

柴油机瞬变工况喷射参数及田口法协同优化对微粒排放的影响

冯爽^{1,2}, 洪伟^{1,2}, 李小平^{1,2}, 解方喜^{1,2}

(1. 吉林大学汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130022)

摘要: 为研究发动机“恒转增扭”瞬变工况下的微粒排放特性及优化方法, 以车用 2.8 L 增压柴油机为研究对象, 首先研究了单因素喷射参数对柴油机瞬态加载工况微粒排放的影响; 随后设计了田口正交试验, 给出以微粒数量及质量为输出指标的最优控制参数组合, 并确定了各控制参数的影响权重。结果表明: 在瞬变加载过程中, 小尺寸核态颗粒物数量浓度恶化明显, 大尺寸聚集态颗粒物质量浓度显著恶化; 适当地将主喷时刻提前、增大轨压以及引入恰当的后喷可降低微粒排放; 同时, 控制参数对核态和聚集态微粒的影响存在 Trade-off 关系, 对微粒排放影响权重相对较大的均为喷油时刻的影响, 即喷油正时和主后喷间隔。

关键词: 柴油机; 瞬变工况; 微粒排放; 喷射参数; 协同优化

中图分类号: TK421.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)09-2483-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211236

Effects of injection parameters and taguchi method on particulate emissions of diesel engine under transient conditions

FENG Shuang^{1,2}, HONG Wei^{1,2}, LI Xiao-ping^{1,2}, XIE Fang-xi^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To study the particulate emissions characteristics and optimization methods of the engine under transient conditions, takes a 2.8 L turbocharged diesel engine as the research object. Firstly, the effects of single factor injection parameters on the particulate emissions under transient loading conditions were studied. Then, Taguchi orthogonal experiment was designed to give the optimal control parameter combination with the number and quality of particles, and the influence weight of each control parameter was determined. The results show that during the transient loading process, the number and concentration of small-sized nuclear particles deteriorated significantly, and the mass concentration of large-sized accumulated particles deteriorated significantly; Appropriately advancing the injection timing, increasing the injection pressure and the introduction of post-injection can reduce particulate emissions; Meanwhile,

收稿日期: 2021-11-18.

基金项目: 吉林省教育厅科学研究项目 (JKH20221002KJ); 吉林大学汽车底盘集成与仿生全国重点实验室自由探索项目 (sac1-zytsxm-202014).

作者简介: 冯爽 (1991-), 男, 博士研究生. 研究方向: 内燃机公害与控制. E-mail: 452177412@qq.com

通信作者: 李小平 (1984-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 内燃机公害与控制. E-mail: lixp2008@jlu.edu.cn

the effect of control parameters on nuclear and accumulated particulates has a trade-off relationship, and the relatively large weight of particulate emissions is the effect of fuel injection timing, that is the factor of injection timing and post injection interval.

Key words: diesel engine; transient conditions; particle emission; injection parameters; collaborative optimization

0 引言

在实际道路运行过程中车用发动机大多处于瞬变工况运行条件,且日益严格的排放法规及双碳政策对车用发动机在瞬变工况条件下的排放要求逐步提高,尤其是微粒数量及质量排放的限值越来越成为人们关注的重点;同时,车用柴油机微粒排放是交通行业微粒排放的主要来源。因此,对柴油机瞬变工况性能及微粒排放的优化控制至关重要^[1,2]。

为了优化发动机瞬变过程的性能和微粒排放,国内外研究学者针对瞬变工况的研究主要分为以下两个方面:①发动机瞬态工况计算控制模型的创建及验证;②发动机瞬态工况性能畸变及燃烧排放优化方法的研究。对于发动机瞬态工况计算控制模型的创建及验证,Rakopoulos等^[3,4]建立了一套适用于计算发动机瞬态过程燃烧排放的数学模型,用于评估瞬态过程的燃烧排放。文献[5-8]提出了一种快速标定柴油机瞬变过程的方法,可优化燃油经济性和污染物排放等问题。对于发动机瞬态工况性能畸变及燃烧排放优化相关的研究成果丰硕^[9-15],湖南大学付建勤^[9]探索了瞬变工况下各发动机参数和性能的变化范围及规律;吉林大学张龙平^[10]和刘长铨^[11]发现柴油机瞬变工况排放物中碳烟排放恶化最为严重;同济大学谭丕强等^[12,13]研究了轻型车辆柴油机在瞬态运行条件下的排气颗粒数浓度及粒径分布。

由此可见,针对车用柴油机瞬变工况燃烧排放等方面研究有了一定进展,研究表明^[9]通过优化燃油的喷射正时、喷射压力以及气缸内的空燃比和环境温度等条件,可改善瞬变工况下碳烟soot的排放。但目前探究上述因素对柴油机瞬态工况下微粒排放变化的试验研究相对较少,因此有必要开展瞬变工况下喷射参数对微粒排放影响的试验研究。同时,目前研究者们应用田口正交设计方法对发动机稳态工况下的排放及油耗优化进行了一定研究^[16,17],但是在瞬变工况下相关的

试验优化研究较少。

因此,本文首先单因素试验研究了喷射参数对柴油机瞬变加载工况微粒数量及质量浓度排放的影响,然后借助田口设计方法,通过正交试验得到以特定微粒数量和质量浓度为输出指标的最优控制参数组合,并最终确定各控制参数对输出指标的影响权重。本研究有助于从柴油机喷射参数控制方面为柴油机瞬态过程微粒排放的优化控制提供参考,同时,因本文所使用的电子控制单元(Electronic control unit, ECU)关闭了瞬变过程中对喷油参数的修正,因此本研究也为喷射参数在瞬变加载工况中的map修正提供了数据及理论基础。

1 试验测试平台及试验方案

1.1 试验测试平台

试验采用一台2.8 L直列四缸、四冲程、中冷高压共轨、缸内直喷柴油机,发动机的详细参数如表1所示。本文试验装置示意图如图1所示。

表1 试验用发动机详细参数

Table 1 Detailed parameters of the test engine

发动机参数	技术规格
发动机形式	压燃、直列、四缸、四冲程
排量/L	2.771
缸径×行程/mm×mm	95.4×104.9
压缩比	17.2:1
喷孔数/个	6
最高供油压力/MPa	170
每缸气门数	4(进、排气各两个)
(最大扭矩/转速)/[(N·m)/ (r·min ⁻¹)]	240/(1400~2600)
(额定功率/转速)/[kW/ (r·min ⁻¹)]	80/3400
怠速转速/(r·min ⁻¹)	800±30
排放标准	国V

