



(21) 申请号 201911367342.6

(22) 申请日 2019.12.26

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 111123706 A

(43) 申请公布日 2020.05.08

(73) 专利权人 湖南工业大学

地址 412000 湖南省株洲市天元区泰山西路88号

(72) 发明人 何静 刘志天 张昌凡 刘建华

毛颂安 徐艳 谌雪媛

(74) 专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限公司

公司 44102

专利代理师 杨千寻 冯振宁

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109109601 A, 2019.01.01

CN 110281727 A, 2019.09.27

CN 107544243 A, 2018.01.05

CN 110597063 A, 2019.12.20

CN 109739250 A, 2019.05.10

孙向宇 等. 基于加幂积分方法的制导控制一体化设计.《控制与决策》.2018, 第33卷(第2期), 第242-248页.

审查员 唐捷

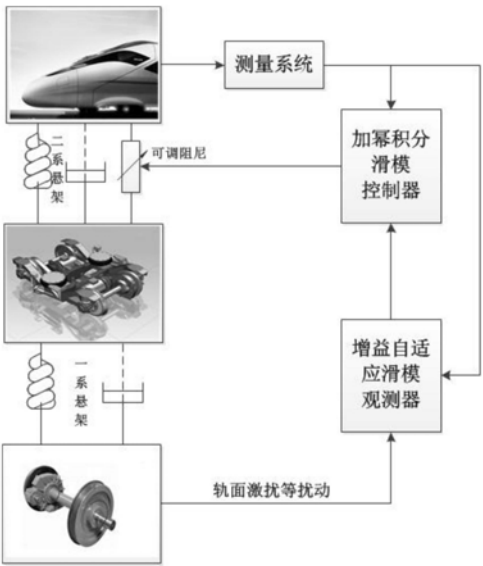
权利要求书3页 说明书14页 附图2页

(54) 发明名称

高速列车半主动悬挂系统控制方法

(57) 摘要

本发明属于列车控制技术领域,公开一种高速列车半主动悬挂系统控制方法,包括如下步骤:S1.根据基于欧拉-拉格朗日非线性动力学模型,建立高速列车十七自由度的状态方程;S2.为了对列车高速运行中所受扰动进行实时观测,设计适用于非线性动力学结构的滑模增益自适应观测器;S3.将滑模变结构控制算法与加幂积分控制算法结合,设计高速列车悬架控制器。本发明提出的基于加幂积分滑模变结构的高速列车悬架控制算法,解决了现实工程中扰动上界未知的现象,有效的克服了非线性复杂系统中强耦合问题,加幂积分算法使系统具有快速动态响应,滑模变结构控制算法具有鲁棒性强,可靠性高等特点,很好的实现了高速列车快速安全稳定运行的要求。



1. 一种高速列车半主动悬挂系统控制方法,其特征在于,采用加幂积分滑模控制算法,包括以下步骤:

S1:基于欧拉-拉格朗日非线性动力学模型,建立高速列车多自由度的状态方程;

步骤S1包括以下步骤:

S11:根据非线性动力学对半主动悬挂系统的运动状态进行分析,建立高速列车十七自由度动力学数学模型,包括轮对的横移和摇头运动方程、转向架的横移和侧滚及摇头方程、车体的横移和侧滚及摇头运动方程;

S12:将十七自由度动力学数学模型等效为传统非线性随机动力学的数学模型,得到高速列车十七自由度的模型变换方程;

S13:引入列车运行环境中多种复杂车况和/或路况时变下的外部干扰,建立精确的高速列车十七自由度模型,得出整个系统不确定性外部干扰的表达式;

步骤S11确定的十七自由度高速列车数学模型如下:

S111:轮对横移运动方程:

$$\begin{aligned} & (M_w + \Delta M_w) \ddot{y}_{wi} + 2\{C_{py} [\dot{y}_{wi} - \dot{y}_{tj} + H_{rw} \dot{\phi}_{tj} + (-1)^i l_t \dot{\psi}_{tj}] \\ & + K_{py} [y_{wi} - y_{tj} + H_{rw} \phi_{tj} + (-1)^i l_t \psi_{tj}] \} + 2f_{22} \left(\frac{\ddot{y}_{wi}}{V} - \dot{\psi}_{wi} \right) + K_{gy} y_{wi} - K_{gy} (x_y + r_0 x_\theta) = 0 \end{aligned}$$

S112:轮对摇头运动方程:

$$\begin{aligned} & J_{wz} \ddot{\psi}_{wi} + 2d^2 [C_{px} (\dot{\psi}_{wi} - \dot{\psi}_{tj}) + K_{px} (\psi_{wi} - \psi_{tj})] \\ & + 2f_{11} \left(\frac{\lambda_e b}{r_0} y_{wj} + \frac{b^2}{V} \dot{\psi}_{wj} \right) - K_{gy} \psi_{wj} - 2f_{11} \frac{\lambda_e b}{r_0} (x_y + r_0 x_\theta) = 0 \end{aligned}$$

S113:转向架横移运动方程:

$$\begin{aligned} & M_t \ddot{y}_{ti} - 2\{[K_{py} (y_{w(2i-1)} - y_{ti} + H_{tw} \phi_{ti} - l_t \psi_{ti}) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i-1)} - \dot{y}_{ti} + H_{tw} \dot{\phi}_{ti} - l_t \dot{\psi}_{ti})] + \\ & [K_{py} (y_{w(2i)} - y_{ti} + H_{tw} \phi_{ti} + l_t \psi_{ti}) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i)} - \dot{y}_{ti} + H_{tw} \dot{\phi}_{ti} + l_t \dot{\psi}_{ti})]\} + \\ & 2\{(K_{sy} + \Delta K_{sy}) [y_{ti} - y_c + H_{Bt} \phi_{ti} + H_{cB} \phi_c + (-1)^i l_c \psi_c] + f_{syrlc}\} = 0 \end{aligned}$$

S114:转向架侧滚运动方程:

$$\begin{aligned} & J_{tx} \ddot{\phi}_{ti} + 2H_{rw} \{[K_{py} (y_{w(2i-1)} - y_{ti} + H_{rw} \phi_{ti} - l_t \psi_{ti}) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i-1)} - \dot{y}_{ti} + H_{rw} \dot{\phi}_{ti} - l_t \dot{\psi}_{ti})] \\ & + [K_{py} (y_{w(2i)} - y_{ti} + H_{rw} \phi_{ti} + l_t \psi_{ti}) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i)} - \dot{y}_{ti} + H_{rw} \dot{\phi}_{ti} + l_t \dot{\psi}_{ti})]\} + 2H_{Bt} \\ & \{(K_{sy} + \Delta K_{sy}) [y_{ti} - y_c + H_{Bt} \phi_{ti} + H_{cB} \phi_c + (-1)^i l_c \psi_c] + f_{syrlc}\} + 4d_w^2 (K_{pz} \phi_{ti} + \\ & C_{py} \dot{\phi}_{ti}) + 2d_z^2 [(K_{sz} + \Delta K_{sz}) (\phi_{ti} - \phi_c) + C_{sz} (\dot{\phi}_{ti} - \dot{\phi}_c)] - K_{\phi z} (\phi_c - \phi_{ti}) = 0 \end{aligned}$$

S115:转向架摇头运动方程:

$$\begin{aligned} & J_{tz} \ddot{\psi}_{ti} - 2l_t \{[K_{py} (y_{w(2i-1)} - y_{ti} + H_{rw} \phi_{ti} - l_t \psi_{ti}) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i-1)} - \dot{y}_{ti} + H_{rw} \dot{\phi}_{ti} - l_t \dot{\psi}_{ti})] - \\ & [K_{py} (y_{w(2i)} - y_{ti} + H_{rw} \phi_{ti} + l_t \psi_{ti}) + f_{pyw2ti}]\} + 2d_w^2 [K_{px} (\psi_{ti} - \psi_{w(2i-1)}) + C_{px} \\ & (\dot{\psi}_{ti} - \dot{\psi}_{w(2i-1)}) + K_{px} (\psi_{ti} - \psi_{w(2i)}) + C_{px} (\dot{\psi}_{ti} - \dot{\psi}_{w(2i)})] - d_z^2 (\psi_c - \psi_{ti}) = 0 \end{aligned}$$

S116:车体横移运动方程:

$$M_c \ddot{y}_c - 2\{[(K_{sy} + \Delta K_{sy})(y_{t1} - y_c + H_{Bt} \phi_{t1} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sy1c}] + [(K_{sy} + \Delta K_{sy})(y_{t2} - y_c + H_{Bt} \phi_{t2} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sy2c}]\} = 0$$

