

新型电动车电子差速控制策略研究

葛英辉^{1,2},倪光正¹

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 宁波大学 信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211)

摘 要: 为了提高驱动轮独立控制的轮式电动车(EV)的转向控制性能,提出了新颖的电子差速控制策略.该控制策略参考路面状况和轮胎偏转率,采用比例控制估算每个驱动轮在转向时的目标滑移率,基于每个驱动轮的滑移率分配转矩,指出轮式驱动不宜采用车轮速度作为控制量,进而采用鲁棒性好的开关控制实施转矩控制.并构建了用于样车的基于 DSP2407 的电子差速控制系统.仿真和实验研究表明,相比于传统的机械差速器,采用新的控制策略后,提高了控制系统的鲁棒性和稳定性,车辆具有更佳转弯性能和控制响应.

关键词: 电子差速系统;电动车(EV);DSP;轮式驱动

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2005)12-1973-06

Novel electric differential control scheme for electric vehicles

GE Ying-hui^{1,2}, NI Guang-zheng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to enhance the steering control performance of the in-wheel motor driven electric vehicle (EV), a novel electric differential control strategy was proposed. According to the road type and the tyre deflection ratio, the object slip ratio of each driven wheel in turn was determined by using the proportional control. Based on object slip ratio of each driven wheel, the torque was distributed on two driven wheels, and was controlled by good robustness switch control. The strategy that the wheels speed was not used as control variables was put forward, and the DSP2407 based electric differential control system for a prototype vehicle was also developed. Experimental results show that compared with the traditional mechanical differential device, the proposed strategy improves the robustness and stability of the control system, and makes the vehicle has better turning performance and the control response.

Key words: electric differential system; electric vehicle (EV); DSP; in-wheel driving

轮式驱动电动车的开发作为一种新颖的电动车(electric vehicle, EV)研究方向,同步于当今全球电动车研发及其产业化的进展,以其令人瞩目的应用前景,受到学术和工程界的普遍关注.因为轮式驱动电动车每个驱动轮带有一个独立驱动电机,既消除了传动中的机械磨损,提高了传动效率,又具有较小的体积和最轻的重量,所以在微型电动车应用方面有着独特的优势.

当车辆转弯行驶时,内轮将和外轮有不同的速度以防止不稳定的驱动,传统的内燃机车辆上通过一个机械差速器实现这个功能.机械差速器的运动规律是:无论转弯行驶或直线行驶,两侧驱动车轮的转速之和始终等于差速器壳转速的 2 倍.常用的对称式锥齿轮差速器,其内摩擦力矩很小,实际上可以认为无论左右驱动轮转速是否相等,两边扭矩总是平均分配,这样的分配比例对于车辆在良好路面上

直线或转弯行驶时,其运行状态都是满意的,但是车辆行驶工况复杂多变,至今还没有哪一种差速器可以满足所有路况下的功能要求^[1,2]. 为了达到既能差速又能差力的目的,目前仍在进行一些新型的如差速锁、差力差速器等的研究. 本文所设计的轮式驱动电动样车,每个驱动轮都能独立提供驱动力,可以按需要独立分配功率,因此不再需要机械差速齿轮,其差速功能主要由软件完成,即代之为电子差速控制. 电子差速完全摆脱了目前传统车辆主要从机械角度改进差速器的技术路线,其研究内涵相对于机械差速器无疑有本质上的飞跃和进步.

对于轮式驱动电动车电子差速系统的分析和建模研究极少. 本文根据轮式驱动电动车的特点,提出了一种基于滑移率分配每个驱动轮驱动转矩和采用鲁棒性好的开关控制实施转矩控制的新的电子差速策略,并设计了基于 DSP2407 的电子差速控制系统.

1 现有电动车电子差速模型分析

在低速时,图 1 所示的分析模型目前广泛用于车辆的驱动策略的研究^[3].

