

# 混合动力电动汽车冲击度的试验\*

张俊智 李波 薛俊亮 潘凯

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

**摘要:** 为提高混合动力电动汽车的驾驶性能, 将冲击度作为评价指标研究车辆的驾驶性能。通过试验研究找到提高整车控制品质、改善混合动力电动汽车驾驶性能的方法。以含有机械式自动变速器的某型混合动力轿车为研究对象, 通过对车辆在行驶过程中产生冲击度的机理进行分析, 设计出相应的试验方案, 对车辆在起步、驱动状态切换、换挡以及制动等典型过程中的冲击度进行试验研究。试验结果表明, 优化离合器分合速度, 协调控制发动机和电动机的转速、转矩可以有效减小车辆冲击度。

**关键词:** 混合动力电动汽车 驾驶性能 冲击度 机械式自动变速器

**中图分类号:** U469.72

## Experimental Research on Jerk of Hybrid Electric Vehicles

ZHANG Junzhi LI Bo XUE Junliang PAN Kai

(State Key Laboratory of Automobile Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** In order to improve the driveability of hybrid electric vehicles (HEVs), the degree of jerk is selected as the evaluation parameter to evaluate the driveability of HEVs. With the analysis of experiment results, some methods are brought out to improve control quality and driveability of HEVs. The reason of jerk is studied, experiment plan is worked out. Experiments of starting, state-changing, shifting and braking are implemented and well analyzed. The whole work is done on a hybrid electric car by using an automated mechanical transmission. Experimental results indicate that the degree of jerk can be reduced by optimizing the clutch control and by coordinately controlling the engine and motor's speed and torque.

**Key words:** Hybrid electric vehicles(HEVs) Driveability Jerk Automated mechanical transmission(AMT)

## 0 前言

汽车的驾驶性能是评价汽车性能的一个重要指标。驾驶性能描述了驾驶员对他与汽车之间交互作用的复杂主观感觉<sup>[1]</sup>, 这种交互作用是指在一定驾驶员输入条件下汽车的前进动态响应特性<sup>[2]</sup>。目前, 汽车制造商通过让富有经验的试验驾驶员填写表格的主观方法来评价汽车的驾驶性能。这种评价方法极为耗时耗力, 可重复性较差, 且不具有客观性<sup>[1]</sup>。

冲击度是车辆前进加速度的变化率, 选择冲击度作为驾驶性能评价指标不仅容易与人的感觉同步, 而且可以把因道路条件引起的弹跳和颠簸加速度的影响排除在外, 从而真实地反映汽车的驾驶性能。

国内其他研究人员曾使用冲击度为指标研究变速器的换挡品质和驾驶舒适性<sup>[3-4]</sup>。

与传统车相比, 混合动力电动汽车由于改变了动力系统的结构, 因此在冲击度的产生机理上与传统车有所不同。文献[5]在进行了由内燃机和电动机组成的动力源工作状态切换过程的协调控制方法的实时仿真研究。文献[6]就部分换挡过程中的协调控制方法进行了定性的研究。本文将对混合动力电动汽车动力源工作状态切换和换挡过程中的冲击度进行系统的实车试验研究。

## 1 冲击度机理分析

本文的研究对象是一款混联式混合动力电动轿车, 其混合动力系统结构如图 1 所示。该系统属于深度混合的混联式混合动力系统, 发动机与电动机

\* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2005AA501220), 20070320 收到初稿, 20070925 收到修改稿

转矩通过转矩合成装置在离合器之后、变速器之前耦合, 变速器使用机械式自动变速器(Automated mechanical transmission, AMT), 发动机带有一体化启动电动机/发电机(Integrated starter/generator, ISG)。

