

# 汽车燃油经济性及动力性与驾驶性客观评价体系

章 桐, 刘普辉

(同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

**摘要:** 在传统的汽车燃油经济性和全负荷动力性客观评价基础上引入汽车驾驶性客观评价指标体系, 重点阐述了驾驶性评价的 4 个主要方面, 即部分负荷特性、加速踏板感觉、换挡平顺性和瞬态急踩/松加速踏板响应。详细分析了纵向加速度响应曲面、加速踏板-加速度线性度、加速度增益、换挡冲击度、加速度均方根值和振动剂量等驾驶性客观指标, 并通过线性相关分析验证客观指标与主观评价的一致性。基于多目标性能平衡, 构建了整车级别燃油经济性、动力性与驾驶性综合评价体系。以某 6 速自动挡柴油车型为例, 利用 AVL CRUISE 软件建立车辆纵向动力学性能计算模型, 借助 AVL GSP(gear shifting program)工具快速生成最佳燃油经济性换挡策略和兼顾油耗、动力与驾驶性约束的综合性换挡策略, 对比分析 2 种不同换挡策略下的燃油经济性、动力性与驾驶性部分客观评价指标, 通过定量分析表明了客观评价体系的有效性和实用性。

**关键词:** 燃油经济性; 动力性; 驾驶性; 客观评价体系

**中图分类号:** U462.3

**文献标志码:** A

## Objective Evaluation System of Vehicle Fuel Economy, Performance and Drivability

ZHANG Tong, LIU Puhui

(Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on the traditional objective evaluation of vehicle fuel economy and WOT (wide open throttle) performance, the objective characterization of vehicle drivability were proposed, emphasizing on the four main aspects: POT (partial open throttle) response, accelerator pedal feeling, gear shift smoothness and tip in/tip out transient response characteristics. The objective characterization metrics including longitudinal acceleration response map, accelerator pedal-acceleration linearity, acceleration gain, shock, acceleration RMS (root mean square), VDV (vibration dose value), etc. were

investigated, and the consistencies of objective indicators and subjective evaluations were verified through correlation analysis. The fuel economy, performance and drivability comprehensive evaluation system was established based on multi-objective balance. A diesel vehicle equipped with 6 automatic transmission was studied as an example, the vehicle and powertrain models were created based on AVL CRUISE software, and the economical and comprehensive shift strategies were generated based on AVL GSP (gear shifting program) tool, then the fuel economy, performance and drivability were contrasted and analyzed between different shift strategies, the effectiveness and practicability of the objective evaluation system were illustrated quantitatively.

**Key words:** fuel economy; performance; drivability; objective evaluation system

燃油经济性、动力性与驾驶性是评价汽车纵向动力学性能的 3 个重要方面。三大属性密切相关且相互影响, 构建有效的客观指标与综合评价体系是借助仿真或测试技术进行量化分析以实现多目标性能平衡与优化的前提。

传统的燃油经济性和全负荷动力性作为汽车基础性能已有较为成熟的客观评价指标、虚拟设计和测试方法与流程<sup>[1-2]</sup>。与燃油经济性和全负荷动力性不同, 驾驶性反映了驾驶员在汽车纵向行驶过程中人车交互作用下的主观感觉, 主观评价作为传统驾驶性开发方式在对标分析与参数调校中发挥着重要作用。然而, 主观评价存在着费时费力、重复性低、对试验环境要求高、对测试驾驶员个体依赖性强等不足<sup>[3]</sup>, 近年来随着测试与仿真技术的进步, 驾驶性客观测试与量化分析逐渐成为主观评价的重要补充, 建立合理有效的客观评价体系是实现驾驶性从主观评价到客观量化分析的关键。国外相关车企与汽车

收稿日期: 2014-11-24

第一作者: 章 桐(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为整车集成设计及新能源汽车动力系统。

E-mail: tzhang@tongji.edu.cn

通讯作者: 刘普辉(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车动力系统性能集成与评价。E-mail: liupuhui@163.com

技术服务商在驾驶性客观指标体系构建<sup>[4]</sup>、神经网络虚拟评价<sup>[5]</sup>、仿真分析与测试评价方法<sup>[6]</sup>等领域已开展了相关研究,且有学者对燃油经济性、动力性与驾驶性多目标平衡与综合评价进行了有益的探索<sup>[7]</sup>.国内相关研究仍处于起步阶段,尚未具备完整的、适合国内汽车产品特征的驾驶性客观评价标准与多性能目标综合评价体系<sup>[8-9]</sup>.

本文在介绍传统的燃油经济性和全负荷动力性评价指标的基础上重点分析了汽车驾驶性客观评价的 4 个主要方面,初步构建了基于多目标性能平衡的综合评价体系.

