

# 汽车转向系统回正力矩模型的比较及仿真研究

杨翔宇<sup>1</sup>, 吕世明<sup>2</sup>, 李楠<sup>2</sup>, 徐腾飞<sup>2</sup>

(1.重庆理工大学 机械工程学院, 重庆 400054; 2.重庆理工大学 车辆工程学院, 重庆 400054)

**摘要:**在汽车转向系统中电动助力转向系统已经成为研究的重点, 其中, 回正力矩模型的建立则是一个核心问题。根据回正力矩产生的原理, 选择了 Mitschke 模型、回正力矩半经验模型、Reimpell 模型三种典型的回正力矩模型, 通过改变模型中轮胎的侧偏角和垂直载荷, 对回正力矩大小进行对比。对比结果表明, 在相同情况下三种模型回正力矩逐渐增大, 且回正力矩随着侧偏角和垂直载荷的变化而改变。通过仿真对比分析确定了适合不同轴距和整备质量的汽车电动助力转向系统回正力矩基础模型。

**关键词:**电动助力转向系统, 回正力矩, 侧偏角, 垂直载荷

**中图分类号:** TH16    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3997(2016)02-0258-05

## Comparison and Simulation of Aligning Torque Models of Vehicle Steering System

YANG Xiang-yu<sup>1</sup>, LV Shi-ming<sup>2</sup>, LI Nan<sup>2</sup>, XU Teng-fei<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400054, China;

2.School of Vehicle Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** In the vehicle steering system, Electric Power Steering system (EPS) has been the research focus in the establishment of the aligning torque models. According to the principle of aligning torque generated to chose Mitschke model, aligning torque semi-empirical model and Reimpell model are three typical aligning torque models. Then changing the slip angle and vertical force in the model it compares the aligning torque. The results show that the aligning torque of the three typical models gradually become larger under the same conditions and the aligning torque changes with slip angle and vertical force. By the simulation to determine an aligning torque foundation model of EPS it is suitable for different wheel base and curb weight.

**Key Words:** Electric Power Steering System(EPS); Aligning Torque; Slip Angle; Vertical Force

## 1 引言

汽车的回正性能表征了汽车从曲线行驶自行回复到直线行驶的能力, 是汽车操纵稳定性和转向性能的一个重要评价指标并且关乎汽车驾乘人员的舒适性和安全<sup>[1-3]</sup>。如今汽车已朝着节能环保的方向发展, 汽车转向系统也由机械转向系统向电动助力转向发展<sup>[4]</sup>。由于结构发生了变化, 转向系统的回正性能也有相应的一些变化。在机械转向系统和液压助力转向系统中, 路面和轮胎之间产生的回正力矩可以通过转向系统的机械连接传递到转向机构中使车轮回正。

在电动助力转向系统中, 当驾驶员完成转向松开方向盘过后, 转向 ECU 根据转向力矩和方向盘转角等信号判断汽车是否需要回正。若需要回正, 则电池提供一定的电流给助力电机使其产生一个扭矩使车轮反转, 以达到回正的目的。但具体应当提供多大的回正力矩这仍然是值得研究的一个重点, 对于电动助力转向回正力矩的建模应当基于机械转向系统和液压助力转向系统

进行设计, 从回正力矩产生的原理入手。目前国内外有几种比较典型的回正力矩模型, 通过对这几种模型进行对比研究, 可以为电动助力转向系统回正力矩模型的建立提供基础。

## 2 回正力矩模型

从转向理论发展至今, 国内外大多学者都是在轮胎和转向杆系的受力分析基础上对回正力矩进行研究, 并且根据受力的变化情况建立回正力矩的数学模型。

### 2.1 Mitschke 模型

在 1990 年, 德国汽车专家 Manfred Mitschke<sup>[4]</sup>由轮胎的侧偏理论以及轮胎的受力, 得到了侧向力以及回正力矩的表达式:

$$F_y = k\alpha \quad (1)$$

$$M_{z1} = k \cdot n_R \cdot \alpha \quad (2)$$

式中:  $F_y$ —轮胎侧向力;  $k$ —侧偏刚度;  $\alpha$ —车轮侧偏角;  $n_R$ —轮胎拖距;  $M_{z1}$ —轮胎回正力矩。

