

船舶柴油机 SCR 控制系统研究

罗 啸, 刘 贇

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 采用高性能标准化模块, 基于选择性催化还原原理及经典控制理论, 研制了 SCR 控制系统, 可选用不同控制策略实现对尿素喷射过程的自动控制。对柴油机尾气脱硝处理效果试验验证表明: SCR 控制系统对尾气中氮氧化物有良好的减排效果, 完全满足 IMO 排放法规要求。

关键词: 柴油机; 尾气; SCR 系统; 控制技术

中图分类号: TK423.4⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)01-0022-04

Research on Marine Diesel Engine SCR Control System

Luo Xiao, Liu Yun

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Adopting high-performance standardization module, SCR system was developed based on principle of selective catalytic reduction and the classical control theory. Varied control strategies could be chosen to realize automatic control of the urea injection process. Test on the denitrification treatment of diesel engine's exhaust gas shows that SCR control system has good effect on reducing NO_x exhaust and completely meets with IMO regulations.

Keywords: engine; exhaust; SCR system; control technology

0 引言

近年来, 随着人类节能环保意识的不断增强和船舶运输业的飞速发展, 国际海事组织(IMO)对船舶尾气排放标准日趋严格。IMO 在 MARPOL 附则 VI 修正案中要求, 2016 年 1 月 1 日及以后建造的船舶, 在驶入排放控制区时, 其尾气中氮氧化物排放要符合 Tier III 标准, 即船舶尾气的氮氧化物排放比 Tier I 标准降低 80% 左右。由于目前船舶行业主要使用柴油机作为主动力, 船舶尾气的氮氧化物排放研究主要针对船舶柴油机进行。

研究成果表明, 有效控制柴油机氮氧化物排放, 可从改善柴油机机内燃烧过程和柴油机机外排气后处理两个方面入手。排气后处理 SCR (Selective Catalytic Reduction) 技术不需对柴油机本体进行改造, 且对燃油的品质要求相对较低, 因此, 国

内外研发机构均对 SCR 技术的研究非常重视。

SCR 是一种机外净化系统, 其基本原理是在催化剂作用下, 利用氨气作为还原剂, 把柴油机尾气中的氮氧化物转化为氮气和水蒸气。本文主要研究 SCR 控制系统, 该系统采用基于选择性催化还原原理的控制方法, 通过对尿素喷射量的控制, 实现对柴油机尾气中氮氧化物转化的控制。

试验针对确定尿素喷射量的不同方法, 采用了五种控制策略对柴油机尾气中氮氧化物转化进行自动控制。试验中通过参数调整, 最终使得柴油机尾气脱硝获得了满意的控制效果。

1 SCR 控制系统的总体设计

1.1 SCR 控制系统组成

SCR 控制系统示意图如图 1 所示。整个系统分为控制部分和执行部分。

收稿日期: 2012-11-07; 修回日期: 2012-09-21

作者简介: 罗啸(1986-), 男, 硕士, 主要研究方向为 SCR 装置控制方法及工程应用, E-mail: 243219055@qq.com。

控制部分包括数据采集模块和控制单元。控制单元采用双 CAN 总线单网关的通讯方式实现数据通讯。数据采集模块采集现场信息经集控室延伸到显示屏上显示。控制单元实现对尾气中氮氧化物排放的控制。

数据采集模块选用了自主研发的机舱自动化标准模块, 包括两个模拟量输出模块和一个数字量输入模块, 采用并联的方式挂在网关的一路 CAN 总线上。数据采集模块采用了当前最先进的嵌入式技术、低功耗技术、现场总线技术和自生成技术, 可对现场的开关量信号进行采集和处理, 可广泛应用于各型船舶自动化系统中。模块采用 DC24V 供电, 支持双路高速冗余 CAN 总线通讯, 可在船舶各种恶劣环境下使用。

执行部分包括尿素制备单元、给料单元、反应器单元和喷射装置。其中尿素制备单元将调配质量浓度为 32.5% 的尿素溶液, 在压缩空气的助推下将尿素溶液喷射到柴油机排气管道内, 与其中的尾气混合后进入反应器单元, 在催化剂的作用下, 经过一系列化学反应后, 降低 NO_x 含量, 实现尾气净化处理。

