金属带式无级变速器硬件在环仿真系统*

安　颖[1]　宋传学[1]　高　帅[1]　刘金刚[2]
(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130025; 2. 湘潭大学机械工程学院, 湘潭 411105)

【摘要】 采用系统辨识方法,建立了金属带式无级变速器(CVT)速比控制电磁阀、夹紧力控制电磁阀和离合器控制阀响应模型,并采用试验数据与理论分析相结合的方式建立了 CVT 速比响应模型与发动机及整车的响应模型。在该模型基础上,建立了 CVT 整车系统硬件在环仿真测试台。采用某国产 CVT 样车进行了实车试验,并将与实车试验相同的控制参数施加到模型上,观察模型的响应,与实车响应进行对比分析。结果表明,该硬件在环系统能够准确再现 CVT 的各项响应特性,可以利用该仿真系统进行控制策略和故障诊断系统的开发。

关键词: 无级变速器　硬件在环仿真　系统辨识
中图分类号: U467　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2011)11-0027-05

Hardware-in-the-loop Simulation System for Belt Type Continuously Variable Transmission

An Ying[1]　Song Chuanxue[1]　Gao Shuai[1]　Liu Jin'gang[2]
(1. *College of Automobile Engineering*, *Jilin University*, *Changchun* 130025, *China*
2. *School of Mechanical Engineering*, *Xiangtan University*, *Xiangtan* 411105, *China*)

Abstract

Use the system identification to get the mathematic model of ratio-control-valve, clamping-force-valve and the clutch-control-valve, and then the CVT ratio response model, engine model and the whole vehicle model were set up by combining the theory and the experimental study. Based on the whole developed model, the hardware-in-the-loop test bench was set up. With the test data of one domestic CVT prototype vehicle taken as the example to verify the developed hardware-in-the-loop test system, comparative results between model response and the real vehicle prototype response show that the developed hardware-in-the-loop test bench can reflect all the characteristics of CVT vehicle. Therefore, the proposed hardware-in-the-loop test bench can be used for developing control strategy and diagnostic system.

Key words　Continuously variable transmission, Hardware-in-the-loop simulation, System identification

引言

作为一种摩擦传动方式,金属带式无级自动变速器(belt type continuously variable transmission,简称 CVT)的传动效率低于齿轮传动。CVT 车辆的经济性和动力性来自动力总成的匹配优化,即控制系统的控制策略和标定参数的合理性。

在传统的开发模式下,CVT 控制策略和控制参数的制定要进行大量的实车试验和标定才能够完成。在 CVT 样机完成之前,控制策略的调试无法同步进行,不仅延长了开发周期,而且一些极限工况的验证也难以实现。为解决这一问题,本文搭建 CVT 硬件在环仿真试验系统,并利用实车试验数据对本系统的准确性进行验证。

收稿日期: 2011-03-02　修回日期: 2011-06-22
* 国家自然科学基金资助项目(50905152)
作者简介: 安颖,博士生,主要从事汽车无级自动变速器研究,E-mail: an05131026@sina.com

1 在环仿真系统的硬件实现

该仿真系统主要由硬件和虚拟计算模型两部分组成。利用计算机接口连接实际硬件和仿真软件[1],并通过仿真模型模拟 CVT 变速器、车辆的运行环境和对控制信号的响应。

实际硬件系统主要包括 TCU (transmission control unit)、转速模拟电动机、转速传感器、压力传感器、线束和 PCI 输入输出采集卡。

计算机仿真模型主要包含:发动机模型、液压系统模型、CVT 机械系统模型和速比响应模型。

整个硬件在环仿真系统的结构如图 1 所示。

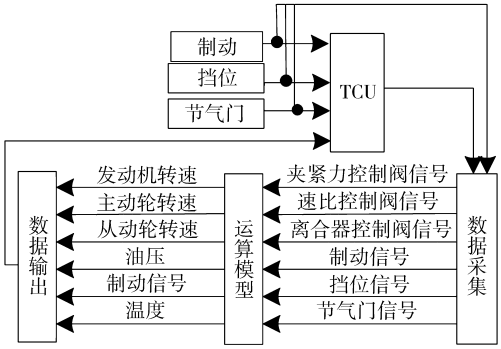

图 1 硬件在环仿真试验台原理图

Fig. 1 Architecture of hardware-in-the-loop test bench

2 硬件在环仿真系统模型

根据整车的结构,采用模块化的建模思想,将整个系统划分为:驾驶输入模块、液压模块、速比响应模块、CVT 机械系统模块和整车动力学模块等几部分,各部分分别包含若干子系统。子系统之间通过运行参数和控制参数链接,构成一套完整 CVT 整车模型,作为虚拟控制对象。

