

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G01M 17/007 (2006.01)

G01P 3/00 (2006.01)



# [12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200710099541.4

[45] 授权公告日 2009年4月22日

[11] 授权公告号 CN 100480664C

[22] 申请日 2007.5.24

[21] 申请号 200710099541.4

[73] 专利权人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园

[72] 发明人 罗禹贡 邹广才 李克强 连小珉  
杨殿阁 郑四发 王建强

[56] 参考文献

CN1865895A 2006.11.22

CN1295952A 2001.5.23

CN1659059A 2005.8.24

汽车 ABS 参考速度的确定方法. 王仁广, 刘昭度, 齐志权, 崔海峰. 农机化研究, 第3期. 2006

汽车制动过程中瞬时车速和轮速的仿真计算. 羊拯民, 李伟. 合肥工业大学学报(自然科学版), 第23卷第3期. 2000

审查员 杨延春

[74] 专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事务所

代理人 罗文群

权利要求书1页 说明书4页

[54] 发明名称

一种全轮驱动的电驱动车辆运动参数的测试方法

[57] 摘要

本发明涉及一种全轮驱动的电驱动车辆运动参数的测试方法,属于电驱动车辆控制技术领域。首先利用各车轮轮速信号和各驱动电机扭矩信号,计算总的地面纵向力和整车加速度,利用非转向车轮的转速和滑转率、滑移率表示整车车速,然后将以上结果代入非转向车轮的滑转率、滑移率的微分表达式,得到非转向车轮的滑转率的微分方程,最后通过积分计算非转向车轮的滑转率,并反推出整车车速,再计算转向车轮的滑转率。本方法针对全轮驱动的电驱动车辆,不依赖于基准轮速的选取,而且不需要使用加速度传感器或者GPS装置测量车辆纵向加速度,仅利用各个车轮的轮速信号以及各个驱动电机的扭矩、获得准确的各个车轮的滑转率、滑移率以及整车车速。

1、一种全轮驱动的电驱车辆运动参数的测试方法，其特征在于该方法包括以下步骤：

- (1) 分别测量所有车轮的转速 $\omega_i$ ，进而分别获得所有车轮轮速的变化率 $\dot{\omega}_i$ ；
- (2) 从车辆的电机驱动器或扭矩传感器上获得所有车轮的驱动电机的输出扭矩值 $T_i$ ；
- (3) 根据上述变化率 $\dot{\omega}_i$ 和输出扭矩值 $T_i$ ，计算得到各个车轮所获得的地面纵向力 $F_{di}$ ，

计算公式为： $F_{di} = \frac{T_i - J\dot{\omega}_i}{r}$ ，其中 $r$ 是车轮半径， $J$ 是车轮系统转动惯量；

- (4) 对上述所有车轮获得的地面纵向力求和，得到作用在整车上的总地面纵向力 $F_d$ ；
- (5) 将上述总地面纵向力除以整车质量 $M$ ，得到整车纵向加速度 $\dot{v}$ ；
- (6) 根据步骤(1)测量得到的两个同轴非转向车轮轮速 $\omega_{r1}$ 和 $\omega_{r2}$ 、根据步骤(5)得到的整车纵向加速度 $\dot{v}$ 计算式和车轮半径 $r$ ，得到两个同轴非转向车轮滑转率的变化率 $\dot{\lambda}_{r1}$ 和 $\dot{\lambda}_{r2}$ 表达式为：

当车轮处于驱动状态时：

$$\dot{\lambda}_{r1} = -\frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}}\lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{\dot{v}}{\omega_{r1}r} = -\frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}}\lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{\sum F_{di}}{Mr\omega_{r1}},$$

$$\dot{\lambda}_{r2} = -\frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}}\lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{\dot{v}}{\omega_{r2}r} = -\frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}}\lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{\sum F_{di}}{Mr\omega_{r2}}$$

当车轮处于制动状态时：

$$\dot{\lambda}_{r1} = \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}}\lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{(1+\lambda_{r1})^2\dot{v}}{\omega_{r1}r} = \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}}\lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{(1+\lambda_{r1})^2\sum F_{di}}{Mr\omega_{r1}},$$

$$\dot{\lambda}_{r2} = \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}}\lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{(1+\lambda_{r2})^2\dot{v}}{\omega_{r2}r} = \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}}\lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{(1+\lambda_{r2})^2\sum F_{di}}{Mr\omega_{r2}};$$

