DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209180

NO_x 传感器的氧补偿及其标定策略

钱 枫[1],付海亮[1],王明达[2],王 超[1],祝 能[1]
(1. 武汉科技大学汽车与交通工程学院 武汉 430070; 2. 中国环境科学研究院 北京 100029)

摘 要:针对氧化锆基氮氧化物传感器信号受汽车尾气氧含量影响,导致精度不佳问题,提出一种氧补偿算法和标定策略。根据 NO_x 传感器工作原理进行模拟试验,分析不同氧含量下泵电流 I_{P2} 与 NO_x 浓度的关系,得出氧补偿算法,并分析了氧含量与补偿系数的关系,设计出一种实时对 I_{P2} 误差补偿的方案,使 I_{P2} 在氧含量为 0%~20%,NO_x 为 0~3 000×10^{-6} 范围内的误差减小到 23 nA,对应 NO_x 浓度误差降低到 15×10^{-6} 以内。为进一步提高传感器测量的准确度,设计了一套标定方案,并与国外 NO_x 传感器进行对比测试。结果表明,该传感器在发动机瞬态工况下,NO_x 浓度为 0~2 000×10^{-6} 的环境中,测量误差为 0~25×10^{-6},验证了该方案的可行性,满足尾气中 NO_x 浓度的监测要求,为提高氧化锆基 NO_x 传感器精度提供了可靠的解决方法。

关键词: NO_x 传感器;泵电流;氧含量影响;氧补偿;标定策略
中图分类号: TH89 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 530.41

Oxygen compensation of the NO_x sensor and its calibration strategy

Qian Feng[1], Fu Hailiang[1], Wang Mingda[2], Wang Chao[1], Zhu Neng[1]
(*1. School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: An oxygen compensation algorithm and calibration strategy are proposed to address the problem that the zirconia-based NO_x sensor signal is affected by the oxygen content of vehicle exhaust, which may result in poor accuracy. A simulation test is conducted according to the working principle of the NO_x sensor, the relationship between pump current I_{P2} and NO_x concentration at different oxygen content is analyzed. The oxygen compensation algorithm is derived, and the relationship between oxygen content and compensation coefficient is analyzed. A real-time compensation scheme for I_{P2} error is designed. Consequently, the error of I_{P2} in the range of oxygen content from 0%~20% and NO_x from 0~3 000×10^{-6} is reduced to 23 nA, and the Corresponding NO_x concentration error is reduced to within 15×10^{-6}. To further improve the accuracy of the sensor measurement, a calibration scheme is designed and tested in comparison with foreign NO_x sensors. The results show that the sensor has a measurement error of 0~25×10^{-6} in an environment with NO_x concentration of 0~2 000×10^{-6} under transient engine conditions, which verifies the feasibility of the scheme and well meets the requirements for monitoring NO_x concentration in the exhaust gas, and provides a reliable solution for improving the accuracy of zirconia-based NO_x sensors.

Keywords: NO_x sensor; pump current; oxygen content influence; compensation and correction; calibration strategy

0 引 言

近年来,随着国家的快速发展,对化石燃料的使用量越来越大,同时也造成了大量污染气体的产生,其中 NO_x 是主要污染气体之一,NO_x 气体能形成酸雨危害生态环境,也对人体呼吸道产生危害[1],为此我国制定了新的汽车排放法规,严格规范和限制尾气中 NO_x 的排放量。氮氧化物(NO_x)传感器作为汽车电子控制系统的信息源之一,是机动车尾气后处理系统中的重要组成,NO_x 传感器能实时精准检测 NO_x 浓度并反馈给 SCR 系统,使该系统定量喷射尿素以消除尾气中 NO_x[2-3],从而满足大气质量检测和环境保护的要求。

收稿日期:2022-01-11 Received Date: 2022-01-11

目前,国内外对于 NO_x 传感器的研究主要集中在气体敏感材料研究、控制电路设计等方面以提高传感器性能。王远西等[4]研究以 Co_3O_4/Cr_2O_3/YSZ 的复合材料为敏感电极,以 YSZ 为固体电解质构建了阻抗型 NO_x 传感器。采用 XRD、SEM 和 EDX 对传感器进行了表征,并系统研究了传感器在高温下对 NO_x 的敏感特性。周坤等[5]根据 NO_x 传感器探头的特性,采用通用元件设计硬件控制电路,以 STM32F103 作为控制算法的实现平台,设计了基于参考电流控制法的 NO_x 传感器专用控制器。廖晓峰等[6]采用 MC9S08DZ60 作为主芯片 ,使用氮氧传感器专用芯片 ATIC43 作为信号处理模块,设计了一款氮氧传感器控制器硬件电路和软件部分,并进行了初步标定。国外,Thomas 等[7]利用混合电位传感器的 FE 模型以模拟测量中的 NO_x 传感器行为,验证是否必须考虑氮氧化物的平衡,解释了如何对模型的必要参数进行量化。Pal 等[8]将部分和完全稳定的氧化钇与氧化铝结合形成复合电解质 Y_2O_3-ZrO_2-Al_2O_3,以及将锶掺杂的镧系锰氧化物与金混合形成复合传感电极 $La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$-Au,制造了复合氮氧化物传感器,描述了复合材料对氮氧化物传感反应的作用,对 O_2、H_2O、CO、CO_2 和 CH_4 的交叉敏感度,并通过阻抗法操作复合氮氧化物传感器对传感器精度的响应和恢复率进行研究。以上研究实现了 NO_x 传感器基本的检测功能,而实际测试中发现氧含量对传感器的性能有影响但鲜有报道。高建元等[9]通过测试电势型 NO_x 传感器的响应电势和阻抗谱研究了一定范围内的氧含量对传感器输出特性的影响。

