

# 自动驾驶汽车的线控转向控制系统

朱琳琳<sup>1</sup>, 张梦炎<sup>2</sup>, 张晓丹<sup>1</sup>, 俞侃<sup>1</sup>

(1. 文华学院信息科学与技术学部, 武汉 430074; 2. 中冶南方城市建设工程技术有限公司, 武汉 430000)

**摘要:** 基于传统汽车电动助力转向系统的基本结构, 文中设计转向角度控制器模块和扭矩控制器模块, 实现线控转向控制系统, 以用于自动驾驶汽车的自动转向控制。其中转向角度控制器硬件使用 STM32F4 系列单片机, 主要用于实时计算出转向扭矩值, 实现转向角度的闭环控制; 扭矩控制器模块主要由 STM32 单片机和扭矩信号生成电路构成, 用于检测扭矩传感器输入及模拟扭矩传感器输出。分别设计转向角度控制器软件和扭矩控制器软件, 最后在某轿车上部署测试, 车辆的转向角度控制快速精准, 实现了自动驾驶车辆平台的转向控制功能。

**关键词:** 自动驾驶汽车; 线控转向系统; 角度控制器; 扭矩控制器

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## Steering-by-wire control system on automatic driving vehicles

ZHU Lin-lin<sup>1</sup>, ZHANG Meng-yan<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-dan<sup>1</sup>, YU Kan<sup>1</sup>

(1. Department of Information Science and Technology, Wenhua College, Wuhan 430074, China;

2. WISDRI Urban Construction Engineering & Research Incorporation Limited, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** The design is about the steering-by-wire control system for realizing the automatic steering control of the automatic driving vehicle, based on the basic structure of the traditional electric power steering system, by adding the steering angle controller module and the torque controller module. STM32F4 series single chip microcomputer is used in the hardware of steering angle controller, which is mainly used to calculate the steering torque value on real time and realize the closed-loop control of steering angle. The module of torque controller is mainly composed of STM32 single chip microcomputer and torque signal processing circuit, which is used to detect the input of torque sensor and the output of analog torque sensor. The steering angle controller software and torque controller software are designed respectively. Finally, the test is deployed on a car. The steering angle control of the vehicle is fast and accurate, and the steering control function of the automatic driving vehicles platform is realized.

**Key words:** automatic driving vehicles; steering-by-wire system; angle controller; torque controller

## 0 引言

自从谷歌于 2009 年布局自动驾驶, 自动驾驶技术引发了新一轮的产业热潮<sup>[1]</sup>, 且自动驾驶车辆在军事、工业、农业等各领域都有应用需求<sup>[2-5]</sup>。对于自动驾驶汽车, 线控转向系统是无人驾驶汽车的重要执行机构<sup>[6]</sup>, 将驾驶意图中的转向信号通过电信号形式发送到转向电机, 由转向电机驱动转向轮<sup>[7]</sup>。

传统驾驶汽车的转向控制是通过电动助力转向系统 (Electric Power Steering, EPS) 实现转向控制

的。而电动助力转向系统是建立在传统机械转向系统的基础之上<sup>[8]</sup>, 由转向操纵机构、扭矩传感器、动力转向电动机、转向传动机构、转向角度传感器等一系列机械和电子控制装置构成。本设计根据目前的

**收稿日期:** 2020-02-26

**基金项目:** 教育部科技发展中心高校产学研基金 (2018A01004); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队 (T201735); 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目 (B2018336); 文华学院校科研基金项目 (2018Y06)

**作者简介:** 朱琳琳 (1987-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为控制算法设计、智能仪器、智能系统。通讯作者: 张晓丹。

电动助力转向系统的结构原理,设计线控转向控制系统,使汽车能根据实时的转向输入信息实现转向自动控制。

### 1 整体方案设计

本设计中的线控转向控制系统,是基于汽车目前的电动助力转向控制的结构,加入转向角度控制器模块和扭矩控制器模块,实现汽车的自动转向控制。下面先对电动助力转向系统的结构进行分析,再对线控转向控制系统的整体方案设计进行介绍。

