

基于神经网络逆系统方法的汽车底盘解耦控制*

朱茂飞¹ 陈无畏¹ 夏光^{1,2}

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学汽车工程研究院, 合肥 230009)

【摘要】 为了消除汽车底盘各电控子系统间的耦合影响,采用了一种基于神经网络逆系统方法的底盘解耦控制策略。对集成主动前轮转向(AFS)、直接横摆力矩控制(DYC)和主动悬架(ASS)的汽车底盘系统进行研究,利用Interactor算法分析了底盘系统的可逆性,建立了多变量底盘系统的BP神经网络逆系统模型,将闭环控制器与神经网络逆系统组成复合控制器用于改善系统的动态性能,并进行了仿真验证。结果表明,基于神经网络逆系统方法的解耦控制策略能够消除底盘各电控子系统间的干涉和耦合影响,有效改善整车的操纵稳定性。

关键词: 汽车 底盘 解耦控制 神经网络 逆系统方法

中图分类号: U463.1; TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)12-0013-05

Vehicle Chassis Decoupling Control Based on Neural Network Inverse Method

Zhu Maofei¹ Chen Wuwei¹ Xia Guang^{1,2}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. Institute of Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

In order to eliminate the interference and coupling among automobile chassis electronic control subsystems, an integrated decoupling control approach based on neural network inverse method was proposed. The integration of active front steering (AFS), direct yaw moment control (DYC) and active suspension (ASS) was studied. According to Interactor algorithm, the reversibility of chassis system was analyzed and a BP neural network inverse system of the multivariable chassis system was obtained. Designing a close-loop controller and combining it with neural network inverse system, a compound controller was completed to improve dynamic performance. The simulation results showed that the proposed decoupling control approach could eliminate the interference and couple among automobile chassis electronic control subsystems, and improve the automobile handling and stability performance.

Key words Automobile, Chassis, Decupling control, Neural network, Inverse method

引言

近年来,为弥补单个控制系统作用范围有限的控制缺陷,对汽车底盘各子系统进行集成控制以发掘子系统功能潜力成为汽车动力学的一个研究热点^[1-2]。由于底盘各电控子系统是以实现汽车某些局部功能为目标,在底盘集成控制系统设计中不可避免出现子系统间的耦合和干涉,若设计控制系统

时,能对各通道相互耦合的底盘集成系统进行解耦,则可使复杂的底盘集成控制系统设计得以简化。文献[3]利用非线性解耦控制理论设计解耦控制器,消除了ASS和电动助力转向系统(EPS)间的耦合以及路面输入干扰对整车性能的影响。文献[4]利用多变量频域方法消除了AFS和主动制动的电子稳定系统(ESC)间的干涉和耦合。文献[5]基于对控制输入解耦的思想,通过抑制底盘其他控制输入的

收稿日期: 2010-11-04 修回日期: 2011-01-04

* 国家自然科学基金资助项目(51075112,51175135)

作者简介: 朱茂飞, 博士生, 主要从事汽车动力学及集成控制研究, E-mail: zhumaofei1983@126.com

影响来实现控制目标,实现了四轮转向(4WS)、车辆动力学控制(VDC)和ASS间的解耦。

本文将神经网络和逆系统的解耦线性化方法相结合,利用非线性系统的神经网络逆系统方法^[6]进行AFS、DYC及ASS间的解耦控制研究。

1 控制系统参考模型

AFS、DYC及ASS是从侧向、纵向和垂向对整车的横摆和操纵稳定性进行控制,采用包含侧向、横摆及侧倾自由度的车辆模型作为三者共用的控制参考模型,如图1所示。

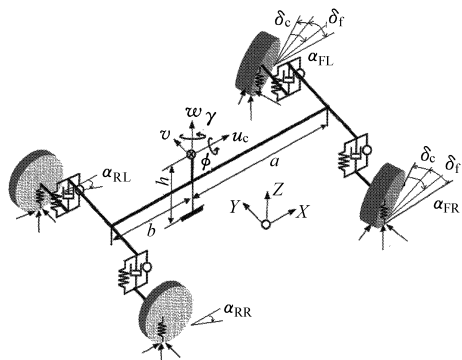


图1 控制系统参考模型

Fig.1 Reference model of control system

定义系统的状态变量 $\mathbf{x} = [\beta \quad \gamma \quad \phi \quad \dot{\phi}]^T$,控制输入变量为 $\mathbf{u} = [\delta_c \quad T_z \quad T_\phi]^T$,控制输出变量为 $\mathbf{y} = [\beta \quad \gamma \quad \phi]^T$,则系统的状态方程,即底盘集成系统可描述为

