

类菱形车电控后轮随动转向系统研制

吴乙万 黄 智 钟志华

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙,410082

摘要:针对类菱形车前后轮机械转向机构的传动机构复杂、系统布置困难等不足,提出电控后轮随动转向系统(ECSS)设计方案,介绍了ECSS的基本构成和工作原理。在Simulink中建立了ECSS仿真模型,采用零偏角控制策略确定了后轮随动转向比例系数,在阶跃转向工况下,仿真分析了ECSS对车辆操纵稳定性的影响。仿真结果表明,采用ECSS后,类菱形车的高速操纵稳定性得到了一定的改善。研制了ECSS样机,并在实车上对样机的主要功能进行了试验验证。试验结果表明,ECSS能快速、准确且稳定地实现后轮随动转向的控制。

关键词:类菱形车;后轮随动转向;前轮比例前馈控制;仿真与试验

中图分类号:U461

文章编号:1004—132X(2011)16—2011—05

Development of Electric Rear Wheel Compliance Steering System for Rhombic Vehicle

Wu Yiwan Huang Zhi Zhong Zhihua

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha, 410082

Abstract: Based on the analysis of the disadvantages of a mechanical steering transmission mechanism installed on the rhombic vehicle, such as its complicated mechanism and its layout problem, a scheme for electric compliance steering system (ECSS) was presented and the structure and working principles of ECSS were introduced. An ECSS simulation model was established in Simulink, by the method of zero-angle controlling strategy the proportion of rear-wheel steering servo coefficient was determined and the stimulation analysis for the effect of the ECSS on the vehicle under the stepping steering condition was carried on. The simulation indicates that by adopting the ECSS, the high speed manipulating stability of the rhombic vehicle is improved. The model of ECSS was made and the main function of it was tested in vehicle. The test results indicate that the ECSS can realize the rear wheel quickly, accurately, and complete stable compliance steering control.

Key words: rhombic vehicle; rear wheel compliance steering; front wheel proportional feedforward control; simulation and experiment

0 引言

类菱形车共有3根轮轴,前后各布置1个车轮,中间轮轴布置2个车轮,采用菱形的底盘和车身设计,整车呈梭形。相对传统底盘,类菱形车在安全性、机动性和燃油经济性等方面具有一定的优势^[1]。

类菱形车的转向系统由转向操纵机构、转向器和转向传动机构三大部分组成。查云飞等^[2-3]、黄智等^[4]对类菱形车的转向性能进行了研究,提出的转向传动机构可以获得较小的转弯半径,但存在以下不足:①前后轮转向角比例系数为固定值(-1),为使类菱形车获得与普通车相似的高速转向性能,所需的转向传动机构复杂。②转向系统布置困难。类菱形车的前后轮为转向轮,中轮

为驱动轮,转向传动机构受悬架、动力布置及地板高度的限制,设计难度大。

笔者针对类菱形车机械转向机构存在的不足,研制了电控后轮随动转向系统(electric compliance steering system, ECSS)。该系统保留了原有的前轮机械转向结构,后轮采用电控随动转向,前后轮转向角比例系数可根据车辆的工况自动调整。

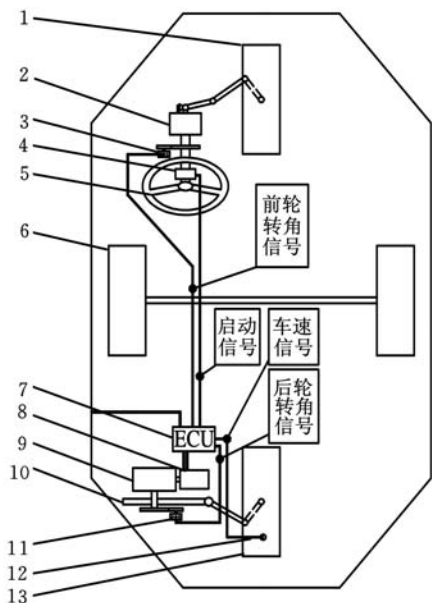
1 类菱形车电控后轮随动转向系统构成及工作原理

1.1 电控随动转向系统的构成及布置

类菱形车电控后轮随动转向系统底盘布置如图1所示,保留前轮机械转向结构,去除中间传动杆系,后轮直接由电动机控制转向。系统主要由前轮转角传感器、后轮转角传感器、车速传感器、电控单元(ECU)、转向电机、减速器、齿轮齿条式机械转向机构等组成。

