

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2023.02.003

# 船用柴油机电控系统硬件在环测试平台设计验证

李金华<sup>1,2</sup>, 马子焜<sup>1,2</sup>, 刘佳<sup>1,2</sup>, 黄连佳<sup>1,2</sup>

- 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心, 上海 201108;
- 上海船用柴油机研究所, 上海 201108)

**摘要:** 以船用柴油机为研究对象, 以 dSPACE 为硬件基础, 从硬件、软件两方面介绍船用柴油机电控系统硬件在环仿真测试平台的设计构建方法, 并开展电控系统的基本控制功能和故障诊断功能在线测试验证。测试结果表明, 该平台应用于船用柴油机电控系统硬件在环测试可有效降低开发成本、缩短开发周期。

**关键词:** 硬件在环; 测试; 船用柴油机; 电控系统

中图分类号: TK424.3 文献标志码: A 文章编号: 1001-4357(2023)02-0010-06

## Design and Verification of Hardware-in-the-Loop Testing Platform for Electronic Control System of Marine Diesel Engine

LI Jinhua<sup>1,2</sup>, MA Zikun<sup>1,2</sup>, LIU Jia<sup>1,2</sup>, HUANG Lianjia<sup>1,2</sup>

- National Engineering Research Center of Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering, Shanghai 201108, China;
- Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** Taking marine diesel engines as the research object and dSPACE as the hardware foundation, the design and construction method of a hardware-in-the-loop simulation testing platform for the electronic control system of marine diesel engines from both hardware and software aspects was introduced, and the online testing and verification of the basic control function and fault diagnosis function of the electronic control system was conducted. The test results indicate that the application of this platform in the hardware-in-the-loop testing of marine diesel engine electronic control systems can effectively reduce development costs and shorten development cycles.

**Key words:** hardware-in-the-loop; testing; marine diesel engine; electronic control system

## 0 引言

船用高压共轨柴油机电控系统作为船舶柴油机动力系统的“最强大脑”, 控制和监测柴油机的运行, 其安全性和可靠性备受关注。如今, 除了基本的控制功能外, 电控系统还增加了故障诊断功能, 使其软件变得更加复杂, 软件测试也越来

越困难。传统的开发流程已经不能满足现代电控系统的开发要求, 现代开发流程——“V”型开发流程受到越来越多的青睐, 在汽车、航天、船舶等行业得到广泛应用。它支持从需求到模型, 再到代码, 最后到产品的全流程开发, 可以针对每个开发阶段的质量进行把关, 做到全过程的测试验证<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-06-28

基金项目: 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心资助项目

在“V”型开发流程中，硬件在环测试验证是非常关键的一环。它不仅能够快速验证电控系统的基本控制功能，同时也能模拟台架试验难以实现的各种故障和极限情况，验证故障诊断功能，可极大缩短开发周期、提高软件可靠性、降低配机风险，并可节省人力、物力、财力成本。

## 1 硬件在环系统

硬件在环测试系统俗称半物理仿真测试系统，由被测对象实物、硬件在环仿真系统和执行器实物组成。系统构成如图1所示。

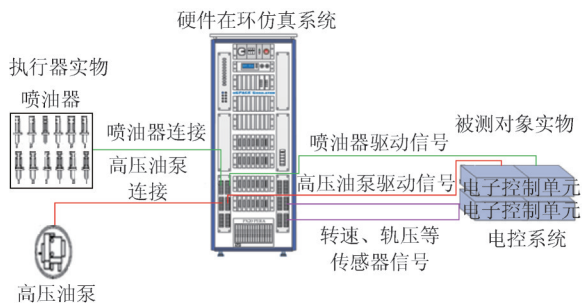


图1 硬件在环测试系统图

被测试对象为某船用高压共轨柴油机电控系统，执行器为高压油泵和喷油器。硬件在环仿真系统为基于dSPACE搭建的仿真系统，主要包括软件模型设计和硬件系统搭建。

## 2 软件模型设计

硬件在环仿真系统的软件模型设计包括柴油机实时仿真模型和输入输出（input output, IO）实时接口模型两部分的设计建模。柴油机实时仿真模型用于模拟电控系统的被控对象——船用高压共轨柴油机，并测试电控系统功能。IO实时接口模型作为电控系统与柴油机模型之间的信号交互接口，可实现仿真数字信号与电气信号之间的转换<sup>[2]</sup>。

