

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.024

基于 FMI 标准的传动系统模型在环虚拟 车辆仿真研究

姚逸程,周文华*

(浙江大学 动力机械及车辆工程研究所,浙江 杭州 310027)

摘要:针对虚拟车辆传动系统模型在环台架仿真问题,在 Simulink 环境中搭建了整车仿真模型,该模型由 SimulationX 双离合变速箱和变速器模块与 dSPACE ASM 发动机及车辆动力学模块共同组成,各模块都根据实车数据进行了参数化。对 DCT 离合器控制和挡位切换逻辑策略进行了研究,提出了一种基于 FMI 标准的协同仿真方法,并讨论了协同仿真模型各模块的步长设置。对比了模拟 NEDC 驾驶循环测试结果与实车转鼓试验台上测得的数据。研究表明:在早期系统验证阶段使用模型在环仿真具有较高的实用价值,可以提早发现系统问题并修改需求;该工作可为接下来的硬件在环测试提供了参考基础。

关键词:双离合变速器;模型在环;SimulationX;协同仿真;FMI

中图分类号:TP391.9;U463

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0938-05

Drivetrain model in loop simulation based on FMI standard

YAO Yi-cheng, ZHOU Wen-hua

(Power Machinery and Vehicular Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at implementing drivetrain model in the loop simulation, an off-line virtual vehicle model was built in Simulink environment. The model consists of SimulationX drivetrain module and dSPACE ASM engine and vehicle dynamics module. All modules were parametrized according to extensive vehicle measurements. The clutch and shift control strategy were studied. The co-simulation method that based on FMI standard was proposed and the step size of each co-simulation module was discussed. The NEDC test was implemented on the vehicle model and the simulation results were compared to the test results from a real vehicle on the roller test bench. The results indicate that: the model-in-the-loop simulation has a highly pragmatic value in the early phase of system verification and validation. This method is able to detect possible problems in vehicle systems and modify requirements in advance. This work prepares for the following hardware-in-the-loop test.

Key words: DCT; model-in-the-loop; SimulationX; Co-Simulation; FMI

0 引言

目前,汽车和航空等行业在新产品的开发环节正进行着两大变革。首先,由于动力和控制系统的复杂性上升,用于开发的时间和预算有限,将系统验证阶段转移到开发早期,通过基于前端载入理念的方法来提

高开发效率已经成为行业共识^[1-2]。其次,汽车制造商更多地把开发任务交给多个国家和地区的合作伙伴共同完成。开发的过程不仅仅包括实际部件和系统,也包括模型的早期开发。由于不同的开发团队可能选择不同的仿真软件进行模型开发,而不同的建模及仿真软件均有自己的模型描述格式及数据存储格式,这样

收稿日期:2016-11-30

作者简介:姚逸程(1991-),男,上海崇明人,硕士研究生,主要从事发动机及整车仿真方面的研究。E-mail:21427050@zju.edu.cn

通信联系人:周文华,男,副教授,硕士生导师。E-mail:zhouwh999@126.com

就需要定义一种通用的模型执行接口以实现不同仿真软件之间模型的解算。

鉴于此,近年来欧洲发展信息计划(ITEA)进行了许多关于联合仿真架构层的研究,较为主要的有于 2012 年结束的 MODELISAR 项目和 2015 年开始的 ACOSAR 项目^[3-4]。MODELISAR 项目旨在定义一种计算模型的功能封装接口标准,用以支持系统的协同设计、仿真、测试。该接口标准称作功能模块化接口。FMI 旨在成为 CAE 数据交互的通用接口,适用于不同的开发环境或行业部门。通过 FMI 标准导出功能模块化单元格式的文件,仿真软件可以集成该接口以实现协同仿真及虚拟测试等^[5]。Modelica 协会于 2012 年推出了 FMI 2.0 标准^[6]。ACOSAR 项目的目标是在不同仿真工具搭建的系统和模型之间建立非专有的通信架构(包括有线和无线通信),以加快调试过程并减少用于测试和验证的开支。该架构被称为高级联合仿真接口,它允许实时系统通过建立实时域和非实时域之间的通信集成在仿真环境中。ACOSAR 项目是 MODELISAR 项目在实时能力和拓扑距离方面的延拓。

