

甲醇发动机甲醛排放测量不确定度评定

曹文明^{1,2}, 石来华^{1,2}, 康见见¹, 刘冰¹, 刘波¹, 吴滴¹

1. 招商局检测车辆技术研究院有限公司, 重庆 400030; 2. 招商局检测车辆技术(合肥)有限公司, 安徽 合肥 230000

摘要:为准确测量甲醛排放的不确定度,从人员操作、分析仪器、标准气体、标准溶液、试验标准循环、试验环境条件等方面分析影响重型甲醇发动机甲醛排放不确定度的测量因素,建立甲醛比排放数学模型,采用冷态全球统一瞬态循环(world harmonized transient cycle, WHTC)台架试验计算甲醛排放的相对标准不确定度。结果表明:甲醛比排放不确定度与重复测量、甲醛质量浓度、稀释因数、排气稀释后总体积、实际循环功的相对标准不确定度有关,其中稀释因数的影响较大;冷态 WHTC 试验平均甲醛比排放为 $41.6 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,甲醛排放测量标准不确定度为 $1.29 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,扩展不确定度为 $2.58 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

关键词:甲醇发动机;甲醛排放;非常规污染物;不确定度

中图分类号:TK402

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)03-0083-06

引用格式:曹文明,石来华,康见见,等. 甲醇发动机甲醛排放测量不确定度评定[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(3):83-88.

CAO Wenming, SHI Laihua, KANG Jianjian, et al. Uncertainty evaluation of formaldehyde emission measurement from methanol engines[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(3):83-88.

0 引言

随着全球节能减排进程的加速推进,燃料的低碳化与无碳化转型已成为内燃机产业发展的重要突破口^[1-2]。甲醇燃料具有低碳环保、常温常压下为液态等优势,得到了广泛应用。甲醇为二次能源载体,可通过风电、光伏等可再生能源电解制氢,结合 CO_2 捕集技术实现碳中和,甲醇全生命周期温室气体排放比传统化石燃料降低 70% 以上,符合我国双碳战略对化石能源替代路径的技术要求^[3]。但甲醇发动机在燃烧过程中排放大量的醇醛类非常规污染物,尤其是排放物中的甲醛不仅危害人体呼吸系统,还参与大气光化学反应,加剧环境污染^[4-5]。文献[6-7]对甲醇燃料的清洁高效利用提出了更高的技术要求,规定甲醇发动机的甲醇、甲醛排放限值均不得超过 $20 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

目前关于甲醇发动机甲醛排放测量结果不确定度的研究较少,本文中从人员操作、分析仪器、标准气体、标准溶液、试验标准循环、试验环境条件等方面分析影响重型甲醇发动机甲醛排放不确定度测量因素,建立甲醛比排放不确定度模型,为提高甲醇、甲醛等非常规排气污染物排放测量准确性、复现性提供参考。

1 检测设备及甲醛采集

1.1 检测设备

以某 6 缸重型甲醇发动机为研究对象,排放后处理装置采用三效催化转化器(three way catalyst, TWC),发动机主要参数如表 1 所示。

收稿日期:2025-05-08

第一作者简介:曹文明(1975—),男,江西南丰人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为内燃机排气污染物控制技术及内燃机产品质量检测,E-mail:caowenming@cmhk.com。

表 1 发动机主要参数

额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)	最大扭矩/(N·m)	最大扭矩转速/(r·min ⁻¹)	缸径/mm	行程/mm	排量/L
353	1 800	2 200	1 100~1 400	130	161	12.8

主要试验设备包括 HD462 发动机瞬态测试台架、全流稀释取样排放分析系统、高效液相色谱仪等。HD462 发动机瞬态测试台架测量发动机转速、转矩,转矩测量范围为 0~2 680 N·m,测量精度为满量程的±0.17%;转速测量范围为 0~5 000 r/min,测量精度为满量程的±0.1%;功率测量范围为 0~462 kW。全流稀释取样排放分析系统包含定容取样系统(constant volume sampling, CVS)、气体分析仪, CVS 测量排气稀释后体积流量,测量范围为 30~150 m³/min,测量精度为满量程的±0.3%;气体分析仪测量 CO、HC、CO₂ 的体积分数,测量精度为测量值的±2%;其中 CO、HC 体积分数的测量范围为 0~1×10⁻⁴, CO₂ 体积分数的测量范围为 0~5%;高效液相色谱仪中的甲醛采样泵测量甲醛采样体积流量,测量范围为 0~500 mL/min,测量精度为满量程的±2.5%,所有仪器设备均经过校准。

