

ICS 27.020  
CCS J 091

# 团 体 标 准

T/CICEIA/CAMS XXXX-XXXX

## 车用柴油机排放虚拟仿真测试方法

Diesel engine emissions virtual simulation test 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 仿真测试流程..... 1

5 模型与系统搭建..... 2

6 虚拟模型集成与调试..... 3

7 测试步骤..... 6

8 测试结果分析..... 6

图 1 车用柴油机排放虚拟仿真测试流程..... 2

表 1 系统输出变量列表..... 3

表 2 系统输出变量列表..... 3

表 3 系统组成要求列表..... 3

表 4 关键参数仿真精度要求..... 4

表 5 WHTC 回归线允差..... 7

表 6 WHSC 回归线允差..... 7

表 7 测试结果汇总..... 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。

# 车用柴油机排放虚拟仿真测试方法

## 1 范围

本文件规定了车用柴油机排放虚拟仿真测试的仿真测试流程、模型与系统搭建、虚拟模型集成与调试、测试步骤及测试结果分析等内容。

本文件适用于M2、M3、N1、N2和N3类及总质量大于3500kg的M1类汽车用柴油机。

## 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 18297-2024 汽车发动机性能试验方法

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）

T/CSAE 431-2025 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

**柴油机虚拟模型** diesel virtual model

能够实时模拟实际柴油机进排气特性、燃油喷射特性、传热特性及燃烧特性的虚拟模型。

### 3.2

**后处理虚拟模型** after treatment virtual model

能够实时模拟实际后处理化学反应动力学特性的虚拟模型。

### 3.3

**硬件在环系统** hardware-in-the-Loop system

将真实控制器硬件直接放入仿真回路中，与计算机仿真物理模型进行实时交互的仿真系统。

### 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硬件电路。

## 4 仿真测试流程

图 1 描述了车用柴油机排放虚拟仿真测试流程，步骤如下：

a) 搭建柴油机虚拟模型、后处理虚拟模型、硬件在环系统；

- b) 将柴油机虚拟模型、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 WHTC、WHSC、WNET 排放虚拟仿真测试；
- d) 进行虚拟仿真测试结果分析。

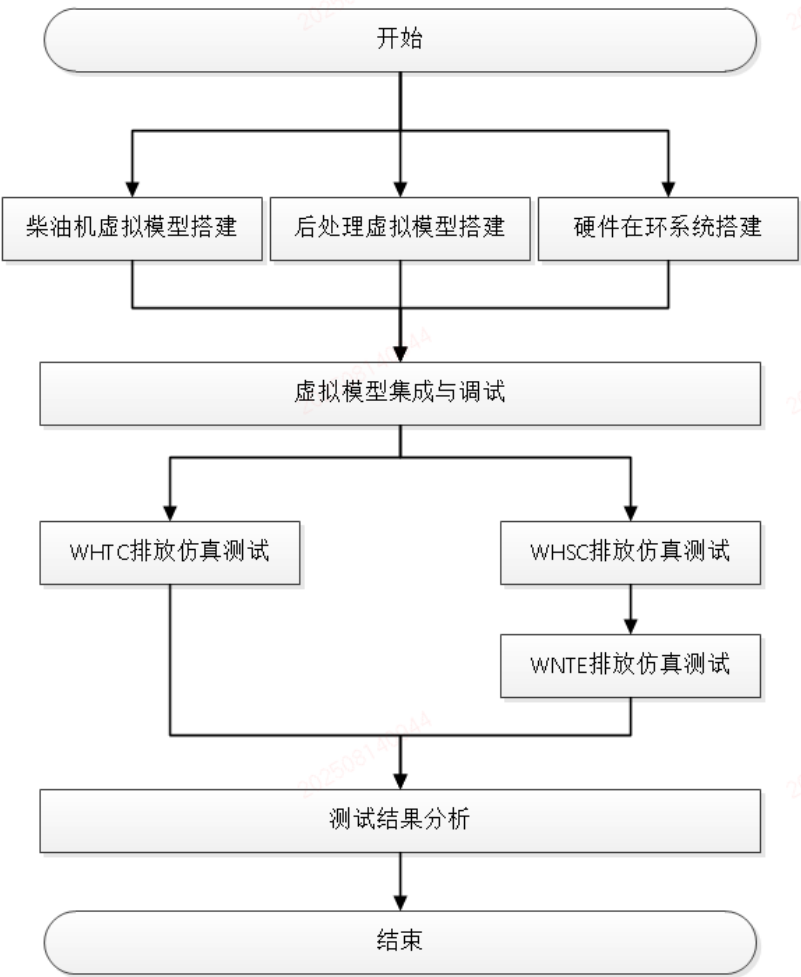


图1 车用柴油机排放虚拟仿真测试流程

5 模型与系统搭建

5.1 柴油机虚拟模型

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。正常情况下，理想值为1，即模拟时间与现实时间同步。若实时因子大于1表明模拟时间比真实时间慢，无法实现实时模拟；若实时因子小于1表明模拟时间比真实时间快，可实现实时模拟。

