

ICS 27.020
CCS J 091

团 体 标 准

T/CICEIA/CAMS XXXX-XXXX

天然气发动机车载诊断（OBD）系统 环境适应性虚拟仿真评价方法

Natural gas engine on-board diagnostics (OBD) system
Environmental adaptability virtual simulation evaluation method

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

中国内燃机工业协会
中国机械工业标准化技术协会

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 仿真评价流程.....	1
5 模型与系统搭建.....	2
6 虚拟模型集成与调试.....	4
7 虚拟仿真评价试验.....	5
8 结果分析.....	6
图 1 天然气发动机车载诊断（OBD）系统环境适应性虚拟仿真评价流程.....	2
图 2 诊断变量正态分布频率直方图.....	7
表 1 系统输出变量列表.....	3
表 2 系统组成要求列表.....	3
表 3 描述短行程特征的参数.....	4
表 4 稳态关键参数仿真精度要求.....	5
表 5 瞬态关键参数仿真精度要求.....	5
表 6 试验环境边界.....	6
表 7 回归线允差.....	6
表 8 分析结果汇总.....	7

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国内燃机工业协会提出。

本文件由中国内燃机工业协会标准化工作委员会归口。

本文件起草单位：潍柴动力股份有限公司、XXX。

本文件主要起草人：XXX、XXX。

本文件为首次发布。

天然气发动机车载诊断（OBD）系统环境适应性 虚拟仿真评价方法

1 范围

本文件规定了天然气发动机车载诊断（OBD）系统环境适应性虚拟仿真评价流程、模型与系统搭建、模型集成与调试、评价试验及评价结果分析的要求。

本文件适用于M2、M3、N1、N2和N3类及总质量大于3500kg的M1类天然气发动机OBD系统。其他天然气发动机OBD系统可参照执行。

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 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 18297 汽车发动机性能试验方法

T/CSAE 431 柴油机电控系统硬件在环仿真平台开发技术要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

虚拟发动机模型 virtual engine model

指通过仿真软件搭建的模拟实际天然气发动机进排气系统、燃气喷射系统、冷却系统及燃烧系统特性的实时模型。

3.2

后处理虚拟模型 after treatment virtual model

指通过仿真软件搭建的模拟天然气发动机后处理系统化学反应动力学特性的实时模型。

3.3

硬件在环系统 hardware-in-the-Loop (HIL) system

将真实控制器硬件、执行器硬件与仿真物理环境连接，形成一个闭环测试系统，以模拟真实工况下的交互。

3.4

信号发生及采集系统 signal generation and acquisition system

模拟传感器的信号输出、采集执行器信号等功能的硬件电路。

4 虚拟仿真评价流程

图 1 为天然气发动机 OBD 系统环境适应性虚拟仿真评价流程，详细过程如下：

- a) 搭建天然气发动机虚拟模型、后处理虚拟模型、硬件在环系统；
- b) 将天然气发动机虚拟模型、后处理虚拟模型集成到硬件在环系统上，进行虚拟模型开闭环调试；
- c) 进行 OBD 特征路谱准备；
- d) 进行天然气发动机 OBD 系统环境适应性虚拟仿真评价试验；
- e) 进行评价结果分析。

