ICS 27.020
CCS J 92

# 团　　体　　标　　准

T/CSICE 001-2023

# 柴油机余热回收装置性能试验方法

Performance test methods for diesel engine waste heat recovery device

2023 年 12 月 04 日发布　　2023 年 12 月 04 日实施

中国内燃机学会　发 布

# 目　次

前　言 ..... III
1　范围 ..... 1
2　规范性引用文件 ..... 1
3　术语和定义 ..... 1
4　试验条件及要求 ..... 2
4.1　环境要求 ..... 2
4.2　燃料、润滑油、工作介质等要求 ..... 2
4.3　试验时发动机所带的附件 ..... 2
4.4　对测量参数及部位的要求 ..... 2
5　试验程序 ..... 4
5.1　台架准备 ..... 4
5.2　发动机和余热回收装置调试 ..... 4
5.3　需要记录的数据和要求 ..... 4
5.4　测试方法 ..... 5
5.5　计算方法 ..... 5
5.6　测试选项 ..... 6
附录 A(资料性)　发动机基本参数 ..... 7
附录 B(资料性)　发动机余热回收装置基本参数 ..... 8

# 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学会标准管理部提出。

本文件由中国内燃机学会归口。

本文件起草单位：中汽研汽车检验中心（天津）有限公司、中国内燃机学会、天津大学、上海交通大学、潍柴动力股份有限公司、广西玉柴机器股份有限公司、上海柴油机股份有限公司、一汽解放汽车有限公司、中国重型汽车集团有限公司、东风商用车有限公司、东风柳州汽车有限公司。

本文件主要起草人：景晓军、吴春玲、汪晓伟、霍永占、杨国峰、田华、裴毅强、林赫、窦站成、王林波、李万洋、张佑源、曹斌、郑祖伟、徐振波、马鹏飞、董大陆、殷勇、张社民。

本文件于2023年首次发布。

# 柴油机余热回收装置性能试验方法

**警告：本标准的应用可能涉及到某些有危险性的材料、操作和设备，但未对与此有关的所有安全问题都提出建议。因此，用户在使用本标准之前有责任制定相应的安全和防护措施，并确定相关规章限制的适用性。**

## 1 范围

本标准规定了柴油机余热回收装置测试评价方法。

本标准适用于配备余热回收装置的柴油机在发动机台架上开展余热回收装置性能测试，柴油机余热回收装置包括但不限于基于朗肯循环、布雷顿循环原理以电能或机械能作为功率输出的系统。

本标准还可作为余热回收装置最高热效率或柴油机和余热回收装置联合最高热效率的试验方法。用于其他燃料类型发动机的余热回收装置性能试验可参考执行。

## 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/T 17692－1999 汽车用发动机净功率测试方法

GB/T 18297－2001 汽车发动机性能试验方法

GB/T 21404－2022 内燃机 发动机功率的确定和测量方法 一般要求

## 3 术语和定义

GB/T 17692－1999、GB/T 18297－2001、GB/T 21404－2022确立的及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

**朗肯循环（RC）Rankine cycle**

朗肯循环是指以水蒸气作为工质的一种理想循环过程，主要包括等熵压缩、等压加热、等熵膨胀、以及一个等压冷凝过程。

3.2

**有机朗肯循环（ORC）organic Rankine cycle**

有机朗肯循环是以低沸点有机物为工质的朗肯循环，主要由换热器、膨胀机、冷凝器和工质泵四大部件组成，液态有机工质在换热器中吸收余热源热量变为蒸发态，蒸汽进入膨胀机膨胀做功，从膨胀机排出的蒸汽在冷凝器中向冷却水放热后凝结成液态，最后借助工质泵重新回到换热器，如此不断地循环下去。

