doi：10.11823/j.issn.1674－5795.2021.03.02

NO_x 分析仪转化效率的统计计算方法

詹彬彬[1]，万蕾[2]
（1. 安庆市计量测试所，安徽 安庆 246002；2. 安庆职业技术学院，安徽 安庆 246003）

摘　要：为了解决氮氧化物（NO_x）分析仪转化炉转化效率的检测问题，对现有氮氧化物转化效率的计算模型进行了定量分析，结合计量工作中误差的含义，定义了氮氧化物分析仪检测过程中二氧化氮转化误差和一氧化氮检测误差两个概念；介绍了氮氧化物分析仪的非分光红外法检测原理和转化效率检测的必要性，采用臭氧发生器对氮氧化物分析仪进行转化效率检测，提出了基于二氧化氮转化误差和一氧化氮检测误差的转化效率二阶次计算模型，利用逐步回归原理确定模型中的自变量并进行参数估计。研究结果表明，相比于氮氧化物分析仪内嵌的计算模型和一阶次计算模型，本文提出的二阶次计算模型拟合方程的多重可决系数靠近1的程度平均提升了96.8%和51.5%，残差平方和平均降低了85.1%和31.7%，为提升氮氧化物分析仪的检测准确性提供了技术支撑。

关键词：计量学；氮氧化物分析仪；参数估计；转化效率
中图分类号：TB99　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674－5795(2021)03－0009－07

Statistical Calculation Method of Conversion Efficiency of NO_x Analyzer

ZHAN Binbin[1], WAN Lei[2]
(1. Anqing Metrology and Testing Institute, Anqing 246002, China;
2. Anqing Vocational and Technical College, Anqing 246003, China)

Abstract: In order to solve the problem of checking the conversion efficiency of the conversion furnace of the nitrogen oxide (NO_x) analyzer, a quantitative analysis of the existing calculation model of the conversion efficiency of nitrogen oxides was carried out, and combined with the meaning of errors in the measurement work, two concepts of nitrogen dioxide conversion error and nitric oxide detection error during the detection process of nitrogen oxide analyzer were defined. The principle of non-spectroscopy infrared method detection of nitrogen oxide analyzer and the necessity of conversion efficiency check are introduced. The conversion efficiency of nitrogen oxide analyzer is checked using an ozone generator. A second-order calculation model of conversion efficiency based on the conversion error of nitrogen dioxide and the detection error of nitric oxide is proposed, and the principle of stepwise regression is used to determine the independent variables in the model and estimate the parameters. The research results show that compared with the calculation model embedded in the nitrogen oxide analyzer and the first-order calculation model, the degree of multiple coefficient of determination of the fitting equation close to 1 increased by 96.8% and 51.5% on average, and the residual sum of squares decreased by 85.1% and 31.7% on average, so that the nitrogen oxide analyzer can more accurately and reliably detect the concentration of nitrogen oxide in the exhaust gas of the vehicle.

Key words: metrology; nitrogen oxide analyzer; parameter estimation; conversion efficiency

0　引言

随着经济的高速发展，我国机动车保有量不断增加，据统计，2018年底全国机动车保有量已达3.27亿辆，同比增长5.5%[1-3]。而机动车排放的尾气是造成大气污染的主要原因之一，其中氮氧化物占机动车尾气总排放量的70%，给人民的身体健康带来了很大危害，故控制汽车尾气中氮氧化物的排放量具有重要意义[4-6]。GB 3847－2018《柴油车污染物排放限值及测量方法(自由加速法及加载减速法)》中对氮氧化物分析仪提出了相应要求，即通过转化炉将NO_2转化为NO的转化效率不得低于90%[7]。

机动车排放的尾气中含有大量氮氧化物，即NO和少量的NO_2。采用转化炉对机动车尾气中的氮氧化物进行分析检测的原理为：通过高温催化反应将NO_2还原为NO，最后利用氮氧化物分析仪检测NO的总含量[8]。目前，化学发光检测法和不分光红外检测法是最常用的两种NO气体浓度检测方法。化学发光检测

