

团 体 标 准

T/CSAE xx—20xx

柴油机电控系统硬件在环仿真平台开发 技术规范

Diesel engine electronic control system HIL simulation platform development
technical specifications

征求意见稿

在提交反馈意见时，请将您所知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

专利情况：本标准不涉及专利相关内容。

20xx-xx-xx 发布

20xx-xx-xx 实施

中国汽车工程学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	2
4.1 平台开发流程	2
4.2 开发精度要求	2
5 实时物理模型开发	3
5.1 模型构成	3
5.2 模型运算	4
5.3 物理模型开发	4
5.4 IO 模型开发	4
5.5 参数化	5
5.6 离线调试	5
6 测试平台开发	5
6.1 结构设计	5
6.2 板卡选型要求	5
6.3 负载匹配	6
6.4 传感器匹配	6
6.5 总线通讯匹配	7
6.6 ECU 电源匹配	7
6.7 线束匹配	7
6.8 人机交互界面开发	7
7 测试方法	7
7.1 激励测试	7
7.2 开环测试	8
7.3 闭环测试	8
8 平台验收	9
附录 A（资料性）柴油机物理模型参数化内容	10
附录 B（资料性）离线调试点检表示例	11
附录 C（资料性）传感器信息查核	12
附录 D（资料性）闭环测试查核	13

柴油机电控系统硬件在环仿真平台开发技术规范

1 范围

本文件规定了柴油机电控系统硬件在环仿真平台开发、实时物理模型开发、测试平台开发、测试方法及平台验收的要求。

本文件适用于柴油机道路、非道路等多种传统动力机型所应用的电控系统硬件在环仿真平台开发。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1147.2 中小功率内燃机 第2部分：试验方法

GB 17691-2018 重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）

GB/T 19520 电子设备机械结构482.6mm（19in）系列机械结构尺寸

GB/T 27930 非车载传导式充电机与电动汽车之间的数字通信协议

ISO 11898-2:2016 道路车辆 控制器局域网(CAN) 第2部分：高速介质访问单元（Road vehicles - Controller area network (CAN) Part 2: High-speed medium access unit）

ISO 11898-3:2016 道路车辆 控制器局域网(CAN) 第3部分：低速、容错、依赖介质的界面（Road vehicles - Controller area network (CAN) Part 3: Low-speed, fault-tolerant, medium-dependent interface）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

硬件在环测试 hardware-in-the-loop (HIL)

被控对象物理模型生成代码下载到实时仿真机上运行，控制器和HIL仿真机之间通过硬线和通讯的方式进行连接，信号传输形成闭环。

3.2

实时物理模型 real-time physical model

能够实时模拟被控对象运行的虚拟模型。

3.3

参数化 parameterization

为使模型达到一定仿真精度而进行的参数标定。其中单值参数指该参数仅有一个数值，多值参数可以是数组和二维以上的表格参数。

3.4

板卡 board card

模拟传感器的信号输出或采集执行器驱动信号等功能的HIL硬件电路。

4 总体要求

4.1 平台开发流程

HIL测试平台开发包括软件和硬件两部分，开发完成以后需进行详细验收，具体开发流程应包含以下内容：

- a) 柴油机实时物理模型开发；
- b) IO 模型开发；
- c) 模型参数化；
- d) 模型离线调试；
- e) HIL 结构设计；
- f) HIL 板卡选型；
- g) 负载匹配；
- h) 传感器匹配；
- i) 总线通讯匹配；
- j) ECU 电源匹配；
- k) 线束匹配；
- l) 人机交互界面开发；
- m) 仿真测试；
- n) HIL 测试平台交付。

4.2 开发精度要求

4.2.1 仿真精度分类

HIL仿真测试平台用于电控系统功能测试或性能预测，功能测试对仿真的要求较性能预测低，根据闭环测试结果，柴油机电控系统仿真测试平台的精度按照功能测试和性能预测分别给出评价结果。

4.2.2 功能测试精度要求

功能测试的结果应满足表 1 要求。

表1 功能测试精度

分类	偏差	定义	示例
高精度	<5%	对HIL整体仿真运算起关键作用的变量。	发动机转速、喷油量、喷油角度、喷油加电时间、轨压等。
中等精度	5%~20%	指对功能测试影响较大的变量。	冷却水温度、进气管路温度压力、排气管路温度压力、后处理管路温度压力、机油温度压力等。
较低精度	>20%	指对功能测试影响较小的变量。	内燃烧温度、输出扭矩、排气组分及浓度、燃油温度、后处理加热、进气加热等。
注：以上仿真精度偏差的适用工况包括稳态和瞬态，稳态要求100%的工况点，瞬态要求90%的工况点。			

