

国六重型柴油机排气热管理技术

李明星¹, 张腾^{2*}, 邹利宁², 周承忠¹, 黎幸荣¹

1. 广西玉柴机器股份有限公司, 广西 玉林 537005; 2. 长城汽车股份有限公司, 河北 保定 071000

摘要:为有效提高发动机排气温度和选择性催化还原器(selective catalytic reduction, SCR)入口温度,以某款国六重型柴油机为研究对象,根据排气温度分布特征将缸内燃烧控制区域划分为若干区间,每个区间制定差异化的温度控制策略;通过试验验证进气节流阀调控和燃烧参数优化两种排气热管理技术的效果,在此基础上设计集成了 SCR 自动加热模式的发动机自适应排气热管理策略,并开展发动机台架冷态世界统一瞬态循环(world harmonized transient cycle, WHTC)试验和高原复杂路况实车验证试验,评估热管理策略的实际效果。结果表明:后喷油量、后喷正时对排气温度的影响明显大于轨压、主喷正时、预喷正时;后喷油量和后喷正时增大,排气热管理效果逐步增强;当进气节流阀的关闭度不低于 70% 时,排气温度随进气节流阀的关闭度增大呈升高趋势;发动机在中、高负荷运行时,可以通过优化后喷油量和后喷正时等燃烧参数的方法达到较好的热管理效果;低负荷及 0 负荷工况下,通过进气节流阀调控并耦合优化燃烧参数的策略可以实现良好的排气热管理效果;冷态 WHTC 工况下,发动机平均排气温度提高约 20 °C,在 WHTC 加权平均油耗增长率仅为 4% 的前提下,NO_x 比排放大幅降低(降幅约为 30%);高原长下坡工况下,SCR 入口温度可长时间维持在 370 °C 左右。设计的自适应排气热管理策略可使发动机在冷机、高原、低温等恶劣工况下具有良好的热管理效果。

关键词:柴油机;排气热管理;SCR;燃烧参数;进气节流阀

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)03-0010-09

引用格式:李明星,张腾,邹利宁,等. 国六重型柴油机排气热管理技术[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(3):10-18.

LI Mingxing, ZHANG Teng, ZOU Lining, et al. Exhaust thermal management technology for a CHINA VI heavy-duty diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(3):10-18.

0 引言

随着我国机动车排放标准的逐步升级,对汽车尾气排放限值和检测方法提出了严格的要求。以重型柴油发动机为例,自国五排放标准实施以来,其排放测试工况逐步接近实际道路运行情况,发动机台架测试工况已采用世界统一瞬态测试循环(world harmonized transient cycle, WHTC),同时要求车辆配备便携式排放测量系统(portable emission measurement system, PEMS),进行实际道路整车尾气检测,确保排放数据更加真实可靠。WHTC 测试工况具有低速低负荷特征,且其动态响应性较传统测试工况显著提高。其中,负荷率小于 10% 的工况(含倒拖工况)占比接近 30%^[1],负荷率小于 30% 且发动机排气温度较低的工况占比大于 40%。这对采用氧化催化剂(diesel oxidation catalyst, DOC)-颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)-选择性催化还原器(selective catalytic reduction, SCR)-氨逃逸催化器(ammonia slip catalyst, ASC)后处理技术路线发动机排放控制提出了更高的要求。发动机排气温度直接影响后处理系统工作效

收稿日期:2025-04-15

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科 AB25069404)

第一作者简介:李明星(1985—),男,湖北仙桃人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为柴油设计与开发,E-mail: limingxing@yuchai.com。

***通信作者简介:**张腾(1989—),男,河北衡水人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为发动机开发及应用,E-mail: zhant_666@163.com。

率,较低的发动机排气温度可导致尿素结晶、后处理系统工作效率下降;较高的发动机排气温度需要消耗更多的燃料,降低发动机的经济性。在柴油机后处理系统中,通常采用降低空燃比或电加热等技术实现 SCR 载体的快速升温。但当发动机长时间在低速低负荷状态下运行时,由于 SCR 载体频繁经历“加热-冷却”循环过程,导致发动机油耗显著增加^[2-3]。这种“低温失效-高温耗能”的矛盾特性,凸显了发动机热管理技术在排放控制与经济性平衡中的重要作用。

快速提高低速低负荷工况下发动机的排气温度,充分提高 SCR 后处理系统的转化效率,已成为国六重型柴油机排放控制中的研究重点和难点。当前,发动机废气热管理技术涵盖进排气节流、主喷正时推迟、废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)等。王建等^[3-4]研究发现:采用进排气节流技术后,随着节流阀开度减小,柴油机排气温度、 NO_x 排放和碳烟排放均升高,最低燃油消耗率增大;采用燃油后喷技术后,柴油机排气温度升高较快, NO_x 排放随后喷油量和后喷正时增大而降低,碳烟排放呈现先降低后升高的趋势。Bai 等^[5]系统研究了进气节流、主喷正时、喷油压力和喷油策略对柴油机排放的影响,研究表明:减小节气门开度、推迟后喷正时和增大后喷油量可以提高发动机排气温度,但是调节主喷正时和喷油压力对提高排气温度的作用较小。

