

无人驾驶高速 AWID - AWIS 车辆运动控制研究^{*}

阮久宏 李贻斌 荣学文 宋锐

(山东大学机器人研究中心, 济南 250061)

【摘要】 无人驾驶 AWID - AWIS 车辆是一种全部车轮均可独立驱动/制动、独立转向的先进车辆, 对其运动控制这一基础问题进行了研究。首先建立一种适于无人驾驶 AWID - AWIS 车辆的分层式运动控制体系结构, 其上层为运动控制器, 中层为控制分配器, 底层为独立车轮伺服控制器; 然后使用扩张状态观测器(ESO)和自抗扰控制(ADRC)方法设计车辆运动学/动力学集成式运动控制器; 最后开展多种工况下的运动控制仿真, 证明了控制方法的有效性, 指出运动控制目标不能被简单地确定。

关键词: 全轮独立驱动-独立转向车辆 无人驾驶 集成运动控制

中图分类号: TP242.6; U461.6

文献标识码: A

Locomotion Control of Unmanned High-speed AWID - AWIS Vehicle

Ruan Jiuhong Li Yibin Rong Xuwen Song Rui

(Center for Robotics, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract

The high performance locomotion control is an essential issue of the unmanned AWID - AWIS (all-wheel-independent-drive & steering) vehicle. Firstly, a kind of hierarchical locomotion control architecture suited to the unmanned vehicle was proposed. Its top layer, middle layer and bottom layer are the locomotion controller, the control allocator and the independent wheel drive-brake-steering servo controller, respectively. Secondly, a novel vehicle dynamic/kinematics integrated locomotion control means was developed using the extended state observer (ESO) and active disturbance rejection control (ADRC) method, and the controller was subsequently designed. Finally, the vehicle locomotion control simulations under different conditions were performed. The results showed the proposed control method is virtual, and that the control objective for AWID - AWIS vehicle locomotion couldn't be designed simply.

Key words AWID - AWIS vehicle, Unmanned drive, Integrated locomotion control

引言

全轮独立驱动 - 独立转向 (all-wheel-independent-drive & steering, 简称 AWID - AWIS) 车辆的所有车轮均为主动轮, 可独立驱动/制动、独立转向, 具有较强操纵驱动冗余 (冗余度为 $2n - 3$, n 为车轮个数, $n \geq 3$), 通过恰当的协调控制可获得

比传统车辆更好的动力性、机动性和主动安全性。

文献[1~4]分别采用分层控制方法对有人驾驶的 AWID - AWIS 车辆和 AWID 车辆的运动控制问题进行了初步研究。本文以无人驾驶高速 AWID - AWIS 车辆为研究对象, 建立其运动控制体系结构, 设计上层运动控制器, 对整车运动控制进行仿真。

收稿日期: 2009 - 04 - 29 修回日期: 2009 - 08 - 31

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划项目(2007AA04Z206)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(2008BS05003)、中国博士后科学基金项目(20080431189)和山东省教育厅科技计划项目(J07WA10)

作者简介: 阮久宏, 副教授, 博士后, 主要从事先进车辆动力学及其控制、机器人技术研究, E-mail: ruanjh@sdu.edu.cn

通讯作者: 李贻斌, 教授, 博士生导师, 主要从事机器人和先进车辆技术研究, E-mail: liyb@sdu.edu.cn

1 无人驾驶 AWID-AWIS 车辆运动控制体系结构

图 1 是目前有人驾驶 AWID-AWIS 车辆^[1-3]和 AWID 车辆^[4-5]运动控制广泛使用的体系结构。以此为参考,设计了无人驾驶 AWID-AWIS 车辆运动控制体系结构,如图 2 所示。该体系结构中,控制目标(期望车速、横向偏移和横摆角偏差信息)由“行驶路径信息”生成;上层“运动控制器”产生虚拟的总控制量,即总纵向力、侧向力和横摆力矩;中层“控制分配器”将虚拟的总控制量分配到各独立车轮,并使用轮胎模型或专家经验转换为各独立车轮的滑转率和侧偏角,作为底层控制目标,解决 AWID-AWIS 车辆中的驱动冗余问题;底层“车轮独立驱动/制动、独立转向控制”完成车轮的伺服控制,产生被分配的滑转率和侧偏角。

