

两轮独立驱动电动车的转矩协调控制

许鹏^{1,2}, 曹秉刚¹, 曹建波¹, 郭桂芳¹

(1. 西安交通大学电动汽车研究开发中心, 710049, 西安; 2. 中国人民解放军 71811 部队, 464000, 河南信阳)

摘要: 为了对独立驱动电动车的 2 个驱动轮的转矩进行协调控制, 研究了驱动系统的结构, 建立了电动车运动模型. 根据电动车的转动平衡, 发现电动车在高速转弯时, 外侧轮的受力明显高于内侧轮. 由于道路状况的变化, 当 2 个车轮分别在摩擦系数不同的路面行驶时, 车轮的受力也不同, 因此采用神经网络 PID 控制方法, 对 2 台轮毂式电动机分别进行了控制. 通过系统仿真与实验研究, 表明该模型及控制方法可以很好地反映电动车在各种工况下的响应特性, 提高电动车的运行安全性与稳定性.

关键词: 电动车; 神经网络; 独立驱动; 转矩协调控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0053-05

Torque Coordinated Control of Two-Wheel Independent Drive Electric Vehicle

XU Peng^{1,2}, CAO Binggang¹, CAO Jianbo¹, GUO Guifang¹

(1. Research and Development Center of Electric Vehicle, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. The 71811 Unit of PLA, Henan, Xinyang 464000, China)

Abstract: To coordinately control the torque of the two-wheel independent drive electric vehicle (EV), the independent drive system and the dynamic model of the EV are constructed. Due to the side-dump moment, the force of the out wheel gets greater than the inner wheel during turning at high speed. When the rolling friction coefficient of the two driving wheels is different, the exerting force on the two wheels is unbalance as the road condition varies. Adopting neural network PID control mode the two in-wheel motors are controlled respectively. By comparing the experimental data and the simulation data it is found that the model and control method are able to reflect the response characteristics of the EV under various conditions, and to enhance the safety and stability.

Keywords: electric vehicle; neural network; independent drive; torque coordinated control

由于电动车具有节能无污染以及方便快捷的特点, 因此已经逐渐成为人们生活中一种重要的绿色交通工具^[1]. 采用电动轮独立驱动方式的电动车具有广阔的发展前景. 然而, 在根据实际行驶状况调节驱动轮转矩时, 传统的驱动方式往往存在着局限性^[2-5].

在理论上可依据不同的工况直接控制各轮的输出转矩, 既可以避免电动车因转矩过大而对地滑转, 又可以根据需求提供足够的驱动力. 因此, 独立驱动

电动车在操纵性和稳定性方面较传统驱动方式具有明显的优势^[6].

1 驱动系统结构

两轮独立驱动系统可实现电动、定速巡航、限速、电流极值门限保护、电池欠压过压保护、过温保护等功能, 如图 1 所示. 本文选用 2 个永磁无刷直流电机来驱动电动车. 永磁直流电机的特性见文献^[7], 其控制系统的工作过程为: 控制芯片收到调速

信号和2个电机的反电动势位置信号后,将相应的脉宽调制(PWM)信号和12路驱动逻辑信号输送给场效应晶体管(MOSFET)驱动芯片IR2103,IR2103进行逻辑变换后调制12个MOSFET,并分别驱动2个电机.通过速度计算和电流检测来反馈控制结果,在控制芯片中对反馈结果进行处理后输出,形成闭环控制.与此同时,控制芯片还通过串行通信接口将相关的信息传输到显示面板,显示当前的工作状态.

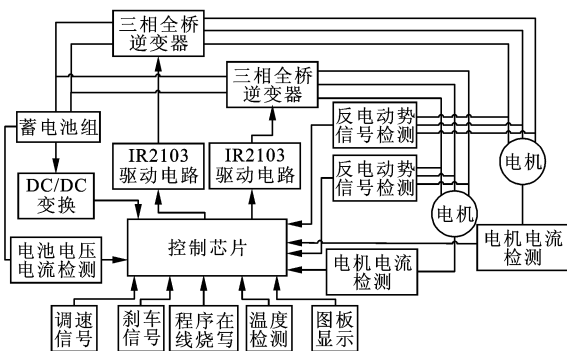
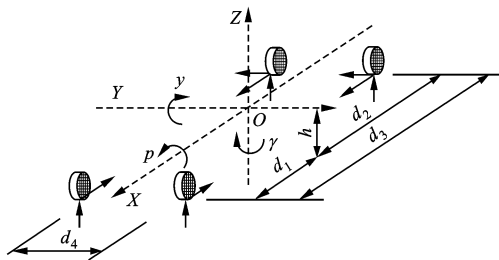