## 1 客观指标分析

### 1.1 燃油经济性

燃油经济性是指汽车以尽可能少的燃油消耗经济行驶的能力,通常用特定循环工况下的百公里行驶燃油消耗量或一定燃油量下汽车行驶的里程来衡量.通过优化动力传动系统参数使发动机尽可能地工作在低燃油消耗率区间,以实现发动机工作特性曲线与汽车纵向行驶功率的合理匹配,是提高汽车燃油经济性的有效手段.

$$E_f = \frac{\int_0^T \dot{m}_f dt}{\rho S_{\text{cycle}}} \times 100 \quad (1)$$

式中: $E_f$ 为燃油经济性, $L \cdot (100 \text{ km})^{-1}$ ;  $T$ 为单个循环周期总时间,s;  $\dot{m}_f$ 为燃油消耗率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $t$ 为行驶时间,s;  $\rho$ 为燃油密度, $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $S_{\text{cycle}}$ 为循环工况行驶里程,km.

### 1.2 动力性

动力性是指汽车在发动机节气门全开(WOT, wide open throttle)即加速踏板 100%开度下的纵向极限行驶能力.从获得尽可能高的平均行驶速度的观点出发,汽车动力性常采用最高车速、加速时间、最大爬坡度 3 个客观指标来评价.动力性影响着汽车的平均行驶效率和行驶安全,是汽车各种性能中最基本、最重要的性能之一.

$$v_{\max} = \sqrt{2 \frac{F_t - mgf \cos \alpha - mg \sin \alpha}{\rho_{\text{air}} C_d A_f}} \quad (2)$$

$$t_{\text{acc}} = \int_{v_1}^{v_2} \frac{\partial m}{(F_t - mgf - \frac{\rho_{\text{air}} C_d A_f v^2}{2})} dv \quad (3)$$

$$\alpha_{\max} = \arcsin \frac{D_{\max} - f \sqrt{1 - D_{\max}^2 + f^2}}{1 + f^2} \quad (4)$$

式中: $v_{\max}$ 为最高车速, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $F_t$ 为最大牵引力,

$N$ ;  $m$ 为车辆质量,kg;  $f$ 为轮胎滚动阻力系数;  $\alpha$ 为道路坡度,%;  $\rho_{\text{air}}$ 为空气密度,一般取  $\rho_{\text{air}} = 1.225 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$ ;  $C_d$ 为空气阻力系数;  $A_f$ 为迎风面积,  $\text{m}^2$ ;  $t_{\text{acc}}$ 为加速时间,s;  $v_1, v_2$ 分别为初始与终止车速,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $\delta$ 为车辆旋转质量转换系数;  $v$ 为行驶速率,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $\alpha_{\max}$ 为最大爬坡度,%;  $D_{\max}$ 为最大动力因素.

### 1.3 驾驶性

在驾驶员-汽车-环境闭环控制系统中,驾驶员同时承担着操纵车辆以及根据车辆动态响应来控制车辆的任务,如图 1 所示<sup>[10]</sup>.驾驶性反映了驾驶员在汽车纵向行驶过程中人车交互作用下的综合感知,描述了在整个汽车纵向行驶闭环控制系统中驾驶员动态感觉(纵向加速度、冲击、俯仰等)、决策行为(根据感觉做出判断)、操作行为(换挡、踏板操作等)、车辆动态响应过程之间的交互关系,并以驾驶员的期望满意度为最终评价依据.驾驶性体现着汽车产品市场定位与品牌基因,影响着消费者购买意愿,是提升产品竞争力的关键.

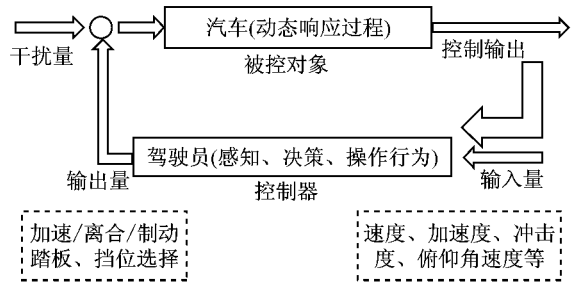


图 1 驾驶员-汽车-环境闭环控制系统

Fig.1 Driver-vehicle-environment closed-loop system

本文在借鉴国内外驾驶性主观评价开发经验的基础上,提取经过主客观一致性检验并可以量化的客观指标,建立相应的评价体系与标准及具体的行驶工况操作规范,以进行驾驶性的量化分析.详细阐述了驾驶性客观评价的 4 个主要方面:部分负荷特性、加速踏板感觉、换挡平顺性和瞬态急踩/松加速踏板响应,如图 2 所示.