试验过程中,一台CW160电涡流测功机用于控制并记录发动机负荷和转速。发动机冷却水温度控制在(80±1)℃。进气流量由SENSYCON Sensy空气流量计测得。单位时间柴油消耗量由

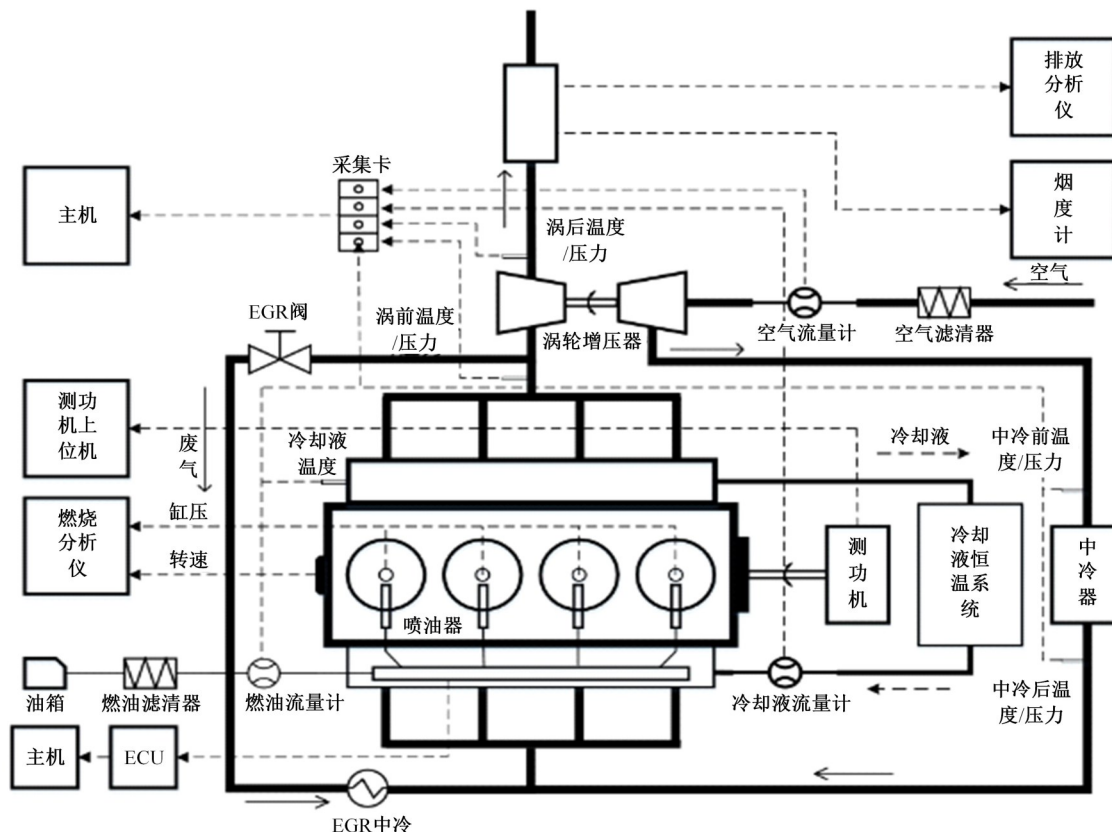


图1 发动机瞬态测试平台示意图

Fig. 1 Schematic of the engine test bench

同圆 TOCEIL-CMFG025 油耗仪测得。通过 BOSCH LSU4.9 lambda 传感器和 ETAS lambda 仪监测缸内混合气浓度。本文采用大连新风公司生产的 ECU 通过 INCA 标定软件实现对发动机喷油参数的灵活调控。

瞬态加载过程中需要对各运行参数进行精确记录,本文通过 AVL Indimicro 6020 燃烧分析仪中的高速数据采集模块将油门踏板电压信号、进气流量信号、柴油油耗信号以及扭矩 4 个信号,分别接入对应的 4 个通道进行瞬态过程信号的高速采集和记录,以便与燃烧状态进行同步,且最大采集信号频率为 200 MHz,满足瞬态采集要求。

在瞬态试验中,对尾气中微粒测量所用设备为英国 Cambustion 公司的 DMS500 快速微粒采样分析仪。此分析仪可以对发动机原排进行快速微粒测量,最高频率达到 10 Hz,可满足发动机瞬态工况下对微粒的采样分析。同时,由于微粒采样存在一定的滞后性,本文将微粒恶化突变的时刻前移到加载的始点,以便更好地理解瞬变过程的微粒恶化特性。

1.2 试验方案

本文选取试验转速为最大扭矩转速 1600 r/min,加载负荷从 5% 到 95%,加载时间为 5 s,加载速率为 43.2 N·m/s。在此工况下,分别通过 INCA 基于原机 map 单因素研究主喷时刻、喷射轨压、后喷比例和主后喷间隔在瞬态加载工况对柴油机性能和微粒数量、质量排放的影响。在研究主后喷间隔对微粒排放的影响时,将后喷比例固定;当研究后喷比例对微粒排放的影响时,将主后喷间隔固定。通过前期试验过程可知,为达到较优的微粒排放水平,主后喷间隔和后喷比例均不宜过小或过大,因此本文在固定后喷比例和主后喷间隔时选择适中的比例和角度,即后喷比例为 10%、主后喷间隔为 10 °CA。各因素下的试验方案如表 2 所示。随后通过田口法设计正交试验协同优化。

微粒数量浓度转换成质量浓度的公式如下:

$$M = 5.2 \times 10^{-16} \times d_p^3 \times \rho \quad (1)$$

式中: M 为微粒质量浓度; d_p 为微粒粒径; ρ 为微粒数量浓度。

表 2 瞬变工况试验方案

Table 2 Transient conditions test plan

因素	主喷时刻/ (°CA ATDC)	轨压/ MPa	后喷比 例/%	主后喷间隔/ (°CA ATDC)
主喷 角度	原机、原机±3、 原机±6	原机	无	无
轨压	原机	原机、原 机±20	无	无
主、后喷 间隔	原机	原机	10	5、10、15、20
后喷 比例	原机	原机	5、10、 15、20	10

