

文章编号: 1002-0268 (2007) 02-0130-05

汽车转向感觉主观评价试验方法综述

林逸, 张昕, 施国标, 邢洪滨
(北京理工大学 电动车辆工程技术中心, 北京 100081)

摘要: 传统的转向评价标准已经不能完全适应新兴的动力转向, 如何系统的评价转向感觉, 如何获得理想的转向感觉, 已经成为国内外迫切需要解决的问题。分别对转向的移线性能、中间位置转向性能和转向的舒适性等主观感觉评价进行介绍, 分析转向感觉主观评价中的几个基本问题, 并探讨应用实车试验、驾驶员模型和驾驶模拟器进行转向感觉试验的主要方法, 对今后转向感觉主观评价的发展具有一定指导性和借鉴意义。

关键词: 转向感觉; 主观评价; 电动助力转向系统; 试验方法

中图分类号: U463.4

文献标识码: A

Subjective Evaluation Method Study on Vehicle Steering Feeling

LIN Yi, ZHANG Xin, SHI Guo-biao, XING Hong-bin

(Electric Vehicle Center of Analysis and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Steering feeling is a major safety and refinement issue. The traditional steering evaluation criteria fail to satisfy the advanced steering system. It is essential to systemically evaluate steering feeling and obtain the ideal feeling. This paper introduces the main contents of steering subjective evaluation, including the ISO lane change capability, workload measures and the on-center steering feeling. And focuses on the main test methods by means of real vehicle test, driver model and driving simulator, analyzes the basic issues in the evaluation. The study on the evaluation method will be fundamental and helpful for the improvements of steering feeling. It makes it possible to evaluate the steering feel, set targets, and guide vehicle development to achieve good steering feel.

Key words: steering feel; subjective evaluation; electric power steering system; test method

0 引言

随着电子技术的迅速发展, 转向系统发生了革命性的变化, 电动助力转向系统 (EPS) 和线控转向系统 (SBW) 的出现, 除了节能与环保等优点, 更为改善转向性能, 获得适宜的转向感觉带来了新的发展空间。

在液压动力转向系统中, 选定参数完成设计之后, 转向系统的性能就确定了, 不能再进行调节与控制。而 EPS 输出力的大小由电控单元 (ECU) 进行实时调节与控制, 可以在各种行驶工况下提供最佳助力, 改善汽车的转向性能, 提高了汽车驾驶舒适性。

传统的转向评价指标主要集中于转向轻便性和转向回正特性, 对于转向的灵活性、转向响应的灵敏程

度、转向盘的振动、中间位置的转向性能和转向疲劳程度等转向感觉的评价, 还要依靠大量主观试验, 传统转向评价已经不能完全适应于新兴的动力转向, 如何完整、系统的评价转向感觉, 如何调整参数达到理想的转向感觉已经成为国内外汽车行业迫切需要解决的问题。

1 转向感觉主观评价的内容

转向盘是个重要的感观部件, 在汽车-驾驶员-路面之间传递信息。转向感觉是人和转向操纵之间的感觉。一方面驾驶者通过转向盘对汽车进行转向操纵, 另一方面通过转向盘反馈给手的力及身体各部分的感觉来感受检测汽车的运动状态。

早在 20 世纪 80 年代, 日本开始对电动助力转向

收稿日期: 2005-09-14

基金项目: 奥运纯电动客车整车开发资助项目 (D0305002040111)

作者简介: 林逸 (1953 -), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为汽车系统动力学. (liny@bit.edu.cn)

系统进行研究的同时,就开始研究转向感觉主观评价方法。随着近几年EPS应用市场的不断扩大,转向感觉的评价也逐步成为转向系统设计的研究热点。日本丰田、本田、三菱电机及美国德尔福和菲亚特等公司都进行了大量的研究,经过20几年的发展,转向感觉的主观评价方法也日趋完善。

传统的转向主观评价试验主要着眼于转向的轻便性和稳定性,并已经形成了统一的标准,如GB/T6323.4-1994和GB/T6232.5-1994对转向的回正性能和轻便性能都进行了规范^[1]。随着转向性能的大幅提高和拓展,转向的轻便性、回正特性和稳定性都可以较好地实现,现在的主观评价试验更强调汽车的移线性能、中间位置转向性能、转向的舒适性等。

