

氮氧传感器性能自动检测装置设计

王川川^{1,2}, 张振刚^{1,2*}, 王聪^{1,2}, 高伟^{1,2}, 孙后瑞^{1,2}, 唐忠刚¹

1. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061; 2. 国家内燃机产业计量测试中心, 山东 潍坊 261061

摘要:为解决氮氧传感器在检测尾气中 NO_x 、 O_2 体积分数时“测不全”“测不快”“测不准”的问题,分析氮氧传感器结构组成、工作原理及控制过程,结合当前检测技术现状,设计一种氮氧传感器性能自动检测装置,该装置通过动态配气法、自动化结构检测模块及数据处理模块优化,解决“测不全”“测不快”的问题,但还应提高检测结果的精确度和系统的稳定性。

关键词:氮氧传感器;检测技术;自动检测;动态配气

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)02-0091-06

引用格式:王川川,张振刚,王聪,等.氮氧传感器性能自动检测装置设计[J].内燃机与动力装置,2025,42(2):91-96.

WANG Chuanchuan, ZHANG Zhengang, WANG Cong, et al. Design of automatic testing device for NO_x sensor performance[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(2):91-96.

0 引言

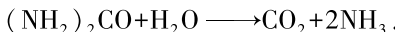
随着汽车行业的快速发展以及人们对环境保护的日益重视,各国相继制定了严格的环保法规和内燃机尾气排放标准^[1]。内燃机尾气主要成分包括 NO_x 、颗粒物(particulate matter, PM)、CO、HC 及 SO_x 等,其中 NO_x 是形成酸雨的重要成分,PM 对人体的呼吸系统造成严重损害。尾气中 NO_x 和 PM 浓度过高,严重威胁生态环境和公共健康,应严格控制内燃机 NO_x 和 PM 排放。

氮氧传感器作为发动机后处理系统的核心零部件,在控制尾气排放方面发挥着重要作用,其性能直接影响尾气中 NO_x 、 O_2 的检测精度。国内关于氮氧传感器检测技术的研究起步相对较晚,现有研究主要集中在氮氧传感器控制策略,对氮氧传感器的产品特性、基本原理及检测技术的研究仍显不足^[2-3]。本文中根据氮氧传感器的基础理论、工作原理,分析检测技术发展现状,提出一种氮氧传感器检测装置,为推动氮氧传感器检测技术发展提供参考。

1 氮氧传感器结构组成及控制过程

1.1 系统原理

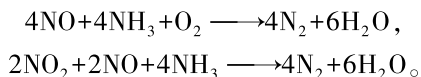
选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)系统以 NH_3 为反应物,在催化剂的作用下将 NO_x 还原成氮气和水。由于 NH_3 刺激性气味很强,因此在实际应用中多采用尿素水溶液,通过向排气管中喷射尿素水溶液的方式提供反应所需的 NH_3 ^[4-5]。SCR 系统主要反应过程为^[6]:



收稿日期:2024-10-16

第一作者简介:王川川(1985—),女,河南遂平人,工程师,主要研究方向发动机零部件检测技术开发,E-mail: wangchuanc@weichai.com。

***通信作者简介:**张振刚(1992—),男,山东德州人,工程师,主要研究方向为内燃机零部件检测技术及应用,E-mail: shanlisunshine@163.com。



某满足国六排放标准的柴油发动机,后处理系统采用柴油机氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)-柴油颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)-SCR 或氨逃逸催化器(ammonia slip catalyst, ASC), SCR 系统示意图如图 1 所示。