2 试验结果及分析

2.1 喷射参数对微粒排放的影响

2.1.1 主喷时刻

图 2 和图 3 分别为主喷时刻对不同粒径微粒数量及质量浓度的影响。通过后期对试验数据的处理后发现针对微粒排放的规律具有一致性,同时为精简篇幅,省略原机±3 °CA 的微粒数据。由图 2 和图 3 可知,微粒数量恶化较为严重的粒径区段按照其恶化程度的优劣从重到轻依次为:< 10 nm、10~15 nm、15~23 nm 和 23~50 nm,较大的颗粒物(如 50~100 nm 和 >100 nm)在数量上随瞬变加载过程的变化相对较小,而在质量浓度方面发生了显著恶化现象。从图 2 和图 3 可以看出:随着主喷时刻的提前,无论微粒数量浓度还是质量浓度,各粒径区间的微粒浓度均显著下降,当主喷时刻为原机-6 °CA 时,微粒数量与质量浓度间的差别变化较小且达到最小值。由此可见,合理控制主喷时刻对各粒径区间微粒的数量及质量影响较大。

结合课题组前人的研究成果^[9]可以总结以下几方面原因:首先,提前喷油可以使缸内湍动能增大,燃油雾化效果及油气混合均匀性得到极大改善;其次,提前喷油可以使缸内最高燃烧温度及平均燃烧温度上升,温度场中高温范围的扩大提高了对碳烟微粒的氧化效率;再者,推迟喷油使燃烧重心滞后,燃油燃烧产生碳烟的时刻相对延迟,极大缩短了碳烟在有效温度、压力、氧含量等条件下的氧化时间,增加了微粒的生成数量;最后,通过同一曲轴转角下的缸内氧浓度场及当量比浓度场可知,提前喷油可较早地利用氧气,在利于对微粒氧化的环境氛围下提高了氧气对微粒的氧化效率。

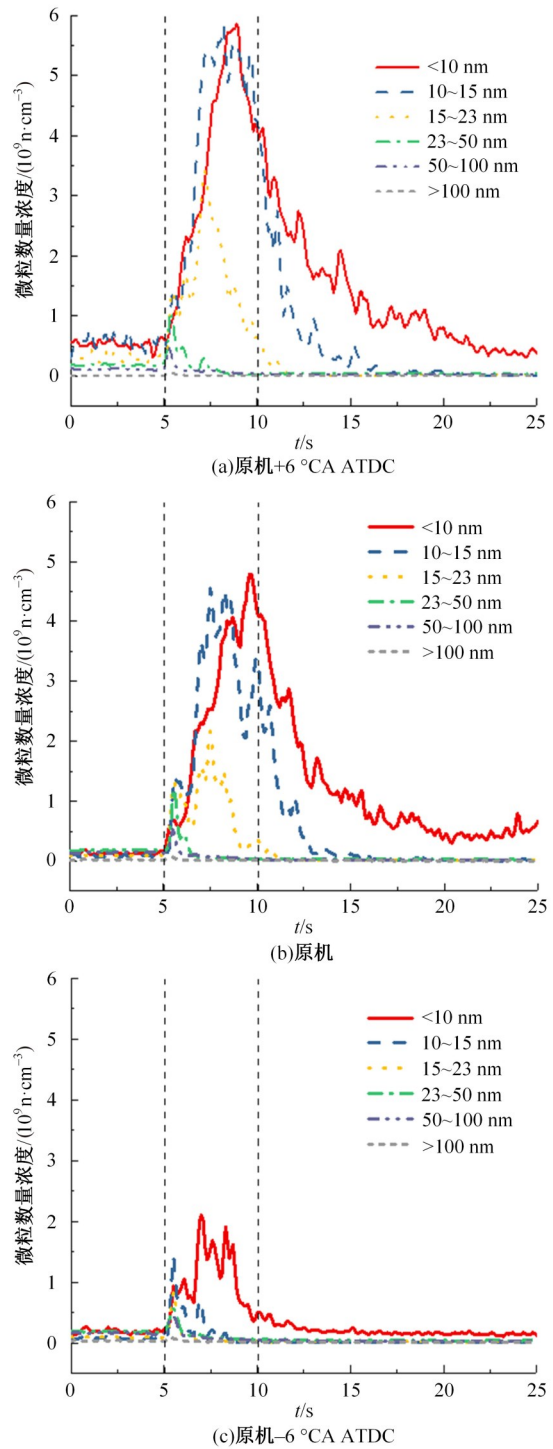
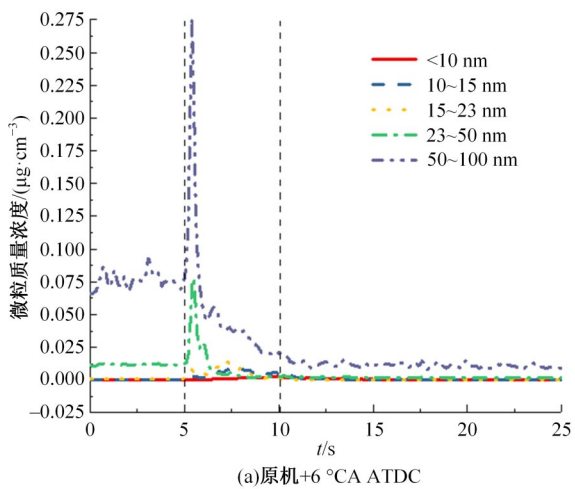


图 2 主喷对不同粒径微粒数量浓度的影响

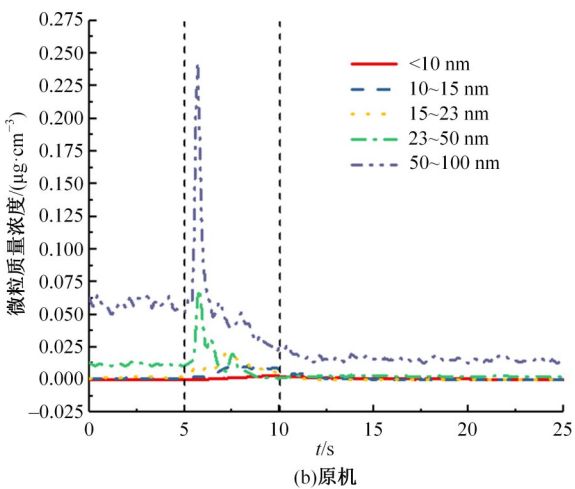
Fig. 2 Influence of main injection timing on the number concentration of particles with different sizes

