

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.040

柴油机尿素 SCR 系统氨覆盖率跟踪控制器设计

胡云峰^{1,2} 蒋冰晶² 宫洵^{2,3} 赵靖华² 陈虹^{1,2}

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学通信工程学院, 长春 130025;
3. 密歇根大学航空航天工程系, 安娜堡 48105)

摘要: 柴油发动机尿素选择催化还原(Urea-selective catalytic reduction, Urea-SCR)控制系统以尿素的喷射量为控制输入,通过精确控制尾气后处理装置中氨的覆盖率,将尾气中有毒的氮氧化物还原成无毒的氮气和水。针对车载 Urea-SCR 系统具有非线性,干扰动态难以建模的特点,设计了工程中常用的前馈加反馈结构的 2 自由度控制系统。前馈控制器部分采用微分平坦方法,根据氨覆盖率的期望值,得到了前馈控制输入;在此基础上,将 Urea-SCR 系统在前馈控制输入的平衡点处进行泰勒展开,将尿素未转化量的建模动态及参数不确定性等考虑成幅值有界的扰动输入,进而设计了满足 H_∞ 性能指标的反馈控制控制器对氨覆盖率进行精确控制。最后,通过在发动机动力学仿真软件 enDYNA 中 FTP75 测试循环的仿真实验,验证了算法的跟踪性能和鲁棒性。

关键词: 柴油发动机; SCR 控制系统; 微分平坦; H_∞ 控制

中图分类号: TG156 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)04-0301-08

Ammonia Coverage Rate Tracking Controller Design in Diesel Engine Urea-SCR System

Hu Yunfeng^{1,2} Jiang Bingjing² Gong Xun^{2,3} Zhao Jinghua² Chen Hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

3. Department of Aerospace Engineering, Michigan University, Ann Arbo 48105, USA)

Abstract: The urea selective catalytic reduction (Urea-SCR) system has been widely used in the aftertreatment system of diesel engine, in which the injection quantity of urea is selected as the control input. By the precise control of the ammonia coverage rate, the poisonous NO_x can be converted to the environmentally friendly N_2 and H_2O . As Urea-SCR system has nonlinear characteristics and disturbance is difficult to model, a two degree of freedom control system consisting of a feedforward controller and an H_∞ feedback controller was developed. Firstly, the Urea-SCR system model was deduced based on the principle of chemical reaction kinetics. Secondly, the feedforward controller was designed based on the differential flatness method. The flatness output was chose as ammonia coverage rate, then the system state, control input were expressed by flatness output and its finite order derivatives, based on this, the feedforward control input was obtained. Thirdly, the Taylor expansion of the Urea-SCR system model was carried out at the equilibrium point of the feedforward control input, the un-modeling dynamics of urea and parameter uncertainties were considered as the amplitude-bounded disturbance input. The feedback control controller which satisfied the H_∞ performance index was designed to accurately control the ammonia coverage rate. Finally, the tracking performance and robustness were verified by the simulation results with the engine dynamics simulation software enDYNA under FTP75 test cycle.

Key words: diesel engine; SCR control system; differential flatness; H_∞ control

收稿日期: 2016-01-12 修回日期: 2016-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61374046,6151001021)和吉林省教育厅科学计划研究项目(2015-485)

作者简介: 胡云峰(1983—),男,讲师,主要从事发动机建模与优化控制研究,E-mail: huyf@jlu.edu.cn

通信作者: 陈虹(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事非线性控制应用及汽车电子控制研究,E-mail: chen@jlu.edu.cn

引言

柴油发动机由于自身的耐久性和燃油经济性,已经成为商用车动力来源的一种重要选择。目前欧洲配有柴油发动机的乘用车已经占到了乘用车总量的70%^[1],同时国内的乘用车绝大多数也都采用柴油发动机。但是由于柴油发动机采用稀燃模式,燃烧过程会有大量的氮氧化物(NO_x)产生^[2]。柴油发动机尾气净化主要包含机内净化和尾气后处理,而单纯的机内净化已经无法满足越来越严格的排放法规,如国V、欧IV等排放法规。随着排放法规的日益严格,尾气后处理已经成为柴油发动机 NO_x 净化的主要方式。现阶段应用比较广泛的尾气后处理技术主要包含氮氧化物捕集技术^[3](Lean NO_x trap, LNT)和Urea-SCR 2种方式^[4-5],相较于LNT,Urea-SCR系统具有 NO_x 转化效率更高、成本更低而且对硫不敏感等显著优点,使得Urea-SCR系统的应用更加广泛^[6]。该系统的工作原理是采用质量分数为32.5%尿素溶液(俗称“添蓝”)作为还原剂^[7],通过向尾气后处理反应器中喷射适量的尿素溶液与尾气中的 NO_x 发生还原反应,将有害的 NO_x 转化为无害的氮气和水。因此,Urea-SCR控制系统核心问题是如何精确控制尿素的喷射量达到在降低 NO_x 排放的同时,避免有异味的氨气泄漏。

