

文章编号: 1000-582X(2011)10-021-06

无人驾驶高速 4WID-4WIS 车辆路径跟踪单点预瞄控制

阮久宏^{1,2}, 李贻斌², 杨福广¹, 荣学文²

(1. 山东交通学院 先进车辆与机器人研究所, 山东 济南 250023;

2. 山东大学 机器人研究中心, 山东 济南 250061)

摘要:针对无人驾驶高速四轮独立驱动-独立转向(4WID-4WIS)车辆的驱动冗余、强非线性和不确定特性,提出一种基于控制分配和自抗扰控制法的路径跟踪单点预瞄控制方法。首先建立车辆单点预瞄路径跟踪系统的动力学模型。然后构建以控制分配器为核心的控制系统,使用自抗扰控制方法设计单点预瞄解耦控制器;提出目标生成器的类惯性环节算法,讨论其合理性;给出4WID-4WIS车辆路径跟踪控制分配问题的求解方法。最后进行仿真,结果表明所提方法能够实现快速、高精度的双移线圆弧路径跟踪控制。

关键词:无人驾驶车辆;独立驱动-独立转向车辆;路径跟踪;单点预瞄;控制分配;自抗扰控制

中图分类号: TP242.6, U461.6

文献标志码: A

Single-point preview control for unmanned high-speed 4WID-4WIS vehicle path tracking

RUAN Jiu-hong^{1,2}, LI Yi-bin², YANG Fu-guang¹, RONG Xue-wen²

(1. Advanced Vehicle & Robot Institute of Shandong Jiaotong University,

Jinan 250023, Shandong, P. R. China;

2. Center for Robotics of Shandong University, Jinan 250061, Shandong, P. R. China)

Abstract: As for the actuation redundancy, strong nonlinearity and uncertainty, a kind of single-point preview control approach for the unmanned high-speed four-wheel-independent-drive & steering (4WID-4WIS) vehicle path tracking is proposed based on the control allocation and the Active Disturbance Rejection Control(ADRC) methods. The vehicle single-point preview system dynamic model for path tracking is built. The control system architecture with the control allocation unit as the core is constructed. The decouple single-point preview ADRC controller for path tracking is designed. Then the quasi-inertial parts used to generate control objectives are proposed and its rationality is discussed. The control allocation solution method for the 4WID-4WIS vehicle path tracking is subsequently presented. The simulations are conducted to illustrate the validity of the single-point preview control method proposed. The results show that the unmanned high-speed 4WID-4WIS vehicle can track the circular arc double-lane change path rapidly and accurately.

Key words: unmanned vehicle; Independent-Drive & Steering vehicle; path tracking; single-point preview; control allocation; active disturbance rejection control

收稿日期: 2011-04-02

基金项目: 国家 863 计划资助课题(2007AA04Z206); 汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目(KF09061); 交通运输部应用基础研究资助项目(2008319817070); 山东省中青年科学家奖励基金项目(2008BS05003); 浙江师范大学计算机软件与理论省级重中之重学科开放基金项目(ZSDZZZXK15)

作者简介: 阮久宏(1971-), 男, 山东交通学院副教授, 博士, 主要研究方向为先进车辆动力学控制、智能交通、机器人技术, (E-mail)ruanjh@sdu.edu.cn。

李贻斌(联系人), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)liyb@sdu.edu.cn。

无人驾驶高速四轮独立驱动-独立转向 (four wheel independent drive & steering, 4WID-4WIS) 车辆是未来汽车的重要发展方向之一,其 4 个车轮均可独立悬挂、驱动、制动和转向,具有驱动冗余(冗余度为 $2n-3$, n 为车轮个数, $n \geq 3$),可通过协调控制获得比传统车辆更好的动力和循迹性能,组成高性能的汽车队列 (vehicle platoon),广泛用于自动化高速公路。路径跟踪控制是无人驾驶高速 4WID-4WIS 车辆获得上述应用的关键技术之一。

文献[1]利用自回正力矩和纵向力、侧向力之间的关系估计轮胎力裕量,使用序列二次规划法进行控制分配,发展了 4WID-4WIS 车辆动力学的分层控制方法;文献[2-3]基于 Magic 轮胎模型和改进的加速定点规划方法研究了 4WID-4WIS 车辆的动力学协调与容错控制问题;文献[4]基于无约束和有约束非线性规划方法研究了 4WID-4WIS 车辆的控制分配和动力学协调控制问题。但文献[1-4]均未涉及无人驾驶车辆的路径跟踪控制问题。

