

基于 HIL 的车用电机控制器故障保护策略测试

田鑫, 刘全周, 晏江华, 刘铁山

[中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津 300130]

摘要: 随着新能源汽车电控系统的发展以及复杂度和集成度的提高, 整车故障保护策略已成为软件开发的重要组成部分之一, 但测试难度较大且风险较高, 尤其针对电机控制系统, 传统的台架和实车测试往往不能满足需求。通过对电机控制系统故障保护策略及硬件在环(HIL)测试方案的介绍, 并结合 dSPACE 仿真系统, 针对车用电机控制单元搭建了信号级 HIL 仿真测试平台。借助上位机实时模拟电机不同故障工况, 并进行试验和测试结果的分析, 验证了电机控制器故障保护策略的正确性, 同时体现出 HIL 测试方法的优越性。

关键词: 纯电动汽车; 电机控制; 硬件在环; 故障保护

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)11-0082-06

Fault Protection Strategy Test of Vehicle Motor Controller Based on HIL

TIAN Xin, LIU Quanzhou, YAN Jianghua, LIU Tieshan

[CATARC (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300130, China]

Abstract: With the development of new energy vehicle electronic control system and the increase of complexity and integration, the vehicle fault protection strategy has become an important part of software development. However, the test was difficult and risky, especially for motor control system. Traditional bench and real vehicle tests always could not meet the actual requirements. The motor control system fault protection strategy and its hardware-in-the-loop (HIL) test scheme were introduced. Combined with the dSPACE simulation system, a signal-level HIL simulation test platform was built for the vehicle motor control unit. Real-time simulation was performed for different faults of the motor. By analysis of the test results, the correctness of the motor controller fault protection strategy was verified, and the superiority of the HIL test method was proved.

Key words: electric vehicle; motor control; hardware-in-the-loop (HIL); fault protection

0 引言

电机控制技术经过多年的发展, 已成熟地应用于各领域, 但随着智能驾驶和车联网技术的不断更新迭代, 汽车出行的安全性变得尤为重要, 因此车用电机控制器的设计需要考虑更为复杂的工况和故障保护措施。针对故障仿真测试, 国内外各大主机厂也在逐渐加大研发成本, 如芯片仿真技术和快速原型技术, 可以在开发前期对硬件和软件进行仿真验证; 对于量产前的产品而言, 传统的电机台架及实车测试主要验证动力总成的性能; 针对功能上的故障保护策略主要采用硬件在环(HIL)测试^[1]。

目前, dSPACE、NI、ETAS 等公司均推出了具有代表性的 HIL 测试方案, 已有很多成功案例。国内在这方面起步较晚, 缺乏成熟、完善的 HIL 测试产品。HIL 测试通过半实物仿真设备模拟各种工况验证控制器的功能逻辑, 可以在试验室环境下, 安全并高效地对控制器进行测试, 已成为整车研发流程中重要的环节之一^[2]。本文介绍了电机控制器组成和 HIL 测试方法, 并通过搭建 dSPACE HIL 测试平台, 验证了某控制器在不同工况下的故障保护策略。

1 车载电机控制系统结构

新能源汽车主要由动力电池、电池管理系统

作者简介: 田鑫(1990—), 男, 工程师, 研究方向为硬件在环仿真开发与测试。

(BMS)、整车控制器 (VCU)、电机、电机控制器 (MCU) 以及底盘系统组成^[3]。电机作为动力源, 控制系统是整车的核心。电机控制系统结构如图 1 所示。

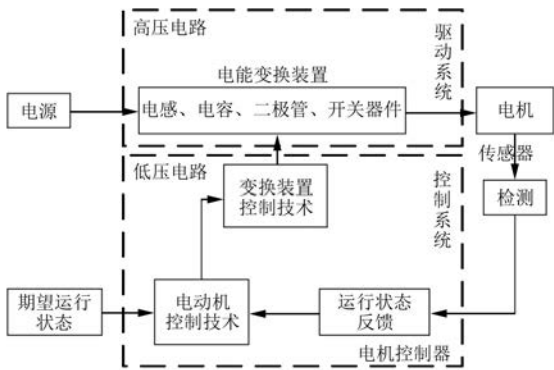


图 1 电机控制系统结构

整个系统由电源、电机控制器和电机 3 大部分组成。电源主要指高压电源, 即动力电池。电机一般使用永磁同步电机, 并集成温度传感器和位置传感器。电机控制器包括控制部分和驱动部分: 控制部分主要实现软件控制策略, 是控制器的核心; 驱动部分主要由电容、功率元件等组成电能变换装置^[4]。