基于传动系统模型在环仿真,本研究研究基于 FMI 标准的由两个仿真软件共同搭建车辆模型的可行性。

1 虚拟车辆各模块的搭建

笔者研究的车辆模型主要由发动机、传动系统、整车动力学和环境 4 个模块组成。其中,环境信号包含方向盘转角、油门踏板位置、道路坡度、交通信号等。

1.1 传动系统模块

1.1.1 传动系统物理模型

笔者研究的传动系统由一台六速干式双离合变速箱(DCT)和差速器共同组成。传动系统结构如图 1 所示^[7]。

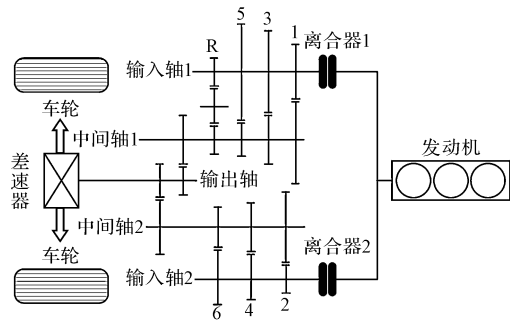


图 1 DCT 传动系统结构简图

DCT 的挡位按照奇数和偶数分别布置于两根离合器输入轴上。该模型包括 2 个干摩擦离合器,2 根输入轴,2 根中间轴,输出轴和差速器。

传动系统主要技术参数如表 1 所示。

表 1 传动系统主要技术参数

参数	单位	数值
各档传动比 i_n	-	$i_1 = 3.917 \quad i_2 = 2.429$
		$i_3 = 1.436 \quad i_4 = 1.021$
		$i_5 = 0.867 \quad i_6 = 0.702$
主减速比	-	3.894
飞轮转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.111
离合器 1 转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.007 4
离合器 2 转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.006 7
静摩擦系数	-	0.12
动摩擦系数	-	0.08
压紧力建立时间	s	0.1

本研究根据实际参数使用 SimulationX 软件搭建传动系统物理模型。忽略传动轴和齿轮啮合的弹性与传动系统的机械损失。该模型主要输入信号为发动机有效扭矩,左右驱动轮转速,离合器 1 和 2 的传递扭矩和换挡信号。主要输出信号为驱动轮扭矩和输出轴转速。考虑到实时仿真的需要,选择定步长求解器,步长为 0.125 ms。

DCT 传动系统 SimulationX 模型如图 2 所示。

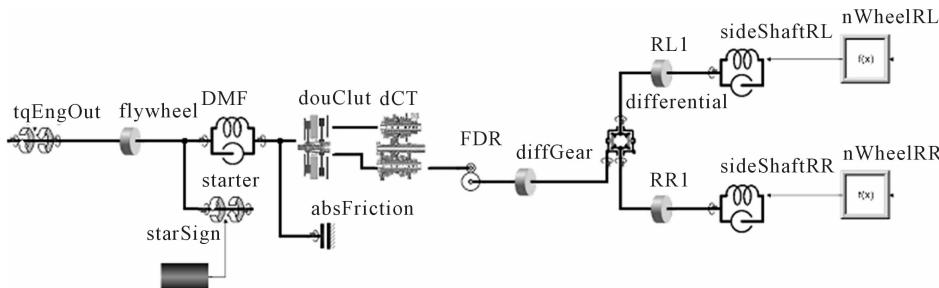


图 2 DCT 传动系统 SimulationX 模型

1.1.2 TCU 控制策略

TCU 换挡规律表由 DCT 制造商提供,如表 2 所示。表 2 中的数据表示在不同节气门开度下车辆的换挡速度。其中, U_{ij} 表示 i 挡升 j 挡的最佳换挡规律的临界

