

冗余制动电控系统多物理体在环试验研究及应用

郭笑通^{1,2} 李论^{1,2} 张立亮^{1,2} 王伟^{1,2} 赵健³

(1.中国第一汽车股份有限公司研发总院,长春 130013;2.汽车振动噪声与安全控制综合技术国家重点实验室,长春 130013;3.吉林大学,长春 130022)

【摘要】为验证车辆在集成式助力系统(IFS)与电子稳定控制(ESC)2个控制器功能交互下的性能表现,排查并定位IFS与ESC功能交互下的故障问题,基于多物理体在环试验(m-HIL)技术,提出了一种可在IFS与ESC 2个控制器功能交互下进行制动电控系统性能及功能试验的冗余制动电控系统多物理体在环试验平台方案,并根据组合测试方法,运用自动化测试技术完成了IFS与ESC冗余控制器下的再生制动工况试验,提炼出再生制动工况下制动助力失效时对应的参数空间,形成了IFS与ESC冗余系统的再生制动工况下制动助力失效的典型测试用例。

关键词:多物理体在环 再生制动 自动化测试 冗余制动

中图分类号:U467.1 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20220129

Research and Application on m-HIL Tests for Redundant Brake Electrical System

Guo Xiaotong^{1,2}, Li Lun^{1,2}, Zhang Liliang^{1,2}, Wang Wei^{1,2}, Zhao Jian³

(1. Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013; 2. State Key Laboratory of Comprehensive Technology on Automobile Vibration and Noise & Safety Control, Changchun 130013; 3. Jilin University, Changchun 130022)

【Abstract】In order to verify the performance of vehicle under the functional interaction between Integrated Boosting System (IFS) and Electronic Stability Control (ESC), troubleshoot and locate the faults when IFS and ESC are interacted, this paper proposes a redundant brake electrical system multiple mechatronics Hardware In the Loop (m-HIL) testing platform scheme based on m-HIL technology, which could test function and performance of brake electrical system under functional interaction between IFS and ESC. According to the combined testing method, regenerative braking condition testing under IFS and ESC redundant controllers was accomplished. In addition, the parameter space corresponding to brake boosting failure under regenerative braking condition was abstracted, the typical test cases of braking boost failure under regenerative braking condition between IFS and ESC were formed.

Key words: Multiple mechatronics Hardware in the Loop (m-HIL), Regenerative braking, Automated testing, Redundant brake

【引用格式】郭笑通,李论,张立亮,等.冗余制动电控系统多物理体在环试验研究及应用[J].汽车技术,2023(5):40-44.

GUO X T, LI L, ZHANG L L, et al. Research and Application on m-HIL Tests for Redundant Brake Electrical System[J]. Automobile Technology, 2023(5): 40-44.

1 前言

随着汽车电控系统的发展,越来越多的车辆制动助力系统采用集成式助力系统(Integrated Boost System, IBS),利用无刷直流电机取代真空源作为系统助力装置^[1]。整车制动力由再生制动与液压制动共同提供,在进行再生制动时,为了保证驾驶员正常的驾驶习惯,制动系统需保证踏板感觉正常^[2]。而在车辆从稳定工况过

渡到不稳定工况时,制动系统的助力方式会发生改变,由于再生制动的作用,可能发生助力降级事件。因此需要在IBS与电子稳定控制(Electronic Stability Control, ESC)功能交互下,结合不同的驾驶工况,评价制动时的输入力,以验证是否发生助力降级事件。

本文针对目前IBS与ESC功能交互的试验需求,基于多物理体在环(multiple mechatronics Hardware In the Loop, m-HIL)技术的思想,设计冗余制动电控系统多物

理体在环试验平台(制动m-HIL试验平台),并根据组合测试的思想,开发自动化测试程序,完成某车型的IBS与ESC冗余控制器条件下的再生制动工况试验,最后提炼制动助力失效时对应的驾驶参数空间,形成IBS与ESC冗余系统的再生制动工况下制动助力失效典型测试用例。

