(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110435623 A
(43)申请公布日 2019.11.12

(21)申请号 201910801636.9

(22)申请日 2019.08.28

(71)申请人 吉林大学
地址 130012 吉林省长春市前进大街2699号

(72)发明人 赵健 宋东鉴 朱冰 赵文博 孙卓 王春迪

(74)专利代理机构 长春市恒誉专利代理事务所（普通合伙）22212
代理人 梁紫钺

(51)Int.Cl.
B60T 13/74(2006.01)
B60W 30/09(2012.01)
B60W 50/14(2012.01)
B60W 40/06(2012.01)
B60W 40/064(2012.01)
B60W 40/076(2012.01)
B60L 7/10(2006.01)
B60W 30/02(2012.01)

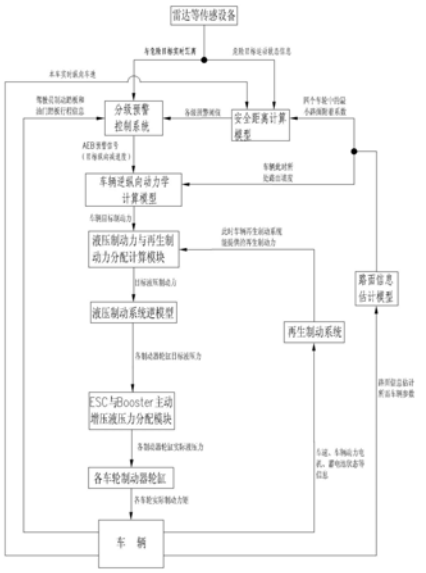
权利要求书13页 说明书18页 附图7页

(54)发明名称

一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统

(57)摘要

本发明涉及一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统。包括：车载测距测速传感设备、分级预警控制系统、安全距离计算模型、车辆逆纵向动力学计算模型、液压制动力与再生制动力分配计算模块、液压制动系统逆模型、ESC与Booster主动增压液压力分配模块和路面信息估计模型，改善AEB系统触发时的舒适性同时降低本车突然大幅减速致使后车追尾等安全隐患，对车辆的当前行驶道路以及前方道路的坡度、附着系数等信息进行估算，控制参数的在线调整，增强AEB系统对不同路面状况的适应程度，充分回收制动能量，提高续航里程，充分发挥车身稳定性控制系统ESC与电子机械制动助力器Booster在主动增压上的优势。



CN 110435623 A

1.一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统，其特征在于：所述的控制系统包括：车载测距测速传感设备、分级预警控制系统、安全距离计算模型、车辆逆纵向动力学计算模型、液压制动力与再生制动力分配计算模块、液压制动系统逆模型、ESC与Booster主动增压液压力分配模块和路面信息估计模型，系统的控制方法如下所述：

(1)车辆在行驶过程中，车载测距测速传感设备将本车与危险目标实时距离S传递给分级预警控制系统，将危险目标车的车速、加速度等运动状态信息传递给安全距离计算模型；路面信息估计模型将四个车轮中的最小路面附着系数μ传递给安全距离计算模型，将车辆此时所处路面坡度传递给车辆逆纵向动力学计算模型；

(2)所述安全距离计算模型将AEB系统的制动强度分为轻度制动和全力制动两种，根据四个车轮中的最小路面附着系数μ确定AEB系统的两级制动强度的目标制动减速度a_{exp}，并根据危险目标运动状态信息以及本车车速传感器测得的本车实时纵向车速v_0，确定AEB系统的三个控制信号触发阈值：感官预警安全距离阈值S_w、轻度制动的安全距离阈值S_d、全力制动的安全距离阈值S_b；

(3)分级预警控制系统将本车与危险目标实时距离S与各级预警阈值S_w、S_d、S_b的大小进行比较，结合驾驶员是否有主动的减速操作，分析产生AEB预警控制信号即车辆的目标纵向减速度a_{exp}：若$S>S_w$，则系统判断此时车辆与前车距离处于安全范围，不进行作动；若$S_w<S<S_d$，则系统会对驾驶员进行视觉触觉预警，提醒驾驶员进行减速操作；若$S_b<S<S_d$，且根据制动踏板行程传感器信号判断此时驾驶员未进行减速操作，则系统将控制车辆进行轻度制动，此时目标纵向减速度a_{exp}为轻度制动减速度a_{1max}；若驾驶员此时有减速操作，则AEB系统会对驾驶员进行感官预警直至驾驶员使车距保持在安全距离；若$S<S_b$，则系统会控制车辆进行全力制动，使车辆以最快的速度在预设的最小安全车距范围S_0内停驶或达到与危险目标相同的速度，此时目标纵向减速度a_{exp}为全力制动减速度a_{2max}；

(4)分级预警控制系统将目标纵向减速度a_{exp}传递给车辆逆纵向动力学计算模型，同时路面信息估计模型计算出车辆此时所处路面的坡度i并将其传递给车辆逆纵向动力学计算模型，当车辆上坡时由公式(1)计算，当车辆下坡时由公式(2)计算，最终得到此时车辆制动系统所需提供的目标制动力F_b：

$$F_b=ma_{exp}-F_f-F_w-Gi \quad (1)$$

$$F_b=ma_{exp}+Gi-F_f-F_w \quad (2)$$

其中m为车辆质量，G为车辆重力，F_f为滚动阻力，F_w为空气阻力；

(5)目标制动力F_b传递给液压制动力与再生制动力分配计算模块，同时再生制动系统根据此时的车速、车辆动力电机、蓄电池等系统的工作状态判断此时能提供的再生制动力F_{br}，所述液压制动力与再生制动力分配计算模块计算此时的目标液压制动力$F_{bh}=F_b-F_{br}$；

(6)目标液压制动力F_{bh}传递给液压制动系统逆模型进行计算，由公式(3)得到各制动器轮缸的目标液压力P_{exp}：

$$P_{\exp}=\frac{F_{bh}\cdot r_{r0}}{2([BEF]_f+[BEF]_r)} \quad (3)$$

其中r_{r0}为车轮滚动半径，$[BEF]_f$为前轮制动器制动效能因数，$[BEF]_r$为后轮制动器制动效能因数，均为车辆的常规结构参数；

(7)各制动器轮缸的目标液压力P_{exp}传递给ESC与Booster主动增压液压力分配模块,判断此时液压制动系统的主动增压方式:若P_{exp}在ESC系统的主动增压极限范围内,则由ESC系统在制动器轮缸建压进行主动增压控制;若P_{exp}超过了ESC系统的主动增压极限,则由Booster在制动轮缸建压进行主动增压控制,使车辆减速至目标车速;

上述过程在整个AEB系统触发过程中不断进行,与危险目标实时距离、各级预警阈值、本车和危险目标运动状态等信息不断更新调整,直至车辆减速至目标车速或停车并与危险目标保持在预设的安全距离。

2.根据权利要求1所述的一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统,其特征在于:步骤(1)中,路面信息估计模型通过基于滤波的路面附着系数估计算法计算得到最小路面附着系数μ的方法如下:

首先建立Dugoff轮胎模型以获取归一化轮胎力,Dugoff轮胎模型将轮胎上的纵向力和侧向力表示为:

$$F_x = \mu \cdot F_z \cdot C_x \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot f(L)$$

$$F_y = \mu \cdot F_z \cdot C_y \cdot \frac{\tan(\alpha)}{1-\lambda} \cdot f(L)$$

$$f(L) = \begin{cases} L \cdot (2-L), L < 1 \\ 1, L \geq 1 \end{cases}$$

$$L = \frac{}{2\sqrt{C_x^2 \cdot \lambda^2 + C_y^2 \cdot \tan^2 \alpha}} \cdot (1-\lambda) \cdot (1 - \varepsilon \cdot v_x \cdot \sqrt{C_x^2 \cdot \lambda^2 + C_y^2 \cdot \tan^2 \alpha})$$

式中F_x为轮胎纵向力,F_y为轮胎侧向力,F_z为轮胎法向力,λ为纵向滑移率,C_y为轮胎侧偏刚度,C_x为轮胎纵向刚度,α为轮胎侧偏角,μ为路面附着系数,ε为轮胎影响系数,是一个与轮胎本身结构和材料有关的参数,用以修正车辆滑移速度对轮胎力的影响,L为边界值,用以描述车轮滑移带来的轮胎力的非线性特征;为了方便设计路面附着系数估计算法,将Dugoff轮胎模型简化为下述归一形式:

$$F_x = \mu \cdot F_x^0 = \mu \cdot F_z \cdot C_x \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot f(L)$$

$$F_y = \mu \cdot F_y^0 = \mu \cdot F_z \cdot C_y \cdot \frac{\tan(\alpha)}{1-\lambda} \cdot f(L)$$

式中F_x^0和F_y^0分别为纵向和侧向的归一化轮胎力,与附着系数μ无关,便于所述基于滤波的路面附着系数估计算法中确定系统状态空间表达式的系数矩阵;

建立归一化Dugoff轮胎模型后需要对模型中的归一化轮胎力进行计算,即分别计算各车轮的垂向载荷F_{Zfl}、F_{Zfr}、F_{Zrl}、F_{Zrr},纵向滑移率λ_{fl}、λ_{fr}、λ_{rl}、λ_{rr},轮胎侧偏角α_{fl},α_{fr},α_{rl},α_{rr},角标fl、fr、rl、rr分别代表车辆的左前轮、右前轮、左后轮、右后轮;

各车轮垂向载荷计算公式:

$$F_{Zfl} = m \cdot g \cdot \frac{b}{2l} - m \cdot a_x \cdot \frac{h_g}{2l} + m \cdot a_y \cdot \frac{h_g}{T_f} \cdot \frac{b}{l}$$

$$F_{Zfr}=m\cdot g\cdot\frac{b}{2l}-m\cdot a_x\cdot\frac{h_g}{2l}-m\cdot a_y\cdot\frac{h_g}{T_f}\cdot\frac{b}{l}$$

$$F_{Zrl}=m\cdot g\cdot\frac{a}{2l}+m\cdot a_x\cdot\frac{h_g}{2l}+m\cdot a_y\cdot\frac{h_g}{T_r}\cdot\frac{a}{l}$$

$$F_{Zrr}=m\cdot g\cdot\frac{a}{2l}+m\cdot a_x\cdot\frac{h_g}{2l}-m\cdot a_y\cdot\frac{h_g}{T_r}\cdot\frac{a}{l}$$

各车轮侧偏角计算公式：

$$\alpha_{fl}=\delta-\tan^{-1}\left(\frac{v_y+a\cdot r}{v_x+\frac{T_f}{2}\cdot r}\right)$$

$$\alpha_{fr}=\delta-\tan^{-1}\left(\frac{v_y+a\cdot r}{v_x-\frac{T_f}{2}\cdot r}\right)$$

$$\alpha_{rl}=\tan^{-1}\left(\frac{-v_y+b\cdot r}{v_x+\frac{T_f}{2}\cdot r}\right)$$

$$\alpha_{rr}=\tan^{-1}\left(\frac{-v_y+b\cdot r}{v_x-\frac{T_f}{2}\cdot r}\right)$$

各个车轮滑移率的计算公式：

$$\lambda_{fl}=\frac{\omega_{fl}\cdot R_\omega-v_{fl}}{v_{fl}}$$

$$\lambda_{fr}=\frac{\omega_{fr}\cdot R_\omega-v_{fr}}{v_{fr}}$$

$$\lambda_{rl}=\frac{\omega_{rl}\cdot R_\omega-v_{rl}}{v_{rl}}$$

$$\lambda_{rr}=\frac{\omega_{rr}\cdot R_\omega-v_{rr}}{v_{rr}}$$

上式中各个车轮接地点的速度v_{fl}、v_{fr}、v_{rl}、v_{rr}计算公式为：

$$v_{fl}=v_{cog}+r\cdot(\frac{T_f}{2}-a\cdot\beta)$$

$$v_{fr}=v_{cog}+r\cdot(-\frac{T_f}{2}-a\cdot\beta)$$

$$v_{rl}=v_{cog}+r\cdot(\frac{T_r}{2}+b\cdot\beta)$$

$$v_{rr}=v_{cog}+r\cdot(-\frac{T_r}{2}+b\cdot\beta)$$

上述各公式中各参数含义为:β为车辆质心侧偏角,$\beta=\tan^{-1}(\frac{v_y}{v_x})$,$v_{cog}$为车辆质心速度,$v_{cog}=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$,m为整车质量,a为前轮中心与车辆质心的水平距离,b为后轮中心与车辆质心的水平距离,l为车辆轴距,h_g为车辆质心高度,a_x为车辆纵向加速度,a_y为车辆侧向加速度,T_f为两前轮轮距,T_r为两后轮轮距,v_x为整车纵向速度,v_y整车侧向速度,R_ω为车轮滚动速度,ω_{fl}、ω_{fr}、ω_{rl}、ω_{rr}分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮的滚动角速度;

因此四个车轮的纵向归一化轮胎力可表示为:

$$F_{xfl}^0=F_{zfl}\cdot C_x\cdot\frac{\lambda_{fl}}{1-\lambda_{fl}}\cdot f(L_{fl})$$

$$F_{xfr}^0=F_{zfr}\cdot C_x\cdot\frac{\lambda_{fr}}{1-\lambda_{fr}}\cdot f(L_{fr})$$

$$F_{xrl}^0=F_{zrl}\cdot C_x\cdot\frac{\lambda_{rl}}{1-\lambda_{rl}}\cdot f(L_{rl})$$

$$F_{xrr}^0=F_{zrr}\cdot C_x\cdot\frac{\lambda_{rr}}{1-\lambda_{rr}}\cdot f(L_{rr})$$

四个车轮的侧向归一化轮胎力可表示为:

$$F_{yfl}^0=F_{zfl}\cdot C_y\cdot\frac{\tan(\alpha_{fl})}{1-\lambda_{fl}}\cdot f(L_{fl})$$

$$F_{yfr}^0=F_{zfr}\cdot C_y\cdot\frac{\tan(\alpha_{fr})}{1-\lambda_{fr}}\cdot f(L_{fr})$$

$$F_{yrl}^0=F_{zrl}\cdot C_y\cdot\frac{\tan(\alpha_{rl})}{1-\lambda_{rl}}\cdot f(L_{rl})$$

$$F_{yrr}^0=F_{zrr}\cdot C_y\cdot\frac{\tan(\alpha_{rr})}{1-\lambda_{rr}}\cdot f(L_{rr})$$

结合Dugoff轮胎模型修正的归一化轮胎力的计算过程中需要的参数包括车辆结构参数和运动学参数两类,结构参数可直接测量得到,运动学参数可通过相关车载传感器测量;

为了列写基于滤波的路面附着系数估计算法中的系统状态方程和观测方程,需要建立车辆的三自由度四轮车辆模型来描述车辆纵向、侧向和横摆运动;

车辆纵向、侧向和横摆三个方向的运动方程为:

$$a_x=[\mu_{fl}\cdot(F_{xfl}^0\cdot\cos\delta-F_{yfl}^0\cdot\sin\delta)+\mu_{fr}\cdot(F_{xfr}^0\cdot\cos\delta-F_{yfr}^0\cdot\sin\delta)$$
$$+\mu_{rl}\cdot F_{xrl}^0+\mu_{rr}\cdot F_{xrr}^0]/m$$

$$a_y=[\mu_{fl}\cdot(F_{xfl}^0\cdot\sin\delta+F_{yfl}^0\cdot\cos\delta)+\mu_{fr}\cdot(F_{xfr}^0\cdot\sin\delta+F_{yfr}^0\cdot\cos\delta)$$
$$+\mu_{rl}\cdot F_{yrl}^0+\mu_{rr}\cdot F_{yrr}^0]/m$$
$$\dot{r}=\frac{1}{I_z}\cdot\{[a\cdot(F_{xfl}^0\cdot\sin\delta+F_{yfl}^0\cdot\cos\delta)+\frac{T_f}{2}\cdot(-F_{xfl}^0\cdot\cos\delta+F_{yfl}^0\cdot\sin\delta)]\cdot\mu_{fl}$$
$$+[a\cdot(F_{xfr}^0\cdot\sin\delta+F_{yfr}^0\cdot\cos\delta)+\frac{T_f}{2}\cdot(F_{xfr}^0\cdot\cos\delta-F_{yfr}^0\cdot\sin\delta)]\cdot\mu_{fr}$$
$$+(-(b\cdot F_{yrl}^0-\frac{T_r}{2}\cdot F_{xrl}^0))\cdot\mu_{rl}+(-(b\cdot F_{yrr}^0+\frac{T_r}{2}\cdot F_{xrr}^0))\cdot\mu_{rr}\}$$

