



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF××××—XXXX

航空发动机气态排放物（NO_x）测量系统校准规范

Calibration Specification for Aircraft Engine Gaseous emissions
(NO_x) measurement systems

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

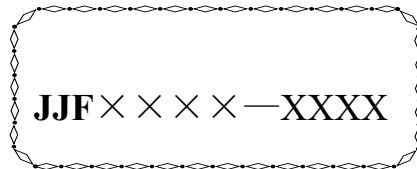
国家市场监督管理总局发布

航空发动机气态排放物(NO_x)

测量系统校准规范

Calibration Specification for Aircraft Engine

Gaseous emissions(NO_x) measurement systems



归口单位： 全国航空专用计量测试技术委员会

主要起草单位： 中国航发商用航空发动机有限责任公司

上海飞机制造有限责任公司

参加起草单位： 中国民用航空适航审定中心

航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司

中国航发哈尔滨东安发动机有限公司

本规范委托航空专用计量测试技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

曹玮 (中国航发商用航空发动机有限责任公司)

吴欣欣 (中国航发商用航空发动机有限责任公司)

杨野 (上海飞机制造有限公司)

参加起草人：

孙李明恒 (中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司)

刘佳鑫 (中国民用航空适航审定中心)

匡锐丹 (航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司)

张世林 (中国航发哈尔滨东安发动机有限公司)

目 录

引 言 I

1 范围 1

2 引用文件 1

3 术语和定义 1

4 概述 2

5 计量特性 2

6 校准条件 3

 6.1 环境条件 3

 6.2 测量标准和其他设备 3

7 校准项目和校准方法 4

 7.1 校准前的准备 4

 7.2 示值误差 5

 7.3 线性度 5

 7.4 重复性 6

 7.6 漂移 7

 7.5 响应时间 7

 7.7 噪声 8

 7.8 干扰 9

 7.9 二氧化氮转换效率 10

8 校准结果表达 12

9 复校时间间隔 12

附录 A 航空发动机气态排放物（NO_x）测量系统校准记录格式 13

附录 B 航空发动机气态排放物（NO_x）测量系统校准证书内页格式 17

附录 C 航空发动机气态排放物（NO_x）测量系统示值误差的测量不确定度评定示例
..... 18

附录 D 二氧化氮转换效率检定方法 22

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑校准规范制订工作的基础性系列规范。

本规范的制定主要参考了 Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation Environment Protection, Volume II—Aircraft Engine Emissions Fifth Edition, July 2023(国际民用航空公约附件 16, 环境保护, 第II卷, 航空器发动机的排放物, 2023 年 7 月第五版)、HJ 76—2017《固定污染源烟气(SO₂ NO_x 颗粒物)排放连续监测系统技术要求及检测方法》、HJ 654—2013《环境空气气态污染物(SO₂、NO₂、O₃、CO)连续自动监测系统技术要求及监测方法》、HB 6117—2022《航空燃气涡轮发动机气态污染物的连续取样及测量方法》等。

本规范为首次发布。

航空发动机气态排放物(NO_x)测量系统校准规范

1 范围

本规范适用于化学发光法原理的航空发动机气态排放物(NO_x)测量系统的校准,其他原理的仪器可参照本规范执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件:

JJG 801—2004 化学发光法氮氧化物分析仪检定规程

GB/T 13966—2013 分析仪器术语

CCAR-34 涡轮发动机飞机燃油排泄和排气排出物规定

凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本规范,凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本规范。

3 术语和定义

JJF 1001—2011 和 GB/T 13966—2013 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 排气排出物 exhaust emissions

由航空器或航空器发动机排气管排放到大气中的物质。

[来源 CCAR-34 第 34.1 条]

3.2 气态排放物 gaseous emissions

航空发动机排气排出物中的气体物质。一般包括碳氢化合物(HC)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)、氮氧化物(NO、NO₂)等。

3.3 零气 zero gas

用于航空发动机气态排放物测量系统指示零点进行调整的气体。

3.4 量程气 span gas

用于航空发动机气态排放物测量系统仪器响应进行调整的气体,接近满量程90%的校准或标定用气体。

3.3 噪声 noise

测量系统在通入零气或量程气时输出信号的随机扰动变化,用合并样本偏差表示。

3.4 干扰 interference

由于待测气体（或蒸气）以外的成分存在，导致仪器响应发生变化，引起测得值或量的变化。

4 概述

航空发动机气态排放物(NO_x)测量系统(以下简称系统)对发动机排气排出物中氮氧化物气体浓度进行测量，一般由采样单元、传输单元、气体检测单元、数据采集与控制单元和显示单元组成。航空发动机气态排放物由采样单元收集后，在传输管路中经过温度、压力、流量等调节，样气中被测组分通过气体检测单元经信号处理转化为电信号，再通过数据采集和控制单元转化为数字信号，由显示单元输出氮氧化物气体浓度。测量系统结构示意图见图 1。

