

文章编号: 1674-8085(2016)04-0052-05

轮毂驱动电动汽车转向行驶时驱动方案的研究

*张利芬, 赵雪松, 时培成

(安徽工程大学机械与汽车工程学院, 安徽, 芜湖 241000)

摘要: 相比于市面上已比较成熟的中央电机驱动电动汽车, 轮毂驱动电动汽车底盘更加简单, 省去传统的传动链, 每个车轮分别由一独立电机直接驱动。如此一来, 汽车转向行驶时, 车轮之间的差速, 就必须通过控制各电机的输出转速来进行控制。以装有完整齿轮齿条转向机构的全轮毂驱动四轮电动汽车为研究对象, 结合传统四轮驱动汽车, 转向行驶时四轮的速度关系, 分别对两轮转向和四轮转向两种情况下的驱动方案进行研究。

关键词: 全轮毂驱动; 电动汽车; 转向; 差速

中图分类号: U461.4

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2016.04.011

RESEARCH ON THE DRIVE SCHEME OF ALL WHEEL DRIVE ELECTRIC CARS

*ZHANG Li-fen, ZHAO Xue-song, SHI Pei-cheng

(Mechanical and Vehicle College of Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: Compared to the central motor driven electric vehicle on the market which has been more mature, wheel drive electric vehicle chassis is simpler and save the traditional transmission chain, which each wheel driven directly by a separate motor. When the car is driven, the differential between the wheels have to compete by controlling the output of the motor speed. We have taken complete gear rack steering mechanism of four-wheel electric vehicle who driven by all wheels as the research object. Combined with the driving speed of traditional four-wheel drive vehicle, we also studied the four each of two wheel steering and four-wheel steering driving scheme.

Key words: all wheel drive; electric vehicle; steering; differential

0 引言

汽车已日益成为人们日常生活不可或缺的工具, 给我们的生活带来极大便利, 也推动着科技的进步, 从而汽车的数量也越来越庞大。根据公安部交通管理局公布的数据, 截止2014年底, 全国机动车达到1.37亿辆, 汽车保有量占总数量的47.15%。所以随之而来的能源问题、污染问题、成本问题等等就变得越来越严峻, 汽车急需一次重大的革新^[1-2]。

在各国人员的不断努力下, 新的清洁能源电能成为汽车的新动力, 如今电动汽车已成为世界各个国家汽车产业研究不可缺少的项目。

在此背景下, 多轮毂驱电机驱动电动汽车: 1) 传动链短、效率高, 降低了母线电压, 提高了整车电气安全性; 2) 控制的准确性和稳定性均高于差速器的电子差速, 提高转向操纵稳定性, 进一步提高主动安全性; 3) 大大简化底盘结构, 兼顾乘坐空间和低底盘两方面好处, 提高汽车的行驶稳定性和乘坐舒适性的优点, 使其具有很高的应用前景^[1-2]。

收稿日期: 2015-10-30; 修改日期: 2016-01-04

作者简介: *张利芬(1988-), 湖北黄石人, 硕士生, 主要从事汽车新能源技术方面的研究(E-mail:1007131948@qq.com);

赵雪松(1970-), 安徽六安人, 副教授, 主要从事精密与特种加工、先进制造技术、CAD/CAE 技术等研究(E-mail:405833136@qq.com);

时培成(1976-), 安徽安庆人, 教授, 主要从事机械/汽车振动系统控制技术、汽车动力学、电动汽车等研究(E-mail: shipeicheng@126.com).

4 轮毂电机驱动汽车转向行驶时, 在没有差速器的情况下, 直接通过对各电机输出转速的控制, 实现四轮差速, 即能根据方向盘的转角、行驶车速、汽车的轴距、轮距等参数主动地控制四轮的转速变化^[3]。使汽车在转向行驶时, 以四轮都做纯滚动为理想目标, 使四轮都处于合理的滑移率范围内。本文以阿克曼原理^[4]为基础, 通过对传统的差速器差速的两轮转向汽车和四轮转向汽车转向行驶时四轮的速比关系与方向盘转角、行驶车速、汽车轴距、汽车轮距、整车质量等参数的匹配关系分析, 并将分析结果作为 4 轮毂驱动电动汽车转向行驶时的驱动控制方案^[3]。

1 阿克曼原理^[5]

