DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.022

线控转向电动汽车运动控制系统的研究*

朱小春,董铸荣*,贺 萍
(深圳职业技术学院 汽车与交通学院,广东 深圳 518055)

摘要: 针对传统汽车转向存在转弯半径大和操纵不灵活的问题,采用线控技术在线控转向电动汽车上设计了运动控制系统。介绍了线控转向电动汽车的机械结构和多种运动模式,分析了电动汽车绕任意点旋转运动的运动学算法,并利用模块化设计和车载网络通讯实现了线控转向技术,设计了该车的运动控制系统;研制了该车的运动控制系统样机,并在实际路面上分别对传统汽车和线控转向电动汽车进行了掉头转弯对比实验。研究结果表明,线控转向电动汽车能够更好地实现掉头转向,相比传统汽车具有更小的转弯半径和操纵灵活性。

关键词: 线控转向;运动模式;控制系统
中图分类号: U462.1;TH39;TP29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4551(2014)06-0779-04

Research of motion control system for the EV of steering by wire

ZHU Xiao-chun, DONG Zhu-rong, HE Ping
(Automotive and Transportation Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Aiming at the problem of large turning radius and handling inflexibility with regard to conventional car, the motion control system based on the drive-by-wire network was designed and realized. The mechanical structure and movement patterns of the EV steered by wire were introduced, the kinematics on the rotary motion of the EV about an arbitrary point was analyzed in great detail, and using the technology of modularization and steering by wire in vehicle network, the motion control system was designed. The prototype of motion control system on the EV steering by wire was developed and tested, and the comparative experiments between the traditional car and the steered by wire EV steering U-turn on actual road were carried out. The results indicate that the steered by wire electric vehicle achieved better U-turn steering, with a smaller turning radius and handling flexibility compared to a conventional car.

Key words: steering by wire; movement pattern; control system

0 引 言

电动汽车由于具有环保特性,正成为汽车产业未来的发展方向。四轮独立转向的电动汽车已经成为国内外研究的方向之一[1-3]。

一般来说,四轮独立转向(Four-Wheel Independent Steering-4WIS)技术是指前、后4个车轮都能根据需要起转向作用,且每个转向轮相互之间没有机械连接,能有效改善车辆的机动灵活性和操纵稳定性。在低速转弯时,使后轮和前轮反向转动,可以减小汽车的转弯半径,提高汽车的机动灵活性;在高速时,使后轮与前轮同向转动,提高高速转弯以及加速超车时汽车的稳定性[4-6]。

笔者研究的平台是一辆线控转向电动汽车,研究内容是基于线控转向电动汽车,为了实现该车的多种运动模式,本研究设计并实现该车的运动控制系统。

1 线控转向电动汽车

线控转向电动汽车导入线控四轮独立转向技术,

收稿日期: 2014-01-24
基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(S2013010013931)
作者简介: 朱小春(1979-),男,江苏南通人,讲师,主要从事电动汽车及电力电子控制技术方面的研究. E-mail:zhuxc@szpt.edu.cn
通信联系人: 董铸荣,男,教授,硕士生导师. E-mail:arondong@szpt.edu.cn

该技术采用4个高性能转向驱动控制器分别控制4个转向伺服电机，取消了传统汽车的转向机构，汽车结构大大简化。该车的实物图如图1所示。

图1 全车实物图

该车设计的悬架能满足每个车轮的转向角度足够大，这样它不仅能实现低速时减小转弯半径、高速时提高车辆操纵稳定性的性能，还能实现横向移动和自旋转等功能[7-8]。

1.1 机械结构

线控转向电动汽车可实现四轮独立大角度线控转向的功能，其车架及悬架都必须进行专门的设计。其中一个车轮机械结构的实物图如图2所示。

图2 车轮机械结构的实物图

由图2可知，每个车轮机械结构都有一个轮驱电机和转向电机。该车架能满足大角度（向左90°和向右90°）转向控制，而且保证车轮与地面的接触点就是该车轮的旋转中心。

1.2 运动模式

线控转向电动汽车可实现多种运动模式，比如：正常行驶运动模式（如图3(a)所示）、横向运动模式（如图3(b)所示）、低速转弯运动模式（如图3(c)所示）、高速转弯运动模式（如图3(d)所示）和旋转运动模式（绕任意点旋转）等。

4种运动模式如图3所示，其实这4种运动模式都可以归纳为旋转运动模式的一种特殊情况。例如：正常行驶运动模式为旋转中心在后轮轴线上的旋转运动模式；横向运动模式为旋转中心在前（或后）方无限

