



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108437991 A

(43)申请公布日 2018.08.24

(21)申请号 201810318561.4

(22)申请日 2018.04.11

(71)申请人 厦门大学

地址 361005 福建省厦门市思明南路422号

(72)发明人 郭景华 李文昌 王进

(74)专利代理机构 厦门南强之路专利事务所

(普通合伙) 35200

代理人 马应森

(51)Int.Cl.

B60W 30/14(2006.01)

B60W 40/105(2012.01)

B60W 40/02(2006.01)

B60W 10/04(2006.01)

B60W 10/18(2012.01)

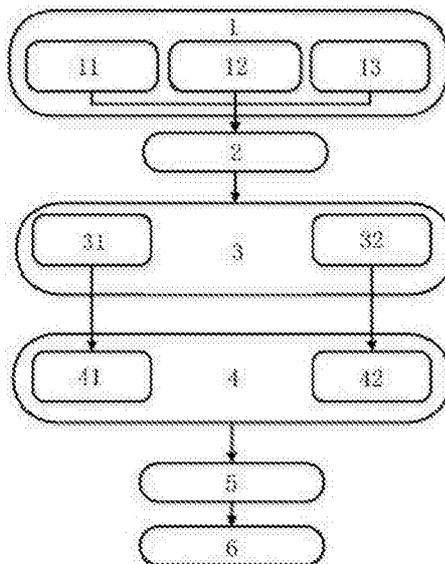
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

一种智能电动汽车自适应巡航控制系统及其方法

(57)摘要

一种智能电动汽车自适应巡航控制系统及其方法,涉及汽车安全驾驶辅助控制。所述系统包括信息获取模块、工作模式选择模块、控制作用切换模块、期望力矩计算模块、转换器模块和执行器模块。提出安全距离控制策略、驱动/制动切换策略,采用基于神经模糊的反演滑模自适应巡航跟踪模式控制方法,可以解决电动汽车自适应巡航系统速度控制的非线性问题及系统状态的强耦合性,保证车辆自适应巡航行驶时跟踪前车的能力,提高交通道路利用率及车辆行驶的安全性、舒适性。



1. 一种智能电动汽车自适应巡航控制系统,其特征包括信息获取模块、工作模式选择模块、控制作用切换模块、期望力矩计算模块、转换器模块和执行器模块;所述信息获取模块包括车-车通信模块、车-路通信模块和车载信息传感器,所述工作模式选择模块的输入端与车-车通信模块、车-路通信模块和车载信息传感器的输出端连接,工作模式选择模块的输出端与控制作用切换模块输入端连接,控制作用切换模块包括驱动控制模块和制动控制模块;期望力矩计算模块包括驱动力矩计算模块和制动力矩计算模块,驱动控制模块输出端接驱动力矩计算模块,制动控制模块输出端接制动力矩计算模块;期望力矩计算模块的输出端接转换器模块输入端,转换器模块输出端接执行器模块的输入端。

2. 智能电动汽车自适应巡航控制方法,其特征包括以下步骤:

1) 驾驶员设定巡航速度并激活自适应巡航开关后,巡航开始;

2) 自适应巡航系统信息获取模块实时采集本车行驶运动状态信息及周围环境信息,主要由车速传感器测量本车行驶速度,雷达测量本车与前车距离,车-车/车-路通信系统获取前车行驶速度;

3) 根据步骤2) 实时获取的信息,控制系统工作模式选择模块对定速巡航模式或跟踪模式做出选择,若雷达检测到前方没有车辆,则进入定速巡航模式;否则进入自动跟踪前车模式;巡航过程中若驾驶员进行干预,则巡航结束;

所述跟踪模式期望车距控制策略采用固定时距控制策略,期望间距随速度线性变化,其表达式为 $s_d = \tau v_x + d_0$,其中 s_d 为期望车距, τ 为车间时距, v_x 为本车车速, d_0 为设定的最小安全车距;

4) 若车辆进入自动跟踪前车模式,控制作用切换模块则根据驱动/制动切换策略,对驱动或制动模式做出选择;

设 s 为两车实际车辆间距,则车距误差表示为 $\Delta s = s - s_d$,两车相对速度用 v_r 表示,根据车距误差与相对速度的关系提出驱动/制动切换策略;

5) 期望力矩计算模块计算出跟踪前车的期望控制力矩,所述期望控制力矩包括驱动力矩或制动力矩;

6) 转换器模块将期望控制力矩信号转换成驱动踏板信号或者制动踏板信号,输出到执行器模块对相应执行器进行控制,完成自适应巡航的控制;

在跟踪模式下的控制目标为 $\Delta s \rightarrow 0, v_r \rightarrow 0$;

针对所述控制目标,电动汽车跟踪模式控制方法包括以下步骤:

(1) 建立智能电动汽车自适应巡航纵向动力学模型;

(2) 采用反演设计与滑模控制相结合的方法,提出跟踪前车期望车轮控制力矩的反演滑模控制律;

(3) 采用模糊逻辑实现反演滑模控制律中重要参数 c_1, c_2, c_3 的自调整,具体方法如下:

(3.1) 选择两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 和两车相对速度 v_r 作为模糊模型的输入变量,控制律参数 c_1, c_2, c_3 作为输出变量;

(3.2) 设定模糊模型输入变量 Δs 的论域为 $[-50, 50]$,输入变量 v_r 的论域为 $[-20, 20]$,量化因子都取1;输出变量 c_1, c_2, c_3 的论域都设定为 $[0, 50]$,比例因子都取1;

(3.3) 将所述两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 的模糊子集都分为7个语言变量等级,模糊集均设为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$,分别表示{负大,负中,负小,

零,正小,正中,正大};将控制器参数 c_1, c_2, c_3 分别设为5个语言变量等级,模糊集都为{Z0, PS, PM, PB, VB},分别表示{零,正小,正中,正大,很大};选择高斯函数作为隶属度函数;

(3.4) 模糊模型控制规则为:当两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 都为PB时,需要电机输出大的驱动力矩,此时取输出变量 c_1, c_2, c_3 为Z0;当两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 都为PB时,需要电机输出大的制动力矩,此时也取输出变量 c_1, c_2, c_3 为Z0;当两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 都为Z0时,此时控制收敛,取输出变量 c_1, c_2, c_3 为VB;根据相同逻辑,将控制策略汇总为49条控制规则;

(4) 模糊系统中隶属度函数的调整利用神经网络的自学习功能,将神经网络与模糊系统融合,构造一个五层神经网络模糊系统,采用多层前向神经网络完成模糊模型每一步功能,各层定义如下:

第一层为输入层,将输入值传送至下一层;

第二层的每个节点代表一个语言变量值,作用为计算各输入分量属于各语言变量值模糊集合的隶属度函数;所述语言变量值包括PB,Z0;

第三层的每个节点代表一条模糊规则,用于匹配模糊规则的前件,计算出每条规则的适用度;

第四层完成规则的后件,进行模糊推理并输出模糊量;

第五层为输出层,实现清晰化计算,输出控制量。

一种智能电动汽车自适应巡航控制系统及其方法

技术领域

[0001] 本发明涉及汽车安全驾驶辅助控制,尤其是涉及一种智能电动汽车自适应巡航控制系统及其方法。

背景技术

[0002] 自适应巡航(Adaptive Cruise Control,ACC)是一种汽车安全辅助驾驶系统,在传统定速巡航功能的基础上增加自动跟踪前车功能,使本车与前车保持合适的安全距离,可提高车辆行驶的安全性、缓解交通拥挤问题,同时可减轻驾驶员的负担。目前对自适应巡航控制系统及控制方法的研究大量集中在传统汽车,而针对智能电动汽车的较少。智能电动汽车是当前的研究热点,具有节能环保的优势,智能电动汽车自适应巡航功能可实现车辆的安全、舒适、节能行驶,同时可提高交通道路的利用率,因此对智能电动汽车自适应巡航系统及控制方法的研究具有重要的意义。

[0003] 智能电动汽车自适应巡航系统具有非线性和不确定性等特点,车辆在自适应巡航跟踪模式控制过程中存在加减速过程,在建立纵向动力学模型时,滑移率成为一个重要影响因素。加入滑移率的自适应巡航动力学模型存在速度控制的非线性问题,且状态变量间存在较强的耦合关系。因此,简单的非线性系统线性化方法以及简单的控制方法难以满足系统的控制要求。文献1(Kayacan E.Multi-objective H_{∞} Control for String Stability of Cooperative Adaptive Cruise Control Systems[J].IEEE Transactions on Intelligent Vehicles,2017,2(1):52-61.)使用多目标鲁棒 H_{∞} 控制能达到较好的自适应巡航跟踪效果,但建立纵向动力学模型时假设不存在非线性因素。文献2(Vajedi M,Azad N L.Ecological Adaptive Cruise Controller for Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using Nonlinear Model Predictive Control[J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2015,17(1):113-122.)使用非线性模型预测控制,可以使自适应巡航控制车辆实现安全、节能,但预测控制对系统计算性能要求较高,因此研究自适应巡航控制时需要建立较为精确的模型并选用合适的控制方法。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于针对上述存在的技术问题,提供可保证智能电动汽车自适应巡航跟踪前车能力,实现车辆安全、舒适、节能智能行驶的一种智能电动汽车自适应巡航控制系统及其方法。

[0005] 所述智能电动汽车自适应巡航控制系统包括信息获取模块、工作模式选择模块、控制作用切换模块、期望力矩计算模块、转换器模块和执行器模块;所述信息获取模块包括车-车通信模块、车-路通信模块和车载信息传感器,所述工作模式选择模块的输入端与车-车通信模块、车-路通信模块和车载信息传感器的输出端连接,工作模式选择模块的输出端与控制作用切换模块输入端连接,控制作用切换模块包括驱动控制模块和制动控制模块;期望力矩计算模块包括驱动力矩计算模块和制动力矩计算模块,驱动控制模块输出端接驱