#### 1.3.1 部分负荷与加速度响应曲面

部分负荷(POT, part open throttle)加速度响应是考核驾驶性的重要方面.笔者选取了近 20 辆不同级别的汽车样本,统计分析了包含中国 NEDC、日本 1015 和美国 FTP 共 3 种不同循环工况下的车辆加速踏板开度和纵向加速度数据.如图 3、图 4 所示,在典型的车辆道路循环过程中,加速踏板开度小于 20%的低负荷运行接近 60%;加速踏板开度大于

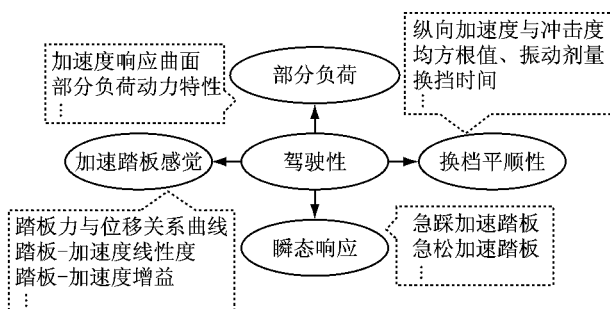


图2 驾驶性评价的4个主要方面

Fig.2 Four main aspects of drivability assessment

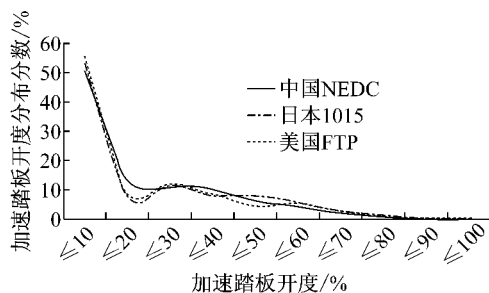


图3 加速踏板开度统计分析

Fig.3 Statics analysis of accelerator pedal position

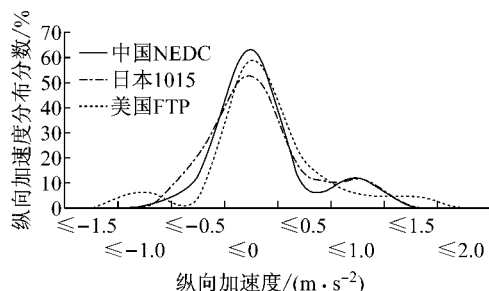


图4 纵向加速度统计分析

Fig.4 Statics analysis of longitudinal acceleration

80%的高负荷运行不足2%;近99%的运行情况下纵向加速度都低于0.15g。这充分说明部分负荷特性对于研究驾驶行为特性的重要性的必要性。

加速度响应曲面以纵向直线行驶车速和加速踏板开度为影响因子,考虑不同车速和负荷下的车辆稳态纵向加速度响应。如图5所示,加速度响应曲面重点考虑了低负荷区域(通常取加速踏板开度小于30%)的加速度响应、车速和踏板开度三者之间的关系。对数据作进一步处理,可以得到不同负荷下的加速性能和换挡性能,包括起步冲击、起步加速度增益、加速时间、换挡冲击等特征。加速度响应曲面从整车层面很好地描述了汽车在不同负荷与车速下的车辆响应特性。加速踏板开度输入与发动机转矩输出之间的非线性关系以及换挡时机的选择是加速度响应曲面的重要影响因素。

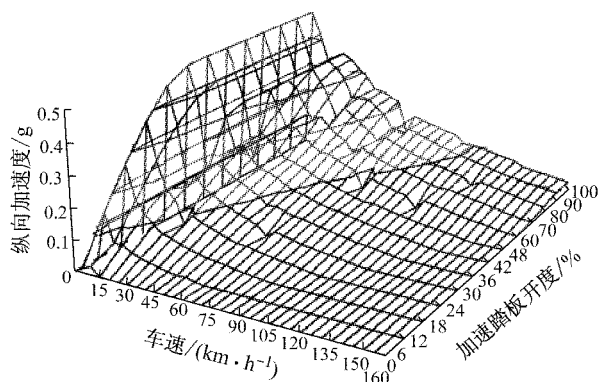


图5 加速度响应曲面

Fig.5 Acceleration response map

### 1.3.2 加速踏板感觉

加速踏板是驾驶员与车辆之间交互最多、最重要的功能模块之一。驾驶员根据车辆实际动态响应与期望的反馈做出比较、判断与决策,进而通过调整加速踏板力与行程来控制动力输出大小。

(1) 加速踏板力与位移关系曲线。加速踏板设计需要考虑人机工程学,同时以操作轻便度、舒适度以及驾驶性为设计目标。力与位移关系特性曲线是加速踏板设计的基础指标。如图6所示,通过对踏板初始力、光滑度、95%开度力与位移、止动点力、止动位移、回程力、滞后力区间等技术指标的合理设计与量化分析以达到加速踏板感觉性能的设计要求<sup>[11]</sup>。

