



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107097785 A

(43)申请公布日 2017.08.29

(21)申请号 201710378710.1

(22)申请日 2017.05.25

(71)申请人 江苏大学

地址 212013 江苏省镇江市京口区学府路301号

(72)发明人 汪若尘 谢辰阳 孙泽宇 孟祥鹏 陈龙

(51)Int.Cl.

B60W 30/10(2006.01)

G05B 13/04(2006.01)

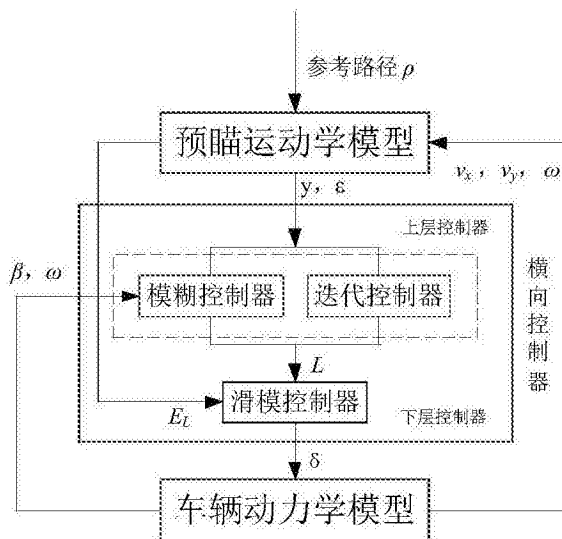
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法。属于智能车辆横向控制技术领域。本发明涉及的横向控制方法包含以下步骤：步骤一，建立整车十四自由度动力学参考模型。步骤二，设计分层式横向控制器结构。分层式横向控制器分为上层控制器和下层控制器，其中上层控制器由模糊控制器和迭代学习控制器并联组成。下层控制器基于准滑动模态理论设计。本发明提出的预瞄距离自适应的横向控制器，在道路曲率连续变化工况下，相较于传统固定预瞄距离的横向控制器，在保证路径跟踪精度满足要求的同时，兼顾了车辆的操纵稳定性和乘坐舒适性。



1. 一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1,首先建立整车14自由度非线性车辆动力学模型作为参考模型;

步骤2,构建分层式横向控制器,分层式横向控制器分为上层控制器和下层控制器两部分;上层控制器由模糊控制器和迭代控制器并联组成,下层控制器为滑模控制器;

步骤3,根据车辆与参考路径的几何关系建立的预瞄运动学模型接收步骤1的车辆动力学模型产生的纵向速度 v_x 、侧向速度 v_y 和横摆角速度 ω 数据,结合参考路径曲率 ρ 计算预瞄点处车辆的横向、方向误差 ε ,并作为滑模控制器输入;

步骤4,以消除预瞄点处综合误差 E_L 为控制目标,设计切换函数 S ,使用饱和函数替代符号函数设计趋近率,联立切换函数的导数和趋近率,并代入车辆横向动力学模型得到所需滑模控制器;

步骤5,基于实时的车辆状态信息:车辆质心侧偏角 β 、横摆角速度 ω 、预瞄点处横向误差 y 、方向误差 ε 设计模糊控制器;

步骤6,设计迭代控制器:首先设计开环学习律,被控对象包含滑模控制器和车辆动力学模型;将车辆实际行驶方向和参考路径预瞄点处切线方向的方向误差为开环学习律的输入,开环学习律当前时刻得出的结果与上一时刻得出的结果相加发送至存储器储存,同时传送至被控对象;

步骤7,自适应预瞄距离计算。

2. 根据权利要求1所述的一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法,其特征在于,所述步骤1的车辆动力学模型为:

$$I_z \dot{\omega} = a(F_{1c} + F_{2c}) - b(F_{3c} + F_{4c})$$

$$m(\dot{v}_y + v_x \omega) = F_{1c} + F_{2c} + F_{3c} + F_{4c}$$

式中: a 、 b 分别为车辆质心距前、后轴的距离, m 、 ω 为横摆角速度, rad/s ; v_x 、 v_y 分别为纵向速度、侧向速度, m/s ; I_z 为整车绕 z 轴的转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; F_i 为悬架与车身链接点的悬架力; F_{ic} 为轮胎侧向力,由Dugoff轮胎模型获得。

3. 根据权利要求1所述的一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法,其特征在于,所述步骤3的预瞄运动学模型为:

根据车辆与参考路径的几何关系计算预瞄点处的横向误差及方向误差,表达式为:

$$\begin{cases} \dot{y} = v_x \varepsilon - v_y - \omega L \\ \dot{\varepsilon} = \frac{v_x}{R} - \omega \end{cases}$$

式中: y 为预瞄点处横向误差, m ; ε 为预瞄点处方向误差, rad ; R 、 L 分别道路曲率半径和预瞄距离, m ; v_x 、 v_y 分别为纵向速度、侧向速度。

4. 根据权利要求1所述的一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法,其特征在于,所述步骤4的滑模控制器为:

定义综合偏差 E_L :

$$E_L = \gamma \frac{y_{\max} - y}{y_{\max} - y_{\min}} + (1 - \gamma) \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}$$

式中: γ 为权重系数; y_{\max} 、 y_{\min} 、 ε_{\max} 、 ε_{\min} 分别为横向误差与方向误差的最大、最小值; γ 的取值由试测法确定;

定义切换函数S:

$$S = \dot{E}_L + cE_L$$

式中:c为常数;

设计指数趋近率slaw:

$$slaw = -\eta \text{sat}(S) - kS$$

式中: η, k 为控制器常数;

对切换函数S求导,令 $\dot{S} = slaw$,代入车辆横向动力学模型,得滑模控制器输出前轮转向角 δ 。

5. 根据权利要求1所述的一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法,其特征在于,所述步骤5的模糊控制器设计如下:

S3.1, 定义预瞄点处综合偏差向左为正,向右为负,定义车辆质心侧向加速度向左为负,向右为正,定义综合偏差和负质心侧偏加速度为模糊控制器输入,控制器输出为预瞄距离补偿量 ΔL_1 ;

S3.2, 综合误差和质心侧向加速度均转化为 $[-6, 6]$ 的模糊集,模糊子集的语言变量为{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB},输出变量转化为 $[0, 1]$ 的模糊集,语言变量为{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB},其中NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB分别称为负大,负中,负小,零,正小,正中,正大;选择三角函数作为输入、输出变量的隶属度函数,模糊逻辑推理采用Mamdani法,重心法作为解模糊判决;

S3.3, 采用专家经验法定义模糊规则表,模糊控制规则由IF-THEN模糊语句构成:

$$R^{(i)}: \text{IF } y \text{ is } A_1^i \text{ AND } -a_y \text{ is } A_2^i \text{ THEN } \Delta L_1 \text{ is } B^i;$$

其中 A_1^i, A_2^i 为输入变量模糊子集语言变量, B^i 为输出变量模糊子集语言变量, $i = 1, 2, \dots, 49$ 代表模糊规则的数目。

6. 根据权利要求1所述的一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法,其特征在于,所述步骤6中,迭代控制器的具体设计过程为:以滑模控制器和车辆动力学模型为被控对象,以消除方向误差为控制目标,迭代控制器输出为下一时刻的预瞄距离,设计PID型开环迭代学习律,则预瞄距离补偿量为:

$$\Delta L_2 = k_p |\varepsilon_k(t)| + k_d \left| \frac{d\varepsilon_k(t)}{dt} \right| + k_i \int_0^t |\varepsilon_k(t)| dt$$

式中: k_p, k_d, k_i 分别为比例、微分、积分系数, $\varepsilon_k(t)$ 为当前时刻方向误差。

7. 根据权利要求1所述的一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法,其特征在于,所述步骤7的自适应预瞄距离计算为:将初始预瞄距离 $L' = 0.5v_x$ 与预瞄距离补偿量 $\Delta L_1, \Delta L_2$ 累加得: $L = 0.5v_x + \Delta L_1 + \Delta L_2$;其中 v_x 为纵向速度。

一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于智能车辆运动控制领域,涉及一种智能车辆横向控制方法,特别涉及一种基于模糊理论和迭代学习理论的预瞄距离计算方法。

背景技术

[0002] 智能车辆运动控制技术根据控制目标的不同分为纵向控制和横向控制两类。其中,横向控制技术是实现智能车辆自主行驶的关键技术之一。预瞄式横向控制以车辆前方预瞄点处的位姿误差为控制器输入,对参考路径变化有良好的适应性。