2 试验平台方案

2.1 试验平台总体方案

制动m-HIL试验平台包括上位机模块、试验台控制器模块、供电模块、动力源模块、制动系统负载模块、

输入/输出(I/O)接插口模块和上层控制软件模块7个部分。制动m-HIL试验平台采用真实的被测控制器(IBS、ESC)与执行机构(制动钳等制动系统负载),通过实时仿真机及I/O板卡,通过仿真整车参数及驾驶环境场景,完成信号产生、计算、采集和交互,进行机、电、液、气多物理耦合在环的功能试验。试验平台总体方案如图1所示。

2.2 试验平台硬件方案

由多物理体在环试验平台作为整个试验台的控制器,采用dSPACE硬件和DS1006型实时仿真机。控制器与上位机通过工业以太网通讯。

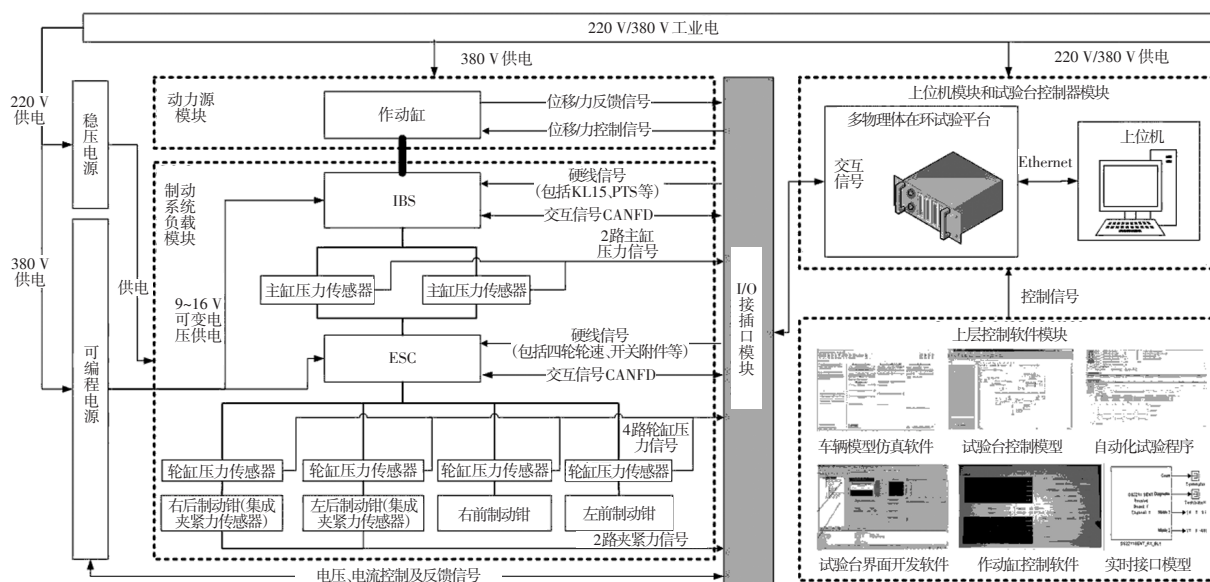


图1 试验平台总体方案示意

I/O接插口模块用于传感器采集的信号、执行机构的命令信号与多物理在环试验平台,通过内部总线进行信号通讯^[3]。

制动系统负载模块包括IBS、ESC、制动管路、前后制动钳及制动盘等制动系统负载、主缸压力传感器、轮缸压力传感器和电子驻车制动(Electrical Park Brake, EPB)夹紧力传感器;IBS、ESC与I/O接插口模块进行硬件与网络通讯间的信号交互,其中,网络通讯为CANFD协议;主缸压力传感器、轮缸压力传感器和EPB夹紧力传感器将采集到的信号实时发送给I/O接插口模块。

动力源模块采用液压作动缸,作动缸与IBS的推杆通过机械方式连接,使作动缸只能推动IBS推杆前进,不能拉动推杆回退;作动缸可通过I/O接插口模块进行位移或力控制,并实时将作动缸位移及输入力反馈给I/O接插口模块。

供电模块包括220 V/380 V工业电源、稳压电源及可编程电源。其中,220 V/380 V工业电源为上位机提

供220 V电源,并为作动缸及多物理体在环试验平台提供380 V电源;稳压电源为压力传感器、EPB夹紧力传感器等传感器提供24 V直流电源;可编程电源为ESC、IBS进行9~16 V不同电压的供电,其供电电压及电流限值由I/O接插口模块控制;稳压电源、可编程电源由220 V/380 V工业电源供电。