1.2 甲醛采集

发动机完成按照文献[8]规定的冷态全球统一瞬态循环(world harmonized transient cycle, WHTC)后,发动机尾气与稀释空气混合后,经热交换器、定容取样系统,最后由抽气装置排出。在稀释空气进入稀释通道前配置稀释空气集气袋,采集空气稀释后的甲醛样气;在热交换器后配置稀释排气集气袋,采集排气稀释后的甲醛样气;在稀释空气集气袋、排气集气袋中使用填充了涂渍 2,4-二硝基苯肼(DNPH)硅胶的采样管采集一定体积的样气;采用高效液相色谱法分析采集的甲醛样气,为确保采样管不被污染,使用空白采样管进行对比分析,甲醛采样过程如图 1 所示。

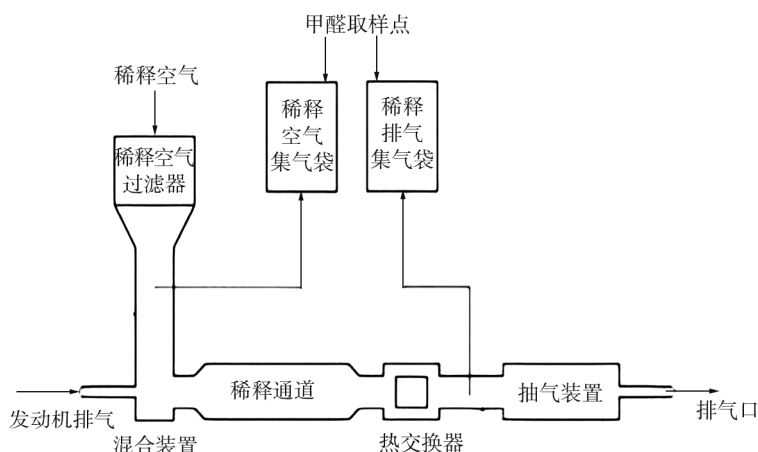


图 1 甲醛采样过程示意图

2 甲醛排放测量不确定度评估

2.1 甲醛排放测量不确定度数学模型

采用台架试验测量甲醛不确定度,稀释因数^[8]

$$k_d = \frac{11.57}{\varphi(\text{CO}_2) + (\varphi(\text{THC}) + \varphi(\text{CO})) \times 10^{-4}}, \quad (1)$$

式中: $\varphi(\text{CO}_2)$ 、 $\varphi(\text{THC})$ 、 $\varphi(\text{CO})$ 分别为稀释排气集气袋中 CO₂、THC、CO 的体积分数。

两个集气袋采集的以 mL 为单位的校准后采样气体体积 $V_{c,i}$ 的数值

$$\{V_{c,i}\} = 273.15 \{q_{v,i}\} \{t_{c,i}\} \{p_i\} / (101.3 \{T_i\}), \quad (2)$$

式中: $i=1,2$, 分别对应空气集气袋、排气集气袋; $\{q_{v,i}\}$ 为以 mL/s 为单位的采样体积流量 $q_{v,i}$ 的数值; $\{t_{c,i}\}$ 为以 s 为单位的采样时间 $t_{c,i}$ 的数值; $\{p_i\}$ 为以 kPa 为单位的采样点大气压力 p_i 的数值; $\{T_i\}$ 为以 K 为单位的采样点热力学温度 T_i 的数值。

稀释排气集气袋采集的以 mg/m³ 为单位的甲醛质量浓度 $\rho_{1,2}$ 的数值

$$\{\rho_{1,2}\} = 1\,000 (\{m_{F,2}\} - \{m_{B,2}\}) / \{V_{c,2}\}, \quad (3)$$

式中: $\{m_{F,2}\}$ 为以 mg 为单位的排气集气袋中采样管采集的甲醛质量 $m_{F,2}$ 的数值; $\{m_{B,2}\}$ 为以 mg 为单位的排气集气袋空白管中甲醛质量 $m_{B,2}$ 的数值。