文献[5]基于预瞄最佳曲率控制理论,提出了车辆预瞄路径跟踪控制的分阶 PDⁿ 方法。文献[6]模拟驾驶员的预瞄行为,利用人工势场法提出了势场总能量函数包含安全和操控性两项评价指标的预瞄路径决策方法。文献[7]研究了基于预瞄路径的车辆纵向-横向组合控制器的设计问题,其中的横向控制器采用增益调度方法。文献[8]利用非线性状态反馈 H_∞ 法研究了车辆预瞄路径跟踪的自主转向控制问题。文献[9]设计了预瞄加反馈的控制器,预瞄距离和车辆速度根据预瞄路径的弯曲程度自动调整。文献[10]基于“预瞄-跟随”驾驶员建模理论,通过引入加速度反馈,建立了跟随任意道路路径和车速的方向-速度综合控制驾驶员模型。文献[11]通过状态预测方法,建立了用于单目视觉车道保持系统的状态预测模型。文献[12]采用“驾驶员预瞄最优曲率模型”中预期行驶轨迹的预瞄策略,提出了汽车方向预瞄式自适应 PD 控制算法。

文献[5-12]研究的均是传统车辆,所提供的方法尚不能解决 4WID-4WIS 车辆所固有的驱动冗余问题,对路径跟踪系统动力学层次上的非线性、不确定性的讨论也有待深入。对此,笔者使用控制分配和自抗扰控制方法,采用单点预瞄控制方案研究 4WID-4WIS 车辆在高速和无人驾驶工况下的路径跟踪问题,提出一种面向 4WID-4WIS 车辆的路径跟踪控制方法。

1 车辆路径跟踪系统动力学建模

1.1 路径跟踪问题描述

无人驾驶车辆跟踪期望路径运动的几何描述如图 1。图中, XOY 为参考坐标系, $x'o'y'$ 为车体固联坐标系; P_C 是车辆沿 $o'y'$ 轴与跟踪路径的交点,称为当前跟踪点; P_P 称为预瞄跟踪点,简称预瞄点,与 P_C 之间沿 $o'x'$ 方向的距离为 L ; ψ_V 为车辆横摆角, ψ_C 、 ψ_P 分别为 P_C 、 P_P 点处跟踪路径切线与 OX 轴的夹角; v 、 v_x 、 v_y 为车辆速度、纵向速度、侧向速度; v_{Pd} 为期望的车辆速度,即车辆沿预瞄点处路径切线的期望速度; β 为自主车质心侧偏角; Δy_C 、 Δy_P 分别为当前横向偏差和预瞄点横向偏差; $\Delta \psi_C$ 、 $\Delta \psi_P$ 分别为 $o'x'$ 轴与 P_C 、 P_P 点处路径切线的夹角,称为当前点横摆角偏差、预瞄点横摆角偏差; ρ_P 为预瞄点 P_P 处路径的曲率。

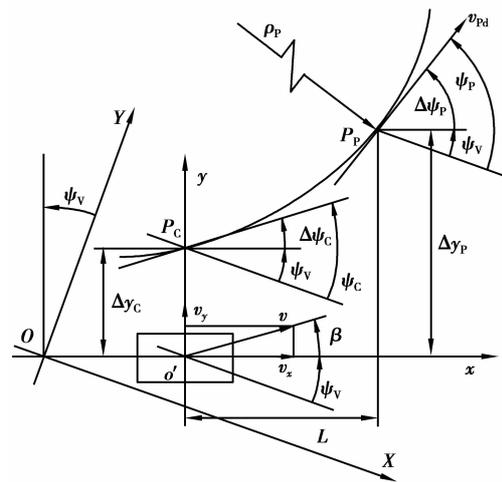


图 1 4WID-4WIS 车辆路径跟踪运动示意图

所谓车辆单点预瞄路径跟踪控制,指的是利用车辆在预瞄点 P_P 处的偏差信息 Δy_P 和 $\Delta \psi_P$,通过适当的控制方法同步实现 $\Delta y_C \rightarrow 0$, $\Delta \psi_C \rightarrow 0$ 。