表 2 换挡规律表

节气门开度 / (%)	U_{12} / (km · h ⁻¹)	U_{23} / (km · h ⁻¹)	U_{34} / (km · h ⁻¹)	U_{45} / (km · h ⁻¹)	U_{56} / (km · h ⁻¹)	D_{21} / (km · h ⁻¹)	D_{32} / (km · h ⁻¹)	D_{43} / (km · h ⁻¹)	D_{54} / (km · h ⁻¹)	D_{65} / (km · h ⁻¹)
0	12	22	33	47	62	7	19	28	39	54
2	12	22	33	47	62	7	19	28	39	54
15	12	22	33	47	62	7	19	28	39	54
30	14	27	41.5	59	76	7	19	28	39	54
40	18	33	55.5	75	93	10	19	28	39	62
60	20	49	76.5	103	135	10	24	40	62	89
80	29	56	89	125	146	17	38	60	88	122

基于上述的挡位逻辑,本研究在 Matlab/Stateflow 状态机上编写相应的策略模型,离合器状态逻辑模型如图 3 所示。

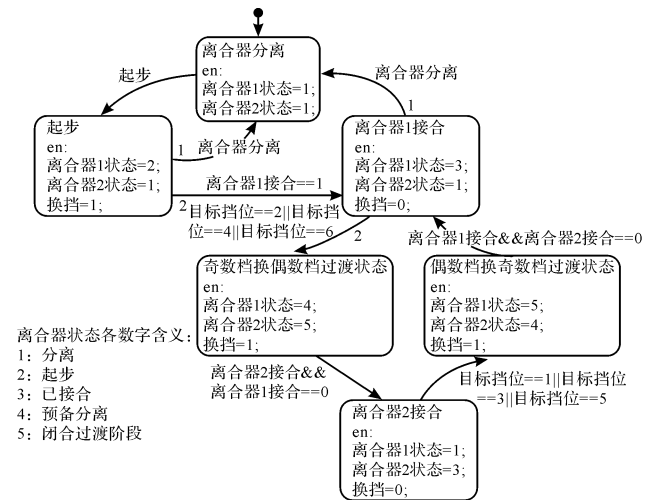


图 3 离合器控制逻辑模型

该策略模型由初始、起步和接合 3 个状态组成。其中接合状态包括离合器 1 接合和离合器 2 接合两种情况,两者之间切换时首先进入过渡状态减小换挡冲击。当目标挡位信号发生变化(如 1 挡时目标挡位信号变成 2 挡)离合器的状态也随之发生改变。离合器状态的不同对应 DCT 物理模型中离合器所传递扭矩的不同(状态 1 传递扭矩为零,状态 3 传递扭矩最大)。图 3 中状态 5 是离合器闭合过渡阶段,表示离合器处于滑摩状态,传递的扭矩主要由压紧力决定。

除了离合器控制之外,挡位的切换逻辑也需要通过 Matlab/Stateflow 状态机来表示。挡位切换逻辑模型如图 4 所示。

图中目标挡位的确定方法表述如下:首先把油门

界速度值, D_{ij} 表示 j 挡降 i 挡的最佳换挡规律的临界速度值。该换挡规律兼顾车辆动力性和燃油经济性^[8-10],即在小节气门开度时选取较大的换挡延迟,在节气门开度较大时选取较小的换挡延迟。

