(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 114003030 B
(45)授权公告日 2023.08.08

(21)申请号 202111178307.7
(22)申请日 2021.10.09
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114003030 A
(43)申请公布日 2022.02.01
(73)专利权人 北京科技大学
地址 100083 北京市海淀区学院路30号
专利权人 北京科技大学顺德研究生院
(72)发明人 白国星 李帅 孟宇 刘立 王国栋 周蕾
(74)专利代理机构 北京市广友专利事务所有限责任公司 11237
专利代理师 张仲波 付忠林
(51)Int.Cl.
G05D 1/02(2020.01)
(56)对比文件
CN 108919794 A,2018.11.30
CN 109795502 A,2019.05.24
CN 109857098 A,2019.06.07
CN 109885052 A,2019.06.14
CN 110286683 A,2019.09.27
CN 110539752 A,2019.12.06
CN 110696793 A,2020.01.17
CN 111522237 A,2020.08.11
CN 111624992 A,2020.09.04
CN 111949036 A,2020.11.17
CN 112000095 A,2020.11.27
CN 112230651 A,2021.01.15
CN 112882474 A,2021.06.01
US 2011304633 A1,2011.12.15
WO 2019228435 A1,2019.12.05
WO 2021168669 A1,2021.09.02
WO 2021179038 A1,2021.09.16
白国星.基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪.《农业机械学报》.2020,第51卷(第9期),1-4.
审查员 姜鸿阳

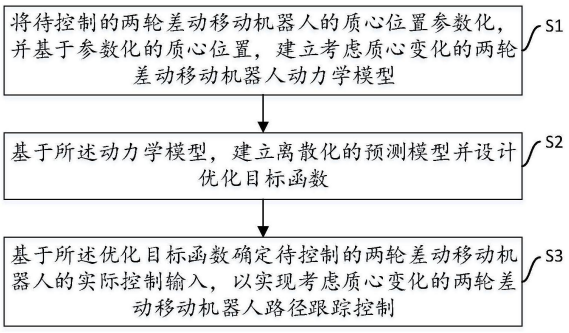
权利要求书4页 说明书10页 附图2页

(54)发明名称

考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法,包括:将待控制的两轮差动移动机器人的质心位置参数化并基于参数化的质心位置建立考虑质心变化的两轮差动移动机器人动力学模型;基于动力学模型建立离散化的预测模型并设计优化目标函数;基于优化目标函数确定待控制的两轮差动移动机器人的实际控制输入,实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制。本发明可以将侧滑纳入考虑,避免两轮差动移动机器人在以较高速度转向时路径跟踪控制的精确性下降,同时解决现有技术在两轮差动移动机器人质心变化时路径跟踪控制无解的问题。



CN 114003030 B

1.一种考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法，其特征在于，所述两轮差动移动机器人路径跟踪控制实现方法包括：

将待控制的两轮差动移动机器人的质心位置参数化，并基于参数化的质心位置，建立考虑质心变化的两轮差动移动机器人动力学模型；

基于所述动力学模型，建立离散化的预测模型并设计优化目标函数；

基于所述优化目标函数，确定待控制的两轮差动移动机器人的实际控制输入，以实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制；

所述基于参数化的质心位置，建立考虑质心变化的两轮差动移动机器人动力学模型，包括：

以机器人驱动轮所在轴线的中点为原点，驱动轮所在轴线为y轴，机器人左侧为y轴正方向，以机器人前后向中轴线为x轴，机器人前方为x轴正方向，建立固结于两轮差动移动机器人的坐标系；

假设两轮差动移动机器人装载货物后的整体质心在所述坐标系中的x坐标为l_x，y坐标为l_y，建立如下数学模型：

$$\begin{cases}\dot{v}_x=\left(F_{xl}+F_{xr}\right)/m+v_y\omega\\ \dot{v}_y=\left(F_{yl}+F_{yr}\right)/m-v_x\omega\\ \dot{\omega}=\left(\left(-F_{xl}\left(l_w/2-l_y\right)+F_{xr}\left(l_w/2+l_y\right)\right)-\left(F_{yl}+F_{yr}\right)l_x\right)/I_z\end{cases}$$

其中，v_x为质心处的纵向速度，v_y为质心处的横向速度，ω为质心处的横摆角速度，F_{xl}为左侧驱动轮的驱动力，F_{xr}为右侧驱动轮的驱动力，F_{yl}为左侧驱动轮的横向力，F_{yr}为左侧驱动轮的横向力，m为移动机器人质量，l_w为移动机器人宽度，I_z为移动机器人绕垂直方向的转动惯量；$\dot{v}_y$、$\dot{v}_x$、$\dot{\omega}$分别表示v_x、v_y、ω的微分变量，即纵向加速度、横向加速度、横摆角加速度；

根据刚体运动学，可得左侧驱动轮的纵向速度v_{xl}为：

$v_{xl}=v_x-\omega(l_w/2-l_y)$

左侧驱动轮的横向速度v_{yl}为：

$v_{yl}=v_y-\omega l_x$

右侧驱动轮的纵向速度v_{xr}为：

$v_{xr}=v_x+\omega(l_w/2+l_y)$

右侧驱动轮的横向速度v_{yr}为：

$v_{yr}=v_y-\omega l_x$

将机器人驱动轮所在轴线的中点在大地坐标系下的运动学状态表示为：

$$\begin{cases}\dot{X}=\left(v_x+\omega l_y\right)\cos\theta-\left(v_y-\omega l_x\right)\sin\theta\\ \dot{Y}=\left(v_x+\omega l_y\right)\sin\theta+\left(v_y-\omega l_x\right)\cos\theta\\ \dot{\theta}=\omega\end{cases}$$

其中，X为横坐标，Y为纵坐标，θ为航向角；$\dot{X}$、$\dot{Y}$、$\dot{\theta}$分别表示X、Y、θ的微分变量；

根据侧偏角计算公式，可得左右侧驱动力的侧偏角α_l和α_r：

$$\begin{cases}\alpha_l=\arctan\left(v_{yl}/v_{xl}\right)\\ \alpha_r=\arctan\left(v_{yr}/v_{xr}\right)\end{cases}$$

根据关于横向力的魔术公式$f_{MF}()$可知，左右侧横向力为：

$$\begin{cases}F_{yl}=f_{MF}\left(\alpha_l\right)\\ F_{yr}=f_{MF}\left(\alpha_r\right)\end{cases}$$