1.1 移线性能的主观评价

在转向移线过程中,主要考虑转向系统对整车侧向动力学的影响,是对转向盘手力特性及转向所引起的整车动态特性进行综合评价,可包括以下几个方面^[2]:

(1) 转向操作量;

(2) 转向时汽车的响应速度:指令输入和汽车响应之间的延迟程度;

(3) 转向时汽车的反馈速度:是汽车对转向响应后,反馈给驾驶员的感觉,如果反馈速度较慢,滞后过多,驾驶者尚未感觉到汽车已经转向到位,可能会继续转动转向盘。该项评价通常只有专业驾驶者才能感觉出来,称之为二次响应。

(4) 侧倾:在正常驾驶中驾驶者感觉到的汽车的侧倾程度。

(5) 侧倾滞后:侧向动力学性能和侧倾运动之间的滞后程度。

1.2 中间位置转向性能的主观评价

中间位置转向性能是转向感觉研究的主要内容之一。中间位置指的是转向输入操作较小,汽车侧向加速度小于 $0.1 \sim 0.3 g$,主要是直线行驶,只作转向的轻微调整和侧向加速度较低时的转向操纵。

在高速公路上驾驶时,中间位置的转向感觉将直接影响驾驶员对稳定性、安全性和驾驶的判断。汽车高速直线行驶时,如果对转向响应过于灵敏会使驾驶者精神紧张,降低驾驶的舒适性,而灵敏度不够就会降低汽车的安全性。

美国德尔福和日本曾提出过相关的评价标准,采用固定频率的转向输入,根据试验曲线的梯度和宽度进行对比研究^[3]。但该方法转角输入频率是固定的,试验证明,输入转角幅值和频率不同时转向感觉是不

同的。图1为输入转角不变,改变输入频率情况下的分析曲线,转向力矩梯度和阻尼感觉随频率而变化。等价刚度 K 和等价阻尼 C 分别为评价转向力矩变化和阻尼滞后程度的参数。转向盘转角输入均为 25° ,频率从 0.25 Hz 变化到 2 Hz ,曲线变化中存在一转折点,大致在 1 Hz 左右。

中间位置转向的主观感觉主要从轨迹追随性的感觉,抗干扰的能力和转向修正的难易程度等几个方面来评价^[4,5]。

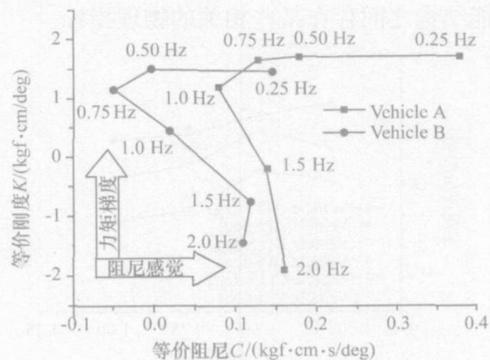


图1 力矩梯度和阻尼感觉随输入频率变化曲线图

Fig. 1 Moment gradient and damping feeling results at frequencies from 0.25 Hz to 2 Hz

1.3 转向舒适性的主观评价

转向的舒适性是更加主观更加综合的评价,受很多方面影响,包括转向的轻便性、路感、转向盘的振动、转向时的易疲劳程度等。

2 转向感觉评价的基本问题

作为转向感觉评价最直接最可靠的主观评价也有两个主要的缺点,其一,它受评价者个人主观因素的影响,不同评价者可能给出差别较大的评价结果;另外,一般情况下,它不能给出汽车性能与汽车结构两者之间有何种联系的信息。这就需要对主、客观评价的相关性进行研究,将主观评价进行量化,通过主观评价来指导系统的设计。通常,在主观评价中需要考虑主观评价的差异性、试验项目和评价指标的有效确定等几方面问题。

