



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117400944 B

(45) 授权公告日 2024.03.08

(21) 申请号 202311723616.7

B62D 11/00 (2006.01)

(22) 申请日 2023.12.15

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 117400944 A

CN 109017778 A, 2018.12.18

CN 111806427 A, 2020.10.23

CN 115042810 A, 2022.09.13

(43) 申请公布日 2024.01.16

CN 115179963 A, 2022.10.14

CN 115320572 A, 2022.11.11

(73) 专利权人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

CN 115635967 A, 2023.01.24

CN 116279409 A, 2023.06.23

(72) 发明人 侯泓钰 韩立金 谢景硕 郝伟赫 张一帆

US 2023105572 A1, 2023.04.06

WO 2023056227 A1, 2023.04.06

(74) 专利代理机构 北京高沃律师事务所 11569 专利代理师 赵兴华

审查员 张向磊

(51) Int. Cl.

B60W 30/18 (2012.01)

B60W 50/00 (2006.01)

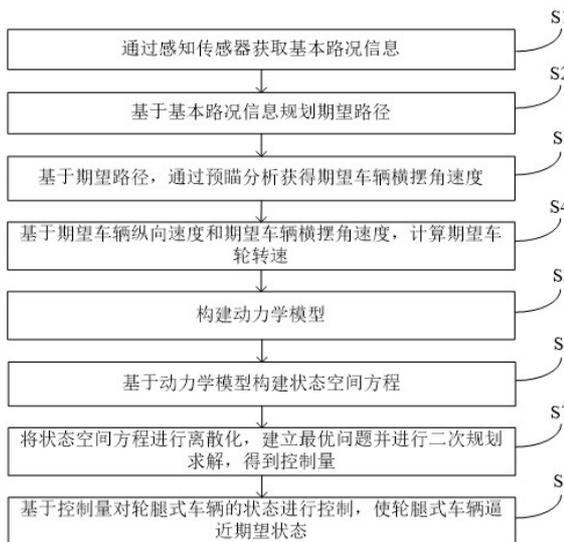
权利要求书3页 说明书13页 附图4页

(54) 发明名称

一种轮腿式车辆速差转向控制方法、系统及电子设备

(57) 摘要

本发明公开了一种轮腿式车辆速差转向控制方法、系统及电子设备,涉及车辆速差转向控制技术领域,该方法包括:通过感知传感器获取基本路况信息;基于基本路况信息规划期望路径;基于期望路径,通过预瞄分析获得期望车辆横摆角速度;基于期望车辆纵向速度和期望车辆横摆角速度,计算期望车轮转速;构建动力学模型;基于动力学模型构建状态空间方程;将状态空间方程进行离散化,建立最优问题并进行二次规划求解,得到控制量;基于控制量对轮腿式车辆的状态进行控制,使轮腿式车辆逼近期望状态。本发明通过对轮腿式车辆足端车轮的转速、车辆横摆角速度进行优化控制,能够实现对轮腿式车辆的纵、横向控制。



1. 一种轮腿式车辆速差转向控制方法,其特征在于,包括:

通过感知传感器获取基本路况信息;所述基本路况信息包括道路宽度、转弯曲率和障碍物分布;

基于所述基本路况信息规划期望路径;所述期望路径包括期望车辆质心位置以及期望车辆纵向速度;

基于所述期望路径,通过预瞄分析获得期望车辆横摆角速度;

基于所述期望车辆纵向速度和所述期望车辆横摆角速度,计算期望车轮转速;

构建动力学模型;所述动力学模型包括速差转向车身动力学模型、车轮动力学模型和轮胎动力学模型;

基于所述动力学模型构建状态空间方程;

将所述状态空间方程进行离散化,建立最优问题并进行二次规划求解,得到控制量;

基于所述控制量对轮腿式车辆的状态进行控制,使所述轮腿式车辆逼近期望状态;所述期望状态包括期望车辆横向速度、期望车辆横摆角速度、期望车轮转速以及期望车轮滑移率;所述期望车辆横向速度和所述期望车轮滑移率均为零;

所述速差转向车身动力学模型的表达式为:

$$\begin{cases} m(\dot{v}_x - v_y \omega) = F_{x_1} + F_{x_2} + F_{x_3} + F_{x_4} \\ m(\dot{v}_y + v_x \omega) = F_{y_1} + F_{y_2} + F_{y_3} + F_{y_4} \\ I_z \dot{\omega} = L_f (F_{y_1} + F_{y_2}) - L_r (F_{y_3} + F_{y_4}) \\ \quad + \frac{B}{2} (-F_{x_1} + F_{x_2} - F_{x_3} + F_{x_4}) \end{cases};$$

其中, m 为轮腿式车辆的整体质量, v_x 为车身坐标系下的纵向速度, \dot{v}_x 为车身坐标系下的纵向加速度, v_y 为车身坐标系下的横向速度, \dot{v}_y 为车身坐标系下的横向加速度, ω 为车辆横摆角速度, $\dot{\omega}$ 为车辆横摆角加速度, I_z 为转动惯量, L_f 为前半轴距, L_r 为后半轴距, B 为车辆轮距, F_{xi} 为各车轮受到的纵向力, F_{yi} 为各车轮受到的横向力, $i=1,2,3,4$ 分别对应左前、右前、左后、右后位置;

所述轮胎动力学模型的表达式为:

$$\begin{cases} F_{xi} = F_{zi} (c_1 (1 - e^{-c_2 s_{sum}}) - c_3 s_{sum}) \frac{s_i}{s_{sum}} \\ F_{yi} = F_{zi} (c_1 (1 - e^{-c_2 s_{sum}}) - c_3 s_{sum}) \frac{0.9 \alpha_i}{s_{sum}} \end{cases};$$

其中, F_{zi} 为各个车轮的垂向载荷, s_i 为各车轮的纵向滑移率, α_i 为各车轮侧偏角,

s_{sum} 为中间变量, $s_{sum} = \sqrt{s_i^2 + \tan^2 \alpha_i^2}$, c_1 、 c_2 、 c_3 均为摩擦参数。

2. 根据权利要求1所述的轮腿式车辆速差转向控制方法,其特征在于,所述期望车辆横摆角速度的计算公式为:

$$\omega_{CoM}^{des} = \frac{d\theta_{CoM}^{des}}{dt};$$

$$\theta_{CoM}^{des} = \arctan\left(\frac{y_{CoM}^L - y_{CoM}}{x_{CoM}^L - x_{CoM}}\right);$$

其中, ω_{CoM}^{des} 为期望车辆横摆角速度, θ_{CoM}^{des} 为期望车辆横摆角度, x_{CoM}^L 和 y_{CoM}^L 为预瞄点的横纵坐标, x_{CoM} 和 y_{CoM} 为当前车辆质心的横纵坐标, t 为时间。

3. 根据权利要求2所述的轮腿式车辆速差转向控制方法,其特征在于,所述期望车轮转速的计算公式为:

$$\omega_{ei}^{des} = \frac{1}{R} \left(v_x^{des} - \frac{B}{2} \omega_{COM}^{des} \right) \quad (i = 1, 3)$$

$$\omega_{ei}^{des} = \frac{1}{R} \left(v_x^{des} + \frac{B}{2} \omega_{COM}^{des} \right) \quad (i = 2, 4)$$