对上述各表达式积分，得到两个同轴非转向车轮的滑转率 $\lambda_{r1}$ 和 $\lambda_{r2}$ ；

- (7) 根据上述两个同轴非转向车轮滑转率 $\lambda_{r1}$ 和 $\lambda_{r2}$ ，计算整车车速 $v$ ，其计算式为：

$$\text{当车辆处于加速状态时： } v = \frac{r\omega_{r1}(1-\lambda_{r1})}{2} + \frac{r\omega_{r2}(1-\lambda_{r2})}{2}$$

$$\text{当车辆处于减速状态时： } v = \frac{r\omega_{r1}}{2(1+\lambda_{r1})} + \frac{r\omega_{r2}}{2(1+\lambda_{r2})};$$

(8) 根据步骤(1)测量得到的转向车轮的车轮轮速 $\omega_f$ 、车轮半径 $r$ 和整车车速 $v$ ，计算转向车轮的滑转率 $\lambda_f$ ，计算式为：

$$\text{当车轮处于驱动状态时： } \lambda_f = \frac{r\omega_f - v}{r\omega_f}$$

$$\text{当车轮处于制动状态时： } \lambda_f = \frac{r\omega_f - v}{v}.$$

## 一种全轮驱动的电驱动车辆运动参数的测试方法

## 技术领域

本发明涉及一种全轮驱动的电驱动车辆运动参数的测试方法，属于电驱动车辆控制技术领域。

## 背景技术

电驱动车辆作为日益加剧的环境压力下发展的一种新型车辆，已成为汽车工业界的研究重点之一。全轮电驱动车辆滑转率、滑移率（车轮驱动时称之为滑转率，车轮制动时称之为滑移率）及整车车速计算是全轮驱动的电驱动车辆进行行驶控制所需要的关键技术之一。对全轮电驱动车辆，目前还没有公开的滑转率、滑移率及整车车速计算方法。

现有的针对传统全轮驱动车辆的滑转率、滑移率及整车车速计算方法主要有两种，其中方法之一：首先测量每个车轮的转速；利用某一个车轮轮速测量结果或某几个车轮轮速测量结果的平均值作为基准轮速；将基准轮速和车轮半径相乘的结果作为整车车速值；利用整车车速值和各个车轮的轮速测量值计算各个车轮的滑转率、滑移率。其缺点是，如果四个车轮同时处于较严重的打滑或者抱死状态，各个车轮轮速和车轮半径的乘积均和整车车速相差甚远，无法取得令人满意的基准轮速值；对于较低的附着系数路面，上述方法取得的整车车速值有较大误差，计算出来的滑转率、滑移率也有较大误差。方法之二：首先利用加速度传感器或者卫星导航系统（以下简称 GPS）装置测量车辆纵向加速度；利用滤波方法过滤纵向加速度信号的测量噪音；将过滤后的加速度传感器信号积分得到整车车速。其缺点是，需要加装加速度传感器或者 GPS 装置，成本很高；对纵向加速度信号的滤波有很高的要求，否则容易造成积分器溢出而失效。

## 发明内容

本发明的目的是提出一种全轮驱动的电驱动车辆运动参数的测试方法，不依赖于基准轮速的选取，不需要使用加速度传感器或者 GPS 装置测量车辆纵向加速度，而是仅利用各个车轮的轮速信号以及各个驱动车轮的驱动电机的扭矩，获得准确的各个车轮的滑转率、滑移率以及整车车速。

本发明提出的全轮驱动的电驱动车辆运动参数的测试方法，包括以下步骤：

- (1) 分别测量所有车轮的转速  $\omega_i$ ，进而分别获得所有车轮轮速的变化率  $\dot{\omega}_i$ ；
- (2) 从车辆的电机驱动器或扭矩传感器上获得所有车轮的驱动电机的输出扭矩值  $T_i$ ；
- (3) 根据上述变化率  $\dot{\omega}_i$  和输出扭矩值  $T_i$ ，计算得到各个车轮所获得的地面纵向力  $F_{di}$ ，