气体检测单元检测原理是化学发光法，一氧化氮与臭氧发生化学反应时，产生激发态的二氧化氮分子，激发态的二氧化氮分子回到基态时发出光，发出的光强与一氧化氮的浓度成正比关系，通过检测发光强度进行一氧化氮浓度检测。其化学反应式为：



式中 $h\nu$ ——发射光。

测量总氮氧化物浓度时，转化器先将二氧化氮气体转化为一氧化氮气体，再测量总的一氧化氮浓度。

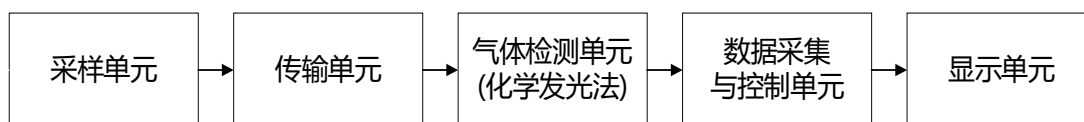


图 1 测量系统结构示意图

5 计量特性

测量系统计量特性如下表 1 所示。

表 1 计量特性

序号	校准项目	技术指标
1	示值误差	不超过 $\pm 2\%$ FS
2	线性度	不超过 $\pm 2\%$ FS
3	重复性	不超过 $\pm 1\%$ FS 或 $\pm 1.0\ \mu\text{mol/mol}$ ，满足其一即可

4	响应时间	不超过 10 s
5	漂移	零点漂移: 在 1h 内, 不超过 $\pm 1\%$ FS 或 $\pm 1.0\ \mu\text{mol/mol}$, 满足其一即可
		量程漂移(稳定性): 在 1h 内, 不超过 $\pm 2\%$ FS 或 $\pm 1.0\ \mu\text{mol/mol}$, 满足其一即可
6	噪声	采样频率 0.5 Hz 及以上, 在 2 h 内, 不超过 $\pm 1\%$ FS 或 $\pm 1\ \mu\text{mol/mol}$, 满足其一即可
7	干扰	干扰(二氧化碳): 不超过读数的 0.05 %/1 %CO ₂ 干扰(水蒸气): 不超过读数的 0.1 %/1 %水蒸气
8	二氧化氮转换效率	不小于 90 %
注: 1. 上述计量特性各项指标不用于合格与否判断, 仅供参考。 2. “FS”为测量系统量程, 优先选用客户使用量程, 用户使用多量程仪器, 应按要求对所使用的每一量程进行校准。 3. 用户选取量程应考虑氮氧化物实际排放浓度, 通常不超过 2500 $\mu\text{mol/mol}$ 。		

6 校准条件

6.1 环境条件

- 环境温度: (5~40) °C;
- 相对湿度: 20%~85%;
- 校准环境通风良好, 无其他干扰气体。

6.2 测量标准和其他设备

6.2.1 气体标准物质

校准采用有证的氮气中一氧化氮气体标准物质, 一氧化氮气体标准物质的相对扩展不确定度不大于 1% (包含因子 $k=2$), 当采用气体稀释装置时, 稀释后标准气体的相对扩展不确定度应满足上述要求。

6.2.2 干扰气体

(1) 二氧化碳气体干扰

根据排放要求, 选取以下任意混合气体校准即可, 气体标准物质相对扩展不确定度不大于 2% ($k=2$):

选取以氮气为平衡气含有 5%二氧化碳气体和量程 30%一氧化氮气体的混合气;

选取以氮气为平衡气含有 5%二氧化碳气体和量程 60%一氧化氮气体的混合气；

选取以氮气为平衡气含有 5%二氧化碳气体和量程 90%一氧化氮气体的混合气。

(2) 水蒸气干扰

根据排放要求，选取以下任意混合气体校准即可，标准气体相对扩展不确定度不大于 2% ($k=2$)：

选取以氮气为平衡气含有 2%水蒸气和量程 30%一氧化氮气体气体的混合气；

选取以氮气为平衡气含有 2%水蒸气和量程 60%一氧化氮气体气体的混合气；

选取以氮气为平衡气含有 2%水蒸气和量程 90%一氧化氮气体气体的混合气；

选取以氮气为平衡气含有 4%水蒸气和量程 30%一氧化氮气体气体的混合气；

选取以氮气为平衡气含有 4%水蒸气和量程 60%一氧化氮气体气体的混合气；

选取以氮气为平衡气含有 4%水蒸气和量程 90%一氧化氮气体气体的混合气。

6.2.3 零气

氮气（纯度不低于 99.999%），零气的杂质应限制在小于以下气体浓度： $C < 1 \mu\text{mol/mol}$ ， $\text{CO} < 1 \mu\text{mol/mol}$ ， $\text{CO}_2 < 100 \mu\text{mol/mol}$ ， $\text{NO}_x < 1 \mu\text{mol/mol}$ 。