其中, ω_{ei}^{des} 为期望车轮转速, R 为轮胎半径, B 为车辆轮距, v_x^{des} 为期望车辆纵向速度, $i = 1, 2, 3, 4$, 分别对应左前、右前、左后、右后位置。

4. 根据权利要求1所述的轮腿式车辆速差转向控制方法,其特征在于,所述车轮动力学模型的表达式为:

$$I_w \dot{\omega}_{ei} = T_i - F_{xi} R;$$

其中, I_w 为车轮转动惯量, T_i 为车轮驱动力矩, R 为车轮半径, $\dot{\omega}_{ei}$ 为车轮角加速度, F_{xi} 为各车轮受到的纵向力。

5. 一种轮腿式车辆速差转向控制系统,其特征在于,包括:

基本路况信息获取模块,用于通过感知传感器获取基本路况信息;所述基本路况信息包括道路宽度、转弯曲率和障碍物分布;

期望路径规划模块,用于基于所述基本路况信息规划期望路径;所述期望路径包括期望车辆质心位置以及期望车辆纵向速度;

期望车辆横摆角速度获得模块,用于基于所述期望路径,通过预瞄分析获得期望车辆横摆角速度;

期望车轮转速计算模块,用于基于所述期望车辆纵向速度和所述期望车辆横摆角速度,计算期望车轮转速;

动力学模型构建模块,用于构建动力学模型;所述动力学模型包括速差转向车身动力学模型、车轮动力学模型和轮胎动力学模型;

状态空间方程构建模块,用于基于所述动力学模型构建状态空间方程;

求解模块,用于将所述状态空间方程进行离散化,建立最优问题并进行二次规划求解,

得到控制量；

控制模块,用于基于所述控制量对轮腿式车辆的状态进行控制,使所述轮腿式车辆逼近期望状态;所述期望状态包括期望车辆横向速度、期望车辆横摆角速度、期望车轮转速以及期望车轮滑移率;所述期望车辆横向速度和所述期望车轮滑移率均为零;

所述速差转向车身动力学模型的表达式为:

$$\begin{cases} m(\dot{v}_x - v_y \omega) = F_{x_1} + F_{x_2} + F_{x_3} + F_{x_4} \\ m(\dot{v}_y + v_x \omega) = F_{y_1} + F_{y_2} + F_{y_3} + F_{y_4} \\ I_z \dot{\omega} = L_f(F_{y_1} + F_{y_2}) - L_r(F_{y_3} + F_{y_4}); \\ \quad + \frac{B}{2}(-F_{x_1} + F_{x_2} - F_{x_3} + F_{x_4}) \end{cases}$$

其中, m 为轮腿式车辆的整体质量, v_x 为车身坐标系下的纵向速度, \dot{v}_x 为车身坐标系下的纵向加速度, v_y 为车身坐标系下的横向速度, \dot{v}_y 为车身坐标系下的横向加速度, ω 为车辆横摆角速度, $\dot{\omega}$ 为车辆横摆角加速度, I_z 为转动惯量, L_f 为前半轴距, L_r 为后半轴距, B 为车辆轮距, F_{x_i} 为各车轮受到的纵向力, F_{y_i} 为各车轮受到的横向力, $i=1,2,3,4$ 分别对应左前、右前、左后、右后位置;

所述轮胎动力学模型的表达式为:

$$\begin{cases} F_{x_i} = F_{z_i}(c_1(1 - e^{-c_2 s_{sum}}) - c_3 s_{sum}) \frac{s_i}{s_{sum}} \\ F_{y_i} = F_{z_i}(c_1(1 - e^{-c_2 s_{sum}}) - c_3 s_{sum}) \frac{0.9 \alpha_i}{s_{sum}} \end{cases};$$

其中, F_{z_i} 为各个车轮的垂向载荷, s_i 为各车轮的纵向滑移率, α_i 为各车轮侧偏角,

s_{sum} 为中间变量, $s_{sum} = \sqrt{s_i^2 + \tan^2 \alpha_i^2}$, c_1 、 c_2 、 c_3 均为摩擦参数。

6.一种电子设备,其特征在于,包括存储器及处理器,所述存储器用于存储计算机程序,所述处理器运行所述计算机程序以使所述电子设备执行权利要求1-4中任一项所述的轮腿式车辆速差转向控制方法。

一种轮腿式车辆速差转向控制方法、系统及电子设备

技术领域

[0001] 本发明涉及车辆速差转向控制技术领域,特别涉及一种轮腿式车辆速差转向控制方法、系统及电子设备。

背景技术

[0002] 轮腿式车辆具有多模态复合驱动能力,可应用于复杂地形环境中,满足多元化任务工况的需求。在结构化道路路况下,轮腿式车辆主要依靠对足端车轮及电机的控制完成横纵向运动,具有行驶速度高,运动能力强的特点。然而,当前针对轮腿式车辆领域的研究有待进一步提升,在轮腿式车辆分布式驱动方面更是鲜有研究。轮腿式车辆的纵向运动控制与横向运动控制具有极强的耦合性。早些车辆横纵向协同控制主要采用直接横摆力矩控制器,虽然具备同时考虑运动稳定性和经济性的优点,但在实际中由于系统存在响应延迟和其他缺陷,可能会导致车辆处于不稳定状态。现如今主流的车辆横纵向协同控制多采用模型预测的方法,但多数都只考虑横向控制或引入纵向速度反馈量实现横、纵向解耦,且多数研究对象都针对阿克曼转向车辆,针对分布式驱动的轮腿式车辆更是鲜有提及。

发明内容

[0003] 本发明的目的是提供一种轮腿式车辆速差转向控制方法、系统及电子设备,实现对轮腿式车辆的纵、横向控制。

[0004] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:一种轮腿式车辆速差转向控制方法,包括:通过感知传感器获取基本路况信息;所述基本路况信息包括道路宽度、转弯曲率和障碍物分布。

[0005] 基于所述基本路况信息规划期望路径;所述期望路径包括期望车辆质心位置以及期望车辆纵向速度。

[0006] 基于所述期望路径,通过预瞄分析获得期望车辆横摆角速度。

[0007] 基于所述期望车辆纵向速度和所述期望车辆横摆角速度,计算期望车轮转速。

[0008] 构建动力学模型;所述动力学模型包括速差转向车身动力学模型、车轮动力学模型和轮胎动力学模型。

[0009] 基于所述动力学模型构建状态空间方程。

[0010] 将所述状态空间方程进行离散化,建立最优问题并进行二次规划求解,得到控制量。

[0011] 基于所述控制量对轮腿式车辆的状态进行控制,使所述轮腿式车辆逼近期望状态;所述期望状态包括期望车辆横向速度、期望车辆横摆角速度、期望车轮转速以及期望车轮滑移率;所述期望车辆横向速度和所述期望车轮滑移率均为零。

[0012] 实现上述目的,本发明还提供了如下方案:一种轮腿式车辆速差转向控制系统,包括:基本路况信息获取模块,用于通过感知传感器获取基本路况信息;所述基本路况信息包括道路宽度、转弯曲率和障碍物分布。