式中，a_x为车辆纵向加速度，a_y为车辆侧向加速度，$\dot{r}$为车辆的横摆角加速度，δ为两个前轮转角，m为整车质量，μ_{fl}、μ_{fr}、μ_{rl}、μ_{rr}分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮所在路面附着系数，a为前轮中心与车辆质心的水平距离，b为后轮中心与车辆质心的水平距离，T_f为两前轮轮距，T_r为两后轮轮距，I_z车辆的横摆转动惯量；

车辆上的相关传感器测量得到算法所需的车辆运动学参数并将其传递给Dugoff轮胎模型，Dugoff轮胎模型计算得到纵向和侧向归一化轮胎力并将其传递给车辆三自由度四轮模型，从而得到纵向、侧向和横摆方向的三个动力学方程，基于这三个动力学方程可以得到路面附着系数滤波估计器的系统状态方程和观测方程，以进行后续的附着系数估计；

所述的基于滤波的路面附着系数估计算法选取的系统为非线性系统，其状态方程和观测方程分别为：

状态方程：

$$\dot{x}(t)=f(x(t),u(t),w(t))$$

观测方程：

y(t)＝h(x(t),u(t),v(t))

随机变量w(t)，v(t)分别为过程噪声和测量噪声，在所述的基于滤波的路面附着系数估计算法中取为互相独立且均值为零的高斯白噪声，其概率分布为：

p(w)～N(0,Q)p(v)～N(0,R)

并设它们的协方差矩阵分别为Q和R，即：

Q＝cov[w(t),w(τ)]

R＝cov[v(t),v(τ)]

所述的基于滤波的路面附着系数估计算法的具体实现过程如下：

(1)确定系统状态方程和观测方程：

根据所述三自由度四轮车辆模型纵向、侧向和横摆方向的运动方程确定：

状态变量：$x(t)=[\mu_{fl}\ \mu_{fr}\ \mu_{rl}\ \mu_{rr}]^T$，

观测变量：$y(t)=[a_x\ a_y\ r]^T$，

控制输入：u(t)＝[δ]，

根据所述三自由度四轮车辆模型纵向、侧向和横摆方向的运动方程的表达式和各变量，将状态方程和观测方程写成：

状态方程：

$$\dot{x}(t)=f(x(t),u(t),w(t))=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu_{fl}\\\mu_{fr}\\\mu_{rl}\\\mu_{rr}\end{bmatrix}+w(t) \quad \cdots\cdots(a)$$

观测方程：

$$y(t)=h(x(t),u(t),v(t))$$

$$=\begin{bmatrix}\frac{F_{xfl}^0-F_{yfl}^0\cdot\delta}{m} & \frac{F_{xfr}^0-F_{yfr}^0\cdot\delta}{m} & \frac{F_{xrl}^0}{m} & \frac{F_{xrr}^0}{m}\\ \frac{F_{xfl}^0\cdot\delta+F_{yfl}^0}{m} & \frac{F_{xfr}^0\cdot\delta+F_{yfr}^0}{m} & \frac{F_{yrl}^0}{m} & \frac{F_{yrr}^0}{m}\\ H(3,1) & H(3,2) & H(3,3) & H(3,4)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu_{fl}\\\mu_{fr}\\\mu_{rl}\\\mu_{rr}\end{bmatrix}+v(t) \quad \cdots\cdots(b)$$

其中：

$$H(3,1)=\frac{a\cdot(F_{xfl}^0\cdot\delta+F_{yfl}^0)+\frac{T_f}{2}\cdot(F_{xfr}^0-F_{yfr}^0\cdot\delta)}{I_z},\quad H(3.3)=\frac{-(b\cdot F_{yrl}^0-\frac{T_r}{2}\cdot F_{xrl}^0)}{I_z}$$

$$H(3,2)=\frac{a\cdot(F_{xfr}^0\cdot\delta+F_{yfr}^0)-\frac{T_f}{2}\cdot(F_{xfl}^0-F_{yfl}^0\cdot\delta)}{I_z},\quad H(3,4)=\frac{-(b\cdot F_{yrr}^0+\frac{T_r}{2}\cdot F_{xrr}^0)}{I_z}$$

(2)估计器赋初值：

递推过程中的初值，测量噪声协方差阵R为3乘3的单位阵，过程噪声协方差阵Q为4乘4的单位矩阵；

(3)利用滤波算法估计路面附着系数：

①进行滤波初始化，迭代步数k＝0，则状态变量x的初始均值$\bar{x}(0)$和协方差P(0)分别为：

$$\bar{x}(0)=E[x(0)]$$

$$P(0)=E\left[(x(0)-\bar{x}(0))(x(0)-\bar{x}(0))^T\right]$$

②利用无迹变换计算得到2n+1个点，使这2n+1个点的均值和协方差等于原状态分布的均值和协方差，称这2n+1个点为Sigma点，n为状态维数，根据上述状态方程，取n＝4，则这里需要得到9个Sigma点集，每个Sigma点集的状态维数与状态变量x的维数一致，即为4维列向量，则由这9个Sigma点集组成的矩阵x为4*9的矩阵；设$x_i(0)$为在迭代步数k＝0时矩阵x中的每个列向量即每个Sigma点集，$x_0(0)$为Sigma矩阵x的第一列，以此类推，则初始的Sigma矩阵为：

$$\chi_0(0)=\bar{x}(0)\quad i=0$$

$$\chi_i(0)=\begin{cases}\bar{x}(0)+\left(\sqrt{(4+\lambda)P(0)}\right)_i & i=1,2,\cdots,4\\ \bar{x}(0)-\left(\sqrt{(4+\lambda)P(0)}\right)_i & i=5,6,\cdots,8\end{cases}$$

其中λ为比例参数，λ＝(α²-1)·n＝4(α²-1)，α用来确定Sigma点在状态变量均值$\bar{x}$附近的分布范围，是一个很小的正数$10^{-4}\leqslant\alpha\leqslant1$，通常取$\alpha=10^{-3}$；

上述迭代步数k＝0时的初始Sigma点集的计算过程，同样适用于其他迭代步数的Sigma点集计算，只不过此时用于Sigma点集计算的状态变量均值和状态变量协方差值为k时刻的值，即k时刻的$\bar{x}(k|k)$和P(k|k)，计算公式为：

$$\chi_0(k)=\bar{x}(k|k)\quad i=0$$

$$\chi_i(k)=\begin{cases}\bar{x}(k|k)+\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k)}\right)_i & i=1,2,\cdots,4\\ \bar{x}(k|k)-\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k)}\right)_i & i=5,6,\cdots,8\end{cases}$$

③进入下一步迭代，迭代步数k增加1，对9个Sigma点集进行下一步预测，将步骤②得到的上一步的Sigma点集代入系统的状态方程(a)中，得到变换后的Sigma点集：

x(k|k-1)＝f(x(k-1),u(k-1))k＝1,2,…

④根据无迹变换原则，计算系统状态变量的下一步预测均值以及预测方差，系统状态变量的预测均值由Sigma点集的预测值加权求和得到：

$$\bar{x}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(m)}\chi_i(k|k-1)$$

式中$W_i^{(m)}$为各Sigma点的均值权重，具体取值为：

$$W_0^{(m)}=\lambda/(4+\lambda)\quad i=0$$

$W_i^{(m)}$＝1/[2(4+λ)]i＝1,2,…,8

系统状态变量的预测方差由Sigma点集的预测协方差加权求和得到：

$$P(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(c)}\left(\chi_i(k|k-1)-\bar{x}(k|k-1)\right)\left(\chi_i(k|k-1)-\bar{x}(k|k-1)\right)^T+Q$$

上式中$x_i(k|k-1)$是矩阵x(k|k-1)的第i列，i＝0,1,…,8；$W_i^{(c)}$为各Sigma点的协方差权重，具体取值为：

$$W_0^{(c)}=\lambda/(n+\lambda)+\left(1-\alpha^2+\beta\right)\quad i=0$$

$W_i^{(c)}$＝1/[2(n+λ)]i＝1,2,…,8

其中β用来合并有关状态变量x分布的先验状态，所述基于滤波的路面附着系数估计算法中状态变量x服从高斯分布，通常取β＝2；

⑤根据步骤④得到的系统状态变量的下一步预测均值以及下一步预测方差，再次利用无迹变换，产生新的Sigma点集，计算过程与步骤②中初始的Sigma点集的计算过程相同：

$$\chi_0(k|k-1)=\bar{x}(k|k-1)\quad i=0$$

$$\chi_i(k|k-1)=\begin{cases}\bar{x}(k|k-1)+\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k-1)}\right)_i & i=1,2,\cdots,4\\ \bar{x}(k|k-1)-\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k-1)}\right)_i & i=5,6,\cdots,8\end{cases}$$

⑥将步骤⑤得到的新的Sigma点集带入观测方程(b)得到Sigma点集的观测量的下一步预测值：

$$\varsigma(k|k-1)=h\left[\chi(k|k-1)\quad u(k-1)\right]$$

式中的u(k-1)即为迭代步数为k-1时刻的系统输入，即此时的前轮转角δ，可由现有的车载转角传感器测得；

由观测方程(b)可知，系统的输出矩阵为3乘4的矩阵，Sigma矩阵x(k|k-1)为4乘9的矩阵，因此经观察方程(b)计算得到Sigma点集的观测量的下一步预测值$\varsigma(k|k-1)$为3乘9的矩阵；

⑦由步骤⑥得到的Sigma点集的观测量下一步预测值$\varsigma(k|k-1)$，通过加权求和得到系统观测变量的预测均值：

$$\bar{y}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(m)}\varsigma_i(k|k-1)$$

式中$\varsigma_i(k|k-1)$是Sigma点集的观测量的下一步预测值矩阵$\varsigma(k|k-1)$的第i列，i＝0，1，…，8；

⑧由步骤⑥得到的Sigma点集的观测量下一步预测值$\varsigma(k|k-1)$以及系统观测变量的预测均值$\bar{y}(k|k-1)$，通过加权求和计算更新后的观测协方差矩阵以及状态变量与输出变量互相关矩阵：

观测协方差矩阵为：

$$P_{yy}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(c)}\left(\varsigma_i(k|k-1)-\bar{y}(k|k-1)\right)\left(\varsigma_i(k|k-1)-\bar{y}(k|k-1)\right)^T+R$$

状态变量与输出变量互相关矩阵为：

$$P_{xy}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(c)}\left(\chi_i(k|k-1)-\bar{x}(k|k-1)\right)\left(\varsigma_i(k|k-1)-\bar{y}(k|k-1)\right)^T$$

⑨计算系统更新后的滤波反馈增益矩阵：

$$K(k)=P_{xy}(k|k-1)P_{yy}^{-1}$$

计算系统更新后的状态变量均值矩阵：

$$\bar{x}(k|k)=\bar{x}(k|k-1)+K(k)\left(y(k)-\bar{y}(k|k-1)\right)$$

矩阵$\bar{x}(k|k)$的(1,1)元素，(2,1)元素，(3,1)元素，(4,1)元素分别为迭代步数为k时的左前轮附着系数、右前轮附着系数、左后轮附着系数、右后轮附着系数的滤波估计值；

式中的y(k)为迭代步数为k的时刻实际的观测变量值，即迭代步数为k时刻的纵向加速

度a_x、侧向加速度a_y以及横摆角加速度$\dot{r}$，以上三个车辆运动学参数均可由车辆上装配的相关加速度传感器进行实时测量，再传递给所述基于滤波的路面附着系数估计算法；

计算系统更新后的状态变量协方差值：

$P(k|k)=P(k|k-1)-K(k)P_{yy}K^T(k)$

系统更新后的状态变量均值$\bar{x}(k|k)$和状态变量协方差值P(k|k)将返回步骤②产生下一组Sigma点集，开始下一个迭代步数的计算；上述过程将不断重复，直到完成所有迭代步数，最终得到四个车轮的路面附着系数μ；对四个车轮附着系数值进行比较取最小值，然后将此最小值μ传递给所述安全距离计算模型。

3.根据权利要求1所述的一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统，其特征在于：步骤(2)中，AEB系统的轻度制动的目标制动减速度a_{1max}＝0.25μg～0.35μg，全力制动的目标制动减速度a_{2max}＝0.75μg～0.85μg；AEB系统的三级预警安全距离阈值计算方法如下：

从车辆制动的角度出发，本车分级制动过程分为六个阶段：

第一阶段：从AEB系统发出轻度制动信号开始，至主动制动系统开始使车辆产生轻度制动减速度为止，该阶段持续时间t_{11}为车辆的主动制动系统的响应滞后时间，在此阶段，由于制动系统并未建立起制动压力，车辆减速度为0，本车的位移为：

$S_{11}=v_0t_{11}$

式中：v_0为本车初始车速；

第二阶段：该阶段以主动制动系统开始增压为起点，至制动压力达到轻度制动的目标液压力为止，增压时间为t_{12}；此过程中，随着制动压力的增加，车辆制动减速度a_1、车速v_{12}及位移S_{12}表达式分别如下：

$$a_1=\frac{a_{1max}}{t_{12}}\cdot t$$

$v_{12}=v_0-\int a_1\cdot dt$

$$S_{12}=\int_0^{t_{12}} v_{12}dt$$

式中：a_{1max}为轻度制动阶段目标制动减速度；

第三阶段：该阶段为AEB系统稳定的轻度制动阶段，车辆保持a_{1max}的制动强度不变，该过程的持续时间t_{13}，由AEB系统设定，可取为1～2s，在此过程中本车车速v_{13}及位移S_{13}变化如下：

$v_{13}=v_0-0.5a_{1max}t_{12}-a_{1max}t$

$$S_{13}=\int_0^{t_{13}} v_{13}dt$$

第四阶段：该阶段从AEB系统发出紧急全力制动信号开始，至主动制动系统开始增压为止，在该阶段中，本车仍保持a_{1max}的制动减速度不变，该阶段响应滞后持续时间$t_{21}=t_{11}$；此阶段车速v_{21}及位移S_{21}分别为：

$v_{21}=v_0-a_{1max}(0.5t_{12}+t_{13})-a_{1max}t$

$$S_{21}=\int_0^{t_{21}} v_{21}dt$$

第五阶段：该阶段为液压制动系统的增压阶段，主动制动压力由轻度制动目标值升至全力制动目标值，增压时间t_{22}；在该阶段，本车减速度a_2、车速v_{22}及位移S_{22}表达式分别如下：

$$a_2=a_{1\max}+\frac{a_{2\max}-a_{1\max}}{t_{22}}t$$

$v_{22}=v_0-a_{1\max}(0.5t_{12}+t_{13}+t_{21})-\int a_2dt$

$$S_{22}=\int_0^{t_{22}} v_{22}dt$$

式中：$a_{2\max}$为全力制动阶段目标制动减速度；

第六阶段：稳定的全力制动阶段，该阶段从本车制动压力达到目标制动压力开始，至本车车速降至0或降至危险目标车车速v_t为止；在该阶段中，本车初始车速v_2、持续时间t_{23}、实时车速v_{23}以及制动距离S_{23}表达式分别如下：