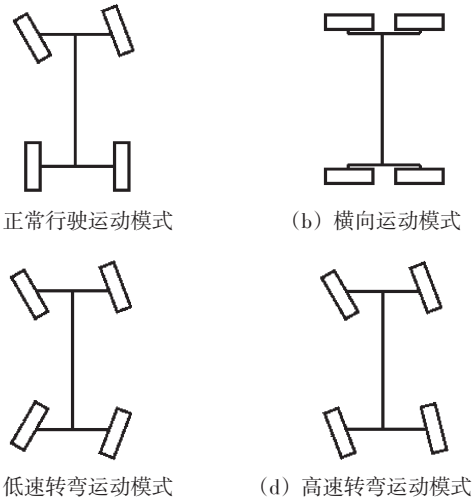

图3 多种运动模式示意图

远的旋转运动模式。本研究从绕任意点旋转运动算法着手，设计了线控转向电动汽车的运动控制系统。

2 运动控制系统的设计

2.1 绕任意点旋转运动算法设计

假设电动汽车左右两轮旋转中心的距离为$2K$，前后两轮旋转中心的距离为$2L$，以电动汽车几何中心为坐标原点(0,0)，建立笛卡尔坐标系$X-O-Y$。在不考虑电动汽车质心侧偏、横摆角和侧风等情况下，4个轮胎都近似围绕着坐标为(x，y)的中心点进行纯滚动旋转的情况如图4所示。

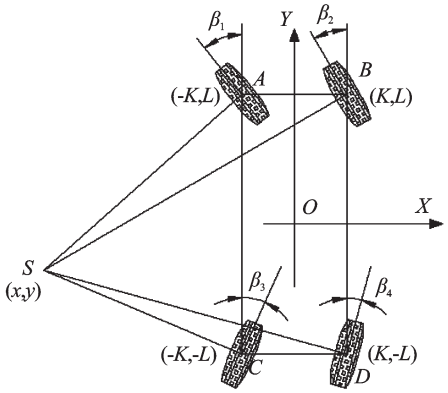

图4 绕任意点旋转的笛卡尔坐标系

图4中，电动汽车的4个车轮的旋转中心坐标分别为：左前轮A点$(-K,L)$、右前轮B点(K,L)、左后轮C点$(-K,-L)$和右后轮D点$(K,-L)$。设定车轮转向角度的0°为Y轴的正方向，向右转向时为正角度（X轴的正方向为90°），向左转向时为负角度（X轴的负方向为-90°）。此时，转弯中心S点的坐标为(x,y)，这样能得到4个车轮的转向角度β_1、β_2、β_3、β_4为：

$$\beta_1 = \mathrm{arctg}\frac{-y+L}{x+K} \tag{1}$$

$$\beta_2 = \mathrm{arctg}\frac{-y+L}{x-K} \tag{2}$$

$$\beta_3 = \mathrm{arctg}\frac{-y-L}{x+K} \tag{3}$$

$$\beta_4 = \mathrm{arctg}\frac{-y-L}{x-K} \tag{4}$$

公式(1~4)中，若分母为0时，分子为正的转向角度为90°，分子为负的转向角度为-90°。

为了分析方便，假设车辆几何中心就是质心，此时质心的目标线速度为 v_o，质心与旋转中心的距离为 r_o，则4个车轮的线速度必须满足以下关系：

$$\frac{v_1}{r_1} = \frac{v_2}{r_2} = \frac{v_3}{r_3} = \frac{v_4}{r_4} = \frac{v_o}{r_o} \tag{5}$$

式中：v_1，v_2，v_3，v_4—左前轮、右前轮、左后轮和右后轮的线速度；r_1，r_2，r_3，r_4—4个车轮的转弯半径。

而4个车轮的转弯线速度与转速又满足如下关系式：

$$v_i = r \cdot \frac{n_i}{60} \cdot 2\pi, \quad i = 1,2,3,4 \tag{6}$$

式中：r—车轮半径，n_i—车轮转速。

由图4、式(5~6)可得到4个车轮的目标转速为：

$$n_1 = \frac{30}{\pi \cdot r} \cdot v_1 = \frac{30 \cdot v_o}{\pi \cdot r \cdot \sqrt{x^2+y^2}} \cdot \frac{x+K}{\cos\beta_1} \tag{7}$$

