

基于模型的DPF再生温度控制策略开发及验证

解同鹏^{1,2},高翠^{1,2},鹿文慧^{1,2},张善星^{1,2},李兰菊^{1,2}

1. 内燃机可靠性国家重点实验室,山东 潍坊 261061;

2. 潍柴动力股份有限公司,山东 潍坊 261040

摘要:为精确控制柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)的再生温度,避免因再生失控引起的DPF失效风险,在柴油机氧化催化剂(diesel oxidation catalyst, DOC)和DPF组成的后处理系统上建立基于化学反应动力学原理的DOC温度模型,在温度模型和再生温度控制算法的基础上设计DPF再生温度前馈及反馈控制策略;利用发动机台架测试数据进行控制策略联合仿真,对控制参数进行系统整定及优化;通过发动机台架瞬态及稳态工况测试,验证控制策略的实际应用效果。仿真和台架试验结果表明:DPF再生温度控制策略具有很好的动态性能及稳态性能,最大峰值温度及燃油喷射量均控制在限定范围,可确保DPF实现高效可靠的再生。

关键词:柴油机;DPF;DOC;再生温度;控制策略

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)03-0016-06

引用格式:解同鹏,高翠,鹿文慧,等.基于模型的DPF再生温度控制策略开发及验证[J].内燃机与动力装置,2022,39(3):16-21.

XIE Tongpeng, GAO Cui, LU Wenhui, et al. Development and verification of control strategy for DPF regeneration temperature based on model [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(3):16-21.

0 引言

柴油机排气中含有大量的氮氧化物(NO_x)和颗粒物(particulate matter, PM),严重危害人体健康^[1-3]。文献[4]对柴油机尾气中颗粒物质量及数量提出了严格要求,减少柴油机PM排放最有效的技术是采用柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)。目前DPF多为壁流式结构,在布朗扩散与拦截机理的作用下,PM在壁面内部积聚、沉积,PM的不断累积造成DPF堵塞,导致排气背压增大,缸内燃烧恶化,油耗增加。因此当捕集的PM达到一定数量时,DPF需要进行主动再生,将吸附的PM烧掉,以恢复其过滤功能,DPF主动再生过程安全性和经济性的关键是再生过程的温度控制。

国内外对DPF再生温度控制进行了大量研究。文献[5]研究了DPF再生阶段的温度特性及影响因素,分析了不同再生温度对DPF再生效率的影响;文献[6]针对DPF热再生过程大惯性、大滞后特点,研究了基于排气温度和排气流量的增益补偿控制;文献[7]基于自抗扰控制(active disturbances rejection control, ADRC)设计了改进的延迟时间自适应复合控制系统;文献[8]研究了再生温度和再生时间对DPF内部颗粒物分布的影响;文献[9]研究了DPF中灰分对再生的影响;文献[10]研究了DPF再生温度场,以及峰值温度、温度梯度控制的重要性;文献[11]提出了一种闭环鲁棒性设计方法,基于城市驾驶工况验证了较好的抗扰能力;文献[12]研究了低负荷稳定工况下DPF再生时,进气节流阀开度、喷油提前角、喷油压力、后喷等主动控制策略对排气热管理的影响。

收稿日期:2021-10-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0211305)

第一作者简介:解同鹏(1985—),男,济南人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为发动机控制策略开发,E-mail:xietp@weichai.com。

关于 DPF 再生过程影响因素的研究有很多有价值的成果。本文中针对由柴油机氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)和 DPF 组成的后处理系统,建立基于化学反应动力学原理的温度模型,并将模型用于 DPF 再生温度的前馈和反馈控制,精确控制 DPF 的再生温度,降低 DPF 失效风险,提高再生效率。

1 试验装置

发动机试验台架总体布置示意如图 1 所示。

试验采用 ETAS INCA7.2 标定软件调节柴油机喷油及后处理控制策略,采用 AVL INDYS66JD 交流电力测功机测量转速和转矩,采用 AVL483 测量仪测量碳烟排放。