S117:车体侧滚运动方程:

$$J_{cx} \ddot{\phi}_c - 2H_{cB} \{[(K_{sy} + \Delta K_{sy})(y_{t1} - y_c + H_{Bt} \phi_{t1} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sy1c}] - [(K_{sy} + \Delta K_{sy})(y_{t2} - y_c + H_{Bt} \phi_{t2} + H_{cB} \phi_c + l_c \psi_c) + f_{sy2c}]\} - 2d_s^2 [(K_{sz} + \Delta K_{sz})(\phi_{t1} - \phi_c) + C_{sz}(\dot{\phi}_{t1} - \dot{\phi}_c) + (K_{sz} + \Delta K_{sz})(\phi_{t2} - \phi_c) + C_{sz}(\dot{\phi}_{t2} - \dot{\phi}_c)] + (K_{\phi z} + \Delta K_{\phi z})[(\phi_c - \phi_{t1}) + (\phi_c - \phi_{t2})] = 0$$

S118:车体摇头运动方程:

$$J_{cz} \ddot{\psi}_c - 2l_c \{[(K_{sy} + \Delta K_{sy})(y_{t1} - y_c + H_{Bt} \phi_{t1} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sy1c}] - [(K_{sy} + \Delta K_{sy})(y_{t2} - y_c + H_{Bt} \phi_{t2} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sy2c}]\} + 2d_s^2 [(K_{sx} + \Delta K_{sx})(\psi_c - \psi_{t1}) + C_{sx}(\dot{\psi}_c - \dot{\psi}_{t1}) + (K_{sx} + \Delta K_{sx})(\psi_c - \psi_{t2}) + C_{sx}(\dot{\psi}_c - \dot{\psi}_{t2})] = 0$$

S12确定的模型变换方程如下:

$$[M_0 + \Delta M]\{\ddot{y}\} + [C_0 + \Delta C]\{\dot{y}\} + [K_0 + \Delta K]\{y\} = u + [D],$$

S13确定的系统综合不确定性外部干扰如下:

$$D = -[\Delta M]\{\ddot{y}\} - [\Delta C]\{\dot{y}\} - [\Delta K]\{y\} + [d],$$

S2:设计适用于非线性动力学结构的滑模增益自适应观测器对列车高速运行中所受扰动进行实时观测;

步骤S2包括以下步骤:

S21:根据高速列车的轮对、转向架及车体各自由度传感器的测量值及设定参考值之间的误差,构造外部干扰项的观测滑模面;

S22:根据高速列车十七自由度的模型变换方程构造干扰项的滑模变结构观测器;

步骤S21的观测滑模面具体构造过程如下:

S211:定义测量值及设计参考值的误差信息:

$$e = y - \hat{y}$$

S212:设计观测器的滑模面方程:

$$s_a = c_1 \int e + c_2 e + \dot{e}$$

S22中的滑模变结构观测器的具体设计过程如下:

S221:设计滑模变结构观测器:

$$M_0 \ddot{\hat{y}} + C_0 \dot{\hat{y}} + K_0 \hat{y} = u + \hat{D} + v$$

S222:观测器中 $\hat{D}$ 的估计值为:

$$\begin{cases} \hat{D} = \xi + \lambda_2 M_0 \dot{y} \\ \dot{\xi} = \lambda_2 (C_0 \dot{y} + K_0 y - u - \hat{d}) \end{cases};$$

S3:将滑模变结构控制算法与加幂积分控制算法结合,设计高速列车半主动悬挂控制器;

步骤S3包括以下步骤:

S31:定义高速列车十七自由度的模型变换方程的中间变量,将其转换成空间状态方程;

S32:选取合适的积分滑模面,构建加幂积分滑模控制器;

步骤S31的空间状态方程转换过程如下:

S311:定义列车数学模型的状态变量

设半主动悬架系统的理想轨迹位置为 y_d ,实际位置矢量为 y ,则状态变量为:

$$x_1 = [x_{1,1}, \dots, x_{1,n}]^T = y_d - y$$

$$x_2 = [x_{2,1}, \dots, x_{2,n}]^T = \dot{y}_d - \dot{y}$$

S312:建立列车模型变换方程的空间状态方程:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -M_0^{-1}u - M_0^{-1}D + M_0^{-1}C_0(\dot{y}_d - x_2) + M_0^{-1}K_0 y + \ddot{y}_d$$

定义 $\xi = x_2^r - x_2^{*r}$,其中 $x_2^* = -k_1 x_1^{1/r}$ 是一个设定的虚拟控制器,其中 $1 < r = r_1/2 < 2$, r_1 与 r_2 均是正整数;

S32所述的控制器设计如下:

S321:选择积分滑模面为:

$$s = k_1^r x_1 + x_2^r$$

S322:设计加幂积分滑模控制器:

$$u = \left((2 - 1/r) 2^{1-1/r} k_1^{1+r} k_2 M_0 (x_2^r + k_1^r x_1)^{2/r-1} + C_0(\dot{y}_d - x_2) + K_0 y + M_0 \ddot{y}_d - \hat{D} \right) \text{sgn}(s)$$

式中 $k_1 > 0$, $k_2 > \frac{2^{1-1/r} \left[\frac{k_1(1+r)}{2^{3-1/r}} \right]^{-r}}{1+r} + \frac{1}{k_1} + \frac{r}{1+r} \left[\frac{k_1(1+r)}{4} \right]^{-1/r}$, $\text{sgn}(s)$ 为符号函数;

采用 $\frac{s}{\delta+|s|}$ 替代函数 $\text{sgn}(s)$,式中 δ 为趋于零的正常数。

高速列车半主动悬挂系统控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及涉及轨道交通运行控制领域,具体是一种高速列车半主动悬挂系统控制方法。

背景技术

[0002] 随着国家的轨道交通发展,中国高速列车已经成为了中国的名片,承载着中国科技走出去的重要信念,中国高铁以平稳性好著称,其优良的平稳性离不开高性能的悬挂控制系统,高速列车运行过程中的悬挂系统是一种多自由度动力学系统,属于一种多变量,非线性和强耦合的复杂模型。

[0003] 针对实际工程应用中扰动上界未知问题,如何设计较好的观测器,针对提升列车运行的抗干扰能力,如何设计较好的控制器,均是高速列车运行悬挂系统控制技术在现实生产应用中的关键,它直接影响列车运行控制的可靠性及乘客乘坐的舒适性。以上高速列车运行过程中存在的复杂轨道激励工况,需要解决的关键问题是,如何设计观测器能快速精确的观测非线性随机振动系统中的扰动,如何设计控制算法快速有效的抑制列车运行中的扰动,保证高速列车安全稳定的运行,这些均是高速列车设计亟需要解决的技术问题。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种基于加幂积分滑模的高速列车控制方法,以解决现实工程中高速列车运行过程中所受轨道激励上界未知的问题,使高速列车快速安全稳定的运行。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0006] 一种高速列车半主动悬挂系统控制方法,包括以下步骤:

[0007] S1:基于欧拉-拉格朗日非线性动力学模型,建立高速列车多自由度的状态方程;

[0008] S2:设计适用于非线性动力学结构的滑模增益自适应观测器对列车高速运行中所受扰动进行实时观测;

[0009] S3:将滑模变结构控制算法与加幂积分控制算法结合,设计高速列车半主动悬挂控制器。

[0010] 步骤S3:将滑模变结构控制算法与加幂积分控制算法结合,设计高速列车悬架控制器。

[0011] 进一步地,S1所述的高速列车多自由度状态方程,为十七自由度状态方程,具体包括如下过程:

[0012] S11:根据非线性动力学对半主动悬挂系统的运动状态进行分析,建立高速列车十七自由度动力学数学模型,包括轮对的横移和摇头运动方程、转向架的横移和侧滚及摇头方程、车体的横移和侧滚及摇头运动方程;

[0013] S12:将十七自由度动力学数学模型等效为传统非线性随机动力学的数学模型,得到高速列车十七自由度的模型变换方程;

[0014] S13:引入列车运行环境中多种复杂车况和/或路况时变下的外部干扰,建立精确的高速列车十七自由度模型,得出整个系统不确定性外部干扰的表达式。

[0015] 其中,S11中的高速列车十七自由度动力学数学模型包括:

