

# ABS 动态模拟实验台的道路路面模拟

王旭东, 张超, 刘健

(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**利用 ABS 动态模拟实验台为 ABS 控制器提供较为真实的外部环境,对实验台参数进行设置,使之能够模拟多种路面的附着系数,通过对实验台实时运行的数据与控制器的实时工作状态相对比来验证路面识别方法的正确性,并深入分析了实验台路面模拟的原理,将实验台控制参数与实际轮胎与地面的附着系数相对应,从而为检测各种路面情况下 ABS 控制器的工作状态提供依据。

**关键词:**ABS 实验台; 路面模拟; 摩擦系数

**中图分类号:** U467.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2683(2012)01-0039-04

## Road Simulation of ABS Dynamic Simulation Test Stand

WANG Xu-dong, ZHANG Chao, LIU Jian

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** A virtual environment was created to approximate physical conditions for Anti-Lock Braking System (ABS) by using ABS dynamic simulation test stand, which can simulate various road friction coefficients by setting the exciting current of the magnetic clutch; the accuracy of the road simulation method can be verified by the comparison between the real-time data from the user interface and the real-time working status of the controller. This paper analyses the road simulation method principle which corresponds the exciting current of magnetic clutch with the road friction coefficient, so as to provide a basis for testing the working status of ABS under various road conditions.

**Key words:** ABS test stand; road simulation method; friction coefficient

## 0 引言

目前 ABS 已成为大多数车型的标准配置,这导致了国内汽车市场对 ABS 的需求迅速增加. 为了保证 ABS 的产品质量,缩短研发周期,降低研发成本,相比道路试验而言采用室内试验是更为合理的选择. ABS 室内试验代替实际道路试验,具有不受环境条件限制,可控性好,安全可靠等优点<sup>[1]</sup>. 汽车上的 ABS 控制系统运行在情况复杂多变的路面下,为保证制动时车轮不抱死,同时又能达到最佳的制动效果,ABS 必须针对多种路面情况采取相应的控制

策略,为了检测 ABS 能够在不同的路面上正常工作,并且充分利用不同路面提供的最大附着系数,本文针对上述问题设计了 ABS 动态模拟实验台,利用室内台架系统模拟实际车辆外部环境,将实验台参数与实际轮胎与地面的附着系数相对应,可以更加真实准确的对控制器的性能进行检测.

## 1 实验台系统结构

### 1.1 实验台机械结构及工作原理

实验台的基础结构如图 1 所示. 利用电机带动飞轮旋转到一定转速,用飞轮旋转时的转动惯量来

收稿日期: 2010-09-02

作者简介: 王旭东(1958—),男,教授,博士生导师;

张超(1985—),男,硕士研究生, E-mail: zhangchao9900@163.com.

模拟实车在此速度下的平动动能. 飞轮一侧通过联轴器与扭矩传感器相连, 扭矩传感器可以同时车速和扭矩进行测量. 利用原车制动盘上安装的轮速传感器来测量四轮轮速. 在测速方面实验台计算车轮滑移率的方法要优于实际车辆, 实际车辆是利用轮速来估算车速, 从而得到滑移率, 而在实验台上车速与轮速分开, 可以对滑移率更精确的计算. 磁粉离合器是整个系统的核心部件, 控制激磁电流的大小, 便可轻易地控制主从动轴之间传递的转矩, 该设备的主要用途是用来模仿地面与轮胎之间的摩擦力, 通过对四台磁粉离合器分别控制, 可在制动动作发生后在四个车轮上产生转速差, 进而为 ABS 控制器的工作创造外界条件.

飞轮转动惯量的计算方法如下:

$$I_F = \frac{\beta}{1+\beta} \frac{(G_a + \delta G_0) r^2}{2g} \quad (1)$$

$$I_R = \frac{1}{1+\beta} \frac{(G_a + \delta G_0) r^2}{2g} \quad (2)$$

式中:  $I_F$  为前车轮所对应的转动惯量;  $I_R$  为后车轮所对应的转动惯量;  $\delta$  为汽车转动机件当量空车质量系数, 实验中取为 7%;  $G_0$  为汽车额定重量;  $G_a$  为满载重量;  $r$  为车轮滚动半径;  $\beta$  为前后车轮制动力分配比, 具体定义如下:

$$\beta = \frac{F_f}{F_r} \quad (3)$$

式中:  $F_f$  为前轮制动器的制动力;  $F_r$  为后轮制动器的制动力. 由此可见, 所模拟汽车的质量相对应的转动惯量与汽车本身的重量  $G$ 、车轮滚动半径  $r$ 、前后车轮制动力分配比  $\beta$  相关<sup>[9]</sup>.