$$n_2 = \frac{30}{\pi \cdot r} \cdot v_2 = \frac{30 \cdot v_o}{\pi \cdot r \cdot \sqrt{x^2+y^2}} \cdot \frac{x-K}{\cos\beta_2} \tag{8}$$

$$n_3 = \frac{30}{\pi \cdot r} \cdot v_3 = \frac{30 \cdot v_o}{\pi \cdot r \cdot \sqrt{x^2+y^2}} \cdot \frac{x+K}{\cos\beta_3} \tag{9}$$

$$n_4 = \frac{30}{\pi \cdot r} \cdot v_4 = \frac{30 \cdot v_o}{\pi \cdot r \cdot \sqrt{x^2+y^2}} \cdot \frac{x+K}{\cos\beta_4} \tag{10}$$

假定转速的正方向定义为该车轮转向角度为0°时驱动方向为Y轴的正方向。式(7~10)中，由于目标线速度 v_o 为正值，这样转速计算结果有正有负，此时电动汽车绕转弯中心(x,y)进行顺时针旋转。若要绕转弯中心进行逆时针旋转，则每个车轮驱动转速应分别求反。

2.2　硬件设计

运动控制系统采用汽车CAN(控制局域网)总线技术[9-10]，共由5个模块电子控制单元(ECU)组成，分别为：4个车轮控制ECU和1个整车控制ECU，利用高速CAN总线网络将5个ECU通讯联系起来，实现线控转向和线控驱动的功能。车轮控制ECU的实物图如图5所示。

整车控制ECU负责整车控制策略的算法和控制信息的采集；每个车轮控制ECU负责将整车控制ECU发送来的控制信息执行转向和驱动动作，并实时地将该车轮的状态发送给整车控制ECU。

图5　车轮控制ECU的实物图

2.3　软件设计

线控转向电动汽车目前已经实现3种运动模式：正常行驶运动模式、横向运动模式和自适应运动模式。其中自适应模式包括：低速转弯情况、高速转弯情况和绕任意点旋转情况。自适应运动模式时的软件控制流程图如图6所示。

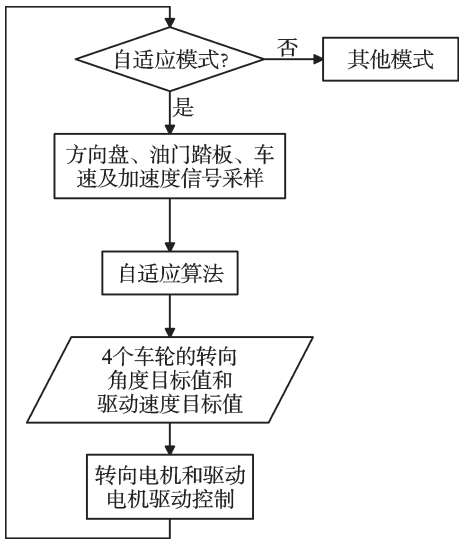

图6　控制流程图

图6中，进入自适应运动模式后，整车控制ECU会根据方向盘信号、油门踏板信号、每个车轮速度和加速度信号进行自适应算法控制，得出4个车轮的转向角度目标值和驱动转速目标值，然后通过CAN总线网络将控制目标值发送给每个车轮控制ECU，每个车轮控制ECU会根据控制目标值执行转向角度驱动控制和驱动转速驱动控制，同时，每个车轮控制ECU会实时地将该车轮的转向状态和驱动状态发送给整车控制ECU。

3　实验及分析

线控电动汽车的主要参数如下：左、右轮转向节点距离$2K$=1.11 m，前后轮轴距$2L$=2.76 m，驱动轮半径为0.281 m，轮毂电机采用的是直流无刷电机，转向

电机采用的伺服电机，电池组的额定电压为72 V。

本研究设计的运动控制系统可以实现正常行驶运动模式、横向运动模式和自适应运动模式。其中，正常行驶模式就是完全模拟传统汽车的转向方式，即前轮为转向轮，后轮转向自由度固定不动，转向时旋转中心在后轮的轴线上。而横向运动模式和自适应运动模式可以实现传统汽车不能完成的许多功能。下面笔者利用在双向四车道的交叉路口进行掉头转弯的实验进行对比分析。