阿克曼转向原理是一种理想的转向状态, 现在汽车的所有转向机构都只能实现在一定的车轮转角范围内, 尽可能地近似满足阿克曼转向原理。

阿克曼原理描述的是: 在汽车直线行驶时, 四个车轮的周线都相互平行, 且垂直于汽车的纵向中心面; 在汽车转向行驶的过程中的任何时刻, 所有车轮的轴线都相交于一点, 即都必须绕着同一个瞬时中心(即转向中心)做纯滚动。

2 基本条件假设^[6]

汽车转向机构是个复杂的空间机构, 车轮更是个复杂的弹性体, 为了简化计算公式, 在许可的范围内, 对转向机构进行如下假设:

1) 忽略汽车前轮的定位参数, 即不考虑主销内倾角、主销后倾角、车轮外倾角、前束对汽车转向运动的影响;

2) 假设车轮为刚性车轮, 忽略轮胎弹性侧偏等影响;

3) 规定汽车左转时, 方向盘, 左、右转向轮的转角取正; 右转时, 转角为负。

3 两前轮转向全轮毂驱动汽车转向驱动方案

在如图 1 所示的两前轮转向模型里: 忽略所有的车轮定位参数及轮胎的影响, 用 f 表示左右轮距, d 表示前后轴距, β_1 、 β_2 分别表示内外侧车轮偏转角。

在理想的阿克曼转向状态下, 内侧车轮的偏转角 β_1 要大于外侧车轮的偏转角 β_2 , 且满足以下关系式:

$$\cot\beta_2 - \cot\beta_1 = \frac{f}{d}$$

在四轮毂电机驱动的电动汽车中, ECU 检测到传感器检测到的方向盘转角大小, 再结合轴距轮距等参数, 直接控制各个轮毂电机的输出转速, 从而分别控制四车轮转速的变化^[6]。

当方向盘出现转角, 即汽车开始转向行驶时, ECU 控制四个轮毂电机转速的变化, 从而使汽车的转向行驶尽量接近阿克曼理想状态, 从而能使车轮的运动与转向机构的工作相协调, 使转向行驶过程中, 轮胎的滑移率尽可能小, 从而保证轮胎的使用寿命。

下面通过图 1 所示的转向模型分析出, 转向行驶时, 为满足阿克曼理想状态, 对应不同的方向盘转角, 四轮的速比关系式。

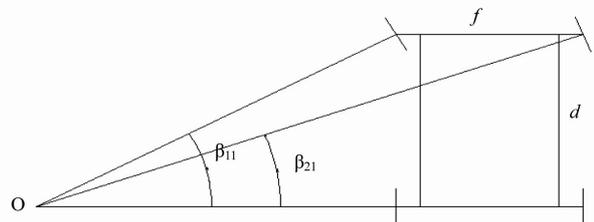


图 1 两轮转向时阿克曼原理的几何意义^[5]

Fig.1 The geometry meaning of the Ackerman when two wheel steering

如图 1 所示:

设: 方向盘转角为 α , (方向盘转角传感器测得) 转向系角传动比为 i (在汽车设计中确定, 查阅相关技术参数取得); 前轮偏转角分别为: 左侧车轮为 β_1 , 右侧车轮为 β_2 ; 前后桥轮距均为 f , 轴距为 d ; 根据第二部分中的基本条件假设, 左转向时相关转角取正, 右转向时相关转角取负。

由转向系角传动比的概念有: $i = \frac{\alpha}{\beta_1}$

$$\text{所以} \quad \cot\beta_1 = \cot \frac{\alpha}{i} \quad (1)$$

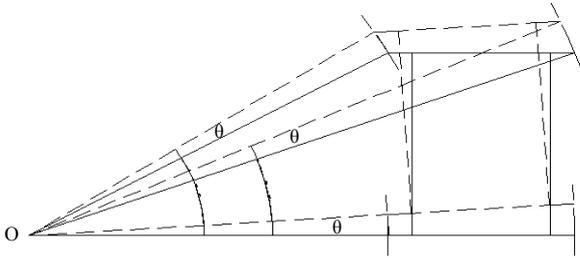
由阿克曼原理有: $\cot\beta_2 - \cot\beta_1 = \frac{f}{d}$

$$\text{所以 } \cot\beta_2 = \frac{f}{d} + \cot\frac{\alpha}{i} \quad (2)$$

说明: 1) 当方向盘左转时, α, β_1, β_2 均取正值, 且 $\beta_1 > \beta_2$;