整个电控系统接收 VCU 发出的命令及需求, 如电机转速或转矩请求, 并结合电机反馈的运行状态, 如电机母线电压、三相电流、位置、温度等, 通过电机控制算法驱动逆变器桥, 将直流电源转为电流可控的交流信号, 实现换向及电机的运转。

2 电机控制器故障保护策略

电机控制器的故障保护机制是软件控制策略的核心部分, 决定了不同故障下的安全处理措施, 对整车性能及安全起到关键作用。针对不同故障等级, 以及故障的处理方式和清除条件不同, 主要归类为报警、降功率、停机 3 个级别。严重故障一般需要重新对控制器进行复位才可清除, 电机控制器故障保护策略如表 1 所示。

电机控制器需要实时监测电机位置、电流、电压、温度等。当出现高压故障, 如过压、欠压、过流时, 需要立即关管保护; 当出现温度较高时, 整车仅报警提醒用户; 当温度逐渐升高时, MCU 会进行降功率或者停机处理。

表 1 电机控制器故障保护策略

故障类型	故障等级	触发条件	清除条件
过流故障	2	相电流>700 A	重新上低压电
过压报警	1	母线电压>420 V	母线电压>410 V
过压故障	2	母线电压>470 V	重新上低压电
欠压故障	1	母线电压<270 V	母线电压>280 V
电机温高	1	电机温度>100 ℃	电机温度<95 ℃
电机过温	2	电机温度>120 ℃	重新上低压电
控制器温高	1	控制器温度>95 ℃	控制器温度<90 ℃
控制器过温	2	控制器温度>160 ℃	重新上低压电
超速报警	1	电机转速 >12 000 r/min	电机转速 <11 800 r/min
超速故障	2	电机转速 >13 000 r/min	重新上低压电

3 HIL 测试系统

dSPACE HIL 测试系统可以按用户需求并应用 MATLAB/Simulink 实现建模, 根据数学模型和软件仿真验证控制系统的正确性^[5]。HIL 测试系统如图 2 所示。

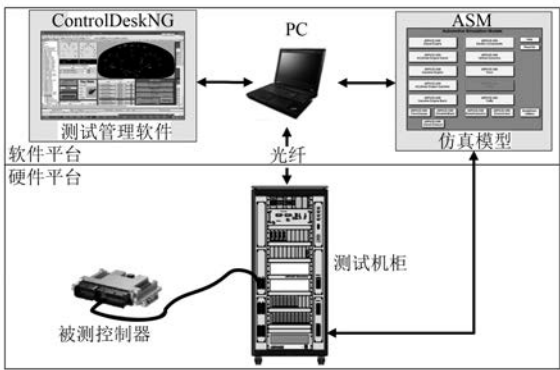


图 2 HIL 测试系统组成

系统硬件平台包括测试机柜和被测控制器, 软件平台由不同仿真模型以及相关上位机软件组成。

测试机柜中有不同功能仿真板卡, 可以通过板卡的实时接口 (RTI) 将仿真模型与真实控制器相连, 同时可在上位机上实时调整参数来模拟各种极端工况, 以测试控制器功能的正确性和稳定性。HIL 测试已成为整车开发流程中必不可少的环节, 在减少了实车路试及标定工作任务的同时,

缩短了开发周期,可以安全并高效地对控制器进行验证^[6]。

4 MCU 信号级 HIL 测试

依据测试对象不同,MCU HIL 测试分为 3 个级别。

(1) 信号级测试。只对 MCU 的控制部分进行测试,电机驱动部分、电机和负载用模型代替,测试机柜对 MCU 控制板接口信号进行仿真和采集,并可灵活地修改参数,可以低成本地验证 MCU 完整的控制策略。

