

NO_x 传感器布置位置对测量准确度影响的试验研究

甄雷,刘帅,朱兴军,邵宏鑫

潍柴动力股份有限公司,山东 潍坊 261061

摘要:为提高 NO_x 传感器的测量准确性,采用不同工况的正交试验和排气均匀性仿真建模,分析不同布置位置下 NO_x 传感器的测量偏差及原因,研究不同位置下的 NO_x 传感器的测量准确度。结果表明:NO_x 传感器应布置在混合气流较均匀的位置且在涡后自氧化催化器前至尾管后的排气管路上;沿尾管随气流方向越靠后的位置,测量准确度越高;气流分布不均匀是影响 NO_x 传感器测量准确度的主要因素。

关键词:NO_x 传感器;精度;气流均匀性;布置位置;测量准确度

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)05-0068-06

引用格式:甄雷,刘帅,朱兴军,等.NO_x 传感器布置位置对测量准确度影响的试验研究[J].内燃机与动力装置,2023,40(5):68-73.

ZHEN Lei, LIU Shuai, ZHU Xingjun, et al. Experimental study on the measurement accuracy influenced by NO_x sensor position[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(5):68-73.

0 引言

柴油机的热效率高、功率密度大、故障率低,广泛应用于交通运输、非道路工程机械、船舶动力等领域^[1]。研究表明,柴油机排气系统加装带选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)的后处理后,NO_x 比排放大幅下降^[2]。影响最终 NO_x 排放的因素是发动机原排和 SCR 的催化效率^[3],SCR 技术是当前柴油机降低 NO_x 排放的主要技术手段^[4],在 SCR 控制系统中,NO_x 传感器测量结果是电子控制单元(electronic control unit, ECU)控制 SCR 尿素喷射的重要输入参数,ECU 根据获取的上游 NO_x 传感器的测量结果、废气流量和氨氮比信号,计算尿素喷射量,因此传感器测量信号的精确度直接决定尿素喷射量。NO_x 传感器安装位置对测量准确度的影响较大,为保证柴油机 NO_x 排放测试结果的一致性、可重复性和准确性,综合考虑国家排放标准、后处理系统经济性和尿素结晶问题^[5],研究柴油机排放测试过程中影响 NO_x 测量结果的因素非常必要^[6]。

NO_x 传感器是柴油机尾气后处理装置的重要部件,通常布置在后处理器的前、后端,分别测量后处理前、后尾气中 NO_x 的浓度。上游 NO_x 传感器测量发动机原排中 NO_x 的浓度,下游 NO_x 传感器测量后处理器后 NO_x 的浓度。不同柴油机厂家 NO_x 传感器的布置位置不同,上游 NO_x 传感器的测量结果作为原排的输入至关重要,在涡轮后至后处理总成前均布置有 NO_x 传感器。针对下游 NO_x 传感器在后处理箱中位置、角度等对测量准确度影响的研究较多:林福容等^[7]对 NO_x 传感器偏差自适应功能进行了研究,提出了一种偏差修正的方法,对不同位置、不同万有工况点的 NO_x 排放测量偏差进行了对比分析;钱显威等^[8]提出了一种 NO_x 传感器氧气干扰的补偿方法,该方法能够更好地建立测量泵电流与 NO_x 体积分数的对应关系,克服了测量过程中 O₂ 的干扰,显著提高了 NO_x 传感器的测量精度;余舒等^[9]构建了 NO_x 排放预测模型,实现 NO_x 浓度预测功能,保证后处理系统的正常运转;王柯等^[10]对 NO_x 传感器测量精度进

收稿日期:2023-03-14

基金项目:国家重点研发计划项目(GG20211602-03)

