

# 场地电动车 EPS 系统助力特性曲线设计\*

丁凡<sup>1</sup> 陈金鹤<sup>2</sup> 许明<sup>3</sup> 胡杰<sup>3</sup> 康军<sup>1</sup> 李建文<sup>1</sup>

(1. 天津理工大学电气工程与自动化学院 天津 300384)(2. 国家汽车电气零部件质量监督检测中心 温州 325204)  
(3. 天津中宜电动车有限公司 天津 301508)

**摘要** 介绍了电动助力转向系统的工作原理并建立其动力学模型,针对特殊场地电动车进行助力特性分析,对不同类型的助力特性曲线进行对比分析,选择适合实验车辆的曲线类型,通过计算结合实车试验数据,利用 Matlab 软件进行曲线拟合,设计出适合场地电动车助力特性曲线。使用结果表明:设计出的助力特性曲线符合特殊场地电动车的实际应用要求。

**关键词** 场地电动车;EPS;曲线拟合;助力特性

**中图分类号** U463.4 **DOI:**10.3969/j.issn.1672-9722.2022.11.043

## Design of Power Assist Characteristic Curve of EPS System for Electric Vehicle in Special Venues

DING Fan<sup>1</sup> CHEN Jinhe<sup>2</sup> XU Ming<sup>3</sup> HU Jie<sup>3</sup> KANG Jun<sup>1</sup> LI Jianwen<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University of Technology, Tianjin 300382)

(2. National Automotive Electrical Parts Quality Supervision and Testing Center, Wenzhou 325204)

(3. Tianjin Zhongyi Electric Vehicle Co., Ltd., Tianjin 301508)

**Abstract** This paper introduces the working principle of the electric power steering system and establishes its dynamic model, analyzes the power assist characteristics of low-speed electric vehicles in special places, and designs the power assist characteristic curves based on the polyfit function of Matlab and combined with the real vehicle experiments. The results show that the designed power assist characteristic curve meets the practical application requirements of low-speed electric vehicles in special venues.

**Key Words** electric vehicle in special venues, EPS, curve fitting, assist characteristics

**Class Number** U463.4

## 1 引言

随着汽车电控技术的发展和成熟,消费者对汽车驾驶的舒适性和安全性的需求有较大幅度的提高,因此电动助力转向系统(Electric Power Steering, EPS)应运而生<sup>[1]</sup>。该系统已普遍应用于各大汽车企业的车辆生产中,是一种结合了现代控制技术与电子技术的转向系统<sup>[2]</sup>,是汽车安全性和驾驶舒适度的重要保障。电动助力转向系统在不同种类的汽车上的结构虽不一样,但工作原理是相同的<sup>[3]</sup>。与国外相比,国内电动助力转向系统技术整体起步较晚<sup>[4]</sup>。随着我国汽车工业整体水平的提高和对新技术的吸收利用水平提高,电动助力转向

系统在中国得到了快速发展,目前电动助力转向系统的研究已被列为中国高科技产业项目之一<sup>[5]</sup>,国内高校和相关企业已投入大量资金进行电动助力转向系统的研究,并取得了丰富的科研成果。

本文针对某企业高尔夫球场用车使用环境的特殊要求,根据车辆参数及实车试验,通过公式法设计适合应用于特殊场地且低速的电动车的助力特性曲线,以提高驾驶员驾驶车辆的舒适度,利于车辆行驶过程中的稳定性和安全性。

## 2 EPS 系统的工作原理及结构

### 2.1 电动助力转向系统的工作原理

电动助力转向系统主要包括方向盘、转向管

\* 收稿日期:2022年4月15日,修回日期:2022年5月17日

作者简介:丁凡,男,硕士研究生,研究方向:电动汽车电动助力转向系统。

柱、助力电机、转矩传感器、蜗轮蜗杆减速部件、传动轴以及齿轮齿条转向器等部件<sup>[6]</sup>。当驾驶员操作汽车方向盘进行转向时,通过转向管柱传动动作发出转矩信号和转角信号,此时转矩传感器开始工作<sup>[7]</sup>。通过转矩传感器的信号采集传输给电子控制器(ECU),ECU根据转矩信号,转角信号当前车速以及当前电动机转速等,利用适当的控制策略,得到符合当前工况的最优助力力矩,进而控制助力电机的旋转方向和工作电流的大小,驱动助力电机对驾驶员进行助力转向动作。