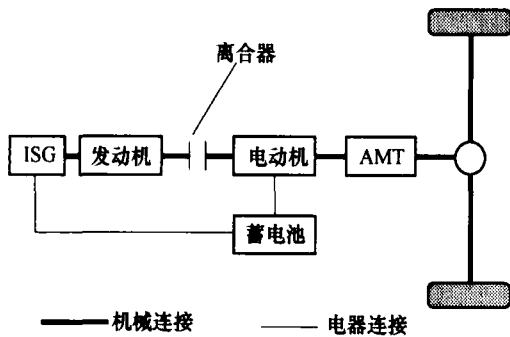


图 1 混合动力系统结构

冲击度  $j$  是整车加速度的变化率, 由汽车理论可知

$$j = \frac{1}{\delta m} \frac{d(F_t - F_f - F_r - F_w)}{dt} \quad (1)$$

式中  $F_t, F_f, F_w, F_r$  ——驱动力、空气阻力、滚动阻力和坡度阻力

$\delta$  ——变速器后旋转质量换算系数

$m$  ——整车质量

假设行驶过程中空气阻力、滚动阻力和坡度阻力不变, 则

$$j = \frac{i_0}{\delta m r} \frac{dT_t}{dt} \quad (2)$$

式中  $T_t$  ——变速器输出轴转矩

$i_0$  ——主减速器减速比

$r$  ——车轮半径

换挡过程一般包括动力减小、摘挡、选挡、挂挡以及动力恢复几个阶段。换挡过程的冲击度主要存在动力减小和恢复的两个过程中, 在此过程中

$$j = \frac{i_0 i_g}{\delta_1 m r} \frac{d(T_c + T_m)}{dt} \quad (3)$$

式中  $\delta_1$  ——离合器后旋转质量换算系数

$T_c$  ——离合器传递的转矩

$i_g$  ——变速器速比

当离合器完全分离时,  $T_c$  为 0。当离合器完全接合时, 有

$$T_c = T_{\text{ENG}} + T_{\text{ISG}} - I_1 \dot{\omega}_1 \quad (4)$$

式中  $T_{\text{ENG}}$  ——发动机输出转矩

$T_{\text{ISG}}$  ——ISG 输出转矩

$I_1$  ——离合器前各部分的转动惯量

$\omega_1$  ——离合器主动片转速

当离合器在接合或分离过程中时有

$$T_c = T_x \text{sgn}(\omega_1 - \omega_2) \quad (5)$$

式中  $T_x$  ——离合器滑摩转矩, 它与离合器分离行程  $x$  的关系如图 2 所示

$\omega_2$  ——离合器从动片转速

$\text{sgn}()$  ——符号函数,  $\omega_1 > \omega_2$  时为 1,  $\omega_1 = \omega_2$  时为 0,  $\omega_1 < \omega_2$  时为 -1

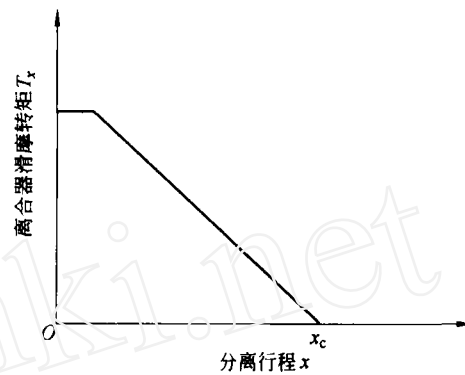


图 2 离合器滑摩转矩与分离行程的关系

该型混合动力电动汽车与传统车相比, 在冲击度的产生机理上有几点不同。

(1) 起步过程中, 传统车包括一个离合器接合的过程, 离合器接合过程的控制品质决定了冲击度的大小; 该型混合动力汽车采用纯电动机驱动起步, 电动机转矩的控制品质决定冲击度的大小。

(2) 该型混合动力汽车在行驶过程中根据能量分配策略, 需要在电动机驱动、发动机驱动和混合驱动等状态之间进行切换, 有的状态切换过程伴随着离合器的分合。在上述工作状态切换过程中会产生冲击度。