[0013] 期望路径规划模块,用于基于所述基本路况信息规划期望路径。所述期望路径包括期望车辆质心位置以及期望车辆纵向速度。

[0014] 期望车辆横摆角速度获得模块,用于基于所述期望路径,通过预瞄分析获得期望车辆横摆角速度。

[0015] 期望车轮转速计算模块,用于基于所述期望车辆纵向速度和所述期望车辆横摆角速度,计算期望车轮转速。

[0016] 动力学模型构建模块,用于构建动力学模型;所述动力学模型包括速差转向车身动力学模型、车轮动力学模型和轮胎动力学模型。

[0017] 状态空间方程构建模块,用于基于所述动力学模型构建状态空间方程。

[0018] 求解模块,用于将所述状态空间方程进行离散化,建立最优问题并进行二次规划求解,得到控制量。

[0019] 控制模块,用于基于所述控制量对轮腿式车辆的状态进行控制,使所述轮腿式车辆逼近期望状态;所述期望状态包括期望车辆横向速度、期望车辆横摆角速度、期望车轮转速以及期望车轮滑移率;所述期望车辆横向速度和所述期望车轮滑移率均为零。

[0020] 实现上述目的,本发明还提供了如下方案:一种电子设备,包括存储器及处理器,所述存储器用于存储计算机程序,所述处理器运行所述计算机程序以使所述电子设备执行上述的轮腿式车辆速差转向控制方法。

[0021] 实现上述目的,本发明还提供了如下方案:一种计算机可读存储介质,其存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如上述的轮腿式车辆速差转向控制方法。

[0022] 根据本发明提供的具体实施例,本发明公开了以下技术效果:

[0023] 本发明提针对轮腿式车辆分布式驱动的特点,建立了速差转向车身动力学模型、车轮动力学模型和轮胎动力学模型,基于这三个动力学模型构建状态空间方程并进行离散化,建立最优问题,进行二次规划求解,得到控制量;基于控制量对轮腿式车辆的状态进行控制,使轮腿式车辆逼近期望状态。本发明能够对轮腿式车辆足端车轮的转速、车辆横摆角速度进行优化控制,以各足端车轮的驱动力矩为控制量,实现对轮腿式车辆的纵、横向控制。且本发明还能够兼顾考虑车轮的滑移率,进一步提升运动控制精度。

附图说明

[0024] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0025] 图1为本发明提供的轮腿式车辆速差转向控制方法的流程图。

[0026] 图2为预瞄点和期望路径示意图。

[0027] 图3为差转向车身动力学模型示意图。

[0028] 图4为轴荷转移分析示意图。

[0029] 图5为车轮的受力分析示意图。

具体实施方式

[0030] 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。

[0031] 本发明的目的是提供一种轮腿式车辆速差转向控制方法、系统及电子设备,通过对轮腿式车辆足端车轮的转速、车辆横摆角速度进行优化控制,实现对轮腿式车辆的纵、横向控制。

[0032] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0033] 实施例一:如图1所示,本实施例提供的轮腿式车辆速差转向控制方法,包括步骤S1-步骤S8。

[0034] S1:通过感知传感器获取基本路况信息;基本路况信息包括道路宽度、转弯曲率和障碍物分布。

[0035] 轮腿式车辆通过感知传感器获取基本路况信息,包括道路宽度、转弯曲率和障碍物分布等基本信息。

[0036] S2:基于基本路况信息规划期望路径;期望路径包括期望车辆质心位置以及期望车辆纵向速度。

[0037] 同时分析已获得的基本路况信息,规划出期望路径,期望路径示意图如图2所示。

得到期望车辆质心位置 $(x_{CoM}^{des}, y_{CoM}^{des})$ 以及期望车辆纵向速度 v_x^{des} ,为后续获得期望车身横摆角度和横摆角速度提供基本数据支撑。

[0038] S3:基于期望路径,通过预瞄分析获得期望车辆横摆角速度。

[0039] 通过预瞄分析,获得期望车辆横摆角速度。如图2所示,图2中 L_d 是预瞄距离。在每个控制步长内根据期望车辆质心位置 $(x_{CoM}^{des}, y_{CoM}^{des})$ 选取预瞄点,并通过一条圆弧将预瞄点与当前位置点连接,当步长足够小时,所得的轨迹便为期望行驶路径,当前位置点和预瞄点连线方向与当前x方向夹角是期望车辆横摆角度。

[0040] 期望车辆横摆角度和期望车辆横摆角速度用公式(1)。

$$[0041] \begin{cases} \theta_{CoM}^{des} = \arctan\left(\frac{y_{CoM}^L - y_{CoM}}{x_{CoM}^L - x_{CoM}}\right) \\ \omega_{CoM}^{des} = \frac{d\theta_{CoM}^{des}}{dt} \end{cases} \quad (1)。$$

[0042] 式中, x_{CoM}^L 和 y_{CoM}^L 是预瞄点的横纵坐标, x_{CoM} 和 y_{CoM} 是当前车辆质心的横纵坐标, θ_{CoM}^{des} 是期望车辆横摆角度(rad), ω_{CoM}^{des} 是期望车辆横摆角速度。预瞄点的横纵坐标是通过预瞄距离和期望路径轨迹获得。

[0043] S4:基于期望车辆纵向速度和期望车辆横摆角速度,计算期望车轮转速。

[0044] 左侧车轮和右侧车轮的期望转速用公式 (2) 表示。

$$\omega_{ei}^{des} = \frac{1}{R} \left(v_x^{des} - \frac{B}{2} \omega_{COM}^{des} \right) \quad (i = 1, 3)$$

$$\omega_{ei}^{des} = \frac{1}{R} \left(v_x^{des} + \frac{B}{2} \omega_{COM}^{des} \right) \quad (i = 2, 4)$$

[0045] (2)。

[0046] 式中, ω_{ei}^{des} 为期望车轮转速, R 为轮胎半径, v_x^{des} 为期望车辆纵向速度, B 为车辆轴距, $i = 1, 2, 3, 4$, 分别对应左前、右前、左后、右后位置。

[0047] S5: 构建动力学模型; 动力学模型包括速差转向车身动力学模型、车轮动力学模型和轮胎动力学模型。

[0048] S51: 速差转向车身动力学模型的构建。

[0049] 忽略侧倾、俯仰等自由度, 建立速差转向车身动力学模型, 如图3所示。

[0050] 在横摆运动中分析速度与加速度的关系如公式 (3) 和公式 (4) 所示。

$$a_x = (\dot{v}_x - v_y \omega) \quad (3)。$$

$$a_y = (\dot{v}_y + v_x \omega) \quad (4)。$$

[0053] 式中, a_x 和 a_y 分别是质心绝对加速度在车身坐标系下 x 方向和 y 方向的分量 (rad/s^2), v_x 和 v_y 分别是车身坐标系下的纵向速度和横向速度 (m/s), \dot{v}_x 和 \dot{v}_y 分别是车身坐标系下的纵向加速度和横向加速度, ω 是车辆横摆角速度 (rad/s)。