该分析模型的假设条件为: 1) 车体刚性; 2) 车轮纯滚动,即不考虑已发生滑移、滑转和轮胎离开地面的运行状态; 3) 轮胎侧向变形与侧向力成正比,即不考虑轮胎材质与结构上的非线性和因垂直载荷不同造成的轮胎侧向弹性系数的变化.

从这一简化的分析模型出发,可得

$$R = \frac{L}{\tan \delta}, \tag{1}$$

$$R_{in} = R - \frac{B}{2}, \tag{2}$$

$$R_{out} = R + \frac{B}{2}, \tag{3}$$

$$C_{in} = 2\pi R_{in} = 2\pi R - \pi B, \tag{4}$$

$$C_{out} = 2\pi R_{out} = 2\pi R + \pi B, \tag{5}$$

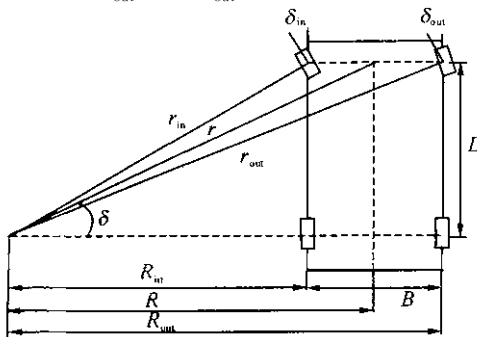


图 1 低速行驶时 Ackermann 和 Jeantand 模型^[3]

Fig. 1 Ackermann and Jeantand model under low speed^[3]

$$k = \frac{\pi B}{\Delta T}, \tag{6}$$

$$v_{in} = \frac{C_{in}}{\Delta T} = 2\pi \frac{R}{\Delta T} - \frac{\pi B}{\Delta T} = v_c - k, \tag{7}$$

$$v_{out} = \frac{C_{out}}{\Delta T} = 2\pi \frac{R}{\Delta T} + \frac{\pi B}{\Delta T} = v_c + k. \tag{8}$$

式中: C_{in} 、 C_{out} 分别为内、外侧车轮轨迹圆的圆周长, v_{in} 、 v_{out} 分别为内、外侧车轮的旋转线速度(m/s), v_c 为后轮平均旋转线速度(m/s), ΔT 为对应于轨迹一圈所需要的时间.

遵循该模型以驱动车轮速度为控制变量的技术思想,文献[1]提出的电子差速控制系统如图 2 所示. 该系统将车体速度和转角作为输入参数,通过经样车训练的基于神经网络的差速控制器确定每个驱动轮的目标速度,对每个驱动轮进行速度闭环控制. 应该指出, Ackermann 和 Jeantand 模型没有考虑轮胎的影响,忽略了车辆转弯行驶时的离心力,因此对于车辆弯道上的运行,只进行了静态分析,有明显的局限性. 当然,基于神经网络的建模计及了系统的非线性,但应指出,当车体结构变化,车体数学模型和参数也会相应变化,这就需要重新训练系统,此外该系统的实验结果并没有证明这个策略有助于完善车辆的转向性能.

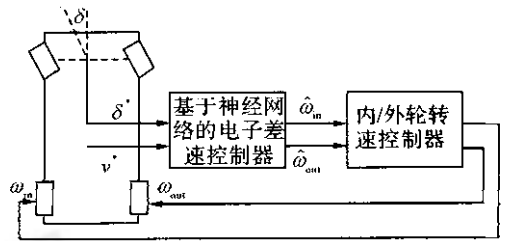


图 2 基于神经网络的电子差速系统结构框图

Fig. 2 Scheme of neural network based electric differential system

国内关于电子差速的研究甚少,在能够见到的文献中均采用了更为简化的模型,即

$$\frac{\omega_3}{\omega_4} = \frac{R_{in}}{R_{out}} \tag{9}$$

式中: ω_3 、 ω_4 分别为内、外侧车轮的旋转角速度. 该简化模型表明,车辆纯滚动转弯时,内外侧车轮的转速比即为其转弯半径比.