发动机排气热管理策略虽能有效提高发动机排气温度和 SCR 入口温度,但也可能导致发动机的经济性和排放性下降。对此,本文中以某国六重型柴油机为研究对象,基于 WHTC 台架试验和实际道路整车试验开展发动机热管理研究。通过优化发动机热管理策略,确保 SCR 系统长时间处于高效工作温度区间,在稳定满足国六排放标准的同时兼顾发动机燃油经济性。

1 试验对象及方法

试验用高压共轨柴油发动机的最大喷射压力为 200 MPa,最多可支持 7 次喷射,通过采用外部高压冷却 EGR 系统和高效低惯量增压器抑制尾气中 NO_x 及颗粒物(particulate matter, PM)的生成,配合 DOC、DPF 和 SCR 组成的后处理系统对尾气进行二次处理,可以满足国六 b 排放标准要求。试验用柴油机主要参数如表 1 所示。

表 1 试验用柴油机主要参数

排量/L	最大扭矩/(N·m)	最大扭矩转速/(r·min ⁻¹)	额定功率/kW	额定功率转速/(r·min ⁻¹)	技术路线
7.7	1 400	1 000~1 700	257	2 200	EGR-DOC-DPF-SCR

发动机采用进气节流阀耦合缸内燃烧控制的排气热管理技术路线。发动机排气热管理和排放技术路线示意图如图 1 所示。

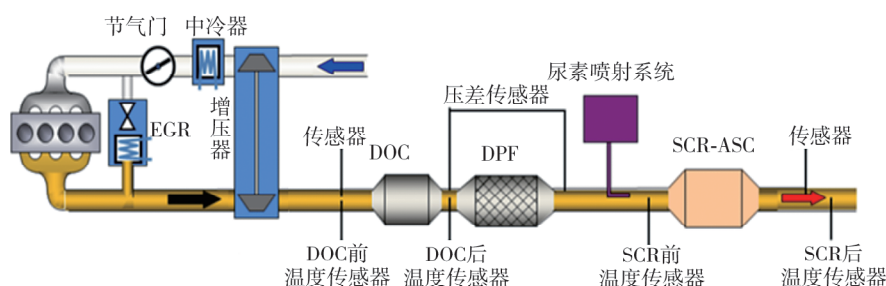


图 1 发动机排气热管理和排放技术路线示意图

根据排气温度分布特征将缸内燃烧控制区域划分为若干区间,并针对每个区间制定差异化的温度控制策略;通过试验验证进气节流阀调控和燃烧参数优化两种排气热管理技术的效果,在此基础上设计发动机自适应排气热管理策略;基于 WHTC 测试工况开展发动机台架试验,选取某型柴油重卡在苛刻道路

环境下进行整车试验,考核排气热管理策略的实际效果。最终根据台架与整车试验数据,系统构建适用于发动机在不同工况下的热管理优化策略体系。

2 稳态工况试验研究

2.1 发动机排气温度分布

不同工况下发动机排气温度分布万有图如图2所示,图中排气温度单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。由图2可知:发动机排气温度分布范围较广,随着发动机转速和负荷增大,排气温度逐渐升高;高速大转矩工况下发动机最高排气温度为 515°C ,低速低转矩工况下的最低排气温度为 194°C ,最高温度和最低温度相差 321°C 。

这种排气温度显著差异主要源于发动机喷油量变化对缸内燃烧过程的影响。低速低负荷工况时发动机喷油较少,缸内燃烧产生的热量较少且排气量降低,因此发动机排气温度(即SCR的温度)较低;高速大负荷工况运行时发动机喷油增加,燃烧更加充分,产生较多热量的同时排气量增加,因此发动机排气温度较高^[6]。

另外,发动机沿外特性曲线运行时排气温度最高,原因:在外特性工况下,随发动机输出转矩增大,循环喷油量相应增加,缸内燃烧更加剧烈,释放的热量显著增多,发动机排气流量随之增大,排气温度明显升高。

2.2 发动机运行工况分区控制策略

为提高发动机排气温度,确保SCR系统的高效转化,应根据发动机工况进行分区排气热管理,优化发动机综合性能。

根据发动机排气温度的分布特征,综合考虑不同工况下的经济性、动力性及排放性,将发动机运行工况划分为4个区域,并针对各区域的排气温度制定差异化的排气热管理策略,如图3所示。

区域①、③为发动机外特性区间,负荷较高,排气温度高于 350°C ,SCR载体温度较高;区域②、④是进行发动机WHTC排放测试和整车实际道路PEMS排放测试的常用工况。