2.1.2 轨压

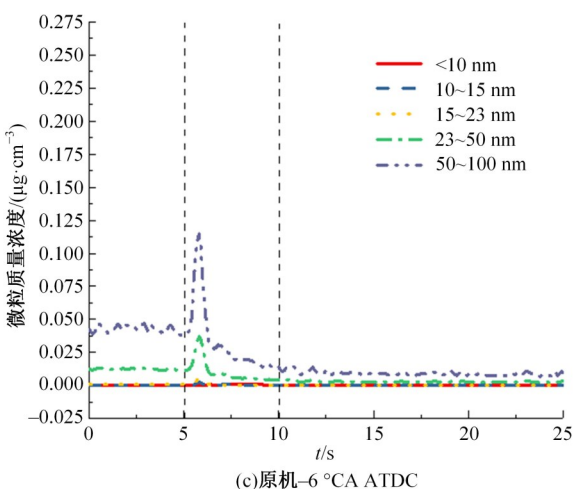
图 4 和图 5 分别为喷油压力对不同粒径微粒数量及质量浓度的影响。由图 4 和图 5 可知,微粒数量恶化较为严重的粒径区间依然集中在 <10



(a)原机+6 °CA ATDC



(b)原机

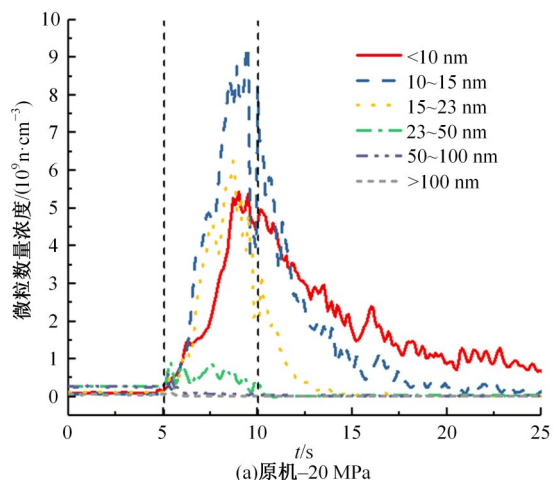


(c)原机-6 °CA ATDC

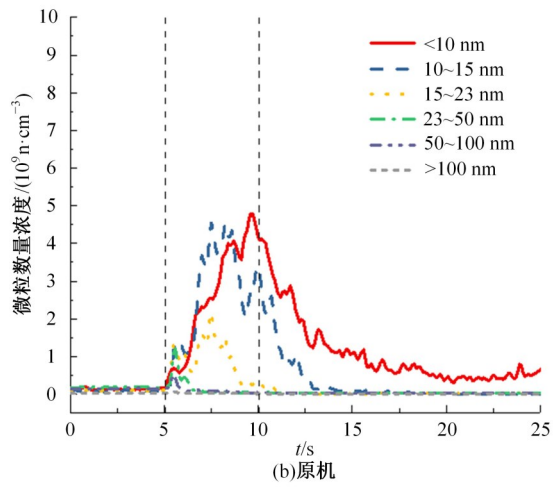
图 3 主喷对不同粒径微粒质量浓度的影响

Fig. 3 Influence of main spray timing on mass concentration of particles with different sizes

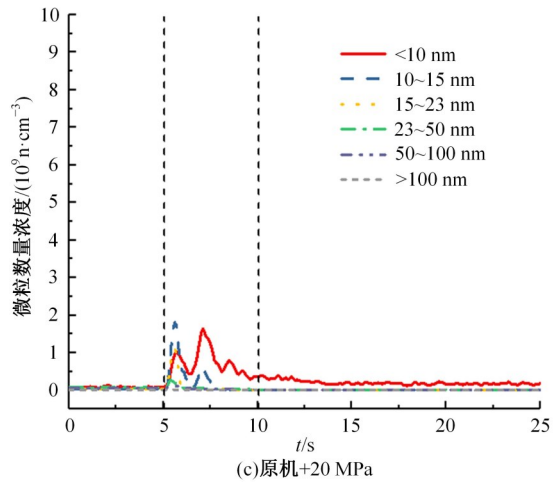
nm、10~15 nm 和 15~23 nm 这 3 个区间内,粒径在 23~50 nm 和 50~100 nm 中尺寸较大的颗粒物在数量上随着瞬变加载过程的变化相对较小,在



(a)原机-20 MPa



(b)原机



(c)原机+20 MPa

图 4 轨压对微粒数量浓度的影响

Fig. 4 Effect of injection pressure on the number concentration of particles with different sizes