2.2 EPS系统的建模

场地电动车有着特殊的应用场合,工作路况和特点,其电动助力转向系统也有其工作特点。为方便更细致了解系统的工作特点,通过对该系统内部特点的分析研究,再结合公式和一定的工具,可以推导出它的动力学模型。如果把所有变量都考虑进来,建立的数学模型会更严谨更准确,但会使模型复杂化,所以为了方便研究,降低问题的复杂程度,在该系统的研究中我们通常会忽略一些次要条件,将系统简化。主要分成四部分:方向盘与转轴部分,传感器部分,电机部分,齿条齿条部分<sup>[8]</sup>。

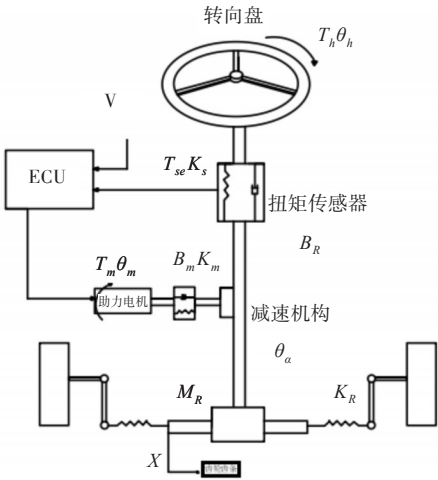


图1 EPS动力学简化模型

方向盘与转轴:

J\_h\ddot{\theta}\_h + B\_h\dot{\theta}\_h = T\_h + T\_{se} \tag{1}

力矩传感器:

T\_{se} = K\_s(\theta\_h - \theta\_a) \tag{2}

助力电机:

J\_m\ddot{\theta}\_m + B\_m\dot{\theta}\_m = T\_m - K\_z(\theta\_m - \theta\_zG) \tag{3}

齿条齿条:

M\_R\ddot{X} + B\_R\dot{X} + K\_RX = \frac{T\_l}{r\_p} - F\_R \tag{4}

其中  $J_h$ 、 $J_m$  分别为方向盘及传动轴的等效转动惯

量、助力电机的转动惯量。 $B_h$ 、 $B_m$  为方向盘阻尼系数和电机粘性阻尼系数。 $T_h$ 、 $T_{se}$  分别为方向盘的输入转矩大小、转矩传感器测量的实际值大小。 $K_s$ 、 $K_z$ 、 $K_R$  分别为转矩传感器的刚度系数、助力电机电机轴刚度系数、齿条弹簧在阻力作用下的刚度系数。 $T_m$ 、 $T_l$  为助力电机电磁转矩、输出轴在助力电机作用下的转矩。

系统的动量参数中  $\theta_h$ 、 $\theta_a$ 、 $\theta_m$ 、 $\theta_s$  分别代表操作员操控方向盘转角、转矩传感器下方传动轴转角、电机转角以及输出轴转角。

3 助力特性分析

EPS系统的助力特性曲线反映的是助力电机所提供的转向助力和驾驶员操作方向盘产生的力矩和当前汽车行驶速度的关系,是系统的核心要素<sup>[9]</sup>。助力特性决定着电子控制单元以何种助力模式来进行助力,是系统关键点,直接影响着整车的驾驶舒适度和驾驶安全性。当前常用的助力特性曲线分为三类<sup>[10]</sup>:直线型、折线形、曲线型。三种曲线均可分成:

1)零助力区,当驾驶员操作方向盘的力小于某一特定值时,助力电机不工作,凭驾驶员单独完成转向。

2)变化助力区,当驾驶员操作方向盘的力处于一定范围之内,若车速此时还未达到所设定的最大车速,助力电机所提供的力则会随驾驶员提供的力变化而变化。

3)最大助力区,当车辆车速不断加速到达所设定的最大车速时,助力电机提供的助力也达到最大值并维持在最大值不变。

图2所示的三种不同类型的曲线中其特征的不同点在变化助力区。 $T$ 表示方向盘实时扭矩值, $I$ 表示助力电机实时电流值,当实时扭矩小于 $t$ 时,助力电机不进行动作,助力力矩为0;当实时扭矩大于 $t$ 而小于 $m$ 时,助力电流大小随车速变化;当实时扭矩大于 $m$ 时,助力电流大小保持一定。

其中直线型助力曲线的助力大小和方向盘扭矩成线性关系,表达式为

I = \begin{cases} 0 & |T| \leq t \\ K(T-t) & t \leq |T| \leq m \\ I\_d & |T| \geq m \end{cases} \tag{5}

式中  $I$  为助力电机产生的助力电流值,  $I_d$  为助力电机提供的最大助力电流,  $K$  为随车速变化的曲线斜率,也称为助力梯度。 $t$ 为助力死区转折点,  $m$

为驾驶人员转动方向盘的最大扭矩。直线型曲线具有良好的转向灵敏度,但车速较高时路感很差<sup>[11]</sup>。

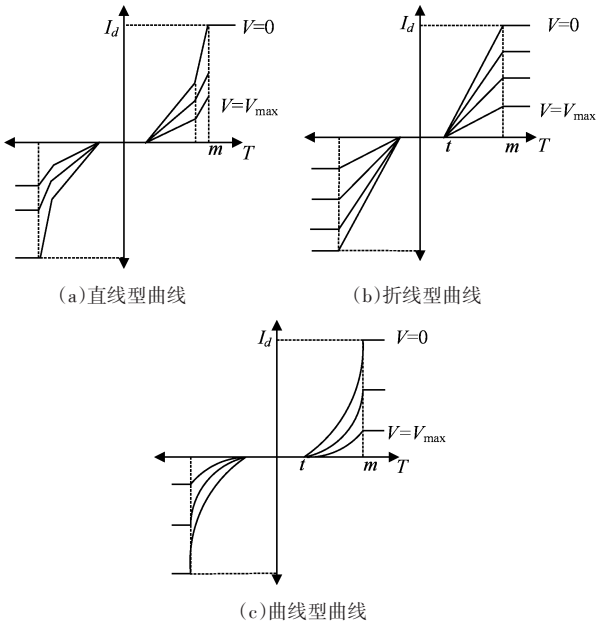


图2 三种不同类型的特性曲线

折线形曲线的数学表达式为

$$I=\begin{cases} 0 & |T|\leq t \\ K_1(T-t) & t\leq |T|\leq y \\ K_1(y-t)+K_2(T-y) & y\leq |T|\leq m \\ I_d & |T|\geq m \end{cases} \quad (6)$$

折线形曲线至少应分成两部分,图2(b)为折线形曲线图,可以看出y是不同斜率K1K2的转折点,两斜率为方向盘扭矩在不同状态下的系数。折线形曲线的驾驶舒适度略优于直线型,但效果提升幅度不大。

曲线型曲线的数学表达式为

$$I=\begin{cases} 0 & |T|\leq t \\ K_f(T) & t\leq |T|\leq m \\ I_d & |T|\geq m \end{cases} \quad (7)$$

曲线型助力曲线能够弥补直线型曲线的不足,在车速较高时可以获得更好的路感。本文所选用的某公司高尔夫球场用车,速度介于0~30km 每小时之间,属于低速车型。所以曲线型助力曲线的优化效果对此车型影响不大。

在以上三种不同类型的助力特性曲线中,结合目前主流设计的实际情况,直线型曲线应用较为广泛,因为直线型助力曲线的调整参数的方式更加简洁,使用成本低,缺点是助力比单一<sup>[12]</sup>,不能随方向盘的输入转矩实时调整,路感较差。曲线形曲线的设计最繁琐,设计难度及其成本较大。公式及运算复杂,这使得系统响应速度下降。折线形曲线的效