法具有响应快、灵敏度高、计算模型的线性度好等优势，但是该方法受温度的影响较大，且设备的气路复杂，日常维护成本高[9]。非分光红外法具有传感器寿命长、维护方便、精度等级高、不易受干扰等优点，因此目前大部分氮氧化物分析仪均采用该方法[10]。

影响氮氧化物分析仪转化炉转化效率的因素有很多，高韦韦等人的研究指出催化剂的活性随使用时间的增加而降低，零气和标准气体中的杂质均会使转化效率测试的结果偏低[11]。熊志凯和襄阳等人按照算法公式计算转化效率，他们将臭氧发生器和氮氧化物分析仪组合成多种工作状态，最后计算得出转化炉的转化效率[12-13]。实际工作中，氮氧化物分析仪的工作环境并不稳定，因此难以在复杂工作环境下对其转化效率进行准确判定。本文参考氮氧化物分析仪的工作原理，结合误差的相关概念以及转化效率的定义，构建计算转化效率的二阶次数学模型，通过在实验室环境下采集到的数据，对模型进行参数估计，并对估计结果进行分析，为准确判断氮氧化物分析仪的转化效率提供技术参考。

1　模型构建

1.1　朗伯-比尔定律

气体对特定波长红外光线的吸收遵守朗伯-比尔(Lambert. Beer)定律[14]，反应原理如下

$$I = I_0 e^{-kcl} \tag{1}$$

式中：I 为出射光强度；I_0 为入射光强度；l 为红外光经过的气体反应室的长度；k 为气体的吸收常数；c 为被测气体的浓度。

由式(1)推导出

$$c = -\frac{1}{kl}\ln\left(1-\frac{I_0-I}{I_0}\right) = \frac{1}{kl}\ln\frac{I_0}{I} \tag{2}$$

根据式(2)可知，对于一台确定的分析仪，l 和 k 已确定，对出射光和入射光强度进行检测和分析，即可计算得出 c。

1.2　非分光红外法(NDIR)检测原理

图 1 为 NDIR 的检测原理，红外光源发出 3 ~ 6 μm 的红外光经过一定长度的气体反应室，利用探测器对光强度信号进行测量，再根据朗伯-比尔定律计算得到被测气体的浓度[15]。

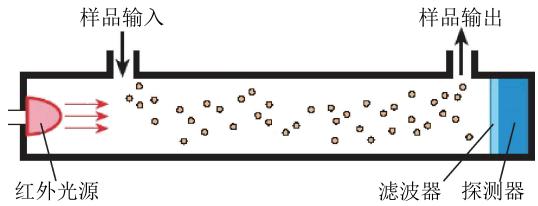

图 1　非分光红外法检测原理

在实际应用中，用于气体检测的探测器有分光型和不分光型两种。分光型探测器具有高精度、可分离出窄波段带单色光等优势，但是也存在分光系统复杂、体积大、不能共用一个气室等缺点[16]。非分光型气体探测器具有体积小、便携性好的优势[17]，在非分光型气体探测器表面增加针对不同波长范围的滤光片，可使不同测量通道共用一个气室，并且不会互相影响[18]。非分光型探测器气室构造相对简单、对红外光源无特殊要求、设计方便，因此被大量使用于氮氧化物分析仪中[19]。

1.3　NO_x 分析仪检测原理

尾气中的氮氧化物气体通过转化炉时，在高温和催化剂的作用下发生氧化还原反应，反应式如式(3)。

$$2\,NO_2 \xrightarrow{\text{催化剂、高温}} 2NO + O_2 \tag{3}$$

氮氧化物分析仪的检测流程如图 2 所示，在流量计的控制下，被测气体以一定流速通过转化炉，在转化炉内发生转化反应后，部分 NO_2 气体转化为 NO，随后与被测气体中原先的 NO 一起进入分析仪的 NO 传感器检测通道中进行检测，最终输出氮氧化物的浓度示值[20]。检测过程中的误差主要来源于两方面：NO_2 转化为 NO 的转化误差以及 NO 的检测误差。