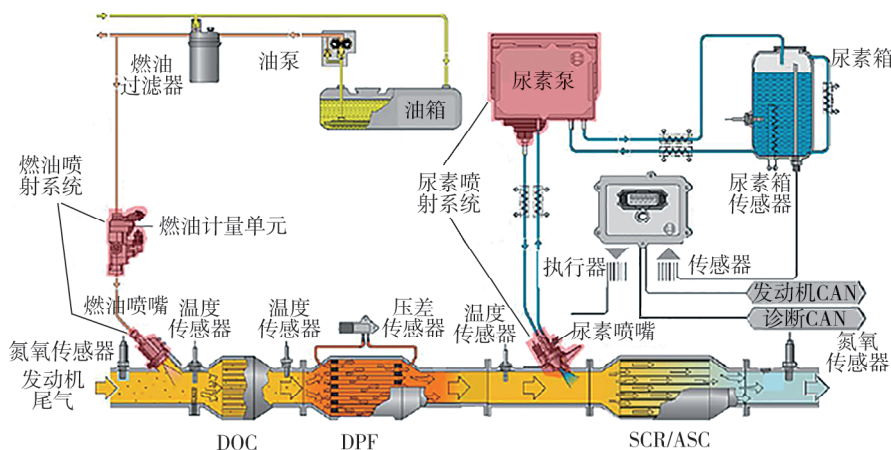


图 1 国六发动机后处理系统示意图

SCR 系统主要包含尿素泵、管道、尿素喷嘴、上下游氮氧传感器、排温传感器、尿素箱等。氮氧传感器通过检测尾气中 NO_x 和 O_2 的体积分数,监测内燃机尾气是否满足排放标准。排气管上游和下游各安装一个氮氧传感器,上游氮氧传感器的主要作用为:1)测量发动机尾气中 NO_x 体积分数,结合发动机电子控制单元(electronic control unit, ECU)控制尿素喷射系统喷入的尿素量;2)监测尾气中 O_2 体积分数,上游氮氧传感器结合 ECU 调整燃油喷射策略,确保燃油与空气的最佳质量比为 14.7 : 1,优化燃烧过程,减少 NO_x 生成。下游氮氧传感器主要检测催化剂还原后尾气中 NO_x 体积分数,间接检测催化剂性能。上、下游氮氧传感器形成闭环控制,精确控制还原过程,降低内燃机尾气中的污染物。排气管前、中、后部安装温度传感器,以测量排气温度,反馈给 ECU,调整尿素溶液喷射策略。

内燃机工作过程中, NO_x 的生成条件为高温富氧, PM 的生成条件为缺氧。为了降低尾气中 NO_x 和 PM 排放,目前大多数内燃机采用富氧燃烧-SCR 系统技术路线,即控制空气和燃油比例,使燃烧过程处于富氧状态,降低颗粒物生成,再通过 SCR 系统降低 NO_x 排放^[7]。

1.2 氮氧传感器结构组成及原理

常见的电化学型的氮氧传感器主要包含探头、连接电缆、连接插头和电控单元,对应的连接电极包括加热电极 H+、公共电极 P+、主泵电极 P-、辅助泵电极 M₁、测量电极 M₂、参考电极 Ref。探头为敏感元件,包括陶瓷传感器和加热器,陶瓷传感器内部主要由导电电解质氧化锆组成,温度为 800 ℃ 时,电解质可传导氧离子,当氧离子从体积分数高的一侧泵入体积分数低的一侧时,产生能斯特电压^[8]。

传感器探头主要包含 3 个功能:1)通过能斯特电压确定探头是否在正常工作温度(800 ℃ 左右),若不在正常工作温度,将传感器加热到正常工作温度;2)测量尾气中 O_2 体积分数;3)测量尾气中 NO_x 体积分数。探头内有主泵、辅助泵,主泵负责在第一腔室泵出大部分 O_2 ,辅助泵负责在第二腔室泵出其余 O_2 。氮氧传感器工作原理示意图如图 2 所示。

