

天然气发动机燃烧不稳定性分形特征分析

丁顺良¹, 刘津津¹, 牟俊超², 崔超¹, 宋恩哲³, 杨福源^{4,5}

(1. 郑州大学机械与动力工程学院, 450001, 郑州; 2. 上海船用柴油机研究所, 201108, 上海;

3. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 150001, 哈尔滨; 4. 清华大学汽车安全与节能国家

重点实验室, 100084, 北京; 5. 清华大学车辆与运载学院, 100084, 北京)

摘要: 为了揭示点火正时 θ_{sit} 对天然气发动机燃烧不稳定性的影响规律, 在低负荷工况下, 针对不同 θ_{sit} 工况进行试验, 利用多重分形和多尺度熵方法对指示平均有效压力 p_{imep} 、放热量 Q 时间序列进行分析, 并利用 p_{imep} 的循环变动系数 P_{CCV} 进行验证, 对天然气发动机燃烧不稳定性的分形特征进行了定性、定量研究。结果表明: 天然气发动机燃烧过程呈现出一定的分形特征, 随着 θ_{sit} 提前, Hurst 指数变化差值和奇异谱宽度先增大后减小, P_{CCV} 先减小后增大, 多尺度熵随尺度因子的增加而减小, 燃烧不稳定性的分形复杂度和反持续相关性先增强后减弱, 表明存在一个最优 θ_{sit} 使得天然气发动机的燃烧稳定性达到最佳。并且, 对 θ_{sit} 影响天然气发动机燃烧不稳定性的原因进行了研究, 为改善天然气发动机稀燃稳定性提供了理论依据。

关键词: 天然气发动机; 燃烧不稳定性; 点火正时; 多重分形; 多尺度熵

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202212003 **文章编号:** 0253-987X(2022)12-0023-10

Fractal Characteristics of Combustion Instability for a Natural Gas Engine

DING Shunliang¹, LIU Jinjin¹, MOU Junchao², CUI Chao¹, SONG Enzhe³, YANG Fuyuan^{4,5}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Shanghai Marine Diesel

Engine Research Institute, Shanghai 201108, China; 3. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering

University, Harbin 150001, China; 4. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University,

Beijing 100084, China; 5. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To reveal the pattern of influence of θ_{sit} on combustion instability for natural gas engine, experiments are carried out under low load condition with different θ_{sit} . The multi-fractal and multiscale entropy methods are applied to analyze the experimental p_{imep} and Q time series, and the P_{CCV} of p_{imep} are used to verify the results. The fractal characteristics of combustion instability for the natural gas engine is qualitatively and quantitatively analyzed. Results show that the combustion process for natural gas engine exhibits certain fractal characteristics. With θ_{sit} being advanced, the difference value of Hurst index and the width of singular spectrum increase at first and then decrease; the P_{CCV} decreases at first and then increases; the multiscale entropy decreases as τ increases. The fractal complexity and anti-persistence correlation of combustion instability enhance at first and then weaken, indicating that there is an optimal θ_{sit} which makes the combustion stability of natural gas engine reach its best. In addition, the analysis on the

收稿日期: 2022-05-11。 作者简介: 丁顺良(1988—),男,副教授;崔超(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51906225);汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目(KF2030);河南省高等学校重点科研资助项目(20A470001)。

网络出版时间: 2022-07-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220714.1608.002.html>

causes of θ_{sit} affecting the combustion instability provides a theoretical basis for improving the lean-burn stability of natural gas engine.

Keywords: natural gas engine; combustion instability; spark ignition timing; multi-fractal analysis; multi-scale entropy

随着内燃机排放法规日趋严格,为柴油、汽油发动机寻找替代燃料成为发动机节能减排的有效措施。在多种替代燃料中,天然气因其清洁、热效率高、经济性能好、安全性能好以及燃料储量丰富等特点逐渐成为替代燃料的首选^[1-2],使得天然气发动机在车辆、船舶、发电厂等领域得到了广泛应用^[3-6]。在稀燃工况下,天然气发动机排放性能、经济性和热效率得到进一步改善。然而,稀燃工况下与进气、混合气成分、缸内混合过程相关的诸多因素变化都会引起燃烧不稳定,从而降低发动机功率,导致排放恶化,控制难度增加,严重影响发动机工作稳定性^[7]。研究表明,天然气发动机燃烧不稳定性如果得到较好控制,动力性可提高10%,且在同等功率下,相对于汽油发动机,天然气发动机的 CO_2 排放降低20%以上, NO_x 、 SO_x 排放也明显降低^[8]。

天然气发动机的燃烧过程具有复杂的非线性特性,针对燃烧不稳定性的复杂非线性特性所具有的分形特征进行研究,揭示相关因素对其复杂度的影响规律,可以为天然气发动机有效控制提供策略,保证其高效、稳定燃烧,国内外学者对此开展了相关研究。Litak等^[9-10]利用返回映射和直方图方法,研究了不同点火正时 θ_{sit} 下四缸火花点火发动机的燃烧不稳定性,通过峰值压力及其对应曲轴转角的循环变动,结合放热量 Q 时间序列的重现图,发现不同 θ_{sit} 工况下燃烧过程具有间歇性特征。Sen等^[11]利用多重分形和统计方法,研究了不同 θ_{sit} 时发动机 Q 时间序列变化的复杂动力学特性,研究结果表明,燃烧不稳定性的复杂性会随着 θ_{sit} 的提前而增加。对于所涉及到的 θ_{sit} , Q 时间序列波动呈现反持续和负相关特征,并随着 θ_{sit} 的推迟反持续特征增强。Sen等^[12-13]利用多重分形和小波分解方法,对稀燃、多缸火花点火发动机在不同空燃比下的试验测量数据进行了研究,进一步研究燃烧不稳定性的变化规律,发现在空燃比较大时燃烧过程呈现持续的非随机振荡模式。Kaul等^[14]通过废气再循环(EGR)对火花点火发动机缸内混合气实现了高水平的稀释,然而,受循环变动的限制,稀释水平会产生随机和确定性的变动,其随机效应包括湍流、混合程度变化等,确定性效应主要是由于火焰传播速度和点火特性对燃料