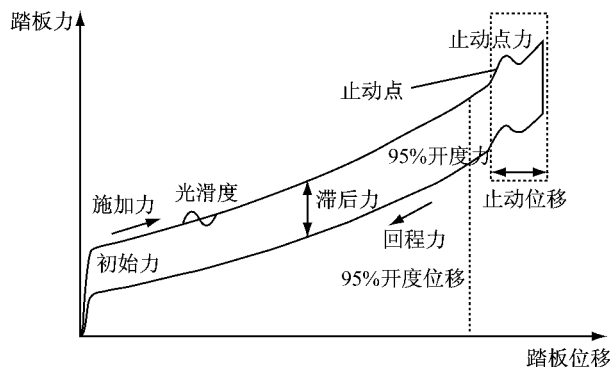


图6 加速踏板力与位移关系特性曲线

Fig.6 Accelerator pedal force-displacement curve

(2) 加速度线性度。在车辆稳态加速过程中(通常取10~60 km·h<sup>-1</sup>速度范围),按一定速率缓慢增大加速踏板开度,要求加速度保持在一定范围内而不出现较大的波动,具体体现在加速度标准方差控制在一定的范围内,且纵向加速度与加速踏板开度保持一定的线性相关性(即加速度线性度)。通过线性回归分析得到相关系数衡量纵向加速度线性度,线性相关系数越大越好。

加速度线性度体现了一定速度范围内稳态加速

过程中加速踏板开度与纵向加速度响应之间的跟随关系,是加速踏板感觉的重要评价特征之一。

(3) 加速度增益. 良好的加速踏板-纵向加速度感觉除了受加速度线性度的影响,还与单位加速踏板开度下的纵向加速度响应特性关系密切. 由于加速踏板力-加速踏板位移-节气门开度-发动机负荷之间的非线性关系,加速踏板输入-纵向加速度响应输出之间也体现出复杂的非线性关系,该关系影响着驾驶员的主观感觉,是车辆品牌基因的重要特征之一. 加速度增益表征了单位踏板位移下的车辆纵向加速度,在一定程度上反映加速踏板位移输入与纵向加速度响应输出之间的非线性关系。

$$a_{\text{gain}} = \frac{F_t - mgf - \frac{\rho_{\text{air}} C_d A_f v^2}{2}}{\delta m D_{\text{ped}}} \quad (5)$$

式中:  $a_{\text{gain}}$  为加速度增益,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;  $D_{\text{ped}}$  为加速踏板位移,  $\text{mm}$ 。

在单位踏板位移输入下,加速度增益值越大,则车辆纵向加速度响应输出越大,车辆运动感越强. 图 7 为不同加速度增益区间所对应的车辆驾驶性特征,通过设定合理的目标区间以达成加速踏板位移与加速度期望输出关系,从而实现特定品牌的产品特征。

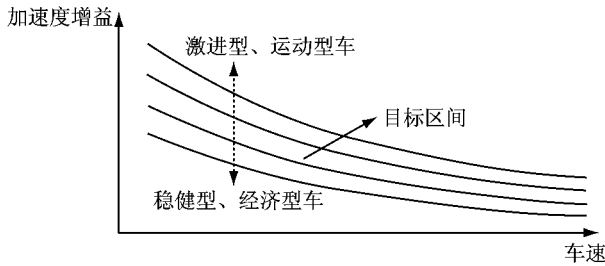


图 7 纵向加速度增益

Fig.7 Longitudinal acceleration gain

### 1.3.3 换挡平顺性

换挡平顺性是驾驶性的重要组成部分. 纵向加速度与冲击度是车辆在行驶方向上的变量,与人的主观感觉密切相关,对换挡舒适性影响较大. 尤其是冲击度表征了车辆动力传递过程的平顺性,其峰值直接反映了人体主观感觉上瞬态的冲击. 加速度均方根值(RMS)描述了纵向加速时间历程中的平均加速度值,考察了加速度持续时间和变化快慢. 振动剂量(VDV)描述了加速度对驾乘人员的累积作用程度,比加速度均方根值对峰值加速度更加敏感,能够更好地估计偶尔遇到过大脉冲引起的高峰值振动,以反映动力传递过程中的瞬态冲击与颠簸. 相关指标的计算公式如下。

$$a = \frac{F_t - mg(f \cos \alpha + \sin \alpha) - \frac{\rho_{\text{air}} C_d A_f v^2}{2}}{\delta m} \quad (6)$$

$$J = \frac{da}{dt} = \frac{d^2 v}{dt^2} \quad (7)$$

$$a_{\text{RMS}} = \sqrt{\int_{t_0}^{t_f} \tilde{a}^2 dt / (t_f - t_0)} \quad (8)$$

$$a_{\text{VDV}} = \left[ \int_{t_0}^{t_f} \tilde{a}^4 dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (9)$$

式中:  $a$  为纵向加速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $J$  为冲击度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$ ;  $a_{\text{RMS}}$  为加速度均方根值,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $a_{\text{VDV}}$  为振动剂量,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1.75}$ ;  $\tilde{a}$  为经过滤波处理后的纵向加速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $t_0, t_f$  分别为起止时间,  $\text{s}$ 。

### 1.3.4 急踩/松加速踏板瞬态响应

对于急踩加速踏板(tip in)和急松加速踏板(tip out)瞬态响应工况,可以根据加速度响应曲线的形状来评价驾驶性. 如图 8 所示,对于某固定车速和挡位下急踩加速踏板瞬态响应工况,通过缩短响应延迟、减少加速度凹陷以及抑制加速度振荡等方法可以有效改善驾驶员主观感觉,提升驾驶性。