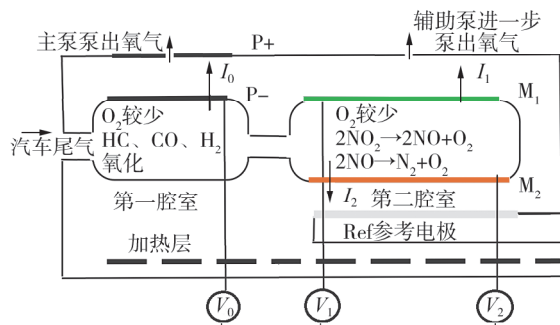


图 2 氮氧传感器工作原理示意图

当汽车尾气通过第一扩散层进入第一腔室,P-与 Ref 之间产生能斯特电压 V_0 ,主泵将第一腔室的 O_2 泵出,使尾气中 O_2 体积分数维持在 10^{-6} ,此时主泵电流为 I_0 ,尾气中的 HC、CO 和 H_2 等在第一腔室被氧化;当 O_2 体积分数较小的尾气进入第二腔室时, M_1 与 Ref 产生能斯特电压 V_1 ,辅助泵使 O_2 泵出至尾气中 O_2 体积分数为 0 左右,此时辅助泵电流为 I_2 ,尾气中的 NO_2 被分解成 NO 和 O_2 ,NO 被催化还原为 N_2 和 O_2 , M_2 与 Ref 产生能斯特电压 V_2 ,调节 V_2 使产生的氧气泵出腔室,此时主泵电流为 I_3 ,可计算尾气中 NO_x 体积分数。

1.3 传感器控制过程

控制系统对陶瓷芯中加热器、泵单元进行控制,主要包含以下功能:1)加热器驱动模块通过驱动信号,加热探头陶瓷芯片,结合温度测量模块使陶瓷芯温度稳定在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;2)控制模块通过模数(analog to digital,AD)转换电路检测泵单元各电极信号,测控泵电流、泵电压,保证 O_2 和 NO_x 检测的准确性;3)通过控制器局域网(controller area network,CAN)总线将尾气中 O_2 体积分数、 NO_x 体积分数、探头温度、传感器状态等输出信号传递给发动机 ECU。氮氧传感器控制框图如图 3 所示。

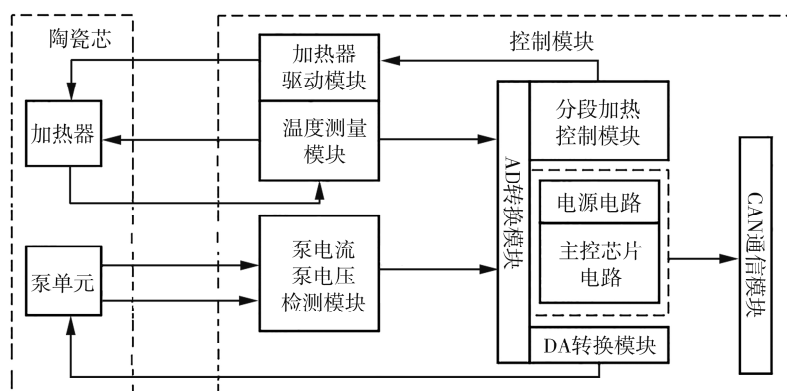


图3 氮氧传感器控制框图

1.4 传感器性能检测装置

综上所述,氮氧传感器应能实现对尾气中 O_2 、 NO_x 体积分数的快速及准确测量,同时氮氧传感器测量精度与尾气中 NO_x 体积分数、 O_2 体积分数具有相关性,即不同体积分数的 NO_x 、 O_2 检测精度不同,氮氧传感器应能实现对不同体积分数的 NO_x 、 O_2 的尾气的检测。以 Bosch 公司的氮氧传感器为例,规定应能实现对 4 种不同体积分数的 O_2 、3 种不同体积分数的 NO_x 的尾气的检测。

氮氧传感器性能检测装置采用 N_2 、 O_2 及混合气(由 NO、 N_2 组成,用 NO 体积分数表示)作为标准气源来源,实现对传感器功能的检测,主要包括:1)检测传感器测量混合气中 NO 体积分数的测量精度;2)检测传感器测量气源(N_2 、 O_2 组成)中 O_2 体积分数的测量精度;3)氮氧传感器检测装置应能检测气源中不同体积分数的 NO、 O_2 。

