

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.04.016

线控转向车辆可变角传动比特性的研究^{*}

李文琪, 吴晓东^{*}

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要:针对线控车辆的操控性能改善问题,对线控转向系统可变角传动比特性的优化设计方法进行了研究。基于客观的车辆操纵稳定性指标多目标评价函数,结合“驾驶员-车-路”闭环系统双移线工况仿真实验结果分析,确定了不同车速对应的最优角传动比;在此基础上,考虑车辆非线性横摆角速度增益特性对驾驶员转向操作的不利影响,分析了角传动比随转向盘转角变化的特性;对固定角传动比系统和可变角传动比系统的线控车辆,分别进行了双纽线和双移线两种典型转向工况下的仿真对比实验。实验及研究结果表明:相比于传统固定角传动比系统,具有角传动比可变优化特性的转向系统不仅能改善车辆低速转向灵敏性和中高速路径跟随性能,还能有效减小驾驶员的转向操作负担。

关键词:线控转向;变角传动比;操纵稳定性;仿真分析

中图分类号:TP301.6;U462.1;U463.4

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)04-0422-06

Variable steering ratio characteristics for steer-by-wire vehicle

LI Wen-qi, WU Xiao-dong

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at improving handling performance of steer-by-wire vehicle, method for variable steering ratio characteristics was studied. Based on an objective vehicle handling performance index with multi-objective evaluation functions, combined with analysis on simulation results of double-lane-change tests conducted on a closed-loop “driver-vehicle-road” system, optimal steering ratio characteristics varied with vehicle speed was obtained. On this basis, the adverse effect of the nonlinear vehicle yaw rate gain properties on driver steering, was considered steering ratio characteristics varied with steering wheel angle was designed. Comparison experiments for steer-by-wire vehicles with fixed steering ratio system and variable steering ratio system were simulated. The results of lemniscate curve and double lane-change tests indicate that, compared with fixed steering ratio system, the proposed variable steering ratio system can not only improve vehicle maneuverability at low speed and path following performance at medium and high speed, but also reduce driver's steering workload in controlling the vehicle.

Key words: steer-by-wire(SBW); variable steering ratio; handling performance; simulation analysis

0 引言

线控转向(SBW)系统取消了转向盘与转向车轮之间的机械连接,改由电信号和电机驱动转向系统控制汽车的转向,这种物理解耦传动特性使其可以通过设计合理的变角传动比策略,实现更为理想的转向特

性^[1-2],即低速行驶时,转向系统具有较小的角传动比,提高车辆转向灵敏性;高速转向时,转向角传动比较大,以提高高速行驶稳定性。

目前,关于 SBW 系统变角传动比特性及控制策略的研究主要集中在以下两种方法。第一种方法从车辆横摆角速度增益不变的角度出发,设计理想的角传动

收稿日期:2018-11-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775331)

作者简介:李文琪(1992-),男,浙江温州人,硕士研究生,主要从事线控转向电控技术方面的研究。E-mail: liwenqi057@sjtu.edu.cn

通信联系人:吴晓东,男,博士,副教授。E-mail: xiaodongwu@sjtu.edu.cn

比特性,保证车辆在不同车速下的响应保持一致^[3-4],从而降低驾驶员的操作难度。商高高等人^[5]考虑轮胎的非线性特性对车辆稳定性的影响,通过建立非线性二自由度车辆模型并基于转向增益不变设计理想角传动比,提高了车辆在低附着系数路面驾驶的稳定性。另一种方法针对线控系统的复杂性和非线性特性,采用模糊控制等智能控制方法进行变传动比的设计。Azzalin 等人^[6]采用分层多级模糊控制算法设计了变传动比以提高车辆转向稳定性和驾驶舒适性;SERARSLAN^[7]提出了一种转向传动比自适应学习算法,以保证在车辆参数波动等不稳定情况下仍能提供一致的驾驶手感和保证驾驶稳定性;张庭芳等人^[8]结合模糊变传动比和 LQR 最优控制,实现了四轮转向车辆低速转向灵敏和高速转向稳定的理想转向特性。