1.2 单点预瞄路径跟踪系统建模

在水平路面和无风的条件下,4WID-4WIS 车辆的受力情况由图 2 表示^[4]。图中, $x_w O_w y_w$ 为车轮固联坐标系; a 、 b 分别为车辆质心到前、后轴的距离; c 为质心到左、右轮的距离; F_x 、 F_y 、 M_z 为车体所受轮胎力的纵向合力、侧向合力和横摆合力矩,也是整车动力学控制量; F_{air} 为空气阻力; α_i 、 δ_i 为各车轮侧偏角、转角; F_{Li} 、 F_{Si} 、 F_{Ri} 为各轮胎纵向力、侧向力和滚动阻力; v_{wi} 、 v_{Ri} 为各车轮水平合成速度、滚动速度; $i=1,2,3,4$ 。

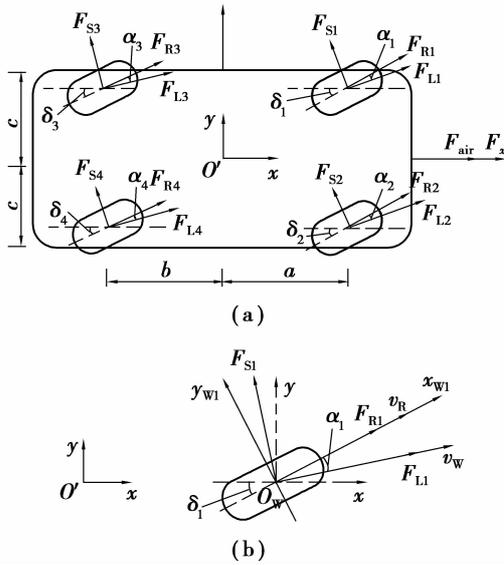


图 2 4WID-4WIS 车辆在水平面上的受力图

根据图 1 和图 2,可建立 4WID-4WIS 车辆单点预瞄路径跟踪系统的动力学模型(车体固联坐标系下)

$$\dot{v}_x = f_{vx}(t) + \frac{1}{m_{est}}F_x, \quad (1)$$

$$\Delta \ddot{y}_P = f_{vy}(t) - \frac{1}{m_{est}}F_y, \quad (2)$$

$$\Delta \ddot{\psi}_P = f_{\omega z}(t) - \frac{1}{I_{zest}}M_z. \quad (3)$$

其中: m_{est} 、 I_{zest} 分别为车辆质量 m 、转动惯量 I_z 的估计; $\frac{1}{m_{est}}$ 、 $\frac{-1}{m_{est}}$ 、 $\frac{-1}{I_{zest}}$ 分别为车辆纵向、侧向和横摆 3 个动力学通道的控制增益的估计; $f_{vx}(t)$ 、 $f_{vy}(t)$ 、 $f_{\omega z}(t)$ 分别为 3 个通道“内扰”和“外扰”的“总和”

$$f_{vx}(t) = v_y \omega_z - \frac{1}{2m} \rho C_w A_f v_x^2 + \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m_{est}} \right) F_x + \omega_1,$$

$$f_{vy}(t) = \dot{v}_{xd} \sin(\Delta \psi_P) + v_{xd} \Delta \dot{\psi}_P \cos(\Delta \psi_P) + v_x \omega_z - (\dot{L} \omega_z + L \dot{\omega}_z) - \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m_{est}} \right) F_y - \omega_2,$$

$$f_{\omega z}(t) = \dot{v}_{xd} \rho_P + v_{Pd} \dot{\rho}_P - \left(\frac{1}{I_z} - \frac{1}{I_{zest}} \right) M_z - \omega_3.$$

ρ_a 为空气密度; C_w 为风阻系数; A_f 为前挡玻璃迎风面积; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为纵向、侧向和横摆运动扰动量,包括与车轮滚动阻力相关的项、垂向未建模动态等。