联立上述所有公式，建立以左右侧驱动轮的驱动力为输入的两轮差动移动机器人动力学模型：

$$\begin{cases}\dot{X}=\left(v_x+\omega l_y\right)\cos\theta-\left(v_y-\omega l_x\right)\sin\theta\\ \dot{Y}=\left(v_x+\omega l_y\right)\sin\theta+\left(v_y-\omega l_x\right)\cos\theta\\ \dot{\theta}=\omega\\ \dot{v}_x=\left(F_{xl}+F_{xr}\right)/m+v_y\omega\\ \dot{v}_y=\left(F_{yl}+F_{yr}\right)/m-v_x\omega\\ \dot{\omega}=\left(\left(-F_{xl}\left(l_w/2-l_y\right)+F_{xr}\left(l_w/2+l_y\right)\right)-\left(F_{yl}+F_{yr}\right)l_x\right)/I_z\\ F_{yl}=f_{MF}\left(\alpha_l\right)\\ F_{yr}=f_{MF}\left(\alpha_r\right)\\ \alpha_l=\arctan\left(v_{yl}/v_{xl}\right)\\ \alpha_r=\arctan\left(v_{yr}/v_{xr}\right)\\ v_{xl}=v_x-\omega\left(l_w/2-l_y\right)\\ v_{yl}=v_y-\omega l_x\\ v_{xr}=v_x+\omega\left(l_w/2+l_y\right)\\ v_{yr}=v_y-\omega l_x\end{cases}$$

并将所述动力学模型抽象为：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=f\left(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u}\right)\\ \boldsymbol{y}\subset\boldsymbol{x}\end{cases}$$

其中：

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}=\left[X\quad Y\quad\theta\quad v_x\quad v_y\quad\omega\quad F_{yl}\quad F_{yr}\quad\alpha_l\quad\alpha_r\quad v_{xl}\quad v_{yl}\quad v_{xr}\quad v_{yr}\right]^T\\ \boldsymbol{u}=\left[F_{xl}\quad F_{xr}\right]^T\\ \boldsymbol{y}=\left[X\quad Y\quad\theta\quad\alpha_l\quad\alpha_r\right]^T\end{cases}$$

在动力学模型中，质心位置为每个运输周期开始时测量获得的可变参数；其中，$\dot{\boldsymbol{x}}$为x的微分变量，f(x,u)为x和u的函数；

l_x与l_y是每次装载时通过称重系统测量的变量；

基于所述动力学模型建立离散化的预测模型，包括：

基于欧拉法离散化所述动力学模型，建立离散化的预测模型；

所述设计优化目标函数，包括：

基于迭代预测获得的状态量设计优化目标函数；

基于欧拉法离散化所述动力学模型建立离散化的预测模型，包括：

基于欧拉法离散化所述动力学模型，并写为非线性迭代的形式：

$$\boldsymbol{x}(1|t)=\boldsymbol{x}(0|t)+Tf\left(\boldsymbol{x}(0|t),\boldsymbol{u}(1|t)\right)$$

$$\vdots$$

$$\boldsymbol{x}(i|t)=\boldsymbol{x}(i-1|t)+Tf\left(\boldsymbol{x}(i-1|t),\boldsymbol{u}(i|t)\right)$$

$$\vdots$$

$$\boldsymbol{x}(N_c|t)=\boldsymbol{x}(N_c-1|t)+Tf\left(\boldsymbol{x}(N_c-1|t),\boldsymbol{u}(N_c|t)\right)$$

$$\vdots$$

$$\boldsymbol{x}(N_p|t)=\boldsymbol{x}(N_p-1|t)+Tf\left(\boldsymbol{x}(N_p-1|t),\boldsymbol{u}(N_c|t)\right)$$

其中，x(i|t)表示t时刻的第i个预测状态，u(i|t)表示t时刻的第i个预测输入，T表示迭代周期，N_c表示控制步数，N_p表示预测步数；

基于迭代预测获得的状态量设计优化目标函数，包括：

获得每步迭代对应的模型输出：

$\boldsymbol{y}(i|t)\subset\boldsymbol{x}(i|t)$，i＝1,2,…,$N_p$将速度调节控制器的优化目标函数中关于X,Y和θ的误差的惩罚项设计为：

$$J_1=\left(Q_1\sum_{i=1}^{N_p}\left\|X(i|t)-X_{\text{ref}}(i|t)\right\|^2+Q_2\sum_{i=1}^{N_p}\left\|Y(i|t)-Y_{\text{ref}}(i|t)\right\|^2+Q_3\sum_{i=1}^{N_p}\left\|\theta(i|t)-\theta_{\text{ref}}(i|t)\right\|^2\right)$$

其中，下标ref表示参考值，Q_1、Q_2、Q_3表示权重系数；X(i|t)、Y(i|t)、θ(i|t)分别表示t时刻预测模型输出的第i个横坐标、纵坐标和航向角；X_{ref}(i|t)、Y_{ref}(i|t)、θ_{rref}(i|t)分别表示t时刻的第i个横坐标参考值、纵坐标参考值和航向角参考值；

针对α_l和α_r，设计如下分段函数：

$$\begin{cases}\begin{cases}\alpha_{\text{el}}(i|t)=\left|\alpha_l(i|t)\right|-\alpha_{\max}, & \text{如果}\left|\alpha_l(i|t)\right|>\alpha_{\max}\\ \alpha_{\text{el}}(i|t)=0, & \text{如果}\left|\alpha_l(i|t)\right|\le\alpha_{\max}\end{cases}\\ \begin{cases}\alpha_{\text{er}}(i|t)=\left|\alpha_r(i|t)\right|-\alpha_{\max}, & \text{如果}\left|\alpha_r(i|t)\right|>\alpha_{\max}\\ \alpha_{\text{er}}(i|t)=0, & \text{如果}\left|\alpha_r(i|t)\right|\le\alpha_{\max}\end{cases}\end{cases},\quad i=1,2,\cdots,N_p$$

其中，$\alpha_{\max}$表示轮胎处于线性范围的最大侧偏角，α_{el}(i|t)和α_{er}(i|t)分别表示t时刻的第i个左、右侧驱动轮侧偏角优化目标值；α_l(i|t)、α_r(i|t)分别表示t时刻预测模型输出的第i个左、右侧驱动轮侧偏角；