[0003] 仿真和试验结果显示,在参考路径曲率连续变化工况下,预瞄距离的选择对路径跟踪精度、车辆操纵稳定性和乘坐舒适性有显著影响。目前,预瞄式横向控制器设计中,通常将预瞄距离表示为纵向车速的一次或二次函数。专利CN103439884A以固定预瞄距离设计了智能车辆横向控制器。该方法仅能保证横向控制精度满足需求,随着纵向车速的增加,车辆质心侧向加速度逼近或超过 $0.4g$,导致线性化动力学模型描述不准确,不仅使横向控制精度下降,车辆操纵稳定性和乘坐舒适性均有所恶化。

发明内容

[0004] 为了克服现有技术存在的上述问题,本发明需要提出一种预瞄距离自适应的智能车辆横向控制方法,既要使智能车辆在参数变化和外界干扰情况下实现对路径的精确跟踪,又要兼顾跟踪过程中车辆操纵稳定性和乘坐舒适性。

[0005] 为实现上述目标,本发明的技术方案是:一种预瞄距离自适应的横向控制方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤1,首先建立整车14自由度非线性车辆动力学模型作为参考模型;

[0007] 步骤2,构建分层式横向控制器,分层式横向控制器分为上层控制器和下层控制器两部分;上层控制器由模糊控制器和迭代控制器并联组成,下层控制器为滑模控制器;

[0008] 步骤3,根据车辆与参考路径的几何关系建立的预瞄运动学模型接收步骤1的车辆动力学模型产生的纵向速度 v_x 、侧向速度 v_y 和横摆角速度 ω 数据,结合参考路径曲率 ρ 计算预瞄点处车辆的横向、方向误差 ϵ ,并作为滑模控制器输入;

[0009] 步骤4,以消除预瞄点处综合误差 E_L 为控制目标,设计切换函数 S ,使用饱和函数替代符号函数设计趋近率,联立切换函数的导数和趋近率,并代入车辆横向动力学模型得到所需滑模控制器;

[0010] 步骤5,基于实时的车辆状态信息:车辆质心侧偏角 β 、横摆角速度 ω 、预瞄点处横向误差 y 、方向误差 ϵ 设计模糊控制器;

[0011] 步骤6,设计迭代控制器:首先设计开环学习律,被控对象包含滑模控制器和车辆动力学模型;将车辆实际行驶方向和参考路径预瞄点处切线方向的方向误差为开环学习律的输入,开环学习律当前时刻得出的结果与上一时刻得出的结果相加发送至存储器储存,同时传送至被控对象;

[0012] 步骤7,自适应预瞄距离计算。

[0013] 进一步,所述步骤1的车辆动力学模型为:

$$I_z \dot{\omega} = a(F_{1c} + F_{2c}) - b(F_{3c} + F_{4c})$$

[0014]

$$m(\dot{v}_y + v_x \omega) = F_{1c} + F_{2c} + F_{3c} + F_{4c}$$

[0015] 式中:a、b分别为车辆质心距前、后轴的距离,m; ω 为横摆角速度,rad/s; v_x 、 v_y 分别为纵向速度、侧向速度,m/s; I_z 为整车绕z轴的转动惯量,kg·m²;F_i为悬架与车身链接点的悬架力;F_{ic}为轮胎侧向力,由Dugoff轮胎模型获得。

[0016] 进一步,所述步骤3的预瞄运动学模型为:

[0017] 根据车辆与参考路径的几何关系计算预瞄点处的横向误差及方向误差,表达式为:

$$\begin{cases} \dot{y} = v_x \varepsilon - v_y - \omega L \\ \dot{\varepsilon} = \frac{v_x}{R} - \omega \end{cases}$$

[0019] 式中:y为预瞄点处横向误差,m; ε 为预瞄点处方向误差,rad;R、L分别道路曲率半径和预瞄距离,m; v_x 、 v_y 分别为纵向速度、侧向速度。

[0020] 进一步,所述步骤4的滑模控制器为:

[0021] 定义综合偏差E_L:

$$E_L = \gamma \frac{y_{max} - y}{y_{max} - y_{min}} + (1 - \gamma) \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}$$

[0023] 式中: γ 为权重系数; y_{max} 、 y_{min} 、 ε_{max} 、 ε_{min} 分别为横向误差与方向误差的最大、最小值;

[0024] γ 的取值由试测法确定;

[0025] 定义切换函数S:

$$S = \dot{E}_L + cE_L$$

[0027] 式中:c为常数;

[0028] 设计指数趋近率slaw,以饱和函数sat(S)代替符号函数sgn(S):

$$slaw = -\eta \text{sat}(S) - kS$$

[0030] 式中: η ,k为控制器常数;