第一作者简介:甄雷(1994—),男,石家庄人,工程师,主要研究方向为发动机排放控制,E-mail:zhenl@weichai.com。

行相关研究表明,当下游 NO_x 传感器安装在经过消声器后的尾管直管段时精度最高,该位置能够真实反应发动机瞬态工况变化;钱枫等^[11]针对氧化锆基 NO_x 传感器信号受汽车尾气氧气含量影响导致的精度不佳问题,提出一种氧补偿算法和标定策略;张琳等^[12]研究表明,传感器对当量空燃比天然气发动机排放浓度的精确度不高,不能真实反映发动机排放水平;王远西等^[13]研究开发了一种原位检测 NO_x 的高效检测设备,提升了检测精度;卞增涛等^[14]研究表明,SCR 前氨气不均匀是 NO_x 传感器测量偏差大的原因,SCR 下游增加螺旋混合装置后,可以解决测量偏差大的问题;袁志玲等^[15]对下游 NO_x 测量准确度进行了研究,通过设计一种后腔混合器提高均匀性和准确性。然而,针对上游 NO_x 传感器安装位置对传感器测量准确度影响的相关文献较少。

本文中以某排量为 13 L 柴油机为研究对象,在其涡后至后处理总成前的尾管不同位置和角度布置 NO_x 传感器,测量 NO_x 排放,分析不同位置 NO_x 传感器测量准确度和原因,确定 NO_x 传感器的最佳安装位置,为后续传感器的布置方案积累经验,避免出现因安装位置导致测量偏差过大现象。

1 试验方案

通过试验研究上游 NO_x 传感器布置位置对 NO_x 传感器测量精度的影响,试验时将相同批次且经校验无问题的传感器布置在排气管路的不同位置,测试不同万有特性工况下各个位置测量结果的偏差,并对排气管路中的气流压力进行仿真,根据仿真结果分析气体均匀性,确定最佳测量位置。NO_x 传感器外观如图 1 所示。

1.1 试验用发动机及设备

该试验以某排量为 13 L、满足国六排放标准的柴油机为研究对象,该发动机运行状态稳定可靠,其关键技术参数如表 1 所示。



图 1 NO_x 传感器外观

表 1 试验用柴油机关键技术参数

额定转速/(r·min ⁻¹)	额定转矩/(N·m)	额定功率/kW	后处理路线	增压器类型
1 900	2 100	420	高效 SCR	电控放气阀增压器

试验依托于测功机台架,由测功机控制发动机在不同转速-转矩工况下稳定运行,试验用各项设备及型号如表 2 所示。

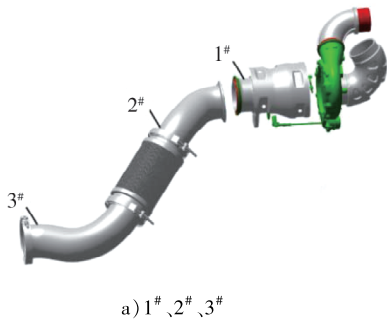
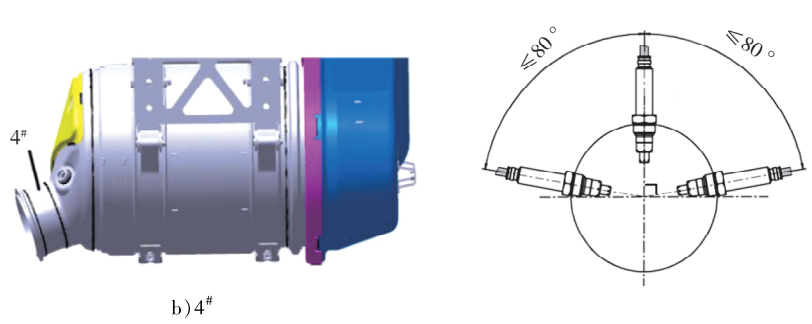
表 2 试验用设备及型号

设备名称	电力测功机	气体分析仪	进气空调	测控电脑	数采设备
型号	1PL6228	7500DEGR	ZK-08	T470	ES592/ES650

试验前分别在排气管的不同位置布置相同型号和批次的 NO_x 传感器,测试时选取不同万有特性工况,分别同时记录不同位置的传感器测量结果。

1.2 NO_x 传感器安装位置

上游 NO_x 传感器测量未经后处理 SCR 还原反应的发动机原排中 NO_x 的体积分数,因此上游 NO_x 传感器安装位置应在增压器涡轮后至 SCR 混合器之间,选取安装位置时还应考虑在直管段管路。本次试验中,NO_x 传感器安装位置如图 2 所示。由图 2 可知:NO_x 传感器分别布置在涡轮后(1#位置)、涡轮后与后处理入口中间位置(2#位置)、后处理入口(3#位置)以及后处理出口(4#位置)。传感器布置角度按照传感器使用要求,与管路垂直方向成 80°夹角,如图 3 所示。气体分析仪排放设备采样点分别为 1#、4#位置。