[0016] S111:轮对横移运动方程

$$[0017] \quad (M_w + \Delta M_w) \ddot{y}_{wi} + 2\{C_{py} [\dot{y}_{wi} - \dot{y}_{ij} + H_{tw} \dot{\phi}_{ij} + (-1)^i l_t \dot{\psi}_{ij}] + K_{py} [y_{wi} - y_{ij} + H_{tw} \phi_{ij} + (-1)^i l_t \psi_{ij}]\} + 2f_{22} \left(\frac{\ddot{y}_{wi}}{V} - \dot{\psi}_{wi} \right) + K_{gy} y_{wi} - K_{gy} (x_y + r_0 x_\theta) = 0$$

[0018] S112:轮对摇头运动方程

$$[0019] \quad J_{wz} \ddot{\psi}_{wi} + 2d_w^2 [C_{px} (\dot{\psi}_{wi} - \dot{\psi}_{il}) + K_{px} (\psi_{wi} - \psi_{il})] + 2f_{11} \left(\frac{\lambda_e b}{r_0} y_{wj} + \frac{b^2}{V} \dot{\psi}_{wj} \right) - K_{g\psi} \psi_{wj} - 2f_{11} \frac{\lambda_e b}{r_0} (x_y + r_0 x_\theta) = 0$$

[0020] S113:转向架横移运动方程

$$[0021] \quad M_t \ddot{y}_{ti} - 2\{[K_{py} (y_{w(2i-1)} - y_{ti} + H_{tw} \phi_{ti} - l_t \psi_{ti}) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i-1)} - \dot{y}_{ti} + H_{tw} \dot{\phi}_{ti} - l_t \dot{\psi}_{ti})] + [K_{py} (y_{w(2i)} - y_{ti} + H_{tw} \phi_{ti} + l_t \psi_{ti}) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i)} - \dot{y}_{ti} + H_{tw} \dot{\phi}_{ti} + l_t \dot{\psi}_{ti})]\} + 2\{[K_{sy} + \Delta K_{sy}] [y_{ti} - y_c + H_{Bt} \phi_{ti} + H_{cB} \phi_c + (-1)^i l_c \psi_c] + f_{sytlc}\} = 0$$

[0022] S114:转向架侧滚运动方程

$$[0023] \quad J_{tx} \ddot{\phi}_{ti} + 2H_{tw} \{[K_{py} (y_{w(2i-1)} - y_{ti} + H_{tw} \phi_{ti} - l_t \psi_{ti}) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i-1)} - \dot{y}_{ti} + H_{tw} \dot{\phi}_{ti} - l_t \dot{\psi}_{ti})] + [K_{py} (y_{w(2i)} - y_{ti} + H_{tw} \phi_{ti} + l_t \psi_{ti}) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i)} - \dot{y}_{ti} + H_{tw} \dot{\phi}_{ti} + l_t \dot{\psi}_{ti})]\} + 2H_{Bt} \{[K_{sy} + \Delta K_{sy}] [y_{ti} - y_c + H_{Bt} \phi_{ti} + H_{cB} \phi_c + (-1)^i l_c \psi_c] + f_{sytlc}\} + 4d_w^2 (K_{pz} \phi_{ti} + C_{py} \dot{\phi}_{ti}) + 2d_s^2 [(K_{sz} + \Delta K_{sz}) (\phi_{ti} - \phi_c) + C_{sz} (\dot{\phi}_{ti} - \dot{\phi}_c)] - K_{\phi z} (\phi_c - \phi_{ti}) = 0$$

[0024] S115:转向架摇头运动方程

$$[0025] \quad J_{tz} \ddot{\psi}_{ti} - 2l_t \{[K_{py} (y_{w(2i-1)} - y_{ti} + H_{tw} \phi_{ti} - l_t \psi_{ti}) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i-1)} - \dot{y}_{ti} + H_{tw} \dot{\phi}_{ti} - l_t \dot{\psi}_{ti})] - [K_{py} (y_{w(2i)} - y_{ti} + H_{tw} \phi_{ti} + l_t \psi_{ti}) + f_{pyw2ti}]\} + 2d_w^2 [K_{px} (\psi_{ti} - \psi_{w(2i-1)}) + C_{px} (\dot{\psi}_{ti} - \dot{\psi}_{w(2i-1)}) + K_{px} (\psi_{ti} - \psi_{w(2i)}) + C_{px} (\dot{\psi}_{ti} - \dot{\psi}_{w(2i)})] - d_s^2 (\psi_c - \psi_{ti}) = 0$$

[0026] S116:车体横移运动方程

$$[0027] \quad M_c \ddot{y}_c - 2\{[(K_{sy} + \Delta K_{sy}) (y_{t1} - y_c + H_{Bt} \phi_{t1} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sytlc}] + [(K_{sy} + \Delta K_{sy}) (y_{t2} - y_c + H_{Bt} \phi_{t2} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sytlc}]\} = 0$$

[0028] S117:车体侧滚运动方程

$$\begin{aligned}
& J_{\alpha} \ddot{\phi}_c - 2H_{\alpha B} \{[(K_{sy} + \Delta K_{sy})(y_{t1} - y_c + H_{Bt} \phi_{t1} + H_{\alpha B} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{\alpha t1c}] - \\
& [(K_{sy} + \Delta K_{sy})(y_{t2} - y_c + H_{Bt} \phi_{t2} + H_{\alpha B} \phi_c + l_c \psi_c) + f_{\alpha t2c}]\} - 2d_s^2 \\
& [(K_{sz} + \Delta K_{sz})(\phi_{t1} - \phi_c) + C_{sz}(\dot{\phi}_{t1} - \dot{\phi}_c) + (K_{sz} + \Delta K_{sz})(\phi_{t2} - \phi_c) + \\
& C_{sz}(\dot{\phi}_{t2} - \dot{\phi}_c)] + (K_{\phi z} + \Delta K_{\phi z})[(\phi_c - \phi_{t1}) + (\phi_c - \phi_{t2})] = 0
\end{aligned}$$

[0030] S118:车体摇头运动方程

$$\begin{aligned}
& J_{\alpha} \ddot{\psi}_c - 2I_{\alpha} \{[(K_{sy} + \Delta K_{sy})(y_{t1} - y_c + H_{Bt} \phi_{t1} + H_{\alpha B} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{\alpha t1c}] - \\
& [(K_{sy} + \Delta K_{sy})(y_{t2} - y_c + H_{Bt} \phi_{t2} + H_{\alpha B} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{\alpha t2c}]\} + 2d_s^2[(K_{sx} + \Delta K_{sx}) \\
& (\psi_c - \psi_{t1}) + C_{sx}(\dot{\psi}_c - \dot{\psi}_{t1}) + (K_{sx} + \Delta K_{sx})(\psi_c - \psi_{t2}) + C_{sx}(\dot{\psi}_c - \dot{\psi}_{t2})] = 0
\end{aligned}$$

[0032] 更进一步地,得到外部广义干扰力项,其中 $m=1\sim 4$, $n=5\sim 8$ 。

$$D(l_m) = 2f_{22}(\frac{\ddot{y}_{wm}}{V} - \psi_{wm}) + K_{gy} y_{wm} - K_{gy}(x_y + r_0 x_{\theta})$$

$$D(l_n) = 2f_{11}(\frac{\lambda_e b}{r_0} y_{wn} - \frac{b^2}{V} \dot{\psi}_{wn}) + K_{g\psi} \psi_{wn} - 2f_{11} \frac{\lambda_e b}{r_0} (x_y + r_0 x_{\theta})$$

[0035] 更进一步地,S12确定的模型变换方程如下:

$$[M_0 + \Delta M]\{\ddot{y}\} + [C_0 + \Delta C]\{\dot{y}\} + [K_0 + \Delta K]\{y\} = u + [D]$$

[0037] 更进一步地,定义D表示列车运行环境中其他复杂时变下的外部干扰,得到更为精确的高速列车多自由度模型。将模型变换方程进一步转化,则有:

$$M_0 \ddot{y} + C_0 \dot{y} + K_0 y = u + D$$

[0039] 更进一步地,S13确定的系统综合不确定性外部干扰如下:

$$D = -[\Delta M]\{\ddot{y}\} - [\Delta C]\{\dot{y}\} - [\Delta K]\{y\} + [d]$$

[0041] 式中 $[M_0]$, $[C_0]$, $[K_0]$:依次为整车系统惯量矩阵、阻尼矩阵和时刚度矩阵,均为 17×17 阶方阵; ΔM 代表由于乘客人数变化等造成质量系数的改变, ΔC 代表列车长时间运行后造成阻尼系数的改变, ΔK 代表列车长时间运行后弹簧系数的改变; u : 17×17 阶的控制器输出量; $[D]$:包括轨道不平顺在内的扰动变量。 $y = [y_{w1}, y_{w2}, y_{w3}, y_{w4}, \psi_{w1}, \psi_{w2}, \psi_{w3}, \psi_{w4}, y_{t1}, y_{t2}, \phi_{t1}, \phi_{t2}, \psi_{t1}, \psi_{t2}, y_c, \phi_c, \psi_c]^T$;