(3) 该型混合动力车在换挡过程中, 电动机可以进行转矩和转速的调整控制, 内燃机、电动机和离合器的协调工作决定换挡品质。

(4) 制动过程中, 该型混合动力汽车的冲击度还受电动机回馈转矩的影响。

## 2 整车冲击度试验设计

### 2.1 冲击度信号的采集

冲击度测试采用的车辆前进加速度信号的采集原理如图 3 所示。

选用英国模拟器件公司的集成芯片 ADXL 203 作为加速度传感器。它能测量的加速度范围为  $\pm 1.7g$ , 可以满足汽车驾驶性能评价的需要。

加速度传感器测得的加速度值以模拟电压量的形式输出, 该信号经过信号调理电路处理后进入整车控制器 HCU 主芯片的 ADC 端口, 由 MCU 对加

速度信号进行周期采样和模数转换。

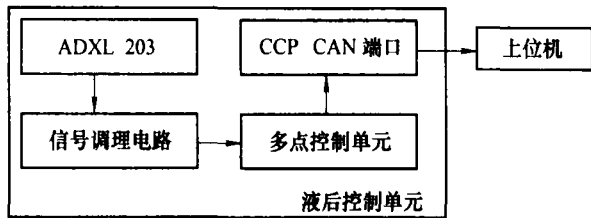


图3 车辆前进加速度信号的采集原理

通过 CCP 监控与标定系统, HCU 将得到的原始加速度信号上传, 由上位机对其进行保存, 信号的采样周期为 100 Hz。

研究表明, 人体承受水平振动的敏感频率在 2 Hz 以下, 而高于 50 Hz 的水平振动对人的感觉无明显影响<sup>[7]</sup>。因此, 本文对于采集的加速度信号, 使用 Matlab 的 SPTOOL 工具设计了一个通带频率 3 Hz、截止频率 5 Hz 的低通滤波器进行滤波。对滤波后的加速度信号进行差分, 就得到了某次试验过程中的冲击度值。

### 2.2 整车冲击度试验方案

为了全面研究整车的冲击度, 设计了以下的试验方案。

(1) 局部工况试验。局部工况试验方案为: ①在不同的加速度踏板开度(0%~100%)下正常起步, 倒车起步。②在电动机单独驱动、发动机单独驱动和混合等不同驱动状态下, 快速增大/减小加速踏板开度。③纯电动状态向发动机单独驱动状态切换, 发动机单独驱动状态向纯电动状态切换, 纯电动和发动机单独驱动状态向混合驱动状态切换。④在纯电动状态、发动机单独驱动状态和混合驱动状态下进行升/降挡。⑤制动停车。

(2) 综合试验。综合试验方案为: 正常起步—加速—升挡—减速—降挡—制动—停车过程。

## 3 整车冲击度试验结果分析

根据上述试验方案, 对该型混合动力电动汽车行驶过程中的冲击度进行了细致的试验研究。下面对一些典型过程的试验结果进行分析。

### 3.1 纯电动起步和加速过程

以固定的加速踏板开度使汽车纯电动起步/倒车, 保持几秒后, 踩下制动踏板制动停车。纯电动起步—停车过程特征曲线如图4所示。

纯电动起步, 离合器脱开,  $T_c$  为 0, 整车冲击度的大小取决于电动机转矩  $T_m$  的变化率。虽然对电动机的转矩命令以一定斜率平稳上升, 但由于电动机在极低转速时转矩控制不稳, 产生如图4所示约