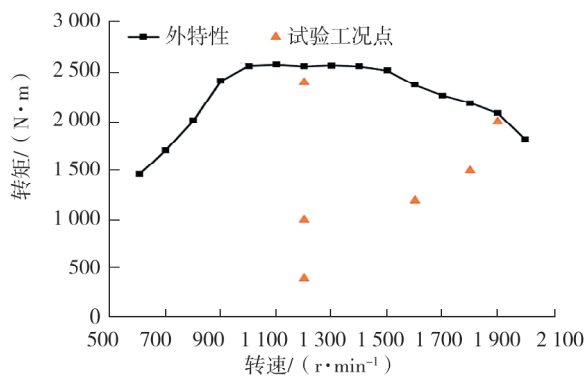
图2 NO_x传感器安装位置图3 NO_x传感器安装角度

1.3 发动机工况

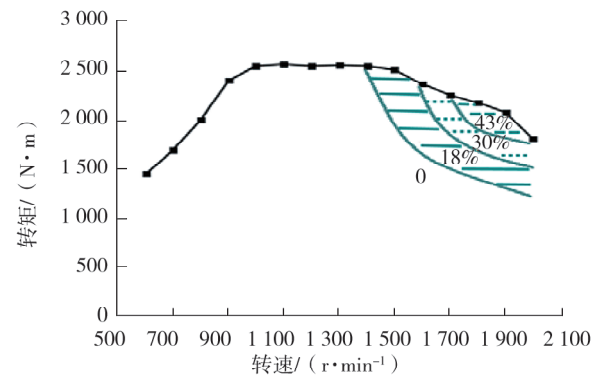
按照覆盖全面、侧重常用工况、具备代表的选取原则,综合考虑增压器动作、排气温度等可能影响NO_x传感器精度的因素,选定发动机试验工况,如表3所示,基于转速-转矩的试验工况与外特性下增压器放气特性如图4所示。

表3 试验工况

工况	转速/(r·min ⁻¹)	转矩/(N·m)	备注	工况	转速/(r·min ⁻¹)	转矩/(N·m)	备注
1	1 200	2 500	外特性附近点	4	1 600	1 200	增压器放气分界点
2	1 900	2 000	额定点附近	5	1 200	1 000	常用工况区
3	1 800	1 500	放气中心点	6	1 200	400	低负荷



a) 工况点



b) 外特性下增压器放气特性

图4 基于转速-转矩的试验工况点与增压器放气特性

1.4 试验方法

开展不同工况下的正交试验,试验时校对发动机状态,确保发动机状态与初始开发时状态吻合,各项设备工作正常。在尿素停喷的情况下测量全部后处理流场内各位置NO_x的体积分数,使用测功机控制发动机在设定的稳定工况运行,每个位置测量时间为5 min,计算每个位置NO_x传感器测量的平均NO_x体积分数,同步计算排放设备测量的平均NO_x体积分数,进行对比分析。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

