

基于硬件在环系统的液力自动变速器控制策略开发验证

张健

西安双特智能传动有限公司 陕西西安 710119

摘要：通过硬件在环系统对液力自动变速器液力变矩器解闭锁控制策略进行开发验证，应用Simulink/Stateflow进行控制策略的建模仿真，生成代码集成到控制器硬件，搭建HIL系统测试环境，通过HIL系统仿真实车运行环境对设计的控制策略进行测试验证，此方法可以缩短开发周期、有效地节约开发成本、提升产品质量。

关键词：液力自动变速器；液力变矩器；硬件在环系统；Simulink/Stateflow；测试验证

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.10.014

目前控制器开发的主流模式为基于模型的开发方式，在基于模型的开发模式中，硬件在环仿真被广泛应用和推荐的测试验证方法之一。

硬件在环系统（Hardware-In-The-Loop，简称HIL），是将真实的控制器连接模拟的被控对象对控制器进行全面测试，是一种低成本但高效的测试验证方法。

本文通过Simulink/Stateflow对液力自动变速器液力变矩器解闭锁控制逻辑进行模型建模、仿真，并将生成代码集成后刷写到TCU硬件，最后通过硬件在环系统对设计的控制策略进行测试验证。

HIL系统介绍

HIL测试是一种通过搭建仿真环境，对电控单元进行功能、系统集成、通信及故障测试的方法。HIL仿真环境让被测控制器“感觉”自己工作在实车环境中，

并且被测控制器与模拟器构成完整的控制闭环。HIL系统如图1所示。

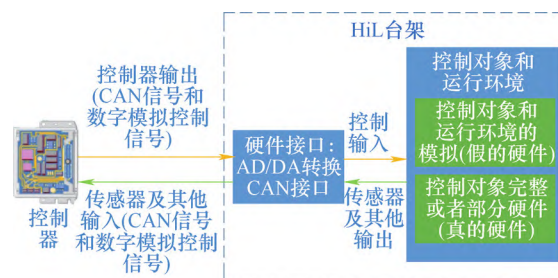


图1 HIL系统

HIL测试可以使测试提前到开发的早期阶段，从而大大提升产品的技术成熟度，并相应缩减测试所需要的时间及资金成本。HIL系统可以仿真所有仍处于开发之中的被控对象，如发动机、车辆及其他控制单元，与被测控制单元交互，从而进行测试。另一方面，HIL测试可以将相当一部分测试从台架或者实车测试平台

迁移到虚拟仿真的实验室测试平台，从而使所有测试场景参数的灵活设置变为可能。

HIL系统优势主要表现在以下方面：

- 1) 在开发的早期阶段就可以提升控制器软件质量。
- 2) 缩短产品投入市场的时间。
- 3) 可以在安全的实验室环境进行极端测试，实现测试自动化，支持回归测试。
- 4) 实现自动化的故障注入测试，有助于质量控制。

液力自动变速器系统介绍

液力自动变速器是目前商用车中应用较为广泛的自动变速器之一，主要由液力变矩器、行星齿轮组、液压系统及电控单元组成。电控系统接收传感器、报文及硬线信号，根据控制逻辑控制离合器的结合和释放实现行星排机构不同的组合方式，实现车辆行驶过程中的变速和变矩。

液力自动变速器变速稳定、换挡平稳，能够有效提高车辆的乘坐舒适性及可靠性；其不足之处在于结构复杂、传递效率低、油耗高。因此，对匹配液力自动变速器的车辆来说，动力性和经济性指标尤为重要。

其中，液力变矩器主要由泵轮、涡轮、导轮及单向离合器组成。液力变矩器将动力从发动机曲轴传递给变速器输入轴，能够在发动机和变速器之间提供平稳传递转矩的液力连接。液力变矩器构成如图2所示。