收稿日期:2010—10—26

基金项目:教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(531105050037);湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主研究课题资助项目(61075002)



1.前轮 2.方向机 3.前轮转角传感器 4.组合开关 5.方向盘
6.中轮 7.控制器 8.直流电机 9.减速机构 10.齿轮齿条
传动机构 11.后轮转角传感器 12.车速传感器 13.后轮

图 1 类菱形车电控随动转向底盘布置图

1.2 电控后轮随动转向系统工作原理

车辆转向时,车轮转角传感器和车速传感器实时检测前后车轮的转角及车速,控制器根据传感器输入信号计算后轮目标转角和电机输出力矩。电机的输出力矩由减速机构减速增扭后通过齿轮齿条式机械转向器驱动后轮转向,直至后轮转向至目标角度。

1.3 电控后轮随动转向系统的优点

(1)后轮电控随动转向系统的前后轮转角比例系数可变,低速时前后轮转向相反,具有较小转弯半径,中高速时后轮随动转向角减小甚至前后轮同向,改变后轮转向角可改善高速操纵稳定性。

(2)后轮具备较大的主销倾角,且随动转向机构的传动具有可逆性,当发生电气故障时,后轮在回正力矩的作用下仍可保持直线行驶,由前轮机械转向实现对车辆的操纵。

(3)前后转向轮间无传动机构,避免了与悬架、传动机构及地板等的干涉。

2 电控随动转向系统建模及仿真

2.1 类菱形车二自由度模型

本文采用简化的线性三轮车辆模型^[4]。模型基于如下假设:忽略转向系统的间隙、阻尼及弹性形变;直接以车轮转角作为输入;采用主动悬架,认为车辆平行于地面运动;轮胎侧偏刚度处于线性区域。整车二自由度转向模型如图 2 所示,力平衡方程为

$$(k_f + k_c + k_r)\beta + (k_f l_f - k_c l_c - k_r l_r) \frac{\gamma}{v_x} -$$

$$k_f \delta_f - k_r \delta_r = (\dot{v}_y + \gamma v_x) m \quad (1)$$

$$\beta(k_f l_f - k_c l_c - k_r l_r) - k_f l_f \delta_f + k_r l_r \delta_r +$$

$$\frac{\gamma}{v_x} (k_f l_f^2 + k_c l_c^2 + k_r l_r^2) = I_z \dot{\gamma} \quad (2)$$

$$\alpha_f = \beta - \delta_f + \frac{\gamma l_f}{v_x} \quad (3)$$

$$\alpha_c = \beta - \frac{\gamma l_c}{v_x} \quad (4)$$

$$\alpha_r = \beta - \delta_r - \frac{\gamma l_r}{v_x} \quad (5)$$

式中, m 为整车质量; I_z 为车辆绕质心 z 轴旋转的转动惯量; γ 为横摆角速度; v_x 为车辆质心处速度矢量 v 在 x 轴的分量; β 为车辆质心偏角; l_f 为前轮与车辆质心的距离; l_c 为中轮与车辆质心的距离; l_r 为后轮与车辆质心的距离; k_f 为前轮侧偏刚度; k_c 为中轮侧偏刚度; k_r 为后轮侧偏刚度; α_f 为前轮侧偏角; α_c 为中轮侧偏角; α_r 为后轮侧偏角; δ_f 为前轮转向角; δ_r 为后轮转向角。

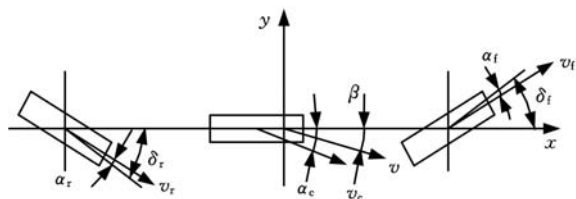


图 2 整车二自由度模型

2.2 转向阻力矩

在小转角条件下,轮胎侧偏刚度可以认为是线性的,当轮胎发生侧偏时,作用在后轮的阻力矩为

$$T_{zr} = F_{y_r} e = k_r \alpha_r e = k_r (\beta - \delta_r - \frac{\gamma l_r}{v_x}) e \quad (6)$$