此外,由式(9)分析模型可知,在给定转角的情况下,4 个轮速和整车速度共 5 个量的自由度为 1,如果后轮驱动并同时 2 个驱动轮进行转速闭环控制,一旦实际系统稍有误差,将导致被控各个车轮滑移率不同,甚至会产生滑转,造成系统不稳定,影响整车的运行,因此本文独立提出轮式驱动电动车的

电子差速不宜采用车轮速度作为控制变量的技术观点,进而提出基于滑移率的电子差速算法.新的电子差速控制方案,摈弃了已有电子差速的技术思路,以驱动轮的转矩为控制变量,在力求完善电动汽车操纵性能和平稳性的前提下,在 EV 直线前行时,将转矩平均分配在左右轮上;在转向运行时,则对左右驱动轮输入不同的转矩以确保驾驶更安全平稳.

2 新的电动车电子差速控制算法

2.1 车辆横向动力学方程

电动车的转向行驶是由驾驶员、车辆、行驶环境组成的复杂系统.电动车的空间运动自由度主要包括:前后、左右、上下的平动和绕 3 个垂直轴线的转动.对转向行驶的分析,一般集中于研究侧向、横摆运动,为此本文提取了二自由度电动汽车转向分析模型,如图 3 所示.由此可得车体的受力和力矩平衡方程为

$$m(\dot{v} + u\omega_r) = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4, \quad (10)$$

$$J_z \dot{\omega}_r = a(Y_1 + Y_2) - b(Y_3 + Y_4) - B(X_1 + X_3)/2 + B(X_2 + X_4)/2. \quad (11)$$

各轮的滑移率定义为

$$\lambda_i = \begin{cases} \frac{V_{\omega_i} - V_i}{V_{\omega_i}}, & \text{当 } V_{\omega_i} \geq V_i, \\ \frac{V_i - V_{\omega_i}}{V_i}, & \text{当 } V_{\omega_i} \leq V_i. \end{cases} \quad (12)$$

式中: $X_i = F_{xi} \cos \delta_i - F_{yi} \sin \delta_i$, $Y_i = F_{xi} \sin \delta_i + F_{yi} \cos \delta_i$, $i=1 \sim 4$, M 为车体质量, b 为车体重心距前后轴的距离, B 为内外车轮的轮距, J_z 为车体转动惯量, F_{y1}, F_{y2} 分别为前轮内、外轮的侧向反作用力, F_{y3}, F_{y4} 分别为后轮内、外轮的侧向反作用力, F_{x1}, F_{x2} 分别为前轮内、外轮的切向反作用力, F_{x3}, F_{x4} 分别为后轮内、外轮的切向反作用力, ω_r 为车体横摆角速度, φ_r 为车体横摆角, $\dot{\varphi}_r = \omega_r$, V 为车体速度

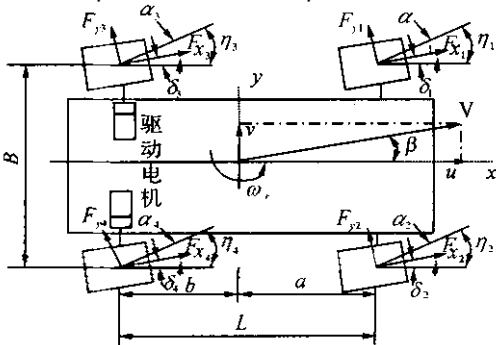


图 3 二自由度电动汽车转向模型图

Fig. 3 Turning model for EV with two freedoms

矢量, v, u 分别为车体速度矢量在 x, y 轴上的分量, V_i 为 4 个车轮的车轮速度, V_{ω_i} 为 4 个车轮的车轮角速度.