[0054] 因此, 速差转向车身动力学模型的方程如公式 (5)。

$$\begin{cases} m(\dot{v}_x - v_y \omega) = F_{x_1} + F_{x_2} + F_{x_3} + F_{x_4} \\ m(\dot{v}_y + v_x \omega) = F_{y_1} + F_{y_2} + F_{y_3} + F_{y_4} \\ I_z \dot{\omega} = L_f (F_{y_1} + F_{y_2}) - L_r (F_{y_3} + F_{y_4}) \\ \quad + \frac{B}{2} (-F_{x_1} + F_{x_2} - F_{x_3} + F_{x_4}) \end{cases} \quad (5)。$$

[0056] 式中, m 是轮腿式车辆的整体质量 (kg), I_z 是转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), L_f 和 L_r 分别表示前、后半轴距, F_{x_i} 和 F_{y_i} 表示各车轮受到的纵向力和横向力 (N)。

[0057] 轮式平台加速运动、减速运动或横摆运动时, 车轮受到的垂向载荷会发生转移, 图4为轴荷转移分析, 图4的 (a) 为侧视图, 图4的 (b) 为后视图。

[0058] 由力矩分析可得每个车轮的垂向载荷如公式 (6)。

$$[0059] \quad \begin{cases} F_{z1} = \frac{1}{L} \left(-\frac{L_r h m a_y}{B} - \frac{h m a_x}{2} + \frac{L_r m g}{2} \right) \\ F_{z2} = \frac{1}{L} \left(\frac{L_r h m a_y}{B} - \frac{h m a_x}{2} + \frac{L_r m g}{2} \right) \\ F_{z3} = \frac{1}{L} \left(-\frac{L_f h m a_y}{B} + \frac{h m a_x}{2} + \frac{L_f m g}{2} \right) \\ F_{z4} = \frac{1}{L} \left(\frac{L_f h m a_y}{B} + \frac{h m a_x}{2} + \frac{L_f m g}{2} \right) \end{cases} \quad (6)。$$

[0060] 式中, $L = L_f + L_r$ 是平台的轴距(m), h 是车身质心距地面高度(m), F_{zi} 是各个车轮的垂向载荷(N), g 是重力加速度。

[0061] S52: 构建车轮动力学模型。

[0062] 车轮的受力分析如图5所示, 由于行驶过程中, 车轮与地面的接触常常为滚动摩擦, 故在分析时一般忽略滚动阻力矩 T_b , 可得到车轮动力学模型的方程如公式(7)。

$$[0063] \quad I_w \dot{\omega}_{ei} = T_i - F_{xi} R \quad (7)。$$

[0064] 式中, T_i 是各个车轮驱动力矩(N·m), I_w 是车轮转动惯量(kg·m²), $\dot{\omega}_{ei}$ 是各个车轮角加速度(rad/s²)。

[0065] S53: 构建轮胎动力学模型。

$$[0066] \quad \text{轮胎侧偏角由定义可得: } \alpha_i = \arctan\left(\frac{v_{yei}}{v_{xei}}\right) \quad (8)。$$

[0067] 式中, α_i 表示各个轮胎侧偏角(rad), v_{xei} 表示各个车轮纵向速度(m/s), v_{yei} 表示各个车轮横向速度(m/s)。

[0068] 平台进行横摆运动时, 横向速度往往非常小, 可将上式简化为公式(9)。

$$[0069] \quad \alpha_i = \frac{v_{yei}}{v_x} \quad (9)。$$

[0070] 各个车轮的纵向滑移率 S_i 可以表示为公式(10)。

$$[0071] \quad S_i = -\frac{v_{xei} - \omega_{ei} R}{v_{xei}} \quad (10)。$$

[0072] 式中, ω_{ei} 是各个车轮角速度。

[0073] 轮胎动力学模型采用Burckhardt经验轮胎模型, 该模型满足轮胎非线性要求, 参数较少, 易于计算, 同时又能保证较好的精确度, 模型的公式描述如公式(11)。

$$[0074] \quad \begin{cases} F_{xi} = F_{zi} (c_1 (1 - e^{-c_2 s_{sum}}) - c_3 s_{sum}) \frac{s_i}{s_{sum}} \\ F_{yi} = F_{zi} (c_1 (1 - e^{-c_2 s_{sum}}) - c_3 s_{sum}) \frac{0.9 \alpha_i}{s_{sum}} \end{cases} \quad (11)。$$

[0075] 式中, s_{sum} 为中间变量, $s_{sum} = \sqrt{s_i^2 + \tan^2 \alpha_i}$, c_1 、 c_2 、 c_3 是摩擦参数, 其值根据路面条件选取。

[0076] S6: 基于动力学模型构建状态空间方程。

[0077] 依据步骤S5中所得到的速差转向车身动力学模型、车轮动力学模型与轮胎动力学模型, 构建连续形式的状态空间方程。

[0078] S61: 通过模型预测理论实现横向与纵向的协同控制, 因此建立状态预测模型方程时选取车身坐标系下的横向速度 v_y 、车辆横摆角速度 ω 、各车轮角速度 ω_{ei} 为状态量。以上选取的三类状态量均能够反映横向运动性能, 同时, 车轮角速度还可以体现纵向运动性能。考虑到在横向运动或纵横复合运动中, 车轮滑移率会发生变化, 以致影响到平台的受力和运动问题, 所以在状态向量中加入车轮滑移率 s_i , 最终构成的预测模型状态向量为

$\mathbf{x} = [v_y, \omega, s_1, s_2, s_3, s_4, \mathbf{W}]^T$, T表示转置。矩阵 $\mathbf{W} = [\omega_{e1} \ \omega_{e2} \ \omega_{e3} \ \omega_{e4}]$, 即x包含了总计10个状态量。

[0079] S62: 分析各个车轮滑移变化率 \dot{s}_i 。对式(10)求导得到下式。

$$[0080] \quad \dot{s}_i = \frac{\dot{\omega}_{ei} R v_{xei} - \omega_{ei} R \dot{v}_{xei}}{v_{xei}^2} \quad (12)。$$

[0081] 式中, \dot{v}_{xei} 表示各个车轮纵向加速度。

[0082] 将上式与车轮动力学模型的表达式联立, 引入车轮驱动力矩 T_i , 且为降低模型复杂度, 将车轮受到的纵向力和横向力进行简化, 由于车轮滑移率较小时的纵向力与其呈线性关系, 轮胎侧偏角较小时的横向力与角度呈线性关系, 故可令: $F_{xi} = k_x s_i$ (13)。

$$[0083] \quad F_{yi} = k_y \alpha_i \quad (14)。$$

[0084] 式中, k_y 是侧偏刚度(N/rad), k_x 是纵向滑移刚度(N)。

[0085] 由式(7)、式(12)、式(13)联立可得各车轮的滑移变化率 \dot{s}_i 计算式。

$$[0086] \quad \dot{s}_i = \frac{(T_i - Rk_x s_i)}{I_w v_{xei}} - \frac{\omega_{ei} R \dot{v}_{xei}}{v_{xei}^2} = -\frac{Rk_x s_i}{I_w v_{xei}} - \frac{\omega_{ei} R \dot{v}_{xei}}{v_{xei}^2} + \frac{T_i}{I_w v_{xei}} \quad (15)。$$