2.1 驾驶输入模型

在仿真过程中,采用了实车试验记录的驾驶员操作信号作为物理模型的输入激励。

试验过程记录驾驶员输入信号,其中包括换挡信号、制动信号、节气门信号、经济/动力模式选择信号、手动/自动模式选择信号。记录时间间隔为 0.015 s,与仿真步长间隔一致。

将试验信号作为输入,不仅可以使仿真过程更加接近实车操作,同时可以对比仿真输出和实车输出信号,用以验证物理模型的准确性。

2.2 发动机模型

最常用的发动机模型描述方法是利用发动机的稳态试验数据,构造发动机稳态输出转矩、节气门开度和发动机转速之间的 MAP 图。本文利用某国产发动机的试验数据构造关于发动机节气门开度和发动机转速的扭矩输出模型,如图 2 所示。

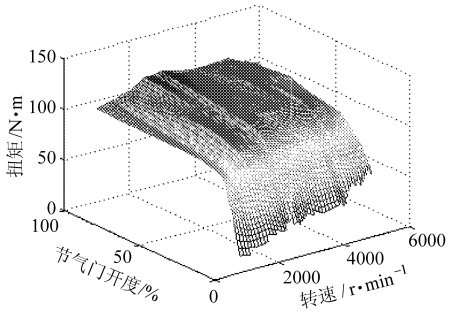

图 2 某国产发动机 MAP 图

Fig. 2 Map of one domestic engine

同时,根据发动机的惯性特性,采用一阶滞后环节近似仿真其动态特性[2~3]。因此,发动机的动态输出转矩表示为

$$T_e = e^{-\tau s}\frac{1}{k_\tau + 1}T_s(\alpha, \omega_e) \tag{1}$$

其中 T_s——发动机稳态输出转矩

T_e——发动机非稳态工况下的输出转矩

α——节气门开度

ω_e——发动机输出转速

k_τ——动态特性拟合系数

s——拉式变换因子 τ——滞后时间

2.3 CVT 液压系统响应模型

本文中的 CVT 采用电液控制模式,其中液压系统原理如图 3 所示,夹紧力控制阀控制从动油缸的压力,速比控制阀控制主动油缸的压力,油泵采用发动机直接驱动的摆线转子泵。

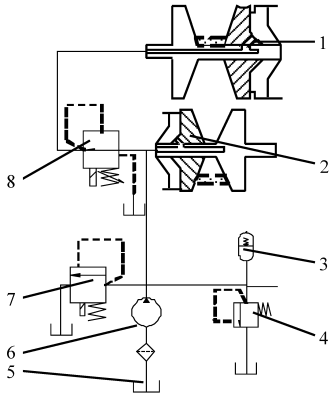

图 3 CVT 液压系统原理图

Fig. 3 Theory diagram of CVT hydraulic system

1. 主动带轮油缸 2. 从动带轮油缸 3. 蓄能器 4. 安全阀 5. 储油器 6. 油泵 7. 夹紧力控制阀 8. 速比控制阀

为了准确模拟液压系统在一定控制信号输入下的响应,需要建立该液压系统的数学模型。但液压系统受到很多因素的影响,包括阀结构参数,电磁铁的电磁特性,油液和管道的弹性、阻尼,液压缸的泄漏量等性能参数,并且随着使用条件的变化,这些参数都会发生较大的变化。

针对这种机理比较复杂或者机理不清晰的复杂系统，采用白箱建模（即机理建模）的方式难度较大，因此本文采用系统辨识方法[4~5]。

以受控于夹紧力控制阀的从动油缸压力为例，输入控制信号为夹紧力控制阀线圈的占空比信号 $V_{sec}(t)$，输出信号为 CVT 从动油缸内的压力 $p_{sec}(t)$。同时从动油缸压力还受到油泵转速、速比控制阀控制信号的影响，因此将 $V_{sec}(t)$、发动机转速 $n_{pump}(t)$ 和速比控制阀控制信号 $V_{pri}(t)$ 作为系统的输入信号，$p_{sec}(t)$ 作为系统的输出信号。经过采样后输入输出信号离散为 $V_{sec}(k)$、$n_{pump}(k)$、$V_{pri}(k)$ 和 $p_{sec}(k)$ 4 个数值序列。