成分的非线性依赖,而燃料成分受到前一循环残余废气的影 响。Daw等^[15]等开发了一种高EGR工况下燃烧不稳定性的动力学模型,对气缸内燃料混合状态进行研究,结果表明,由于再循环的废气和新鲜燃气混合程度不同,循环变动系数 P_{ccv} 的变化与压缩冲程开始时的温度、压力和对初始条件的敏感程度有关。Wagner等^[16]为了研究稀燃条件下燃料混合状态对燃烧不稳定性的影响规律,在一台以异辛烷为燃料的单缸发动机上进行试验,利用返回映射、数学统计分析、香农熵等方法分析了气流运动对发动机燃烧不稳定性的影响,发现当混合气浓度从化学当量比到稀燃极限变化时,燃烧不稳定性经历了由随机性到噪声确定性的明显转变。胡二江等^[17-18]在火花点火式天然气掺氢发动机上进行了多组试验,分析了不同EGR率和掺氢比对燃烧不稳定性的影响规律,结果表明,EGR率越高,掺氢比越小,燃烧不稳定性越明显,而增加掺氢比可使发动机在较高的EGR率下稳定运行。Yang等^[19-21]利用非线性嵌入理论和递归分析方法,在高维相空间中对不同过量空气系数及喷射正时工况下燃烧系统的隐含规律和复杂非线性特征进行了分析,并对预混天然气发动机的燃烧不稳定性进行了研究。发现混合气浓度增大、更早的或更迟的燃气喷射正时会降低燃烧不稳定性,并且预混天然气发动机燃烧不稳定的原因主要来自于缸内混合气浓度的不合理分层和湍流运动。姚宝峰等^[22]以一台点燃式增压电喷天然气发动机为研究对象进行试验,对天然气发动机的指示平均有效压力 p_{imep} 进行了循环变动分析,以此为基础研究了燃空当量比、节气门开度、转速和点火时刻对燃烧不稳定性的影响规律,结果表明,混合气燃空当量比越小,节气门开度越小,转速越高,则燃烧不稳定性越明显,存在最优点火时刻使得燃烧循环变动最小。

国内外的研究表明, θ_{sit} 对燃烧过程和发动机排放存在较大影响,然而在预混天然气发动机领域,燃烧不稳定性的研究大多都是针对某一全局参数 p_{imep} 进行循环变动分析,虽能体现出时间序列整体波动的大小,但不能体现出时间序列内部的波动规律。多重分形和多尺度熵方法能够更准确地反映时间序

列的内部波动规律,并且 θ_{sit} 对燃烧过程分形特征和复杂性的影响尚未得到系统研究。因此,本文在不同 θ_{sit} 工况下进行试验,对试验得到的 p_{imep} 、 Q 时间序列进行多重分形和多尺度熵分析,进而研究燃烧过程中的分形行为,并利用 p_{imep} 的 P_{CCV} 进行验证,从而对天然气发动机燃烧不稳定性的分形特征和动力学演化机理进行更深入地探索。

1 试验设备及方案

本文的研究对象为电控多点顺序喷射天然气发动机,发动机主要参数如表 1 所示。由燃烧分析仪、缸内压力传感器、编码器、计算机等组成的数据采集系统获取缸内压力时间序列,该系统的最高采集分辨率可达 0.03° ,试验台示意图如图 1 所示。

试验过程中,在转速为 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,负荷为 10% 、 25% 时分别记录燃料量,试验保持该燃料量不

表 1 天然气发动机的主要参数	
Table 1 Main parameters of the natural gas engine	
参数	数值
气缸数	2
缸径/mm	135
行程/mm	140
压缩比	11
进气方式	自然吸气
燃料供给形式	多点顺序喷射
标定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1 500
怠速转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	500
标定功率/kW	29.4
最大扭矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	200
单缸排量/L	2
发火间隔/($^\circ$)	180/540

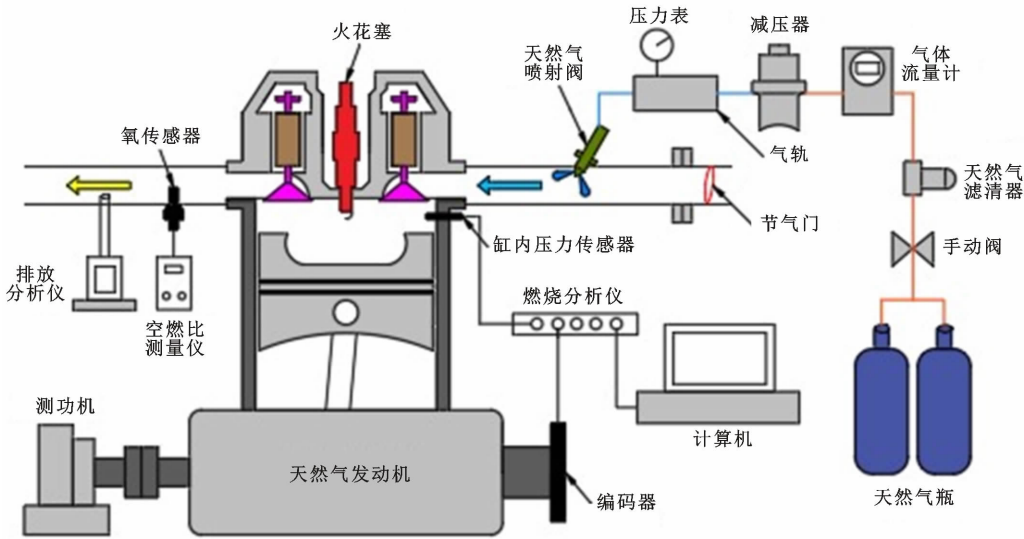


图 1 试验台示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the experimental bench

变,由于天然气发动机在低负荷时燃烧不稳定性更为明显,为了探索发动机在稀燃边界的稳定性变化,选取了可在较大 θ_{sit} 范围内进行试验数据采集的转速。在 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 10% 负荷,过量空气系数为 1.6 , θ_{sit} 分别为上止点前 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 45° 曲轴转角这 5 种不同工况下进行试验,并在 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 25% 负荷,过量空气系数为 1.6 , θ_{sit} 分别为上止点前 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 45° 曲轴转角这 5 种不同工况下进行了对比试验。针对不同工况,分别取 $1\,800$ 个燃烧循环的缸内压力时间序列,其中数据采样间隔为 1° ,每个工作循环包括 720 个数据点,对于每个燃烧循环计算 p_{imep} 、 Q 。

p_{imep} 包含发动机循环中每个曲轴转角及其相应缸内压力的所有信息,是分析发动机燃烧质量、输出功率和性能的重要参数。通过采集到的缸内压力及其相应的曲轴转角,对 p_{imep} 时间序列的计算式为

$$p_{imep} = \frac{W}{V_h} \tag{1}$$

$$W = \sum_{\varphi=-360^\circ}^{359^\circ} p(\varphi)\Delta V(\varphi) \tag{2}$$