将关于侧滑的优化目标函数设计为：

$$J_2 = R\left(\sum_{i=1}^{N_p} \left\| \alpha_{el}(i|t) \right\|^2 + \sum_{i=1}^{N_p} \left\| \alpha_{er}(i|t) \right\|^2 \right)$$

其中,R为权重系数;

得到两轮差动移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数为:

$J=J_1+J_2$

其中,J表示两轮差动移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数。

2.如权利要求1所述的考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法,其特征在于,基于所述优化目标函数,确定待控制的两轮差动移动机器人的实际控制输入,以实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制,包括:

求解所述优化目标函数的最小值并将求解得到的第一组控制变量作为实际控制输入,以实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制。

考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及移动机器人自主行驶控制技术领域，特别涉及一种考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法。

背景技术

[0002] 两轮差动移动机器人是一种常用于物流、仓储等行业的运输设备，其形式结构是机器人前后端安装两个随动万向轮，中部左右侧各安装一个独立驱动的驱动轮。两轮差动移动机器人自主运行的关键技术中包括路径跟踪控制，其功能是控制机器人沿着给定参考路径行驶，控制目标是使机器人与参考路径之间的横向偏差和航向偏差达到最小。

[0003] 目前常见的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法是无模型路径跟踪控制方法或基于运动学模型的路径跟踪控制方法。无模型路径跟踪控制方法的技术特征包括：不建立两轮差动移动机器人数学模型，直接以两轮差动移动机器人与参考路径之间的横向误差、航向误差等信号为基础设计路径跟踪控制律。基于运动学模型的路径跟踪控制的技术特征包括：首先假设两轮差动移动机器人符合非完整约束条件，即假设两轮差动移动机器人在运行时不发生侧滑，接着在前述假设条件下建立两轮差动移动机器人运动学模型，然后在该模型的基础上设计路径跟踪控制律。前述两种路径跟踪控制方法无法将侧滑纳入考虑，因此在两轮差动移动机器人以较高行驶速度转向时，路径跟踪控制的精确性、安全性无法得到保障。

[0004] 将侧滑纳入考虑的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法也有两种，一种是通过调节纵向速度避免侧滑的路径跟踪控制方法，另一种是基于动力学模型的路径跟踪控制方法。通过调节纵向速度避免侧滑的路径跟踪控制方法的技术特征包括：采用无模型路径跟踪控制方法或基于运动学模型的路径跟踪控制方法为基础，增加速度调节模块，以实现在转向时降低行驶速度，从而避免侧滑的目的。这种控制方法无法将质心变化纳入考虑，因此速度调节通常趋于保守，两轮差动移动机器人在转向时的行驶速度过低。基于动力学模型的路径跟踪控制方法的技术特征包括：以动力学模型为设计基础，控制目标中包含侧向加速度等动力学因素。提出该方法的文献(Bai G,Liu L,Meng Y,et al.Path tracking of wheeled mobile robots based on dynamic prediction model[J].IEEE Access,2019,7:39690-39701.)假设质心位于驱动轮所在轴线的中点，未解决质心变化带来的路径跟踪控制无解等问题。

发明内容

[0005] 本发明提供一种考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法，以解决现有路径跟踪控制方法无法解决侧滑导致的路径跟踪控制精确性、安全性下降或无法解决质心变化导致的行驶速度过低或路径跟踪控制无解的技术问题。

[0006] 为解决上述技术问题，本发明提供了如下技术方案：

[0007] 一方面，本发明提供了一种考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方

法，该考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法包括：

[0008] 将待控制的两轮差动移动机器人的质心位置参数化，并基于参数化的质心位置，建立考虑质心变化的两轮差动移动机器人动力学模型；

[0009] 基于所述动力学模型，建立离散化的预测模型并设计优化目标函数；

[0010] 基于所述优化目标函数，确定待控制的两轮差动移动机器人的实际控制输入，以实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制。

[0011] 进一步地，所述基于参数化的质心位置，建立考虑质心变化的两轮差动移动机器人动力学模型，包括：

[0012] 以机器人驱动轮所在轴线的中点为原点，驱动轮所在轴线为y轴，机器人左侧为y轴正方向，以机器人前后向中轴线为x轴，机器人前方为x轴正方向，建立固结于两轮差动移动机器人的坐标系；

[0013] 假设两轮差动移动机器人装载货物后的整体质心在所述坐标系中的x坐标为l_x，y坐标为l_y，建立如下数学模型：

[0014]
$$\begin{cases} \dot{v}_x = \left(F_{xl} + F_{xr}\right)/m + v_y\omega \\ \dot{v}_y = \left(F_{yl} + F_{yr}\right)/m - v_x\omega \\ \dot{\omega} = \left(\left(-F_{xl}\left(l_w/2 - l_y\right) + F_{xr}\left(l_w/2 + l_y\right)\right) - \left(F_{yl} + F_{yr}\right)l_x\right)/I_z \end{cases}$$

[0015] 其中，v_x为质心处的纵向速度，v_y为质心处的横向速度，ω为质心处的横摆角速度，F_{xl}为左侧驱动轮的驱动力，F_{xr}为右侧驱动轮的驱动力，F_{yl}为左侧驱动轮的横向力，F_{yr}为左侧驱动轮的横向力，m为移动机器人质量，l_w为移动机器人宽度，I_z为移动机器人绕垂直方向的转动惯量；$\dot{v}_y$、$\dot{v}_x$、$\dot{\omega}$分别表示v_x、v_y、ω的微分变量，即纵向加速度、横向加速度、横摆角加速度；

[0016] 根据刚体运动学，可得左侧驱动轮的纵向速度v_{xl}为：

[0017] $v_{xl}=v_x-\omega\left(l_w/2-l_y\right)$

[0018] 左侧驱动轮的横向速度v_{yl}为：

[0019] $v_{yl}=v_y-\omega l_x$

[0020] 右侧驱动轮的纵向速度v_{xr}为：

[0021] $v_{xr}=v_x+\omega\left(l_w/2+l_y\right)$

[0022] 右侧驱动轮的横向速度v_{yr}为：

[0023] $v_{yr}=v_y-\omega l_x$

[0024] 将机器人驱动轮所在轴线的中点在大地坐标系下的运动学状态表示为：

[0025]
$$\begin{cases} \dot{X} = \left(v_x + \omega l_y\right)\cos\theta - \left(v_y - \omega l_x\right)\sin\theta \\ \dot{Y} = \left(v_x + \omega l_y\right)\sin\theta + \left(v_y - \omega l_x\right)\cos\theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases}$$

