

轮毂电机驱动电动汽车电子差速系统研究

赵艳娥, 张建武

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)



摘要: 针对轮毂电机独立驱动电动汽车电子差速问题进行了研究。电子差速器要实现当车辆直线行驶时, 两驱动车轮的轮速相等, 而当车辆转向时, 欲使车轮不发生滑移, 车轮相对转向中心的角速度相等。为此, 考虑车辆转向行驶时轴荷转移、向心力以及轮胎侧偏角的影响, 计算每个车轮需要的驱动力矩, 以车轮的滑移率为控制目标, 提出了基于滑模控制(SMC)的电子差速控制策略, 并在 Matlab/Simulink 环境下进行了仿真。仿真结果表明, 此电子差速装置可以实现车辆直线行驶和转弯过程中将滑移率控制在最佳范围内, 车辆能够按照预定方向稳定行驶。

关键词: 电动汽车; 轮毂电机; 电子差速; 滑模控制

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2008) 18-4767-05

Study on Electronic Differential Control System
of Independent In-wheel Motor Drive Electric Vehicle

ZHAO Yan-e, ZHANG Jian-wu

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A novel electronic differential (ED) system for an in-wheel motor drive electric vehicle (EV) was proposed. The controller simulates the behavior of the differential. When a vehicle drives on a straight line, the speed of each drive wheel is equal. While on a curvilinear trajectory, the speed of the inner wheel has to be different from that of the outer one in order to maintain vehicle stability and avoid tire slippage. The ED system distributes torque and power to each motor to meet the requirements of each wheel. However, it is difficult to analyze the nonlinear behavior of the differential system because of the need to considering tire characteristics, the steering angle and the load shift during turns. To address these problems, an ED control system based on the sliding mode control (SMC) method was proposed considering these factors. Simulation and analysis were conducted in Matlab/Simulink environment. The simulation results show that good performances are achieved based on the proposed control strategy. The ED control system can keep the slip rate within the optimized range, ensuring the stability of the vehicle either on a straight line or on a curve.

Key words: electric vehicle (EV); in-wheel motor; electronic differential (ED); sliding mode control (SMC)

引言

电动汽车可利用多种能源, 结构简单, 使用维修方便, 排放污染物少, 是解决能源短缺和环境污染问题的重要途径之一。然而, 电动汽车的优点不仅限于此, 从结构和控制的角度而言, 电动汽车具有普通燃油汽车无法比拟的优势^[1]。按照动力传动系统的结构, 电动汽车可以分为两种: 一种是在原有发动机汽车的基础上改装的, 即用一个电机代替发动机的集中驱动形式, 这种结构与传统燃油汽车类似, 动力由电机发出沿变速器、传动轴、差速器、半轴传递到车轮, 驱动车辆前进, 传动机构复杂, 易产生振动、噪声等问题; 另一种是根据电动汽车本身的特点而研制的分布式驱动形式, 即电机通过减速装置或者直接安装在车轮内, 驱动车轮前进。这种结构可去掉复杂的变速装置、机械差速器、半轴等传动系部件, 不仅简化了底盘结构, 而且降低了整车质量, 提高传动效率, 有助于提高电动汽车的续驶里程, 同时, 采用轮毂电机单独驱动, 可以减小单个电机尺寸, 使整车质量

分布更加合理, 并降低了整车底板的高度^[1,2], 尤其适用于城市区域内运行, 是电动汽车发展的新方向。

由于轮毂电机驱动电动汽车每个驱动车轮连接一个电机, 每个电机可以单独提供驱动力矩, 电机之间没有机械联系, 而车辆转向过程中由于路面附着系数不同以及轴荷转移等因素的影响, 使得其控制过程极为复杂, 如何有效的控制两个电机完成预期转向, 是轮毂电机独立驱动电动汽车研究的重点和难点。目前国内相关研究相对较少, 其中大部分集中在带有差速运行的特殊电机的设计上^[2]。文献[3]以左前轮转速作为标定车速, 调节其它三个车轮转速, 实现四个车轮绕转向中心同角速度旋转, 但并没有考虑轮胎侧偏角和滑移率的影响。文献[4]应用的神经网络控制, 考虑了车辆运动非线性特性, 但未考虑轴荷转移和向心力的影响。本文考虑滑移率和轴荷转移以及轮胎非线性特性的影响, 以正在研制的适于机场和车站之间运行的电动驳运车为研究对象, 基于滑模变结构控制理论, 针对后轮独立驱动电动汽车电子差速控制系统问题进行深入探讨。

