



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106773714 A

(43)申请公布日 2017. 05. 31

(21)申请号 201710037357.0

(22)申请日 2017.01.19

(71)申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

(72)发明人 张承宁 张蕊

(74)专利代理机构 北京市诚辉律师事务所 11430

代理人 郎坚

(51) Int. Cl.

G05B 13/04(2006.01)

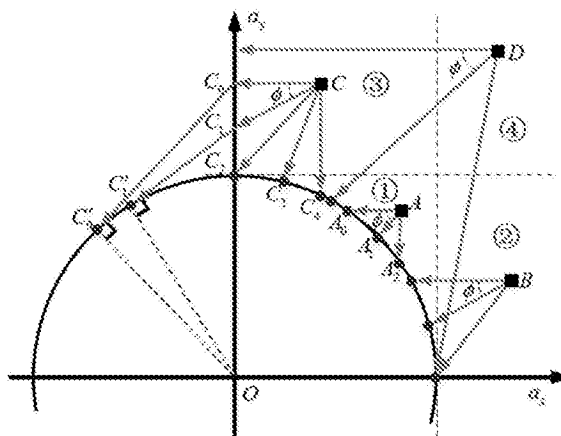
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种基于自调节粒子模型的轮毂电机驱动车辆控制方法

(57)摘要

本申请涉及一种基于自调节粒子模型的轮毂电机驱动车辆控制方法,该自调节粒子模型根据车辆动力学原理建立,适用于车辆的线性和非线性区域,尤其可提供路面附着极限下合理的车辆运动状态参考值,以确保车辆的操纵稳定性和行驶安全性。所述自调节粒子参考模型的建立包含以下步骤:一、根据车辆动力学中性转向特性,随着二自由度线性参考模型解析得到车辆理想参考侧向加速度的变化规律;二、车辆同时有纵向加速度和侧向加速度需求时,在G-G加速度摩擦圆中建立从参考合加速度到理想合加速度的——对应的映射函数MAP关系;三、通过车辆运动轨迹坐标系和车辆质心坐标系之间的转换,得到车辆理想参考运动状态值。保证了车辆在附着极限下的操纵稳定性和主动安全性,并确保驾驶员对车辆的可控性。



1. 一种基于自调节粒子模型的轮毂电机驱动车辆控制方法,其特征在于:

参考合加速度,由车辆二自由度线性模型解析得到;

车辆摩擦圆,车辆整体抓地力用量与分配的关系;

自调节粒子映射关系,是通过参考合加速度到车辆摩擦圆上的映射,得到理想合加速度的函数关系;

具体包括以下步骤:

①. 车辆匀速转弯行驶时,根据驾驶员输入的信号,通过自调节粒子参考模型解析理想侧向加速度;

②. 车辆非匀速转弯行驶时,在所述车辆摩擦圆中,根据所述自调节粒子映射关系,得到理想合加速度;

③. 将所述理想合加速度由车辆运动轨迹坐标系转换到车辆质心坐标系,得到车辆理想参考运动状态值。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤①具体包括:当车辆只有驾驶员输入的侧向加速度需求且解析参考侧向加速度  $a_y^{DI} > \mu g$  时,参考侧向加速度  $a_y^{DI}$  和理想侧向加速度  $a_y^{ref}$  的乘积等于车辆路面附着系数  $\mu$  和重力加速度  $g$  乘积的平方,得到车辆理想侧向加速度:

$$a_y^{ref} = \frac{(\mu g)^2}{a_y^{DI}} \quad (1)$$

3. 如权利要求1所述的方法,其特征在于:

偏置角,为参考合加速度映射到车辆摩擦圆上的射线与横坐标的夹角;

所述步骤②的得到理想合加速度,具体包括:在所述自调节粒子映射关系中,当车辆的参考侧向加速度  $a_y^{DI}$ 、参考纵向加速度  $a_x^{DI}$  与理想侧向加速度  $a_y^{ref}$ 、理想纵向加速度  $a_x^{ref}$  存在以下关系时:

$$\begin{cases} (a_x^{ref})^2 + (a_y^{ref})^2 = (\mu g)^2 \\ \tan \phi = \frac{a_y^{DI} - a_y^{ref}}{a_x^{DI} - a_x^{ref}} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\phi$  为偏置角;通过如下公式确定理想合加速度:

$$\begin{aligned} a_y^{ref} &= a_y^{DI} \\ a_x^{ref} &= \text{sign}(a_x^{DI}) \cdot \sqrt{(\mu g)^2 - (a_y^{ref})^2} \end{aligned} \quad (3)$$