试验发动机为电控高压共轨、增压中冷、6 缸直列柴油机,柴油机主要技术参数如表 1 所示。

排气后处理系统由 DOC 和 DPF 组成,DOC 和 DPF 的主要参数见表 2。

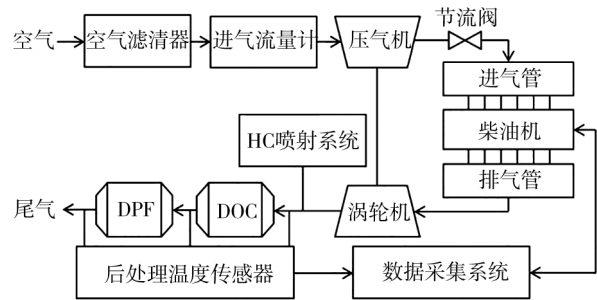


图 1 发动机试验台架示意图

表 1 柴油机主要技术参数

缸径/mm	行程/mm	总排量/L	压缩比	标定功率/kW	标定转速/(r·min ⁻¹)	最大转矩/(N·m)
110	130	7.5	17:1	200	2000	1000

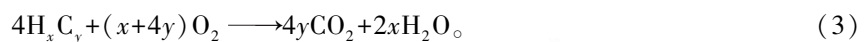
表 2 DOC 和 DPF 主要参数

后处理组成部件	载体材料	载体长度/mm	载体直径/mm	载体体积/L	孔密度/(个·cm ⁻²)
DOC	堇青石	150	260	6.5	62
DPF	堇青石	300	260	15.5	31

2 DOC 温度模型

2.1 DOC 反应机理

DOC 载体表面涂覆铂(Pt)、铑(Rh)、钯(Pd)等贵金属,可以有效降低反应温度。柴油机排气中的 CO、HC 及部分可溶性有机物(soluble organic carbon, SOC)在 DOC 的孔道内中与氧气反应生成 CO₂ 及 H₂O,同时放出热量提高 DPF 入口温度,为 DPF 主动再生创造条件。其中主要化学反应如下^[13]:



2.2 一维 DOC 温度场

DOC 轴向分割及温度传感器布置如图 2 所示。

将 DOC 沿轴向分割为 6 个单元(按气流方向分别记为 1、2、3、4、5、6)。每个单元的物理特性相同,燃油转化效率分别为 η_1 、 η_2 、 η_3 、 η_4 、 η_5 、 η_6 ,整个 DOC 的燃油转化效率

$$\eta = 1 - \prod_{k=1}^6 (1 - \eta_k). \quad (4)$$

在 DOC 进、出口(图中 A、B 位置)分别安装 2

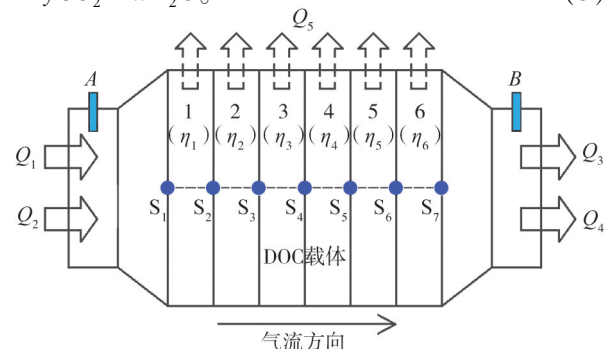


图 2 DOC 轴向分割、温度传感器布置及能量流向示意图

个PT200温度传感器,在DOC内部布置7支热电偶,分别标记为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 、 S_7 ,实时获取再生过程中DOC进、出口及每个单元进出口的温度;根据DOC入口燃油喷射量及下游的HC泄漏量,可计算得到每个单元的燃油转化效率。