$v_2=v_0-a_{1\max}(0.5t_{12}+t_{13}+t_{21}+0.5t_{22})-0.5a_{2\max}t_{22}$

$$t_{23}=\frac{v_2-v_t}{a_{2\max}}$$

$v_{23}=v_2-a_{2\max}\cdot t$

$$S_{23}=\int_0^{t_{23}} v_{23}dt$$

至此，本车分级制动计算过程结束；

由于前方危险目标车辆存在紧急制动的可能，在此工况下，本车将以两车同时紧急制动而不发生碰撞的车距为轻度制动的安全距离阈值，因此对本车主动制动系统全力制动过程进行计算：

该过程分为三个阶段：

第一阶段：为主动制动系统响应滞后阶段，在该过程中，本车行驶的距离S_1为：

$S_1=v_0\cdot t_1$

第二阶段：为主动制动压力建立阶段，该阶段中主动制动压力线性增加，本车制动减速度a、本车车速v_1以及本车位移S_2的表达式分别为：

$$a=\frac{a_{2\max}}{t_2}\cdot t$$

$v_1=v_0-\int adt$

$$S_2=\int_0^{t_2} v_1dt=v_0\cdot t_2-\frac{a_{2\max}t_2^2}{6}$$

式中：t_2为主动制动系统压力建立时间，$a_{2\max}$为本车的目标制动减速度；

第三阶段：该阶段本车匀减速直至停车，在该阶段中，本车初始车速v_{30}、实时车速v_3、持续时间t_3以及制动距离S_3分别为：

$$v_{30}=v_0-\int_0^{t_2}adt=v_0-\frac{a_{2\max}}{2}\cdot t_2$$

$$t_3=\frac{v_{30}}{a_{2\max}}$$

$v_3=v_{30}-a_{2max}\cdot t$

$$S_3=\int_0^{t_3}v_3dt$$

下面进行AEB三个预警等级安全距离阈值S_w S_d S_b的计算：

①全力制动阈值S_b：

由本车分级制动过程可知，当前方危险目标车辆以速度v_t保持匀速行驶，本车全力制动减速至前方危险目标车车速时，本车的制动距离S_{h1_m}为：

$S_{h1_m}=S_{21}+S_{22}+S_{23}$

该过程中，前方危险目标车行驶的距离S_{t1}为：

$S_{t1}=v_t(t_{21}+t_{22}+t_{23})$

设当车辆完成自动紧急制动后，能够与前车保持的目标距离即最小安全车距范围S_0，S_0为2～3m，则AEB系统触发全力制动的安全距离门限值S_b为：

$S_b=S_{h1_m}-S_{t1}+S_0$

②轻度制动安全距离阈值S_d：

当前方危险目标车突然以最大减速度制动时，其制动距离S_{t2}为：

$$S_{t2}=\frac{v_t^2}{2\mu g}$$

本车亦采用全力制动模型计算制动距离，本车全力制动的制动距离S_{h2_m}为：

$S_{h2_m}=S_1+S_2+S_3$

则AEB系统轻度制动安全距离门限值S_d为：

$S_d=S_{h2_m}-S_{t2}+S_0$

③视觉听觉预警安全距离阈值S_w：

$S_w=S_d+t_w\cdot v_0$

式中t_w为声觉、视觉预警持续的时间，可取为1～1.5s。

4.根据权利要求1所述的一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统，其特征在于：步骤(3)中，最小安全车距范围S_0为2～3m。

5.根据权利要求1所述的一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统，其特征在于：步骤(4)中，路面信息估计模型中基于闭环全维状态观测器的路面坡度估计算法估算出车辆此时所处路面的坡度i的方法如下：

车辆的相关传感器将路面坡度估计所需的车辆参数传递给路面信息估计模型，车辆行驶方程式为$F_t=F_f+F_w+F_i+F_j$；

车辆驱动力F_t为：

$$F_t=\frac{T_e i_g i_0 \eta_t}{r}$$

其中r为车轮滚动半径，T_e为车辆发动机转矩，i_g为车辆变速器传动比，i_0为车辆主减速器，η_t为车辆传动系统总效率；

车辆空气阻力F_w为：

$$F_w=\frac{1}{2}C_D A\rho v_x^2$$

其中C_D为空气阻力系数，A为迎风面积，ρ为空气密度，v_x为车辆纵向速度；

车辆加速阻力F_j为：

$F_j=\delta Ma_x$

其中δ为车辆旋转质量换算系数；M为整车质量，a_x为车辆纵向加速度；

车辆滚动阻力F_f为：

$F_f=Mgf\cos\alpha\approx Mgf$

其中f为车辆滚动阻力系数；

车辆的坡度阻力F_i为：

$F_i=Mg\sin\alpha\approx Mgi$

则车辆在坡路上的纵向动力学方程可以写为：

$$\delta Ma_x=\frac{T_e i_g i_0 \eta_t}{r}-\frac{1}{2}C_D A\rho v_x^2-Mgf-Mgi$$

将车辆驱动力F_t、空气阻力F_w和滚动阻力F_f看成一个合力F_{input}，作为车辆纵向动力学模型的系统输入，则纵向动力学方程简化为：

$\delta Ma=F_{input}-Mgi$

上式为系统状态方程，基于系统状态方程可写出系统的状态空间表达式；以车辆纵向速度v_x和坡度i作为系统状态变量，以合力F_{input}为系统输入变量，则基于汽车纵向动力学方程的状态空间表达式为：

$$\dot{x}=Ax+BU$$

$z=Cx$

其中：$x=\begin{bmatrix}v_x\\ i\end{bmatrix}$，$U=\begin{bmatrix}F_{input}\\ 0\end{bmatrix}$，$A=\begin{bmatrix}0 & -\frac{g}{\delta}\\ 0 & 0\end{bmatrix}$，$B=\begin{bmatrix}\frac{1}{\delta M} & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$，C＝[1 0]；

该系统的可观测性矩阵为：

$$Q_B=\begin{bmatrix}C\\ CA\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & -\frac{g}{\delta}\end{bmatrix}$$

可观测性矩阵Q_B满秩，说明该系统可观测，因此设计路面坡度观测器为：

$$\dot{\hat{x}}=A\hat{x}+BU+HCe$$

其中$\hat{x}$为观测器的观测向量，$\hat{x}=\begin{bmatrix}\hat{v}_x & \hat{i}\end{bmatrix}^T$；H是观测器的反馈增益矩阵；e是误差向量，即$e=x-\hat{x}$；

将$\dot{x}=Ax+BU$与$\dot{\hat{x}}=A\hat{x}+BU+HCe$相减可得：

$$\dot{x}-\dot{\hat{x}}=A(x-\hat{x})-HC(x-\hat{x})=(A-HC)(x-\hat{x})$$

设$\dot{x}-\dot{\hat{x}}$为j，则上式变为$\dot{j}=(A-HC)j$，转化为关于j的一阶线性微分方程，设初始时刻为t_0，则微分方程解为：

$$j=x-\hat{x}=e^{(A-HC)(t-t_0)}[x(t_0)-\hat{x}(t_0)]$$

为了保证观测器稳定性，应保证当时间趋于无穷时，观测器误差向量e等于0，即：

$$\lim_{t\to\infty}(x-\hat{x})=0$$

只要使(A-HC)的特征根λ具有负实部，误差向量就将以指数规律衰减为0，且衰减速度由(A-HC)的特征根决定；设观测器的反馈增益矩阵$H=\begin{bmatrix}h_1\\h_2\end{bmatrix}$，则(A-HC)的特征方程为：

$$\det[\lambda I-(A-HC)]=\lambda^2+h_1\lambda-\frac{h_2 g}{\delta} \qquad (4)$$

预设全维观测器的期望极点即具有负实部的(A-HC)特征根为λ_1和λ_2，期望极点λ_1和λ_2对应的期望特征方程为：

$$(\lambda-\lambda_1)(\lambda-\lambda_2)=\lambda^2-(\lambda_1+\lambda_2)\lambda+\lambda_1\lambda_2 \qquad (5)$$

令式(4)和式(5)对应项系数相等可得观测器的反馈增益矩阵H的元素为：

$$h_1=-\lambda_1-\lambda_2$$

$$h_2=\frac{-\lambda_1\lambda_2}{g}\delta$$

按照上述方法计算得到反馈增益矩阵H即可保证特征值λ_1和λ_2具有负实部，即可使观测器稳定；全维状态观测器观测变量$\hat{x}$中的第二行元素$\hat{i}$即为车辆此时所处路面坡度的估计值i。

一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种电动车自动紧急制动控制系统,特别涉及一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统。

背景技术

[0002] 近年来,随着全球汽车技术的不断发展,汽车保有量不断增加,车辆交通事故也随之增加。为了降低道路交通事故数量,各种汽车主动安全技术和被动安全技术得到了迅速发展。作为一项重要的汽车主动安全技术,自动紧急制动系统(Automatic Emergency Brake System,AEB,以下简称AEB)能够有效地避免大量的交通事故的产生,已经逐渐成为车辆标配。

[0003] AEB系统主要由信息采集、控制系统和执行机构三部分组成。信息采集主要是通过雷达等传感器对周围环境进实时监测,把目标物信息输送给控制系统。控制系统接收到目标物信息后,结合本车运动状态,通过控制策略决策出期望减速度等信息并将其发送给执行机构。执行机构通过电子节气门和制动器对控制系统的指令进行对应操作,由此达到避免碰撞或者减轻碰撞的效果。

[0004] 但是目前的AEB系统尚存在一些问题,如:

[0005] 1、目前车载的AEB系统控制算法出于安全性考虑,通常选择在需要AEB介入时就直接以最大制动减速度将车辆刹停,会对成员舒适性造成严重影响,且高速下的紧急制动还容易发生后车追尾等危险。

[0006] 2、AEB系统控制算法不包含路面信息识别的功能,算法在设计时只考虑了车辆的结构参数和本身的运动学参数,而为考虑不同路面对AEB算法实施效果的影响。

[0007] 3、AEB系统控制算法不具备对路面状况变化的自适应性,例如车辆在低附着系数路面上行驶时,由于附着系数的下降,车辆的最大制动减速度可能无法达到AEB系统的预设值,从而导致碰撞的发生;当车辆行驶在具有一定坡度的道路上时,坡路阻力会导致车辆的实际制动力发生变化,若AEB算法未根据路面坡度进行调整,可能会导致上坡车辆过早减速给驾驶员带来不信任感或下坡车辆减速不足发生碰撞。

[0008] 4、对于搭载部分解耦或非解耦式电动助力制动系统的电动车辆而言,当AEB系统触发并开始对车辆施加制动力时,由于驾驶员制动踏板和制动主缸之间存在机械连接,因此制动踏板将在助力电机的带动下自动移动,一方面可能造成驾驶员的不适和慌张,另一方面由于制动踏板已经不在起始位置,当驾驶员想要自主给车辆施加更大制动力时,驾驶员脚部移动到制动踏板的时间将比平时更长,这段时间差可能造成驾驶员迟疑或者错误操作,造成制动力施加不足从而发生危险。

发明内容

[0009] 为解决上述技术问题,本发明为搭载非解耦式或部分解耦式的电动助力制动系统的电动车辆提供了一种基于路面信息自动识别和控制参数在线调整的电动车分级自动紧

急制动控制系统。

[0010] 本发明所述一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统，包括：车载测距测速传感设备、分级预警控制系统、安全距离计算模型、车辆逆纵向动力学计算模型、液压制动力与再生制动力分配计算模块、液压制动系统逆模型、ESC与Booster主动增压液压力分配模块、路面信息估计模型，系统的控制方法如下所述：

[0011] (1)车辆在行驶过程中，车载测距测速传感设备将本车与危险目标实时距离S传递给分级预警控制系统，将危险目标车的车速、加速度等运动状态信息传递给安全距离计算模型；路面信息估计模型将四个车轮中的最小路面附着系数μ传递给安全距离计算模型，将车辆此时所处路面坡度传递给车辆逆纵向动力学计算模型；

[0012] (2)所述安全距离计算模型将AEB系统的制动强度分为轻度制动和全力制动两种，根据四个车轮中的最小路面附着系数μ确定AEB系统的两级制动强度的目标制动减速度a_{exp}，并根据危险目标运动状态信息以及本车车速传感器测得的本车实时纵向车速v_0，确定AEB系统的三个控制信号触发阈值：感官预警安全距离阈值S_w、轻度制动的安全距离阈值S_d、全力制动的安全距离阈值S_b；

[0013] (3)分级预警控制系统将本车与危险目标实时距离S与各级预警阈值S_w、S_d、S_b的大小进行比较，结合驾驶员是否有主动的减速操作，分析产生AEB预警控制信号即车辆的目标纵向减速度a_{exp}：若$S>S_w$，则系统判断此时车辆与前车距离处于安全范围，不进行作动；若$S_w<S<S_d$，则系统会对驾驶员进行视觉触觉预警，提醒驾驶员进行减速操作；若$S_b<S<S_d$，且根据制动踏板行程传感器信号判断此时驾驶员未进行减速操作，则系统将控制车辆进行轻度制动，使车辆减速的同时对驾驶员进行感官预警，此时目标纵向减速度a_{exp}为轻度制动减速度a_{1max}，为使车辆得到有效的减速并为驾驶员提供触觉预警，同时又保证不对乘员舒适性产生过大影响，因此轻度制动减速度a_{1max}可取为0.25μg到0.35μg；若驾驶员此时有减速操作，则AEB系统会对驾驶员进行感官预警直至驾驶员使车距保持在安全距离；若$S<S_b$，则系统会控制车辆进行全力制动，使车辆以最快的速度在预设的最小安全车距范围S_0内停驶或达到与危险目标相同的速度，最小安全车距范围S_0为2～3m，此时目标纵向减速度a_{exp}为全力制动减速度a_{2max}，在触发全力制动时，为了为使车辆能够尽快减速同时又防止车轮抱死，则全力制动减速度a_{2max}可取为0.75μg到0.85μg；

[0014] (4)将目标纵向减速度a_{exp}传递给车辆逆纵向动力学计算模型，同时路面信息估计模型计算出车辆此时所处路面的坡度i并将其传递给车辆逆纵向动力学计算模型，当车辆上坡时由公式(1)计算，当车辆下坡时由公式(2)计算，最终得到此时车辆制动系统所需提供的目标制动力F_b：

[0015] $$F_b=ma_{exp}-F_f-F_w-Gi \quad (1)$$

[0016] $$F_b=ma_{exp}+Gi-F_f-F_w \quad (2)$$

[0017] 其中m为车辆质量，G为车辆重力，F_f为滚动阻力，F_w为空气阻力；

[0018] (5)目标制动力F_b传递给液压制动力与再生制动力分配计算模块，同时再生制动系统根据此时的车速、车辆动力电机、蓄电池等系统的工作状态判断此时能提供的再生制动力F_{br}，所述液压制动力与再生制动力分配计算模块计算此时的目标液压制动力$F_{bh}=F_b-F_{br}$；

[0019] (6)目标液压制动力F_{bh}传递给液压制动系统逆模型进行计算，由公式(3)得到各制

动器轮缸的目标液压力P_{exp}：

[0020] $$P_{\exp}=\frac{F_{bh}\cdot r_{r0}}{2([BEF]_f+[BEF]_r)} \quad (3)$$

[0021] 其中r_{r0}为车轮滚动半径，$[BEF]_f$为前轮制动器制动效能因数，$[BEF]_r$为后轮制动器制动效能因数，均为车辆的常规结构参数；

[0022] (7)各制动器轮缸的目标液压力P_{exp}传递给ESC与Booster主动增压液压力分配模块，判断此时液压制动系统的主动增压方式：若P_{exp}在ESC系统的主动增压极限范围内，则由ESC系统在制动器轮缸建压进行主动增压控制；若P_{exp}超过了ESC系统的主动增压极限，则由Booster在制动轮缸建压进行主动增压控制，使车辆减速至目标车速；