图1 电动车驱动与控制结构框图

2 电动车动力学模型

电动车绕X轴做侧倾向运动,绕Y轴做俯仰运动,绕Z轴做横摆转动,各车轮有一个转动自由度,其输入为垂直载荷和驱动转矩,输出为电动车车轮的转速,如图2所示.



d_1 :重心与前轴的距离; d_2 :重心与后轴的距离; d_3 :汽车前后轴的距离; d_4 :轴距; h :重心高度; p, γ, γ' :汽车分别绕X、Y、Z轴的转动方向

图2 电动车动力学模型

当电动车在平坦的路面直线行驶时,运动方程表现为在X轴向的受力,即

$$m\dot{v} = f_R(1,1) + f_R(1,2) + f_R(2,1) + f_R(2,2) - f_w \quad (1)$$

式中: f_R 为电动车车轮的受力; $f_R(1,1)$ 表示左前轮受力; $f_R(1,2)$ 表示右前轮受力; $f_R(2,1)$ 表示左后

轮受力; $f_R(2,2)$ 表示右后轮受力; f_w 为迎风阻力; v 为车体在固定坐标下的纵向车速; m 为电动车的质量.

当电动车在平坦路面转弯时,取纵、侧向位移,横摆角速度、侧倾运动等,以及4个车轮的回转运动来建立整车模型,并假设固定于电动车上的动坐标系原点与电动车重心重合.对于绕Y轴的俯仰角,本文采用文献[8]提出的2电机串联的方式,而俯仰运动不会影响电动车的运动状态,因为驱动轮受到的Z轴方向的力是同时增加或减小,2个驱动轮的受力平衡状态并没有被打破,同样也不用考虑沿Z轴方向的垂直运动.

X轴方向的动力方程为

$$m(\dot{v} - \omega v_1) = f_x(2,1) + f_x(2,2) - f_w - [f_Y(1,1) + f_Y(1,2)]\sin\delta - [f_x(1,1) + f_x(1,2)]\cos\delta \quad (2)$$

Y轴方向的动力方程为

$$m(\dot{v}_1 + \omega v) = [f_Y(1,1) + f_Y(1,2)]\cos\delta - [f_x(1,1) + f_x(1,2)]\sin\delta + f_Y(2,1) + f_Y(2,2) \quad (3)$$

Z轴方向的动力方程为

$$I_{Z\omega} = [f_Y(1,1) + f_Y(1,2)]\cos\delta \cdot d_1 - [f_x(1,1) + f_x(1,2)]\sin\delta \cdot d_1 - [f_Y(2,1) + f_Y(2,2)]d_2 + [f_x(1,1) - f_x(1,2)]\cos\delta \cdot d_1/2 + [f_Y(1,1) - f_Y(1,2)]\sin\delta \cdot d_1/2 - [f_x(2,1) - f_x(2,2)]d_2/2 \quad (4)$$

风阻为^[9]

$$f_w = \frac{1}{21.15} C_D A v^2 \quad (5)$$

式中: C_D 为风阻系数; A 为迎风面积; δ 为转向角; f_x 为纵向力; f_Y 为侧向力; v_1 为车体在固定坐标系下的侧向车速; ω 为电动车的横摆角速度.当电动车转弯时(见图3),内侧轮的转弯半径 $r = d_3/\sin\delta$,电动车后桥中心到转弯中心的距离 $r_0 = (d_2^2 + (d_3 \cot\delta + d_4/2)^2)^{1/2}$,电动车重心到转弯中心的距离 $r_1 = d_3 \cot\delta + d_4/2$,离心力

$$f_0 = mv^2 / (d_2^2 + (d_3 \cot\delta + d_4/2)^2)^{1/2}$$

对于侧倾力,分别以外侧轮的连线为轴线,以电动车的内侧轮连线为转动轴线,建立转动平衡方程式:①假设 $f_z(1,2) = f_z(2,2)$;②离心力指向圆心,而不是垂直于左前轮和右后轮组成的转动轴,2个驱动轮的受力分别为

$$f_z(2,1) = 1/2 [f_0 h / d_4 + mg/2] \quad (6)$$

$$f_z(2,2) = 1/2[mg/2 - f_0h/d_4] \quad (7)$$

由文献[10]可知,采用后轮两轮独立驱动的效率更高,在电机直接串联的驱动方式中,以及低速的情况下,侧倾力矩可以忽略,可以实现电动车的自动差速^[8]。在车速较高的情况下,侧倾力矩不能忽略,从理论分析可知,两轮的转动力矩是不同的,外侧轮明显高于内侧轮,为了满足动力学的需要,必须对 2 个轮毂电机的电压电流加以控制。