发动机排气稀释后甲醛污染物质量浓度

$$\rho_{t,z} = \rho_{t,2} - \rho_{t,1}(1 - 1/k_d), \quad (4)$$

式中: $\rho_{t,1}$ 为稀释空气集气袋中甲醛的质量浓度, mg/m^3 。

基于发动机转速和转矩计算发动机瞬时功率,对瞬时功率积分得到以 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 为单位的实际循环功 W_{act} 的数值

$$\{W_{\text{act}}\} = \int_{j=1}^t \frac{\{n_j\} \{M_j\}}{9\,550} dt, \quad (5)$$

式中: $\{n_j\}$ 为以 r/min 为单位的测试循环过程第 j 秒瞬时转速 n_j 的数值; $\{M_j\}$ 为以 $\text{N} \cdot \text{m}$ 为单位的测试循环过程中第 j 秒瞬时转矩 M_j 的数值; t 为整个测试循环时间, s 。

以 m^3 为单位的排气稀释后总体积 V_t 的数值

$$\{V_t\} = 30 \{k_v\} \{p_p\} (\{T_p\}^{0.5}), \quad (6)$$

式中: $\{k_v\}$ 为标准状态下临界文丘里管的标定系数,可由标定证书得到; $\{p_p\}$ 为以 kPa 为单位的文丘里管入口绝对压力 p_p (大气压力与压力表测量压力的和)的数值; $\{T_p\}$ 为以 K 为单位的文丘里管入口热力学温度 T_p 的数值。

WHTC 冷态循环产生的排气污染物中甲醛比排放

$$e_H = m_H / W_{\text{act}} = V_t \rho_{t,z} / W_{\text{act}}, \quad (7)$$

式中: m_H 为试验循环中甲醛的质量, mg 。

考虑影响甲醛比排放测量不确定度的修正因子 f , 结合式(4)(5)计算

$$e_H = m_H f / W_{\text{act}} = [\rho_{t,2} V_t / W_{\text{act}} - \rho_{t,1} V_t / W_{\text{act}} + \rho_{t,1} V_t / (W_{\text{act}} k_d)] f. \quad (8)$$

甲醛比排放测量的相对标准不确定度

$$u_r(e_H) = \sqrt{[c(f)u_r(f)]^2 + [c(V_t)u_r(V_t)]^2 + [c(k_d)u_r(k_d)]^2 + [c(W_{\text{act}})u_r(W_{\text{act}})]^2 + [c(\rho_{t,z})u_r(\rho_{t,z})]^2}, \quad (9)$$

式中: $u_r(f)$ 、 $u_r(\rho_{t,z})$ 、 $u_r(k_d)$ 、 $u_r(V_t)$ 、 $u_r(W_{\text{act}})$ 分别为重复测量、甲醛质量浓度、稀释因数、排气稀释总体积、实际循环功的相对标准不确定度; $c(f)$ 、 $c(\rho_{t,z})$ 、 $c(V_t)$ 分别为重复测量、甲醛质量浓度、稀释排气总体积对应的灵敏因数,均为 1; $c(k_d)$ 、 $c(W_{\text{act}})$ 分别为稀释因数、实际循环功对应的灵敏因数,均为 -1。

2.2 评估方法

分析重型发动机甲醛排放检测过程及比排放不确定度模型,结合人员操作、分析仪器、标准气体、标准溶液、试验标准循环、试验环境条件等方面识别甲醛比排放测量的不确定度影响因素^[9-11],甲醛比排放不确定度因素分布鱼骨图如图 2 所示。

由图 2 可知:甲醛比排放不确定分量包含以下因素:1)由试验环境、台架控制、人员操作等重复性测量造成的不确定度;2)标准状态下由采样过程、标准溶液、标准曲线造成的气袋甲醛质量浓度不确定度;3)由 CO_2 、 CO 、 THC 体积分数测量造成的稀释因数不确定度;4)由 CVS 文丘里管标定系数、入口绝对压力和入口热力学温度造成的排气稀释后总体积不确定度;5)由转矩和转速测量造成的实际循环功不确定度。