求解上式各变量所需的公式分别为^[4]: 车体的速度为 $V = \sqrt{u^2 + v^2}$; 各车轮轮速为

$$V_1 = \sqrt{(u + B\omega_r/2)^2 + (v + a\omega_r)^2} \cos \alpha_1,$$

$$V_2 = \sqrt{(u + B\omega_r/2)^2 + (v + a\omega_r)^2} \cos \alpha_2,$$

$$V_3 = \sqrt{(u - B\omega_r/2)^2 + (v - b\omega_r)^2} \cos \alpha_3,$$

$$V_4 = \sqrt{(u + B\omega_r/2)^2 + (v - b\omega_r)^2} \cos \alpha_4;$$

轮胎垂直载荷为

$$N_1 = \frac{b}{2L} \left(mg - \frac{2hF_c}{B} \right), N_2 = \frac{b}{2L} \left(mg + \frac{2hF_c}{B} \right),$$

$$N_3 = \frac{a}{2L} \left(mg - \frac{2hF_c}{B} \right), N_4 = \frac{a}{2L} \left(mg + \frac{2hF_c}{B} \right);$$

离心力为 $F_c = mV(\omega_r + \dot{\beta})$; 车体质心侧偏角为 $\beta = \arctan(v/u)$; 两后轮的旋转角速度为 $J_w \dot{V}_{\omega_i}/R^2 = T_i/R - F_{xi}$, ($i=3, 4$); 地面切向反作用力为 $F_{xi} = \mu_{xi} N_i$, 其中 $\mu(\lambda)$ 由函数 $\mu(\lambda) = 2\mu_p \lambda_p \lambda / (\lambda_p^2 + \lambda^2)$ 来拟和实际测试曲线^[5]; 4 个轮子的轨迹角为 $\eta_1 = \eta_2 = (v + a\omega_r)/u$, $\eta_3 = \eta_4 = (v - b\omega_r)/u$; 相应的轮胎侧偏角为 $\alpha_i = \eta_i - \delta_i$, $i=1 \sim 4$, 轮胎所受地面侧向反作用力 $F_{yi} = -c_i \alpha_i$. 这些关系式中, R_w 为车轮半径, h 为质心高度, L 为前后轮间的轴距, $L = a + b$, J_w 为车轮转动惯量, C_i 为轮胎的侧偏刚度, β 为车体质心的侧偏角, μ_{xi}, μ_{yi} 分别为各轮切向、侧向附着系数, α_i 为轮胎的侧偏角, η_i 为各车轮轮胎的轨迹角, N_i 为各轮胎的垂直载荷, 其中 δ_i, δ_r 分别为前、后轮的转向角度, $\delta_1 = \delta_2 = \delta_i, \delta_3 = \delta_4 = \delta_r$.

2.2 基于滑移率控制和开关控制的新电子差速策略

基于前述分析, 本文将转弯时的转矩分配计算与车轮滑移率控制相结合, 提出一种新的用于轮式驱动电动车的电子差速控制策略, 其基本原理是: 根据来自加速踏板的转矩输入量和与方向盘操作对应的前轮转向角度输入量, 参考路面状况和估算的偏转率, 算出每个车轮在转向时的目标滑移率, 应用鲁棒性好的开关控制对左右驱动轮独立地分配转矩. 现详述如下: 样车采用前轮转向、后轮驱动的结构模式. 设该车在前轮转向角为 δ_i^* 、后轮转向角 $\delta_r = 0$ 时左转弯, 加速踏板对应的转矩参考值为 T^* , 左右驱动轮实际滑移率差为

$$\Delta\lambda_x = \lambda_3 - \lambda_4. \quad (13)$$

在轮胎的线性区域内, 偏转率可以用 $-V \cdot \delta/L$ 来估算, 因此由偏转运动决定的左右驱动轮的滑移率差为

$$\Delta\lambda_r^* = K_1(\omega_r - V\delta_f^*/L), \quad (14)$$

式中: K_1 为控制增益, 调节它可以得到所需的偏转运动. 以 λ_3^* 、 λ_4^* 分别表征左、右驱动轮在给定转向条件下的目标滑移率. 对应于左转弯工况, λ_3^* 由系统根据路面条件确定, 由此根据式(13), 得 λ_4^* 为