记整车控制向量 $\mathbf{F}_V = [F_x \ F_y \ M_z]^T$, 轮胎力向量 $\mathbf{F}_W = [F_{L1} \ F_{L2} \ F_{L3} \ F_{L4} \ F_{S1} \ F_{S2} \ F_{S3} \ F_{S4}]^T$,

$$\mathbf{F}_V = \mathbf{B}_{VW} \mathbf{F}_W. \quad (4)$$

其中: \mathbf{B}_{VW} 是与车体质心位置、车体速度及 v_{wi} 与 $O'x$ 轴之间夹角有关的 3×8 矩阵; F_{Li} 、 F_{Si} 根据 Burckhardt 模型计算^[4],其定义如图 2(b),计算式

$$\begin{bmatrix} F_L \\ F_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_z \cdot s_L \cdot \frac{\mu_{Res}}{s_{Res}} \\ F_z \cdot s_S \cdot \frac{\mu_{Res}}{s_{Res}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中: F_z 为轮胎垂向力; s_L 、 s_S 和 s_{Res} 分别为轮胎纵向、侧向和合成滑移率; μ_{Res} 为合成附着系数。

2 路径跟踪控制器设计

式(1)-(3)描述的车辆单点预瞄路径跟踪系统具有本质非线性和载荷、路面等不确定特性,可使用自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)方法设计控制器。ADRC 是一种不依赖系统精确模型的新型控制方法,能实时估计并补偿系统受到的各种“外扰”和“内扰”的总和作用,实现对系统的动态补偿线性化控制^[13-14]。

图 3 是 $n+1$ 阶 ADRC 控制器的一般结构,包括三部分:“安排过渡过程(n 阶 TD)”,“非线性反馈(NF)”(也可采用线性反馈)和“扩张状态观测器($n+1$ 阶 ESO)”,可对式(6)描述的 n 阶非线性不确定系统进行控制。其中: $x^{(n)}$ 为对象状态 x 的第 n 阶导数; $w(t)$ 为对象外部扰动; u 为控制量; y 为输出; $b(t)$ 为控制增益; b_0 是 $b(t)$ 的估计; $f(x^{n-1}, \dots, x, w(t), t)$ 是包括对象“内扰”和“外扰”在内的“总扰动”; r_0 为控制目标; v_1 是 r_0 的跟踪信号; v_n 是 r_0 的第 n 阶 TD 微分信号; z_1 是系统输出 y 的估计; z_n 是系统输出 y 的第 n 阶导数的估计; z_{n+1} 是对象总扰动 $f(x^{n-1}, \dots, x, w(t), t)$ 的估计; e_1 、 e_n 是误差; u_0 是 NF 的输出。

$$\left. \begin{aligned} x^{(n)} &= f(x^{(n-1)}, \dots, x, w(t), t) + b(t)u, \\ y &= x. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

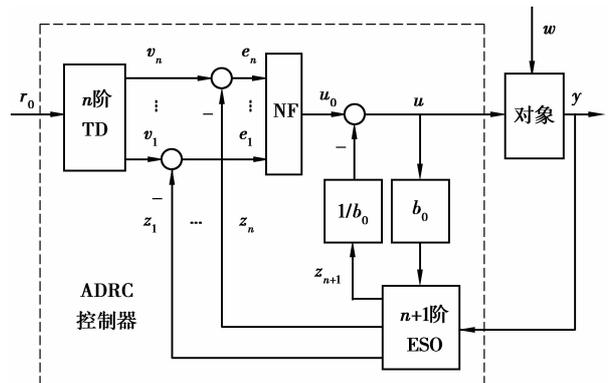


图 3 $n+1$ 阶 ADRC 控制器结构

2.1 控制系统结构

针对系统冗余驱动问题,采用控制分配方法将整车控制量 F_x 、 F_y 、 M_z 恰当地分配到 4 个车轮上,以各车轮 s_{Li} 和 s_{Si} ($i=1,2,3,4$) 作为最终控制量,如图 4。图中: PG_{v_x} 、 $PG_{\Delta y}$ 、 $PG_{\Delta\psi}$ 分别为 v_x 、 Δy_P 、 $\Delta\psi_P$ 3 个动力学通道的目标发生器, v_{xd} 、 Δy_{Pd} 、 $\Delta\psi_{Pd}$ 为各通道 ADRC 控制器的跟踪目标。