计算公式为：
$$F_{di} = \frac{T_i - J\dot{\omega}_i}{r}$$
，其中  $r$  是车轮半径；

- (4) 对上述所有车轮获得的地面纵向力求和, 得到作用在整车上的总地面纵向力  $F_d$ ;
- (5) 将上述总地面纵向力除以整车质量  $M$ , 得到整车纵向加速度  $\dot{v}$ ;
- (6) 根据步骤 (1) 测量得到的两个同轴非转向车轮轮速  $\omega_{r1}$  和  $\omega_{r2}$ 、根据步骤 (5) 得到的整车纵向加速度  $\dot{v}$  计算式和车轮半径  $r$ , 得到两个同轴非转向车轮滑转率的变化率  $\dot{\lambda}_{r1}$  和  $\dot{\lambda}_{r2}$  表达式为:

当车轮处于驱动状态时:

$$\dot{\lambda}_{r1} = -\frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} \lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{\dot{v}}{\omega_{r1} r} = -\frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} \lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{\sum F_{di}}{Mr \omega_{r1}},$$

$$\dot{\lambda}_{r2} = -\frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} \lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{\dot{v}}{\omega_{r2} r} = \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} \lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \dot{v}}{\omega_{r2} r}$$

当车轮处于制动状态时:

$$\dot{\lambda}_{r1} = \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} \lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \dot{v}}{\omega_{r1} r} = \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} \lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \sum F_{di}}{Mr \omega_{r1}},$$

$$\dot{\lambda}_{r2} = \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} \lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \dot{v}}{\omega_{r2} r} = \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} \lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \sum F_{di}}{Mr \omega_{r2}};$$

对上述各表达式积分, 得到两个同轴非转向车轮的滑转率  $\lambda_{r1}$  和  $\lambda_{r2}$ ;

- (7) 根据上述两个同轴非转向车轮滑转率  $\lambda_{r1}$  和  $\lambda_{r2}$ , 计算整车车速  $v$ , 其计算式为:

$$\text{当车辆处于加速状态时: } v = \frac{r \omega_{r1} (1 - \lambda_{r1})}{2} + \frac{r \omega_{r2} (1 - \lambda_{r2})}{2}$$

$$\text{当车辆处于减速状态时: } v = \frac{r \omega_{r1}}{2(1 + \lambda_{r1})} + \frac{r \omega_{r2}}{2(1 + \lambda_{r2})};$$

(8) 根据步骤 (1) 测量得到的转向车轮的车轮轮速  $\omega_f$ 、车轮半径  $r$  和整车车速  $v$ , 计算转向车轮的滑转率  $\lambda_f$ , 计算式为:

$$\text{当车轮处于驱动状态时: } \lambda_f = \frac{r \omega_f - v}{v}$$

$$\text{当车轮处于制动状态时: } \lambda_f = \frac{r \omega_f - v}{v}$$

本发明提出的全轮驱动的电驱动车辆运动参数的测试方法, 其优点是: 不需要选取基准轮速, 消除了由基准轮速带来的估计误差; 不需要在车辆上额外加装加速度传感器或者 GPS 装置, 降低了成本, 避免了加速度测量误差; 仅利用各个车轮的轮速信号以及各个驱动车轮的驱动电机的扭矩, 计算简便快速, 实时性高。

### 具体实施方式

本发明提出的全轮驱动的电驱动车辆运动参数的测试方法中, 测试的运动参数包括车轮滑转率和整车车速。

首先分别测量所有车轮的转速  $\omega_i$ , 进而分别获得所有车轮轮速的变化率  $\dot{\omega}_i$ ; 从车辆的电机驱动器或扭矩传感器上获得所有车轮的驱动电机的输出扭矩值  $T_i$ ; 根据上述变化率  $\dot{\omega}_i$  和输出扭矩值  $T_i$ , 计算得到各个车轮所获得的地面纵向力  $F_{di}$ , 计算公式为:  $F_{di} = \frac{T_i - J \dot{\omega}_i}{r}$ , 其中  $r$  是车轮半径; 对上述所有车轮获得的地面纵向力求和, 得到作用在整车上的总地面