[0026] 其中，X为横坐标，Y为纵坐标，θ为航向角；$\dot{X}$、$\dot{Y}$、$\dot{\theta}$分别表示X、Y、θ的微分变量；

[0027] 根据侧偏角计算公式，可得左右侧驱动力的侧偏角α_l和α_r：

[0028] $$\begin{cases}\alpha_{\mathrm{l}}=\arctan\left(v_{y\mathrm{l}}/v_{x\mathrm{l}}\right)\\ \alpha_{\mathrm{r}}=\arctan\left(v_{y\mathrm{r}}/v_{x\mathrm{r}}\right)\end{cases}$$

[0029] 根据关于横向力的魔术公式$f_{MF}()$可知，左右侧横向力为：

[0030] $$\begin{cases}F_{y\mathrm{l}}=f_{\mathrm{MF}}\left(\alpha_{\mathrm{l}}\right)\\ F_{y\mathrm{r}}=f_{\mathrm{MF}}\left(\alpha_{\mathrm{r}}\right)\end{cases}$$

[0031] 联立上述所有公式，建立以左右侧驱动轮的驱动力为输入的两轮差动移动机器人动力学模型：

[0032] $$\begin{cases}\dot{X}=\left(v_x+\omega l_y\right)\cos\theta-\left(v_y-\omega l_x\right)\sin\theta\\ \dot{Y}=\left(v_x+\omega l_y\right)\sin\theta+\left(v_y-\omega l_x\right)\cos\theta\\ \dot{\theta}=\omega\\ \dot{v}_x=\left(F_{x\mathrm{l}}+F_{x\mathrm{r}}\right)/m+v_y\omega\\ \dot{v}_y=\left(F_{y\mathrm{l}}+F_{y\mathrm{r}}\right)/m-v_x\omega\\ \dot{\omega}=\left(\left(-F_{x\mathrm{l}}\left(l_{\mathrm{w}}/2-l_y\right)+F_{x\mathrm{r}}\left(l_{\mathrm{w}}/2+l_y\right)\right)-\left(F_{y\mathrm{l}}+F_{y\mathrm{r}}\right)l_x\right)/I_z\\ F_{y\mathrm{l}}=f_{\mathrm{MF}}\left(\alpha_{\mathrm{l}}\right)\\ F_{y\mathrm{r}}=f_{\mathrm{MF}}\left(\alpha_{\mathrm{r}}\right)\\ \alpha_{\mathrm{l}}=\arctan\left(v_{y\mathrm{l}}/v_{x\mathrm{l}}\right)\\ \alpha_{\mathrm{r}}=\arctan\left(v_{y\mathrm{r}}/v_{x\mathrm{r}}\right)\\ v_{x\mathrm{l}}=v_x-\omega\left(l_{\mathrm{w}}/2-l_y\right)\\ v_{y\mathrm{l}}=v_y-\omega l_x\\ v_{x\mathrm{r}}=v_x+\omega\left(l_{\mathrm{w}}/2+l_y\right)\\ v_{y\mathrm{r}}=v_y-\omega l_x\end{cases}$$

[0033] 并将所述动力学模型抽象为：

[0034] $$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=f\left(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u}\right)\\ \boldsymbol{y}\subset\boldsymbol{x}\end{cases}$$

[0035] 其中：

[0036] $$\begin{cases}\boldsymbol{x}=\left[X\quad Y\quad\theta\quad v_x\quad v_y\quad\omega\quad F_{y\mathrm{l}}\quad F_{y\mathrm{r}}\quad\alpha_{\mathrm{l}}\quad\alpha_{\mathrm{r}}\quad v_{x\mathrm{l}}\quad v_{y\mathrm{l}}\quad v_{x\mathrm{r}}\quad v_{y\mathrm{r}}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{u}=\left[F_{x\mathrm{l}}\quad F_{x\mathrm{r}}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{y}=\left[X\quad Y\quad\theta\quad\alpha_{\mathrm{l}}\quad\alpha_{\mathrm{r}}\right]^{\mathrm{T}}\end{cases}$$

[0037] 在动力学模型中，质心位置为每个运输周期开始时测量获得的可变参数；其中，$\dot{\boldsymbol{x}}$为x的微分变量，f(x,u)为x和u的函数。

[0038] 进一步地，l_x与l_y是每次装载时通过称重系统测量的变量。

[0039] 进一步地，基于所述动力学模型建立离散化的预测模型，包括：

[0040] 基于欧拉法离散化所述动力学模型，建立离散化的预测模型。

[0041] 进一步地，所述设计优化目标函数，包括：

[0042] 基于迭代预测获得的状态量设计优化目标函数。

[0043] 进一步地，基于欧拉法离散化动力学模型建立离散化的预测模型，包括：

[0044] 基于欧拉法离散化所述动力学模型，并写为非线性迭代的形式：

[0045] $x(1|t)=x(0|t)+Tf(x(0|t),u(1|t))$

[0046] ⋮

[0047] $x(i|t)=x(i-1|t)+Tf(x(i-1|t),u(i|t))$

[0048] ⋮

[0049] $x(N_c|t)=x(N_c-1|t)+Tf(x(N_c-1|t),u(N_c|t))$

[0050] ⋮

[0051] $x(N_p|t)=x(N_p-1|t)+Tf(x(N_p-1|t),u(N_c|t))$

[0052] 其中，$x(i|t)$表示t时刻的第i个预测状态，$u(i|t)$表示t时刻的第i个预测输入，T表示迭代周期，N_c表示控制步数，N_p表示预测步数。

[0053] 进一步地，基于迭代预测获得的状态量设计优化目标函数，包括：

[0054] 获得每步迭代对应的模型输出：

[0055] $$\boldsymbol{y}(i|t)\subset\boldsymbol{x}(i|t),\quad i=1,2,\cdots,N_p$$

[0056] 将速度调节控制器的优化目标函数中关于X，Y和θ的误差的惩罚项设计为：

[0057] $$J_1=\left(Q_1\sum_{i=1}^{N_p}\left\|X(i|t)-X_{ref}(i|t)\right\|^2+Q_2\sum_{i=1}^{N_p}\left\|Y(i|t)-Y_{ref}(i|t)\right\|^2+Q_3\sum_{i=1}^{N_p}\left\|\theta(i|t)-\theta_{ref}(i|t)\right\|^2\right)$$