区域①为空燃比和烟度优化控制区,该区域工况下,发动机排气温度处于SCR载体最佳工作温度范围,热管理策略重点以空燃比精确调控为主,同步优化碳排放。

区域②为常用排放性能控制区,该区域工况下,发动机处于高速高负荷运行状态,排气温度为 $300\sim 450^{\circ}\text{C}$,对SCR载体工作温度影响显著。在此工况区域下,发动机排气温度受喷油量和进气量等常规燃烧参数影响较小,主要取决于发动机缸内燃烧状态。针对区域②工况的排气热管理策略应首先保证发动机的进气量充足,常规措施为调节进气节流阀开度,但这种热管理方法的调节作用较小,所以应通过优化燃烧参数进行发动机热管理^[7]。

区域③为发动机保护控制区,该区域工况下,发动机功率和转矩显著提高,排气温度较高,甚至可能超出其耐受上限,需重点监控热机械负荷。但是,在WHTC排放测试和实际道路PEMS排放测试时,发动机在这个区域工况的运行时间占比仅为 $3.5\%\sim 5.0\%$,因此该区域可以不进行热管理或者简化热管理。

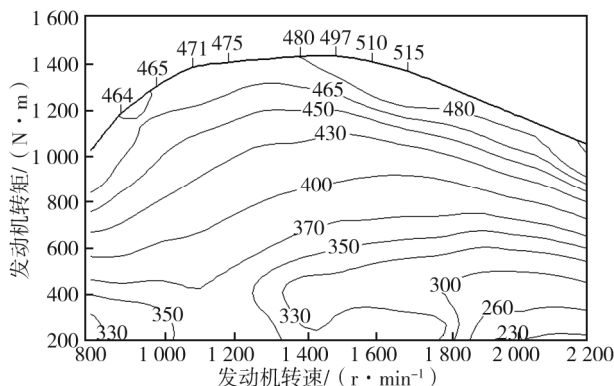


图2 发动机排气温度分布万有图

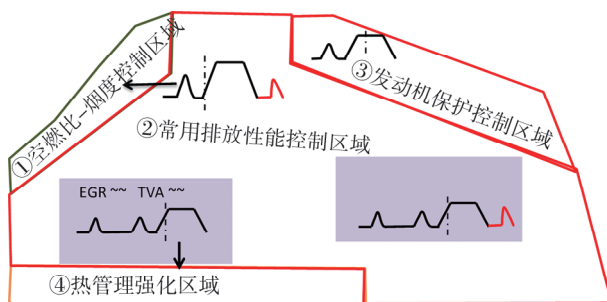


图3 发动机不同区域划分

区域④为热管理强化区域,该区域工况下,发动机处于低速低负荷运行状态,缸内燃烧恶劣,排气温度通常低于 200 ℃。受限于较低的进气量,单纯优化燃烧参数无法提高发动机排气温度,因此需要通过进气节流阀与燃烧参数协同优化的方式,减少发动机进气量,降低发动机空燃比,提高发动机排气温度^[8]。

3 发动机热管理过程控制

3.1 全工况燃烧参数优化

在区域②内,选取若干典型工况点,重点针对影响发动机缸内燃烧过程的 5 个关键参数(轨压、主喷正时、预喷正时、后喷正时、喷油量)进行稳态燃烧优化。考虑到影响缸内燃烧过程的控制参数众多且相互耦合,为在保证优化效果的同时有效减少试验工作量,采用 D-优化与试验设计(design of experiment, DoE)相结合的优化方法,D-优化方法主要用于确定各控制参数的最优目标,在确保满足核心优化目标的前提下,协调控制其他相关参数以实现整体性能的最优匹配。本文中以发动机排气温度大于 250 ℃ 为优化目标,要求在满足发动机关键性能指标(最高燃烧压力、燃烧噪声、碳烟排放、污染物排放等)的前提下,达到经济性最优。

对比稳态热管理试验结果可知:1)后喷油量、后喷正时对发动机排气温度的影响明显大于轨压、主喷正时、预喷正时,且随着后喷油量和后喷正时增大,废气热管理效果逐步增强;2)优化燃烧参数后,发动机在中小负荷工况下的排气温度平均提高约 10 ℃,NO_x 比排放降低约 0.5 g/(kW·h);发动机在中高负荷工况下排气温度的升幅更大,且 NO_x 比排放进一步下降。主要原因为:后喷正时较小时,发动机的后喷燃油进入主喷阶段,导致发动机的燃烧中心前移,缸内燃烧温度上升,排气温度降低,此时若后喷油量增加,缸内燃烧温度和 NO_x 排放进一步升高^[9]。后喷正时较大时,后喷油束惯性诱导缸内混合气产生扰动,促进燃油与空气充分混合,形成明显的扩散燃烧,燃烧中心后移,滞燃期延长,混合气燃烧放热量减小,排气温度显著升高;后喷正时延迟还使发动机涡轮增压压力升高,进一步增加进气量,缸内燃烧温度进一步降低,局部高温混合气区域减少,有效抑制了 NO_x 生成^[10]。稳态热管理优化前、后排气温度对比如图 4 所示,图中,排气温度单位为 ℃,转矩百分比为实际转矩与额定转矩的比。