质量浓度方面发生了显著恶化现象。

从图 4 可以看出:当喷油压力较低时,粒径为 10~15 nm 的微粒恶化最为严重,其峰值数量高

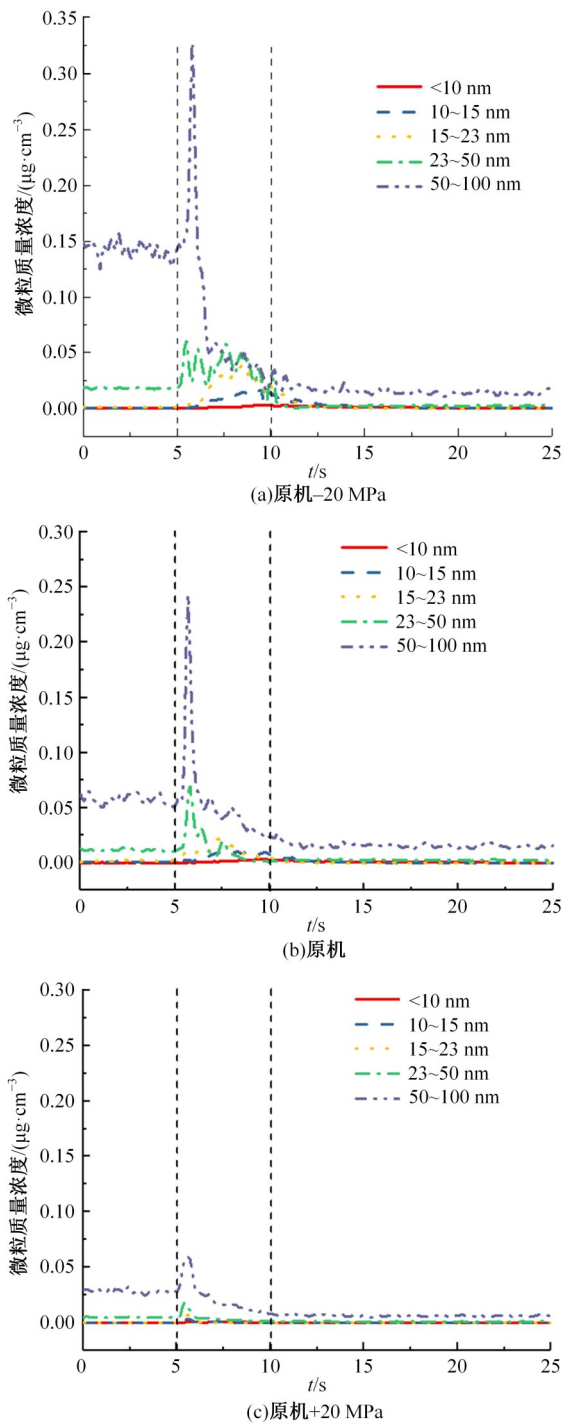


图 5 轨压对微粒质量浓度的影响

Fig. 5 Effect of injection pressure on mass concentration of particles with different sizes

达 $9 \times 10^9 \text{ n/cm}^3$, 其次为粒径 $<10 \text{ nm}$ 和粒径为 $15 \sim 23 \text{ nm}$ 的微粒, 随着喷射压力的增大, 各粒径区间的微粒数量浓度均发生显著下降, 且以粒径 $<10 \text{ nm}$ 的微粒为主要恶化粒径区间, 当轨压为原机 + 20 MPa 时, 微粒数量浓度间的差别变化较

小且达到最小值。从图 5 可以看出: 轨压对大尺寸微粒的质量浓度影响极大, 随着喷射压力的增大, 粒径为 $50 \sim 100 \text{ nm}$ 的微粒质量浓度恶化峰值从 $0.35 \mu\text{g/cm}^3$ 降到 $0.06 \mu\text{g/cm}^3$, 降低了近 6 倍。由此可见, 合理控制喷油压力可很大程度地改善各粒径区间微粒的数量及质量浓度, 降低微粒的恶化畸变系数。

分析其原因为: 首先, 增大喷油压力可以使缸内湍动能增大, 燃油雾化效果及油气混合均匀性得到极大改善; 其次, 喷油压力的增大可以使缸内平均燃烧温度上升及缸内最大燃烧温度的相位发生改变, 且温度场中高温范围的扩大提高了对碳烟微粒的氧化效率; 再者, 提高喷油压力使燃油液滴破碎得更为细小, 与空气混合及燃烧更为充分, 降低了微粒的生成; 最后, 对比同一曲轴转角下的缸内氧浓度场可知, 较大的喷油压力利用氧气也更多, 在利于对微粒氧化的环境氛围下提高了氧气对微粒的氧化效率, 进而减少了微粒的生成^[8]。

2.1.3 后喷比例和主后喷间隔

图 6 为后喷对微粒总数量浓度的影响, 由图可知, 适当的后喷比例及后喷间隔可改善瞬态加载过程中微粒数量的恶化情况。由图 6(a) 可知, 当后喷比例较大 (20%) 或较小 (5%) 时, 相较于原机其微粒总数在瞬态加载过程中恶化得更为严重, 数量峰值均大于原机的微粒数量峰值。而后喷比例为 10% 和 15% 时, 在瞬态加载过程中微粒总数恶化情况有较明显改善, 其微粒恶化峰值分别为 5.35×10^9 和 $4.84 \times 10^9 \text{ n/cm}^3$, 相比于原机的 $6.74 \times 10^9 \text{ n/cm}^3$, 分别降低了 20.62% 和 28.19%。由图 6(b) 可知: 当主后喷间隔较大为 20°CA 时, 微粒总数相较于原机同样发生了显著恶化, 而当主后喷间隔为 10°CA 和 15°CA 时微粒数量恶化得到改善, 其数量峰值分别降低了 9.64% 和 14.54%。由此可见, 合适的后喷比例及主后喷间隔参数可对瞬态加载过程中的微粒排放进行改善。

分析其原因为: 首先, 后喷参数不同使得缸内放热及温度变化的相位不同, 而恰当的后喷比例及主后喷间隔会使缸内平均燃烧温度处于相对较高的温度, 有利于微粒的氧化; 其次, 后喷的引入会增大燃烧中后段的缸内平均湍动能, 加强了空气对燃油的卷吸作用, 使得喷油末期的油气混合效果得到极大改善, 混合气燃烧得更充分, 极大减