1 轮毂电机驱动电动汽车的结构

整车控制系统结构如图1所示, 采用144V镍氢电池为

收稿日期: 2007-04-29

修回日期: 2007-11-17

基金项目: 国家863计划重大专项子课题 (2001AA505000-114)

作者简介: 赵艳娥(1976-), 女, 河北人, 博士生, 研究方向为汽车系统动力学和电动汽车仿真与控制技术。

动力源对电机供电, 两台 5kW 低速大转矩盘式永磁同步电机分别直接安装在两个后车轮内, 形成前轮转向, 后轮轮毂电机驱动的方式。

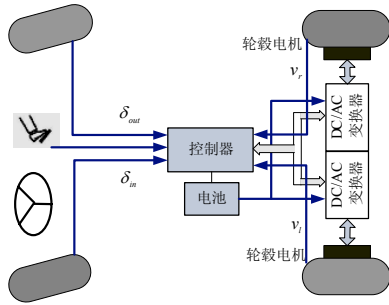


图1 轮毂电机驱动电动汽车控制系统结构示意图

每个电机有单独的控制, 整车控制器通过接收驾驶员方向盘转角及加速踏板、制动踏板、电池管理系统、电机控制器以及车轮转速等信号, 根据内部控制策略计算每个电机需要提供的转矩, 并向电机控制器发出指令, 调节电机的转速, 从而控制驱动车轮的转速。

2 车辆动力学方程

2.1 整车动力学方程

整车动力学模型如图2所示。这里重点研究轮毂电机独立驱动电动汽车的电子差速控制系统, 因此, 忽略悬架特性, 选取纵向、侧向和横摆三个自由度, 建立整车动力学模型, 其方程如下^[5]:

$$m(\dot{v}_x - v_y\gamma) = F_{xrl} + F_{xrr} - F_{yfl} \sin \delta_m - F_{yfr} \sin \delta_{out} - fmg \cos \alpha - \frac{1}{2} C_D A \rho v^2 - mg \sin \alpha \quad (1)$$

$$m(\dot{v}_y + v_x\gamma) = F_{yfl} \cos \delta_m + F_{yfr} \cos \delta_{out} + F_{yrl} + F_{yrr} \quad (2)$$

$$I_z \dot{\gamma} = l_f (F_{yfl} \cos \delta_m + F_{yfr} \cos \delta_{out}) - l_r (F_{yrl} + F_{yrr}) + \frac{d_f}{2} (F_{yfr} \sin \delta_{out} - F_{yfl} \sin \delta_m) + \frac{d_r}{2} (F_{xrr} - F_{xrl}) \quad (3)$$

式中, m 为整车质量; v_x 、 v_y 分别为整车纵向速度和侧向速度; v 为车速, 且 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$; F_y 、 F_x 分别为车轮所受的纵向力和侧向力 (下标 fl 、 fr 、 rl 及 rr 分别表示左前、右前、左后、右后车轮); δ_m 、 δ_{out} 分别为前轮内、外车轮转向角; f 为滚动阻力系数; g 为重力加速度; α 为道路坡度角; C_D 为

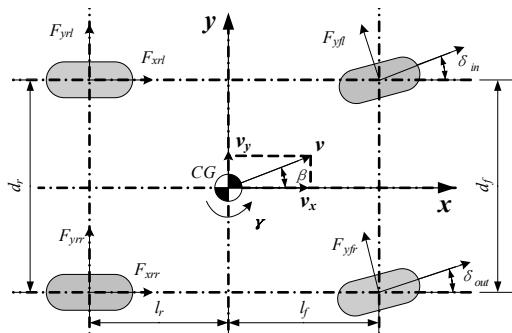


图2 整车动力学系统模型

空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ 为空气密度; l_f 、 l_r 分别为汽车质心到前、后轴的距离; CG 为整车质心; d_f 、 d_r 分别为前、后轴车轮轮距; I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量; β 为车身侧偏角; γ 为横摆角速度。

