

某柴油机尾气后处理装置空速计算方法

刘建军^{1,2}, 张建华², 王明杰², 白书战^{1*}

1. 山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东交通学院, 山东 济南 250357

摘要:为提高柴油机后处理装置性能,分析排气质量流量计算方法,开展台架试验采集标准工况下柴油机的进气质量流量;基于进气密度和进气质量流量,分别用进气流量和油耗量测量法、碳平衡法计算尾气后处理装置的空速,并对比2种计算方法的有效性。结果表明:进气质量流量和油耗量测量法、碳平衡法计算的尾气后处理装置空速结果接近,2种方法计算的空速的相对误差为3.94%,均可用于柴油机尾气后处理装置空速计算;相比碳平衡法,基于进气质量流量和油耗量测量法更容易实现。

关键词:柴油机;尾气后处理;空速;排气流量;有效容积

中图分类号:TK422

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)03-0057-05

引用格式:刘建军,张建华,王明杰,等.某柴油机尾气后处理装置空速计算方法[J].内燃机与动力装置,2024,41(3):57-61.

LIU Jianjun, ZHANG Jianhua, WANG Mingjie, et al. Space velocity calculation of exhaust after-treatment device for a diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024,41(3):57-61.

0 引言

我国非道路移动机械用柴油机排放标准不断升级,对柴油机排放尾气中污染物的限定更加严格,促进了柴油机尾气后处理装置的普及和应用。为满足我国非道路移动机械用柴油机第四阶段排放标准,装用额定净功率为37~560 kW柴油机的机械,需加装壁流式柴油颗粒捕集器(diesel particulate filter,DPF)或更加高效的颗粒物(particulate matter,PM)控制装置^[1]。

当前针对柴油机尾气后处理装置的研究及成果较多:陈曦等^[2]分析了柴油机尾气后处理的主要故障模式、原因以及预防措施,为提升相关产品的质量、降低因柴油机尾气后处理设备失效造成的损失提供了经验;王磊等^[3]对满足污染物排放标准的柴油机开展台架试验,分别研究了稳态、瞬态试验循环下尾气后处理技术对尾气中 N_2O 排放的影响;侯普辉^[4]利用流体动力学仿真软件,研究了影响选择性催化还原(selective catalytic reduction,SCR)技术工作效率的关键参数,提高产品的性能和一致性;王冠^[5]分析了多种尾气后处理技术对重型柴油机PM、 NO_x 排放的影响,阐述了重型柴油机尾气后处理技术的研究趋势;罗万祥^[6]介绍了SCR技术在二冲程、四冲程柴油机尾气后处理中的应用,使相关制造企业更充分了解SCR技术以提高产品质量;刘伟等^[7]为提高柴油机尾气后处理系统的工作效率,通过数值仿真和试验验证研究了尾气后处理混合器对氨气分布均匀性的影响;杨丽君等^[8]为进一步优化柴油机尾气后处理设备的性能,从工作原理入手,研究了尿素喷入量计算精度欠缺等常见故障的原因及诊断方法;单文坡等^[9]为

收稿日期:2023-12-18

基金项目:山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2021TSGC1334);济南市市校融合发展战略工程项目(JNSX2023006)

第一作者简介:刘建军(1989—),男,济南人,山东大学硕士研究生,山东交通学院助理工程师,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制技术,E-mail:402030@sdjtu.edu.cn。

***通信作者简介:**白书战(1979—),男,山东莘县人,工学博士,教授,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制技术、整机开发与可靠性技术及新能源汽车技术,E-mail:baishuzhan@sdu.edu.cn。

降低重型柴油车污染,总结分析了在用的重型柴油车后处理技术,研究指出为满足更高排放标准,需要发动机与后处理系统控制技术交叉融合,提高低温下 NO_x 净化效率和 DPF 安全可靠再生;李奕闻等^[10]总结了当前的 DPF 再生技术,分析了不同参数对 DPF 内颗粒沉积分布特性的影响,指出了可行的微观通道内颗粒沉积与 DPF 再生技术的研究方向。

影响尾气后处理装置性能的主要因素包括后处理装置的结构、载体结构、载体材料、涂层材料、贵金属含量、排气流量等,其中排气流量是重要的技术参数,直接影响尾气后处理装置的性能。柴油机后处理装置空速是柴油机的排气体积流量与后处置装置体积的比。柴油机后处理装置空速过大,意味着选取的后处理装置体积过小,废气流过后处理装置的速度加快,时间较短,导致后处理装置上的催化剂不能充分捕捉废气中的有害气体,柴油机排放难以满足排放标准要求;空速过小,意味着选取的后处理装置体积过大,废气流过后处理装置的速度减小,时间增加,虽然能够满足排放标准要求,但导致使用成本增加,同时体积过大的后处理装置不利于其在整机上的布置。