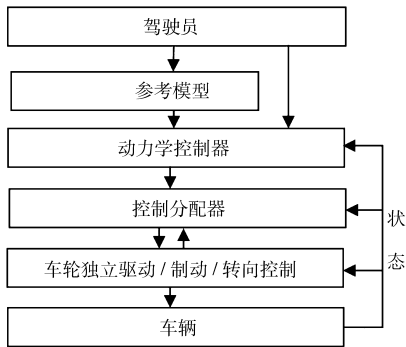


图 1 有人驾驶 AWID/AWIS 车辆运动分层式控制方法框图

Fig.1 Hierarchical control of manned AWID/AWIS vehicle

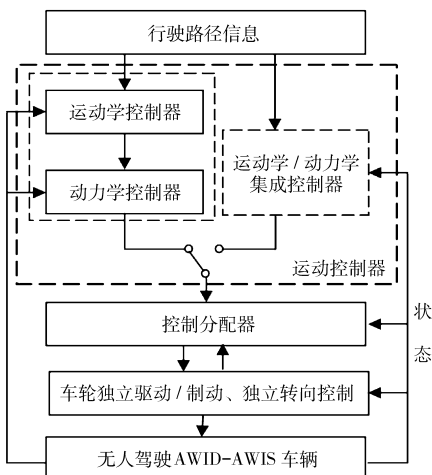


图 2 无人驾驶 AWID-AWIS 车辆运动分层式控制方法框图

Fig.2 Hierarchical control of unmanned AWID/AWIS vehicle

行驶路径信息可以源于“GIS+DGPS”系统,也可以源于车载式车道线视觉检测系统,或道路磁钉检测系统;上层运动控制器可以采用串联的“运动学

控制器+动力学控制器”,也可以采用“运动学/动力学集成控制器”;中层控制分配逻辑可以采用“非线性规划+轮胎模型”方法,也可以采用模糊逻辑或神经网络等智能分配方法;底层车轮伺服控制方法则有更多的选择,如 PID、智能控制、鲁棒控制、非线性控制等。

2 AWID-AWIS 车辆动力学/运动学模型

2.1 动力学模型

假设路面水平,则可建立以总纵向力、侧向力和横摆力矩为控制变量的 AWID-AWIS 车辆操纵动力学模型(车体固联坐标系下)

$$\dot{v}_x = v_y \omega_z - \frac{1}{2m} \rho_a C_W A_f v_x^2 + \frac{1}{m} F_{xd} + \omega_1 \quad (1)$$

$$\dot{v}_y = -v_x \omega_z + \frac{1}{m} F_{yd} + \omega_2 \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{1}{I_z} M_{zd} + \omega_3 \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \quad F_{xd}^2 + F_{yd}^2 \leq (\mu_p mg)^2 \quad (4)$$

$$M_{zd} \leq M_{zd\max}(t) \quad (5)$$

式中 v_x, v_y ——车辆纵向、侧向速度, m/s

ω_z ——横摆角速度, rad/s

m ——车辆总质量, kg

I_z ——车辆绕垂直轴的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

F_{xd}, F_{yd} ——总纵向力、侧向力, N

M_{zd} ——总横摆力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

$M_{zd\max}(t)$ ——系统最大可达横摆力矩,与每个车轮纵向力、侧向力和侧偏角有关, $\text{N} \cdot \text{m}$

μ_p ——路面附着系数峰值

ρ_a ——空气密度, kg/m^3

C_W ——风阻系数

A_f ——车辆前挡迎风面积, m^2

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ——车辆纵向、侧向和横摆运动动力学扰动,包括被忽略的垂向未建模动态, m/s^2

2.2 运动学模型

AWID-AWIS 车辆跟踪期望路径的运动可由图 3 表示。

图中, XOY 为参考坐标系, $xO'y$ 为车体固联坐标系; ψ_V 为车辆横摆角, ψ_P 为期望路径 P 点处切线与 OX 轴的夹角, v 为车辆速度, β 为车辆质心侧偏角, Δy 为沿 $O'y$ 方向车体坐标原点至期望路径点 P 的位移偏差, $\Delta \psi$ 为 $O'x$ 轴与期望路径 P 点处切线的夹角,称为横摆角偏差。AWID-AWIS 车辆路