果略优于直线型,但效果提升幅度不大,与曲线型相比还有较大差距。

4 助力曲线的设计

通过对三种不同类型的分析研究,结合测试车辆的实际情况,本次设计采用直线型助力特性曲线。

4.1 设计要求

助力曲线设计应满足如下几个条件<sup>[13]</sup>。

1)预设一特殊值为系统的死区阈值Td

系统在工作之初由驾驶员转动方向盘,此时方向盘产生一定的力矩,当小于Td时,系统助力电机助力电流为0,不工作,也不提供助力;当大于Td时,系统电机才开始动作。Td的设定对整个转向系统乃至整车都尤为重要。Td不宜过大或过小,过大会降低汽车的驾驶舒适度,在转向时会感觉越发沉重;过小会使得转向系统过于敏感,容易引发方向盘抖动甚至车身侧翻,并且造成助力电机时起时停,降低使用寿命。通过对实车进行实验并查阅大量文献,将Td的值设为1N。

2)设置方向盘的最大输入扭矩Tm

当驾驶车辆时,方向盘输入的力大于Tm时,此时系统所提供的助力大小应保持不变。

表1 车辆部分参数

参数	数值
全车质量	980kg
轴距	1.74m
方向盘半径	0.25m
车胎气压	0.03Mpa
车辆质后长度	0.980m
车辆质前长度	0.880m
系统传动比	15
EPS减速部分传动比	10
助力电机转矩常数	0.0476
齿轮齿条的正效率	0.8
前轴载荷	285kg

根据国家现行标准的规定,在原地转向时的手力不高于标准的250N,助力系统工作后的手力不高于50N。我们假设驾驶员提供的最大力为35N,然后根据公式:

$$T_m=\frac{1}{2}DF_m \quad (8)$$

其中Tm为方向盘的最大扭矩,D是方向盘的直径大小为0.5m,Fm为方向盘输入的最大力。结合实验车辆的方向盘大小,我们可以得出Tm为7N。

3)电机的最大工作电流Id的确定

当驾驶员转动方向盘的力不断增加时,助力电机的功率也应加大,也就是电机工作电流的加大。

$I_d$  的设置相当于给助力电机制定相应的型号,以此来满足转向系统的工作对助力电机的要求。当驾驶员进行转向操作时,车辆受到的阻力包括轮胎与地面产生的摩擦阻力以及EPS内部结构之间的摩擦力<sup>[14]</sup>。汽车在行驶途中由于车速等不断变化的不确定因素的影响,我们无法获得精确的摩擦力值,所以利用半经验公式来计算车速为0时的阻力矩。公式<sup>[16]</sup>为

$$T_f = \frac{f}{3} \sqrt{\frac{G_f^3}{p}}$$

(9)

其中:

$$G_f^3 = Mg \frac{L_a}{L_b + L_a}$$

(10)

以上两个公式中: $T_f$  为零车速时转向最大阻力; $G_f$  为车辆前轴承重量; $f$  为动摩擦因数一般设为0.7; $p$  为轮胎气压; $M$  为全车质量; $L_a$  为质前长度; $L_b$  为质后长度。

联立式(9)和式(10)可以求出  $T_f$  为213N·m。

所以当助力电机不向驾驶员提供助力,并且车速为零时,驾驶员向方向盘提供的最大力矩  $T_{sm}$  可以用式(11)得出。

$$T_{sm} = \frac{T_f}{t\theta_c}$$

(11)

在式(11)中,  $t$  为EPS传动比,  $\theta_c$  为齿条齿轮的正效率。那么由此得  $T_{sm}$  的大小等于17.5N·m。那么最大工作电流可以用下列公式计算得出:

$$I_d = \frac{T_{sm} - T_m}{t_j k_c}$$

(12)