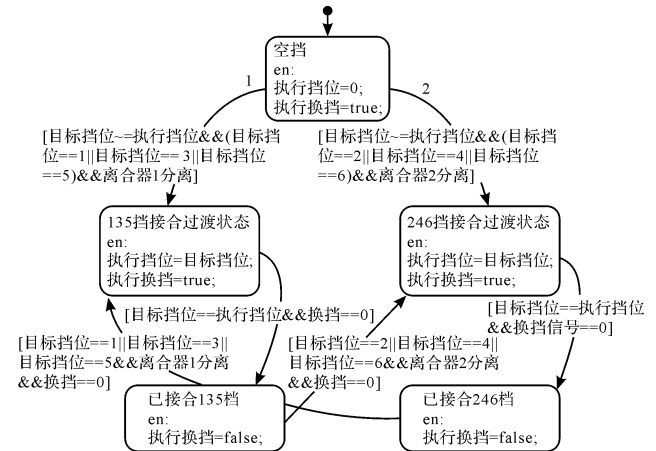


图 4 挡位切换逻辑模型

踏板开度(近似认为节气门开度和油门踏板开度成线性关系)和当前挡位二者信号输入到换挡规律表得到换挡曲线值(即升挡临界车速和降挡临界车速),然后判断实际车速和换挡临界车速值的大小,如果满足换挡条件则输出换挡信号。

1.2 发动机和整车动力学模块

本研究采用 dSPACE ASM 库搭建发动机和整车动力学模块,该库集成于 Simulink 环境。本研究采用其发动机、车辆动力学和环境 3 个模块。

本研究使用的发动机为一款 0.9 L 直喷涡轮增压汽油机,技术参数如表 3 所示。

表 3 发动机技术参数

参数	单位	数值
气缸个数	-	3
压缩比	-	9.5:1
额定功率	kW	66
额定扭矩	N · m	135
最大爆发压力	bar	2.3
转动惯量	kg · m ²	0.012

发动机特性曲线如图 5 所示。

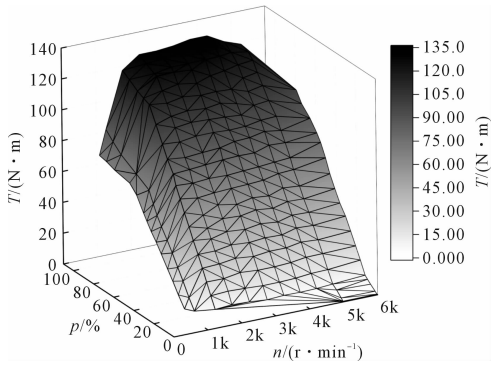


图 5 发动机特性曲线

T —有效扭矩; p —油门踏板开度; n —发动机转速

ECU 控制模块也已集成于 ASM 库。

整车主要参数如表 4 所示。

表 4 整车仿真主要参数

参数	单位	数值
整车质量	kg	1 240
滚动阻力系数	-	0.010 4
迎风面积	m ²	2.25
风阻系数	-	0.3
轮胎半径	m	0.292 7

本研究采用 NEDC 驾驶循环来测试 DCT 传动系统和验证整车协同仿真模型的可行性。首先通过 ModelDesk 的 GUI 界面输入整车和发动机模型的各项参数,然后建立 NEDC 目标车速曲线作为唯一的输入变量,最后将所有参数导入到 ASM 模型中。实车 NEDC 试验数据已从转鼓试验台上测得。

2 建立整车协同仿真模型

2.1 选择 FMU 的使用方式

FMI 标准为实现模型重用的通用接口标准^[11]。

协同仿真在执行模式上采用代码导出的方式,此种模式导出的 FMU 文件脱离原从属软件(SimulationX),导入到主控软件(Simulink)中时主控软件占用单独的一个进程控制 FMU 进行求解。并且可以通过 Simulink 的界面设置调整 FMU 的步长。

2.2 虚拟车辆联合仿真模型的搭建

DCT 传动系统模块首先由 SimulationX 软件完成建模,然后通过该软件自带的 FMU 转换工具把模型编译成 FMU 文件。

本研究采用 FMI 接口标准使 FMU 文件与 Simulink 进行通信。Simulink 把 FMU 封装在 Getriebemodell_Export 模块中,每个采样周期被调用一次。该模块的作用相当于一个传递函数,DCT 模型所需要的信号如曲轴输入扭矩,离合器 1 和 2 的传递扭矩、左右驱动轮转速等信号在 Simulink 的每个采样周期内输入给 FMU,经过运算后再把驱动轮扭矩,输出轴转速等信号输出给 Simulink。Simulink 作为仿真环境,其步长须大于 SimulationX 的 0.125 ms 步长,且为其整数倍。经验证 Simulink 的步长设置为 0.5 ms 定步长较为合适,并采用欧拉法求解,可以很好地平衡精度和运行速度。