### 2.1 柴油机实时模型建模

以某船用高压共轨柴油机为原型建模，分别建立燃油系统模型、气缸和增压器模型（含进排气系统）、动力学模型、负载模型和辅助系统模型，构成柴油机模型，如图2所示。

建模时考虑模型的通用性和兼容性，采用模块化建模。鉴于硬件在环仿真系统侧重于功能性测试，对模型实时性要求高的特点，对于进排气管、高压油管、共轨管这些容积型部件，在建模时忽略压力波在管内的传播。假设管内工质流动为准稳态过程，根据质量守恒公式采用定容积分

建模，既能体现关键物理特性、满足电控系统功能验证要求，又能减少计算迭代、提高模型实时性。在燃油系统中，高压油泵和喷油器的结构比较复杂，若按照其实际结构和工作原理建模，模型将非常庞大，而且运算速度很慢。电控系统通过高压油泵驱动电流控制油泵泵油量，通过控制共轨压力和喷油器驱动电流控制喷油量，从而达到调速目的。在高压油泵和喷油器建模时，通过经验公式和试验数据标定图谱的方法模拟油泵和喷油器的控制特性，可保证测试评价参数的正确性，省去对测试无用的结构化建模部分。

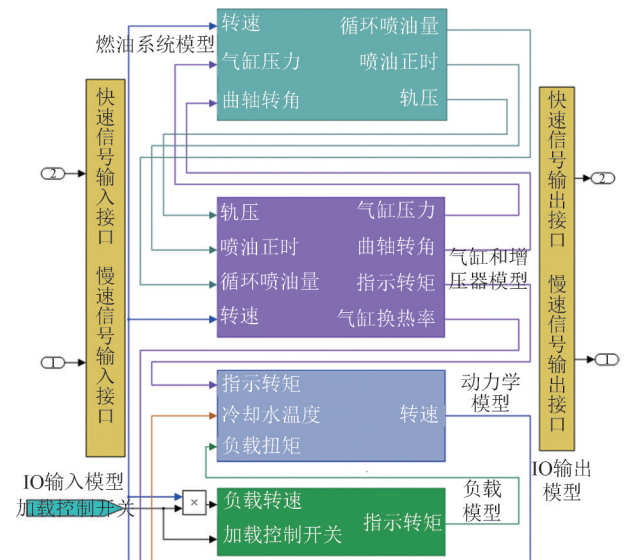


图2 柴油机仿真模型示意图

为了测试电控系统多次喷射控制功能，气缸模型采用多个韦伯模型模拟多次喷射燃烧过程，可以观测多次喷射时刻和喷射量对柴油机动态特性的影响。为了测试电控系统相继增压控制和诊断功能，建立两个增压器模型，分别模拟低负荷单增压器运行和高负荷双增压器运行。为了测试各缸工作的不均匀性，按照实际柴油机缸数建立气缸模型，没有采用为提高实时性而简化的单缸平移算法<sup>[3]</sup>。

动力学模型采用动力学公式建模。负载模型则采用推进特性公式建模。

### 2.2 IO实时接口模型建模

依据电控系统输入输出信号需求，建立IO模型，分别为IO输入模型和IO输出模型。IO输入模型采集电控系统输出信号——高压油泵电流和喷油器电流驱动信号，获取燃油、喷油信息用于柴油机模型计算，使实时模拟高压油泵和喷油器工作过程，从而反映轨压和喷油的特性变化。IO输出模型反映柴油机当前运行状态的转速、轨压

等参数信息，输出给电控系统，使其判断柴油机当前状态，实施相应控制。IO模型采用dSPACE RTI（实时仿直接口）模块建立，建模方法如下。

### 2.2.1 IO输入模型

IO输入模型包括高压油泵、喷油器IO模型。其中，高压油泵IO模型直接采用模拟数字转换器(analog-to-digital converter, ADC)模块，实时采集油泵电流，无须其他配置。喷油器IO模型采用喷油信号采集模块，须配置缸数、发火顺序和首发火缸上止点角度。根据配置信息和柴油机当前曲轴转角，获取每缸每次喷射的喷油时刻与喷油脉宽，用于模型计算。如果配置错误，将导致获取的喷油信息错误。喷油器IO模型如图3所示。