$$\begin{cases} \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{K} \mathbf{x} + \mathbf{N} \mathbf{u} + \mathbf{Q} \delta_i \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m u_c & a m_f - b m_r & 0 & m_s h \\ (a m_f - b m_r) u_c & I_z & 0 & I_{xz} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ m_s h u_c & I_{xz} & 0 & I_x \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} =$$

$$\begin{bmatrix} -2(C_{\alpha f} + C_{\alpha r}) & -m u_c + \frac{2(b C_{\alpha r} - a C_{\alpha f})}{u_c} & 0 & 0 \\ 2(b C_{\alpha r} - a C_{\alpha f}) & (b m_r - a m_f) u_c - 2 \frac{a^2 C_{\alpha f} + b^2 C_{\alpha r}}{u_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & m_s h u_c & m_s g h - K_\phi & -D_\phi \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 2C_{\alpha f} & 0 & 0 \\ 2C_{\alpha r} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 2C_{\alpha f} \\ 2aC_{\alpha f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

式中 m, m_s ——整车质量、悬挂质量

m_f, m_r ——前非悬挂质量、后非悬挂质量

u_c ——纵向速度 γ ——横摆角速度

β ——质心侧偏角 ϕ ——车身侧倾角

a, b ——汽车质心距前、后轴的距离

$C_{\alpha f}, C_{\alpha r}$ ——前、后轮侧偏刚度

K_ϕ, D_ϕ ——悬架侧倾刚度系数、侧倾阻尼系数

I_z, I_x ——横摆转动惯量、侧倾转动惯量

I_{xz} ——侧倾与横摆运动的惯性积

δ_f, δ_c ——驾驶员施加的前轮转角、前轮转向补偿角

T_z, T_ϕ ——横摆控制力矩、悬架侧倾力矩

h ——汽车质心距侧倾轴的距离

显然,底盘集成系统模型是一典型的三输入、三输出的多变量系统。由于轮胎的纵向力、侧向力与垂向力间存在彼此关联,且车身的侧倾、俯仰与汽车的纵向运动、侧向运动相互影响,因此分别从侧向、纵向和垂向改善汽车操纵稳定性的AFS、DYC和ASS系统间耦合严重,为了使多变量集成系统的设计得以简化,需要对上述3个控制回路相互耦合的底盘多变量集成系统进行解耦。

2 解耦控制系统设计

2.1 系统的可逆性分析

对于状态方程(1)描述的多输入、多输出底盘集成系统,其系统可逆性的证明一般采用Interactor算法:计算输出变量 $\mathbf{y}$ 对时间的各阶导数,直到输出的导数方程中显含输入变量 $\mathbf{u}$,由式(1)可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{y}}_1 = \dot{\beta} &= \frac{-2(C_{\alpha f} + C_{\alpha r})\beta}{m u_c} + \frac{2\gamma(b C_{\alpha r} - a C_{\alpha f})}{m u_c^2} - \\ &\frac{m_s h \ddot{\phi}}{m u_c} - \frac{(a m_f - b m_r)\dot{\gamma}}{m u_c} - \gamma + \frac{2C_{\alpha f}(\delta_f + \delta_c)}{m u_c} \end{aligned} \quad (2)$$