当车辆的参考侧向加速度  $a_y^{DI}$ 、参考纵向加速度  $a_x^{DI}$  与理想侧向加速度  $a_y^{ref}$  和理想纵向加速度  $a_x^{ref}$  存在以下关系时:

$$\begin{cases} a_x^{ref} = 0 \\ a_y^{ref} = a_y^{DI} - \tan \phi \cdot a_x^{DI} \end{cases} \quad (4)$$

则通过如下公式确定理想合加速度:

$$a_y^{ref} = \frac{(\mu g)^2}{a_y^{DI}} \quad (5)$$

$$a_x^{ref} = -\sqrt{(\mu g)^2 - (a_y^{ref})^2}$$

4. 如权利要求1所述的方法,其特征在于:所述步骤③的实现采用如下公式:

$$\begin{bmatrix} a_x^{ref} \\ a_y^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x^{ref} \\ a_y^{ref} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\beta$ 是车辆质心侧偏角, $a_x^{ref}$ 是车辆在质心坐标系中的纵向加速度, $a_y^{ref}$ 是车辆在质心坐标系中的侧向加速度。

5. 如权利要求4所述的方法,其特征在于:当所述车辆质心偏角 $\beta$ 为0时,车辆参考动力学状态值可用如下公式表示:

$$\begin{cases} v_x^{ref} = v_x + \int a_x^{ref} dt \\ r^{ref} = \frac{a_y^{ref}}{v_x^{ref}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $v_x$ 是车辆初始纵向速度; $v_x^{ref}$ 是车辆在其质心坐标系中的理想纵向速度, $r^{ref}$ 是车辆横摆角速度。

## 一种基于自调节粒子模型的轮毂电机驱动车辆控制方法

### 技术领域

[0001] 本申请涉及一种轮毂电机驱动车辆的控制方法,尤其涉及基于自调节粒子模型,适用于在路面附着极限下提供合理车辆运动状态值的方法。

### 背景技术

[0002] 轮毂电机驱动车辆是目前电动汽车领域中的研究热点之一,当轮毂电机驱动车辆运行在附着极限时,通常需要参考模型提供合理的车辆参考运动状态值,才能真正地发挥轮毂电机驱动车辆的性能优势。目前一般采用二自由度线性模型作为参考模型来生成车辆控制系统参考状态值。然而,二自由度线性模型具有以下三个方面的局限性:(a).二自由度模型是线性的,只可表示车辆在侧向加速度小于 $0.4g$ 的线性区域内的基本特性,不能真实反映车辆非线性区域(大侧向加速度)的动力学特性;(b).在路面-轮胎附着极限附近,二自由度模型将提供不合理的车辆动力学状态值;(c).当车辆需求广义力超出路面附着极限时,车辆目标状态值将会以一定方式达到饱和,此时应采用非线性参考模型解析驾驶员输入信号;否则,驾驶员输入信号与车辆目标轨迹的相互耦合关系在饱和点将会变得非常微弱,换句话说,驾驶员将失去对车辆行驶轨迹的可控性。

[0003] 因此,需要建立一种适用于线性和非线性区域的参考模型,以保证车辆在附着极限下的操纵稳定性和主动安全性,并确保驾驶员对车辆的可控性。

### 发明内容

[0004] 针对上述本领域存在的技术问题,本发明提供了一种轮毂电机驱动车辆的自调节粒子模型。该模型将轮胎摩擦圆应用于整车层面,从而将运动中的车辆看做粒子(particle)来进行建模。该模型的构建具体包括以下步骤:

[0005] ①.车辆匀速弯道行驶时,根据驾驶员输入信号,通过车辆二自由度线性参考模型解析获得车辆参考侧向加速度;并依据车辆动力学中性转向特性,建立理想侧向加速度随着参考侧向加速度的变化规律,即就是,车辆参考侧向加速度和理想侧向加速度的乘积是车辆路面附着系数和重力加速度乘积的平方,进而可以获得车辆在线性和非线性区域,尤其是附着极限下合理的运动状态值。

[0006] ②.车辆非匀速弯道行驶时,同时有纵向加速度和侧向加速度需求,在车辆摩擦圆中,构建参考合加速度与理想合加速度之间的自调节粒子映射关系,得到理想合加速度矢量;