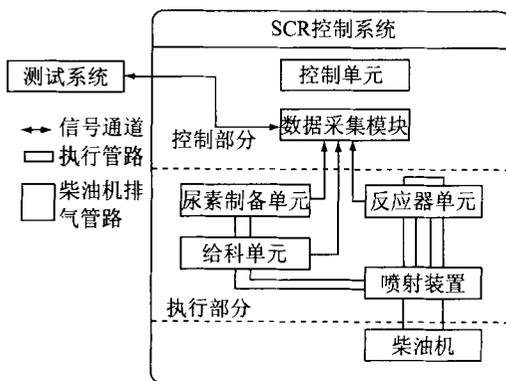


图 1 SCR 控制系统示意图

为规避实机试验中由于参数设置不当或控制策略不当可能造成的控制系统不稳定现象, 在前期尿素喷射试验的调试过程, 通过并行方式引入测试系统, 向 SCR 控制系统模拟发送柴油机各传感器的信息和电磁阀的启/停状态, 分析 SCR 控制系统的动态响应, 待测试正常后进入到实机控制、测试环节。

1.2 系统主要功能

通过集控室延伸显示屏进行操作, SCR 控制系统主要功能如下:

- (1) 切换手动/自动旋钮, 验证所有开关、调速、电磁阀进行无扰动转换;
- (2) 控制各电磁阀的启/停状态, 考核执行部

分各关键部件(泵、喷嘴、变频器、反应器等)的性能;

(3) 选择五种不同控制模式(开环 MAP 图、开环传感器、闭环前馈+串级 MAP 图、闭环前馈+串级传感器、闭环串级), 验证控制系统对尾气中氮氧化物排放的控制效果。

(4) 通过在集控室延伸显示屏显示测试系统发送的模拟数值, 验证系统内部通讯是否正常。

2 控制方法研究

本文采用的控制方法建立在选择性催化还原原理的基础上。采用中国船级社根据 SCR 技术理论推导的尿素喷射量公式, 如下所述。

尿素喷射量(即氨水的体积流量)

$$V_{\text{NH}_3} = \frac{m_{\text{NH}_3}}{\rho_{\text{NH}_3}} \quad (1)$$

式中: V_{NH_3} 为氨水的体积流量, ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); m_{NH_3} 为氨水质量流量, ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); ρ_{NH_3} 为氨水密度, 本研究氨水密度约为 $900 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$ 。

$$m_{\text{NH}_3} = m_{\text{NO}_x} \left(\frac{17X}{64} \right) \quad (2)$$

式中: X 为基本氨氮摩尔比, 本文取 $0.6 \sim 1.1$; m_{NO_x} 为氮氧化物质量流量, ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)。

$$m_{\text{NO}_x} = m C_{\text{NO}_x} \quad (3)$$

式中: m 为柴油机总排气的质量流量, ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$); C_{NO_x} 为氮氧化物浓度, $\times 10^{-6}$ 。

由以上公式可知, 计算尿素喷射量的主要依据是排气质量流量、 NO_x 浓度, 这两个重要参数的确定需要在试验中安装流速传感器和 NO_x 浓度传感器, 故这两个传感器的精度将在很大程度上影响最终尿素的喷射量。由于目前传感器技术的限制, 试验中传感器的精度可能达不到要求。有鉴于此, 本研究根据柴油机不同工况计算出排气质量流量和 NO_x 浓度的理论值, 绘制 MAP 图, 以此作为柴油机后排放控制 NO_x 浓度的依据, 以消除传感器精度不足带来的影响。采用 MAP 图模式将不需参照传感器, 并确保在此控制模式下尿素喷射量在正常范围内。

2.1 控制策略研究

如上所述, 由于存在流量传感器、 NO_x 浓度传感器的影响, 在试验中, 根据控制信号采集模式的不同, 采用了五种控制模式: 开环 MAP 图模式(无 NO_x 浓度传感器, 有流速传感器)、开环传感器模式(有 NO_x 浓度传感器, 有流速传感器), 闭环前馈+