式中, e 为轮胎的拖距,由轮胎的侧偏特性决定。

2.3 后轮随动转向系统模型

后轮随动转向系统由多个惯性元件以及弹簧、阻尼(或摩擦)元件组成,为简化问题,常用降阶建模的方法来建立系统的物理模型^[5]。将随动转向系统简化为只包含三个重要动力学元件的物理系统模型。这三个动力学元件为转向电机、齿轮齿条机构、转向轮组件。图 3 所示为系统的物理简化模型。

电控后轮随动转向系统采用永磁直流电动机驱动,电机的电压 U 与电感 L 、电枢电阻 R 、反电动势常数 C_e 、转速 $\dot{\delta}_m$ 、电流 I_m 之间的关系^[6]如下:

$$U = L \dot{I}_m + R I_m + C_e \dot{\delta}_m \quad (7)$$

对直流电动机而言,电动机的电磁转矩与电枢电流具有如下关系:

$$T_m = C_k I_m \quad (8)$$

式中, C_k 为电机电磁转矩系数。

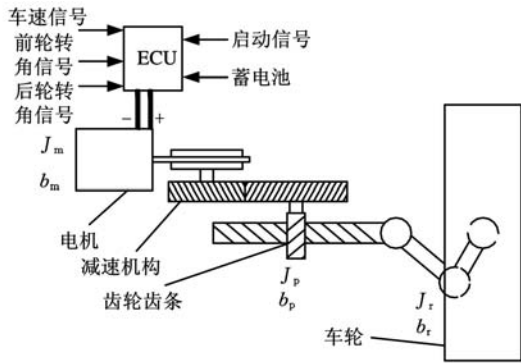


图3 后轮随动转向系统简化模型

电动输出扭矩 T_m 可表示为

$$T_m = J_m \ddot{\delta}_m + b_m \dot{\delta}_m + T_{f_m} + T_p/i_1 \quad (9)$$

$$T_p = J_p \ddot{\delta}_p + b_p \dot{\delta}_p + T_{f_p} + T_r/i_2 \quad (10)$$

式中, J_m 为电机转动惯量; b_m 为电机阻尼系数; T_{f_m} 为电机阻力矩; δ_m 为电机转角; i_1 为电机输出轴与转向小齿轮之间的传动比; T_p 为作用在转向小齿轮上的等效输入力矩; J_p 为等效到转向小齿轮的转动惯量; b_p 为等效到转向小齿轮的阻尼系数; T_{f_p} 为作用在转向小齿轮上的等效摩擦力矩; T_r 为作用在后轮上的转向力矩; δ_p 为转向传动机构向转向小齿轮等效后的转角; i_2 为转向小齿轮与后轮之间的传动比。

对转向轮组件进行动力学分析可得

$$T_r = J_r \ddot{\delta}_r + b_r \dot{\delta}_r + T_{f_r} + T_{z_r} \quad (11)$$

式中, J_r 为后轮的转动惯量; b_r 为后轮绕主销的阻尼系数; T_{f_r} 为后轮绕主销转动阻力矩; T_{z_r} 为地面对后轮的阻力矩; δ_r 为实际后轮转角。

考虑到电机、转向小齿轮与转向轮的速度匹配, 则有

$$\frac{\delta_m}{i_1 i_2} = \frac{\delta_p}{i_2} = \delta_r \quad (12)$$

2.4 转向电机伺服控制

采用PID控制器对后轮转向电机进行伺服控制。PID控制器输入为前后轮转角差 $\Delta\delta$ 和车速, 输出为电机控制电压 U , 且 U 可表示为

$$U = K_p \Delta\delta + K_i \int \Delta\delta + K_d \dot{\Delta\delta} \quad (13)$$

$$\Delta\delta = \delta_d - \delta_r \quad (14)$$

式中, δ_d 为目标后轮转角; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数。

2.5 电控后轮随动转向控制策略

以零侧偏角($\beta = 0$)为控制目标, 采用比例前馈型控制算法确定后轮随动转向比例系数, 以改善车辆的低速机动性和高速稳定性^[7]。后轮转向角为

$$\delta_r = \xi_0 \delta_f \quad (15)$$

式中, ξ_0 为后轮转角与前轮转角的比例系数。

稳态时有

$$\beta = 0 \quad \dot{\beta} = 0 \quad \dot{\gamma} = 0 \quad (16)$$

将式(15)与式(16)代入式(1)和式(2)可得

$$\xi_0 = \frac{k_f [l_f m v_x^2 + k_c l_c (l_f + l_c) + k_r l_r (l_f + l_r)]}{k_r [l_r m v_x^2 - k_f l_f (l_f + l_r) - k_c l_c (l_c - l_r)]} \quad (17)$$