[0031] 对切换函数S求导,令 $\dot{S} = slaw$,代入车辆横向动力学模型,得滑模控制器输出前轮转向角 δ 。

[0032] 进一步,所述步骤5的模糊控制器设计如下:

[0033] S3.1,定义预瞄点处综合偏差向左为正,向右为负,定义车辆质心侧向加速度向左为负,向右为正,定义综合偏差和侧向加速度为模糊控制器输入,控制器输出为预瞄距离补偿量 ΔL_1 ;

[0034] S3.2,综合误差和质心侧向加速度均转化为[-6,6]的模糊集,模糊子集的语言变量为{NB,NM,NS,ZE,PS,PM,PB},输出变量转化为[0,1]的模糊集,语言变量为{NB,NM,NS,ZE,PS,PM,PB},其中NB,NM,NS,ZE,PS,PM,PB分别称为负大,负中,负小,零,正小,正中,正大;选择三角函数作为输入、输出变量的隶属度函数,模糊逻辑推理采用Mamdani法,重心法

作为解模糊判决；

[0035] S3.3,采用专家经验法定义模糊规则表,模糊控制规则由IF-THEN模糊语句构成:

[0036] $R^{(i)}$: IF y is A_1^i AND $-a_y$ is A_2^i THEN ΔL_1 is B^i ;

[0037] 其中 A_1^i , A_2^i 为输入变量模糊子集语言变量, B^i 为输出变量模糊子集语言变量, $i = 1, 2, \dots, 49$ 代表模糊规则的数目。

[0038] 进一步,所述步骤6中,迭代控制器的具体设计过程为:以滑模控制器和车辆动力学模型为被控对象,以消除方向误差为控制目标,迭代控制器输出为下一时刻的预瞄距离,设计PID型开环迭代学习律,则预瞄距离补偿量为:

$$[0039] \quad \Delta L_2 = k_p |\varepsilon_k(t)| + k_d \left| \frac{d\varepsilon_k(t)}{dt} \right| + k_i \int_0^t |\varepsilon_k(t)| dt$$

[0040] 式中: k_p 、 k_d 、 k_i 分别为比例、微分、积分系数, $\varepsilon_k(t)$ 为当前时刻方向误差。

[0041] 进一步,所述步骤7的自适应预瞄距离计算为:将初始预瞄距离 $L' = 0.5v_x$ 与预瞄距离补偿量 ΔL_1 、 ΔL_2 累加得: $L = 0.5v_x + \Delta L_1 + \Delta L_2$;其中 v_x 为纵向速度。

[0042] 本发明的有益效果为:本发明提出了一种预瞄距离自适应的横向分层控制器。不同于常规横向控制器当纵向车速恒定时,预瞄距离为定值。本发明将预瞄点处的横向误差、方向误差、质心侧向加速度作为预瞄距离修正的参考因素。上层控制器结合实时的车辆状态信息计算出合理的预瞄距离,下层控制器接收上层控制器计算得出的预瞄距离,实现对参考路径的精确跟踪。这种横向控制器不仅保证了智能车辆路径跟踪精度满足需求,同时兼顾了路径跟踪过程中,车辆的操纵稳定性和乘坐舒适性。

附图说明

[0043] 图1是横向控制系统控制流程示意图;

[0044] 图2是整车14自由度车辆动力学模型示意图;

[0045] 图3是智能车辆与参考路径几何关系示意图;

[0046] 图4是输入变量的隶属度函数示意图;

[0047] 图5是输出变量的隶属度函数示意图;

[0048] 图6是迭代学习控制器结构示意图;

具体实施方式

[0049] 以下结合技术方案和附图详细叙述本发明的实施过程:

[0050] 如图1所示,本发明提及的横向控制系统包括预瞄运动学模型、分层式横向控制器、车辆动力学模型三部分。其中,分层式横向控制器分为上层控制器和下层控制器两部分。上层控制器由模糊控制器和迭代控制器并联组成。下层控制器为滑模控制器。

[0051] 控制系统的具体工作流程为预瞄运动学模型根据当前车辆纵向车速 v_x 、横向车速 v_y 、横摆角速度 ω 和参考路径曲率 ρ 计算得出预瞄点处横向误差 y 、方向误差 ε 。

[0052] 上层控制器首先发送初始预瞄距离 L 至下层控制器。下层控制器以初始预瞄点处位姿误差为输入,对参考路径进行跟踪。行驶过程中,模糊控制器接收实时的车辆质心侧偏角 β 、横摆角速度 ω 、预瞄点横向误差 y 、方向误差 ε ,计算得到实时车辆质心侧向加速度 a_y 和