[0023] 上述过程在整个AEB系统触发过程中不断进行，与危险目标实时距离、各级预警阈值、本车和危险目标运动状态等信息不断更新调整，直至车辆减速至目标车速或停车并与危险目标保持在预设的安全距离。

[0024] 本发明的有益效果：

[0025] 1、通过采用安全距离计算模型和分级预警控制系统，根据本车和前车的运动状态，可对驾驶员进行声觉或视觉等感官预警、对车辆施加轻度制动或全力制动，改善AEB系统触发时的舒适性同时降低本车突然大幅减速致使后车追尾等安全隐患。

[0026] 2、通过设计路面信息估计算法，对车辆的当前行驶道路以及前方道路的坡度、附着系数等信息进行估算，并利用摄像头等传感器对下阶段路面信息进行预估计，提高路面信息估计算法实用性。

[0027] 3、能够根据路面信息估计算法得到的相关路面信息进行控制参数的在线调整，增强AEB系统对不同路面状况的适应程度，使AEB系统在任何路面上都能为车辆提供最大化的安全性能，同时避免AEB系统过早触发给驾驶员带来不信任感。

[0028] 4、对于具有再生制动功能的电动汽车，使再生制动系统与液压制动系统协调工作，在AEB系统要求制动强度较低时，进行再生制动力和液压制动力的合理分配，最大限度的发挥车辆的再生制动力，以充分回收制动能量，提高续航里程。

[0029] 5、使电子车身稳定性控制系统ESC与电子机械制动助力器Booster协调配合，充分发挥各自在主动增压上的优势，在AEB系统要求制动强度较低，制动力可由再生制动系统和ESC系统提供时，电子机械制动助力器Booster不介入制动，使制动踏板不发生自主移动，提高驾驶安全性和舒适性；而当AEB系统要求制动强度增大到超过ESC系统的主动增压极限和此时车辆再生制动系统能够提供的最大制动力之和时，由主动增压能力更强的电子机械制动助力器Booster介入使车辆尽快停车或者减速到理想速度。

附图说明

[0030] 图1为本发明整体架构示意图；

[0031] 图2为本发明路面信息估计模型算法原理图；

[0032] 图3为本发明分级预警控制系统逻辑图；

[0033] 图4为本发明ESC与Booster主动增压液压力分配原理图；

[0034] 图5为本发明路面附着系数估计算法中的三自由度四轮车辆模型示意图；

[0035] 图6为本发明路面附着系数估计算法中滤波估计的流程示意图；

[0036] 图7为本发明路面附着系数估计算法验证结果图；

[0037] 图8为本发明安全距离计算模型中本车分级制动过程示意图；

[0038] 图9为本发明安全距离计算模型中本车全力制动过程示意图；

[0039] 图10为本发明路面信息估计算法中基于闭环全维状态观测器的路面坡度估计算法验证结果图。

具体实施方式

[0040] 请参阅附图1-10，本发明所述的一种自动调整的电动车分级自动紧急制动控制系统包括：车载测距测速传感设备、分级预警控制系统、安全距离计算模型、车辆逆纵向动力学计算模型、液压制动力与再生制动力分配计算模块、液压制动系统逆模型、ESC与Booster主动增压液压力分配模块、路面信息估计模型，系统的控制方法如下所述：

[0041] (1)参阅附图2，车辆在行驶过程中，车载测距测速传感设备将本车与危险目标实时距离S传递给分级预警控制系统，将危险目标车的车速、加速度等运动状态信息传递给安全距离计算模型；路面信息估计模型将四个车轮中的最小路面附着系数μ传递给安全距离计算模型，将车辆此时所处路面坡度传递给车辆逆纵向动力学计算模型；

[0042] (2)所述安全距离计算模型将AEB系统的制动强度分为轻度制动和全力制动两种，根据四个车轮中的最小路面附着系数μ确定AEB系统的两级制动强度的目标制动减速度a_{exp}，并根据危险目标运动状态信息以及本车车速传感器测得的本车实时纵向车速v_0，确定AEB系统的三个控制信号触发阈值：感官预警安全距离阈值S_w、轻度制动的安全距离阈值S_d、全力制动的安全距离阈值S_b；

[0043] (3)参阅附图3，分级预警控制系统将本车与危险目标实时距离S与各级预警阈值S_w、S_d、S_b的大小进行比较，结合驾驶员是否有主动的减速操作，分析产生AEB预警控制信号即车辆的目标纵向减速度a_{exp}：若$S>S_w$，则系统判断此时车辆与前车距离处于安全范围，不进行作动；若$S_w<S<S_d$，则系统会对驾驶员进行感官预警，提醒驾驶员进行减速操作；若$S_b<S<S_d$，且根据制动踏板行程传感器信号判断此时驾驶员未进行减速操作，则系统将控制车辆进行轻度制动，使车辆减速的同时对驾驶员进行感官预警，此时目标纵向减速度a_{exp}为轻度制动减速度a_{1max}；若驾驶员此时有减速操作，则AEB系统会对驾驶员进行感官预警直至驾驶员使车距保持在安全距离；若$S<S_b$，则系统会控制车辆进行全力制动，使车辆以最快的速度在预设的最小安全车距范围内停驶或达到与危险目标相同的速度，最小安全车距范围S_0取值为2～3m，此时目标纵向减速度a_{exp}为全力制动减速度a_{2max}；

[0044] (4)分级预警控制系统将目标纵向减速度a_{exp}传递给车辆逆纵向动力学计算模型，车辆逆纵向动力学计算模型的基础是车辆行驶阻力方程式：

[0045] $F=F_f+F_w+F_i+F_j+F_b$

[0046] 其中F为车辆所受的纵向阻力，F_f为滚动阻力，F_w为空气阻力，F_i为坡路阻力，F_j为加速阻力，F_b为车辆制动系统产生的制动力。

[0047] 所述车辆逆纵向动力学计算模型接收所述分级预警控制系统传递的AEB预警信号即目标纵向减速度，当所述分级预警控制系统要求对车辆进行减速操作时，上式中的行驶阻力F应为：

[0048] $F=ma_{exp}$

[0049] 其中,m为车辆质量。

[0050] 由于车辆需进行减速操作,所以加速阻力:

[0051] $F_j=0$

[0052] 同时车辆逆纵向动力学计算模型会接收路面信息估计模型计算得到的路面坡度i,若车辆需要在坡路上进行紧急制动,则必须考虑坡度对制动过程的影响:

[0053] ①若此时为上坡,则坡路阻力会为车辆提供一部分减速度,坡路阻力:

[0054] $F_i=Gi$

[0055] 其中,G为车辆重力。

[0056] 综合可得,为了得到车辆期望的纵向减速度a_{exp},制动系统需要提供的制动力为:

[0057] $F_b=ma_{exp}-F_f-F_w-Gi$ (1)

[0058] ②若此时为下坡,则车辆重力沿坡路的分力会给车辆提供一个沿坡路向下的加速度,此时必须考虑通过加大制动力将此部分加速度抵消,则制动系统需要提供的制动力为:

[0059] $F_b=ma_{exp}+Gi-F_f-F_w$ (2)

[0060] 因此所述车辆逆纵向动力学计算模型可根据所述分级预警控制系统传递的车辆目标纵向减速度a_{exp},结合所述路面信息估计模型估算的路面坡度i,判断此时制动系统应该提供的制动力F_b,避免车辆在上坡路面上过早触发AEB系统或使车辆过早刹停,给驾驶员带来不信任感;避免车辆在下坡路面上AEB系统介入过晚导致制动不足发生碰撞危险。

[0061] (5)目标制动力F_b传递给液压制动力与再生制动力分配计算模块,同时再生制动系统根据此时的车速、车辆动力电机、蓄电池等系统的工作状态判断此时能提供的再生制动力F_{br},所述液压制动力与再生制动力分配计算模块计算此时的目标液压制动力$F_{bh}=F_b-F_{br}$;液压制动力与再生制动力分配计算模块能够充分发挥电动车的再生功能制动能力以回收制动能量,同时满足了车辆的制动减速度需求。

[0062] (6)目标液压制动力F_{bh}传递给液压制动系统逆模型进行计算,由公式:

[0063] $$F_{bh}=\frac{2\cdot[BEF]_f\cdot P_{\exp}+2\cdot[BEF]_r\cdot P_{\exp}}{r_{r0}}$$

[0064] 得到各制动器轮缸的目标液压力P_{exp}:

[0065] $$P_{\exp}=\frac{F_{bh}\cdot r_{r0}}{2([BEF]_f+[BEF]_r)} \quad (3)$$

[0066] 其中r_{r0}为车轮滚动半径,$[BEF]_f$为前轮制动器制动效能因数,$[BEF]_r$为后轮制动器制动效能因数,均为车辆的常规结构参数;

[0067] (7)参阅附图4,各制动器轮缸的目标液压力P_{exp}传递给ESC与Booster主动增压液压力分配模块,判断此时液压制动系统的主动增压方式:若P_{exp}在ESC系统的主动增压极限范围内,则由ESC系统在制动器轮缸建压进行主动增压控制;若P_{exp}超过了ESC系统的主动增压极限,则由Booster在制动轮缸建压进行主动增压控制,使车辆减速至目标车速;

[0068] 所述ESC与Booster主动增压液压力分配模块能够充分利用ESC系统和Booster主动增压方面的优势:当制动压力需求不高时,可以利用响应时间和精度相对较低的ESC系统,在满足压力需求的同时,对于搭载非解耦式制动系统的车辆,能够避免利用Booster主动增压导致制动踏板自动下移给驾驶员带来的不适感,并降低安全隐患;当制动压力需求

较高时，采用响应速度快、压力控制精度高，建压上限高的Booster进行主动制动，全力使车辆达到期望的制动减速度。

[0069] 上述过程在整个AEB系统触发过程中不断进行，与危险目标实时距离、各级预警阈值、本车和危险目标运动状态等信息不断更新调整，直至车辆减速至目标车速或停车并与危险目标保持在预设的安全距离。

[0070] 步骤(1)中，路面信息估计模型通过基于滤波的路面附着系数估计算法计算得到最小路面附着系数μ的方法如下：

[0071] 首先建立Dugoff轮胎模型以获取归一化轮胎力，Dugoff轮胎模型将轮胎上的纵向力和侧向力表示为：

[0072] $$F_x = \mu \cdot F_z \cdot C_x \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot f(L)$$

[0073] $$F_y = \mu \cdot F_z \cdot C_y \cdot \frac{\tan(\alpha)}{1-\lambda} \cdot f(L)$$

[0074] $$f(L) = \begin{cases} L \cdot (2-L), L < 1 \\ 1, L \geq 1 \end{cases}$$

[0075] $$L = \frac{}{2\sqrt{C_x^2 \cdot \lambda^2 + C_y^2 \cdot \tan^2 \alpha}} \cdot (1-\lambda) \cdot (1 - \varepsilon \cdot v_x \cdot \sqrt{C_x^2 \cdot \lambda^2 + C_y^2 \cdot \tan^2 \alpha})$$

[0076] 式中F_x为轮胎纵向力，F_y为轮胎侧向力，F_z为轮胎法向力，λ为纵向滑移率，C_y为轮胎侧偏刚度，C_x为轮胎纵向刚度，α为轮胎侧偏角，μ为路面附着系数，ε为轮胎影响系数，是一个与轮胎本身结构和材料有关的参数，用以修正车辆滑移速度对轮胎力的影响，L为边界值，用以描述车轮滑移带来的轮胎力的非线性特征；为了方便设计路面附着系数估计算法，将Dugoff轮胎模型简化为下述归一形式：

[0077] $$F_x = \mu \cdot F_x^0 = \mu \cdot F_z \cdot C_x \cdot \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot f(L)$$

[0078] $$F_y = \mu \cdot F_y^0 = \mu \cdot F_z \cdot C_y \cdot \frac{\tan(\alpha)}{1-\lambda} \cdot f(L)$$

[0079] 式中F_x^0和F_y^0分别为纵向和侧向的归一化轮胎力，与附着系数μ无关，便于所述基于滤波的路面附着系数估计算法中确定系统状态空间表达式的系数矩阵；

[0080] 建立归一化Dugoff轮胎模型后需要对模型中的归一化轮胎力进行计算，即分别计算各车轮的垂向载荷F_{Zfl}、F_{Zfr}、F_{Zrl}、F_{Zrr}，纵向滑移率λ_{fl}、λ_{fr}、λ_{rl}、λ_{rr}，轮胎侧偏角α_{fl}，α_{fr}，α_{rl}，α_{rr}，角标fl、fr、rl、rr分别代表车辆的左前轮、右前轮、左后轮、右后轮；

[0081] 各车轮垂向载荷计算公式：

[0082] $$F_{Zfl} = m \cdot g \cdot \frac{b}{2l} - m \cdot a_x \cdot \frac{h_g}{2l} + m \cdot a_y \cdot \frac{h_g}{T_f} \cdot \frac{b}{l}$$

[0083] $$F_{Zfr} = m \cdot g \cdot \frac{b}{2l} - m \cdot a_x \cdot \frac{h_g}{2l} - m \cdot a_y \cdot \frac{h_g}{T_f} \cdot \frac{b}{l}$$

[0084] $$F_{Zrl}=m\cdot g\cdot\frac{a}{2l}+m\cdot a_x\cdot\frac{h_g}{2l}+m\cdot a_y\cdot\frac{h_g}{T_r}\cdot\frac{a}{l}$$

[0085] $$F_{Zrr}=m\cdot g\cdot\frac{a}{2l}+m\cdot a_x\cdot\frac{h_g}{2l}-m\cdot a_y\cdot\frac{h_g}{T_r}\cdot\frac{a}{l}$$

[0086] 各车轮侧偏角计算公式：

[0087] $$\alpha_{fl}=\delta-\tan^{-1}\left(\frac{v_y+a\cdot r}{v_x+\frac{T_f}{2}\cdot r}\right)$$

[0088] $$\alpha_{fr}=\delta-\tan^{-1}\left(\frac{v_y+a\cdot r}{v_x-\frac{T_f}{2}\cdot r}\right)$$

[0089] $$\alpha_{rl}=\tan^{-1}\left(\frac{-v_y+b\cdot r}{v_x+\frac{T_f}{2}\cdot r}\right)$$

[0090] $$\alpha_{rr}=\tan^{-1}\left(\frac{-v_y+b\cdot r}{v_x-\frac{T_f}{2}\cdot r}\right)$$

[0091] 各个车轮滑移率的计算公式：

[0092] $$\lambda_{fl}=\frac{\omega_{fl}\cdot R_\omega-v_{fl}}{v_{fl}}$$

[0093] $$\lambda_{fr}=\frac{\omega_{fr}\cdot R_\omega-v_{fr}}{v_{fr}}$$

[0094] $$\lambda_{rl}=\frac{\omega_{rl}\cdot R_\omega-v_{rl}}{v_{rl}}$$

[0095] $$\lambda_{rr}=\frac{\omega_{rr}\cdot R_\omega-v_{rr}}{v_{rr}}$$

[0096] 上式中各个车轮接地点的速度v_{fl}、v_{fr}、v_{rl}、v_{rr}计算公式为：

[0097] $$v_{fl}=v_{cog}+r\cdot(\frac{T_f}{2}-a\cdot\beta)$$

[0098] $$v_{fr}=v_{cog}+r\cdot(-\frac{T_f}{2}-a\cdot\beta)$$

[0099] $$v_{rl}=v_{cog}+r\cdot(\frac{T_r}{2}+b\cdot\beta)$$

[0100] $$v_{rr}=v_{cog}+r\cdot(-\frac{T_r}{2}+b\cdot\beta)$$

[0101] 上述各公式中各参数含义为:β为车辆质心侧偏角,$\beta=\tan^{-1}(\frac{v_y}{v_x})$,$v_{cog}$为车辆质心速度,$v_{cog}=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$,m为整车质量,a为前轮中心与车辆质心的水平距离,b为后轮中心与车辆质心的水平距离,l为车辆轴距,h_g为车辆质心高度,a_x为车辆纵向加速度,a_y为车辆侧向加速度,T_f为两前轮轮距,T_r为两后轮轮距,v_x为整车纵向速度,v_y整车侧向速度,R_ω为车轮滚动速度,ω_{fl}、ω_{fr}、ω_{rl}、ω_{rr}分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮的滚动角速度;