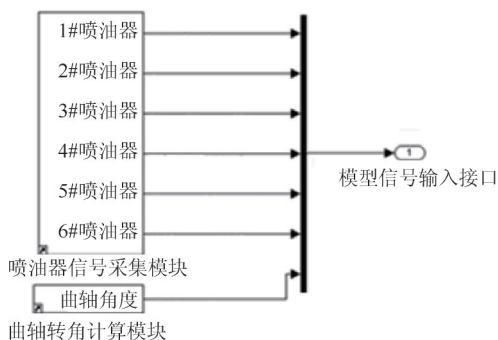


图3 喷油器IO模型示意图

### 2.2.2 IO输出模型

IO输出模型为转速、轨压等传感器类型信号输出模型。转速信号输出模型的建立须根据柴油机转速、相位信号的实际齿数和相位关系等配置信号波形图。通过如图4所示的RTI IO模型曲轴接口与IO模型相位接口模块，按照配置的相位关系和模型实时计算柴油机转速输出曲轴和相位信号。图4中TDC代表上止点(top dead center)。为测试电控系统转速信号故障诊断功能，按照故障类型配置如图5和图6所示的多齿、缺齿故障信号。

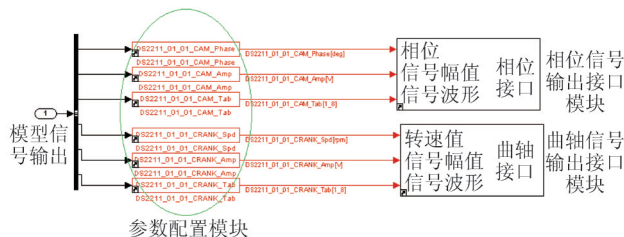


图4 曲轴相位信号RTI模块示意图

通过RTI DAC模块将模型计算轨压值转换为电控系统能够识别的电压信号。根据实际轨压传感器的特性对标映射表，以满足测试的准确性。轨压IO模型如图7所示。其他温度、压力传感器类型信号建模方法同轨压。

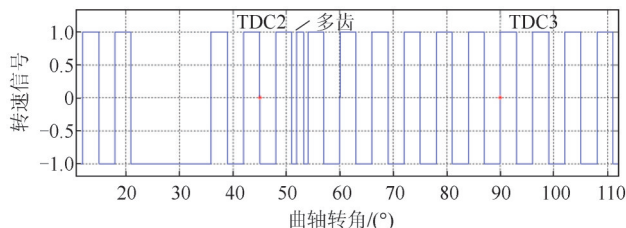


图5 多齿故障转速信号图

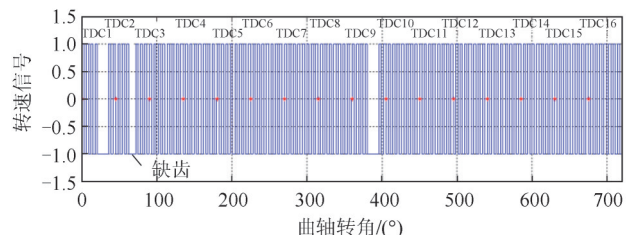


图6 缺齿故障转速信号图

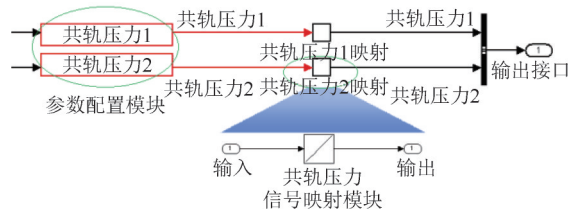


图7 轨压IO模型示意图

## 3 硬件系统设计

硬件系统包括处理器板卡和通用多功能数据输入输出板卡(IO板卡)。处理器板卡具有高速运算能力，可实现仿真模型实时解算，并与IO通道之间高速通信，实现数据实时交互。在此选用搭载高性能处理器的DSPACE DS1006板卡，它具有四核处理器，当模型过于复杂，超出单核运算能力时，可将模型分割，使用多核运算。将柴油机模型编译下载到DS1006运行，结果发现实际仿真时间占用设置单步时间的比例始终小于30%，仅使用单核处理器已满足实时性要求。

