

线控转向系统的全状态反馈控制策略^{*}

施国标 于蕾艳 林逸

【摘要】 研究了线控转向系统的车辆全状态(质心侧偏角和横摆角速度)反馈控制策略,根据虚拟前轮侧偏刚度的概念得到横摆角速度和质心侧偏角的反馈系数,研究了虚拟前轮侧偏刚度系数对极点、频率特性等的影响。仿真表明,根据车速选择合适的虚拟侧偏刚度系数,可改变汽车的转向特性,即低速时,该系数为正,过度转向程度增大,提高转向灵敏性;高速时,该系数为负,不足转向程度增大,提高转向稳定性。因此全状态反馈控制策略可提高车辆的操纵稳定性。

关键词: 线控转向 全状态反馈 控制策略 转向特性

中图分类号: U463.4 **文献标识码:** A

Research on Full State Feedback Control Strategy of Steer-by-wire

Shi Guobiao¹ Yu Leiyan² Lin Yi¹

(1. Beijing Institute of Technology 2. China University of Petroleum)

Abstract

Full states (i. e. slip angle and yaw rate) feedback control strategy was researched and feedback coefficients of slip angle and yaw rate were acquired according to the concepts of virtual front tire cornering stiffness coefficient. Slip angle was estimated with Kalman filter. Effects of virtual front tire cornering stiffness coefficient changing coefficient on poles and frequency characteristics have been researched. Simulations showed that virtual front tire cornering stiffness coefficient changing coefficients could be chosen based on velocities to change steering characteristics: positive coefficient at low velocities leading to oversteer and steering agile; while negative coefficient at high velocities leading to understeer and steering stable. So presented control strategy improved handling and stabilities.

Key words Steer-by-wire, Full state feedback, Control strategy, Steering characteristics

引言

线控转向(steer-by-wire,简称SBW)系统由转向盘总成、控制器和前轮转向机构总成组成,该系统取消了转向轮与转向盘的机械连接,而由转向电动机直接驱动转向轮,可以实现主动转向。线控转向可根据车辆行驶状况主动控制转向轮转角,改变车辆的转向特性,低速时操纵性好,高速时稳定性好,从而改善车辆的操纵稳定性和主动安全性^[1-3]。

国内外提出了许多主动转向控制策略,分为前

馈和反馈两类。前馈控制策略不需要车辆状态的反馈,如:根据车速改变不足转向梯度^[4],而反馈控制策略需要车辆状态的反馈,如横摆角速度反馈^[5]、横摆角速度与侧向加速度反馈^[6]等。本文研究一种可改善车辆操纵稳定性的线控转向全状态(质心侧偏角和横摆角速度)反馈控制策略。

1 二自由度线控转向系统模型

线控转向系统的系统结构如图1所示。

采用经典二自由度模型,车辆的两个状态变量

收稿日期:2007-03-14

^{*} 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50705008)和国家“863”高技术研究发展计划资助项目(项目编号:2006AA11A192)

施国标 北京理工大学机械与车辆工程学院 讲师 博士后,100081 北京市

于蕾艳 中国石油大学机电工程学院 讲师 博士,257061 山东省东营市

林逸 北京理工大学机械与车辆工程学院 教授 博士生导师

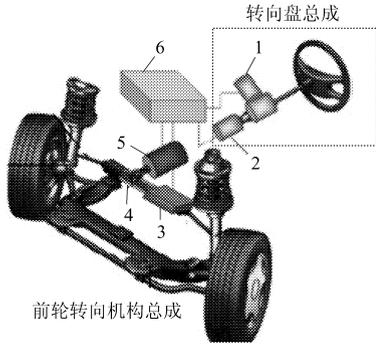


图1 线控转向系统的系统结构图

Fig.1 System structure of steer by wire system

- 1. 路感电动机 2. 转向盘转角传感器 3. 齿条位移传感器
- 4. 齿轮齿条转向器 5. 转向电动机 6. ECU

为质心侧偏角和横摆角速度,其动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{k_1 + k_2}{mu} \beta + \left(\frac{ak_1 - bk_2}{mu^2} - 1 \right) \omega_r - \frac{k_1}{mu} \delta_f \\ \dot{\omega}_r = \frac{ak_1 - bk_2}{I_z} \beta + \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{I_z u} \omega_r - \frac{ak_1}{I_z} \delta_f \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 β ——质心侧偏角 ω_r ——横摆角速度
- δ_f ——前轮转角 a ——质心至前轴距离
- b ——质心至后轴距离 u ——车速
- I_z ——车辆绕Z轴的转动惯量
- k_1 ——前轮胎侧偏刚度
- k_2 ——后轮胎侧偏刚度

稳定性因数 K_{us} 为

$$K_{us} = \frac{m}{l^2} \left(\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1} \right) \quad (2)$$