式中: V_h 为气缸工作体积; W 为指示功; p 为缸内压力; φ 为曲轴转角; ΔV 为缸内容积。

利用测量的缸内压力 and 气缸容积,根据热力学第一定律计算出每循环放热量 Q 。

$$\frac{dQ}{d\varphi} = \frac{dQ_{\text{loss}}}{d\varphi} + p \frac{dV}{d\varphi} + \frac{dU}{d\varphi} \quad (3)$$

$$Q_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^3 \lambda (T - T_i) A_i \quad (4)$$

式中: Q_{loss} 为损失热, J; U 为工质内能; λ 为传热系数; T 为缸内温度, K; i 表示缸套湿表面、活塞顶部和缸盖底部。热损失主要考虑活塞顶部、缸盖底部和气缸套的湿表面, 而传热表面温度变化很小, 可以忽略不计。

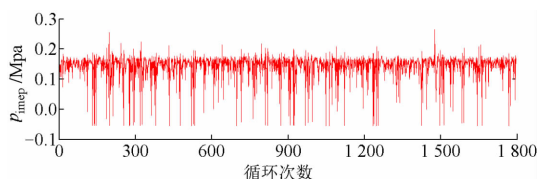
缸内工质内能变化可表示为

$$\frac{dU}{d\varphi} = mc_p \frac{dT}{d\varphi} \quad (5)$$

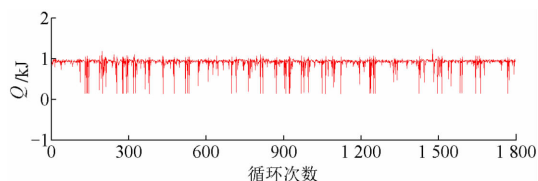
$$\frac{dT}{d\varphi} = \frac{V}{mR} \frac{dp}{d\varphi} + \frac{p}{mR} \frac{dV}{d\varphi} - \frac{T}{mu_f} \frac{dQ}{d\varphi} \quad (6)$$

式中: m 为气缸内工质质量, kg; c_p 为工质比定压热容; R 为气体常数; u_f 为燃料低热值, J · kg⁻¹。在计算放热时, 考虑到了气缸内燃烧的百分比。

图2给出了10%负荷下, θ_{sit} 为35°时 p_{imep} 、 Q 的时间序列图。从图2中可以定性地看出, p_{imep} 、 Q 时间序列均存在明显波动。



(a) p_{imep} 时间序列



(b) Q 时间序列

图2 p_{imep} 、 Q 时间序列

Fig. 2 The p_{imep} and Q time series

2 多重分形分析

Peng 等^[23]提出的去趋势波动分析(DFA)方法可以有效量化非平稳时间序列的标度指数, 但 DFA 方法难以反映时间序列的全局和局部相关特征。基于此, Kantellhardt 等^[24]提出了多重分形去趋势波动分析(MF-DFA)方法, 将时间序列的复杂分形划分为奇异程度不同的小区域, 通过分析其自相似性进而发现其复杂的动态特征, 充分揭示隐藏在非平稳时间序列中的多重分形特征, 得到的多重分形谱细致地刻画了时间序列的非线性动力学行为。

对非平稳时间序列进行 MF-DFA 分析, 首先构造信号轮廓 $Y(i)$, 即

$$\begin{cases} Y(i) = \sum_{k=1}^i (x_k - \bar{x}), & i = 1, 2, \dots, N \\ \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_k 为原始时间序列; N 为时间序列数据点数。

为了充分利用数据, 将信号轮廓从数据的正、反两个方向划分为不重叠的 $2N_s$ 个长度为 s 的数据段, 用最小二乘法对 $2N_s$ 个间隔相等的数据段进行拟合, 获得拟合多项式。根据数据长度对 N_s 、 s 取值, $N_s = \lfloor N/s \rfloor$, $\max\{m+2, 10\} \leq s \leq N/10$ 。每个间隔的平均残差平方为

$$\begin{cases} F^2(v, s) = \sum_{i=1}^s \{Y[(v-1)s+i] - y_v(i)\}^2, \\ v = 1, 2, \dots, N_s \\ F^2(v, s) = \sum_{i=1}^s \{Y[N - (v - N_s)s + i] - y_v(i)\}^2, \\ v = N_s + 1, N_s + 2, \dots, 2N_s \end{cases} \quad (8)$$

式中: $F^2(v, s)$ 为第 v 个数据段的平均残差平方; $y_v(i)$ 为第 v 个数据段的拟合二次多项式。

阶数为 q 的去趋势波动函数 $F_q(s)$ 可表示为

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(v, s)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (9)$$

当 $q=0$ 时

$$F_0(s) = \exp \left\{ \frac{1}{4N} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln[F^2(v, s)] \right\} \quad (10)$$

当时间序列具有自相似特征时, q 阶去趋势波动函数的均值与时间尺度 s 之间存在幂律关系, $F_q(s)$ 和 s 在对数范围上的斜率 $h(q)$ 被称为广义 Hurst 指数, 即

$$F_q(s) \sim s^{h(q)} \quad (11)$$

$h(q)$ 不仅可以判断时间序列的相关性, 也是区分随机序列与非随机序列的重要标志。当时间序列为单分形时, $h(q)$ 为常数; 当时间序列为多重分形时, $h(q)$ 与 q 成反比。 $h(q)$ 的大小表示时间序列的关联度, 当 $h(q) < 0.5$ 时, 时间序列具有反持续的长程相关性特征; 当 $h(q) = 0.5$ 时, 时间序列表现为随机游动特征, 或只存在短程相关性; 当 $0.5 < h(q) < 1$ 时, 时间序列具有持续性的长程相关性。

$h(q)$ 与质量指数 $\tau(q)$ 的关系为

$$\tau(q) = qh(q) - 1 \quad (12)$$

多重分形时间序列的奇异指数和多重分形谱可以通过 Legendre 变换得到

$$\begin{cases} \alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq} \\ f(\alpha) = q\alpha(q) - \tau(q) \end{cases} \quad (13)$$