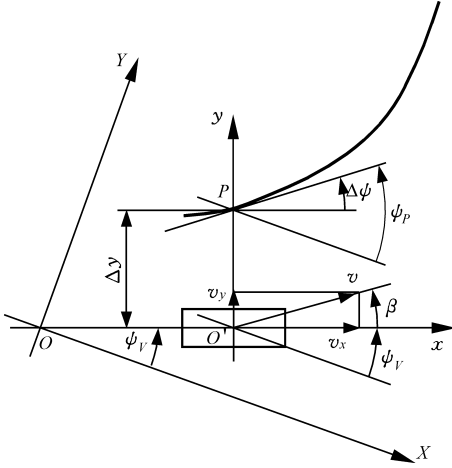


图 3 AWID-AWIS 车辆路径跟踪运动示意图

Fig.3 Tracking motion of AWID-AWIS vehicle

径跟踪的任务就是在一定的车速下同时使跟踪误差, $\Delta y \rightarrow 0, \Delta \psi \rightarrow 0$ 。

据图 3, 得路径跟踪运动学数学模型(车体固联坐标系下)

$$\Delta \dot{y} = V_{xd} \sin(\Delta \psi) - V_y \quad (6)$$

$$\Delta \dot{\psi} = V_{xd} \rho_p - \omega_z \quad (7)$$

式中 V_{xd} ——期望的车辆纵向速度(车体固联坐标系下), 即车辆沿期望路径的切线速度, m/s

ρ_p ——期望路径 P 点处的曲率, 1/m

2.3 路径跟踪运动动力学模型

将式(6)和式(7)分别对时间求导, 可得车体固联坐标系下车辆进行路径跟踪时的横向和横摆动力学模型

$$\Delta \ddot{y} = \dot{v}_{xd} \sin(\Delta \psi) + v_{xd} \dot{\Delta \psi} \cos(\Delta \psi) - \dot{v}_y \quad (8)$$

$$\Delta \ddot{\psi} = \dot{v}_{xd} \rho_p - \dot{\omega}_z \quad (9)$$

将式(8)、(9)与式(1)~(5)联合, 即得车辆进行路径跟踪时完整的动力学模型。

3 运动学/动力学集成控制器设计

无人驾驶 AWID-AWIS 车辆的上层运动控制器采用图 2 中的“运动学/动力学集成控制器”形式。考虑到路面条件和车辆运动工况等的不确定性, 运动控制必须具备较好的鲁棒能力, 为此使用扩张状态观测器 ESO(expanded state observation)和自抗扰控制 ADRC(active disturbance rejection control)方法设计运动控制器。

ADRC 和 ESO^[6-7]是一种不依赖于系统模型的新型控制技术, 它能对系统运行时受到的各种“外扰”和“内扰”的“总和”作用进行实时估计, 并结合特殊的非线性反馈结构对扰动进行实时补偿, 实现具

有强鲁棒性的良好控制品质。

3.1 模型变换

为使用 ESO 和 ADRC 设计动力学控制器, 首先将由式(1)~(3)、(8)、(9)表示的路径跟踪模型写成仿射形式(这里未列出约束条件式(4)和(5))

$$\dot{v}_x = f_{vx}(t) + \frac{1}{m_{est}} F_{xd} \quad (10)$$

$$\Delta \ddot{y} = f_{vy}(t) - \frac{1}{m_{est}} F_{yd} \quad (11)$$

$$\Delta \ddot{\psi} = f_{\omega z}(t) - \frac{1}{I_{zest}} M_{zd} \quad (12)$$

式中 m_{est}, I_{zest} ——车辆质量、转动惯量估计值
 $f_{vx}(t), f_{vy}(t), f_{\omega z}(t)$ 为车辆纵向、横向和横摆运动 3 个动力学通道的“内扰”和“外扰”的“总和”, 包括被忽略的垂向未建模动态。

$$f_{vx}(t) = v_y \omega_z - \frac{1}{2m} \rho_a C_W A_f v_x^2 + \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m_{est}} \right) F_{xd}$$

$$f_{vy}(t) = \dot{v}_{xd} \sin(\Delta \psi) + v_{xd} \dot{\Delta \psi} \cos(\Delta \psi) + v_x \omega_z - \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m_{est}} \right) F_{yd} - \tau_2$$

$$f_{\omega z}(t) = \dot{v}_{xd} \rho_p - \left(\frac{1}{I_z} - \frac{1}{I_{zest}} \right) M_{zd} - \tau_3$$