由式(1)可知,线控转向可以通过转向盘转角自由控制前轮转角 δ_f , 改变 β 和 ω_r 的响应。

2 全状态反馈控制策略

对前轮转角施加车辆状态反馈可以改变车辆系统的极点配置,改变车辆的转向特性,并且自动补偿物理参数不可预见的变化(如车辆负荷分配变化)和操纵条件(如道路摩擦因数)的变化,提高操纵稳定性^[7]。试验表明横摆角速度反馈可以改善横摆角速度的响应,改善驾驶员跟踪期望路径的能力^[8],但是无法控制质心侧偏角,可能出现侧偏角很大的情况,导致侧滑等危险工况。因此,引入全状态(质心侧偏角和横摆角速度)反馈控制策略(图2),可以同时控制质心侧偏角和横摆角速度,保证汽车的操纵稳定性和主动安全性。

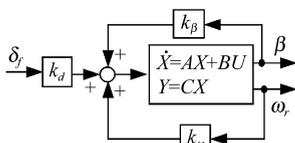


图2 全状态反馈控制示意图

Fig.2 Schematics of full state feedback control

实际前轮转角为

$$\delta'_f = \delta_f + k_\omega \omega_r \quad (3)$$

式中 k_ω ——横摆角速度反馈系数

$$\delta'_f = k_d \delta_f + k_\beta \beta + k_\omega \omega_r \quad (4)$$

式中 k_d ——前轮转角增益系数

k_β ——质心侧偏角反馈系数

为直观看出全状态反馈控制策略对车辆转向特性的影响,定义虚拟前轮侧偏刚度 \hat{k}_1 为

$$\hat{k}_1 = k_1(1 + \eta) \quad (5)$$

式中 η ——虚拟前轮侧偏刚度系数

实现全状态反馈后,式(2)变为

$$K_{us} = \frac{m}{l^2} \left[\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1(1 + \eta)} \right] \quad (6)$$

可见, $\eta < 0$ 时,虚拟前轮侧偏刚度 \hat{k}_1 降低, K_{us} 增大,不足转向程度增大。反之, $\eta > 0$ 时,虚拟前轮侧偏刚度 \hat{k}_1 增大, K_{us} 减小,过度转向程度则增大。 $\eta = 0$ 时,转向特性不变。随车速实时改变 η 大小和符号,即可改变汽车的稳态转向特性:低速时, $\eta > 0$,过度转向,转向灵敏;高速时, $\eta < 0$,不足转向,转向稳定。图3为 η 对稳定性因数的影响曲线。

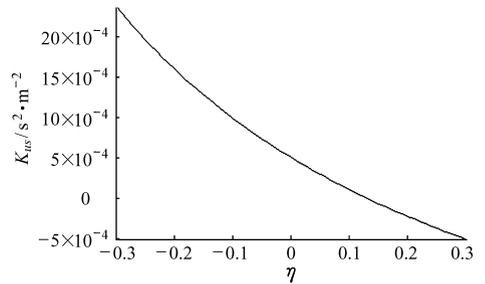


图3 η 对稳定性因数的影响

Fig.3 Effects of η on stabilities factor

式(1)中,用 \hat{k}_1 代替 k_1 后为

$$\begin{cases} \dot{\beta} = k_{11} \beta + k_{12} \omega_r - k_{13} \delta_f \\ \dot{\omega}_r = k_{21} \beta + k_{22} \omega_r - k_{23} \delta_f \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} k_{11} &= \frac{k_1(1 + \eta) + k_2}{mu} \\ k_{12} &= \frac{ak_1(1 + \eta) - bk_2}{mu^2} - 1 \\ k_{13} &= \frac{k_1(1 + \eta)}{mu} \quad k_{23} = \frac{ak_1(1 + \eta)}{I_z} \\ k_{21} &= \frac{ak_1(1 + \eta) - bk_2}{I_z} \\ k_{22} &= \frac{a^2 k_1(1 + \eta) + b^2 k_2}{I_z u} \end{aligned}$$

式(1)中,用 δ'_f 代替 δ_f 得到反馈后的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\beta} = k'_{11} \beta + k'_{12} \omega_r - k'_{13} \delta_f \\ \dot{\omega}_r = k'_{21} \beta + k'_{22} \omega_r - k'_{23} \delta_f \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$k'_{11} = \frac{k_1(1 - k_\beta) + k_2}{mu}$$