为此本文基于氮氧化物传感器原理,分析氧含量影响和模拟实验,并提出一种氧补偿算法和标定策略,通过对 NO_x 传感器实时氧补偿,把氧气的影响降到最低,提高传感器检测准确性,并对传感器进行标定和对比分析,验证所提出的补偿算法和标定策略的可行性。

1 氧化锆基氮氧化物传感器工作原理

电流型氮氧化物传感器[10]利用能斯特与极限电流原理,通过测量 NO_x 在 Pt/Rh 测量电极和泵电压作用下分解产生的 O_2,间接反馈 NO_x 的浓度。基于应用最为广泛的三腔室氧化锆基传感器进行研究,其结构如图 1 所示。

基于尾气的扩散路径,该传感器主要包括 3 个泵单元、3 个能斯特电压感应单元、第一/第二扩散通道、扩散障、第一/第二腔室(主泵腔室,副泵与测量泵腔室)、参考气体腔室、Al_2O_3 绝缘层、加热单元。加热单元提供传感器工作所需温度,公共电极 P+分别与 P_1、P_2 和 M 构成主泵、副泵和测量泵单元,参考电极 Ref 分别与 P_1、P_2 和 M 电极构成相应的主泵、副泵和测量泵感应单元。传感器的工作过程如下。

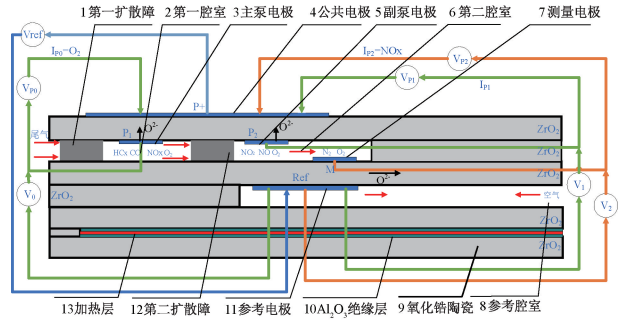

图 1 氮氧化物传感器结构原理图

Fig. 1 Schematic structure of the NO_x sensor

1)NO_x 传感器工作温度需达到 800℃[11],由加热单元使其上升至该温度,待温度稳定后便可进行 NO_x 浓度检测。工作时尾气经第一扩散通道到达主泵腔室,碳氢化物,一氧化碳等在该腔室电极上氧化,同时发生式(1)反应。该反应产生的氧与尾气中的氧在 P_1 电极上电离[12],在 P+与 P_1 之间形成极限电流 I_{P0},并在主泵电压 V_{P0} 作用下,使第一腔室的大部分氧被泵出,同时由 I_{P0} 得到尾气中的氧含量。

2)主泵室气体经第二扩散通道到达第二腔室,氧在副泵电压 V_{P1} 作用下继续分解至接近 0×10^{-6}。参考电极 Ref 与 M 电极形成能斯特电压 V_1,公共电极 P+与 P_2 电极形成极限电流 I_{P1}。当 I_{P1} 稳定在 7 μA 时,第二腔室内 O_2 接近 0×10^{-6}。

3)气体继续扩散至测量电极 M 上,在测量泵电压 V_{P2} 作用下发生式(2)反应,NO 被分解为 N_2 与 O_2。在参考电极 Ref 与 M 电极间形成能斯特电压 V_2,P+与 M 电极间形成极限电流 I_{P2},由于该电流与 NO_x 浓度成线性关系,故该电流可以间接反映 NO_x 浓度[13]。

$$NO_X \longrightarrow NO+O_2 \quad (1)$$

$$NO \longrightarrow N_2+O_2 \quad (2)$$

2 氧含量影响分析与模拟实验

2.1 氧含量影响分析

基于上述原理,主泵室气体经第二扩散障到达第二腔室,O_2 在副泵电压 V_{P1} 作用下继续分解至接近 0,但实际测试中受制备工艺及其泵单元材料性能的影响[14-16],其泵氧能力不能达到理想状态。残余 O_2 没有被完全排出,并扩散到测量泵电极,与该电极上 NO 分解产生的 O_2 共同作用使测量泵极限电流 I_{P2} 偏大。当被测尾气中氧含量增加时,经过主、副泵单元后的残余氧也会增加,影响了传感器输出信号的准确性。为衡量氧含量对传感器信号的影响程度,在模拟尾气中对 NO_x 传感器进行性能测试。