ξ_0 随车速变化, 低速(满载工况下, 车速小于42km/h; 空载工况下, 车速小于49km/h)时为负值, 汽车前后轮逆向转向; 高速(满载工况下, 车速大于42km/h; 空载工况下, 车速大于49km/h)时为正值, 汽车前后轮同向转向。

2.6 仿真及结果分析

在MATLAB/Simulink中建立电控后轮随动转向系统模型, 如图4所示。主要仿真参数见表1。

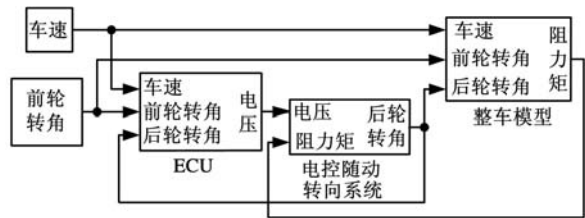
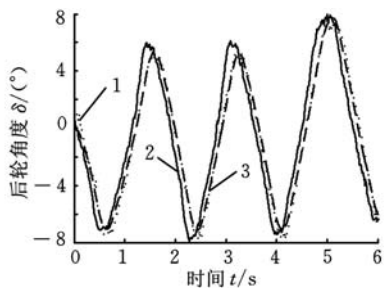


图4 电控后轮随动转向系统 Simulink 仿真模型

表1 主要仿真参数

参数	数值
整车质量 m (kg)	1320
绕质心 z 轴惯量 I_z /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1000
前轮侧偏刚度 k_f (N/rad)	-35000
中轮侧偏刚度 k_c (N/rad)	-100000
后轮侧偏刚度 k_r (N/rad)	-35000
前轮与车辆质心的距离 l_f (m)	1.85
中轮与车辆质心的距离 l_c (m)	0.15
后轮与车辆质心的距离 l_r (m)	2.15
电机输出轴与转向小齿轮之间的传动比 i_1	19.8
转向小齿轮与后轮之间的传动比 i_2	18
电机电枢绕组的电感 L /(μH)	93.5
电机电枢绕组的电阻 R (Ω)	0.298
电机电磁转矩系数 C_k ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$)	0.0454
电机反电势系数 C_e ($\text{V} \cdot \text{s}$)	0.0458
电机转动惯量 J_m ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.001 134
转向传动机构向转向小齿轮等效后的转动惯量 J_p ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.000 446
后轮转动惯量 J_r ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1.916 446
电机阻尼系数 B_m ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$)	0.0119
转向传动机构向转向小齿轮等效后的阻尼系数 B_p ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$)	0.2115
后轮绕主销的阻尼系数 B_r ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$)	0.0027
电机阻力矩 T_{f_m} ($\text{N} \cdot \text{m}$)	0.0225
作用在转向小齿轮的等效摩擦力矩 T_{f_p} ($\text{N} \cdot \text{m}$)	9.8576
后轮绕主销转动阻力矩 T_{f_r} ($\text{N} \cdot \text{m}$)	6.5727
比例系数 K_p	8
积分系数 K_i	0.5
微分系数 K_d	0.5

对装备样机的样车进行原地转向试验,将试验中采集的前轮转角轨迹作为仿真曲线输入,进行仿真分析。将试验结果与仿真结果进行比较,对比结果如图 5 所示。

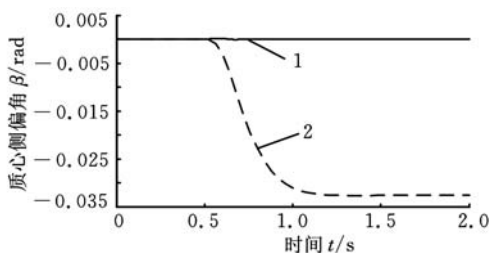


1. 实际后轮转角 2. 目标后轮转角 3. 仿真后轮转角

图 5 后轮转角对比曲线

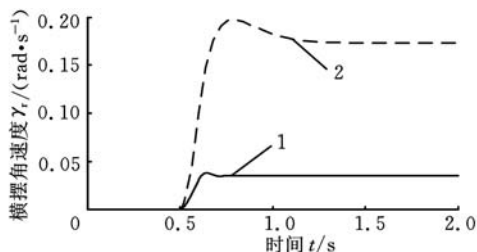
从图 5 可以看出,仿真计算结果与试验结果基本吻合。机构间的间隙及转动惯量的存在是实际后轮转角比目标转角滞后的主要原因。对比结果表明,本文所建立的后轮随动转向模型具有一定的可信度,可将此模型用于后续随动转向控制策略、车辆操纵稳定性的仿真研究中。