针对Urea-SCR系统尿素喷射量的控制问题,已经得到了国内外学者的广泛研究。应用最早的控制方法是根据尾气中 NO_x 的含量,进行开环控制,该方法在稳态工况可以获得高的 NO_x 转化效率和可以接受的 NH_3 逃逸率,在早期得到了一定的应用^[8-9],但是该方法不适用于车辆运行的复杂状况,且瞬态效果相对较差,同时随着发动机的老化及参数漂移也会导致该方法的控制效果越来越差,无法满足日益严格的排放法规。针对开环控制方法存在的问题,文献[10-11]应用模型预测控制方法,将系统的非转化效率为优化目标进行优化,实现了对尿素喷射量的闭环控制。近年来,一些学者将Urea-SCR系统的控制问题转化为系统内部关键的中间变量——氨覆盖率的闭环跟踪控制问题,该方法首先离线优化出保证同时降低 NO_x 排放和避免氨逃逸的最佳氨覆盖率,再进行氨覆盖率的精确跟踪控制,从而使得系统满足控制要求。文献[12-15]中,提出了基于非线性理论的覆盖率跟踪控制方法;文献[16]中,针对于Urea-SCR系统模型的非线性参变特性,应用LMI方法设计了一个线性参变控制器,降低了控制器参数调试的工作量;文献[17]提出一种基于实验与仿真相结合的SCR控制系统开发策略。

本文首先对所设计的问题进行描述,建立一个面向控制器设计面向控制器设计的Urea-SCR系统非线性模型,然后分别基于平坦理论和 H_∞ 方法设计前馈控制加反馈控制的2自由度氨覆盖率跟踪控制系统。最后,通过在enDYNA环境下FTP75测试循环的离线仿真,验证控制系统的跟踪性能和鲁棒性。

1 问题描述及系统建模

1.1 控制问题描述

Urea-SCR系统内部的反应机理如图1所示,由尿素转化而来的 NH_3 吸附在催化剂活性中心位上,变成吸附态的氨($\text{NH}_3(\text{ads})$,红色部分所示),只有吸附态 $\text{NH}_3(\text{ads})$ 才能与发动机排出的 $\text{NO}_{x,\text{in}}$ 发生氧化还原反应,将其转化为 N_2 和 H_2O 。而未被吸附和解吸附出来的 NH_3 则会发生逃逸,造成氨泄漏。因此吸附态的氨的数量是影响系统效率的关键因素,吸附的多少用氨覆盖率(θ_{NH_3})来表示。如覆盖率高,则 NO_x 的转化效率高,但是高的氨覆盖率也会导致逃逸的氨增加,反之亦然。因此,本文Urea-SCR系统的控制问题转换为最佳氨覆盖率的跟踪控制,以尿素的喷射量作为系统的控制输入,以氨的浓度和覆盖率作为状态变量,将系统的参数不确定性(主要指催化剂的储氨能力)引起的建模误差和尿素未转化量的不确定性考虑成幅值有界的干扰,首先设计了基于微分平坦的前馈控制器,在此基础上,设计了满足 H_∞ 性能指标的氨覆盖率跟踪控制器。

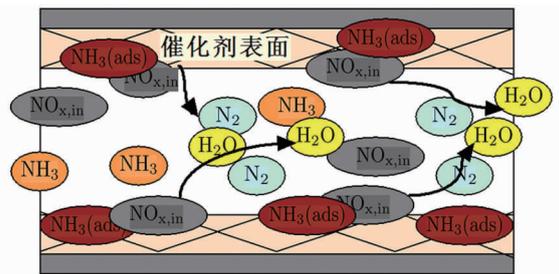


图1 urea-SCR 化学反应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of urea-SCR reactions

研究表明,Urea-SCR系统集中参数模型比较简单,且能够很好地代表催化转化器的相关动态^[19]。所以本文基于化学反应动力学原理,建立Urea-SCR系统集中参数模型^[20]。模型中所用到的参数如表1所示。

1.2 集中参数模型

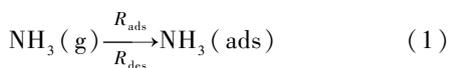
Urea-SCR系统还原反应遵循Eley-Rideal机理^[20-21],即气态氨只有吸附在催化剂的活性中心位上才能与 NO_x 发生还原反应。首先,气态氨 $\text{NH}_3(\text{g})$

表1 常量命名法

Tab. 1 Constants nomenclature

参数	数值
1 mol 活性原子的表面积 $S_c / (\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1})$	581
粘着率 α_{prob}	1.11×10^{-3}
催化剂储氮能力名义值 $c_{s0} / (\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	7.30
排气定压比热 $c_{p, \text{EC}} / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	1060
催化剂比热 $c_{p, c} / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	1054
NH_3 的摩尔质量 $M_{\text{NH}_3} / (\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	17
气体常数 $R / (\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1})$	8.3145
排气气体常数 $R_{s, \text{EC}} / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	288
解吸附速率因子 $k_{\text{des}} / \text{s}^{-1}$	0.514
urea-SCR 反应速率因子 $k_{\text{SCR}} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2.6776
NH_3 氧化反应速率因子 k_{o_x} / s^{-1}	3.34×10^6
解吸附活性能 $E_{a, \text{des}} / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	15.2
urea-SCR 反应活性能 $E_{a, \text{SCR}} / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	28471
NH_3 氧化反应活性能 $E_{a, o_x} / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	1.16×10^5
大气压 $p_{\text{amb}} / \text{Pa}$	101325
urea-SCR 系统的总容积 V_c / m^3	0.01
催化剂质量 m_c / kg	19
空隙比 ε	0.81
黑度 $\varepsilon_{\text{rad, ser}}$	0.507
气体辐射常数 σ_{sb}	5.67×10^{-8}
催化剂辐射表面积 $A_{\text{rad, ser}} / \text{m}^2$	0.9044

吸附在催化剂表面变成吸附态的氨 $\text{NH}_3(\text{ads})$, 称之为吸附反应; 而吸附态的氨随着温度的升高会从催化剂表面解吸附出来, 称为解吸附反应, 吸附和解吸附是一个可逆的过程, 反应式为