当汽车在行驶的过程中会受到路面以及侧向风等因素的影

来稿日期: 2015-08-04

基金项目: 重庆市应用开发计划项目(cstc2014yykfb70008); 重庆理工大学研究生创新基金(YCX2014203)

作者简介: 杨翔宇, (1953-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 教授, 主要研究方向: 机械传动

响,会在车轮与地面之间产生沿着车轮轴线向外的侧向力,相应的车轮前进方向与汽车速度方向之间会形成一个夹角,此夹角称之为侧偏角<sup>9</sup>。在车轮行驶的过程中会产生轮胎拖距,它与侧向力共同作用产生了轮胎的回正力矩。

### 2.2 回正力矩半经验模型

对于变化载荷下的回正力矩求解往往是很复杂的,而郭孔辉院士在轮胎侧偏特性的基础上提出了回正力矩的半经验模型<sup>9</sup>,此模型通过拟合回正力臂的变化使得求解更加的简化,其简化受力图,如图 1 所示。

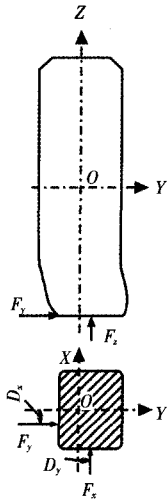


图 1 轮胎受力示意图  
Fig.1 Schematic of Tire Force

在 XOY 平面中轮胎受到 X 方向(侧向)和 Y 方向(纵向)的作用力,并且分别产生了偏距  $D_y$  和  $D_x$ 。总的回正力矩可以简化为两部分组成:

$$M_{z2} = F_y \cdot D_x + F_x \cdot D_y \quad (3)$$

式中:  $F_x$ —轮胎纵向力;  $F_y$ —轮胎侧向力;  $D_x$ —轮胎纵向拖距;  $D_y$ —轮胎横向偏距;  $M_{z2}$ —车轮的回正力矩。

### 2.3 Reimpell 模型

除了上述两种典型的模型外,德国汽车专家 Prof. J.Reimpell 教授在其对底盘讲解的丛书对汽车转向过程中回正力矩的计算也进行了详细的阐述。在车轮接地面上存在三个力—垂直力  $F_z$ 、侧向力  $F_y$  以及纵向力  $F_x$ ,若这三个力具有能产生力矩的力臂那么就可以使转向系统在转弯后回正<sup>10</sup>。

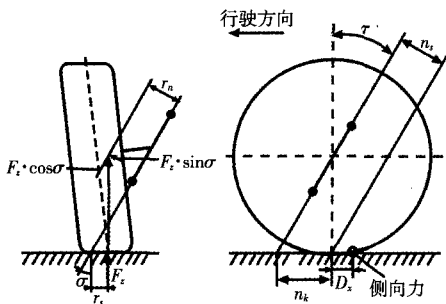


图 2 轮胎受力与主销关系示意图

Fig.2 Schematic of Tire Force and Kingpin Relationship

图 2 左侧为轮胎的正视图,车轮接地点受到向上的垂直力  $F_z$ ,将这个力移向车轮中心,并按转向节轴线方向和其垂直方向分解,由此会产生一个使车轮沿主销回正的力矩,此时由垂直力

产生的回正力矩为:

$$M_{z3} = F_z \cdot \sin\sigma \cdot \sin\sigma_m \cdot r_n \quad (4)$$

式中:  $M_{z3}$ —垂直力产生的回正力矩;

- $F_z$ —垂直力;
- $\sigma$ —主销内倾角;
- $\sigma_m$ —平均转向角;
- $r_n$ —垂直力臂。

图 2 右侧为轮胎的侧视图,车轮受到向外的侧向力  $F_y$  且与轮胎的接地中心产生了  $D_x$  的轮胎拖距,主销与接地中心的距离为  $n_s$ 。所以侧向力的力臂为  $n_s$  与  $D_x$  在主销方向上的投影之和,在计算中还需考虑主销内倾的影响,这一部分的回正力矩计算式为:

$$M_{z3} = F_y \cdot \cos\sigma \cdot (n_s + D_x \cdot \cos\tau) \quad (5)$$

式中:  $M_{z3}$ —侧向力产生的回正力矩;  $F_y$ —侧向力;  $D_x$ —轮胎拖距;  $n_s$ —主销与接地中心的距离;  $\tau$ —主销后倾角。