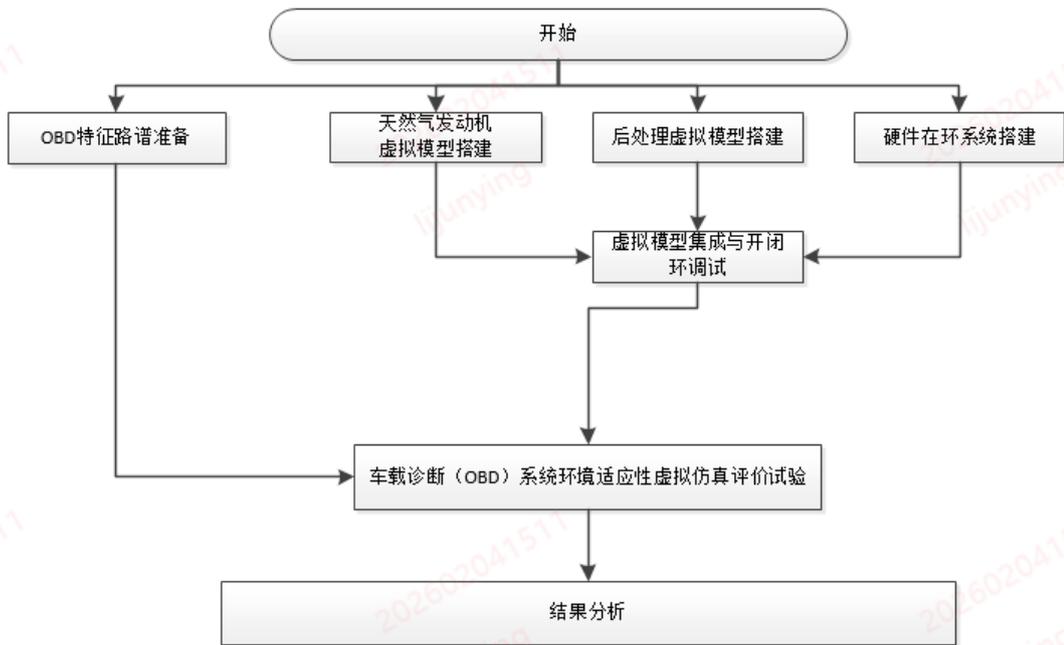


图 1 天然气发动机 OBD 系统环境适应性虚拟仿真评价流程

5 模型与系统搭建

5.1 天然气发动机虚拟模型

5.1.1 模型实时性

实时因子（real-time factor）是模拟时间与真实时间的比值。实时因子大于1表明模拟时间比真实时间慢，无法实现实时模拟；实时因子小于1表明模拟时间比真实时间快，可实现实时模拟。气体发动机虚拟模型在虚拟台架上稳态运行的实时因子应小于0.7，确保模型实时运行过程不出现模型溢出的问题。

5.1.2 模型组成

天然气发动机虚拟模型由进气系统、排气系统、燃气喷射系统、冷却系统、燃烧系统五个系统组成，各子系统技术路线应与被控对象的机型结构一致。

天然气发动机虚拟模型中各子系统的仿真计算应至少包括表1所示的输出变量。

表 1 系统输出变量列表

序号	天然气发动机模型子系统	输出变量
1	进气系统	压气机进口温度压力、压气机出口温度压力、中冷器后温度压力、节气门前温度压力、混合器温度压力、进气歧管温度压力、新鲜进气量、增压器转速
2	排气系统	涡轮机进口排气温度压力、排气流量、废气再循环装置（EGR）前后废气温度压力、通过 EGR 阀的废气流量、涡轮机出口排气温度压力
3	燃气喷射系统	燃气喷射流量、燃气温度、气轨压力、燃气喷射加电时间
4	燃烧系统	天然气发动机转速、燃烧放热率、缸内压力、输出扭矩、摩擦扭矩、排气温度、排气组分（CH ₄ 、THC、CO、NO _x 、O ₂ 等）
5	冷却系统	机油温度压力、冷却液温度、风扇转速

5.2 后处理虚拟模型

5.2.1 模型实时性

模型实时性要求参照5.1.1。

5.2.2 模型组成

后处理虚拟模型应与被控对象的机型结构一致。

后处理虚拟模型的仿真计算输出变量应至少包括：后处理温度、后处理出口气体成分（CH₄、THC、CO、NO_x、O₂等）。

5.3 硬件在环系统

硬件在环系统由HIL系统、测控系统、标定系统、硬件机柜组成，各子系统的系统组成要求应至少包括表2所示内容。

表 2 系统组成要求列表

序号	硬件在环子系统	系统组成要求
1	HIL 系统	HIL 工控机，HIL 软件进行实时仿真应用的搭建、编译和下载
2	测控系统	测控工控机，测控软件进行模型运行控制、测量与数据记录
3	标定系统	标定工控机，标定软件进行与控制器通讯、标定与测量
4	硬件机柜	电源模块、板卡组、实时机、控制器、线束、负载单元