(2) 功率级测试。测试机柜采集功率元件的输出,经过负载板卡消耗和电机模型进行处理,实现对 MCU 部分功能逻辑测试和功率元件测试。因为控制器内部接口已高度集成,所以驱动板相关故障无法模拟,且功率元件测试需要额外使用

相关负载及板卡,使成本提高。

(3) 机械级测试。被测对象包括完整的 MCU、电机,需要借助测功机台架和电机进行连接,HIL 测试设备主要运行车辆模型,可以对动力总成进行工况模拟和测试,因此更偏向于性能测试。

综上所述,对电机控制器的故障保护策略进行完整的测试,需要采用信号级 HIL 测试,整个系统环境搭建主要包括硬件分配、模型开发和测试管理界面开发 3 部分^[7-8]。

4.1 系统硬件分配

硬件系统包括待测控制器(控制板)和 dSPACE 机柜。机柜由主处理器、I/O 板卡和内部信号调理电路组成。主处理器对模型进行实时运算,并通过 I/O 板卡和信号调理单元实现与控制器的交互。测试系统连接图如图 3 所示。

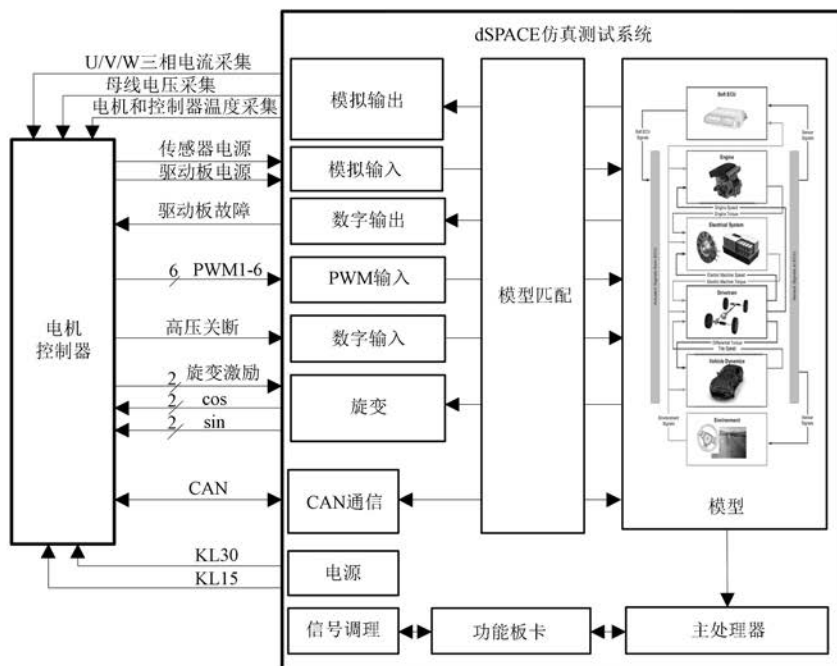


图 3 测试系统连接图

根据对待测电机控制器接口,对机柜信号进行资源分配,如表 2 所示。

系统主要使用 DS5202 和 DS2211 板卡。DS5202 为电机仿真专用 FPGA 板卡,可以实现对控制器高速信号的仿真和捕捉,如 PWM、电流和旋变信号。DS2211 为通用 I/O 板卡,用于电源、温度、CAN 信号等低速信号的传输。

4.2 系统模型开发

系统通过 RTI 模型接口(IO 模型)与被控对象模型的相关配置,实现控制器与模型的信号连接。

依据表 2 系统资源分配以及传感器特性,在 Simulink 中建立 RTI 模型接口,并添加 CAN 模块和查表模块,以实现模型与硬件的匹配以及传感

表 2 系统资源分配表

控制器接口	信号说明	机柜板卡
数字输出	6 路 PWM 调制信号	DS5202
	高压关断信号	DS5202
模拟输出	传感器供电电源信号	DS2211
	旋变激励信号	DS5202
数字输入	控制器电源信号	DS2211
	驱动板故障信号	DS2211
模拟输入	母线电压信号	DS5202
	三相电流信号	DS5202
	温度信号	DS2211
	旋变信号	DS5202
	CAN 通信	DS2211