2.1 转向感觉评价试验的评价尺度

主观评价中个人的主观因素为研究带来了一定的难度,应通过适当的评价尺度,最大限度的降低驾驶者判断的差异性。参加试验的驾驶员可分为两部分,普通驾驶员和专业驾驶员。因为驾驶者的驾驶经验和对汽车性能的期望程度对评价结果有很大影响。专业驾驶员的感觉更加敏锐一些,可以感觉到普通人不易

察觉出的一些问题,如汽车转向时对人的反馈过程。大量试验结果表明,对于不同试验方案,同一驾驶者的类型可以认为是不变的,并具有可重复性;通过不同车型的对比,可以看到驾驶者的类型与所驾驶的车型无关^[6]。而且,不同类型的驾驶者对某一类型汽车的主观评价的趋势是大体相同的^[7]。图 2 为不同转角不同频率的蛇行试验曲线,3 种车型为 A、B、C,驾驶员对转向力矩的感觉(包括力的大小和增减变化快慢)的评价等级趋势是一致的,这说明主观感觉和汽车性能结构之间存在某些相关的物理指标。

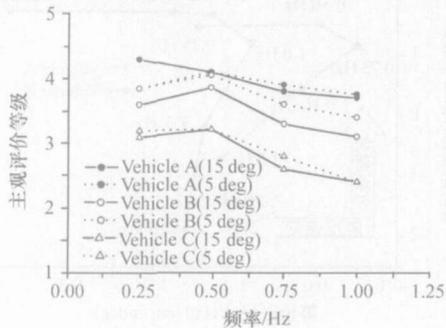


图 2 不同车型的转向力矩主观评价曲线

Fig. 2 Subjective rating result steering angle-steering torque

所以,主观评价存在一定的个人因素,但并不是不确定、不可测的,这些都构成了可以对转向感觉主观评价进行客观量化的基础。因为评价具有一定的主观性,结果可能比较分散,可通过对评述值进行标准化或引入自适应模糊推理模型加以改善。

2.2 转向感觉评价试验项目的选择

可用于转向性能评价的试验很多,包括定圆转向、阶跃输入转向、双扭线转向、蛇行、单移线、双移线、U 字型调头等等。不同的操作和车速考察的侧重点不同,反应的转向感觉也不同,应选择具有代表性的试验项目,尽可能以较少的试验工况全面反映转向感觉的各个方面。

原地转向和双扭线试验用来检验转向的轻便性,属于转向的客观性评价。双移线试验中驾驶员对试验结果影响较大,同时也说明驾驶员对转向感觉感受的较为充分,所以双移线试验在转向主观评价中采用的最多。如果考察汽车转向的极限情况,如转向引起的侧滑或甩尾,可以采用小半径 U 字型调头试验。对中间位置的转向性能评价一般都采用蛇行试验或正弦输入试验。试验中所应采用的车速,输入角度和输入频率等国际上没有明确的规定,正在研究探讨当中,例如日本本田技术中心针对北美市场,进行了大量车型的试验和相关性分析,得到了 3 种试验工况,可有

效的涵盖北美高速驾驶转向感觉的各种情况^[5],3 种工况车速都为 140 km/h,输入角及频率分别为:(1) 5°,0.25 Hz;(2) 25°,0.25 Hz;(3) 25°,1.0 Hz。但各地的行驶路况和驾驶习惯各有不同,在中国市场,该试验还需进行一定的调整。

2.3 转向感觉评价试验数据统计分析及评价指标的确定

转向感觉评价试验涉及了大量的客观参数,如何确定有效可靠的评价指标是转向感觉主观评价的一个难点。指标应构成一个完整的体系,指标总数也应尽可能的少,以降低评价负担。

其一,可以根据一些参数,有针对性的制定试验方案,方案中客观参数呈一定规律变化,统计在“极好、好、一般、差、很差”等各评价等级内,各试验方案所占的比例,然后定性的分析参数对转向感觉的影响趋势和影响大小。其二,可以确定一些潜在参数,然后根据统计检验进行筛选。常用的是方差分析方法,通过比较样本变量的平均值,判断它们之间是否有显著性的差异。检验是在组间变异与组内变异的方差比较基础上进行的。组间平方和与组内平方和的比值可以度量出因素对结果影响的大小,比值越大,影响越显著。客观评价中所采用的物理量是否合理,要取决于其评价性能的结果与主观评价是否一致。确定出客观评价参数后,应对主客观评价进行相关性分析,以保证客观评价参数的有效性和可靠性。

