

汽车驾驶机器人驾驶性能评价半实物仿真平台^{*}

陈 刚¹ 张为公²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 东南大学仪器科学与工程学院, 南京 210096)

【摘要】 为了克服汽车驾驶机器人在实际车辆上调试存在的危险以及快速获得试验车辆的性能, 设计了汽车驾驶机器人驾驶性能评价半实物仿真平台, 可以借助这个平台对驾驶机器人驾驶车辆的品质进行性能评价。该平台中实际车辆由汽车纵向动力学数学模型代替, 它可以模拟实际车辆的工作状态, 输入信号为通过传感器测得的驾驶机器人油门机械腿、制动器机械腿、离合器机械腿和换挡机械手的位移, 输出信号为经模型计算得到的发动机转速和车速, 驾驶机器人不用做任何改动就可在该平台上进行驾驶操作。仿真和实车试验结果验证了该平台的有效性。

关键词: 汽车 驾驶机器人 性能评价 半实物仿真平台

中图分类号: TP273; U467.5⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)12-0048-07

Semi-physical Simulation Platform for Driving Performance Evaluation of Vehicle Robot Driver

Chen Gang¹ Zhang Weigong²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract

In order to overcome the danger existed in the debugging of vehicle robot driver in actual vehicle and quickly obtain the performance of test vehicle, a semi-physical simulation platform for driving performance evaluation of robot driver was designed. The performance evaluation of robot driver could also be conducted by the simulation platform. In the platform, the actual vehicle was replaced by the vehicle longitudinal dynamics model, and it could simulate the working conditions of actual vehicles. The displacement of throttle pedal, brake pedal, clutch pedal, and shift manipulator for vehicle robot driver measured by the sensor was used as input of the platform, and vehicle speed and engine speed calculated by the model were used as output of the platform. Vehicle robot driver could operate the platform without any changes. Simulation and real vehicle test results showed the proposed platform was effective.

Key words Vehicle, Robot driver, Performance evaluation, Semi-physical simulation platform

引言

随着汽车工业的发展, 人类对汽车的性能要求越来越高, 需要借助于大量的试验来改进设计。汽车试验中的许多项目, 由于重复性强、持续时间长、危险性大、工作环境恶劣、循环车速频繁变换, 更适合由机器人来操作。驾驶机器人是在汽车试验中代

替人类驾驶员进行驾驶操作的工业机器人。国外驾驶机器人的关键技术还处在保密阶段, 目前只有少数几个发达国家拥有该项技术^[1~4]。国内主要有东南大学与南京汽车研究所联合研制成功的、具有自主知识产权的 DNC-1 型和 DNC-2 型驾驶机器人^[5~7]。利用驾驶机器人进行汽车试验对于减轻试验人员的劳动强度, 节省试验费用, 提高试验效率,

收稿日期: 2010-12-17 修回日期: 2011-02-21

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51008143)、中国博士后科学基金资助项目(2011M500922)、南京理工大学自主科研专项计划资助项目(2011YBXM43)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200802861061)

作者简介: 陈刚, 讲师, 博士, 主要从事汽车电子与测控技术、智能控制研究, E-mail: gang0418@163.com

消除人为因素的影响,进而加速汽车研发进度都有重要的意义。

汽车试验前需要快速且准确地知道车辆的动力特性,从而有利于驾驶机器人经性能学习后更好地操纵试验车辆,以提高驾驶机器人的自适应能力。驾驶机器人驾驶性能评价是汽车驾驶机器人的关键技术,国外还处于保密阶段,国内也鲜见报道。由于在实际车辆上进行调试存在危险,因此需要一个半实物仿真平台来完成此项工作,在该平台中实际车辆由汽车纵向动力学数学模型代替,驾驶机器人驾驶车辆的品质可以借助这个仿真平台进行性能评价。汽车纵向动力学系统的模型已经非常成熟,值得借鉴的地方很多^[8-10]。本文所建立的模型旨在不大幅降低汽车动力学系统精度的基础上,尽量简化或省略系统的模型结构,注重于实时性和系统实现,并把这个模型与汽车驾驶机器人结合起来,为汽车驾驶机器人驾驶性能评价提供一个方便、实用的半实物仿真平台。