车辆的操控性能主要为车辆转向响应特性和驾驶员的转向操纵负担两方面^[9]。针对线控转向车辆的操控性能,本文提出一种可变角传动比特性的优化设计方法,基于客观的车辆操纵稳定性指标多目标评价函数,结合“驾驶员-车-路”闭环系统仿真实验结果,分析线控转向车辆角传动比随车速和转向盘转角变化的特性。

1 “驾驶员-车-路”仿真系统

建立“驾驶员-车-路”闭环仿真系统如图1所示。

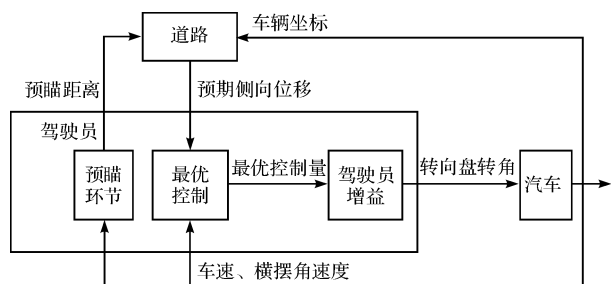


图1 “驾驶员-车-路”闭环仿真系统

该闭环系统中,驾驶员模型采用 MacAdam^[10]提出的预瞄最优控制(optimal preview control, OPC)模型。最优控制算法以侧向位移跟随误差最小作为目标计算出转向角最优控制量,通过驾驶员自身增益输出转向盘转角到车辆动力学模型。本文假设驾驶员自身增益不变。

车辆动力学模型可用状态空间方程来表示:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $\mathbf{y}$ —输出变量; u —输入控制变量,即转向角; $\mathbf{x}$ —状态向量。

$\mathbf{x}$ 由4个状态变量组成:

$$\mathbf{x} = [Y \ \psi \ v_y \ \gamma]^T \quad (2)$$

式中: Y —车辆侧向位移; ψ —车辆横摆角; v_y —车辆侧向速度; γ —横摆角速度。

$\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 是由车辆动力学参数和车辆纵向速度 v_x 组成的常系数矩阵,分别是:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & v_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{-C_f - C_r}{mv_x} & \frac{bC_r - aC_f}{mv_x} - v_x \\ 0 & 0 & \frac{bC_r - aC_f}{Iv_x} & \frac{-b^2C_r - a^2C_f}{Iv_x} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{C_f}{m} \\ \frac{aC_f}{I} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = (1 \ 0 \ 0 \ 0) \quad (5)$$

上式中的车辆动力学参数与取值如表1所示。

表1 车辆动力学参数与取值

参数符号	定义	值	单位
m	整车质量	1 880	kg
a	前轴到汽车质心距离	1.185	m
b	后轴到汽车质心距离	1.757	m
C_f	前轮侧偏刚度	109 036	N/rad
C_r	后轮侧偏刚度	87 650	N/rad
I	整车绕 z 轴转动惯量	2 400	kg · m ²

2 可变角传动比特性设计

在 SBW 系统中,驾驶员操作转向盘的转角将以电信号形式发送给控制器,控制器通过变角传动比策略计算目标小齿轮转角,并发送给转向执行电机以驱动齿轮齿条转向器工作,从而达到转向的目的。因此,本文定义 SBW 系统角传动比为转向盘转角与小齿轮转角之间的比值:

$$\beta = \frac{\delta_s}{\delta_p} \quad (6)$$

式中: β —SBW 角传动比; δ_s —转向盘转角; δ_p —转向小齿轮转角。

2.1 角传动比随速变化特性

一般地,当车辆低速转向时,要求系统有较小的角传动比,满足转向轻便性的要求,但如果角传动设

置过小,容易出现小转角便使车轮转至极限位置打死的情况,对转向执行电机产生额外的负载,影响电机性能和寿命;当车辆处于高速行驶状态时,要求系统有较大的角传动比,提高车辆高速转向稳定性,同样地,过大的角传动比会使得系统响应过于迟钝,降低转向安全性。