5.4 OBD 特征路谱准备

OBD特征路谱准备的流程如下：

- a) 根据发动机排量及配套应用场景，选择一段时间的整车实际运行路谱数据，用于构建特征路谱循环；
- b) 对整车路谱数据进行预处理及清洗，剔除异常值。根据整车运动学数据划分短行程，计算短行程对应的特征参数，参数如表3；
- c) 根据聚类算法，对城市、郊区、高速等短行程样本进行划分归类；
- d) 使用马尔科夫链模拟真实驾驶过程中的状态变化，并通过蒙特卡洛抽样，构建高代表性的短片段特征路谱；
- e) 将得到的各短片段特征路谱拼接，生成OBD特征路谱。

表 3 描述短行程特征参数

特征参数	特征参数	特征参数
行驶距离/m	行驶时间/s	平均减速度(m/s^2)
加减速占比/%	平均速度/(km/h)	加速度标准差
匀速占比/%	速度标准差	
怠速占比/%	平均加速度/(m/s^2)	

6 虚拟模型集成与调试

6.1 开环调试

开环调试是系统搭建的第一阶段工作，主要完成控制器与板卡通道的线束连接、板卡通道的配置、开环模型和实时应用的创建、各项开环控制功能的确认。开环调试需保证准确的信号模拟和执行器信号测量。开环调试过程中信号误差应符合 T/CSAE 431 的要求。开环调试步骤如下：

- a) 需求分析和硬件准备；
- b) 开环模型搭建；
- c) 实时应用创建和编译；
- d) 开环功能验证。

6.2 闭环调试

开环调试通过后进行闭环调试，用闭环调试结果验证虚拟仿真平台精度。闭环调试应满足如下要求：

- a) 闭环测试过程中，虚拟仿真平台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不大于 1ms；
- b) 闭环测试结果与发动机台架数据（基准参数）对比，精度应符合 6.4 的要求；
- c) 测试结果应具备可复现性，每两次测试结果偏差不大于 5%。

6.3 预试验测试

测试控制系统控制虚拟发动机起动，起动后怠速运行（3~5）min。切换转速/油门模式控制发动机到额定工况运行（5~10）min，额定工况运行期间，调整运行边界参数（包含环境温度、环境压力、环境湿度、喇叭口进气负压、中冷压降、排气背压、出水温度、机油温度等），确保符合发动机设计开发要求。

6.4 仿真精度要求

按照 GB/T 18297 进行万有特性试验，记录性能、排放关键参数并与基准参数进行对比，关键参数的仿真精度应满足表 4 要求。

瞬态循环 WHTC（World Harmonised Transient Cycle）按 GB 17691-2018 标准进行，记录性能、排放参数与基准参数进行对比，关键参数的仿真精度应满足表 5 要求。

表 4 稳态关键参数仿真精度要求

序号	仿真变量	工况及要求	偏差要求
1	进气流量 (kg)	稳态工况 满足偏差要求的工况 需覆盖至少 80%	±5%
2	燃气消耗率 (g/kWh)		±3%
3	最高爆发压力 (MPa)		±10bar
4	增压器转速 (r/min)		±3%
5	前氧浓度 (后处理前) (%)		±3%
6	氮氧化物排放 (后处理前) (10 ⁻⁶)		±10%
7	氮氧化物排放 (后处理后) (10 ⁻⁶)		±10ppm
8	总碳氢、一氧化碳排放 (后处理前) (10 ⁻⁶)		±15%
9	总碳氢、一氧化碳排放 (后处理后) (10 ⁻⁶)		±15ppm
10	后氧浓度 (后处理后) (%)		±3%
11	进气歧管温度 (°C)		±10°C
12	进气歧管压力 (kPa)		±10kPa
13	排气温度 (°C)		±20°C
14	排气压力 (kPa)		±20kPa
15	后处理温度 (°C)		±20°C

表 5 瞬态关键参数仿真精度要求

序号	仿真变量	工况及要求	偏差要求
1	累计功 (kWh)	瞬态工况	±2%
2	累积燃气消耗率 (g/kWh)		±3%
3	累积进气量 (kg)		±3%
4	氮氧化物排放原排 (g/kWh)		±10%
5	氮氧化物排放尾排 (g/kWh)		±10%
6	总碳氢、一氧化碳排放原排 (g/kWh)		±10%
7	总碳氢、一氧化碳排放尾排 (g/kWh)		±10%