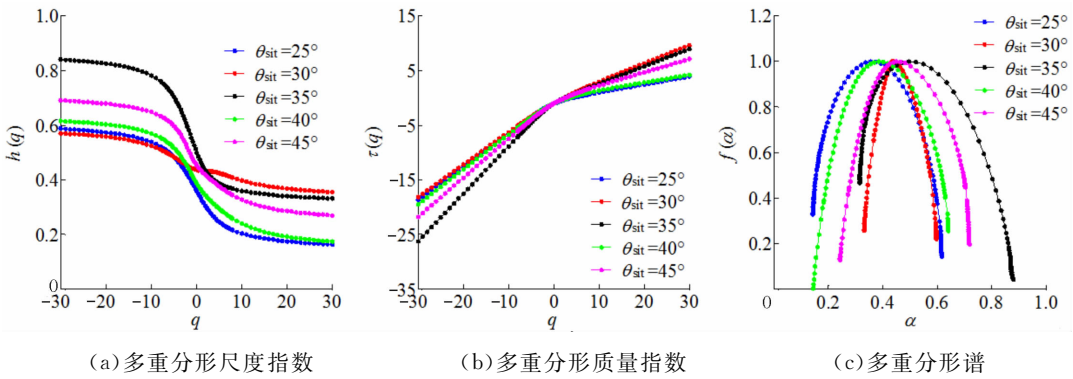


图 3 10% 负荷时 p_{imep} 时间序列的 MF-DFA 分析
Fig. 3 MF-DFA analysis of the p_{imep} time series under 10% load condition

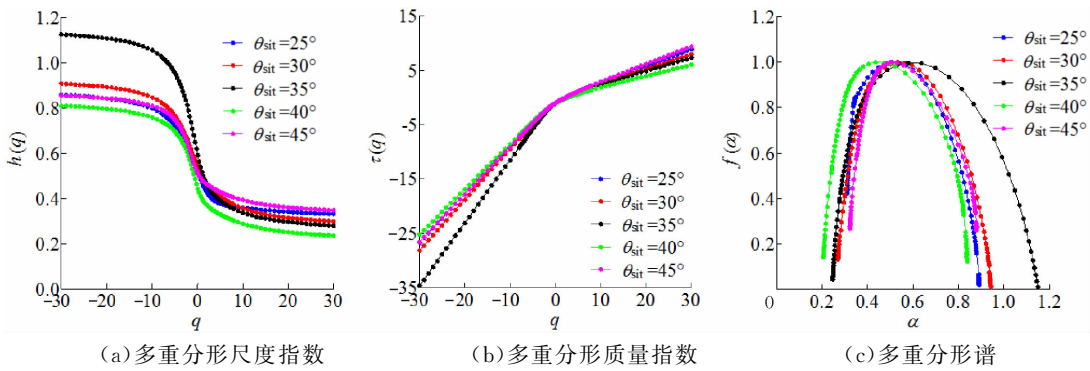


图 4 10% 负荷时 Q 时间序列的 MF-DFA 分析
Fig. 4 MF-DFA analysis of the Q time series under 10% load condition

线性结构, $f(\alpha)-\alpha$ 为单模开口向下的凸函数, 表明天然气发动机燃烧不稳定性具有明显的多重分形特性。 $q>0$ 时, $F_q(s)$ 主要反映时间序列的较大波动; $q<0$ 时, $F_q(s)$ 主要反映时间序列的较小波动。对于时间序列的多重分形特征, 大的波动条件通常对应较小的标度指数 $h(q)$, 而小的波动情况具有较大的标度指数。由图 3(a)、4(a) 可以看出, 在不同 θ_{sit} 条件下, $q<0$ 时有 $0.5<h(q)<1$, 而 $q>0$ 时有 $0<h(q)<0.5$, 这说明 p_{imep} 、 Q 时间序列在小尺度下波动性较强, 具有持续性的长程相关性; 在大尺度下, 波动较弱且具有反持续的长程相关性。由图 3(b)、4(b) 可知 $\tau(q)$ 曲线呈非线性结构, 这表明 p_{imep} 、 Q 时间序列具有显著的多重分形特征。在 $\theta_{\text{sit}}=35^\circ$ 、 $q<0$ 时, $h(q)$ 明显高于其他工况, 相应地, 图 3(b)、4(b) 中 $\tau(q)$ 的非线性更强; 图 3(c)、4(c) 中 $f(\alpha)$ 趋近于 0 时, 较大的 α 值明显大于其他工况, 在小尺度

式中: α 为 Holder 指数; $f(\alpha)$ 为多重分形谱。若时间序列是单分形的, $f(\alpha)$ 为一常数; 若时间序列是多重分形的, $f(\alpha)$ 一般为开口向下的凸函数。对 p_{imep} 、 Q 时间序列进行 MF-DFA 分析, 结果如图 3、图 4 所示, 图中 $h(q)$ 是 q 的递减函数, $\tau(q)$ 曲线呈非

时的波动较明显。
图 5 给出了奇异谱计算 p_{imep} 时间序列多重分形特征参数的示意图 ($\theta_{\text{sit}}=30^\circ$), 通过多重分形分析得到的 $f(\alpha)$ 如图中红色标记点所示, 用最小二乘法对

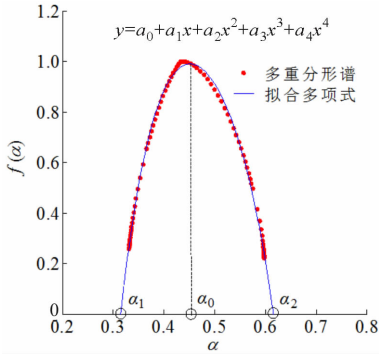


图 5 多重分形谱特征参数示意图
Fig. 5 Schematic diagram for determining characteristic parameters of the multi-fractal spectrum

$(\alpha, f(\alpha))$ 进行 4 次多项式拟合,得到趋势线如蓝线所示。 α_0 为 $f(\alpha)$ 峰值对应的 α 值, $f(\alpha)$ 趋近于 0 时对应的 α 值分别为 α_1 、 α_2 。

图 3、图 4 中的多重分形指数,在表 2 和图 6、图 7 中给出了更清晰的呈现。 α_0 反映了 $q=0$ 时时间序列的不均匀程度; $\Delta\alpha=\alpha_2-\alpha_1$ 反映了时间序列在

整个分形结构上概率测度的不均匀程度,也称为奇异谱宽; $\Delta h=h_{\max}-h_{\min}$ 表示 Hurst 指数的变化差值。从图 6 可以看出 $\Delta\alpha$ 、 Δh 之间存在较明显的线性关系,随着 θ_{sit} 的提前, $\Delta\alpha$ 、 Δh 存在先增大后减少的趋势,在 $\theta_{\text{sit}}=35^\circ$ 时 $\Delta\alpha$ 、 Δh 均达到最大值,这说明该工况下时间序列的测度分布不均匀程度较大,多