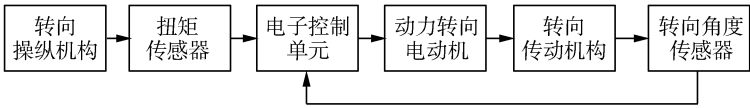


图1 电动助力转向系统结构图

- 电动助力转向系统各部分的工作原理分别是：
- ①转向操纵机构,驾驶员操纵转向器工作的装置,由转向盘、转向机构、转向传动轴等组成。
  - ②扭矩传感器<sup>[9]</sup>,分别为安装在主轴的输入轴侧的扭矩传感器和安装在输出轴侧的扭矩传感器,两个传感器中间用具有弹性变形能力的扭力杆进行连接,在行驶过程中方向盘转动驱动转向机工作,当转向车轮转向阻力过大时,用来连接方向盘转向传动轴和转向机之间的弹性扭力杆就会发生变形,使两个扭矩传感器获得不同的转矩信号而产生信号差。当电控单元获得两个不同的转矩信号时,通过信号差的大小来判断应该施加的辅助扭矩。
  - ③电子控制单元 (Electronic Control Unit, ECU)<sup>[9]</sup>,依据扭矩传感器、车速传感器、电机转向角度传感器输入的相关电信号进行逻辑分析判断,

#### 1.1 电动助力转向系统结构分析

传统的电动助力转向系统结构包括:转向操纵结构、扭矩传感器、电子控制单元、动力转向电动机、转向传动机构、转向角度传感器。驾驶员操作转向操纵机构,扭矩传感器会输出扭矩信号至电子控制单元,电子控制单元根据扭矩信号和转向传感器角度控制动力转向电动机动作,动力转向电动机通过转向传动机构带动车轮转动,转向角度传感器检测车轮的转向角度并将数据反馈至电子控制单元,电动助力转向系统结构如图1所示。

- 最终对电动机进行控制,同时对蓄电池电压进行增压产生驱动动力转向电动机的电压,但是如果系统过热会限制系统工作保护系统。
- ④动力转向电动机,带动转向横拉杆对转向轮进行助力转向控制。
  - ⑤转向传动机构,将动力转向电机输出的力和运动传到转向轮,使两侧转向轮偏转。
  - ⑥转向角度传感器<sup>[9]</sup>,检测转向轮的转角信号来反映转向系统的工作状态,向电子控制单元提供状态信息。

#### 1.2 线控转向控制系统设计

基于汽车已有的电动助力转向控制系统,设计转向角度控制器模块和扭矩控制器模块,接收自动驾驶服务器的转向控制指令,实现线控转向控制系统,具体设计框架如图2所示。

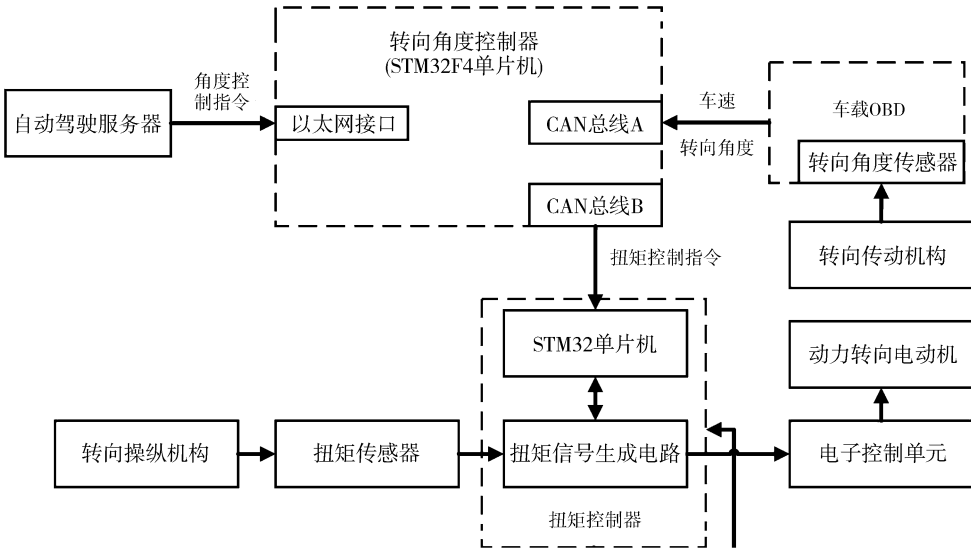


图2 线控转向系统结构设计

1.2.1 扭矩传感器在本系统中的功能

在传统的电动助力转向系统中,扭矩传感器包含安装在主轴的输入轴侧的扭矩传感器和安装在输出轴侧的扭矩传感器,用于检测转向操纵机构的扭矩信息,将扭矩信息发送至电子控制单元,如图 1 所示。而在本设计的线控转向系统中,转向操纵机构有两种工作方式,人工介入方式和无人工介入方式,扭矩传感器在此除了检测转向操纵机构的扭矩信号,还用于检测是否有人工介入转向操纵机构。