器和 CAN 信号的仿真。I/O 接口模型如图 4 所示。

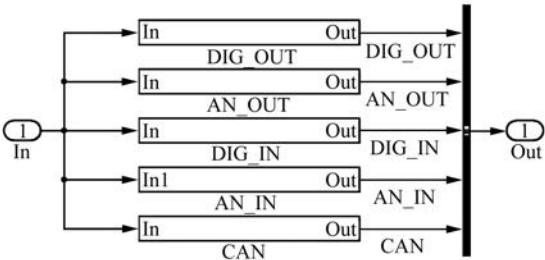


图 4 I/O 接口模型

如图 5 所示,被控对象模型主要包括逆变器模型、电机本体模型等。

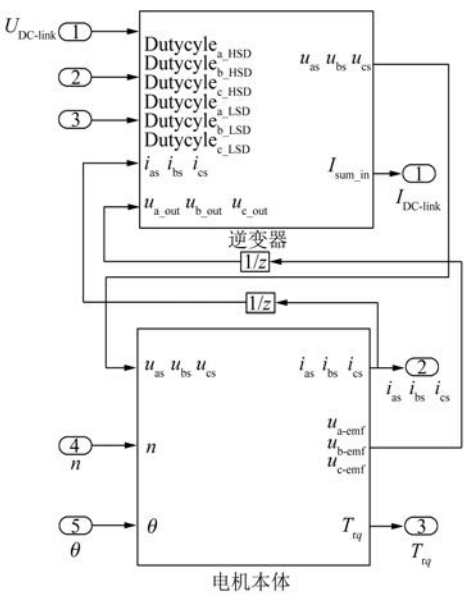


图 5 被控对象模型

逆变器模型包含 3 个半桥逆变器 A、B、C, 每个半桥均可以选择功率开关的类型 (IGBT 或者 MOSFET)。逆变器模型直接由电池组模型供直流电, 输出三相定子绕组电压, 在电机本体模型中可以定义电机等效电阻和电感、极对数、磁链等参数, 并通过 dq 轴坐标变换计算出电流和转矩。计算式为

$$T_{rq} = \frac{2}{3} p [\Psi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1)$$

式中: T_{rq} ——电机转矩;

p ——电机极对数;

Ψ ——电机磁链;

$i_d、i_q$ —— $d、q$ 轴电流;

$L_d、L_q$ —— $d、q$ 轴电感。

选取与待测控制器相匹配的电机参数, 并在模型参数文件中进行设定, 如表 3 所示。

表 3 电机参数

参数名称	参数值
额定电压/V	363
额定电流/A	235
d 轴电感/ μH	126
q 轴电感/ μH	490
定子电阻/ $\text{m}\Omega$	6.4
极对数	4
磁链/Wb	0.049 269 546

系统模型配置完成后, 编译生成 dSPACE 目标处理器可识别的代码。

4.3 测试管理界面开发

ControlDesk 是 dSPACE 公司开发的新一代集成试验和测试工具的软件, 可实现对试验过程的综合管理, 包括实时硬件及变量的可视化管理, 即对机柜的板卡通道和模型变量进行相关操作。用户虚拟仪表的建立, 可以实现测试界面的开发设计。通过在上位机导入模型编译生成的变量文件来对所需信号和参数进行实时操作^[9-10]。ControlDesk 测试管理界面如图 6 所示。

界面包括 MCU 控制部分和变量采集部分。控制部分主要实现电源控制、传感器仿真、目标指令设定和故障设置。采集部分除模型变量外, 还包括 MCU 发出的硬线信号和总线信号, 如 PWM 信号和控制器的故障信息。