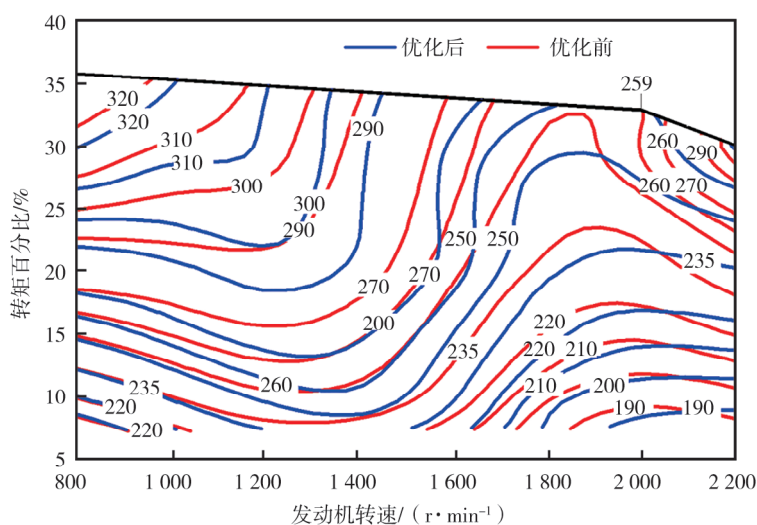


图4 稳态热管理优化前、后排气温度对比

当后喷油量和后喷正时过大时,可造成污染物排放升高和燃油经济性下降。相比主喷阶段,后喷阶段缸内氧气浓度已显著降低,燃油难以获得充分氧气参与燃烧,其燃烧效率明显低于主喷;后喷油量比例增加加剧燃烧不充分现象;后喷正时增大,燃烧中心后移,缸内温度和压力下降,燃油燃烧速率减慢,燃烧效率进一步下降。此时,排气温度不一定升高,但碳烟等发动机其他污染物排放上升。此外,发动机后喷油量增加使主喷油量减小,进而降低发动机输出转矩。为满足文献[1]对转矩响应性的要求,需增大每

循环喷油量补偿转矩损失,导致燃油消耗量随之增加^[11]。因此,确定后喷油量和后喷间隔角时必须综合考虑排放性能、燃油经济性、动力性等多方面的约束条件^[12-13]。

3.2 发动机减速过程排气热管理优化

WHTC 测试工况下,发动机运行会出现负荷率小于 10% 的低负荷工况和倒拖工况,即图 3 中区域④所示位置。这两个工况的发动机排气温度较低,SCR 载体温度也较低,是发动机排气热管理重点优化的区域。区域④的典型工况之一为发动机减速运行瞬态断油工况。该工况下,缸内燃烧几乎停止,燃烧产生的排气热量非常低。

发动机转速为 1 000、1 200 r/min 两个典型工况下,负荷率分别为 5% (转矩为 60 N·m) 和 0 时,进气节流阀开度对发动机进气流量、排气温度和进气口绝对压力的影响如图 5 所示。