表 2 10% 负荷时多重分形分析的相关参数

Table 2 The related parameters of multi-fractal analysis under 10% load condition

参数	$\theta_{\text{sit}} / (^\circ)$	$h_{\max}$	$h_{\min}$	Δh	α_0	α_1	α_2	$\Delta\alpha$
p_{imep}	25	0.588 0	0.164 6	0.423 4	0.361 2	0.113 7	0.632 1	0.518 4
	30	0.571 1	0.356 0	0.215 1	0.448 2	0.317 7	0.615 4	0.297 7
	35	0.841 2	0.332 5	0.508 7	0.468 3	0.267 6	0.882 9	0.615 3
	40	0.616 1	0.174 9	0.441 2	0.391 3	0.143 8	0.665 6	0.521 8
	45	0.691 8	0.271 0	0.420 8	0.481 6	0.234 1	0.742 5	0.508 4
Q	25	0.857 0	0.330 5	0.526 5	0.449 5	0.272 9	0.891 0	0.618 1
	30	0.905 6	0.298 6	0.607 0	0.509 7	0.256 9	0.943 1	0.686 2
	35	1.123 0	0.279 0	0.844 0	0.521 7	0.236 8	1.148 0	0.911 2
	40	0.808 8	0.234 5	0.574 3	0.397 3	0.196 7	0.850 8	0.654 1
	45	0.853 2	0.346 2	0.507 0	0.489 6	0.301 0	0.911 0	0.610 0

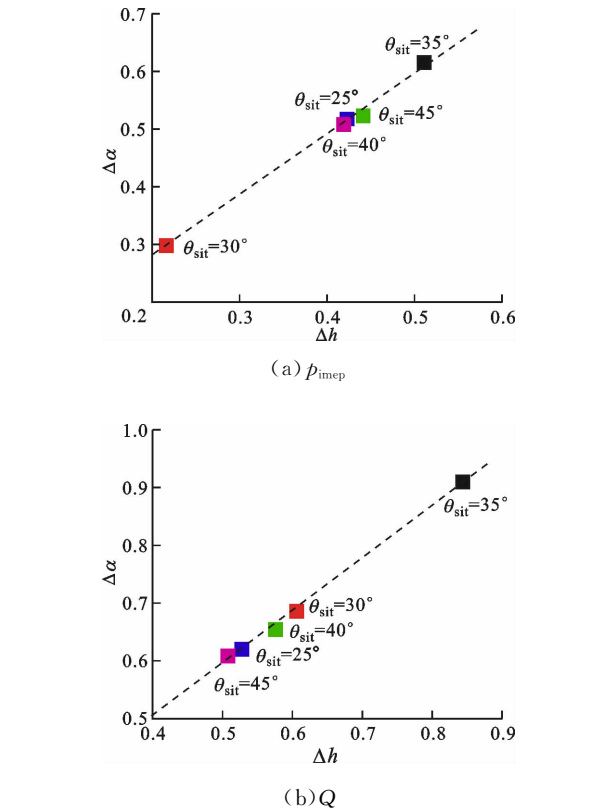


图 6 10% 负荷时 p_{imep} 、Q 时间序列的 Hurst 指数变化差值 Δh 和奇异谱宽 $\Delta\alpha$ 的关系示意图
Fig. 6 Relationships between the Δh and $\Delta\alpha$ for the p_{imep} and Q time series under 10% load condition

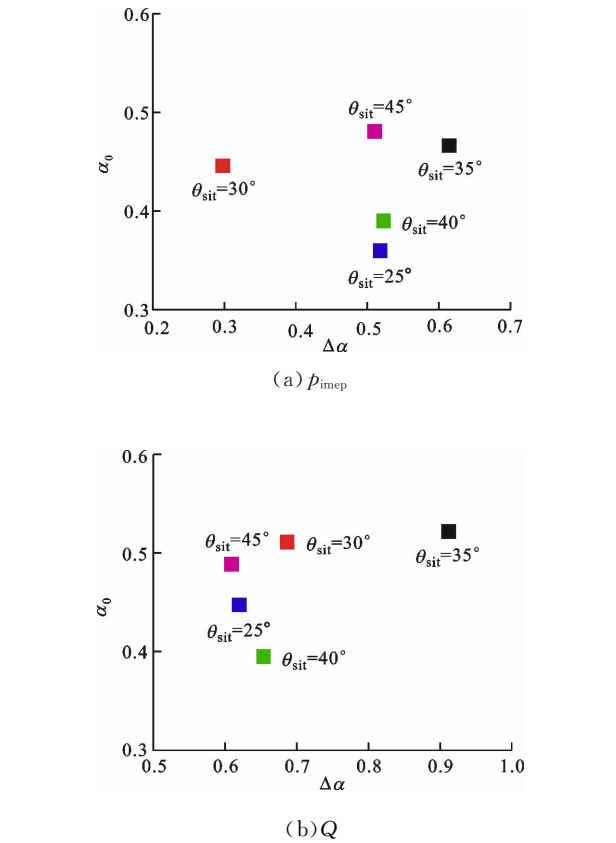


图 7 10% 负荷时 p_{imep} 、Q 时间序列的 $\Delta\alpha$ 和 α_0 关系
Fig. 7 Relationships between the $\Delta\alpha$ and α_0 for the p_{imep} and Q time series under 10% load condition

重分形特征最为明显。如图 7 所示, $\Delta\alpha$ 、 α_0 没有明显的线性关系,不同 θ_{sit} 下 α_0 的差别较小,这说明在 $q=0$ 时,随着 θ_{sit} 提前时间序列测度的不均匀程度变化较小。

为了验证其他工况燃烧过程的多重分形特征也具有同样的变化趋势,针对 25% 负荷工况, θ_{sit} 分别为 20°、30°、35°、40°、50° 时的 p_{imep} 时间序列进行了多重分形分析,结果如图 8、9 所示。从图 8、9 可以看

出,在 25% 负荷工况下, $\theta_{\text{sit}}=35^\circ$ 时 $\Delta\alpha$ 、 Δh 均达到最大值,多重分形最为明显,这与 10% 负荷时 p_{imep} 时间序列分形特征的变化规律一致。为了对天然气发动机燃烧不稳定性多重分形结果进行验证,计算了 p_{imep} 的 P_{CCV} ,如图 10 所示,10%、25% 负荷下 P_{CCV} 均随 θ_{sit} 的提前而先减小后增大,在 $\theta_{\text{sit}}=35^\circ$ 时达到最小值,说明在这一工况下燃烧不稳定性降低。 $\theta_{\text{sit}}<35^\circ$ 时 P_{CCV} 下降趋势平缓,而 $\theta_{\text{sit}}>35^\circ$ 时, P_{CCV} 上升

