数振动问题进行研究<sup>[14]</sup>。

国内外许多学者已针对齿轮-转子系统的动力学特性进行了大量的研究,研究表明:影响齿轮-转子-滑动轴承系统振动特性的非线性因素主要包括齿轮啮合力和滑动轴承的油膜力等<sup>[15]</sup>。另外,转子和联轴器等系统的材料及几何非线性、滚动轴承的间隙、内阻尼、内摩擦力,密闭环中的流体作用力等,也是非线性的重要来源。

目前,关于齿轮传动系统的非线性动力学研究

本研究主要根据国内外的研究成果,阐述齿轮传动系统非线性动力学理论的基本框架,对齿轮传动系统的非线性动力学研究方法进行综述;对含多级齿轮传动的系统整体动力学研究进行分析总结,特别是对典型的车用变速器动力学的问题进行分析;最后,针对变速器动力学,提出其在动态特性、振动和噪声、故障诊断以及可靠性方面可能的研究热点和方向。

## 1 齿轮传动系统的非线性动力学研究

在齿轮传动系统动力学的研究中,主要包括的3方面内容<sup>[5]</sup>,齿轮传动系统理论体系如图1所示。

主要有3种方法:即近似解析法、数值法和实验法,现将10年来各学者的研究成果综述如下。

### 1.1 解析法

解析法难以研究初值对系统非线性行为的影响,这是近似解析法的共同缺点,一般仅能用来考虑齿轮非线性啮合力的单自由度和两个自由度的系统<sup>[16]</sup>。

#### 1.1.1 分段技术

分段技术是将齿轮非线性系统按照区间进行分块,在每一个区间形成一个时变线性系统再进行求解。

柴山等<sup>[17]</sup>发现只有分段段数足够多时,用分段法求得的结果才与积分法达到一致的结果。王雷<sup>[18]</sup>建立了一般的综合考虑时变刚度、惯量的非圆齿轮扭转振动动力学微分方程组,提出了逐段线性近似的求解方法,并采用方程的解析解来代替数值解法。刘晓宁<sup>[19]</sup>分别建立了具有分段线性特征的单自由度非线性动力学模型、综合考虑齿侧间隙和时变啮合刚度的三自由度非线性动力学模型。

#### 1.1.2 能量法

振动量的大小直接取决于能量输入的强度,用振

动功率流对结构振动特性进行评价,可较传统的动力响应分析更好地揭示出振动系统的综合动态特性,因而受到越来越多的重视。

邵毅敏<sup>[20]</sup>提出了能量保持因子概念,用来描述其能量通过多界面的损耗关系,并通过实验获得了多界面的能量关系与能量保持因子的系数表。冯婧<sup>[21]</sup>在动力学建模的基础上探讨了应用能量分析研究系统非线性振动特性的方法,随后推导了系统运动方程和振动功率流函数的时域仿真算法。陈思雨<sup>[22]</sup>提出了用改进的能量法求解其周期响应的方法,详细推导了该法的求解过程,得到了系统振动幅频特性曲线。

### 1.1.3 增量谐波平衡法(IHB)

增量谐波平衡法是在谐波平衡法的基础上发展起来的。增量谐波平衡法可以弥补谐波平衡法解的精度取决于谐波项个数的缺点,对于一般的非线性系统可以方便地求取任意阶近似解。

杨绍普等<sup>[23-24]</sup>利用 IHB,对直齿轮副的非线性动力学进行了研究,考虑了时变啮合刚度和间隙,得到了这类模型统一形式的解,同时研究了外激励幅值、阻尼比以及系统的分岔特性对系统幅频曲线的影响。刘振皓<sup>[25]</sup>运用 IHB 对包含时变啮合刚度、齿侧间隙与综合啮合误差的 Ravnigneaux 式复合行星齿轮传动系统纯扭转动力学微分方程组进行求解,得到了系统的基频稳态响应。目前还出现了一些改进的增量谐波平衡法<sup>[26-27]</sup>。

## 1.2 数值法

数值方法是通过数值法求解非线性微分方程,得到非线性系统在特定初始条件和参数下的运动规律。但是该方法不能给出解的表达式,故无法对系统的整体作定性分析。但数值方法可作为一种验证非线性振动问题近似解析解或者发现新现象的主要方法。