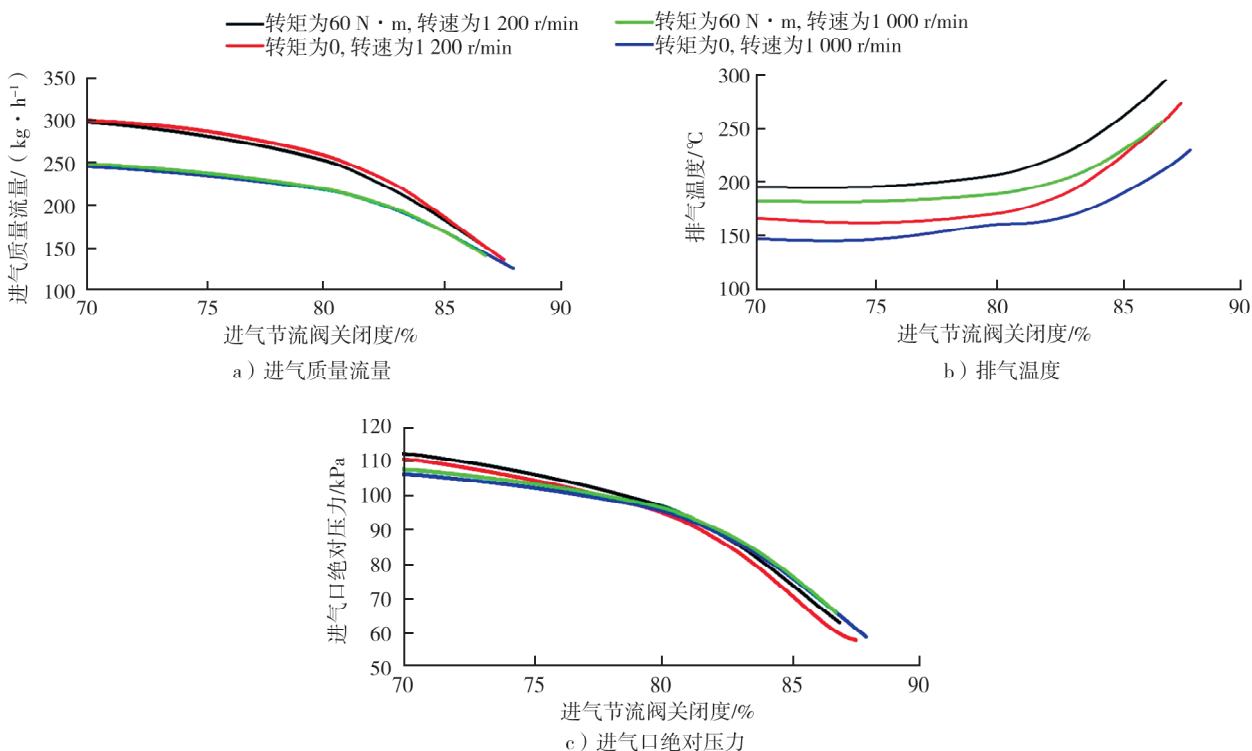


图5 不同转速和负荷率时,进气节流阀开度对发动机进气流量、排气温度、进气口绝对压力的影响

由图 5a) 可知:当进气节流阀的关闭度小于 70% 时,发动机进气质量流量无明显变化,当进气节流阀关闭度大于等于 70% 时,进气节流效果开始显现,发动机进气质量流量随进气节流阀关闭度增大不断降低,有利于提高发动机排气温度。

由图 5b) 可知:当进气节流阀的关闭度大于等于 75% 时,发动机排气温度随进气节流阀的关闭度增大呈上升趋势;节流阀关闭度约大于 82% 时,发动机的排气温度升高较快;进气节流阀关闭度接近 90% 时,即使负荷率为 0 时,发动机的绝对排气温度也超过 200°C ,且与关闭度为 70% 时相比,发动机排气温度升幅超过 70°C 。低速低负荷工况下,增大进气节流阀关闭度可显著提高发动机排气温度。这是因为:增大进气节流阀关闭度后,发动机进气质量流量减小,空燃比降低,缸内混合气浓度和放热量增大,使排气温度明显升高;进气质量流量减小导致发动机缸内的工质减少,工质比热容和吸热能力降低,使排气温度上升^[14-15]。基于进气节流阀的优化控制,协同调节燃烧参数(包括后喷油量及后喷正时),将燃烧过程控制在最佳工作区间,可显著提高缸内燃烧热效率。该策略使发动机在低速低负荷工况下仍能维持较高的排气温度,有效避免 SCR 载体因排气温度不足导致的催化效率下降问题。

进气节流阀开度存在最优区间,并非越大越好。过度的节流作用可造成以下问题:1) 发动机泵气损失显著增大,低负荷工况下尤为明显,极端情况下可引发进气口绝对压力低于大气压的异常状况;2) 新鲜

充量显著减少,空燃比进一步降低,缸内混合气的均质化程度降低。这些影响增大了缸内局部高温缺氧区域的生成概率,最终导致碳烟排放显著上升。

由图 5c)可知:当进气节流阀关闭度达到 88%时,发动机的进气口绝对压力降至 60 kPa,此时的负压约为-40 kPa。这对发动机运行产生双重负面影响:1)涡轮增压器因进气流量不足更易进入喘振区运行,瞬态工况(如频繁加减速)下喘振风险显著增加^[16];2)进气系统与曲轴箱之间形成较大压差,促使机油通过活塞环间隙窜入燃烧室,引发发动机烧机油问题。因此,在对发动机进行热管理策略的优化过程中,应对进气节流阀开度进行约束,确保进气口绝对压力不低于 70 kPa。

4 瞬态工况试验研究

4.1 自适应排气热管理策略

发动机热管理系统控制策略应根据排气温度进行优化决策。当发动机运行在特定排气温度区间时,控制系统需要综合评估是否启用热管理策略以及选择何种热管理方案。进气节流阀调控、燃烧参数优化两种热管理方法均可提高发动机排气温度,但是同样会导致发动机动力性能下降、燃油消耗上升,因此应在兼顾发动机经济性、动力性、排放性的基础上,对发动机进行科学的废气热管理控制,保证发动机的整体使用效益最大化。