记 $\mathbf{Y}_1 = \dot{\mathbf{y}}_1$,其对输入 $\mathbf{u}$ 的Jacobian矩阵的秩为

$$t_1 = \text{rank} \left[\frac{\partial \mathbf{Y}_1}{\partial \mathbf{u}^T} \right] = \text{rank} \left[\frac{\partial \dot{\mathbf{y}}_1}{\partial \delta_c} \quad \frac{\partial \dot{\mathbf{y}}_1}{\partial T_z} \quad \frac{\partial \dot{\mathbf{y}}_1}{\partial T_\phi} \right] = 1 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{y}}_2 = \dot{\gamma} &= \frac{2(b C_{\alpha r} - a C_{\alpha f})\beta}{I_z} - \frac{2(a^2 C_{\alpha f} + b^2 C_{\alpha r})\gamma}{I_z u_c} - \\ &\frac{I_{xz} \ddot{\phi}}{I_z} - \frac{(a m_f - b m_r)(\dot{\beta} + \gamma) u_c}{I_z} + \frac{T_z}{I_z} + \frac{2a C_{\alpha f}(\delta_f + \delta_c)}{I_z} \end{aligned} \quad (4)$$

记 $\mathbf{Y}_2 = [\dot{\mathbf{y}}_1 \quad \dot{\mathbf{y}}_2]^T$,其对 $\mathbf{u}$ 的Jacobian矩阵的秩为

$$t_2 = \text{rank} \left[\frac{\partial \mathbf{Y}_2}{\partial \mathbf{u}^T} \right] = \text{rank} \left[\frac{\partial \dot{\mathbf{y}}_1}{\partial \delta_c} \quad \frac{\partial \dot{\mathbf{y}}_1}{\partial T_z} \quad \frac{\partial \dot{\mathbf{y}}_1}{\partial T_\phi} \quad \frac{\partial \dot{\mathbf{y}}_2}{\partial \delta_c} \quad \frac{\partial \dot{\mathbf{y}}_2}{\partial T_z} \quad \frac{\partial \dot{\mathbf{y}}_2}{\partial T_\phi} \right] = 2 \quad (5)$$

$$\ddot{y}_3 = \ddot{\phi} = -\frac{D_\phi \dot{\phi}}{I_x} - \frac{(K_\phi - m_s g h) \phi}{I_x} - \frac{I_{xz} \dot{\gamma}}{I_x} - \frac{m_s h (\dot{\beta} + \gamma) u_c}{I_x} + \frac{T_\phi}{I_x} \quad (6)$$

记 $\mathbf{Y}_3 = [\dot{y}_1 \quad \dot{y}_2 \quad \dot{y}_3]^\text{T}$, 其对 $\mathbf{u}$ 的 Jacobian 矩阵的秩为

$$t_3 = \text{rank} \left[\frac{\partial \mathbf{Y}_3}{\partial \mathbf{u}^\text{T}} \right] = \text{rank} \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{y}_1}{\partial \delta_c} & \frac{\partial \dot{y}_1}{\partial T_z} & \frac{\partial \dot{y}_1}{\partial T_\phi} \\ \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial \delta_c} & \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial T_z} & \frac{\partial \dot{y}_2}{\partial T_\phi} \\ \frac{\partial \dot{y}_3}{\partial \delta_c} & \frac{\partial \dot{y}_3}{\partial T_z} & \frac{\partial \dot{y}_3}{\partial T_\phi} \end{bmatrix} = 3 \quad (7)$$

由于存在非负整数 $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, \alpha_3 = 2$, 使得 t_3 等于式(1)的输出变量数, 则系统的向量相对阶为 $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3]^\text{T} = [1 \quad 1 \quad 2]^\text{T}$, 且 $\sum_{i=1}^3 \alpha_i = n = 4$ (n 为系统的阶数)。由隐函数定理可知, 式(1)的逆系统存在, 且逆系统的输出 $\mathbf{u}$ (原系统的输入) 为

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \dot{y}_1, \dot{y}_2, \dot{y}_3) = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \quad (8)$$

其中 $\mathbf{v} = [v_1 \quad v_2 \quad v_3]^\text{T} = [\dot{y}_1 \quad \dot{y}_2 \quad \dot{y}_3]^\text{T}$, $\boldsymbol{\varphi}(\cdot)$ 为逆系统的输出与输入间的非线性关系。令 $z_1 = y_1, z_2 = y_2, z_{31} = y_3, z_{32} = \dot{z}_{31} = \dot{y}_3, v_1 = \dot{y}_1, v_2 = \dot{y}_2, v_3 = \dot{y}_3$ 为逆系统的输入, 则式(1)的逆系统为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = v_1 \\ \dot{z}_2 = v_2 \\ \dot{z}_{31} = z_{32} \\ \dot{z}_{32} = v_3 \\ \mathbf{u} = \overline{\boldsymbol{\varphi}}(z_1 \quad z_2 \quad z_{31} \quad z_{32} \quad v_1 \quad v_2 \quad v_3) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可见, 将逆系统串联在原系统前组成的伪线性系统, 相当于 2 个一阶积分线性子系统和 1 个二阶积分线性子系统, 这样对于包含 AFS、DYC 和 ASS 的强耦合多变量集成系统的控制问题就转换为对 2 个一阶积分线性子系统和 1 个二阶积分线性子系统的控制, 如图 2 所示。