[0058] 其中，下标ref表示参考值，Q_1、Q_2、Q_3表示权重系数；$X(i|t)$、$Y(i|t)$、$\theta(i|t)$分别表示t时刻预测模型输出的第i个横坐标、纵坐标和航向角；$X_{ref}(i|t)$、$Y_{ref}(i|t)$、$\theta_{ref}(i|t)$分别表示t时刻的第i个横坐标参考值、纵坐标参考值和航向角参考值；

[0059] 针对α_l和α_r，设计如下分段函数：

[0060] $$\begin{cases}\alpha_{el}(i|t)=\left|\alpha_l(i|t)\right|-\alpha_{max},\quad \text{如果}\left|\alpha_l(i|t)\right|>\alpha_{max}\\ \alpha_{el}(i|t)=0,\quad \text{如果}\left|\alpha_l(i|t)\right|\le\alpha_{max}\\ \alpha_{er}(i|t)=\left|\alpha_r(i|t)\right|-\alpha_{max},\quad \text{如果}\left|\alpha_r(i|t)\right|>\alpha_{max}\\ \alpha_{er}(i|t)=0,\quad \text{如果}\left|\alpha_r(i|t)\right|\le\alpha_{max}\end{cases},\quad i=1,2,\cdots,N_p$$

[0061] 其中，α_{max}表示轮胎处于线性范围的最大侧偏角，$\alpha_{el}(i|t)$和$\alpha_{er}(i|t)$分别表示t时刻的第i个左、右侧驱动轮侧偏角优化目标值；$\alpha_l(i|t)$、$\alpha_r(i|t)$分别表示t时刻预测模型输出的第i个左、右侧驱动轮侧偏角；

[0062] 将关于侧滑的优化目标函数设计为：

[0063] $$J_2=R\left(\sum_{i=1}^{N_p}\left\|\alpha_{el}(i|t)\right\|^2+\sum_{i=1}^{N_p}\left\|\alpha_{er}(i|t)\right\|^2\right)$$

[0064] 其中，R为权重系数；

[0065] 得到两轮差动移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数为：

[0066] $J=J_1+J_2$

[0067] 其中，J表示两轮差动移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数。

[0068] 进一步地，基于所述优化目标函数，确定待控制的两轮差动移动机器人的实际控制输入，以实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制，包括：

[0069] 求解所述优化目标函数的最小值并将求解得到的第一组控制变量作为实际控制输入，以实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制。

[0070] 再一方面，本发明还提供了一种电子设备，其包括处理器和存储器；其中，存储器中存储有至少一条指令，所述指令由处理器加载并执行以实现上述方法。

[0071] 又一方面，本发明还提供了一种计算机可读存储介质，所述存储介质中存储有至少一条指令，所述指令由处理器加载并执行以实现上述方法。

[0072] 本发明提供的技术方案带来的有益效果至少包括：

[0073] 本发明的考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法首先基于参数化的质心位置建立两轮差动移动机器人动力学模型，然后基于动力学模型建立离散化的预测模型并设计优化目标函数，从而实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制。本发明可以将侧滑纳入考虑，避免两轮差动移动机器人在以较高速度转向时路径跟踪控制的精确性下降，同时解决现有技术在两轮差动移动机器人质心变化时路径跟踪控制无解的问题。

附图说明

[0074] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案，下面将对实施例描述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的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0075] 图1是本发明实施例提供的考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法的流程示意图；

[0076] 图2是本发明实施例提供的两轮差动移动机器人及其质心的示意图；

[0077] 图3是本发明实施例提供的两轮差动移动机器人在全局坐标系中的运动关系的示意图。

具体实施方式

[0078] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合附图对本发明实施方式作进一步地详细描述。

[0079] 第一实施例

[0080] 针对现有技术方案中两轮差动移动机器人在路径跟踪控制过程中侧滑、路径跟踪控制在质心变化时无解等问题，本实施例提供了一种将质心变化纳入考虑的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法，该方法可以由电子设备实现。该方法的执行流程如图1所示，包括以下步骤：

[0081] S1，将待控制的两轮差动移动机器人的质心位置参数化，并基于参数化的质心位

置，建立考虑质心变化的两轮差动移动机器人动力学模型；

[0082] S2，基于所述动力学模型，建立离散化的预测模型并设计优化目标函数；

[0083] S3，基于所述优化目标函数确定待控制的两轮差动移动机器人的实际控制输入，以实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制。

[0084] 具体地，在本实施例中，上述S1的实现过程如下：

[0085] 首先，需要说明的是，假设两轮差动移动机器人符合非完整约束条件，是忽略了两轮差动移动机器人在以较高速度转向时路径跟踪控制会出现侧滑这一现象，假设质心位置不变，是忽略了质心变化会导致两轮差动移动机器人路径跟踪控制无解这一现象。下文建立基于参数化的质心位置建立两轮差动移动机器人动力学模型的目的是考虑上述现象，更加接近两轮差动移动机器人路径跟踪控制的真实情况。基于此，S1的实现过程如下：

[0086] 首先建立固结于两轮差动移动机器人的坐标系。

[0087] 需要说明的是，如图2所示，本实施例的路径跟踪控制实现方法所针对的两轮差动移动机器人的形式结构是机器人前后端安装两个随动万向轮，中部左右侧各安装一个独立驱动的驱动轮。因此，固结于两轮差动移动机器人的坐标系以机器人驱动轮所在轴线的中点为原点，驱动轮所在轴线为y轴，机器人左侧为y轴正方向，以机器人前后向中轴线为x轴，机器人前方为x轴正方向。两轮差动移动机器人装载货物后的整体质心在前述坐标系中的x坐标为l_x，y坐标为l_y。l_x与l_y是每次装载时通过称重等系统测量的变量，同时两轮差动移动机器人装载货物后的质量m、转动惯量I_z也在每次装载时通过称重等系统测量获得。v_x为质心处的纵向速度，v_y为质心处的横向速度，ω为质心处的横摆角速度，F_{xl}为左侧驱动轮的驱动力，F_{xr}为右侧驱动轮的驱动力，F_{yl}为左侧驱动轮的横向力，F_{yr}为左侧驱动轮的横向力，l_w为移动机器人宽度。