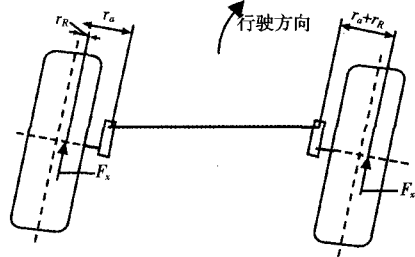


图 3 纵向力及其力臂示意图  
Fig.3 Schematic of Vertical Force and Arm

如图 3 所示,以前轮驱动型式汽车受力为例,在转向过程中轮胎纵向力同样也可以产生使车轮回正的力臂,这一部分回正力矩以及总的回正力矩的计算式分别为:

$$M_{z3}'' = -F_x (r_a - r_R) + F_x (r_a + r_R) = F_x \cdot 2 \cdot r_a \quad (6)$$

$$M_{z3} = M_{z3}' + M_{z3}'' + \frac{M_{z3}''}{2} \quad (7)$$

式中:  $M_{z3}''$ —左右轮纵向力产生的回正力矩;  $F_x$ —纵向力(驱动力);  $r_a$ —主销到车轮纵向平面的距离;  $r_R$ —纵向力到纵向平面的距离。

### 3 模型的对比

这三种模型虽然都是为了计算回正力矩,但是这三种模型仍然存在着不同。主要是在产生回正力矩的力以及其力臂上的不同。在力臂上, Mitschke 模型和回正力矩半经验模型都是以轮胎的接地中心作为回正力矩的取矩中心,计算的是轮胎的回正力矩。而 Reimpell 模型是将转向系统的主销作为取矩中心,计算的是转向系统的回正作用。在作用力上, Mitschke 模型考虑了侧向力对回正的影响,回正力矩半经验模型则是将回正力矩简化成了侧向力以及纵向力的共同作用,而 Reimpell 模型不仅仅考虑了这两种力的共同作用,还将轮胎受到的垂直载荷对回正力矩的影响也进行了分析。

由于三种模型的计算方法不同,不同的变量对于模型的计算都有影响,为了方便模型的对比,将这些变量都简化为侧偏角

和垂直载荷的变化。根据简化后的变量分别计算不同情况下三种模型的回正力矩的大小,从而对不同的模型进行对比。选择某一车型作为计算的基础,具体车体参数如表 1 所示,汽车的侧向力以及轮胎拖距变化情况,如图 4 所示。

表 1 车体参数  
Tab.1 Parameters of Vehicle

名称(单位)	数值	名称(单位)	数值
轮胎型号	205/55 R16	整备质量(kg)	1429
主销内倾角(°)	13.76	主销后倾角(°)	3
主销横向偏距(mm)	75.3998	前轮侧偏刚度(N/rad)	67419
轮胎有效旋转半径(mm)	310	轮胎空载半径(mm)	316

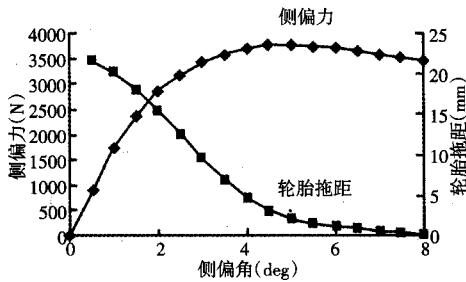


图 4 侧向力与轮胎拖距变化曲线  
Fig.4 Curve of Lateral Force and Pneumatic Trail

### 3.1 侧偏角对回正力矩的影响

由于侧向力对这三种回正力矩的计算都有影响,而侧偏角的变化直接影响侧向力的变化,所以可以通过改变侧偏角的大小来分别计算这三种模型的回正力矩。通过提供的车体参数以及侧偏角的变化计算并绘制出图 5 所示曲线。