通用多功能数据输入输出板卡采集电控系统输出电气信号，将物理量转换为数字量，传输给处理器板卡用于模型计算。同时，接收处理器板卡传输的模型计算的数字量，将其转换为物理量，输出到电控系统对应的电气接口上。根据被测电控系统的输入与输出信号的数量及类型，选配数据输入输出硬件板卡。电控系统的输入输出信号如表1所示，选用DSPACE DS2211 IO板卡。从表1可见，单块板卡能够完全覆盖电控系统输入输出信号的数量和类型要求。考虑后续电控系统升级，还可再增加DS2211 IO板卡数量，各板卡独立工作，彼此不产生干扰。



表1 信号需求映射表

项目	电控系统输入输出信号			DS2211 IO板卡通道	
	信号种类	数量/个	信号类型	通道类型	数量/个
输入	曲轴信号	2	霍尔, 齿数为60-2(缺齿)或500内	曲轴(CRANK, 霍尔)	2
	凸轮信号	2	霍尔, 单齿	凸轮(CAM, 霍尔)	2
	增压器转速信号	2	霍尔, 单齿	脉冲输出(PWM_OUT, 频率可变)	16
	开关量信号	10	无源	数字输出(DIG_OUT)	16
	电阻(温度类信号)	10	PT1000	电阻(RES, 阻值可配)	12
	电压(压力类信号)	7	0~5 V	模拟量输出(DAC, 0~10 V)	20
输出	小功率继电器信号	3	DC24 V直流驱动, 10 W	脉冲信号采集(PWM_IN)	16
	喷油器驱动信号	16	Boost-Hold (Boost最大为25 A)	喷油信号采集(INJ)	16
	高压油泵驱动信号	2	0~3 A	模拟量采集(ADC)	16
	电压信号	3	0~5 V	模拟量采集(ADC)	16
	开关量信号	5	无源	数字输入(DIG_IN)	8
通信	CAN	2		CAN	2

注：空白代表“不适用”。

除油泵、喷油器信号外，电控系统其他输入输出信号直接进入硬件在环仿真系统，通过信号接口转换板卡与DS2211 IO板卡相应通道连接，中间不必再设计连接其他硬件板卡。

电控系统输出的油泵、喷油器信号都须连接实际负载形成回路才能产生实际驱动电流。为满足测试要求，硬件在环仿真系统须采集实际驱动电流，获取油泵和喷油器信息用于模型计算，以便模型实时仿真柴油机不同运行状态，故设计增加电流测量板卡。为满足电控系统油泵、喷油器驱动故障诊断功能测试需求，还设计增加了故障注入板卡<sup>[4]</sup>。高压油泵硬件设计如图8所示。电控系统输出的高压油泵驱动信号通过DS5332电流测量板卡采集，同时将油泵电流信号转换为电压信号输出给DS2211 IO板卡，再通过DS2211的ADC通道采集。配置故障注入板卡DS0291，模拟高压油泵驱动电流信号短路（对地、对电源）和断路电气故障。配置负载板卡DS0281，当缺少实际油泵负载时，可代替实际负载，模拟高压油泵负载特性。

喷油器硬件设计如图9所示。电控系统输出喷油器驱动电流信号瞬时电流值较高，采用高电流测量板卡EV1025采集，可支持60 A以内的电流测量。EV1025将电流信号转换为电压信号输出给DS2211，再通过DS2211的INJ通道捕捉电压信号，获取喷油信息。配置大电流故障注入板卡DS5355和DS5390<sup>[5]</sup>，共同实现喷油器短路、断路电气故障模拟。