3.3

**布雷顿循环（BC）Brayton cycle**

布雷顿循环是由绝热压缩、等压加热、绝热膨胀和等压冷却4个过程组成的热力循环。

3.4

**涡轮复合技术 turbo compound technology**

涡轮复合技术是以布雷顿循环为基础的利用发动机排气余热余压能通过动力涡轮输出功的技术。

3.5

**有效功率 brake power**

指在试验台架上，发动机安装本标准要求附件，在曲轴端或其等效件末端相应转速下输出的功率，并按标准大气状态修正。

3.6

**燃油消耗率 specific fuel consumption**

发动机每单位有效功率和单位时间内所消耗的燃油量。

3.7

**发动机有效热效率 engine effective thermal efficiency**

发动机有效功率与单位时间所消耗的燃料热量的比值。

3.8

**余热回收装置净功率 waste heat recovery device net power**

余热回收装置膨胀机所输出的功率减去工质泵及系统其他消耗功部件（如冷却泵）所消耗功率。

3.9

**余热回收装置有效热效率 waste heat recovery device effective thermal efficiency**

余热回收装置净功率与单位时间余热回收系统所吸收发动机余热源热量的比值。

3.10

**发动机和余热回收装置联合热效率 combined thermal efficiency of engine and waste heat recovery device**

发动机有效功率和余热回收装置净功率之和与单位时间发动机所消耗的燃料热量的比值。

## 4 试验条件及要求

### 4.1 环境要求

一般采用GB17691－2018要求的标准环境进行试验。

进气管路连接进气空调，进气管路做好保温，不受环境热辐射影响。排气管路的长度为企业申报值的最大值。余热回收系统管路和换热器等部件按照企业要求做好保温，相关保温材料由企业提供。

### 4.2 燃料、润滑油、工作介质等要求

试验用发动机所用燃料、润滑油、冷却液、尿素溶液以及余热回收系统所用工质等牌号和规格，应符合国家环境要求和企业试验技术条件。

### 4.3 试验时发动机所带的附件

附件要求，参照GB/T 17692－1999 汽车用发动机净功率测试方法的C2.3.1和C2.3.2执行。

### 4.4 对测量参数及部位的要求

**表 1 测量参数误差及部位的要求**

| 序号 | 测量参数 | 误差 | 测量部位及要求 |
|---|---|---|---|
| 1 | 环境参数 | | |
| 1.1 | 环境温度 | ±1 ℃ | 试验室内不受阳光和热辐射的部位 |
| 1.2 | 环境压力 | ±0.2 kPa | 试验室内不受阳光和热辐射的部位 |

**表 1**（第 2 页/共 3 页）

| 序号 | 测量参数 | 误差 | 测量部位及要求 |
|---|---|---|---|
| 2 | 发动机参数 | | |
| 2.1 | 转速 | ±0.5% | 误差不超过所测值的±0.5% |
| 2.2 | 扭矩 | ±1% | 误差不超过所测发动机最大扭矩值的±1% |
| 2.3 | 燃油流量 | ±0.5% | 误差不超过所测值的±0.5% |
| 2.4 | 进气相对湿度 | ±1% | 试验室内不受阳光和热辐射的部位 |
| 2.5 | 进气流量 | ±0.1% F.S | 气流稳定流动的直管处 |
| 2.6 | 进气温度 | ±1 ℃ | 进气口上游 30 mm～60 mm 处 |
| 2.7 | 进气阻力 | ±0.05 kPa | 空气滤清器下游 |
| 2.8 | 排气温度 | ±1 ℃ | 1.排气歧管出口或涡轮增压器出口 50 mm 处 |
| | | | 2.排气侧换热器前 50 mm 处 |
| | | | 3.排气侧换热器后 50 mm 处 |
| 2.9 | 排气背压 | ±0.2 kPa | 1.排气歧管出口或涡轮增压器出口下游 75 mm 处 |
| | | | 2.排气侧换热器前 50 mm 处 |
| | | | 3.排气侧换热器后 50 mm 处 |
| 2.10 | 进水温度 | ±1℃ | 靠近发动机冷却液进口 |
| 2.11 | 出水温度 | ±1℃ | 靠近发动机冷却液出口 |
| 2.12 | 进水压力 | ±0.2 kPa | 靠近发动机冷却液进口 |
| 2.13 | 出水压力 | ±0.2 kPa | 靠近发动机冷却液出口 |
| 2.14 | 机油温度 | ±1℃ | 主油道、主油道入口或有代表性的部位 |
| 2.15 | 机油压力 | ±0.1% F.S | 主油道或有代表性的部位 |
| 2.16 | 燃油温度 | ±1 ℃ | 台架供油系统出口 |
| 2.17 | 燃油压力 | ±0.1% F.S | 台架供油系统出口 |
| 2.18 | 中冷前气体温度 | ±1 ℃ | 中冷器前直管处 |
| 2.19 | 中冷后气体温度 | ±1 ℃ | 中冷器后直管处 |
| 2.20 | 中冷前压力 | ±0.1% F.S | 中冷器前直管处 |
| 2.21 | 中冷后压力 | ±0.1% F.S | 中冷器后直管处 |
| 3 | 余热回收装置参数 | | |
| 3.1 | 工质流量 | ±0.1% F.S | 工质为液态且流动状态稳定处 |
| 3.2 | 工质泵前、后温度 | ±1 ℃ | 靠近工质泵前、后 100 mm 工质流体处 |
| 3.3 | 工质泵前、后压力 | ±0.2 kPa | 靠近工质泵前、后 100 mm 工质流体处 |
| 3.4 | 工质侧换热器前、后温度 | ±1 ℃ | 靠近换热器前、后 100 mm 工质流体处 |
| 3.5 | 工质侧换热器前、后压力 | ±0.2 kPa | 靠近换热器前、后 100 mm 工质流体处 |
| 3.6 | 膨胀机前、后温度 | ±1 ℃ | 靠近膨胀机前、后 100 mm 工质流体处 |
| 3.7 | 膨胀机前、后压力 | ±0.2 kPa | 靠近膨胀机前、后 100 mm 工质流体处 |
| 3.8 | 工质侧冷凝器前、后温度 | ±1 ℃ | 靠近冷凝器前、后 100 mm 工质流体处 |