综合误差 E_L ,并作为控制器输入,以预瞄距离补偿量 ΔL_1 为控制器输出。迭代控制器以消除方向误差 ε 为目标,输出为预瞄距离补偿量 ΔL_2 。以上述预瞄距离补偿量对当前预瞄距离进行修正,再发送至下层滑模控制器,如此循环上述过程。

[0053] 图1中提及的车辆动力学模型如图2所示,整车14自由度简化模型由四部分组成,分别为簧上质量块、悬架系统、横向稳定杆和车轮。簧上质量块是车身的简化模型。悬架系统的简化模型包括螺旋弹簧和阻尼器。车轮的简化模型由等效螺旋弹簧和簧下质量块表示。左右两侧簧下质量块通过横向稳定杆连接。

[0054] 本发明具体实施步骤如下:

[0055] 步骤1:

[0056] 建立整车14自由度动力学模型作为参考模型。当质心侧向加速度 a_y 小于 $0.4g$,前轮转向角 δ 较小时,参考模型的简化动力学方程具体如下:

$$[0057] \quad I_y \ddot{\theta} = b(F_3 + F_4) - a(F_1 + F_2)$$

$$[0058] \quad I_x \ddot{\varphi} = m_s v_x h_s (\dot{\beta} + \omega) + m_s g h_s \varphi + d(F_2 + F_3 - F_1 - F_4)$$

$$[0059] \quad I_z \dot{\omega} = a(F_{1c} + F_{2c}) - b(F_{3c} + F_{4c})$$

$$[0060] \quad m(\dot{v}_y + v_x \omega) = F_{1c} + F_{2c} + F_{3c} + F_{4c}$$

$$[0061] \quad \text{式中:} \begin{cases} F_1 = -k_1(z_{b1} - z_{w1}) - c_1(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_{w1}) - \frac{k_{af}}{2d}(\varphi - \frac{z_{w2} - z_{w1}}{2d}) \\ F_2 = -k_2(z_{b2} - z_{w2}) - c_2(\dot{z}_{b2} - \dot{z}_{w2}) + \frac{k_{af}}{2d}(\varphi - \frac{z_{w2} - z_{w1}}{2d}) \\ F_3 = -k_3(z_{b3} - z_{w3}) - c_3(\dot{z}_{b3} - \dot{z}_{w3}) + \frac{k_{ar}}{2d}(\varphi - \frac{z_{w3} - z_{w4}}{2d}) \\ F_4 = -k_4(z_{b4} - z_{w4}) - c_4(\dot{z}_{b4} - \dot{z}_{w4}) - \frac{k_{ar}}{2d}(\varphi - \frac{z_{w3} - z_{w4}}{2d}) \end{cases}$$

[0062] a 、 b 、 d 分别为车辆质心距前、后轴的距离、 $1/2$ 车辆轮距, m 。 ω 为横摆角速度, rad/s 。 v_x 、 v_y 分别为纵向速度、侧向速度, m/s 。 θ 、 β 、 φ 分别为俯仰角、质心侧偏角、车身侧倾角, rad 。 I_x 、 I_y 、 I_z 分别为整车绕 x 轴的转动惯量、整车绕 y 轴的转动惯量、整车绕 z 轴的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。 F_i 为悬架与车身连接点处的悬架力, N 。 z_{bi} 、 z_{wi} 分别为悬架与车身连接点位移、轮胎与悬架连接点位移, m 。 k_{af} 、 k_{ar} 分别为前后横向稳定杆侧偏角刚度 $\text{KN} \cdot \text{m/rad}$ 。 F_{ic} 为轮胎侧向力,由Dugoff轮胎模型获得。

[0063] 步骤2:

[0064] 预瞄运动学模型接收车辆动力学模型产生的纵向速度 v_x 、侧向速度 v_y 和横摆角速度 ω 数据,结合参考路径曲率 ρ 计算预瞄点处车辆的横向、方向误差 y 、 ε ,并作为下层控制器输入。

[0065] 由图3所示的车辆与参考路径的几何关系图,建立预瞄运动学模型,则预瞄点处横向误差和方向误差 y 、 ε 的计算方法如下:

$$[0066] \quad \begin{cases} \dot{y} = v_x \varepsilon - v_y - \omega L \\ \dot{\varepsilon} = \frac{v_x}{R} - \omega \end{cases}$$