[0102] 因此四个车轮的纵向归一化轮胎力可表示为:

[0103] $$F_{xfl}^0=F_{zfl}\cdot C_x\cdot\frac{\lambda_{fl}}{1-\lambda_{fl}}\cdot f(L_{fl})$$

[0104] $$F_{xfr}^0=F_{zfr}\cdot C_x\cdot\frac{\lambda_{fr}}{1-\lambda_{fr}}\cdot f(L_{fr})$$

[0105] $$F_{xrl}^0=F_{zrl}\cdot C_x\cdot\frac{\lambda_{rl}}{1-\lambda_{rl}}\cdot f(L_{rl})$$

[0106] $$F_{xrr}^0=F_{zrr}\cdot C_x\cdot\frac{\lambda_{rr}}{1-\lambda_{rr}}\cdot f(L_{rr})$$

[0107] 四个车轮的侧向归一化轮胎力可表示为:

[0108] $$F_{yfl}^0=F_{zfl}\cdot C_y\cdot\frac{\tan(\alpha_{fl})}{1-\lambda_{fl}}\cdot f(L_{fl})$$

[0109] $$F_{yfr}^0=F_{zfr}\cdot C_y\cdot\frac{\tan(\alpha_{fr})}{1-\lambda_{fr}}\cdot f(L_{fr})$$

[0110] $$F_{yrl}^0=F_{zrl}\cdot C_y\cdot\frac{\tan(\alpha_{rl})}{1-\lambda_{rl}}\cdot f(L_{rl})$$

[0111] $$F_{yrr}^0=F_{zrr}\cdot C_y\cdot\frac{\tan(\alpha_{rr})}{1-\lambda_{rr}}\cdot f(L_{rr})$$

[0112] 结合Dugoff轮胎模型修正的归一化轮胎力的计算过程中需要的参数包括车辆结构参数和运动学参数两类,结构参数可直接测量得到,运动学参数可通过相关车载传感器测量;

[0113] 为了列写基于滤波的路面附着系数估计算法中的系统状态方程和观测方程,需要建立车辆的三自由度四轮车辆模型来描述车辆纵向、侧向和横摆运动;

[0114] 参阅附图5,车辆纵向、侧向和横摆三个方向的运动方程为:

[0115] $$a_x=[\mu_{fl}\cdot(F_{xfl}^0\cdot\cos\delta-F_{yfl}^0\cdot\sin\delta)+\mu_{fr}\cdot(F_{xfr}^0\cdot\cos\delta-F_{yfr}^0\cdot\sin\delta)+\mu_{rl}\cdot F_{xrl}^0+\mu_{rr}\cdot F_{xrr}^0]/m$$

[0116]
$$a_y=[\mu_{fl}\cdot(F_{xfl}^0\cdot\sin\delta+F_{yfl}^0\cdot\cos\delta)+\mu_{fr}\cdot(F_{xfr}^0\cdot\sin\delta+F_{yfr}^0\cdot\cos\delta)+\mu_{rl}\cdot F_{yrl}^0+\mu_{rr}\cdot F_{yrr}^0]/m$$

[0117]
$$\dot{r}=\frac{1}{I_z}\cdot\{[a\cdot(F_{xfl}^0\cdot\sin\delta+F_{yfl}^0\cdot\cos\delta)+\frac{T_f}{2}\cdot(-F_{xfl}^0\cdot\cos\delta+F_{yfl}^0\cdot\sin\delta)]\cdot\mu_{fl}+[a\cdot(F_{xfr}^0\cdot\sin\delta+F_{yfr}^0\cdot\cos\delta)+\frac{T_f}{2}\cdot(F_{xfr}^0\cdot\cos\delta-F_{yfr}^0\cdot\sin\delta)]\cdot\mu_{fr}+(-(b\cdot F_{yrl}^0-\frac{T_r}{2}\cdot F_{xrl}^0))\cdot\mu_{rl}+(-(b\cdot F_{yrr}^0+\frac{T_r}{2}\cdot F_{xrr}^0))\cdot\mu_{rr}\}$$

[0118] 式中，a_x为车辆纵向加速度，a_y为车辆侧向加速度，$\dot{r}$为车辆的横摆角加速度，δ为两个前轮转角，m为整车质量，μ_{fl}、μ_{fr}、μ_{rl}、μ_{rr}分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮所在路面附着系数，a为前轮中心与车辆质心的水平距离，b为后轮中心与车辆质心的水平距离，T_f为两前轮轮距，T_r为两后轮轮距，I_z车辆的横摆转动惯量；

[0119] 车辆上的相关传感器测量得到算法所需的车辆运动学参数并将其传递给Dugoff轮胎模型，Dugoff轮胎模型计算得到纵向和侧向归一化轮胎力并将其传递给车辆三自由度四轮模型，从而得到纵向、侧向和横摆方向的三个动力学方程，基于这三个动力学方程可以得到路面附着系数滤波估计器的系统状态方程和观测方程，以进行后续的附着系数估计；

[0120] 所述的基于滤波的路面附着系数估计算法选取的系统为非线性系统，其状态方程和观测方程分别为：

[0121] 状态方程：

[0122]
$$\dot{x}(t)=f(x(t),u(t),w(t))$$

[0123] 观测方程：

[0124] y(t)＝h(x(t),u(t),v(t))

[0125] 随机变量w(t)，v(t)分别为过程噪声和测量噪声，在所述的基于滤波的路面附着系数估计算法中取为互相独立且均值为零的高斯白噪声，其概率分布为：

[0126] p(w)～N(0,Q)p(v)～N(0,R)

[0127] 并设它们的协方差矩阵分别为Q和R，即：

[0128] Q＝cov[w(t),w(τ)]

[0129] R＝cov[v(t),v(τ)]

[0130] 参阅附图6，所述的基于滤波的路面附着系数估计算法的具体实现过程如下：

[0131] (1)确定系统状态方程和观测方程：

[0132] 根据所述三自由度四轮车辆模型纵向、侧向和横摆方向的运动方程确定：

[0133] 状态变量：$x(t)=[\mu_{fl}\ \mu_{fr}\ \mu_{rl}\ \mu_{rr}]^T$，

[0134] 观测变量：$y(t)=[a_x\ a_y\ r]^T$，

[0135] 控制输入：$u(t)=[\delta]$，

[0136] 根据所述三自由度四轮车辆模型纵向、侧向和横摆方向的运动方程的表达式和各变量，将状态方程和观测方程写成：

[0137] 状态方程：

[0138] $$\dot{x}(t)=f(x(t),u(t),w(t))=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu_{fl}\\\mu_{fr}\\\mu_{rl}\\\mu_{rr}\end{bmatrix}+w(t) \quad \cdots\cdots(a)$$

[0139] 观测方程：

$$y(t)=h(x(t),u(t),v(t))$$

[0140] $$=\begin{bmatrix}\frac{F_{xfl}^0-F_{yfl}^0\cdot\delta}{m}&\frac{F_{xfr}^0-F_{yfr}^0\cdot\delta}{m}&\frac{F_{xrl}^0}{m}&\frac{F_{xrr}^0}{m}\\\frac{F_{xfl}^0\cdot\delta+F_{yfl}^0}{m}&\frac{F_{xfr}^0\cdot\delta+F_{yfr}^0}{m}&\frac{F_{yrl}^0}{m}&\frac{F_{yrr}^0}{m}\\H(3,1)&H(3,2)&H(3,3)&H(3,4)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mu_{fl}\\\mu_{fr}\\\mu_{rl}\\\mu_{rr}\end{bmatrix}+v(t) \quad \cdots\cdots(b)$$

[0141] 其中：

[0142] $$H(3,1)=\frac{a\cdot(F_{xfl}^0\cdot\delta+F_{yfl}^0)+\frac{T_f}{2}\cdot(F_{xfr}^0-F_{yfr}^0\cdot\delta)}{I_z},\quad H(3.3)=\frac{-(b\cdot F_{yrl}^0-\frac{T_r}{2}\cdot F_{xrl}^0)}{I_z}$$

[0143] $$H(3,2)=\frac{a\cdot(F_{xfr}^0\cdot\delta+F_{yfr}^0)-\frac{T_f}{2}\cdot(F_{xfl}^0-F_{yfl}^0\cdot\delta)}{I_z},\quad H(3,4)=\frac{-(b\cdot F_{yrr}^0+\frac{T_r}{2}\cdot F_{xrr}^0)}{I_z}$$

[0144] (2)估计器赋初值：

[0145] 递推过程中的初值，测量噪声协方差阵R为3乘3的单位阵，过程噪声协方差阵Q为4乘4的单位矩阵；

[0146] (3)利用滤波算法估计路面附着系数：

[0147] ①进行滤波初始化，迭代步数k＝0，则状态变量x的初始均值$\bar{x}(0)$和协方差P(0)分别为：

[0148] $$\bar{x}(0)=E[x(0)]$$

[0149] $$P(0)=E\left[(x(0)-\bar{x}(0))(x(0)-\bar{x}(0))^T\right]$$

[0150] ②利用无迹变换计算得到2n+1个点，使这2n+1个点的均值和协方差等于原状态分布的均值和协方差，称这2n+1个点为Sigma点，n为状态维数，根据上述状态方程，取n＝4，则这里需要得到9个Sigma点集，每个Sigma点集的状态维数与状态变量x的维数一致，即为4维列向量，则由这9个Sigma点集组成的矩阵x为4*9的矩阵；设$x_i(0)$为在迭代步数k＝0时矩阵x中的每个列向量即每个Sigma点集，$x_0(0)$为Sigma矩阵x的第一列，以此类推，则初始的Sigma矩阵为：

[0151] $$\chi_0(0)=\bar{x}(0)\quad i=0$$

[0152] $$\chi_i(0)=\begin{cases}\bar{x}(0)+\left(\sqrt{(4+\lambda)P(0)}\right)_i & i=1,2,\cdots,4\\ \bar{x}(0)-\left(\sqrt{(4+\lambda)P(0)}\right)_i & i=5,6,\cdots,8\end{cases}$$

[0153] 其中λ为比例参数，λ＝(α²-1)·n＝4(α²-1)，α用来确定Sigma点在状态变量均值$\bar{x}$附近的分布范围，是一个很小的正数$10^{-4}\leqslant\alpha\leqslant1$，通常取$\alpha=10^{-3}$；

[0154] 上述迭代步数k＝0时的初始Sigma点集的计算过程，同样适用于其他迭代步数的Sigma点集计算，只不过此时用于Sigma点集计算的状态变量均值和状态变量协方差值为k时刻的值，即k时刻的$\bar{x}(k|k)$和P(kk)，计算公式为：

[0155] $$\chi_0(k)=\bar{x}(k|k)\quad i=0$$

[0156] $$\chi_i(k)=\begin{cases}\bar{x}(k|k)+\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k)}\right)_i & i=1,2,\cdots,4\\ \bar{x}(k|k)-\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k)}\right)_i & i=5,6,\cdots,8\end{cases}$$

[0157] ③进入下一步迭代，迭代步数k增加1，对9个Sigma点集进行下一步预测，将步骤②得到的上一步的Sigma点集代入系统的状态方程(a)中，得到变换后的Sigma点集：

[0158] x(kk-1)＝f(x(k-1)，u(k-1))k＝1,2,…

[0159] ④根据无迹变换原则，计算系统状态变量的下一步预测均值以及预测方差，系统状态变量的预测均值由Sigma点集的预测值加权求和得到：

[0160] $$\bar{x}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(m)}\chi_i(k|k-1)$$

[0161] 式中$W_i^{(m)}$为各Sigma点的均值权重，具体取值为：

[0162] $W_0^{(m)}=\lambda/(4+\lambda)$ i＝0

[0163] $W_i^{(m)}=1/[2(4+\lambda)]$ i＝1,2,…,8

[0164] 系统状态变量的预测方差由Sigma点集的预测协方差加权求和得到：

[0165] $$P(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(c)}\left(\chi_i(k|k-1)-\bar{x}(k|k-1)\right)\left(\chi_i(k|k-1)-\bar{x}(k|k-1)\right)^T+Q$$

[0166] 上式中$x_i(k|k-1)$是矩阵x(k|k-1)的第i列，i＝0,1,…,8；$W_i^{(c)}$为各Sigma点的协方差权重，具体取值为：

[0167] $W_0^{(c)}=\lambda/(n+\lambda)+(1-\alpha^2+\beta)$ i＝0

[0168] $W_i^{(c)}=1/[2(n+\lambda)]$ i＝1,2,…,8

[0169] 其中β用来合并有关状态变量x分布的先验状态，所述基于滤波的路面附着系数估计算法中状态变量x服从高斯分布，通常取β＝2；

[0170] ⑤根据步骤④得到的系统状态变量的下一步预测均值以及下一步预测方差，再次利用无迹变换，产生新的Sigma点集，计算过程与步骤②中初始的Sigma点集的计算过程相同：

[0171] $$\chi_0(k|k-1)=\bar{x}(k|k-1)\quad i=0$$

[0172] $$\chi_i(k|k-1)=\begin{cases}\bar{x}(k|k-1)+\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k-1)}\right)_i & i=1,2,\cdots,4\\ \bar{x}(k|k-1)-\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k-1)}\right)_i & i=5,6,\cdots,8\end{cases}$$

[0173] ⑥将步骤⑤得到的新的Sigma点集带入观测方程(b)得到Sigma点集的观测量的下一步预测值：

[0174] $$\varsigma(k|k-1)=h\left[\chi(k|k-1)\quad u(k-1)\right]$$

[0175] 式中的u(k-1)即为迭代步数为k-1时刻的系统输入，即此时的前轮转角δ，可由现有的车载转角传感器测得；

[0176] 由观测方程(b)可知，系统的输出矩阵为3乘4的矩阵，Sigma矩阵x(kk-1)为4乘9的矩阵，因此经观察方程(b)计算得到Sigma点集的观测量的下一步预测值$\varsigma(k|k-1)$为3乘9的矩阵；

[0177] ⑦由步骤⑥得到的Sigma点集的观测量下一步预测值$\varsigma(k|k-1)$，通过加权求和得到系统观测变量的预测均值：

[0178] $$\bar{y}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(m)}\varsigma_i(k|k-1)$$

[0179] 式中$\varsigma_i(k|k-1)$是Sigma点集的观测量的下一步预测值矩阵$\varsigma(k|k-1)$的第i列，i＝0,1,…,8；

[0180] ⑧由步骤⑥得到的Sigma点集的观测量下一步预测值$\varsigma(k|k-1)$，通过加权求和计算更新后的观测协方差矩阵以及状态变量与输出变量互相关矩阵：

[0181] 观测协方差矩阵为：

[0182] $$P_{yy}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(c)}\left(\varsigma_i(k|k-1)-\bar{y}(k|k-1)\right)\left(\varsigma_i(k|k-1)-\bar{y}(k|k-1)\right)^T+R$$

[0183] 状态变量与输出变量互相关矩阵为：

[0184] $$P_{xy}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(c)}\left(\chi_i(k|k-1)-\bar{x}(k|k-1)\right)\left(\varsigma_i(k|k-1)-\bar{y}(k|k-1)\right)^T$$