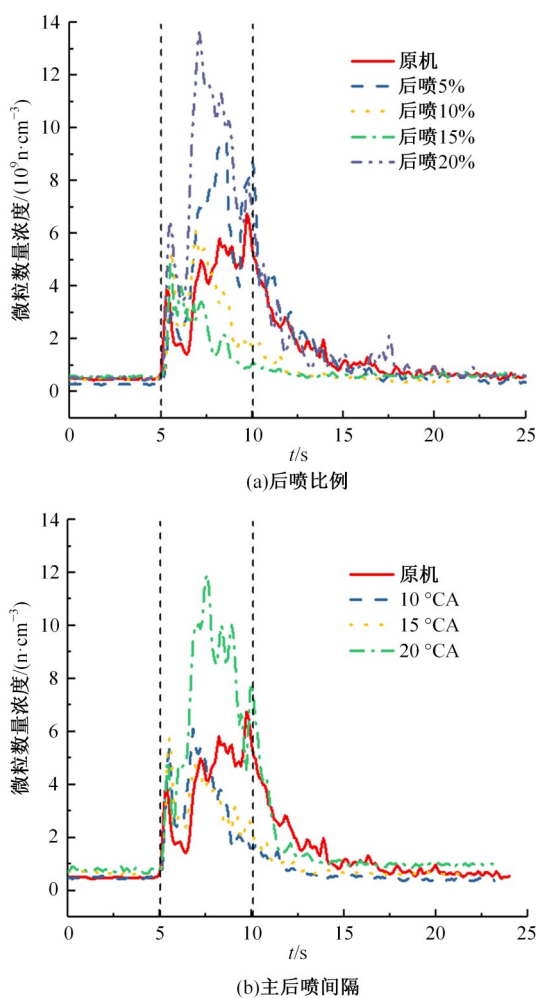


图6 后喷对微粒总数量浓度的影响

Fig. 6 Effect of post-injection on the total number concentration of particles

少了微粒排放;再者,合适的后喷比例和后喷间隔使得缸内温度场、氧浓度场以及速度场均处于相对较高的水平,缩小了利于微粒生成的边界范围,增强了对微粒的氧化^[9]。

2.2 喷射参数田口试验的协同优化

从2.1节可知,各喷油参数均可对瞬变工况下微粒排放恶化这一情况有不同程度的影响和改善。通过单因素研究方法适当地将主喷正时提前、增大轨压以及引入合理的后喷比例和后喷间隔等措施均会改善瞬态加载过程的燃烧及微粒排放。另外,如果要确定达到发动机某一性能时的最优控制参数组合,则需大量且重复性的试验工作。同时,为满足后续开发需求,每个控制参数对发动机特定性能指标的敏感度也有待确定。因此,本节采用田口设计的方法解决以上问题。

田口方法常用信噪比和正交表提高产品的质

量和效率。其中,信噪比 S/N (单位为dB)可以衡量噪声因素对性能的影响,从而寻求微粒数量及质量排放的最优喷射参数组合,并可表征输出特征的稳定性。本文中,为了获得最低的颗粒物数量及质量排放,希望 S/N 的比值越小越好,即望小特性。信噪比计算公式如下:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (2)$$

式中: y_i 为样本的实际值,是微粒数量或质量浓度的畸变系数值; n 为样本总数。

本文选取4个控制参数,分别是喷油正时、喷油压力、主后喷间隔、后喷比例,将其设置为试验的4个因素,每个因素取5个水平,如表3所示。

表3 田口试验水平和因素相关参数

Table 3 Control factors and their levels for Taguchi method

因素	水平1	水平2	水平3	水平4	水平5
主喷正时A/°CA	原-6	原-2	原机	原+2	原+4
轨压B/MPa	原-20	原-10	原机	原+10	原+20
主后喷间隔C/μs	1000	1500	1750	2000	2500
后喷比例D/%	5	10	12.5	15	20

表3中各参数水平的选择是在综合考虑前文中通过单因素研究某一特定参数对瞬态过程微粒排放影响之后确定的。其中,喷油时刻的基准是压缩上止点。对表3中各参数进行正交试验,试验在5s的瞬态加载过渡工况下进行。

试验完成后,根据试验结果分别对微粒总数量(Particle number, PN)、核态微粒数量、积聚态微粒数量以及核态微粒质量(Particle mass, PM)、积聚态微粒质量进行微粒排放畸变系数 μ 的对比。采用望小特性,在统计学软件Minitab中录入相关畸变系数数据,即可进行相关分析。本文分析对象选择信噪比的响应曲线。畸变系数计算公式为:

$$\mu = \frac{n_t - n_s}{n_t} \quad (3)$$

式中: μ 为某排放参数畸变系数; n_t 为某排放参数恒转增扭瞬变工况下的排放最大值; n_s 为某排放参数在试验转速下全负荷稳态工况中的最大值。

2.2.1 信噪比分析

图7和图8为微粒数量及质量信噪比 S/N 的响应曲线。信噪比值越高,表示其特定性能特征为最优水平,在图中用三角形着重表示出来。

首先就微粒数量PN而言,不同粒径尺寸的

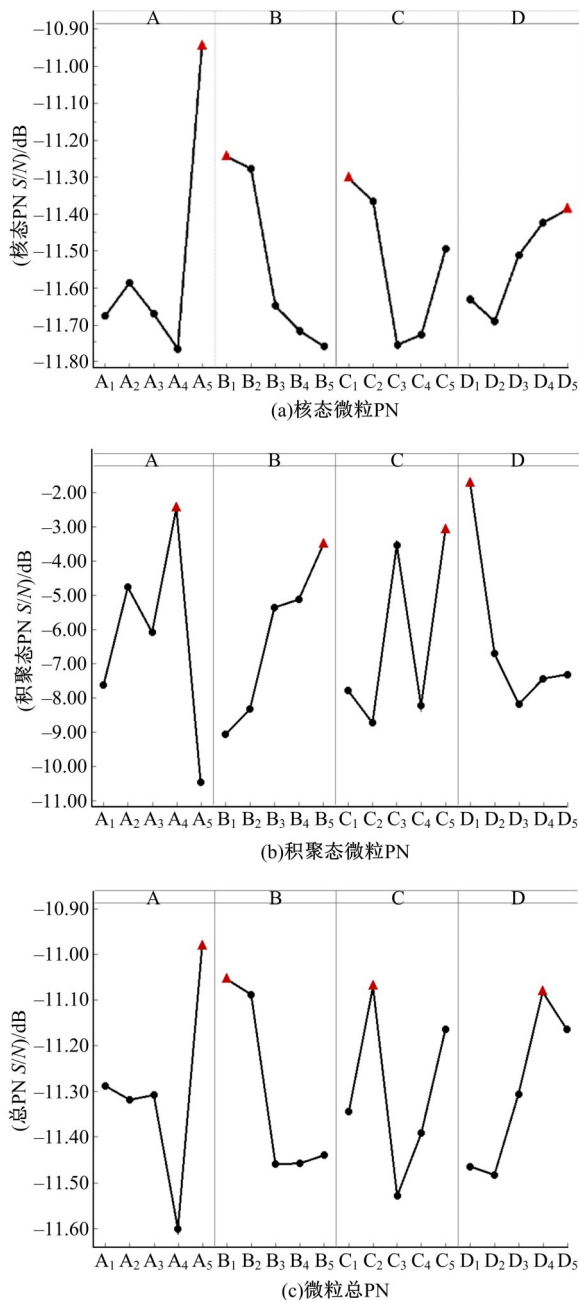


图 7 不同模式微粒数量信噪比响应曲线

Fig. 7 Signal-to-noise ratio response curve of particle number in different mode

微粒数量及微粒总数量浓度的最优控制参数组合不尽相同,就数量浓度而言,在各影响因素下核态微粒的信噪比响应曲线与总微粒数量的信噪比响应曲线趋势近似,而积聚态的信噪比响应曲线与其截然相反。从图 7 和图 8 可以看出,核态微粒数量浓度最优的参数控制组合是喷油正时在原机 map 的基础上滞后 4 °CA (A₅)、轨压为原机 -20 MPa (B₁)、主后喷间隔为 1000 μs (C₁) 和后喷比例为 20% (D₅);而积聚态微粒数量浓度最优