[0067] 式中: y 为预瞄点处横向误差, m 。 ε 为预瞄点处方向误差, rad 。 R 、 L 分别道路曲率半径和预瞄距离, m 。

[0068] 将预瞄点处横向误差和方向误差归一化后,按一定权重组合成为综合误差。综合误差 E_L 的计算方法如下:

$$[0069] \quad E_L = \gamma \frac{y_{max} - y}{y_{max} - y_{min}} + (1 - \gamma) \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}$$

[0070] 式中 γ 为权重系数, $\gamma = 0.65$ 。 y_{max} 、 y_{min} 、 ε_{max} 、 ε_{min} 分别为横向误差与方向误差的最大、最小值。

[0071] 步骤3:

[0072] 以消除预瞄点处综合误差 E_L 为控制目标, 设计下层滑模控制器。

[0073] 定义切换函数:

$$[0074] \quad S = \dot{E}_L + cE_L$$

[0075] 式中: c 为常数;

[0076] 对切换函数 S 求导得:

$$[0077] \quad \dot{S} = 1 - \frac{\gamma v_x^2}{R y_{max}} + \frac{\gamma v_x \omega}{y_{max}} + \frac{\gamma v_y}{y_{max}} + \left(\frac{\gamma L}{y_{max}} + \frac{1 - \gamma}{\varepsilon_{max}} \right) \dot{\omega}$$

[0078] 设计指数趋近率, 以饱和函数 $\text{sat}(S)$ 代替符号函数 $\text{sgn}(S)$:

$$[0079] \quad \text{slaw} = -\eta \text{sat}(S) - kS$$

[0080] 式中: η , k 为控制器常数;

[0081] 联立切换函数的导数 \dot{S} 和指数趋近率 slaw , 并将上述车辆动力学微分方程代入, 计算得到控制器输出, 即前轮转向角 δ 。

[0082] 步骤4:

[0083] 基于实时的车辆状态信息: 车辆质心侧偏角 β 、横摆角速度 ω 、预瞄点处横向误差 y 、方向误差 ε 设计上层控制器。

[0084] 步骤4.1:

[0085] 实际行驶过程中驾驶员通常以前方某一点作为目标, 通过驾驶操作使车辆在有限时间内到达前方目标点。为了能够使驾驶过程安全、舒适, 有经验的驾驶员通常根据车辆的状态和道路环境不断调整前方目标点位置。

[0086] 参考上述过程, 将驾驶经验转化为控制规则, 再利用模糊理论转化为数学函数, 设计预瞄距离优化模糊控制器。

[0087] 已知, 步骤2提及的综合误差 E_L 能够代表车辆的路径跟踪精度。车身侧倾角 φ 、质心侧偏角 β 等评价指标能够衡量车辆的安全性和舒适性。又已知车身侧倾角 φ 和质心侧偏角 β 与车辆质心侧向加速度 a_y 正相关。因此选择综合误差 E_L 和质心侧向加速度 a_y 为模糊控制器输入, 预瞄距离补偿量 ΔL_1 为控制器输出。定义质心侧向加速度向右为正, 向左为负。将综合误差和负质心侧向加速度转化为论域 $[-6, 6]$ 的模糊集。模糊子集语言变量为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$, 其中 $\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}$ 分别称为负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大。将预瞄距离补偿量 ΔL_1 转化为论域为 $[0, 1]$ 的模糊集。模糊子集语言变量与输入变量相同。预瞄距离变化过于灵敏, 不利于系统的稳定性。因此输入、输出变量的隶属度函数均为三角函数和梯形函数组成, 如图4、图5所示。

[0088] 步骤4.2采用专家经验法确定模糊控制规则。模糊规则如表1所示。每一条模糊控制规则由下面的“IF-THEN”模糊语句构成:

$$[0089] \quad R^{(i)}: \text{IF } y \text{ is } A_1^i \text{ AND } -a_y \text{ is } A_2^i \text{ THEN } \Delta L_1 \text{ is } B^i;$$

[0090] 其中 A_1^i , A_2^i 为输入变量模糊子集语言变量, B^i 为输出变量模糊子集语言变量。 $i =$

1, 2, ..., 49代表模糊规则的数目。模糊逻辑推理采用Mamdani法,采用重心法作为解模糊判决。

[0091] 任选上述模糊规则表中一例:

[0092] $R^{(12)}$: IF E_L is PS AND $-a_y$ is NM THEN ΔL_1 is PM;