4.2.3 性能预测精度要求

性能预测的精度应满足表2要求。

表2 性能预测精度

序号	变量	工况	最大偏差限值	备注
1	排气温度	稳态	$\leq \pm 20^{\circ}\text{C}$	-
2	有效燃油消耗率	稳态	$\leq \pm 3\%$	-
3	最高燃烧爆发压力	稳态	$\leq \pm 10 \text{ bar}$	-
4	涡轮转速	稳态	$\leq \pm 5\%$	-
5	烟度（后处理前）	稳态	$\leq \pm 15\%$	0.5FSN 以上时
		稳态	$\leq \text{实测最小值 FSN} \pm 0.05\text{FSN}$	0.5FSN 及以下时
6	排气口氮氧化物	稳态	$\leq \pm 10\%$	-
7	增压器后温度	稳态	$\leq \pm 10^{\circ}\text{C}$	-
8	增压器后压力	稳态	$\leq \pm 0.1 \text{ bar}$	-
9	燃油消耗量	瞬态	$\leq \pm 10\%$	-
10	碳载量	稳态	$\leq \pm 20\%$	-
11	NO _x （原排）排放	瞬态	$\leq \pm 10\%$	-
12	SCR 上游温度	瞬态	$\leq \pm 20^{\circ}\text{C}$	-
13	排气尾管出口处氮氧化物	瞬态	$\leq \pm 20\%$	-

5 实时物理模型开发

5.1 模型构成

5.1.1 柴油机模型

柴油机实时物理模型由进气模块、排气模块、供油模块、燃烧模块、后处理模块、冷却模块、做功及转速扭矩计算模块等子系统组成，与被控对象的机型结构一致。

具体模块计算输出变量应符合以下要求：

- a) 进气模块：进气节流阀前后的进气管道压力温度、进气总管新鲜气体流量；
- b) 排气模块：涡前温度压力和流量、EGR 前后温度压力、EGR 阀流量、排气节流阀前后的温度压力、排气制动蝶阀前后的温度和压力；

- c) 供油模块：燃油供给流量、共轨管内温度压力、单缸喷油器每循环喷油量、喷油器回油量；
- d) 燃烧模块：燃烧放热量、缸内压力；
- e) 后处理模块：排气组分、DOC 前后温度压力、HC 喷射量、DPF 前后温度压力、当前碳载量、再生碳载量、SCR 前后温度压力、尿素喷射量、SCR 后 NH_3 浓度及气体浓度组分；
- f) 冷却模块：机油温度和压力、冷却水温度、风扇转速；
- g) 做功及转速扭矩计算模块：发动机输出扭矩、摩擦扭矩、发动机瞬时转速。

5.1.2 辅助模型

除柴油机本体模型外，物理模型还应包括以下试验辅助模块：

- a) 驾驶员模块：实现目标车速的驾驶员加速过程，设定目标车速后，模型自动进行加速仿真，换挡、踩油门。反映常规驾驶员对油门及制动踏板的操纵规律；
- b) 环境模块：模拟环境温度、压力，模拟低温、海拔高度对环境压力的影响，设置道路坡度、道路附着系数；
- c) 测功机模块：实现测功机仿真，支持 M/n（负载扭矩/发动机转速），M/P（负载扭矩/油门开度），n/P（发动机转速/油门开度）等模式的控制，实现台架试验循环模拟，如 WHTC 循环（按照 GB 17691-2018 要求执行）；
- d) 整车模块：仿真整车在道路上的纵向运动，包括整车阻力的计算和汽车加速度、速度、汽车行驶距离的计算。仿真倒车、上坡道倒溜、下坡道溜车工况。其中子模块包括离合器、变速箱、主减速器、差速器等。

5.2 模型运算

对于单核仿真的模型，平均值模型仿真运算步长应不大于1ms，基于缸内燃烧的瞬时模型仿真运算步长应不大于0.1ms。

对于分核计算的模型，进气模块、排气模块、燃烧模块、供油模块、后处理模块、转速扭矩计算模块的运算步长应不大于0.1ms，其余模块运算步长应不大于1ms。

5.3 物理模型开发

柴油机实时物理模型采用零维仿真，基于准稳态的概念建立非线性模型。使用仿真软件搭建，包括 MATLAB、Cruise、GT-Power、Wave、AMESim 等。