2.2 车轮动力学方程

车轮受力方程可写成如下形式^[6]:

$$T_m - T_r = J_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4)$$

式中, T_m 为单个电机的转矩; T_r 为每个车轮的阻力矩, 且 $T_r = F_t r$, F_t 为驱动力; r 为车轮半径; J_m 为折算到电机的转动惯量。这里, 由于去掉了变速装置, 减速比为 1, 因此有 $\omega_m = \omega_w$, 其中 ω_m 、 ω_w 分别为电机和车轮的转速。

当车辆转向行驶时, 向心加速度会使整车轴荷发生转移, 进而对轮胎滑移率产生影响。向心力可用下式来计算:

$$F_c = mv(\gamma + \dot{\beta}) \quad (5)$$

轮胎的垂直载荷为^[6]:

$$\begin{cases} N_{fl} = \frac{l_r}{2(l_f + l_r)}(mg - \frac{2hF_c}{d_f}) \\ N_{fr} = \frac{l_r}{2(l_f + l_r)}(mg + \frac{2hF_c}{d_f}) \\ N_{rl} = \frac{l_f}{2(l_f + l_r)}(mg - \frac{2hF_c}{d_r}) \\ N_{rr} = \frac{l_f}{2(l_f + l_r)}(mg + \frac{2hF_c}{d_r}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, h 为质心高度。

轮胎侧偏角计算如下^[7]:

$$\begin{cases} \alpha_{fl} = \beta + \frac{l_f \gamma}{v} - \delta_m \\ \alpha_{fr} = \beta + \frac{l_f \gamma}{v} - \delta_{out} \\ \alpha_{rl} = \alpha_{rr} = \beta - \frac{l_r \gamma}{v} \end{cases} \quad (7)$$

式中, 车身质心侧偏角 $\beta = \arctan(v_y/v_x)$ 。

轮胎纵向力和侧向力可分别用以下两式计算:

$$F_{xi} = \mu_{xi} N_i \quad (8)$$

$$F_{yi} = c_i \alpha_i \quad (9)$$

式中, i 分别代表 fl 、 fr 、 rl 、 rr ; $\mu_{xi} = C_1(1 - e^{-C_2 s_i}) - C_3 s_i$, C_1 、 C_2 、 C_3 分别为与地面状况相关的常数。

轮胎滑移率 s 可表示为:

$$s_i = \frac{\omega_{wi} r - v}{\omega_{wi} r} \quad (10)$$

2.3 电机方程

永磁同步电机驱动系统控制具有较高的鲁棒性, 电机气隙较小使其具有较强的电枢反应, 可以控制电机在恒转速即弱磁恒功率区高速运行, 其控制特性非常适合电动汽车的运行特点。与相同功率的其它类型电机相比, 永磁电机体积小、质量轻, 可以实现低速大转矩, 尤其适合直接轮毂式驱动。这里选用 5kW 永磁同步驱动电机, 电机基本方程可分为电

气特性方程和机械特性方程。

电气特性方程如下^[8]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q \\ \frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q} \\ T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \end{cases} \quad (11)$$

式中, L_q 、 L_d 分别为定子绕组 q 、 d 轴的电感; R 为定子绕组的内阻; i_q 、 i_d 分别为 q 、 d 轴的电流; v_q 、 v_d 分别为 q 、 d 轴的电压; ω_r 为转子的角速度; λ 为磁通幅值; p 为磁极对数; T_e 为电磁转矩。

机械特性方程如下:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{J}(T_e - F\omega_m - T_m) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_m \end{cases} \quad (12)$$

式中, J 为负载和转子的转动惯量之和; F 为负载和转子阻力之和; θ 为转子转角位置。

3 电子差速控制系统设计

对于直线行驶的汽车而言, 在水平良好路面上不需要差速, 只需要平均分配各个车轮的驱动力矩。由于道路情况不同, 汽车不可能总是直线行驶, 当车辆转向时, 则绕一定的圆心做圆周运动, 前后及左右车轮相对同一转向中心转过的距离并不相等, 欲使车轮实现无滑移的平稳转向, 外侧车轮转速必须大于内侧车轮转速, 前轮转速必须大于后轮转速。