尚志勇<sup>[28]</sup>采用 Newmark 方法求解了含有松动与碰摩耦合故障的转子-轴承系统系统的响应,用 Poincare 映射、轴心轨迹和频谱图分析各个转子-轴承系统在特定参数下的运动特征。陈会涛<sup>[29-30]</sup>等基于齿轮动力学理论和 Lagrange 方程,通过数值仿真得到了载荷和参数随机变异时系统各响应量和齿轮副间动态啮合力的统计特征。陈小安<sup>[31]</sup>提出了一种基于有限单元法的多间隙耦合齿轮传动系统的非线性动态特性分析方法。

### 1.3 实验法

实验方法作为一种重要的辅助方法,不仅可用于验证理论研究的正确性,也可用来修正理论分析模型。但因为受试验中各种误差的影响,通过试验来精确研

究齿轮系统的非线性动力学行为也具有一定的困难。

马锐等<sup>[32]</sup>通过试验提取含有裂纹故障齿轮的振动特征,验证了理论分析的结果。周长江<sup>[33]</sup>从理论和实验 2 个方面对复杂润滑状态下齿面摩擦因数的计算方法作了深入的系统研究。韩志武等<sup>[34]</sup>以工程仿生学和有限元理论为基础,并通过激光雕刻技术将仿生表面形态加工在齿面上,进行实际的台架试验。

## 2 含多级齿轮传动的系统整体动力学研究

对于多级齿轮传动系统,除了动力学模型的自由度数量增加以外,还存在整个齿轮系统包括各级齿轮轴、各级齿轮、轴承、箱体及原动机等多种振动耦合的综合作用以及各种内部激励的非线性特性,这些都给系统的动态分析带来了困难。

林腾蛟等<sup>[35]</sup>建立了锥-平行轴-行星多级齿轮传动系统包含时变啮合刚度、啮合阻尼等因素的 18 自由度弯-扭-轴耦合非线性动力学模型,采用 4~5 阶变步长 Runge-Kutta 法对动力学微分方程进行了求解。崔亚辉等<sup>[36]</sup>提出一种新的求解方法,可用该方法求出多级齿轮系统的动态啮合力,采用数值仿真方法求解了系统的动态频率响应。

在现阶段,多级齿轮传动系统整体模型的降阶处理,系统中各连接部位、边界处、轴承处的刚度和阻尼以及动载荷处理,寻找出其动力学计算的一般方法,具有重要的理论意义和现实意义。

特别需要指出的是,汽车变速器作为一种典型的多级齿轮传动系统,学者们已经对其动力性能进行了一些研究<sup>[37-39]</sup>。除了需要考虑上述问题外,汽车变速器还需要考虑换挡过程中的冲击力对变速器动力性能的影响<sup>[40]</sup>。换挡过程还涉及到操纵机构、同步器和离合器的配合,研究它们自身参数对换挡力与换挡时间的影响同样增加了问题的复杂性<sup>[41]</sup>。随着变速器档位数的增多,如何降低噪声、减少震动和加强换挡连续性以提高驾驶员换挡舒适感是动力学亟需解决的问题。

## 3 结束语

本研究根据对国内外齿轮传动系统动力学研究成果的分析总结,阐述了齿轮传动系统非线性动力学理论的基本框架;综述了 10 年来齿轮传动系统的非线性动力学的研究方法,包括解析法、数值法和实验法;分析总结了含多级齿轮传动的整体系统的动力学研究现状,其重点问题在于模型的降阶、内部激励和边界条件

的处理;特别对典型的车用变速器动力学问题进行了分析,如何降低噪声、减少震动和加强换挡连续性以提高驾驶员换挡舒适感是其动力学亟需解决的问题。

随着齿轮传动系统非线性动力学研究的深入,以下几个方面可能成为变速器动力学研究的热点问题:

(1)变速器动态性能的全面分析。由于整个变速器的振动是轴、齿轮、轴承、箱体及原动机等多种振动耦合的综合作用,研究者可利用有限元、实验模态分析技术等方法进行整个变速器系统的建模及结构设计,对系统动力性能进行优化。

(2)变速器系统的振动和噪声控制。研究者通过对系统输出响应的研究,了解振动机理,从而设计出平稳性好和噪声低的变速器系统,提高系统的有效寿命。

(3)变速器系统非线性动力学中的故障诊断问题。研究者通过研究变速器带故障的齿轮系统,以及齿轮啮合刚度、传递误差和啮合冲击等与轮齿破坏的关系,对其频谱机理进行分析,可对故障诊断进行指导,在理论和工程上均具有重要的价值。