[0007] ③.将所述车辆理想合加速度矢量由车辆运动轨迹坐标系转换到车辆质心坐标系,得到车辆理想参考运动状态值。

[0008] 所述步骤①中通过自调节粒子模型解析获得车辆理想侧向加速度,具体包括:当车辆只有驾驶员输入的侧向加速度需求且解析参考侧向加速度 $a_y^{Dr} > \mu g$ 时,向车辆施加一个侧向加速度和制动加速度的理想合加速度,且所述理想合加速度与车辆质心合速度方向呈钝角;根据参考侧向加速度 $a_y^{Dr}$ 和理想侧向加速度 $a_y^{ref}$ 的乘积等于车辆路面附着系数 $\mu$ 和重

力加速度 $g$ 乘积的平方的关系,得到车辆理想侧向加速度:

$$[0009] \quad a_y^{ref} = \frac{(\mu g)^2}{a_y^{DI}} \quad (1)$$

[0010] 所述步骤②的得到车辆理想合加速度,具体包括:在所述自调节粒子映射关系中,当车辆的参考侧向加速度 $a_y^{DI}$ 、参考纵向加速度 $a_x^{DI}$ 与理想侧向加速度 $a_y^{ref}$ 、理想纵向加速度 $a_x^{ref}$ 存在以下关系时:

$$[0011] \quad \begin{cases} (a_x^{ref})^2 + (a_y^{ref})^2 = (\mu g)^2 \\ \tan \phi = \frac{a_y^{DI} - a_y^{ref}}{a_x^{DI} - a_x^{ref}} \end{cases} \quad (2)$$

[0012] 其中, $\phi$ 为偏置角,为参考合加速度映射车辆摩擦圆上的射线与横坐标的夹角;通过如下公式确定理想合加速度:

$$[0013] \quad \begin{cases} a_y^{ref} = a_y^{DI} \\ a_x^{ref} = \text{sign}(a_x^{DI}) \cdot \sqrt{(\mu g)^2 - (a_y^{ref})^2} \end{cases} \quad (3)$$

[0014] 当车辆的参考侧向加速度 $a_y^{DI}$ 、参考纵向加速度 $a_x^{DI}$ 与理想侧向加速度 $a_y^{ref}$ 和理想纵向加速度 $a_x^{ref}$ 存在以下关系时:

$$[0015] \quad \begin{cases} a_x^{ref} = 0 \\ a_y^{ref} = a_y^{DI} - \tan \phi \cdot a_x^{DI} \end{cases} \quad (4)$$

[0016] 则通过如下公式确定理想合加速度:

$$[0017] \quad \begin{cases} a_y^{ref} = \frac{(\mu g)^2}{a_y^{DI}} \\ a_x^{ref} = -\sqrt{(\mu g)^2 - (a_y^{ref})^2} \end{cases} \quad (5)$$

[0018] 所述步骤③的实现采用如下公式:

$$[0019] \quad \begin{bmatrix} a_x^{ref} \\ a_y^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x^{ref} \\ a_y^{ref} \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0020] 其中, $\beta$ 是车辆质心侧偏角, $a_x^{ref}$ 是车辆在质心坐标系中的纵向加速度, $a_y^{ref}$ 是车辆在质心坐标系中的侧向加速度。

[0021] 当所述车辆质心偏角 $\beta$ 为0时,车辆参考动力学状态值可用如下公式表示:

$$[0022] \quad \begin{cases} v_x^{ref} = v_x + \int a_x^{ref} dt \\ r^{ref} = \frac{a_y^{ref}}{v_x^{ref}} \end{cases} \quad (7)$$

[0023] 其中, $v_x$ 是车辆初始纵向速度; $v_x^{ref}$ 是车辆在其质心坐标系中的理想纵向速度, $r^{ref}$ 是车辆横摆角速度。

[0024] 本发明所提供的上述方法适用于车辆的线性和非线性区域,可提供路面附着极限下合理的车辆运动状态参考值,能够确保车辆的操纵稳定性和行驶安全性。

## 附图说明

- [0025] 附图1为自调节粒子模型在车辆摩擦圆中的示意图
- [0026] 附图2为在G-G图第一象限中驾驶员解析参考合加速度到MPR理想参考合加速度的映射
- [0027] 附图3为驾驶员解析参考合加速度到理想参考合加速度的MPR映射一归一化的G-G图
- [0028] 附图4为车辆理想合加速度在车辆运动坐标系和车辆质心坐标系之间的转换示意图