[0088] 考虑到万向轮受力很小，受力分析时可以将万向轮忽略不计，因此可以针对两轮差动移动机器人进行如图1所示的受力分析，进而可以建立如下动力学模型：

[0089]
$$\begin{cases} \dot{v}_x = \left(F_{xl} + F_{xr}\right)/m + v_y\omega \\ \dot{v}_y = \left(F_{yl} + F_{yr}\right)/m - v_x\omega \\ \dot{\omega} = \left(\left(-F_{xl}\left(l_w/2 - l_y\right) + F_{xr}\left(l_w/2 + l_y\right)\right) - \left(F_{yl} + F_{yr}\right)l_x\right)/I_z \end{cases}$$

[0090] 其中，v_x为质心处的纵向速度，v_y为质心处的横向速度，ω为质心处的横摆角速度，F_{xl}为左侧驱动轮的驱动力，F_{xr}为右侧驱动轮的驱动力，F_{yl}为左侧驱动轮的横向力，F_{yr}为左侧驱动轮的横向力，m为移动机器人质量，l_w为移动机器人宽度，I_z为移动机器人绕垂直方向的转动惯量；$\dot{v}_y$、$\dot{v}_x$、$\dot{\omega}$分别表示v_x、v_y、ω的微分变量，即纵向加速度、横向加速度、横摆角加速度；

[0091] 考虑到通过控制滑移率控制驱动力的方法已经十分成熟，因此本实施例假设驱动力可控，且上述模型直接以左右侧驱动轮的驱动力作为控制输入。

[0092] 在此基础上，根据刚体运动学，可得左侧驱动轮的纵向速度v_{xl}为：

[0093] $v_{xl} = v_x - \omega\,(l_w/2 - l_y)$

[0094] 左侧驱动轮的横向速度v_{yl}为：

[0095] $v_{yl} = v_y - \omega\, l_x$

[0096] 右侧驱动轮的纵向速度v_{xr}为：

[0097] $v_{xr}=v_x+\omega(l_w/2+l_y)$

[0098] 右侧驱动轮的横向速度v_{yr}为：

[0099] $v_{yr}=v_y-\omega l_x$

[0100] 此外，如图3所示，机器人驱动轮所在轴线的中点在大地坐标系下的运动学状态可以表示为：

[0101]
$$\begin{cases}\dot{X}=\left(v_x+\omega l_y\right)\cos\theta-\left(v_y-\omega l_x\right)\sin\theta\\ \dot{Y}=\left(v_x+\omega l_y\right)\sin\theta+\left(v_y-\omega l_x\right)\cos\theta\\ \dot{\theta}=\omega\end{cases}$$

[0102] 其中，X为横坐标，Y为纵坐标，θ为航向角；$\dot{X}$、$\dot{Y}$、$\dot{\theta}$分别表示X、Y、θ的微分变量；

[0103] 根据侧偏角计算公式，可得左右侧驱动力的侧偏角α_l和α_r：

[0104]
$$\begin{cases}\alpha_l=\arctan\left(v_{yl}/v_{xl}\right)\\ \alpha_r=\arctan\left(v_{yr}/v_{xr}\right)\end{cases}$$

[0105] 又根据关于横向力的魔术公式$f_{MF}()$可知，左右侧横向力为：

[0106]
$$\begin{cases}F_{yl}=f_{MF}\left(\alpha_l\right)\\ F_{yr}=f_{MF}\left(\alpha_r\right)\end{cases}$$

[0107] 联立上述所有公式，即可建立以左右侧驱动轮的驱动力为输入的两轮差动移动机器人动力学模型：

[0108]
$$\begin{cases}\dot{X}=\left(v_x+\omega l_y\right)\cos\theta-\left(v_y-\omega l_x\right)\sin\theta\\ \dot{Y}=\left(v_x+\omega l_y\right)\sin\theta+\left(v_y-\omega l_x\right)\cos\theta\\ \dot{\theta}=\omega\\ \dot{v}_x=\left(F_{xl}+F_{xr}\right)/m+v_y\omega\\ \dot{v}_y=\left(F_{yl}+F_{yr}\right)/m-v_x\omega\\ \dot{\omega}=\left(\left(-F_{xl}\left(l_w/2-l_y\right)+F_{xr}\left(l_w/2+l_y\right)\right)-\left(F_{yl}+F_{yr}\right)l_x\right)/I_z\\ F_{yl}=f_{MF}\left(\alpha_l\right)\\ F_{yr}=f_{MF}\left(\alpha_r\right)\\ \alpha_l=\arctan\left(v_{yl}/v_{xl}\right)\\ \alpha_r=\arctan\left(v_{yr}/v_{xr}\right)\\ v_{xl}=v_x-\omega\left(l_w/2-l_y\right)\\ v_{yl}=v_y-\omega l_x\\ v_{xr}=v_x+\omega\left(l_w/2+l_y\right)\\ v_{yr}=v_y-\omega l_x\end{cases}$$

[0109] 并可以将上述动力学模型抽象为：

[0110] $$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u}) \\ \boldsymbol{y} \subset \boldsymbol{x} \end{cases}$$

[0111] 其中：

[0112] $$\begin{cases} \boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} X & Y & \theta & v_x & v_y & \omega & F_{yl} & F_{yr} & \alpha_l & \alpha_r & v_{xl} & v_{yl} & v_{xr} & v_{yr} \end{bmatrix}^T \\ \boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} F_{xl} & F_{xr} \end{bmatrix}^T \\ \boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} X & Y & \theta & \alpha_l & \alpha_r \end{bmatrix}^T \end{cases}$$

[0113] 在上述动力学模型中，质心位置为每个运输周期开始时测量获得的可变参数；其中，$\dot{\boldsymbol{x}}$为x的微分变量，f(x,u)为x和u的函数。

[0114] 进一步地，在本实施例中，在基于参数化的质心位置建立两轮差动移动机器人动力学模型后，即可开始执行S2～S3，具体过程如下：

[0115] 基于动力学模型建立离散化的预测模型并设计优化目标函数时，首先基于欧拉法离散化上述动力学模型，并写为非线性迭代的形式：

[0116] x(1|t)＝x(0|t)+Tf(x(0|t),u(1|t))