运动控制系统工作在正常行驶运动模式下进行掉头转弯的情况如图7所示。运动控制系统工作在自适应运动模式下进行掉头转弯的情况如图8所示。

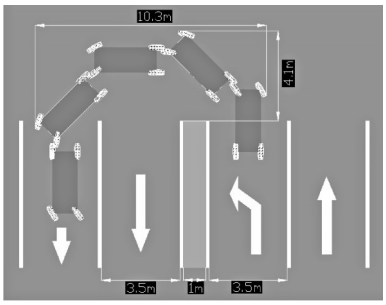

图7 传统转向时掉头转弯情况

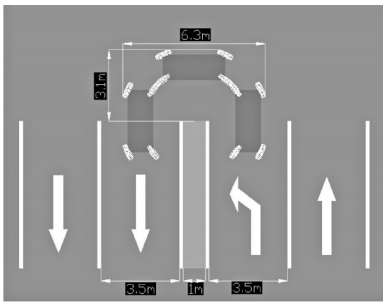

图8 自适应运动模式时掉头转弯情况

图7、图8中，双向四车道的车道宽度为3.5 m，中间隔离带的宽度为1 m，车辆都从左转车道的中间开始进行掉头转弯动作。

图7中，传统汽车转向轮的最大转向角度在35°~40°之间，实验中左前轮的转向角度为-38°（向左），右前轮的转向角度为-31°，在传统转向模式下，车辆行进的轨迹最大宽度有10.3 m，只能转到最左侧的车道。而图8中，当自适应运动模式时，根据方向盘和车速等信息，此时左前轮的转向角度为-37°，右前轮的转向角度为-25°，左后轮的转向角度为37°，右后轮的转向角度为25°，车辆行进的轨迹最大宽度为6.3 m，车辆能直接掉头至相邻车道的中间。

由上面的实验对比可以发现，运动控制系统在低速转弯时能减小转弯半径，提高汽车的机动灵活性。除此之外，本研究的线控转向电动汽车还能实现高速转弯、横向行驶、绕任意点旋转等模式，能做到真正意义上的车辆跟踪任意轨迹的功能。

4 结束语

本研究基于线控转向电动汽车所提出的绕任意点运动控制系统的设计得到了实验验证，实验结果表明，该运动控制策略可以实现线控电动汽车的各种运动模式，相比传统两轮转向汽车具有更好的操作灵活性。

下一阶段工作是在本研究成果的基础上完善自适应控制的算法，使整个运动控制系统能满足各种路况下和各种车速情况下的控制。

参考文献（References）：

[1] DICKERMAN L，HARRISON J. A new car，a new grid[J]. **IEEE Transactions on Power and Energy Magazine**，2010，8(2)：55-61.

[2] 程启明，吴 凯，王鹤霖，等. 电动汽车技术的发展研究[J]. 电机与控制应用，2013，40(6)：1-6.

[3] 彭庆红，杜群贵. 电动客车变频热泵空调系统及其性能的试验研究[J]. 流体机械，2013，41(12)：65-69.

[4] 胡家奇，杨志刚，王华磊. 线控四轮独立转向系统的结构及控制研究[J]. 北京汽车，2013(5)：11-14，32.

[5] 冯严科，韩致信，雷继军，等. 一种四轮独立转向车辆的稳态响应分析[J].科学技术与工程，2010，10(10)：2380-2383.

[6] 刘彩志，陈 茜. 四轮独立转向汽车比例方向阀驱动电路设计[J]. 机电工程，2002，19(5)：23-25.

[7] 董铸荣，贺 萍，朱小春. 基于Ackermann模型的轮毂电机四轮独立驱动电动汽车电子差速转向控制研究[J]. 深圳职业技术学院学报，2013，12(5)：26-29.

[8] ZHU X C，ZHANG Y C，QIU H. Power control system of four-wheel independent drive electric vehicle[C]// Proceedings of the International Conference on Remote Sensing，Environment and Transportaion Engineering. Nanjing：[s.n.]，2011：1819-1822.

[9] 赵俊杰，吴 卿，胡维华. 基于Jini的CAN总线自适应车载网络的设计与研究[J]. 机电工程，2010，27(10)：112-115.

[10] 王书举，张天侠，张国胜. 采用混合调度策略的电动汽车TTCAN网络[J]. 汽车工程，2010(11)：993-996，1005.

[编辑：李 辉]

本文引用格式：

朱小春，董铸荣，贺 萍. 线控转向电动汽车运动控制系统的研究[J]. 机电工程，2014，31(6)：779-782.

ZHU Xiao-chun，DONG Zhu-rong，HE Ping. Research of motion control system for the EV of steering by wire[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering，2014，31(6)：779-782.