本文中设计基于排气温度的发动机自适应排气热管理策略,控制逻辑如图 6 所示。设计的热管理策略在普通发动机排气热管理策略的基础上新增 SCR 自动加热模式,实现热管理系统的功能扩展和性能优化。该策略设定 SCR 载体温度低、高阈值 A、B,当 SCR 载体实际温度低于 A 时,发动机进入 SCR 快速加热状态,发动机排气温度快速升高,保证 SCR 后处理催化器具备足够的转化效率;当载体实际温度高于 B 时,催化器的温度较高可保证足够的转化效率,发动机由 SCR 加热状态切换回正常模式;当 SCR 载体实际温度在运行过程中再次低于 A 时,重新触发 SCR 加热模式。该排气热管理策略可实现发动机在冷机、高原、低温等恶劣工况下的热管理自适应调整,保证发动机排放满足国六标准,同时兼顾发动机的动力性和经济性^[17]。

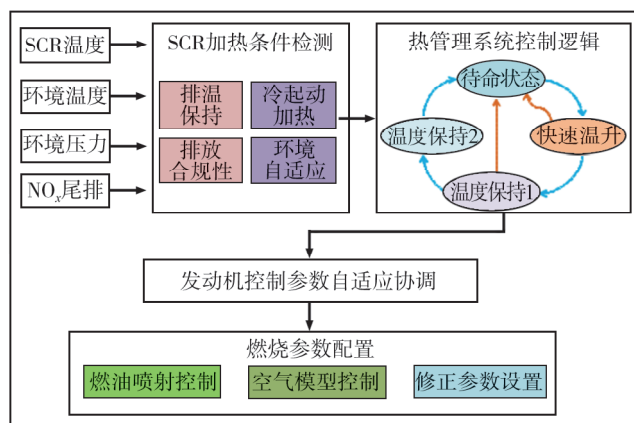


图6 发动机自适应排气热管理策略逻辑图

4.2 冷态 WHTC 工况排气热管理效果验证

根据文献[1]的要求,发动机冷态 WHTC 测试需要满足以下条件:环境温度控制在 25 ℃,大气压力维持在 100 kPa,发动机冷却液初始温度稳定在 25 ℃。在冷态 WHTC 测试的初始阶段,SCR 载体温度亦为 25 ℃,远低于尿素喷射阈值,尿素泵无法启动喷射尿素,无法将发动机尾气中的 NO_x 催化转化为无害气体。

进行发动机冷态 WHTC 台架试验,对比分析发动机自适应排气热管理策略优化前、后 SCR 载体入口温度的变化,结果如图 7 所示。由图 7 可知:SCR 加热状态持续时间约 460 s,平均排气温度提高约 20 ℃;自适应热管理策略启动后,在尿素喷射条件不变的前提下(SCR 入口温度首次达到 200 ℃),尿素喷射时

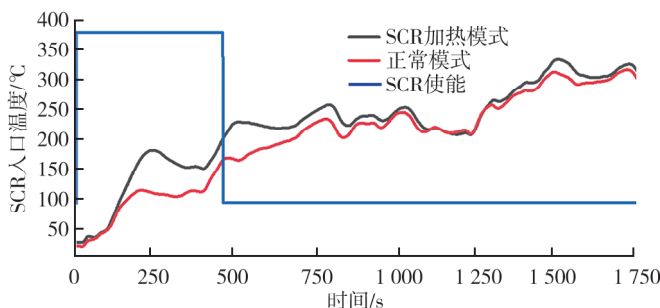


图7 冷态 WHTC 工况下发动机自适应排气热管理策略优化前、后 SCR 入口温度对比

刻可以从第 694 秒提前至第 460 秒,尿素喷射提前 234 s。

冷态 WHTC 工况下,自适应排气热管理策略优化前、后发动机排放性能及经济性能对比如表 2 所示。由表 2 可知:启动自适应排气热管理策略后,冷态 WHTC 测试下,NO_x 比排放降低约 30%,WHTC 加权平均油耗仅提高约 4%。

表 2 冷态 WHTC 工况下自适应排气热管理策略优化前、后发动机排放性能及经济性能对比

排气热管理模式	NO _x 比排放/[g·(kW·h) ⁻¹]	加权平均油耗增长率/%	SCR 载体平均温度/℃	尿素首次起喷时间/s
正常模式	1.414		185.0	694
自适应模式	0.966	4	204.6	460

注:油耗增长率为自适应排气热管理模式油耗和正常模式油耗的差与正常模式油耗之比。

综上,启动发动机自适应排气热管理策略后,发动机排气温度上升速率较快,尿素泵喷射时间大幅提前,在油耗小幅增加的前提下显著降低 NO_x 比排放。

4.3 高海拔实际整车排气热管理效果验证

高原地区道路路况复杂且上、下坡路段较多,汽车在行驶过程中需频繁加减速,发动机排气温度难以维持稳定。为进一步验证发动机自适应排气热管理策略对 SCR 载体温度的提高效果,在海拔 2 400 m 的高原地区选取了一段长度为 6 km、海拔变化小于 50 m 的连续长下坡路段进行整车试验验证。为了减少外界影响,采用配置相同的两辆柴油重卡进行测试,对比分析自适应排气热管理策略启动前、后,SCR 后处理入口和出口温度的变化,结果如图 8 所示。