2.3 试验平台软件方案

上层控制软件模块包含试验台控制模型(MATLAB Simulink软件编写)、车辆仿真模型软件CarSim-RT、试验台界面开发软件ControlDesk、作动缸控制软件、实时接口(Real-Time Interface, RTI)模型、自动化试验程序。其中,实时接口模型实现试验台控制模型、车辆仿真模型与dSPACE接口之间的连接^[4]。基于ControlDesk软件开发试验界面,CarSim-RT用于控制和观测车辆模型实时仿真;自动化试验通过ECUtest软件编写自动化测试程序实现,主要应用于模型在环(Model In the Loop, MIL)/软件在环(Software In the Loop, SIL)/

硬件在环(Hardware In the Loop, HIL)试验环境中的自动化测试用例的编辑、执行、数据分析以及生成试验报告^[5]。试验平台软件方案如图2所示。

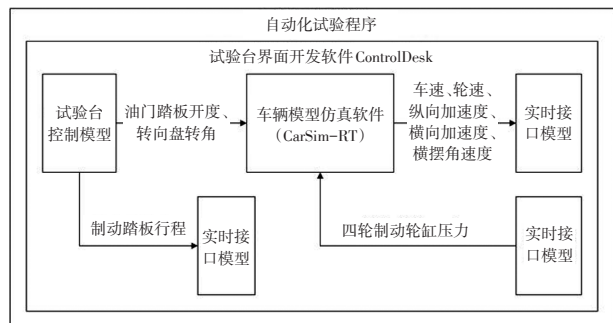


图2 试验平台软件方案示意

3 试验方案设计

3.1 再生制动原理

IBS 与 ESC 2 个控制器功能交互下,再生制动的实现过程如图3所示。

车辆无转向开始制动时,处于稳定状态,IBS 助力模式为行程控制,再生制动 (Cooperative Regenerative

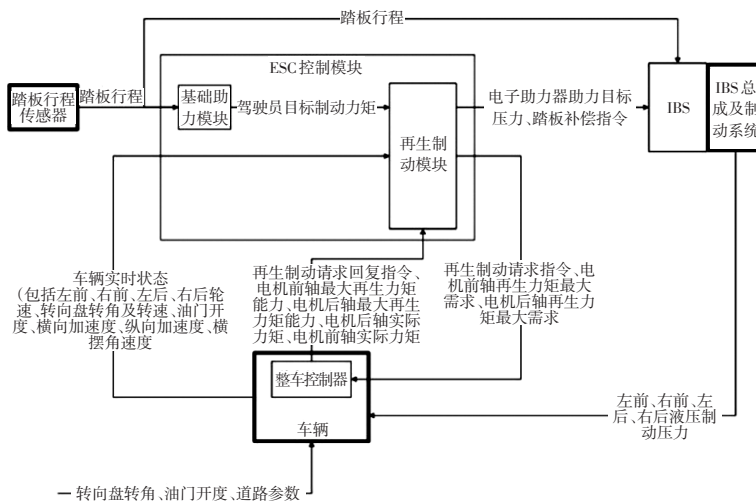


图3 再生制动原理示意

踏板力补偿指令信号及 ABS 功能信号均由 ESC 发到 CANFD 网络中,助力失效系数的计算方法为:当车辆处于稳定状态时,控制作动缸以一组速度(5 mm/s、10 mm/s、15 mm/s、20 mm/s、……、55 mm/s)匀速推动 IBS 推杆前进,实时采集作动缸位移(亦即制动踏板行程)与作动缸输入力,得到不同制动踏板速率下标准输入力-作动缸位移($F-S$)曲线。车辆趋于失稳时,当制动踏板行程为 S_1 时,实时采集到的作动缸输入力为 F_1 ,此时对应标准 $F-S$ 曲线中的作动缸输入力为 F_{normal} ,助力失效系数计算公式为:

$$i_{br} = F_1 / F_{normal} \quad (1)$$

Brake, CRB)模块工作,制动液储存在 ESC 蓄能器中,主缸压力较低;随着转向盘转角变大,继续制动,车辆处于趋于失稳状态(但未失稳),IBS 助力模式切换为压力控制,但 CRB 未及时完全退出并将制动液完全泵回卡钳,主缸内的液压力与之前的状态一致,以此时的主缸压力作为驾驶员需求,产生的液压制动力则很低,产生的整车减速度也很低,反映出踏板力增加很多,驾驶员会产生制动助力失效的不良感觉。因此,需要进行上述驾驶场景的 CRB 试验,验证是否会发生制动助力失效。