1 驾驶机器人系统结构

驾驶机器人在不改变试验车辆的基础上代替试验人员驾驶汽车,按照预先设定的各种速度-时间循环行驶工况的要求进行汽车试验,完成油门、制动、离合器、换挡机械手的协调配合动作。驾驶机器人由换挡机械手、油门机械腿、制动机械腿、离合器机械腿、计算机控制系统和电动驱动系统等组成,采用纯电动驱动方式,使机器人的操作能够具有人类试验人员肌肉的快速性和柔顺性,满足汽车驾驶动作快速(如换挡、制动)、快慢接合(如离合器)、慢速(如油门)等运动要求。汽车驾驶机器人的系统结构如图 1 所示。

2 驾驶性能评价半实物仿真平台

2.1 汽车纵向动力学数学模型

在建模过程中,作如下假设:①动力传动系统中的传动轴及传动齿轮为刚性。②地面附着系数足够大,不考虑轮胎的滑移等非线性因素。

2.1.1 发动机模型

发动机模型包括空载模型和有载模型。空载模型时,汽车试验过程中的起步点火工况、换挡工况、怠速工况和滑行工况,发动机都处于空载。这时,离合器主从动部分存在相对滑摩,发动机状态更新方程为

$$J_e \frac{d\omega_e}{dt} = T_e - T_{ef} - T_c \tag{1}$$

式中 J_e ——发动机转动惯量

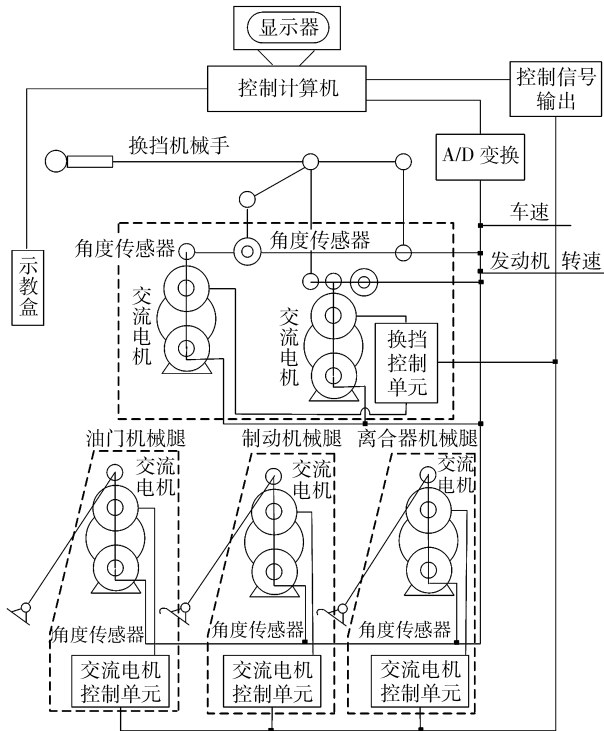


图 1 汽车驾驶机器人系统结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of vehicle robot driver system configuration

- ω_e ——发动机角速度
- T_e ——发动机转矩
- T_{ef} ——发动机自身转动的摩擦阻力矩
- T_c ——离合器反作用于发动机的滑摩扭矩

有载模型相当于发动机处于挡位下的运行工况,试验过程中发动机大多处于这种状态下。忽略节气门滞后时间及驱动轴扭转刚度对发动机性能的影响,发动机稳态输出扭矩、发动机转速和油门开度之间的非线性关系为

$$T_e = f(n_e, \alpha) \tag{2}$$

式中 n_e ——发动机转速 α ——油门开度

由发动机台架试验数据,可得到关于油门开度、发动机转速和扭矩之间的关系,即发动机 MAP 图。

2.1.2 离合器模型

离合器的摩擦传递扭矩 T_c 与离合器踏板行程 x_c 之间的关系如图 2 所示。图中 x_{c1} 、 x_{c2} 为离合器踏板开始分离位置、离合器踏板完全分离位置。