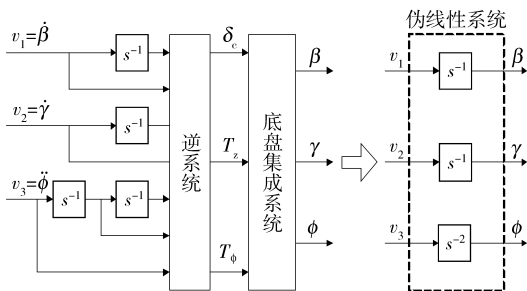


图 2 伪线性系统结构框图

Fig. 2 Pseudo-linear system

2.2 神经网络逆系统的构造及训练

基于精确数学模型的底盘集成系统解析逆系统式(9), 仅在原系统的参数准确、已知并保持恒定时, 伪线性系统的解耦特性才能得以体现。为了提高控制系统对参数变化的自适应能力和对负载扰动的鲁棒性, 应用静态神经网络和积分器来构造其逆系统。由式(9)可知, 逆系统的输入层包括 $\beta, \gamma, \phi, \dot{\phi}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}$ 和 $\ddot{\phi}$, 输出层包括 δ_c, T_z 和 T_ϕ , 因此确定输入层神经元数为 7, 输出层神经元数为 3, 采用试验试凑法确定隐含层神经元数为 15, 利用静态神经网络逼近式(9)逆系统的非线性映射, 4 个积分器用来表征逆系统的动态特性, 从而得到底盘集成系统的神经网络逆系统结构为 7-15-3, 见图 3, 其中逆系统 BP 神经网络的输入层和隐含层采用 tansig 作为传递函数, 输出层采用 purelin 作为传递函数。

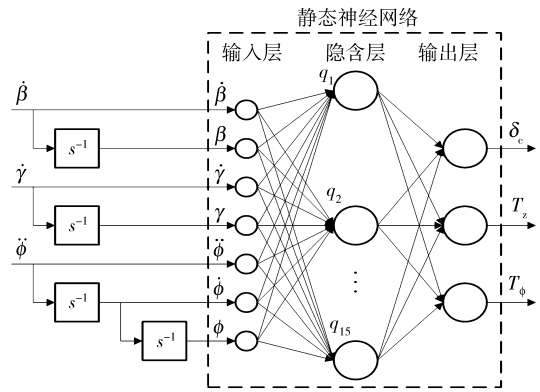


图 3 逆系统 BP 神经网络结构图

Fig. 3 BP neural network of inverse system

设定车速为 100 km/h, 驾驶员施加的前轮转角为变幅值正弦曲线, 对前轮转向补偿角 δ_c 、横摆控制力矩 T_z 、悬架侧倾力矩 T_ϕ 输入的激励信号见图 4。

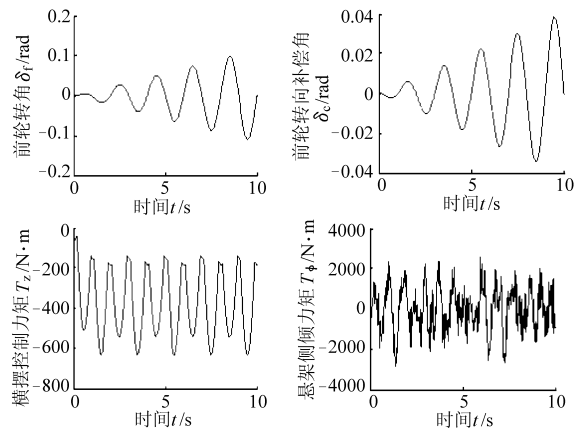


图 4 神经网络逆系统训练激励信号

Fig. 4 Training signal of neural network inverse system

以 5 ms 周期采样横摆角速度 γ 、质心侧偏角 β 和车身侧倾角 ϕ 的响应, 根据五点数值求导算法^[6]计算 β, γ, ϕ 的一阶、二阶数值微分 $\dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$, 重组