6.2.4 电子秒表

最大允许误差： $\pm 0.10 \text{ s/h}$ 。

6.2.5 流量计

测量范围： $(0 \sim 2) \text{ L/min}$ ；

准确度等级不低于 1.0 级。

6.2.6 露点仪

测量范围： $(-40 \sim 60) ^\circ\text{C}$ ；

示值误差不大于 $\pm 0.2 ^\circ\text{C}$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准前的准备

按照说明书的要求对气体检测单元进行预热，气体检测单元预热稳定后，按图 2 所示，将气体标准物质通入航空发动机气态排出物(NO_x)测量系统气体检测单元，保持正常工作状态。

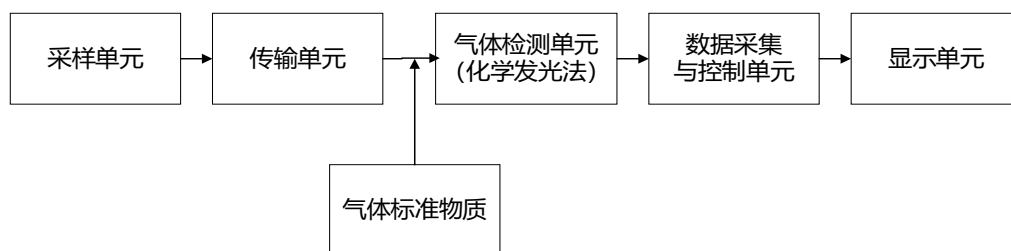


图 2 系统校准流程图

对于每个量程，校准前均应进行零点调整和量程调整。先通入零气，待读数稳定后，将气体检测单元示值调到与零点一致，关闭零气。然后通入量程气，待读数稳定后，将气体检测单元示值调到与标称值一致。校准过程数据采集频率要求不低于每秒 1 次。

7.2 示值误差

首先通入零气，记录零点稳定示值 y_0 ，再依次通入浓度约为该量程 30%，60% 和 90% 的气体标准物质，待示值稳定后，连续采集 30s 时间间隔内的测量值，计算 30s 内平均值。读数完成后再通入零气，将标准气体排空，待零点读数稳定后，重复通入上述气体标准物质。每点重复测量 3 组，取 3 组测量的算术平均值作为各点的示值，按公式(1)计算各浓度点的示值误差。

按公式(1)计算各浓度点的示值误差。

$$\Delta C_i = \frac{\overline{y_i} - R_i}{R_{FS}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$\overline{y_i}$ ——各浓度点 3 次测量的算术平均值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

R_i ——标准气体浓度值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

R_{FS} ——用户所选量程， $\mu\text{mol/mol}$ ；

ΔC_i ——各浓度点的示值误差，%FS。

7.3 线性度

按照最小二乘法计算零点和量程 30%、60% 和 90% 四个点的浓度与测量值拟合曲线。按式(5)分别计算不同浓度值的非线性误差 ΔL_i ，取绝对值最大的值作为测量系统线性度。

测量系统的参比直线采用最小二乘法线性回归直线，线性方程为：

$$Y_i = kR_i + b \quad (2)$$

灵敏度 k 及截距 b 公式如下：

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n R_i \bar{y}_i - \sum_{i=1}^n R_i \sum_{i=1}^n \bar{y}_i}{n \sum_{i=1}^n R_i^2 - (\sum_{i=1}^n R_i)^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}_i \sum_{i=1}^n R_i^2 - \sum_{i=1}^n R_i \sum_{i=1}^n R_i \bar{y}_i}{n \sum_{i=1}^n R_i^2 - (\sum_{i=1}^n R_i)^2} \quad (4)$$

$$\Delta L_i = \frac{\bar{y}_i - Y_i}{R_{FS}} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

Y_i ——第 i 种浓度标准气体点的线性回归值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

k ——线性回归灵敏度；

b ——截距， $\mu\text{mol/mol}$ ；

ΔL_i ——各浓度点的非线性误差，%FS。

7.4 重复性

仪器回零后，通入浓度为量程 60% 的气体标准物质，待示值稳定后，连续采集 30s 时间间隔内的测量值，计算 30s 内平均值。然后通入零气，将标准气体排空，待零点读数稳定后，再通入上述浓度的标准气体。重复测量 6 次，按式(6)和式(7)计算重复性。

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中：

s_r ——重复性（以实验标准偏差表示）， $\mu\text{mol/mol}$ ；

$\bar{C}$ ——测量 n 次的算术平均值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

C_i ——第 i 次测量的示值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

n ——测量次数。

$$s_R = \frac{s_r}{R_{FS}} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

s_R ——重复性（以相对实验标准偏差表示），%FS；

R_{FS} ——用户所选量程， $\mu\text{mol/mol}$ 。

7.6 漂移

测量系统漂移包括零点漂移和稳定性(量程漂移)。

a) 先通入零气，待读数稳定后，连续采集 30s 时间间隔内的测量值，计算 30s 内平均值 Z_0 。

b) 然后通入浓度约为量程 90%的气体标准物质，待读数稳定后，连续采集 30s 时间间隔内的测量值，计算 30s 内平均值 S_0 ，再通入零气，将标准气体排空。