图2 液力变矩器结构

液力变矩器主要作用为柔性连接，平缓起步，起步过程中增扭，泵轮和涡轮速差变小后，锁止提高传递效率。因此，液力变矩器的性能对整车的动力性和经济性有至关重要的作用。

液力变矩器解闭锁控制逻辑

车辆的实际运行工况复杂，因此变矩器的解锁、闭锁逻辑需要综合考虑各种情形以覆盖车辆运行工况，同时根据液力变矩器的特性设计如下解闭锁控制逻辑。

液力变矩器闭锁控制逻辑如图3所示。液力变矩器变矩时有增扭作用，但此时传递效率低。因此，结合液力变矩器特性曲线，并考虑不同挡位设置不同逻辑，通过当前挡位与最小闭锁挡位比较设置不同的闭锁点。

液力变矩器解锁控制逻辑如图4所示，通过当前挡位与最小闭锁挡位，比较设置不同的解锁点。同时，根据是否处于换挡过程中，设置不同解锁点。另外，还需要考虑车辆运行过程中，紧急制动时需要解锁。因此，需要增加紧急制动解锁逻辑。

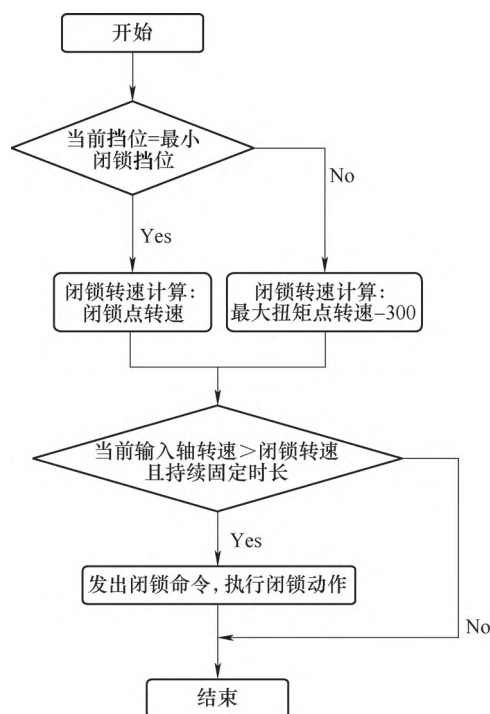


图3 闭锁控制逻辑

液力变矩器控制策略开发及HIL系统验证

1. 液力变矩器控制策略开发

基于前文描述的液力变矩器控制需求，通过Simulink/Stateflow对液力变矩器解闭锁控制逻辑进行建

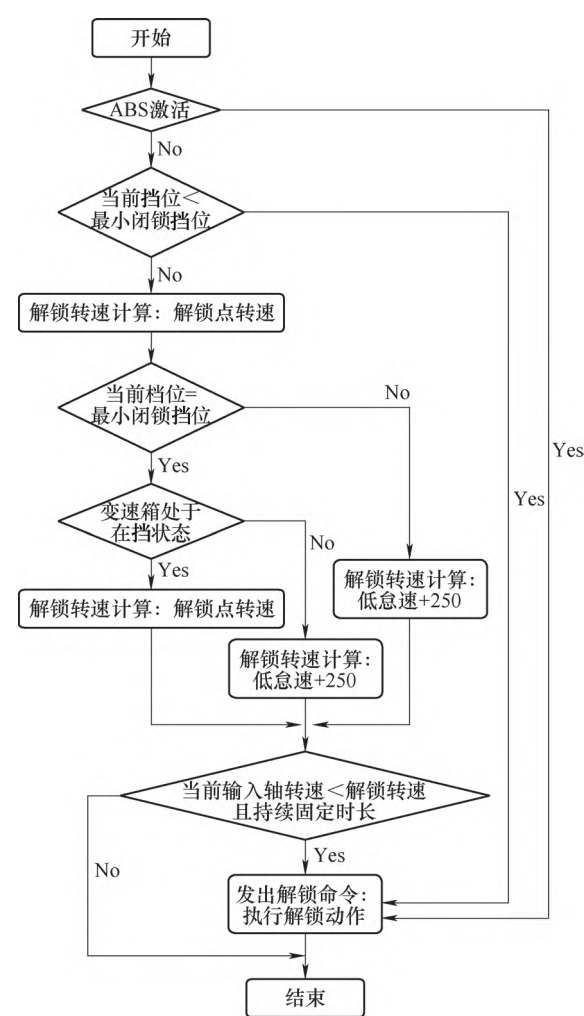


图4 解锁控制逻辑

模仿真，最后将控制模型生成代码，并与控制器底层代码集成，刷写到控制器硬件。

2.HIL系统实施

将变速器控制器TCU与模拟被控对象的HIL系统连接起来，在实时环境下，对TCU控制功能进行闭环测试。

被控对象的物理模型建模，闭环测试模型基于Matlab/Simulink搭建，模型包括被控对象模型和IO模型，模型架构如图5所示。