$$\lambda_4^* = \lambda_3^* - \Delta\lambda_r^*. \quad (15)$$

根据所确定的每个驱动轮的目标滑移率, 分别设计基于滑移率控制的开关变结构控制器, 其控制函数分别为

$$\begin{aligned} T_3 &= k_L \operatorname{sgn}(D_L), \\ T_4 &= k_R \operatorname{sgn}(D_R). \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $D_L = \lambda_3^* - \lambda_3$, $D_R = \lambda_4^* - \lambda_4$, k_L 和 k_R 均为控制增益, 本文取常数.

此外开关控制的应用提高了控制的鲁棒性和稳定性, 但由于开关函数 sgn 的系数是常数, 在切换面附近容易产生因非理想切换引起的高频颤振, 为此本文围绕切换面引入一个固定宽度 φ 的边界层, 在边界层内分别设定为

$$k_L = D_L/\varphi, \text{ 当 } |D_L| < \varphi, \quad (17)$$

$$k_R = D_R/\varphi, \text{ 当 } |D_R| \geq \varphi. \quad (18)$$

实践证明, 边界层的设计消减了常规控制中存在的颤振现象.

本文构造的电子差速策略的算法框图如图 4 所示. 在转向运动中, 这一电子差速算法对左右驱动轮输入不同的转矩, 确保了驾驶的安全性与平稳性, 并能得到更优异的转向性能和更快的响应特性.

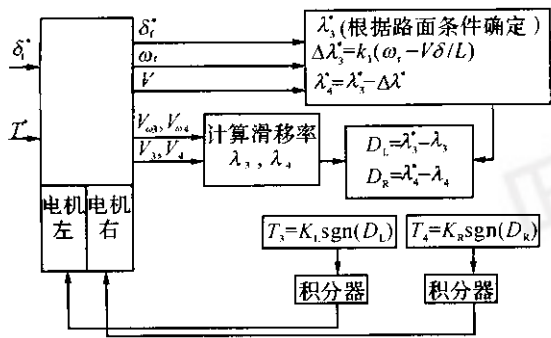


图 4 电子差速算法框图

Fig. 4 Algorithm pattern of novel electric differential strategy

3 仿真结果及分析

本研究采用 Matlab/Simulink 进行建模和仿真模拟. 仿真中车辆模型各参数取值分别为: $m = 2\ 500\ \text{kg}$, $R = 0.32\ \text{m}$, $J_w = 13.7\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$, $J_z = 450\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$, $L = 1.72\ \text{m}$, $h = 0.6\ \text{m}$, $a = 0.9\ \text{m}$,

$b = 0.82\ \text{m}$, $B = 1.12\ \text{m}$, 前轮侧偏刚度 $C_1 = C_2 = 10\ 500\ \text{N/rad}$, 后轮侧偏刚度 $C_3 = C_4 = 12\ 000\ \text{N/rad}$, 当车辆在干路面行驶的模拟中, $\mu_p = 0.8$, $\lambda_p = 0.2$, $\lambda_3^* = 0.19$, $k_L = 50$, $k_R = 100$, $K_1 = 0.11$, $\varphi = 0.001$.

因为在理想的转弯情况下, x 方向的速度 u 不变或变化极慢, 所以计算时 u 取一常值. 对前述的电子差速控制策略进行仿真研究的同时, 为进一步论证新策略的优异秉性, 在系统研究的基础上, 以传统的对称式锥齿轮机械差速器的等转矩分析为背景, 进行了等转矩分配的转向运行的模拟仿真研究. 作为对比, 两种策略取了相同的初始条件, 即车辆直线行驶时, 在初始纵向速度为 $u = 5\ \text{m/s}$, 踏板对应初始转矩 $T^* = 1\ 200\ \text{N} \cdot \text{m}$ 时, 以 $\delta_f^* = 2^\circ$ 左转弯, 所得的仿真结果如图 5 所示. 图中实线代表采用新方案的计算结果, 虚线代表采用传统机械差速方案的计算结果.