3 转向感觉评价试验的主要方法

转向感觉主观评价试验的实现方法大致有 3 类:

第 1 类,主要依靠试验,对驾驶者评述和客观参数进行相关性分析,将主观评价量化,用于指导转向系统的设计。但必须要进行大量的试验,才能找到转向感觉主、客观之间的变化规律,得到有效的客观评价参数。

主要依靠试验进行转向感觉研究虽然比较费时费力,但方法直接、最为可靠。菲亚特研究中心就是应用该方法对汽车移线中的侧向动力学综合评价进行了研究。其根据 ISO4138、ISO7401、ISO/DIS3888-1 标准进行稳态回转、阶跃输入和双移线试验,试验中对转向盘转角、侧向加速度、横摆角速度、滑移角、转向盘转矩、侧倾加速度和车速等参数进行测量记录。并对主观评价结果进行标准化,降低由于个人差异引起的数据离散程度,以利于获得有效的客观参数。

对所测数据进行方差统计,数据表明单项评价和单个的客观参数没有直接的联系,可通过非线性方法

选取主观评价指数。得到 5 个方面的局部指数^[2] (IVA、IRV、IPI、ICO、IVC), 这是一组以客观参数表示的方程。每个局部指数所包含的客观参数见表 1。这些指数与主观评价的相关系数最低的也可达到 0.85。而后对局部指数进行加权合成, 综合为总的主观评价指数。

表 1 各局部指数所包含的客观参数

Tab. 1 Parameters contained in partial indices

稳态转向试验	转角阶跃输入试验	双移线试验
转向盘的转向灵活程度 (IAV) 动比	横摆角速度相对于转向盘转角的滞后时间	横摆角速度和转向盘转角的曲线增益
汽车响应的灵敏程度 (IRV)	横摆角速度相对于转向盘转角的滞后时间	横摆角速度和转向盘转角的曲线增益
汽车反馈 (IPI)	转向盘转角和横摆角速度之间的滞后时间	侧向加速度和横摆角速度之间的滞后时间
侧倾程度 (ICO)	侧倾角和侧向加速度之间的稳态增益	侧倾角速度和侧向加速度的曲线增益
侧倾速度 (IVC)	转向盘转角和侧倾角之间的滞后时间	侧倾角速度和侧向加速度的曲线增益

第 2 类, 通过建立整车模型和驾驶员模型对主观试验进行仿真分析, 便于改变模型参数, 找到主观感觉和客观参数之间的相关规律。但该方法对模型的准确性要求较高, 模型的精确是得到可靠有效的客观评价的基础。

随着近几年 CAE 技术和驾驶员模型理论的快速发展, 驾驶员-汽车-路面闭环系统动力学仿真取得了突破性的进展, 可以充分考虑驾驶员及路面的因素, 用于转向感觉仿真分析。目前可进行转向感觉评价仿真的建模工具有很多, 比较常用的有 ADAMS、DYNAWARE 动力学仿真软件, 以机电一体化耦合仿真见长的 AME Sim 软件, 菲亚特研究中心为研究转向性能专门开发的 MB-SHARC 软件, 其转向控制及电机模型在 Matlab-simulink 中完成。

转向感觉仿真分析中关键的一环是建立适当的驾驶员模型。闭环仿真分析中的驾驶员模型可以反映实际驾驶员操纵的一些主要特征, 除了可按预定路线驾驶之外, 还包括反应延迟时间和实际行驶误差。图 3 是日本本田所建的驾驶员模型示意图^[8]。

模型采用 2 阶预瞄轨迹控制, 驾驶员可以根据预定轨道控制汽车进行跟踪。预瞄的侧向误差 e_p 是预定轨迹上的预瞄点 y_{pP} 和 2 阶预瞄侧向位置 y_p 之间的