[0185] ⑨计算系统更新后的滤波反馈增益矩阵：

[0186] $$K(k)=P_{xy}(k|k-1)P_{yy}^{-1}$$

[0187] 计算系统更新后的状态变量均值矩阵：

[0188] $$\bar{x}(k|k)=\bar{x}(k|k-1)+K(k)\left(y(k)-\bar{y}(k|k-1)\right)$$

[0189] 矩阵$\bar{x}(k|k)$的(1,1)元素，(2,1)元素，(3,1)元素，(4,1)元素分别为迭代步数为k时的左前轮附着系数、右前轮附着系数、左后轮附着系数、右后轮附着系数的滤波估计值；

[0190] 式中的y(k)为迭代步数为k的时刻实际的观测变量值，即迭代步数为k时刻的纵向加速度a_x、侧向加速度a_y以及横摆角加速度$\dot{r}$，以上三个车辆运动学参数均可由车辆上装配的相关加速度传感器进行实时测量，再传递给所述基于滤波的路面附着系数估计算法；

[0191] 计算系统更新后的状态变量协方差值：

[0192] $P(k|k)=P(k|k-1)-K(k)P_{yy}K^{T}(k)$

[0193] 系统更新后的状态变量均值$\bar{x}(k|k)$和状态变量协方差值P(k|k)将返回步骤②产生下一组Sigma点集，开始下一个迭代步数的计算；上述过程将不断重复，直到完成所有迭代步数，最终得到四个车轮的路面附着系数μ；

[0194] 所述基于滤波的路面附着系数估计算法的迭代步数k取决于算法设置的采样步长，采样步长的选取又直接影响算法最终的收敛程度、收敛速度，也就是四个车轮所在路面附着系数的估计速度和精度，因此算法采样步长需根据不同车辆的相关参数具体调整以使算法获得最佳性能。

[0195] 参阅附图7，对所述基于滤波的路面附着系数估计算法进行了验证，由附图可知，各车轮路面附着系数均可在1s之内完成收敛，并且基本与路面附着系数的实际参考值保持一致，误差极小，说明本发明所述的基于滤波的路面附着系数估计算法性能良好，路面附着系数估计速度和估计精度极高，满足车级算法要求。

[0196] 所述基于滤波的路面附着系数估计算法考虑了车辆在对开路面等四个车轮附着系数不同路面上行驶的情况，在得到各车轮路面附着系数估计值后，所述基于滤波的路面附着系数估计算法会对四个值进行比较然后得到四个车轮附着系数中的最小值，然后将此最小值μ反馈给所述安全距离计算模型，以防止低附着系数轮胎与路面之间无法产生足够的制动力导致车辆制动减速度不足发生碰撞危险。

[0197] 步骤(2)中，AEB系统的轻度制动的目标制动减速度$a_{1max}=0.25\mu g\sim0.35\mu g$，全力制动的目标制动减速度$a_{2max}=0.75\mu g\sim0.85\mu g$；AEB系统的三级预警安全距离阈值计算方法如下：

[0198] 参阅附图8，从车辆制动的角度出发，本车分级制动过程分为六个阶段：

[0199] 第一阶段：从AEB系统发出轻度制动信号开始，至主动制动系统开始使车辆产生轻度制动减速度为止，该阶段持续时间t_{11}由车辆的主动制动系统的响应滞后时间决定，可通过试验测试得到。在此阶段，由于制动系统并未建立起制动压力，车辆减速度为0，本车的位移为：

[0200] $S_{11}=v_0t_{11}$

[0201] 式中：v_0为本车初始车速；

[0202] 第二阶段：该阶段以主动制动系统开始增压为起点，至制动压力达到轻度制动的目标液压力为止，增压时间为t_{12}；此过程中，随着制动压力的增加，车辆制动减速度a_1、车速v_{12}及位移S_{12}表达式分别如下：

[0203] $$a_1=\frac{a_{1max}}{t_{12}}\cdot t$$

[0204] $v_{12}=v_0-\int a_1\cdot dt$

[0205] $$S_{12}=\int_0^{t_{12}}v_{12}dt$$

[0206] 式中：a_{1max}为轻度制动阶段目标制动减速度；

[0207] 第三阶段：该阶段为AEB系统稳定的轻度制动阶段，车辆保持a_{1max}的制动强度不

变，该过程的持续时间t_{13}，由AEB系统设定，可取为1～2s，在此过程中本车车速v_{13}及位移S_{13}变化如下：

[0208] $v_{13}=v_0-0.5a_{1max}t_{12}-a_{1max}t$

[0209] $$S_{13}=\int_0^{t_{13}} v_{13}dt$$

[0210] 第四阶段：该阶段从AEB系统发出紧急全力制动信号开始，至主动制动系统开始增压为止，在该阶段中，本车仍保持a_{1max}的制动减速度不变，该阶段响应滞后持续时间$t_{21}=t_{11}$；此阶段车速v_{21}及位移S_{21}分别为：

[0211] $v_{21}=v_0-a_{1max}(0.5t_{12}+t_{13})-a_{1max}t$

[0212] $$S_{21}=\int_0^{t_{21}} v_{21}dt$$

[0213] 第五阶段：该阶段为液压制动系统的增压阶段，主动制动压力由轻度制动目标值升至全力制动目标值，增压时间t_{22}；在该阶段，本车减速度a_2、车速v_{22}及位移S_{22}表达式分别如下：

[0214] $$a_2=a_{1max}+\frac{a_{2max}-a_{1max}}{t_{22}}t$$

[0215] $v_{22}=v_0-a_{1max}(0.5t_{12}+t_{13}+t_{21})-\int a_2dt$

[0216] $$S_{22}=\int_0^{t_{22}} v_{22}dt$$

[0217] 式中：a_{2max}为全力制动阶段目标制动减速度；

[0218] 第六阶段：稳定的全力制动阶段，该阶段从本车制动压力达到目标制动压力开始，至本车车速降至0或降至危险目标车车速v_t为止；在该阶段中，本车初始车速v_2、持续时间t_{23}、实时车速v_{23}以及制动距离S_{23}表达式分别如下：

[0219] $v_2=v_0-a_{1max}(0.5t_{12}+t_{13}+t_{21}+0.5t_{22})-0.5a_{2max}t_{22}$

[0220] $$t_{23}=\frac{v_2-v_t}{a_{2max}}$$

[0221] $v_{23}=v_2-a_{2max}\cdot t$

[0222] $$S_{23}=\int_0^{t_{23}} v_{23}dt$$

[0223] 至此，本车分级制动计算过程结束；

[0224] 由于前方危险目标车辆存在紧急制动的可能，在此工况下，本车将以两车同时紧急制动而不发生碰撞的车距为轻度制动的安全距离阈值，因此对本车主动制动系统全力制动过程进行计算：

[0225] 该过程分为三个阶段：

[0226] 第一阶段：为主动制动系统响应滞后阶段，在该过程中，本车行驶的距离S_1为：

[0227] $S_1=v_0\cdot t_1$

[0228] 第二阶段：为主动制动压力建立阶段，该阶段中主动制动压力线性增加，本车制动

减速度a、本车车速v_1以及本车位移S_2的表达式分别为：

[0229] $$a=\frac{a_{2max}}{t_2}\cdot t$$

[0230] $v_1=v_0-\int a\,dt$

[0231] $$S_2=\int_0^{t_2} v_1 dt=v_0\cdot t_2-\frac{a_{2max}t_2^2}{6}$$

[0232] 式中：t_2为主动制动系统压力建立时间，a_{2max}为本车的目标制动减速度；

[0233] 第三阶段：该阶段本车匀减速直至停车，在该阶段中，本车初始车速v_{30}、实时车速v_3、持续时间t_3以及制动距离S_3分别为：

[0234] $$v_{30}=v_0-\int_0^{t_2} a\,dt=v_0-\frac{a_{2max}}{2}\cdot t_2$$

[0235] $$t_3=\frac{v_{30}}{a_{2max}}$$

[0236] $v_3=v_{30}-a_{2max}\cdot t$

[0237] $$S_3=\int_0^{t_3} v_3 dt$$

[0238] 下面进行AEB三个预警等级安全距离阈值S_w S_d S_b的计算：

[0239] ①全力制动阈值S_b：

[0240] 由本车分级制动过程可知，当前方危险目标车辆以速度v_t保持匀速行驶，本车全力制动减速至前方危险目标车车速时，本车的制动距离S_{h1_m}为：

[0241] $S_{h1_m}=S_{21}+S_{22}+S_{23}$

[0242] 该过程中，前方危险目标车行驶的距离S_{t1}为：

[0243] $S_{t1}=v_t(t_{21}+t_{22}+t_{23})$

[0244] 设当车辆完成自动紧急制动后，能够与前车保持的目标距离为S_0，则AEB系统触发全力制动的安全距离门限值S_b为：

[0245] $S_b=S_{h1_m}-S_{t1}+S_0$

[0246] ②轻度制动安全距离阈值S_d：

[0247] 当前方危险目标车突然以最大减速度制动时，其制动距离S_{t2}为：

[0248] $$S_{t2}=\frac{v_t^2}{2\mu g}$$

[0249] 本车亦采用全力制动模型计算制动距离，本车全力制动的制动距离S_{h2_m}为：

[0250] $S_{h2_m}=S_1+S_2+S_3$

[0251] 则AEB系统轻度制动安全距离门限值S_d为：

[0252] $S_d=S_{h2_m}-S_{t2}+S_0$

[0253] ③视觉听觉预警安全距离阈值S_w：

[0254] $S_w=S_d+t_w\cdot v_0$

[0255] 式中t_w为声觉、视觉预警持续的时间，可取为1～1.5s。

[0256] 由上述的AEB预警等级安全阈值可以看出，所述安全距离计算模型中AEB系统的轻

度制动减速度为0.3μg，全力制动的制动减速度为0.8μg，μ为所述路面信息估计模型计算得到的此时车辆四个车轮路面附着系数最小值，因此本发明能够根据实际的最小路面附着系数μ，实时在线改变轻度制动和全力制动的减速度值，防止AEB系统进行自动制动时，路面无法提供预设的制动减速度而发生碰撞危险。同时，所述安全距离计算模型也会根据此时的路面附着系数调整各级预警阈值，防止AEB系统过晚触发发生危险。

[0257] 步骤(4)中，路面信息估计模型基于闭环全维状态观测器的路面坡度估计算法估算出车辆此时所处路面的坡度i的方法如下：

[0258] 车辆的相关传感器将路面坡度估计所需的车辆参数传递给路面信息估计模型，车辆行驶方程式为$F_t=F_f+F_w+F_i+F_j$；

[0259] 车辆驱动力F_t为：

[0260] $$F_t=\frac{T_e i_g i_0 \eta_t}{r}$$

[0261] 其中r为车轮滚动半径，T_e为车辆发动机转矩，i_g为车辆变速器传动比，i_0为车辆主减速器，η_t为车辆传动系统总效率；

[0262] 车辆空气阻力F_w为：

[0263] $$F_w=\frac{1}{2}C_D A\rho v_x^2$$

[0264] 其中C_D为空气阻力系数，A为迎风面积，ρ为空气密度，v_x为车辆纵向速度；

[0265] 车辆加速阻力F_j为：

[0266] $F_j=\delta Ma_x$

[0267] 其中δ为车辆旋转质量换算系数；M为整车质量，a_x为车辆纵向加速度；

[0268] 车辆滚动阻力F_f为：

[0269] $F_f=Mgf\cos\alpha\approx Mgf$

[0270] 其中f为车辆滚动阻力系数；

[0271] 车辆的坡度阻力F_i为：

[0272] $F_i=Mg\sin\alpha\approx Mgi$

[0273] 则车辆在坡路上的纵向动力学方程可以写为：

[0274] $$\delta Ma_x=\frac{T_e i_g i_0 \eta_t}{r}-\frac{1}{2}C_D A\rho v_x^2-Mgf-Mgi$$

[0275] 上述计算过程中涉及到的车辆相关参数均为车辆设计制造过程中易于得到的参数。为了应用状态观测器，需对该纵向动力学方程进行线性化处理，将车辆驱动力F_t、空气阻力F_w和滚动阻力F_f看成一个合力F_{input}作为系统输入纵向动力学方程，则纵向动力学方程简化为：

[0276] $\delta Ma=F_{input}-Mgi$

[0277] 上式为系统状态方程，基于系统状态方程可写出系统的状态空间表达式；以车辆纵向速度v_x和坡度i作为系统状态变量，以合力F_{input}为系统输入变量，则基于汽车纵向动力学方程的状态空间表达式为：

[0278] $$\dot{x}=Ax+BU$$

[0279] z＝Cx

[0280] 其中：$x=\begin{bmatrix} v_x \\ i \end{bmatrix}, U=\begin{bmatrix} F_{input} \\ 0 \end{bmatrix}, A=\begin{bmatrix} 0 & -\frac{g}{\delta} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} \frac{1}{\delta M} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$,C＝[1 0]；

[0281] 下面验证系统可观性，该系统的可观测性矩阵为：

[0282] $$Q_B=\begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\frac{g}{\delta} \end{bmatrix}$$

[0283] 可观测性矩阵Q_B满秩，说明该系统可观测，因此设计路面坡度观测器为：

[0284] $$\dot{\hat{x}}=A\hat{x}+BU+HCe$$

[0285] 其中$\hat{x}$为观测器的观测向量，$\hat{x}=\begin{bmatrix} \hat{v}_x & \hat{i} \end{bmatrix}^T$；H是观测器的反馈增益矩阵；e是误差向量，即$e=x-\hat{x}$；

[0286] 将$\dot{x}=Ax+BU$与$\dot{\hat{x}}=A\hat{x}+BU+HCe$相减可得：

[0287] $$\dot{x}-\dot{\hat{x}}=A(x-\hat{x})-HC(x-\hat{x})=(A-HC)(x-\hat{x})$$

[0288] 设$\dot{x}-\dot{\hat{x}}$为j，则上式变为$\dot{j}=(A-HC)j$，转化为关于j的一阶线性微分方程，设初始时刻为t_0，微分方程解为：

[0289] $$j=x-\hat{x}=e^{(A-HC)(t-t_0)}[x(t_0)-\hat{x}(t_0)]$$

[0290] 为了保证观测器稳定性，应保证当时间趋于无穷时，观测器误差向量e等于0，即：

[0291] $$\lim_{t\to\infty}(x-\hat{x})=0$$

[0292] 只要使(A-HC)的特征根λ具有负实部，误差向量就将以指数规律衰减为0，且衰减速度由(A-HC)的特征根决定；设观测器的反馈增益矩阵$H=\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}$，则(A-HC)的特征方程为：

[0293] $$\det[\lambda I-(A-HC)]=\lambda^2+h_1\lambda-\frac{h_2 g}{\delta} \qquad (4)$$

[0294] 预设全维观测器的期望极点即具有负实部的(A-HC)特征根为λ_1和λ_2，λ_1和λ_2可由本系统的使用者自行选择，只要保证其具有负实部即可，期望极点λ_1和λ_2对应的期望特征方程为：

[0295] $(\lambda-\lambda_1)(\lambda-\lambda_2)=\lambda^2-(\lambda_1+\lambda_2)\lambda+\lambda_1\lambda_2$ (5)

[0296] 令式(4)和式(5)对应项系数相等可得观测器的反馈增益矩阵H的元素为：

[0297] $h_1=-\lambda_1-\lambda_2$

[0298] $$h_2=\frac{-\lambda_1\lambda_2}{g}\delta$$

[0299] 按照上述方法计算得到反馈增益矩阵H即可保证特征值λ_1和λ_2具有负实部，即使观测器稳定；全维状态观测器观测变量$\hat{x}$中的第二行元素$\hat{i}$即为车辆此时所处路面坡度的估计值i。