模型所有输入输出（以下简称IO）接口变量设置开关，在模型仿真、手动输入两种模式下切换。

模型采用浮点运算，除特殊信号外不定标。设置信号标签，便于跟踪。

如实时物理模型基于 MATLAB/simulink 工具进行开发，应按照如下要求进行：

- a) 复杂功能或逻辑运算，使用 Stateflow 或 S-Function；
- b) 若实现功能主要涉及逻辑操作，同时亦有复杂的数值计算，分别使用 Simulink 和 Stateflow 实现数值计算和复杂逻辑，用 Stateflow 中的函数调用唤醒 Simulink 子系统的执行；
- c) 模块封装，应根据算法功能分解，以子系统的形式出现在模型中；
- d) Inport 模块应放置在模型的左侧，为避免与信号线交叉，可向右偏移。Outport 模块应放置在模型的右侧，为避免与信号线交叉，可向左偏移。Inport 模块不应重复用在根层级中。端口名称可见，不得隐藏；
- e) 信号线不互相交叉，角度正确，不应重叠，不应与模块相交，一个分支点不应超出两条子线。
- f) Simulink 模型中的信号流从左至右，反馈循环除外。顺序模块或子系统从左至右，反馈循环除外。并行模块或子系统从上至下；
- g) 同级系统间应缩减可见的信号流，通过 Goto 及 From 模块实现；
- h) 系统中不应含有：未连接的子系统或基本模块输入，未连接的子系统或基本模块输出，未连接的信号线。

5.4 IO 模型开发

输入输出接口变量在IO模型中开发，应具备以下功能：

- a) ECU 电源的电压、电流控制；
- b) ECU 系统供电开关控制；
- c) 传感器信号模拟；
- d) 执行器信号采集；
- e) 模型与硬件 IO 资源映射；
- f) CAN 节点模拟；
- g) CAN 信号接收。

5.5 参数化

模型参数通过修改参数文件编译后实现，同时能够在线实时修改。

参数类型包括单值参数、数组、二维表格、多维表格，具体参数参考附录A。

参数化的数据来源包括：发动机结构参数、零部件性能参数、发动机试验参数、模型运行保障参数等。

5.6 离线调试

模型搭建后，对模型进行离线调试，应符合以下要求：

- a) 离线运行无异常中断，无故障报出；
- b) 极限输入测试，取无穷小、零点、无穷大、临界状态点等作为输入进行调试，要求仿真运行正常，输出值合理；
- c) 离线编译无错误报出；
- d) 与 Soft ECU 联合进行离线仿真，信号趋势正确，无错误报出；
- e) 进行数据记录和分析存档；

对发动机实时物理模型离线调试结果进行检查，点检表格式参考附录 B。

6 测试平台开发

6.1 结构设计

HIL测试平台的结构设计应符合以下要求：

- a) 采用工业标准 19 英寸机柜，应满足 GB/T 19520 的要求，带有脚轮，便于移动和锁止，脚轮设计最大承重力大于机柜总重量的二倍；
- b) 供电电压 220VAC，50Hz；
- c) 耐受环境要求，温度-10℃~40℃，湿度 95%；
- d) HIL 与 ECU 和负载箱的连接器的连接器，采用 0.5mm²以上的圆针，不得使用单触点式。每个针脚最大承受电流不小于 6A，接触电阻小于 1.8mΩ，插拔次数寿命大于 5000 次。

6.2 板卡选型要求

电阻、模拟量、数字量、电流输入板卡选型应满足表3的要求：

表3 板卡选型要求

序号	板卡类型	范围	采集速率	分辨率	精度偏差
1	电阻	0.1kΩ~500kΩ	≥1kHz	≤4Ω	≤1%
2	模拟输入	0V~5V	≥50kHz	≥16bit	≤3mV
3	模拟输出	0V~5V	≥50kHz	≥14bit	≤5mv
4	PWM 数字输入	1Hz~100kHz	≥50kHz	-	频率≤0.2%，占空比≤0.2%
5	PWM 数字输出	1Hz~100kHz	≥50kHz	-	频率≤0.2%，占空比≤0.2%
6	电流输入	0A~30A	≥50kHz	-	≤1%