以上数据得到2 000组训练数据集 $(\beta, \dot{\beta}, \gamma, \dot{\gamma}, \phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi})$ 和 (δ_c, T_z, T_ϕ) 。利用Matlab神经网络工具箱中的premnmx函数对网络输入输出数据进行归一化,网络仿真测试时,所用的新数据利用trmnmx接受相同的预处理,最后使用函数postmnmx还原归一化数据。利用newff函数建立BP神经网络,选取Levenberg-Marquardt算法的trainlm作为训练函数,应用train函数对建立的BP神经网络进行训练,设置训练次数为500,学习效率为0.05,网络目标误差为 10^{-3} ,经过72次训练后,达到所要求的训练精度。

2.3 闭环控制器的设计

系统进行解耦后,多变量的多输入多输出集成系统转换成互不干扰的3个单输入单输出系统:2个一阶积分线性子系统和1个二阶积分线性子系统。为综合改善系统的响应品质,将闭环控制器与神经网络逆系统组成复合控制器以对集成系统进行有效控制,见图5。

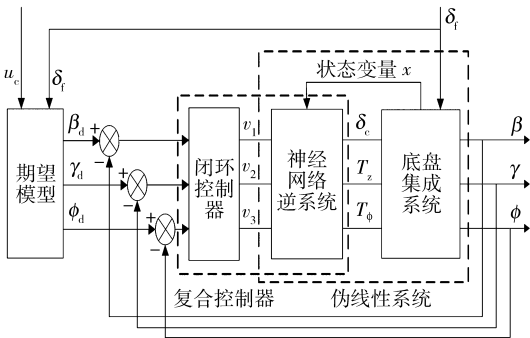


图5 底盘集成系统解耦控制结构图

Fig.5 Decoupling control structure of integrated chassis

由于解耦后得到的伪线性系统的输出与输入间具有一一对应的线性关系,因此可采用针对单变量线性系统理论中的PID控制、极点配置或二次型指标最优控制等方法来设计闭环控制器。为此,在系统解耦的基础上,设计了PD闭环控制器

$$\mathbf{v} = \mathbf{K}_p \text{diag}\{\mathbf{e}\} + \mathbf{K}_d \text{diag}\{\dot{\mathbf{e}}\} \tag{10}$$

式中 $\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}$ ——系统输出信号的偏差和偏差变化率
 $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_d$ ——比例和微分系数

在图5中,汽车的期望模型根据驾驶员的输入产生动态响应参考值,根据文献[7]得到质心侧偏角和横摆角速度的期望值为

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_d &= \frac{\frac{2C_{\alpha f}(2a^2C_{\alpha f} + 2b^2C_{\alpha r})}{2aC_{\alpha f} - 2bC_{\alpha r} + mu_c^2} - 2bC_{\alpha f}}{\frac{(2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r})(2a^2C_{\alpha f} + 2b^2C_{\alpha r})}{2aC_{\alpha f} - 2bC_{\alpha r} + mu_c^2} + 2bC_{\alpha r} - 2aC_{\alpha f}} \delta_f \\ \gamma_d &= \min\left(\left| \frac{u_c \delta_f}{(a+b)(1+Ku_c^2)} \right|, \left| \frac{\mu g}{u_c} \right| \text{sgn} \delta_f \right) \end{aligned} \right. \tag{11}$$