离合器输出传递扭矩为

$$T_c = k_c T_e \tag{3}$$

离合器扭矩传递系数 k_c 为

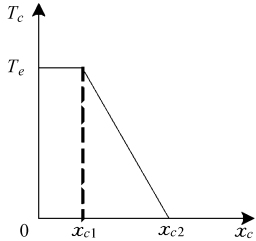


图 2 离合器扭矩传递特性图

Fig.2 Characteristics of clutch torque transmission

$$k_c = \begin{cases} 1 & (0 \leq x_c \leq x_{c1}) \\ \frac{x_{c2} - x_c}{x_{c2} - x_{c1}} & (x_{c1} < x_c < x_{c2}) \\ 0 & (x_{c2} \leq x_c \leq 1) \end{cases} \quad (4)$$

当 $x_c = 0$ 时,离合器踏板位于初始位置;当 $x_c = x_{c1}$ 时,离合器踏板位于开始分离位置;当 $x_c = x_{c2}$ 时,离合器踏板位于完全分离位置。模拟不同车辆时,取不同的 x_{c1} 、 x_{c2} ,即可取得不同的 k_c ,进而得到不同的 T_c 。

2.1.3 变速器模型

经变速器和主减速器后,传递到车轮的驱动扭矩为

$$T_t = T_c i_0 i_g \eta_T \quad (5)$$

式中 i_0 ——主减速器传动比
 i_g ——变速器各个挡位下的传动比
 η_T ——传动效率

2.1.4 制动器模型

制动器制动扭矩与制动踏板位移的关系为

$$T_b = \frac{x_b}{x_{bmax}} T_{bmax} \quad (6)$$

式中 T_b ——制动扭矩
 T_{bmax} ——最大制动扭矩
 x_b ——制动踏板位移
 x_{bmax} ——制动踏板最大位移

制动力与制动踏板位移的关系为

$$F_b = \varphi_b mg \quad (7)$$

式中 F_b ——制动力 m ——汽车质量
 φ_b ——制动力系数
将 φ_b 拟合为三段直线方程

$$\varphi_b = \begin{cases} 0.79s/0.11 & (0 < s \leq 0.11) \\ s + 0.68 & (0.11 < s \leq 0.18) \\ -0.1875(s - 0.18) + 0.86 & (0.18 < s \leq 1) \end{cases} \quad (8)$$

式中, s 为滑移率,表示汽车在制动过程中车轮滑动成分所占的比例,在此以制动踏板位移 x_b 粗略表示滑移率,即假设 $s = x_b$ 。

2.1.5 车辆纵向行驶动力学模型

根据汽车驾驶机器人控制的特点和要求,采用简化和局部线性化的方法,在合理简化假设的前提下,建立了如图3所示的汽车纵向动力学模型。

汽车行驶过程中要受到作用于汽车的各种外力,即驱动力与行驶阻力。其中,驱动力是由发动机扭矩经离合器、变速器传至驱动轮上得到的,而行驶阻力包括滚动阻力、空气阻力、加速阻力和坡度阻力。车辆行驶动力学方程为

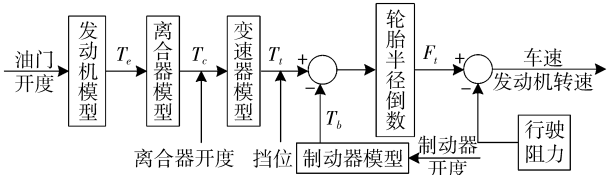


图3 汽车纵向动力学模型框图

Fig.3 Diagram of vehicle longitudinal dynamics model

$$F_t - F_f - F_w - F_i - F_b = \delta ma \quad (9)$$

即

$$\frac{k_c T_e i_g i_0 \eta_T}{r} - \left(mgf + \frac{C_D A}{21.15} v^2 + mgi \right) - F_b = \delta ma \quad (10)$$

其中 $F_t = k_c T_e i_g i_0 \eta_T / r$ $F_f = mgf$
 $F_w = C_D A v^2 / 21.15$ $A = l_{front} l_{height}$
 $\delta = 1 + \sum I_w / (mr^2) + I_f i_g^2 \eta / (mr^2)$
 $f = \begin{cases} 0.0165[1 + 0.01(v - 50)] & (\text{轿车}) \\ 0.0076 + 0.000056v & (\text{货车}) \end{cases}$