5 m/s<sup>3</sup>的正负冲击度。

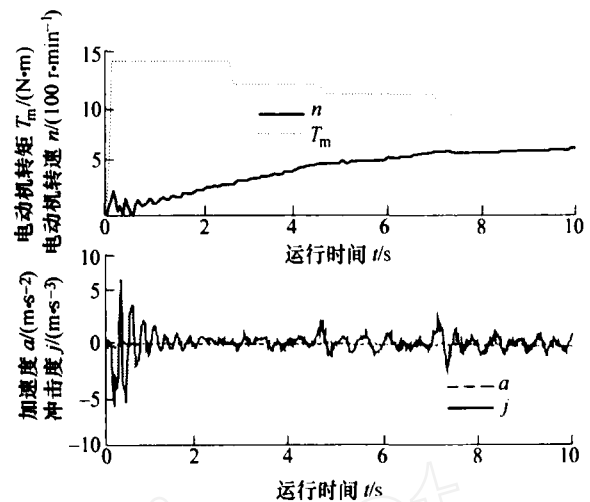


图4 纯电动起步—停车过程特征曲线

在纯电动工况下, 突然增大加速踏板开度, 试验此过程的冲击度值, 如图5所示。

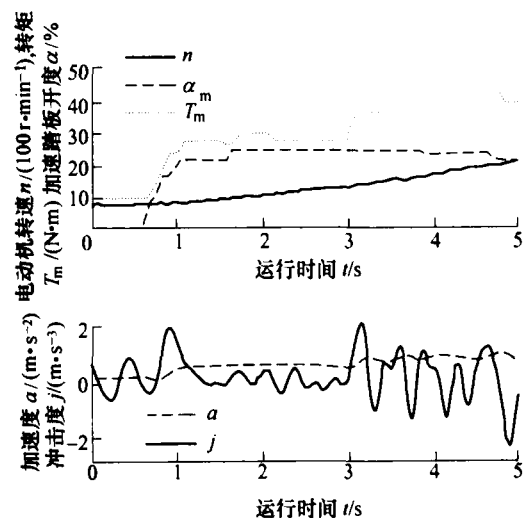


图5 纯电动工况快速增大加速踏板开度

与纯电动起步工况一样, 整车冲击度的大小取决于电动机转矩  $T_m$  的变化率。由于 HCU 和电动机控制器对电动机输出转矩采取了斜坡控制(转矩增长率小于 125 N/s), 所以加速踏板的突然增大并不会引起驱动力的剧烈变化。从图5可以看出, 加速踏板增大瞬间, 由于驱动力的变大, 产生了增大的正向加速度, 并引起了正向的冲击度, 但冲击度值并不大。

### 3.2 纯电动切换到发动机单独驱动过程

纯电动切换到发动机单独驱动的典型过程如图6所示。

在接合离合器之前, 电动机驱动转矩维持不变。HCU 先控制发动机进行调速, 当发动机转速接近电动机转速时, AMT 控制离合器开始接合。在离合器半接合(主、从动片转速不一致)状态下, 根据式(5),

由于离合器结合速度稍大,使  $T_c$  变化率较大,产生较大的正冲击度。随后主、从动片转速一致,  $T_c$  由式(5)的值变为式(4)值,由于此时发动机节气门关闭,  $T_{ENG}$  为 0, ISG 没有工作  $T_{ISG}$  也为 0, 所以这时产生了一个稍大的负冲击度。离合器完全接合之后,电动机转矩减小,发动机转矩增大。由于对发动机的转矩进行控制不够精确,使  $T_c$  和  $T_m$  之和有些波动,产生了一些冲击度。