2 研究现状与进展

2.1 氮氧传感器研究现状

国外关于氮氧传感器的研究较早,目前市场上氮氧传感器价格昂贵,且存在行业垄断,内燃机用氮氧传感器主要生产厂家为 Bosch、纬湃科技;同时氮氧传感器的相关技术不公开,导致氮氧传感器技术发展缓慢^[9]。实行国四排放标准后,我国各内燃机生产企业、高校及科研院所逐渐开展内燃机后处理系统技术研发,氮氧传感器性能检测实现了从“测不了”到“测得了”的突破,但目前氮氧传感器检测装置较少,且存在检测成本高、准确度差等问题,如检测结果测不准,不同 NO 体积分数的气源测不快,无法测量不同体积分数的 O_2 ^[10]。

谈宏亮等^[11]研制了一套氮氧传感器的检测装置,检测结构主要包括模拟配气装置、加热装置、电信号检测装置、尾气处理装置等,主要检测过程为:按照测量要求配置模拟气源,将混合后模拟气源经过加热管预热后进入传感器,电脑端采集检测数据,并进行数据分析。通过流量计的精准控制实现不同体积分数的气源配置,该装置实现了采用氮氧传感器对气源中 NO 体积分数测量精度的检测,并能记录相关数据,但存在以下不足:1)气源中 NO 体积分数的测量结果不准确,偏差较大。由于氮氧传感器的工作特性及被测气源成分不均匀等客观因素,氮氧传感器的测量结果出现跳动,使得某一时刻测量结果出现较大偏差,测量不确定性较大。2)无法自动检测气源中不同体积分数的 NO、O₂,现有技术中需人工调整,检测效率低,检测时间长。3)无法实现对不同 NO 体积分数的气源的实时检测与评估。在评价气源中 NO_x 体积分数检测结果时,以标准气源中实际 NO 体积分数为标准评价氮氧传感器测量精度,如果标准气源中实际 NO 体积分数未进行在线检测,传感器测量精度的评价结果不可信;现有检测装置根据标准气流量计算标准气源中实际 NO 体积分数,不能进行实时检测,使数据延迟,导致检测结果可信度差。4)无法检测气源中 O₂ 体积分数测量精度,精确测量尾气中 O₂ 体积分数是降低颗粒物排放的前提,若无法检测气源中 O₂ 体积分数测量精度,造成不合格产品流入市场,存在颗粒物排放超标的风险。

孙文进等^[12]设计了一套氮氧传感器性能检测装置,主要由控制模块、电源模块、加热模块、标准气源模块、温度控制模块及尾气处理模块等 6 大核心模块组成,主要检测过程为:通过控制模块为传感器通入不同的标准气体,检测传感器不同的性能测试点,由电脑端采集数据,采集过程中通过加热模块使装置工作温度与真实工况温度一致。该装置采用标准气源进行检测,结构简单,操作便捷,准确性高,但存在以下不足:1)该装置只能识别单一标准气源,在监控产品质量性能的过程中,不同氮氧传感器供应商的产品性能检测点不同,即不同 NO 体积分数的标准气源的检测要求不同;该装置需配置不同 NO 体积分数的标准气源,价格高昂,检测成本较高。2)在检测不同 NO 体积分数的标准气源时,无法自动检测,只能手动切换,检测效率较低。

2.2 氮氧传感器性能自动检测装置设计

针对以上 2 种检测装置的不足,设计一种氮氧传感器性能自动检测装置,装置硬件结构包括分析仪测量模块、标准气源、混合控制模块、数据处理及显示模块、传感器测量模块、软件模块、尾气处理模块等,具体优势为:1)标准气源模块中采用动态配气法,可实现标准气源中不同体积分数的 NO 气体自动配置,适用性强;2)在传感器测量模块中搭建分析仪测量模块,实现标准气源中不同体积分数 NO 气体自动化检测,提高检测效率;3)优化数据处理模块算法,通过计算均值等方法消除随机误差的影响;4)增加测量气源中 O₂ 体积分数的功能,解决“测不全”的难题^[13]。氮氧传感器性能自动检测装置结构框图如图 4 所示。