时序理论方法是系统辨识中建立系统差分方程的一种分析方法，即采用随机信号作为系统的输入，检测相应的输出，并通过合适的参数估计，从而获得系统的差分方程。从动油缸压力响应系统是一个多输入-单输出系统，系统有 3 个输入和 1 个输出，因此采用 n 阶差分方程表示为

$$y(k) = \sum A_i y(k-i) + \sum B_i u(k-i) \quad (2)$$

其中　$y(k) = p_{sec}(k)$

$$u(k) = [\, n_{pump}(k) \quad V_{sec}(k) \quad V_{pri}(k) \,]'$$

引入单位时延算子 z^{-1}，系统的 ARMAX 模型表示为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) \quad (3)$$

其中　$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_n z^{-n}$

$$B(z^{-1}) = B_0 + B_1 z^{-1} + \cdots + B_n z^{-n}$$

式中　a_1、…、a_n——自回归参数

B_1、…、B_n——滑动平均参数

为了使系统产生一个满足辨识条件的动态过程，首先构建伪随机序列替代理想白噪声序列，驱动夹紧力控制阀获得从动油缸压力原始数据，如图 4 所示。

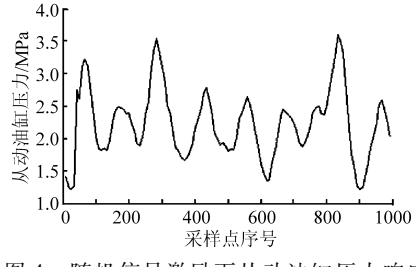

图 4　随机信号激励下从动油缸压力响应

Fig. 4　Pressure response under stimulation of random signals

经过参数辨识，得到 CVT 夹紧力控制系统的 ARMAX 数学模型，为了验证建立的 CVT 夹紧力控制系统数学模型的精确性，在同样控制参数的作用下，将仿真和试验结果进行了比较，响应曲线如图 5 所示。

同理，采用系统辨识的方法对主动油缸压力响应模型进行辨识，将辨识模型的仿真结果与试验数据进行对比，如图 6 所示。

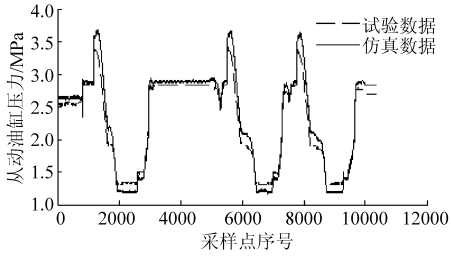

图 5　压力控制阀模型响应和试验结果比较

Fig. 5　Comparison between the pressure-control-valve model response and the test results

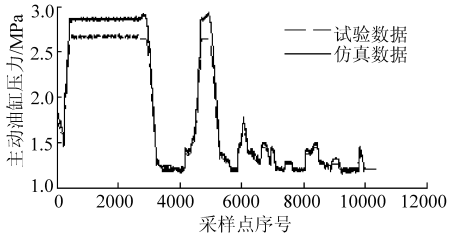

图 6　速比控制阀压力模型压力响应与试验结果比较

Fig. 6　Comparison between ratio-control-valve model response and the test results

从图中可以看出所建立的数学模型的响应与试验结果有很好的一致性。

2.4　速比响应模型

金属带式无级变速传动系统的工作状态由主从动油缸压力、输入转矩、输入转速及速比来描述[6~9]。稳态下，主、从动带轮的压力保持平衡。当主动压力、从动压力、输入转矩、输入转速等因素中任何一个参数变化时，平衡条件将被打破。试验结果表明，速比变化率 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 与当前主动油缸压力 p_{pri} 和使系统平衡的主动油缸压力 p_{pri}^* 之差、输入转速 n_{in}、速比 i 之间的关系可以表示为

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = k_i n_{in}(p_{pri} - p_{pri}^*) \quad (4)$$

式中　k_i——速比影响系数

由于影响速比变化率的因素较多，难以通过理论计算的方式来建立速比响应模型，因此本文采取了基于试验数据的建模方法。

要建立速比响应模型，首先要得到速比影响系数 k_i。由于 k_i 与速比唯一相关[7]，因此采用试验方法得到该系数与速比的对应关系。保持输入转速、输入扭矩、从动压力不变，阶梯改变主动油缸压力，记录速比响应过程，并通过试验数据进行分析，提取 k_i 与速比之间的关系，如图 7 所示。