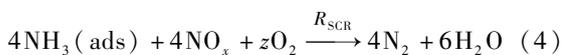
其中 $R_{\text{ads}} = r_{\text{ads}} C_{\text{NH}_3} (1 - \theta_{\text{NH}_3})$ (2)

$$R_{\text{des}} = r_{\text{des}} \theta_{\text{NH}_3} \quad (3)$$

$$r_{\text{ads}} = c_s S_c \alpha_{\text{Prob}} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M_{\text{NH}_3}}}$$

$$r_{\text{des}} = c_s k_{\text{des}} e^{-\frac{E_{a, \text{des}}}{RT}}$$

式中 $R_{\text{ads}}, R_{\text{des}}$ ——氨吸附和解吸附反应速率常数
 C_{NH_3} ——气态氨浓度 θ_{NH_3} ——氨覆盖率
 当温度高于 200°C 时, 吸附态的氨在催化剂的作用下选择性与 NO_x 反应生成 N_2 和 H_2O , 反应式为



式中 R_{SCR} —— NO_x 发生还原反应的反应速率常数

NO_x 发生还原反应的速率表达式为

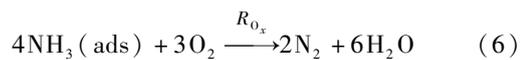
$$R_{\text{SCR}} = r_{\text{SCR}} C_{\text{NO}_x} \theta_{\text{NH}_3} \quad (5)$$

其中 $r_{\text{SCR}} = c_s R T k_{\text{SCR}} e^{-\frac{E_{a, \text{SCR}}}{RT}}$

式中 C_{NO_x} ——氮氧化物浓度

同时, 当温度高于 350°C 吸附态氨被氧化成 N_2

和 H_2O , 反应方程式为



式中 R_{o_x} ——氨氧化反应速率常数

则 $\text{NH}_3(\text{ads})$ 氧化反应速率为

$$R_{o_x} = r_{o_x} \theta_{\text{NH}_3} \quad (7)$$

其中 $r_{o_x} = c_c k_{o_x} e^{-\frac{E_{a, o_x}}{RT}}$

将 Urea-SCR 系统假设为一个均匀搅拌釜, 即系统内部各状态均匀一致^[21-22], 这是符合轻车载 SCR 系统建模的一种方式。如前面所描述的, 氨覆盖率对系统的排放有至关重要的影响, 而它的动态变化过程又与式(1)、(4)、(6)密切相关, 整理得

$$c_s \dot{\theta} = R_{\text{ads}} - R_{\text{des}} - R_{\text{SCR}} - R_{o_x} \quad (8)$$

式中 c_s ——系统的储氮能力

将式(2)、(5)、(7)代入式(8), 得到氨覆盖率的状态方程为

$$c_s \dot{\theta}_{\text{NH}_3} = r_{\text{ads}} (1 - \theta_{\text{NH}_3}) C_{\text{NH}_3} - (r_{\text{des}} + r_{\text{SCR}} C_{\text{NO}_x} + r_{o_x}) \theta_{\text{NH}_3} \quad (9)$$

尿素的喷射直接影响到催化反应器内部氨气变化情况, 进而影响氨的覆盖率, 所以氨气的浓度是系统中非常重要的状态变量, 而它的变化和化学反应式(1)密切相关, 具体表示为

$$\dot{C}_{\text{NH}_3} = a_1 (n_{\text{NH}_3, \text{in}} - n_{\text{NH}_3, \text{out}}) - R_{\text{ads}} + R_{\text{des}} \quad (10)$$

式中 $n_{\text{NH}_3, \text{in}}, n_{\text{NH}_3, \text{out}}$ ——执行器喷射的氨气(本文控制输入)和系统排出的氨气

根据理想气体状态方程有

$$n_x = a_0 m_{\text{EG}}^* T C_x \quad (11)$$

最终结合式(2), 得到关于氨气浓度状态方程

$$\dot{C}_{\text{NH}_3} = a_1 n_{\text{NH}_3, \text{in}}^* - C_{\text{NH}_3} [a_0 a_1 m_{\text{EG}}^* T + r_{\text{des}} \theta_{\text{NH}_3}] + r_{\text{ads}} \theta_{\text{NH}_3} \quad (12)$$

其中 $a_0 = \frac{R_{s, \text{EC}}}{p_{\text{amb}}}$ $a_1 = \frac{1}{\varepsilon V_c}$

本文将催化剂的储氮能力 c_s 作为常值, 取其名义值 $c_{s0} = 7.3$, 而将由其改变而引起的系统变化视作系统扰动 d_1 。由于真实系统中尿素并不能百分之百的转化为氨气, 所以本文将未转化率定义为 η , 取 $\eta \in (0, 1)$, 则 $\eta n_{\text{NH}_3, \text{in}}^*$ 表示尿素的未转化量, 将其视作扰动量 d_2 。所以重新整理式(9)、(11), 最终得到系统的面向控制模型的状态空间形式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_{11}(x_1, p) + f_{12}(x_1, p) x_2 + d_1 \\ \dot{x}_2 = r_{\text{des}} x_1 + f_{21}(x_1, p) x_2 + a_1 u - a_1 d_2 \end{cases} \quad (13)$$