基于上述原因,要求所设计的角传动比随速变化特性应满足以下关系:

$$\beta = \begin{cases} \beta_{\min}, v_x < v_0 \\ f(v_x), v_0 \leq v_x \leq v_1 \\ \beta_{\max}, v_x > v_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\beta_{\max}$ —角传动比上限值; $\beta_{\min}$ —角传动比下限值; v_1 —角传动比上限对应的车速; v_0 —角传动比下限对应的车速; $f(v_x)$ —角传动比随车速增大而增大的非线性特性。

为了得到理想的 $f(v_x)$ 特性,本文结合“驾驶员-车-路”闭环系统,参照标准 ISO3888-1:1999^[11],采用可以描述汽车综合性能的双移线工况进行仿真实验。实验时,具有不同角传动比 β 的 SBW 车辆模型分别以 6 种指定的实验车速通过双移线实验路段,根据实验要求记录数据。6 种实验车速分别为:20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h 和 120 km/h。

为了评价 β 对车辆操纵性能的影响,本研究采用了一种客观的车辆操纵稳定性多目标评价指标函数,具体如下^[12]:

$$J_e = \int_0^t \left(\frac{e}{e_t} \right)^2 dt \quad (8)$$

$$J_b = \int_0^t \left(\frac{\omega}{\omega_t} \right)^2 dt \quad (9)$$

$$J_c = \int_0^t \left(\frac{a_y}{(a_y)_t} \right)^2 dt \quad (10)$$

$$J_r = \int_0^t \left(\frac{\varphi}{\varphi_t} \right)^2 dt \quad (11)$$

式中: J_e —考虑车辆路径跟踪侧向误差的指标; J_b —考虑驾驶员操纵负担的指标; J_c —考虑车辆侧向加速度的指标; J_r —侧翻危险性的指标; t —实验时间; e —车辆实际行驶路径和期望路径之间的侧向位移偏差; ω —转向盘角速度; a_y —车辆侧向加速度; φ —车辆侧倾角; $e_t, \omega_t, (a_y)_t, \varphi_t$ —各指标变量对应的标准阈值。

将以上 4 个指标通过加权组合成综合评价指标:

$$J = \sqrt{\frac{J_e^2 + J_b^2 + J_c^2 + J_r^2}{4}} \quad (12)$$

式中: J —车辆操纵稳定性客观评价综合指标。

该指标越小,汽车的操纵稳定性越好。上式中各指标加权系数值可通过调整标准阈值来选择^[12]。针对双移线工况,本文所有权系数均取 1,其对应的客观评价指标各变量标准阈值如表 2 所示。

表 2 客观评价指标各变量标准阈值

变量	符号	标准阈值	单位
侧向位移偏差	e_t	0.4	m
转向盘转动角速度	ω_t	1.0	rad/s
侧向加速度	$(a_y)_t$	3.0	m/s ²
侧倾角	φ_t	3.0	°

不同车速下,双移线实验客观评价指标 J 的实验结果如图 2 所示。

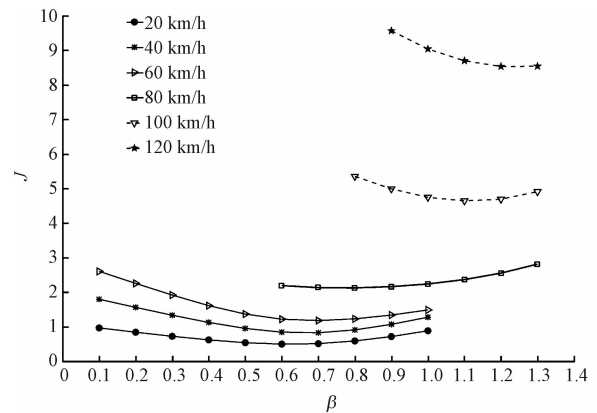


图 2 不同车速下双移线实验评价指标实验结果

由图 2 可知,车速一定时,指标 J 随传动比 β 的增加呈现先减小后增大的趋势,即各车速下均存在一个使 J 最小的 β 值。以 100 km/h 车速实验结果为例, $\beta = 1.1$ 即是该车速对应的最优角传动比。根据上述实验结果分析,确定了 SBW 车辆在 6 个给定车速下的角传动比特性,拟合得到 SBW 角传动比随车速变化特性如图 3 所示。