2.2　尾气模拟系统实验

传感器检测所需尾气模拟系统的结构组成如图 2 所示,包括气源、带有质量流量计的混气仪、气路块和气体处理装置。气源包括高纯 N_2、高纯 O_2 及 1% 的 NO 标准气体,并由混气仪按比例配置出不同 NO_x 浓度的被测气体。

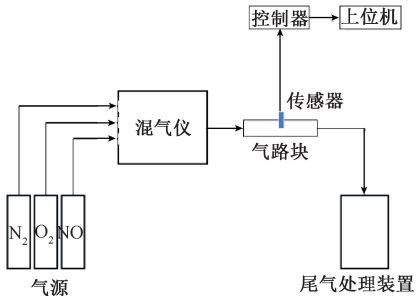

图 2　尾气模拟及测试系统

Fig. 2　Exhaust gas simulation and test system

测试过程如下:1)设置混气仪气体总流量为 3 000 mL/min,以高纯 N_2 为填充气体。2)上位机发送漏点报文,启动加热单元并加热至工作温度。3)设置混气仪氧含量为 0 %,分别测量 NO_x 浓度为 0、500、1 000、1 500、2 000、2 500 和 3 000 $\times10^{-6}$ 下的极限电流值 I_{P2}。4)改变 O_2 分别为 5%、10%、15% 和 20% 后重复步骤 3)。5)绘制不同氧含量下,NO_x 浓度与 I_{P2} 的关系曲线。

3　数据分析及氧补偿方案

根据传感器性能测试结果,绘制不同氧含量下的 NO_x(氮氧化物)浓度与极限电流 I_{P2} 的关系曲线,如图 3 所示。在相同氧含量下,I_{P2} 与尾气中的 NO_x 浓度呈线性关系;在相同 NO_x 浓度下,传感器输出的极限电流 I_{P2} 随着氧含量增加而增加。

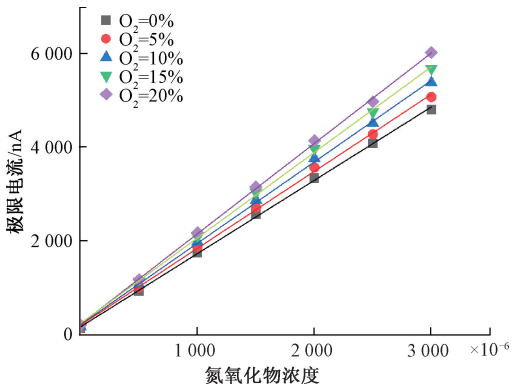

图 3　极限电流与氮氧化物气体浓度关系

Fig. 3　Limit current and nitrogen oxide gas concentration relationship

计算可得氧含量为 0% 与 20% 时不同氮氧化物 NO_x 浓度下极限电流 I_{P2} 的差值,如表 1 所示,NO_x 为 0 和 3 000 $\times10^{-6}$ 时,I_{P2} 差值分别为 66 和 1 158 nA,对应的 NO_x 浓度差分别为 42$\times10^{-6}$ 和 742$\times10^{-6}$。由此可知,尾气中氧含量极大地影响 NO_x 传感器测量结果,从而造成检测误差。

表 1　0% 和 20% 氧含量下的极限电流差值

Table 1　Limit current difference at 0% and 20% oxygen concentration

氮氧化物浓度/($\times10^{-6}$)	极限电流/nA (O_2=0%)	极限电流/nA (O_2=20%)	极限电流差值/nA
0	161	227	66
500	941	1 189	248
1 000	1 722	2 152	430
1 500	2 502	3 114	612
2 000	3 283	4 077	794
2 500	4 063	5 039	976
3 000	4 844	6 002	1 158

为解决上述问题,提出一种补偿算法。通过对图 3 中的数据拟合,得出 5 种氧含量下极限电流 I_{P2} 与模拟尾气中 NO_x 浓度的线性关系表达式如式(3)~(7)所示。

$$Y_1 = 1.561X_1 + 160.7 \tag{3}$$

$$Y_2 = 1.639X_2 + 165.4 \tag{4}$$

$$Y_3 = 1.733X_3 + 184.6 \tag{5}$$

$$Y_4 = 1.822X_4 + 209.4 \tag{6}$$

$$Y_5 = 1.925X_5 + 226.5 \tag{7}$$

线性关系表达式的斜率分别以 K_1、K_2、K_3、K_4 和 K_5 表示,截距分别以 b_1、b_2、b_3、b_4 和 b_5 表示,如表 2 所示。该算法通过不同氧含量下 NO_x 与 I_{P2} 的线性关系式,得出 0% 的氧含量下线性关系式的斜率 K_1 分别与氧含量为 0%、5%、10%、15% 以及 20% 时线性关系式斜率的比值 a_x($a_1=K_1/K_1$、$a_2=K_1/K_2$、$a_3=K_1/K_3$、$a_4=K_1/K_4$、$a_5=K_1/K_5$),利用该比值修正上述 5 种氧含量下 I_{P2} 与 NO_x 浓度的线性关系式($Y_1\times a_1$、$Y_2\times a_2$、$Y_3\times a_3$、$Y_4\times a_4$、$Y_5\times a_5$),该修正可抵消极限电流 Y (I_{P2})因氧含量变化导致的偏差,达到抑制氧影响的目的。