3.2 控制器结构设计

以 $v_x, \Delta y, \Delta \psi$ 为被控变量, 将 $f_{vx}(t), f_{vy}(t), f_{\omega z}(t)$ 视为扰动时, 由式(10)~(12)描述的车辆纵向、横向和横摆运动动力学通道之间即可被认为是相互独立的, 可以实施解耦控制。

(1) v_x 通道为一阶系统, 可设计形如

$$\begin{cases} e = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + \\ \quad h(z_2(k) - \beta_{01} \text{fal}(e, \alpha_1, \delta) + b_0 u(k)) \\ z_2(k+1) = z_2(k) - h\beta_{02} \text{fal}(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (13)$$

的二阶离散 ESO 实时估计 $f_{vx}(t)$ 。设计形如

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k) \\ u_0 = K_p \text{fal}(e_1, \alpha_p, \delta_p) \\ u(k) = u_0 - z_2(k) / b_0 \end{cases} \quad (14)$$

的一阶离散非线性比例控制器对 $f_{vx}(t)$ 进行实时补偿, 并对通道误差进行反馈校正。

(2) $\Delta y, \Delta \psi$ 通道均为二阶系统, 可分别设计两个形如

$$\begin{cases} e = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01} e) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \\ \quad \beta_{02} \text{fal}(e, \alpha_1, \delta) + b_0 u(k)) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_{03} \text{fal}(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (15)$$

的三阶离散 ESO 实时估计 $f_{vy}(t)$ 、 $f_{\omega z}(t)$ 的值。分别设计两个形如

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2 = v_2(k) - z_2(k) \\ u_0 = K_P \text{fal}(e_1, \alpha_P, \delta_P) + K_D \text{fal}(e_2, \alpha_D, \delta_D) \end{cases} \quad (16)$$

的二阶离散非线性 PD 控制器对 $f_{vy}(t)$ 、 $f_{\omega z}(t)$ 进行实时补偿,并对通道误差进行反馈校正。式(13)~(16)中各参量的含意参见文献[6~7]。

3.3 控制器参数设计

由式(13)、(14)所表示的一阶系统控制器有 9 个参数需要确定,式(15)、(16)表示的二阶系统控制器有 13 个参数需要确定。如果 ESO 采用非线性形式,参数的设计难度较大,而 ESO 采用线性形式,参数设计相对容易。本文采用线性 ESO 形式。

对一阶 v_x 通道,设定式(13)、(14)中参数 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.0$, $\beta_{01} = -2p_1$, $\beta_{02} = p_1^2$ (p_1 为式(13)ESO 的 2 个同值实特征根), $\delta = \delta_P = 0.01$, $\alpha_P = 0.5$, $b_0 = 1/m_{\text{est}}$, 这样控制器只需调整 p_1 和 K_P 2 个参数;对二阶 Δy 、 $\Delta \psi$ 通道也采用类似的方法,最后只需调整 p_2 、 K_P 和 K_D 3 个参数(p_2 为式(15)ESO 的 3 个同值实特征根)。

上述参数的调节难度与传统 PID 控制器的参数调节难度相当,可在实际工程应用中方便地进行在线调试。

4 仿真

4.1 仿真参数

取控制周期为 10 ms,道路附着系数峰值 $\mu_p = 0.9$ 。

实际被控 AWID-AWIS 车辆和空气动力学参数标称值如下: $I_z = 2\,350 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $m = 1\,480 \text{ kg}$, $\rho_a = 1.25 \text{ kg}/\text{m}^3$, $A_f = 0.6 \text{ m}^2$, $C_W = 0.3$; 控制器使用的车辆质量与转动惯量估计值 $m_{\text{est}} = 1\,200 \text{ kg}$, $I_{z\text{est}} = 1\,900 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 待跟踪路径轨迹(即期望运动轨迹)如图 4 所示。