采集不同工况下排放设备和1#、2#、4#位置NO_x传感器测量的NO_x体积分数,如图5所示。3#位置的NO_x体积分数由4#位置测量结果计算得到。

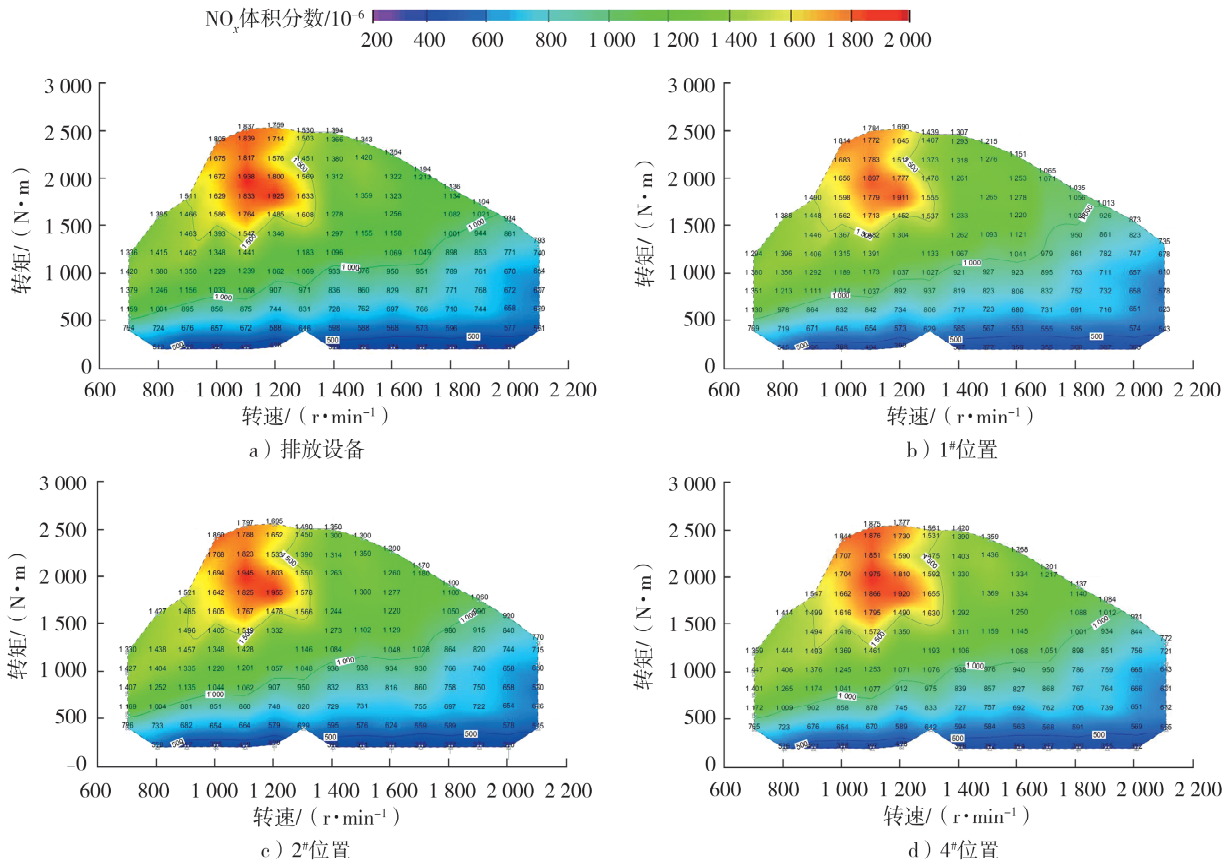


图5 不同工况下排放设备和1#、2#、4#位置NO_x传感器测量的NO_x体积分数

2.2 结果分析

2.2.1 各工况下不同位置平均相对偏差

数据分析时以排放设备测量结果为基准,分别与第1#~4#位置的测量结果进行处理,NO_x相对偏差百分比

$$\delta = (\varphi_1 - \varphi) / \varphi \times 100\%$$

式中: φ_1 为NO_x传感器测量的排气中NO_x体积分数, φ 为排放设备测量的排气中NO_x体积分数。

各工况下不同位置NO_x准确度相对偏差如表4所示。由表4可知:各工况下、不同测点位置的相对偏差均在±10%以内,随气流方向向后,偏差逐渐减小;工况2下的相对偏差较大,这是因为工况2为增压器放气阀的放气区域。

表4 各工况下不同位置NO_x测量准确度相对偏差

工况	相对偏差/%				工况	相对偏差/%			
	1#	2#	3#	4#		1#	2#	3#	4#
1	-4.3	3.0	-2.0	1.0	4	-4.8	2.5	-1.5	-1.0
2	-9.8	-4.0	2.0	-1.8	5	-3.0	1.5	-0.8	0.3
3	-7.5	-5.0	2.0	0.5	6	2.0	-1.0	-0.8	0.1

2.2.2 不同工况下相同位置偏差

各工况下1#~4#位置的NO_x传感器测量准确度平均相对偏差分别为-4.6%、-1.0%、-0.2%、-0.2%,1#测点平均偏差最大;3#、4#测点基本无偏差,精度一致性较好,2#测点的偏差较小,进一步证明NO_x传感器安装位置随气流方向越靠后,测量准确度越高,当测量位置超过3#测点(氧化催化器前)后,