动力矩计算模块,制动控制模块输出端接制动力矩计算模块;期望力矩计算模块的输出端接转换器模块输入端,转换器模块输出端接执行器模块的输入端。

[0006] 所述智能电动汽车自适应巡航控制方法包括以下步骤:

[0007] 1) 驾驶员设定巡航速度并激活自适应巡航开关后,巡航开始;

[0008] 2) 自适应巡航系统信息获取模块实时采集本车行驶运动状态信息及周围环境信息,主要由车速传感器测量本车行驶速度,雷达测量本车与前车距离,车-车/车-路通信系统获取前车行驶速度等;

[0009] 3) 根据步骤2) 实时获取的信息,控制系统工作模式选择模块对定速巡航模式或跟踪模式做出选择,若雷达检测到前方没有车辆,则进入定速巡航模式,否则进入自动跟踪前车模式;巡航过程中若驾驶员进行干预,则巡航结束;

[0010] 所述跟踪模式期望车距控制策略采用固定时距控制策略,期望间距随速度线性变化,其表达式为 $s_d = \tau v_x + d_0$,其中 s_d 为期望车距, τ 为车间时距, v_x 为本车车速, d_0 为设定的最小安全车距;

[0011] 4) 若车辆进入自动跟踪前车模式,控制作用切换模块则根据驱动/制动切换策略,对驱动或制动模式做出选择;

[0012] 设 s 为两车实际车辆间距,则车距误差表示为 $\Delta s = s - s_d$,两车相对速度(即前车速度与本车速度之差)用 v_r 表示,根据车距误差与相对速度的关系提出驱动/制动切换策略,保证车辆行驶时的舒适性;

[0013] 5) 期望力矩计算模块计算出跟踪前车的期望控制力矩,所述期望控制力矩包括驱动力矩或制动力矩;

[0014] 6) 转换器模块将期望控制力矩信号转换成驱动踏板信号或者制动踏板信号,输出到执行器模块对相应执行器进行控制,完成自适应巡航的控制;

[0015] 在跟踪模式下的控制目标为 $\Delta s \rightarrow 0, v_r \rightarrow 0$;

[0016] 针对所述控制目标,电动汽车跟踪模式控制方法包括以下步骤:

[0017] (1) 建立智能电动汽车自适应巡航纵向动力学模型;

[0018] (2) 采用反演设计与滑模控制相结合的方法,提出跟踪前车期望车轮控制力矩的反演滑模控制律;

[0019] (3) 采用模糊逻辑实现反演滑模控制律中重要参数 c_1, c_2, c_3 的自调整,具体方法如下:

[0020] (3.1) 选择两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 和两车相对速度 v_r 作为模糊模型的输入变量,控制律参数 c_1, c_2, c_3 作为输出变量;

[0021] (3.2) 设定模糊模型输入变量 Δs 的论域为 $[-50, 50]$,输入变量 v_r 的论域为 $[-20, 20]$,量化因子都取1;输出变量 c_1, c_2, c_3 的论域都设定为 $[0, 50]$,比例因子都取1;

[0022] (3.3) 将所述两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 的模糊子集都分为7个语言变量等级,模糊集均设为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$,分别表示{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大};将控制器参数 c_1, c_2, c_3 分别设为5个语言变量等级,模糊集都为 $\{ZO, PS, PM, PB, VB\}$,分别表示{零,正小,正中,正大,很大};选择高斯函数作为隶属度函数;

[0023] (3.4) 模糊模型控制规则为:当两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对

速度 v_r 都为PB(正大)时,需要电机输出大的驱动力矩,此时取输出变量 c_1, c_2, c_3 为Z0;当两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 都为PB时,需要电机输出大的制动力矩,此时也取输出变量 c_1, c_2, c_3 为Z0;当两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 都为Z0时,此时控制收敛,取输出变量 c_1, c_2, c_3 为VB;根据相同逻辑,将控制策略汇总为49条控制规则;

[0024] (4) 模糊系统中隶属度函数的调整是需要大量依靠经验和试验数据的操作的过程,可利用神经网络的自学习功能,将神经网络与模糊系统融合,从而使模糊系统中隶属度函数的选取不断改善,因此构造一个五层神经网络模糊系统,采用多层前向神经网络完成模糊模型每一步功能,各层定义如下:

[0025] 第一层为输入层,将输入值传送至下一层;

[0026] 第二层的每个节点代表一个语言变量值,如PB,Z0等,作用为计算各输入分量属于各语言变量值模糊集合的隶属度函数;

[0027] 第三层的每个节点代表一条模糊规则,用于匹配模糊规则的前件,计算出每条规则的适用度;

[0028] 第四层完成规则的后件,进行模糊推理并输出模糊量;

[0029] 第五层为输出层,实现清晰化计算,输出控制量。

[0030] 本发明的技术效果如下:提出安全距离控制策略、驱动/制动切换策略,采用基于神经模糊的反演滑模自适应巡航跟踪模式控制方法,可以解决电动汽车自适应巡航系统速度控制的非线性问题及系统状态的强耦合性,保证车辆自适应巡航行驶时跟踪前车的的能力,提高交通道路利用率及车辆行驶的安全性、舒适性。