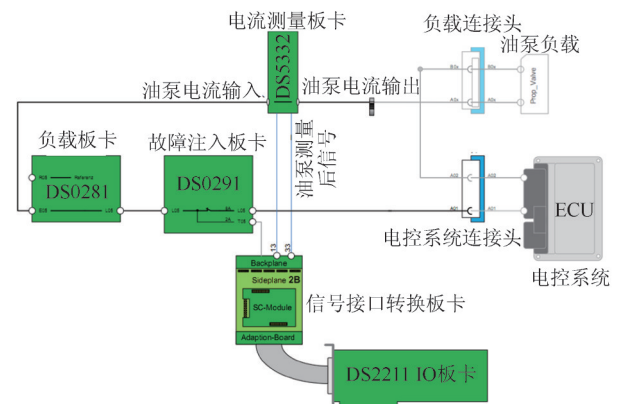


图8 高压油泵硬件设计示意图

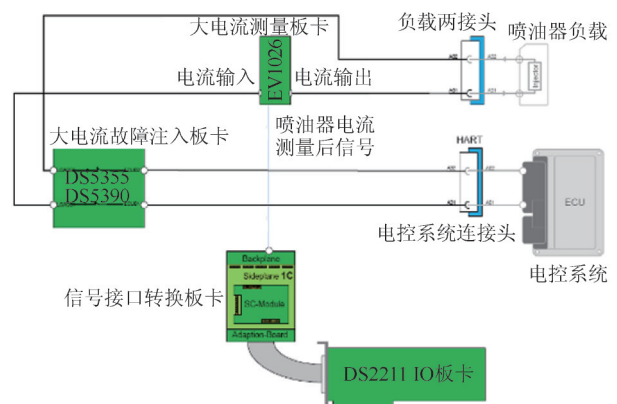


图9 喷油器硬件设计示意图

硬件设计选用的板卡均为dSPACE标准板卡，出厂前均已完成安全性、可靠性测试验证。为验证硬件系统设计满足电控系统测试需求，采用开环通道测试。对于电控系统输入信号，由硬件在环仿真系统IO输出模型设置某信号物理值，观测该信号的采集值，若两值相等且精度在电控系统

传感器精度要求范围内，即说明该信号通道硬件设计正确，满足测试需求。同理，对于电控系统输出信号（如油泵、喷油器信号），由被测电控系统侧设置信号值，观测硬件在环仿真系统IO模型采集值，若一致，说明设计正确。为保证测试准确性，每个信号通道测试10次，剔除不合理结果，取均值。对于油泵、喷油器，还须通过硬件在环仿真系统设置短路（对地、对电源）、断路故障，观测电控系统对故障的诊断响应。硬件在环仿真系统所有硬件通道逐一完成测试，满足测试要求。

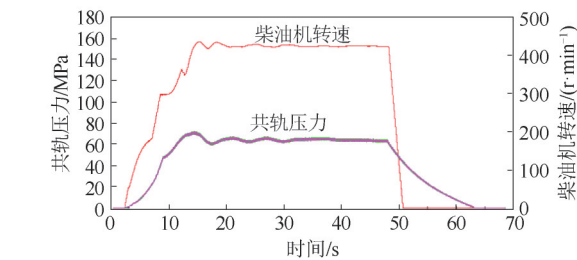
## 4 在线测试验证

连接被测电控系统、硬件在环平台、喷油器和油泵构成硬件在环测试系统。在线测试的主要目的是测试和验证硬件在环仿真系统是否能对柴油机电控系统功能实现准确的全覆盖<sup>[6]</sup>。该柴油机电控系统主要控制功能有启动控制、停车控制、转速和轨压控制、相继增压控制，主要故障诊断功能有超速、超压、喷油器故障、高压油泵故障。

