

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104169

一种柴油机示功图曲线光顺处理算法研究*

杨光 魏亨蝶 丁博 郑国君

(长春理工大学电子信息工程学院 长春 130022)

摘要: 示功图是描述柴油机气缸内气体的压力随着曲轴转角变化而变化的曲线,通过分析示功图曲线,可以获取柴油机燃烧状况和运行状态。柴油机工作过程中,具有噪音大、振动大等特点,使得测量得到的示功图曲线存在大量的干扰信号,严重影响分析精度。针对以上问题,提出了一种消除示功图曲线干扰信号的处理算法,该算法有效地融合了均值滤波、中值滤波、畸点数据替代处理算法、改进的畸点数据局部滤波处理算法以及五点三次光顺处理算法,能够有效地消除示功图曲线中的干扰信号。采用4190ZLC型柴油机分设置柴油机转速945 r/min、负载率30%和转速1 000 r/min、负载率50%进行实验验证,结果表明,该算法能够有效地滤除示功图数据中的高频干扰信号,同时,在保持示功图曲线较小失真的条件下,获得了平滑、连续的示功图曲线。

关键词: 柴油机;示功图;曲线光顺;畸点

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

Research on a kind of processing algorithm of smoothing for diesel indicator diagram curve

Yang Guang Wei Hengdie Ding Bo Zheng Guojun

(School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Indicator diagram is a curve that describes the pressure of the gas in the cylinder of a diesel engine as the crankshaft Angle changes. The combustion and running state of diesel engine can be obtained by analyzing the indicator diagram curve. Due to the characteristics of high noise and vibration in the working process of diesel engine, there are a lot of interference signals in the measured indicator diagram curve, which seriously affects the accuracy of analysis. In order to solve the above problems, a processing algorithm to eliminate the interference signal of the indicator graph curve is proposed. The algorithm effectively integrates mean filtering, median filtering, anomaly data replacement processing algorithm, improved anomaly data local filtering algorithm and five-point cubic smoothing algorithm, and it can effectively eliminate the interference signal in the indicator diagram curve. A 4190ZLC diesel engine was used to set the engine speed at 945 r/min, the load rate at 30% and the speed at 1 000 r/min, and the load rate at 50% for experimental verification. The results show that the algorithm can effectively filter out the high-frequency interference signals in the indicator diagram data, and obtain smooth and continuous indicator diagram curve while maintaining a small distortion of the indicator diagram curve.

Keywords: diesel engines; indicator diagram; curve smoothing; distortion point

0 引言

柴油机示功图是研究柴油工作过程完善程度、柴油机故障判断以及柴油机燃烧过程的重要依据^[1-11]。理论上柴油机示功图曲线是一条光滑、连续的曲线,但在实际

工程中,采集柴油机气缸压力数据的过程中,由于电磁干扰、机械振动及噪声、热冲击、传感器本身的热噪声等问题,使得测量得到的示功图曲线存在着大量的干扰信号,这就就会导致依据示功图进行柴油机工作过程热力学分析会产生很大的误差,因此,有效地滤除示功图曲线上的干扰信号,获得准确的示功图曲线是分析柴油机工作过程

收稿日期: 2021-04-14 Received Date: 2021-04-14

* 基金项目: 吉林省教育厅科学计划(JJKH20200778KJ)、吉林省科技厅科学计划(20180201090GX)项目资助

的基础。滤除柴油机示功图曲线上的干扰信号比较常用的方法有低通滤波法和光顺法^[12-15],这两种方法的基本原理都是低通滤波,都能获得比较好的效果,但都存在着,幅度较小的单个畸点数据不能滤除或部分示功图曲线不平滑的缺陷。

在曲线光顺处理算法上,Kjellander 提出了一种由用户识别曲线上的坏点并对其做出微小调整从而拟合出一条新曲线的方法;文献[16-18]在 Kjellander 的基础上进行了改进,将一部分坏点去除后,重新计算出 B 样条曲线的控制点以实现曲线光顺,优点是计算速度快,局部修改能力强,但“坏点”较多时,光顺效果就比较差;文献[19]提出了一种矩阵特征值与特征向量的点云快速光顺曲线方法,该方法存在光顺处理后曲率变化不均的现象;王可等^[20]提出了一种基于拉格朗日乘数法对点云数据光顺处理的算法,该算法能很好保持曲线原有性质的基础上使曲线连续及一阶导数全局连续,曲线光顺效果较好;廖伯荣^[21]基于数字滤波理论和频谱分析方法,采用压力信号滤波的手段光顺处理示功图曲线,该方法设计的滤波器能有效的衰减高频压力波动,能有效地滤除由燃烧振荡和噪声产生的压力波动带来的干扰,光顺效果明显。上述方法虽然都能获得比较好的光顺效果,但存在着,幅度较小的单个畸点数据不能滤除或部分示功图曲线不平滑的缺陷。