[0042] 进一步地,S2所述的滑模增益自适应观测器的具体设计过程包括如下过程:

[0043] S21:根据高速列车的轮对、转向架及车体各自由度传感器的测量值及设定参考值之间的误差,构造外部干扰项的观测滑模面;

[0044] S22:根据高速列车十七自由度的模型变换方程构造干扰项的滑模变结构观测器;

[0045] 更进一步地,S21所述的具体过程如下:

[0046] S211:定义测量值及设计参考值的误差信息

$$e = y - \hat{y}$$

[0048] S212:设计观测器的滑模面方程

$$[0049] \quad s_a = c_1 \int e + c_2 e + \dot{e}$$

[0050] 再进一步地,S22中的滑模变结构观测器的具体设计过程如下:

[0051] S221:设计滑模变结构观测器

$$[0052] \quad M_0 \ddot{\hat{y}} + C_0 \dot{\hat{y}} + K_0 \hat{y} = u + \hat{D} + v$$

[0053] S222:观测器中 $\hat{D}$ 的估计值为

$$[0054] \quad \begin{cases} \hat{D} = \xi + \lambda_2 M_0 \dot{y} \\ \dot{\xi} = \lambda_2 (C_0 \dot{y} + K_0 y - u - \hat{d}) \end{cases}$$

[0055] 式中, $v = \lambda_1 \operatorname{sgn}(S_a)$ 滑模变量, 标量 λ_1 辅助系统的增益。高速列车运行中扰动不会出现突增性现象, 所以可得 $\|\dot{D}\| \leq \vartheta$, 且 ϑ 为一正常数, 将转化后的模型转换方程统减去滑模变结构观测器方程, 并代入可得:

$$[0056] \quad N \dot{s}_a = \tilde{D} - \lambda_1 \operatorname{sgn}(s_a)$$

[0057] 式中未知增益系数 $\lambda_1 = \tilde{D} + \gamma$, 其中 γ 是正的矩阵。

[0058] 优选地, 为保证S22设计的滑模变结构观测器可达, 并且能够趋于渐近稳定, 对S22设计的滑模变结构观测器进行证明, 具体证明过程如下:

[0059] S231:构建证明滑模观测器存在性及可达性的Lyapunov函数

$$[0060] \quad V_1 = s_a^T N s_a$$

[0061] S232:证明滑模观测器的存在性与可达性

$$[0062] \quad \begin{aligned} \dot{V}_1 &= 2 s_a^T N \dot{s}_a \\ &= 2 s_a^T (\tilde{D} - \lambda_1 \operatorname{sgn}(s_a)) \\ &\leq -2 (\lambda_1 - \|\tilde{D}\|) \|s_a\| \\ &\leq -2 \frac{\gamma}{\sqrt{\lambda_{\max}(N)}} V_1^{\frac{1}{2}} \\ &\leq 0 \end{aligned}$$

[0063] S233:构建证明观测器稳定性的Lyapunov函数

$$[0064] \quad V_2 = \tilde{D}^T P \tilde{D}$$

[0065] S234:证明观测器趋于逐渐稳定

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= \tilde{D}^T P \tilde{D} + \tilde{D}^T P \dot{\tilde{D}} \\
&\leq -2\lambda_2 \tilde{D}^T P \tilde{D} + \frac{1}{\mu} \tilde{D}^T P \tilde{D} + \mu \dot{\tilde{D}}^T P \tilde{D} \\
[0066] \quad &\leq \left(-2\lambda_2 + \frac{1}{\mu} \right) \tilde{D}^T P \tilde{D} + \mathcal{G}^2 \lambda_{\max}(\mu P) \\
&= -\left(2\lambda_2 - \frac{1}{\mu} \right) V_2 + \mathcal{G}^2 \lambda_{\max}(\mu P)
\end{aligned}$$

[0067] 进一步地, S3所述的高速列车半主动悬架控制器的具体设计过程如下所示:

[0068] S31: 定义高速列车十七自由度的模型变换方程的中间变量, 将其转换成空间状态方程;

[0069] S32: 选取合适的积分滑模面, 构建加幂积分滑模控制器;

[0070] 更进一步地, S31所述的空间状态方程建立过程如下所示:

[0071] S311: 定义列车数学模型的状态变量

[0072] 设半主动悬架系统的理想轨迹位置为 y_d , 实际位置矢量为 y , 则状态变量为

$$[0073] \quad x_1 = [x_{1,1}, \dots, x_{1,n}]^T = y_d - y$$

$$[0074] \quad x_2 = [x_{2,1}, \dots, x_{2,n}]^T = \dot{y}_d - \dot{y}$$

[0075] S312: 建立列车模型变换方程的空间状态方程

$$[0076] \quad \dot{x}_1 = x_2$$

$$[0077] \quad \dot{x}_2 = -M_0^{-1}u - M_0^{-1}D + M_0^{-1}C_0(\dot{y}_d - x_2) + M_0^{-1}K_0 y + \ddot{y}_d$$

[0078] 定义 $\xi = x_2^r - x_2^{*r}$, 其中 $x_2^* = -k_1 x_1^{1/r}$ 是一个设定的虚拟控制器, 其中

[0079] $1 < r = r_1/r_2 < 2$, r_1 与 r_2 均是正整数。

[0080] 再进一步地, S32所述的控制器设计具体如下:

[0081] S321: 选择积分滑模面为

$$[0082] \quad s = k_1^r x_1 + x_2^r$$

[0083] S322: 设计加幂积分滑模控制器

$$[0084] \quad u = \left(\begin{aligned} &(2 - 1/r) 2^{1-1/r} k_1^{1+r} k_2 M_0 (x_2^r + k_1^r x_1)^{2/r-1} \\ &+ C_0(\dot{y}_d - x_2) + K_0 y + M_0 \ddot{y}_d - \hat{D} \end{aligned} \right) \text{sgn}(s)$$

$$[0085] \quad \text{式中 } k_1 > 0, k_2 > \frac{2^{1-1/r} \left[\frac{k_1(1+r)}{2^{3-1/r}} \right]^{-r}}{1+r} + \frac{1}{k_1} + \frac{r}{1+r} \left[\frac{k_1(1+r)}{4} \right]^{-1/r}。$$

[0086] 更进一步地, 为保证S32设计的加幂积分滑模控制器可达, 并且能够趋于渐近稳定, 对S32设计的加幂积分滑模控制器进行证明, 具体证明过程如下:

[0087] S331: 构建Lyapunov方程:

[0088] $V = V_1 + V_2$

[0089] $V_1 = \frac{x_1^2}{2}$

[0090] $V_2 = \frac{\int_{x_2^*}^{x_2} (s^r - x_2^{*r})^{2-1/r} ds}{(2-1/r)2^{1-1/r} k_1^{1+r}}$

[0091] S332: 验证加幂积分控制器的稳定性

[0092] $\dot{V}_1 = x_1(x_2 - x_2^*) - k_1 x_1^{1+1/r}$
 $< 2^{1-1/r} |x_1| |\xi|^{1/r} - k_1 x_1^{1+1/r}$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -(2-1/r) \frac{\frac{\partial x_2^{*r}}{\partial x_1} \int_{x_2^*}^{x_2} (s^r - x_2^{*r})^{1-1/r} ds}{(2-1/r)2^{1-1/r} k_1^{1+r}} \dot{x}_1 + \frac{(x_2^r - x_2^{*r})^{2-1/r}}{(2-1/r)2^{1-1/r} k_1^{1+r}} \dot{x}_2 \\ &= \frac{\int_{x_2^*}^{x_2} (s^r - x_2^{*r})^{1-1/r} ds}{2^{1-1/r} k_1} \dot{x}_1 + \frac{(x_2^r - x_2^{*r})^{2-1/r}}{(2-1/r)2^{1-1/r} k_1^{1+r}} \left(-M_0^{-1}u - M_0^{-1}D + M_0^{-1}C_0 \right) \\ &\quad \left((\dot{y}_d - x_2) + M_0^{-1}K_0 y + \ddot{y}_d \right) \end{aligned}$$