1.2.2 扭矩控制器的功能

①扭矩控制器接收扭矩传感器的扭矩信息和有无人工介入的信息。如果有人工介入,则扭矩控制器将扭矩传感器测得的扭矩信息发送至电子控制单元;如果无人工介入,扭矩控制器把从转向角度控制器接收到的扭矩指令转换成扭矩电压信号发送至电子控制单元(EPS ECU)。

②扭矩控制器根据扭矩控制指令模拟输出扭矩电压,将扭矩电压发送至电子控制单元。

1.2.3 转向角度控制器的功能

①在无人工介入方式下,转向角度控制器的角度控制指令来自于自动驾驶服务器,自动驾驶服务器采用自动驾驶专用工控机 Nuvo-6018GC,它是第一款支持高端 GPU 显卡的工业级 GPU 嵌入式电脑,为自动驾驶提供解决方案<sup>[10]</sup>。转向角度控制器与自动驾驶服务器采用以太网连接。

②转向角度控制器从车载 OBD 接口中获取转向角度、车速等数据,转向角度控制器与车载 OBD 接口采用 CAN 总线连接。

③转向角度控制器将接收到角度控制指令、车速与实时转向角度信息,经过算法计算得出扭矩控制指令,输出至扭矩控制器。

2 扭矩控制器模块硬件关键技术分析

扭矩控制器主要由扭矩信号生成电路和 STM32 单片机控制电路构成,如图 2 中的扭矩控制器模块,STM32 单片机通过 CAN 总线接收扭矩控制指令,STM32 单片机控制扭矩信号生成电路中的程控放大器实现扭矩信号的调整。

2.1 扭矩信号生成电路原理分析

扭矩传感器为分相器型,输出 4 路正弦波模拟信号,分别标记为 INCS、INSN、OUCS、OUSN,转向操纵机构静止时,扭矩传感器输出的正弦信号中 INCS 与 OUCS 幅值与相位相等,INSN 与 OUSN 幅值与相位相等。转向操纵机构转动时,扭矩传感器的 INCS 和 INSN 正弦信号的幅值产生变化,分别标记为 INCS\_OUT 和 INSN\_OUT,但是 OUCS 与 OUSN 正弦信号不变。在

传统的电子助力转向系统中,电子控制单元从扭矩传感器获得两个不同的转矩信号 INCS\_OUT 和 INSN\_OUT 时,通过信号差的大小来判断应该施加的辅助扭矩。本设计中在人工介入的模式下,由于转向操纵机构无人控制,故扭矩传感器输出的正弦信号未产生变化,若要使电子控制单元控制转向,需要设计扭矩信号生成电路,模拟输出扭矩控制电压。

在无人工介入模式下,设定公式来模拟传统电动助力转向系统中两个变化的转矩信号 INCS\_OUT 和 INSN\_OUT:

$$INCS\_OUT = INCS + n * INSN \tag{1}$$

$$INSN\_OUT = INSN - n * INCS \tag{2}$$

其中,  $n$  为系数。

根据式(1) - (2),在无人工介入模式下,设计扭矩信号生成电路,通过检测扭矩传感器的信号 INCS 和 INSN,通过电路产生信号 INCS\_OUT 和 INSN\_OUT:

$$INCS\_OUT = INCS + (R_f - 10k\Omega) / (15 * INSN) \tag{3}$$

$$INSN\_OUT = INSN + (10k\Omega - R_f) / (15 * INCS) \tag{4}$$

其中,  $n = (R_f - 10k\Omega) / 15$ ,  $R_f$  为程控电阻,程控电阻阻值范围为 0 至 20k $\Omega$ ,通过程序控制  $R_f$  阻值来调整扭矩。

2.2 扭矩信号生成电路结构设计

根据 INCS\_OUT 和 INSN\_OUT 输出信号要求,设计反向放大电路、程控放大电路、加法电路等组成的扭矩信号生成电路。INCS 和 INSN 信号经过电路的处理,生成 INCS\_OUT 和 INSN\_OUT 信号。信号变换流程分别如图 3 - 4 所示。