[0087] 式中, v_{xei} 是各个车轮纵向速度(m/s), \dot{v}_{xei} 是各个车轮纵向加速度(m/s²)。

[0088] S63:平台的横向运动主要由横向速度与横摆角速度来描述,由式(5)可得公式(16)和公式(17)。

$$[0089] \quad \dot{v}_y = A_{11} v_y + A_{12} \omega \quad (16)。$$

$$[0090] \quad \dot{\omega} = A_{21} v_y + A_{22} \omega + \frac{B}{2I_z R} \sum_i (T_i - I_w \dot{\omega}_i) \quad (17)。$$

[0091] 式中, $\dot{\omega}$ 为车辆横摆角加速度,各系数为:

$$[0092] \quad A_{11} = -\frac{2}{mv_x} (k_{yf} + k_{yr}) \quad (18)。$$

$$[0093] \quad A_{12} = (-v_x - \frac{2}{mv_x} (L_f k_{yf} - L_r k_{yr})) \quad (19)。$$

$$[0094] \quad A_{21} = -\frac{2}{I_z v_x} (L_f k_{yf} - L_r k_{yr}) \quad (20)。$$

$$[0095] \quad A_{22} = (-\frac{2}{I_z v_x} (L_f^2 k_{yf} + L_r^2 k_{yr})) \quad (21)。$$

[0096] 式中, k_{yf} 是前侧轮胎侧偏刚度(N/rad), k_{yr} 是后侧轮胎侧偏刚度(N/rad)。

[0097] S64:控制量 $u = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4]^T$,由四个车轮驱动力矩 T_i 构成。在明确了状态量与控制量后,由式(7)、(15)、(16)、(17)可得状态空间方程为: $G_a \dot{x} = A_a x + B_a u$ (22), \dot{x} 为x的导数。

[0098] A_a 、 B_a 、 G_a 均为方程系数矩阵,表达式为:

$$[0099] \quad A_a = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \mathbf{0}_{1 \times 4} & \mathbf{0}_{1 \times 4} \\ A_{21} & A_{22} & \mathbf{0}_{1 \times 4} & \mathbf{0}_{1 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 1} & P & \hat{P} \\ \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 1} & K \cdot I_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \end{bmatrix} \quad (23)。$$

$$[0100] \quad \mathbf{B}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1 \times 4} \\ -S \quad S \quad -S \quad S \\ \frac{R}{I_w v_{xe1}} \cdot \mathbf{I}_{4 \times 4} \\ \frac{1}{I_w} \cdot \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix} \quad (24)。$$

$$[0101] \quad \mathbf{G}_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & -\frac{BI_w}{2I_z R} & \frac{BI_w}{2I_z R} & -\frac{BI_w}{2I_z R} & \frac{BI_w}{2I_z R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)。$$

[0102] 方程系数矩阵 \mathbf{A}_a 中, 中间变量 $K = -\frac{Rk_x}{I_w}$, 矩阵 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$ 如下。

$$[0103] \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} -\frac{Rk_x}{I_w v_{xe1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{Rk_x}{I_w v_{xe2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Rk_x}{I_w v_{xe3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{Rk_x}{I_w v_{xe4}} \end{bmatrix} \quad (26)。$$

$$[0104] \quad \hat{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} -\frac{R\dot{v}_{xe1}}{v_{xe1}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R\dot{v}_{xe2}}{v_{xe2}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R\dot{v}_{xe3}}{v_{xe3}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R\dot{v}_{xe4}}{v_{xe4}^2} \end{bmatrix} \quad (27)。$$

[0105] 方程系数矩阵 B_a 中, 中间变量 $S = \frac{B}{2I_z R}$ 。至此, 完成状态空间方程建立, 对应公式 (22)。

[0106] S7: 将状态空间方程进行离散化, 建立最优问题并进行二次规划求解, 得到控制量。

[0107] S71: 在上一步骤建立的状态空间方程与选取的状态向量中, 车轮横摆角速度和各个车轮转速的期望目标由上层控制器获得, 对于车轮滑移率而言, 其控制目标应使得车轮作纯滚动, 所以车轮期望滑移率应为: $s_i^{def} = 0$ (28)。

[0108] 式中, s_i^{def} 表示车轮期望滑移率。

[0109] S72: 该系统的约束包括状态约束和控制约束。状态约束主要反映为横摆角速度约束, 考虑到无人平台的快速性和稳定性, 根据常识经验, 设定车辆横摆角速度的极限值 ω_{max} 。控制约束是车轮驱动力矩的峰值约束, 车轮驱动力矩的大小应小于峰值力矩 T_{max} , 该值一般与驱动电机的参数有关。因此, 可以得到约束表达式如下。

$$[0110] \quad \begin{cases} -\omega_{max} \leq \omega \leq \omega_{max} \\ -T_{max} \leq T_i \leq T_{max} \end{cases} \quad (29)。$$

[0111] 至此, 控制约束设计完成, 对应公式 (29)。

[0112] S73: 采用线性时变的模型预测结构实现多目标的综合控制。对连续的状态空间方

$$[0112] \quad \text{程进行离散化可得: } \begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}'\mathbf{x}_k + \mathbf{B}'\mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}'\mathbf{x}_k \end{cases} \quad (30)。$$

[0113] 式中, k 为离散步, \mathbf{x}_{k+1} 表示第 $k+1$ 步的状态量, \mathbf{y}^k 和 \mathbf{u}^k 分别表示第 k 步的输出量和控制量, 各系数矩阵定义如下。

$$[0114] \quad \mathbf{A}' = \mathbf{I} + \mathbf{G}_a^{-1} \mathbf{A}_a \Delta T \quad (31)。$$

$$[0115] \quad \mathbf{B}' = \mathbf{G}_a^{-1} \mathbf{B}_a \Delta T \quad (32)。$$

$$[0116] \quad \mathbf{C}' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (33)。$$

[0117] 其中, ΔT 是采样间隔时间 (s)。

[0118] S74: 为使得预测控制更加准确, 这里假设平台纵向速度 v_x 和车轮纵向速度 v_{xei} 在预测时域内保持不变, 而在进入下一个采样步长时由轮腿式车辆动力学模型反馈更新。该状态预测模型的最优问题可进行如下表示。

$$[0119] \quad \begin{cases} J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_p} \|(y^k - y_d)\|_Q^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_c} \|(u^k - u^{k-1})\|_R^2 \\ -\omega_{\max} \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ -T_{\max} \leq T_i \leq T_{\max} \\ u^* = \operatorname{argmin}(J) \end{cases} \quad (34)$$

[0120] 式中, J 表示表示优化问题的代价函数, N_p 表示预测步长, N_c 表示控制步长, Q 和 R 是权重矩阵, y_d 表示期望的状态值,包含了9个状态量的目标值, u^{k-1} 表示第 $k-1$ 步的控制量, u^* 表示控制序列, T_{\max} 表示最大车轮驱动力矩。

[0121] 期望状态值中,期望车辆横向速度 $v_y^{des} = 0$,期望车辆横摆角速度为 ω_{CoM}^{des} ,在步骤S3中已提及,每个车轮的期望滑移率为 $s_i^{def} = 0$,左侧车轮和右侧车轮的期望转速在步骤S4中已提及。

[0122] S75:通过模型预测控制理论中典型的步骤方法,将上式展开后调整为标准二次规划形式: $J(x_0, \bar{u}) = \frac{1}{2} \bar{u}^T H \bar{u} + \bar{u} g(x_0) + c$ (35)。