附图说明

[0031] 图1为本发明所述智能电动汽车自适应巡航控制系统实施例的结构组成示意图。

[0032] 图2为本发明所述智能电动汽车自适应巡航控制方法实施例的流程图。

[0033] 图3为驱动/制动切换策略图。

[0034] 图4为神经网络模糊系统结构示意图。

具体实施方式

[0035] 下面结合附图对本发明作进一步的详细说明。

[0036] 如图1所示,本发明所述智能电动汽车自适应巡航控制系统包括信息获取模块1、工作模式选择模块2、控制作用切换模块3、期望力矩计算模块4、转换器模块5和执行器模块6;所述信息获取模块1包括车-车通信模块11、车-路通信模块12和车载信息传感器13,所述工作模式选择模块2的输入端与车-车通信模块11、车-路通信模块12和车载信息传感器13的输出端连接,工作模式选择模块2的输出端与控制作用切换模块3输入端连接,控制作用切换模块3包括驱动控制模块31和制动控制模块32;期望力矩计算模块4包括驱动力矩计算模块41和制动力矩计算模块42,驱动控制模块31输出端接驱动力矩计算模块41,制动控制模块32输出端接制动力矩计算模块42;期望力矩计算模块4的输出端接转换器模块5输入端,转换器模块5输出端接执行器模块6的输入端。

[0037] 如图2流程图所示,本发明所述智能电动汽车自适应巡航控制方法实施例包括以

下步骤:

[0038] 步骤1:驾驶员设定巡航速度并激活自适应巡航开关后,巡航开始;

[0039] 步骤2:自适应巡航系统信息获取模块实时采集本车行驶运动状态信息及周围环境信息,主要由车速传感器测量本车行驶速度,雷达测量本车与前车距离,车-车/车-路通信系统获取前车行驶速度等;

[0040] 步骤3:基于上述实时获取的信息,控制系统工作模式选择模块对定速巡航模式或跟踪模式做出选择,若雷达检测前方没有车辆,则进入定速巡航模式,否则进入自动跟踪前车模式;巡航过程中若驾驶员进行干预,则巡航结束;

[0041] 根据所测得的车辆信息,计算出跟踪模式的期望安全距离,期望车距采用固定时距控制策略(CTG),其表达式为 $s_d = \tau v_x + d_0$,其中 s_d 为期望车距, τ 为车间时距, v_x 为本车车速, d_0 为设定的最小安全车距。

[0042] 步骤4:若车辆进入自动跟踪前车模式,系统控制作用切换模块则根据驱动/制动切换策略,对驱动或制动模式进行选择。

[0043] 设 s 为两车实际车辆间距,则车距误差表示为 $\Delta s = s - s_d$,两车相对速度(即前车速度与本车速度之差)用 v_r 表示。本发明根据车距误差与相对速度的关系提出驱动/制动切换策略,保证车辆行驶时的舒适性。

[0044] 如图3所示,以车距误差 Δs 和两车相对速度 v_r 作为坐标轴,设雷达能检测到的最大距离为 L ,取 $\pm L$ 为 Δs 的上下限。将整个区域划分为3个控制区,分别为驱动区、制动区、以及过渡区。在驱动区,车辆进行驱动模式行驶;在制动区,车辆进行制动模式行驶;图中虚线斜率为 -45° ,虚线上下移动 δ (δ 为大于零且很小的值)形成的区域为过渡区,车距误差 Δs 和两车相对速度 v_r 在此区域时车辆既不驱动也不制动,称为滑行模式。设立此过渡区以减少驱动与制动的频繁切换,提高车辆行驶的舒适性。

[0045] 步骤5:车辆进入驱动模式或制动模式时,期望力矩计算模块以 $\Delta s, v_r$ 无限趋近零为控制目标计算出相应的期望控制力矩,算法包括以下步骤:

[0046] 步骤5.1:建立自适应巡航系统跟车模式模型

[0047] 考虑到自适应巡航行驶工况下纵向滑移率很小,假设轮胎纵向力和滑移率成比例,建立纵向模型,驱动模式和制动模式下的状态方程分别为:

$$[0048] \quad \dot{x}_1 = v_1 - x_2$$

$$[0049] \quad \dot{x}_2 = \frac{k}{m} \frac{x_2 - r_{eff} x_3}{x_2} - fg - \frac{C_D A}{21.15m} x_2^2 \quad (\text{制动模式})$$

$$[0050] \quad \dot{x}_3 = -\frac{kr_{eff}}{2J} \frac{x_2 - r_{eff} x_3}{x_2} + \frac{1}{2J} u + \Delta E(t)$$

$$[0051] \quad \dot{x}_1 = v_1 - x_2$$

$$[0052] \quad \dot{x}_2 = \frac{k}{m} \frac{x_2 - r_{eff} x_3}{r_{eff} x_3} - fg - \frac{C_D A}{21.15m} x_2^2 \quad (\text{驱动模式})$$

$$[0053] \quad \dot{x}_3 = -\frac{kr_{eff}}{2J} \frac{x_2 - r_{eff} x_3}{r_{eff} x_3} + \frac{1}{2J} u + \Delta E(t)$$

