

SCR 脱硝系统
基于 NOx 传感器交叉敏感信号
估算氨逃逸技术方案

发动机/发电设备 SCR 脱硝工程方案
前馈 + 后反馈 + 温度保护 控制架构

版本: V1.0
2026 年 4 月

1 方案概述

在 SCR（选择性催化还原）脱硝系统中，尿素喷射量的精确控制是关键技术难题。喷射量不足会导致脱硝效率不达标，而喷射过量则会造成氨逃逸（NH₃ slip），形成二次污染。精确检测氨逃逸浓度是实现闭环控制的前提。

本方案提出一种基于现有 NOx 传感器交叉敏感信号的氨逃逸估算方法，利用车载/工业 NOx 传感器（如大陆 Continental、博世 Bosch）对 NH₃ 的天然交叉响应特性，通过软件算法从传感器混合信号中提取 NH₃ 分量，实现对氨逃逸的估算监测。

核心优势：无需增加额外传感器硬件，利用已有设备通过算法实现氨逃逸监测，硬件成本为零。

本方案适用于氨逃逸限值要求宽松（>5 ppm）或作为 TDLAS 等精密仪器的备份/粗校验的场景

2 技术原理

2.1 NOx 传感器工作原理

车载/工业 NOx 传感器采用电化学双腔陶瓷元件（YSZ 氧化锆），其结构如下：

第一腔：泵出排气中的 O₂，消除干扰，为第二腔提供无氧环境

第二腔：将所有 NO 转化为 NO₂ 后，分解 NO₂ 并测量产生的 O₂ 量

传感器内部将样气中所有的 NO 预先转化为 NO₂，然后进行总 NOx 测量。因此输出的 ppm 值是以 NO 当量计的总 NOx 浓度。

常见传感器品牌及型号：

品牌	产品系列	典型型号	NH 交叉敏感
大陆 Continental	NSN / 5WK9	5WK9 6675A	存在
博世 Bosch	EGS-NX（第一代）	0 281 006 644	存在，未分离
博世 Bosch	EGS-NX2（第二代）	0 281 006 932	软件可分离
博世 Bosch	EGS-NX3（第三代）	0 281 007 156	面向欧7，高精度

2.2 NH 交叉敏感机制

NOx 传感器第二腔的检测电极对 NH 具有天然的交叉响应特性（cross-sensitivity）。当烟气中存在 NH 时，NH 会在第二腔中发生氧化反应，产生与 NOx 分解类似的氧信号，从而叠加在 NOx 读数上。传感器实际输出的是 NOx 与 NH 的加权混合信号：

$$V_{\text{sensor}} = f([NOx] + k_{\text{NH3}} \times [NH])$$

其中 k_NH3 为 NH 的交叉敏感系数，对于大陆传感器：

$$k_{\text{NH3}} \approx 0.9 \sim 1.0$$

这意味着 1 ppm NH 的干扰约等效于 0.9~1 ppm NOx，两者几乎等权叠加。这一特性正是我们估算氨逃逸的物理基础。

3 算法方案

3.1 方法一：前后双传感器差值法

在 SCR 催化器前后各装一个 NOx 传感器，通过差值估算氨逃逸量。这是最简单、工程上最常用的方法。前置条件：

- SCR 入口安装 NOx 传感器1，测量入口 NOx 浓度
- SCR 出口安装 NOx 传感器2，测量出口混合信号
- 已有 SCR 转化效率模型或查表

算法步骤：

步骤 1：读取入口传感器值

$$[NOx]_{\text{in}} = V_{\text{sensor1}}$$

步骤 2：读取出口传感器值

$$V_{\text{sensor2}} = [NOx]_{\text{out}} + k \times [NH]_{\text{slip}}$$

步骤 3：通过 SCR 效率模型预测出口真实 NOx

$$[NOx]_{\text{out,predict}} = [NOx]_{\text{in}} \times (1 - \eta_{\text{SCR}})$$