3.2 组合试验方案设计

3.2.1 整体设计方案

根据趋于失稳状态下的工况分析及专家经验,确定趋于失稳状态下导致制动助力失效所对应的参数空间包括:车速 v_x 、制动踏板行程 S_{bp} 、制动踏板速率 v_{bp} 、转向盘转角 θ_{sw} 、转向盘转速 ω_{sw} 。其中,车速为初始车速。 v_x 、 S_{bp} 、 θ_{sw} 为影响力较大的因子, v_{bp} 和 ω_{sw} 为影响力较小的因子。制动助力失效的判定标志为:踏板力补偿指令置为启动状态且 ABS 功能未介入,且助力失效系数 i_{br} 大于助力失效阈值 i_{br_th} 。

根据经验,设定 $i_{br_th}=2$ 。驾驶场地为 20 km×20 km 的方形沥青区域,路面附着系数为 1.0,采用组合测试与粒子群优化相结合的方法进行多次迭代试验,直至找到制动助力失效时所对应的参数空间 $[v_x, S_{bp}, \theta_{sw}, v_{bp}, \omega_{sw}]^T$ 。

3.2.2 测试方案比较

目前,寻求特定参数空间的方法主要包括组合测试和优化搜索测试。优化搜索测试通过设定一定的奖励函数,将测试结果视为函数结果,使用梯度优化等方式寻找可能发生危险的参数空间,如粒子群优化算法等。但是,优化搜索测试寻找最优解需要的迭代次数很多,如果进行多次迭代,则需要长时间的“耐久”试验,

一旦试验过程中系统崩溃,则需要重新进行,试验周期过长,不适合工程应用;组合测试只需在测试用例生成中进行,无需在试验过程中循环迭代(或者循环迭代的次数很少),故本文选择组合测试方法进行工程应用。

3.2.3 组合测试方案

组合测试的主要目标是从一个庞大的输入空间中选取少量的输入配置,使生成的测试用例数量较少,提高算法的执行效率^[6]。参数空间包括 v_x 、 S_{bp} 、 v_{bp} 、 θ_{sw} 、 ω_{sw} 。其中 v_x 、 S_{bp} 、 θ_{sw} 的水平为固定值,各6个,如表1所示。

表1 各参数水平

参数空间	水平					
$v_x/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	40	60	80	100	120	140
S_{bp}/mm	5	10	15	20	25	30
$\theta_{sw}/(^{\circ})$	30	60	90	120	150	180

为了提高试验的可操作性,控制达到每一个制动踏板行程所需的时间与达到每一个转向盘转角所需的时间尽量相等。因此,每个转向盘转角因子的水平对应3个转向盘转速因子的水平,即 $0.8\theta_{sw}-20$ 、 $0.9\theta_{sw}-20$ 、 $\theta_{sw}-20$ 。

每个制动踏板速率因子的水平 v_{bp} 设置为: $S_{bp}/v_{bp}=\theta_{sw}/\omega_{sw}$ 。

根据数学统计分析,73%的缺陷是由单因子或双因子相互作用产生的,19%的缺陷是由3个因子相互作用产生的^[7]。综合考虑试验所需时间,本文采用双因子组合算法,即保证车速、制动踏板行程和转向盘转角中任意2个因子下所有水平的组合均出现过。本文采用启发式搜索算法中的模拟退火算法,其应用到本试验的步骤为:

输入:5个因子待覆盖的两两取值组合对的集合

输出:测试用例集(初始为空)

创建两两取值组合对的总集合

DB = DB_struct (vx, sbp, osw, vbp, wsw);

CB = [];

开始计算测试用例集

while (DB != [])