[0054] 其中,状态变量 $x = [x_1, x_2, x_3]^T$, $x_1 = s$ 表示本车与前车实际距离, $x_2 = v_x$ 表示本车

速度, $x_3 = \omega_w$ 表示车轮转速; v_1 表示前车车速; k 为轮胎侧偏刚度; m 为车辆质量; r_{eff} 为轮胎有效半径; f 为滚动阻力系数; g 为重力加速度; C_d 为空气阻力系数; A 车辆迎风面积 J 车轮转动惯量; u 为系统模型的输入, 取为传递到车轮的力矩 T_{wheel} , 当 T_{wheel} 为正时表示驱动力矩, 为负时表示制动力矩; $\Delta E(t)$ 为不确定性和外部干扰, t 为时间。

[0055] 步骤5.2: 上述自适应巡航系统纵向动力学模型速度控制存在非线性问题且系统状态变量间有较强的耦合性, 因此本发明采用反演滑模控制器, 以制动模式为例说明制动力矩滑模控制律的计算:

[0056] 步骤5.2.1: 取期望距离信号 s_d , 设 $z_1 = s - s_d$, 则 $\dot{z}_1 = \dot{s} - \dot{s}_d = v_f - x_2 - \dot{s}_d$

[0057] 步骤5.2.2: 定义Lyapunov函数: $V_1 = \frac{1}{2} z_1^2$, 则 $\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1(v_f - x_2 - \dot{s}_d)$, 取

$x_2 = c_1 z_1 + \dot{s}_d - v_f - z_2$, 其中 c_1 为大于0的正常数, z_2 为虚拟控制量, 即

[0058] $z_2 = -x_2 + c_1 z_1 + \dot{s}_d - v_f$, 则 $\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2$ 。

[0059] 步骤5.2.3: 定义Lyapunov函数: $V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2$, 由于 $\dot{z}_2 = -\dot{x}_2 + c_1 \dot{z}_1 + \ddot{s}_d - \dot{v}_f$,

[0060] 则:

[0061] $\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 (fg - \frac{k}{m} \frac{x_2 - r_{\text{eff}} x_3}{x_2} + \frac{C_D A}{21.15m} x_2^2 + c_1 \dot{z}_1 + \ddot{s}_d - \dot{v}_f)$

[0062] 取:

[0063] $x_3 = \frac{x_2}{r_{\text{eff}}} (1 - fg \frac{m}{k} - \frac{C_D A}{21.15k} x_2^2 - \frac{c_1 \dot{z}_1 m}{k} \frac{\dot{s}_d m}{k} + \frac{\dot{v}_f m}{k} - \frac{c_2 z_2 m}{k} - \frac{m z_1 - m z_3}{k})$

[0064] 其中, c_2 为大于0的正常数,

[0065] $z_3 = fg - \frac{k}{m} \frac{x_2 - r_{\text{eff}} x_3}{x_2} + \frac{C_D A}{21.15m} x_2^2 + c_1 \dot{z}_1 + \ddot{s}_d - \dot{v}_f + c_2 z_2 + z_1$

[0066] 则:

[0067] $\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3$;

[0068] 步骤5.2.4: 取滑模切换函数为 $s = z_3$, 定义Lyapunov函数: $V_3 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2$, 由于

[0069] $\dot{z}_3 = \frac{k}{m} (\frac{u r_{\text{eff}}}{2J x_2^2} - \frac{k r_{\text{eff}}^2}{2J} \frac{x_2 - r_{\text{eff}} x_3}{x_2^3} + \frac{x_2 \dot{x}_2 - r_{\text{eff}} x_3 \dot{x}_2 - \dot{x}_2}{x_2^2}) + \frac{2C_D A}{21.15} x_2 \dot{x}_2 + c_1 \dot{z}_1 + c_2 \dot{z}_2 + \dot{z}_1$

[0070] 则:

[0071] $\dot{V}_3 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3 + z_3 [\frac{k}{m} (\frac{u r_{\text{eff}}}{2J x_2^2} - \frac{k r_{\text{eff}}^2}{2J} \frac{x_2 - r_{\text{eff}} x_3}{x_2^3} + \frac{x_2 \dot{x}_2 - r_{\text{eff}} x_3 \dot{x}_2 - \dot{x}_2}{x_2^2}) + \frac{2C_D A}{21.15} x_2 \dot{x}_2 + c_1 \dot{z}_1 + c_2 \dot{z}_2 + \dot{z}_1]$

[0072] 步骤5.2.5: 为使 $\dot{V}_3 \leq 0$, 制动模式时, 取制动力矩滑模控制律为:

[0073] $u = \frac{2J x_2^2}{r_{\text{eff}}} [\frac{m}{k} (-c_3 z_3 - z_2 - \frac{1}{z_3} \eta \text{sgn}(z_3)) - \frac{2C_D A}{21.15} x_2 \dot{x}_2 - c_1 \dot{z}_1 - c_2 \dot{z}_2 - \dot{z}_1] + \frac{k r_{\text{eff}}^2}{2J} \frac{x_2 - r_{\text{eff}} x_3}{x_2^3} - \frac{x_2 \dot{x}_2 - r_{\text{eff}} x_3 \dot{x}_2 - \dot{x}_2}{x_2^2}$

[0074] 其中, c_3 为大于0的正常数; η 为滑模切换增益;

[0075] 驱动模式下, 驱动力矩的滑模控制律计算方法与上述步骤相同, 驱动力矩的滑模控制律为:

[0076]

$$u = \frac{2Jm\dot{x}_3^2 r_{eff}}{k(\dot{x}_2 - x_3 r_{eff} - x_2)} (-z_2 - c_3 z_3 - \frac{1}{z_3} \eta \operatorname{sgn}(z_3)) - \frac{2C_D A}{21.15} x_2 \dot{x}_2 - c_1 \dot{z}_1 - c_2 \dot{z}_2 - \dot{z}_1) + \frac{k(x_2 - r_{eff} x_3)}{x_3}$$

[0077] 步骤5.3: 调节控制律中参数 c_1, c_2, c_3 的取值可改变系统的动态特性, 本发明采用模糊逻辑实现反演滑模控制器参数 c_1, c_2, c_3 的自调整。

[0078] 步骤5.3.1: 选择两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 和两车相对速度 v_r 作为模糊模型的输入变量, 控制器参数 c_1, c_2, c_3 作为输出变量。

[0079] 步骤5.3.2: 设定模糊模型输入变量 Δs 的论域为 $[-50, 50]$, 输入变量 v_r 的论域为 $[-20, 20]$, 量化因子都取1; 输出变量 c_1, c_2, c_3 的论域都设定为 $[0, 50]$, 比例因子都取1。

[0080] 步骤5.3.3: 将所述两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 的模糊子集都分为7个语言变量等级, 模糊集均设为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 分别表示 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}; 将控制器参数 c_1, c_2, c_3 分别设为5个语言变量等级, 模糊集都为 {ZO, PS, PM, PB, VB}, 分别表示 {零, 正小, 正中, 正大, 很大}; 选用高斯函数作为隶属度函数。

[0081] 步骤5.3.4: 模糊规则控制表如表1所示, 模糊模型控制规则的确定逻辑为: 当两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 都为PB (正大) 时, 需要电机输出大的驱动力矩, 此时取输出变量 c_1, c_2, c_3 为ZO; 当两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 都为PB时, 期望力矩为大的制动力矩, 此时也取输出变量 c_1, c_2, c_3 为ZO; 当两车实际距离与期望安全距离之差 Δs 与两车相对速度 v_r 都为ZO时, 此时控制收敛, 取输出变量 c_1, c_2, c_3 为VB; 根据相同逻辑, 将控制策略汇总为49条控制规则。

[0082] 表1

Δs	v_r						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB
NM	ZO	ZO	PS	PM	PB	VB	VB
[0083] NS	ZO	PS	PM	PB	VB	PB	PM
ZO	PS	PM	PB	VB	PB	PM	PS
PS	PM	PB	VB	PB	PM	PS	ZO
PM	PB	VB	PB	PM	PS	ZO	ZO
PB	VB	PB	PM	PS	ZO	ZO	ZO

[0084] 步骤5.4: 将神经网络与模糊系统融合, 从而使模糊系统中隶属度函数的选取不断改善。因此本发明构造了一个五层神经网络模糊系统, 如图4所示神经网络模糊系统结构示意图, 采用多层前向神经网络完成模糊模型每一步功能。

[0085] 步骤5.4.1: 下面具体给出每一层的节点函数。

[0086] 第一层: 输入层, 将输入值传送至下一层。节点数 $N_1=2, y_1^{(1)} = x_1^{(1)} = \Delta s, y_2^{(1)} = x_2^{(1)} = v_r$ 。

[0087] 第二层: 总节点数 $N_2=14$, 每个节点代表一个语言变量值, 如PB, ZO等, 作用为计算

各输入分量属于各语言变量值模糊集合的隶属度函数 μ_i^j , $\mu_i^j = e^{-\frac{(x_i^{(0)} - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}}$, 其中 c_{ij} 和 σ_{ij} 分别表示隶属度函数的中心和宽度, $i=1,2$ 是输入量的维数, $j=1,2,\dots,7$, 是语言变量等级数。

[0088] 第三层: 每个节点代表一条模糊规则, 用来匹配模糊规则的前件, 计算出每条规则的适用度。节点数 $N_3=49$ 代表 49 条模糊规则, $\alpha_j^{(3)} = \min\{\mu_{i_1}^{j_1}, \mu_{i_2}^{j_2}\}$, 其中 $i_1 \in \{1,2,\dots,7\}$, $i_2 \in \{1,2,\dots,7\}$, $j=1,2,\dots,49$;