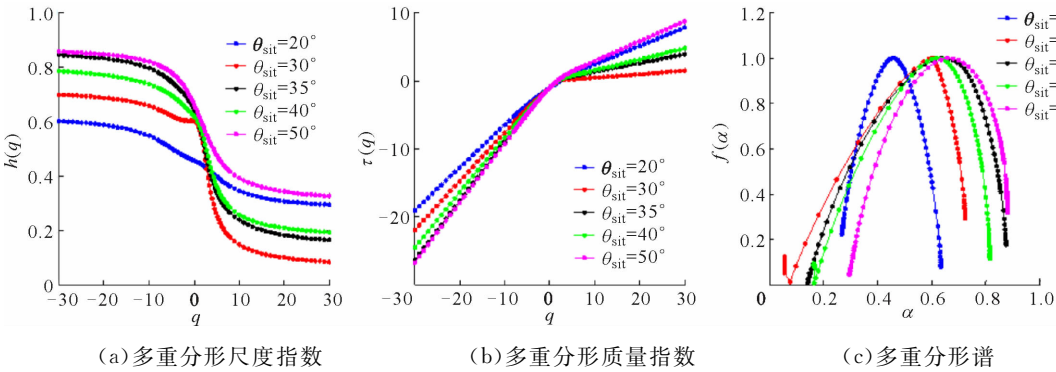
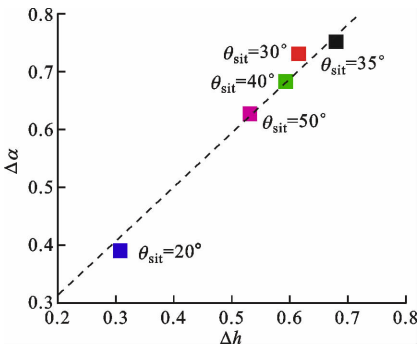
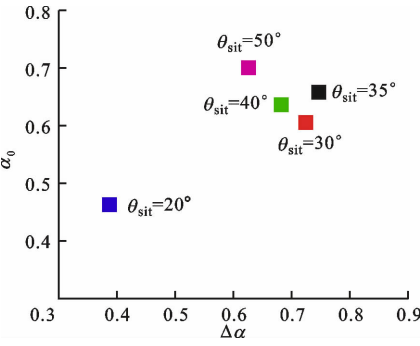


图 8 25% 负荷时 p_{imep} 时间序列的 MF-DFA 分析

Fig. 8 MF-DFA analysis of the p_{imep} time series under 25% load condition



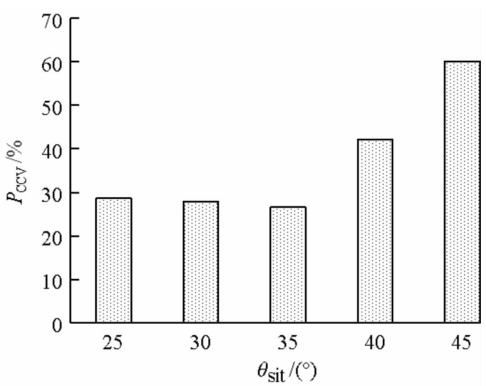
(a)Hurst 指数变化差值 Δh 和奇异谱宽 $\Delta\alpha$



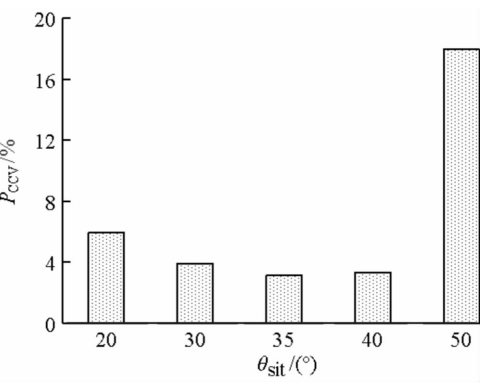
(b)奇异谱宽 $\Delta\alpha$ 和 α_0

图 9 25% 负荷时 p_{imep} 时间序列的多重分形特征指数关系示意图

Fig. 9 Relationships between the multi-fractal characteristic parameters for the p_{imep} time series under 25% load condition



(a)10% 负荷



(b)25% 负荷

图 10 不同负荷时 p_{imep} 时间序列的 P_{CCV}

Fig. 10 P_{CCV} of p_{imep} time series under different load conditions

幅度较大,主要原因是 θ_{sit} 过小时,缸内燃烧主要发生在活塞下行期,缸内压力的下降抵消了一部分燃烧放热引起的压力升高;而 θ_{sit} 过大时,点火时刻的缸内温度和压力较低,滞燃期会有所延长,火核发展受气流影响较大,燃烧质量较差,导致燃烧不稳定性严重。

结合多重分形和循环变动分析发现,在不同 θ_{sit} 工况下,天然气发动机燃烧过程在不同尺度上呈现出不同的分形特征,且燃烧不稳定性与分形特性之间呈现较强的负相关性。在 $\theta_{\text{sit}}=35^\circ$ 时燃烧过程分形特征最为明显,相应的 P_{CCV} 最小,说明存在一个最优 θ_{sit} 使得天然气发动机的不稳定性最弱。为了进一步研究不同尺度下时间序列的复杂性和间歇性,对 p_{imep} 、 Q 时间序列进行多尺度熵分析,揭示燃烧不稳定性的内在演变特征。

3 多尺度熵分析

天然气发动机燃烧系统是复杂的非线性系统。为了描述系统的复杂性,Richman等^[25]提出了一种测量方法,称为样本熵(E_{SE}),它对时间序列长度依赖性小,抗干扰能力强,在较大范围内一致性好。但样本熵仅从单一尺度描述时间序列复杂性,容易丢失大量重要信息。为了提取不同尺度下隐藏的特征信息,更准确地描述时间序列复杂性,Costay等^[26]提出了多尺度样本熵(E_{MSE})的概念。结合多尺度和样本熵的概念, E_{MSE} 基于粗粒度过程,通过对非重叠窗口内的数据点进行平均来构造多个粗粒度时间序列