式中 μ ——路面附着系数 K ——不足转向系数
根据文献[5]得到车身侧倾角期望值为 $\phi_d = 0$ 。

3 仿真计算与结果分析

为了验证所神经网络逆系统方法解耦控制的有效性,利用Matlab/Simulink软件对设计的底盘解耦控制系统进行验证。仿真车辆参数为 $m = 1\,375\text{ kg}$, $m_s = 1\,055\text{ kg}$, $m_f = 160\text{ kg}$, $m_r = 160\text{ kg}$, $a = 1.19\text{ m}$, $b = 1.21\text{ m}$, $I_z = 5\,428\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_x = 1\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_{xz} = 47.5\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $C_{\alpha f} = 77.85\text{ kN/rad}$, $C_{\alpha r} = 75.51\text{ kN/rad}$, $K_\phi = 65.59\text{ kN/rad}$, $D_\phi = 2.1\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$, $h = 0.3\text{ m}$ 。经反复调整,设定PD闭环控制器参数为 $\mathbf{K}_p = \text{diag}\{18\,52\,5\,000\}$, $\mathbf{K}_d = \text{diag}\{4.5\,3\,10\}$ 。设置初始状态车速 $u_c = 100\text{ km/h}$,附着系数 $\mu = 0.85$,分别对没有考虑子系统间解耦的集成PD控制、AFS/DYC/ASS的联合控制(3个子控制器同时独立参与控制)和所采用的基于神经网络逆方法的解耦PD控制进行2种典型工况下的仿真,并与理想期望值进行对比分析。

3.1 单移线工况

驾驶员施加的前轮转角为 $5(^{\circ})/(0.5\text{ Hz})$ 的正弦曲线,汽车横摆角速度、质心侧偏角和车身侧倾角响应曲线见图6~8。

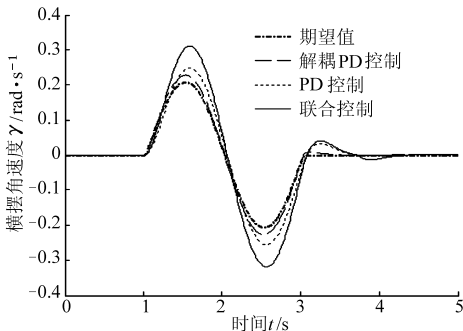


图6 横摆角速度响应曲线

Fig.6 Response curves of yaw rate

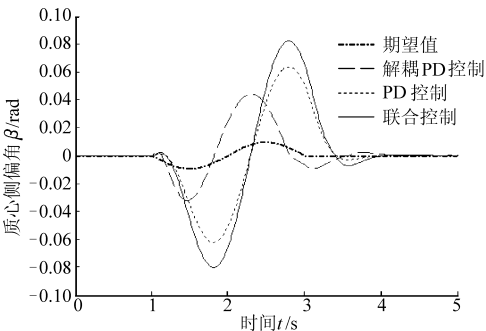


图7 质心侧偏角响应曲线

Fig.7 Response curves of sideslip angle

在图6中,与联合控制相比,单纯的PD控制和解耦PD控制都能获得较好的横摆角速度跟踪效

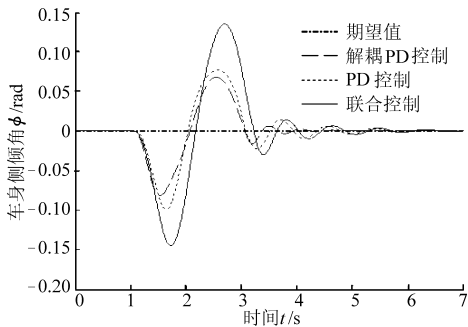


图 8 车身侧倾角响应曲线

Fig. 8 Response curves of roll angle

果,但是解耦 PD 控制的超调量较小。图 7 中,解耦 PD 控制的质心侧偏角被控制在一个较小的范围内,从而有利于车辆的稳定行驶。图 8 中,由于解耦 PD 控制能实现一个输出仅由一个输入完全控制,因此通过主动悬架的侧倾力矩能较好地改善车身侧倾角响应,从而有助于极限工况下汽车操纵稳定性的改善。

3.2 阶跃转向工况

在阶跃转向工况中,为了检验解耦 PD 控制系统的鲁棒性,在控制器不发生任何变化的情况下,人为改变被控系统的参数:车身质量和前、后轮侧偏刚度,三者的变化范围均为 $\pm 20\%$,且按正弦函数变化。阶跃转向工况下汽车横摆角速度、质心侧偏角和车身侧倾角的对比结果见图 9 ~ 11。