在上式中,  $t_j$  为EPS减速部分传动率,  $k_c$  为电机的转矩因数。那么可以求出  $I_d$  为26A。从而我们计算出在车保持原地状态下的速度感应系数。

4.2 曲线设计

表2是所选车型的实验数据,为车速不断提过程中感应系数的值。我们选了六个不同速度,分别对应了不同的感应系数。感应系数的确立当下还没有特别准确的方法,我们可以通过大量的试验进行确定。首先选定一特定车速,并保持不变,而后改变感应系数大小,可以得到此刻的最佳方向盘扭矩以及助力电流的大小,而后再选择不同车速重复试验。

表2 实车数据						
车速	0	10	15	20	25	30
斜率	4.35	3.95	3.57	3.29	3.03	2.84

通过试验可以获得表2的数据,斜率既感应系数  $K(v)$ ,然后通过Matlab的多元拟合函数可以拟合出一条曲线<sup>[15]</sup>,其表达式为3阶:

$$K(v) = 0.0000095v^3 + 0.001173v^2 + 0.02732082v + 4.33$$

根据图3我们可以得出结论,当驾驶员驾驶汽车不断加速的过程中,感应系数会随之减小,最后我们通过Matlab软件可以绘出满足此类型车辆驾驶需求的助力特性曲线如图4所示。

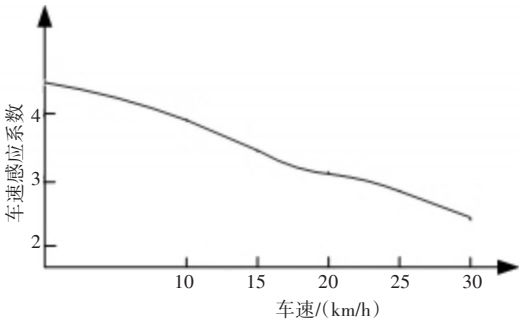


图3 速度感应曲线

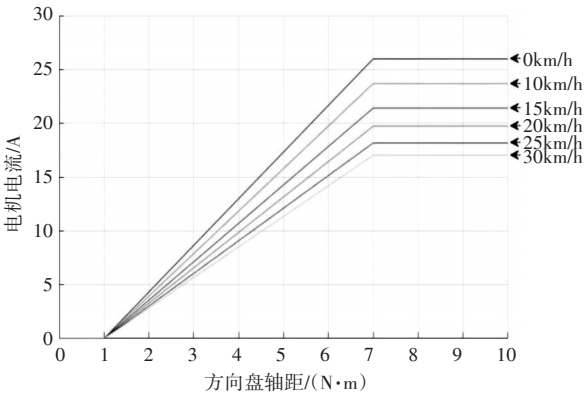


图4 助力特性曲线图

5 仿真实验验证及分析

我们可以根据第一节建立的数学模型,在Simulink中对整个系统的进行建模。如图5所示。包含机械转向、电机、整车、齿条等多个部分,以保证结果的准确性。

首先设定驾驶员操作方向盘的输入扭矩力为2N.m。其次车的行驶速度为20km/h。图6和图7所表示的是在其他参数都不变的情况之下横摆角速度以及方向盘转角随时间变化的关系。我们可以很直观地看出,无论是横摆角速度还是方向盘转角都有着较快的响应时间,达到稳定所用的时间都很少,并且可以保持着相对久的稳定性。这说明本曲线的灵敏性和稳定性达到了场地电动车的转向要求。