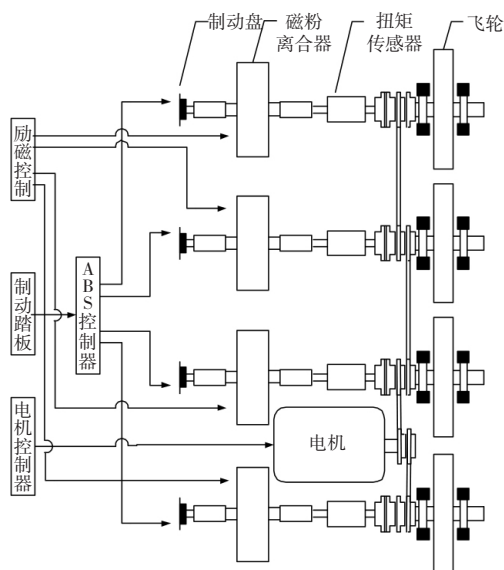


图1 实验台整体结构连接简图

实验台针对捷达王 MK20 - I 型 ABS 控制器进行实验, 车辆满载质量 1 550 kg, 车轮滚动半径 0.28 m, 前后制动力分配比近似为 1:1, 经计算每个飞轮的转动惯量为 33 kg·m<sup>2</sup>. 针对不同车辆可对飞轮进行加减配重, 从而得到不同的转动惯量.

## 1.2 数据采集系统与控制界面

数据采集系统结构如图 2 所示, 它的主要任务是采集 4 个车轮实时的状态信息(包括轮速信号, 车速信号, 压力信号和扭矩信号), 再经过滤波和整形之后送入到单片机内. 单片机将收到的信号做分析运算处理后通过 CAN 总线传输到上位机, 其中在制动过程中单片机还可以根据车速信号计算出刹车距离. 上位机的控制界面是以 LabVIEW™ 软件为设计平台搭建而成的<sup>[9]</sup>, 操作者可以清晰直观的观察实验台的工作情况和制动时 ABS 的工作状态. 而且可以根据操作者的需要灵活的设定路面模式来达到模拟不同的路况环境.

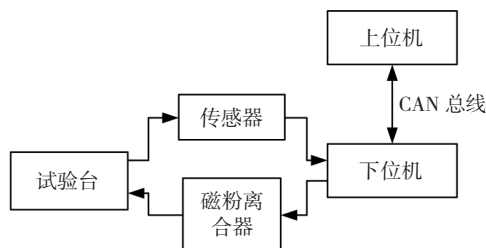


图2 数据采集系统结构图

## 2 路面模拟方法

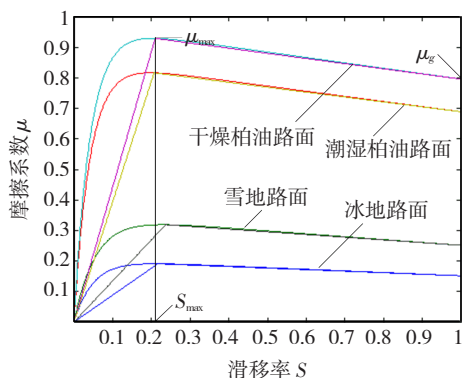
### 2.1 轮胎/路面摩擦模型及车轮模型

汽车抱死时, 车轮线速度为零, 车身速度并不为零, 所以车身与车轮直接存在速度差. 把车身与车轮间产生的速度差称为滑移现象, 一般用滑移率  $S$  来表示滑移的程度, 即

$$S = \frac{v - \omega R}{v} \quad (4)$$

式中:  $v$  为车辆参考速度;  $R$  为车轮滚动半径;  $\omega$  为车轮角速度. 为了模拟实际路面, 需要确定滑移率和摩擦系数的关系.

目前研究中使用得较多的是用简化的双线性模型、Pacejka 模型、Burckhardt 模型、Kiencke 模型来表示轮胎模型轮胎/路面摩擦模型<sup>[9]</sup>. 双线性模型公式物理意义明确, 拟合精确度较高, 较适合计算机模拟, 基于本实验台的实际情况, 本文采用双线性模型模拟各种路面的  $\mu - S$  曲线<sup>[9]</sup>.