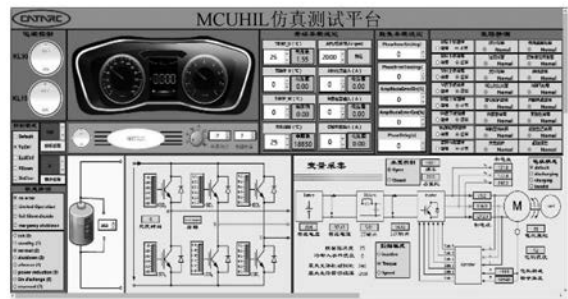


图6 ControlDesk 测试管理界面

5 测试结果分析

HIL 机柜和控制器正常工作后,在上位机根据表 1 设置该电机控制系统的不同故障工况,并实时监控控制器,并针对不同故障采取保护措施。

5.1 电流故障测试

在系统运行过程中,可设置三相电流中任意一相电流超出正常阈值,对控制板而言,只需仿真并改变电流传感器输出的电压即可。当控制器监测到过流时,停止 PWM 输出,并上报二级故障。故障恢复后,控制器不能直接恢复,需要再次进行上下电操作,才可以将故障进行清除。电流故障测试结果如图 7 所示。

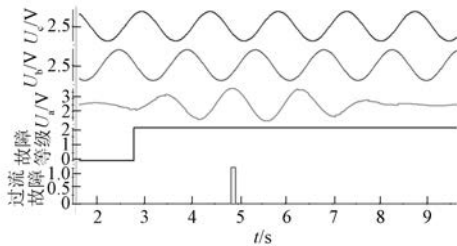


图7 电流故障测试结果

5.2 电压故障测试

电压故障包括直流母线电压过压和欠压。当控制器监测到电压低于或高于限制阈值时,会停机关管,待电压恢复正常并重新上下电后,控制器才可以正常工作。电压故障测试结果如图 8~图 10 所示。

5.3 温度故障测试

温度故障包括电机温度故障和控制器温度故障。通过机柜仿真不同电阻作试验温度的模拟。当温度超过一定范围时,控制器不做任何处理,只通过总线上报警信息提醒用户,但温度再次升