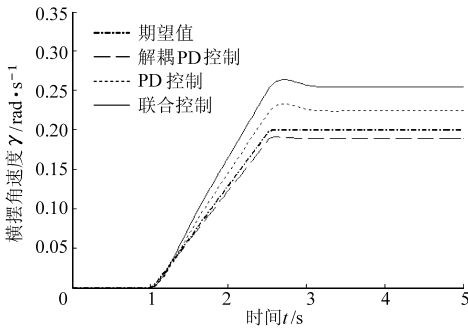


图 9 横摆角速度响应曲线

Fig. 9 Response curves of yaw rate

在图 9 ~ 11 中,即使被控对象的参数发生变化,解耦 PD 控制也能使汽车横摆角速度较好地接近期望值,并且其质心侧偏角和车身侧倾角也在可控范围内,可见基于神经网络逆系统方法的解耦控制系统具有一定的鲁棒性。底盘系统联合控制时,由于

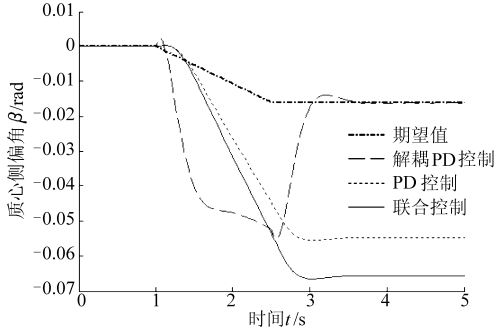


图 10 质心侧偏角响应曲线

Fig. 10 Response curves of sideslip angle

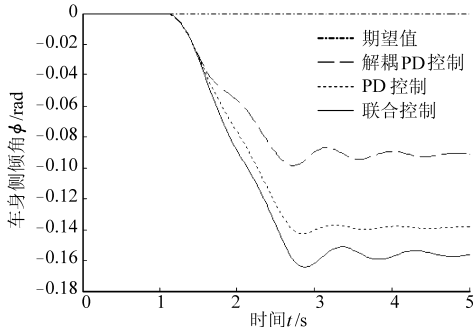


图 11 车身侧倾角响应曲线

Fig. 11 Response curves of roll angle

各个子系统都以实现某些局部性能为目标,因此横摆角速度、质心侧偏角和车身侧倾角的幅值都较大。而单纯 PD 控制没有考虑控制回路间的耦合效应,控制某一目标时不可避免地对其他控制目标产生不利影响,从而使得在被控对象参数发生变化下,其横摆角速度、质心侧偏角和车身侧倾角都偏离了期望值,且系统鲁棒性较差。

4 结论

(1)将多变量系统的神经网络逆控制方法应用于汽车底盘解耦控制系统设计中,分析了集成系统的可逆性,构造了 BP 神经网络逆系统。

(2)神经网络逆系统与集成系统串联得到的伪线性系统的输入输出间具有一一对应的关系,各控制回路间彼此解耦。

(3)仿真结果表明,基于神经网络逆的集成底盘控制能实现良好的车辆状态跟踪和稳定性,并且控制系统具有一定的鲁棒性。

参 考 文 献

1 Trachtler A. Integrated vehicle dynamics control using active brake, steering and suspension system [J]. International Journal of Vehicle Design, 2004, 36(1): 1 ~ 12.
2 Karbalaei R, Ghaffari A, Kazemi R, et al. A new intelligent strategy to integrated control of AFS/DYC based on fuzzy logic [J]. International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 1(1): 47 ~ 52.

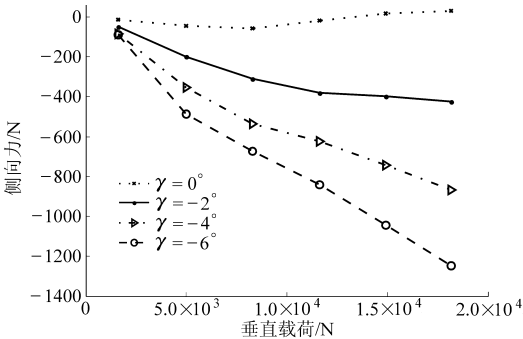


图 12 轮胎侧向力与外倾角的关系

Fig. 12 Tire lateral force vs camber angle

4 结束语

对已有的轮胎试验数据进行了整理,详细论述了各种影响因素与轮胎侧向力之间的关系。随着轮胎侧偏角的增大,车轮侧向力呈现很强的非线性。随着垂直载荷的增大,车轮侧向力不会呈比例增大。车轮载荷转移及外倾角补偿特性是影响车辆操纵稳定的重要因素,着重研究了载荷转移及外倾角变化与轮胎侧向力间的关系,结果显