准确度基本一致,偏差很小。此外,不同测点的测量偏差没有明显规律。

工况 2、3 均为增压器放气阀的放气区域,基于放气阀开度的 1# 位置的传感器偏差,根据工况 2~4 的测量结果,分析增压器放气阀开度与传感器测量准确度之间的关系,如图 6 所示。由图 6 可知:在放气范围工况内,随增压器放气阀开度增大,放气量增加, NO_x 传感器测量准确度变差。

综合以上分析,可知:1)沿气流方向, NO_x 传感器在排气管布置位置越靠后,测量准确度越高;2)放气阀放气时,放气量越大,对 NO_x 传感器测量准确度的影响越大。

3 排气均匀性仿真分析

根据不同工况、不同位置 NO_x 传感器安装位置对测量准确度的影响结果,猜测排气管路中气流混合的均匀性影响传感器的测量准确度,气流紊乱程度越高,对准确度的影响越大,因此,对影响较大、距离增压器较近的 1#、2# 位置进行气流均匀性仿真。

使用 ANSYS018.1 和 SolidWorks 软件进行仿真,对现有三维管路模型进行网格划分,将增压器模型嵌入三维管路模型中,创建几何模型,并校验网格质量,完成后对增压器涡轮后压力进行流体仿真,结果如图 7 所示,其中对 2# 位置与 1# 位置之间的弯管做垂直处理,对实际结果分析无影响。

由图 7 可知:增压器涡轮端放气口的气流均匀度随气流流向逐渐变好,越靠近涡轮端放气口,各缸脉冲及增压器叶片气流旋向的影响越大。

对放气区域进行分析,增压器放气示意如图 8 所示。增压器放气时曲柄连杆结构受进气压力和弹簧作用力,推动排气旁通阀门打开。放气阀打开时,气流呈离散状向四周迸射,且在阀内形成湍流,湍流结束后再沿原放气路径迸射,如图 9 所示。