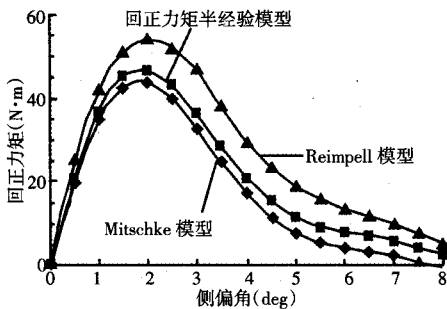


图 5 回正力矩随侧偏角的变化曲线  
Fig.5 Curve of Aligning Torque with Slip Angle Change

从图 5 可以看出三种回正力矩模型随着侧偏角的逐渐增大都有相同的变化趋势,在小角度侧偏的情况下回正力矩随着侧偏角的增大而逐渐增大,并且在侧偏角为 2°附近的时候达到最大值,过后随着侧偏角增大回正力矩减小。其次 Mitschke 模型、回正力矩半经验模型、Reimpell 模型的回正力矩逐次增大,这说明侧偏角和垂直载荷的改变的确会对回正力矩模型的值产生影响并且作用方式相同,但由于三种模型中的力和力臂不同,侧偏角和垂直载荷的变化会对这些力和力臂产生变化,所以会造成三者之间大小的差异。

由于侧向力会随着侧偏角的增大而逐渐增大,并由图 1 可以看出轮胎在纵向平面内的偏距也会随着侧向力变化而变化,从而增加了回正力矩半经验模型中回正力矩的值,因而半经验回正力矩模型的最大值点较 Mitschke 模型最大值点右移。同样,Reimpell 模型中垂直力的加入也使得回正力矩增大,回正力矩最

大值点也较前面两种模型的最大值点右移。

### 3.2 垂直载荷对回正力矩的影响

汽车在行驶的过程中除了侧偏角会经常变化以外,其所受的垂直载荷受路面不平等情况影响也时刻变化。空载和满载都会影响汽车转向系统的受力和其力臂的大小,从而影响车轮的回正力矩。计算中取侧偏角为 2°,在此侧偏角下分别计算三种回正力矩的大小。回正力矩随垂直力的变化曲线,如图 6 所示。

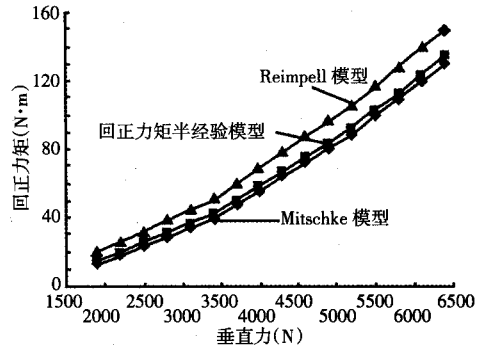


图 6 回正力矩随垂直力变化曲线  
Fig.6 Curve of Aligning Torque with Vertical Force Change

由图可以看出在侧偏角一定的情况下,这三种回正力矩模型的值都随着所加垂直载荷的增大而呈现上升的趋势。垂直力由小变大使得车轮在地面上的印迹也渐渐变大,由于轮胎拖距与车轮的印迹成正比,所以轮胎拖距也相应增大,从而导致回正力矩增大。

### 3.3 综合因素对回正力矩的影响

行驶过程中汽车通常是侧偏角和垂直载荷的共同作用,所以还应当考虑两种因素对回正力矩的综合影响。根据 Mitschke 模型的计算方法,然后分别计算不同垂直力和不同侧偏角下的回正力矩,并绘制出图 7 所示的回正力矩三维图。

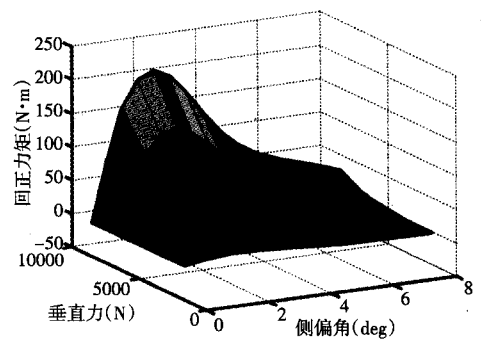


图 7 回正力矩三维图  
Fig.7 3D Map of Aligning Torque

从三维图中可以直观的看出回正力矩在侧偏角和垂直力的综合影响下的变化情况,每个侧偏角和垂直力都对对应一个回正力矩。在侧偏角为 2°,且垂直力最大的时候回正力矩达到了最大值。无论车轮受到多大的垂直力,回正力矩总是在侧偏角为 2°附近达到最大值,这和前面的结论是相互呼应的。