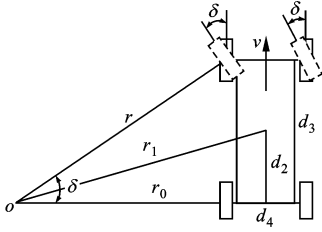


图 3 电动车左转弯模型

3 神经网络 PID 控制

系统采用了神经网络比例积分微分(PID)控制方法,控制器由 BP 神经网络和 PID 控制器构成,BP 神经网络根据系统的运行状态调节 PID 控制器的参数,以期达到最佳的控制效果。PID 控制器负责对电机电流进行闭环控制,控制器输入 $u=i_m$,中间变量 $\zeta=B$, B 为脉宽调制(PWM)信号的占空比,输出 $y=i_o$ 。

经典增量式数字 PID 的控制算法为^[11]

$$\begin{aligned} \zeta(k) &= \zeta(k-1) + \Delta\zeta(k) = \\ \zeta(k-1) &+ K_P[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + \\ &K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (8) \\ e(k) &= u(k) - y(k) \end{aligned}$$

式中: K_P 、 K_I 、 K_D 分别为比例、积分、微分系数。

BP 神经网络的结构为 4-5-3,即 4 个输入层节点、5 个隐含层节点和 3 个输出层节点。神经网络的输入层节点选为 $x=[u(k), y(k), e(k), 1]$,输出层节点分别对应 PID 的 3 个可调参数 K_P 、 K_I 、 K_D 。神经网络的输入层节点的输出为

$$O_j^{(1)}(k) = x(j) \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

隐含层神经元的活化函数取正负对称的 Sigmoid 函数,即

$$f(x) = \tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (10)$$

神经网络隐含层的输入输出为

$$\left. \begin{aligned} N_i^{(2)}(k) &= \sum_{j=0}^4 w_{ij}^{(2)} O_j^{(1)}(k) \\ O_i^{(2)}(k) &= f(N_i^{(2)}(k)) \\ i &= 1, 2, 3, 4, 5 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $w_{ij}^{(2)}$ 为隐层权系数。神经网络输出层的输入输出为

$$\left. \begin{aligned} N_l^{(3)}(k) &= \sum_{i=1}^5 w_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \\ O_l^{(3)}(k) &= g(N_l^{(3)}(k)) \quad l = 1, 2, 3 \\ O_1^{(3)}(k) &= K_P; O_2^{(3)}(k) = K_I; O_3^{(3)}(k) = K_D \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: $w_{li}^{(3)}$ 为由隐层节点 l 到输出层节点 i 的权重;上角标(1)~(3)分别表示输入层、隐含层和输出层。

由于 K_P 、 K_I 、 K_D 不能为负值,所以输出层神经元的活化函数取非负的 Sigmoid 函数,即

$$g(x) = \frac{1}{2}(1 + \tanh x) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (13)$$

取性能指标函数为二次型函数^[12]

$$J = \frac{1}{2}[u(k) - y(k)]^2 \quad (14)$$

采用梯度下降法来修正网络的权系数,即按 J 对权系数的负梯度方向搜索调整,并附加 1 个使搜索快速收敛全局最小的惯性项^[13],则

$$\Delta w_{li}^{(3)} = -\eta(k) \frac{\partial J}{\partial w_{li}^{(3)}} + \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) \quad (15)$$

$$\frac{\partial J}{\partial w_{li}^{(3)}} = \frac{\partial J}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_l^{(3)}(k)} \frac{\partial O_l^{(3)}(k)}{\partial N_l^{(3)}(k)} \frac{\partial N_l^{(3)}(k)}{\partial w_{li}^{(3)}(k)} \quad (16)$$

式中: $\eta(k)$ 为学习速率; α 为惯性系数。由于 $\partial y(k)/\partial \Delta u(k)$ 未知,所以近似用符号函数取代,即 $\partial y(k)/\partial \Delta u(k) \approx \text{sgn}(\partial y(k)/\partial \Delta u(k))$,由此带来计算不精确的影响可通过调整 $\eta(k)$ 来补偿。