柴油机虚拟模型在虚拟台架上稳态运行的实时因子宜小于0.7，瞬态运行的实时因子应不大于1，这样能确保模型实时模拟过程不出现模型溢出的问题。

5.1.2 模型组成

柴油机虚拟模型由进气系统、排气系统、供油系统、燃烧系统、冷却系统五个系统组成，各子系统技术路线应与被控对象的机型结构一致。

柴油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	柴油机模型子系统	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、进气节流阀后进气管道温度压力、进气总管气体流量、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、排气节流阀后气体温度压力、排气制动蝶阀后气体温度压力
3	供油系统	燃油供给流量、燃油温度、共轨管内燃油压力、单缸喷油器每循环喷油量
4	燃烧系统	柴油机转速、燃烧放热率、缸内压力、发动机输出扭矩、摩擦扭矩、排气气体温度、排气组分（THC、CO、NO <sub>x</sub> 、O <sub>2</sub> ）
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

后处理虚拟模型由催化氧化器(DOC)系统、颗粒捕集器(DPF)系统、催化还原器(SCR)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。

后处理虚拟模型中各子系统的仿真计算应至少包括表2所示的输出变量。

表2 系统输出变量列表

序号	后处理模型子系统	输出变量
1	DOC 系统	DOC 前燃油喷射量、DOC 下游排气温度压力、DOC 下游排气组分（THC、CO、NO <sub>x</sub> 、O <sub>2</sub> ）
2	DPF 系统	DPF 下游温度压力、DPF 下游排气组分（THC、CO、NO <sub>x</sub> 、O <sub>2</sub> ）、DPF 当前碳载量、DPF 再生碳载量
3	SCR 系统	SCR 入口尿素喷射量、SCR 氨储量、SCR 下游排气温度压力、SCR 下游排气组分（THC、CO、NO <sub>x</sub> 、O <sub>2</sub> 、NH <sub>3</sub> ）

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3所示内容。

表3 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

6 虚拟模型集成与调试

6.1 开环调试

硬件在环系统的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。开环调试需保证控制器需求的各种信号可以正确模拟，控制器不报错、执行器驱动信号被正确测量，到闭环调试阶段能够给柴油机模型和后处理模型提供正确的输入。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) 系统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) 开环功能确认。

6.2 闭环调试

开环调试通过后进行闭环调试，用闭环测试结果验证虚拟仿真平台的功能测试精度及性能排放预测精度。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，精度偏差应符合 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

24V电源接通、ECU上电，测控系统控制虚拟柴油机起动，起动后怠速模式运行（3~5）min。切换转速/油门模式控制柴油机到额定工况运行（5~10）min，额定工况运行期间，通过模型接口调整运行边界参数（包含环境温度、环境压力、喇叭口进气负压、中冷压降、排气背压、出水温度、机油温度），确保符合柴油机设计开发要求。

6.4 模型仿真精度要求

按照GB/T 18297-2024标准进行万有特性试验，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。

表4 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	稳态工况 满足偏差要求的工况 需覆盖至少 80%	±5%
2	燃油消耗率		±3%
3	最高爆发压力		±10bar
4	增压器转速		±3%
5	烟度（后处理前）		±15%
6	氮氧化物排放（后处理前）		±10%
7	氮氧化物排放（后处理后）		±10ppm
8	总碳氢、一氧化碳排放（后处理前）		±15%
9	总碳氢、一氧化碳排放（后处理后）		±15ppm

表4（续）

序号	仿真变量	工况及要求	偏差要求
10	氨气排放（后处理后）		±5ppm
11	进气总管温度		±10℃
12	进气总管压力	稳态工况 满足偏差要求的工况 需覆盖至少 80%	±10kPa
13	排气温度		±20℃
14	排气压力		±20kPa
15	后处理温度		±20℃
16	后处理压力		±10kPa

7 测试步骤

7.1 WHTC 虚拟仿真测试

7.1.1 WHTC 测试准备

瞬态循环WHTC（world harmonised transient cycle）按GB 17691-2018附录C规定执行，测试准备如下：

- a) 按照GB/T 18297-2024标准进行外特性试验、调速特性试验，进行瞬态外特性测试，以得到柴油机的转速-扭矩曲线。按照GB 17691-2018 WHTC循环的转速、扭矩规范百分值转化成实际值，以形成WHTC基准循环。
- b) 连续运行2~3遍WHTC循环，通过测控系统控制虚拟柴油机停机，虚拟模型在实时机内保持运算状态。

7.1.2 冷起动测试

通过模型接口调整运行边界，确保柴油机的润滑剂、冷却剂和后处理系统的温度均达到293K~303K（20℃~30℃）范围后，进行冷起动循环试验。

测控系统控制虚拟柴油机起动，起动后应立即进行冷起动测试。

虚拟柴油机开始运行后，测试循环控制应初始化使柴油机从循环的起始点运行。完成冷起动排放循环测试后应立即停机。

若柴油机在冷起动测试循环期间停机，则测试无效。柴油机需按要求重新预处理后再次进行测试。

冷起动测试完成后应对照基准循环进行实际转速、扭矩和功率的回归分析，并对整个循环的柴油机实际功率进行积分，计算出实际循环功。实际循环功和基准循环功的偏差在规定范围内，则判定试验有效。