图 3  $\mu - S$  的关系曲线

如图 3 所示,各种摩擦系数的  $\mu - S$  曲线均采用分段线性函数近似表示. 函数经过原点、 $\mu_{\max}$  和  $\mu_g$ , 并以  $\mu_{\max}$  为界划分成两部分,这两部分用直线方程表达,即

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{\mu_{\max}}{S_{\max}} S, & S \leq S_{\max} \\ \mu &= \frac{\mu_{\max} - \mu_g S_{\max}}{1 - S_{\max}} - \frac{\mu_{\max} - \mu_g}{1 - S_{\max}} S, & S > S_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为摩擦系数;  $S$  为滑移率;  $\mu_{\max}$  为峰值摩擦系数;  $S_{\max}$  为峰值摩擦系数对应的最佳滑移率;  $\mu_g$  为滑移率为 1 时的摩擦系数.

为了描述的车辆纵向运动,采用整车的四分之一作为模型. 汽车制动情况下的纵向运动的车轮模型可表示为如图 4 所示.

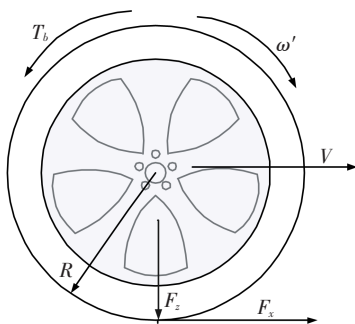


图 4 制动时的车轮模型

根据车轮模型(忽略车轮滚动阻力)有公式<sup>[4]</sup>

$$I\omega' = F_x R + T_b \quad (6)$$

$$F_x = \mu F_z \quad (7)$$

因此

$$\mu = \frac{I\omega' - T_b}{RF_z} \quad (8)$$

制动时车轮共受到两个力的作用,制动力和路面摩擦力,两个力矩的差决定车轮的运动状态. 在实验台上,车轮的制动力与实车相同,而摩擦力则由磁

粉离合器产生,此时磁粉离合器与飞轮之间的扭矩传感器所测量的扭矩值就是摩擦力矩,即:

$$T = I\omega' - T_b \quad (9)$$

即(8)式可写成

$$\mu = \frac{T}{F_z R} \quad (10)$$

式中:  $\omega'$  为车轮角加速度;  $I$  为车轮转动惯量;  $T_b$  为车轮制动力矩;  $R$  为车轮滚动半径;  $F_z$  为车轮垂直载荷.

## 2.2 路面摩擦系数的调节

磁粉离合器是以磁粉为工作介质,以激磁电流为控制方法,达到控制制动或传递转矩目的. 其输出转矩与激磁电流呈良好的线性关系而与转速或滑差无关,并具有响应速度快,结构简单的优点<sup>[4]</sup>.

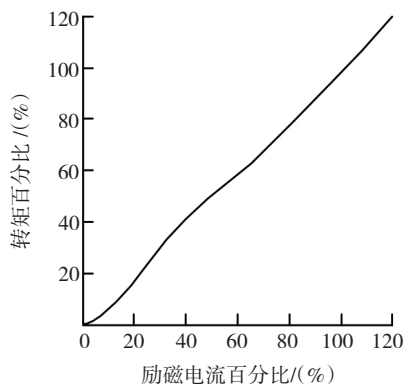


图 5 转矩与励磁电流的关系

转矩与激磁电流的关系如图 5 所示,磁粉离合器传递的转矩值与激磁电流大小近似呈线性关系. 一般情况下,在 5% ~ 95% 的额定转矩内,转矩与激磁电流成正比例线性关系,当激磁电流保持不变时,转矩将会稳定的传递,不受滑差的影响,只要控制电流,即能控制转矩的大小. 因此磁粉离合器的激磁电流与路面摩擦系数呈线性关系.

本实验台使用的磁粉离合器额定转矩为 2 000 N·m,内阻 11 Ω,所以外接电源电压选为 36 V,考虑到器件开通与关断时间,将占空比的可调范围设置在 5% ~ 95% 之间,最高输出电流基本维持在 3 A. 由此可见通过调整 PWM 驱动控制信号的脉宽就可以改变负载两端的电压,从而实现对励磁电流的控制.

基于以上的理论推导和实验台的控制系统,测试人员便可以通过上位机的控制界面设定各种路面. 在制动过程中,上位机根据接收到的滑移率数据来调节磁粉离合器,从而达到对摩擦系数动态模拟的目的.

### 3 实验结果与分析

为了验证实验台模拟实际路面的准确性,我们将路面情况设定为对开路面. 选择柏油(干燥)与雪路面进行实验,即左侧车轮行驶于柏油路面,右侧车轮行驶于雪地路面,制动时模拟车速为 65 km/h. 实验过程中分别对轮缸制动压力、轮速、车速进行了检测,对滑移率进行了计算,实际数据如图 6~9 所示.