[0093] 该模糊规则的具体意义是当综合误差正小,质心侧向加速度负中时,预瞄距离补偿量正中。

[0094] 表一 模糊规则表

ΔL_1		E_L						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
[0095]	NB	ZE	ZE	ZE	PB	PM	PS	NS
	NM	ZE	ZE	ZE	PM	PM	NS	NM
	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PS	NM	NB
	$-a_y$ ZE	PB	PM	PS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NB	NM	NS	PS	ZE	ZE	ZE
	PM	NM	NS	PM	PM	ZE	ZE	ZE
	PB	NS	PS	PB	PB	ZE	ZE	ZE

[0096] 步骤五:基于图6迭代控制器结构示意图,设计开环学习律。步骤如下:

[0097] 图中所示被控对象包含下层滑模控制器和车辆动力学模型。车辆实际行驶方向和参考路径预瞄点处切线方向的方向误差为开环学习律的输入。开环学习律当前时刻得出的结果与上一时刻得出的结果相加发送至存储器储存。同时传送至被控对象。

[0098] 以消除方向误差为控制目标。设计开环PID迭代学习律,预瞄距离补偿量可表示为:

$$[0099] \quad \Delta L_2 = k_p |\varepsilon_k(t)| + k_d \left| \frac{d\varepsilon_k(t)}{dt} \right| + k_i \int_0^t |\varepsilon_k(t)| dt$$

[0100] 式中: k_p 、 k_d 、 k_i 分别为比例、微分、积分系数, $\varepsilon_k(t)$ 为当前时刻方向误差。

[0101] 步骤六:自适应预瞄距离计算方法为:将初始预瞄距离 $L' = 0.5v_x$ 与预瞄距离补偿量 ΔL_1 、 ΔL_2 累加得:

$$[0102] \quad L = 0.5v_x + \Delta L_1 + \Delta L_2。$$

[0103] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示意性实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不一定指的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任何的一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。

[0104] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,本领域的普通技术人员可以理解:在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本发明的范围由权利要求及其等同物限定。