针对以上存在的问题,本文阐述了一种示功图曲线干扰信号滤波算法以及曲线光顺处理算法,首先对多循环的气缸压力数据进行平均值运算获得单循环的气缸压力数据;其次,通过中值滤波算法滤除高频干扰信号;再次,采用拉依达准则判断数据是否是畸点数据,如果是畸点数据,用预测数据代替畸点数据;然后再用五点三次光顺法光顺示功图曲线;最后采用改进的畸点数据局部滤波处理算法对畸点数据进行局部滤波处理后得到最终的示功图曲线。

1 示功图数据预处理算法

在柴油机气缸压力数据的采集过程中,由于一些预先无法预测的干扰因素,导致采集到的气缸压力数据中,存在着随机误差数据。因此,为了减小随机误差数据,在采集数据时,必须采集足够多的完整的气缸工作循环数据,一般柴油机示功图数据采集 20~50 个完整的气缸循环数据绘制示功图就可以。为了尽可能保持曲线的原有形状,减小由于数据处理引起的误差,并保证气缸压力数据采样点数不减少,示功图数据预处理算法中采用了多循环气缸压力数据平均化处理、高频干扰信号滤波处理、畸点数据预测并替代处理等。

1) 不同循环气缸压力数据平均值计算

根据式(1)计算各点压力平均值。

$$P_{\varphi}^{av} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{\varphi}^j \quad (1)$$

式中: P_{φ}^j 为某一曲轴转角下,不同循环的压力数据; P_{φ}^{av} 为某一曲轴转角下,不同循环的压力数据的平均值; n 为循环次数。

2) 同一循环气缸压力平均值计算

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{\varphi}^{av} \quad (2)$$

式中: \bar{P} 为同一循环的压力数据的平均值; P_{φ}^{av} 为某一曲轴转角下,不同循环的压力数据的平均值; n 为采样点数。

3) 中值滤波算法处理

在实际测量过程中,采集的气缸压力数据经常会有较为突出的尖峰存在,并且持续的时间较短,这种信号通过中值滤波器进行处理,会获得较理想的效果。

中值滤波的原理如下:对于输入连续的的数字信号 x ,以 x 为中心,取长度为 $2k$ 的信号,区间为 $[x - k + 1, x + k]$,计算这个区间的中间值,作为 x 新的输出值。

4) 畸点压力数据的取舍判断及替代处理

由于畸点数据的存在,会影响柴油机热力学计算的准确性,因此,必须把这些数据剔除。系统中,采用拉依达准则(3σ 准则)如式(3)所示,对畸点数据进行剔除。

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (P_{\varphi}^{av} - \bar{P})^2} \quad (3)$$

式中: σ 为标准差; \bar{P} 为同一循环的压力数据的平均值; P_{φ}^{av} 为某一曲轴转角下,不同循环的压力数据的平均值。

经过中值滤波算法处理之后的示功图数据按照式(4)进行取舍判断,如果满足式(4)的关系,则舍弃这一压力数据,并用式(5)的预测数据代替舍弃的畸点数据。

$$|P_{\varphi}^{av} - \bar{P}| \geq 3\sigma \quad (4)$$

某一点曲轴转角对应的压力数据预测值如式(5)所示。

$$y = y_{t-1} + (y_{t-1} - y_{t+1}) \quad (5)$$

式中: y 为 t 时刻的预测数据; y_{t-1} 为 t 时刻前一次采样的数据; y_{t+1} 为 t 时刻后一次采样的数据。

2 示功图曲线光顺处理算法

如果采用预处理之后的数据直接绘制 $P-\varphi$ 示功图曲线,仍然存在着噪声干扰信号^[22-25]。为了减小此干扰信号带来的影响,除了采用示功图数据预处理算法之外,还需要采用示功图曲线光顺处理算法提高示功图曲线的平滑度,以获得平滑、连续的示功图曲线^[26-29]。五点三次光顺法的特点是对原有曲线的特性做到了很好地保留,同时又对存在的干扰成分进行了有效的消除^[30-32],其优