其中 $f_{11}(x_1, p) = -\frac{1}{c_s} (r_{\text{des}} + r_{\text{SCR}} C_{\text{NO}_x} + r_{o_x}) x_1$

$$f_{12}(x_1, p) = \frac{1}{c_s} r_{\text{ads}} (1 - x_1)$$

$$f_{21}(x_1, \mathbf{p}) = -[a_0 a_1 m_{EG}^* T + r_{ads}(1 - x_1)]$$

$$\mathbf{p} = [T_{in} \quad T_{amb} \quad C_{NO_x} \quad m_{EG}^* \quad r_x]^T$$

$$\mathbf{x} = [\theta_{NH_3} \quad C_{NH_3}]^T$$

$$\mathbf{d} = [d_1 \quad d_2] \quad u = n_{NH_3, in}^*$$

式中 \mathbf{p} ——慢变参数 \mathbf{x} ——状态变量
 \mathbf{d} ——系统干扰 u ——控制输入
 x_1 ——被控输出

将 T 和 NO_x 视为外部可测干扰^[22]。

2 氨覆盖率控制器设计

2.1 非线性前馈控制器设计

前馈控制器设计是在名义情况下进行,即 $d = 0$ 。氨覆盖率跟踪控制器的目的是跟踪期望的覆盖率 x_{1d} ,为了推导非线性前馈控制器,将状态 x_1 作为输出,即

$$y = x_1 \quad (14)$$

将式(14)分别求一阶导和二阶导,并代入状态方程(13)得到

$$\begin{cases} \dot{y} = f_{11}(x_1, \mathbf{p}) + f_{12}(x_1, \mathbf{p})x_2 \\ \ddot{y} = \dot{f}_{11} + \dot{f}_{12}x_2 + r_{des}f_{12}x_1 + f_{12}f_{21}x_2 + a_1 f_{12}u \end{cases} \quad (15)$$

选择 $y_d = x_{1d}$ 是作为平坦输出,有

$$\begin{cases} x_1 = y \\ x_2 = \frac{\dot{y} - f_{11}(y, \mathbf{p})}{f_{12}(y, \mathbf{p})} \\ u = \frac{\left(\frac{\dot{y} - f_{11}}{f_{12}}\right)' - f_{12}f_{21}\left(\frac{\dot{y} - f_{11}}{f_{12}}\right) - r_{des}f_{12}y}{a_1} \end{cases} \quad (16)$$

由于系统的状态和输入可由平坦输出及其有限阶导数表示,因此,Urea-SCR系统模型满足微分平坦的定义条件,及该模型具有平坦性。因此,将系统的参考输入 $y_d = x_{1d}$ 和其相应的时间导数代入,得到尿素 SCR 系统的前馈控制器,即

$$\begin{cases} x_{2d} = \frac{\dot{x}_{1d} - f_{11}(x_{1d}, \mathbf{p})}{f_{12}(x_{1d}, \mathbf{p})} \\ u_f = \frac{\dot{x}_{2d} - f_{21}x_{2d} - r_{des}x_{1d}}{a_1} \end{cases} \quad (17)$$

反馈控制中需要状态误差的微分信号。为了从氨覆盖率的测量值 $\tilde{\theta}_{NH_3}$ 获得 $y(\theta_{NH_3})$ 和 $\dot{y}(\dot{\theta}_{NH_3})$,让 $\tilde{\theta}_{NH_3}$ 信号通过一个一阶微分滤波器。滤波器通常是用于滤除测量噪声的影响,一阶滤波器的结构框图如图2所示,表达式为

$$\frac{\theta_{NH_3}}{\tilde{\theta}_{NH_3}} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (18)$$

滤波器的输出是 θ_{NH_3} ,将它传递给控制器。通过式(18)的滤波器可以得到 $\dot{\theta}_{NH_3}$ 。选择滤波器时

间常数为 0.03 s。

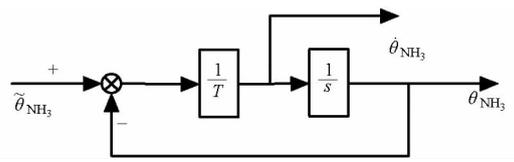


图2 一阶滤波器

Fig.2 First-order filter

2.2 H_∞ 反馈控制器设计

将氨覆盖率系统在前馈控制的平衡点处进行泰勒展开,将模型中参数不确定性 d_1 和尿素未转化量 d_2 考虑成幅值有界的扰动,采用 H_∞ 方法设计了氨覆盖率反馈控制器,为此,首先将式(13)以 (x_{1d}, x_{2d}, u_f) 作为系统平衡点,泰勒展开,得到

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{c_s}(r_{des} + r_{SCR}C_{NO_x} + r_{O_x} + r_{ads}x_{2d})(x_1 - x_{1d}) + \dot{x}_{1d} + \frac{1}{c_s}r_{ads}(1 - x_{1d})(x_2 - x_{2d}) + (d_1 - d_{10}) + o(x_1) + o(x_2) \\ \dot{x}_2 = \dot{x}_{2d} + (r_{des} + r_{ads})(x_1 - x_{1d}) + [-a_0 a_1 m_{EG}^* T - r_{ads}(1 - x_{1d})](x_2 - x_{2d}) + a_1(u - u_d) - a_1(d_2 - d_{20}) + o(x_1) + o(x_2) \end{cases} \quad (19)$$

令 $e_1 = x_1 - x_{1d}$, $e_2 = x_2 - x_{2d}$, $u_e = u - u_d$ 省略系统的高阶项 $o(x_1) + o(x_2)$ 。则有