由图 5 所示结果的对比可以看出, 新策略得到的质心侧偏角度 β 、瞬时转弯半径 ρ 、向心加速度 V 都明显优于等转矩分配的传统机械差速控制, 车辆获得了更好的操作性能, 并且每个驱动轮的附着系数利用率高, 能够获得更大的加速度/减速度. 此外轮式驱动电动车由于省去了机械传动机构的损耗和延时, 差速系统有更快的响应特性和效率.

4 基于 DSP2407 的电子差速系统设计

本文构建了基于 DSP2407 的双轮毂电机的电子差速控制系统, 其总体框图如图 6 所示. 功率电路采用半桥调制方式; 三相 Y 联接的永磁无刷直流方波轮毂电机采用两两导通方式. 数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 选用美国德州仪器公司的电机微控制器 TMS320X2407A, 其供电电压降至 $3.3\ \text{V}$, 减小了控制器的功耗; 此外 DSP 片内资源丰富, 使控制电路大为简化.

DSP 中电子差速算法实施框图如图 7 所示. 2407A 芯片中有 2 个事件管理模块 EVA、EVB, 每个事件管理器模块包括通用定时器、比较单元、捕获单元等, 分别用于控制轮式驱动样车的 2 个轮毂电机, 同时 2 个电源保护中断 PDPINTA 和 PDPINTB 分别对应于 EVA、EVB, 这样采用一个 CPU 即可独立控制 2 个驱动电机. 如果采用常用的 24X 芯片, 则需要 2 片芯片分别用于两个电机的控制, 因此本文基于 DSP2407 设计的电子差速控制系统, 系统结构可以得到极大的简化.