{

找到当前DB集合中参加组合最多的因子水平,组成一条测试用例,作为初始测试用例

max_level = max_level_find (DB);

max_case1 = max_case_find (DB);

T为系统温度,初始值为一个较高的水平,如100, T_{\min} 为温度的下限值,如3,当 $T \geq T_{\min}$ 时,停止搜索

```

while (T >= T_min)
{
    ## max_case2 是 max_case1 周围的一个测试用例,
    以 max_level 为基准进行移动
    max_case2 = move_case (max_case1, max_level);
    ## cover_count 函数的作用为计算覆盖 DB 集合中的
    两两取值组合对的数量
    dE = cover_count (max_case2) - cover_count
    (max_case1);
    ## 如果移动后的覆盖度比移动前的高,则替换掉
    移动前的测试用例
    if (dE >= 0)
    { max_case1 = max_case2; }
    ## 如果移动后的覆盖度比移动前的低,但是接受
    的概率大于临界值,则同样接受
    else if ( exp (dE / T) > random(0, 1))
    { max_case1 = max_case2; }
    ## 降温退火,取 r=0.9,使降温慢一些
    T = r * T;
}
## 将最终得到的测试用例 max_case1 添加至测试
用例集 CB 中,CB 初始为空
CB = CB_append (max_case1);
## 将最终得到的测试用例 max_case1 从原组合对
的集合中删去,直至 DB 为空,最后测试用例集 CB
DB = DB_del (max_case1);
}

```

3.2.4 自动化测试方案

通过3.2.3节组合测试方案得到的测试用例群需要由自动化测试软件执行,自动化试验通过ECUtest软件实现。由于该程序较为简单,仅与 S_{bp} 和 θ_{sw} 有关(v_{bp} 与 ω_{sw} 可通过 S_{bp} 和 θ_{sw} 的斜率表示),例如,当 $S_{bp}=15\text{ mm}$ 、 $v_{bp}=24\text{ mm/s}$ 、 $\theta_{sw}=60^{\circ}$ 、 $\omega_{sw}=56^{\circ}/\text{s}$ 时,可建模如图4所示。

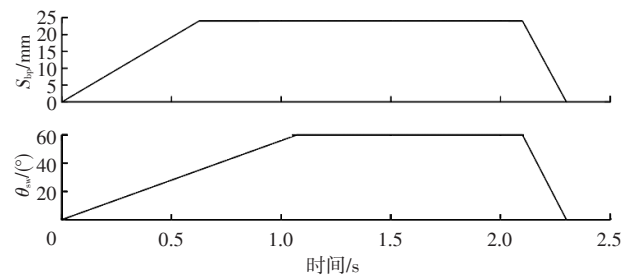


图4 因子建模示意

测试步骤为:挡位设置为D挡;以某一大小的油门开度(如40%)加速直至车速为某一水平值作为目标值;按

照图4所示的方式进行 S_{bp} 、 θ_{sw} 的设置,直至车速降为0。

更改目标车速、 S_{bp} 、 θ_{sw} 的设置,重复上述测试步骤,并将制动助力失效的一组测试用例作为后续验证此种工况下的典型测试用例。

4 试验结果

以某个工况下制动助力失效时的车辆状态为例,此时对应的参数空间为 $[V_x, S_{bp}, \theta_{sw}, v_{bp}, \omega_{sw}]^T = [80, 20, 12.6, 120, 76]^T$ 。