$$k'_{12} = \frac{ak_1(1 - k_\omega u/a) - bk_2}{mu^2} - 1$$

$$k'_{13} = \frac{k_1 k_d}{mu} \quad k'_{23} = \frac{ak_1 k_d}{I_z}$$

$$k'_{21} = \frac{ak_1(1 - k_\beta) - bk_2}{I_z}$$

$$k'_{22} = \frac{a^2 k_1(1 - k_\omega u/a) + b^2 k_2}{I_z u}$$

式(8)与式(7)等效,将 β 、 ω_r 和 δ_f 的系数相比较,得到状态反馈增益系数为

$$k_\omega = -\frac{a}{u}\eta \tag{9}$$

$$k_\beta = -\eta \tag{10}$$

$$k_d = 1 + \eta \tag{11}$$

η 不仅改变稳态转向特性,恰当选择 η 还可使闭环系统的极点位于S平面的任意位置,自由支配系统的响应特性,满足给定的性能指标要求。

由式(1)、(9)~(11)得到加入全状态反馈控制律的系统状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 - a_5 \eta & a_2 - \frac{a_5 a}{u} \eta \\ a_3 - a_6 \eta & a_4 - \frac{a_6 a}{u} \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_5(1 + \eta) \\ a_6(1 + \eta) \end{bmatrix} \delta_f \tag{12}$$

其中

$$a_1 = \frac{k_1 + k_2}{mu} \quad a_2 = \frac{ak_1 - bk_2}{mu^2} - 1$$

$$a_3 = \frac{ak_1 - bk_2}{I_z} \quad a_4 = \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{I_z u}$$

$$a_5 = -\frac{k_1}{mu} \quad a_6 = -\frac{ak_1}{I_z}$$

可见,全状态反馈不仅改变横摆角速度的传递函数,也可以改变质心侧偏角的传递函数,从而可以改善质心侧偏角的响应。

3 仿真计算

为了验证全状态反馈控制策略对操纵稳定性的改善,应用 Matlab/Simulink 研究虚拟侧偏刚度系数 η 对系统性能的影响。

图4比较了转向盘转角正弦输入下, $\eta = 0$ 、 $\eta = 0.2$ 、 $\eta = -0.2$ 三种情况的实际前轮转角和横摆角速度响应。可见,状态反馈使实际前轮转角随之变化以准确重复虚拟前轮侧偏刚度的动态影响。 η 增加时,实际前轮转角增加,横摆角速度增大,车辆有更明显的过度转向特性; η 降低时,与无状态反馈的情况比较,实际前轮转角和横摆角速度减小,车辆有更明显的不足转向特性。

图5表明,增加 η 时,相对阻尼系数 ξ_γ 增大;低

速时反应时间 T_f 降低,高速时反应时间 T_f 增加;稳态横摆角速度增益 $\omega_r/\delta_f(s)$ 增大。图6给出了 η 对极点位置的影响,增加 η ,极点接近实轴,远离虚轴。图7给出了 η 对横摆角速度和质心侧偏角频率响应的影响,增加 η ,转向增益增加,但同时相位滞后增大。

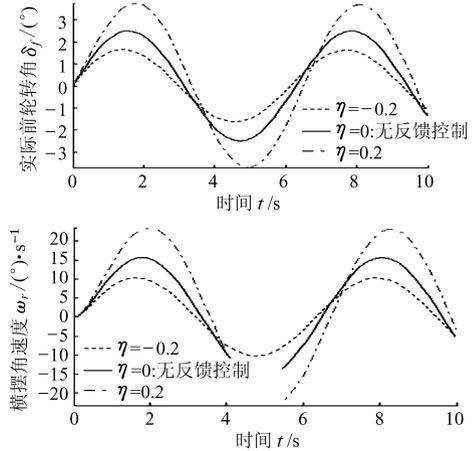


图4 η 对实际前轮转角和横摆角速度的影响
Fig.4 Effects of η on actual front wheel angles and yaw rate