闭环模型主要包括如下几个模块：

- 1) Engine模块，包括发动机控制器模型和发动机本体模型。
- 2) Drivetrain模块，包括变速器控制器模型和变速器本体模型，因此此测试是液力自动变速器控制器闭

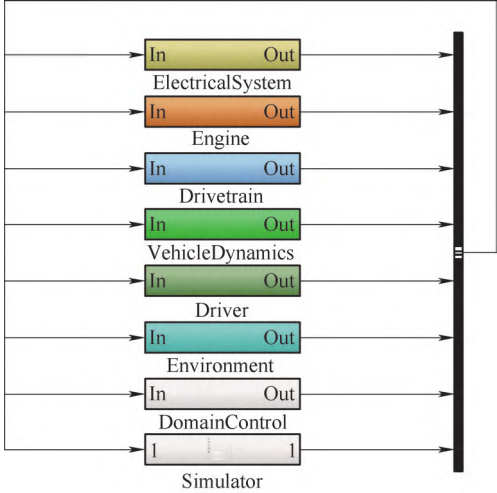


图5 闭环测试模型架构

环测试，模块中包括了真实变速器控制信号。

3) VehicleDynamic模块，包括整车纵向动力学模型以及相关控制策略模型，以及车辆基本属性配置。

4) Driver模块，包括驾驶员相关信号的选择和计算。

5) Environment模块，包括车辆运行环境的初始化模型，如温度、海拔、坡度及风速等。

6) DomainControl模块，包括车辆钥匙起动信号的控制与解析。

7) Simulator模块，包括所有硬件IO和CAN总线通信的配置和解析。

3.试验管理

为方便测试及分析、管理测试结果，需搭建测试主控界面，主要包括仪表界面（用于提供车速、发动机转速、里程及挡位等信号的显示）、驾驶员操作界面（提供形象化的钥匙、加速踏板、制动踏板及换挡手柄的操作等）。另外，可以根据具体需求增加需要显示的内容，试验管理界面如图6所示。

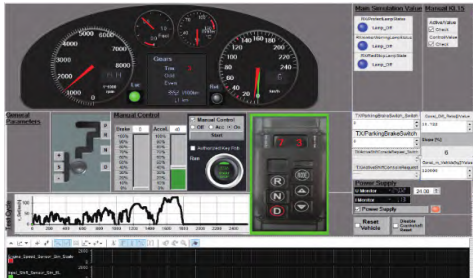


图6 试验管理界面

4.控制策略测试验证

编写测试用例通过主控界面模拟车辆运行过程，验证液力自动变速器液力变矩器的控制策略，采集运行车辆运行过程中的发动机转速、液力自动变速器输入轴转速、液力自动变速器输出轴转速、挡位、解闭锁控制信号及闭锁离合器等信号，进行控制测试的测试分析。本文以解锁为例，通过HIL系统进行控制策略的分析验证。