以氧含量为 0% 时的斜率为基准,补偿系数为 a_x($a_x=K_1/K_x$),为验证 a_x 的补偿效果,将补偿系数分别乘以不同氧含量下的极限电流,再重新拟合如图 4 所示。由图可知,经过补偿后,对于同一 NO_x 浓度,传感器极限电流值 I_{P2} 受氧含量变化的影响减小,氧含量为 0% 与 20% 时极限电流 I_{P2} 的差值如表 3 所示。NO_x 浓度为 0 和 3 000$\times10^{-6}$,泵电流 I_{P2} 相差 23 nA,对应的 NO_x 浓度差仅约为 15$\times10^{-6}$。

表 2 极限电流与氮氧化物浓度的关系参数

Table 2 Parameters for the limit current and nitrogen oxide concentration

氧含量/%	极限电流/nA	斜率 K_x	截距 b_x	氮氧化物浓度/($\times10^{-6}$)	补偿 a_x
0	Y_1	1.561	160.7	X_1	1
5	Y_2	1.639	165.4	X_2	0.952
10	Y_3	1.733	184.6	X_3	0.901
15	Y_4	1.822	209.4	X_4	0.857
20	Y_5	1.925	226.5	X_5	0.812

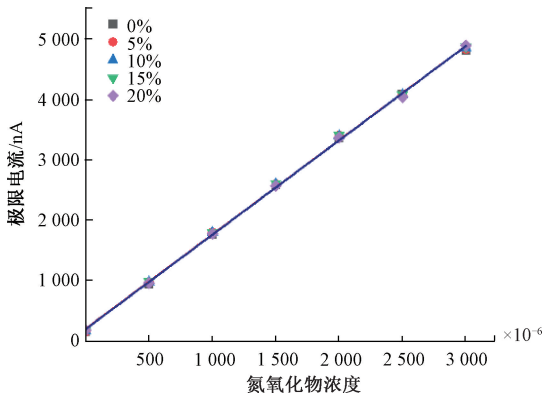

图 4 不同氧含量下极限电流与氮氧化物浓度关系

Fig. 4 Relationship between the limit current and the nitrogen oxide concentration under different O_2 content

表 3 0%和 20%氧含量下极限电流差值

Table 3 The difference between limit current difference at 0% and 20% oxygen concentration

氮氧化物浓度/($\times10^{-6}$)	极限电流/nA (O_2=0%)	极限电流/nA (O_2=20%)	极限电流差值/nA
0	161	184	23
500	941	964	23
1 000	1 722	1 745	23
1 500	2 502	2 525	23
2 000	3 283	3 306	23
2 500	4 063	4 086	23
3 000	4 844	4 867	23

通过以上方法对氧含量 5%、10%、15%以及 20%下的极限电流做修正,达到了很好的补偿效果。实际尾气中的氧含量通常在 0%~20%范围内实时变化,这就需要控制器能够实时计算出每个氧含量所对应的补偿系数 a_x,并用于修正实时变化的极限电流,为此对该补偿策略进行了优化。

将氧补偿系数 a_x 与模拟尾气中的氧含量做线性拟合,如图 5 所示,拟合曲线的表达式如式(8)。由该拟合曲线可知,氧含量与补偿系数呈线性关系。将得到的补偿系数表达式加入到控制器算法中。传感器工作时,实时测量得到尾气中氧含量,将该值带入拟合表达式(8)得到相应的修正系数,并将该系数用于对当前氧含量下极限电流 I_{P2} 的修正,便可实现对传感器测得的 NO_x 浓度进行修正。

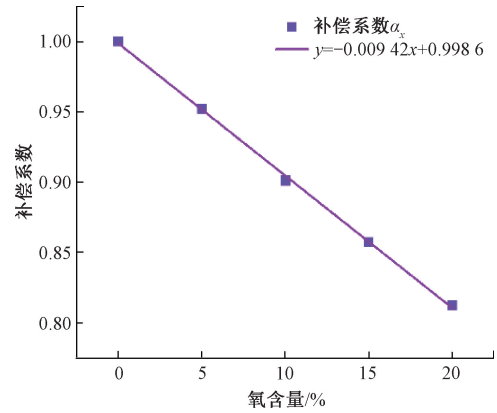

图 5 补偿系数与氧气含量间关系

Fig. 5 Relationship between the compensation coefficient and the oxygen content

$$y = -0.009\,42x + 0.998\,6 \tag{8}$$

为了进一步降低氧含量对氮氧化物传感器检测 NO_x 浓度的影响,并验证氮氧化物传感器加入该方法后在实际测量中的正确性与精确性,提出一种标定策略对传感器进行标定,并在实验室测试验证。