## 具体实施方式

- [0029] 本发明以车辆整体为研究对象,因此本发明中的各加速度均指车辆的加速度。
- [0030] 公知的,把轮胎做为一个研究对象,轮胎的抓地力在车辆转向过程中存在极限,虽然抓地力总量是有限的,但是如何分配却没有限制,可以同时分配给加速和转向,或者减速与转向,于是公知的利用摩擦圆描述轮胎抓地力用量与分配。由于本发明将车辆整体作为研究对象,因此利用上述轮胎摩擦圆的概念提出车辆摩擦圆来描述车辆整体抓地力用量与分配。
- [0031] 本发明中,将在自调节粒子模型中,参考合加速度的点映射车辆摩擦圆上的射线与横坐标的夹角称为偏置角,字母 $\phi$ 表示。车辆在加速转弯工况(既有纵向加速度需求,又有侧向加速度需求)下,如果侧向动力学优先,则最优的选择是 $\phi = 0$ ;反之如果纵向动力学优先,则取 $\phi > 0$ 。一般来说,偏置角 $\phi$ 被考虑为一个设计参数,并根据驾驶风格和人为因素等不同标准来调整。
- [0032] 本发明中的自调节粒子模型中,参考合加速度与理想合加速度的函数关系,也是参考合加速度到车辆摩擦圆上的映射,称为自调节粒子映射或MPR映射。
- [0033] 下面结合附图对本发明进行进一步详细说明。如附图1所示,A代表用二自由度线性模型解析得到的参考合加速度,A'代表利用自调节粒子模型解析得到的理想合加速度。
- [0034] 车辆匀速弯道行驶时,根据驾驶员输入的信号,通过自调节粒子模型解析获得理想侧向加速度,如图1中A'。具体包括:当车辆只有侧向加速度需求且解析得到参考侧向加速度 $a_y^{Di} > \mu g$ 时,向车辆施加一个侧向加速度和制动加速度的合加速度矢量,且合加速度矢量与车辆质心合速度方向呈钝角;根据参考侧向加速度 $a_y^{Di}$ (OB)和理想侧向加速度 $a_y^{ref}$ (OC)的乘积等于车辆路面附着系数 $\mu$ 和重力加速度 $g$ 乘积的平方的关系,得到理想侧向加速度 $a_y^{ref}$ 。
- [0035] 解析参考侧向加速度 $a_y^{Di}$ 和理想侧向加速度 $a_y^{ref}$ 满足直角三角形射影定理: $\overline{OB} \cdot \overline{OA} = \overline{OA'}^2$ ,可得 $a_y^{ref} a_y^{Di} = (\mu g)^2$ 。
- [0036] 车辆非匀速弯道行驶时,为建立解析参考合加速度到车辆摩擦圆上的映射,本发明分析车辆在加速转弯工况、不同偏置角作用下,车辆理想侧向加速度随着参考合加速度的变化规律。如图2所示,图中方点代表二自由度线性模型解析获得的参考合加速度,圆点表根据自调节粒子模型得到的理想合加速度。图中,在车辆摩擦圆图中,将第一象限分成四

个部分：①、②、③、④，其中①、②、③、④部分皆为车辆摩擦圆以外的区域。

[0037] 如附图2所示，区域③具有代表性，下面以区域③C点例进行简要说明，C代表用二自由度线性模型解析得到的参考合加速度。

[0038]  $C'_0C'_1C_2C_3$ 是利用自调节粒子模型解析得到的理想合加速度。

[0039] 以点C作为起始点，其中一个映射选择是减小纵向需求至零，即选择水平映射C→C<sub>0</sub>，随后运用附图1所示的纯侧向加速度需求下的MPR映射，C<sub>0</sub>→C'<sub>0</sub>。显然，参考合加速度靠近a<sub>y</sub>轴时，此映射也是连续的。更一般的其他映射选择包括一个偏置角φ，即同时减小纵向和侧向加速度需求，例如：C→C<sub>1</sub>→C'<sub>1</sub>。

[0040] 在φ < π/2的前提下，参考合加速度a<sup>DI</sup>靠近a<sub>y</sub>轴时，此映射是连续的。区域②和④的偏置角φ应该是有界的，以避免侧向加速度符号的逆转迹象。