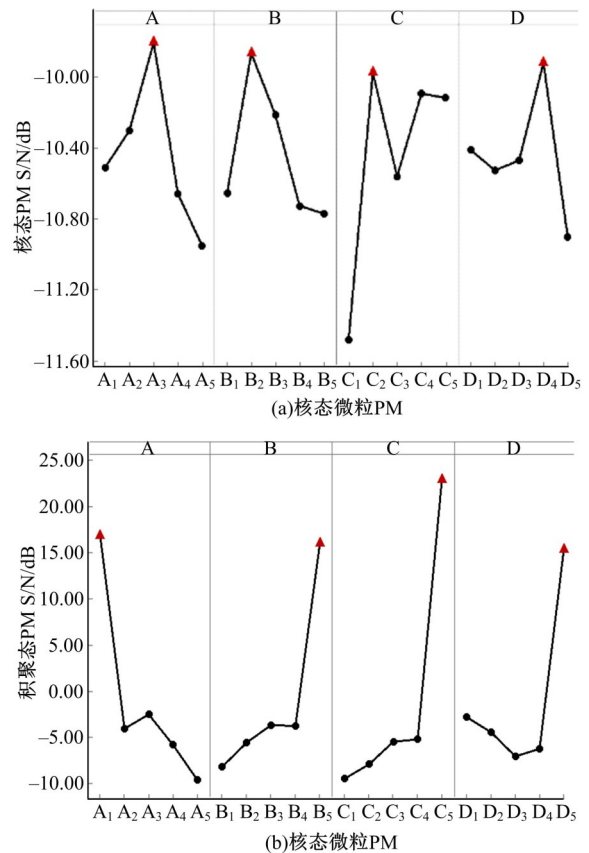


图 8 不同模式微粒数量及质量信噪比响应曲线

Fig. 8 Signal-to-noise ratio response curve of particle mass in different mode

参数控制组合为喷油正时滞后 2 °CA (A₄)、轨压为原机 +20 MPa (B₅)、主后喷间隔为 2500 μs (C₅) 和后喷比例为 5% (D₁),此组合与核态数量最优参数组合几乎完全对立;对于微粒总数量浓度的最优控制参数组合为:喷油正时在原机 map 的基础上滞后 4 °CA (A₅)、轨压为原机 -20 MPa (B₁)、主后喷间隔为 1500 μs (C) 和后喷比例为 15% (D₄)。

针对微粒质量浓度,核态和积聚态微粒的质量浓度最优参数控制组合有所不同,且与其相应的数量浓度也存在差别。核态微粒质量浓度最优的参数控制组合是:喷油正时为原机喷油 map (A₃)、轨压为原机 -10 MPa (B₂)、主后喷间隔为 1500 μs (C₂) 和后喷比例为 15% (D₄);而积聚态微粒质量浓度最优参数控制组合为喷油正时在原机 map 的基础上提前 6 °CA (A₁)、轨压为原机 +20 MPa (B₅)、主后喷间隔为 2500 μs (C₅) 和后喷比例为 20% (D₅)。

通过对比可以发现,核态微粒数量与微粒总数量整体信噪比趋势及最优组合近似,相比于原

机map,均采用较晚的喷油正时+较小的喷油压力+较短的主后喷间隔+较大的后喷比例,再次说明在瞬态加载过程中,微粒恶化最为严重的是核态颗粒物且数量浓度中占比居多;而积聚态微粒的信噪比随控制参数的变化及最优组合与核态颗粒物恰恰相反,这表明控制参数对核态和积聚态微粒的影响存在Trade-off关系。对于瞬态微粒质量浓度的最优控制组合,积聚态颗粒物质量浓度的优化需要较早的喷油正时+较大的喷油压力+较长的主后喷间隔+较大的后喷比例,以进一步加强对油束的雾化效果及油气混合后的燃烧作用,相比之下核态颗粒物的质量浓度则处于适中的参数调控范围内。

2.2.2 变异数权重分析

借助信噪比分析可以得到特定最优输出特征的最优水平组合,但无法明确各参数的影响权重。变异数分析可解决上述问题。变异数分析的对象可以是响应的平均值,也可以是信噪比。由于信

噪比中同时包含了特征响应的平均值和变异信息,所以本文选取信噪比进行相关变异数分析。进行变异数响应分析时用到的相关计算公式如下:

$$\text{因素的影响权重} = \frac{SS_i}{SS_T} \times 100\% \quad (4)$$

式中:SS_i为第*i*个参数的响应平方和;SS_T为所有参数的总的响应平方和。

图9为各控制参数的权重图。无论对于微粒数量还是质量浓度,影响权重较大的为喷油正时A和主后喷间隔C,均为喷油时刻的影响,而喷油压力和后喷比例对微粒影响权重相对较小。从微粒数量浓度占比分析中可知,影响权重从大到小依次为:喷油正时、主后喷间隔、喷油压力、后喷比例,因此喷油正时的优化对微粒数量浓度的改善尤为重要。从微粒质量浓度占比分析可知,影响权重从大到小依次为:主后喷间隔、喷油正时、喷油压力、后喷比例,所以后喷的喷油时刻对微粒质量影响极大。