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x_i, \quad 1 \leq j \leq N/\tau \quad (14)$$

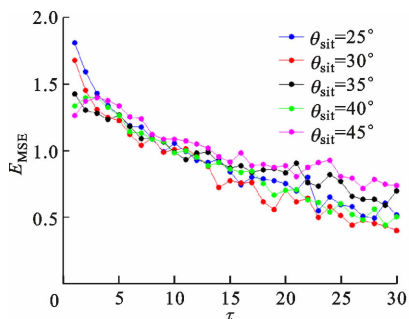
式中: τ 为比例因子;每个粗粒化时间序列的长度等于 N/τ ,当 $\tau=1$ 时,粗粒化时间序列即是原始时间序列。计算每个粗粒化向量的样本熵,得到的样本熵可表示为尺度因子的函数

$$E_{\text{MSE}}(x, \tau, m, r) = E_{\text{SE}}(y_j^{(\tau)}, m, r) \quad (15)$$

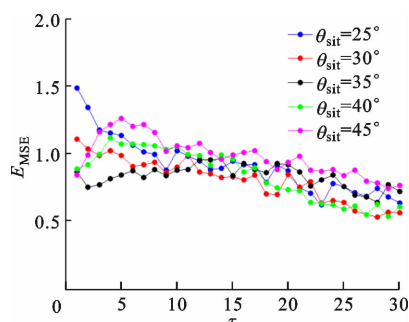
E_{MSE} 共有嵌入维数 m 、相似公差 r 和尺度因子 τ 3个影响参数。嵌入维数 m 会影响时间列重构后的信息量, m 越大,信息量越大,计算时间越长,所需要的原始数据长度 N 也越长,通常数据长度 N 需要满足 $10^m \sim 30^m$;相似公差 r 的大小会影响样本熵对噪声的灵敏度,如果 r 值过小,则结果对噪声的敏感性会增加, r 过大则会丢失时间序列很多细节,一般选取 $(0.1 \sim 0.25)\sigma$ (σ 为时间序列的标准偏差);尺度因子 τ 决定了对原始时间序列划分的尺度。本文

使用的参数为 $m=3, r=0.15\sigma, \tau=30$ 。

对时间序列进行多尺度熵分析,可以看出不同 θ_{sit} 工况下,熵值总体变化趋势基本一致,均随尺度因子 τ 的增加而减少,如图11所示。在 $\theta_{\text{sit}}=40^\circ, 45^\circ, \tau=1 \sim 5$ 时, p_{imep}, Q 的熵值有一个先上升后下降的波动;当 $\theta_{\text{sit}}=45^\circ$ 时,在整个 τ 值区域,熵值都略高于其他工况,这说明此时的信号复杂度较大,无规则程度较高,当嵌入维数变化时,产生新模式的可能性较大,与之对应的是在图10(a)中, $\theta_{\text{sit}}=45^\circ$ 时的 P_{CCV} 的值最大,而其他 θ_{sit} 工况下的 P_{CCV} 较小。由图11(b)可知: $\theta_{\text{sit}} < 35^\circ$ 时,熵值呈现随 τ 的增大而降低的趋势; $\theta_{\text{sit}}=35^\circ$ 时,熵值在 $0.7 \sim 0.8$ 之间小幅度波动; $\theta_{\text{sit}} > 35^\circ$ 时,整体呈先上升后下降的趋势。时间序列的整体复杂度较大,无规则程度较高,在不同尺度上具有不同的复杂度。小尺度范围的无规则程度较大,大尺度上的无规则程度较小,这与多重分形特征指数的变化规律一致。



(a) p_{imep}



(b) Q

图11 10%负荷不同 θ_{sit} 时 p_{imep}, Q 时间序列的多尺度熵
Fig. 11 E_{MSE} of the p_{imep} and Q time series with different θ_{sit} under 10% load condition

为了验证其他工况燃烧过程在不同尺度下时间序列的复杂性和间歇性变化趋势,针对25%负荷, θ_{sit} 分别为 $20^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 时的 p_{imep} 时间序列进行多尺度熵分析,如图12所示。从图12可以看出,

在不同 θ_{sit} 工况下,多尺度熵均随尺度因子的增加而减少,在 $\theta_{sit}=40^\circ, 45^\circ, \tau=1\sim 5$ 时未出现先增大后减小的趋势,与之对应的是在图 10(b)中,随着负荷增大, P_{CCV} 值整体较小,但变化趋势与 10% 负荷一致。

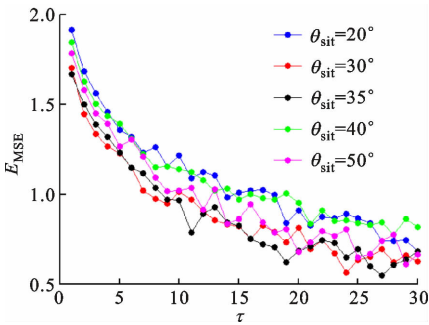


图 12 25% 负荷不同 θ_{sit} 时 p_{imep} 时间序列的多尺度熵

Fig. 12 E_{MSE} of the p_{imep} time series with different θ_{sit} under 25% load condition

4 结 论

在不同 θ_{sit} 工况下进行天然气发动机台架试验,利用去趋势波动多重分形、多尺度熵、循环变动分析等方法对 p_{imep} 、 Q 等燃烧过程时间序列进行分析,得出以下结论。

(1)在不同 θ_{sit} 工况下,燃烧不稳定性表现出明显的多重分形特性,其动力学特征表现为一个在小尺度上具有长程相关性,大尺度上呈现反持续特征的游走过程,且燃烧不稳定性与分形特性之间存在较强的负相关性。

(2)随 θ_{sit} 的提前, p_{imep} 、 Q 时间序列的奇异谱的宽度先增大后减小, P_{CCV} 先减小后增大。在 $\theta_{sit}=35^\circ$ 附近,奇异谱的宽度较宽, P_{CCV} 较小,燃烧过程表现出较强的分形特征,而燃烧不稳定性较弱。表明存在一个最优 θ_{sit} ,使得天然气发动机的燃烧不稳定性最弱。

(3)多尺度熵随着尺度因子的增加而减小,时间序列在不同尺度上具有不同的复杂度,小尺度范围的无规则程度较大,大尺度上的无规则程度较小,这与燃烧过程中的多重分形特征指数变化规律一致。

多重分形、多尺度熵方法在定性、定量分析燃烧不稳定性方面具有较明显优势。本文对燃烧不稳定性的复杂动力学特性进行了研究,为研究天然气发动机燃烧过程的分形特征提供了重要的试验支持和理论依据,有助于优化 θ_{sit} 控制策略以实现天然气发动机高效、稳定燃烧。

参考文献:

[1] 邹才能,赵群,张国生,等. 能源革命:从化石能源到新能源 [J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 1-10.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, ZHANG Guosheng, et al. Energy revolution: from a fossil energy era to a new energy era [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36 (1): 1-10.