根据文献[8],在同一边界条件下进行 6 次冷态 WHTC 试验并记录甲醛比排放。

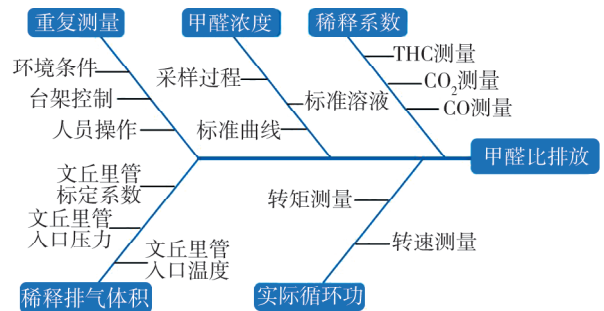


图2 甲醛比排放不确定度因素分布鱼骨图

2.3 不确定度评估因素

2.3.1 相对标准不确定度计算方法

根据测量内容、测量方法、测量设备的不同,不同测量参数的相对标准不确定度计算方法不同,通常有 3 种方法,相对标准不确定度^[10-11]

$$u_r(x) = c/k_x, \quad (10)$$

$$u_r(y) = w/(ak_x), \quad (11)$$

$$u_r(z) = ws/(ak_x), \quad (12)$$

式中: x, y, z 为影响因素, c 为相对扩展不确定度, k_x 为该测量设备及测量内容对应的包含因子, w 为最大测量误差, a 为实际测量结果, s 为测量设备对应的满量程。

气体分析仪测量 CO_2 、 CO 、 THC 的体积分数,标准气体校准气体分析仪 CO_2 、 CO 、 THC 的体积分数,甲醛标准溶液的相对标准不确定度计算采用公式 (10);文丘里管入口热力学温度、采样点热力学温度及大气压力的相对标准不确定度计算采用式 (11);采样管气体体积、文丘里管入口绝对压力、测功机转速及转矩的相对标准不确定度计算采用式 (12)。

2.3.2 测量重复性

冷态 WHTC 试验中 6 次甲醛比排放测量结果分别为 42.2、41.7、41.2、42.4、41.4、40.9 $\text{mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,平均甲醛比排放 $\bar{e}_H$ 为 41.6 $\text{mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,甲醛比排放标准差为 0.582 $\text{mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,重复性测量引入的标准不确定度 $u(f)$ 与标准偏差一致,为 0.582 $\text{mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,重复性测量引入的相对标准不确定度 $u_r(f) = u(f)/\bar{e}_H = 1.4\%$ 。

2.3.3 稀释因数

由式 (1) 可知,稀释因数的不确定度主要由测量 CO_2 、 THC 及 CO 体积分数时引入,不确定度 $u_r(k_d)$ 主要来自气体分析仪和标准气体校准^[16]。气体分析仪的 $c = \pm 2\%$,服从均匀分布, $k_x = \sqrt{3}$,根据式 (10) 计算气体分析仪测量 CO_2 、 CO 、 HC 的体积分数 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 引入的相对标准不确定度均为 1.15%;采用标准气体校准气体分析仪, $c = 1\%$, $k_x = 2$,根据式 (10) 计算标准气体 CO_2 、 CO 、 HC 体积分数 φ_4 、 φ_5 、 φ_6 引入的相对标准不确定度均为 0.5%,计算排放分析仪引入的相对标准不确定度与标准气体校准的相对标准不确定度, CO_2 、 CO 、 HC 的相对标准不确定度 $u_r(\text{CO}_2)$ 、 $u_r(\text{CO})$ 、 $u_r(\text{HC})$ 均为 1.25%,由式 (9) 可得: $u_r(k_d) = 2.17\%$ 。

2.3.4 排气稀释总体积

由式 (6) 可知,排气稀释后总体积的相对标准不确定度包括文丘里管标定系数、入口绝对压力和入口热力学温度的标准不确定度。试验中采用的 CVS 体积流量为 50 m^3/min ,标定证书中文丘里管标定系数 $k_v = 8.848$,标准差为 0.004 8,文丘里管标定系数引入的相对标准不确定度 $u_r(k_v)$ 为标准差与标定系数的比, $u_r(k_v) = 0.05\%$;测量文丘里管入口热力学温度 T_p 最大允许误差为 $\pm 1 \text{ K}$,服从均匀分布,测量入口热力学温度为 298 K, $k_x = \sqrt{3}$,根据式 (11) 计算 $u_r(T_p) = 0.19\%$;文丘里管入口绝对压力 p_p 的测量误差为 0.1%,服从均匀分布,文丘里管满量程为 106.7 kPa,测量入口绝对压力为 98 kPa, $k_x = \sqrt{3}$,由式 (12) 计算文丘里管入口处压力引入的相对标准不确定度 $u_r(p_p) = 0.06\%$;由式 (9) 可得: $u_r(V_t) = 0.12\%$ 。