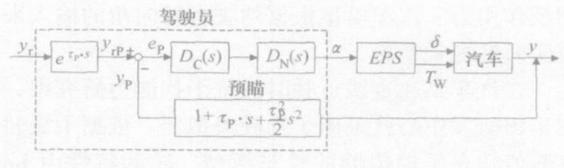


图 3 人-车系统中的驾驶员模型

Fig. 3 Model of driver-vehicle system

差。

驾驶员的控制操作:

$$D_C(s) = K_P (T_L s + 1), \quad (1)$$

其中, K_P 为驾驶员 PID 控制的比例系数, T_L 为驾驶员的时间常数, 这两个系数可以根据汽车的动态变化进行自适应调整。

因为人生理学的影响, 比如神经肌肉系统有一定的延迟特性, 模型加入了延迟项 $D_N(s)$,

$$D_N(s) = \frac{e^{-0.2s}}{(0.1s + 1)}, \quad (2)$$

进而得到转向盘转角:

$$\alpha = K_P \frac{(T_L s + 1)e^{-0.2s}}{0.1s + 1} e_p, \quad (3)$$

式中, 系数 0.1 表示驾驶员会对 1 Hz 以上的频率作出反应, 1 Hz 以下时, 仍会保持原来的反应, 只有当工作负荷增加时, 反应频率才会增加。

可以根据驾驶员输入转角的均方根值、转向盘转角变化的功率谱密度、变道时的移线时间来表示驾驶操作量和疲劳程度。

此外, 可以通过人-车系统模型, 改变转向柱刚度、助力特性、阻尼、不足转向梯度等参数观察对转向感觉的影响。也可以根据参考车型的评价指标, 调整助力转向的助力变化、横摆阻尼控制参数、传感器相位补偿、电机惯量补偿等, 使仿真模型获得最优的转向性能。

第 3 类, 应用驾驶模拟器, 将实车试验与汽车动力学模型相结合, 驾驶者可驾驶虚拟汽车进行各种工况试验, 真实感受转向盘的手力特性, 可以方便的进行不同车型的研究, 减少了大量的试验, 但与第 2 种方法相同的是, 客观评价的有效性取决于模型的精确程度。另外建立驾驶模拟器试验台的费用也较高。

驾驶模拟器非常适合人-车系统的研究, 它的出现, 为转向感觉的分析和助力转向系统的设计提供了极大的方便。驾驶者通过前面屏幕的虚拟景象和转向盘的反作用力来判定汽车行驶状态。汽车的运动都是由汽车模型计算得出, 控制器通过转向盘转角输入和汽车状态来计算出确切的前轮转角和作用到转向盘上

的反作用力。汽车模型根据驾驶者转向角的输入来生成实时的视觉景象。

在汽车高速直线行驶时的抗干扰能力研究中,日本丰田研发中心就采用了驾驶模拟器。依据中级轿车参数值建立了模拟器的整车模型,轮胎特性由 brush 轮胎模型描述。在外界干扰下,分析改变转向盘转速系数和转向系传动比对汽车性能的影响^[9]。

不同车速下,在汽车质心处加入侧向力脉冲,驾驶员在汽车受到干扰时对汽车进行操纵,保持汽车的稳定状态,横摆角速度均方根值和转向盘转速系数的变化曲线见图 4,横摆角速度随着转速系数的增加而单调下降。图 5 是在质心处加入不同的横摆力矩干扰,改变传动比,对比汽车的抗摆动能力。可以看到随着转向系传动比变得越来越大,汽车的抗摆动能力变得越来越强,达到某一值时,抗干扰能力可达到最大或饱和。