4 传感器标定与测试验证

4.1 传感器标定策略

NO_x 传感器在加入上述补偿算法后,0%与 20%的氧含量下,相同 NO_x 浓度的极限电流 I_{P2} 的平均差值为 23 nA,不在受到氧含量变化的干扰。为了进一步降低氧含量对 NO_x 传感器检测精度影响,并标定 NO_x 浓度与极限电流 I_{P2} 的对应关系,需要对其进行标定。标定策略按顺序进行"氧满程标定氮氧浓度零点,氧零点标定氮氧浓度满程,氧零点标定氮氧中程,氧中程标定",具体如下。

氧满程(20.9% O_2)标定氮氧浓度(0×10^{-6} NO_x)零点。将传感器置于空气中,待极限电流 I_{P0} 值稳定后,1)将此时 I_{P0} 值对应的氧值标为 20.9%,且氧值在(20.9±0.2)%内判定为标定成功;2)在空气中标定氮氧浓度零点,即将此时的 I_{P2} 值对应的 NO_x 浓度值标定为 0×10^{-6},标定后 NO_x 值处于 $0\sim5\times10^{-6}$ 内,判定为标定成功,否则重新标定。

氧零点(0% O_2)标定氮氧满程(1 500×10^{-6} NO_x)和氮氧中程(750×10^{-6} NO_x)。将传感器置于尾气模拟系统的气路块中,通过混气仪调节氧含量为 0%,NO_x 为 1 500 ×10^{-6}。待极限电流 I_{P0} 和 I_{P2} 值稳定后,1)将此时传感器测得氧值标定为 0%,标定完成后,氧值处于 0%~0.2%判定为合格,否则重新标定;2)将传感器测得的 NO_x 值标定为 1 500×10^{-6},标定后 NO_x 值波动范围不超过 10 ×10^{-6} 判定为标定成功,否则重新标定;3)保持模拟尾气中氧含量为 0%,调整 NO_x 浓度为 750 ×10^{-6},待 I_{P2} 值稳定后,将此时测得的 NO_x 值标定为 750 ×10^{-6},且该值稳定后波动范围不超过 10 ×10^{-6} 判定为标定成功,否则重新标定。

氧中程(10% O_2)标定。将模拟尾气中的氧和 NO_x 含量分别调整为 10% 和 750 ×10^{-6},待传感器的 I_{P0} 值稳定后,将此时测得的氧值标定为 10%。标定完成后,氧值为(10±0.2)%判定为标定成功,否则重新标定。

4.2　实验室测试分析

在 NO_x 传感器控制中加入补偿算法并进行标定后,以某国外的氮氧化物传感器为参照,在同一混气仪上进行测试对比。步骤如下:1)NO_x 浓度为 0~3 000 ×10^{-6},氧含量为 0~20%,观察检测的 NO_x 浓度是否随着氧含量变化而改变。2)保持模拟尾气中 NO_x 浓度为 1 000 ×10^{-6},氧含量从 15%降到 5%,观察检测的 NO_x 浓度是否变化;改变 NO_x 浓度为 500 ×10^{-6},重复上述测试。控制器以 20 次/s 输出数字信号到上位机,测试时间 1 600 s,测试结果如图 6、7 所示。由图 6 可知,在氧含量变化过程中,传感器检测的 NO_x 浓度(曲线 1-NO_x)与某国外传感器(曲线 2-NO_x)相比,曲线的一致性较好。但是采样次数超过 15 000 后数据出现明显波动,这是因为混气仪调整氧含量降幅过大,如图 7(箭头标记处),而传感器对环境变化的响应速度较慢,导致传感器内部各个腔室之间气体扩散平衡被打破,使数据出现波动,然而传感器数据可快速恢复稳定。