[0089] 第四层: 完成规则的后件, 进行模糊推理并输出模糊量。节点数 $N_4=N_3=49$, 实现的是归一化计算, 即 $\bar{\alpha}_j = \alpha_j / \sum_{i=1}^{49} \alpha_i$, $j=1,2,\dots,49$ 。

[0090] 第五层: 输出层, 实现清晰化计算, 输出控制量。节点数 $N_5=3$, 表示 3 个输出变量, $y_i^{(5)} = \sum_{j=1}^{49} \omega_{ij} y_j^{(4)}$, 其中 ω_{ij} 为网络的连接权值。

[0091] 步骤 5.4.2: 上述所述的网络节点函数中, 需要学习的主要参数为最后一层的连接权 ω_{ij} 和隶属度函数的中心 c_{ij} 和宽度 σ_{ij} , 本发明采用 BP 网络误差反传的方法来设计、调整参数的学习算法。

[0092] 定义目标函数为 $E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (r_i - y_i)^2$, 其中 r_i 和 y_i 分别表示期望输入和实际输出。

[0093] 参数调整的学习算法为:

$$[0094] \quad (1) \quad \omega_{ij}(k+1) = \omega_{ij}(k) - \beta \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} \quad (i=1,2,3; j=1,2,\dots,49)$$

$$[0095] \quad (2) \quad c_{ij}(k+1) = c_{ij}(k) - \beta \frac{\partial E}{\partial c_{ij}} \quad (i=1,2; j=1,2,\dots,7)$$

$$[0096] \quad (3) \quad \sigma_{ij}(k+1) = \sigma_{ij}(k) - \beta \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} \quad (i=1,2; j=1,2,\dots,7)$$