[0093] $\leq \frac{|\xi|}{k_1} x_2 + \frac{\xi^{2-1/r}}{(2-1/r)2^{1-1/r} k_1^{1+r}} \left(-M_0^{-1}u - M_0^{-1}D + M_0^{-1}C_0 \right) \left((\dot{y}_d - x_2) + M_0^{-1}K_0 y + \ddot{y}_d \right)$
 $\leq \frac{|\xi|}{k_1} x_2 - k_2 \xi^{2-1/r} (x_2^r - k_1^r x_1^r)^{2-1/r} \text{sgn}(s)$
 $\leq \frac{k_1}{4} |x_1|^{1+1/r} + \left(\frac{1}{k_1} + \frac{r}{1+r} \left[\frac{k_1(1+r)}{4} \right]^{-1/r} - k_2 \right) |\xi|^{1+1/r}$

[0094] 结合上面的公式可得到:

[0095] $\dot{V} \leq -\frac{k_1}{2} |x_1|^{1+1/r} - (k_2 - \varphi) |\xi|^{1+1/r}$

[0096] 式中 $\varphi = \frac{2^{1-1/r} \left[\frac{k_1(1+r)}{2^{3-1/r}} \right]^{-r}}{1+r} + \frac{1}{k_1} + \frac{r}{1+r} \left[\frac{k_1(1+r)}{4} \right]^{-1/r}$ 。

[0097] 更进一步地, 采用 $\frac{s}{\delta+|s|}$ 代替函数 $\text{sgn}(s)$, 其中 δ 为趋于零的正常数。

[0098] 与现有技术相比, 本发明的有益效果是: 本发明提出的基于加幂积分滑模的高速列车控制方法, 有效的克服了复杂系统中扰动多变, 系统非线性和变量强耦合等问题, 使系统具有有限时间收敛的快速动态响应, 鲁棒性强, 可靠性高, 很好的实现了高速列车的安全

稳定运行要求,有利于高速列车运行控制的实际工程应用。

附图说明

[0099] 图1为实施例1中高速列车半主动悬挂系统控制方法的结构框图;

[0100] 图2为实施例2所述高速列车半主动悬挂系统控制方法中扰动实际值和增益自适应滑模扰动观测器观测值的对比仿真图;

[0101] 图3为实施例2所述高速列车半主动悬挂系统控制方法中高速列车运行过程中的车体横向位移仿真图。

具体实施方式

[0102] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0103] 实施例1

[0104] 请参阅图1,一种基于加幂积分滑模的高速列车半主动悬挂系统控制方法,包括以下步骤:

[0105] 第一步,根据欧拉-拉格朗日非线性动力学模型,目的是建立高速列车多自由度的状态方程。

[0106] 进一步,高速列车十七自由度动力学数学模型可表示为:

[0107] 式(1)为轮对横移运动:

$$(\mathbf{M}_w + \Delta \mathbf{M}_w) \ddot{\mathbf{y}}_{wi} + 2\{C_{py} [\dot{\mathbf{y}}_{wi} - \dot{\mathbf{y}}_{ij} + H_{tw} \dot{\phi}_{ij} + (-1)^i l_t \dot{\psi}_{ij}] + K_{py} [\mathbf{y}_{wi} - \mathbf{y}_{ij} + H_{tw} \phi_{ij} + (-1)^i l_t \psi_{ij}]\} + 2f_{22} \left(\frac{\ddot{\mathbf{y}}_{wi}}{V} - \dot{\psi}_{wi} \right) + K_{gy} \mathbf{y}_{wi} - K_{gy} (\mathbf{x}_y + r_0 \mathbf{x}_\theta) = 0 \quad (1)$$

[0109] 式(2)为轮对摇头运动:

$$J_{wz} \ddot{\psi}_{wi} + 2d_w^2 [C_{px} (\dot{\psi}_{wi} - \dot{\psi}_{t1}) + K_{px} (\psi_{wi} - \psi_{t1})] + 2f_{11} \left(\frac{\lambda_e b}{r_0} \mathbf{y}_{wj} + \frac{b^2}{V} \dot{\psi}_{wj} \right) - K_{g\psi} \psi_{wj} - 2f_{11} \frac{\lambda_e b}{r_0} (\mathbf{x}_y + r_0 \mathbf{x}_\theta) = 0 \quad (2)$$

[0111] 式(3)为转向架横移运动:

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{y}}_u - 2\{[\mathbf{K}_{py} (\mathbf{y}_{w(2i-1)} - \mathbf{y}_u + H_{tw} \phi_u - l_t \psi_u) + C_{py} (\dot{\mathbf{y}}_{w(2i-1)} - \dot{\mathbf{y}}_u + H_{tw} \dot{\phi}_u - l_t \dot{\psi}_u)] + \\ & [\mathbf{K}_{py} (\mathbf{y}_{w(2i)} - \mathbf{y}_u + H_{tw} \phi_u + l_t \psi_u) + C_{py} (\dot{\mathbf{y}}_{w(2i)} - \dot{\mathbf{y}}_u + H_{tw} \dot{\phi}_u + l_t \dot{\psi}_u)]\} + \\ & 2\{(\mathbf{K}_{sy} + \Delta \mathbf{K}_{sy}) [\mathbf{y}_u - \mathbf{y}_c + H_{Bc} \phi_u + H_{cb} \phi_c + (-1)^i l_c \psi_c] + f_{\theta tlc}\} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

[0113] 式(4)为转向架侧滚运动:

$$\begin{aligned}
& J_{\alpha} \ddot{\phi}_n + 2H_{tw} \{ [K_{py} (y_{w(2i-1)} - y_n + H_{tw} \phi_n - l_t \psi_n) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i-1)} - \dot{y}_n + H_{tw} \dot{\phi}_n - l_t \dot{\psi}_n)] \\
& + [K_{py} (y_{w(2i)} - y_n + H_{tw} \phi_n + l_t \psi_n) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i)} - \dot{y}_n + H_{tw} \dot{\phi}_n + l_t \dot{\psi}_n)] \} + 2H_{Bt} \\
& \{ (K_{sy} + \Delta K_{sy}) [y_n - y_c + H_{Bt} \phi_{t1} + H_{cB} \phi_c + (-1)^i l_c \psi_c] + f_{sy1c} \} + 4d_s^2 (K_{px} \phi_{t1} + \\
& C_{px} \dot{\phi}_{t1}) + 2d_s^2 [(K_{sx} + \Delta K_{sx}) (\phi_n - \phi_c) + C_{sx} (\dot{\phi}_n - \dot{\phi}_c)] - K_{\phi z} (\phi_c - \phi_n) = 0
\end{aligned}
\tag{4}$$

[0115] 式(5)为转向架摇头运动:

$$\begin{aligned}
& J_{\alpha} \ddot{\psi}_n - 2l_t \{ [K_{py} (y_{w(2i-1)} - y_n + H_{tw} \phi_n - l_t \psi_n) + C_{py} (\dot{y}_{w(2i-1)} - \dot{y}_n + H_{tw} \dot{\phi}_n - l_t \dot{\psi}_n)] - \\
& [K_{py} (y_{w(2i)} - y_n + H_{tw} \phi_n + l_t \psi_n) + f_{pyw2n}] \} + 2d_s^2 [K_{px} (\psi_n - \psi_{w(2i-1)}) + C_{px} \\
& (\dot{\psi}_n - \dot{\psi}_{w(2i-1)}) + K_{px} (\psi_n - \psi_{w(2i)}) + C_{px} (\dot{\psi}_n - \dot{\psi}_{w(2i)})] - d_s^2 (\psi_c - \psi_n) = 0
\end{aligned}
\tag{5}$$

[0117] 式(6)为车体横移运动:

$$\begin{aligned}
& M_c \ddot{y}_c - 2\{ [(K_{sy} + \Delta K_{sy}) (y_{t1} - y_c + H_{Bt} \phi_{t1} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sy1c}] + \\
& (K_{sy} + \Delta K_{sy}) (y_{t2} - y_c + H_{Bt} \phi_{t2} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sy2c} \} = 0
\end{aligned}
\tag{6}$$