3.1 电子差速器差速原理

电子差速器要实现车辆直线行驶时, 驱动车轮线速度相等, 通过车轮转速传感器测量速度, 将信号送入中央处理器, 中央处理器比较左右两轮的转速, 并通知电机控制器, 使左右车轮速度一致, 且保证左右两车轮滚过相同的距离; 车辆转向行驶时, 欲使轮胎不发生滑移, 需要保证驱动车轮相对旋转中心的角速度相等, 根据方向盘给定的转角、路面状况和车轮实际转速, 中央处理器进行计算, 将两轮所需的转速信号传送给电机控制器实现对左右两车轮的差速控制^[2]。

车辆直线行驶时, 由于电机直接与车轮相连, 电机转子旋转的角速度即为车轮的角速度, 由于假设各个车轮的滚动半径相等, 所以有下式成立:

$$\omega_{w,rl} = \omega_{w,rr} \quad (13)$$

式中, $\omega_{w,rl}$ 、 $\omega_{w,rr}$ 分别为左右驱动车轮的旋转角速度; $\omega_{m,rl}$ 、 $\omega_{m,rr}$ 分别为左右电机转子旋转角速度。

当车辆转向行驶时, 方向盘转角 $\delta \neq 0$, 存在部分车轮的转速过快或过慢, 这将导致汽车转向困难, 出现某些车轮与地面相对的平移滑动, 从而加速了轮胎的磨损。因此, 要求转向系统能保证在汽车转向时, 所有车轮均绕转向中心 O 作纯滚动, 内转向轮偏转角应大于外转向轮偏转角。图 3 为汽车转向的几何关系示意图^[4]。设向左转向时方向盘转角为

正, 向右转向时方向盘转角为负, 在车辆低速转向行驶时, 电子差速器可依据阿克曼转角关系进行设计^[4]。由图 3, 根据其几何关系, 得:

$$\begin{cases} R_{f,in} = \frac{l_f + l_r}{\sin|\delta_{in}|} - e \\ R_{f,out} = \frac{l_f + l_r}{\sin|\delta_{out}|} + e \\ R_{r,in} = R_r - \frac{d_r}{2} \\ R_{r,out} = R_r + \frac{d_r}{2} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $R_{f,in}$ 、 $R_{f,out}$ 分别为前轴内外车轮转向半径; $R_{r,in}$ 、 $R_{r,out}$ 分别为后轴内外车轮转向半径。

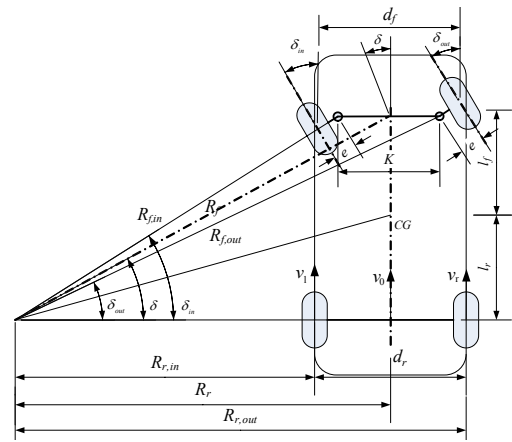


图 3 汽车转向示意图

前轴内外车轮转向角可表示为:

$$\begin{cases} \delta_{in} = \arctan \left(\frac{(l_f + l_r) \tan \delta}{l_f + l_r - \frac{K}{2} \tan \delta} \right) \\ \delta_{out} = \arctan \left(\frac{(l_f + l_r) \tan \delta}{l_f + l_r + \frac{K}{2} \tan \delta} \right) \end{cases} \quad (15)$$

式中, δ 为方向盘转角; K 为两主销中心延长线到地面交点之间的距离。

汽车在良好路面上行驶(左右车轮地面附着系数相同), 当正常转向时, 若车轮不产生滑动, 四车轮相对于转向中心的角速度相等, 设角速度为 ω_0 , 前、后轴中心转弯半径 R_f 、 R_r 是轴距和方向盘转角的函数:

$$\begin{cases} R_f = \frac{l_f + l_r}{\sin \left(\frac{\delta_{in} + \delta_{out}}{2} \right)} \\ R_r = \frac{l_f + l_r}{\tan \left(\frac{\delta_{in} + \delta_{out}}{2} \right)} \end{cases} \quad (16)$$