图 2　采用转化炉的氮氧化物分析仪的检测流程

1.4　建模

由式(3)可知，在理想状态下，NO_2 在转化炉中转化为 NO 的转化率应为 100%。但是事实上，转化炉的工作环境复杂，使用频率较高，其中的催化剂往往有所消耗，且随着时间的推移，转化炉的工作稳定性逐渐下降，其反应室的温度也容易出现异常，导致氧化还原反应的效率大大降低[21]。在使用氮氧化物分析仪前，会通入零气和标准气体进行校准，而零气和标准气体中的杂质也会对转化炉的转化结果产生干扰。因此，实际工作条件下 NO_2 的转化误差计算公式为

$$x = \frac{C_1 - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中：x 为 NO_2 的转化误差；C_1 为 NO_2 转化后的气体浓度值；C_0 为 NO_2 转化前的气体浓度值。

分析仪进行 NO 气体浓度检测时，检测结果受到多种因素影响。例如：反应室中的滤光片的作用是接收光信号，随着使用时间的增长，柴油车尾气中的杂质会附着在滤光片上，导致滤光片的透光度逐渐降低，从而影响信号采集准确度，造成检测数据偏低[22]。环境温度变动、校准零点所用气体的准确度以及机动车尾气中的杂质气体均会对 NO 气体浓度的检测结果产生影响[1]。因此，实际工作条件下 NO 的检测误差计算公式为

$$y = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中：y 为 NO 气体浓度的检测误差；D_1 为检测后的 NO 气体浓度值；D_0 为检测前的 NO 气体浓度值。

通常采用最小二乘法拟合的方法计算氮氧化物分析仪转化炉的转化效率，一般来说，拟合方程的次数越高，样本数据的拟合结果越好，但也可能出现“过拟合”现象，即模型对训练数据的拟合结果很好，但对测试数据的拟合结果表现很差，泛化性能低；而如果拟合方程次数过低，则容易导致“欠拟合”现象，即模型过于简单，没有学习到数据的规律，导致训练数据和测试数据的拟合结果都很差[23]。综合考虑实际应用的便捷性和拟合方程的精确性，本文采用二阶次计算模型进行拟合，计算公式如下

$$\theta = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 \quad (6)$$

式中：θ 为转化炉的转化效率。

2　参数确定

2.1　自变量的确定

式(6)中包含的自变量有 x，y，x^2，y^2，如果将这些自变量都代入二阶次的计算模型中，则容易出现“过拟合”现象，也会提高模型的复杂程度，因此本文采用逐步回归的方法确定选取的自变量。

逐步回归的主要思想是综合考虑所有的自变量，按照每个自变量对因变量的贡献大小逐一分析并引入回归方程。在引入了新的自变量之后，回归方程中之前被引入的自变量也有可能失去其对因变量的贡献，需要将其剔除出回归方程。逐步回归中的一步即为剔除自变量的过程或者引入自变量的过程，在每一步的进行过程中均需进行相关检验。

回归模型中剔除自变量后，回归平方和减少的部分被称为该剔除自变量对因变量的偏回归平方和，即该自变量对因变量的贡献。偏回归平方和越大，说明该自变量对因变量的作用越大；偏回归平方和越小，说明该自变量对因变量的作用越小。二次模型确定自变量的算法流程如图 3 所示，主要包含五个步骤：