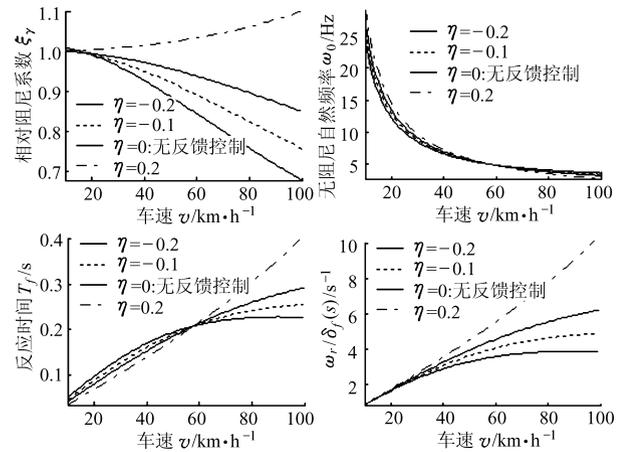


图5 η 对操纵稳定性的影响
Fig.5 Effects of η on handling and stabilities

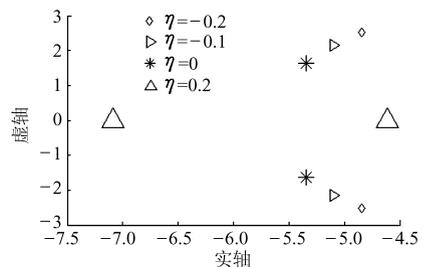


图6 η 对极点位置的影响
Fig.6 Effects of η on system poles

4 结束语

根据所建立二自由度线控转向模型,研究了线

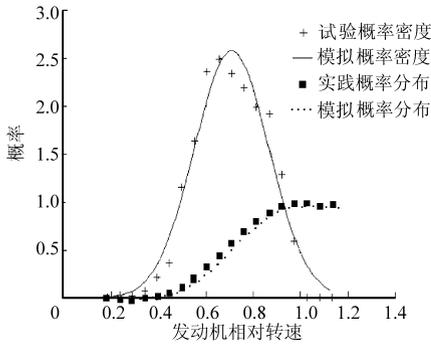


图3 汽车发动机工作转速的最大熵统计模型

Fig.3 Statistic model with max entropy of service torque of automobile engine

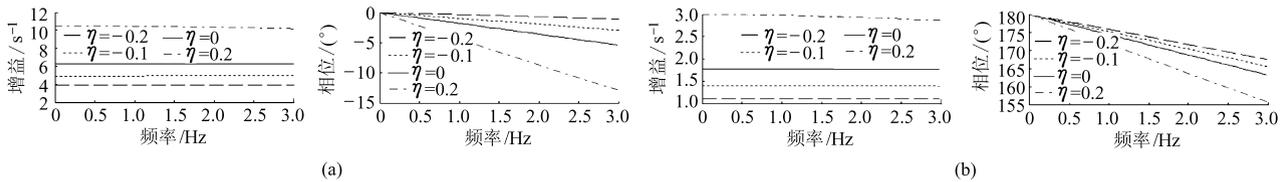
4 结束语

最大熵概率密度函数能够表达不同统计分布形式的随机变量的统计特性,具有广泛的适用性。最大熵概率密度函数具有统一的函数表达形式。用最大熵概率密度函数来描述随机变量分布不带任何人为主观偏向。随机变量统计特性不同,最大熵概率密度函数的阶数不同,可以根据经验或假设检验来确定阶数。

参 考 文 献

- 1 李光久,张金时,和爱. 应用数理统计[M]. 南京:东南大学出版社,1993.
- 2 希德尔 J N. 工程概率设计原理与应用[M]. 陈立周,译. 北京:科学出版社,1989.
- 3 Coleman T, Branch M A, Grace A. Optimization toolbox for use with Matlab, user' guide[M]. Version 2. Natick, MA: The Mathworks Inc,1999.
- 4 南京汽车公司. IVECO 49-10 试验报告[R]. 南京:南京汽车公司,1986.
- 5 高翔,王若平,夏长高,等. 随机变量多重 Weibull 统计模型及参数最优估计[J]. 农业机械学报,2006,37(11):41~44.

(上接第 32 页)

图7 η 对横摆角速度和质心侧偏角频率响应的影响Fig.7 Effects of η on frequency response of yaw rate and slip angle

(a) 横摆角速度频率响应 (b) 质心侧偏角频率响应

控转向系统的车辆全状态(质心侧偏角和横摆角速度)反馈控制策略。应用虚拟前轮侧偏刚度的概念得到横摆角速度和质心侧偏角的反馈系数,分析了

虚拟前轮侧偏刚度系数对极点、频率特性等的影响。仿真表明,根据车速选择合适的虚拟侧偏刚度系数,可改善汽车的转向特性,提高车辆的操纵稳定性。

参 考 文 献

- 1 王望予. 汽车设计[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- 2 毕大宁. 汽车转向式动力转向器的设计与应用[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
- 3 于蕾艳,林逸,施国标. 线控转向系统的角传动比研究[J]. 农业机械学报,2007,38(8):190~192.
- 4 Keiji Suzuki, Yoshiharu Inaguma, Kyosuke Haga. Integrated electro-hydraulic power steering system with low electric energy consumption[C]. SAE Paper 950580, 1995.
- 5 Yoshiharu Inaguma, Keiji Suzuki, Kyosuke Haga. An energy saving technique in an electro-hydraulic power steering (EHPS) system[C]. SAE Paper 960934, 1996.
- 6 林逸,施国标. 汽车电动助力转向技术的发展现状与趋势[J]. 公路交通科技,2001(2):79~82.
- 7 Dominke Peter, Gerhard Ruck. Electric power steering-the first step on the way to "steer by wire"[C]. SAE Paper 1999-01-0401, 1999.
- 8 Werner Harter, Wolfgang Pfeiffer, Peter Dominke, et al. Future electrical steering systems; realizations with safety requirements[C]. SAE Paper 2000-01-0822, 2000.