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & N \\ H & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_1 \end{bmatrix} u_e + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中 $M = -\frac{1}{c_s}(r_{des} + r_{SCR}C_{NO_x} + r_{O_x} - r_{ads}x_{2d})$

$$N = \frac{1}{c_s}r_{ads}(1 - x_{1d}) \quad H = r_{des} + r_{ads}$$

$$K = -a_0 a_1 m_{EG}^* T - r_{ads}(1 - x_{1d})$$

整理之后误差系统的状态方程为

$$\dot{e}(t) = \mathbf{A}e(t) + \mathbf{B}_d d(t) + \mathbf{B}_u u_e(t) \quad z = \mathbf{C}e(t) \quad (21)$$

$$\text{其中 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} M & N \\ H & K \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -a_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_u = \begin{bmatrix} 0 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = [1 \quad 0]$$

考虑到矩阵 \mathbf{A} 是时变的,它在一系列 LTI 模型的凸包络里变化。

$$\mathbf{A} = Co\{\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_n\} \quad (22)$$

\mathbf{A}_i 是分别由 M, N, H, K 的最小值和最大值确定的,即

$$\begin{cases} M \in [M_{dn}, M_{up}] \\ N \in [N_{dn}, N_{up}] \\ H \in [H_{dn}, H_{up}] \\ K \in [K_{dn}, K_{up}] \end{cases} \quad (23)$$

其中各变量的上下界是通过实验获得的, 由于 $r_{ads} \gg a_0 a_1 m_{EG}^* T$, 所以, $N \approx -r_{ads}(1 - x_{1d})$ 。则 N 与 K 的变化趋势是相反的, 即

$$A_k = \begin{bmatrix} * & N_{dn} \\ * & K_{dn} \end{bmatrix} \quad A_l = \begin{bmatrix} * & N_{up} \\ * & K_{up} \end{bmatrix}$$

等 8 种组合不可能发生, 为了使结果不过于保守, 本文的 $n = 8$ 。所以稳定问题等价于寻找一个状态反馈控制律 $\Delta u = K_p e$ 使对应的闭环系统内部稳定, 系统为

$$\dot{e}(t) = A_c e(t) + B_c d(t) \quad (24)$$

$$z = C_c e(t) \quad (25)$$

其中

$$A_c = A + B_u K$$

$$B_c = B_v \quad C_c = C$$

令 $G(z)$ 表示从干扰输入 d 到输出 z 的闭环传递函数矩阵, 同时定义从干扰输入 d 到输出 z 的 H_∞ 范数为

$$\|G\| = \sup_{v \in l_2} \frac{\|z\|^2}{\|d\|^2}$$

其中 $d \in l_2$ 表示 d 是能量有界信号, 即

$$\|d\|^2 = \left(\sum_{k=0}^{\infty} \|d\|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

设计控制器增益, 使系统对某一类干扰输入 $d(t)$, 系统性能输出总能保持是“小”的^[23]。所以本部分反馈控制律的求解将在 LMI 优化的框架下进行处理。本文先给出如下结论: 如果存在矩阵 $Q = Q^T > 0$, Y 使得半定规划问题

$$\begin{aligned} & \min_{\gamma, Q, Y} \gamma^2 \text{ 满足不等式} \\ & \begin{bmatrix} Q & * & * & * \\ 0 & \gamma I & * & * \\ A_l Q + B_u Y & B_v & Q & * \\ C_l Q & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} > 0 \end{aligned} \quad (26)$$

有最优解 (γ^*, Q^*, Y^*) , 则状态反馈控制器 $K = Y^* Q^{-1}$ 使得闭环系统从外部干扰输入 d 到性能输出 z 的 H_∞ 性能小于等于 γ , 具体证明详见文献[24], 这里由于篇幅所限, 不详细证明。

通过求解(26)中的优化问题, 得到控制系统的控制增益 $K_p = (-26.1403, -2.9450)$, 优化性能指标 $\gamma^* = 0.0906$ 。控制系统结构如图 3 所示, 控制量 u 是非线性前馈控制量和线性反馈控制量的和, 所以系统控制输入为

$$u = \Delta u + u_f \quad (27)$$

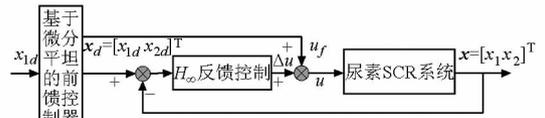


图 3 前馈加反馈控制器结构框图

Fig. 3 Block diagram of feedforward-feedback controller

综上, 本文设计了前馈加反馈形式的 2 自由度控制器, 与现有的方法相比, 具有以下优点: 控制器结构与工程中常用的控制方案一致, 便于本文控制器的工程化实现。针对幅值有界的扰动输入, 设计了满足 H_∞ 性能指标的反馈控制器, 并通过优化问题的求解给出了控制器增益, 减小了控制器参数调试的工作量。

3 仿真

仿真中采用德国 Tesis 公司的商用发动机动力学仿真软件 enDYNA^[25] 作为被控对象, 该软件以实测数据为基础, 通过平均值建模方法搭建不同类型的发动机模型, 提供给用户一个高逼真的近似物理系统模型。enDYNA 软件能够对发动机进气系统、燃油喷射系统、发动机燃烧、废气排放系统以及动力传动系统等进行动力学分析, 用户可以导入自己实验所得数据进行预处理, 得出发动机特性参数, 从而将模型改造成与实际发动机结构和燃烧过程相符的模型。提供硬件在环测试设备中的实时模型能满足发动机 ECU 主要功能的开发与测试, 同时还提供很多虚拟发动机台架功能, 如测功机模式、怠速模式、驾驶模式、驾驶循环模式及汽车排放循环模式等。本文仿真中选择一款排量为 1.9 L 带涡轮增压的四缸轻型柴油发动机, 发动机最大转速为 4 500 r/min。实验在美国轻型车排放测试循环 FTP75 环境下进行, 选取部分工况来验证控制器设计的有效性。