为了分析电控后轮随动转向系统对整车稳定性的影响,根据汽车操纵稳定性试验方法(GB/T 6323.2-94 规定)进行仿真分析。仿真车速为 25m/s,前轮输入起跃时间为 0.1s、幅值为 0.02rad 的阶跃信号。采用机械联动转向系统时, $\xi_0 = -1$;采用电控后轮随动转向系统时,由 ECU 根据式(17)确定 ξ_0 。仿真输出的角阶跃响应曲线如图 6 ~ 图 8 所示。



1. 电控后轮随动转向 2. 机械转向

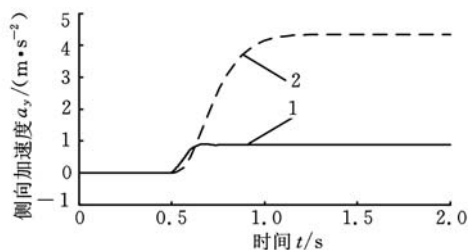
图 6 质心侧偏角响应曲线



1. 电控后轮随动转向 2. 机械转向

图 7 横摆角速度响应曲线

从图 6~图 8、表 2 可知,以零侧偏角为控制目标的电控后轮随动转向系统实现了车辆在转向



1. 电控后轮随动转向 2. 机械转向

图 8 侧向加速度响应曲线

过程中近似零侧偏角的目的,从而使车辆具备了良好的路径跟踪能力;高速时车辆横摆角速度和侧向加速度的超调量和响应时间明显减小,使转向过程更加平稳。

表 2 菱形车阶跃转向相应特性

		反应时间(s)	超调量(%)
质心侧偏角	随动转向	0.22	0
	机械转向	0.66	0
横摆角速度	随动转向	0.22	8.56
	机械转向	0.79	13.92
侧向加速度	随动转向	0.25	1.51
	机械转向	0.73	0

3 电控后轮随动转向控制系统研制

电控系统主要功能为车速和前后轮转角信号的处理,后轮目标转角计算,电机伺服控制,故障自检、处理及报警等。

采用 M68HC08GZ32 设计电控随动转向控制器,控制器由 MCU 模块、电源模块、信号处理模块、通信模块、故障处理模块、H 桥等部分构成。图 9 为后轮随动转向系统控制器总体框图。

控制系统对后轮转角进行闭环控制。ECU 按周期采样车速、前后车轮转角,并根据前轮转角和车速确定后轮目标转角,将后轮目标转角与实际后轮转角比较后的误差输入到 PID 控制器中,控制 H 桥 PWM 驱动信号的占空比,对电机的转矩及方向进行控制,并由机械传动机构将电机驱动力作用在后轮上,使后轮转向至目标值。

在车辆运行过程中,电控系统不断进行故障自检。当检测到电控系统发生故障时,故障处理模块将断开直流电机的电源,使电机转子在回正力矩作用下能够自由转动。

图 10 为 ECU、后轮转向传动机构的物理样机实物图。图 11 和图 12 所示分别为原地转向和以 30km/h 车速行驶转向时,后轮对目标转角的响应曲线。从图 11、图 12 可以看到,ECSS 控制系统具有快速、准确的响应特性,基本满足使用要求。