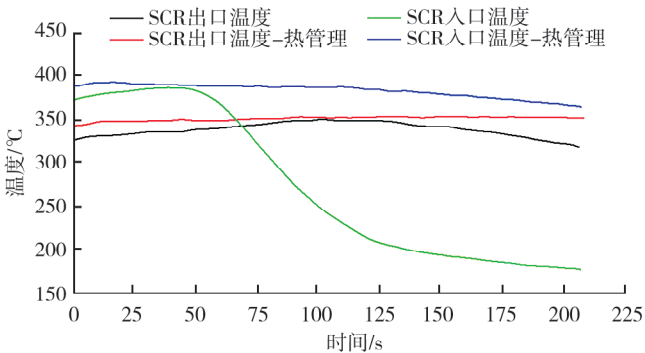


图 8 实际道路废气热管理策略效果

由图 8 可知:自适应排气热管理策略启动前、后,SCR 出口温度变化不大;未启动自适应排气热管理策略时,SCR 入口温度在 100 s 内由 370 ℃下降到 200 ℃以下,表明随着排气温度降低,排气热量已难以维持 SCR 后处理系统温度;自适应热管理策略启动后,SCR 入口温度在 200 s 内基本不变(约为 370 ℃),表明发动机自适应排气热管理策略可在高原复杂道路条件下持续保持较高 SCR 载体温度,确保 SCR 系统在运行过程中维持稳定且保持高效的 NO_x 转化效率。

5 结论

为有效提高发动机排气温度和 SCR 入口温度,以某款国六重型柴油机为研究对象,设计发动机自适应排气热管理策略,并进行发动机台架冷态 WHTC 试验和高原复杂路况整车试验,评估排气热管理策略的实际效果。

1) 后喷油量、后喷正时对排气温度的影响明显大于轨压、主喷正时、预喷正时,且随后喷油量和后喷正时增大,排气热管理效果逐步增强。优化燃烧参数后,发动机在中小负荷工况下的排气温度平均提高约 10 ℃,NO_x 比排放降低约 0.5 g/(kW·h);发动机在中高负荷工况下排气温度的升幅更大,且 NO_x 比排放进一步下降。

2) 进气节流阀关闭度小于 70% 时,发动机进气质量流量无明显变化;当关闭度大于等于 70% 时,排气温度呈上升趋势。

3) 发动机中、高负荷工况,优化燃烧参数尤其是缸内后喷射参数的排气热管理策略可提高排气温度;低速低负荷工况,需要通过进气节流阀调控耦合燃烧参数优化的排气热管理策略;外特性工况,可不采用

排气热管理策略。

4) 发动机在低负荷及0负荷区域运行时的热管理目标是保持SCR催化剂温度,通过科学调节进气节流阀开度,可实现在进气口绝对压力不低于70 kPa的条件下维持SCR催化剂温度。

5) 设计的自适应排气热管理策略在普通热管理策略的基础上集成SCR自动加热模式。启动自适应排气热管理策略后,冷态WHTC工况下,发动机排气温度平均提高约20℃,WHTC加权平均油耗提高4%,而NO_x比排放可降低约30%。在高原长下坡工况下,SCR入口温度基本维持在下坡前的370℃。