2.3 DOC温度模型

DOC能量流向如图2所示,在DOC再生过程中,DOC与环境之间存在热传递和热传导^[14],其中热传导与热传递相比要小得多,此处忽略不计^[15]。

DOC入口排气热量

$$Q_1 = m_g c_g T_i, \quad (5)$$

式中: m_g 为排气质量,kg; c_g 为排气比热容,J/(kg·K); T_i 为DOC入口排气温度,K。

DOC入口喷射燃油所含热量

$$Q_2 = m_f H_f \eta, \quad (6)$$

式中: m_f 为DOC入口燃油喷射量,mg; H_f 为燃油热值,J/mg; η 为DOC的燃油转化效率。

DOC出口排气带走热量

$$Q_3 = m_g c_g T_o, \quad (7)$$

式中: T_o 为DOC出口排气温度,K。

DOC中未完全反应燃油所含热量

$$Q_4 = m_f H_f (1 - \eta)。 \quad (8)$$

DOC与环境热传递能量

$$Q_5 = \sum C_e (T_k - T_e), \quad (9)$$

式中: C_e 为环境热容,J/K; T_k 为每个单元温度,K; T_e 为环境温度,K。

DOC温度分布如图3所示。

将DOC出口的再生设定温度 T_d 作为最后一个单元的出口设定温度,只考虑每个单元与环境的热传递,从后向前依次计算出每个单元的出口设定温度:

$$T_k = T_{k+1} + ((T_{k+1} - T_e) f_e) / C_g, \quad (9)$$

式中: T_k 为 k 单元的出口设定温度,K; T_e 为环境温度,K; f_e 为DOC与环境的散热系数,J/K; C_g 为排气热容,J/K。

将DOC入口温度传感器采集温度作为第1个单元的入口温度 T_{1i} ,计算单位时间(1s)内第1个单元的需求燃油喷射量

$$q_1 = ((T_1 - T_e) f_e + (T_1 - T_{1i}) C_g) / H_f, \quad (10)$$

式中: T_1 为第1个单元的出口设定温度,K; T_{1i} 为第1个单元的入口温度,K; H_f 为燃油热值,J/mg。

根据 q_1 在第1个单元中的燃烧放热及第1个单元与环境的热传递,计算出更新后的第1个单元的出口温度 T_{1o} (即第2个单元的入口温度 T_{2i})。

$$T_{1o} = T_{2i} = (q_1 H_f \eta_1 + T_e f_e + T_{1i} C_e) / (f_e + C_g), \quad (11)$$

式中 η_1 为第1个单元的燃油转化效率。

从前向后依次计算单位时间内每个单元的需求燃油喷射量 q_k 及每个单元的出口温度,把最后一个单元的出口温度作为DOC出口模型计算温度,对 q_k 求和得到单位时间内需求的总燃油喷量作为前馈燃油喷射量 q 。单位时间内第6个单元的需求燃油喷射量、出口温度、总燃油喷射量分别为:

$$q_6 = ((T_6 - T_e) f_e + (T_6 - T_{6i}) C_g) / H_f, \quad (12)$$

$$T_{6o} = (q_6 H_f \eta_6 + T_e f_e + T_{6i} C_e) / (f_e + C_g), \quad (13)$$

$$q = \sum q_k, \quad (14)$$

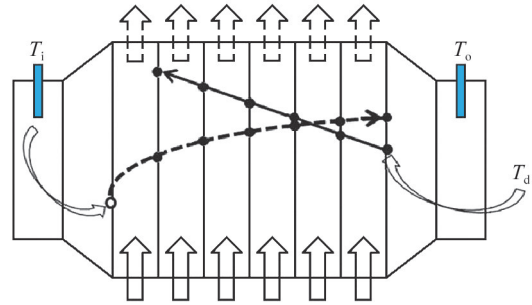


图3 DOC温度分布

式中: q_6 为第6个单元单位时间内需求燃油喷射量,mg; T_6 为第6个单元的出口设定温度,K; T_{6i} 为第6个单元的入口温度,K; η_6 为第6个单元的燃油转化效率; T_{6o} 为第6个单元的出口温度(即DOC出口模型计算温度),K; q 为单位时间内需求的总燃油喷射量,mg。

3 控制算法开发及验证

3.1 基于模型的闭环控制算法

按偏差的比例、积分、微分(proportion integral differential, PID)进行控制^[16]是一种工业过程控制中广泛应用的算法,应用于DPF再生温度控制的PID再生温度控制系统原理如图4所示。