c) 每间隔 10min 通入零气，待读数稳定后，连续采集 30s 时间间隔内的测量值，记录平均响应 Z_i ，再通入浓度约为量程 90%的气体标准物质，待读数稳定后，连续采集 30s 时间间隔内的测量值，记录平均响应 S_i ，重复上述步骤 6 次。按公式(9)、(10)计算零点漂移，取绝对值最大的值作为仪器零点漂移的值。按公式(11)、(12)计算稳定性，取绝对值最大的值作为稳定性的值。

$$\Delta Z_i = (Z_i - Z_0) \quad (9)$$

$$\delta Z_i = \frac{(Z_i - Z_0)}{R_{FS}} \times 100\% \quad (10)$$

式中：

ΔZ_i ——第 i 次测量时零点漂移（绝对误差）， $\mu\text{mol/mol}$ ；

Z_i ——第 i 次通入零点气体的仪器示值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

Z_0 ——校准开始时的零位示值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

δZ_i ——第 i 次测量时零点漂移（相对误差），%FS。

$$\Delta S_i = (S_i - Z_i) - (S_0 - Z_0) \quad (11)$$

$$\delta S_i = \frac{(S_i - Z_i) - (S_0 - Z_0)}{R_{FS}} \times 100\% \quad (12)$$

式中：

ΔS_i ——第 i 次测量时稳定性（绝对误差）， $\mu\text{mol/mol}$ ；

S_i ——第 i 次通入标准气体时的仪器示值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

S_0 ——校准开始时，通入标准气体时的仪器示值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

δS_i ——第 i 次测量时稳定性（相对误差），%FS。

7.5 响应时间

仪器回零后，通入浓度约为量程 60%的气体标准物质，待示值稳定后记录初值 C_0 ，然后通入零气，将标准气体排空，待零点读数稳定后。再通入上述标准气体，并同时启动秒表，待示值升至初值 C_0 的 90%时，停止秒表，记下秒表的读

数 T_i 。重复上述步骤 3 次，取 3 次测量的算术平均值作为响应时间，按式(8)计算响应时间。

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \quad (8)$$

式中：

$\bar{T}$ ——响应时间，s；

T_1, T_2, T_3 ——3 次响应时间测量值，s。

7.7 噪声

7.7.1 零点噪声

通入零气，以不小于 0.5Hz 的采样频率连续采样 1 小时以上，按公式(13)计算 30s 时间段采样数据实验标准偏差，每个测量周期间隔 30s，计算不少于 30 组数据的标准偏差，噪声用标准差的均方根的二倍表示，按公式(14)、(15)计算仪器的零点噪声。

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{ji} - \bar{C}_j)^2}{n-1}} \quad (13)$$

式中：

s_j ——第 j 组，30s 内测量值的实验标准偏差， $\mu\text{mol/mol}$ ；

C_{ji} ——第 j 组，30s 内第 i 次测量的示值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

$\bar{C}_j$ ——30s 内测量值的算术平均值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

n ——30s 时间段的采样次数。

$$s_{0,\text{rms}} = 2 \times \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (s_j)^2}{m}} \quad (14)$$

$$N_0 = \frac{s_{0,\text{rms}}}{R_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (15)$$

式中：

$s_{0,\text{rms}}$ ——零点噪声， $\mu\text{mol/mol}$ ；

m ——通入 1h 零气，记录的组数；

N_0 ——零点噪声，%FS；

7.7.2 量程噪声

通入约为量程 90%的气体标准物质，以不小于 0.5Hz 的采样频率连续采样 1h 以上，按公式(13)计算 30s 时间段采样数据实验标准偏差，每个测量周期间隔

30s, 计算不少于 30 组数据的标准偏差, 噪声用标准差的均方根的二倍表示, 按公式(16)、(17)计算仪器的量程噪声。

$$s_{1,\text{rms}} = 2 \times \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (s_j)^2}{m}} \quad (16)$$

$$N_1 = \frac{s_{1,\text{rms}}}{R_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (17)$$

式中:

$s_{1,\text{rms}}$ —— 量程噪声, $\mu\text{mol/mol}$;

m —— 通入 1 小时量程气体采样记录的组数;

N_1 —— 量程噪声, %FS。

7.8 干扰

7.8.1 二氧化碳气体干扰

系统校准零点和量程点后, 然后通入规定浓度的干扰气体, 待示值稳定后, 连续采集 30s 时间内的测量值, 然后通入零气, 将标准气体排空, 待零点读数稳定后, 再通入上述气体标准物质。按上述操作方法重复测量 3 次, 取算术平均值。按式(18)计算二氧化碳气体干扰。

$$L' = -\frac{\overline{C'_{\text{CO}_2}} - C_{\text{NO}} - \overline{C_0}}{C_{\text{NO}} \times C_{\text{CO}_2}} \times 100\% \quad (18)$$