## 4 仿真分析

为了对电动助力转向系统回正力矩基础模型进行匹配,将根据对比结果并利用汽车动力学仿真软件 CaiSim 对三种模型进

行低速回正性能仿真,并比较三种模型的回正情况。

根据三种回正力矩的计算式在 Simulink 中建立回正力矩的仿真模型,在CarSim 中选择 B、C、D 三款车型对三种模型进行仿真,其车体参数如表 2 所示,车轮定位参数和表 1 所示相同。仿真时间设置为 90s,由于低速回正性能仿真为力输入控制,所以前 60s 在方向盘上设置一定的力矩使汽车沿半径为 (15±1)m 的圆周行驶,60s 过后将扭矩设置为 0。仿真过后分别得到如图 8~图 10 所示的仿真路径示意图和汽车方向盘转角曲线。

表 2 仿真车体参数

Tab.2 Parameters of Simulation Vehicle

B 级车		C 级车		D 级车	
整备质量(kg)	1111	整备质量(kg)	1429	整备质量(kg)	1837
轴距(mm)	2600	轴距(mm)	2600	轴距(mm)	3000
轮胎型号	185/65 R15	轮胎型号	205/55 R16	轮胎型号	205/55 R16

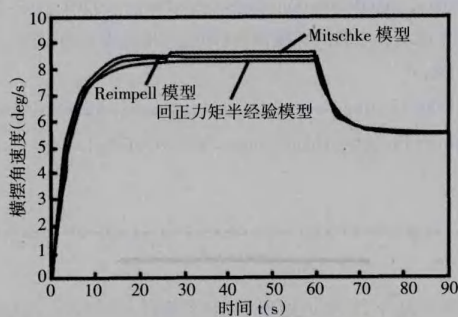
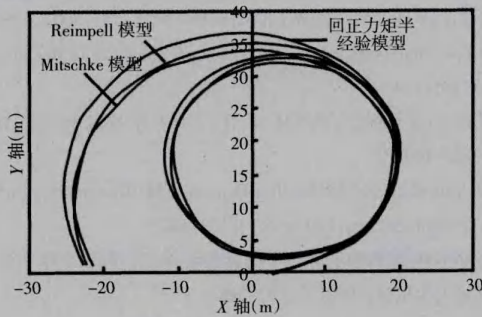


图 8 B 级车仿真结果

Fig.8 Simulation Results of B-Class

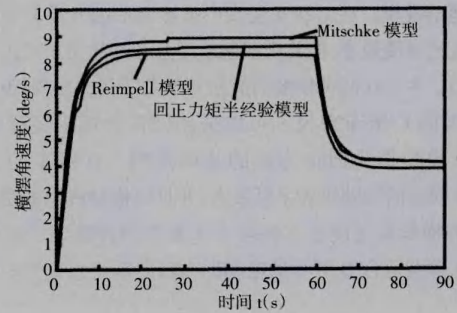
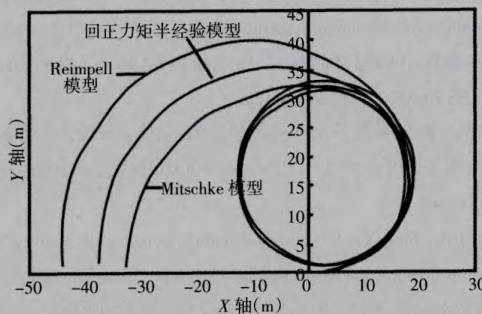