4.2 仿真结果

工况 1: 期望车速 $v_{xd} = 32 \text{ m/s}$, 期望路径如图 4a, 仿真结果见图 5。

工况 2: 期望车速 $v_{xd} = 30 + 10\sin(0.5t)$, 期望路径如图 4a, 仿真结果见图 6。

工况 3: $m = 1\,050 \text{ kg}$, $I_z = 1\,650 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 期望车速 $v_{xd} = 30 + 10\sin(0.5t)$, 期望路径如图 4a, 仿真结果见图 7。

工况 4~6: 期望路径如图 4b, 其它条件分别与工况 1~3 的条件相同, 仿真结果见图 8~10。

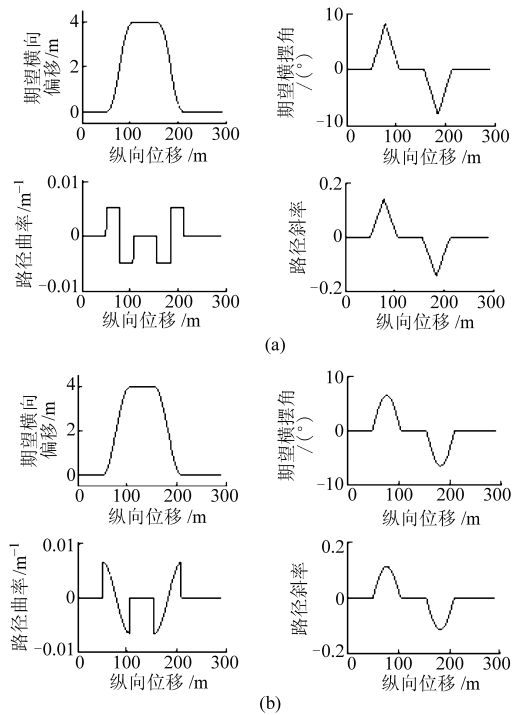


图 4 待跟踪路径轨迹

Fig. 4 Tracked trajectory

(a) 过渡段为圆弧曲线的待跟踪路径

(b) 过渡段为正弦曲线的待跟踪路径

4.3 结果分析与讨论

工况 1 和工况 4 的仿真结果(图 5 和图 8)描述了车辆运动满足约束条件式(4)和(5), 即 AWID-AWIS 车辆运动在系统控制能力范围内时的情况, 表明车辆能够快速、准确地跟踪期望路径轨迹, 并保持车速几乎不变。

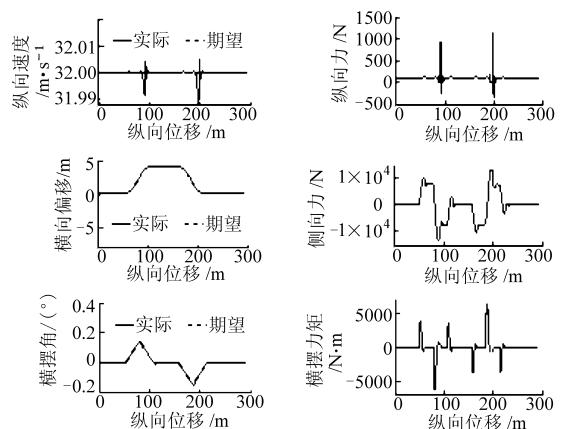


图 5 工况 1 的仿真结果

Fig. 5 Results under condition 1

工况 2 和工况 5 的仿真结果(图 6 和图 9)描述了车辆在部分时间内运行于系统控制能力范围外的情况, 一方面证明了控制器对车速变化具有较强的鲁棒能力, 另一方面表明当最大轮胎力无法满足路径跟踪对总纵向力、侧向力和横摆力矩的要求时, 就会产生较大的速度和路径跟踪误差(图 6 中最大速