式中:

L' —— 二氧化碳气体对氮氧化物分析仪干扰误差, % NO/%CO₂;

$\overline{C'_{\text{CO}_2}}$ —— 通入混合气体的仪器三次测量平均值, $\mu\text{mol/mol}$;

C_{NO} —— 通入混合气体中一氧化氮气体浓度, $\mu\text{mol/mol}$ 。

$\overline{C_0}$ —— 通入零气的三次测量平均值, $\mu\text{mol/mol}$;

C_{CO_2} —— 通入混合气体中二氧化碳气体浓度, %。

7.8.2 水蒸气干扰

系统校准零点和量程点后, 按图 3 连接。

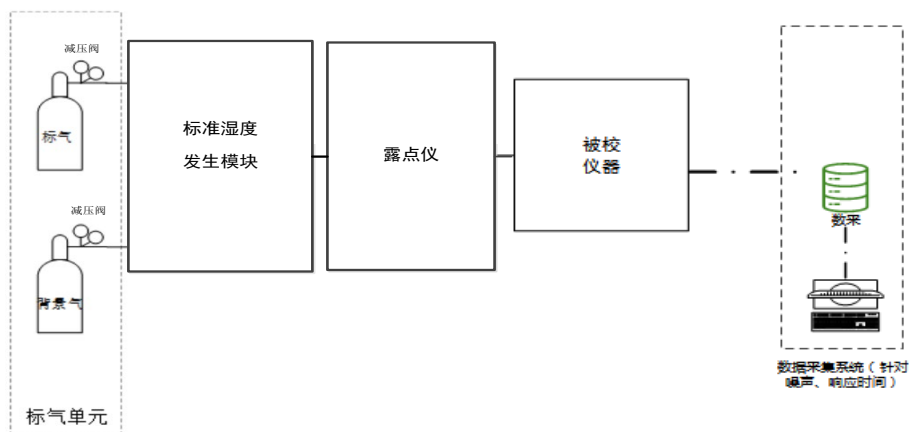


图 3 水蒸气干扰校准连接示意图

仪器经预热稳定后，按照仪器正常工作进样速率，通入零气，待仪器稳定后，连续采集 30s 时间内的测量值。然后将规定浓度(量程 30%、60%或 90%)的干扰气体先经过湿度发生单元，将湿度设置为目标值（设定为 2%或 4%），出气口温度控制在 $(65 \pm 15)^{\circ}\text{C}$ ，经过加热管路后通入分析仪内，待示值稳定后，连续采集 30s 时间内的测量值，并记录露点仪读数。重复上述步骤 3 次。

$$M' = -\frac{\overline{C'_{H_2O}} - C_{NO} - \overline{C_0}}{C_{NO} \times C_{H_2O}} \times 100\% \quad (19)$$

式中：

M' —— 氮氧化物分析仪水蒸气干扰误差，% NO/% H_2O ；

$\overline{C'_{H_2O}}$ —— 通入一氧化氮和水蒸气标准气体的三次测量平均值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

C_{NO} —— 通入标准气体中一氧化氮气体浓度， $\mu\text{mol/mol}$ ；

$\overline{C_0}$ —— 通入零气的三次测量平均值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

C_{H_2O} —— 通入标准气体中水蒸气浓度，%v/v。

7.9 二氧化氮转换效率

用于民用航空领域使用的气态排放物测量系统二氧化氮转换效率校准应参照本节方法执行，其他领域使用的气态排放物测量系统二氧化氮转换效率校准可参考本方法或附录 D 方法执行。

二氧化氮转换效率示意图如图 4。

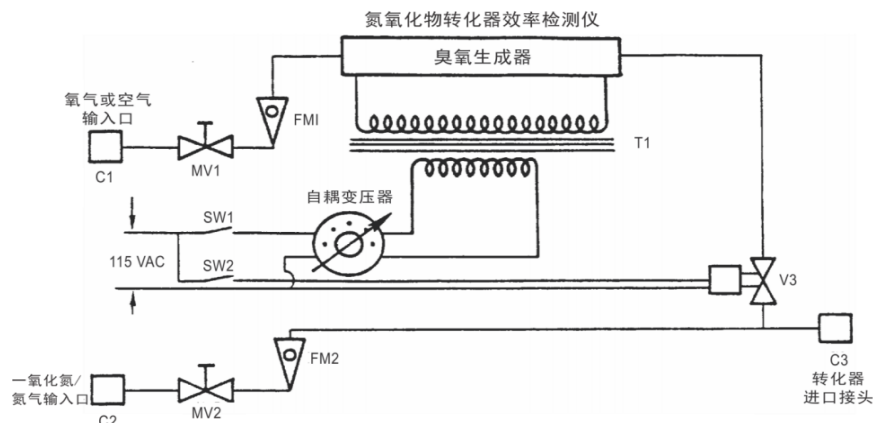


图 4 转换效率测试方法示意图

a) 在“C2”处通入氮中一氧化氮气体标准物质（150~500 ppm），在“C1”处通入氧气或空气，在 C3 处连接氮氧化物分析仪(如果使用浓度较低的一氧化氮，则可以用空气代替氧气)。