图 9 C 级车仿真结果

Fig.9 Simulation Results of C-Class

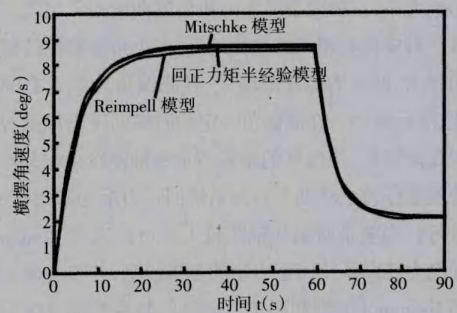
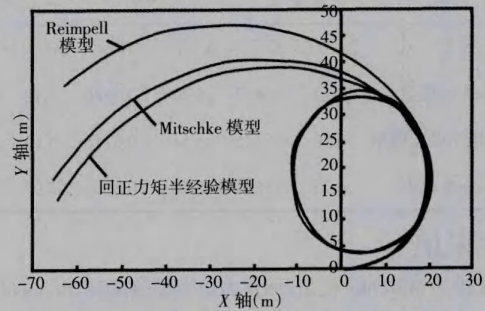


图 10 D 级车仿真结果

Fig.10 Simulation Results of D-Class

仿真结果示意图左侧为仿真过程中汽车的行驶轨迹,右侧为汽车横摆角速度变化情况。当撤去方向盘上的力输入后各仿真模型都有明显的回正作用并且方向盘回了一定的角度,这说明这三种模型在作为电动转向助力转向系统回正力矩基础模型的时候都有一定的回正效果,但需要在基础模型上添加其他控制策略才能满足完全回正的要求。

在对电动助力转向性能进行评价的时候,可采用松开方向盘 3s 时的残留横摆角速度绝对值  $\Delta r(^{\circ}/s)$  和横摆角速度总方差  $E_r(s)$  两项指标来评价转向回正性<sup>[9]</sup>。仿真过后的回正性评价指标数据,如表 3 所示。

根据仿真过后的结果可以看出在 B 级车的回正过程中,回正力矩半经验模型的行驶半径较其余两种模型稍大,且残留横摆角速度绝对值和横摆角速度总方差也比 Mitschke 模型和 Reimpell 模型更小。这说明在 B 级车的仿真中回正力矩半经验模型的回正效果更好,更适合作为 B 级车的电动助力转向系统回

正力矩基础模型。在 C 级车仿真中虽然 Reimpell 模型的残留横摆角速度绝对值最小,但其横摆角速度总方差却大于回正力矩半经验模型。由于这两种模型的值差异不大,所以对于轴距和整备质量较大的 C 级车来说,可以采用回正力矩半经验模型和 Reimpell 模型作为回正力矩的基础模型。D 级车的仿真中 Reimpell 模型的行驶轨迹半径最大,并且该模型残留横摆角速度绝对值和横摆角速度总方差均小于其它两种模型,由此说明 Reimpell 模型适合 D 级车的电动助力转向系统回正力矩基础模型。

表 3 回正性评价指标  
Tab.3 Evaluation Index of Turning Performance

车型	B 级车		C 级车		D 级车	
	$\Delta r(^{\circ}/s)$	$Er(s)$	$\Delta r(^{\circ}/s)$	$Er(s)$	$\Delta r(^{\circ}/s)$	$Er(s)$
Mitschke 模型	6.72	0.5452	5.70	0.6986	5.12	2.1038
回正力矩半经验模型	6.56	0.5425	5.54	0.6713	5.13	2.1344
Reimpell 模型	6.73	0.5647	5.20	0.6801	4.92	2.1001

## 5 结束语

选择了 Mitschke 模型、回正力矩半经验模型、Reimpell 回正力矩模型,通过改变车轮受到的侧偏角和垂直载荷计算三种模型的回正力矩大小,三种模型回正力矩值逐渐增大。当垂直载荷一定的时候三种模型有相同的变化趋势,在小角度侧偏的情况下随着侧偏角增大,回正力矩逐渐增大,在侧偏角为  $2^{\circ}$  左右的时候达到最大值,随后减小。在侧偏角一定的时候回正力矩随着垂直载荷的增大逐渐增大。当汽车的整备质量和轴距较小时选择回正力矩半经验模型作为电动助力转向系统回正力矩的基础模型,其回正效果较好;当整备质量和轴距较大时可以选择 Reimpell 模型作为电动助力转向系统回正力矩的基础模型;若整备质量和轴距适中,则 Reimpell 模型和回正力矩半经验模型都可作为回正力矩的基础模型。

## 参考文献

[1] 尹安东.汽车试验学[M].合肥:合肥工业大学出版社,2011:156-170.  
(Yin An-dong.Automobile Test Science [M].Hefei:Hefei University of Technology Publishing House,2011:156-170.)