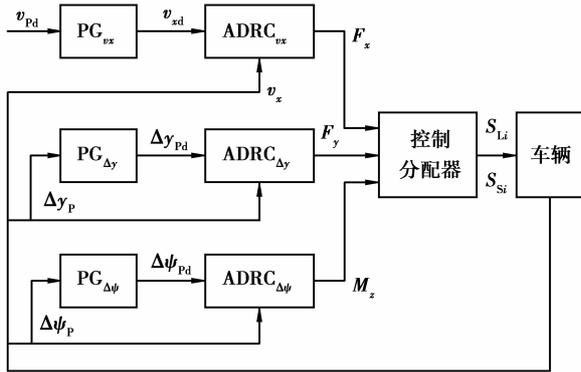


图 4 单点预瞄路径跟踪 ADRC 控制系统结构

图 4 所示的系统结构中,“控制分配器”和“车辆”被视为了 ADRC 的广义控制对象,其 3 个动力学通道由 ADRC 进行解耦控制。

2.2 目标发生器设计

图 4 中, v_x 通道是关于目标值 v_{xd} 的一阶随动系统,自抗扰控制器 $ADRC_{v_x}$ 可采用二阶 ADRC 结构,参考输入由惯性环节发生器 PG_{v_x} 产生,其离散形式为

$$v_{xd}(k+1) = v_{xd}(k) + \frac{T_s}{T_{v_x}(k)}(v_{Pd}(k) - v_{xd}(k)). \quad (7)$$

其中: T_s 为系统控制周期, $T_{v_x}(k)$ 为当前控制步的惯性时间常数。

Δy_P 、 $\Delta\psi_P$ 通道均为关于目标值 Δy_{Pd} 、 $\Delta\psi_{Pd}$ 的二阶控制系统,自抗扰控制器 $ADRC_{\Delta y}$ 、 $ADRC_{\Delta\psi}$ 需采用三阶 ADRC,参考输入由形式上类似于惯性环节的发生器 $PG_{\Delta y}$ 、 $PG_{\Delta\psi}$ 产生,其离散表达式分别为

$$\Delta y_{Pd}(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{T_{\Delta y}(k)}\right) \Delta y_{Pd}(k). \quad (8)$$

$$\Delta\psi_{Pd}(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{T_{\Delta\psi}(k)}\right) \Delta\psi_{Pd}(k). \quad (9)$$

其中, $T_{\Delta y}(k)$ 、 $T_{\Delta\psi}(k)$ 为当前控制步的惯性时间常数。

在取值上, $T_{v_x}(k)$ 、 $T_{\Delta y}(k)$ 、 $T_{\Delta\psi}(k)$ 均取为车辆以当前速度 $v_x(k)$ 驶过预瞄距离 L 所用时间的 1/4,即

$$\left. \begin{aligned} T_{v_x}(k) &= \frac{L}{4v_x(k)}, \\ T_{\Delta y}(k) &= \frac{L}{4v_x(k)}, \\ T_{\Delta\psi}(k) &= \frac{L}{4v_x(k)}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其物理意义是:若在各通道控制器的协调作用下,车辆能够准确地跟踪速度目标 v_{xd} 、预瞄点 P_P 处的横向偏差目标 Δy_{Pd} 和横摆角偏差目标 $\Delta\psi_{Pd}$,则经过时间 $\frac{L}{v_x(k)}$ 后,车辆能够以 $v_x = v_{Pd}$ 、 $\Delta y_C = 0$ 和 $\Delta\psi_C = 0$ 的结果到达预瞄点 P_P ,即实现了路径跟踪的任务目标。

2.3 ADRC 控制器设计

从工程应用的角度出发,采用易于实现的线性化离散算法设计 $ADRC_{\Delta y}$ 控制器^[13, 15],其 ESO 和 NF 算法公式^[15] 分别如式(11)和(12)。

$$\left. \begin{aligned} e &= z_1(k) - \Delta y_P(k); \\ z_1(k+1) &= z_1(k) + T_s(z_2(k) - \beta_{01}e); \\ z_2(k+1) &= z_2(k) + T_s(z_3(k) - \beta_{02}e + b_0u(k)); \\ z_3(k+1) &= z_3(k) - T_s\beta_{03}e. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} e_1(k) &= v_1(k) - z_1(k); \\ e_2(k) &= v_2(k) - z_2(k); \\ u_0(k) &= K_P e_1(k) + \alpha_1 \delta_1 + K_D e_2(k); \\ u(k) &= u_0(k) - z_3(k)/b(k). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中: β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 为 ESO 设计参数, $\beta_{01} = 3\omega_n$, $\beta_{02} = 3\omega_n^2$, $\beta_{03} = \omega_n^3$; ω_n 为控制对象的带宽; K_P 和 K_D 为 NF 设计参数。