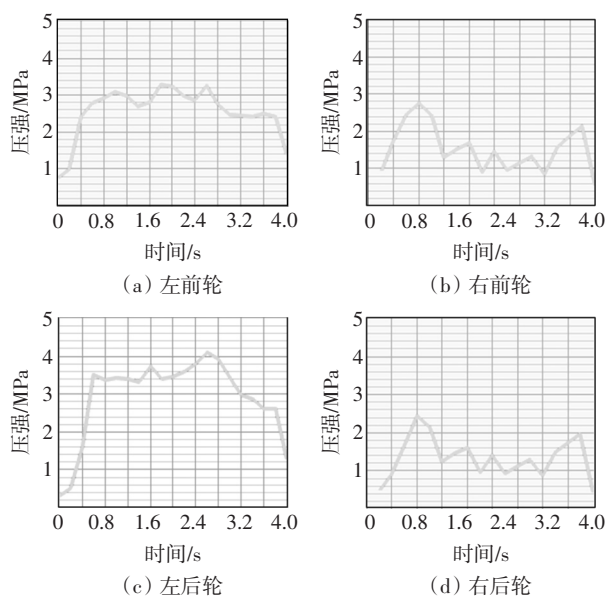


图 6 轮缸制动压力

由图 6 可以看出,轮缸制动压力发生了明显的变化,说明 ABS 起到了防抱死的作用. 特别是从制动压力的大小来看,因为雪地路面的摩擦系数小,车

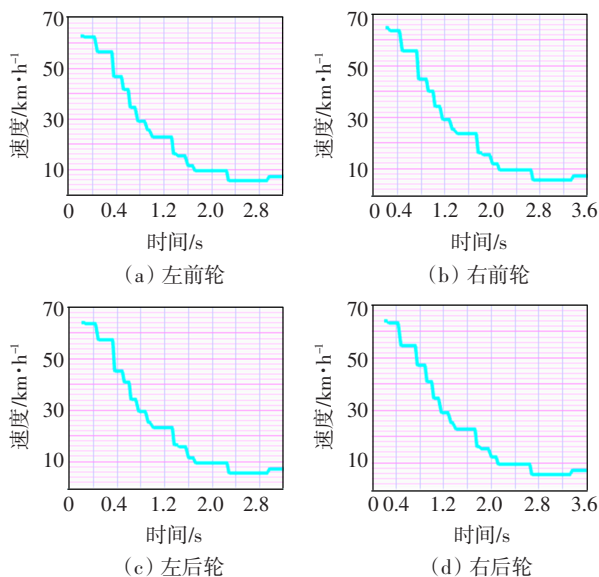


图 7 轮速

轮容易发生抱死,所以雪地路面侧车轮的制动压力明显小于柏油路面侧车轮的制动压力,说明 ABS 控制器是能够识别出实验台所设定的摩擦系数的.

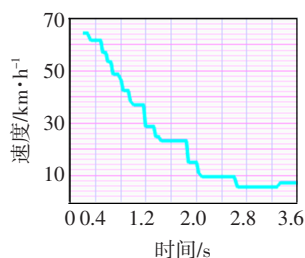


图 8 车速

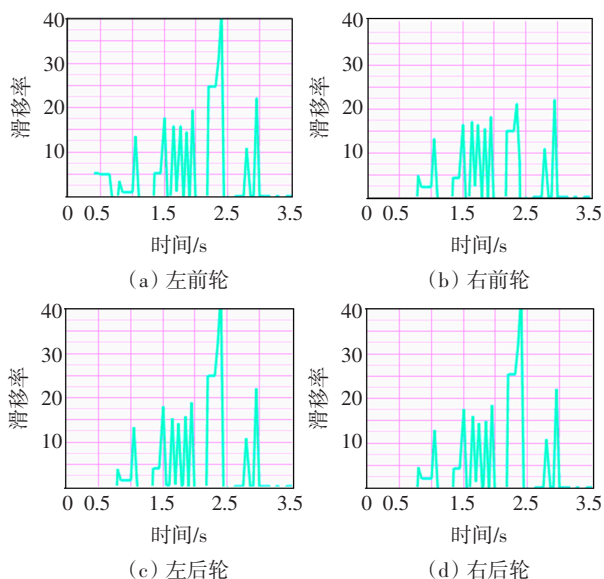


图 9 滑移率

从图 7~9 中可以看出,在整个制动过程中,车速的变化基本相同,而且四轮的滑移率都能控制在 25% 以下,说明 ABS 控制器工作情况正常而且在制动过程中对路面摩擦系数的分析是正确的. 从而验证了路面模拟方法理论推导的正确性和实验台结构设计的合理性.