1)对每个待引入回归方程的自变量进行偏回归平方和计算；

2)选择偏回归平方和值最大的一个自变量，对其进行 F 检验，如果 F 检验结果显著，则确定将该自变量引入回归方程，如果 F 检验结果不显著，则停止引入；

3)剩余变量中，对贡献值最大的变量进行 F 检验，若检验结果显著，则将其引入回归方程；

4)每当有新的自变量引入回归方程后，都要重新计算该回归方程中每个自变量的偏回归平方和，对其中偏回归平方和最小的自变量进行 F 检验，若 F 检验结果显著，则保留该自变量，并继续重复步骤 3；如果 F 检验结果不显著，则将该自变量剔除出回归方程，再对回归方程中剩余的自变量按照偏回归平方和从小到大的次序依次进行 F 检验；

5)在没有满足引入条件的变量后，确定回归方程的自变量。

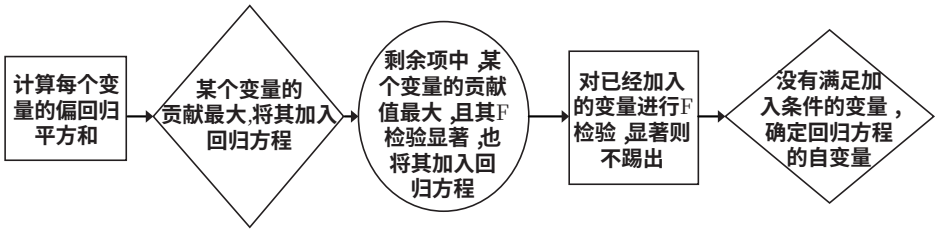

图 3　二次模型确定自变量的算法流程

运用 SPSS 软件对数据进行逐步回归的结果如图 4 所示，根据图 4 可知回归方程中含有的项为 x，y 以及 x^2。

输入/移去的变量[a]		
模型	输入的变量	移去的变量
1	y^2	·
2	x^2	·
3	y	·
4	·	y^2
5	x	·

a. 因变量：转化效率

图 4　SPSS 逐步回归结果

根据逐步回归的结果，可得氮氧化物分析仪转化效率的计算模型为

$$\theta = a + bx + cy + dx^2 \tag{7}$$

式中：a，b，c，d 均为模型参数。

2.2　数据采集

本次实验采用臭氧发生器进行转化率的检测，装置原理如图 5 所示，装置实物图如图 6 所示。

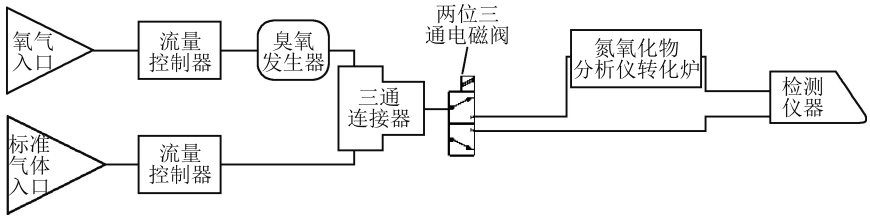

图 5　臭氧发生器法转化率检测装置原理图

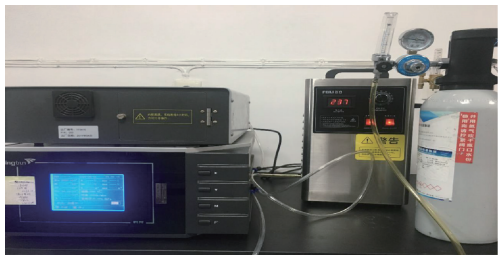

图 6　臭氧发生器法转化率检测装置实物图

具体检测步骤为：

1）按照图 5 连接各设备，接通电源，并预热调零。将 O_2 标准气体和 NO 标准气体的出气管分别连接于装置的相应气体入口处；

2）打开标准气体入口，通入 NO 标准气体，通过操作两位三通电磁阀，使 NO 标准气体进入检测仪，记录此时检测仪中 NO 的示值 D_1；

3）打开氧气入口，通入 O_2 标准气体，不启动臭氧发生器，调节流量控制器，通过控制三通连接器稀释管路中的 NO 气体，使检测仪中显示的 NO 浓度值为步骤 2 中测得 NO 浓度值的 50%，记录此时检测仪中 NO 的示值 E_3；