其他类型的板卡应符合以下要求：

- a) 角度采集：支持 24 缸，每缸 7 次喷射，角度偏差不大于 0.01 曲轴转角，转速上限不小于 12000r/min；
- b) 故障注入板卡电流限值要求：喷油器不小于 50A，电磁阀类负载不小于 8A，继电器、指示灯类负载不小于 2A，传感器信号不小于 500mA；
- c) ECU 供电继电器：不应使用可编程电源直接控制，需经过继电器输出，每通道持续电流不小于 20A，总电流不小于 45A，采用 MOSFET 控制开关；
- d) 板卡过压保护不小于 60V，带有自复位保险。

6.3 负载匹配

执行器采用模拟负载或真实负载，如下负载应用真实执行器：

- a) 带有位置反馈信息的执行器：如节流阀、EGR 等；
- b) 交互信息信号频率大于 1kHz 的智能型执行器：如智能型尿素泵等；
- c) 具有真实信号反馈要求的执行器，如后处理尿素泵建压系统，其尿素泵和尿素喷嘴需同时采用真实执行器，并建立相应的尿素吸液、喷射和回流管路。

模拟负载匹配应符合表 4 要求。

表4 模拟负载要求

序号	板卡类型	电阻/Ω	电感/mH	功率/W	备注
1	喷油器	0.22	0.18	50	最大持续电流 25A，最大瞬时电流 36A
2	油量计量单元	2.7	5.6	200	最大持续电流 3A，最大瞬时电流 8A
3	尿素喷嘴	12	14	100	-
4	SV 切断阀	3.3	6	100	-
5	DV 计量阀	16	20	100	-
6	其他电磁阀、加热丝类负载	300	-	50	ECU 无电流采样要求

注：继电器类负载采用真实继电器，电阻在 300Ω~500Ω，工作电压 9V~36V。

6.4 传感器匹配

柴油机 HIL 需要模拟的传感器应符合以下要求：

- a) 电阻型传感器，采用电阻板卡模拟，满足温度类传感器的模拟效果；

- b) 电压型传感器，采用模拟输出板卡模拟，满足压力类或者位置类传感器的模拟效果；
- c) 频率型传感器，采用普通的 PWM 数字或频率输出板卡模拟，高频信号或信号幅值随曲轴转角变化的信号采用 FPGA 板卡模拟。

6.5 总线通讯匹配

柴油机 HIL 总线通讯应符合以下要求：

- a) CAN 通讯：波特率可配置，最大值不小于 1Mbps。支持 CAN 2.0A（标准帧格式），CAN 2.0B（扩展帧格式），配置格式应支持 GB/T 27930 通信协议的要求，高速 CAN 应满足 ISO 11898-2:2016 标准要求，低速 CAN 应满足 ISO 11898-3:2016 标准要求；
- b) SENT 通讯：配置 SENT（Single Edge Nibble Transmission，单边半字节）输出和输入，即 SENT 信号的发生和解析。SENT 参数可配置项包括 ticks、帧长、同步段连续相关的帧（1-18 帧）、每帧的 Nibble 取值方式以及 Slow channel 定义。

6.6 ECU 电源匹配

柴油机 HIL 的电控系统电源应符合以下要求：

- a) 单 ECU 功率不小于 1200W，双 ECU 不小于 2000W，输出电压 0V 至 40V 可调，分辨率 1mV，输出电流上限单不小于 30A，双 ECU 不小于 50A；
- b) 外壳绝缘：交流大于 1500V，直流大于 1000V，绝缘阻抗大于 100MΩ；
- c) 冷却方式：强制风冷，由前往后，自动调速风扇；
- d) 为了保证实时性，必须采用硬线直接控制，具备自我保护功能。

6.7 线束匹配

ECU 线束的线径在 0.35mm²至 1.5mm²之间，使用 FLR-B 德标薄壁导线。线束外面用黑色编织网管包裹，用黑色绒布胶带及扎带紧固，出线端不影响接插件安装。线束应符合以下要求：

- a) 耐压不小于 36V；
- b) 允许经过的最大电流不小于对应 ECU 管脚的峰值电流；
- c) 信号间不出现电磁干扰。

6.8 人机交互界面开发

HIL 测试平台常用的人机交互界面，应支持实时在线调整模型参数、在线观测模型信号波形、记录和保存数据，界面应包括以下内容：

- a) 虚拟驾驶舱界面，包括驾驶员可操作的所有输入，如油门踏板、换挡杆、各种开关，可实现怠速、加/减速、巡航、制动等各工况的操作。显示车辆状态信息，如车速、发动机转速、发动机扭矩、变速箱档位等；
- b) 发动机模型界面，监控发动机模型中的重要变量，在线修改发动机模型的主要参数，如摩擦扭矩、喷油器各缸油量矩阵、SCR 催化剂质量等；
- c) 传感器状态监控界面；
- d) 执行器状态监控界面；
- e) 总线显示和监控界面。