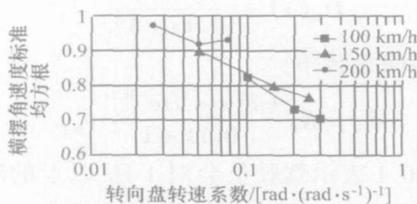


图 4 侧向力干扰下的横摆角速度 RMS 曲线

Fig. 4 Normalized RMS values of yaw rate under lateral force disturbance

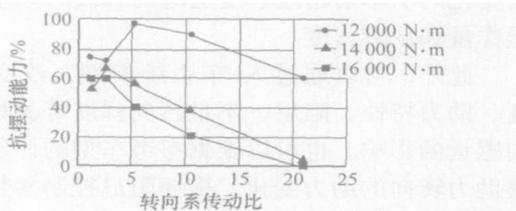


图 5 横摆力矩干扰下汽车的抗摆动能力曲线

Fig. 5 Spin evasive probability under yaw moment disturbance

无论是仿真模型还是驾驶模拟器都主要用于定性分析。3种方法各有利弊,如何应用先进的技术

手段,可根据研究需要和试验条件,进行合理选择。

4 结论

目前,国际上对转向感觉的评价试验及评价指标还处于研究探讨阶段,随着研究的不断深入,评价指标还将会发生变化,但各项研究的方法对今后评价体系的发展具有指导性和借鉴意义。

建立一套系统的转向感觉综合评价方法,获得准确可靠的评价指标,可以应用在今后电动助力转向系统设计的各个方面,为动力转向系统的开发提供有力的工具。

参考文献:

- [1] 林逸, 施国标, 邹常丰. 电动助力转向系统转向性能的客观评价 [J]. 农业机械学报, 2003, 34 (4): 4-7.
- [2] DATA S C, FRIGERIO F. Objective evaluation of handling quality [J]. Proc Instn Mech Engr Part D: J Automobile Engineering, 2002, 206: 297-305.
- [3] NORMAN K. Objective evaluation of on-center handling performance [C]. SAE Paper 840069. 1984.
- [4] HIROYUKI TOKUNAGA, KAZUHITO MISAJI. Vehicle Dynamics Evaluation by "Analytical Method of Equivalent Linear System using the Restoring Force Model of Power Function Type" [C]. AVEC. 20024618.
- [5] JINGHONG YU, HIROYUKI TOKUNAGA. Vehicle Dynamic Feeling Study with a Focus on the On-center Steering Feeling of North American Highway Driving [C]. AVEC. 2004: 415-420.
- [6] SILVIO CARLO DATA, LEONARDO PASCALI. Handling Objective Evaluation Using a Parametric Driver Model for ISO Lane Change Simulation [C]. SAE 2002-01-1569.
- [7] HIROYUKI TOKUNAGA, KAZUHITO MISAJI. Steer Feel Evaluation Method Based on "Analytical Method of Equivalent Linear System using the Restoring Force Model of Power Function Type" [C]. AVEC. 20024619.
- [8] KATSUHIRO SAKAI, ATSUSHI YONEDA. Improvement in Control Performance of Driver-Vehicle System with EPS using Cables to Connect the Steering Wheel and Gearbox [C]. AVEC. 20024584.
- [9] KATSUHIRO FUKUI, TOSHIMICHI TAKAHASHI. Experimental Study on the Performance of Driver-Vehicle System for the Change of Steering Characteristics [C]. AVEC. 2004: 41-46.

与应用, 2004, 40 (7): 3-5, 229.

(上接第 125 页)

- [3] 鲁光泉, 许洪国, 刘宏飞, 王利芳. 基于普通相机的交通事故现场三维重建关键技术研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 19 (2): 94-96, 100.
- [4] SALVIJ, ARMANQUE X, BATTLE J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation [J]. Pattern Recognition, 2002, 35 (7): 1 617-1 635.
- [5] 胡占义, 吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法 [J]. 计算机学报, 2002, 25 (11): 1 150-1 151.
- [6] 蔡涛, 李德华. 非标定图像的最优匹配方法 [J]. 计算机工程

- [7] 鲁光泉. 基于普通相机的交通事故现场三维重建关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2004.
- [8] 王红梅, 张科. 图像匹配研究进展 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40 (19): 43-44.
- [9] 毛剑飞, 邹细勇, 诸静. 改进的平面模板两步法标定摄像机 [J]. 中国图像图形学报, 2004, 9 (7): 848-849.
- [10] 王俊修, 孔斌. 双目立体视觉传感器的现场标定技术 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40 (18): 189-191.