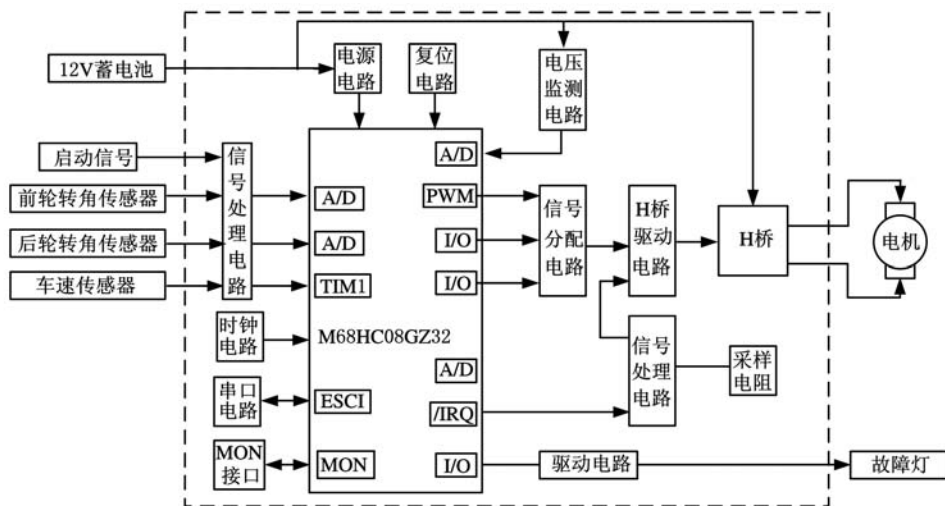


图9 随动转向控制器框图

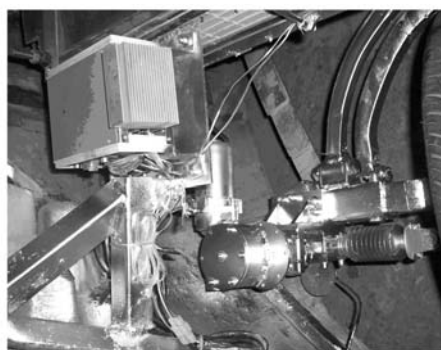
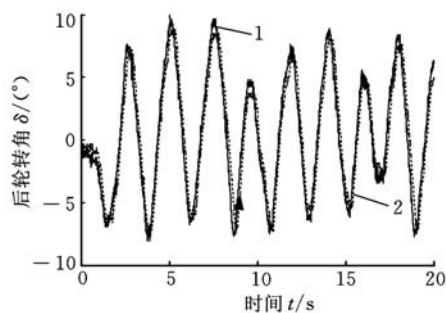
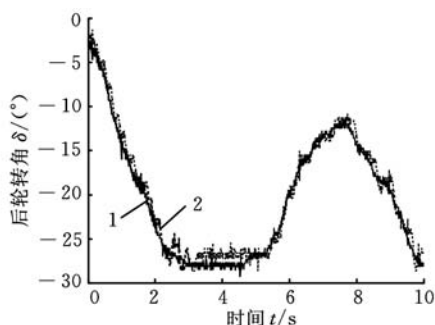


图10 样机实物图



1. 目标后轮转角 2. 实际后轮转角

图11 后轮转角对目标转角的响应试验（半载，车速=0）



1. 目标后轮转角 2. 实际后轮转角

图12 后轮转角对目标转角的响应试验（半载，车速=30km/h）

4 结语

本文针对类菱形车机械转向系统存在的不足，提出类菱形车电控后轮随动转向系统。在Simulink中建立仿真模型，仿真结果表明采用ECSS能显著改善类菱形车的高速操纵稳定性。研制了电控后轮随动转向控制系统，实现了对后轮随动转向的快速、准确控制。本文的研究成果为改善类菱形车高速操纵稳定性提供了有效的途径。

参考文献：

- [1] 郑军. 新概念车舒适性与操纵稳定性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [2] 查云飞, 钟志华, 张义. 菱形车回正性能分析与研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(22): 4650-4653.
- [3] 查云飞, 钟志华, 闫晓磊. 菱形车转向机构的分析与优化[J]. 中国机械工程, 2010, 21(8): 935-939.
- [4] 黄智, 钟志华. 菱形新概念车转向性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(6): 46-50.
- [5] 吴亦君. 汽车电动助力转向系统的建模与仿真[J]. 传动技术, 2008, 22(1): 20-24.
- [6] 刘锦波, 张承慧. 电机与拖动[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [7] Tadahiko T, Noritaka Y, Shigeki F, et al. Improvement of Vehicle Dynamics by Vehicle - speed - sensing Four - wheel Steering System[J]. SAE paper, 860624, 1986.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 吴乙万, 男, 1984年生。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为智能车、汽车电子、汽车动力学、类菱形车。黄智, 男, 1977年生。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室副研究员。钟志华, 男, 1962年生。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室教授、博士研究生导师, 中国工程院院士。