[0117] ⋮

[0118] x(i|t)＝x(i-1|t)+Tf(x(i-1|t),u(i|t))

[0119] ⋮

[0120] $x(N_c|t)＝x(N_c-1|t)+Tf(x(N_c-1|t),u(N_c|t))$

[0121] ⋮

[0122] $x(N_p|t)＝x(N_p-1|t)+Tf(x(N_p-1|t),u(N_c|t))$

[0123] 其中，x(i|t)表示t时刻的第i个预测状态，u(i|t)表示t时刻的第i个预测输入，T表示迭代周期，N_c表示控制步数，N_p表示预测步数。

[0124] 进一步地，基于迭代预测获得的状态量设计优化目标函数，包括：

[0125] 然后可得每步迭代对应的模型输出：

[0126] $$\boldsymbol{y}(i|t) \subset \boldsymbol{x}(i|t), \quad i = 1,2,\cdots,N_p$$

[0127] 以此为基础，可以将速度调节控制器的优化目标函数中关于X，Y和θ的误差的惩罚项设计为：

[0128] $$J_1 = \left(Q_1 \sum_{i=1}^{N_p} \left\| X(i|t) - X_{ref}(i|t) \right\|^2 + Q_2 \sum_{i=1}^{N_p} \left\| Y(i|t) - Y_{ref}(i|t) \right\|^2 + Q_3 \sum_{i=1}^{N_p} \left\| \theta(i|t) - \theta_{ref}(i|t) \right\|^2 \right)$$

[0129] 其中，下标ref表示参考值，Q_1、Q_2、Q_3表示权重系数；X(i|t)、Y(i|t)、θ(i|t)分别表示t时刻预测模型输出的第i个横坐标、纵坐标和航向角；$X_{ref}(i|t)$、$Y_{ref}(i|t)$、$\theta_{ref}(i|t)$分别表示t时刻的第i个横坐标参考值、纵坐标参考值和航向角参考值；

[0130] 针对α_l和α_r，考虑到两轮差动移动机器人在侧偏角较小时仍能正常行驶，因此可以设计如下分段函数：

[0131] $$\begin{cases}\begin{cases}\alpha_{el}(i|t)=\left|\alpha_{l}(i|t)\right|-\alpha_{max}, & \text{如果}\left|\alpha_{l}(i|t)\right|>\alpha_{max}\\ \alpha_{el}(i|t)=0, & \text{如果}\left|\alpha_{l}(i|t)\right|\le\alpha_{max}\end{cases}\\ \begin{cases}\alpha_{er}(i|t)=\left|\alpha_{r}(i|t)\right|-\alpha_{max}, & \text{如果}\left|\alpha_{r}(i|t)\right|>\alpha_{max}\\ \alpha_{er}(i|t)=0, & \text{如果}\left|\alpha_{r}(i|t)\right|\le\alpha_{max}\end{cases}\end{cases},\quad i=1,2,\cdots,N_{p}$$

[0132] 其中，α_{max}表示轮胎处于线性范围的最大侧偏角，$\alpha_{el}(i|t)$和$\alpha_{er}(i|t)$分别表示t时刻的第i个左、右侧驱动轮侧偏角优化目标值；$\alpha_{l}(i|t)$、$\alpha_{r}(i|t)$分别表示t时刻预测模型输出的第i个左、右侧驱动轮侧偏角；

[0133] 以此为基础，关于侧滑的优化目标函数可以设计为：

[0134] $$J_{2}=R\left(\sum_{i=1}^{N_{p}}\left\|\alpha_{el}(i|t)\right\|^{2}+\sum_{i=1}^{N_{p}}\left\|\alpha_{er}(i|t)\right\|^{2}\right)$$

[0135] 其中，R为权重系数；

[0136] 两轮差动移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数即为：

[0137] $J=J_{1}+J_{2}$

[0138] 求解优化目标函数最小值minJ并将求解得到的第一组控制变量作为实际控制输入，即可实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制。

[0139] 综上，本实施例的考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制方法，在将质心位置参数化后，建立考虑质心变化的两轮差动移动机器人动力学模型，在此基础上采用欧拉法建立离散化的预测模型并基于迭代预测获得的状态量设计优化目标函数，最终实现能够考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制，解决了现有技术中两轮差动移动机器人在路径跟踪控制过程中侧滑、路径跟踪控制在质心变化时无解等问题。

[0140] 第二实施例

[0141] 本实施例提供一种电子设备，其包括处理器和存储器；其中，存储器中存储有至少一条指令，所述指令由处理器加载并执行，以实现第一实施例的方法。

[0142] 该电子设备可因配置或性能不同而产生比较大的差异，可以包括一个或一个以上处理器(central processing units，CPU)和一个或一个以上的存储器，其中，存储器中存储有至少一条指令，所述指令由处理器加载并执行上述方法。

[0143] 第三实施例

[0144] 本实施例提供一种计算机可读存储介质，该存储介质中存储有至少一条指令，所述指令由处理器加载并执行，以实现上述第一实施例的方法。其中，该计算机可读存储介质可以是ROM、随机存取存储器、CD-ROM、磁带、软盘和光数据存储设备等。其内存储的指令可由终端中的处理器加载并执行上述方法。

[0145] 此外，需要说明的是，本发明可提供为方法、装置或计算机程序产品。因此，本发明实施例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，本发明实施例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上实施的计算机程序产品的形式。

[0146] 本发明实施例是参照根据本发明实施例的方法、终端设备(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、嵌入式处理机或其他可编程数据处理终端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终端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。

[0147] 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终端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。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终端设备上，使得在计算机或其他可编程终端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终端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。

[0148] 还需要说明的是，在本文中，术语“包括”、“包含”或者其任何其他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、物品或者终端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、物品或者终端设备所固有的要素。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、物品或者终端设备中还存在另外的相同要素。

[0149] 最后需要说明的是，以上所述是本发明优选实施方式，应当指出，尽管已描述了本发明优选实施例，但对于本技术领域的技术人员来说，一旦得知了本发明的基本创造性概念，在不脱离本发明所述原理的前提下，还可以做出若干改进和润饰，这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。所以，所附权利要求意欲解释为包括优选实施例以及落入本发明实施例范围的所有变更和修改。