整车中心相对转向中心的旋转半径可表示为:

$$R_{cg} = \sqrt{\left(\frac{l_f + l_r}{2} \right)^2 + R_r^2} \quad (17)$$

其旋转角速度为:

$$\omega_0 = \frac{v}{R_{cg}} \quad (18)$$

又, ω_0 可用后轴中心速度表示:

$$\omega_0 = \frac{v_l + v_r}{2R_r} \quad (19)$$

式中 v_l 、 v_r 分别为两个驱动车轮的线速度, 并且有 $v_l = \omega_0 R_{r,in} = \omega_{wl} r$, $v_r = \omega_0 R_{r,out} = \omega_{wr} r$, ω_{wl} 、 ω_{wr} 分别为两驱动车轮的角速度, 也即轮毂电机转子的角速度。

因此, 当汽车转向时, 以整车质心速度为参考, 计算每个车轮绕转向中心的线速度, 进而得出每个车轮需要的电机转速, 通过向电机控制器发出电压指令实现电机转速的调节, 从而调整车轮转速, 合理的分配每个电机的输出转矩, 实现车轮的纯滚动转向行驶。

3.2 电子差速控制系统设计

轮毂电机直接连接在车轮上, 车轮自身旋转角速度与电机转子的角速度相同, 因而调节车轮转速可以通过控制电机转速来实现^[9]。

由于车轮的转速与路面状况、车轮滑移率以及车轮转角均有关系, 因此, 电子差速器控制系统应全面考虑以上因素的影响, 将转矩分配和车轮滑移率结合考虑, 并根据方向盘转角和来自加速踏板的转矩输入, 考虑车轮转向时的轴荷转移。这里, 以左后驱动轮为参考对象, 考虑转向时轮胎偏转角的变化率, 估算右后驱动轮的滑移率, 并分别以滑移率为控制目标, 调节每个电机的输出转矩。

在轮胎的线性区域内中性转向时, 轮胎偏转角的变化率 $\Delta\phi$ 可以用下式来估算^[6]:

$$\Delta\phi = \frac{\delta v}{l_f + l_r} \quad (20)$$

对于由偏转运动决定的左右车轮滑移率差, 可通过下式比例控制来修正:

$$\Delta s = D(\gamma - \Delta\phi) \quad (21)$$

式中, D 为控制增益。设左、右驱动轮的目标滑移率分别为 s_{rl}^* 、 s_{rr}^* , 实际滑移率分别为 s_{rl} 、 s_{rr} , 则有:

$$s_{rr}^* = s_{rl}^* - \Delta s \quad (22)$$

根据每个驱动轮的目标滑移率, 分别设基于滑移率控制的滑模控制器, 其中控制器采用常值滑模控制。考虑到滑模控制在切换面附近容易产生颤振的问题, 在切换面附近设置边界层 $\phi = 0.001$ 。

令 $\sigma_{rl} = s_{rl}^* - s_{rl}$, $\sigma_{rr} = s_{rr}^* - s_{rr}$, 转矩可表示为:

$$T_l = \begin{cases} k_l \operatorname{sgn}(\sigma_{rl}) & |\sigma_{rl}| \geq \phi \\ \frac{\sigma_{rl}}{\phi} \operatorname{sgn}(\sigma_{rl}) & |\sigma_{rl}| < \phi \end{cases} \quad (23)$$

$$T_r = \begin{cases} k_r \operatorname{sgn}(\sigma_{rr}) & |\sigma_{rr}| \geq \phi \\ \frac{\sigma_{rr}}{\phi} \operatorname{sgn}(\sigma_{rr}) & |\sigma_{rr}| < \phi \end{cases} \quad (24)$$

设加速踏板输入的转矩参考值为 T^* , 控制器接收加速踏板信号和方向盘转角信号, 根据车轮转速和电子差速控制策略分配两电机的转矩。电机控制可采用电流和速度双闭环控制, 内环采用电流控制, 外环采用转速控制。