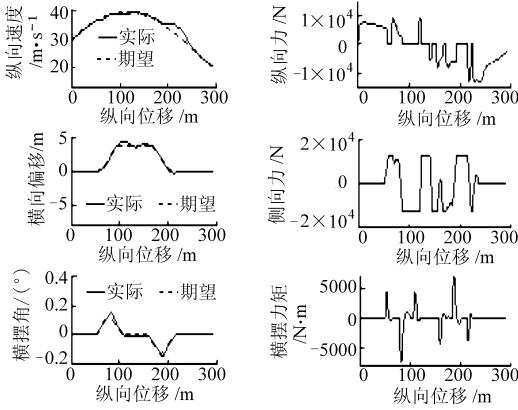


图 6 工况 2 的仿真结果

Fig. 6 Results under condition 2

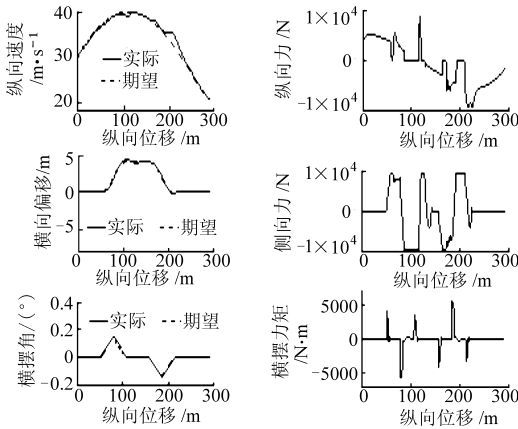


图 7 工况 3 的仿真结果

Fig. 7 Results under condition 3

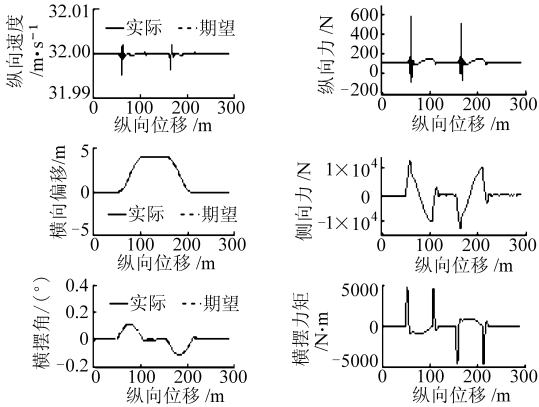


图 8 工况 4 的仿真结果

Fig. 8 Results under condition 4

度误差 3.18 m/s, 最大路径跟踪误差 0.5 m)。事实上, 随着车速的提高, 误差将快速增大, 直至车辆驶出道路而失控。

工况 3 和工况 6 的仿真结果(图 7 和图 10)表明, 当其它条件均相同时, 车辆质量和转动惯量的变化对控制性能的影响并不明显, 这证明基于 ESO 和 ADRC 设计的运动学/动力学集成控制器对车辆质量和转动惯量的大范围变化具有很强的鲁棒能力。该结果同时说明车辆对连续性较好的正弦路径的跟