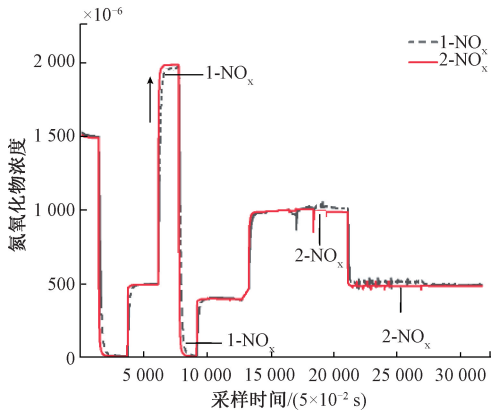

图 6　氮氧化物浓度结果对比

Fig. 6　Comparison of the NO_x concentration results

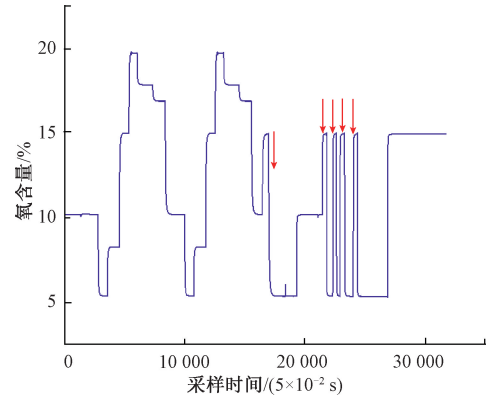

图 7　检测混气仪氧含量

Fig. 7　Detecting the oxygen content of the air mixer

图 8 所示为 NO_x 传感器与某国外传感器测得的 NO_x 浓度差值曲线。可以看出在尾气中 NO_x 浓度变化的瞬间出现了峰值,这是由于某国外传感器响应速度稍快,导致 NO_x 传感器得到的 NO_x 浓度曲线稍微落后,从而产生了较大的瞬间差值,但并不影响最终测得 NO_x 浓度值。

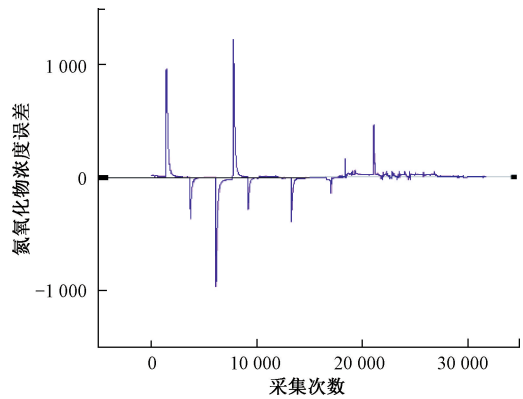

图 8　氮氧化物浓度差值

Fig. 8　Nitrogen oxide concentration error value

NO_x 传感器的响应速度取决于腔室内部平衡的控制参数,该参数可通过大量实验来获得,从而实现对尾气变化的快速响应。除 NO_x 浓度变化瞬间的数据之外,两传感器间的信号差值都分布在 0~15 ×10^{-6},如图 9 所示,验证了该标定策略在模拟尾气测量中的可行性。

综上所述,氮氧化物传感器在加入补偿算法再标定后,大幅度降低了氧含量对 NO_x 传感器检测 NO_x 浓度的影响并在实验室模拟尾气环境中验证验证了氧补偿修正和标定策略的正确性。实际尾气环境复杂且变化剧烈,下文将对 NO_x 传感器在实际尾气中进行测试验证。

4.3　台架测试分析

在济南中国重汽研究总院进行了 NO_x 传感器台架测试,并以某国外氮氧化物传感器的测试结果作为参照。

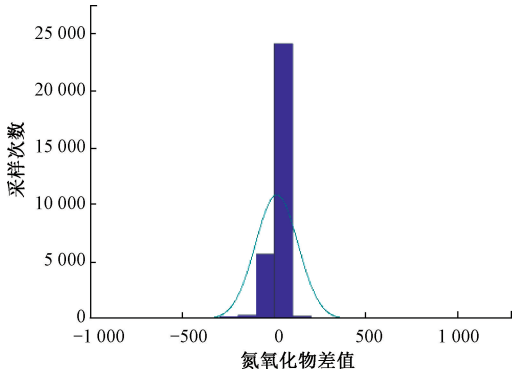

图 9 氮氧化物浓度差值分布

Fig. 9 Distribution of the nitrogen oxide error value

测试台架所用发动机型号为中国重汽 D12.42−50,其排量为 11.596 L,最大扭矩为 1 820 N·m。NO_x 传感器与某国外传感器安装在排气管延长段,位置如图 10 所示,传感器通过螺纹连接在排气管上,为避免外部气体混入影响检测结果,在传感器与排气管连接处缠绕密封铝箔胶带。测试台架发动机设置为瞬态工况,该工况下发动机转矩和角速度随时间迅速变化,其油门开度为 0% ~ 100%,扭矩为 0~1 820 N·m。

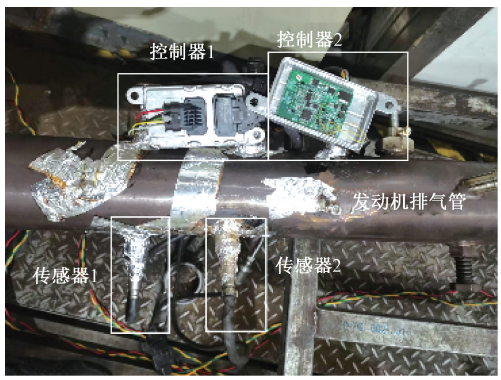

图 10 NO_x 传感器安装位置

Fig. 10 NO_x sensor installation position

传感器的台架测试数据更新较快,数据曲线较密集,为便于分析只取 260 s 内测试数据。由图 11 可知,发动机尾气中氧含量在 5% ~ 20.5% 范围内实时变化,说明发动机处于瞬态工况下运行,为传感器提供了氧含量实时变化的测试环境。