纵向力  $F_d$ ；将上述总地面纵向力除以整车质量  $M$ ，得到整车纵向加速度  $\dot{v}$ ；根据上述测量得到的两个同轴非转向车轮轮速  $\omega_{r1}$  和  $\omega_{r2}$ 、根据得到的整车纵向加速度  $\dot{v}$  和车轮半径  $r$ ，得到两个同轴非转向车轮滑转率的变化率  $\dot{\lambda}_{r1}$  和  $\dot{\lambda}_{r2}$  表达式为：

当车轮处于驱动状态时：

$$\dot{\lambda}_{r1} = -\frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} \lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{\dot{v}}{\omega_{r1} r} = -\frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} \lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{\sum F_{di}}{Mr \omega_{r1}},$$

$$\dot{\lambda}_{r2} = -\frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} \lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{\dot{v}}{\omega_{r1} r} = \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} \lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \dot{v}}{\omega_{r2} r}$$

当车轮处于制动状态时：

$$\dot{\lambda}_{r1} = \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} \lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \dot{v}}{\omega_{r1} r} = \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} \lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \sum F_{di}}{Mr \omega_{r1}},$$

$$\dot{\lambda}_{r2} = \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} \lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \dot{v}}{\omega_{r2} r} = \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} \lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \sum F_{di}}{Mr \omega_{r2}};$$

对上述各表达式积分，得到两个同轴非转向车轮的滑转率  $\lambda_{r1}$  和  $\lambda_{r2}$ ；

根据上述两个同轴非转向车轮滑转率  $\lambda_{r1}$  和  $\lambda_{r2}$ ，计算整车车速  $v$ ，其计算式为：

$$\text{当车辆处于加速状态时： } v = \frac{r \omega_{r1} (1 - \lambda_{r1})}{2} + \frac{r \omega_{r2} (1 - \lambda_{r2})}{2}$$

$$\text{车辆处于减速状态时： } v = \frac{r \omega_{r1}}{2(1 + \lambda_{r1})} + \frac{r \omega_{r2}}{2(1 + \lambda_{r2})};$$

根据步骤上述测量得到的转向车轮的车轮轮速  $\omega_f$ 、车轮半径  $r$  和整车车速  $v$ ，计算转向车轮的滑转率  $\lambda_f$ ，计算式为：

$$\text{当车轮处于驱动状态时： } \lambda_f = \frac{r \omega_f - v}{r \omega_f}$$

$$\text{当车轮处于制动状态时： } \lambda_f = \frac{r \omega_f - v}{r \omega_f}.$$

本发明方法的计算过程中，其具体计算公式及其推导过程如下：

根据变化率  $\dot{\omega}_i$  和输出扭矩值  $T_i$ ，计算得到各个车轮所获得的地面纵向力  $F_{di}$ ，其计算

公式为：
$$F_{di} = \frac{T_i - J \dot{\omega}_i}{r}$$
，其中  $r$  是车轮半径。

对所有车轮获得的地面纵向力求和，得到作用在整车上的总地面纵向力  $F_d$ ，其计算公式为：
$$F_d = \sum F_{di}.$$

将总纵向地面力除以整车质量  $M$ ，所得的结果即为整车纵向加速度  $\dot{v}$ ，其计算公式为：

$$\dot{v} = \frac{F_d}{M} = \frac{\sum F_{di}}{M}.$$

将同轴两个非转向车轮的滑转率  $\lambda_{r1}$  和  $\lambda_{r2}$  表达成由车轮轮速  $\omega_{r1}$  和  $\omega_{r2}$ 、整车车速  $v$  和车轮半径  $r$  组成的计算式为：

$$\text{当车轮处于驱动状态时， } \lambda_{r1} = \frac{r \omega_{r1} - v}{r \omega_{r1}}, \quad \lambda_{r2} = \frac{r \omega_{r2} - v}{r \omega_{r2}}$$

$$\text{当车轮处于制动状态时， } \lambda_{r1} = \frac{r \omega_{r1} - v}{v}, \quad \lambda_{r2} = \frac{r \omega_{r2} - v}{v};$$