[0041] 附图2中，具体映射如下：

[0042] (a) 在区域①中，驾驶员参考合加速度 $A(a_x^{DI}, a_y^{DI})$ 和理想合加速度 $A_i(a_x^{ref}, a_y^{ref})$ 之间的关系可表示为：

$$[0043] \begin{cases} (a_x^{ref})^2 + (a_y^{ref})^2 = (\mu g)^2 \\ \tan \phi = \frac{a_y^{DI} - a_y^{ref}}{a_x^{DI} - a_x^{ref}} \end{cases}$$

[0044] A<sub>i</sub>是不同偏置角下的理想合加速度，如A<sub>0</sub>、A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>，偏置角φ的有效范围是0 ≤ φ < π/2。

[0045] (b) 在区域②中，驾驶员参考合加速度B和理想合加速度B<sub>i</sub>二者的关系和区域①中是一样的；不同的是偏置角φ的有效范围不同，即0 ≤ φ ≤ arctan[a<sub>y</sub><sup>DI</sup> / (a<sub>x</sub><sup>DI</sup> - μg)]。

[0046] (c) 在区域③中，如果0 = φ，对应的纯侧向加速度需求下的MPR映射点是C<sub>0</sub>，然后遵循如附图1所示的纯侧向加速度需求下的MPR理论将参考加速度映射到车辆摩擦圆上点C'<sub>0</sub>；

[0047] 如果0 < φ < arctan[(a<sub>y</sub><sup>DI</sup> - μg) / a<sub>x</sub><sup>DI</sup>]，对应的MPR映射点是C<sub>1</sub>，然后遵循如附图3所示的纯侧向加速度需求下的MPR理论将参考合加速度映射到车辆摩擦圆上点C'<sub>1</sub>；

[0048] 如果φ = arctan[(a<sub>y</sub><sup>DI</sup> - μg) / a<sub>x</sub><sup>DI</sup>]，对应的MPR映射点是C<sub>2</sub>；

[0049] 由上可见如果0 ≤ φ ≤ arctan[(a<sub>y</sub><sup>DI</sup> - μg) / a<sub>x</sub><sup>DI</sup>]，对应的加速点是C<sub>0</sub>、C<sub>1</sub>或C<sub>2</sub>，驾驶员参考合加速度 $A(a_x^{DI}, a_y^{DI})$ 和理想合加速度 $A_i(a_x^{ref}, a_y^{ref})$ 之间的关系可表示为：

$$[0050] \begin{cases} a_x^{ref} = 0 \\ a_y^{ref} = a_y^{DI} - \tan \phi \cdot a_x^{DI} \end{cases}$$

[0051] 然后遵循纯侧向加速度需求下的MPR理论将参考加速度映射到车辆摩擦圆上点C'<sub>0</sub>、C'<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>，如附图2所示。

[0052] 否则，如果arctan[(a<sub>y</sub><sup>DI</sup> - μg) / a<sub>x</sub><sup>DI</sup>] < φ < π/2，相应的MPR加速度点是C<sub>3</sub>或C<sub>4</sub>，和区域①相同。

[0053] (d) 在区域④中的映射和区域③中的映射基本一致，不同的是偏置角φ的工作区

域。

[0054] 上面分析了车辆在加速转弯工况下,不同偏置角对车辆理想纵向加速度和侧向加速度都的影响规律,这一影响规律也同样适用于车辆的减速制动工况。当车辆在路面附着极限下减速转弯时,在车辆摩擦圆的第二象限中, $\phi > 0$  (转向和制动相结合, $a_x^{DI} < 0$ ) 更合适,强调了减速。最终生成的映射显示在归一化车辆摩擦圆中,如附图3所示。

[0055] 附图3所示的MPR映射,上下半平面映射是对称的,而左右平面的映射是不对称的(制动/加速);图中方点代表二自由度线性模型解析获得的参考合加速度,圆点表根据自调节粒子模型得到的理想合加速度。当驾驶员解析加速度需求 $(a_x^{DI}, a_y^{DI})$ 位于点D或G所在的区域,理想合加速度可表示为:

$$[0056] \quad a_y^{ref} = a_y^{DI}$$

$$[0057] \quad a_x^{ref} = \text{sign}(a_x^{DI}) \cdot \sqrt{(\mu g)^2 - (a_y^{ref})^2}$$