依次改变输入扭矩，分别得到输入扭矩在 40 ~ 120 N·m 之间的主、从动油缸压力平衡图，以40 N·m

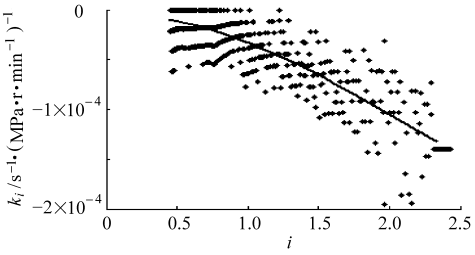

图 7 速比与速比影响系数之间的关系

Fig. 7 Ratio change factor with the ratio

输入扭矩试验结果为例,如图 8 所示。通过查表插值,得到某一状态下,保持速比所需的主动缸平衡压力 p^*_{pri}。

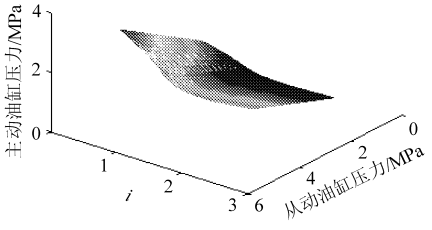

图 8 主从动油缸压力平衡图

Fig. 8 Pressure equilibrium between primary cylinder and the secondary cylinder

根据上述试验数据并结合式(4),建立速比变化率的计算模型,并与实车试验速比变化率进行比较,如图 9 所示。

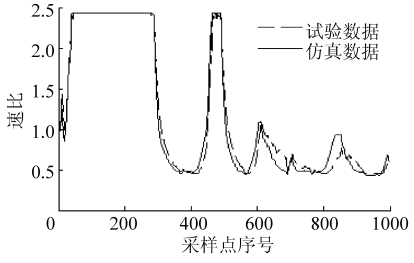

图 9 模型速比响应与实车速比响应比较

Fig. 9 Ratio response comparison between model and vehicle test

2.5 CVT 数学模型

金属带式无级变速器的传动模型,表明了主从动带轮和金属带的输入输出动态特性,忽略金属带传动特性的影响,简化其模型为

$$I_e \dot{\omega}_p = T_e - T_{in} \tag{5}$$

$$I_s \dot{\omega}_s = T_{in} i_{cvt} \eta - T_{out}/i_0 \tag{6}$$

$$i_{cvt} = \frac{\omega_e}{\omega_s} \tag{7}$$

$$\dot{\omega}_e = \dot{\omega}_s i_{cvt} + \omega_s \mathrm{d}i_{cvt}/\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中 T_{in}——CVT 主动带轮输入扭矩