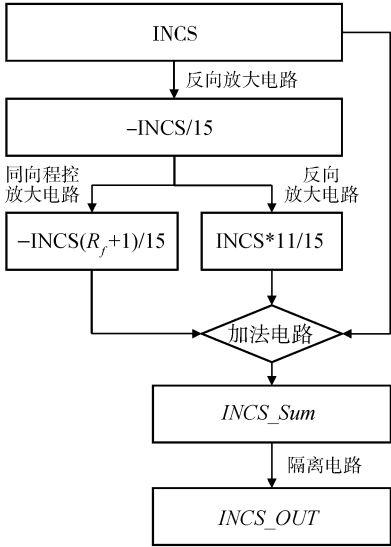


图 3 INCS 信号变换流程图

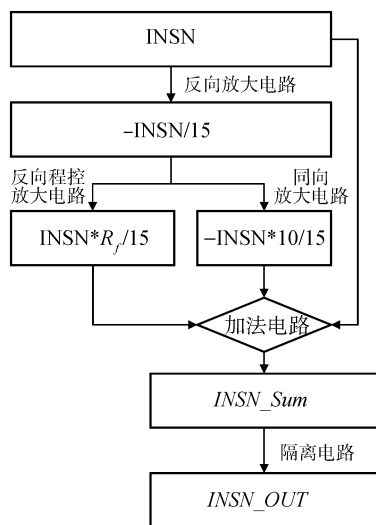


图4 INS\_N 信号变换流程图

图3中,INCS 经过  $-1/15$  倍的反向放大电路变换后为  $-INCS/15$ ,  $-INCS/15$  分别通过同向程控放大电路和反向放大电路将信号变换为  $-INCS(R_f + 1)/15$  和  $INCS * 11/15$ , 再将  $INCS$ 、 $-INCS(R_f + 1)/15$ 、 $INCS * 11/15$  三个信号通过加法电路变换为  $INCS\_Sum$ , 最后通过 1:1 隔离电路输出  $INCS\_OUT$  信号。

图4中,INSN 经过  $-1/15$  倍的反向放大电路变换后为  $-INSN/15$ ,  $-INSN/15$  分别通过反向程控放大电路和同向放大电路将信号变换为  $INSN * R_f/15$  和  $-INSN * 10/15$ , 将  $INSN$ 、 $INSN * R_f/15$ 、 $-INSN * 10/15$  三个信号通过加法电路变换为  $INSN\_Sum$ , 最后通过 1:1 隔离电路输出  $INSN\_OUT$  信号。

## 2.3 扭矩信号生成电路原理图设计

### 2.3.1 程控放大电路设计

程控放大电路通过程控电阻实现放大倍数的控制,扭矩信号生成电路中的程控放大电路原理图如图5所示。

AD5270 为程控电阻,AD5279 与 STM32 单片机之间采用 SPI 接口连接,INCS、INSN 信号变换电路分别使用的同向程控放大和反向程控放大。

对于同向程控放大电路,A 接口接入  $-INCS/15$ ,B 接口接入 1.65V 参考电源 REF,程控放大器工作模式为同向程控放大电路,C 接口输出信号为  $-INCS(R_f + 1)/15$ 。

对于反向程控放大电路,A 接口接入 1.65V 参考电源 REF,B 接口接入  $-INSN/15$ ,程控放大器工作模式为反向程控放大电路,C 接口输出信号为  $-INSN * R_f/15$ 。

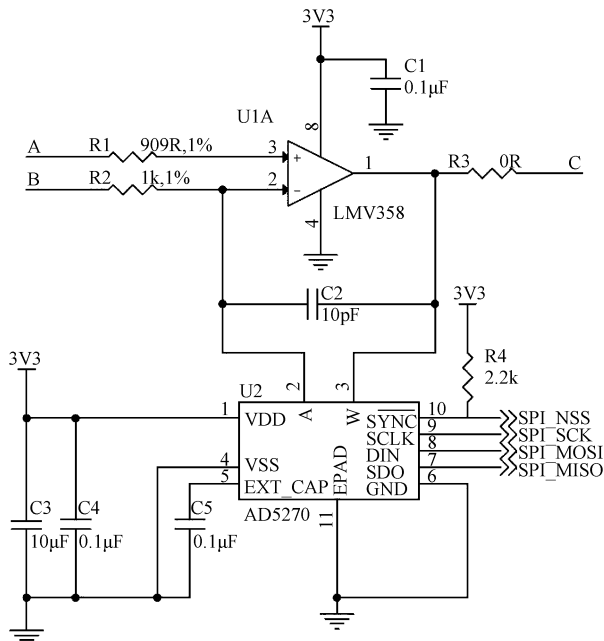


图5 程控放大电路

### 2.3.2 加法电路

加法电路采用 LMV358 运算放大器,输入分别为  $Sum\_A$ 、 $Sum\_B$ 、 $Sum\_C$ , 输出为  $Sum$ 。电路图如图6所示。