首先在名义工况下, 即认为尿素瞬时完全转化为氨气, 验证本文所设计控制器对参考信号的跟踪能力。仿真中同时考虑了尿素喷嘴实际的执行能力, 将控制量的输出限制在 0.003 mol/s 以内。实验中发动机转速和扭矩变化如图 4 所示。

图 5~8 是选择参考输入为不同频率的正弦信号和阶跃信号情况下的仿真结果。如图 5 所示, 仿真中选择的参考输入信号为一个相对高频的正弦信号, 信号的最大值为 0.5, 频率为 $\frac{\pi}{150}$ rad/s。从图中可以看到, 所设计的控制器可以很好地跟踪参考信号, 只是在仿真的前 20 s 和后 20 s 有些许偏差。如图 6 所示, 在仿真的前 20 s, 虽然氨覆盖率没能很

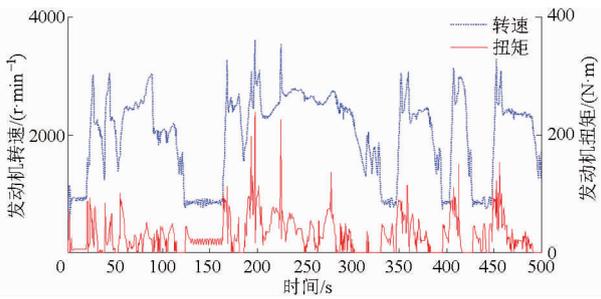


图4 发动机工况

Fig.4 Engine operation condition

好地跟踪上期望值,但是此时的氨喷射量已经达到上限,这是由于执行机构的执行能力饱和影响了控制效果;在仿真的后20 s,尽管此时控制器已经停止了氨气的喷射,但是实际的氨覆盖率并没有跟踪上期望值,通过对比 NO_x 排放可以看到,由于此时的发动机已经没有 NO_x 排放,也就是说没有可以减少氨覆盖率的条件,所以才会出现氨覆盖率不能及时跟踪期望值的情况。

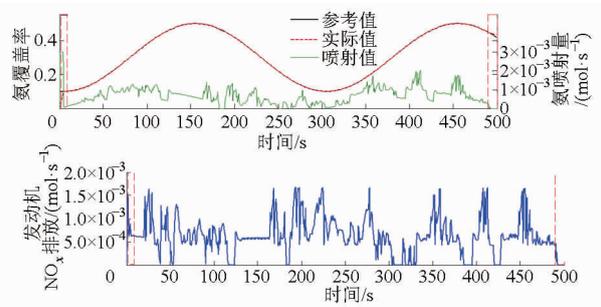


图5 高频正弦信号跟踪

Fig.5 Tracking of high frequency sine signal

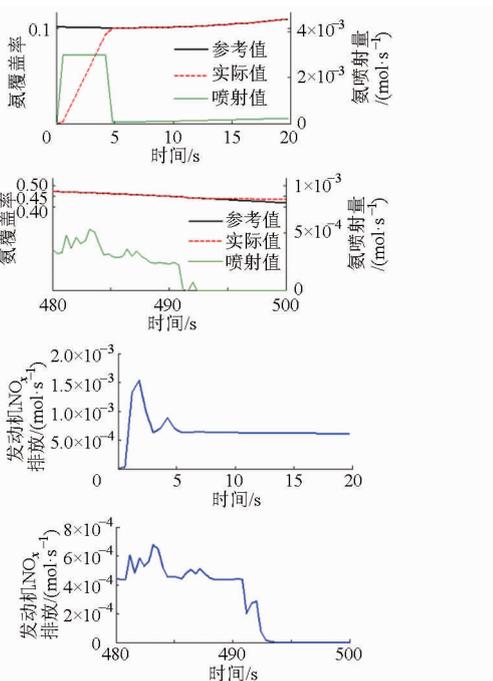


图6 图5(0~20)、(480~500)的局部放大

Fig.6 Partial zoom-in of Fig.5(0~20),(480~500)

图7中展示的是将氨覆盖率信号设置为变化更为平缓的正弦信号,进一步检验所涉及的控制器的跟踪效果。由图可见氨覆盖率跟踪控制器可以很好地跟踪上期望值。

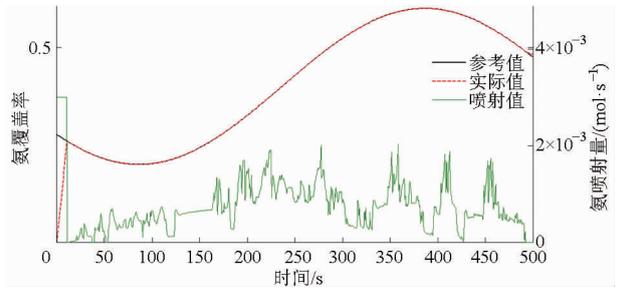


图7 低频正弦信号跟踪

Fig.7 Tracking of low frequency sine signal

本文将氨覆盖率信号设置为变化更为剧烈的阶跃信号,如图8所示,在0 s、50 s和250 s 3个氨覆盖率上升的时间点,由于执行机构的限制,尽管此时控制器已经输出最大值,系统还是需要1~2 s才能跟踪上期望值。在160 s、350 s和410 s 3个氨覆盖率下降的时间点,尽管此时控制器已经停止尿素的喷射,但是由于系统的吸附氨的消耗有限,真实覆盖率还需要经过几秒才能跟踪上期望的覆盖率。由于真实的最佳氨覆盖率是结合系统特性和发动机排放情况得到的,所以本文中在验证控制器跟踪效果中出现的覆盖率突然下降和上升时控制器效果不是很好的现象是合理的。