由式(8)得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_1^{(3)}(k)} &= e(k) - e(k-1) \\ \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_2^{(3)}(k)} &= e(k) \\ \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_3^{(3)}(k)} &= e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

因此,可得神经网络输出层权系数的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta w_{li}^{(3)}(k) &= \eta(k) \delta_l^{(3)} O_i^{(2)}(k) + \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) \\ \delta_l^{(3)} &= e(k) \text{sgn}\left(\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}\right) \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_l^{(3)}(k)} g'[N_l^{(3)}(k)] \\ l &= 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$g'[\cdot] = 2g(x)[1 - g(x)]$$

依据上述推算方法,可得隐含层权系数的计算公式为

$$\Delta w_{ij}^{(2)}(k) = \eta(k)\delta_i^{(2)} O_j^{(1)}(k) + \alpha \Delta w_{ij}^{(2)}(k-1)$$
$$\delta_i^{(2)} = f'[N_i^{(2)}(k)] \sum_{l=1}^3 \delta_l^{(3)} w_{li}^{(3)}(k) \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

(19)

$$f'[\cdot] = 1 - f^2(x)$$

4 计算机仿真与实验

为验证所述模型的准确性,利用实验室改装的高尔夫球车进行了电动车操纵稳定性实车实验. 电动车的主要参数为:前后轮的距离为 1.56 m,轮距为 1.13 m,电动车质量为 860 kg,绕 X 轴的转动惯量为 184 kg·m²,车轮半径为 0.28 m,电机额定电流为 45 A,相电感为 3.5 mH,重心距前轴的距离为 0.94 m,重心距后轴的距离为 0.62 m,汽车绕 Z 轴的转动惯量为 724 kg·m²,重心的高度为 0.38 m,电机额定电压为 48 V,电机相电阻为 0.266 Ω,电磁转矩系数为 21 N·m/A.

正常干燥沥青路面的摩擦系数为 0.6,雨天路面摩擦系数降为 0.4,雪天则为 0.28,结冰路面只有 0.18. 有可能一个车轮行驶在干燥的路面上,而另外一个车轮却行驶在潮湿或者冰雪路面上. 当电动车转弯时,特别是高速转弯时,由于侧倾力矩的存在,使 2 个车轮受到的力矩差异非常大. 首先将电动车加速至 40 km/h,然后恒速行驶. 电动车在干燥的路面行驶,地面的摩擦系数为 0.6,车轮的转速为 370 r/min,在第 3 s 到第 10 s 的时间内,电动车的左后轮行驶在潮湿的路面上,地面摩擦系数为 0.4,如图 4 所示. 在没有控制系统的情况下,电动车左右轮的转速响应如图 5 所示,由于地面摩擦力的不平衡,使得 2 个车轮的转速不同,从而引起车辆行驶的不平稳.

在加入控制系统后,电动车左右轮的转速响应如图 6 所示. 从图 6 中可以看出,与无控制的电动车相比,神经网络控制系统明显提高了电动车在摩擦系数不对称路面上行驶的稳定性. 仿真结果表明,基于 BP 神经网络的 PID 控制系统很好地跟踪了电动车的运动状态,实现了电动车的转矩实时调整,提高了电动车的行驶平稳性和极限行驶能力.

图 7 为电动车在 30 km/h 的车速下进行蛇行实验时,所测得的侧向加速度与同样工况下仿真得

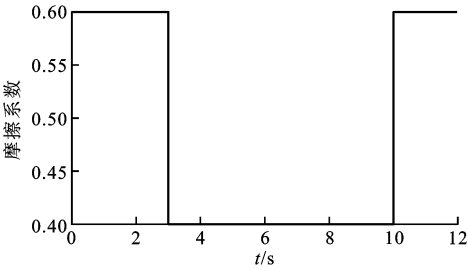
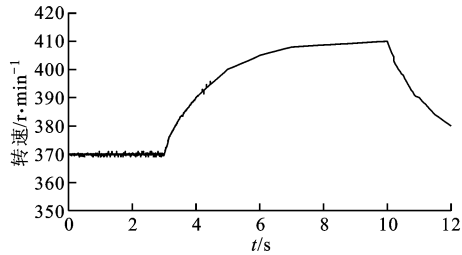
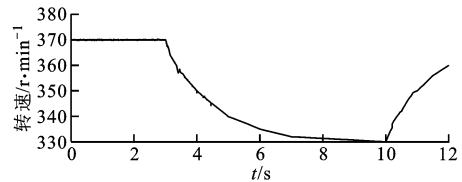