2) 当方向盘右转时, α, β_1, β_2 均取负值, 且 $\beta_1 > \beta_2$, 由此可见 $|\beta_1| < |\beta_2|$, 所以右转向时, 右侧车轮向右偏角度大于左侧车轮。

在转向行驶过程中, 取一瞬态过程为研究对象, 如图 2 所示:



实线为状态 1; 虚线表示状态 2

图 2 转向瞬态过程描述

Fig. 2 The description of Steering transient process

由图中状态 1 行驶到状态 2 这一过程, 假设这一瞬态过程中, 转向中心 O 的位置不变, 又因为方向盘的转角不变, 忽略车轮车轴的位置误差, 所以若要满足阿克曼原理, 则四车轮绕转向中心转过的角度必须相等, 将这个角度用 θ 表示。

设: 这一瞬态过程中, 四轮行驶过的线距离分别为 s_1, s_2, s_3, s_4 ; 四车轮旋转中心到转向中心 O 的距离分别为 r_1, r_2, r_3, r_4 ; 四轮的转速分别为 v_1, v_2, v_3, v_4 。

根据曲线运动基本原理有:

$$\begin{aligned} s_1 : s_2 : s_3 : s_4 &= \\ r_1 \cdot \theta : r_2 \cdot \theta : r_3 \cdot \theta : r_4 \cdot \theta &= \\ r_1 : r_2 : r_3 : r_4 & \end{aligned}$$

又因为:

$$s = v \cdot t$$

且同一过程, 时间相等, 所以有:

$$v_1 : v_2 : v_3 : v_4 = r_1 : r_2 : r_3 : r_4 \quad (3)$$

由图 1 可知:

$$r_1 : r_2 : r_3 : r_4 =$$

$$\frac{d}{\sin\beta_1} : \frac{d}{\sin\beta_2} : d \cdot \cot\beta_1 : d \cdot \cot\beta_2 =$$

$$\frac{1}{\sin\beta_1} : \frac{1}{\sin\beta_2} : \cot\beta_1 : \cot\beta_2$$

(4)

又有三角函数变换公式:

$$\sin\beta_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \cot^2\beta_1}}$$

$$\sin\beta_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \cot^2\beta_2}}$$

所以, 结合式 (3)、式 (4) 得出

$$v_1 : v_2 : v_3 : v_4 = r_1 : r_2 : r_3 : r_4 =$$

$$\sqrt{1 + \cot^2\beta_1} : \sqrt{1 + \cot^2\beta_2} : \cot\beta_1 : \cot\beta_2$$

(5)

由式 (1)、式 (2) 可知, $\cot\beta_1, \cot\beta_2$ 均可由方向盘转角 α , 转向系角传动比 i , 汽车轮距 f , 汽车轴距 d 等可测量的相关表达式来表示,

所以式 (5) 最终可表示为:

$$v_1 : v_2 : v_3 : v_4 =$$

$$\sqrt{1 + \cot^2\left(\frac{\alpha}{i}\right)} : \sqrt{1 + \left(\frac{f}{d} + \cot\frac{\alpha}{i}\right)^2} : \cot\left(\frac{\alpha}{i}\right) : \left(\frac{f}{d} + \cot\frac{\alpha}{i}\right)$$

(6)

因此, 4 轮毂驱动 2 轮转向汽车转向行驶过程中, ECU 可以根据传感器检测到的方向盘转角这一变量, 通过式 (6) 的比例方案对四轮转速进行实时控制。从而使轮毂电机的驱动与转向机构的工作协调一致, 使车轮在转向时处于较理想的运行状态。

4 四轮转向全轮毂驱动汽车转向驱动方案

四轮转向(4WS, 4 Wheel Steering)除了传统的前转向轮, 后两轮也是转向轮, 其主要的两种转向方式^[7]及意义如下:

1) 当在高速行驶中转向时, 后轮与前轮的同相转向, 能基本消除汽车在转向时车身与行驶方向的偏转角, 减少了汽车调整行驶转向时的旋转和侧滑, 明显改善车辆高速行驶的稳定性及安全性, 进