PID控制参数相对独立,其控制律为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (15)$$

式中: t 为采样时间, $u(t)$ 为时间 t 的PID控制器输出函数, K_p 为比例系数, $e(t)$ 为时间 t 的偏差量输入函数, K_i 为积分常数, K_d 为微分常数。

由于DPF热再生过程具有大惯性、大滞后特点,PID参数整定困难很大,很容易引起响应速度慢或超调,甚至振荡;最大再生温度和温度梯度难以控制,DPF热失效风险及燃油消耗增大。本文中在传统PID控制基础上引入基于模型的前馈及反馈控制,基于模型的再生温度控制系统原理如图5所示。再生温度控制系统可精确控制DPF再生温度,提高再生效率,降低燃油消耗。

3.2 控制算法仿真分析

将DOC温度模型和再生温度控制算法在Simulink中构建并集成,基于台架输入数据(阶跃响应采集数据)进行联合仿真,模拟发动机瞬态过程,对PID控制参数进行系统整定及测试优化,以初步评估算法性能及控制品质,其中燃油热值设为41 J/mg,环境温度设为293 K,DOC与环境的散热系数与车速相关,仿真中设为0.2 J/K,由试验得到每个单元的燃油转化效率为0.4~0.7。根据排气质量流量和比热容计算得到的排气热容如图6所示,由温度传感器得到DOC入口温度如图7所示。

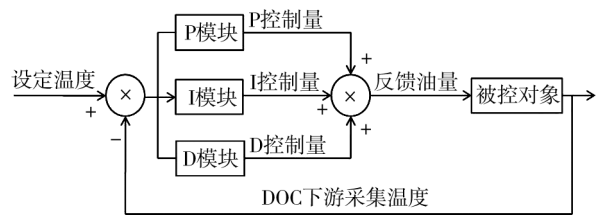


图4 PID再生温度控制系统原理图

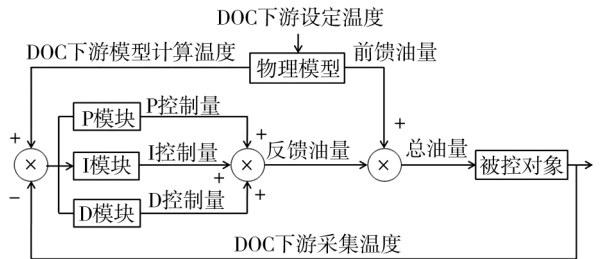


图5 基于模型的再生温度控制系统原理图

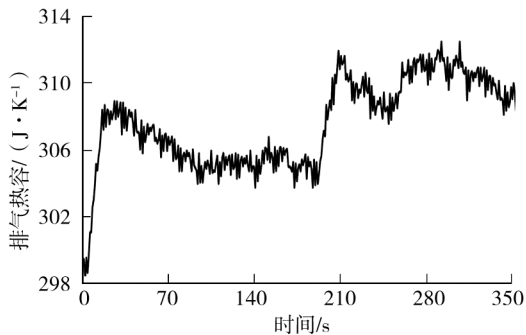


图6 排气热容

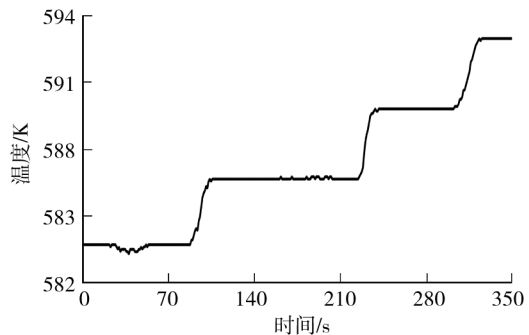


图7 DOC入口温度

DOC出口温度为593、723、873 K阶跃变化过程中,DOC内部各单元模型设定温度、实际温度、计算的需求燃油喷射率(前馈量+反馈量)如图8所示。其中723~873 K段,DOC内部各单元峰值温度为876.3 K,DOC内部各单元的需求燃油喷射率峰值为717 mg/s,满足设计要求。