样车的轮毂电机的额定直流电压为 $96\ \text{V}$, 额

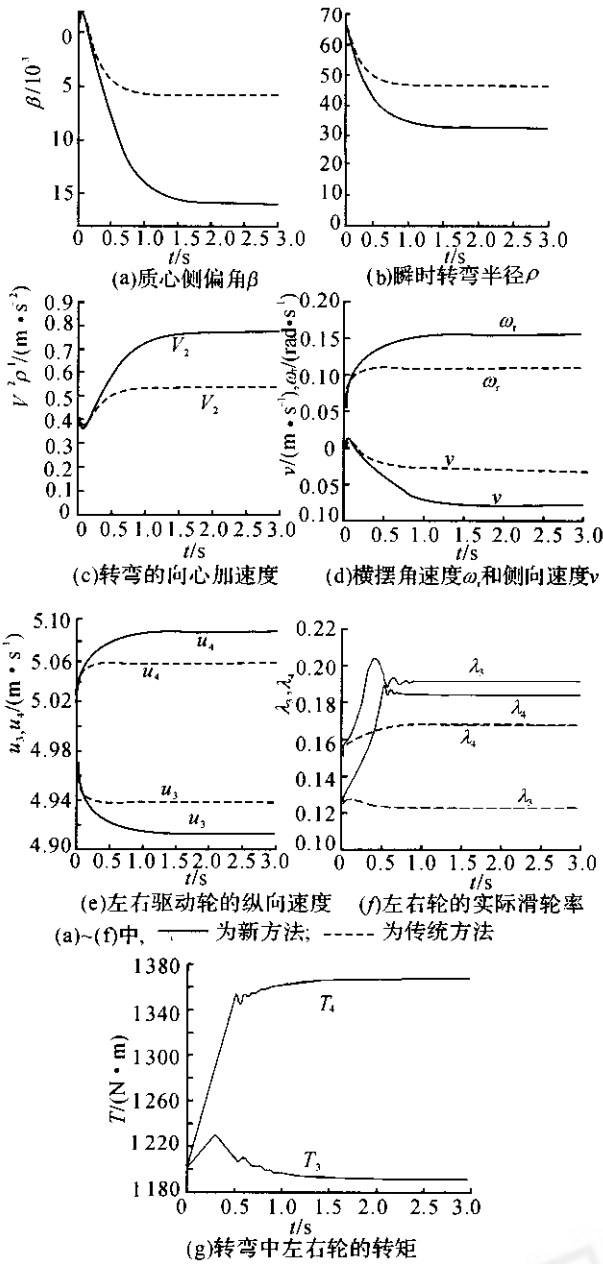


图 5 初始纵向速度 $u=5\text{ m/s}$ 时仿真研究结果

Fig. 5 Numerical results under $u=5\text{ m/s}$

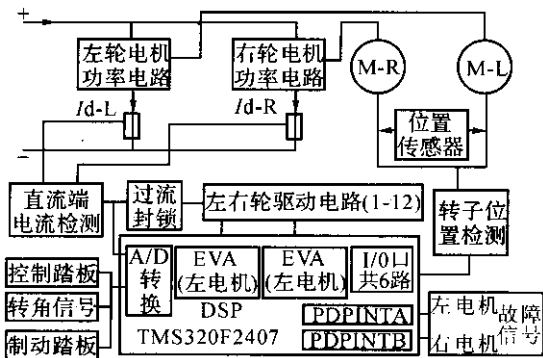


图 6 控制系统总体框图

Fig. 6 Schematic diagram of proposed control system

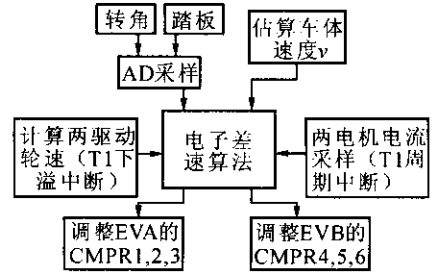
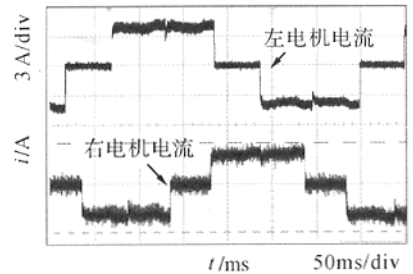


图 7 电子差速算法的实施框图

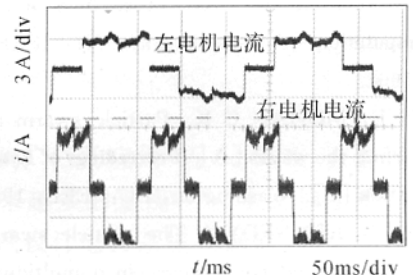
Fig. 7 Schematic diagram of electric differential scheme

定输出功率为 0.9 kW ,极对数为 8,额定转速为 360 r/min . 空车重量约为 250 kg ,含电池重量 57.6 kg ,轮距 95 cm ,轴距 130 cm ,整车尺寸为 $240\text{ cm}\times 120\text{ cm}\times 110\text{ cm}$,定员 2 人,最大时速 22 km/h .

现有实验条件下得到的结果如图 8 所示,其中图 8(a)为直线运行时两电机电流的实际测量结果. 由于从电流波形的频率可以推算电机的转速,因此可看出此时两电机的转矩和转速基本相同,图 8(b)为转角约 5° 时两电机电流的实测值,此时外侧电机的转矩大于内侧电机的转矩,同时转速高于内侧电机的转速,实现了本文提出的电子差速控制技术思想.