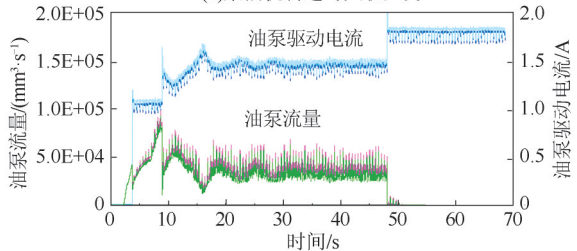
### 4.1 基本功能测试

#### 4.1.1 启动、停车控制功能测试

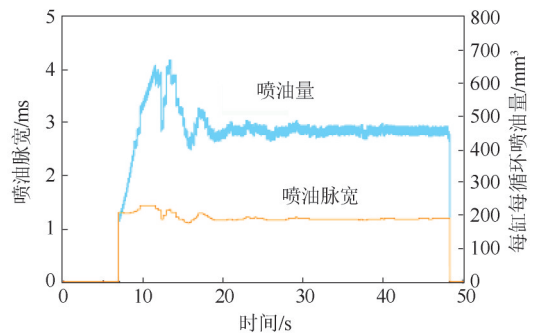
设置目标转速为400 r/min，目标轨压为60 MPa，按启动按钮，电控系统控制油泵以1.0 A电流驱动油泵，使其按每缸5 000 mm<sup>3</sup>进油，迅速建压。在柴油机成功启动并达到目标转速和轨压后，进入转速、轨压闭环控制状态，油泵驱动电流、油泵流量、喷油脉宽、喷油量稳定。按停车按钮，电控系统控制停止供油、喷油，柴油机停车。启动、停车过程测试结果如图10所示。由图10可见，根据启动、停车外部控制指令，电控系统控制柴油机（仿真模型）完成启动、运行、停车过程。



(a)柴油机转速与共轨压力



(b)油泵驱动电流与油泵流量



(c)喷油量与喷油脉宽

图10 启动、停车控制功能测试结果

#### 4.1.2 转速、轨压闭环控制功能测试

测试电控系统能够控制柴油机跟随设定转速、设定轨压变化。测试条件为：在柴油机带螺旋桨负载怠速运行条件下，按加速按钮，目标转速按照一定斜率逐渐增大，随着负荷和转速的增大，目标轨压逐渐增大。柴油机由怠速工况逐渐加速到额定转速1 000 r/min，验证结果如图11所示。

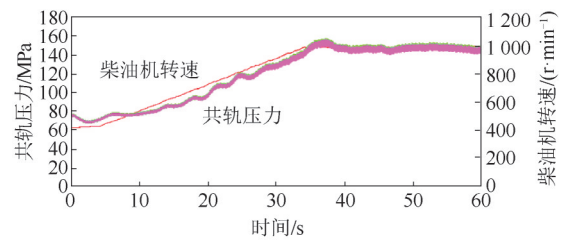


图11 转速轨压控制功能测试结果

由图11可见，转速跟随目标转速上升，直到额定转速1 000 r/min，轨压也跟随目标轨压上升到额定工况对应的目标轨压值160 MPa。整个过程均实现转速和轨压的闭环控制。

#### 4.1.3 相继增压控制功能测试

当测试柴油机进入高负荷运行时，电控系统控制可控增压器切入工作。在进入低负荷工况时，控制可控增压器切出，只留基本增压器继续工作。验证结果如图12所示。

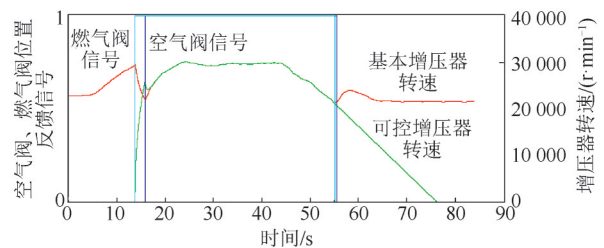


图12 相继增压控制功能测试结果

图12可见当满足切入条件时，电控系统控制空气阀、燃气阀开启，可控增压器切入，两个增

压器转速一致；当满足切出条件时，电控系统控制空气阀、燃气阀关闭，可控增压器切出，转速降为0，实现增压器控制功能。

## 4.2 故障功能测试

### 4.2.1 超速故障诊断功能测试

模拟柴油机超速，测试电控系统是否能够诊断当前为超速工况，停止喷油，控制柴油机紧急停车。验证结果如图13所示。由图13可见，电控系统诊断出柴油机超速，马上停止喷油，控制柴油机紧急停车。

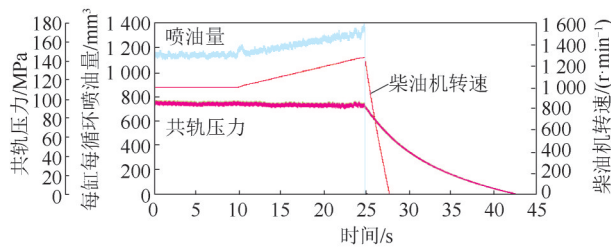


图13 柴油机超速诊断功能测试结果

### 4.2.2 超压故障诊断功能测试

模拟轨压超压，测试电控系统是否能诊断超压故障，控制限压阀开启泄压，维持轨压安全压力。测试结果如图14所示。由图14可见，电控系统诊断出共轨系统超压后，控制泄压阀开启，轨压回落到合理范围。