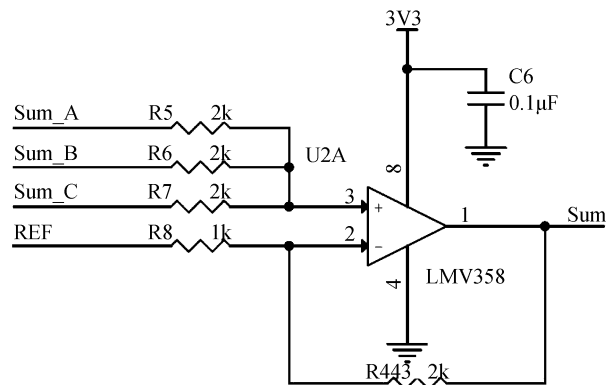


图6 加法电路

加法电路的  $Sum\_A$ 、 $Sum\_B$ 、 $Sum\_C$  分别接入  $INCS$ 、 $-INCS(R_f + 1)/15$ 、 $INCS * 11/15$ , 则  $Sum$  信号为  $INCS + (R_f - 10k\Omega)/(15 * INSN)$ 。

加法电路的  $Sum\_A$ 、 $Sum\_B$ 、 $Sum\_C$  分别接入  $INSN$ 、 $INSN * R_f/15$ 、 $-INSN * 10/15$ , 则  $Sum$  信号为  $INSN + (10k\Omega - R_f)/(15 * INSN)$ 。

### 2.3.3 隔离电路

隔离电路采用 1:1 隔离变压器,电路如图7所示。

输入为  $Sum$ , 输出为  $IN_{xx\_OUT}$ , 因 EPS ECU 在自检过程中检测  $INCS\_OUT$  和  $INSN\_OUT$  对地连接的阻抗必须为 130 欧姆, 所以在隔离变压器次级串联 130 欧姆的电阻。

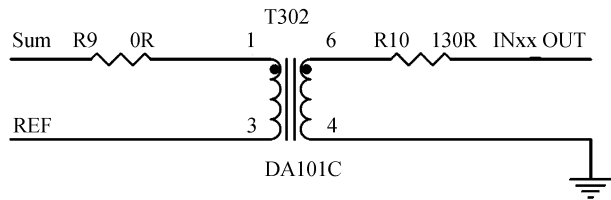


图7 隔离电路

通过加法电路和1:1隔离变压器电路得到  $ISCS\_OUT$  和  $INSN\_OUT$  输出信号。

### 3 软件设计

#### 3.1 转向角度控制器软件设计

转向角度控制软件采用 RT-Thread 实时操作系统,转向角度控制器收到角度控制目标值后,根据当前转向角度和车速,采用 PID 控制算法计算出扭矩控制目标值<sup>[11]</sup>,通过 CAN 总线 B 发送扭矩控制目标值至扭矩控制器。软件设计流程图如图 8 所示。

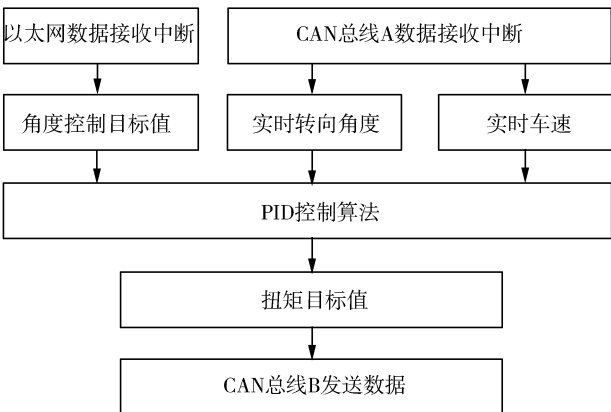


图8 转向角度控制器软件设计

转向角度数据的采样周期  $T$  为 1ms,采样次数设为  $k$ ,取值为整数;车速的更新周期  $T_1$  为 100ms,角度控制目标值的更新周期  $T_2$  为 10ms。PID 算法每一周期  $T$  计算一次,即一个转向角度数据采样周期计算一次。