[0058] 当驾驶员解析的输入加速度需求位于点E(或F)所在的区域,通过MPR调节的输出理想合加速度可定义为:

$$[0059] \quad a_y^{ref} = \frac{(\mu g)^2}{a_y^{DI}}$$

$$[0060] \quad a_x^{ref} = -\sqrt{(\mu g)^2 - (a_y^{ref})^2}$$

[0061] 从上述自调节粒子模型中得到的参考合加速度向量是在车辆轨迹坐标系 $(x, y)$ , $x$ 轴是车辆质心运动方向, $y$ 轴垂直于 $x$ 轴;而车辆状态值一般表述在车辆质心坐标系 $(X, Y)$ 上,如附图4所示,其中 $x$ 轴和 $X$ 轴之间的夹角是车辆质心侧偏角 $\beta$ 。由下式实现理想参考合加速度在车辆轨迹坐标系和车辆质心坐标系之间的转换:

$$[0062] \quad \begin{bmatrix} a_x^{ref} \\ a_y^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x^{ref} \\ a_y^{ref} \end{bmatrix}$$

[0063] 其中, $a_x^{ref}$ 是车辆在质心坐标系中的纵向加速度, $a_y^{ref}$ 是车辆在质心坐标系中的侧向加速度。

[0064] 当车辆质心侧偏角的参考值设置为零时,车辆参考动力学状态值可用如下公式表示:

$$[0065] \quad \begin{cases} v_x^{ref} = v_x + \int a_x^{ref} dt \\ r^{ref} = \frac{a_y^{ref}}{v_x^{ref}} \end{cases}$$

[0066] 其中, $v_x$ 是车辆初始纵向速度; $v_x^{ref}$ 是车辆在其质心坐标系中的理想纵向速度, $r^{ref}$ 是车辆横摆角速度。

[0067] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,对于本领域的普通技术人员而言,可以理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本发明的范围由所附权利要求及其等同物限定。