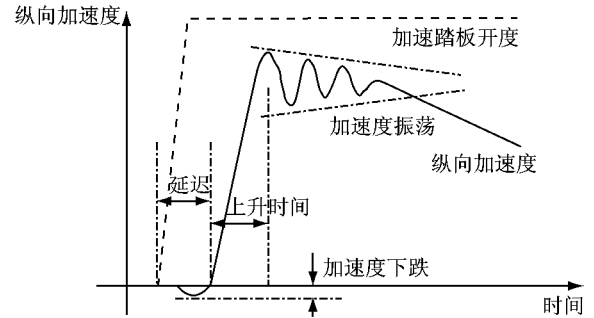


图 8 急踩加速踏板瞬态响应

Fig.8 Tip in transient response

除以上介绍的 4 个主要方面,发动机启动与关闭响应、怠速稳定性、起步性能、车内噪声水平、驻车-倒车-空挡-前进(P-R-N-D)挡位模式切换特性等都会影响驾驶员的主观感觉,是驾驶性评价的重要方面。

## 2 客观指标与主观评分相关性分析

客观指标的有效性取决于能否真实反映驾驶员的主观感觉. 目前已有学者针对单一工况下的客观指标与主观感觉关系进行了定性描述, Wicke 等<sup>[12]</sup>指出纵向加速度、响应延迟、冲击度是评价车辆起步性能的关键,加速度响应稍高、延迟时间很短、冲击度适中则评分越高; Dorey 等<sup>[3]</sup>发现减少加速度超调量和加速度振荡、缩短响应延迟有利于提高急踩/松

加速踏板得分;Dorey 等<sup>[4]</sup>提出减少发动机起动时间和转速超调、降低发动机转速波动有利于提高怠速稳定性得分. 显而易见,单一的客观指标难以完整反映综合的主观感觉,关键在于找到一个最小的客观指标集合来最大化地逼近主观评价,这种拓扑结构如图 9 所示.

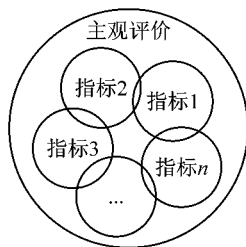


图 9 客观指标与主观评价的拓扑关系

Fig.9 Topological relation between objective characters and subjective assessment

在定性描述客观指标与主观评分关系的基础上,可以借助多元回归分析法,基于主观评价与客观测试的大量历史数据提取出相关系数较高的客观指标作为有效指标,通过定量分析来快速构建客观指标集合. 线性相关系数的计算公式如下.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (10)$$

式中: $R^2$  为线性相关系数; $i$  为指标样本计数; $n$  为指标样本总数; $O_i (i=1, 2 \cdots n)$  为客观指标参数; $S_i (i=1, 2 \cdots n)$  为主观评分; $\bar{O}, \bar{S}$  分别为客观参数与主观评分的均值.

以某 C 级别车部分负荷稳态加速过程中加速度均方根值与主观评分的线性相关性分析为例,其线性相关系数  $R^2 > 0.97$ , 具有较高的相关性,如图 10 所示.

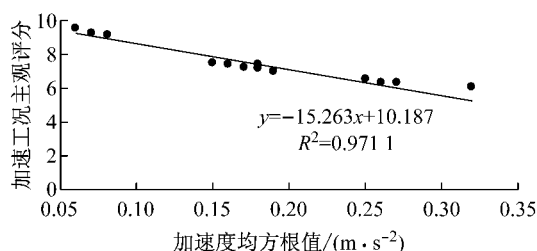


图 10 某 C 级车加速工况下加速度均方根值与主观评分的相关性

Fig. 10 Correlation between acceleration RMS and subject scores of one C-class vehicle under acceleration driving condition

同理,针对前文所述的部分客观指标,搜集整理相关样本参数并进行线性相关性分析,如表 1 所示. 结果表明所选择的大部分客观指标与主观评分相关度较高,说明这些参数在一定程度上可以有效地反映主观评分.

表 1 客观指标与主观评分相关性

Tab.1 Correlation between objective index and subjective scoring

评价因素	客观指标	相关系数
部分负荷(POT)	加速度响应曲面特征值	0.813
	加速踏板力与位移关系曲线	—
踏板感觉	加速度线性度	0.980
	加速度增益	0.927
	纵向加速度	0.815
换挡平顺性	冲击度	0.833
	加速度均方根值	0.794
	振动剂量	0.789
急踩/松加速踏板瞬态响应	响应延迟	0.858
	加速度响应时间	0.810
	加速度下跌	0.837
	加速度振荡	0.923

### 3 综合评价指标体系构建

燃油经济性、动力性与驾驶性三大属性既相互影响又统一于一个整体. 其中,功率传递效率决定着燃油经济性,功率传递幅值决定着动力性,功率传递过程则决定了驾驶性,驾驶性开发是在满足燃油经济性和动力性的基础上对汽车品质的进一步提升. 如图 11 所示.