图 4 左右轮的摩擦系数



(a)左驱动轮



(b)右驱动轮

图 5 电动车驱动轮的转速

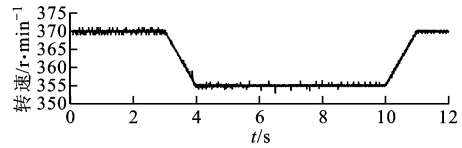


图 6 神经网络控制的车轮转速

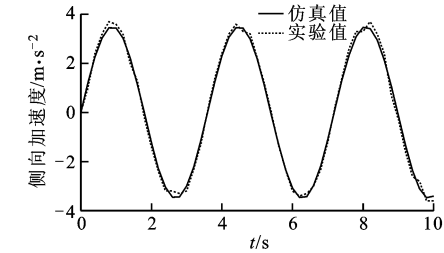


图 7 电动车的侧向加速度对比曲线

到的侧向加速度的对比曲线. 由于在实际实验过程中驾驶员操纵行为的差异,实验数据的侧向加速度峰值会有所波动,但误差较小,因此仿真数据与实验数据吻合得较好.

5 结 论

本文建立了电动车动力学模型,电动车采用两轮串联联接方式,有效地解决了在低速情况下的自动差速。通过分析,发现在电动车高速转弯以及2个车轮的摩擦系数不一样时,2个驱动轮受力也不同,因此容易引起串联式电动车运行的不稳定。为了解决这个问题,在发生不平衡状态时,对2个车轮分别进行控制,并利用MATLAB/Simulink软件建立了计算机仿真模型。通过电动车实验数据与仿真结果的对比,表明本文所述模型及控制方法可以很好地反映电动车在各种工况下的响应特性,从而提高了电动车运行的稳定性。

参考文献:

- [1] 曹秉刚,张传伟,白志峰,等. 电动汽车技术进展和发展趋势[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(1): 1-5.
CAO Binggang, ZHANG Chuanwei, BAI Zhifeng, et al. Technology progress and trends of electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(1): 1-5.
- [2] 李兴虎. 电动汽车概论[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2005: 192-195.
- [3] 李素华. 电控四轮驱动技术的研究现状与发展趋势[J]. 现代机械, 2005(6): 74-75.
LI Suhua. Survey on State of Development and trends in electric power four-wheel driving technology [J]. Modern Machinery, 2005(6): 74-75.
- [4] 李静,李幼德,赵健,等. 四轮驱动汽车牵引力控制系统研究[J]. 吉林大学学报(工学版), 2003, 33(4): 1-6.
LI Jing, LI Youde, ZHAO Jian, et al. Research on traction control system for four wheels drive vehicle [J]. Journal of Jilin University of Technology (Engineering and Technology Edition), 2003, 33(4): 1-6.
- [5] 郭立书,葛安林,张泰,等. 电子控制最佳扭矩分配4WD系统研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 16-19.
GUO Lishu, GE Anlin, ZHANG Tai, et al. Study on electronic control optimal torque distribute system for

4WD [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 16-19.

- [6] 王庆年,张缓缓,靳立强. 四轮独立驱动电动车转向驱动的转矩协调控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(5): 985-989.
WANG Qingnian, ZHANG Huanhuan, JIN Liqiang. Torque co-ordinated control of four-wheel independent drive electric vehicles in cornering [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(5): 985-989.
- [7] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 第2版. 北京:机械工业出版社, 2006: 114-116.
- [8] TAO Guilin, MA Zhiyum, ZHOU Libing, et al. A novel driving and control system for direct-wheel-driven electric vehicle [J]. IEEE Trans on Magnetics, 2005, 41(1): 497-500.
- [9] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春:吉林科学技术出版社, 1991: 195-196.
- [10] 李竟成. 电动汽车驱动控制与再生制动研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院, 2002.
- [11] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2006: 215-218.
- [12] 肖本贤,郭福权,娄天玲,等. 基于模糊神经网络预测转角的无传感器无刷直流电动机换相控制研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(8): 1120-1135.
XIAO Benxian, GUO Fuquan, LOU Tianling, et al. The commutation control research of BLDCM based-on fuzzy neural network for estimating the rotor position [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(8): 1120-1135.
- [13] 沈柏桥,潘海鹏. BP网络智能PID控制算法在交流调速系统中的应用[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(4): 412-416.
SHEN Boqiao, PAN Haipeng. Research and application of intelligent PID algorithm based on BP network [J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(4): 412-416.

(编辑 管咏梅)