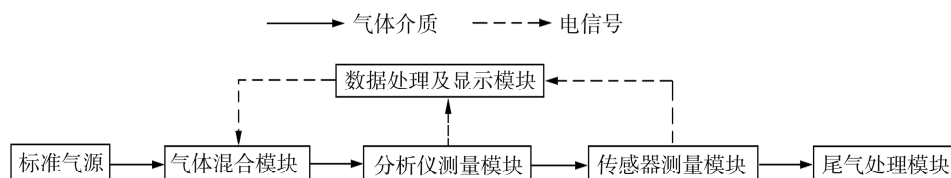


图 4 氮氧传感器性能自动检测装置结构框图

2.3 氮氧传感器性能自动检测装置验证

设计的氮氧传感器性能检测装置配置自动检测程序,适应于气源中不同体积分数 NO 的检测,通常氮氧传感器产品技术规范规定传感器能测量 3 种不同体积分数 NO 的气源(即 3 个检测点),该检测装置无需检测人员单次检测点完成后重复监测控制,可一次操作完所有检测点检测,检测时间由原来的 9 min 减少为 1 min,检测效率提高 80% 以上。

将配置好的 N₂ 与 NO 混合的标准气源通入氮氧传感器检测装置,进行准确性检测验证。本文中随机选取标准气源中 NO 体积分数分别为 0.96. 6×10⁻⁶、798. 0×10⁻⁶ 作为检测点 1、2、3,并采用分析仪检测

各气源中 NO 体积分数为标准进行对比,分析仪检测结果 b_1 、氮氧传感器检测装置测量结果 b_2 如表 1 所示。准确性验证结果如图 5 所示。

表 1 分析仪及氮氧传感器检测装置测量结果

检测点	$b_1/10^{-6}$	$b_2/10^{-6}$	误差 ^①
1	0.10	0.55	0.45×10^{-6}
2	96.75	99.19	2.52×10^{-2}
3	793.92	785.28	1.08×10^{-2}

①产品技术规范中规定检测点中 NO 体积分数较小时采用绝对误差,其余采用相对误差。

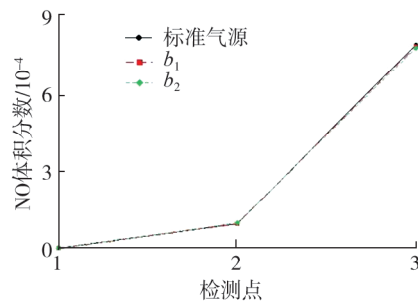


图 5 氮氧传感器准确性验证结果

由表 1 可知:3 个检测点对应的误差分别为 0.45×10^{-6} 、2.50%、1.08%,满足传感器厂家的产品技术条件要求,设计的氮氧传感器性能检测装置测量结果准确。

该装置可实现标准气源中不同体积分数 NO 及 O₂ 的自动检测,解决产业链内氮氧传感器性能参数“测不快,测不全”的问题,但还有以下不足:1)检测结果可能存在偏差。检测过程中由于气体流速、管长、管径等因素,气源到达传感器的时间与分析仪计算的时间不同,标准气源的均匀性未充分验证,传感器采集的数据与分析仪采集的数据可能不完全一致,导致检测结果可能存在偏差。2)系统稳定性不足。检测装置能完成氮氧传感器的检测,但存在卡机、软件系统崩溃等现象,无法满足批量试验的检测需求。

随着对氮氧传感器的深入研究及检测技术的进一步发展,未来氮氧传感器检测装置的发展方向主要是精度高、检测快、功能全、可信度好。

3 结束语

目前氮氧传感器在汽车排放控制、工业废气监测、环境空气质量监测等方面发挥重要作用,氮氧传感器的检测技术在气源制备、自动化检测等方面取得了一定的进步,推动国内氮氧传感器的研发进程,解决产业链内氮氧传感器性能参数“测不准,测不快,测不全”难题,但气源动态制备时气体体积分数的稳定性和实际体积分数的在线检测精度还需提高,应进一步研究,以提高氮氧传感器批量生产质量,满足未来的排放标准;同时,随着材料科学和智能科技的发展,采用新型敏感材料,实现氮氧传感器的智能化控制成为未来发展趋势。

参考文献:

- [1] 王光耀. 国内外排放法规体系现状及我国排放法规分析[J]. 北京汽车, 2022(1):1-3.
- [2] 林伟勋. 氮氧传感器控制系统设计与优化研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2022.
- [3] 程艳, 吴正乾. 氮氧传感器控制系统研究[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(6):150-152.
- [4] 刘坤. 基于模型的国六柴油机 SCR 系统喷射控制策略研究[D]. 太原:太原理工大学, 2023.
- [5] 吴兴研. 柴油机尾气处理尿素泵功能测试台研制[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
- [6] 张愉, 钱璐, 张龙飞, 等. 一种基于氮氧传感器的便携式尾气测试装置[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(6):123-125.
- [7] 梁栋. 车用氮氧传感器控制系统的设计与实现[D]. 重庆:重庆大学, 2022.
- [8] 张明明, 盖泽嘉, 张杰. 国六 b 柴油车氮氧传感器的原理与维修[J]. 汽车维修, 2024(3):35-37.
- [9] 杨凯中, 袁春, 董文, 等. YSZ 基极限电流型 NO_x 传感器研究进展[J]. 电子元件与材料, 2024, 43(1):1-13.
- [10] 汤斌. 一种车载氮氧传感器陶瓷芯片标定检测设备简介[J]. 汽车维修技师, 2024(14):30-32.
- [11] 谈宏亮, 尹亮亮, 宋巍, 等. 一种氮氧化物传感器的检测系统的检测方法:CN102608277B[P]. 2014-05-07.

- [12] 孙文进, 闵永军, 林宇凡, 等. 一种氮氧传感器性能检测装置: CN115015490A[P]. 2022-09-06.
- [13] 高伟, 张振刚, 李继祥, 等. 氮氧传感器性能检测装置设计研究[J]. 中国计量, 2025(3): 117-120.

Design of automatic testing device for NO_x sensor performance

WANG Chuanchuan^{1,2}, ZHANG Zhengang^{1,2*}, WANG Cong^{1,2}, GAO Wei^{1,2},
SUN Hourui^{1,2}, TANG Zhonggang^{1,2}

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

2. Department of National Internal Combustion Engine Industry Measuring and Testing Center, Weifang 261061, China

Abstract: In order to solve the problems of incomplete, slow and inaccurate performance testing NO_x sensor, the structure, working principle and control process of NO_x sensor are analyzed, and combined with the current status of testing technology, an automatic performance testing for NO_x sensor is designed. This device optimizes the dynamic gas mixing method, the automated structure testing module and the data processing module to solve the problems of "slow" and "incomplete" testing, but the accuracy of the detection results and the stability of the system should also be improved.

Keywords: NO_x sensor; testing technology; automatic testing; dynamic gas mixing

(责任编辑: 胡晓燕)

.....

(上接第 90 页)

the highest proportion of domestic heavy-duty trucks, are selected as the research objects. The purchase, use, and maintenance costs of the two types of heavy-duty trucks are thoroughly investigated, and the economic efficiency of the two types of heavy-duty trucks is compared and analyzed. Actual road emission tests on 40 newly produced and in use LNG and diesel heavy-duty trucks are conducted, and original emission tests on 4 typical LNG and diesel engines are carried on. The actual road emissions and engine original emissions of the two heavy-duty trucks are analyzed. The results indicate that, with an annual operating mileage of 200 000 km, the comprehensive economic benefits of LNG heavy-duty trucks in the first year are 122 800 yuan higher than those of diesel heavy-duty trucks. The actual road NO_x emissions of newly produced LNG heavy-duty trucks are lower than those of diesel heavy-duty trucks, but the actual road NO_x emissions of LNG heavy-duty trucks are higher than those of diesel heavy-duty trucks. The actual road CO emissions of LNG heavy-duty trucks are always higher than those of diesel heavy-duty trucks. The original emissions of NO_x , THC, and CO from LNG engines are significantly higher than those from diesel engines, especially the CO emissions are much higher than those from diesel engines.

Keywords: LNG heavy-duty truck; diesel heavy-duty truck; economic analysis; NO_x emission; CO emission

(责任编辑: 臧发业)