表 1（第 3 页/共 3 页）

| 序号 | 测量参数 | 误差 | 测量部位及要求 |
|---|---|---|---|
| 3 | 余热回收装置参数 | | |
| 3.9 | 工质侧冷凝器前、后压力 | ±0.2 kPa | 靠近冷凝器前、后 100 mm 工质流体处 |
| 3.10 | 冷却侧冷凝器前、后温度 | ±1 ℃ | 靠近冷凝器前、后 100 mm 冷却水处 |
| 3.11 | 冷却侧冷凝器前、后压力 | ±0.2 kPa | 靠近冷凝器前、后 100 mm 冷却水处 |
| 3.12 | 冷却水流量 | ±0.1% F.S | 工质泵与蒸发器之间工质稳定流动直管处 |
| 3.13 | 膨胀机转速 | ±0.5% | 误差不超过所测值的±0.5％ |
| 3.14 | 膨胀机扭矩 | ±1% | 误差不超过所测发动机最大扭矩值的±1％ |
| 3.15 | 发电机输出电压 | ±0.5% | 误差不超过所测值的±0.5% |
| 3.16 | 发电机输出电流 | ±0.5% | 误差不超过所测值的±0.5% |
| 3.17 | 发电机输出功率 | ±0.5% | 误差不超过所测值的±0.5% |
| 注：根据实际测试需求，可以增加或删减传感器或测量参数。 | | | |

## 5 试验程序

### 5.1 台架准备

5.1.1 检查发动机与余热回收装置匹配安装完好，余热回收装置充注合适量工质并保证无泄漏、气密性良好。

5.1.2 发动机及余热回收装置应按照企业推荐规范磨合（企业可自行磨合）。

### 5.2 发动机和余热回收装置调试

5.2.1 启动发动机及余热回收装置，根据企业要求进行暖机。暖机结束后，在额定功率点按照企业要求调整边界参数，完成进气、中冷控制阀和排气背压控制阀的调节，并验证外特性数据满足企业性能要求。

5.2.2 根据 GB/T 17692－1999 标准要求进行净功率试验，以确认发动机状态。发动机功率满足在最大功率的转速(100±1.5)%范围内，实测最大校正净功率与申报的最大净功率误差在±2%以内，其它转速净功率误差在±4%以内则认定该发动机性能状态正常。

5.2.3 按照企业要求调试余热回收装置，确定余热回收系统参数且在发动机额定功率点稳定运行 10 min 后，余热回收装置输出功率误差在±3%以内，则认定该发动机及余热回收装置性能状态正常。

### 5.3 需要记录的数据和要求

5.3.1 根据实际需求可在表 1 所列项目基础上，增减传感器布置和测量参数。

5.3.2 测量数据时的发动机运行转速与选定转速相差应不超过±1%或者±10 r/min，取其中较大值，扭矩值误差范围在±1%以内。发动机余热回收系统的膨胀机前温度和压力分别稳定在±2 ℃、±1 kPa，膨胀机转速相差应不超过±30 r/min。

5.3.3 待发动机转速、扭矩、排气温度，余热回收系统膨胀机转速、扭矩、膨胀机前温度、压力稳定 3 min 后方可进行数据采集和记录，记录时间应不少于 10 s，记录频率不低于 5 Hz。每个工况点需连续进行两次测量，取两次测量的平均值作为该工况点的测试结果，如果两次测量的发动机扭矩和燃油消耗率误差小于± 2%，则该结果有效。