(4)变速器系统非线性动力学中的可靠性问题。复杂零件受力的概率分布函数的确定、对系统考虑载荷多次作用、强度退化的可靠性模型建立和对具有失效相关性模式的系统可靠度的计算等问题都是进行可靠性分析亟待解决的问题。研究者可在分别建立轴承系统、齿轮传动系统、离合器或联轴器以及齿轮箱体的可靠性计算模型的基础上,开展变速器整体的可靠性研究。

## 参考文献(References):

- [1] 李润方,王建军. 齿轮系统动力学—振动、冲击、噪声[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [2] 李明,孙涛,胡海岩. 齿轮传动转子—轴承系统动力学研究进展[J]. 振动工程学报,2002,15(3):249-256.
- [3] 陈克兴,李川奇. 设备状态监测与故障诊断技术[M]. 北京:科学技术文献出版社,1991.
- [4] 申永军,杨绍普,李伟. 齿轮系统非线性动力学研究进展及展望[J]. 石家庄铁道学院学报,2005,18(4):5-10.
- [5] 王建军,李其汉,李润方. 齿轮系统非线性振动研究进展[J]. 力学进展,2005,35(1):37-51.
- [6] 陈予恕. 非线性振动[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [7] KAHRAMAN A, SINGH R. Interactions between time-varying mesh stiffness and clearance non-linearities in a geared system[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, 146(1):135-156.

- [8] CAI Y. Simulation on the rotational vibration of helical gears in consideration of the tooth separation phenomenon(a new stiffness function of helical involute tooth pair)[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1995, 117(3):460-469.
- [9] KAHRAMAN A, BLANKENSHIP G W. Interactions between commensurate parametric and forcing excitations in a system with clearance[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 194(3):317-336.
- [10] THEODOSSIADES S, NATSIAVAS S. Non-linear dynamics of gear-pair systems with periodic stiffness and backlash[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 229(2):287-310.
- [11] KAHRAMAN A, SINGH R. Nonlinear dynamics of a spur gear pair[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, 142(1):49-75.
- [12] KAHRAMAN A, SINGH R. Nonlinear dynamics of a geared rotor-bearing system with multiple clearances[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, 144(1):469-506.
- [13] 唐增宝,朱毅芳. 齿轮传动的振动分析与动态优化设计[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1994.
- [14] 王立华,李润方,林腾蛟,等. 齿轮系统时变刚度和间隙非线性振动特性研[J]. 中国机械工程,2003,14(13):1143-1146.
- [15] OZGUVEN H N. A non-linear mathematical model for dynamic analysis of spur gears including shaft and bearing dynamics[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, 145(2):239-260.
- [16] 崔亚辉. 齿轮—转子—滑动轴承系统非线性动力学特性的理论和试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学能源科学与工程学院,2009.
- [17] 柴山,高连勇. 用积分法计算直齿轮轮齿的弹性变形[J]. 机械设计,2005,22(2):48-50.
- [18] 王雷. 非圆齿轮动力学特性研究[D]. 郑州:郑州大学机械工程学院,2008.
- [19] 刘晓宁. 齿轮系统的混沌控制及仿真[D]. 西安:西北工业大学机电学院,2007.
- [20] 邵毅敏,陈再刚,周晓君,等. 冲击振动能量通过“齿轮—轴—轴承—轴承座”多界面传递损耗研究[J]. 振动与冲击,2009,28(6):2-9.
- [21] 冯婧. 齿轮非线性系统的数值仿真与功率流分析[D]. 济南:山东大学机械工程学院,2009.
- [22] 陈思雨. 一种新的齿轮非线性振动数学模型建模与分析求解研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2007.
- [23] SHEN Yong-jun, YANG Shao-pu, PAN Cun-zhi, et al. Nonlinear dynamics of a spur gear pair with time-varying stiffness and backlash[J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2004, 23(3):178-187.

(下转第 577 页)

## 本文引用格式:

谭秀峰,张国伟,谢里阳,等. 齿轮传动系统的动力学研究与展望综述[J]. 机电工程,2014,31(5):559-562,557.

TAN Xiu-feng, ZHANG Guo-wei, XIE Li-yang, et al. Summary and outlook on gear system's kinetic study[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(5):559-562,557.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

- 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 & Electrical Engineering, 2014, 31(5):573-577. [《机电工程》杂志: http://www.meem.com.cn](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]