串级 MAP 图控制模式(无 NO_x 浓度传感器, 有流速传感器)、闭环前馈+串级传感器控制模式(有 NO_x 浓度传感器, 有流速传感器)、闭环串级控制模式

(有 NO_x 浓度传感器, 无流速传感器)。

试验中主要采用了闭环串级+前馈的控制模式(带有流速传感器), 其控制框图如图 2 所示。

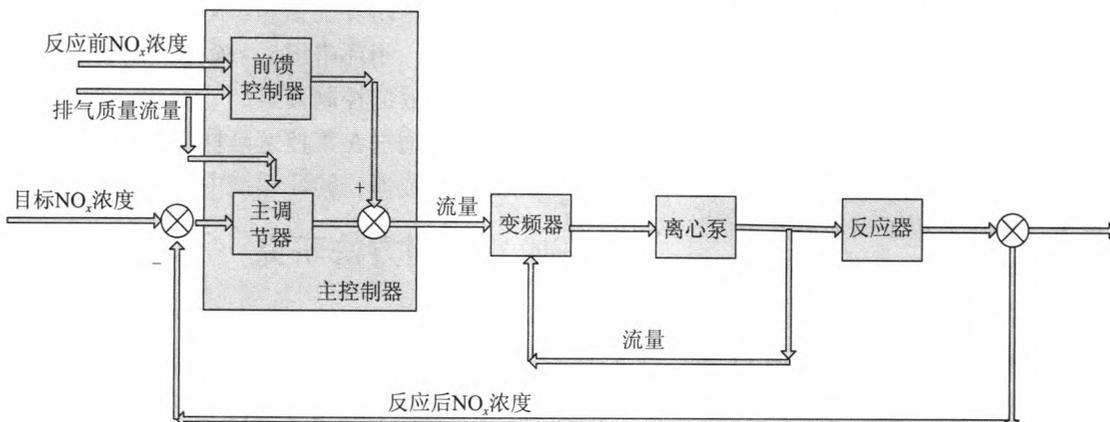


图 2 闭环串级+前馈控制框图

主调节实现尾气中 NO_x 浓度的控制, 副调节通过变频器实现尿素水溶液流量的 PID 闭环控制。前馈控制通过排气质量流量和反应前 NO_x 浓度计算基本喷射尿素溶液量, 主调节器输出修正喷射量, 两者相加作为副调节的输入。

设目标 NO_x 浓度为 R , 反应后 NO_x 浓度为 Y , $R - Y = e$, 位置式 PID 公式如下:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)]$$

式中: $u(k)$ 为浓度偏差; $e(k)$ 为第 k 次采样的浓度偏差; 采样值 $k = 20$; K_p 、 K_I 、 K_D 为 PID 参数, 经试验测试, 当 $K_p = 0.15$ 、 $K_I = 0.8$ 、 $K_D = 0$ 时, 变频器 PID 调节的性能指标可以较好地符合试验喷射要求。

$$(u(k) + 1)X = X^+ \quad (5)$$

式中: X^+ 为氨氮摩尔比修正值; X 为基本氨氮摩尔比, 取 0.6 ~ 1.1。

2.2 MAP 图研究

当传感器精度不能满足要求时, 采用绘制排气质量流量 MAP 图和 NO_x 浓度 MAP 图的方式替代传感器。在不同功率时, 通过线性插值算法计算排气质量流量和反应前的 NO_x 浓度值。其计算公式如下:

$$\text{排气质量流量 } m = 3000 \times P\% \times X \quad (6)$$

式中: m 为排气质量流量, ($g \cdot s^{-1}$); $P\%$ 为功率百分比; X 为不同功率的 NO_x 浓度加权系数, 不同工况下 X 值见表 1。

表 1 不同工况下 NO_x 浓度加权系数 X 数值

转速	100%	100%	100%	100%
功率	100%	75%	50%	25%
加权系数	0.92	0.95	1.04	1.06

反应前 NO_x 浓度

$$C_{NO_x} = 1\ 500 \times P\% \times Y \quad (7)$$

其中: C_{NO_x} 为反应前氮氧化物 (NO_x) 浓度, $\times 10^{-6}$; $P\%$ 为功率百分比, Y 为不同功率的 NO_x 浓度加权系数。

表 2 不同工况下 NO_x 浓度加权系数 Y 数值

转速	100%	100%	100%	100%
功率	100%	75%	50%	25%
加权系数	0.9	0.896	1.14	1.22

根据以上公式, 测试系统模拟柴油机不同工况的功率值, 绘制对应的排气质量流量 MAP 图和 NO_x 浓度 MAP 图, 并通过以太网上传至 SCR 系统网关, 试验中将根据 MAP 图模式给出的排气质量流量和 NO_x 浓度计算尿素喷射量。