b) 关闭效率检测仪的自耦变压器，将氮氧化物分析仪置于“NO”模式并关闭“V3”阀门。打开“MV2”阀门，直至分析仪获得充足的流量和稳定的读数，记下此时的 NO 浓度 b 。对分析仪进行零点和量程校准。

c) 打开 V3 阀门（氧气流量控制电磁阀）并调整“MV1”阀门（氧气输入计量阀），通入氧气，将步骤 b)中的一氧化氮浓度下降约 10%。记下此浓度 c 。

d) 打开臭氧发生器并增加电源电压，使一氧化氮浓度降至步骤 b)读数的 20% 左右，记录此浓度 d ；

e) 将氮氧化物分析仪切换到“NO_x”模式，分析仪指示显示氮氧化物的总浓度，记录此浓度 e ；

f) 关闭臭氧发生器，待分析仪读数稳定，此时一氧化氮和氧气混合物通过分析仪转换器，记录此浓度 f ；

g) 关闭 V3 阀门，确认一氧化氮浓度不小于步骤 b)记录 b 的读数。按式(20)计算二氧化氮转换效率，取最小值作为二氧化氮转换效率。

$$\eta = \frac{e-d}{f-d} \times 100\% \quad (20)$$

式中：

η —— 二氧化氮转换效率。

e —— 通入氧气，打开臭氧发生器时，NO_x 模式下仪器示值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

- d* —— 通入氧气，打开臭氧发生器时，NO 模式下仪器示值， $\mu\text{mol/mol}$ ；
f —— 通入氧气，关闭臭氧发生器时，NO_x 模式下仪器示值， $\mu\text{mol/mol}$ 。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映，校准证书中应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期；
- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- l) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- m) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

送检单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔，建议测量系统的复校时间间隔一般不超过 1 年。在相邻两次校准期间，如果对测量系统的检测数据有怀疑，或氮氧化物分析仪更换主要部件及修理后需对测量系统重新校准。

附录 A 航空发动机气态排放物 (NO_x) 测量系统校准记录格式

校准日期： 年 月 日

共 4 页 第 1 页

原始记录编号			证书编号			
送校单位				收样日期		
证书单位				规格型号		
仪器名称				测量范围		
制造厂				出厂编号		
环境条件	温度	℃	相对湿度	%	大气压	kPa
	地点					
校准使用的主要校准设备						
名称	测量范围	编号	不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号	有效期至	
校准人			核验人			
依据的技术文件：						

1 通电及外观检查：

2 显示分辨力：

3 示值误差

序号	标准气体 浓度 (μmol/mol)	测量值 (μmol/mol)			测量 平均值 (μmol/mol)	绝对误差 (μmol/mol)	示值误差 (%FS)
		1	2	3			
1							
2							
3							
4							
零点示值							

4 线性度

序号	标准气体浓度 (μmol/mol)	测量平均值 (μmol/mol)	截距 (μmol/mol)	灵敏度 (μmol/mol)	线性回归值 (μmol/mol)	非线性误差(%FS)
1						
2						
3						
4						
校准曲线方程						

5 重复性:

标准气体 浓度 ($\mu\text{mol/mol}$)	仪器示值 ($\mu\text{mol/mol}$)						平均值 ($\mu\text{mol/mol}$)	标准偏差 ($\mu\text{mol/mol}$)	重复性 (%FS)
	1	2	3	4	5	6			

6 响应时间

气体标准物质浓度 ($\mu\text{mol/mol}$)	响应时间(s)			
	1	2	3	平均值

7 漂移

时间	0min	10min	20min	30min	40min	50min	60min
	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h
零点示值 ($\mu\text{mol/mol}$)							
量程示值 ($\mu\text{mol/mol}$)							
标准偏差 ($\mu\text{mol/mol}$)							
零点漂移 (%FS)							
标准偏差 ($\mu\text{mol/mol}$)							
量程漂移 (%FS)							

8 噪声

序号	零点噪声			量程噪声		
	测量平均值 (μmol/mol)	实验标准 偏差 (μmol/mol)	噪声 (%FS)	测量平均值 (μmol/mol)	实验标准 偏差 (μmol/mol)	噪声 (%FS)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						

9 干扰

9.1 二氧化碳气体干扰

序号	标准气体浓度		仪器示值, $\mu\text{mol/mol}$				平均值, $\mu\text{mol/mol}$	干扰 误差
	一氧化氮浓度, $\mu\text{mol/mol}$	二氧化碳浓度, %	零点	1	2	3		
1								
2								
3								
序号	标准气体浓度		仪器示值, $\mu\text{mol/mol}$				平均值, $\mu\text{mol/mol}$	干扰 误差
	一氧化氮浓度, $\mu\text{mol/mol}$	水蒸气浓度, %	零点	1	2	3		
1								
2								
3								