1) 车辆运行过程中，通过测试设备模拟ABS激活信号，当TCU接收到ABS激活信号后立即触发解锁命令，解锁离合器释放，如图7所示，测试通过。

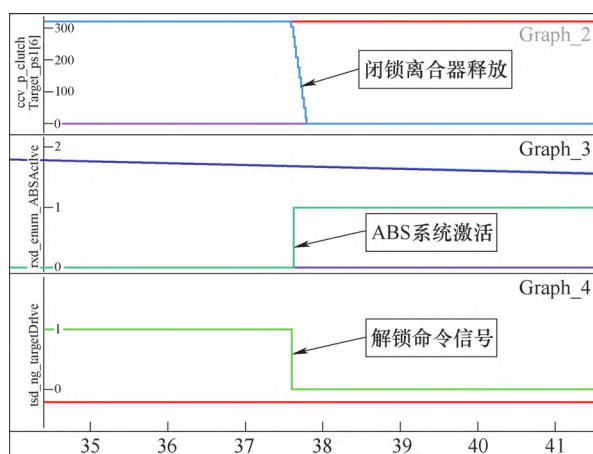


图7 紧急解锁逻辑测试

2) 当前挡位不等于最小闭锁挡位时，解锁转速为低怠速加250r/min，通过HIL系统模拟变速器处于4挡车辆滑行工况，当输入轴转速降低到900r/min且持续50ms时，触发解锁命令如图8所示，测试通过（其中发动机低怠速为650r/min）。

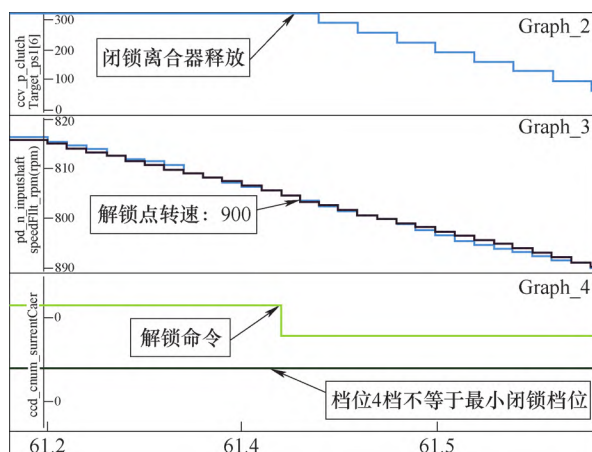


图8 非最小闭锁挡位解锁测试

3) 当前挡位等于最小闭锁挡位3挡时，通过HIL设备模拟变速器处于3挡车辆滑行工况。当输入轴转速低于解锁点转速（1060r/min）且持续50ms后，触发解锁命令，如图9所示，测试通过。

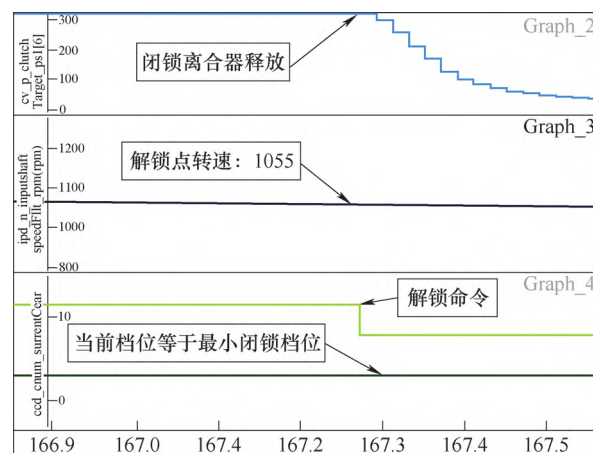


图9 最小闭锁挡位解锁测试

结语

本文采用Simulink/Stateflow进行液力自动变速器液力变矩器控制逻辑建模仿真集成；搭建HIL系统测试环境，包括物理模型及IO模型，创建试验管理界面；将控制器连接HIL系统，通过HIL系统模拟整车运行环境，对设计的液力变矩器解闭锁逻辑进行测试验证。通过仿真结果分析控制策略的可行性，通过此方法可以缩短开发周期、有效地节约开发成本、提升产品质量。

参考文献:

- [1] 何佳议.AT自动变速器电液控制系统研究分析[D].长沙: 湖南大学, 2021.
- [2] 姚正远.DCT变速器电控单元及其硬件在环的研究与实现[D].南宁: 广西大学, 2020.
- [3] 张雪鹏.基于AT变速器的LOCKTOLOCK Shift燃油消耗仿真分析[J].汽车实用技术, 2014 (1): 12-15.
- [4] 朱海天, 李红勋, 孟祥德, 等.重型AT换挡品质仿真研究[J].军事交通学院学报, 2016, 18 (6): 31-32.
- [5] 李宇航, 张国光, 喻环.AT硬件在环搭建[J].传动技术, 2014, 28 (3): 14-18,33. **AUTO1950**