4）保持步骤 3 的气路状态，开启臭氧发生器，待其产生充足的臭氧，使检测仪中显示的 NO 浓度值为步骤 2 中测得 NO 浓度值的 10%，记录此时检测仪中 NO 的示值 E_4；

5）保持步骤 4 的气路状态，控制两位三通电磁阀，使混合气体进入转化器，并记录此时检测仪中 NO 的示值 E_1；

6）保持步骤 5 的气路状态，关闭臭氧发生器，混合气体继续进入转化器，记录此时检测仪中 NO 的示值 E_2。

7）保持步骤 6 的气路状态，撤去 NO 标准气体，先通过标准气体入口通入 99.999% 的高纯氮气，排出整个气路中的反应气体，再将 NO_2 标准气体接入标准气体入口，使其进入转化器，记录此时检测仪中 NO 的示值 C_1。

8）重复步骤 2 至步骤 7，选取相关厂家生产的型号为 MQW－5102，编号分别为 190379，190130，190143 的氮氧化物分析仪进行实验并采集数据，每台分析仪测量 10 次。

完成检测，记录数据后，按式（8）、式（4）、式（5）分别计算氮氧化物分析仪转化效率，二氧化氮转化误差以及一氧化氮检测误差。

$$\theta = \left(1 + \frac{E_1 - E_2}{E_3 - E_4}\right) \times 100\% \tag{8}$$

标准气体的具体信息如表 1 所示，氮氧化物分析仪的气体检测数据如表 2～表 4 所示。

表 1　标准气体信息

标准气体	气体标称浓度值/（μmol · mol^{-1}）	示值相对扩展不确定度
NO	$D_0 = 300$	$U_{rel} = 1.5\%\ (k = 2)$
NO_2	$C_0 = 300$	$U_{rel} = 2\%\ (k = 2)$

表 2　编号为 190379 的氮氧化物分析仪的气体检测数据　μmol/mol

E_1	E_2	E_3	E_4	D_1	C_1
146	151	150	33	293	276
146	151	150	34	294	277
146	152	151	34	294	274
146	152	153	31	294	275
147	152	150	33	293	276
147	153	150	33	294	274
146	151	153	31	292	275
147	152	150	34	294	277
146	152	150	33	294	274
148	153	150	33	293	276

表 3　编号为 190130 的氮氧化物分析仪的气体检测数据　μmol/mol

E_1	E_2	E_3	E_4	D_1	C_1
141	144	146	25	291	280
140	143	149	21	292	282
141	143	146	25	291	283
142	144	147	22	290	282
141	144	149	21	292	282
141	143	148	25	290	282
140	142	149	24	290	282
141	143	146	25	291	283
142	145	149	21	292	282
142	144	148	24	290	282

表 4　编号为 190114 的氮氧化物分析仪的气体检测数据　μmol/mol

E_1	E_2	E_3	E_4	D_1	C_1
148	153	155	36	300	285
149	154	155	36	300	285
148	153	154	36	300	285
148	154	157	35	302	285
147	153	156	35	303	286
149	154	159	32	300	286
148	153	159	33	301	287
148	153	159	32	300	286
147	153	157	35	302	285
147	153	155	34	303	286

分别计算出每台氮氧化物分析仪的转化效率结果值 θ，NO_2的转化误差值 x，NO 的检测误差值 y，以及二次项 x_1^2，结果如表 5 ~ 表 7 所示。

表 5　编号为 190379 的氮氧化物分析仪的计算结果　%

θ	x	y	x^2
95.726	8.000	2.333	0.640
95.690	7.667	2.000	0.588
94.872	8.667	2.000	0.751
95.082	8.333	2.000	0.694
95.726	8.000	2.333	0.640
94.872	8.667	2.000	0.751
95.902	8.333	2.667	0.694
95.690	7.667	2.000	0.588
94.872	8.667	2.000	0.751
95.726	8.000	2.333	0.640