## 5.4 测试方法

发动机余热回收系统测试方法规定以下三种，可选择其中一种方法进行试验：

5.4.1 基于测功机的测试方法。通过联轴器将发动机余热回收装置动力输出轴与测功机连接，测功机作为负载和调节装置，直接测量转速、扭矩，计算输出轴功。

5.4.2 基于扭矩和转速传感器的测试方法。发动机余热回收装置动力输出轴与发电机连接，发电机与消耗电功的可变负载相连,通过在余热回收装置输出轴与发电机之间安装扭矩和转速传感器,测量转速、扭矩，计算输出轴功。

5.4.3 基于电功率分析仪的测试方法。发动机余热回收装置动力输出轴与发电机连接，发电机与消耗电功的可变负载相连,通过负载系统调节,以电功率分析仪测量发电机的电功率,基于发电机企业提供发电机发电效率测试数据、电功率分析仪测量功率，计算输出轴功。

## 5.5 计算方法

5.5.1 采用 5.4 中方法 1、2 进行测试时，计算膨胀机输出轴功率 $P_t$。

$$P_t=n \cdot T/9550$$

式中：

$P_t$——膨胀机输出轴功率,kW;

$N$——膨胀机转速,r/min;

$T$——膨胀机扭矩,N·m。

5.5.2 采用 5.4 中方法 3 进行测试时，计算膨胀机输出轴功率 $P_t$。

$$P_t=P_g/\eta_g$$

式中：

$P_t$——膨胀机输出轴功率,kW;

$P_g$——电功率分析仪测量的发电机电功率,kW;

$\eta_g$——基于运行工况信息（输出电压、电流及发电机转速）查询发电机企业提供的发电机发电效率脉谱图获得,% 。

5.5.3 发动机余热回收装置净功率 $P_{net}$。

发动机余热回收系统若有工质泵、用于单独冷却余热回收系统的冷却水泵，则在计算其有效热效率时需要减去工质泵、冷却水泵等附件的功。

$$P_{net}=P_t-P_f-P_c$$

式中：

$P_{net}$——发动机余热回收装置净功率，kW;

$P_t$ ——膨胀机输出轴功率，kW;

$P_f$ ——工质泵功率，kW;

$P_c$ ——冷却水泵功率，kW;

其中工质泵和冷却水泵的功率可通过电功率分析仪测量获得。

5.5.4 余热回收装置热效率 $\eta_{whr}$。

余热回收装置热效率 $\eta_{whr}$ 按如下公式计算：

$$\eta_{whr}=P_{net}/Q_{whr}$$

$$Q_{whr}=m_f \cdot （h_{fout}-h_{fin}）$$

式中：

$Q_{whr}$——发动机余热回收系统单位时间吸收的热量，kW；

$P_{net}$——发动机余热回收装置净功率，kW；

$m_f$ ——余热回收系统工质流量，kg/s；

$h_{fin}$——工质被加热前的比焓值，kJ/kg；

$h_{fout}$——工质被加热后的比焓值，kJ/kg。

### 5.5.5 发动机和余热回收装置联合热效率 $\eta_c$。

发动机和余热回收装置联合热效率 $\eta_c$ 按如下公式计算：

$$\eta_c = (W_e + W_{net}) / Q$$

式中：

$W_e$——发动机曲轴输出的有效功，kJ；

$W_{net}$——发动机余热回收装置净输出功，kJ；

$Q$——得到有效功发动机所消耗的燃料热能，kJ。

对于一台发动机，当通过试验测得有效功率和每小时耗油量时，根据有效热效率的定义可得：

$$\eta_c = 3.6\times10^3 (P_e + P_{net}) / G \cdot H_u$$

$$g_c = 1000G / (P_e + P_{net})$$

$$\eta_c = 3.6\times10^6 / g_c \cdot H_u$$

式中：

$H_u$——燃料的低热值（以第三方检测机构燃油热值检测报告为准），kJ/kg；

$P_e$——发动机曲轴输出的功率，kW；

$G$——每小时耗油量，kg/h；

$g_c$——发动机和余热回收装置联合燃油消耗率，g/kW·h。

## 5.6 测试选项

在制造商需求的测试项目，如发动机余热回收装置最大净输出功、最高热效率、发动机和余热系统联合最高热效率等，有两种聚焦最优工况的方法，可选择其中一种方法进行试验。

5.6.1 提供最优工况范围，依据提供的工况范围设定发动机测试工况的转速及负荷步长，调控余热回收系统参数，精细测量该区域内的目标评价指标，进而确定最优值；

5.6.2 根据 GB/T 18297－2001 标准进行万有特性试验，确定目标指标最优工况点所在区域，在该区域内缩短发动机测试工况的转速及负荷步长，调控余热回收系统参数，精细测量该区域内的目标评价指标，进而确定最优值。