4 仿真模型的建立及结果分析

4.1 仿真模型

根据以上分析, 基于 Matlab/Simulink 平台建立电子差速器仿真模型, 如图 4 所示。

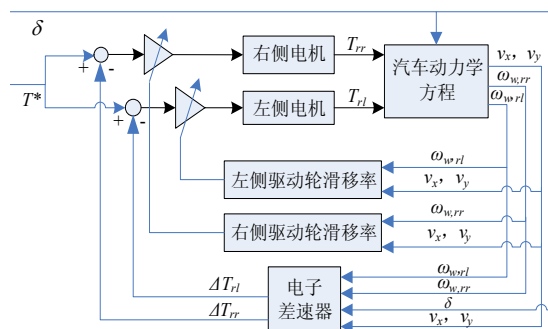


图 4 电子差速器仿真模型

仿真车辆模型主要参数取值见表 1。设加速踏板的输入参考转矩为 $3000\text{N}\cdot\text{m}$, 车辆左转, 方向盘转角为 2° , 通过对控制参数的调节, 取 $\sigma_{rl} = 28$, $\sigma_{rr} = 35$, $s_{rl}^* = 0.18$, $D = 0.15$, 车辆初始速度 $v_x = 18\text{km/h}$ 。

表 1 车辆仿真模型主要参数

m/kg	l_f/m	l_r/m	A/m^2	C_D	d_f/m	d_r/m
3000	1.6	1.7	2.24	0.5	1.5	1.6
f	r/m	$I_z/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	$J_m/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	h/m	$c_f/\text{N}\cdot\text{rad}^{-1}$	$c_r/\text{N}\cdot\text{rad}^{-1}$
0.014	0.32	2500	2.1	0.6	-11500	-13000

4.2 仿真及结果分析

图 6 显示了在 Matlab/Simulink 平台下的仿真结果。

由图 6(a)-6(d)可以看出, 给定方向盘转角, 在电子差速系统控制下, 车辆经过短时间调整, 其横摆角速度、向心加速度、转向半径以及车身侧偏角均达到稳定状态; 图 6(e)、6(f)分别为左、右驱动轮的滑移率, 由图可以看出, 滑移率均控制在 0.18 左右的最佳范围内, 避免了转向过程中车轮发生滑移; 图 6(g)、6(h)分别为左、右驱动电机转矩, 通过滑模控制, 电机转矩在一定范围内波动, 由于车辆向左转向, 因此, 右驱动电机转矩大于左驱动电机转矩; 图 6(i)为左右驱动轮的轮速, 右侧车辆轮速大于左侧车轮轮速; 图 6(j)为左右车轮的纵向力, 同样可以看出, 右侧驱动轮纵向力大于左侧车轮的纵向力, 控制系统很好的实现了电子差速的功能, 能够保证车辆在直线和转弯工况下均能稳定行驶。