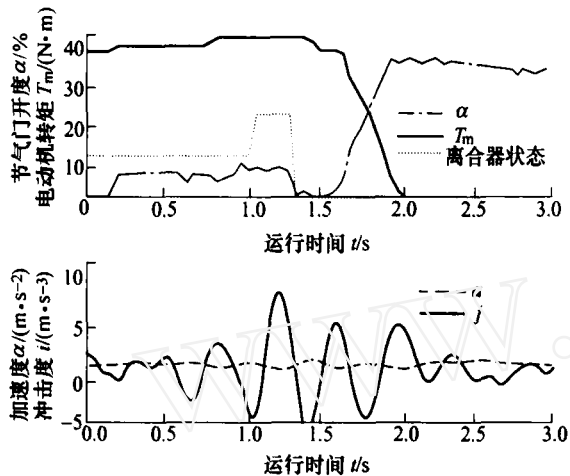


图6 纯电动切换到发动机单独驱动的典型过程

### 3.3 不同驱动状态下的换挡过程

纯电动工况下的典型升挡过程为 1 挡升 2 挡,如图 7 所示。

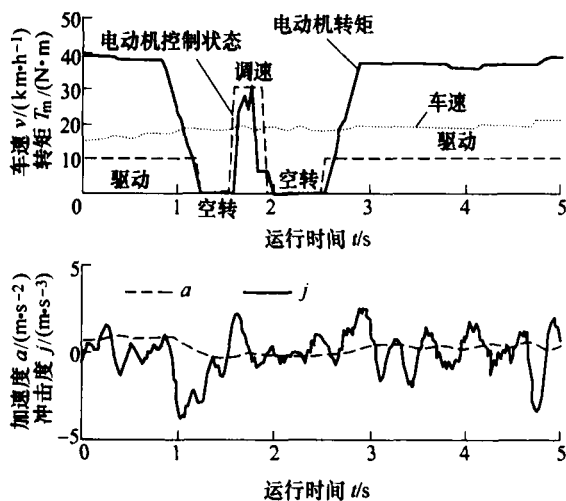


图7 纯电动状态下换挡过程

纯电动状态下进行换挡,由于发动机不参与工作,因此没有离合器分合的过程。如图 7 所示, HCU 允许 AMT 换挡前,先控制电动机撤除驱动转矩,冲击度的大小取决于电动机转矩  $T_m$  的变化率。由于对电动机转矩的控制,产生的冲击度并不大。换挡过程中由于中断了动力并且电动机对输入轴进行了调速,没有什么冲击。之后的动力恢复阶段同样由

于电动机转矩  $T_m$  平稳上升没有大的冲击。

发动机单独驱动状态下的典型换挡过程如图 8 所示。

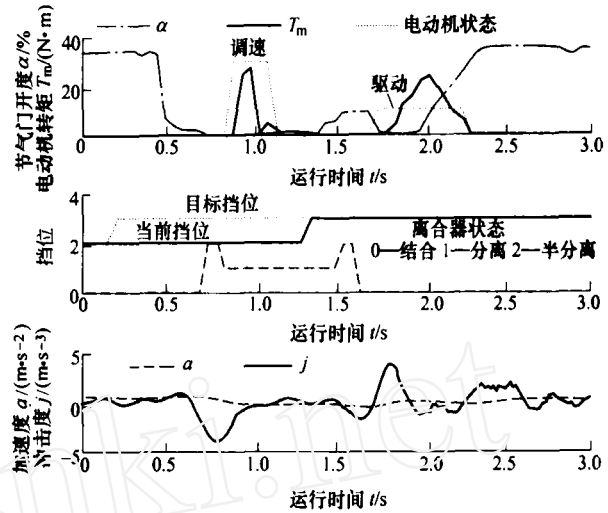


图8 发动机单独驱动状态下换挡过程

发动机单独驱动状态下的换挡过程与传统车相似。首先减小发动机节气门开度,由于发动机输出转矩  $T_{ENG}$  的减小产生负冲击度,但冲击度数值并不大。之后分离器开始分离,而此时发动机转矩已经撤消,在离合器分离的过程中也没有大的冲击。最后离合器开始接合,离合器接合速度稍快而导致正冲击度的产生。

### 3.4 制动过程

一次典型的制动过程特征曲线如图 9 所示。从图 9 中可以看出,制动过程中,随着制动踏板的增大和减小,电动机的回馈制动力矩也增大和减小。在制动力上升和下降的时刻分别有较大的负冲击度和正冲击度,这与传统车的制动过程是相同的。