[0300] 参阅附图10，对所述基于闭环全维状态观测器的路面坡度估计算法进行了验证，由附图可知，路面坡度估计值可在极短时间内完成收敛，并且基本与路面坡度的实际参考值保持一致，误差极小，说明本发明所述的基于闭环全维状态观测器的路面坡度估计算法性能良好，路面坡度估计速度和估计精度极高，满足车级算法要求。

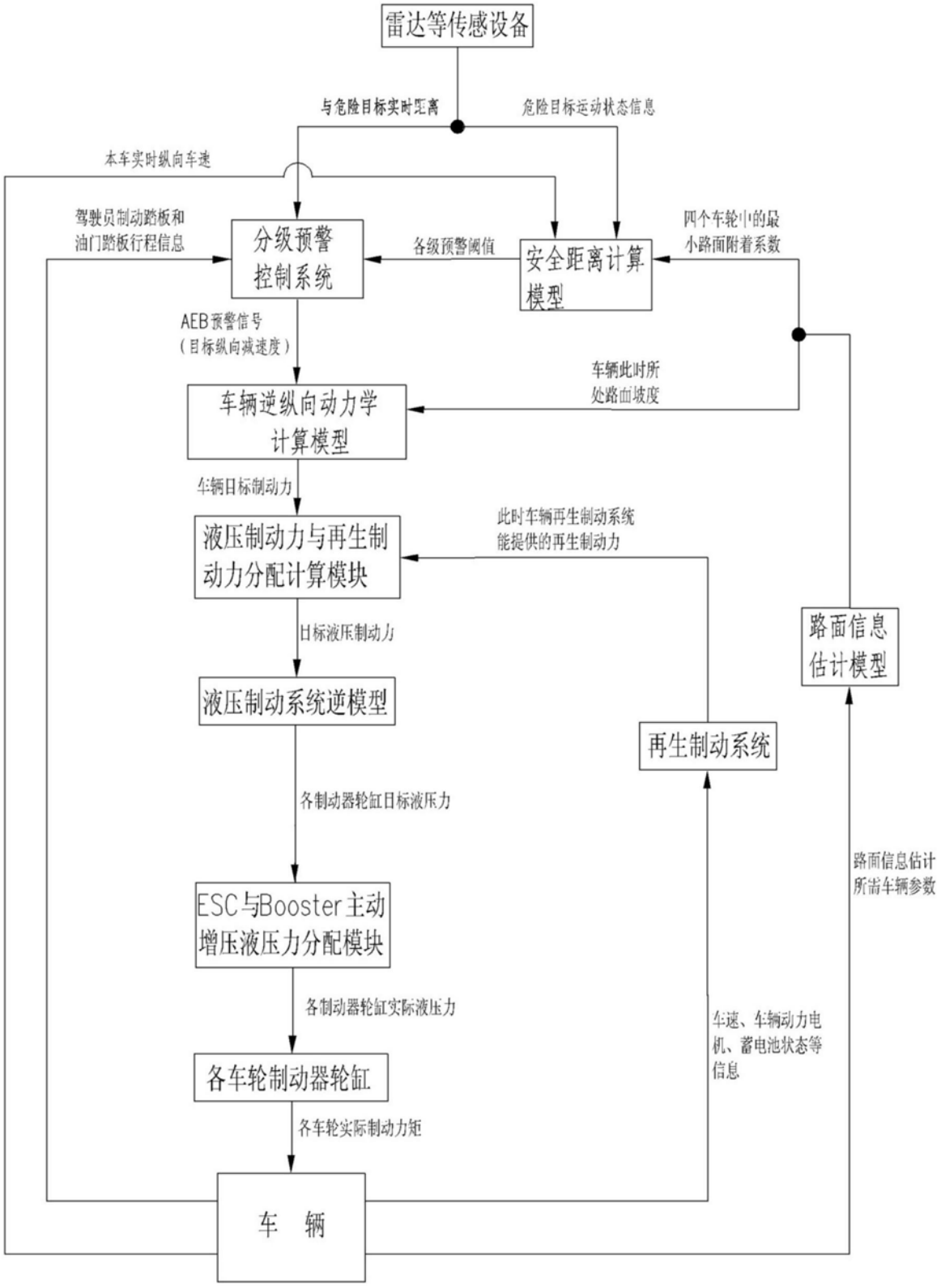

雷达等传感设备
与危险目标实时距离
危险目标运动状态信息
本车实时纵向车速
驾驶员制动踏板和油门踏板行程信息
分级预警控制系统
各级预警阈值
安全距离计算模型
四个车轮中的最小路面附着系数
AEB预警信号（目标纵向减速度）
车辆此时所处路面坡度
车辆逆纵向动力学计算模型
车辆目标制动力
液压制动力与再生制动力分配计算模块
此时车辆再生制动系统能提供的再生制动力
目标液压制动力
液压制动系统逆模型
再生制动系统
路面信息估计模型
各制动器轮缸目标液压力
路面信息估计所需车辆参数
ESC与Booster主动增压液压力分配模块
各制动器轮缸实际液压力
车速、车辆动力电机、蓄电池状态等信息
各车轮制动器轮缸
各车轮实际制动力矩
车 辆

图1

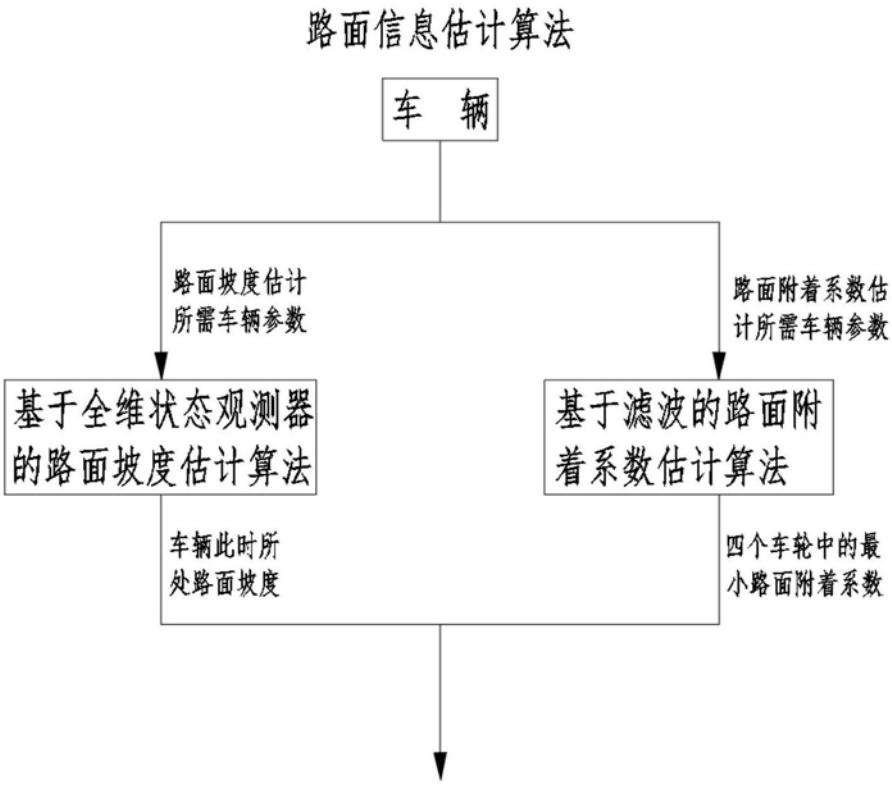

路面信息估计算法
车 辆
路面坡度估计所需车辆参数
路面附着系数估计所需车辆参数
基于全维状态观测器的路面坡度估计算法
基于滤波的路面附着系数估计算法
车辆此时所处路面坡度
四个车轮中的最小路面附着系数

图2

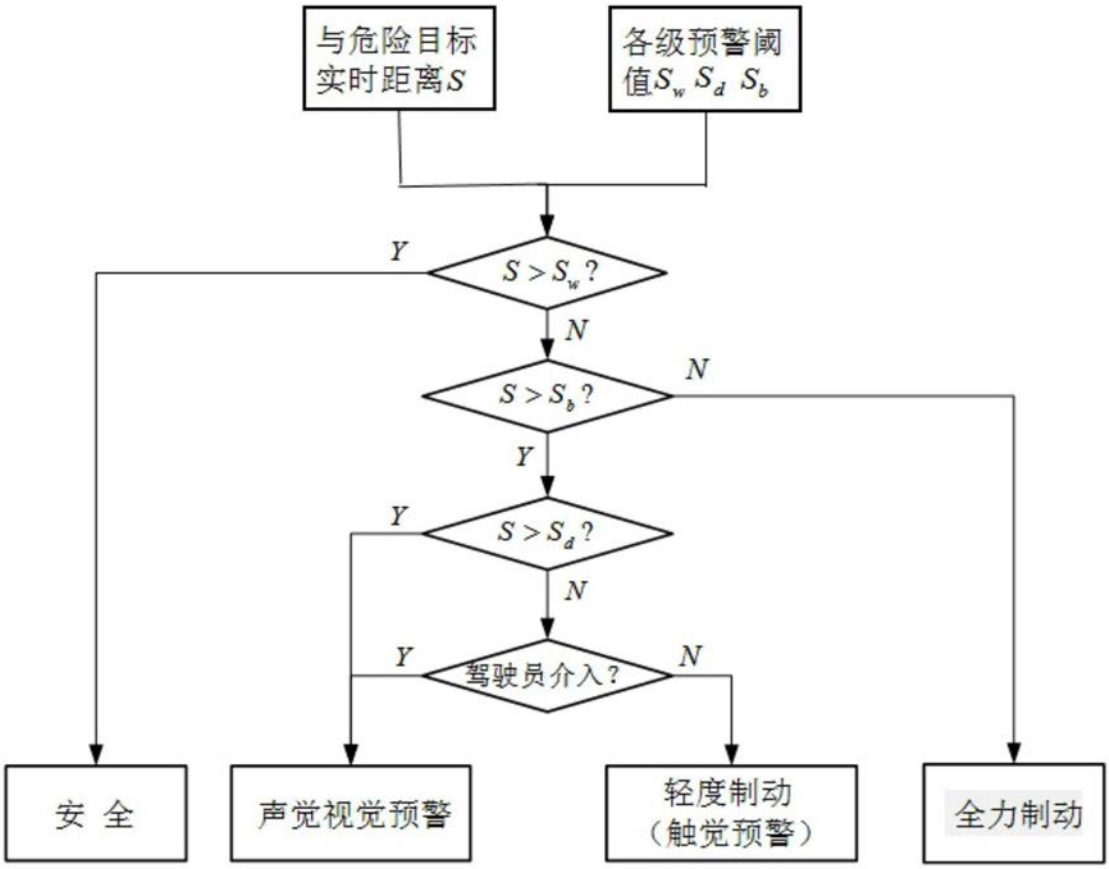

与危险目标
实时距离S
各级预警阈
值S_w S_d S_b
$S > S_w$?
Y
N
$S > S_b$?
N
Y
$S > S_d$?
Y
N
驾驶员介入?
Y
N
安 全
声觉视觉预警
轻度制动
（触觉预警）
全力制动

图3

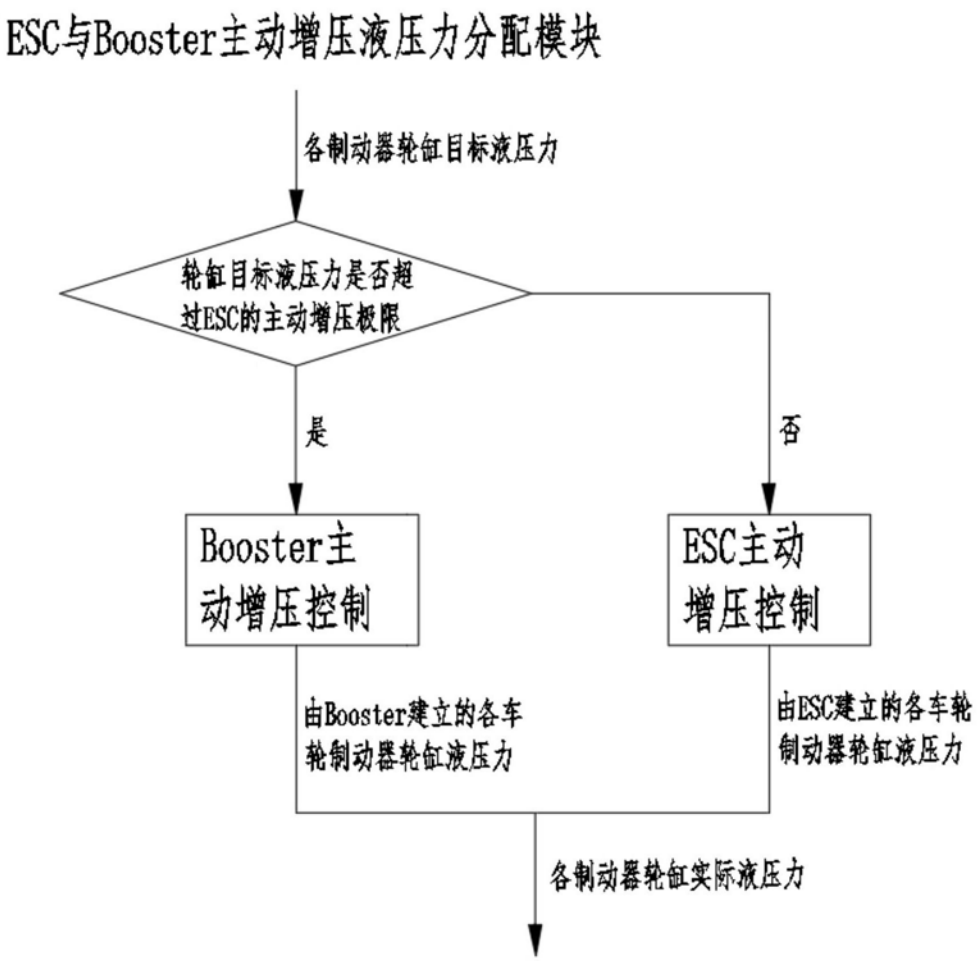

ESC与Booster主动增压液压力分配模块
各制动器轮缸目标液压力
轮缸目标液压力是否超过ESC的主动增压极限
是
否
Booster主动增压控制
ESC主动增压控制
由Booster建立的各车轮制动器轮缸液压力
由ESC建立的各车轮制动器轮缸液压力
各制动器轮缸实际液压力

图4

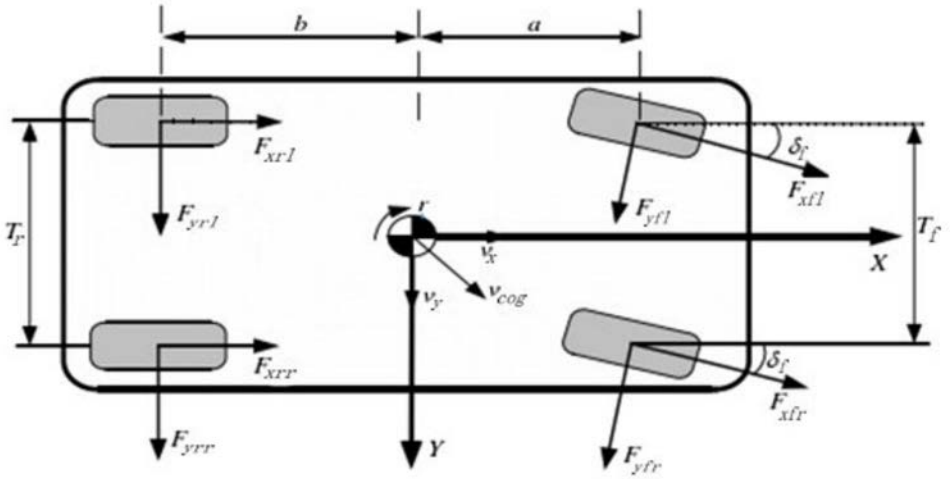

b
a
F_{xrl}
F_{yrl}
F_{xfl}
F_{yfl}
δ_f
T_r
T_f
r
v_x
v_y
v_{cog}
X
Y
F_{xrr}
F_{yrr}
F_{xfr}
F_{yfr}