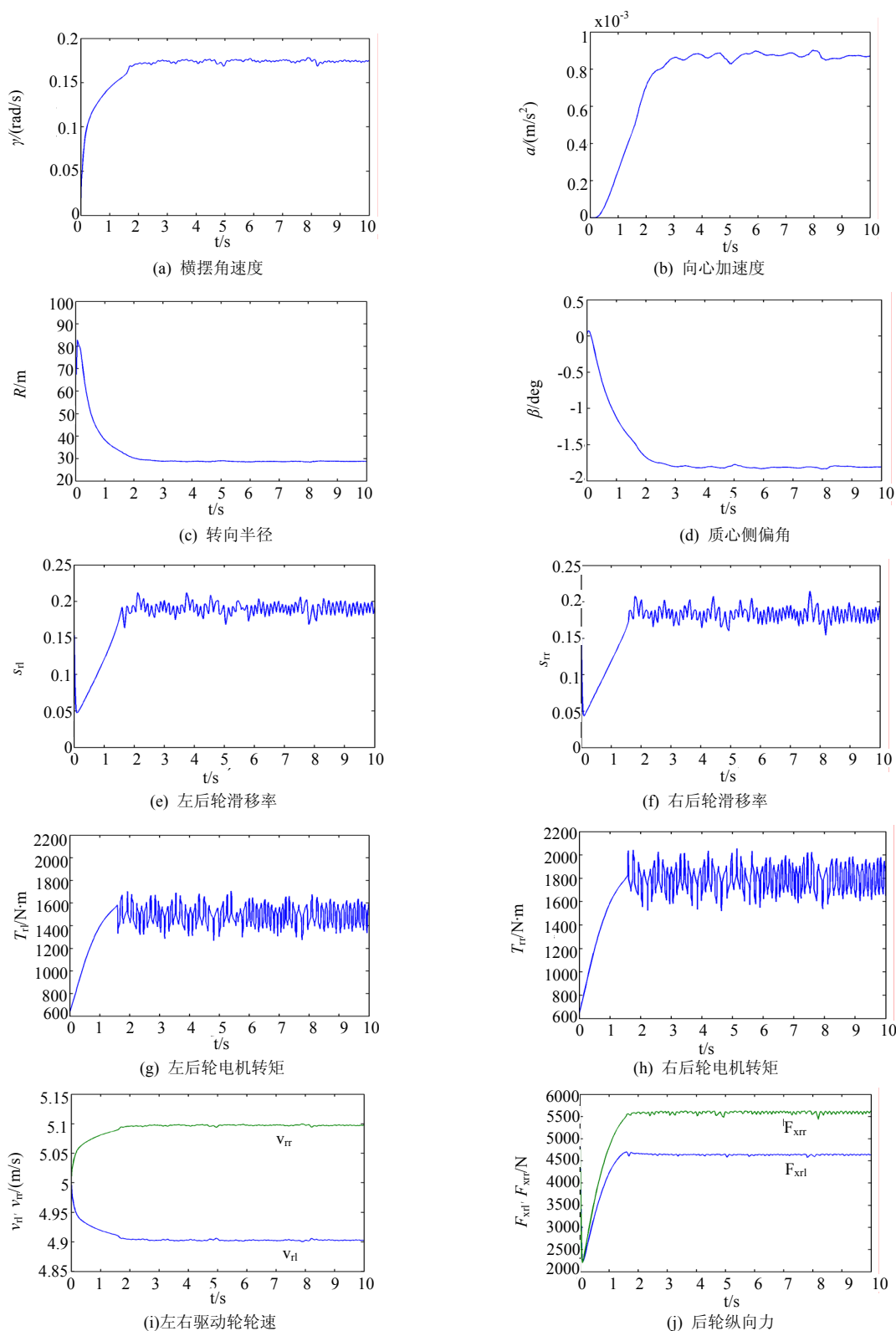


图 6 仿真结果

5 结论

轮毂电机独立驱动电动汽车以其独特的优势成为目前电动汽车发展的一个新方向。本文深入研究了后轮轮毂电机独立驱动电动驳运车电子差速的控制策略,以车轮滑移率为控制目标,考虑车辆转向过程中轴荷转移和向心力的影响,

基于滑模控制理论建立了轮毂电机独立驱动的电子差速控制系统,电子差速系统根据每个车轮的转矩需求合理分配电机的驱动转矩。仿真结果表明,所设计的电子差速控制系统能够保证车辆在转向行驶过程中,车轮的滑移率控制在最佳范围内,避免了轮胎的磨损,同时保证了车辆行驶的稳定性。

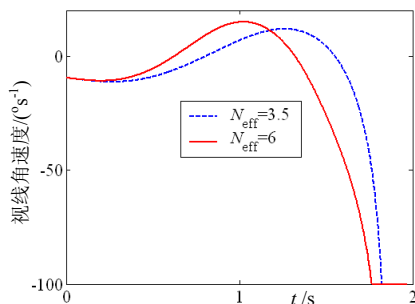


图4 $R_0=1000\text{m}$ 视线角速度特性比较

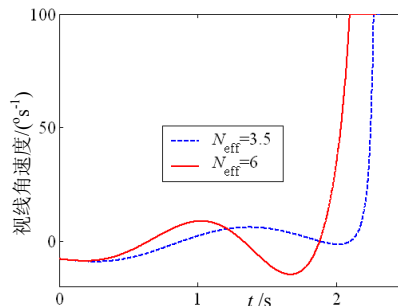


图5 $R_0=1200\text{m}$ 时视线角速度特性比较

1070m。显然 $R_0=800\text{m}$ 不属于本文定义的合适的末端区距离。单独针对发射条件2计算得到的脱靶量和拦截时间见表3, 图4和图5是计算得到的视线角速度曲线, 基本分析结论同前。

表3 $T_m=0.2\text{s}$ 脱靶量和拦截时间计算结果

初始条件序号	N_{eff}	$R_0=800\text{m}$		$R_0=1000\text{m}$		$R_0=1200\text{m}$	
		脱靶量/m	t_f/s	脱靶量/m	t_f/s	脱靶量/m	t_f/s
2	3.5	7.560	1.570	12.743	1.949	2.524	2.319
2	6.0	9.717	1.577	23.618	1.967	48.423	2.291