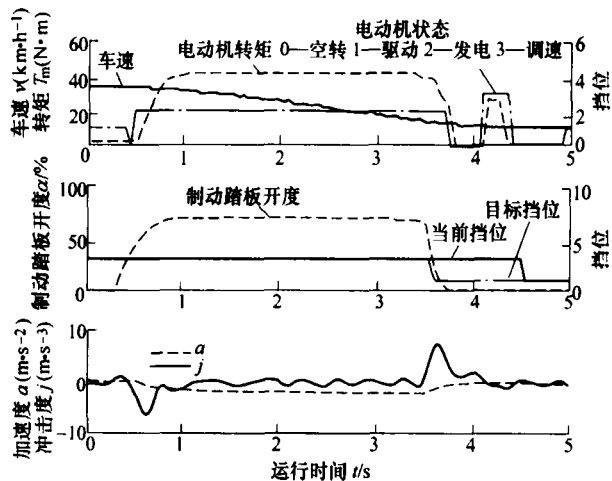


图9 制动过程特征曲线

## 4 结论

(1) 从车辆冲击度产生的机理分析中可知,与传统汽车相比混合动力电动汽车冲击度产生的机理更加复杂。以冲击度为优化目标,可以对混合动力电动汽车的整车控制进行优化,改善混合动力电动汽车的驾驶性能。

(2) 混合动力电动汽车在纯电动起步过程中,电动机在极低转速下的转矩控制不稳会造成冲击度;驱动状态切换过程以及不同驱动状态下的换挡过程中,由于离合器的分合和发动机、电动机转矩的协调会产生冲击度;制动过程中,电动机回馈制动系统发挥作用,但不会对整车的冲击度造成太大影响。

(3) 优化离合器接合速度、发动机和电动机的转矩、转速控制可以减小状态切换及换挡过程中的冲击度。

### 参 考 文 献

- [1] SHOEGGL P, RAMSCH E. Vehicle driveability assessment using neural networks for development, calibration and quality tests[R]// SAE Paper 2000-01-0702, 2000.
- [2] CACCIATORI E, VAUGHAN N D, MARCO J. Evaluating the impact of driveability requirements on the performance of an energy management control architecture for a hybrid electric vehicle[C]//IEE. Automotive Electronics, the 2nd IEE Conference on the 2nd IEE Conference on Automotive Electronics, 20-21 March 2006, Savoy Place, London, UK. Stevenage: IEE, Michael Faraday House, 2006: 297-320.
- [3] HUANG Quanan, WANG Huiyi. Fundamental study of jerk: evaluation of shift quality and ride comfort[R]// SAE Paper 2004-01-2065, 2004.
- [4] 金伦, 程秀生, 葛安林, 等. AMT 换挡过程的离合器控制[J]. 汽车技术, 2006(1): 33-35.
- JIN Lun, CHENG Xiusheng, GE Anlin, et al. Clutch control during gear shifting of AMT[J]. Automobile Technology, 2006(1): 33-35.
- [5] 童毅, 欧阳明高, 张俊智. 并联式混合动力汽车控制算法的实时仿真研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 156-161.
- TONG Yi, OUYANG Minggao, ZHANG Junzhi. Real-time simulation and research on control algorithm of parallel hybrid electric vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 156-161.
- [6] 廖承林, 张俊智, 卢青春. 混合动力轿车机械式自动变速器换挡过程中的动力系统协调控制方法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 37-40.
- LIAO Chenglin, ZHANG Junzhi, LU Qingchun. Coordinated powertrain control method for shifting process of automated mechanical transmission in the hybrid electric vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 37-40.
- [7] 葛安林, 吴锦秋, 郭万富. 离合器最佳结合规律的研讨[J]. 汽车工程, 1988, 10(2): 57-63.
- GE Anlin, WU Jinqiu, GUO Wanfu. Research on optimal clutch combined rule[J]. Automotive Engineering, 1988, 10(2): 57-63.

作者简介: 张俊智, 男, 1969 年出生, 副教授。主要研究方向为内燃机混合动力系统和燃料电池混合动力系统的匹配、控制和优化。

E-mail: jzhzhang@mail.tsinghua.edu.cn

李波, 男, 1983 年出生。主要研究方向为混合动力汽车整车控制器。

E-mail: libo00@tsinghua.edu.cn