式中 r ——轮胎半径 F_t ——驱动力
 F_f ——滚动阻力 F_w ——空气阻力
 f ——滚动阻力系数
 v ——车速 C_D ——空气阻力系数
 A ——车辆迎风面积
 l_{front} ——汽车前轮距
 l_{height} ——汽车高度 F_i ——坡度阻力
 i ——道路坡度
 δ ——汽车旋转质量换算系数
 I_w ——车轮转动惯量
 I_f ——发动机飞轮转动惯量

由于 I_w 、 I_f 的精确测量比较困难,因此可按经验公式来估算: $\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 i_g^2$, 这里取 $\delta_1 \approx \delta_2 = 0.04$ 。

根据 GB 18352.2—2001《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(Ⅱ)》中的要求,在排放耐久性试验中,只需要模拟汽车在平直道路上行驶过程中所受的各种阻力,因此不存在坡度阻力。用于汽车驾驶机器人的车辆纵向动力学方程为

$$F_t - F_f - F_w - F_b = \delta m \frac{dv}{dt} \quad (11)$$

即 $\frac{k_c T_e i_g i_0 \eta_T}{r} - mgf - \frac{C_D A}{21.15} v^2 - F_b = \delta m \frac{dv}{dt}$ (12)

式(12)为汽车驾驶机器人驾驶性能评价半实物仿真平台的核心,在系统实现过程中,通过四阶龙格-库塔法求解得到此微分方程的数值解。

2.2 半实物仿真平台系统设计

汽车驾驶机器人驾驶性能评价半实物仿真平台总体方案如图4所示。

汽车驾驶机器人与半实物仿真平台是两个独立

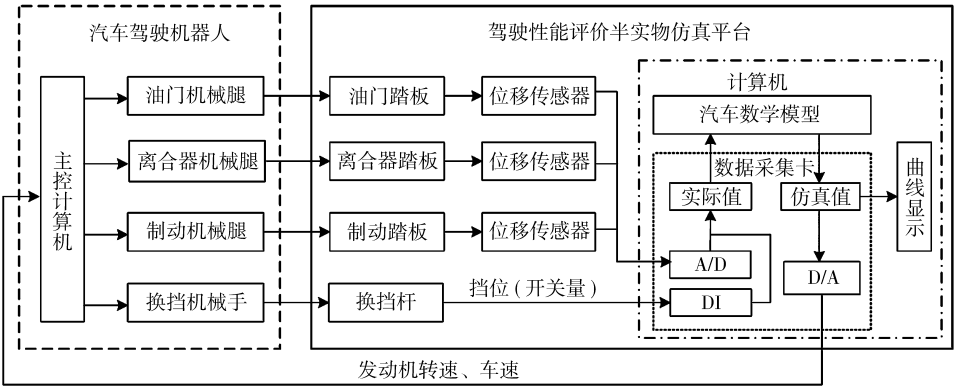


图 4 半实物仿真平台总体方案框图

Fig. 4 Diagram of semi-physical simulation platform general scheme

的系统,驾驶机器人可不用作任何改动就可在半实物仿真平台上进行驾驶操作。驾驶性能评价半实物仿真平台可以模拟实际车辆的工作状态,输入信号为油门踏板位置、离合器踏板位置、制动踏板位置以及挡位,输出信号为发动机转速和车速。在此,实际车辆由汽车纵向动力学数学模型代替,根据汽车纵向动力学数学模型完成从输入到输出的非线性映射。该平台通过数据采集卡获取油门踏板、离合器踏板、制动踏板的位置,以及当前所处的挡位,接着把采集到的数据(实际值)传至上位机,通过汽车纵向动力学数学模型的计算处理后,实时输出发动机转速和车速(仿真值),这两个值通过高速 D/A 转换变成模拟量信号。汽车驾驶机器人主控计算机根据采集到的发动机转速和车速数据,计算并实时地输出执行机构指令信号给油门机械腿、离合器机械腿、制动机械腿和换挡机械手,以操纵油门踏板、离合器踏板、制动踏板和换挡杆。