设  $e(k)$  为第  $k$  次采用后计算得的角度误差, $\theta\_Target(k)$  表示第  $k$  次采样时的角度控制目标值, $\theta\_Realtime(k)$  表示第  $k$  次采样所得的实时转向角度。则角度误差  $e(k)$  的计算公式为:

$$e(k) = \theta\_Target(k) - \theta\_Realtime(k) \quad (5)$$

根据角度误差  $e(k)$  用 PID 算法计算出扭矩目标值  $u(k)$ ,算法公式如下<sup>[12]</sup>:

$$u(k) = K_p * e(k) + K_i * \sum_{i=0}^k e(i) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (6)$$

其中, $K_p$ 为比例系数; $K_i$ 为积分系数; $K_d$ 为微分系数。

$K_p$ 、 $K_i$ 和  $K_d$ 三个参数通过试凑法在现场调试而得。

在现场调试确定参数过程中,车辆在极低速或原地转向条件下,轮胎与地面之间的静摩擦力矩占主导地位,转向力矩远高于在其他车速下行驶的力矩。在 PID 算法中,比例系数  $K_p$  设置值相对较大,使得在较小的角度误差下获得较大的扭矩输出,用于对抗摩擦力。相反,车辆在其他速度下,PID 算法中的比例系数  $K_p$  设置值相对较小。

#### 3.2 扭矩控制器软件设计

扭矩控制器接收到 CAN 总线数据后,读取工作模式配置指令和扭矩控制目标值。无人工介入模式时,扭矩传感器数据超过阈值,会自动切换为人工介入模式。扭矩传感器数据低于安全阈值时,按照扭矩控制目标值,设置扭矩输出电压,完成转向机构的扭矩控制。扭矩控制器软件的流程图如图 9 所示。

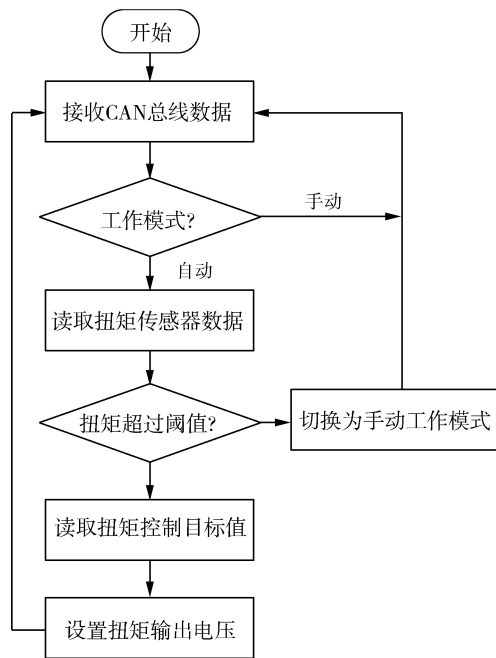


图9 扭矩控制器软件设计

扭矩控制模块有两种工作模式:手动转向(人工介入)、自动转向(无人工介入)。手动转向模式下,扭矩信号生成电路的扭矩信号输出与扭矩传感器电压相同。自动转向模式下,扭矩信号生成电路会截获扭矩传感电压输出,并根据转向角度需求,输出扭矩电压至 EPS ECU。

人工操作转向机构时,扭矩传感器能够检测到人工操作转向机构的扭矩。为了保障操作人员及车辆的安全,在自动转向模式下,检测到人工操作转向机构时,自动转向模式会切换至手动转向模式。自动转向模式下,STM32 单片机会实时采集扭矩传感

(下转第 54 页)

NVIDIA GTX1080Ti。论文提出了基于特征更新的元学习方法,把节点和边缘信息结合到小样本问题中,在嵌入模块和特征更新模块组成的网络中对两个数据集进行监督和半监督的实验,实验结果证明文中的方法可以有效提高小样本的分类精确度。在未来的工作中,将继续扩展框架,如优化分类模块和借鉴因果模型强化的网络。