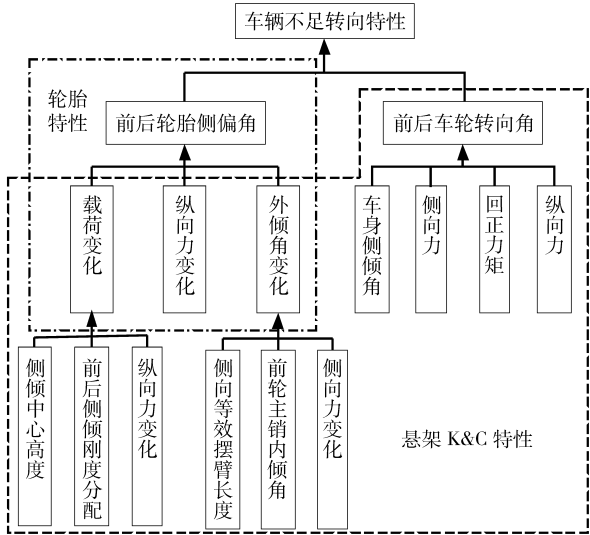


图 13 不足转向特性的影响因素

Fig. 13 Affecting factors of vehicle understeer character

示在一定范围内载荷转移及外倾角的影响可以分别计算,然后线性迭加,简化了试验及分析工作。最后给出了悬架及轮胎与车辆不足转向性能之间的关系。

参 考 文 献

1 魏道高,洪添胜,蒋国平,等. 汽车轮胎侧偏特性研究综述[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2002,23(3):54~59.
Wei Daogao,Hong Tiansheng, Jiang Guoping, et al. A review of cornering properties of pneumatic tire[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science, 2002, 23(3): 54~59. (in Chinese)

2 管迪华,党兆龙. 轮胎垂直特性预测精度对侧偏特性的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005,45(11):1518~1521.
Guan Dihua, Dang Zhaolong. Influence of tire vertical property prediction accuracies on cornering models[J]. Journal of Tsinghua University: Sci. & Tech., 2005,45(11):1518~1521. (in Chinese)

3 袁忠诚. UniTire 轮胎稳态模型研究[D]. 长春:吉林大学,2006.
Yuan Zhongcheng. Study of UniTire steady state tire model[D]. Changchun:Jilin University,2006. (in Chinese)

4 Guo K H, Lu D. UniTire: unified tire model for vehicle dynamic simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(Supp.): 79~99.

5 郭孔辉,袁忠诚,卢荡. UniTire 轮胎稳态模型的联合工况预测能力研究[J]. 汽车工程,2006, 28(6):565~568.
Guo Konghui, Yuan Zhongcheng, Lu Dang. A study on the prediction capability of UniTire model for combined slips mode[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(6):565~568. (in Chinese)

(上接第 17 页)

3 陈无畏,徐娟,胡芳,等. 整车非线性系统的输入输出解耦及解耦比例微分控制[J]. 机械工程学报,2007,43(2):64~70.
Chen Wuwei, Xu Juan, Hu Fang, et al. I/O decoupling and decoupling proportion and differential control of nonlinear full car system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 64~70. (in Chinese)

4 朱冰,李幼德,赵健,等. 基于多变量频域控制方法的车辆底盘集成控制[J]. 农业机械学报,2010,41(1):14~17.
Zhu Bing, Li Youde, Zhao Jian, et al. Integrated chassis control based on multivariable frequency domain control methods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 14~17. (in Chinese)

5 Kazuya Kitajima, Huei peng. H_{∞} control for integrated side-slip, roll and yaw controls for ground vehicles[C]//Proceedings of AVEC 2000, 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Michigan, 2000: 22~24.

6 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

7 Zhang Jinzhu, Zhang Hongtian. Vehicle stability control based on adaptive PID control with single neuron network[C]//2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR), Wuhan, 2010,1: 434~437.