王静等^[11]研究了空速和 NO_2 体积分数对 NO_x 转化效率的影响,结果表明 NO_x 转化效率随空速的增大而降低;潘冬辉等^[12]研究了空速对褶皱式基底钒基催化剂的 NO_x 转化效率和 NH_3 泄漏的影响;卢丰翥等^[13]测量了不同空速下的柴油机氧化催化转化器(diesel oxidation catalyst, DOC)的入口温度,研究了 HC 转化效率、NO 的氧化效率和 DOC 载体的放热特性随温度变化规律。目前涉及空速的研究很多,但对空速计算方法的研究较少。

本文中分析某柴油机尾气后处理装置空速的计算方法,开展台架试验测量柴油机在额定工况下的性能及排放,基于进气量和油耗量的测量法、碳平衡测量法计算柴油机 DPF 空速并对结果进行对比,为设计后处理系统的尺寸及形状,提高和优化后处理装置催化、还原及捕捉废气中有害成份的能力,提供参考。

1 排气流量计算方法

带尾气后处理装置的柴油机排气流量的计算方法主要有直接测量法、基于进气量和油耗量的测量法、碳平衡测量法、总稀释排气流量测量法 4 种^[14]。

1.1 直接测量法

直接测量法通过流量传感器或具有等效功能的流量测试系统测量排气流量,但柴油机在额定工况下的排气温度通常不低于 $500\text{ }^\circ\text{C}$,大多数流量传感器不适于在此温度范围内工作,因此直接测量法较少使用。

1.2 基于进气量和油耗量的测量法

使用满足测量精度的空气流量传感器和燃油流量传感器分别测量进气量和油耗量,理想试验条件下,将进气量和油耗量叠加,可以得到排气流量。

湿基进气体积流量

$$q_{V,A} = q_{m,A} / \rho_A, \quad (1)$$

式中: $q_{m,A}$ 为湿基进气质量流量, kg/h ; ρ_A 为湿基进气密度, kg/m^3 。

湿基排气体积流量的计算式为:

$$\{q_{V,E}\} = \{q_{V,A}\} + 0.746 \{q_{m,F}\}, \quad (2)$$

式中: $\{q_{V,E}\}$ 为以 m^3/h 为单位的湿基排气体积流量 $q_{V,E}$ 的数值, $\{q_{V,A}\}$ 为以 m^3/h 为单位的 $q_{V,A}$ 的数值, $\{q_{m,F}\}$ 为以 kg/h 为单位的燃油质量流量 $q_{m,F}$ 的数值。

1.3 碳平衡测量法

碳平衡测量法根据碳元素质量保持不变的原理,通过含碳气体排气成分和油耗量计算排气质量流量,从而计算进气体积流量^[15]。根据碳特殊因子、干基排气燃烧附加容积、瞬时排气质量流量和瞬时燃料质量流量,计算瞬时进气质量流量。

碳特殊因子

$$k_c = 0.544 \frac{1}{18.522} (\varphi_d(\text{CO}_2) - \varphi_a(\text{CO}_2)) + \frac{\varphi_d(\text{CO})}{18.522} + \frac{\varphi_w(\text{HC})}{18.522}, \quad (3)$$

式中: $\varphi_d(\text{CO}_2)$ 为排气中干基 CO_2 体积分数, $\varphi_a(\text{CO}_2)$ 为进气中干基 CO_2 体积分数, $\varphi_d(\text{CO})$ 为干基 CO 体积分数, $\varphi_w(\text{HC})$ 为湿基 HC 体积分数。

干基排气燃烧附加容积

$$k_{fd} = -0.055594w(\text{H}) + 0.0080021w(\text{N}) + 0.0070046w(\text{O}), \quad (4)$$

式中: $w(\text{H})$ 、 $w(\text{N})$ 、 $w(\text{O})$ 分别为燃油中氢的质量分数、氮的质量分数、氧的质量分数。

瞬时排气质量流量

$$q_{m,ewi} = q_{m,fi} \left(\frac{1.4w^2(\text{C})}{(1.0828w(\text{C}) + k_{fd}k_c)k_c} \left(1 + \frac{H_a}{1000} \right) + 1 \right), \quad (5)$$

式中: $w(\text{C})$ 为燃油中碳的质量分数; $q_{m,fi}$ 为燃料瞬时质量流量,kg/s; H_a 为进气的绝对湿度。

瞬时进气质量流量

$$q_{m,A} = q_{m,ewi} - q_{m,F\circ} \quad (6)$$

1.4 总稀释排气流量测量法

该方法使用容积式泵或临界流量文丘里管测量总稀释排气流量,测量设备精度应符合要求。但由于额定转速下柴油机排气经过定容取样系统管路后进行稀释,空速需要测定柴油机在额定转速下的原始排气流量,因此该方法不适用于后处理空速的计算。