FMU 和 Simulink 联合仿真结构如图 6 所示。

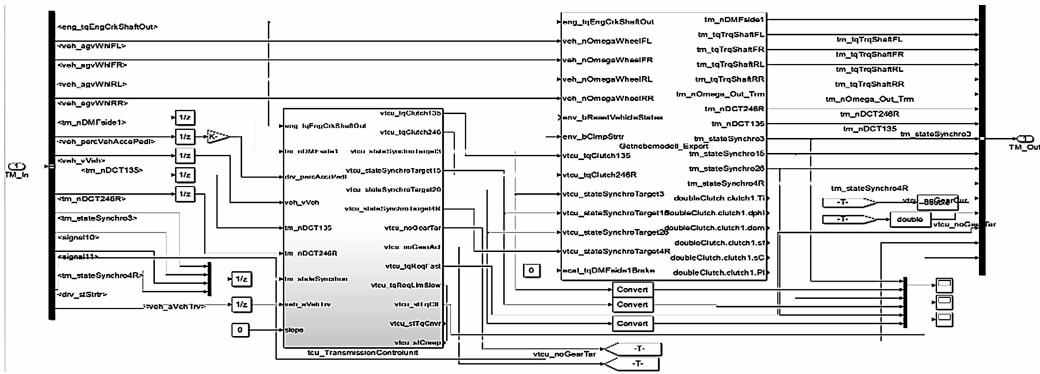


图 6 FMU 和 Simulink 联合仿真结构

3 仿真结果对比分析

由于传动系统需要具备较高的瞬态响应能力,本研究首先对整车模型进行 DCT 模型在环瞬态测试。评价 DCT 模型质量的主要指标为换挡时机、挡位数和离合器转速。

DCT 传动模型当前挡位和目标挡位响应时间对比如图 7 所示。

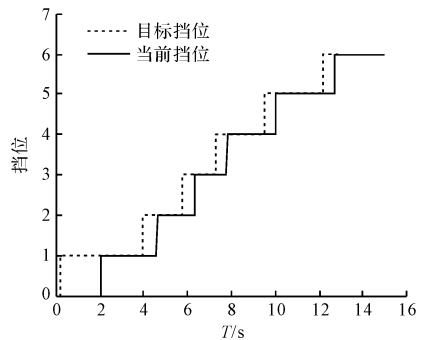


图 7 DCT 传动模型瞬态响应时间对比

仿真时节气门开度为 10%，车辆从空挡连续升挡至 6 挡。从图中可知，除了空挡换一挡以外，其余挡位实际换挡动作迟于换挡信号发出时间大约 0.5 s。

模拟整车 NEDC 试验如图 8 所示。

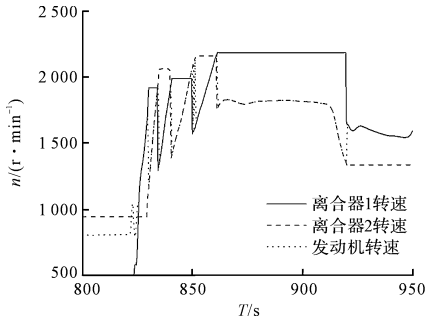


图 8 NEDC 仿真离合器瞬态响应

离合器 1 和 2 的转速与发动机的转速对比，其中 n 为转速。由图 8 可知：两个离合器转速的变化时机与发动机转速对应良好。以上两图可以说明传动系统模型具有较好的瞬态响应性能。