表 6　编号为 190130 的氮氧化物分析仪的计算结果　%

θ	x	y	x^2
97.521	−6.667	−3.000	0.444
97.656	−6.000	−2.667	0.360
98.347	−5.667	−3.000	0.321
98.400	−6.000	−3.333	0.360
97.656	−6.000	−2.667	0.360
98.374	−6.000	−3.333	0.360
98.400	−6.000	−3.333	0.360
98.347	−5.667	−3.000	0.321
97.656	−6.000	−2.667	0.360
98.387	−6.000	−3.333	0.360

表 7　编号为 190114 的氮氧化物分析仪的计算结果　%

θ	x	y	x^2
95.798	−5.000	0.000	0.250
95.798	−5.000	0.000	0.250
95.763	−5.000	0.000	0.250
95.082	−5.000	0.667	0.250
95.041	−4.667	1.000	0.218
96.063	−4.667	0.000	0.218
96.032	−4.333	0.333	0.188
96.063	−4.667	0.000	0.218
95.082	−5.000	0.667	0.250
95.041	−4.667	1.000	0.218

2.3 参数估计和结果分析

为了确定式(7)中的参数 a，b，c，d 的大小，分别在 95% 的置信水平下对每台氮氧化物分析仪的数据和所有数据进行回归分析，拟合结果见表 8。

表 8 二阶次模型参数估计结果

设备编号	a	b	c	d
190379	1.2443	6.9575	1.2295	37.6593
190130	1.0795	3.5107	1.1010	21.7644
190114	1.0206	1.6728	1.0339	8.3446
所有数据	1.0051	1.0249	1.0385	1.5619

为了验证拟合结果，计算该模型的 SSE 和 R^2。

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (\theta_i - \hat{\theta})^2 \tag{9}$$

$$SST = \sum_{i=1}^{n} (\theta_i - \bar{\theta}_i)^2 \tag{10}$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \tag{11}$$

式中：i 为次数；SSE 为拟合数据和原始数据对应点的误差平方和，其越接近于 0，说明模型选择及拟合效果越好，数据预测越成功；SST 为原始数据和均值之差的平方和；R^2 为表征拟合效果好坏的参数，R^2 的正常取值范围为[0，1]，R^2 越接近 1 表明方程的变量对 y 的解释能力越强，该模型对数据拟合的效果越好。

计算二阶次模型拟合优度结果，如表 9 所示。

表 9 二阶次模型拟合优度结果

设备编号	SSE	R^2
190379	1.548×10^{-7}	0.9991
190130	4.641×10^{-8}	0.9997
190114	1.269×10^{-7}	0.9993
所有数据	2.063×10^{-6}	0.9996

作为比较，构建氮氧化物分析仪转化效率的一阶次计算模型，即令公式(7)中的参数 d 为 0，即

$$\theta_1^* = a_1^* + b_1^* x + c_1^* y \tag{12}$$

对该一阶次模型进行参数估计，结果见表 10。

表 10 一阶次模型参数估计结果

设备编号	a_1^*	b_1^*	c_1^*
190379	0.9959	0.7974	−1.0920
190130	0.9971	0.8264	−1.0950
190114	1.0020	0.8844	−1.0360
所有数据	0.9983	0.8093	−1.0230

计算该一阶次模型的 SSE_1^* 和 R_1^{2*}，计算公式如下

$$SSE_1^* = \sum_{i=1}^{n} (\theta_{1i}^* - \hat{\theta}_1^*)^2 \tag{13}$$

$$SST_1^* = \sum_{i=1}^{n} (\theta_{1i}^* - \bar{\theta}_{1i}^*)^2 \tag{14}$$

$$R_1^{2*} = 1 - \frac{SSE_1^*}{SST_1^*} \tag{15}$$

一阶次模型的拟合优度计算结果见表 11。

表 11 一阶次模型的拟合优度结果

设备编号	SSE_1^*	R_1^{2*}
190379	9.215×10^{-7}	0.9945
190130	5.348×10^{-7}	0.9971
190114	1.416×10^{-7}	0.9992
所有数据	2.573×10^{-6}	0.9995