[0097] 其中, $\beta > 0$, 为学习率。

[0098] 步骤 6: 转换器模块将期望力矩计算模块计算得到的驱动或制动力矩转换成对应的踏板信号, 输出到执行器模块完成自适应巡航的控制。

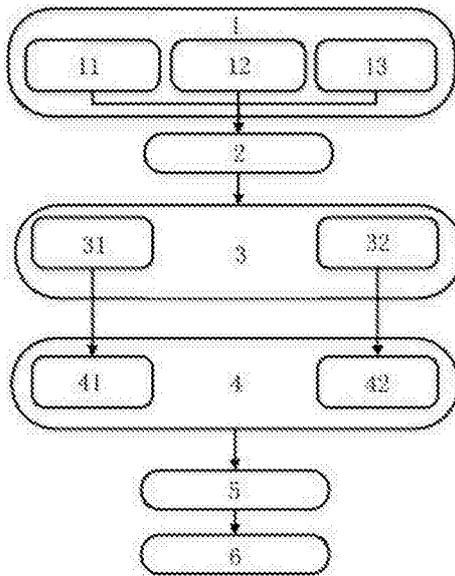


图1

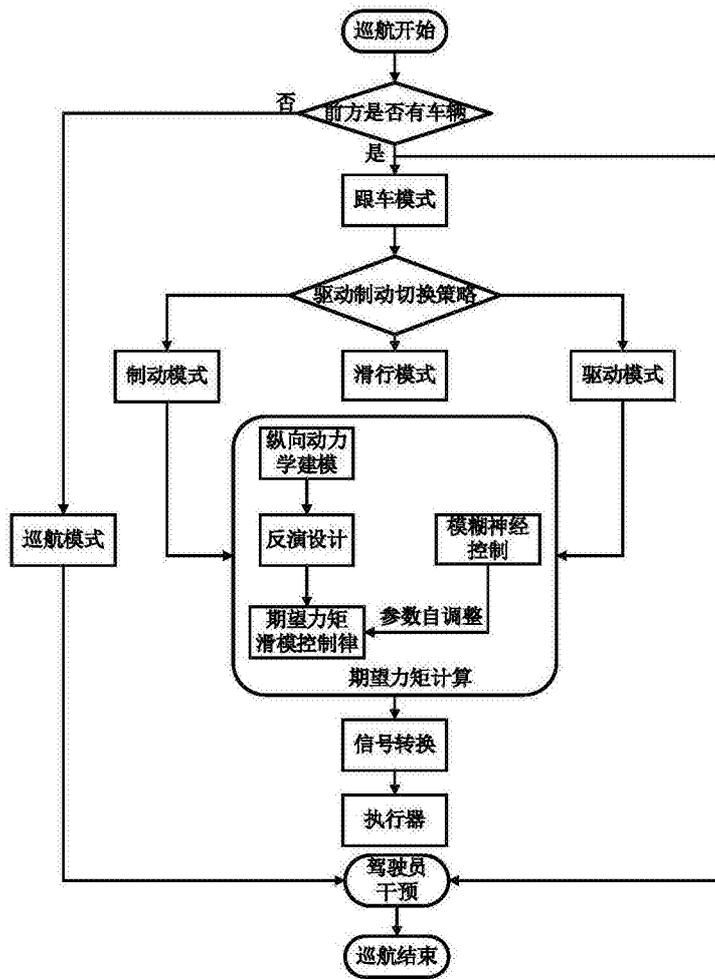


图2

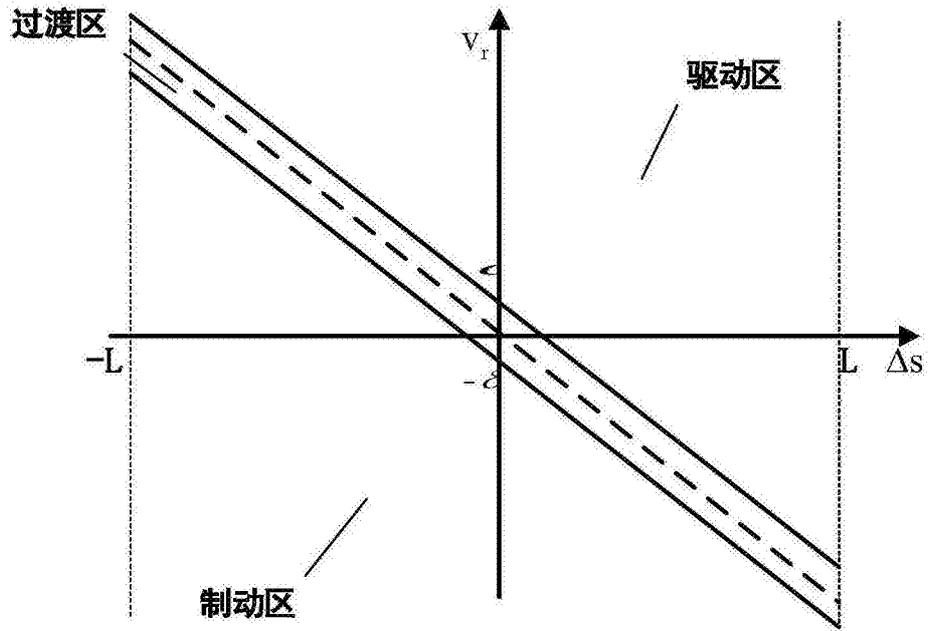


图3

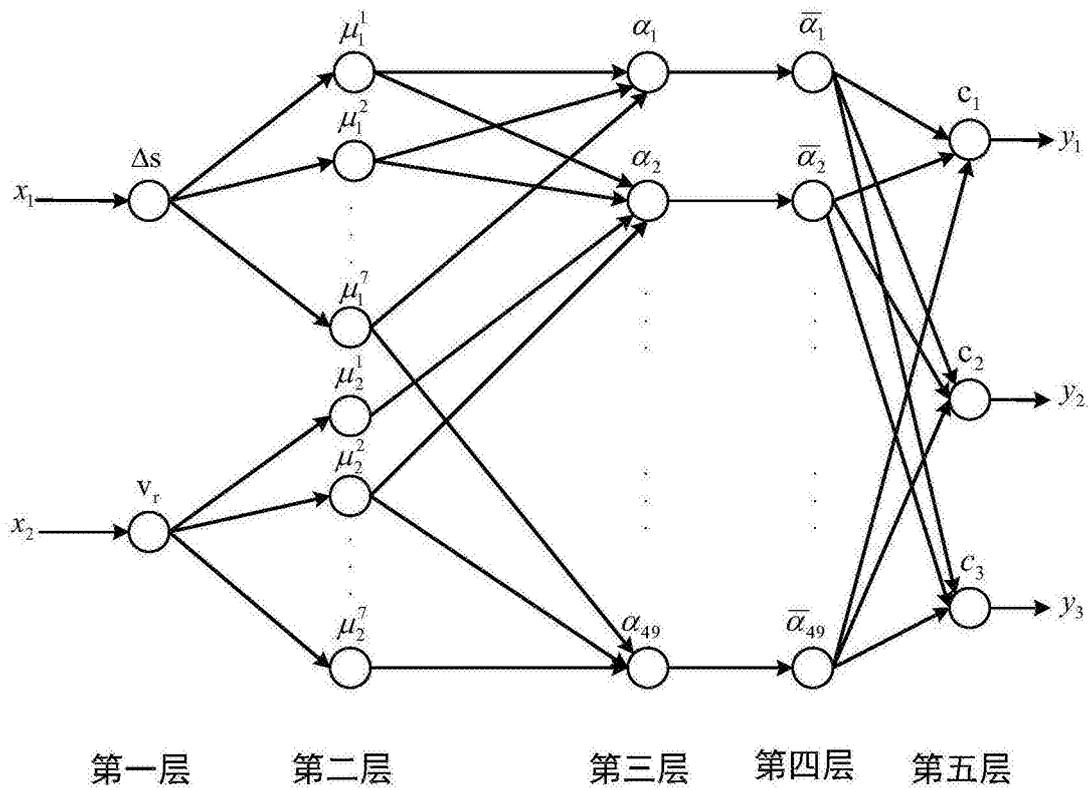


图4