分析图 12 可知,曲线 1 为某国外传感器,曲线 2 为 NO_x 传感器,NO_x 传感器在尾气氧含量连续变化的环境中可以实现实时响应并得到实时 NO_x 浓度,与某国外传感器相比,响应曲线相似度较高。分析两传感器测得数据差值及其分布如图 13 所示,测试差值分布在 $0\sim25\times10^{-6}$。

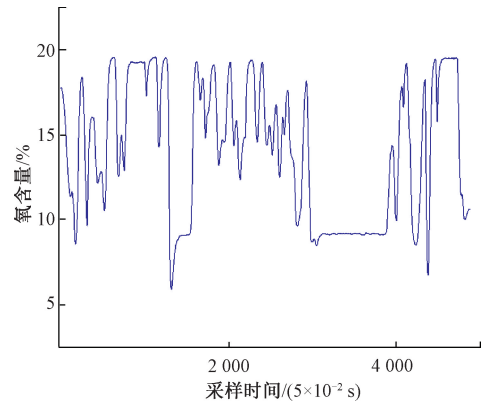

图 11 检测尾气氧含量

Fig. 11 Checking the oxygen content in exhaust gas

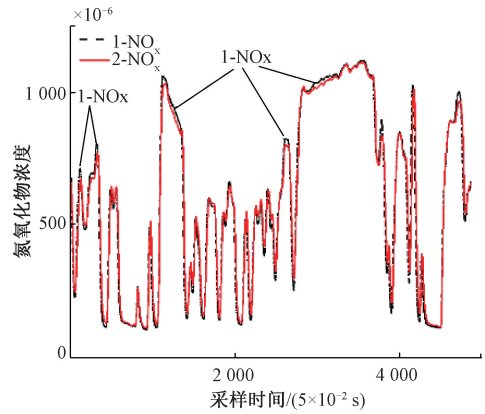

图 12 氮氧化物浓度对比

Fig. 12 Comparison of the nitrogen oxide concentration

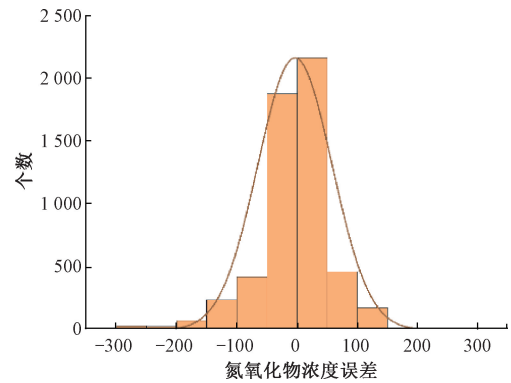

图 13 氮氧化物浓度误差值分布

Fig. 13 Distribution of the nitrogen oxide error value

发动机台架测试结果表明,NO_x 传感器利用氧补偿算法和标定策略可以实现降低氧含量影响,提高传感器检测精度的目的。

5 结　论

通过实验证明了片式氧化锆基传感器在 NO_x 浓度检测时受氧含量影响较严重,为此提出一种氧补偿的修正方法和标定策略。经过对传感器的特性研究得出可以对传感器 NO_x 信号进行实时修正的算法:$a_x = -0.009\ 42x + 0.998\ 6$。为进一步降低受氧含量影响,并提高氮氧化物传感器 NO_x 检测准确性,提出"氧满程标定氮氧浓度零点,氧零点标定氮氧满程,氧零点标定氮氧中程,氧中程标定"的标定策略,经过发动机台架测试,证明了利用氧补偿算法和标定逻辑,可以对 NO_x 传感器在不同氧含量下的检测结果进行有效修正,使得 NO_x 传感器测试稳态差值在 $0\sim15\times10^{-6}$ 以内,瞬态测试差值在 $0\sim25\times10^{-6}$ 以内。针对传感器内部泵单元平衡控制未达到最佳状态而引起的慢响应,将在后续研究中进行控制逻辑优化,以提高其响应速度。

参考文献

[1] SHAW C, BOULIC M, LONGLEY I, et al. The association between indoor and outdoor NO2 levels: A case study in 50 residences in an urban neighbourhood in New Zealand [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 56: 102093.

[2] QIU T, LI X, LEI Y, et al. The prediction of fuel injection quality using a NO_x sensor for the on-board diagnosis of heavy-duty diesel engines with SCR systems [J]. FUEL, 2015, 141(1): 192-199.

[3] 刘传宝, 颜伏伍, 胡杰,等. 柴油机 SCR 后处理系统控制策略[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11):6-11.
LIU CH B, YAN F W, HU J, et al. Control strategy of SCR [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2013, 44 (11): 6-11.

[4] 王远西, 王岭孟, 维薇. 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.
WANG Y X, WANG L M, WEI W. Preparation and performance studies of new solid electrolyte-based nitrogen oxide sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43 (1): 165-171.