[0123] 式中, H 是与前述的权重矩阵以及预测模型相关的矩阵, $g(x_0)$ 是与系统初始状态量 x_0 、权重矩阵以及预测模型相关的向量, c 为常数量, \bar{u} 表示控制量的矩阵。

[0124] 在每一步长下进行二次规划求解,得到控制序列 u^* 。

[0125] S8:基于控制量对轮腿式车辆的状态进行控制,使轮腿式车辆逼近期望状态;期望状态包括期望车辆横向速度、期望车辆横摆角速度、期望车轮转速以及期望车轮滑移率;期望车辆横向速度和期望车轮滑移率均为零。

[0126] 将控制序列 u^* 中的第一个结果 u_1^* 取出作为整个控制器的输出,该控制量使得各状态量跟踪逼近期望值,实现了横向运动、纵向运动、车轮滑移率的优化控制。至此,完成模型预测控制最优问题的设计,对应公式(35)。

[0127] 本发明提出的轮腿式车辆速差转向控制方法,针对轮腿式车辆分布式驱动的特点,建立了速差转向车辆7自由度动力学模型,包括速差转向车身动力学模型、车轮模型及轮胎模型。同时设计了横纵向综合控制器,上层控制器通过预瞄方法与参考模型对期望路径进行解算,下层控制器基于模型预测控制理论,对轮腿式车辆足端车轮的转速、车体横摆角速度进行优化控制,以各足端车轮的驱动力矩为输出量,实现对轮腿式车辆的纵、横向控制。

[0128] 实施例二:为了执行上述实施例一对应的方法,以实现相应的功能和技术效果,下面提供了一种轮腿式车辆速差转向控制系统。

[0129] 该系统包括:基本路况信息获取模块,用于通过感知传感器获取基本路况信息;基本路况信息包括道路宽度、转弯曲率和障碍物分布。

[0130] 期望路径规划模块,用于基于基本路况信息规划期望路径;期望路径包括期望车辆质心位置以及期望车辆纵向速度。

[0131] 期望车辆横摆角速度获得模块,用于基于期望路径,通过预瞄分析获得期望车辆横摆角速度。

[0132] 期望车轮转速计算模块,用于基于期望车辆纵向速度和期望车辆横摆角速度,计算期望车轮转速。

[0133] 动力学模型构建模块,用于构建动力学模型;动力学模型包括速差转向车身动力学模型、车轮动力学模型和轮胎动力学模型。

[0134] 状态空间方程构建模块,用于基于动力学模型构建状态空间方程。

[0135] 求解模块,用于将状态空间方程进行离散化,建立最优问题并进行二次规划求解,得到控制量。

[0136] 控制模块,用于基于控制量对轮腿式车辆的状态进行控制,使轮腿式车辆逼近期望状态;期望状态包括期望车辆横向速度、期望车辆横摆角速度、期望车轮转速以及期望车轮滑移率;期望车辆横向速度和期望车轮滑移率均为零。

[0137] 实施例三

[0138] 本实施例提供一种电子设备,包括存储器及处理器,该存储器用于存储计算机程序,该处理器运行计算机程序以使电子设备执行实施例一提供的轮腿式车辆速差转向控制方法。

[0139] 在实际应用中,上述电子设备可以是服务器。

[0140] 在实际应用中,电子设备包括:至少一个处理器(processor)、存储器(memory)、总线及通信接口(CommunicationsInterface)。

[0141] 其中:处理器、通信接口、以及存储器通过通信总线完成相互间的通信。

[0142] 通信接口,用于与其它设备进行通信。

[0143] 处理器,用于执行程序,具体可以执行上述实施例所述的方法。

[0144] 具体地,程序可以包括程序代码,该程序代码包括计算机操作指令。

[0145] 处理器可能是中央处理器CPU,或者是特定集成电路ASIC(Application Specific Integrated Circuit),或者是被配置成实施本发明实施例的一个或多个集成电路。电子设备包括的一个或多个处理器,可以是同一类型的处理器,如一个或多个CPU;也可以是不同类型的处理器,如一个或多个CPU以及一个或多个ASIC。

[0146] 存储器,用于存放程序。存储器可能包含高速RAM存储器,也可能还包括非易失性存储器(non-volatile memory),例如至少一个磁盘存储器。

[0147] 上述实施例阐明的系统、装置、模块或单元,具体可以由计算机芯片或实体实现,或者由具有某种功能的产品来实现。一种典型的实现设备为计算机。具体的,计算机例如可以为个人计算机、膝上型计算机、蜂窝电话、相机电话、智能电话、个人数字助理、媒体播放器、导航设备、电子邮件设备、游戏控制台、平板计算机、可穿戴设备或者这些设备中的任何设备的组合。

[0148] 为了描述的方便,描述以上装置时以功能分为各种单元分别描述。当然,在实施本发明时可以把各单元的功能在同一个或多个软件和/或硬件中实现。本领域内的技术人员应明白,本发明的实施例可提供为方法、系统或计算机程序产品。因此,本发明可采用完全

硬件实施例、完全软件实施例或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本发明可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0149] 本发明是参照根据本发明实施例的方法、设备(系统)和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0150] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0151] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0152] 在一个典型的配置中,计算设备包括一个或多个处理器(CPU)、输入/输出接口、网络接口和内存。

[0153] 内存可能包括计算机可读介质中的非永久性存储器,随机存取存储器(RAM)和/或非易失性内存等形式,如只读存储器(ROM)或闪存(flashRAM)。内存是计算机可读介质的示例。

[0154] 计算机可读介质包括永久性和非永久性、可移动和非可移动媒体可以由任何方法或技术来实现信息存储。信息可以是计算机可读指令、数据结构、程序的模块或其他数据。计算机的存储介质的例子包括,但不限于相变内存(PRAM)、静态随机存取存储器(SRAM)、动态随机存取存储器(DRAM)、其他类型的随机存取存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、电可擦除可编程只读存储器(EEPROM)、快闪记忆体或其他内存技术、只读光盘只读存储器(CD-ROM)、数字多功能光盘(DVD)或其他光学存储、磁盒式磁带,磁带、磁盘存储或其他磁性存储设备或任何其他非传输介质,可用于存储可以被计算设备访问的信息。按照本发明中的界定,计算机可读介质不包括暂存电脑可读媒体(transitory media),如调制的数据信号和载波。

[0155] 还需要说明的是,术语“包括”、“包含”或者其他任何其任何变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、商品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、商品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、商品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0156] 本发明可以在由计算机执行的计算机可执行指令的一般上下文中描述,例如程序模块。

[0157] 一般地,程序模块包括执行特定事务或实现特定抽象数据类型的例程、程序、对象、组件、数据结构等等。也可以在分布式计算环境中实践本发明,在这些分布式计算环境

中,由通过通信网络而被连接的远程处理设备来执行事务。在分布式计算环境中,程序模块可以位于包括存储设备在内的本地和远程计算机存储介质中。

[0158] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开的系统而言,由于其与实施例公开的方法相对应,所以描述的比较简单,相关之处参见方法部分说明即可。