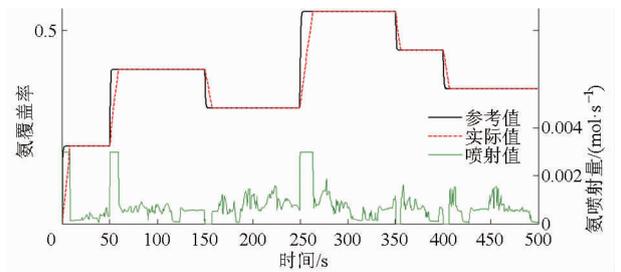


图8 阶跃信号跟踪

Fig.8 Tracking of step signal

在设计控制器时充分考虑了系统参数变化和尿素不能完全转化为氨气的情况,为了验证控制器的鲁棒性,考虑催化剂储氨能力 $0.5c_{s0} \sim 1.0c_{s0}$ 变化过程;同时随机设计了一种尿素的非转化率 η 变化情况,如图9所示。为了更好地体现本文所设计的反馈加前馈控制器的鲁棒控制效果,将控制器的仿真效果和PID控制器控制效果进行对比。

图10所示的是本文设计的控制器与PID控制器在考虑干扰后二者的控制效果对比,图11所示的是2种控制器在加入干扰前后出现的误差,具有更小的响应时间和稳态误差。因此,差率对比可以看到,本文所设计的控制器在系统存在参数不确定性和

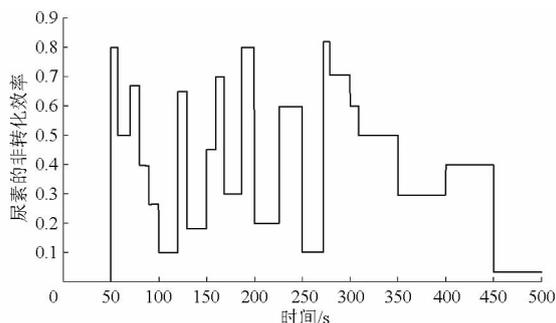


图9 尿素的非转化率

Fig. 9 Nonconversion efficiency of urea

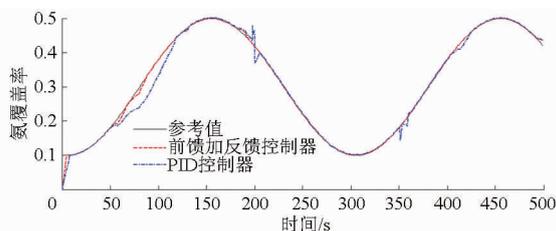


图10 干扰情况下2种控制器跟踪性能对比

Fig. 10 Comparison of tracking performance for two controllers under disturbance

未建模动态的情况下与传统的PID控制器相比,具有较好的鲁棒性,以及更好的瞬态性能和稳态性能。

4 结束语

针对现阶段研究很热门的尿素SCR系统控制

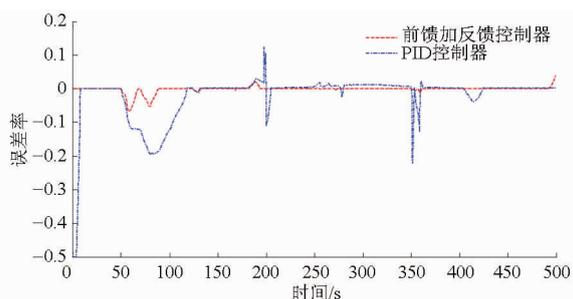


图11 2种控制器干扰前后误差对比

Fig. 11 Comparison of tracking error for two controllers before and after disturbance

问题,选择了将氨覆盖率作为被控量,设计了氨覆盖率跟踪控制器。本文首先根据SCR系统机理,搭建了一个集中参数模型,并基于此模型得到面向控制模型。针对SCR系统模型的特征及干扰难以建模的特点,选择了工程中常用的前馈加反馈的控制器设计结构。前馈部分应用微分平坦理论设计了基于平坦输出及其导数的前馈非线性控制器。反馈控制器的设计时,充分考虑了未被建模的尿素转化过程,将其考虑为幅值有界的干扰,应用鲁棒控制理论设计了 H_∞ 反馈控制器。最终基于发动机动力学仿真软件enDyna验证了算法的跟踪性能和鲁棒性能。