控制器参数设计方法如下:利用先验知识并结合实验分析估算 ω_n ;利用过渡过程参数设计方法^[13] 确定 r_{TD} 和 h_{TD} ;参照基于比例缩放和带宽参数化的控制器调节方法^[15] 设计 K_P 和 K_D ; T_s 取 0.01 s。限于篇幅,详细过程从略。

$ADRC_{v_x}$ 、 $ADRC_{\Delta\psi}$ 的设计与 $ADRC_{\Delta y}$ 方法类似,从略。

2.4 控制分配方法

以 $\mathbf{s} = [s_{L1} \ s_{L2} \ s_{L3} \ s_{L4} \ s_{S1} \ s_{S2} \ s_{S3} \ s_{S4}]^T$ 为优化变量,第 $k+1$ 时刻的整车控制量 $\mathbf{F}_V(k+1)$ 的 Taylor 一阶展开式为

$$\mathbf{F}_V(k+1) = \mathbf{F}_V(k) + \mathbf{J}_F \times [\mathbf{s}(k+1) - \mathbf{s}(k)]^T. \quad (13)$$

其中: \mathbf{J}_F 为 $\mathbf{B}_{vW} \mathbf{B}_{FW} \times [g \ a_x \ a_y]^T$ 关于 \mathbf{s} 的 Jacobian 矩阵; g 、 a_x 、 a_y 分别为重力加速度、车辆纵向和侧向加速度; \mathbf{B}_{FW} 是一个 8×3 的矩阵,与车辆质

量转移、各车轮的合成附着系数 μ_{Resi} 、合成滑移率 s_{Resi} 、纵向滑移率 s_{Li} 、侧向滑移率 s_{Si} 有关, $i=1, 2, 3, 4$ 。

控制分配模型建立为

$$\min J = \mathbf{g}_1^T \mathbf{W}_1 \mathbf{g}_1 + \mathbf{g}_2^T \mathbf{W}_2 \mathbf{g}_2 + \mathbf{g}_3^T \mathbf{W}_3 \mathbf{g}_3 \quad (14)$$

s. t.

$$\left. \begin{aligned} s_{L\min i} &\leq s_{Li}(k+1) \leq s_{L\max i} \\ s_{S\min i} &\leq s_{Si}(k+1) \leq s_{S\max i} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} ds_{L\min i} &\leq \frac{s_{Li}(k+1) - s_{Li}(k)}{T_s} \leq ds_{L\max i} \\ ds_{S\min i} &\leq \frac{s_{Si}(k+1) - s_{Si}(k)}{T_s} \leq ds_{S\max i} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\mu_{Resi} \leq \mu_{\max i} \quad (17)$$

其中: $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3$ 为加权矩阵,

$$\mathbf{g}_1 = \mathbf{1} - \frac{\mathbf{F}_V(k) + \mathbf{J}_F \times [\mathbf{s}(k+1) - \mathbf{s}(k)]^T}{\mathbf{F}_{Vd}}$$

$$\mathbf{g}_2 = \mathbf{s}(k+1) - \mathbf{s}(k),$$

$\mathbf{g}_3 = [\sqrt{s_{L1}^2 + s_{S1}^2} \quad \sqrt{s_{L2}^2 + s_{S2}^2} \quad \sqrt{s_{L3}^2 + s_{S3}^2} \quad \sqrt{s_{L4}^2 + s_{S4}^2}]^T$, $s_{L\min i}, s_{L\max i}, s_{S\min i}, s_{S\max i}$ 以及 $ds_{L\min i}, ds_{L\max i}, ds_{S\min i}, ds_{S\max i}$ 均为常数,表示执行器和地面特性对系统的约束, $i=1, 2, 3, 4$; \mathbf{F}_{Vd} 为 ADRC 控制器生成的整车控制量的期望值。目标函数式(14)力求使控制分配精度、控制量变化率和控制能量综合性能最优,获得尽可能平滑的轮胎控制量(纵向、侧向滑移率)和尽可能大的轮胎力利用裕量。