[0119] 式(7)为车体侧滚运动:

$$\begin{aligned}
& J_{\alpha} \ddot{\phi}_c - 2H_{cB} \{ [(K_{sy} + \Delta K_{sy}) (y_{t1} - y_c + H_{Bt} \phi_{t1} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sy1c}] - \\
& [(K_{sy} + \Delta K_{sy}) (y_{t2} - y_c + H_{Bt} \phi_{t2} + H_{cB} \phi_c + l_c \psi_c) + f_{sy2c}] \} - 2d_s^2 \\
& [(K_{sx} + \Delta K_{sx}) (\phi_{t1} - \phi_c) + C_{sx} (\dot{\phi}_{t1} - \dot{\phi}_c)] + (K_{sx} + \Delta K_{sx}) (\phi_{t2} - \phi_c) + \\
& C_{sx} (\dot{\phi}_{t2} - \dot{\phi}_c)] + (K_{\phi z} + \Delta K_{\phi z}) [(\phi_c - \phi_{t1}) + (\phi_c - \phi_{t2})] = 0
\end{aligned}
\tag{7}$$

[0121] 式(8)为车体摇头运动:

$$\begin{aligned}
& J_{\alpha} \ddot{\psi}_c - 2l_c \{ [(K_{sy} + \Delta K_{sy}) (y_{t1} - y_c + H_{Bt} \phi_{t1} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sy1c}] - \\
& [(K_{sy} + \Delta K_{sy}) (y_{t2} - y_c + H_{Bt} \phi_{t2} + H_{cB} \phi_c - l_c \psi_c) + f_{sy2c}] \} + 2d_s^2 [(K_{sx} + \Delta K_{sx}) \\
& (\psi_c - \psi_{t1}) + C_{sx} (\dot{\psi}_c - \dot{\psi}_{t1}) + (K_{sx} + \Delta K_{sx}) (\psi_c - \psi_{t2}) + C_{sx} (\dot{\psi}_c - \dot{\psi}_{t2})] = 0
\end{aligned}
\tag{8}$$

[0123] 式(9)与式(10)为外部广义干扰力项,其中 $m=1\sim 4$, $n=5\sim 8$ 。

$$D(1_m) = 2f_{22} \left(\frac{\ddot{y}_{wm}}{V} - \psi_{wm} \right) + K_{gy} y_{wm} - K_{gy} (x_y + r_0 x_\theta) \tag{9}$$

$$D(1_n) = 2f_{11} \left(\frac{\lambda_e b}{r_0} y_{wn} - \frac{b^2}{V} \dot{\psi}_{wn} \right) + K_{g\psi} \psi_{wn} - 2f_{11} \frac{\lambda_e b}{r_0} (x_y + r_0 x_\theta) \tag{10}$$

[0126] 下表为高速列车十七自由度动力学数学模型输出变量参数含义

	轨道方向不平顺信号	x_y
	轨道水平不平顺信号	x_e
[0127]	车体横移/摇头/侧滚	$y_c / \psi_c / \phi_c$
	转向架横移/摇头/侧滚	$y_g / \psi_g / \phi_g$
	轮对横移/摇头/侧滚	$y_{wi} / \psi_{wi} / -$

[0128] 当 $j=1$ 时, $i=1\sim 2$; 当 $j=2$ 时, $i=3\sim 4$ 。

[0129] 进一步, 分析模型特性可知, 高速列车多自由度模型在满足欧拉-拉格朗日非线性随机动力学的前提下, 可将高速列车多自由度动力学数学模型等效为传统非线性随机动力学的数学模型, 得出高速列车的多自由度模型变换方程, 得到式 (11) 为:

$$[0130] \quad [M_0 + \Delta M]\{\ddot{y}\} + [C_0 + \Delta C]\{\dot{y}\} + [K_0 + \Delta K]\{y\} = u + [D] \quad (11)$$

[0131] 式中 $[M_0]$, $[C_0]$, $[K_0]$: 依次为整车系统惯量矩阵、阻尼矩阵和时刚度矩阵, 均为 17×17 阶方阵; ΔM 代表由于乘客人数变化等造成质量系数的改变, ΔC 代表列车长时间运行后造成阻尼系数的改变, ΔK 代表列车长时间运行后弹簧系数的改变; u : 17×17 阶的控制器输出量; $[D]$: 包括轨道不平顺在内的扰动变量。 $y = [y_{w1}, y_{w2}, y_{w3}, y_{w4}, \psi_{w1}, \psi_{w2}, \psi_{w3}, \psi_{w4}, y_{t1}, y_{t2}, \phi_{t1}, \phi_{t2}, \psi_{t1}, \psi_{t2}, y_c, \phi_c, \psi_c]^T$;

[0132] 进一步, 将系统方程进一步转化, 得到式 (12)

$$[0133] \quad M_0 \ddot{y} + C_0 \dot{y} + K_0 y = u + D \quad (12)$$

[0134] 定义 D 表示列车运行环境中其他复杂时变下的外部干扰, 变量 y 反映的是轮对、车体、转向架的横移位移、摇头、侧滚角度。

[0135] 式中整理后的系统综合不确定性为 $D = -[\Delta M]\{\ddot{y}\} - [\Delta C]\{\dot{y}\} - [\Delta K]\{y\} + [d]$ 。

[0136] 第二步, 针对列车高速运行中所受扰动需要进行实时观测问题, 目的是设计适用于非线性动力学结构的滑模增益自适应观测器;

[0137] 具体的, 采用高速列车作为被控对象, 系统各子系统输出总和 y 与设定的参考值 η 之间的误差可表示为 $e = y - \hat{y}$, 定义滑模面, 如式 (13) 所示:

$$[0138] \quad s_a = c_1 \int e + c_2 e + \dot{e} \quad (13)$$

[0139] 进一步, 为设计如下滑模变结构观测器, 如式 (14) 所示:

$$[0140] \quad M_0 \ddot{\hat{y}} + C_0 \dot{\hat{y}} + K_0 \hat{y} = u + \hat{D} + v \quad (14)$$

[0141] 式中 $\hat{D}$ 的估计值如下式所示:

$$[0142] \quad \begin{cases} \hat{D} = \xi + \lambda_2 M_0 \dot{y} \\ \dot{\xi} = \lambda_2 (C_0 \dot{y} + K_0 y - u - \hat{d}) \end{cases}$$

[0143] 式中, $v = \lambda_1 \text{sgn}(S_a)$ 滑模变量, 标量 λ_1 辅助系统的增益。高速列车运行中激励不会出现突增性现象, 所以可得 $\|\dot{\hat{D}}\| \leq \theta$, 且 θ 为一正常数, 将 (12) 式减去式 (14) 代入可得式

(15) :

$$[0144] \quad N\dot{s}_a = \tilde{D} - \lambda_1 \operatorname{sgn}(s_a) \quad (15)$$

[0145] 式中未知增益系数 $\lambda_1 = \tilde{D} + \gamma$, 其中 γ 是正的矩阵。

[0146] 具体的, 构建如下Lyapunov函数, 如式 (16) 所示:

$$[0147] \quad V_1 = s_a^T N s_a \quad (16)$$

[0148] 式 (16) 对时间 t 的导数为式 (17) :

$$[0149] \quad \begin{aligned} \dot{V}_1 &= 2s_a^T N \dot{s}_a \\ &= 2s_a^T (\tilde{D} - \lambda_1 \operatorname{sgn}(s_a)) \\ &\leq -2(\lambda_1 - \|\tilde{D}\|) \|s_a\| \\ &\leq -2 \frac{\gamma}{\sqrt{\lambda_{\max}(N)}} V_1^{\frac{1}{2}} \\ &\leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

[0150] 具体的, 为了使状态估计误差 $\tilde{D}$ 可以在有限时间中收敛到零之后始终保持, 构建如下Lyapunov函数, 如式 (18) 所示:

$$[0151] \quad V_2 = \tilde{D}^T P \tilde{D} \quad (18)$$

[0152] 式 (18) 对时间 t 的导数为式 (19) :

$$[0153] \quad \begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{\tilde{D}}^T P \tilde{D} + \tilde{D}^T P \dot{\tilde{D}} \\ &\leq -2\lambda_2 \tilde{D}^T P \tilde{D} + \frac{1}{\mu} \tilde{D}^T P \tilde{D} + \mu \dot{D}^T P \dot{D} \\ &\leq \left(-2\lambda_2 + \frac{1}{\mu} \right) \tilde{D}^T P \tilde{D} + \mathcal{G}^2 \lambda_{\max}(\mu P) \\ &= -\left(2\lambda_2 - \frac{1}{\mu} \right) V_2 + \mathcal{G}^2 \lambda_{\max}(\mu P) \end{aligned} \quad (19)$$