势是可以使信号尽可能地接近真实值,削弱噪声而不削弱有用信号。

本文采用五点三次光顺法光顺示功图曲线,获得了较好的效果。

五点三次平滑公式^[22],如式(6)所示。

$$\begin{aligned} y'_1 &= \frac{1}{70}[69y_1 + 4(y_2 + y_4) - 6y_3 - y_5] \\ y'_2 &= \frac{1}{35}[2(y_1 + y_5) + 27y_2 + 12y_3 - 8y_4] \\ y'_j &= \frac{1}{35}[-3(y_{j-2} + y_{j+2}) + 12(y_{j-1} + y_{j+1}) + 17y_j] \\ y'_{n-1} &= \frac{1}{35}[2(y_{n-4} + y_n) - 8y_{n-3} + 12y_{n-2} + 27y_{n-1}] \\ y'_n &= \frac{1}{70}[-y_{n-4} + 4(y_{n-3} + y_{n-1}) - 6y_{n-2} + 69y_n] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: y 为原始的示功图数据; y' 为光顺后的示功图数据; n 为数据个数。

3 改进的畸点数据局部滤波处理算法

利用低通滤波器多次衰减畸点误差数据的处理算法,当达到低通滤波器的控制精度时,停止滤波运算^[33-34]。首先,通过算法找到畸点数据,运用中值滤波滤除畸点数据中的高频信号,然后再通过均值滤波对曲线进行平滑处理。

1) 畸点数据确定算法

将经过五点三次光顺法处理之后的示功图数据 X 通过低通滤波器进行滤波处理^[15-21],得到输出数据 Y ,则 Y 与 X 的差值如式(7)所示。

$$\delta(i) = Y(i) - X(i) \quad (7)$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

设滤波器控制精度为 δ ,找到 $\delta(i)$ 的最大值 $\delta(k)$,并且 $\delta(k) > \delta$,则 $\delta(k)$ 为畸点数据。

2) 畸点数据滤波算法

以 $\delta(k)$ 对应的 $X(k)$ 数据为中心,左侧取 M 个数据,右侧取 M 个数据,先用中值滤波算法滤除高频信号,再通过均值滤波器进行平滑处理。

3) 重复步骤 1) 和 2),直至 $\delta(k) \leq \delta$,结束算法执行。

4 实验及分析

1) 采用 4190ZLC 型柴油机进行试验研究,系统设置的工况:柴油机转速 945 r/min,负载率 30%。

本文采集 20 个循环的气缸压力数据,运用式(1)进

行多循环的均值运算之后输出的单循环示功图曲线如图 1 所示;图 1 经过中值滤波处理之后的示功图曲线如图 2 所示;运用式(3)~(5)进行畸点压力数据的取舍判断及替代处理之后的示功图曲线如图 3 所示;经过五点三次光顺处理的示功图曲线如图 4 所示;经过改进的畸点数据局部滤波处理算法处理之后示功图曲线如图 5 所示。

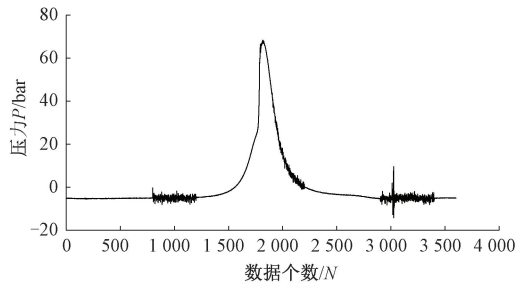


图 1 多循环的均值计算之后的单循环示功图曲线(945 r/min)

Fig. 1 Single-cycle indicator diagram curve after multi-cycle mean value computation(945 r/min)

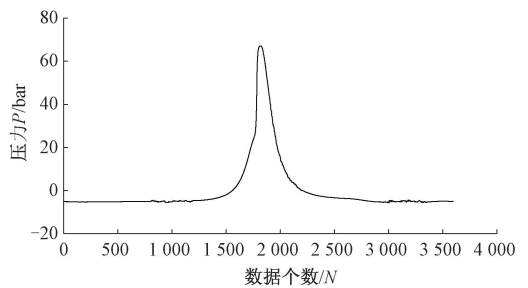


图 2 中值滤波之后的示功图曲线(945 r/min)

Fig. 2 Indicator diagram curve after median filtering(945 r/min)

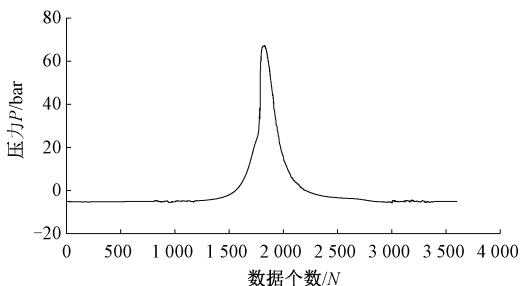


图 3 畸点压力数据取舍判断之后的示功图曲线(945 r/min)