[0159] 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

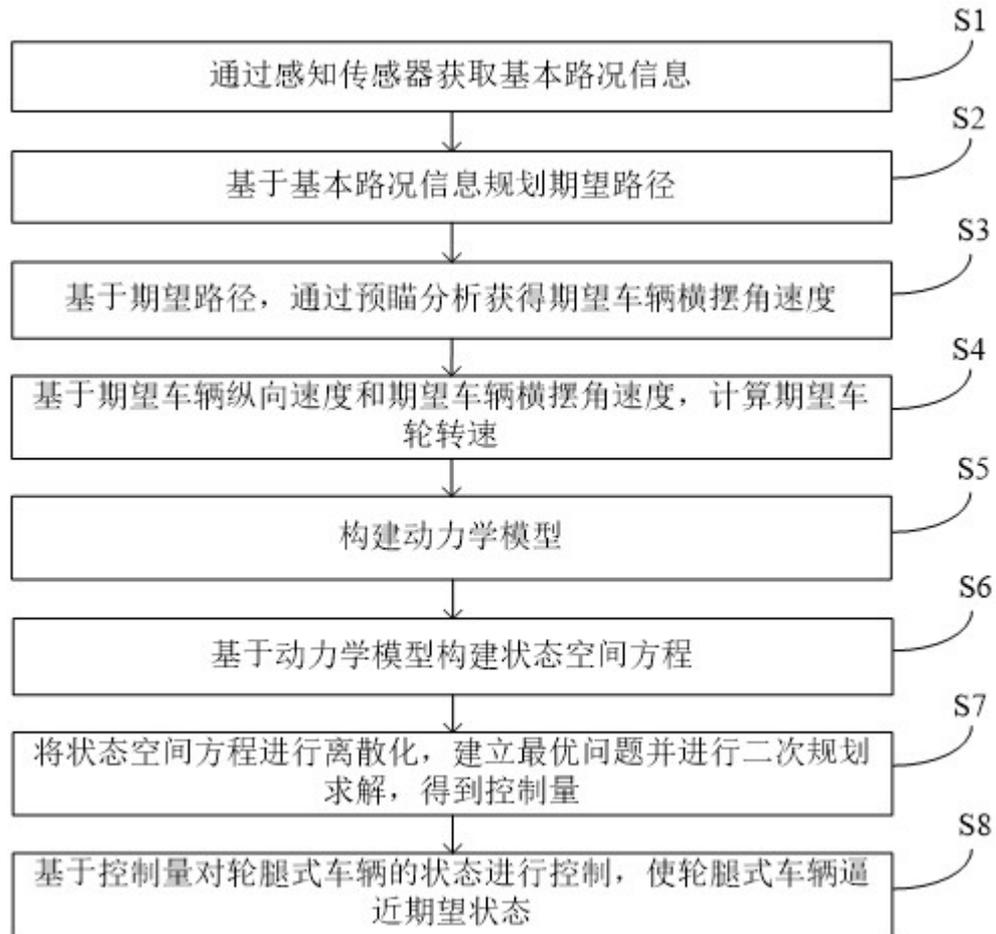


图 1

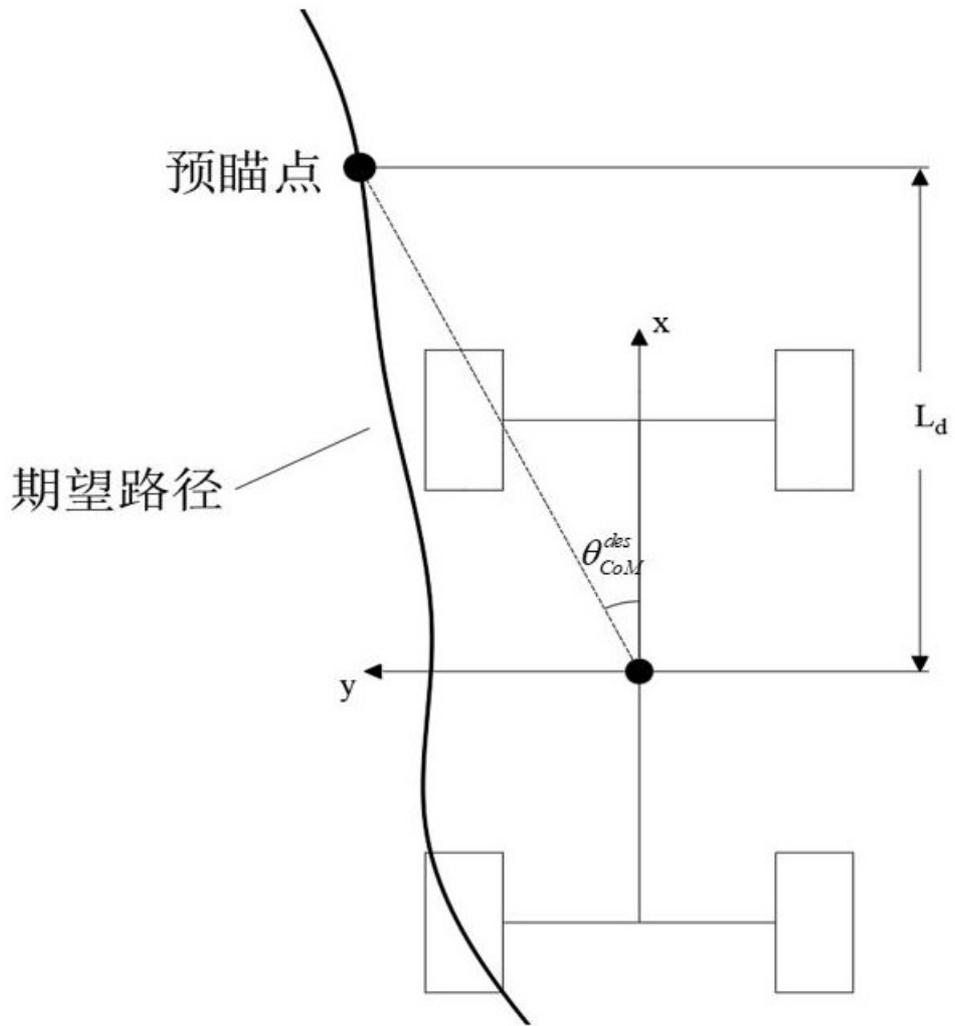