(a) 直线行驶时各驱动电机的电流



(b) 转角为 5° 时转弯行驶时各驱动电机的电流

图 8 实验结果

Fig. 8 Experimental results

5 结语

本文研究了新型轮式驱动电动车的电子差速控制策略,应用本文提出的电子差速算法后,轮式驱动电动车转弯性能和系统的效率更为优异,因而本款车型在电动车领域独具特色,此外采用鲁棒性好的

开关控制,适合于这类参数时变的非线性系统的控制,提高了控制系统的鲁棒性和稳定性.设计制作的基于 DSP2407 的电子差速控制系统的初步实验,验证了本文所提出技术方案的实用性.下一步研究着重于车辆转弯时目标滑移率的确定、最优滑移率控制及基于滑移率的新的控制方法等问题.

参考文献(References):

- [1] HORI Y, TOYODA Y, TSURUOKA Y. Traction control of electric vehicle: Basic experimental results using the test EV, "UOT" [J]. **IEEE Transactions on Industrial Application**. 1998,34:1131 - 1138.
- [2] PARK J W, KOO Dae-Hyun, KIM Jong-Moo, *et al*. High performance drive unit for 2-motor driven electric

vehicle [A]. **Proceedings of the Fourteenth Applied Power Electronics Conference and Exposition** [C]. Dallas: IEEE, 1999,1:443 - 449.

- [3] LEE Ju-Sang, RYOO Y J, LIM Y C, *et al*. A neural network model of electric differential system for electric vehicle [A]. **Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation** [C]. Nagoya: IEEE, 2000,1:83 - 88.
- [4] M 米奇克(西德). 汽车动力学[M]. 北京:人民交通出版社, 1992.
- [5] QIAN Ming. Sliding mode controller design for ABS system [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997:33, 55.

(上接第 1949 页)

参考文献(References):

- [1] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [A]. **Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks** [C]. Piscataway NJ: IEEE, 1995:1942 - 1948.
- [2] KENNEDY J. The particle swarm: social adaptation of knowledge [A]. **Proceedings of Evolutionary Computation** [C]. Indianapolis: IEEE, 1997 : 303 - 308.
- [3] SHI Y, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer [A]. **Proceedings of Evolutionary Computation (CEC 1998)** [C]. Piscataway NJ: IEEE, 1998: 69 - 73.
- [4] SUGANTHAN P N. Particle swarm optimiser with neighbourhood operator [A]. **Proceedings of Evolutionary Computation** [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 1999: 1958 - 1962.
- [5] OZCAN E, MOHAN C K. Particle swarm optimization: surfing the waves [A]. **Proceedings of Evolutionary Computation** [C]. Washington, DC: IEEE, 1999.
- [6] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, 2002, 6(1):58 - 73.
- [7] KENNEDY J. Small worlds and mega-minds: effects of neighborhood topology on particle swarm performance

[A]. **Proceedings of Evolutionary Computation** [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 1999: 1931 - 1938.

- [8] KENNEDY J, MENDES R. Population structure and particle swarm performance [A]. **Proceedings of Evolutionary Computation** [C]. Honolulu, Hawaii: IEEE, 2002:167 - 1676.
- [9] 傅强, 胡上序, 赵胜颖. 基于 PSO 算法的神经网络集成构造方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2004, 38(12): 1596 - 1600.
- FU Qiang, HU Shang-xu, ZHAO Sheng-ying. PSO-based approach for neural network ensembles [J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2004, 38(12):1596 - 1600.
- [10] ANGELINE P J. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: philosophy and performance differences [J]. **Evolutionary Programming**, 1998, 8: 601-610.
- [11] PARSOPOULOS K E, PLAGIANAKOS V P, MANGOULAS G D. Objective function stretching to alleviate convergence to local minima [J]. **Nonlinear Analysis**, 2001 47(5):3419 - 3424.
- [12] ANGELINE P J. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: philosophy and performance differences [J]. **Evolutionary Programming**, 1998:1956 - 1959.