### 4 结 语

该方法的研究,可以完全满足对 ABS 性能准确、快速、有效检测的要求. 加之与实验台的机械台架部分相结合,对 ABS 进行动态模拟实验,可以部分地替代 ABS 装车路试,从而大大降低实验费用和实验周期,缩短了 ABS 产品的研制周期和研制费用,尤其是摩擦系数可随实验条件的不同做任意修改,更增加了实验的准确性与灵活性. 该系统的开发,具有较高的实用价值和重要的工程意义.

(下转第 49 页)

- [4] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 一种高性能的非线性励磁控制 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 37-42.
- [5] 周雪松, 马幼捷, 何彦民. 复杂系统非线性励磁控制的数字仿真研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 32-35.
- [6] 梁海瑛, 张泾周. 规则自适应模糊 PID 数字电压调节器设计 [J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(3): 664-685, 686.
- [7] 姚骏, 廖勇. 基于全模糊控制器的交流励磁发电机励磁控制系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 36-41.
- [8] MUKHERJEE V, GHOSH S P. Intelligent Particle Swarm Optimized Fuzzy PID Controller for AVR System [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(12): 1689-1698.
- [9] LEANDRO S C. Tuning of PID Controller for an Automatic Regulator Voltage System Using Chaotic Optimization Approach [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 39(4): 1504-1514.
- [10] 姚舜才, 潘宏侠. 粒子群优化同步电机分数阶鲁棒励磁控制器 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 91-97.
- [11] ÅSTRÖM K J, HAGGLUND T. Advanced PID Control [M]. Research Triangle Park, NC: Instruments Society of American, 2005: 158-221.
- [12] ÅSTRÖM K J, HAGGLUND T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning [M]. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995: 179-193.
- [13] WANG Q G, ZHANG Z P, ÅSTRÖM K J, et al. Guaranteed Dominant Pole Placement with PID Controllers [J]. Journal of Process Control, 2009, 19(2): 349-352.

(编辑: 付长缨)

## (上接第 38 页)

- [6] WESTON J, WAKTINS C. Multi-class Support Vector Machines [J]. Technical Report CSD-TR-98-04. Royal Holloway, University of London, Department of Computer Science, 1998, 215(9): 1065-1074.
- [7] YUAN Shengfa, Chu Fulei. Support Vector Machines-based Fault Diagnosis for Turbo-pump Rotor [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(4): 939-952.
- [8] 何学文, 赵海鸣. 支持向量机及其在机械故障诊断中的应用 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(1): 97-101.
- [9] SUGUMARAN V, MURALIDHARAN V, RAMACHANDRAN K I. Feature Selection Using Decision Tree and Classification Proximal Support Vector Machine for Fault Diagnostic of Roller Bearing [J]. Mechanical System and Signal Processing, 2007, 21(2): 930-942.
- [10] 王凯, 张永祥, 李军. 基于支持向量机的齿轮故障诊断方法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(5): 49-51.
- [11] 赵杰文, 呼怀平, 邹小波. 支持向量机在苹果分类的近红外光谱模型中的应用 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 149-152.

(编辑: 付长缨)

## (上接第 42 页)

## 参考文献:

- [1] LI J, YU F, ZHANG J. The Rapid Development of a Vehicle Electronic Control System and Its Application to an Antilock Braking System Based on Hardware-in-the-loop Simulation [J]. J. A. Engineering, 2002, 216(2): 95-105.
- [2] 胡宗梅, 李骏. 客车制动力分配比优化设计与计算 [J]. 公路与汽运, 2008, 4: 1-3.
- [3] 雷振山. LabVIEW 高级编程与虚拟仪器工程应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009: 1-50.
- [4] YI J, ALVAREZ L, HOROWITZ R. Adaptive Emergency Braking Control With Underestimation of Friction Coefficient [J]. IEEE Trans. Control Sys. Tech, 2002, 10(3): 381-392.
- [5] TANELLI M, PIRODDI L, PIURI M, et al. Real-time Identification of Tire-road Friction Conditions [J]. IET Control Theory and Applications, 2009, 3(7): 891-906.
- [6] RABHI A, SIRDIN K M, ELHAJJAJI A. Estimation of Contact Forces and Tire Road Friction [J]. Mediterranean Conference on Control and Automation, Athens, Greece, 2007: 1-6.
- [7] 张光荣. 磁粉离合器和磁粉制动器的结构、性能及选用 [J]. 机电工程技术, 2004, 33(10): 77-79.

(编辑: 温泽宇)