[2] 向丹,李武波,杨勇.电动助力转向系统回正控制及其仿真研究[J].机械设计与制造,2012(8):115-117.  
(Xiang Dan, Li Wu-bo, Yang Yong.Study on return-to-center control and simulation for electric power steering system [J].Machinery Design and Manufacture,2012(8):115-117.)

[3] 赵万忠,徐晓宏,赵婷.新型汽车动力转向技术发展综述[J].汽车工程学报,2012(6):393-399.  
(Zhao Wan-zhong, Xu Xiao-hong, Zhao Ting.Review on theory and development of current automotive power steering system [J].Chinese Journal of Automotive Engineering,2012(6):393-399.)

[4] (德)M·米奇克著.汽车动力学 C 卷[M].陈荫三译.北京:人民交通出版社,1997(9):6-20.  
(Manfred Mitschke.Vehicle Dynamics [M].Chen Yin-san Translation. Beijing:China Communications Press,1997(9):6-20.)

[5] 余志生.汽车理论第四版[M].北京:机械工业出版社,2007:135-144.  
(Yu Zhi-sheng.Automobile Theory [M].Beijing:China Machine Press, 2007:135-144.)

[6] 郭孔辉.汽车操纵动力学[M].长春:吉林科学技术出版社,1991,12(1):123-140.  
(Guo Kong-hui.Vehicle Handling Dynamics[M].Changchun:Jilin Science and Technology Press,1991,12(1):123-140.)

[7] (德)耶尔森·赖姆帕尔著.汽车底盘基础[M].张洪欣,余卓平译.北京:科学普及出版社,1992(9):192-218.  
(J.Reimpell.Automobile Chassis Base [M].Zhang Hong-xing, Yu Zhuo-ping Translation.Beijing:Popular Science Press,1992(9):192-218.)

[8] 林风涛.电动助力转向性能评价研究[J].机械设计与制造,2008(4):135-137.  
(Lin Feng-tao.Study on evaluation of steering performance of EPAS[J]. Machinery Design and Manufacture,2008(4):135-137.)

(上接第 257 页)

(Ma Liang, Li Yun-tao, Yang Xue-feng.LabVIEW electronic equipment fault detection system [J].Computer system application,2012(8):152-155.)

[7] 宋春华.高档注塑机的发展动向[J].机床与压,2012,40(2):122-125. DOI:10.3969/j.issn.1001-3881.2012.02.041.  
(Song Chun-hua.The development trend of the high-grade injection molding machine [J].Machine Tool and Press,2012,40(2):122-125. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2012.02.041.)

[8] 焦志伟,安琪,谢鹏程.新型注塑机合模机构内循环节能机理[J].机械工程学报,2012,48(10):153-159.DOI:10.3901/JME.2012.10.153.  
(Jiao Zhi-wei, An Ying, Xie Peng-cheng.The new injection molding machine clamping mechanism circulation within the energy saving mechanism [J].Journal of Mechanical Engineering,2012,48(10):153-159.DOI: 10.3901/JME.2012.10.153.)

[9] 阎亚林,彭志平,郑利文.现代注塑机控制技术的现状与展望[J].机械设计与制造,2004(4):106-108. DOI:10.3969/j.issn.1001-3997.2004.04.056.  
(Yan Ya-lin, Peng Zhi-ping, Zheng Li-wen.Current situation and prospect of modern injection molding machine control technology [J].Journal of Mechanical Design and Manufacturing,2004(4):106-106.The DOI:10.39-69/j.i SSN.1001-3997.2004.04.056.)

[10] 杜建铭,谢金铎.基于 AMESim 的注塑机锁模系统设计与仿真[J].机床与液压,2011,39(23):127-129. DOI:10.3969/j.issn.1001-3881.20-11.23.036.  
(Du Jian-ming, Xie Jin-duo.Design and simulation of injection molding machine clamping system based on AMESim [J].Journal of machine tools and hydraulic,2011,39(23):127-127.The DOI:10.3969/j.i SSN.1001-3881.2011.23.036.)