设计的自适应排气热管理策略在冷机、高原、低温等恶劣工况下能自适应调整发动机热管理控制参数,确保发动机排放满足国六标准需求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周鹏,杨荣彬,侣庆涛,等. 柴油机热管理策略研究与优化[C]//中国汽车工程学会. 2020 中国汽车工程学会年会论文集(3). 上海:中国汽车工程学会,2020:5.
- [3] 王建,曹政,张多军,等. 基于柴油机排气热管理的喷油策略控制试验研究[J]. 车用发动机,2018(2):79-86.
- [4] 王建,许鑫,顾晗,等. 基于排气热管理的柴油机氧化催化剂升温特性[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(2):408-416.
- [5] BAI S Z, CHEN G B, SUN Q, et al. Influence of active control strategies on exhaust thermal management for diesel particulate filter active regeneration[J]. Applied Thermal Engineering,2017,119:297-303.
- [6] SUN K, LI D, LIU H, et al. Influence of diesel engine intake throttle and late post injection process on the rise of temperature in the diesel oxidation catalyst[J]. Fluid Dynamics & Materials Processing,2020,16(3):573-584.
- [7] 余永华,陈永辉. 基于欧VI排放标准的中型柴油机排气热管理试验研究[J]. 柴油机,2017,39(5):12-16.
- [8] 黄粉莲,朱玉,万明定,等. 基于进气节流耦合后喷策略的柴油机排气热管理[J]. 农业工程学报,2024,40(2):196-207.
- [9] 李明星,王辉,周道林,等. 后喷射改善轻型商用车柴油机排放的应用[J]. 车用发动机,2011(4):74-77.
- [10] 甘波,陈光利,王鹏,等. 后喷参数对柴油机燃烧与排放特性的影响[J]. 汽车工程,2014,36(10):1197-1199.
- [11] WU B Y, JIA Z, LI Z G, et al. Different exhaust temperature management technologies for heavy-duty diesel engines with regard to thermal efficiency[J]. Applied Thermal Engineering,2021,186:116495.
- [12] 姜伟波,姜斌,皮邵辉,等. 预喷和后喷时刻对柴油机燃烧与排放特性的影响[J]. 内燃机,2022,38(4):1-7.
- [13] 王奎. 国VI高压共轨柴油机喷油特性参数对燃烧及排放的影响研究[D]. 温州:温州大学,2020.
- [14] 万明定,聂学选,毕玉华,等. 不同大气压力下进/排气节流对SCR性能的影响[J]. 内燃机学报,2023,41(3):263-270.
- [15] 王金豪,毕玉华,申立中,等. 高原环境下进排气节流对柴油机性能的影响[J]. 内燃机工程,2022,43(3):36-44.
- [16] 刘浩. 满足DPF主动再生温度的热管理策略研究[D]. 济南:山东大学,2022.
- [17] 刘光义,孙德增,郎斌扬,等. 柴油机WHTC冷起动过程SCR温度热管理技术研究[J]. 内燃机工程,2017,38(6):145-151.

Exhaust thermal management technology for a CHINA VI heavy-duty diesel engine

LI Mingxing¹, ZHANG Teng^{2*}, ZOU Lining², ZHOU Chengzhong¹, LI Xingrong¹

1. Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Yulin 537005, China; 2. Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding 071000, China

Abstract: In order to effectively improve the engine exhaust temperature and selective catalytic reduction (SCR) inlet temperature, a certain China VI heavy-duty diesel engine is taken as the research object. Based on the

distribution characteristics of exhaust temperature, the combustion control area in the cylinder is divided into several intervals, and differentiated temperature control strategies are formulated for each interval. Based on the experimental verification of the effects of two exhaust thermal management technologies, namely intake throttle valve regulation and combustion parameter optimization, an adaptive exhaust thermal management strategy for the engine integrated with SCR automatic heating mode is designed. Engine bench cold world unified transient cycle (WHTC) tests and high-altitude complex road condition real vehicle verification tests are conducted to evaluate the actual effectiveness of the thermal management strategy. The results show that the influence of post injection quantity and post injection timing on exhaust temperature is significantly greater than that of rail pressure, main injection timing, and pre-injection timing. Furthermore, as the post injection quantity and timing increase, the exhaust thermal management effect gradually strengthens. When the closing degree of the intake throttle valve is not less than 70%, the exhaust temperature shows an upward trend with the increase of the closing degree of the intake throttle valve. When the engine operates at medium to high loads, it can achieve good thermal management effects by optimizing combustion parameters such as fuel injection quantity and timing. Under low load and zero load conditions, the strategy of regulating and coupling combustion parameters through the intake throttle valve can achieve good exhaust thermal management effects. Under cold WHTC conditions, the average exhaust temperature of the engine increases by about 20 °C. With a weighted average fuel consumption growth rate of only 4% in cold WHTC, the NO_x specific emissions are significantly reduced (by about 30%). In the case of long downhill slopes on the plateau, the inlet temperature of SCR can be maintained at around 370 °C for a long time. The designed engine adaptive exhaust thermal management strategy can enable the engine to have good thermal management effects in harsh working conditions such as refrigeration, high altitude, and low temperature.

Keywords: diesel engine; exhaust thermal management; SCR; combustion parameter; intake throttle valve

(责任编辑:臧发业)

.....
(上接第 9 页)

discharge plasma. The potential of the ignition system in combustion rate control and detonation suppression is discussed, and the development direction of advanced ignition systems is summarized. The analysis results show that the ignition system plays a key role in the combustion control process of internal combustion engines. Advanced ignition technology can ensure the ignition stability of internal combustion engines in lean-burn mode. Increasing ignition energy and ignition coverage can enhance ignition stability, but both will lead to a sharp increase in total ignition energy, requiring higher power for the ignition system, increasing system complexity, and reducing engine economy. Currently, the majority of ignition methods generate plasma ignition of the mixture through gas discharge. By adjusting the characteristics of the discharge plasma, the ignition system can flexibly control the combustion heat release throughout the combustion process in the cylinder.

Keywords: internal combustion engine; ignition system; high voltage discharge; plasma; combustion process control

(责任编辑:刘丽君)