[2] 李剑,余源琦,高阳,等. 中国天然气产业发展形势与前景 [J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 133-142.
LI Jian, SHE Yuanqi, GAO Yang, et al. Natural gas industry in China: development situation and prospect [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 133-142.

[3] HALL C, KASSA M. Advances in combustion control for natural gas-diesel dual fuel compression ignition engines in automotive applications: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 148: 111291.

[4] AREFIN M A, NABI M N, AKRAM M W, et al. A review on liquefied natural gas as fuels for dual fuel engines: opportunities, challenges and responses [J]. Energies, 2020, 13(11): 6127.

[5] DENG Jiaojun, WANG Xiaochen, WEI Zhilong, et al. A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels [J]. Science of the Total Environment, 2021, 766: 144319.

[6] 张勇,黄佐华,廖世勇,等. 天然气/氢气燃烧特性研究 [J]. 内燃机学报, 2006, 24(3): 200-205.
ZHANG Yong, HUANG Zuohua, LIAO Shiyong, et al. Study on combustion characteristics of natural gas-hydrogen-air mixtures [J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(3): 200-205.

[7] 李国岫,姚宝峰. 天然气发动机稀燃工况燃烧循环变动特性研究 [J]. 车用发动机, 2007(2): 26-29.
LI Guoxiu, YAO Baofeng. Study on characteristics of cycle-to-cycle combustion variations in a natural gas engine under lean burn operating conditions [J]. Vehicle Engine, 2007(2): 26-29.

[8] 石滨,郭林福,刘建华. 缸内直喷不同 CH_4/N_2 配比的混合燃料发动机掺氢燃烧负荷特性试验研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 107-112.
SHI Bin, GUO Linfu, LIU Jianhua. Experimental study of load characteristics of direct-injection engine fueled with various proportions of CH_4 and N_2 -hydrogen blends [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(20): 107-112.

[9] LITAK G, KAMIŃSKI T, CZARNIGOWSKI J, et al. Combustion process in a spark ignition engine:

- analysis of cyclic peak pressure and peak pressure angle oscillations [J]. *Meccanica*, 2009, 44(1): 1-11.
- [10] LITAK G, KAMINSKI T, CZARNIGOWSKI J, et al. Cycle-to-cycle oscillations of heat release in a spark ignition engine [J]. *Meccanica*, 2007, 42(5): 423-433.
- [11] SEN A K, LITAK G, KAMINSKI T, et al. Multi-fractal and statistical analyses of heat release fluctuations in a spark ignition engine [J]. *Chaos*, 2008, 18(3): 033115.
- [12] SEN A K, LITAK G, FINNEY C E A, et al. Analysis of heat release dynamics in an internal combustion engine using multifractals and wavelets [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(5): 1736-1743.
- [13] SEN A K, LITAK G, EDWARDS K D, et al. Characteristics of cyclic heat release variability in the transition from spark ignition to HCCI in a gasoline engine [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(5): 1649-1655.
- [14] KAUL B, WAGNER R, GREEN J. Analysis of cyclic variability of heat release for high-EGR GDI engine operation with observations on implications for effective control [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2013, 6(1): 132-141.
- [15] DAW C S, EDWARDS K D, WAGNER R M, et al. Modeling cyclic variability in spark-assisted HCCI [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(5): 052801.
- [16] WAGNER R M, DRALLMEIER J A, DAW C S. Characterization of lean combustion instability in premixed charge spark ignition engines [J]. *International Journal of Engine Research*, 2000, 1(4): 301-320.
- [17] 胡二江, 黄佐华, 刘兵, 等. 火花点火发动机燃用天然气/氢气混合燃料配合 EGR 的燃烧特性 [J]. *内燃机学报*, 2010, 28(5): 399-406.
- HU Erjiang, HUANG Zuohua, LIU Bing, et al. Combustion characteristics of a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR [J]. *Transactions of CSICE*, 2010, 28(5): 399-406.
- [18] 黄彬, 胡二江, 黄佐华, 等. 火花点火天然气掺氢发动机结合 EGR 时的循环变动规律 [J]. *内燃机学报*, 2011, 29(1): 16-22.
- HUANG Bin, HU Erjiang, HUANG Zuohua, et al. Cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combined with EGR [J]. *Transactions of CSICE*, 2011, 29(1): 16-22.
- [19] YANG Liping, SONG Enzhe, DING Shunliang, et al. Analysis of the dynamic characteristics of combustion instabilities in a pre-mixed lean-burn natural gas engine [J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 746-759.
- [20] LIU Jinjin, DING Sufen, DING Shunliang, et al. Effects of gas injection timing on combustion instability for a spark ignition natural gas engine under low load conditions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 206: 118144.
- [21] 丁顺良, 贺帅峰, 刘津津, 等. 天然气发动机燃烧不稳定性的多尺度特性分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(1): 31-40.
- DING Shunliang, HE Shuaifeng, LIU Jinjin, et al. Multi-scale analysis of combustion instability in natural gas engine [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(1): 31-40.
- [22] 姚宝峰, 李国岫. 稀燃天然气发动机燃烧循环变动影响因素研究 [J]. *内燃机工程*, 2007, 28(5): 23-27.
- YAO Baofeng, LI Guoxiu. Study on influencing factors of cycle-to-cycle combustion variations in a lean burn natural gas engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2007, 28(5): 23-27.
- [23] PENG C K, HAVLIN S, STANLEY H E, et al. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series [J]. *Chaos*, 1995, 5(1): 82-87.
- [24] KANTELHARDT J W, ZSCHIEGNER S A, KO-SCIENY-BUNDE E, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series [J]. *Statistical Mechanics and its Applications*, 2002, 316(1/4): 87-114.
- [25] RICHMAN J S, MOORMAN J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy [J]. *American Journal of Physiology: Heart and Circulatory Physiology*, 2000, 278(6): H2039-H2049.
- [26] COSTA M, GOLDBERGER A L, PENG C K. Multi-scale entropy analysis of complex physiologic time series [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(6): 068102.

(编辑 赵炜 杜秀杰)