# 附 录 A
（资料性）
发动机基本参数

表A.1 发动机基本参数填报表

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 生产厂 | | | 商标 | |
| 规格型号 | | | 发动机编号 | |
| 排量/L | | | 发火顺序 | |
| 进气方式 | | | 冷却方式 | |
| 进气阻力/kPa | | | 怠速转速/（r/min） | |
| 缸数-缸径×行程/mm | | | 燃料及硫含量/（$10^{-6}$） | |
| 额定功率/转速/kW/(r/min) | | | 最大扭矩/转速/Nm/(r/min) | |
| 额定功率转速时每冲程燃料供给量/mL | | | 最大扭矩转速时每冲程燃料供给量/mL | |
| 最大净功率/转速/kW/(r/min) | | | 最大净扭矩/转速/(Nm/(r/min) | |
| 最大净功率对应最高转速下的排气背压/kPa | | | 最大净扭矩对应最高转速下的排气背压/kPa | |
| 气缸排列型式 | | | 喷油器喷射压力/MPa | |
| 单缸进/排气阀数 | | | 缸体构造 | |
| 容积压缩比 | | | 最高空车转速/（r/min） | |
| 供油系统形式 | | | 燃烧室结构 | |
| 发动机缸心距/mm | | | 发动机点火方式 | |
| 燃油温度/K | | | 排气系统容积/L | |
| 备注 | 机油牌号 | | 机油生产厂 | |
| | 发动机生产日期 | | | |

# 附 录 B
（资料性）
发动机余热回收装置基本参数

表 A.2 发动机余热回收装置基本参数填报表

| | | |
|---|---|---|
| 系统类型 | □有机朗肯循环 ORC □涡轮复合 Turbo compound □其他_____ | |
| 利用热源 | □排气 □缸套水 □EGR □增压空气 □其他_____ | |
| 回收能形式 | □机械能 □电能 □机械能和电能 □其他_____ | |
| 有机朗肯循环 ORC | | |
| 工作流体介质 | 名称 | |
| | 全球变暖潜能值 *GWP* | |
| | 毒性/可燃性等级 | |
| | 系统工质充注质量/kg | |
| 工质泵 | 类型 | |
| | 型号 | |
| | 额定功率/转速/（kW/r/min） | |
| | 流量/（$m^3$/s） | |
| | 扬程/m | |
| | 等熵效率/% | |
| 热源-工质换热器 | 个数 | |
| | 类型 | □板式 □管壳式 □其他_____ |
| | 换热面积/$m^2$ | |
| | 总传热系数/（W/$m^2$·K） | |
| | 尺寸：长/宽/厚/mm | |
| | 最大承受压力/MPa | |
| | 最大承受温度/℃ | |
| 膨胀机 | 类型 | □活塞式□透平式□其他_____ |
| | 额定输出功率/kW | |
| | 额定膨胀比 | |
| | 等熵效率/% | |
| | 入口承受最大压力/MPa | |
| | 入口承受最大温度/℃ | |
| | 最大体积流量/（$m^3$/s） | |
| 冷却水-工质换热器 | 个数 | |
| | 类型 | □板式 □管壳式 □其他_____ |
| | 换热面积/$m^2$ | |
| | 总传热系数/（W/$m^2$·K） | |
| | 尺寸：长/宽/厚/mm | |
| 其他 | 储液罐体积/$m^3$ | |
| | 工质流量计型号 | |
| | 冷却水泵功率/kW | |
| | 发电机额定功率/转速/（kW/（r/min）） | |

表 A.2（第 2 页/共 2 页）

| 涡轮复合 Turbo compound | | |
|---|---|---|
| 输出机械能 | 涡轮耦合类型 | □曲轴 □二级增压器 □其他_____ |
| | 涡轮额定转速/（r/min） | |
| | 总减速比 | |
| 输出电能 | 涡轮类型 | |
| | 涡轮额定转速/（r/min） | |
| | 发电机额定功率/转速/（kW/r/min） | |
| □其他系统类型 | | |
| 请描述系统原理、构型、主要部件及能量输出形式等信息： | | |