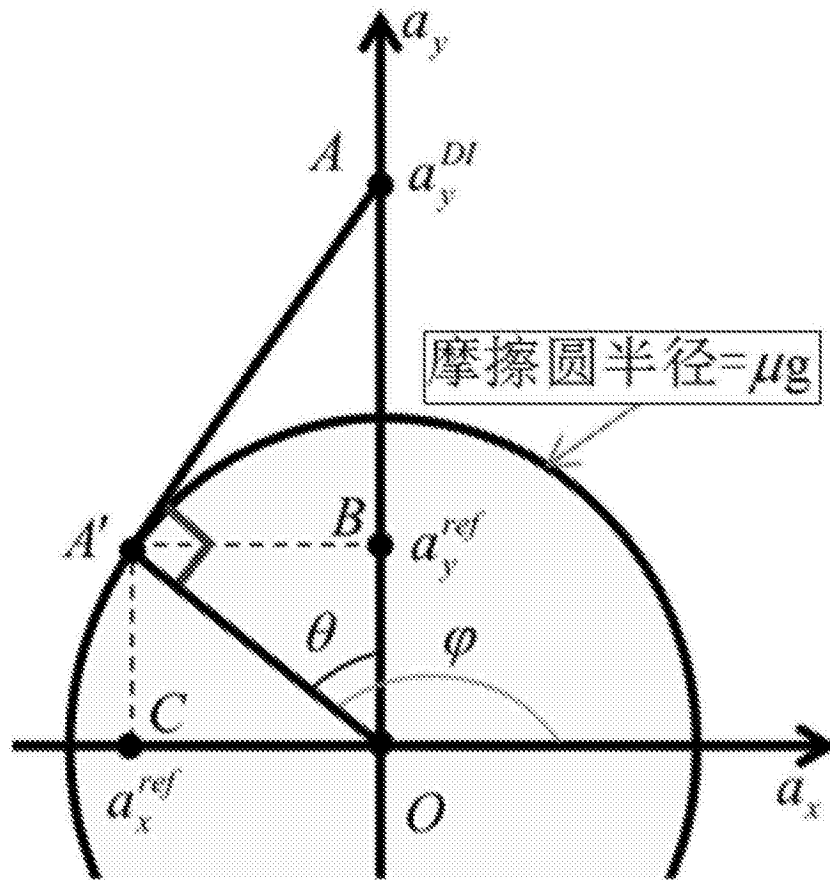


图1

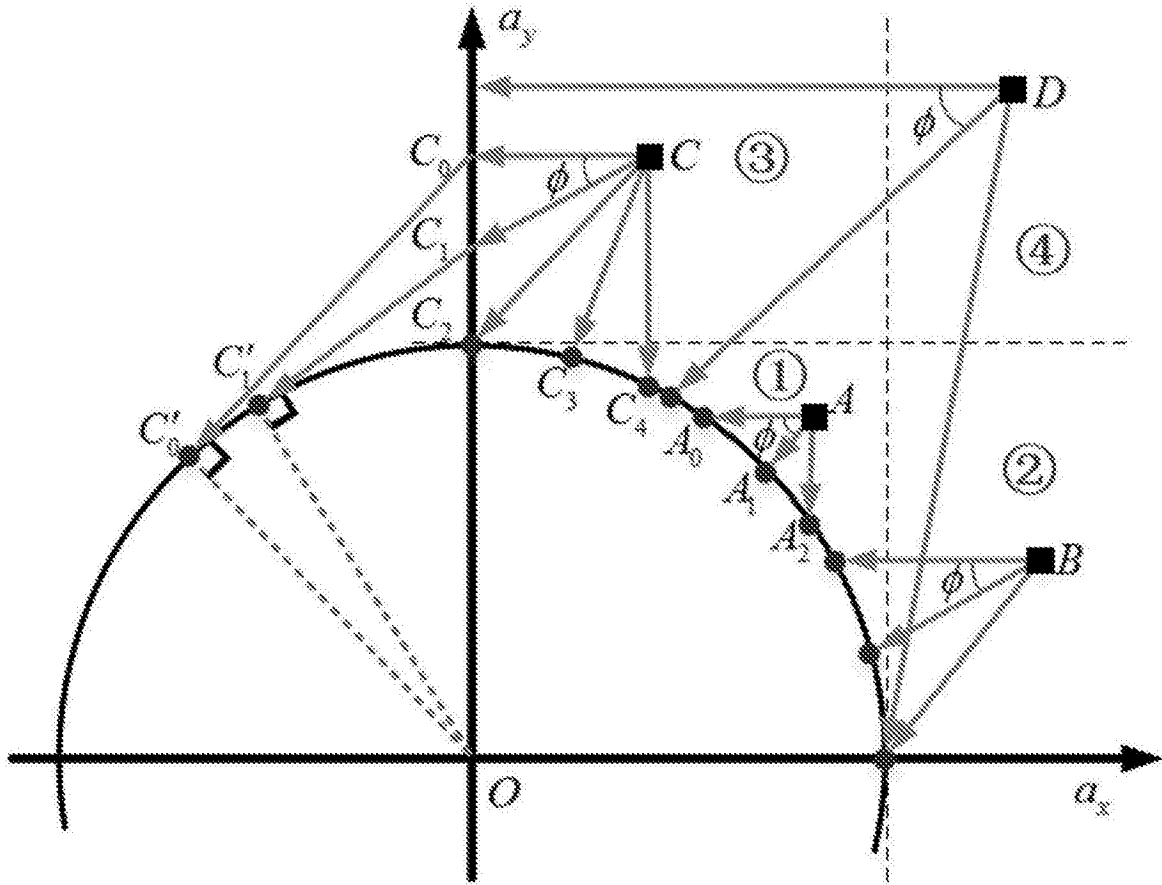


图2