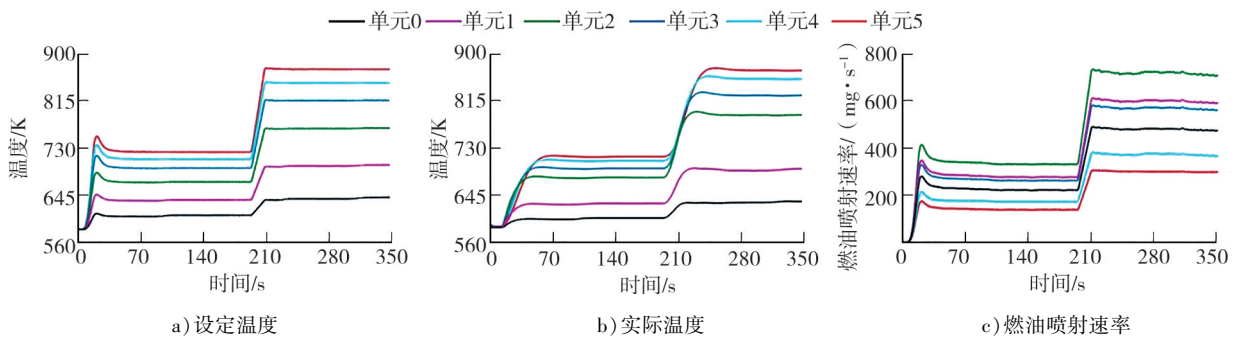


图8 DOC内部各单元设定温度分布、实际温度分布和需求燃油喷射速率

3.3 发动机台架试验验证

在发动机台架上模拟发动机瞬态过程,验证控制算法在实际应用的控制性能。DOC出口设定与实际温度、出口与入口实际温度以及DOC入口燃油喷射速率如图9所示。图9a)为出口设定温度分别为593~723 K、723~873 K、873~723 K各阶跃变化过程中的各阶段响应结果,其中设定温度为723~873 K,阶跃响应上升时间(DOC出口实际温度从738 K上升到858 K所需时间)为28 s,调节时间(DOC出口实际温度到达865.5 K所需时间)为132 s,无超调;图9b)为阶跃响应过程中DOC出、入口实际温度对比,DOC入口实际温度为583~593 K,温度波动率为3%;图9c)为阶跃响应过程中DOC入口燃油喷射速率,可知最大入口燃油喷射速率为2946 mg/s。

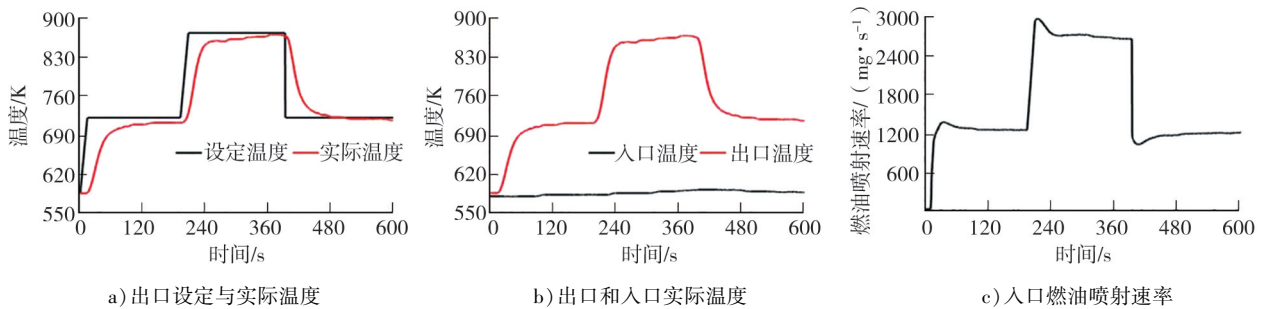


图9 DOC出口设定与实际温度、出口和入口实际温度以及入口燃油喷射速率

4 结语

将基于DOC中化学反应动力学原理建立的再生温度模型用于DPF再生温度前馈及反馈控制,通过仿真试验评估控制策略的效果,及时完善策略及数据标定。这种基于模型的控制策略开发方法能够显著缩短开发周期,提高策略开发效率,降低DPF失效风险,节约开发成本;对DPF再生温度控制策略进行仿真并通过发动机台架试验验证策略的控制效果,仿真和试验结果均表明,温度控制过程中具有很好的动态性能及稳态性能,最大温度及燃油喷射量都在限定范围内,基于模型的DPF再生温度控制策略可用于精准跟踪和控制再生温度,使DPF再生安全可靠。