对比表 9 和表 11 的数据可知，二阶次模型拟合得到的 SSE 比一阶次模型拟合得到的 SSE_1^* 小，且二次模型拟合的 R^2 也比一次模型的 R_1^{2*} 更接近 1。与一阶次模型的拟合结果相比，二阶次模型的残差平方和平均降低了 31.7%，多重可决系数接近 1 的程度平均增长了 51.5%，说明二阶次模型比一阶次模型更加准确。

分析仪出厂时，其内嵌程序中计算模型的参数 a，b，c 一般设置为 1，1 和 −1，即

$$\theta_2 = 1 + x - y \tag{16}$$

计算本次实验中分析仪内嵌模型的 SSE_2 和 R_2^2，公式为

$$SSE_2 = \sum_{i=1}^{n} (\theta_{2i} - \hat{\theta}_1)^2 \tag{17}$$

$$SST_2 = \sum_{i=1}^{n} (\theta_{2i} - \bar{\theta}_{2i})^2 \tag{18}$$

$$R_2^2 = 1 - \frac{SSE_2}{SST_2} \tag{19}$$

氮氧化物分析仪内嵌模型的拟合优度结果见表 12。

表 12 内嵌模型拟合优度

设备编号	SSE_2	R_2^2
190379	3.987×10^{-6}	0.9858
190130	2.325×10^{-5}	0.8861
190114	1.436×10^{-6}	0.9875
所有数据	9.735×10^{-4}	0.9119

对比表 12 和表 9 的数据可知，二阶次模型的拟合优度明显优于内嵌模型的拟合优度。与分析仪的内嵌模型相比，二阶次模型的残差平方和平均减少了 85.1%，多重可决系数接近 1 的程度平均提升了 96.8%，

拟合效果明显更好。

3 总结

结合计量工作中误差的含义以及氮氧化物分析仪自身的工作原理，定义了氮氧化物分析仪检测过程中二氧化氮的转化误差以及一氧化氮的检测误差两个概念，利用臭氧发生器对分析仪的转化效率进行检测，将该检测值作为转化效率的拟合值，提出了转化效率的二阶次计算模型。采用逐步回归的思想，剔除对因变量影响小的自变量，保留对因变量影响大的自变量，在提升拟合精度的基础上简化了模型的复杂程度，通过实验检测得到的相关数据，对二阶次模型进行参数估计。结果表明，与一阶次计算模型相比，二阶次计算模型的拟合方程的拟合优度提升了近 50%，与氮氧化物分析仪的内嵌模型相比，二阶次计算模型的拟合优度更是提升了近一倍，证明本文提出的二阶次模型具有很好的准确性，为氮氧化物分析仪后续的性能研究打下了理论和技术基础。

本文的研究未来仍有进一步完善的空间：由于标准气体价格昂贵，本次实验中标准气体的浓度选择比较单一，后续将采用不同浓度的标准气体进行更多试验，以得到更高准确度的模型；本文采用了同一厂家生产的同一型号氮氧化物分析仪进行试验，后续将考虑选取不同厂家生产的不同型号氮氧化物分析仪进行对比试验；未来将考虑配备更高效的臭氧发生器，研究臭氧浓度以及反应时的流量大小对转化炉转化效率的影响，以期望得到精度更高，拟合优度更好的计算模型。

参 考 文 献

[1] Wang G, Awad O I, Liu S, et al. NO_x emissions prediction based on mutual information and back propagation neural network using correlation quantitative analysis[J]. Energy, 2020, 198: 117286.