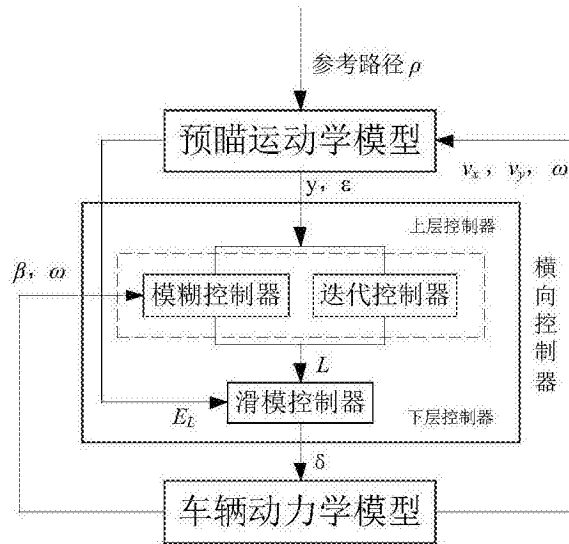


图1

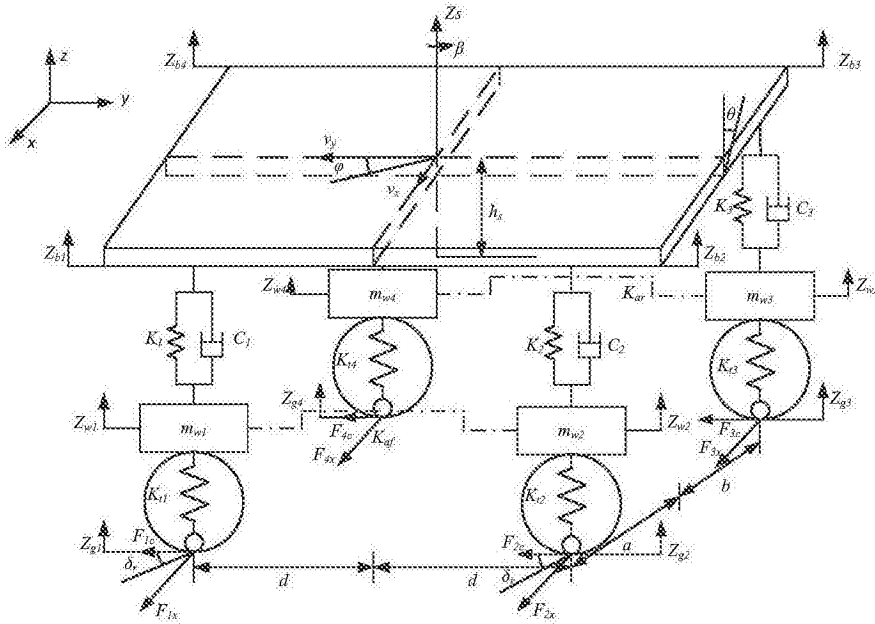


图2

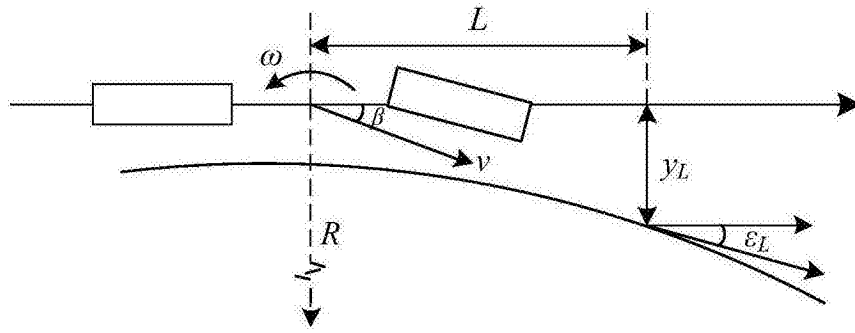


图3

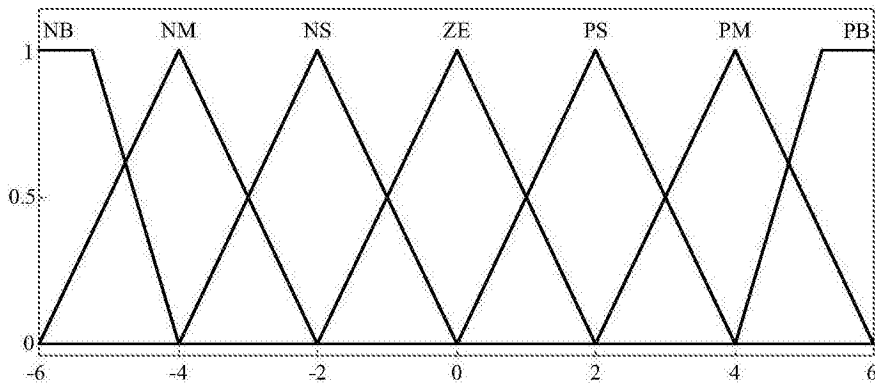


图4

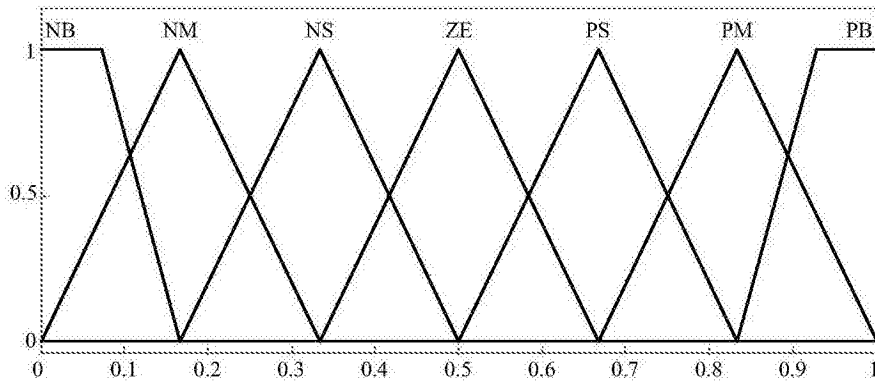


图5

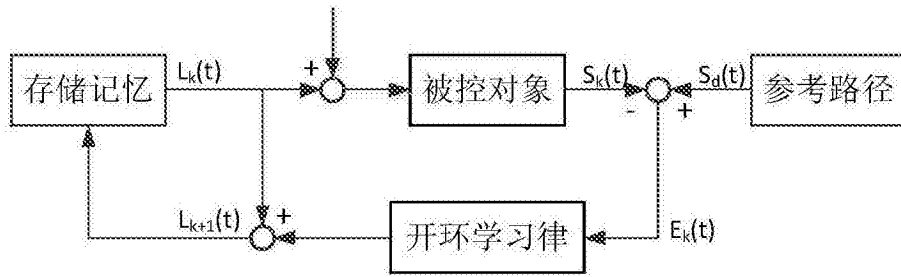


图6