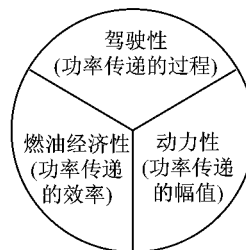


图 11 多目标性能平衡

Fig.11 Multi-objective balance

这三大属性与车辆动力传动系统优化匹配、整车性能集成密切相关,往往在车辆开发前期就需要通过市场、法规及竞争对手分析等制定技术指标规范及其目标值. 为实现上述三大属性的优化平衡,本文构建了整车级别的燃油经济性、动力性与驾驶性客观指标体系,如表 2 所示.

基于上文所构建的客观指标体系,借助计算机仿真技术可进行多目标性能的快速模拟与综合评

表 2 客观指标体系

Tab.2 Objective index system

属性	客观指标
燃油经济性	城市循环工况油耗(UDC)
	郊区循环工况油耗(EUDC)
	综合循环工况油耗(NEDC)
动力性(WOT)	0~100 km·h <sup>-1</sup> 原地起步加速时间
	60~100, 80~120 km·h <sup>-1</sup> 超越加速时间
	最高车速
	最大爬坡度
	坡道起步能力
	最大牵引力
部分负荷(POT)	加速度响应曲面
踏板感觉	加速踏板力与位移关系曲线
	加速度线性度
	加速度增益
换挡平顺性	纵向加速度
	冲击度
	加速度均方根值
	振动剂量
驾驶性	响应延迟
	急踩/松加速踏板瞬态响应
	加速度响应时间
	加速度下跌
其他	加速度振荡
	P-R-N-D 挡位切换
	车内噪声水平
	发动机启动与关闭响应
	怠速稳定性,等

价.本文提出了如图 12 所示的思路:利用 AVL Cruise 工具建立车辆纵向动力学性能计算模型,借助 AVL GSP 工具快速生成满足不同性能约束的换挡策略,通过对整车与系统参数优化、换挡策略优化来实现多目标性能平衡设计.

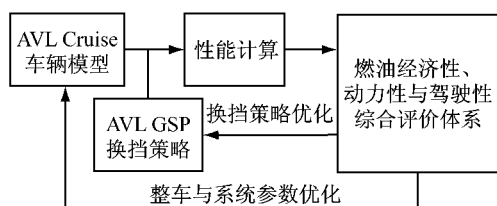


图 12 仿真分析流程

Fig.12 Simulation analysis process

## 4 客观指标应用

建立量化的指标体系是实现客观测试和仿真分析的前提.为了进一步阐明客观指标的应用,本文以某自动挡乘用车型为例,对比分析了 2 种不同换挡策略对燃油经济性、动力性与驾驶性的影响.

### 4.1 仿真模型建立

针对某装备了 1.6L 柴油机和 6 速自动变速器的乘用车型,利用 AVL Cruise 软件建立了整车模

型<sup>[13]</sup>.车型基本参数如表 3 所示.

表 3 车型基本信息

Tab.3 Basic vehicle parameters

车型	发动机类型	发动机最大扭矩/(N·m)	发动机最大功率/kw
5 座乘用车	1.6L 柴油机	300	100
整备质量/kg	变速器类型	主减速器速比	轮胎型号
1 570	6AT	3.17	165/75 R16

## 4.2 换挡策略生成与优化

### 4.2.1 静态初始计算

首先确定 4 个基本因素:加速踏板开度、挡位、液力变矩器锁止离合器状态以及车速的取值范围,通过矩阵计算得到轮边功率  $P_{\text{wheel}}$ 、纵向加速度  $a$ 、燃油消耗量  $Q_{\text{fuel}}$ 、污染物排放量  $Q_{\text{em}}$ 、发动机转矩  $T_{\text{eng}}$  与转速  $N_{\text{eng}}$  等信息,这些变量均表现为 4 个基本因素的函数,如式(11)所示<sup>[14]</sup>:

$$P_{\text{wheel}}, a, Q_{\text{fuel}}, Q_{\text{em}}, T_{\text{eng}}, N_{\text{eng}} = f(i_g, P_{\text{ped}}, S_{\text{lu}}, v) \quad (11)$$

式中: $i_g$  为变速器挡位; $P_{\text{ped}}$  为加速踏板开度; $S_{\text{lu}}$  为液力变矩器锁止离合器状态.

### 4.2.2 最佳燃油经济性换挡策略<sup>[15]</sup>

AVL GSP(gear shifting program)模块可以通过下式进行燃油经济性和排放目标之间的平衡与优化.

$$S_{\text{opt}} = (1 - K)Q_{\text{fuel}} + KQ_{\text{em}} \quad (12)$$

式中: $S_{\text{opt}}$  为目标方案; $K$  为权重因子.当  $K=0$  时,只考虑燃油经济性约束,此时可以得到在不同踏板开度和车速下的油耗最低挡位选择曲面,据此可以描绘出最佳燃油经济性换挡策略.