[2] Yun S, Xia Y F, Lu B H, et al. Emission inventory and trends of NO_x for China, 2000 – 2020[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & amp; Engineering), 2014, 15(6): 454 – 464.

[3] 赵圳正. 城市机动车尾气污染问题及对策研究[D]. 江苏：苏州大学，2014.

[4] 范武波，陈军辉，钱骏，等. 机动车尾气对人体健康的危害[J]. 中国环境管理，2016，8(1)：110 – 113.

[5] Li T, Xin W, Zhou Q, et al. Swift Acid Rain Sensing by Synergistic Rhizospheric Bioelectrochemical Responses[J]. ACS sensors, 2018, 3(7).

[6] Xu X, Huang G, Liu L, et al. A mitigation simulation method for urban NOx emissions based on input-output analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 249: 119338.

[7] 生态环境部，国家市场监督管理总局. GB 3847 – 2018 柴油车污染物排放限值及测量方法自由加速法及加载减速法[S]. 北京：中国环境科学出版社，2018.

[8] 石伟. 在用机动车尾气检测系统的研究与开发[D]. 浙江：浙江大学，2011.

[9] 刘军，冯艳君，刘中军. 基于化学发光检测法的氮氧化物气体分析仪[J]. 仪表技术与传感器，2008(3)：83 – 84.

[10] 陈红岩，李志彬，曲健，等. 基于不分光红外法的汽车尾气检测传感器的设计[J]. 计算机测量与控制，2015，23(12)：4242 – 4245.

[11] 高韦韦，刘俐，肖勇，等. 影响氮氧化物监测仪钼炉转换效率测试的因素分析[J]. 四川环境，2017，36(5)：114 – 118.

[12] 熊志凯，王凤金，万金宝. NO_x 分析仪转换效率检查方法研究[J]. 机电工程，2012，29(11)：1276 – 1279，1293.

[13] 襄阳，刘茹，李昕，等. 汽车排放分析系统中 NO_x 转换效率的计算分析[J]. 中国机械，2014(10)：147.

[14] 陶波波，徐科军，陈桄红，等. 不分光红外气体传感器建模与非线性校正[J]. 自动化仪表，2014，35(3)：20 – 23，27.

[15] 王婧. 基于振镜调制的 NDIR 机动车尾气检测装置的研制[D]. 天津：天津大学，2018.

[16] 袁博. 基于 NDIR 原理的 CO_2 浓度传感器的制备与研究[D]. 四川：电子科技大学，2019.

[17] 李志彬. 不分光红外法汽车尾气传感器的内流场分析及结构改进[D]. 浙江：中国计量大学，2016.

[18] 张坤，陈锋. 非分光红外车辆尾气传感器系统设计[J]. 传感器与微系统，2016，35(2)：130 – 132.

[19] 张兵. 基于不分光红外法尾气检测装置的研制[D]. 浙江：中国计量学院，2016.

[20] 胡磬遥. 基于车用氮氧化物传感器的工程机械 NO_x 排放因子测量方法研究[J]. 环境科学学报，2019，39(5)：1474 – 1481.

[21] 徐驰，刘娟，居力，等. 非分散红外法应用于在用柴油车 NO_x 排放检测的研究[J]. 中国环境监测，2019，35(3)：28 – 33.

[22] 李辉，张鑫，简家文. 基于非分光红外法的汽车尾气检测装置的设计[J]. 车辆与动力技术，2019(4)：42 – 48.

[23] 谢中华. MATLAB 统计分析与应用：40 个案例分析[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2010.

收稿日期：2020 – 11 – 26；**修回日期**：2021 – 04 – 13

基金项目：国家自然科学基金资助项目(61603003)；国家自然科学基金资助项目(11471093)；安徽省高校优秀拔尖人才项目(gxbjZD26)

引用格式：詹彬彬，万蕾. NO_x 分析仪转化效率的统计计算方法[J]. 计测技术，2021，41(3)：9 – 15.