步骤 4：求解氨逃逸

$$[NH]_{\text{slip}} \approx (V_{\text{sensor2}} - [NOx]_{\text{out,predict}}) / k_{\text{NH3}}$$

关键依赖：步骤 3 的 SCR 效率模型精度直接决定氨逃逸估算精度。建议通过台架标定或稳态工况数

3.2 方法二：单传感器 + 温度模型分离法

只在 SCR 出口装一个 NOx 传感器，利用传感器内部温度反馈和 k_NH3(T) 曲线进行信号分离，精度更高但标定工作量更大。

核心原理：NOx 传感器的交叉敏感系数 k_NH3 本身是温度的函数，传感器内部有电池温度反馈，可以实时修正。建立方程组：

$$S_{\text{NOx}} = [NOx] + k(T_{\text{cell}}) \times [NH]$$
$$[NOx] = \eta_{\text{SCR}}([NOx]_{\text{in}}, T_{\text{cat}}, t)$$

其中：

- S_NOx—— 传感器输出值（含交叉敏感的混合信号）
- k(T_cell)—— 温度修正后的 NH 交叉敏感系数
- η_SCR—— SCR 催化器转化效率模型（是入口 NOx、催化剂温度、空速的函数）

代入模型后求解 [NH]，即可得到氨逃逸估算值。这是博世 EGS-NX3/Euro7 系统采用的技术路线。

3.3 两种方法对比

对比项	前后双传感器差值法	单传感器 + 温度分离法
传感器数量	2 个（入口 + 出口）	1 个（出口）
估算精度	中等（±2~5 ppm）	较高（±1~3 ppm）
标定工作量	较小（主要标定 η_{SCR} ）	较大（需标定 $k_{NH3}(T)$ 曲线）
动态响应	受 SCR 模型时延影响	温度动态追踪，响应较快
实施难度	★★☆ 简单	★★★★ 较复杂
推荐场景	初期验证、粗校验	精确控制、长期运行

4 控制策略集成

将氨逃逸估算算法集成到现有 SCR 控制策略中，形成完整的闭环控制架构：

4.1 整体控制架构

控制策略采用“前馈 + 后反馈 + 温度保护”三层架构：
前馈控制：基于发动机功率→EF（排放因子）曲线五点插值，计算基础尿素喷射量
后反馈控制：基于出口 NOx 传感器实测值，通过 PID 调节 NSR（氨氮比），维持脱硝率
温度保护：Pt100 测温，防低温结晶（<200° C）和高温烧结（>450° C）

4.2 氨逃逸保护逻辑

在上述三层架构基础上，增加氨逃逸保护环节：
 $[NH]_{est} = (V_{NOxSensor_out} - NOx_predicted) / k(T)$

控制逻辑：
当 $[NH]_{est} > \text{阈值1}$ （建议 5 ppm）：减少尿素喷射量，降低 NSR
当 $[NH]_{est} > \text{阈值2}$ （建议 8 ppm）：触发报警，强制减少喷射或暂停喷射
当 $[NH]_{est} < 1 \text{ ppm}$ ：判断为氨不足，可适当提高 NSR

4.3 PLC 控制链路

信号链路	信号来源	PLC 控制输出
前馈	发动机功率信号（模拟/通讯）	基础尿素喷射量计算
NOx 反馈	CAN J1939 → 威纶通 CMT3105X	PID 调节 NSR
NH 估算	算法计算值（软件）	氨逃逸保护逻辑
温度保护	Pt100 测温（4-20mA）	喷射允许/禁止判断
尿素喷射	32.5% 尿素溶液	4-20mA 控制尿素泵