参考文献:

- [1] 贺泓,翁端,资新运. 柴油机尾气排放污染控制技术综述[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1169-1177.
- [2] 钟祥麟,于全顺,高忠明,等. 基于模型的柴油机排放预测技术[J]. 内燃机与动力装置, 2021, 38(5): 27-33.
- [3] 王利平,国丽,郭红莉,等. 柴油机排放颗粒物试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2019, 36(5): 35-38.
- [4] 生态环境部. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段): GB 17691—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版

- 社,2018.
- [5]石秀勇,蒋得刚.柴油机颗粒捕集器再生温度预测模型[J].农业工程学报,2019,35(20):17-24.
- [6]黄铁雄,胡广地,郭峰,等.DPF热再生过程温度控制与试验[J].内燃机学报,2020,38(3):257-264.
- [7]NING Jinbiao, YAN Fengjun. Composite control of DOC-out temperature for DPF regeneration[J]. IFAC-Papers on Line, 2016,49(11):20-27.
- [8]TSUJIMOTO D, KUSAKA J, FUKUMA T. Modeling and controlling active regeneration of a diesel particulate filter[C]//SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Detroit, USA: SAE International,2020.
- [9]LIU Yi, SU Changsheng, CLERC J, et al. Experimental and modeling study of ash impact on DPF backpressure and regeneration behaviors[C]//SAE 2015 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE International,2015.
- [10]TONG Dehui, ZHANG Jun, WANG Guoyang, et al. Experimental study and numerical interpretation on the temperature field of DPF during active regeneration with hydrocarbon injection[C]//WCX World Congress Experience. Detroit, USA: SAE International,2018.
- [11]ECK C, NAKANO F. Robust DPF regeneration control for cost-effective small commercial vehicles [C]//13th International Conference on Engines & Vehicles. Detroit, USA:SAE International,2017.
- [12]BAI Shuzhan, CHEN Guobin, SUN Qiang, et al. Influence of active control strategies on exhaust thermal management for diesel particular filter active regeneration[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,119:297-303.
- [13]刁庆华.面向控制的DOC建模研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [14]张鹏超,宋崇林,吴兆刚,等.DPF主动再生过程中缸内远后喷策略对柴油机排放及DOC升温特性的影响[J].内燃机工程,2018,39(3):45-52.
- [15]陈栋栋,彭丽娟,李云华,等.基于DoE的柴油机排气能量管理优化[J].内燃机与动力装置,2021,38(4):9-14.
- [16]胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2019.

Development and verification of control strategy for DPF regeneration temperature based on model

XIE Tongpeng^{1,2}, GAO Cui^{1,2}, LU Wenhui^{1,2}, ZHANG Shanxing^{1,2}, LI Lanju^{1,2}

1. The State Key Laboratory of Reliability of Engine, Weifang 261061, China; 2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to accurately control the regeneration temperature of diesel particulate filter (DPF) and avoid DPF failure caused by malfunction regeneration, a regeneration temperature model based on the principle of chemical reaction kinetics is established on the post-treatment system consist of diesel oxidation catalyst (DOC) and DPF. Based on DOC temperature model and regeneration temperature control algorithm, the DPF regeneration temperature feedforward and feedback control strategies are designed; the control strategy is co-simulated based on the engine bench test data, and the control parameters are optimized; the actual performance of the control strategy is verified by transient and steady state tests. The simulation and bench test results indicate that the DPF regeneration temperature control strategy shows good dynamic and steady-state performance, and the maximum peak temperature and fuel injection volume are controlled within a limited range to ensure efficient and reliable regeneration of DPF.

Keywords: diesel engine; DPF; DOC; regeneration temperature; control strategy

(责任编辑:张啸虎)