半实物仿真平台硬件原理框图如图 5 所示。

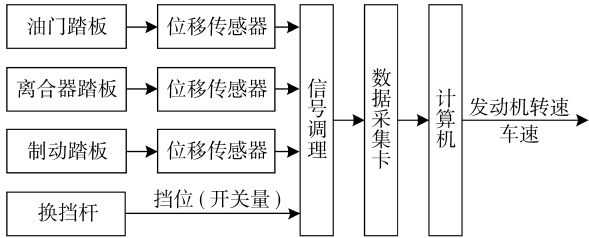


图 5 半实物仿真平台硬件原理框图

Fig. 5 Hardware principle diagram of semi-physical simulation platform

考虑到传感器的测量范围、精度和安装测量的方便性,选用差动变压器式位移传感器测量该平台油门、制动、离合器踏板的位置。换挡杆操纵带有磁性的运动机构导通相应的检测电路,实现挡位开关信号的输出。考虑到系统的精度、输入输出接口等因素,选用 PCI-6011 数据采集卡。

该平台的软件结构如图 6 所示。

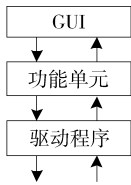


图 6 半实物仿真平台软件流程图

Fig. 6 Software flow chart of semi-physical simulation platform

图 6 中,最底层为数据板卡的驱动、文件操作等单元,分别实现数据采集和参数保存工作;中间为功能层,依据汽车结构分别设计了发动机单元、变速器单元、离合器单元、制动器单元、车轮单元、车身单元等功能单元;最上层为用户操作接口(GUI),用户可以通过界面直接操作各功能单元,从而实现对整车的操作,比如启动、停止、换挡等。软件通过设定不同的车辆参数实现对不同汽车的模拟,以达到代替实际车辆的目的。车辆设定参数主要有:①发动机特性参数,包括发动机最高转速、发动机最大功率、发动机最大功率对应的转速、发动机最大扭矩等。②车辆尺寸参数,包括车辆的长度、宽度、高度和前轮距等。③车辆传动系参数,包括变速器挡位数、各挡传动比、主减速比、传动系机械效率等。④其他参数,包括轮胎滚动半径、风阻系数、车辆整备质量等。

3 试验验证

为了验证所提出的汽车驾驶机器人驾驶性能评价半实物仿真平台的有效性,分别进行了驾驶工况模拟试验和汽车排放耐久性试验。本文的汽车驾驶机器人是在底盘测功机上作室内汽车试验用的,在作试验时方向盘由锁紧装置固定住。按照 GB 18352.3—2005《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ阶段)》的要求,在汽车试验中对驾驶机器人的基本要求是能够跟踪预先设定的循环行驶工况,即设定的车速-时间曲线,实现对给定目

标车速的跟踪。试验车辆为 FORD Focus 2.0 MT, 其车辆尺寸和汽车性能参数如表 1 所示。

表 1 试验车辆参数
Tab.1 Test vehicle parameters

参数	数值
长×宽×高/mm×mm×mm	4 480×1 840×1 500
前轮距/mm	1 535
最高车速/km·h ⁻¹	168
发动机最大功率/kW (r/min)	104 (6 000)
发动机最大扭矩/N·m (r/min)	180 (4 000)
轮胎滚动半径/mm	308
发动机最高转速/r·min ⁻¹	6 800
主减速器速比	4.07
整备质量/kg	1 470
传动比	1 挡 3.417
	2 挡 2.136
	3 挡 1.448
	4 挡 1.028
	5 挡 0.805
风阻系数	0.31

3.1 驾驶工况模拟试验

为了验证所建立的汽车驾驶机器人驾驶性能评价半实物仿真平台的有效性,对该平台进行了起步、换挡等工况下的仿真模拟。汽车驾驶机器人驾驶性能评价半实物仿真平台实物图如图 7 所示。半实物仿真平台的车速与油门开度之间的关系如图 8 所示。半实物仿真平台相当于一辆车,驾驶机器人要开这辆“车”,驾驶机器人给出油门开度,而仿真平台给出车速。