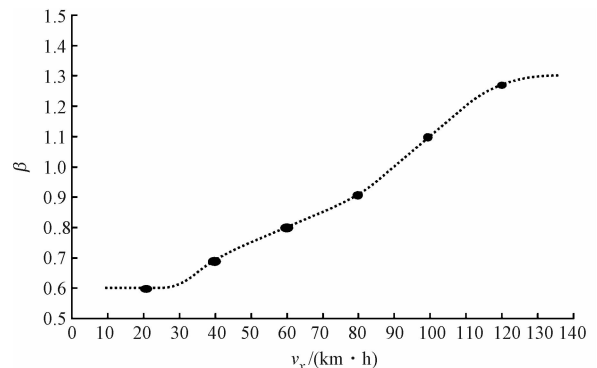


图 3 SBW 角传动比随车速变化特性

分析图 3 可见,角传动比 β 随车速增大而增大。另外,还满足公式(7)所提出的上、下限值的要求,即 $\beta_{\max}$

和 $\beta_{\min}$ 分别是 1.3 和 0.6。

2.2 角传动比随转向盘转角变化特性

转向盘转角到车辆横摆角速度的稳态增益,是车辆转向响应特性的重要指标^[13],即:

$$G_s^y = \frac{\gamma}{\delta_s} \quad (13)$$

式中: G_s^y —车辆横摆角速度对转向盘转角的增益。

将角传动比随车速变化特性嵌入到 SBW 车辆中,通过考查汽车瞬态转向特性的角阶跃输入实验,得到了不同车速下车辆角传动比随速变化 SBW 车辆稳态横摆角速度增益随转向盘转角 δ_s 变化的曲线图,如图 4 所示。

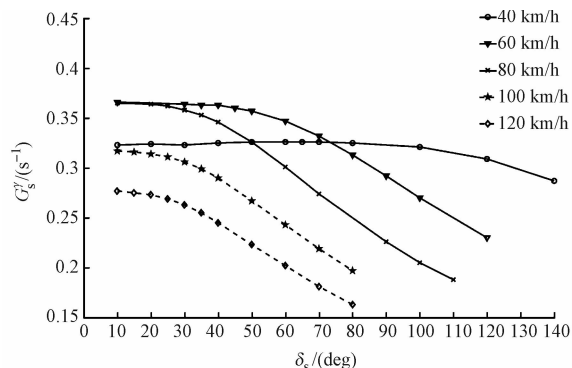


图4 角传动比随速变化 SBW 车辆稳态横摆角速度增益随转向盘转角变化曲线

不同车速下横摆角速度对小齿轮转角 δ_p 响应曲线如图 5 所示。

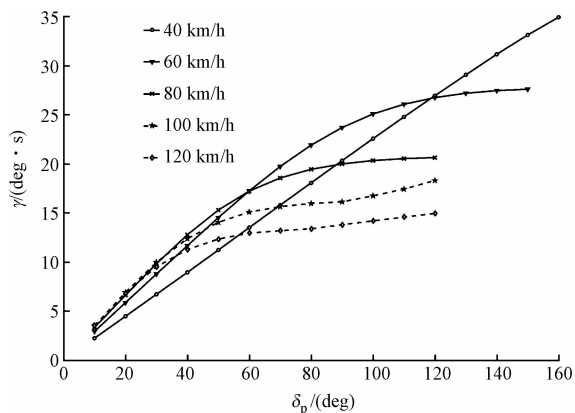


图5 不同车速下横摆角速度对小齿轮转角响应

由图(4,5)可知,汽车在恒定车速下进行转向,当转向角度(转向盘转角及小齿轮转角)较小,轮胎处于线性区时,车辆横摆角速度相对于小齿轮角度的响应基本为线性,横摆角速度增益也基本为定值;随着转角的增大,轮胎开始进入非线性区域,横摆角速度增益则出现逐渐减小的趋势。