为了验证基于 FMI 协议的 DCT 模型在环虚拟车辆联合仿真的可行性以及换挡逻辑的正确性，把模拟 NEDC 试验和转鼓试验台结果进行对比。

仿真和台架关于挡位的对比结果如图 9 所示。

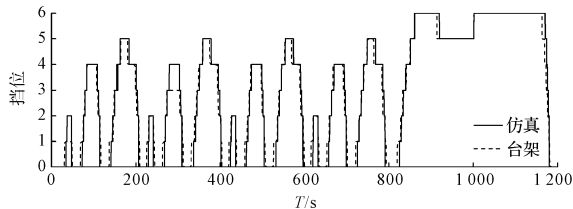


图 9 NEDC 仿真和台架试验挡位对比

可以看出：在绝大多数时间仿真和台架的换挡时机和档位数基本吻合，证明了换挡策略的正确性，但是在空挡升 1 挡和高挡位降低档位时有略微的延迟。

总结以上仿真结果可知：所设计的虚拟车辆协同仿真模型能够实现传动系统在环仿真，并且可以进行模拟驾驶循环（如 NEDC）试验，具备较高的精准度。同时也验证了基于 FMI 接口标准由不同软件组成的虚拟车辆模型的可行性。

4 结束语

本研究采用 SimulationX 软件搭建了 DCT 传动系统

模型，采用 dSPACE ASM 车辆模块搭建了发动机和整车动力学模型，通过基于 FMI 的接口协议实现了 SimulationX 和 Simulink 协同仿真，最后实现了虚拟车辆传动系统模型在环仿真，进行了 NEDC 驾驶循环测试并和实车转鼓试验台所测得的数据进行了对比，结果表明：

(1) 在整车开发初期，不同开发团队针对具体仿真对象使用的不同 CAE 工具可以作为从属软件通过生成符合 FMI 标准的 FMU 文件在 Simulink 环境下进行协同仿真；

(2) 针对具体的算法和物理模型的系统验证，可以通过基于模拟工况的虚拟车辆模型进行模型在环测试（如 NEDC 循环），这样可以判断算法和物理模型是否能达到预期的性能。

参考文献 (References) :

- [1] MILLO F, ROLANDO L, ANDREATA M. Numerical simulation for vehicle powertrain development[M]. Rijeka: INTECH, 2011.
- [2] BELAY A M, WELO T, HELO P. Approaching lean product development using system dynamics: investigating front-load effects[J]. *Advances in Manufacturing*, 2014, 2(2): 130-140
- [3] MODELISAR. Functional mock-up interface for model exchange[J]. *Linköping, modelisar*, 2010.
- [4] KRAMMER M, MARKO, N, BENEDIKT M. Interfacing real-time systems for advanced co-simulation-the ACOSAR approach[C]. Graz: STAF Doctoral Symposium, 2016.
- [5] CHEN W, HUH N M, FRITZSON P. A generic FMU interface for modelica[C]. International Workshop on Equation-Based Object-Oriented Modeling Languages and Tools, Zürich: IEEE, 2013.
- [6] BLOCHWITZ T, OTTER M, AKESSON J, et al. Functional mockup interface 2.0: the standard for tool independent exchange of simulation models[C]. Munich: International Modelica Conference, 2012.
- [7] 孙东野, 王 聪. 发动机负扭矩工况下的 DCT 传动系统换挡控制策略[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(19): 2692-2697.
- [8] 何 宁, 赵治国, 李瑜婷. 双离合自动变速器换挡规律及其仿真评价[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(3): 367-373.
- [9] 韩 旭, 马德森, 赵国平. 一种液压夹套式平动离合器的设计和试验研究[J]. *液压气动与密封*, 2016(7): 67-69.
- [10] 朱 华. 双离合自动变速器及其研究现状[J]. *液压气动与密封*, 2012(8): 1-2.
- [11] 田红芳, 单立志, 李成功. 通用模型接口标准 FMI[C]. 2011 年信息技术、服务技术与工程管理国际学术会议, 北京: 美国科研出版社, 2011.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

姚逸程, 周文华. 基于 FMI 标准的传动系统模型在环虚拟车辆仿真研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(8): 938-942.

YAO Yi-cheng, ZHOU Wen-hua. Drivetrain model in loop simulation based on FMI standard[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(8): 938-942.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>