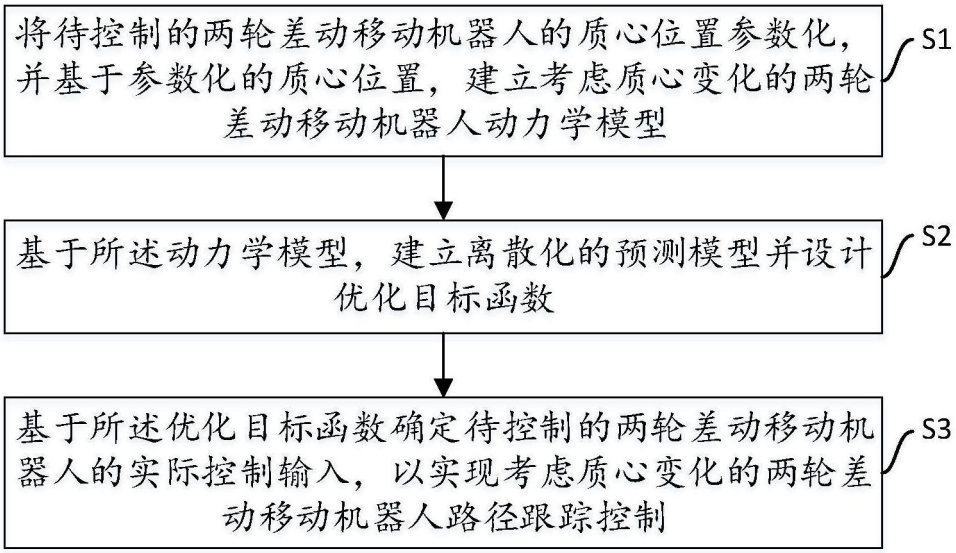

将待控制的两轮差动移动机器人的质心位置参数化，并基于参数化的质心位置，建立考虑质心变化的两轮差动移动机器人动力学模型
S1
基于所述动力学模型，建立离散化的预测模型并设计优化目标函数
S2
基于所述优化目标函数确定待控制的两轮差动移动机器人的实际控制输入，以实现考虑质心变化的两轮差动移动机器人路径跟踪控制
S3

图1

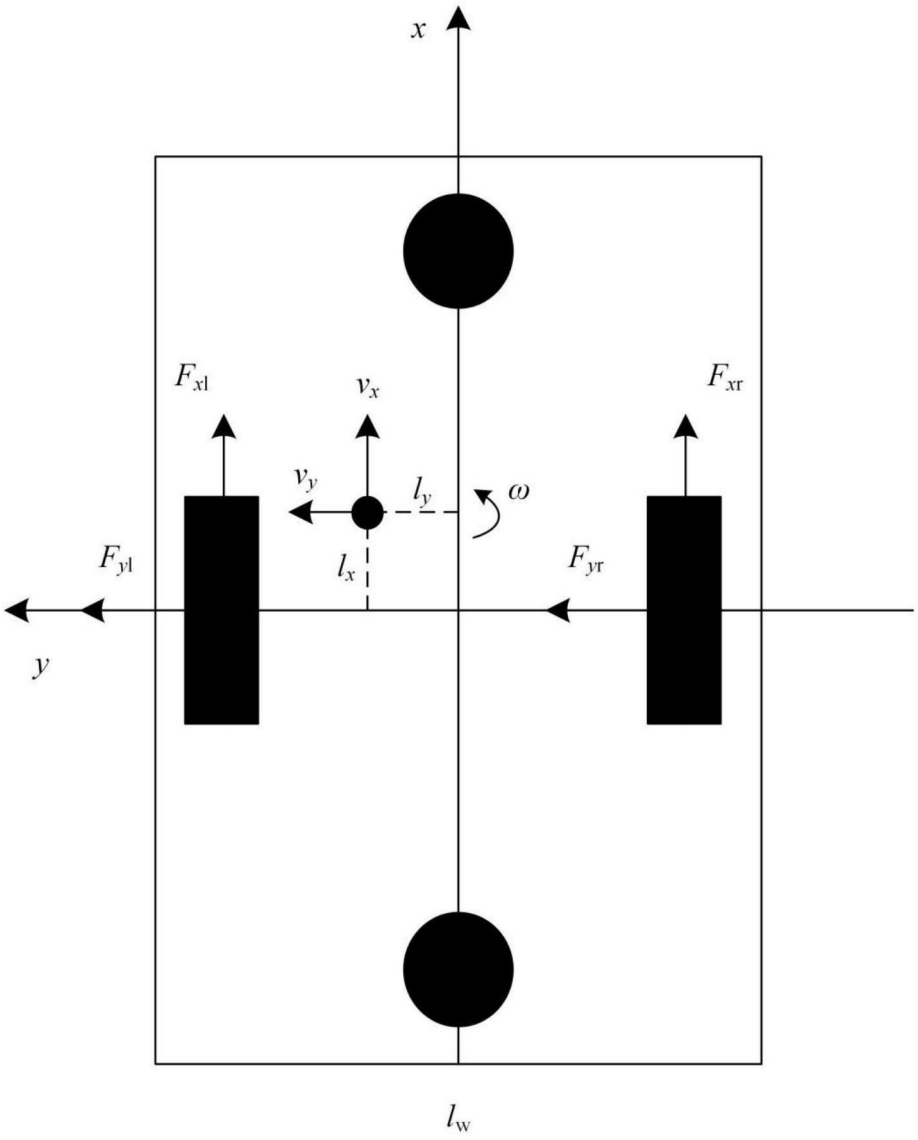


图2

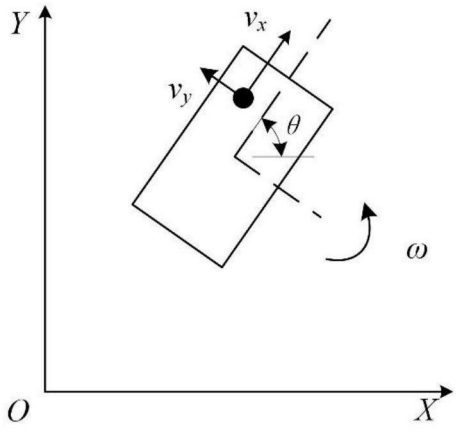


图3