### 参考文献:

- [1] Elman J L. Finding structure in time[J]. Cognitive Science, 1990, 14(2): 179–211.
- [2] Hochreiter S, Schmidhuber, Jürgen. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735–1780.
- [3] Lecun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(11): 2278–2324.
- [4] Gidaris S, Komodakis N. Dynamic few-shot visual learning without forgetting[C]. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Munich, 2018: 4367–4375.
- [5] Han X, Zhu H, Yu P, et al. FewRel: a large-scale supervised few-shot relation classification dataset with state-of-the-art evaluation [C]. Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Brussels, 2018: 4803–4809.
- [6] Lee K, Maji S, Ravichandran A, et al. Meta-learning with differentiable convex optimization[C]. Computer Vision and Pattern Recognition. Los Angeles, 2019: 10657–10665.
- [7] Li W, Wang L, Xu J, et al. Revisiting local descriptor based image-

(上接第 49 页)
 海:上海交通大学,2017.

器的电压输出,当检测到扭矩传感器的扭矩电压输出达到预设值,将扭矩信号生成电路的扭矩信号输出与扭矩传感器电压设置为相同值。

## 4 结束语

本文设计的线控转向控制系统能够对电动助力转向的传统汽车进行改造,已经在某轿车上部署测试,车辆的转向角度控制快速精准,实现了自动驾驶车辆平台的转向控制功能。

### 参考文献:

- [1] 李星宏. 2017 年中国自动驾驶产业研究报告[R]. 北京: 亿欧智库, 2017.
- [2] 寇超, 陈志佳, 杨茂林, 等. 基于惯性导航系统的车辆自动驾驶装置设计[J]. 信息技术, 2011, 35(2): 69-71.
- [3] 孙铮, 肖本贤. 线控转向电动叉车控制系统多故障检测和隔离[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 108-116.
- [4] 刘军, 袁俊, 蔡骏宇, 等. 基于 GPS/INS 和线控转向的农业机械自动驾驶系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 46-53.
- [5] 吕修文. 基于磁钉地图导航的园区无人公交系统的研究[D]. 上

- [8] Sung F, Yang Y, Zhang L, et al. Learning to compare: relation network for few-shot learning[C]. Computer Vision and Pattern Recognition. Los Angeles, 2019: 7260 – 7268.
- [9] Liu Yan-bin, Lee J H, Minseop P, et al. Transductive propagation network for few-shot learning [C]. International Conference on Learning Representations. New Orleans, 2019.
- [10] Garcia V, Bruna J. Few-shot learning with graph neural networks [C]. International Conference on Learning Representations Vancouver, 2018.
- [11] Mengye R, Eleni T, Sachin R, et al. Meta-learning for semi-supervised few-shot classification [C]. In International Conference on Learning Representations, 2018: 9.
- [12] Kim J, Kim T, Kim S, et al. Edge-labeling graph neural network for few-shot learning [C]. Computer Vision and Pattern Recognition, Los Angeles, 2019: 11 – 20.
- [13] Gong Li-yu, Cheng Qiang. Exploiting edge features for graph neural networks[C]. Computer Vision and Pattern Recognition. Los Angeles, 2019: 9211 – 9219.
- [14] Snell J, Swersky K, Zemel R S. Prototypical networks for few-shot learning[C]. Conference and Workshop on Neural Information Processing Systems. Long Beach, 2017: 4080 – 4090.
- [15] Finn C, Abbeel P, Levins S. Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks[C]. International Conference on Machine Learning. Sydney NSW, 2017: 1126 – 1135. 责任编辑: 丁玥

海:上海交通大学,2017.

[6] 吴蒙,张飞铁,文桂林.无人驾驶汽车线控转向系统控制策略的研究[J].计算机仿真,2016,33(12):163-168.

[7] 李德毅,赵菲,刘萌,等.自动驾驶量产的难点分析及展望[J].武汉大学学报:信息科学版,2018,43(12):1775-1779.

[8] 薛明琛,徐广飞,武健.基于滚动时域算法的汽车电动助力转向电流跟踪方法研究[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2019,33(11):24-32.

[9] 李嘉泽.丰田皇冠轿车转向沉重故障分析与排除[J].科技视界,2016(7):195,220.

[10] 北京研控兴业有限公司. NUVO-6108 自动驾驶专用工控机 [EB/OL]. (2018-05-08) [2019-12-17]. <http://www.ac-ontech.com.cn/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=21>.

[11] 严汶均.电动助力转向系统建模及控制算法研究[D].广州:华南理工大学,2019.

[12] 于海生,丁军航,潘松峰,等.微型计算机控制技术[M].3版.北京:清华大学出版社,2017:138-140.

责任编辑:杨静