T_{out}——CVT 从动带轮输出扭矩

I_e——主动带轮的等效转动惯量

I_s——从动带轮的等效转动惯量

i_{cvt}——金属带传动速比

i_0——主减速器传动比

ω_s——从动带轮角速度

η——金属带传动效率

2.6 整车动力学模型

整车驱动力 F_d 与风阻、滚动阻力、坡道阻力、加速阻力之间相互平衡[10],因此有

$$\dot{v} = \frac{mgf\cos\beta + 0.5C_d A v^2 + mg\sin\beta}{m} \tag{9}$$

式中 m——整车满载质量

C_d——风阻系数 f——滚阻系数

A——汽车迎风面积 β——坡角

3 典型工况仿真分析

为了对硬件在环试验台的正确性以及与整车系统响应的一致性进行验证,将相同驾驶员输入下的实车响应与模型响应进行对比,结果如图 10 ~ 12 所示。

从3种典型工况的对比曲线可以看出,在相同

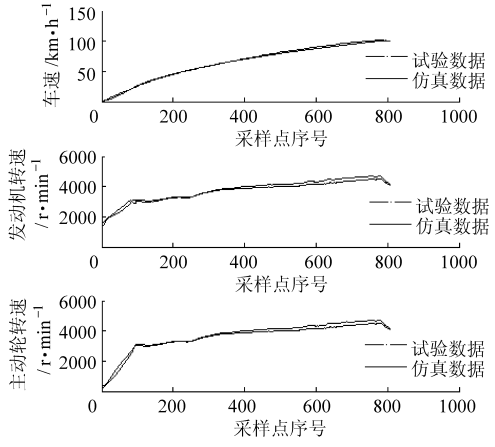

图 10 百公里急加速工况实车响应与仿真比较

Fig. 10 Comparison between model and the vehicle under rapid speeding-up

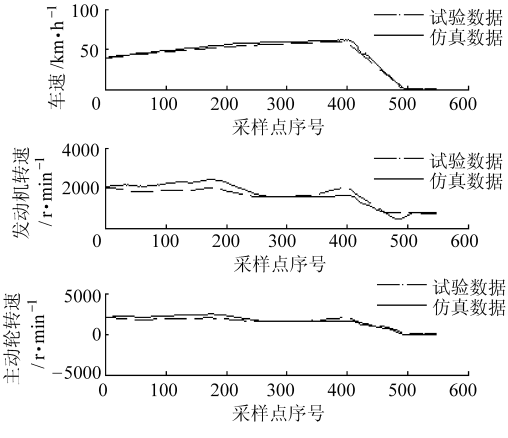

图 11 紧急制动工况实车响应与仿真比较

Fig. 11 Comparison between model and the vehicle under heavy brake

输入激励下，实车试验数据和仿真结果表现出较好的一致性。

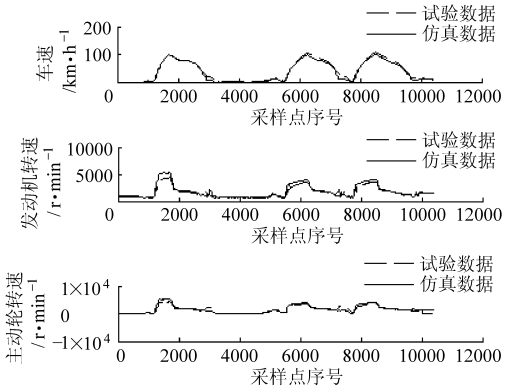

图 12　循环工况实车响应与仿真比较

Fig. 12　Comparison between model and vehicle under cycle driving

4　结论

（1）采用系统辨识方法、试验方法以及理论分析法分别建立了电磁阀响应模型、速比响应模型、金属带传动总成模型以及整车模型，并在该数学模型的基础上搭建了硬件在环仿真测试台。

（2）利用液压系统的标定数据，提取了 CVT 速比变化率系数与速比的关系，综合考虑输入转速、输入扭矩、主从动油缸压力等参数的影响，在国外学者经验公式的基础上，建立了 CVT 速比变化率响应模型。经过与实车试验数据比较，证明该速比响应系统与实际系统具有良好的一致性。

参　考　文　献

1　杨涤，李立涛，杨旭，等. 系统实时仿真开发环境与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2000：1～56.

2　胡建军，秦大同，刘振军. 金属带式无级变速传动速比变化特性研究[J]. 汽车工程，2003，25(1)：25～29.
Hu Jianjun, Qin Datong, Liu Zhenjun. A study on the speed ratio changing characteristic of a metal belt continuously variable transmission [J]. Automotive Engineering, 2003, 25(1):25～29. (in Chinese)

3　张伯英. 金属带式无级变速传动机理与控制的研究 [D]. 长春：吉林大学，2002.

4　尹妍萍，李天石，王成都. 比例减压阀数学模型辨识[J]. 机床与液压，2001(3)：40～41.

5　庞中华，崔红. 系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2009：8～22.

6　Ide T, Udagawa A, Karaoka R. Simulation approach to the effect of the ratio changing speed of a metal V-belt CVT on the vehicle response [J]. Vehicle System Dynamics, 1995, 24(4～5):377～388.

7　周云山，于秀敏. 汽车电控系统理论与设计[M]. 北京：北京理工大学出版社，1999：224～282.

8　胡建军，秦大同，孙东野，等. 金属带式无级变速传动系统仿真与控制研究 [J]. 农业机械学报，2001，32(1)：28～30.
Hu Jianjun, Qin Datong, Sun Dongye, et al. Modeling and control of a continuously variable transmission system with metal pushing belt [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(1):28～30. (in Chinese)

9　王红岩，方志强. 金属带式无级变速汽车的性能仿真研究 [J]. 装甲兵工程学院学报，2003，17(1)：28～30.
Wang Hongyan, Fang Zhiqiang. Performance simulation of vehicle equipped with metal V-belt CVT [J]. Journal of Armored Force Engineering Institute, 2003, 17(1):28～30. (in Chinese)

10　余志生. 汽车理论[M]. 北京：机械工业出版社，2009：1～56.

11　李新城，范光强，朱伟兴，等. 无级变速器电子控制单元硬件在环仿真系统[J]. 农业机械学报，2009，40(7)：6～9.
Li Xincheng, Fan Guangqiang, Zhu Weixing, et al. Hardware-in-the-loop simulation system for electronic control unit of continuously variable transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7):6～9. (in Chinese)