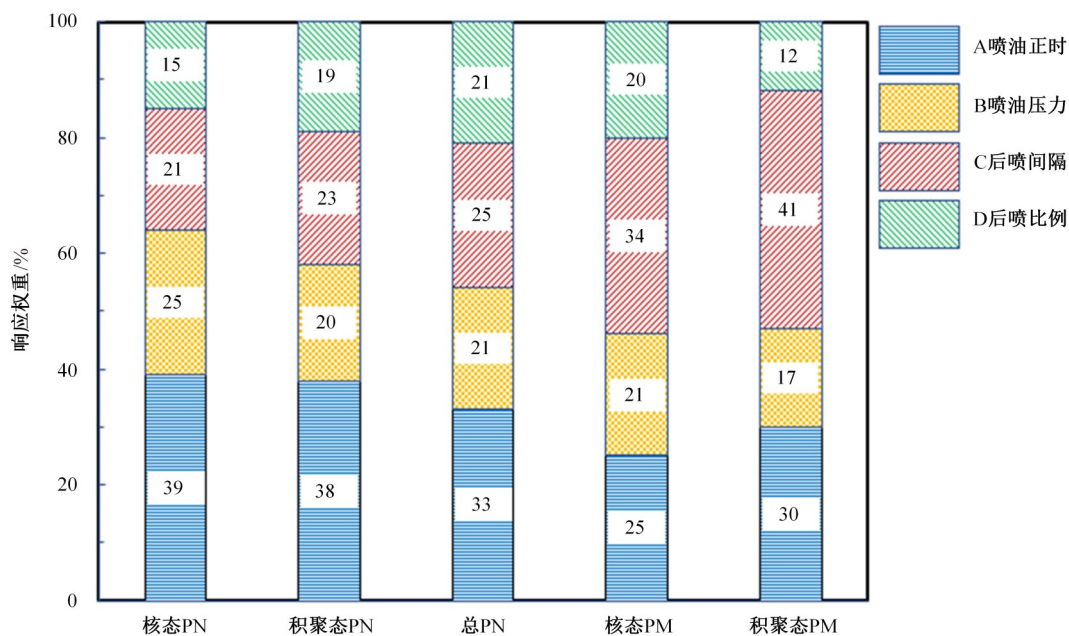


图9 各控制参数对微粒数量及质量影响权重

Fig. 9 Weight of the influence of each control parameter on the quantity and quality of particles

3 结论

(1)在转速为1600 r/min、5 s内将负荷从5%加载到95%的瞬变加载过程中,小尺寸颗粒在数量浓度上恶化较为明显,且恶化程度依次降低,而尺寸较大的颗粒物(粒径为23~50 nm和50~100 nm)在质量浓度方面发生显著恶化现象。

(2)瞬态加载过程中,适当地将主喷提前、增大轨压以及引入后喷可降低微粒的数量和质量浓度。

(3)控制参数对核态和积聚态微粒数量及质量浓度的影响存在Trade-off关系。

(4)瞬态加载过程中,影响权重较大的为喷油时刻的影响,即喷油正时A因素和主后喷间隔C

因素。喷油正时对微粒数量浓度影响最大,主后喷间隔对微粒质量浓度影响最大。

参考文献:

- [1] Nilsson T, Froberg A, Aslund J. Optimal operation of a turbocharged diesel engine during transients[J]. SAE International Journal of Engines, 2012, 5(2): 571-578.
- [2] 隋菱歌. 增压柴油机瞬态工况性能仿真及优化[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院, 2012.
Sui Ling-ge. Simulation and optimization of turbo charged diesel engine performance under transient operations[D]. Changchun; College of Automotive Engineering, Jilin University, 2012.
- [3] Rakopoulos C D, Michos C N, Giakoumis E G. Study of the transient behavior of turbocharged diesel engines including compressor surging using a linearized quasi-steady analysis[C]//SAE Paper, 2005-01-0225.
- [4] Rakopoulos C D, Giakoumis E G, Rakopoulos D C. The effect of friction modelling on the prediction of turbocharged diesel engine transient operation[C]//SAE Paper, 2004-01-0925.
- [5] Grahn M, Johansson K, McKelvey T. Model-based diesel engine management system optimization for transient engine operation[J]. Control Engineering Practice, 2014, 29: 103-114.
- [6] Atkinson C, Allain M, Zhang H. Using model-based rapid transient calibration to reduce fuel consumption and emissions in diesel engines[C]//SAE Paper, 2008-01-1365.
- [7] Atkinson C, Mott G. Dynamic model-based calibration optimization: an introduction and application to diesel engines[C]//SAE Paper, 2005-01-0026, 2005.
- [8] Liu S, Cui Y, Wang Y, et al. An evaluation method for transient response performance of turbocharged diesel engines[J]. Energy, 2019, 182:852-863.
- [9] 付建勤. 车用发动机瞬变工况运行与性能参数连续检测及热功转换过程研究[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院, 2014.
Fu Jian-qin. Continuous detecting on the operating and performance parameters of automotive engine under transient conditions and study of the heat-work conversion process[D]. Changsha; College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2014.
- [10] 张龙平. 车用柴油机瞬变工况性能劣变及其控制策略研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院, 2015.
Zhang Long-ping. Investigation of performance deterioration and control strategy of automotive diesel engine under transient operation conditions[D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2015.
- [11] 刘长铨. 车用增压柴油机瞬变过程能量流及烟流分析[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院, 2020.
Liu Chang-cheng. Analysis of energy flow, exergy flow and optimization of energy efficiency in an automotive turbocharged diesel engine[D]. Changchun; College of Automotive Engineering, Jilin University, 2020.
- [12] Tan Pi-qiang, Ruan Shuai-shuai, Hu Zhi-yuan, et al. Particle number emissions from a light-duty diesel engine with biodiesel fuels under transient-state operating conditions[J]. Applied Energy, 2014, 113: 22-31.
- [13] 谭丕强, 胡志远, 楼狄明, 等. 车用柴油机瞬变工况的排气颗粒数量[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 134-140.
Tan Pi-qiang, Hu Zhi-yuan, Lou Di-ming. Quantity of exhaust particles in vehicle diesel engine under transient conditions[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 134-140.
- [14] Sun Wan-chen, Wang Qiao, Guo Liang, et al. Influence of biodiesel/diesel blends on particle size distribution of CI engine under steady/transient conditions[J]. Fuel, 2019, 245: 336-344.
- [15] Zhang X B, Wang Z X, Xiao B, et al. A neural network learning-based global optimization approach for aero-engine transient control schedule[J]. Neurocomputing, 2021, 469: 180-188.
- [16] Zhang Miao-miao, Hong Wei, Xie Fang-xi, et al. Combustion, performance and particulate matter emissions analysis of operating parameters on a GDI engine by traditional experimental investigation and Taguchi method[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164: 344-352.
- [17] Uslu S, Yaman H, Yesilyurt M K. Optimization of parameters affecting the performance and emissions of a spark ignition engine fueled with *n*-pentanol/gasoline blends using taguchi method[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(12): 11711-11724.