控制分配模型式(14)-(17)可采用 MatLab 内置的 fmincon() 函数求解。

3 仿真试验

假定车辆以 $v_x(t) = 25 + 5\sin(0.5t)$ m/s 的变速度在分离路面上行驶并对过渡段均为圆弧的双移线路径(称为双移线圆弧路径)进行跟踪;车轮 1、3 位于干沥青路面上,2、4 位于湿沥青路面上;车轮 1、4 发生故障,其驱动和制动功能均失效。

仿真参数: $m=1480$ kg, $I_z=2350$ kg·m², $a=1.4$ m, $b=1.2$ m, $c=0.7$ m, $\rho_a=1.25$ kg/m³, $C_w=0.3$, $A_f=0.6$ m²; 预瞄距离 $L=v_x(t)/5$, 即取为车辆当前纵向速度的 1/5; $m_{est}=0.8$ m, $I_{zest}=0.8I_z$ 。仿真中车辆出现的最大加速度约为 5.91 m/s², 最大侧向偏差约为 0.32 m, 其它结果示于图 5。图中 l 表示车辆纵向位移。

图 5 所示结果说明:通过控制分配器和 3 个自抗扰解耦控制器的协调工作,4WID-4WIS 车辆能精确地跟踪双移线圆弧路径;控制分配所得各轮胎纵向和侧向滑移率变化平滑,车辆直线行驶时车轮转

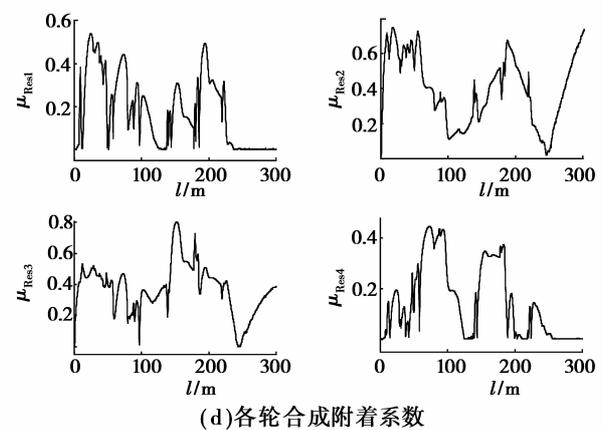
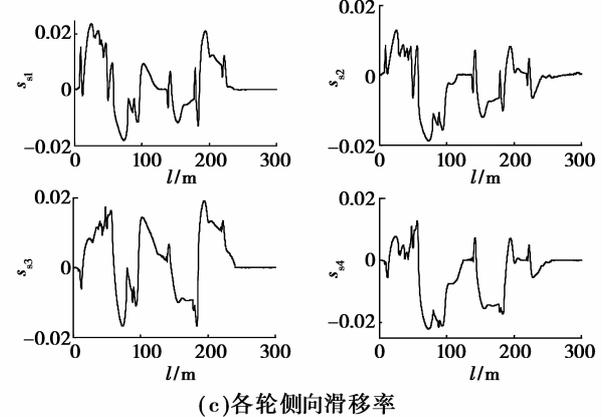
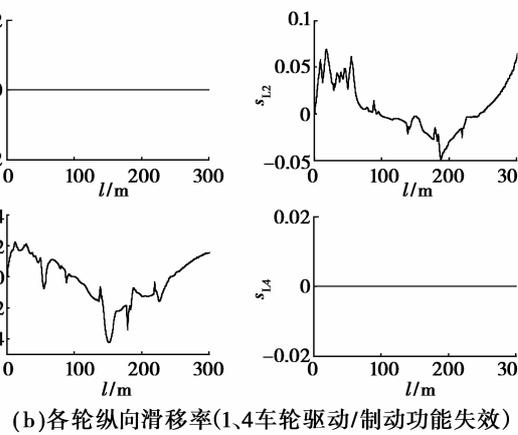
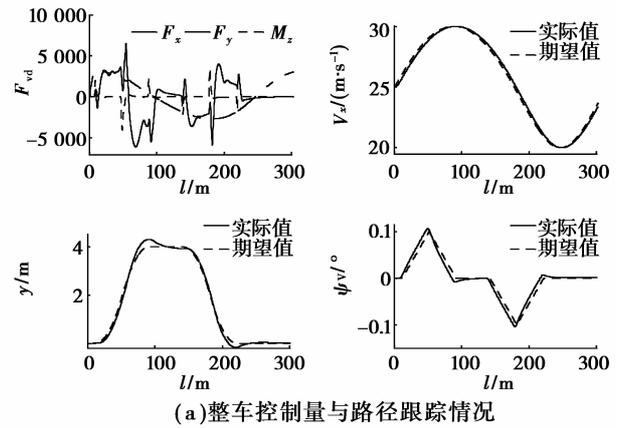