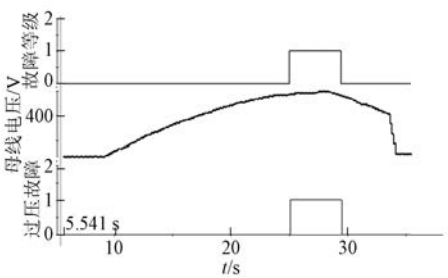


图8 过压一级故障测试结果

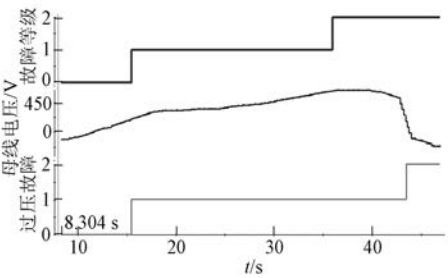


图9 过压二级故障测试结果

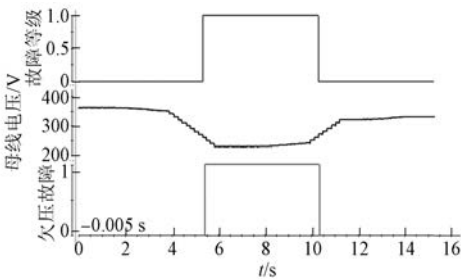


图10 欠压故障测试结果

高后,控制器会限制最大转矩输出,温度恢复正常后,故障清除。温度故障测试结果如图 11~图 12 所示。

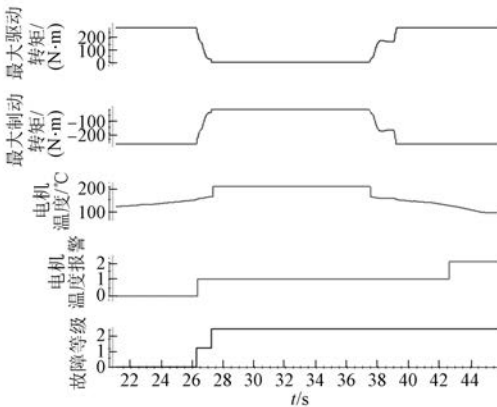


图11 电机温度故障测试结果

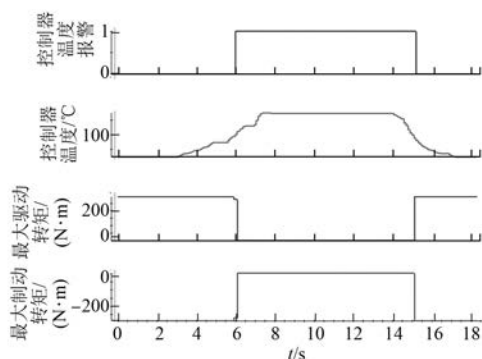


图 12 控制器温度故障测试结果

5.4 旋变故障测试

机柜板卡可以针对旋转变压器进行位置信号仿真和故障注入,包括幅值故障和相位故障等。此外,可以设置不同转速下的位置信号,进行超速故障保护测试。当控制器解码芯片检测到旋变故障后,上报控制器执行关管动作。超速故障测试结果如图 13 所示。

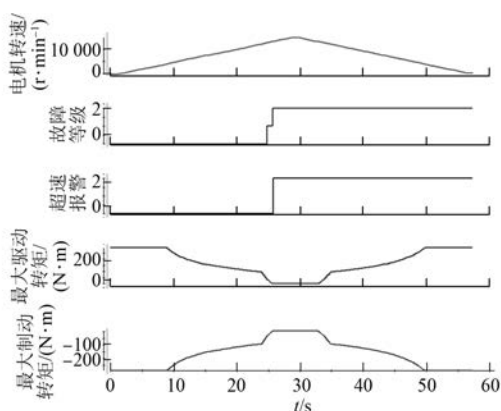


图 13 超速故障测试结果

综上所述,通过用 dSPACE 的 HIL 测试系统可对电控系统中的电压、电流、温度和转速实现实时修改,并监测控制器故障触发和恢复时的参数阈值以及总线发出的故障信号,能够准确地验证电机控制器针对不同故障的保护策略。

6 结 语

本文详细论述了基于 dSPACE 的车用电机控制器 HIL 仿真测试方案,从理论上阐述了测试系统和测试方案的可行性和必要性。通过搭建电机控制器信号级 HIL 测试平台,制定了详细的测试试验流程,并依据测试结果验证了电机控制器的故障保护策略。

利用 dSPACE HIL 测试平台对控制器进行验证,不仅能够节约成本,缩短 ECU 开发周期,而且能够灵活地配置模型参数,实时地改变不同变量来模拟各种工况,并对不同工况下控制器及控制对象的运行状态进行监测,比传统的 ECU 测试更具有优越性。

【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,2002.
- [2] 周明珂.电动车增程器 ECU 硬件在环仿真平台的研究与开发[D].杭州:中国计量学院,2012.
- [3] 赵丹,叶欣,杨子轩.一种纯电动车系统思路及方法[J].汽车与配件,2016(15): 60.
- [4] 袁登科,陶生桂.交流永磁电机变频调速系统[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [5] 王松辉.基于 dSPACE 的无人机飞行控制系统半实物仿真研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.
- [6] 赵鑫,冯亚军,蒋新华.基于 LABCAR 的插电式混合动力轿车硬件在环测试系统设计与应用[J].上海汽车,2014(10): 13.
- [7] HANSELMANN H. Hardware-in-the-loop simulation testing and its integration into a CACSD toolset[C]// Proceedings of Joint Conference on Control Applications Intelligent Control and Computer Aided Control System Design, 1996.
- [8] 朱辉,王丽清,程昌圻.硬件在环仿真在汽车控制系统开发中的应用[J].汽车技术,1998(12): 7.
- [9] 金晓华.基于 dSPACE 半实物仿真的电机测试平台研究[D].南京:东南大学,2006.
- [10] 付畅.车辆自动变速器电控单元硬件在环仿真的研究[D].武汉:武汉理工大学,2007.

收稿日期: 2019-07-30