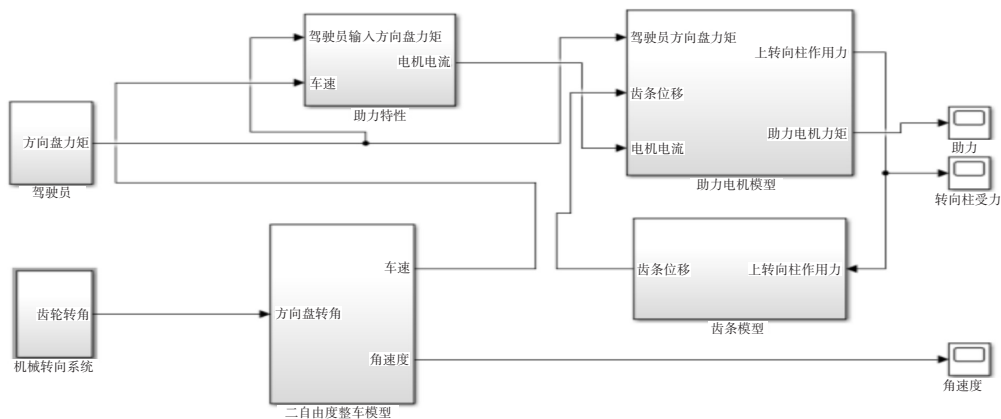


图5 EPS模型

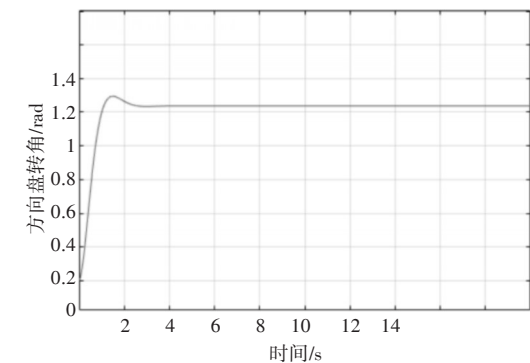


图6 助力控制对方向盘影响

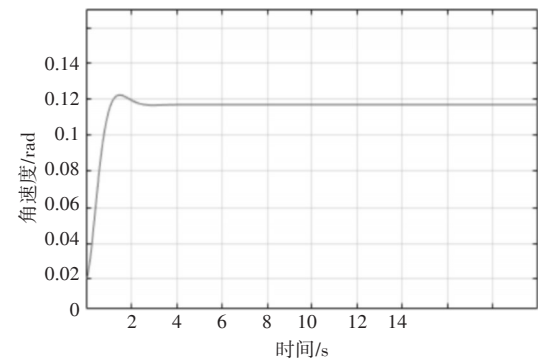


图7 助力控制对角速度影响

6 结语

本文基于某公司具体项目的某一试验车型,具有大量的现场数据。通过大量计算得以确定设计曲线的必要特征值。根据实车实验结果对不同车速下的感应系数进行了曲线拟合。综合以上三点设计了一款针对此种车辆的助力特性曲线。结果表明,设计出的助力特性曲线可以提升驾驶舒适度,具有了良好的驾驶稳定性,提升了安全性,符合特殊场地电动车的实际应用要求。

参考文献

[1] 于发加. 汽车电动助力转向系统助力特性分析及仿真

研究[J]. 汽车实用技术,2021,46(15):121-123.

YU Fajia. Analysis and Simulation of power assisted characteristics of automotive electric power steering system [J]. Automotive Practical Technology, 2021, 46 (15) : 121-123.

[2] 马煜乾. 基于永磁同步电机的电动助力转向系统控制器开发 [D]. 长春:吉林大学, 2012:5-6.

MA Yuqian. Development of electric power steering system controller based on permanent magnet synchronous motor [D]. Changchun: Jilin University, 2012:5-6.

[3] 李莉. 转向力矩特性的分析与eps控制策略的研究[D]. 上海:同济大学,2006:14-15.

LI Li. Analysis of steering torque characteristics and research on eps control strategy [D]. Shanghai: Tongji University, 2006:14-15.

[4] 马洪启. 电动助力转向系统控制策略研究与控制器开发[D]. 苏州:江苏大学,2011:176.

MA Hongqi. Research on control strategy and controller development of electric power steering system [D]. Suzhou: Jiangsu University, 2011:176.

[5] 任晓光. 永磁同步电机EPS控制系统研究[D]. 长春:长春工业大学,2019:135-136.

REN Xiaoguang. Research on EPS control system of permanent magnet synchronous motor [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2019:135-136.