参 考 文 献

- 1 王若素,肖寒,白涛,等. 全国机动车保有量——2013年中国机动车污染防治年报(第I部分)[J]. 环境与可持续发展, 2014(1): 88-90.
WANG R S, XIAO H, BAI T, et al. The amount of vehicles—China vehicle emission control annual report in 2013 [J]. Environment and Sustainable Development, 2014(1): 88-90. (in Chinese)
- 2 刘忠长,孙士杰,田径,等. 瞬态工况下喷油参数对柴油机排放及燃烧特性的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2014, 44(6): 1639-1646.
- 3 WANG J, JI Y, JACOBS G, et al. Effect of aging on NO_x reduction in coupled LNT-SCR systems [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014, 148-149: 51-61.
- 4 KASPAR J, FORNASIERO P, HICKEY N. Automotive catalytic converters: current status and some perspectives [J]. Catalysis Today, 2003, 77(4): 419-449.
- 5 辛喆,张寅,王顺喜,等. 柴油机Urea-SCR催化剂转化效率影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 30-34.
XIN Z, ZHANG Y, WANG S X, et al. Influence factors of the NO_x behavior in Urea-SCR catalytic converter of diesel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 30-34. (in Chinese)
- 6 马军彦,李君,曲大为,等. 柴油机SCR系统尿素分解效率研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 282-286, 309.
MA J Y, LI J, QU D W, et al. Urea decomposition efficiency of diesel engine SCR system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 282-286, 309. (in Chinese)
- 7 JOHNSON T V. Diesel emission control in review [J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2009, 1(1): 68-81.
- 8 刘传宝,颜伏伍,朱清山,等. 柴油机SCR开环控制系统尿素计量脉谱标定方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 16-21.
LIU C B, YAN F W, ZHU Q S, et al. SCR post-processing system control strategy of diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 16-21. (in Chinese)
- 9 WANG B Y, WANG Q. Design of urea-SCR model of a feedforward controller based on simulation in diesel engine [J]. Advanced Materials Research, 2012, 562: 1924-1927.
- 10 CHIANG C J, KUO C L, HUANG C C, et al. Model predictive control of SCR aftertreatment system [C] // 2010 the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2010: 2058-2063.
- 11 MCKINLEY T, ALLEYNE A, BACON D. Model predictive control: a unified approach for urea-based SCR systems [J]. SAE

- International Journal of Fuels and Lubricants, 2010, 3(1):673 – 689.
- 12 MEISAMI A M, MOHAMMADPOUR J, GRIGORIADIS K M. An adaptive control strategy for urea – SCR aftertreatment system [C]//Proceedings of the 2010 American Control Conference, 2010: 3027 – 3032.
- 13 CHEN P, WANG J, HUANG C C, et al. A robust ammonia coverage ratio control method for a two-cell selective catalytic reduction system in low temperature operations[C]//American Control Conference, 2014: 2606 – 2611.
- 14 赵靖华,陈志刚,胡云峰,等. 基于“三步法”的柴油机 Urea – SCR 系统控制设计[J]. 吉林大学学报:工学版,2015, 45(6): 1913 – 1923.
ZHAO J H, CHEN Z G, HU Y F, et al. Design of diesel engine's urea – SCR system controller using triple-step method[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2015, 45(6): 1913 – 1923. (in Chinese)
- 15 NING J, YAN F. Compound control strategy based on active disturbance rejection for selected catalytic reduction systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2015, 137(5): 051008.
- 16 MEISAMI A M, MOHAMMADPOUR J, GRIGORIADIS K M. PCA-based linear parameter varying control of SCR aftertreatment systems[C]//Proceedings of the 2011 American Control Conference, 2011: 1543 – 1548.
- 17 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 C B, YAN F W, HU J, et al. SCR post-processing system control strategy of diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 6 – 11. (in Chinese)
- 18 FLIESS M, LÉVINE J, MARTIN P, et al. Flatness and defect of non-linear systems; introductory theory and examples[J]. International Journal of Control, 1995, 61(6): 1327 – 1361.
- 19 SCHÄR C M. Control of a selective catalytic reduction process[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology,2003.
- 20 SCHÄR C M, ONDER C H, GEERING H P. Control of an SCR catalytic converter system for a mobile heavy-duty application [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(4): 641 – 653.
- 21 WILLI R. Low-temperature selective catalytic reduction of NO_x-catalytic behavior and kinetic modeling [D]. Zurich: ETH Zurich,1996.
- 22 HSIEH M. Control of diesel engine urea selective catalytic reduction systems[D]. Ohio: The Ohio State University, 2010.
- 23 ZHENG Q, CHEN Z, GAO Z. A practical approach to disturbance decoupling control[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(9): 1016 – 1025.
- 24 王萍,于鸿昶,刘奇芳,等. 主动队列管理的约束 H_{∞} 状态反馈控制方法[J]. 控制理论与应用,2013, 30(11): 1353 – 1359.
WANG P, YU H C, LIU Q F, et al. State-feedback constrained H-infinity control for active queue management[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(11): 1353 – 1359. (in Chinese)
- 25 PHILIPP O, HUBER M. Development and test of ECU functions for OBD with enDyna[C]. JSAE Paper 20045402,2004.

~~~~~

(上接第 271 页)

- 25 JAOUHER Ben Ali, NADER Fnaiech, LOTFI Saidi, et al. Application of empirical mode decomposition and artificial neural network for automatic bearing fault diagnosis based on vibration signals [J]. Applied Acoustics, 2015, 89: 16 – 27.
- 26 HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1998, 454(1971): 903 – 995.
- 27 龚承柱,李兰兰,杨娟,等. 基于 EMD – PSR – LSSVM 的城市燃气管网短期负荷预测[J]. 系统工程理论与实践,2014, 34(11):3001 – 3008.  
GONG Chengzhu, LI Lanlan, YANG Juan, et al. An integrated short-term load forecasting approach for urban gas pipeline network based on EMD, PSR and LSSVM [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2014, 34(11):3001 – 3008. (in Chinese)
- 28 FRASER A M, SWINNEY H L. Independent coordinates for strange attractors from mutual information [J]. Physical Review A: General Physics, 1986, 33(2): 1134 – 1140.
- 29 CAO Liangyue. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1997, 110(1 – 2): 43 – 50.
- 30 HUANG Guangbin, ZHANG Hongming, DING Xiaojian, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B: Cybernetics, 2012, 42(2): 513 – 529.
- 31 WANG Yuguang, CAO Feilong, YUAN Yubo. A study on effectiveness of extreme learning machine [J]. Neurocomputing, 2011, 74(16): 2483 – 2490.