图 7 驾驶机器人驾驶性能评价半实物仿真平台实物图
Fig.7 Physical map of semi-physical simulation platform for driving performance evaluation of robot driver

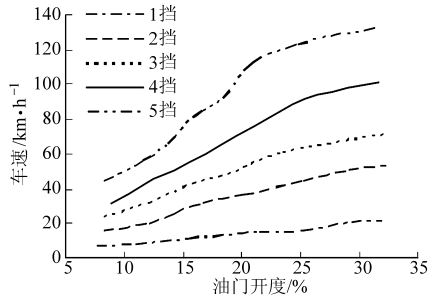


图 8 车速与油门开度的关系曲线
Fig.8 Curves of vehicle speed and throttle opening

汽车驾驶机器人操纵半实物仿真平台的起步过程曲线如图 9 所示,这里油门开度、离合器开度由安装在油门、离合器机械腿上的位移传感器测得,传感器输出电压经标定后,得到油门开度及离合器开度,油门及离合器机械腿未踩下时行程为零,踩到底时行程为 100%。驾驶机器人给出油门开度和离合器开度,而仿真平台给出车速。由图 9 可以看出,离合器开度为 60% 时产生车速,说明离合器的半接合点是 60%,与模型假设的半接合点一致。

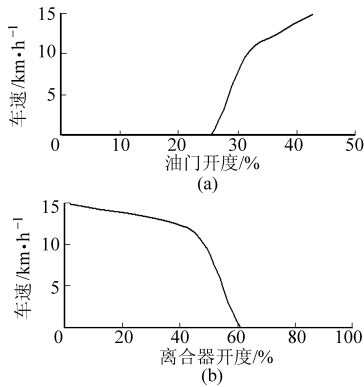


图 9 起步过程曲线
Fig.9 Curves of starting process
(a) 油门开度与车速关系
(b) 离合器开度与车速关系

图 10 为汽车驾驶机器人操纵半实物仿真平台进行试验的换挡过程曲线。

从图 10 中可以看出,换挡过程中,离合器先快速踩到底,然后慢慢接合,换挡过程中车速基本保持不变,与驾驶实际车辆保持一致。汽车驾驶机器人操纵该半实物仿真平台平顺地实现了汽车的起步、加速、换挡、等速、减速等工况,各工况之间过渡顺利。结果表明,提出的平台能较真实地模拟实际车辆的行驶工况,驾驶机器人驾驶车辆的品质可以借助该平台进行性能评价。

3.2 排放耐久性试验

为了验证半实物仿真平台用于汽车试验时的可行性,根据 GB 18352.3—2005 的要求,在国家客车质量监督检验中心(重庆)BOCO NJ 150/80 型水冷

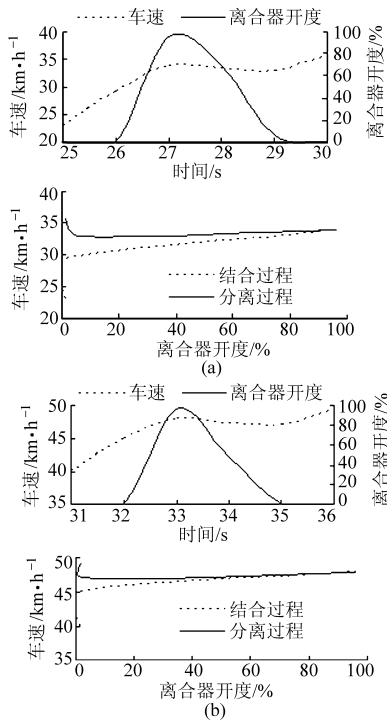


图 10 换挡过程曲线
Fig. 10 Curves of shifting process
(a) 2 挡升 3 挡 (b) 3 挡升 4 挡

式电涡流底盘测功机上由驾驶机器人对 Ford FOCUS 2.0 L 5 挡手动变速器汽车进行长时间的排放耐久性 V 型试验。驾驶机器人在试验车辆上的安装图及试验现场图如图 11 所示。排放耐久性试验 64 km/h 循环行驶工况由驾驶机器人操纵半实物仿真平台和实际车辆进行车速跟踪试验结果如图 12 所示。