[6] 万肖. 基于模型的汽车电动助力转向系统故障诊断[J]. 南方农机,2019,50(20):184.

WAN Xiao. Fault diagnosis of vehicle electric power steering system based on model [J]. Nanfang Agricultural Machinery, 2019,50 (20): 184.

[7] 徐飞扬. 基于补偿的电动助力转向系统控制策略研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017:107-108.

XU Feiyang. Research on Control Strategy of Electric Power Steering System Based on Compensation [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017:107-108.

- 2013, 61(7):2593–2599.
- [14] 王莎. 速率兼容的极化码编译码算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- WANG Sha. Research on rate-compatible polarization coding algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [15] 高翔. 面向 5G 的 Polar 码编解码技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- GAO Xiang. Research on Polar Code Encoding and Decoding Technology for 5G [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [16] 张晗. 极化码的速率匹配和编码方法研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2019.
- ZHANG Han. Research on rate matching and coding method of polar code [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019.
- [17] Bioglio V, Gabry F, Land I. Low-Complexity Puncturing and Shortening of Polar Codes [C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). IEEE, 2017.
- [18] 常露. 极化码优化设计及其 FPGA 实现[D]. 成都:电子科技大学, 2019.
- Chang Lu. Optimal design of polarized code and its FPGA implementation [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [19] Cyriac A, Narayanan G. Polar Code Encoder and Decoder Implementation [C]//2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICES). 2018.
- [20] Tal I, Vardy A. How to Construct Polar Codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59 (10): 6562–6582.

(上接第 2598 页)

- [8] 任俊名. 基于 Matlab 的汽车电动助力转向系统的仿真 [J]. 福建电脑, 2017(2):112–114.
- REN Junming. Simulation of vehicle electric power steering system based on Matlab [J]. Fujian Computer, 2017 (2): 112–114.
- [9] 单长伟. 基于永磁同步电机的电动助力转向系统控制研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2019.
- SHAN Changwei. Research on electric power steering system control based on permanent magnet synchronous motor [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [10] 朱绍明, 李腾飞. EPS 系统助力特性研究[J]. 汽车实用技术, 2015(1):93–95.
- ZHU Shaoming, LI Tengfei. Research on power assisted characteristics of EPS system [J]. Automotive practical technology, 2015 (1): 93–95.
- [11] 杨胡飞. 重型车转向系统路感跟踪控制策略研究 [D]. 十堰:湖北汽车工业学院, 2019:144–145.
- YANG Hufei. Research on road sense tracking control strategy of heavy vehicle steering system [D]. Shiyan: Hubei Institute of Automobile Industry, 2019:144–145.
- [12] 王涛. 基于 CAN 总线的商用车 EPS 控制器关键技术研究[D]. 西安:长安大学, 2012:127–129.
- WANG Tao. Research on the key technology of EPS controller for commercial vehicles based on CAN bus [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012:127–129.
- [13] 武国飞. 一种新型电动助力转向系统助力转矩跟踪的控制策略[J]. 西安工业大学学报, 2020(2):168–175.
- WU Guofei. A new control strategy for assist torque tracking of electric power steering system [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020 (2): 168–175.
- [14] 王睿. 生活中的物理学——驾驶汽车的力学问题[J]. 考试周刊, 2017(28):40–41.
- WANG Rui. Physics in life —mechanical problems of driving cars [J]. Examination Weekly, 2017(28): 40–41.
- [15] 张永辉, 王栋. EPS 助力曲线设计[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(6):172–173, 177.
- ZHANG Yonghui, WANG Dong. EPS assist curve design [J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2019, 48(6):172–173, 177.
- [16] 张思怡, 高峰, 罗鹰. 直线型助力特性曲线在电动助力转向系统中的应用[J]. 时代汽车, 2021(24): 128–129, 142.
- ZHANG Siyi, GAO Feng, LUO Ying. Application of Linear Power Assist Characteristic Curve in Electric Power Steering System [J]. Times Auto, 2021(24): 128–129, 142.