4 结论

根据线性化弹目运动学模型和比例导引关系, 通过制导系统特性分析进行了制导末端区划分研究, 仿真验证了方法的可行性。制导末端区在进行系统设计、评估中具有重要意义。由于本文结果是在简化情况下得到的, 导引律、弹体动力学特性不同, 结论也会有所差异, 但研究结果对制导系统初步设计和分析中仍然具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] 王建军, 刘荣忠, 张宇. 导弹末敏弹控制系统的设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(8): 1876-1878. (WANG Jian-jun, LIU Rong-zhong, ZHANG Yu. Control System Design and Simulation of Guided Missile with Terminal Sensitive Bullets [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(8): 1876-1878.)
- [2] 宋龙, 任章. 反辐射无人机末制导精度仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 533-537. (SONG Long, REN Zhang. Guidance Accuracy Study of Anti-Radi Aircraft [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(3): 533-537.)
- [3] 崔新, 侯明善, 秦琴. 基于目标最优机动的线性化运动学模型及其特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(1): 73-75.
- [4] Gurfil P. Zero-miss-distance Guidance Law Based on Line-of-Sight Rate Measurement Only [J]. Control Engineering Practice (S0967-0661), 2003, 11: 819-832.
- [5] Dhar A, Ghose D. Capture Region for a Realistic TPN Guidance Law [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (S0885-8985), 1993, 29(3): 995-1003.
- [6] Park J Y, Rhinehart R G, Kabamba P T. Miss Analysis in Lambert Interceptions with Application to A New Guidance Law [J]. Proceedings of the 2000 American Control Conference (S0743-1619), 2000, 2: 1344-1348.

(上接第4771页)

参考文献:

- [1] 靳立强, 王庆年, 岳巍强, 宋传学. 基于四轮独立驱动电动汽车的动力学仿真模型 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 3053-3055. (JIN Li-qiang, WANG Qing-nian, YUE Wei-qiang, SONG Chuan-xue. Dynamic Model for Simulation of EV with 4 Independently-driving Wheels [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(12): 3053-3055.)
- [2] Guilin Tao, Zhiyum Ma, Libing Zhou, Langru Li. A Novel Driving and Control System for Direct-Wheel-Driven Electric Vehicle [J]. IEEE Transactions on Magnetics (S0018-9464), 2005, 41(1): 497-500.
- [3] 万钢, 陈辛波, 余卓平, 沈勇. 四轮电子差速转向控制系统[P]. 02136498.2, 2004: 中国.
- [4] Ju-Sang Lee, Young-Jae Ryoo, Young-Cheol Lim, Peter Freere. A Neural Network Model of Electric Differential System for Electric Vehicle [C]// Industrial Electronics Society, 26th Annual Conference of the IEEE, 2000. USA: IEEE, 2000: 83-88.
- [5] A Roque, J Esteves, J Maia, P Verdelho. Analysis and Design of a Traction Control Algorithm for an Electric Kart with Two Independent Wheel Drivers [C]// Proceeding of Electrimacs' 99. Lisbon, Portugal: IMACSFRANCE, 1999, 3: 257-262.
- [6] 葛英辉, 倪光正. 新型电动车电子差速控制策略研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(12): 1973-1978.
- [7] R Pusca, Y Ait Amirat, A Berthon. Slip Control Strategy of an Electrical Four Wheel Drive Vehicle [C]// Proceedings of 18th Electric Vehicle Symposium (EVS 18), Berlin, Germany: 2001: 1-10.
- [8] 徐衍亮, 唐任远. 永磁同步电动机驱动的电动汽车仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 641-643, 656. (XU-Yan-liang, TANG Ren-yuan. The Simulation Study of Electric Vehicle Driven by Permanent Magnet Synchronous Motor System. [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(4): 641-643, 656.)
- [9] Sinclair Gair, Andrew Cruden, J McDonald, Branislav Hredzak. Electronic Differential with Sliding Mode Controller for a Direct Wheel Drive Electric Vehicle [C]// ICM '04, Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics. USA: IEEE, 2004: 98-103.