2 台架试验结果

某高压共轨增压中冷柴油机后处理系统为DPF-DOC,柴油机主要技术参数如表1所示。

表1 柴油机主要技术参数

缸径/mm	行程/mm	额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)	气缸数	冷却方式	排列方式
98	115	64	2400	4	液冷	直列

DPF后处理单元直径为190.5 mm,高为126.8 mm。根据基于进气量和油耗量测量法、碳平衡测量法配置柴油机台架试验,台架试验测试现场如图1所示,DPF后处理单元如图2所示,试验测试设备相关参数如表2所示,额定工况下柴油机试验结果如表3所示。

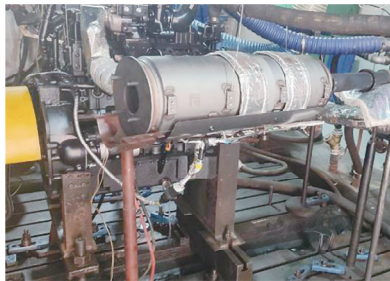


图1 台架测试现场

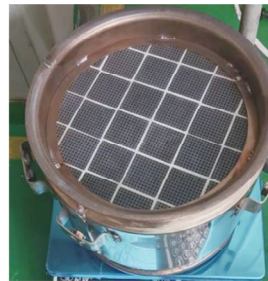


图2 拆卸后的DPF后处理单元

表2 试验用台架设备相关参数

设备名称	型号	测量范围或精度
交流电力测功机	CAC370	转速测量范围为0~3300 r/min,转矩测量范围为0~2019 N·m
质量流量油耗仪	FC2212L-01	测量范围为0.1~70.0 kg/h
热式气体质量流量计	TOCEL20N150	测量范围为270~2700 kg/h,测量精度为1.0级
气体排放分析仪	AMAi60	测量精度为满量程的1.0%

表3 额定工况下柴油机试验结果

转速/(r·min ⁻¹)	转矩/(N·m)	功率/kW	进气质量流量/(kg·h ⁻¹)	燃油消耗质量流量/ (kg·h ⁻¹)	进气温度/°C
2 400	256.8	64.53	415.0	15.673	24.9
进气相对湿度/%	$\varphi(\text{THC})/10^{-6}$	$\varphi_d(\text{CO})/10^{-6}$	$\varphi_d(\text{CO}_2)/\%$	$\varphi_a(\text{CO}_2)$	$q_{m,f}/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$
49	65	6	8.164	0.07	4.358

注:表中 $\varphi(\text{THC})$ 为排气中THC的体积分数。

3 空速计算

DPF空速

$$\gamma = q_{V,E}/V_{\text{DPF}}, \quad (7)$$

式中: V_{DPF} 为DPF后处理的体积,本文中, $V_{\text{DPF}}=3.614\text{ L}$ 。

3.1 基于进气量和油耗量的测量法

采用基于进气量和油耗量的测量法,环境温度为 $24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,进气相对湿度为 49% ,大气压力为 101.3 kPa ,柴油机的进气质量流量为 415.0 kg/h ,进气密度约为 1.186 kg/m^3 。由式(1)可得, $q_{V,A}=349.916\text{ m}^3/\text{h}$ 。由式(2)可得,额定转速和额定功率下, $q_{V,E}=361.703\text{ m}^3/\text{h}$;由式(7)可得该柴油机DPF的空速 $\gamma=100\ 083\text{ h}^{-1}$ 。

3.2 基于碳平衡测量法

本文中, $w(\text{C})=85.65\%$, $w(\text{H})=13.54\%$, $w(\text{N})=0.03\%$, $w(\text{O})=0.72\%$, $H_a=10.027\text{ g/kg}$ 。由式(3)~(6)可得,额定工况下的进气流量约为 398.2 kg/h ;空气密度取 1.186 kg/m^3 ,由式(1)可得, $q_{V,A}=333.750\text{ m}^3/\text{h}$ 。由式(2)可得,额定转速和额定功率下, $q_{V,E}=347.442\text{ m}^3/\text{h}$;由式(7)可得,该柴油机DPF空速 $\gamma=96\ 138\text{ h}^{-1}$ 。

采用基于进气量和油耗量的测量法、碳平衡测量法所得空速的相对误差,评价2种计算方法的区别。基于进气量和油耗量的测量法、碳平衡测量法所得空速的相对误差

$$\delta_{sv} = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1}, \quad (8)$$