而缓解驾驶者在各种路况下(尤其是在风雨天)高速行驶的疲劳程度。

2) 当在低速行驶中转向时, 比如汽车驶入车库和在狭窄的拐角处转弯时, 后轮与前轮反向转向, 能有效提高低速转向的轻便性, 并且能有效减小转向半径, 从而有效提高了汽车停车或在狭小空间转向的机动性。

为保证四轮转向汽车转向行驶时汽车质心侧偏角的稳态值为零, 前、后内侧车轮偏转角之比与车速 u , 汽车总质量 m , 轴距 g , 质心位置等参数的关系可表示为^[8]:

$$\frac{\text{内侧后轮偏转角}}{\text{内侧前轮偏转角}} = \frac{\Delta r}{\Delta f} = \frac{-b + \frac{ma}{k_2 d} \cdot u^2}{a + \frac{mb}{k_1 d} \cdot u^2}$$

式中: a 、 b 分别为质心距前、后轴距离; k_1 、 k_2 分别为前后轮胎侧偏刚度; u 为行驶车速; d 为轴距; m 为汽车总质量。

设前后轴重分别为 m_1 , m_2 , 则根据质心位置的确定原理有:

$$a = \frac{m_2}{m} \cdot d, \quad b = \frac{m_1}{m} \cdot d$$

所以内侧后轮前车轮偏转角之比:

$$\frac{\Delta r}{\Delta f} = \frac{-\frac{m_1 d}{m} + \frac{m_2}{k_2} \cdot u^2}{\frac{m_2 d}{m} + \frac{m_1}{k_1} \cdot u^2} \quad (7)$$

如图 3 所示(取左转向状态为例): f 表示轮距, d 表示轴距, 所有车轮的轴线的延长线交于同一点(转向中心) O , β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 分别表示左前、右前、左后、右后车轮的偏转角, 且四轮转角不等。 r_1, r_2, r_3, r_4 分别表示四轮旋转中心到转向中心之间距离。

i 为转向系统角传动比, α 为方向盘转角。则有:

$$i = \frac{\alpha}{\beta_1}, \quad \frac{\beta_3}{\beta_1} = \frac{\beta_4}{\beta_2} = \frac{\Delta r}{\Delta f}$$

过 O 作 $A_1 A_3$, $A_2 A_4$ 的垂线分别与两线延长线相交于 A 、 B 两点。

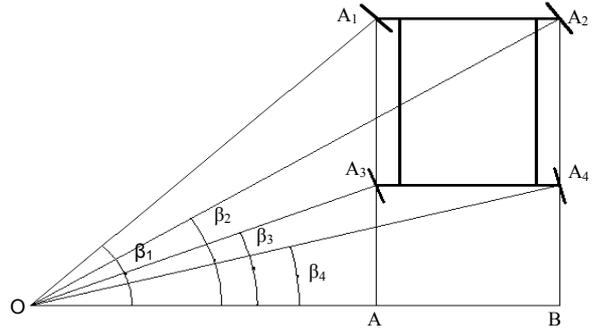


图 3 四轮转向时阿克曼原理的几何意义^[8]

Fig.3 The geometric meaning of the ackerman when Four-wheel steering

由图可知:

$$A_1 A = \frac{\tan \beta_1}{\tan \beta_1 - \tan \beta_3} \cdot g = A_2 B = \frac{\tan \beta_2}{\tan \beta_2 - \tan \beta_4} \cdot g$$

且

$$\frac{A_2 B}{\tan \beta_2} - \frac{A_1 A}{\tan \beta_1} = \frac{A_2 B - d}{\tan \beta_4} - \frac{A_1 A - d}{\tan \beta_3} = f$$

所以:

$$\frac{1}{\tan \beta_2 - \tan \beta_4} - \frac{1}{\tan \beta_1 - \tan \beta_3} = \frac{f}{d} \quad (8)$$

说明: 1) 左转向时 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 均大于 0,

$(\tan \beta_1 - \tan \beta_3) > (\tan \beta_2 - \tan \beta_4)$;

2) 右转向时 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 均小于 0,

$|\tan \beta_1 - \tan \beta_3| < |\tan \beta_2 - \tan \beta_4|$ 均为内侧车轮偏转角大。

同理 4 轮毂驱动两轮转向电动汽车, 要想确定转向时, 四轮毂电机的驱动方案, 必须先分析清楚, 在满足阿克曼原理的理想转向状态下四车轮的速比关系^[6]。

如图 3 所示:

因为:

$$i = \frac{\alpha}{\beta_1}, \quad \frac{\beta_3}{\beta_1} = \frac{\beta_4}{\beta_2} = \frac{\Delta r}{\Delta f}$$

所以:

$$\tan \beta_1 = \tan \frac{\alpha}{i}; \quad \tan \beta_3 = \tan \left(\frac{\Delta r}{\Delta f} \cdot \frac{\alpha}{i} \right);$$

$$\tan \beta_4 = \tan\left(\frac{\Delta r}{\Delta f} \cdot \beta_2\right)$$

同理于图 2 所示原理, 取一瞬态过程为研究对象, 假设这一瞬态过程中, 转向中心 O 的位置不变, 又因为方向盘的转角不变, 忽略车轮车轴的位置误差, 所以若要满足阿克曼原理, 则四车轮绕转向中心转过的角度必须相等, 则有:

$$v_1:v_2:v_3:v_4=r_1:r_2:r_3:r_4 \quad (\text{推理同式(3)})$$

在图 3 中, 由几何关系可得出:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{\tan \beta_1 \cdot d}{(\tan \beta_1 - \tan \beta_3) \cdot \sin \beta_1} \\ r_2 = \sqrt{\left(\frac{d}{\tan \beta_1 - \tan \beta_3} + f\right)^2 + \left(\frac{\tan \beta_1 \cdot d}{\tan \beta_1 - \tan \beta_3}\right)^2} \\ r_3 = \frac{\tan \beta_3 \cdot d}{(\tan \beta_1 - \tan \beta_3) \cdot \sin \beta_3} \\ r_4 = \sqrt{\left(\frac{f}{\tan \beta_1 - \tan \beta_3} + d\right)^2 + \left(\frac{\tan \beta_3 \cdot f}{\tan \beta_1 - \tan \beta_3}\right)^2} \end{cases} \quad (9)$$

以上为以左转向为例得出的式子, 在右转向时 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 均小于 0, 由图 3 几何原理知式 (9) 仍适用, 但因为:

$$|r_1| > |r_3|, |r_1| > |r_2|, |r_1| > |r_4|, |r_2| > |r_4|, |r_3| > |r_4|$$

所以速比应按照下式来控制:

$$v_1:v_2:v_3:v_4 = |r_1|:|r_2|:|r_3|:|r_4| \quad (10)$$

联结式(7)-式 (10) 行驶过程中, 以方向盘转角 α 和车速 u 为主要输入变量, 按式 (10) 比例控制各轮毂电机的输出转速, 进行四轮速比的控制。

5 总结及展望

本文以阿克曼原理为基本原理, 通过对两轮转

向汽车和四轮转向汽车转向行驶时四车轮转速关系的分析, 来确定转向行驶时四轮毂电机的输出转速的变化。使轮毂电机的驱动能与汽车转向系统的机械结构相协调, 使汽车转向行驶时在轮毂电机驱动下的车轮转速与转向系的动作协调一致, 保证四轮毂电机驱动电动汽车转向行驶时各车轮都做纯滚动。

本文只是给出能保证转向行驶时车轮做纯滚动(减少车轮磨损, 提高轮胎寿命)的控制方案。但转向时的这种驱动方案对转向行驶的稳定性影响还未知, 所以在后续的研究中, 希望能围绕“四轮毂电机驱动汽车转向操纵稳定性的分析与控制”展开。

参考文献:

- [1] 刘峰. 轮毂驱动电动汽车整体设计与研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- [2] 孟庆华, 许进,王东峰. 轮毂电机驱动型电动汽车动力系统研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 33-37.
- [3] 宗新怡. 四轮驱动轮毂电机电动汽车转向助力研究[D].吉林:吉林大学,2015.
- [4] 李恩科. 汽车整体式转向机构特性研究及转向纯滚动装置设计[D].重庆:重庆理工大学,2013.
- [5] 王金龙. 几种典型的汽车转向机构运动学研究[D].重庆:重庆理工大学,2010.
- [6] 胡国强. 汽车四轮转向系统转向特性的研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [7] 王敬. 汽车四轮转向系统建模方法的研究[D].重庆:重庆理工大学,2008.
- [8] 史天泽. 轮毂电机驱动电动车悬架和转向系统设计与性能匹配[D].吉林:吉林大学,2015.