5 k_{NH3} 标定方法

5.1 标定原理

k_{NH3} 是本方案的核心参数，需要通过实测标定获得。标定的目标是确定在不同传感器温度下，NH 对 NOx 读数的干扰系数。

5.2 标定步骤

第一步：零点标定（确定基线）
停止喷射尿素，等待系统稳定（此时 [NH] = 0）
记录传感器输出值 V_base，此时读数 = 真实 NOx
在多个工况点重复，建立 V_base 与真实 NOx 的对应关系
第二步：氨氮注入标定（确定 k 值）
开始喷射尿素，调整喷射量使系统产生已知氨逃逸
同时用标准仪器（如 TDLAS）测量真实 NH 浓度
记录传感器输出值 V_NH3
计算： $k = (V_{NH3} - V_{base}) / [NH]_{真实}$
第三步：多温度点标定（建立 k(T) 曲线）
在不同催化剂温度下（建议 200° C、250° C、300° C、350° C、400° C）重复步骤二
拟合 k(T) 曲线，存入 PLC 或控制器查表

5.3 标定工期估算

标定内容	工期估算	备注
基线标定	0.5 天	停氫，稳态工况采集
单温度点 k 值标定	0.5 天	需要 TDLAS 或其他标准仪器配合
多温度点曲线标定（5 点）	1~1.5 天	包含变温和稳定时间
数据整理和曲线拟合	0.5 天	
合计	2~3 天	基础标定，复杂工况可能更长

6 精度与局限性

6.1 估算精度

项目	说明
估算精度	通常 ±2~5 ppm，不适合 <3 ppm 的严格控制
动态响应延迟	依赖模型收敛时间，动态工况（加减速、变负荷）下误差增大
标定工作量	需实测标定 k_NH3(T) 曲线，每批次传感器有差异
长期漂移	传感器老化会导致 k 值漂移，建议每 6~12 个月重新标定

6.2 适用场景判断

适用场景	不适用场景
氨逃逸限值宽松（>5 ppm）	严格环保排放要求（<3 ppm）
稳态工况为主的发电设备	频繁变负荷的动态工况
TDLAS 备份/粗校验	独立的永久性 NH 监测
预算有限，先跑起来验证	精度要求高、需要环保审验报告

7 实施建议

7.1 推荐实施路径

建议分两阶段实施，降低风险：
第一阶段：验证期（前后双传感器差值法）
在 SCR 入口和出口各装一个 NOx 传感器

采用方法一（差值法），标定基础参数
在稳态工况下观察 NH 估算值的可信度
若稳态误差可控（±3 ppm 内），则可直接落地使用
第二阶段：优化期（如需要更高精度）
引入方法二（温度模型分离法）
完成多温度点 k(T) 曲线标定
或者增加 TDLAS 激光分析仪作为精确参考标准

7.2 注意事项

传感器寿命管理：建议每 6~12 个月重新标定 k_NH3 值，传感器老化会导致交叉敏感系数漂移
传感器选型：推荐采用大陆 5WK9 系列或博世 EGS-NX2 以上，确保 CAN J1939 通信兼容性
氨逃逸控制目标：国六标准一般要求 SCR 出口 NH < 3 ppm，但作为内控参数可适当放宽至 5 ppm
数据记录：建议同步记录前馈功率、NOx 浓度、尿素喷射量、温度等全链路数据，便于后期模型优化

8 备选方案对比：TDLAS 激光分析仪

如果后期需要更高精度的氨逃逸检测，可考虑增加 TDLAS 激光分析仪。以下为两种方案的对比：

对比项	NOx 传感器估算方案	TDLAS 激光分析仪
硬件成本	≈ 0 元（利用现有传感器）	国产 8~20 万元
检测精度	±2~5 ppm	±1% F.S.（0~10 ppm）
响应时间	秒级（受模型收敛限制）	<30 s
维护复杂度	低（定期标定即可）	中（伴热管路维护）
环保审验认可	不可以（非独立检测手段）	可以（含 CCEP 认证产品）
推荐场景	先期验证、内控监测	精确闭环控制、环保审验

推荐的渐进式实施路径：先用本方案（零成本）跑起来，观察稳态工况下的可信度，再决定是否需要升级到 TDLAS。如果稳态误差在 ±3 ppm 内，可以长期使用本方案；如果动态工况下估算失控，则升级到 TDLAS 。