这种非线性响应特性将迫使驾驶员在进行大转角

转向时需要不断调整自身的转向增益^[14]。因此,本文提出角传动比随转角变化的特性,以此来补偿车辆响应特性的改变,降低驾驶员操作难度。

由图 4 可知,在小转角区域,每个车速都存在一个保持不变的横摆角速度增益,即为该车速下理想的转向增益。将转向盘转角离散化,每隔 10° 取一个角度,则各角度值所对应的理想横摆角速度为:

$$\gamma_{\text{des}} = [G_s^y]_{\text{des}} \cdot \delta_s \quad (14)$$

式中: $[G_s^y]_{\text{des}}$ —各车速对应的理想横摆角速度增益; γ_{des} —各转向盘转角对应的理想横摆角速度。

图 5 所示的关系曲线为转向小齿轮转角输入到车辆横摆角速度的响应特性,其与车轮、轮胎和悬架特性等有关,而不受角传动比 β 影响,因此在车速恒定时,上式中的转向盘转角和理想横摆角速度,存在一个与之对应的理想小齿轮转角,即可得各转向盘转角所对应的理想角传动比,即:

$$\beta_{\text{des}} = \frac{\delta_s}{[\delta_p]_{\text{des}}} \quad (15)$$

式中: $[\delta_p]_{\text{des}}$ —理想小齿轮转角; β_{des} —各转向盘转角对应的理想角传动比。

此时,虽然车速保持不变,角传动比 β 将具有随转向盘转角变化的特性。但是,随着转角的继续增大,轮胎将渐渐从线性特性区向非线性特性区过渡,此时为了保证车辆响应的稳定性,角传动比应尽量保持不变。

最终,可得到不同车速下 SBW 车辆角传动比随转向盘转角变化特性,如图 6 所示。

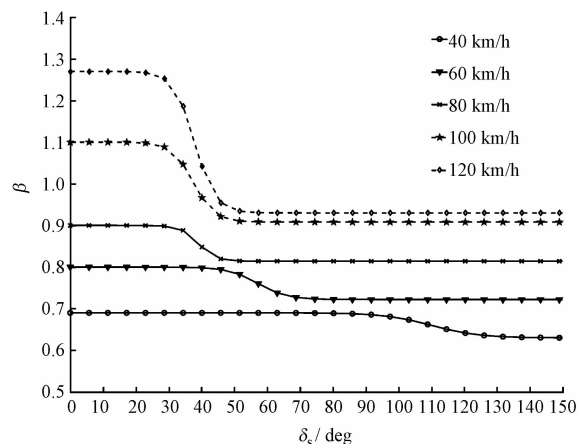


图6 SBW 车辆角传动比随转向盘转角变化特性

本研究根据上述仿真实验和计算,得到了车速 v_x 和转向盘转角 δ_s 与角传动比 β 之间离散的映射关系。

采用对不同车速和转向盘转角进行线性插值的方法,最终得到完整的 SBW 可变角传动比特性,如图 7 所示。

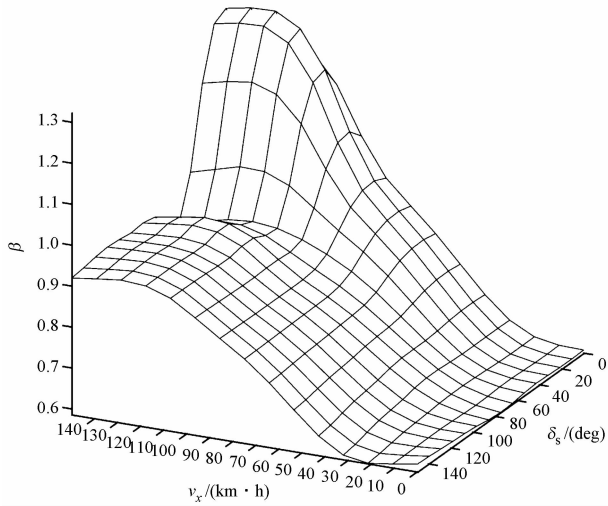


图 7 SBW 可变角传动比特性

3 仿真实验与分析

为了验证所设计的 SBW 变角传动比特性对车辆转向性能以及驾驶员操纵负担的改善效果,本研究将其嵌入到车辆动力学模型中,选取固定角传动比($\beta = 1$)SBW 车辆作为参照,在闭环“驾驶员-车-路”仿真系统中进行典型工况的仿真对比实验。