踪在总体上要优于对连续性较差的等半径圆弧路径的跟踪性能, 使用的控制能量也更少, 因此在进行道路跟踪时, 应使规划路径尽量平滑。

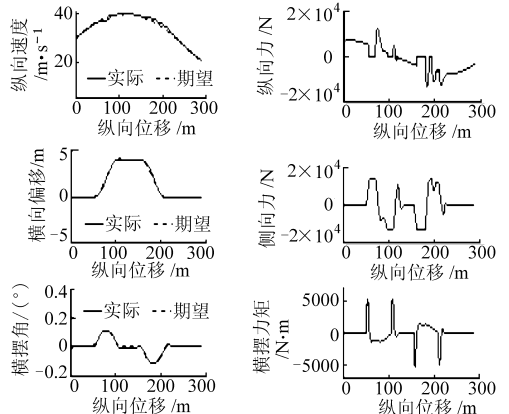


图 9 工况 5 的仿真结果

Fig. 9 Results under condition 5

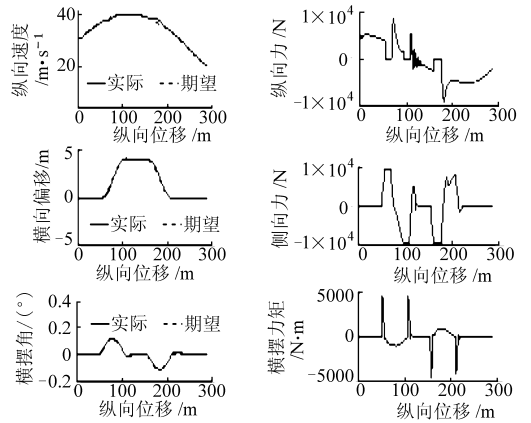


图 10 工况 6 的仿真结果

Fig. 10 Results under condition 6

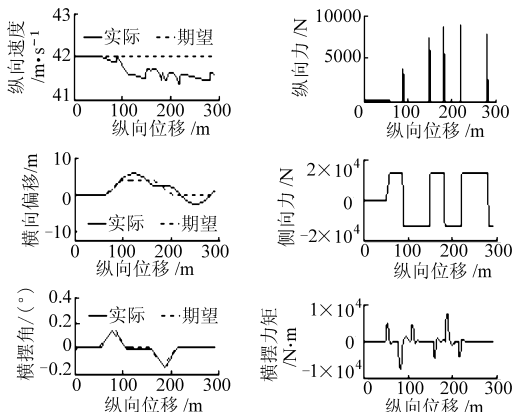


图 11 工况 2 仿真结果 ($v_x = 42 \text{ m/s}$)

Fig. 11 Results under condition 2 ($v_x = 42 \text{ m/s}$)

再以工况 2 中控制目标 v_x 的设计为例来重点讨论控制能力对控制目标的约束问题。由式(2), 当不考虑系统扰动, 且车辆不侧滑时, 有

$$\begin{cases} a_c \frac{1}{m} F_{yd} = v_x \omega_z = v_x^2 \rho_P \\ |a_c| \leq \mu_P g \end{cases} \quad (17)$$

依此,可取 v_x 的设计值为 42 m/s ($\rho_p = 0.005$, $\mu_p = 0.9$),但以此为控制目标的车辆运动已严重违反系统控制能力约束式(4)、(5)而失控,结果见图 11。这一结果与其它条件相同、仅控制目标 v_x 不同的图 6 形成了鲜明对比:图 6 情况下车辆最终可控,结果可接受,而图 11 的结果却无法接受。由此可见,要确定出可满足系统控制能力约束的控制目标(期望车速、横向偏移和横摆角偏差)并非易事,简单地使用类似式(17)的方法可能会导致严重的后果,需综合考虑 μ_p 观测误差、车轮动载荷波动和其它不确定因素的影响进行仔细设计。

一种可能的解决方案是使用模式控制,即针对不同的车辆-道路参数和工况,采用不同的控制模式来确定控制目标,其中的模式库具有自学习和自修

正能力。

5 结论

(1)提出一种适于无人驾驶 AWID-AWIS 车辆运动控制的分层式控制体系结构,以及一种基于 ESO-ADRC 的上层“运动学/动力学集成控制器”实现方法。

(2)使用线性 ESO,为无人驾驶 AWID-AWIS 车辆运动控制器的设计提供了一种可满足鲁棒性要求的、简单易行的工程化方法。

(3)通过实例说明,难以简单地确定出可满足系统控制能力约束的 AWID-AWIS 车辆运动控制目标,其设计问题需作深入研究。

参 考 文 献

- 1 Eiichi One, Yoshikazu Hattori, Yuji Muragishi. 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 Junmin, Longoria R G. Combined tire slip and slip angle tracking control for advanced vehicle dynamics control systems[C]//Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control, San Diego, USA, 2006: 1 733~1 738.
- 3 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 Daofei, Yu Fan. Integrated vehicle dynamics controller design based on optimum tire force distribution[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(6): 887~891. (in Chinese)
- 4 余卓平, 姜炜, 张立军. 四轮轮毂电机驱动电动汽车扭矩分配控制[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2008, 36(8): 1 115~1 119.
Yu Zhuoping, Jiang Wei, Zhang Lijun. Torque distribution control for four wheel in-wheel-motor electric vehicle[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(8): 1 115~1 119. (in Chinese)
- 5 邹广才, 罗禹贡, 李克强. 基于全轮纵向力优化分配的 4WD 车辆直接横摆力矩控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 1~6.
Zou Guangcai, Luo Yugong, Li Keqiang. 4WD vehicle DYC based on tire longitudinal forces optimization distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 1~6. (in Chinese)
- 6 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 Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13~18. (in Chinese)
- 7 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, 2008.