v_x 、 S_{bp} 、 θ_{sw} 曲线如图5所示。作动缸输入力、各轮制动压力曲线如图6所示。

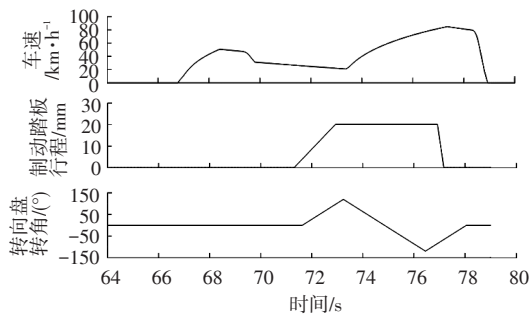


图5 车速、制动踏板行程、转向盘转角曲线

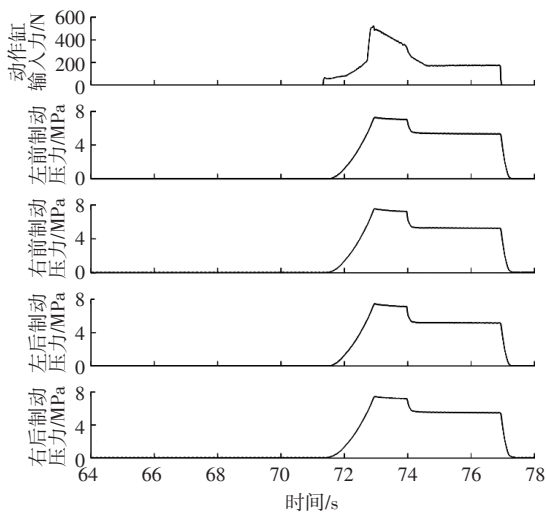


图6 作动缸输入力、各轮制动压力曲线

纵向加速度、横向加速度、制动助力失效标志曲线如图7所示。

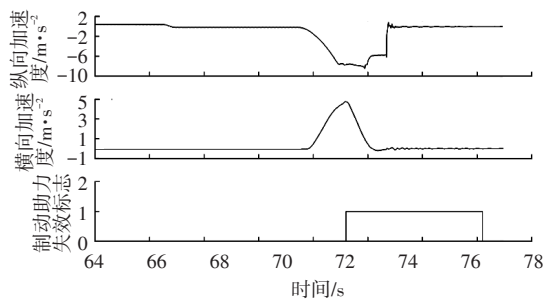


图7 纵向加速度、横向加速度、制动助力失效标志曲线

5 结束语

本文提出的制动 m-HIL 试验平台方案能够进行 IBS 与 ESC 冗余控制器下的再生制动工况试验,可用于验证该工况下制动助力是否失效。通过基于模拟退火算法的组合测试,减少了测试用例数量,并通过自动化测试软件 ECUtest 编写了该工况下的自动化测试程序,找到制动助力失效对应的一组典型测试用例。后续,对于不同的车型项目,该测试用例可进行重用,以减少 IBS 与 ESC 冗余控制下的测试复用工作量。

参考文献

- [1] OHTANI Y, INNAMI T, OBATA T, et al. Development of an Electrically-Driven Intelligent Brake Unit[R]. SAE Technical Paper, 2011.
- [2] 李玉芳, 林逸, 何洪文, 等. 电动汽车再生制动控制算法研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(12): 1059-1062.
LI Y F, LIN Y, HE H W, et al. A Study on Control Algorithm of Regenerative Braking for EV/HEV[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(12): 1059-1062.
- [3] 马培蓓, 吴进华, 纪军, 等. dSPACE 实时仿真平台软件环境及应用[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 667-670.
MA P B, WU J H, JI J, et al. Software Environment and Application of dSPACE Real-Time Simulation Platform[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(4): 667-670.
- [4] 俞志华, 乔婷, 付金勇, 等. 基于 dSPACE 的汽车座椅记忆模块自动化测试平台[C]// 2015 中国汽车工程学会年会. 上海: 中国汽车工程学会, 2015.
YU Z H, QIAO T, FU J Y, et al. An Automotive Testing System for DSM Based on dSPACE[C]// 2015 China-SAE Congress. Shanghai: China-SAE, 2015.
- [5] 宋茜, 吴速超, 王龙, 等. 使用 ECU-TEST 进行 IO 接口批量自动化测试的研究[J]. 汽车电器, 2020(11): 55-56.
SONG Q, WU S C, WANG L, et al. Research on Batch Automatic Test of IO Interface Using ECU-TEST[J]. Auto Electric Parts, 2020(11): 55-56.
- [6] 聂长海. 组合测试[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
NIE C H. Combinatorial Testing[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [7] LEI Y, TAI K C. In-Parameter-Order: A Test Generation Strategy for Pairwise Testing[C]// TSAI J, KEEFE T, STEWART D, et al. Proceedings of the IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering. Los Alamitos: IEEE Press, 1998: 254-261.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为 2022 年 4 月 14 日。