3.1 双纽线实验

双纽线实验主要考查车辆低速行驶的转向轻便性,如图 8 所示。

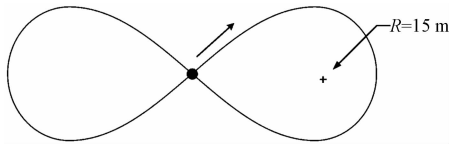


图 8 双纽线实验参考路线设置

实验车速为 20 km/h,变角传动比和固定角传动比 SBW 车辆模型分别匀速通过实验路线。SHIMIZU 等人^[14]指出,频繁的大转角操作会增加驾驶员的体力和精神负担。因此,本研究将针对实验过程中的驾驶员转角数据进行分析。

两种转向系统在 20 km/h 双纽线实验中的转角数据分布结果如图 9 所示。

可见,完成同样的路线行驶,变角传动比车辆所需的最大转角值(107.61°)更小,约为固定角传动比车辆(174.03°)的 60%;从整个过程转角角度值分布分析,驾驶变角传动比车辆时转向盘转角更集中于中、小角度值范围,频繁大转角转向的情况更少,说明变角传动比特性可减小驾驶员的操作负担。

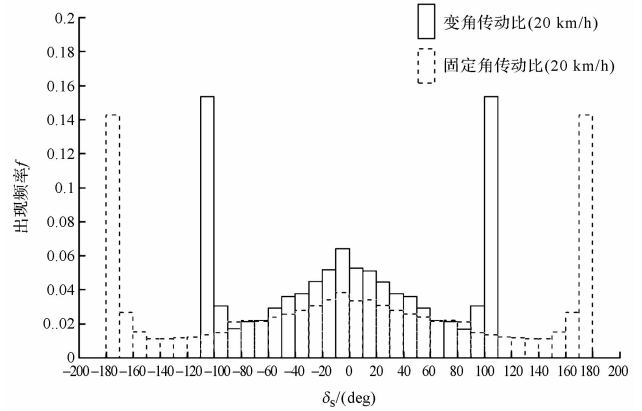


图 9 20 km/h 双纽线实验转向盘转角分布结果

3.2 双移线实验

双移线实验考查车辆中高速行驶时的路径跟踪性能和紧急避障时的操纵性能。

车速为 70 km/h 时,车辆行驶轨迹的对比如图 10 所示。

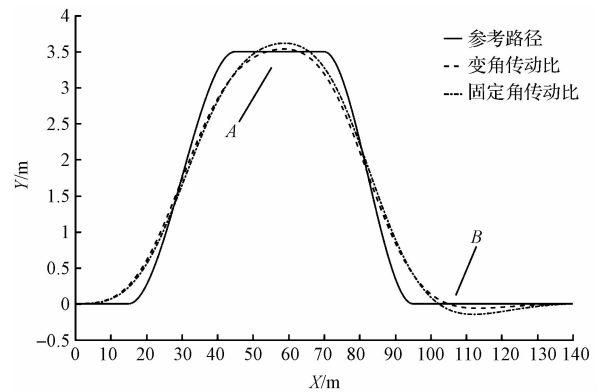


图 10 70 km/h 双移线实验车辆行驶轨迹对比

转向盘转角的对比如图 11 所示。

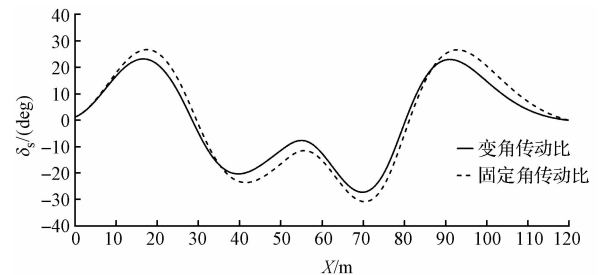


图 11 70 km/h 双移线实验转向盘转角对比

此外,提取相应的 70 km/h 双移线实验指标值,如表 3 所示。

表 3 70 km/h 双移线实验指标值

项目	变角传动比	固定角传动比
最大转角(左/右)/(°)	23.01/-27.39	26.53/-30.94
A 处侧向位移超调量/m	0.038	0.118
B 处侧向位移超调量/m	0.062	0.147
指标 J	1.59	2.06