9.2 水蒸气干扰

10 二氧化氮转换效率

序号	标准气体浓度, $\mu\text{mol/mol}$	仪器示值, $\mu\text{mol/mol}$						转换效率 /%
		b	c	d	e	f	g	
1								
2								
3								

附录 B 航空发动机气态排放物 (NO_x) 测量系统校准证书内页格式

校准人：

核验人：

外观检查				
标志及标识检查				
分辨力				
参数	标准值	测量示值	示值误差	扩展不确定度 ($k=2$)
示值误差				
参数	标准值	测量示值	线性回归值	非线性误差
线性度				
	校准曲线方程			
零点漂移				
稳定性				
响应时间				
零点噪声				
量程噪声				
干扰 (二氧化碳)				
干扰 (水蒸气)				
二氧化氮 转换效率				

附录 C 航空发动机气态排放物（NO_x）测量系统示值误差的测量不确定度评定示例

C.1 测量方法

本规范依据 JJF 1059.1-2012 进行不确定度评定。示值误差按照本规范 7.4 所述方法进行校准。

环境条件：（1）环境温度：（15~35）℃；（2）相对湿度：20%~85%。

测量标准:氮气中一氧化氮气体标准物质，相对扩展不确定度为 1%（ $k=2$ ）。

被校对象:以测量范围(0~1000)μmol/mol 的航空发动机气态排放物（NO_x）测量系统的校准为例，仪器分辨力为 0.1μmol/mol。

按照本规范对示值误差的要求，仪器运行稳定后，按照说明书的要求调整测量系统的零点和示值。分别通入浓度为 30%，60%，90%气体标准物质，待示值稳定后记录测量系统示值，通入零气待示值回零后，再通入上述气体标准物质。每点重复测量 3 次，取算术平均值，计算示值误差。

C.2 测量模型

按照(C.1)计算每点示值误差。

$$\Delta C_i = \frac{\overline{y_i} - R_i}{R_{FS}} \times 100\% \quad (C.1)$$

式中：

$\overline{y_i}$ ——各浓度点 3 次测量的算术平均值，μmol/mol；

R_i ——标准气体浓度值，μmol/mol；

R_{FS} ——用户所选量程，μmol/mol；

ΔC_i ——各浓度点的示值误差，%FS。

C.3 不确定度传播公式

设

$$\Delta_i = \overline{y_i} - R_i \quad (C.2)$$

则计算出 $u(\Delta_i)$ 即可。

$$u^2(\Delta_i) = c_{\overline{y_i}}^2 u^2(\overline{y_i}) + c_{R_i}^2 u^2(R_i) \quad (C.3)$$

公式(C.3)中， $\overline{y_i}$ 与 R_i 不相关，灵敏系数 $c_{\overline{y_i}} = \partial \Delta_i / \partial \overline{y_i} = 1$ ， $c_{R_i} = \partial \Delta_i / \partial R_i = -1$ ，

故

$$u^2(\Delta_i) = u^2(\overline{y_i}) + u^2(R_i) \quad (\text{C.4})$$

即：

$$u(\Delta_i) = \sqrt{u^2(\overline{y_i}) + u^2(R_i)} \quad (\text{C.5})$$

其中：

$u(R_i)$ 为气体标准物质引入的标准不确定度分量；

$u(\overline{y_i})$ 为测量系统输出值引入的标准不确定度分量。

C.4 不确定度来源

测量系统示值误差校准结果的主要不确定度来源有以下两个：

a) 气体标准物质引入的不确定度。

即空气中氮氧化物气体标准物质定值引入不确定度 $u(R_i)$ 。

b) 测量系统输出值引入的不确定度 $u(\overline{y_i})$ 。

由测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\overline{y_i})$ 或仪器读数分辨力引入的标准不确定度 $u_2(\overline{y_i})$ ，取两者中较大者作为测量系统输出值引入的不确定度。测量重复性引入的不确定度，包括环境条件、人员操作和被校仪器的变动性等各种随机因素引入的不确定度。

C.5 标准不确定度评定

C.5.1 氮氧化物气体标准物质的定值引入的标准不确定度 $u(R_i)$

一氧化氮气体标准物质引入的不确定度，用 B 类标准不确定度评定。由标准物质证书，气体标准物质的相对扩展不确定度 $U_{rel}=1\% (k=2)$ 。则一氧化氮气体标准物质定值引入的标准不确定度为：