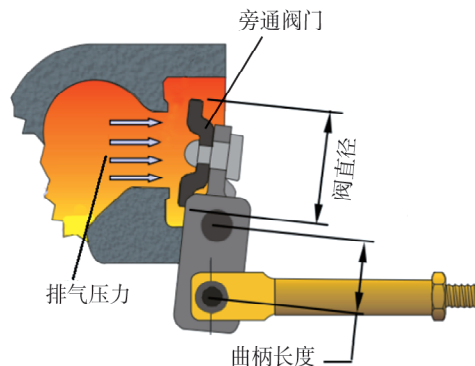


图 8 增压器放气示意图

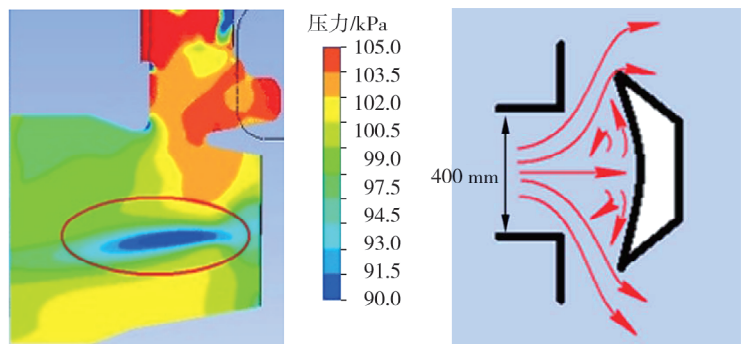


图 9 增压器放气气流分布

由图 9 和表 3 可知:放气阀开度越大,放气量越大, NO_x 传感器测量准确度的偏差越大;放气阀放气形成的湍流越多,对气流均匀性影响越大。

气流均匀性对于 NO_x 传感器测量准确度有较大影响,由于气流的不稳定性,测量结果可能偏高或偏低,不确定性较大。

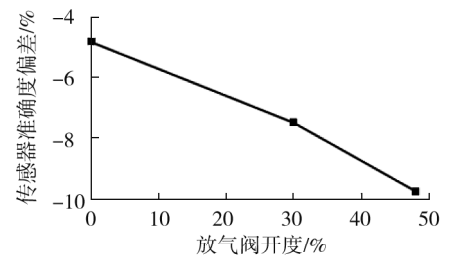


图 6 测量准确度与增压器放气阀开度之间的关系

4 结论

通过试验研究了NO_x传感器在不同位置 and 不同工况点下的测量准确度,仿真分析了距离增压器较近的1[#]、2[#]位置的气流均匀性,得到如下结论。

- 1) NO_x传感器位置沿气流流向越靠后测量准确度越高,并与气流均匀性相关。
- 2) 增压器涡轮后越靠后位置的气流混合均匀性越好。
- 3) NO_x传感器在增压器放气阀打开时测量准确度偏差较大,放气阀开度越大,放气量越大,测量准确度越差。

参考文献:

- [1] 帅石金,唐韬,赵彦光,等. 柴油车排放法规及后处理技术的现状与展望[J]. 汽车安全与节能学报,2012,3(3):200-217.
- [2] 胡杰,钟静,廖健雄,等. 集成式后处理装置对农用柴油机排放的影响[J]. 内燃机工程,2022,43(1):18-28.
- [3] 汪晓伟,景晓军,高涛,等. 重型车低负荷运行特征及NO_x排放特性[J]. 中国环境科学,2022,42(11):5063-5071.
- [4] 杨斌. 柴油机SCR系统尿素喷射控制研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.
- [5] 白羽,滕勤,马标. 用于SCR催化器性能评价的尿素喷射控制系统[J]. 内燃机与动力装置,2019,36(4):5-14.
- [6] 冀树德,杨天军,高波,等. 基于台架重复性的柴油机NO_x排放测量影响因素研究[J]. 车用发动机,2011(6):53-58.
- [7] 林福容,张惠,张艳辉,等. 基于NO_x传感器偏差的SCR自适应功能研究[J]. 现代车用动力,2022(187):14-37.
- [8] 钱显威,李雪宾,周明军,等. 氮氧化物气体传感器氧气干扰的补偿方法[J]. 传感器与微系统,2022,41(9):34-41.
- [9] 余舒,杨志刚. 基于DBSCAN和CNN算法的重型车辆NO_x排放预测模型[J]. 重庆交通大学学报,2022,41(8):134-141.
- [10] 王柯,黄少文,潘飞,等. 氮氧传感器安装位置试验分析[J]. 汽车电器,2014(9):70-72.
- [11] 钱枫,付海亮,王明达,等. NO_x传感器的氧补偿及其标定策略[J]. 汽车电器,2022,43(5):15-22.
- [12] 张琳,卢中轩,李腾腾,等. NO_x传感器测量天然气发动机NO_x排放的试验研究[J]. 小型内燃机与车辆技术,2021,50(6):48-52.
- [13] 王远西,王岭,孟维薇,等. 新型固体电解质基氮氧化物传感器的制备与性能研究[J]. 仪器仪表学报,2022,43(1):165-171.
- [14] 卞增涛,王奉双,刘兴龙,等. 基于CFD分析的NO_x传感器监测特性研究[J]. 车用发动机,2021(4):86-92.
- [15] 袁志玲,耿磊,张建华,等. 国VI排放后处理器下游NO_x测量准确度研究[J]. 内燃机学报,2021,39(2):186-191.

Experimental study on the measurement accuracy influenced by NO_x sensor position

ZHEN Lei, LIU Shuai, ZHU Xingjun, SHAO Hongxin

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

Abstract: To improve the measurement accuracy of NO_x sensors, the accuracy of NO_x sensors in different locations is studied. Different sensor locations and model using orthogonal test methods and uniformity simulation for different operating conditions are investigated, the measurement deviations and causes at different placement locations are analyzed. The result shows that the NO_x sensor should be placed at a more uniform location of the mixed air flow, and the more accurate the position behind the wind (the tail pipe moves backwards in the direction of the air flow) on the post-turbo to exhaust line. The uneven distribution of air flow is a major factor affecting the accuracy of the NO_x sensor.

Keywords: NO_x sensor; precision; airflow uniformity; installation position; measurement accuracy

(责任编辑:刘丽君)