2.3.5 实际循环功

由式 (5) 可知,实际循环功的标准不确定度主要与测功机测量的发动机转速 n 、转矩 M 有关。按照测功机技术参数,转矩 M 最大允许误差为满量程的 $\pm 0.17\%$,转速 n 最大允许误差为 $\pm 0.1\%$,转速、转矩均服从均匀分布,转速、转矩的包含因子均为 $\sqrt{3}$,测量转矩为 540 $\text{N} \cdot \text{m}$,转速为 800 r/min ,根据式 (12) 计算转矩的相对标准不确定度 $u_r(M) = 0.49\%$,转速的相对标准不确定度 $u_r(n) = 0.36\%$,由式 (9) 可得: $u_r(W_{\text{act}}) = 0.61\%$ 。

2.3.6 排气集气袋甲醛质量浓度

标准状态下气袋中的空白管中甲醛体积分数较小,不确定度影响小,可忽略空白管中甲醛,只分析排

气集气袋采样管采样气体体积 V_e [12-13]。

由式(2)(3)可知,标准状态下排气集气袋中 $\{\rho_{t,2}\} = 1\,000\{m_{F,2}\}\{T_2\}101.3/(273.15\{V_e\}\{p_2\})$ 。标准状态下气袋中甲醛质量浓度引入的相对标准不确定度包含排气集气袋中采集的甲醛质量、 V_e 、 T_2 及 p_2 的相对标准不确定度。

排气气袋中采样管采集的甲醛质量的不确定度由甲醛标准溶液和标准曲线引入,甲醛标准溶液的 $c=1\%$, $k_x=2$,由式(10)可得,标准溶液引入的相对不确定度 $u_r(m_{F,21})=0.5\%$ 。采用质量浓度为 $15\,\mu\text{g/mL}$ 的标准甲醛溶液稀释得到 0.9 、 $0.3\,\mu\text{g/mL}$ 的标准储备溶液,再用标准储备溶液稀释得到醛酮标准曲线的 6 个质量浓度点: 0.009 、 0.090 、 0.030 、 0.300 、 0.900 、 $1.500\,\mu\text{g/mL}$ [14-17]。使用线性最小二乘法对甲醛质量浓度进行线性拟合,由标准曲线引入的相对不确定度 $u_r(m_{F,22})=0.23\%$ 。由式(9)可得:气袋采样管甲醛质量的相对不确定度 $u_r(m_{F,2})=0.55\%$ 。

采样管采样体积的相对标准不确定度由采样泵流量计引入,试验时所用的采样泵最大允许误差为 $\pm 2.5\%$,服从均匀分布, $k_x=\sqrt{3}$,测量采样泵最大体积流量为 $500\,\text{mL/min}$,测量时间为 $30\,\text{min}$,采样体积为 $15\,\text{L}$,根据式(12)计算 $u_r(V_e)=1.44\%$ 。

采样点大气绝对压力和热力学温度由试验室气象站测定,采样点热力学温度 T_2 的最大允许误差为 $\pm 0.5\,\text{K}$,采样点大气绝对压力 p_2 的最大允许误差为 $\pm 0.1\,\text{kPa}$,两者均服从均匀分布, $k_x=\sqrt{3}$,采样点热力学温度为 $298\,\text{K}$,采样点大气绝对压力为 $97\,\text{kPa}$,根据式(11)计算 $u_r(T_2)=0.10\%$, $u_r(p_2)=0.06\%$,由式(9)可得,标准状态下气袋甲醛质量浓度引入的相对标准不确定度 $u_r(\rho_{t,2})=1.55\%$ 。

2.3.7 WHTC 试验甲醛比排放结果

由式(9)可得, $u_r(e_H)=3.10\%$ 。冷态 WHTC 试验甲醛排气污染物排放量的合成标准不确定度 $u_c(e_H)=u_r(e_H)\overline{e_H}$, $u_c(e_H)=1.29\,\text{mg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

2.3.8 扩展不确定度

扩展不确定度包含因子 $k_x=2$,置信概率为 95% ,扩展不确定度 $U=k_x u_c(e_H)$, $U=2.58\,\text{mg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