[0154] 由式 (19) 可以看出, 系统满足滑模的存在性以及可达性条件, 当系统进入滑模状态时, $\tilde{D}$ 在有限时间稳定有界, 即 $D = \hat{D}$, 观测器可以实时跟踪扰动。

[0155] 第三步, 设计加幂积分滑模控制器来迅速的消除高速列车运行过程中的跟踪误差, 并证明所设计控制器的稳定性;

[0156] 进一步, 定义高速列车半主动悬架系统的理想轨迹位置为 $y_d = [y_{d1}, \dots, y_{dn}]$, 则实际矢量与理想矢量之间的跟踪误差定义如式 (20) 所示:

$$[0157] \quad \begin{aligned} x_1 &= [x_{1,1}, \dots, x_{1,n}]^T = y_d - y \\ x_2 &= [x_{2,1}, \dots, x_{2,n}]^T = \dot{y}_d - \dot{y} \end{aligned} \quad (20)$$

[0158] 原系统方程 (12) 可转化为如式 (21) 所示的误差方程:

$$\begin{aligned}
 [0159] \quad & \dot{x}_1 = x_2 \\
 & \dot{x}_2 = -M_0^{-1}u - M_0^{-1}D + M_0^{-1}C_0(\dot{y}_d - x_2) + M_0^{-1}K_0y + \ddot{y}_d
 \end{aligned} \tag{21}$$

[0160] 式中 $1 < r = r_1/r_2 < 2$, r_1, r_2 均是正整数。定义 $\xi = x_2^r - x_2^{*r}$, 其中 x_2^* 是一个设定的虚拟控制器, 虚拟控制律定义如式 (22) 所示:

$$[0161] \quad x_2^* = -k_1 x_1^{1/r} \tag{22}$$

[0162] 具体的, 选取滑模面, 如式 (23) 所示:

$$[0163] \quad s = k_1^r x_1 + x_2^r \tag{23}$$

[0164] 针对高速列车多自由度动力学数学模型, 根据式, 加幂积分滑模控制器可设计为如式 (24) 所示的控制器:

$$[0165] \quad u = \left(\begin{aligned} & (2-1/r)2^{1-1/r} k_1^{1+r} k_2 M_0 (x_2^r + k_1^r x_1)^{2/r-1} \\ & + C_0(\dot{y}_d - x_2) + K_0 y + M_0 \ddot{y}_d - \hat{D} \end{aligned} \right) \text{sgn}(s) \tag{24}$$

[0166] 式中 $k_1 > 0$, $k_2 > \frac{2^{1-1/r} \left[\frac{k_1(1+r)}{2^{3-1/r}} \right]^{-r}}{1+r} + \frac{1}{k_1} + \frac{r}{1+r} \left[\frac{k_1(1+r)}{4} \right]^{-1/r}$, $\text{sgn}(s)$ 为符号函数;

[0167] 进一步, 根据所设计的控制器, 现证明其稳定性;

[0168] 具体的, 构建如下 Lyapunov 函数, 如式 (25) 所示:

$$\begin{aligned}
 [0169] \quad & V = V_1 + V_2 \\
 & V_1 = \frac{x_1^2}{2} \\
 & V_2 = \frac{\int_{x_2^*}^{x_2} (s^r - x_2^{*r})^{2-1/r} ds}{(2-1/r)2^{1-1/r} k_1^{1+r}}
 \end{aligned} \tag{25}$$

[0170] 对式 (25) 进行求导, 分别得到式 (26) 与式 (27) 有:

$$\begin{aligned}
 [0171] \quad & \dot{V}_1 = x_1(x_2 - x_2^*) - k_1 x_1^{1+1/r} \\
 & < 2^{1-1/r} |x_1| |\xi|^{1/r} - k_1 x_1^{1+1/r}
 \end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= -(2-1/r) \frac{\frac{\partial x_2^{*r}}{\partial x_1} \int_{x_2^*}^{x_2} (s^r - x_2^{*r})^{1-1/r} ds}{(2-1/r) 2^{1-1/r} k_1^{1+r}} \dot{x}_1 + \frac{(x_2^r - x_2^{*r})^{2-1/r}}{(2-1/r) 2^{1-1/r} k_1^{1+r}} \dot{x}_2 \\
&= \frac{\int_{x_2^*}^{x_2} (s^r - x_2^{*r})^{1-1/r} ds}{2^{1-1/r} k_1} \dot{x}_1 + \frac{(x_2^r - x_2^{*r})^{2-1/r}}{(2-1/r) 2^{1-1/r} k_1^{1+r}} \left(-M_0^{-1}u - M_0^{-1}D + M_0^{-1}C_0 \right) (\dot{y}_d - x_2) + M_0^{-1}K_0 y + \ddot{y}_d \quad (27) \\
[0172] \quad &\leq \frac{|\xi|}{k_1} x_2 + \frac{\xi^{2-1/r}}{(2-1/r) 2^{1-1/r} k_1^{1+r}} \left(-M_0^{-1}u - M_0^{-1}D + M_0^{-1}C_0 \right) (\dot{y}_d - x_2) + M_0^{-1}K_0 y + \ddot{y}_d \\
&\leq \frac{|\xi|}{k_1} x_2 - k_2 \xi^{2-1/r} (x_2^r - k_1^r x_1)^{2-1/r} \operatorname{sgn}(s) \\
&\leq \frac{k_1}{4} |x_1|^{1+1/r} + \left(\frac{1}{k_1} + \frac{r}{1+r} \left[\frac{k_1(1+r)}{4} \right]^{-1/r} - k_2 \right) |\xi|^{1+1/r}
\end{aligned}$$

[0173] 将式 (26) (27) 结合可得式 (28) :

$$[0174] \quad \dot{V} \leq -\frac{k_1}{2} |x_1|^{1+1/r} - (k_2 - \varphi) |\xi|^{1+1/r} \quad (28)$$

$$[0175] \quad \text{式中 } \varphi = \frac{2^{1-1/r}}{1+r} \left[\frac{k_1(1+r)}{2^{3-1/r}} \right]^{-r} + \frac{1}{k_1} + \frac{r}{1+r} \left[\frac{k_1(1+r)}{4} \right]^{-1/r}。$$

[0176] 由式 (28) 可以看出, 系统满足滑模的存在性以及可达性条件, 当系统进入滑模状态时 $s=0$, 结合式 (25) 可知, 此时系统使误差 x_1 和 x_2 渐进收敛于零, 进而可以推导出跟踪误差 x_1 能被消除。

[0177] 图1为本发明提供的基于加幂积分滑模的高速列车半主动悬挂系统控制方法的结构框图, 该结构一方面考虑了高速列车运行中未知扰动对列车运行的影响, 另一方面也考虑了极短时间内高速列车的车体横移稳定在安全范围内, 因此, 该控制结构的稳定运行可以有效地减弱扰动对列车运行的影响, 而且有效地提高系统的控制精度。

[0178] 实施例2

[0179] 本实施例与实施例1的不同之处在于: 为了能够有效减小 $\operatorname{sgn}(s)$ 函数带来的抖振问题, 采用 $\frac{s}{\delta+|s|}$ 函数来代替函数 $\operatorname{sgn}(s)$, δ 为趋于零的正常数, 比如 10^{-5} 、 10^{-6} 、 10^{-7} 等等。

[0180] 由图2中的仿真结果可知, 扰动实际值和增益自适应滑模扰动观测器观测值在每个采样周期内大约经过0.001秒就快速重合, 说明所设计的观测器快速有效的跟踪上了系统的未知扰动, 为后续控制器的设计提供了有力支持。

[0181] 由图3中的仿真结果可知, 高速列车车体横移在采样周期内实现了极短时间以内就收敛到极小的范围内, 表明系统在整个过程中具有较快的动态响应特性。

[0182] 下表为本申请中各参数含义明细:

[0183]

参数	单位	名称
M_c	k_g	车体质量
M_f	k_g	构架质量
M_w	k_g	轮对质量
J_{cx}	$k_g \cdot m^2$	车体侧滚转动惯量
J_{cy}	$k_g \cdot m^2$	车体摇头转动惯量
J_{fx}	$k_g \cdot m^2$	构架侧滚转动惯量
J_{fy}	$k_g \cdot m^2$	构架摇头转动惯量

[0184]