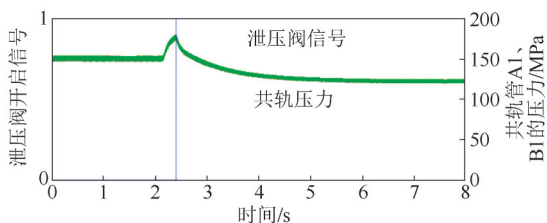


图14 共轨压力超压诊断功能测试结果

### 4.2.3 喷油器故障诊断功能测试

模拟喷油器发生接地故障，测试电控系统故障诊断功能。测试结果如图15所示。由图15可见，电控系统诊断出喷油器故障，控制喷油器停喷，喷油量变为0。

### 4.2.4 油泵故障诊断功能测试

模拟油泵A接地故障，测试电控系统是否能诊断出该故障并做相应处理。测试结果如图16所示。由图16可见，电控系统诊断到油泵A接地，驱动电流变为0，油泵A泵油量变为最大，相应控制油泵B驱动电流变为最大，泵油量变为最小。轨压增大，超压导致泄压阀开启泄压后，油泵B驱动电流减小到稳定值，泵油量和轨压稳定。

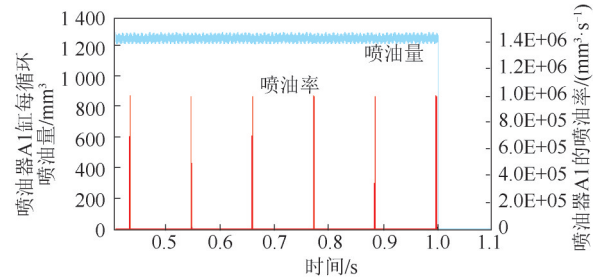


图15 喷油器接地故障诊断功能测试结果

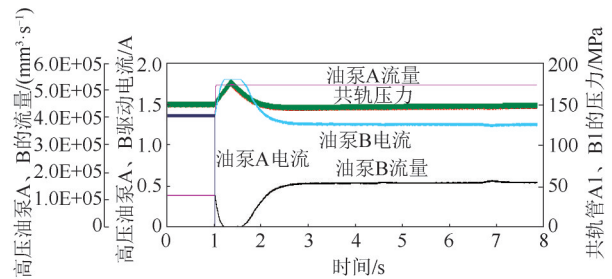


图16 油泵接地故障诊断功能测试结果

## 5 结论

针对船用高压共轨柴油机电控系统，从软件模型和硬件系统两方面设计构建硬件在环仿真系统。在仿真系统上开展电控系统的基本控制功能和故障诊断功能测试验证，结果表明该仿真系统能测试验证电控系统功能，可作为电控系统研制的测试工具。利用硬件在环仿真系统可提前验证电控系统控制和诊断策略，降低实机试验风险。

以模块化建模和通用性硬件为基础开展适应性修改，扩展后的系统可应用于更多机型的电控系统测试。

### 参考文献

- [1] 李彬轩. 柴油机电控单元硬件在环仿真系统的设计及其相关研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [2] 丁威介. 柴油机电控单元硬件在环仿真系统设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [3] 杨志强. 发动机硬件在环仿真试验台搭建[J]. 汽车工程师, 2011(3): 29-31.
- [4] 王勤鹏, 余永华, 杨建国, 等. 船用中速柴油机电子调速系统硬件在环仿真试验平台研制[J]. 船舶工程. 2014, 36(2): 62-65, 98.
- [5] SCHUETTE H, PLOEGER M. Hardware-in-the-loop testing of engine control units: a technical survey[C]. SAE Technical Paper, 2007, 2007-01-0500. DOI: 10.4271/2007-01-0500.
- [6] 王尚勇, 杨青. 柴油机电子控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 220-232.