2.4 不确定度测量结果

该冷态 WHTC 循环试验甲醛平均比排放 $\overline{e_H}=41.6\,\text{mg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $U=2.58\,\text{mg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,扩展不确定度包含因子 $k_x=2$ 。甲醛排放测量不确定度的影响因素测量结果如表 2 所示。

表 2 甲醛排放测量不确定度的影响因素测量结果

影响因素	分因素	k_x	相对标准不确定/%	影响因素	分因素	k_x	相对标准不确定/%
气体分析仪	φ_1	$\sqrt{3}$	1.15	稀释排气总体积	k_v	1	0.05
	φ_2	$\sqrt{3}$	1.15		T_p	$\sqrt{3}$	0.19
	φ_3	$\sqrt{3}$	1.15		p_p	$\sqrt{3}$	0.06
标准气体体积分数	φ_4	2	0.50	排气集气袋甲醛质量浓度	甲醛标准溶液	2	0.50
	φ_5	2	0.50		标准曲线	1	0.23
	φ_6	2	0.50		V_e	$\sqrt{3}$	1.44
实际循环功	n	$\sqrt{3}$	0.36		T_2	$\sqrt{3}$	0.10
	M	$\sqrt{3}$	0.49		p_2	$\sqrt{3}$	0.06

3 结束语

本文中基于重型甲醇发动机冷态 WHTC 试验,分析甲醛比排放量测量的不确定度,主要结论如下。

1)通过建立甲醛比排放模型,分析影响甲醛排放不确定度的关键因素为试验重复性因素、气袋采样质量浓度、实际循环功测量、稀释因数、排气稀释总体积,各因素对应的相对标准不确定度分别为 1.40% 、

1.55%、0.61%、2.17%、0.12%，其中，稀释因数引入的标准不确定度贡献率最高。

2)冷态 WHTC 试验平均甲醛比排放为 $41.6 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，合成标准不确定度为 $1.29 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，扩展不确定度为 $2.58 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

参考文献:

- [1] 李心成,万军杰,吕亮,等. 零碳及低碳燃料内燃机应用进展分析[J]. 车用发动机,2024(3):1-9.
- [2] 许书军,许广健. 中国甲醇汽车产业现状及发展策略研究[J]. 交通节能与环保,2022,18(4):45-49.
- [3] 纪常伟,辛固,汪硕峰,等. 零碳及碳中和燃料内燃机应用进展[J]. 北京工业大学学报,2022,48(3):273-291.
- [4] 和进伟. 甲醇作为内燃机燃料的应用及展望[J]. 化肥设计,2022,60(6):1-6.
- [5] 魏衍举,石自航,张亚杰,等. 商用纯甲醇发动机的非常规排放特性研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2024,57(10):1022-1029.
- [6] 工业和信息化部,国家发展和改革委员会,科学技术部,等. 八部门关于在部分地区开展甲醇汽车应用的指导意见[EB/OL]. (2019-03-20)[2025-03-04]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yj/art/2019/art_f1339d0d67cf45e4960f2292ebeab706.html.
- [7] 生态环境部. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 17691—2018[S]. 北京:中国环境标准出版社,2018.
- [8] 生态环境部. 甲醇燃料汽车非常规污染物排放测量方法:HJ 1137—2020[S]. 北京:中国环境科学出版社,2020.
- [9] 刘冰,吴滴,张超,等. 基于国六标准工况的甲醇增程式发动机 N_2O 和 NH_3 排放特性研究[J]. 车用发动机,2023(4):42-46.
- [10] 全国法制计量管理计量技术委员会. 测量不确定度评定与表示:JJF 1059.1—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [11] 中国合格评定国家认可委员会. 汽车和摩托车检测领域典型参数的测量不确定度评估指南及实例:CNAS-GL023[S]:2018. 北京:中国合格评定国家认可委员会,2018.
- [12] 刘纯,曾三华,郑巍,等. 国六重型柴油机 WHSC 循环颗粒物排放测量不确定度评定[J]. 中国检验检测,2024,32(4):76-80.
- [13] 郭亚辰,翟学超,王振宇,等. 柴油机 N_2O 比排放测量的不确定度评定[J]. 内燃机,2024,40(5):18-24.
- [14] 李劲松,吴春玲,闫鹏勇,等. 非道路柴油机气态污染物测量的不确定度研究[J]. 内燃机,2023,39(5):1-9.
- [15] 张凡,李昂,于津涛. 车用发动机 WHTC 试验 NO_x 排放测量结果的不确定度评定[J]. 小型内燃机与车辆技术,2015,44(6):18-23.
- [16] 全国物理化学计量技术委员会. 化学分析测量不确定度评定:JJF 1135—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [17] 周昭露,赵绍伟,陈莹. 袋法测定汽车内饰材料中醛类物质含量的不确定度评定[J]. 时代汽车,2021(20):164-166.