对上述非转向车轮滑转率  $\lambda_{r1}$  和  $\lambda_{r2}$  的计算式微分，获得非转向车轮滑转率的变化率  $\dot{\lambda}_{r1}$  和  $\dot{\lambda}_{r2}$  的计算式为：

$$\text{当车轮处于驱动状态时, } \dot{\lambda}_{r1} = \frac{v\dot{\omega}_{r1}}{r\omega_{r1}^2} - \frac{\dot{v}}{r\omega_{r1}}, \quad \dot{\lambda}_{r2} = \frac{v\dot{\omega}_{r2}}{r\omega_{r2}^2} - \frac{\dot{v}}{r\omega_{r2}}$$

$$\text{当车轮处于制动状态时, } \dot{\lambda}_{r1} = \frac{r\dot{\omega}_{r1}}{v} - \frac{r\omega_{r1}\dot{v}}{v^2}, \quad \dot{\lambda}_{r2} = \frac{r\dot{\omega}_{r2}}{v} - \frac{r\omega_{r2}\dot{v}}{v^2}。$$

将整车车速  $v$  表达成非转向滑转率  $\lambda_{r1}$  和  $\lambda_{r2}$ 、车轮轮速  $\omega_{r1}$  和  $\omega_{r2}$ 、车轮半径  $r$  的计算式为:

$$\text{当车轮处于驱动状态时, } v = r\omega_{r1}(1 - \lambda_{r1}), \quad v = r\omega_{r2}(1 - \lambda_{r2})$$

$$\text{当车轮处于制动状态时, } v = \frac{r\omega_{r1}}{1 + \lambda_{r1}}, \quad v = \frac{r\omega_{r2}}{1 + \lambda_{r2}}。$$

将上述计算式代入上述非转向车轮滑转率的变化率  $\dot{\lambda}_{r1}$  和  $\dot{\lambda}_{r2}$  的计算式中, 得到以下非转向车轮滑转率的变化率  $\dot{\lambda}_{r1}$  和  $\dot{\lambda}_{r2}$  的计算式为:

$$\text{当车轮处于驱动状态时, } \dot{\lambda}_{r1} = -\frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}}\lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{\sum F_{di}}{Mr\omega_{r1}}, \quad \dot{\lambda}_{r2} = -\frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}}\lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{\sum F_{di}}{Mr\omega_{r2}}$$

$$\text{当车轮处于制动状态时, } \dot{\lambda}_{r1} = \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}}\lambda_{r1} + \frac{\dot{\omega}_{r1}}{\omega_{r1}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \sum F_{di}}{Mr\omega_{r1}},$$

$$\dot{\lambda}_{r2} = \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}}\lambda_{r2} + \frac{\dot{\omega}_{r2}}{\omega_{r2}} - \frac{(1 + \lambda_{r1})^2 \sum F_{di}}{Mr\omega_{r2}};$$

将非转向车轮滑转率的变化率  $\dot{\lambda}_{r1}$  和  $\dot{\lambda}_{r2}$  积分, 即可得到非转向车轮的滑转率  $\lambda_{r1}$  和  $\lambda_{r2}$ 。

根据上述两个同轴非转向车轮滑转率  $\lambda_{r1}$  和  $\lambda_{r2}$ , 计算整车车速  $v$ , 其计算式为:

$$\text{当车辆处于加速状态时, } v = \frac{r\omega_{r1}(1 - \lambda_{r1})}{2} + \frac{r\omega_{r2}(1 - \lambda_{r2})}{2}$$

$$\text{当车辆处于减速状态时, } v = \frac{r\omega_{r1}}{2(1 + \lambda_{r1})} + \frac{r\omega_{r2}}{2(1 + \lambda_{r2})}。$$

利用转向车轮滑转率或滑移率  $\lambda_f$  的计算式, 结合整车车速  $v$ 、转向车轮轮速测量值  $\omega_f$  和车轮半径  $r$ , 计算出转向车轮的滑转率或滑移率  $\lambda_f$ , 计算式为:

$$\text{当车轮处于驱动状态时, } \lambda_f = \frac{r\omega_f - v}{r\omega_f}$$

$$\text{当车轮处于制动状态时, } \lambda_f = \frac{r\omega_f - v}{v}。$$

本发明的计算方法可通过在车辆控制器中编程实现。