图 5 仿真结果(变速,分离路面,2 个车轮失效)

角为零或基本为零,车轮间可能出现的冲突得以消解;可以利用冗余执行器来弥补故障执行器的功能,实现了车辆路径跟踪的容错控制,发挥出了独立驱动-独立转向动力模式的本质优势;控制系统能够有效地补偿、适应控制分配引入的计算误差扰动,以及车辆质量和转动惯量估计误差等导致的扰动。

4 结 论

1)对于具有驱动冗余、强非线性和不确定性的4WID-4WIS车辆路径跟踪系统,可采用本文提出的单点预瞄控制方法实现快速、高精度的路径跟踪控制。

2)所提出的控制目标生成器能有效地产生期望的横向偏差和横摆角偏差控制目标,算法简单,易于实现。

3)预瞄距离的选取仅考虑了车速因素,它和前方道路的形态、曲率之间的关系尚需深入研究。

参考文献:

- [1] EIICHI O, YOSHIKAZU H, YUJI M. Estimation of tire friction circle and vehicle dynamics integrated control for four-wheel distributed steering and four-wheel distributed traction/braking systems [J]. R&D Review of Toyota CRDL, 2005, 40(4): 7-13.
- [2] WANG J M. Coordinated and reconfigurable vehicle dynamics control [D]. Austin, USA: The University of Texas, 2007.
- [3] WANG J M, LONGORIA, R G. Combined tire slip and slip angle tracking control for advanced vehicle dynamics control systems[C]//Conference on Decision and Control, 13-15 Dec. 2006, San Diego, CA, USA. [S. I.]: IEEE, 2006: 1733-1738.
- [4] 李道飞, 喻凡. 基于最优轮胎力分配的车辆动力学集成控制[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(6): 887-891.
LI DAO-FEI, YU FAN. Integrated vehicle dynamics controller design based on optimum tire force distribution [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(6): 887-891.
- [5] ZHUANG D J, LIU J, YU F, et al. Study and evaluation of driver-vehicle system with fractional order PD μ controller [C] // International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 13-15 Dec. 2006, Shanghai, China. [S. I.]: IEEE, 2006: 434-439.
- [6] GAO Z H, JIANG L Y. Optimal preview trajectory decision model of lane-keeping system with driver behavior simulation and Artificial Potential Field[C]// Intelligent Vehicles Symposium, 3-5 June 2009, Xi'an, China. [S. I.]: IEEE, 2009: 797-801.
- [7] CHATZIKOMIS C I, SPENTZAS K N. A path-following driver model with longitudinal and lateral control of vehicle's motion [J/OL]. Forsch Ingenieurwes, Springer-Verlag (2009) 73: 257-266.
- [8] KATSUMI M. Autonomous steering control for electric vehicles using nonlinear state feedback H ∞ control [J]. Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications, 2005, 63(5-7): 2257-2268.
- [9] 陈无畏, 李进, 王檀彬, 等. 视觉导航智能车辆的路径跟踪预瞄控制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 277-282.
CHEN WU-WEI, LI JIN, WANG TAN-BIN, et al. Preview control for road following of vision guided intelligent vehicle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 277-282.
- [10] 丁海涛, 郭孔辉, 李飞, 等. 基于加速度反馈的任意道路和车速跟随控制驾驶员模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 116-120.
DING HAI-TAO, GUO KONG-HUI, LI FEI, et al. Arbitrary path and speed following driver model based on vehicle acceleration feedback [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 116-120.
- [11] 杨志强, 谭彧. 车道保持系统的车辆状态预测模型[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 25-29.
YANG ZHI-QIANG, TAN YU. Model based on states preview for lane keeping system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 25-29.
- [12] 高振海. 汽车方向预瞄式自适应 PD 控制算法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 101-105.
GAO ZHEN-HAI. Vehicle direction preview adaptive PD control algorithm [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(5): 101-105.
- [13] 韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [14] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
HAN JING-QING. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18.
- [15] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference, Evanston, IL, USA: IEEE Press, 2003: 4989-4996.