J_{wx}	$k_g \cdot m^2$	轮对摇头转动惯量
K_{px}	N/m	一系纵向悬挂刚度
K_{py}	N/m	一系横向悬挂刚度
K_{pz}	N/m	一系垂向悬挂刚度
C_{px}	$N \cdot s/m$	一系纵向阻尼系数
C_{py}	$N \cdot s/m$	一系横向阻尼系数
C_{pz}	$N \cdot s/m$	一系垂向阻尼系数
K_{rx}	N/m	二系纵向悬挂刚度
K_{ry}	N/m	二系横向悬挂刚度
K_{rz}	N/m	二系垂向悬挂刚度
C_{rx}	$N \cdot s/m$	二系纵向阻尼系数
C_{ry}	$N \cdot s/m$	二系横向阻尼系数
C_{rz}	$N \cdot s/m$	二系垂向阻尼系数
a	m	车辆轨距
l_f	m	车辆轴距之半
d_s	m	二系悬挂横向距离之半
d_w	m	一系悬挂横向距离之半
H_{cx}	m	车体质心与二系悬挂之距
H_{fx}	m	二系悬挂与构架质心之距
H_{wx}	m	构架质心与轮对质心之距
R_0	m	轮对半径
l_c	m	车辆定距之半
b	m	轨距之半

[0185] 本发明提出的基于加幂积分滑模变结构的高速列车悬架控制算法,解决了现实工程中扰动上界未知的现象,有效的克服了非线性复杂系统中强耦合问题,加幂积分算法使系统具有快速动态响应,滑模变结构控制算法具有鲁棒性强,可靠性高等特点,很好的实现

了高速列车快速安全稳定运行的要求。

[0186] 显然,上述实施例仅仅是为清楚地说明本发明的技术方案所作的举例,而并非是对本发明的实施方式的限定。对于所属领域的普通技术人员来说,在上述说明的基础上还可以做出其它不同形式的变化或变动。这里无需也无法对所有的实施方式予以穷举。凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明权利要求的保护范围之内。

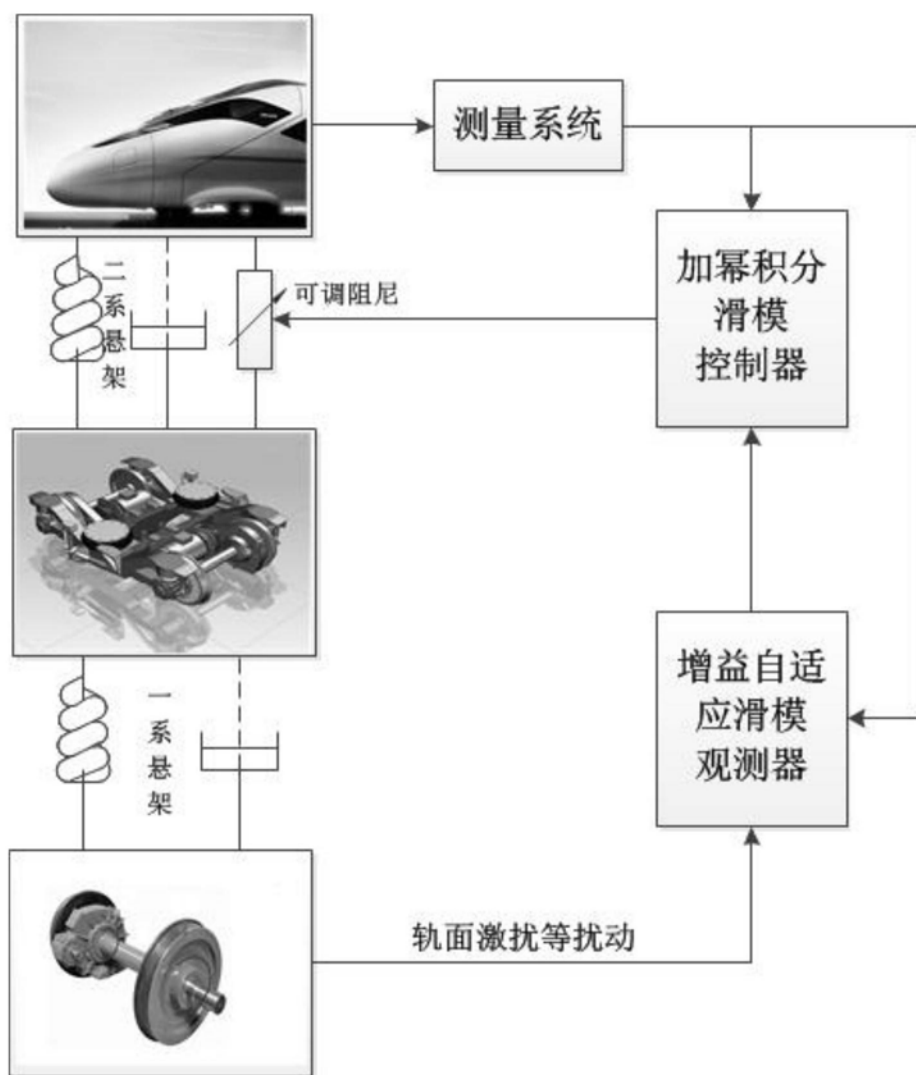


图1

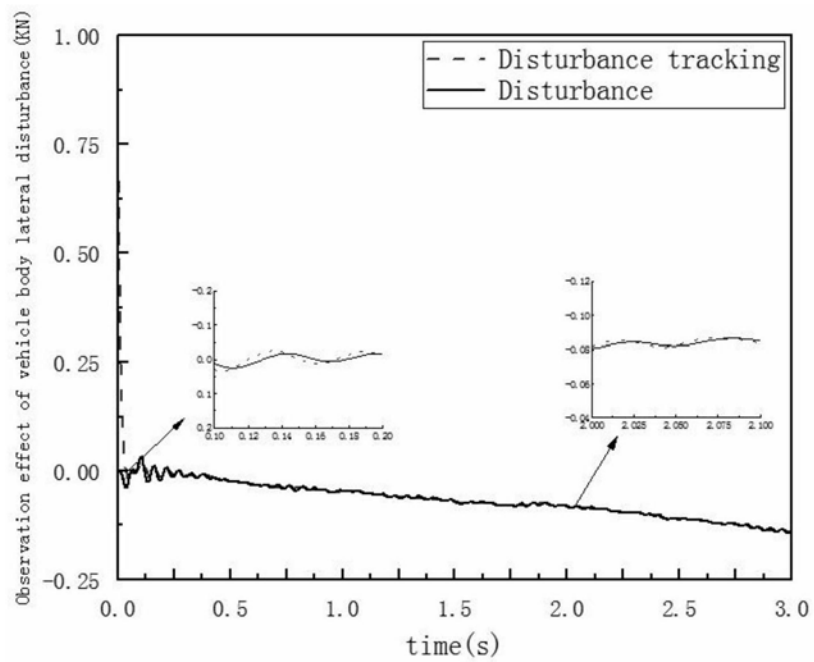


图2

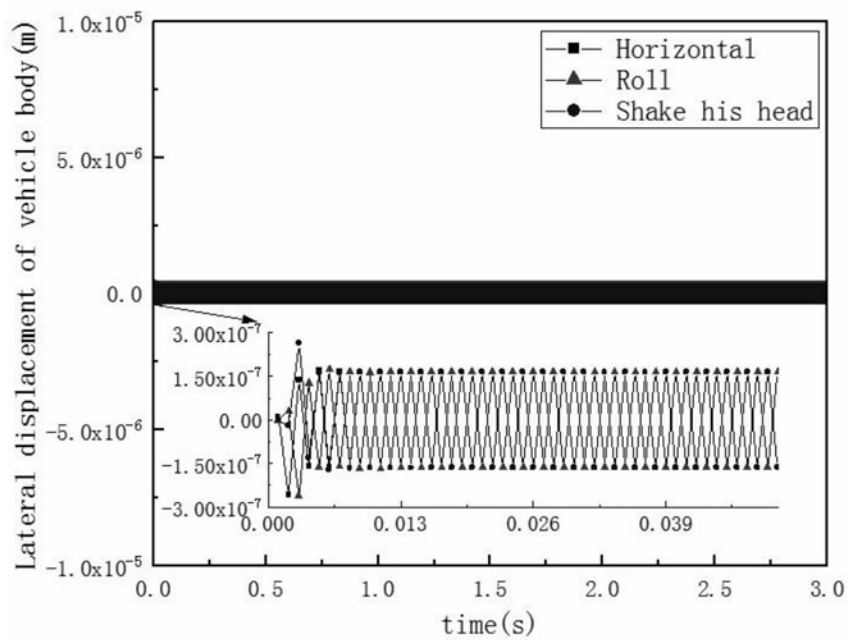


图3