7.1.3 热浸期

在完成冷起动循环测试后应立即进行10min±1min的热浸期作为柴油机热起动循环测试的预处理。热浸期内虚拟模型在实时机内保持运算状态，模拟柴油机自然冷却的过程。也可以根据实际热浸期的特性在虚拟台架进行一键置位模拟热浸过程，无需真实等待10min±1min。



#### 7.1.4 热起动测试

热浸期结束后，通过柴油机测控系统控制虚拟柴油机起动，起动后应立即进行热起动试验。虚拟柴油机开始运行后，测试循环控制应初始化使柴油机从循环的起始点运行。

若柴油机在热起动测试循环期间停机，则测试无效。柴油机需按要求重新热浸，再次进行测试，此时冷起动测试不需重做。

### 7.2 WHSC 虚拟仿真测试

#### 7.2.1 WHSC 测试准备

稳态循环WHSC（world harmonised steady state cycle）按照GB 17691-2018附录C规定执行，测试准备如下：

- a) 按照GB/T 18297-2024标准进行外特性试验、调速特性试验，进行瞬态外特性测试，以得到柴油机的转速-扭矩曲线。按照GB 17691-2018 WHSC循环的转速、扭矩规范百分值转化成实际值，以形成WHSC基准循环。
- b) 连续运行2~3遍WHSC循环，通过测控系统控制虚拟柴油机停机，虚拟模型在实时机内保持运算状态。

#### 7.2.2 WHSC 虚拟仿真测试

通过柴油机测控系统控制虚拟柴油机起动，在WHSC循环工况的第9工况（13个工况顺排的第9个工况）下运行至少10min进行预置，预置后柴油机停机，虚拟模型在实时机内保持运算状态。

在预置后（ $5 \pm 1$ ）min，虚拟柴油机起动，起动后运转1min，将柴油机调整到WHSC测试循环的第一个工况点（怠速）开始测试循环运行。

柴油机按每工况规定的时间运行，在 $20s \pm 1s$ 内以线性速度完成柴油机转速和扭矩切换。

如果柴油机在测试循环期间停机，应终止测试，按要求重新进行测试。

测试完成后应对照基准循环进行实际转速、扭矩和功率的回归分析，并对整个循环的柴油机实际功率进行积分，计算出实际循环功。实际循环功和基准循环功的偏差在规定范围内，则判定试验有效。

### 7.3 WNTe 虚拟仿真测试

非标准循环（WNTe）按照GB 17691-2018附录E规定执行。

柴油机转速范围为 $N_{30}$ 至 $n_{hi}$ 之间的区域。

柴油机扭矩范围包括扭矩大于等于柴油机发出的最大扭矩值30%的所有柴油机负荷点。

WHSC测试通过后再进行WNTe测试，WNTe测试开始前应按照WHSC循环第9个工况点进行3min预处理，结束后立即开始测试。

柴油机应在各随机测试点运行2min，包括从前一稳态测试点的过渡时间。在测试点之间柴油机转速和负荷过渡应为线性，持续时间为 $20s \pm 1s$ 。

注： $N_{30}$ 是WHTC循环包括怠速在内的所有转速频率累积的30%所对应的柴油机转速， $n_{hi}$ 为70%最大净功率时对应的最高发动机转速。

## 8 测试结果分析

完成WHTC、WHSC和WNTe循环测试后，循环参数的记录应停止工作。在计算循环功之前，应删除柴油机起动期间的任何记录。整个测试循环的实际循环功的确定应基于柴油机反馈的转速和扭矩值计算瞬时功率。对整个测试循环瞬时功率进行积分得到实际循环功。将实际循环功与基准循环功进行比较，实际循环功应在（85%~105%）基准循环功之间。

对WHTC和WHSC循环，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。

应采用最小二乘法进行回归分析，对每条回归线都应计算实际值y基于基准值x的估算值的标准偏差和相关系数。分析频率宜为1Hz，统计结果应符合表5和表6的标准值，测试方被认为有效。

表5 WHTC回归线允差

	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

表6 WHSC回归线允差

	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1%	≤最大柴油机扭矩的2%	≤最大柴油机功率的2%
回归线的斜率	0.99到1.01	0.98到1.02	0.98到1.02
相关系数	最小0.990	最小0.950	最小0.950
回归线的y截距	≤最高试验转速的1%	±20Nm或±2%最大扭矩，取其较大者	±4kW或±2%最大功率，取其较大者

按照7.1和7.2规定的标准循环完成柴油机台架污染物排放测试，按照7.3的规定完成柴油机非标准循环排放测试（WNTe），排放计算参考GB 17691-2018附录CA，将排放测试结果填写至表7。

表7 测试结果汇总

测试项目	CO/g/kWh	THC/g/kWh	NO <sub>x</sub> /g/kWh	NH <sub>3</sub> /ppm
WHTC测试				
WHSC测试				
WNTe测试				-