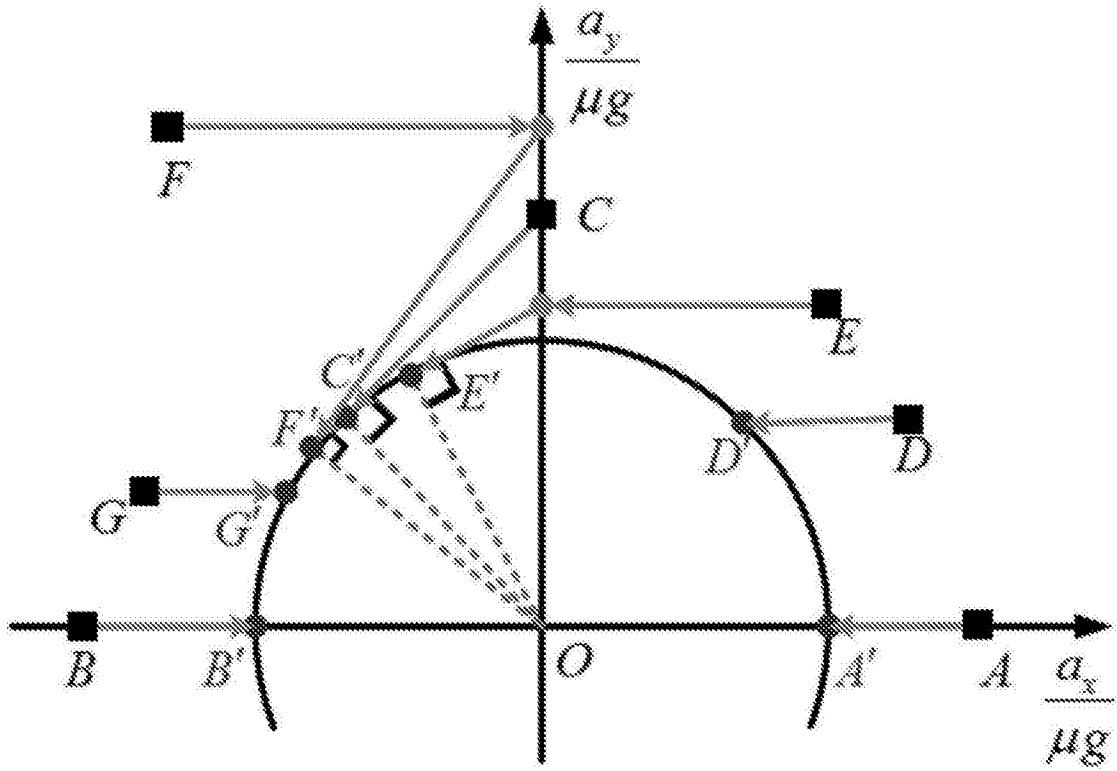


图3

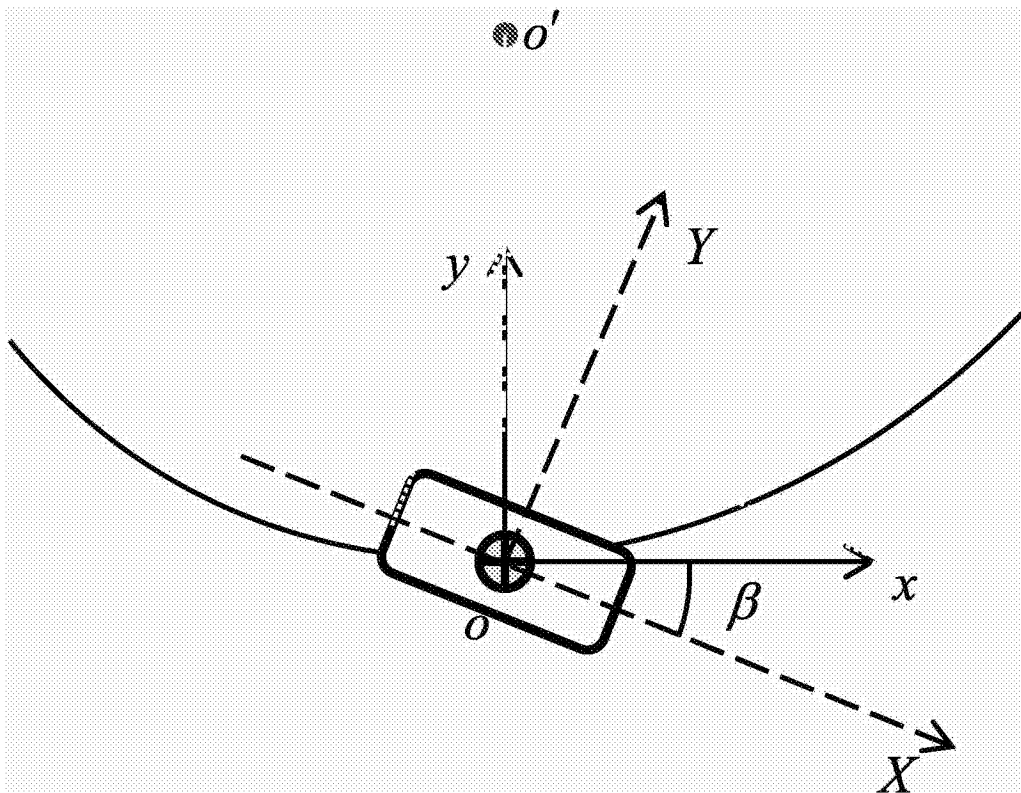


图4