图5

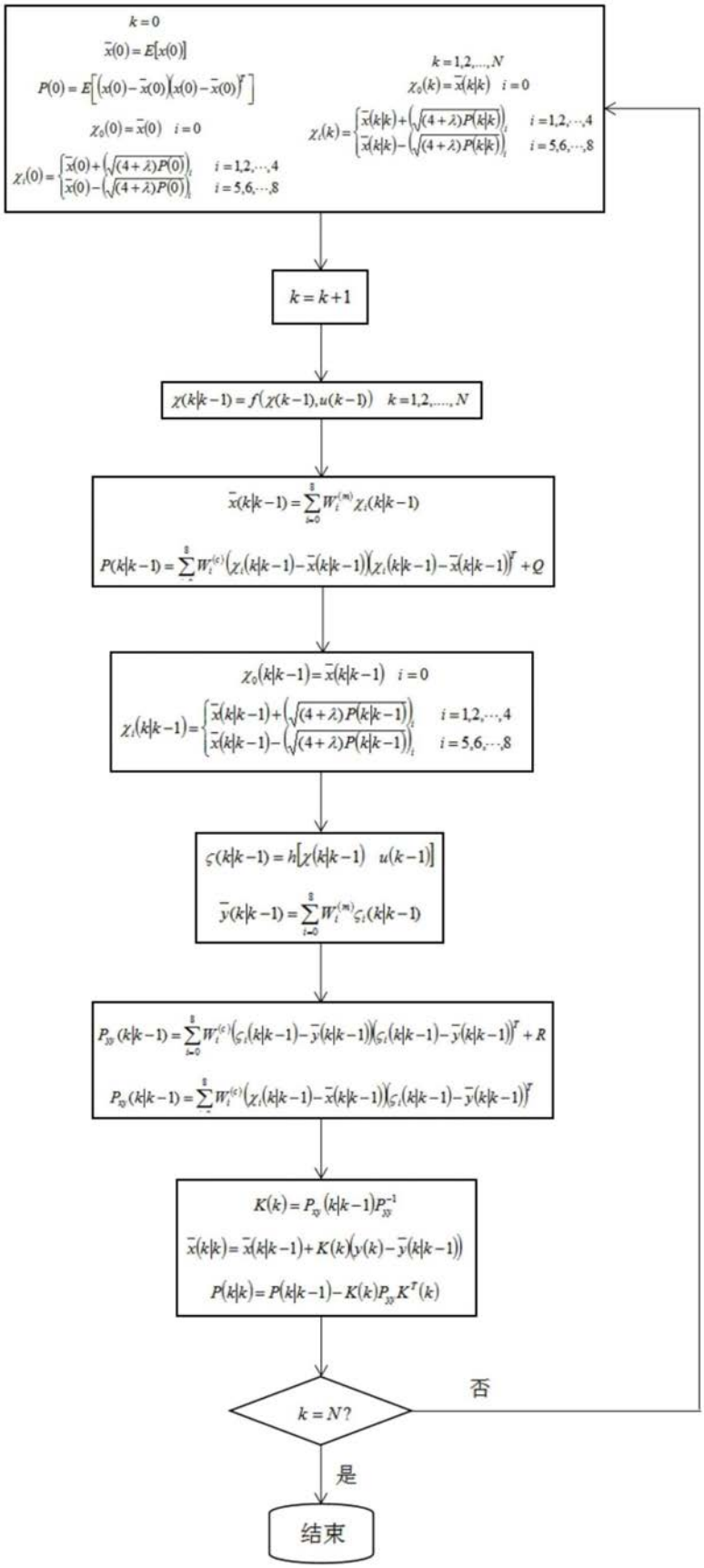

$k=0$
$\bar{x}(0)=E[x(0)]$
$P(0)=E\left[(x(0)-\bar{x}(0))(x(0)-\bar{x}(0))^T\right]$
$\chi_0(0)=\bar{x}(0) \quad i=0$
$\chi_i(0)=\begin{cases}\bar{x}(0)+\left(\sqrt{(4+\lambda)P(0)}\right)_i & i=1,2,\cdots,4\\ \bar{x}(0)-\left(\sqrt{(4+\lambda)P(0)}\right)_i & i=5,6,\cdots,8\end{cases}$
$k=1,2,\ldots,N$
$\chi_0(k)=\bar{x}(k|k) \quad i=0$
$\chi_i(k)=\begin{cases}\bar{x}(k|k)+\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k)}\right)_i & i=1,2,\cdots,4\\ \bar{x}(k|k)-\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k)}\right)_i & i=5,6,\cdots,8\end{cases}$
$k=k+1$
$\chi(k|k-1)=f(\chi(k-1),u(k-1)) \quad k=1,2,\ldots,N$
$\bar{x}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(m)}\chi_i(k|k-1)$
$P(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(c)}(\chi_i(k|k-1)-\bar{x}(k|k-1))(\chi_i(k|k-1)-\bar{x}(k|k-1))^T+Q$
$\chi_0(k|k-1)=\bar{x}(k|k-1) \quad i=0$
$\chi_i(k|k-1)=\begin{cases}\bar{x}(k|k-1)+\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k-1)}\right)_i & i=1,2,\cdots,4\\ \bar{x}(k|k-1)-\left(\sqrt{(4+\lambda)P(k|k-1)}\right)_i & i=5,6,\cdots,8\end{cases}$
$\zeta(k|k-1)=h[\chi(k|k-1) \quad u(k-1)]$
$\bar{y}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(m)}\zeta_i(k|k-1)$
$P_{yy}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(c)}(\zeta_i(k|k-1)-\bar{y}(k|k-1))(\zeta_i(k|k-1)-\bar{y}(k|k-1))^T+R$
$P_{xy}(k|k-1)=\sum_{i=0}^{8}W_i^{(c)}(\chi_i(k|k-1)-\bar{x}(k|k-1))(\zeta_i(k|k-1)-\bar{y}(k|k-1))^T$
$K(k)=P_{xy}(k|k-1)P_{yy}^{-1}$
$\bar{x}(k|k)=\bar{x}(k|k-1)+K(k)(y(k)-\bar{y}(k|k-1))$
$P(k|k)=P(k|k-1)-K(k)P_{yy}K^T(k)$
$k=N?$
否
是
结束

图6

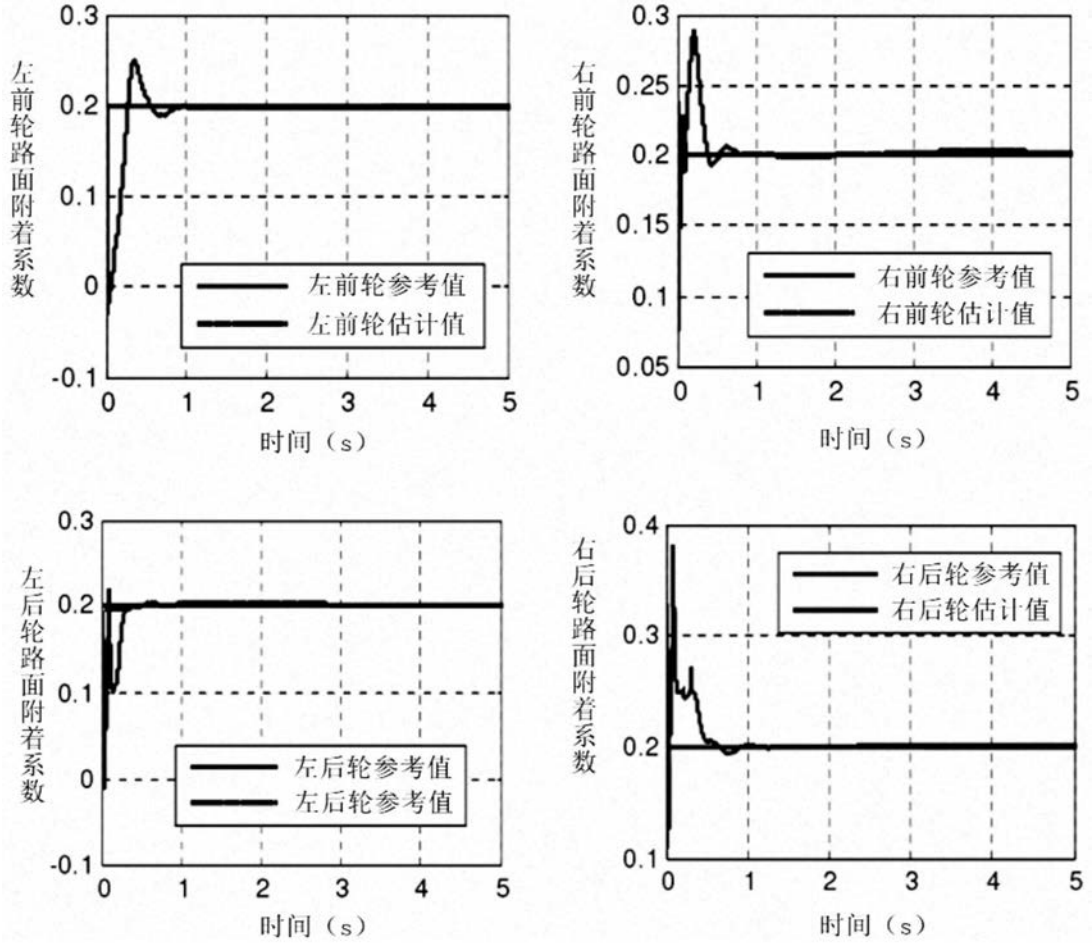

左前轮路面附着系数
左前轮参考值
左前轮估计值
时间（s）
右前轮路面附着系数
右前轮参考值
右前轮估计值
时间（s）
左后轮路面附着系数
左后轮参考值
左后轮参考值
时间（s）
右后轮路面附着系数
右后轮参考值
右后轮估计值
时间（s）

图7

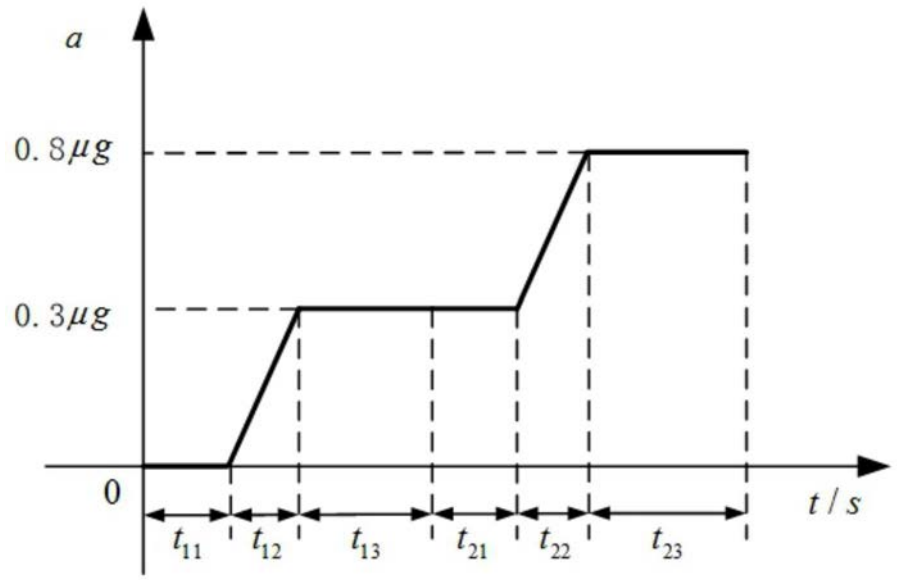

a
0.8μg
0.3μg
0
t / s
t11
t12
t13
t21
t22
t23

图8

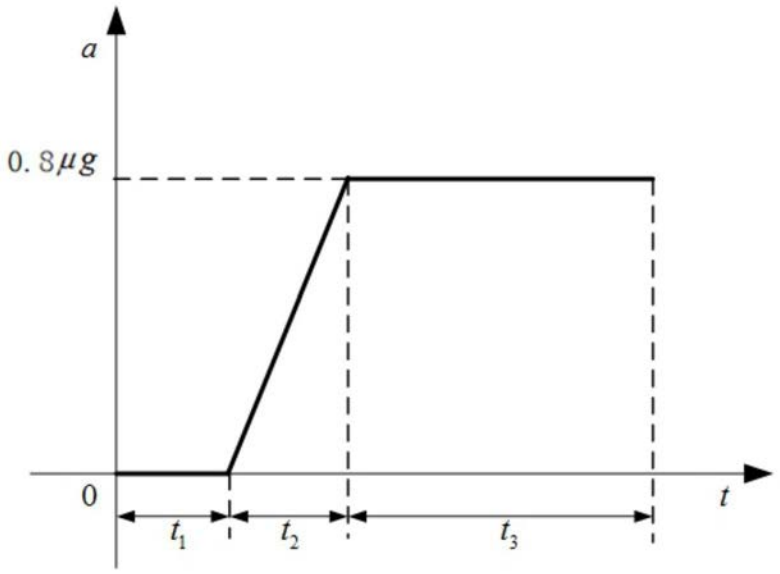

a
0.8μg
0
t
t1
t2
t3

图9

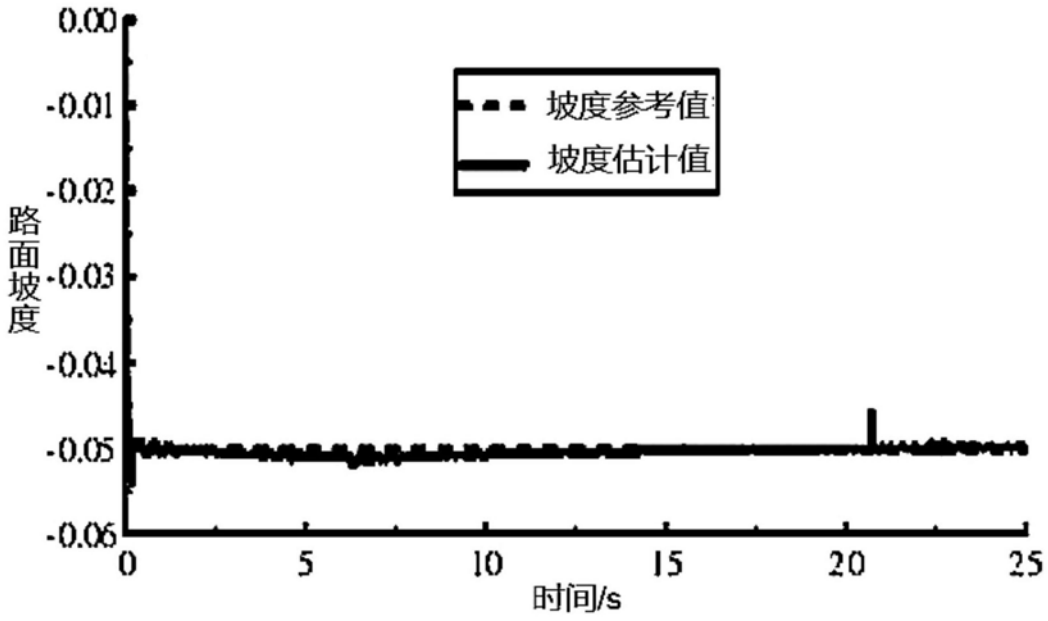

0.00
-0.01
-0.02
-0.03
-0.04
-0.05
-0.06
路面坡度
0
5
10
15
20
25
时间/s
坡度参考值
坡度估计值

图10