图 2

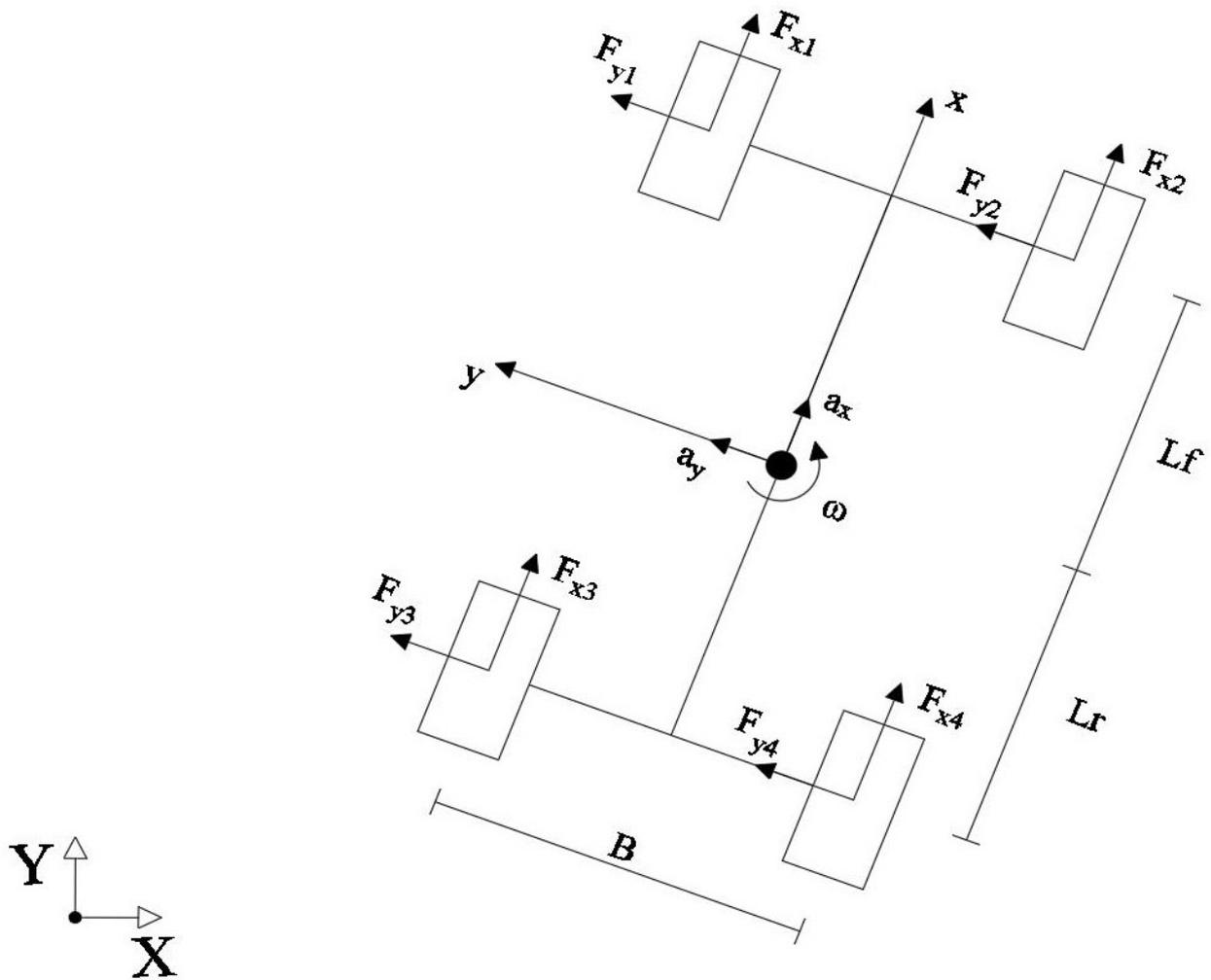


图 3

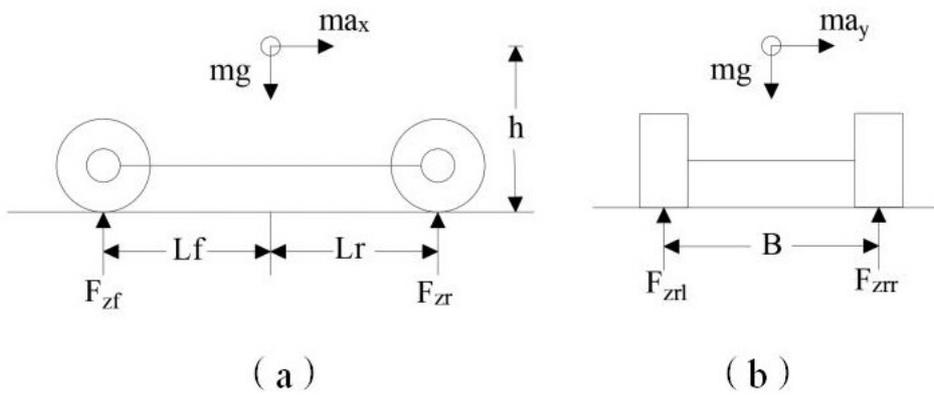


图 4

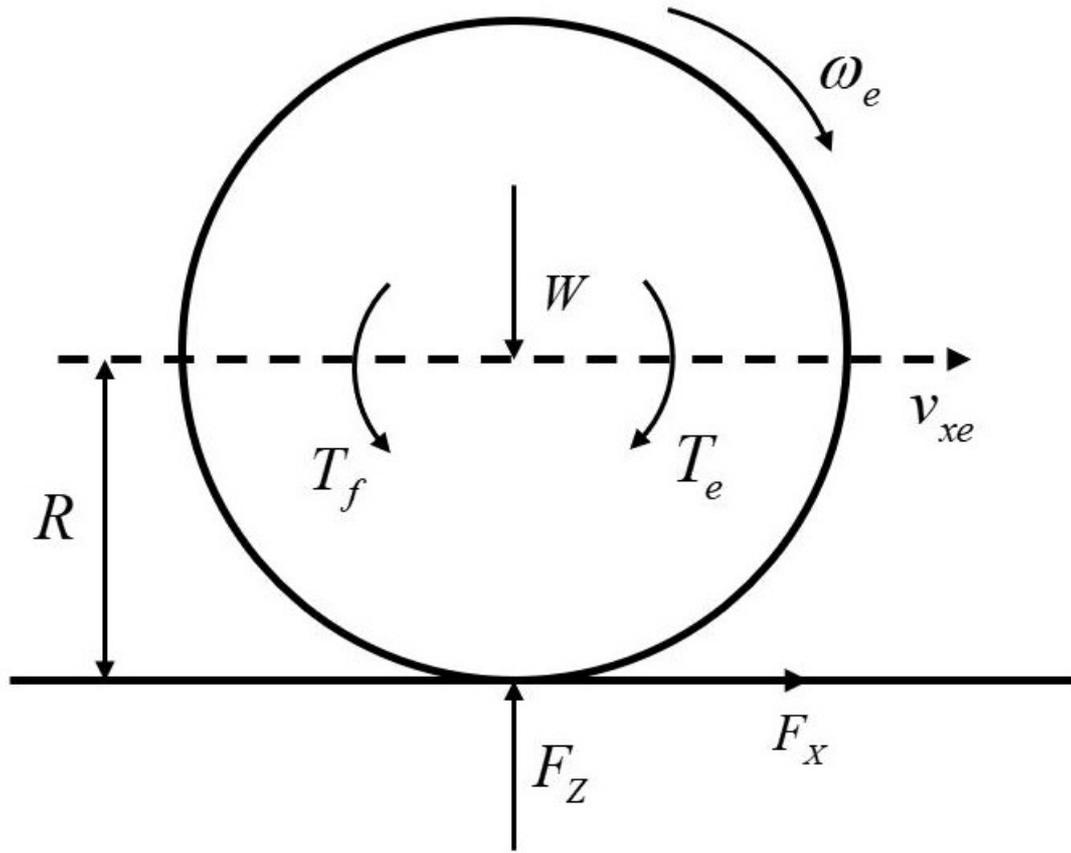


图 5