由图 10、图 11 以及表 3 可知:在路径跟踪方面,变角传动比车辆在 A、B 两个变道处的侧向超调量都比较小,更接近参考路径,即具有较好的路径跟踪性能;从驾驶员操纵的角度分析,与固定角传动比车辆相比,变角传动比车辆在完成实验过程中所需要的转角更小,驾驶员转向操作幅度更小;整体的操纵稳定性表现可从两者的客观指标 J 值的对比看出,变角传动比车辆的 J 值明显小于固定角传动比车辆,即具有较好的操纵稳定性。

4 结束语

本文从改善线控转向车辆的操纵性能角度出发,提出了一种角传动比可变优化特性的设计方法,具体包括:(1)建立了“驾驶员-车-路”闭环仿真系统用于仿真和对比实验;(2)采用了一种客观的车辆操纵稳定性评价指标,结合仿真实验和计算设计了随车速和转向盘转角变化的 SBW 系统变角传动比特性。低速双纽线和 70 km/h 双移线对比实验结果表明,角传动比的可变优化特性不仅可以改善车辆转向响应性能,还可以有效减小驾驶员转向操作负担。

除了角传动特性的优化控制,线控系统的手感力反馈设计对车辆转向性能和驾驶员负担也具有一定的影响。本文所设计的变角传动比策略以及验证实验均未考虑转向力矩反馈特性对驾驶动力学的影响。因此,后续研究将关注 SBW 系统中力矩反馈对转向传动特性和驾驶员转向负担的影响。

参考文献(References):

- [1] 杨莉,吴晓东,许敏,等. 基于位置-力矩混合方法的线控转向系统双向控制[J]. 汽车技术,2016(2):23-28.
- [2] 姚江云,孔峰,吴方圆. 线控转向汽车传动比智能控制策略的研究[J]. 计算机测量与控制,2012,20(3):678-680,686.
- [3] LI G, LI N, WANG G, et al. Study on design method of ideal steering ratios of vehicle steer-by-wire system[C]. International Conference on Mechatronics and Control, Jinzhou: IEEE, 2014.
- [4] 范广栋. 线控转向系统变传动比特性及稳定性控制研究[D]. 长春:吉林大学通信工程学院,2017.
- [5] 商高高,张杰. 基于非线性二自由度模型的线控转向系统变角传动比设计[J]. 重庆理工大学学报:自然科学,2018,32(9):6-13.
- [6] AZZALINI M, GISSINGER G L, BOUSSOUAR V, et al. Computation of a variable steering ratio with a fuzzy logic method[C]. Intelligent Vehicle Symposium, Versailles: IEEE, 2002.
- [7] SERARSLAN B. New approaches to enhance active steering system functionalities: preliminary results[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(9):1153-1170.
- [8] 张庭芳,张超敏,何新毅,等. 基于线控变传动比的四轮转向汽车最优控制[J]. 机械设计与制造,2018(1):133-136.
- [9] BERGMAN W. Measurement and Subjective Evaluation of Vehicle Handling[R]. SAE Technical Papers, 1973.
- [10] MACADAM C C. Application of an Optimal Preview Control for Simulation of Closed-Loop Automobile Driving[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 2007, 11(6):393-399.
- [11] ISO 3888-1:1999 Passenger cars-test track for a severe lane change manoeuvre- Part 1: double lane-change[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1999.
- [12] 宗长富,郭孔辉. 汽车操纵稳定性的客观定量评价指标[J]. 吉林大学学报:工学版,2000,30(1):1-6.
- [13] 郑宏宇. 汽车线控转向路感模拟与主动转向控制策略研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2009.
- [14] SHIMIZU Y, KAWAI T, YUZURIHA J. Improvement in Driver-Vehicle System Performance by Varying Steering Gain with Vehicle Speed and Steering Angle: VGS (Variable Gear-Ratio Steering System) [C]. International Congress & Exposition, Michigan: SAE, 1999.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

李文琪,吴晓东. 线控转向车辆可变角传动比特性的研究[J]. 机电工程,2019,36(4):422-427.

LI Wen-qi, WU Xiao-dong. Variable steering ratio characteristics for steer-by-wire vehicle[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(4): 422-427.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>