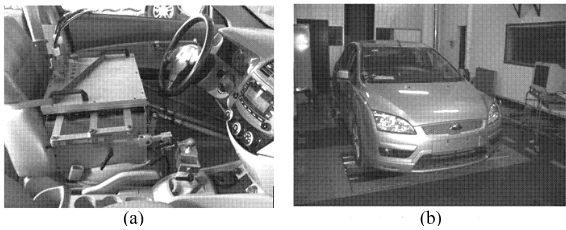


图 11 驾驶机器人在试验车辆上的安装图及试验现场图
Fig. 11 Vehicle robot driver fixed on test vehicle and test site map
(a) 驾驶机器人在试验车辆上的安装图
(b) 排放耐久性试验现场图

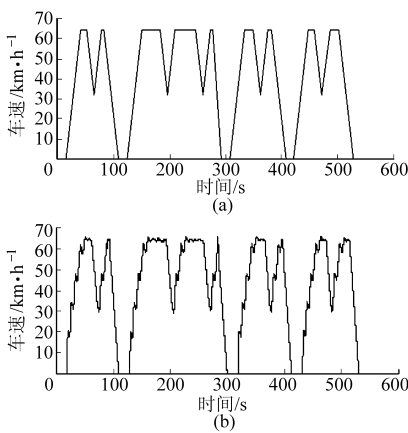


图 12 排放耐久性试验 64 km/h 车速循环跟踪结果对比
Fig. 12 Comparison of speed tracking results for durability emission test of 64 km/h driving test cycle
(a) 驾驶机器人操纵半实物仿真平台
(b) 驾驶机器人操纵实际试验车辆

通过图 12 的试验结果对比,可以看出汽车驾驶机器人操纵半实物仿真平台和实际试验车辆都取得了良好的车速跟踪结果,车速跟踪控制精度满足国家汽车试验标准的要求。由于半实物仿真平台中汽车纵向动力学数学模型对汽车各个组成部分进行了简化,所以该平台的车速循环跟踪结果比实车的车速循环跟踪结果更平滑,更接近试验标准的要求。采用该平台完全可以代替实际车辆,驾驶机器人驾驶车辆的品质可以通过该半实物仿真平台进行评价,避免了在实际车辆上调试时存在的危险。

4 结束语

提出了汽车驾驶机器人驾驶性能评价半实物仿真平台,该平台中实际车辆由汽车纵向动力学数学模型代替,汽车驾驶机器人不用做任何改动就可在该平台上进行驾驶操作。仿真和实车试验结果表明,所提出的平台完全可以代替实际车辆,能较真实地模拟实际车辆的行驶工况,驾驶机器人驾驶车辆的品质可以借助这个平台进行性能评价。根据所提出的仿真平台,通过易于获取的车辆有关参数,能快速便捷地获得车辆的动力特性,以便于深入了解试验车辆性能,为汽车试验的顺利开展提供可靠的参考数据。

参 考 文 献

1 Wolfgang Thiel, Stefan Grof, Gunter Hohenberg, et al. Investigations on robot driver for vehicle exhaust emission measurements in comparison to the driving strategies of human drivers[C]. SAE Paper 982642, 1998.
2 Hazim Namik, Tokushu Inamura, Karl Stol. Development of a robotic driver for vehicle dynamometer testing [C] // Proceedings of 2006 Australasian Conference on Robotics and Automation. Auckland, New Zealand, 2006: 1 ~ 9.
3 Shoal S, Zybur J P, Grimaudo D W. Robot driver for guidance of automatic durability road test vehicles[C] // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, Belgium, 1998: 1 767 ~ 1 772.