[5] 周坤, 陈焕波, 邹杰,等. 基于参考电流控制法的 NO_x 传感器专用控制器[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(2):87-90.
ZHOU K, CHEN H B, ZOU J, et al. NO_x sensor special controller based on reference current control method [J]. Sensors and Microsystems, 2019,38 (2): 87-90.

[6] 缪晓峰, 汤东, 李杰辉, 等. 基于 MC9S08DZ60 单片机的氮氧化物传感器控制器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020,2(2): 92-95.
MIAO X F, TANG D, LI J H, et al. Design of nitrogen oxide sensor controller based on MC9S08DZ60 [J]. Instrument Technology and Sensors, 2020, 2 (2): 92-95.

[7] THOMAS R, JULIA L, GUNTER H, et al. On the influence of the NOx equilibrium reaction on mixed potential sensor signals: A comparison between FE modelling and experimental data [J]. Sensors and Actuators B: Chemical,2019,296: 126627.

[8] PAL N, DUTTA G, KHARASHI K, et al. Investigation of an impedimetric $LaSrMnO_3$-Au/Y_2O_3-ZrO_2-Al_2O_3 composite NO_x sensor [J]. Materials, 2022, 15(3): 1165.

[9] 高建元, 邹杰, 章东兴, 等. 氧气对 NO_x 传感器气敏特性的影响[J]. 传感技术学报, 2010, 23(9): 1215-1219.
GAO J Y, ZOU J, ZHANG D X, et al. Effects of oxygen on the aerodynamic properties of NO_x sensors [J]. Journal of Sensing Technology, 2010, 23 (9): 1215-1219.

[10] TAO L, WANG X, LIN L, et al. Review—Electrochemical NO_x gas sensors based on stabilized zirconia [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164(13):B610-B619.

[11] 赵海燕, 王岭, 陈嘉庚, 等. 汽车尾气用 NOx 传感器[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(1): 8-10,14.
ZHAO H Y, WANG L, CHEN J G, et al. NOx sensor for automobile exhaust gas [J]. Sensors and Microsystems, 2007,26(1): 8-10,14.

[12] 马小玲, 冯小明. 氧化锆基固体电解质研究[J]. 山东陶瓷, 2009, 32(5): 27-30.
MA X L, FENG X M. Study on zirconium oxide-based solid electrolytes [J]. Shandong Ceramics, 2009, 32(5): 27-30.

[13] SZABO N F, DUTTA P K S. A NO_x sensor for feedback control and emissions reduction [J]. SAE Technical Papers, 2002:267-271.

[14] 郑钢,张海航. 改进的氮氧传感器芯片结构设计[J]. 传感器世界,2021(6):6-9.
ZHENG G, ZHANG H H. Improved structure design of nitrogen sensor chip [J]. Sensor World, 2021(6): 6-9.

[15] 吴旭旭. NO_x 传感器零点影响因素分析及陶瓷芯片工艺化[D]. 武汉:武汉科技大学,2021.
WU X X. Analysis of zero point of NO_x sensor and ceramic chip process [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.

[16] 徐晓强, 谢光远, 陈影,等. 车用氧化锆基氮氧化物传感器信号测试及分析[J]. 仪表技术与传感器, 2019, 4(8):13-16.
XU X Q, XIE G Y, CHEN Y, et al. Signal test and analysis of vehicle zirconia-based nitrogen oxide sensor [J]. Instrument Technology and Sensors, 2019, 4 (8): 13-16.

作者简介

钱枫,2005 年于武汉理工大学获得学士学位,2008 年于武汉理工大学获得硕士学位,2017 年于武汉理工大学获得博士学位,现为武汉科技大学副教授,主要研究方向为汽车电子控制技术,汽车排放控制技术、汽车智能网联技术。

E-mail: feng. qian@ wust. edu. cn

Qian Feng received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Wuhan University of Technology in 2005, 2008 and 2017, respectively. He is currently an associate professor at Wuhan University of Science and Technology. His main research interests include automotive electronic control technology, automotive emission control technology, and intelligent network technology.

付海亮,2020 年于武汉华夏理工学院获得学士学位,现为武汉科技大学硕士研究生,主要研究方向为电化学传感技术等。

E-mail: 2192321309@ qq. com

Fu Hailiang received his B. Sc. degree from Wuhan Huaxia University of Technology in 2020. He is currently a master student at Wuhan University of Science and Technology. His main research interests include electrochemical sensing technology.

王明达(通信作者),2006 年于北京联合大学获得学士学位,2015 年于北京理工大学获得工程硕士学位,现为中国环境科学研究院工程师。主要研究方向为机动车环保信息公开以及合规管理。

E-mail: wangmingda@ vecc-mee. org. cn

Wang Mingda (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2006 from Beijing Union University, and received M. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2015. He is now an engineer of the Chinese Academy of Environmental Sciences. His main research direction is in the motor vehicle environmental protection information disclosure and compliance management.