7 测试方法

7.1 激励测试

HIL 未连接 ECU 之前进行激励测试，对于所有 IO 通道取样，设定与实际值进行对比，测试内容及方法见表 5。

表5 激励测试信息

序号	功能板卡	测试工具	最大偏差限值	测试取样点
1	模拟输入	六位半台式信号源	$\pm 3\text{mV}$	0V、1V、3V、5V
2	模拟输出	六位半台式万用表	$\pm 5\text{mV}$	0V、1V、3V、5V
3	数字输入	信号发生器	频率 $\pm 0.2\%$ ， 占空比 $\pm 0.2\%$	频率：2Hz、100Hz、5kHz、50kHz； 占空比：0.5%、5%、50%、95%
4	数字输出	示波器		
5	电阻模拟	六位半台式万用表	$\pm 1\%$	200 Ω 、1k Ω 、50k Ω 、500k
6	电流采集	六位半台式万用表	$\pm 1\%$	0.1A、0.5A、2A、5A
7	电感采集	LCR 电桥表	$\pm 1\%$	0.01mH、0.5mH、2mH、5mH
8	供电	六位半台式万用表	$\pm 10\text{mV}$	9V、14V、24V、28V、36V

7.2 开环测试

激励测试完成后，连接 ECU 进行 IO 开环测试，测试方法如下：

- a) 传感器信号：通过 HIL 上位机监控界面设置传感器信号值（如压力、温度、位置），用测量工具读取控制器采集到内部对应变量值；
- b) 执行器信号：用诊断/标定工具设置 ECU 的输出(如信号占空比等)，HIL 进行采集并在监控界面上显示信号值；
- c) 总线信号：逐一校验控制器发送信号与 HIL 接收信号以及 HIL 发送信号和控制器接收信号，两者应同步且完全相等；
- d) 误差要求：小于 ECU 对应通道的最小分辨率的四分之一，如 ECU 的传感器电压采集最小分辨率为 $\pm 20\text{mV}$ ，要求 HIL 对应的模拟电压输出误差不大于 $\pm 5\text{mV}$ 。

7.3 闭环测试

开环测试通过后应进行闭环测试，用闭环测试结果验证功能测试精度及性能预测精度。闭环测试方法如下：

- a) 操作上位机软件，设定试验步骤进行闭环测试。分别进行子系统级别的闭环测试，分为：进气系统、排气系统、供油系统、燃烧系统、后处理系统、冷却系统、转速扭矩系统等。采用发动机台架试验数据作为子系统的输入，调整模型及参数使子系统的输出与发动机台架数据的输出相比在允许的偏差范围内。
- b) 子系统级别的闭环调试全部通过后进行全系统闭环测试，包括：
 - 1) 起动测试，按照 GB/T 1147.2 执行；
 - 2) 调速特性测试，按照 GB/T 1147.2 执行；
 - 3) 速度特性测试，按照 GB/T 1147.2 执行；
 - 4) 负荷特性测试，按照 GB/T 1147.2 执行；
 - 5) 万有特性测试，按照 GB/T 1147.2 执行；
 - 6) 最低可调空载测试，按照 GB/T 1147.2 执行；
 - 7) 排放测试，分为稳态试验循环测试（WHSC）和瞬态试验循环测试（WHTC），按照 GB/T 17691-2018 执行。

闭环测试过程中应使用成熟可靠的ECU软硬件，HIL系统在闭环测试过程中，每个步骤的响应时间或迟滞时间应保持一致，各步骤之间的时间偏差应不大于1ms，测试结果应符合HIL功能测试或性能预测精度的要求。

HIL闭环测试应具备100%完全可复现性，同一HIL系统测试相同内容，在一年内的多次闭环测试结果偏差不大于精度要求的5%，且不影响最终测试结论。

8 平台验收

HIL仿真测试平台开发完成以后，需进行详细验收，验收通过方可表示开发全部结束。交付验收时，为方便用户进行测试验证，以下文件性内容应一并提供：

- a) ECU 线束定义说明书；
- b) 负载箱接线定义表；
- c) 自动化测试变量表；
- d) 模型参数化列表；
- e) 传感器查核表（参考附录 C）；
- f) 闭环测试查核表（参考附录 D）。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/886141212044010134>