- 4 Kai Muller, Werner Leonhard. Computer control of a robotic driver for emission tests[C] // Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation. San Diego, America, 1992; 1 506 ~ 1 511.
 - 5 陈刚, 张为公, 龚宗洋, 等. 汽车驾驶机器人多机械手协调控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(9): 1 836 ~ 1 840.
Chen Gang, Zhang Weigong, Gong Zongyang, et al. Coordinated control of multiple manipulators for vehicle robot driver[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(9): 1 836 ~ 1 840. (in Chinese)
 - 6 张为公, 陈晓冰. 汽车驾驶机器人关键技术研究[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26(1): 20 ~ 23.
Zhang Weigong, Chen Xiaobing. Key technologies of vehicle robot driver[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2005, 26(1): 20 ~ 23. (in Chinese)
 - 7 Chen Xiaobing, Zhang Weigong. Robot driver for vehicle durability emission test on chassis dynamometer[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2005, 21(1): 33 ~ 38.
 - 8 Cho D, Hedrick J K. Automotive powertrain modeling for control[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1989, 111(4): 568 ~ 576.
 - 9 蔡忠法, 章元安. 汽车模拟驾驶模型与仿真的研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2002, 36(3): 327 ~ 330.
Cai Zhongfa, Zhang Anyuan. Study of automobile emulated driving model and simulation[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2002, 36(3): 327 ~ 330. (in Chinese)
 - 10 侯德藻, 高峰, 李克强, 等. 应用于汽车主动避撞系统的车辆纵向动力学模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(2): 258 ~ 261.
Hou Dezao, Gao Feng, Li Keqiang. Vehicle longitudinal dynamic model for vehicle collision avoidance systems[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2004, 44(2): 258 ~ 261. (in Chinese)
 - 11 陈刚, 张为公, 常思勤. 汽车驾驶机器人模糊神经网络换挡控制方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 6 ~ 11.
Chen Gang, Zhang Weigong, Chang Siqin. Shift control method of vehicle robot driver based on fuzzy neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 6 ~ 11. (in Chinese)
-

(上接第 47 页)

参 考 文 献

- 1 刘凤国, 王晓燕, 封士彩. 连通式油气悬挂车辆三种行驶状况下数学模型的建立[J]. 机械制造与自动化, 2006(3): 36 ~ 40.
Liu Fengguo, Wang Xiaoyan, Feng Shicai. The math-models found of interconnect oil-air suspension vehicle in three exercise state [J]. Machine Building & Automation, 2006(3): 36 ~ 40. (in Chinese)
- 2 王玉安. 连通式油气悬挂装置的设计及性能分析[J]. 机械制造与自动化, 2008, 37(5): 46 ~ 48.
Wang Yu'an. Design and performance analysis for an advanced suspension in vehicles[J]. Machine Building & Automation, 2008, 37(5): 46 ~ 48. (in Chinese)
- 3 王汉平, 张聘义, 邵自然. 混合连通式油气悬挂重型车辆的振动性能研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2003(4): 7 ~ 11.
Wang Hanping, Zhang Pinyi, Shao Ziran. The vibration characteristics of the heavy vehicle with composite interconnecting oil-air suspension[J]. Missiles and Space Vehicles, 2003(4): 7 ~ 11. (in Chinese)
- 4 杜恒, 魏建华, 孔晓武. 连通式油气悬架升降同步控制[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 29 ~ 32.
Du Heng, Wei Jianhua, Kong Xiaowu. Lifting synchronization control for interconnected hydro-pneumatic suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 29 ~ 32. (in Chinese)
- 5 Rosam N, Darling J. Development and simulation of a novel roll control system for the interconnected hydragas suspension [J]. Vehicle System Dynamics, 1997, 27(1): 1 ~ 8.
- 6 Zhang Nong, Wade Smith, Jeku Jeyakumaran. Hydraulically interconnected vehicle suspension: background and modeling [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(1): 17 ~ 40.
- 7 Wade Smith, Zhang Nong, Jeku Jeyakumaran. High frequency parameter sensitivity in hydraulically interconnected suspensions[C] // Australasian Congress on Applied Mechanics, Brisbane, Australia, 2007.
- 8 John Woodrooffe. Heavy truck suspension dynamics: methods for evaluating suspension road friendliness and ride quality [C]. SAE Paper 962152, 1996.