### 4.2.3 综合性换挡策略

在静态计算的基础上,依据加速踏板开度将换挡曲线划分为低中高负荷 3 个区域,并分别进行参数设计.低负荷区域重点考虑 NVH(noise vibration harshness)约束以限制发动机最低转速,同时保证较低的燃油经济性;中负荷区域保证满足一定的后备功率要求以提升车辆动力性能,同时考虑升降挡延迟以避免频繁换挡以及升降挡转速容差范围以提高舒适性;高负荷区域依据最大加速度准则保证满足连续的加速度输出,同时考虑换挡延迟时间以优化换挡一致性,从而提高车辆驾驶性<sup>[14]</sup>.

基于以上原理,本文利用 AVL GSP 工具生成了最佳燃油经济性换挡策略和兼顾油耗、动力性与驾驶性约束的综合性换挡策略,如图 13 所示为升挡策略的对比.

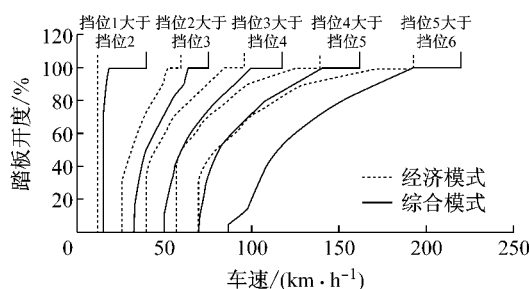


图 13 经济模式与综合模式的升挡策略

Fig.13 Upshift strategies of the economical mode and comprehensive mode

### 4.3 性能计算结果

#### 4.3.1 燃油经济性与动力性

由于换挡时刻直接影响着发动机在循环工况下的工作区间,综合模式比经济模式增加油耗约 6.7%,但是原地起步百公里加速时间减少了约 5.3%. 高档最高稳定车速和低挡最大爬坡度计算时都只考虑加速踏板 100%开度下的峰值功率,经济模式和综合模式计算结果相同,如表 4 所示.

表 4 燃油经济性与动力性计算结果

Tab.4 Fuel economy and performance results

模式	油耗/ (L · (100 km) <sup>-1</sup> )	最高车速/ (km · h <sup>-1</sup> )	最大爬 坡度/%	加速 时间/s
经济模式	6.23	180	40	15.9
综合模式	6.65	180	40	15.1

#### 4.3.2 驾驶性

以图 14 所示的原地起步加速连续升挡工况为例进行驾驶性客观指标分析. 通过对比不难发现,综合模式的速度上升较快(图 14),换挡时刻较晚且换挡时刻发动机转速较高(图 15). 急踩加速踏板瞬态响应过程中纵向加速度最大正值接近  $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,换挡过程中出现较大的加速度波动,产生换挡冲击,在急松加速踏板过程中加速度出现瞬态负向峰值(图 16、图 17). 整个运行工况中加速度均方根值与振动剂量均较大,驾乘舒适性较低(图 18).