3 软件设计

软件设计选用基于 LabVIEW 的图形语言进行编程, 选用这种图形语言不仅逻辑简单易于调试, 而且开发周期相对较短。软件设计由主流程和测点通讯控制、变频器控制、执行单元电磁阀控制等子流程组成。本软件还可以实时的记录所有测点的数据并将数据绘制成曲线, 以方便后续调试。软件的主流程图如图 3 所示。

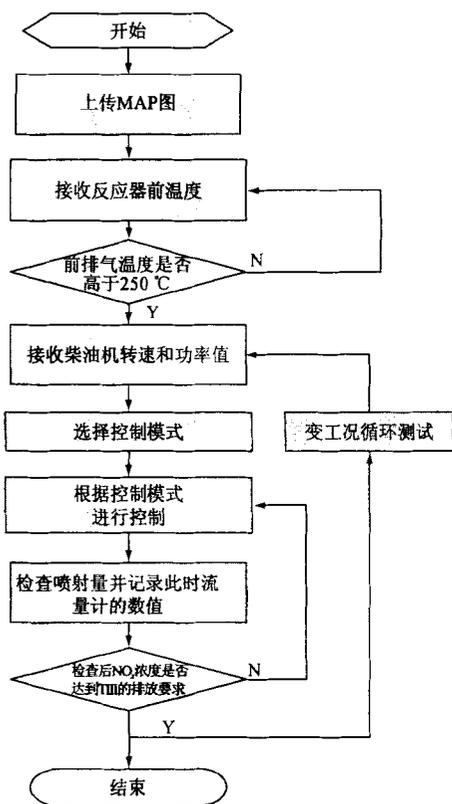


图3 软件流程图

4 试验结果分析

试验中分别按五种控制策略进行了尿素喷射过程的自动控制，针对每种控制策略调整并整定变频器的PID参数，通过自动控制使柴油机尾气脱销率达到了Tier III要求的排放标准。各种控制模式的脱销率范围如表3。数据显示，当采用闭环前馈+串级MAP图控制模式时，脱销率的波动范围最集中，且脱销率略高于Tier III要求的排放标准，可以最大程度节约尿素投放成本，由此认为采用闭环前馈+串级MAP图控制模式的脱销效果最合理。以下针对这种控制模式进行分析。

试验选用2132型1380kW中速柴油机进行定转速变功率的尾气排放控制试验，此柴油机在功率为50%、75%、100%、110%工况下的尿素喷射量分别为10、23、30、32(L·h⁻¹)。表4为采用了闭环前馈+串级MAP图控制模式的试验数据，数据显示在柴油机不同工况下，其氮氧化物的脱销率都高于80%且比较接近，说明控制参数调整得比较合理。

表3 不同控制模式的脱销率范围

控制模式	开环MAP图	开环传感器	闭环前馈+串级MAP图	闭环前馈+串级传感器	闭环串级
脱销率范围	83%~90%	82%~90%	80%~83%	81%~89%	85%~91%

表4 试验数据

功率	110%	100%	75%	50%
反应前NO _x 浓度	1389	1360	1008	855
反应后NO _x 浓度	276	225	192	160
脱销率	80.13%	83.46%	80.95%	81.29%

参考文献

- [1] 董晶. SCR装置在船舶氮氧化物排放控制中的应用[J]. 江苏船舶, 2012(4).
- [2] 何建华. 选择性催化还原技术(SCR)在船舶排气系统中应用[J]. 科技创新导报, 2012.
- [3] 杨超, 张杰群, 郭婷婷. SCR烟气脱硝装置烟气流场数值模拟[J]. 东北电力科技大学学报, 2012(2).
- [4] 王立志. 柴油机Urea-SCR系统控制模型的设计与测试研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [5] 李世用. 柴油机Urea-SCR系统测试与优化设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2012(6).
- [6] Isabella Nova, Cristian Ciardelli, Enrico Tronconi, etc. NH₃-NO/NO₂ SCR for diesel exhausts after treatment, mechanism and modelling of a catalytic converter[J]. Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, 2007(5).

5 结束语

本研究通过采用高性能标准化模块，结合选择性催化还原原理和经典控制理论，应用五种控制策略实现对尿素喷射过程的自动控制。对每种控制策略下变频器的PID参数进行调整并标定，针对其中脱销效果最合理的闭环前馈+串级MAP图控制模式的试验结果进行了分析。本套自主研发的SCR控制系统将在实船上应用，有良好的推广前景。