式中: γ_1 、 γ_2 分别为基于进气量和油耗量的测量法、碳平衡测量法计算的空速, h^{-1} 。

由式(8)可得: $\delta_{sv}=3.94\%$ 。基于进气量和油耗量的测量法、碳平衡测量法所得计算结果相对误差小于 5% ,这2种计算方法均有效。

使用进气空气流量和燃油消耗量测量法计算空速时,通过进气流量计和油耗仪测量进气质量流量;使用碳平衡法计算空速时,使用油耗仪和气体排放分析仪测量,同时还应获取燃油中的碳、氢、氮、氧等的质量分数,测量设备和计算过程较复杂。2种方法相比,基于进气空气流量和燃油消耗量测量法计算后处理装置空速更容易实现。

4 结束语

为满足我国排放标准,提高柴油机DPF性能,通过柴油机台架试验,测量柴油机进气质量流量、燃油消耗及污染物排放,基于进气量和燃油消耗量测量法、碳平衡测量法计算了某柴油机尾气后处理装置的空速。

1)基于进气量和燃油消耗量测量法、碳平衡测量法计算的空速结果相近,2种方法计算的空速的相对误差为 3.94% ,2种方法均可用于柴油机尾气后处理装置空速计算。

2)2种方法相比,基于进气空气流量和燃油消耗量测量法计算后处理装置的空速更容易实现。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 非道路柴油移动机械污染物排放控制技术要求: HJ 1014—2020[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [2] 陈曦, 马江. 柴油机尾气后处理主要的失效模式、成因及预防[J]. 汽车实用技术, 2019(17): 45-46.
- [3] 王磊, 黄志强, 彭程. 国六阶段车用柴油机尾气中 N_2O 排放特性的试验研究[J]. 内燃机, 2019(4): 26-30.
- [4] 侯普辉. 某柴油机 SCR 系统 CFD 仿真分析[J]. 汽车实用技术, 2020(5): 113-116.
- [5] 王冠. 重型柴油车排放特征及颗粒捕集器效用评估[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [6] 罗万祥. SCR 技术在柴油机尾气后处理上的应用[J]. 科技创新导报, 2020, 17(7): 63-64.
- [7] 刘伟, 田松. 柴油机尾气后处理混合器对 NH_3 分布均匀性影响的研究[J]. 内燃机与配件, 2021(20): 13-14.
- [8] 杨丽君, 许刚. 柴油机尾气后处理系统故障诊断与优化[J]. 农机使用与维修, 2021(6): 93-94.
- [9] 单文坡, 余运波, 张燕, 等. 中国重型柴油车后处理技术研究进展[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1672-1677.
- [10] 李奕闻, 范宪涛, 杨培兴, 等. 柴油机 DPF 再生技术的研究进展[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(6): 21-28.
- [11] 王静, 王谦, 赵炜, 等. 车用尿素 SCR 系统的数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 386-393.
- [12] 潘冬辉, 赵巧男, 徐洪涛. 褶皱式玻璃纤维基底的钒基催化剂性能研究[J]. 内燃机工程, 2022, 43(5): 1-6.
- [13] 卢丰翥, 吴海阳, 杨纯. 不同贵金属比例涂覆的 DOC 载体性能研究[J]. 现代车用动力, 2021(4): 54-58.
- [14] 环境保护部. 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第三、四阶段): GB 20891—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [15] 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: 中国环境科学出版社, 2018.

Space velocity calculation of exhaust after-treatment device for a diesel engine

LIU Jianjun^{1,2}, ZHANG Jianhua², WANG Mingjie², BAI Shuzhan^{1*}

1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To improve the performance of diesel engine after-treatment device, the calculation method of exhaust mass flow rate is analyzed, and validated by bench tests to collect the intake mass flow rate of diesel engines under the rated conditions. Based on the intake density and intake mass flow rate, the airspeed of the after-treatment of exhaust gas device is calculated using the intake air flow rate and fuel consumption measurement method, as well as the carbon balance method, respectively, and the effectiveness of the two calculation methods is compared. The results show that the air velocity of the after-treatment of exhaust gas device calculated by the intake mass flow rate and fuel consumption measurement method, as well as the carbon balance method, are close. The relative error of air velocity calculated by the two methods is 3.94%, which can be used for calculating the air velocity of diesel engine after-treatment of exhaust gas devices. Compared with the carbon balance method, the measurement method based on intake mass flow rate and fuel consumption is easier to achieve.

Keywords: diesel engine; after-treatment of exhaust gas; space velocity; exhaust gas flow; effective volume

(责任编辑: 刘丽君)