Uncertainty evaluation of formaldehyde emission measurement from methanol engines

CAO Wenming^{1,2}, SHI Laihua^{1,2}, KANG Jianjian¹, LIU Bing¹, LIU Bo¹, WU Di¹

1. China Merchants Testing Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400030, China;

2. China Merchants Testing Vehicle Technology(Hefei) Co., Ltd., Hefei 230000, China

Abstract: To accurately measure the uncertainty of formaldehyde emission, factors affecting the uncertainty of formaldehyde emission measurement from heavy-duty methanol engines are analyzed from various aspects, such as man, machine, material, method, and environment. A mathematical model of formaldehyde emission is established, and the relative standard uncertainty of formaldehyde emission is calculated using the world harmonized transient cycle (WHTC) test bench. The results show that the uncertainty of formaldehyde emission

(下转第96页)

- [11] VILLAMIZAR V, ACOSTA S, DASTRUP B. High order local absorbing boundary conditions for acoustic waves in terms of farfield expansions[J]. Journal of Computational Physics, 2017, 333: 331–351.
- [12] FARSHCHI M, HANNANI S K, EBRAHIMI M. Linearized and non-linear acoustic/viscous splitting techniques for low Mach number flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2003, 42(10): 1059–1072.
- [13] 魏自言, 刘勇, 王琦. 基于 LBM-LES 方法的翼型气动噪声直接数值计算[J]. 应用力学学报, 2019, 36(5): 1012–1017.
- [14] 齐健, 路宽, 李立州, 等. 基于 POD 降阶模型的近场气动噪声研究[J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52(12): 69–74.

Analysis of aerodynamic noise reduction of crankshaft pulley

DING Baoan^{1,2}, ZHANG Xiaohui^{1,2*}, WANG Jingxin^{1,2}, ZHANG Weilong^{1,2},
ZHAO Xuefei^{1,2}, ZHAO Jingjing^{1,2}

1. National Key Laboratory of Internal Combustion Engine and Power System, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to reduce the noise of the crankshaft pulley, the fluid simulation software STAR ccm+ is used to establish a flow field simulation model, and the acoustic software LMS Virtual lab is used to simulate the aerodynamic noise of the pulley and analyze the structural and acoustic cavity modes of the pulley. The simulation analysis results show that when pulley rotates at high speed, the groove flow velocity between the pulley and the front cover of the gear chamber is uneven, and periodic pressure pulsation is generated on the groove surface, which is the main source of aerodynamic noise of the pulley. A relatively closed cavity is formed inside the groove, and the first-order modal frequency of the acoustic cavity is close to the excitation frequency of the noise source, which increases the noise. The optimized scheme with a 5 mm opening on the pulley is used to compare and verify the aerodynamic noise simulation and testing with the original scheme without a hole on the pulley. The results show that compared with the original scheme, the optimized scheme reduces the root mean square sound pressure level of the aerodynamic noise simulation by about 4 dB, and the root mean square sound pressure level of the acceleration condition test by about 2 dB. The simulation and testing data of the original and optimized schemes are basically consistent, and the simulation method could be effectively used in engineering practice.

Keywords: pulley noise; structure mode; acoustic cavity mode; aerodynamic noise; sound pressure level

(责任编辑:胡晓燕)

(上接第 88 页)

is related to the repeatability of measurement, the relative standard uncertainty of formaldehyde mass concentration dilution factor, total volume after exhaust dilution, and the relative standard uncertainty of actual cycle work. Among them, the dilution factor had a greater impact. The average formaldehyde emission of the cold WHTC test is 41.6 mg/(kW·h), and the standard uncertainty of formaldehyde emission measurement is 1.29 mg/(kW·h), with an expanded uncertainty of 2.58 mg/(kW·h). This research can provide a technical reference improving the accuracy and reproducibility of emission measurement of unconventional pollutants such as methanol and formaldehyde.

Keywords: methanol engine; formaldehyde emission; unconventional pollutant; uncertainty

(责任编辑:胡晓燕)