7 虚拟仿真评价试验

7.1 试验准备

试验环境边界按照GB 17691-2018中规定的OBD功能临时中断的环境温度和海拔条件要求进行设置，边界组合如表6。

表6 试验环境边界

序号	温度 (°C)	压力 (kPa)
1	-7	101
2	38	101
3	-7	74
4	38	74

根据零部件厂商提供的零部件偏差范围，设定不同的零部件关键变量偏差值。

7.2 虚拟仿真评价试验

通过测试控制系统控制虚拟天然气发动机起动，运行瞬态测试循环（WHTC）。完成瞬态测试循环后应立即停机，进行10min±1min的热浸期，作为OBD特征路谱循环的预处理。热浸期内虚拟模型在实时机内保持运算状态，模拟天然气发动机的自然冷却过程。

热浸期结束后，通过测试控制系统控制天然气发动机起动，起动后应立即进行OBD特征路谱循环试验。

若在OBD特征路谱循环试验期间停机，则试验无效。需按要求重新热浸，再次进行试验。

8 评价结果分析

8.1 试验有效性分析

对OBD特征路谱循环试验的转速、扭矩和功率进行基于基准值和实际值的线性回归分析。为将反馈信号相对于实际循环和基准循环之间的时间滞后带来的偏差影响降至最小，整个柴油机转速和扭矩反馈信号序列在时间上可以提前或滞后于对应的基准转速和扭矩序列。若实际信号移位，则转速和扭矩两者都需向同一方向转换同一序列量值。

采用最小二乘法进行回归分析，分别计算实际值y基于基准值x的估算值的标准偏差和相关系数。分析频率取1Hz，分析结果应符合表7的要求，试验方被认为有效。

表7 回归线允差

参数类型	转速	扭矩	功率
y相对x的估算值的标准偏差	≤最高试验转速的5%	≤最大柴油机扭矩的10%	≤最大柴油机功率的10%
回归线的斜率	0.95到1.03	0.83到1.03	0.89到1.03
相关系数	最小0.970	最小0.850	最小0.910
回归线的y截距	≤怠速的10%	±20Nm或±2%最大扭矩，取其较大者	±4kW或±2%最大功率，取其较大者

8.2 环境适应性评价

按GB 17691-2018中OBD系统检测的系统 and 部件要求，对各部件、系统检测的环境适应性分别进行评价。

提取OBD特征路谱循环试验数据中，满足各监测功能所需监测条件的数据。对各监测功能的诊断变量作正态分布图。

以监测功能A为例，假设该功能在诊断变量小于标定限值时不报故障，大于标定限值时报故障，则正常件试验数据中标定限值以下的区域为正常件不报故障的概率，劣化件试验数据中标定限值以上的区域为劣化件报故障的概率，如图2。

分别分析各部件、系统的监测概率，将概率结果填写至表8，若正常件和劣化件的概率都满足 3σ 区间，则该OBD部件、系统的环境适应性满足要求，反之则不满足要求。

表 8 分析结果汇总

监测项目	正常件不报故障概率%	劣化件报故障概率%	环境适应性评估
A			
B			
C		-	

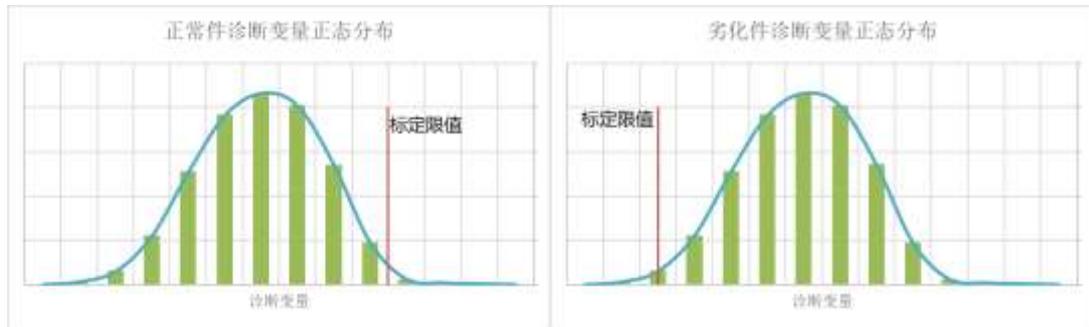


图 2 诊断变量正态分布频率直方图