$$u(R_i) = \frac{R_i \times 1\%}{2} \quad (\text{C.6})$$

三个标准气体浓度点，由标准物质引入的标准不确定度 $u(R_i)$ 分别为：

表 C.1 标准物质引入的标准不确定度

序号	校准浓度点	$u(R_i)$
1	300.18 $\mu\text{mol/mol}$	1.50 $\mu\text{mol/mol}$

2	600.22 μmol/mol	3.00 μmol/mol
3	900.74 μmol/mol	4.50 μmol/mol

C.5.2 测量系统输出值引入的标准不确定度分量 $u(\bar{y}_i)$

仪器输出值的不确定度分量，取测量重复性的标准偏差和仪器读数分辨力的量化误差的较大者。

C.5.2.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(\bar{y}_i)$

用不确定度 A 类方法评定。将浓度分别为 300.18 μmol/mol、600.22 μmol/mol、900.74 μmol/mol 的气体标准物质通入测量系统，待示值稳定后重复测量 6 次，读取测量值，输入量 $\bar{y}_i$ 引入的标准不确定度 $u_1(\bar{y}_i)$ 以 6 次测量结果的实验标准差表示，测量数据及计算结果见表 C.2。

各校准点分别按式 (C.7) 计算实验标准偏差：

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \quad (\text{C.7})$$

表 C.2 重复性校准数据

标准气浓度值	仪器示值 C_i						平均值 $\bar{C}$	标准偏差
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6		
300.18	302.8	303.2	304.2	304.5	304.7	304.8	304.0	0.84
600.22	606.5	606.5	607.2	608.7	610.1	610.9	608.3	1.89
900.74	899.7	902.5	904.5	906.3	905.7	906.6	904.2	2.67

示值误差实际校准中重复测量了 3 次，测量重复性引入的相对标准不确定度按公式(C.8)计算。

$$u_1(\bar{y}_i) = \frac{S_r}{\sqrt{3}} \quad (\text{C.8})$$

各校准点的实验标准偏差与标准不确定度的计算结果见表 C.3。

表 C.3 各校准点的标准不确定度结果

μmol/mol

校准点	平均值	标准偏差	$u_1(\bar{y}_i)$
300.18	304.0	0.84	0.48
600.22	608.3	1.89	1.09
900.74	904.2	2.67	1.54

C.5.2.2 仪器读数分辨力引入的标准不确定度 $u_2(\bar{y}_i)$

仪器测量氮氧化物时读数的最小值为 $0.1\mu\text{mol/mol}$ ，可假设为均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，由分辨力引入的标准不确定度分量为：

$$u_2(\bar{y}_i) = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} = 2.89 \times 10^{-4} \mu\text{mol/mol} \quad (\text{C.9})$$

由于测量重复性引入的标准不确定度分量大于仪器读数分辨力引入的标准不确定度，测量系统输出值引入的标准不确定度分量取测量重复性引入的标准不确定度分量。

C.5 合成标准不确定度 $u_c(\Delta_i)$

根据公式（C.10），各检定点的标准不确定分量及其合成结果 $u_c(\Delta_i)$ 见表 C.4。

$$u_c(\Delta_i) = \sqrt{c_{y_i}^2 u^2(\bar{y}_i) + c_{R_i}^2 u^2(R_i)} \quad (\text{C.10})$$

表 C.4 不确定度计算结果汇总表

序号	不确定度分量	校准浓度点($\mu\text{mol/mol}$)		
		300.18	600.22	900.74
1	输入量 R_i 引入的标准不确定度 $u(R_i)$	1.50	3.00	4.50
2	输入量 $\bar{y}_i$ 引入的标准不确定度 $u(\bar{y}_i)$	0.48	1.09	1.54
合成标准不确定度 $u_c(\Delta_i)$		1.57	3.19	4.76

C.6 扩展不确定度评定

因主要分量为正态分布，因此置信概率 $P=95\%$ 时，取包含因子 $k=2$ ，由公式（C.1）、公式（C.2），扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c(\Delta_i) \quad (\text{C.11})$$

扩展不确定度结果见表 C.5。

表 C.5 扩展不确定度汇总表

测量系统	航空发动机气态排放物 (NO _x)		
	测量系统		
检测浓度点 R_i (μmol/mol)	300.18	600.22	900.74
扩展不确定度 U ($k=2$) , μmol/mol	3.2	6.4	9.5

由上述分析，航空发动机气态排放物 (NO_x) 测量系统示值误差校准结果的扩展不确定度为：

300.18μmol/mol: $U=3.2\mu\text{mol/mol}$ ($k=2$) ;

600.22μmol/mol: $U=6.4\mu\text{mol/mol}$ ($k=2$) ;

900.74μmol/mol: $U=9.5\mu\text{mol/mol}$ ($k=2$) 。

附录 D 二氧化氮转换效率检定方法

在仪器的中间量程，按校准时的流量，通入含量为该量程 10%的 N0，混合气体，读取仪器显示的 NO₂ 稳定示值。按同样的方法连续三次，取三次的算术平均值为结果，按式(D.1)计算转换效率。

$$\eta = \frac{\bar{C}_{\text{NO}_2}}{C_0} \quad (\text{D.1})$$

η ——转换效率；

$\bar{C}_{\text{NO}_2}$ ——三次测量的 NO₂ 浓度平均值；

C_0 ——NO₂ 混合气体浓度值。