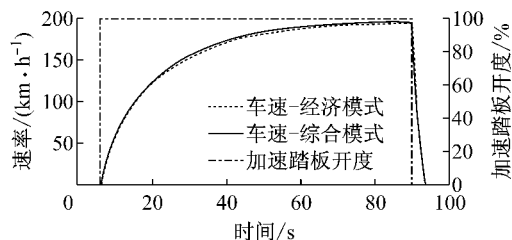


图 14 车速与加速踏板开度

Fig.14 Velocity and accelerator pedal position

上述各个客观指标的量化分析为进一步制定符

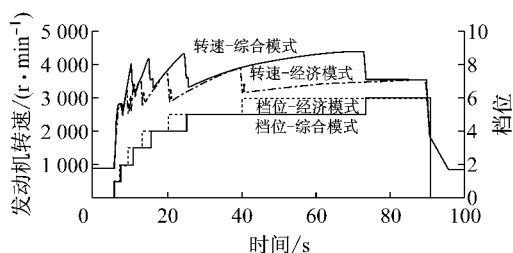


图 15 发动机转速与挡位对比

Fig.15 Engine speed and gear stage comparison

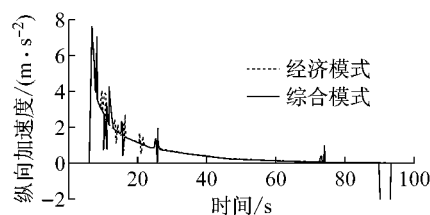


图 16 纵向加速度对比

Fig.16 Vehicle longitudinal acceleration comparison

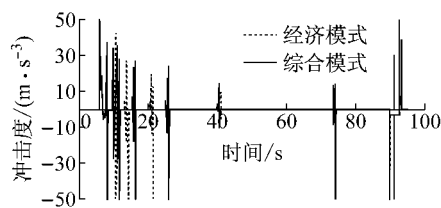


图 17 冲击度对比

Fig.17 Shock impact comparison

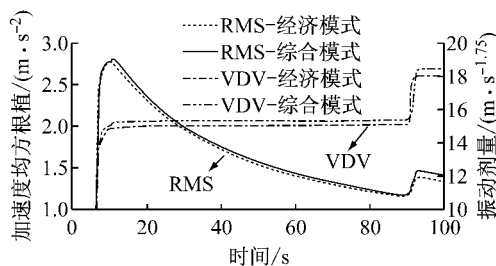


图 18 加速度均方根值与振动剂量对比

Fig.18 Acceleration RMS and VDV comparison

合产品基因的换挡策略和实现多目标性能优化提供了参考. 需要强调的是,汽车燃油经济性、动力性与驾驶性的影响因素众多,实现各个指标的平衡并非易事. 必要的时候,可以损失一部分性能而提高另一方面的表现,以满足特定的产品定位和市场诉求.

## 5 结语

(1) 在传统的汽车燃油经济性和全负荷动力性评价指标的基础上,引入了汽车驾驶性客观评价指标体系,重点阐述了驾驶性评价的 4 个主要方面及

相关典型客观评价指标,为实现从主观评价到客观量化分析驾驶性提供了参考。

(2) 基于多目标性能平衡,构建了整车级别燃油经济性、动力性与驾驶性综合评价体系。以某 6 速自动挡柴油车为例,对比分析了 2 种不同换挡策略下的燃油经济性、动力性和驾驶性部分客观指标,以量化分析的方式表明了客观评价指标体系的有效性和实用性。

(3) 建立合理有效的客观评价指标在将客户之声转化为工程开发语言中发挥着重要作用,是实现驾驶性从主观评价到客观测试与分析的第一步,也是通过虚拟设计来量化分析车辆性能的必要条件。进一步丰富主客观测试数据库样本,建立完善的客观评价指标体系及多目标性能综合评价系统是需要继续研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] Srinivasan P, Kothalilar U M. Performance fuel economy and CO<sub>2</sub> prediction of a vehicle using AVL Cruise simulation techniques [J]. Society of Automotive Engineering, 2009(1): 1862.
- [2] 彭莫,刁增祥. 汽车动力系统计算匹配与评价[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2009.  
PENG Mo, DIAO Zengxiang. Automobile powertrain system matching calculation and evaluation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
- [3] Dorey R E, Holmes C. Vehicle driveability - its characterization and measurement [J]. Society of Automotive Engineering, 1999(1): 949.
- [4] Dorey R E, Martin E J. Vehicle driveability—the development of an objective methodology [J]. Society of Automotive Engineering, 2000(1): 1326.
- [5] Peter Schoeggl, Erich Ramschak. Vehicle driveability assessment using neural networks for development, calibration and quality tests [J]. Society of Automotive Engineering, 2000(1): 702.
- [6] Olivier Hayat, Michel Lebrun. Powertrain driveability evaluation: analysis and simplification of dynamic models [J]. Society of Automotive Engineering, 2003(1): 1328.
- [7] XI Wei. Modeling and control of a hybrid electric drivetrain for optimum fuel economy, performance and driveability [D]. Ohio: The Ohio State University, 2004.
- [8] 王国青. 汽车纵向动力学特性的识别方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.  
WANG Guoqing. Research on the identification method for vehicle longitudinal dynamics characteristic [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [9] 陈涛. 汽车动力性能主观评价方法和指标权重分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.  
CHEN Tao. Methods and index weight analysis for subjective assessment on automobile dynamic properties [D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [10] 石晓明, 陈祯福. 汽车行驶动力学性能的主观评价[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
SHI Xiaoming, CHEN Zhenfu. Subjective evaluation of automobile dynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [11] Jawad B, Dragoiu A. Throttle body design for optimum driver feedback [J]. Society of Automotive Engineering, 2003(1): 2278.
- [12] Wicke V, Brace C, Deacon M, *et al.* Preliminary results from driveability investigations of vehicles with continuously variable transmissions [C] // Proceedings of the International Congress on Continuously Variable Power Transmission. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 1999: 9-14.
- [13] 刘振军, 赵海峰, 秦大同. 基于 CRUISE 的动力传动系统建模与仿真分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(11): 8.  
LIU Zhenjun, ZHAO Haifeng, QIN Datong. Simulation and analysis of vehicle powertrain based on CRUISE [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(11): 8.
- [14] 周云山, 王楠, 蔡源春. 基于 CruiseGSP 的 DCT 整车换挡研究[J]. 科技导报, 2011(12): 42.  
ZHOU Yunshan, WANG Nan, CAI Yuanchun. Shift schedule in the auto with dual clutch transmission based on Cruise gear shift program [J]. Science & Technology Review, 2011(12): 42.
- [15] Guen L D, Weck T, Balihe A. Definition of gearshift pattern: Innovative optimization procedures using system simulation [J]. Society of Automotive Engineering, 2011(1): 412.