Fig. 3 Indicator diagram curve after judgment of distortion point pressure data(945 r/min)

从图 1 可以看出,在 1 000 点、2 000 点和 3 000 点附近存在着随机噪声信号,在 3 000 点附近还存在着高频干扰信号;从图 2 可以看出,经过中值滤波之后,随机信号和高频干扰信号基本滤除,但在 1 000 点和 2 000 点附近的曲线还存在着幅度较小干扰信号,曲线不平滑;从图

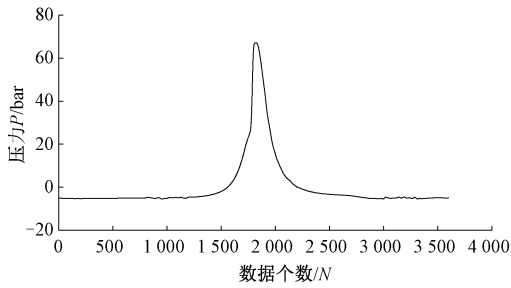


图4 光顺处理之后的示功图曲线(945 r/min)

Fig. 4 Indicator diagram curve after smoothing(945 r/min)

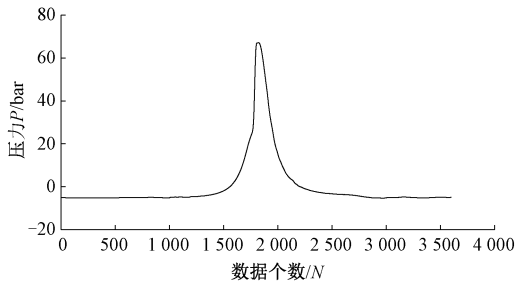


图5 最终的示功图曲线(945 r/min)

Fig. 5 Final indicator diagram curve(945 r/min)

3可以看出,经过畸点压力数据的取舍判断及替代处理之后,对曲线1 000点和2 000点附近曲线的光滑度影响不大,但在曲线上升和下降阶段中的畸点数据被剔除,导致曲线上升和下降阶段模糊度增加,表现明显的是曲线顶部变得更加尖锐,更接近原始信号;从图4可以看出,经过五点三次光顺法光顺曲线之后,在1 000点和3 000点附近的曲线变得较为平滑,但还存在着锯齿形的曲线,还未达到理想状态;从图5可以看出,经过改进的畸点数据局部滤波处理算法处理之后,得到了平滑、连续、渐变的示功图曲线。从以上分析中可以验证本文阐述的算法的有效性。

2)采用4190ZLC型柴油机进行试验研究,系统设置的工况如下:柴油机转速1 000 r/min,负载率50%,各个阶段的示功图曲线如图6~10所示。通过观察各个阶段的示功图曲线进一步验证的本文算法的准确性。

5 结论

本文阐述的算法融合了均值滤波、中值滤波、畸点数据替代处理算法、改进的畸点数据局部滤波处理算法以及五点三次光顺处理算法,对柴油机示功图曲线数据进行处理,并通过4190ZLC型柴油机进行试验研究,验证算法的有效性。实验结果表明:该算法能够有效地滤除示功图数据中的高频干扰信号,同时,在保持

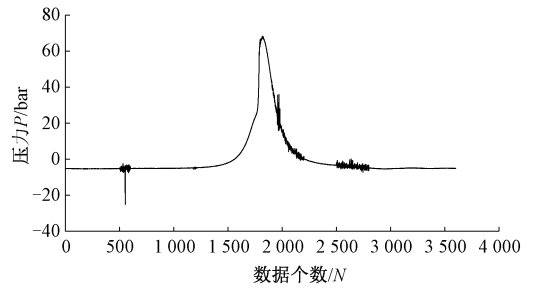


图6 多循环的均值计算之后的单循环示功图曲线(1 000 r/min)

Fig. 6 Single-cycle indicator diagram curve after multi-cycle mean value computation(1 000 r/min)

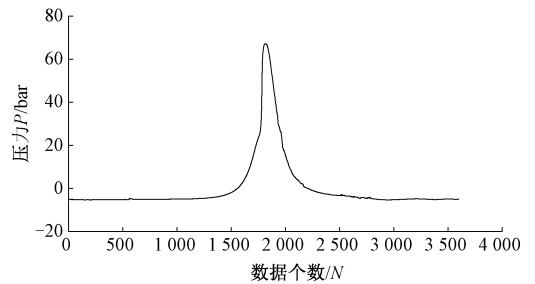


图7 中值滤波之后的示功图曲线(1 000 r/min)

Fig. 7 Indicator diagram curve after median filtering(1 000 r/min)

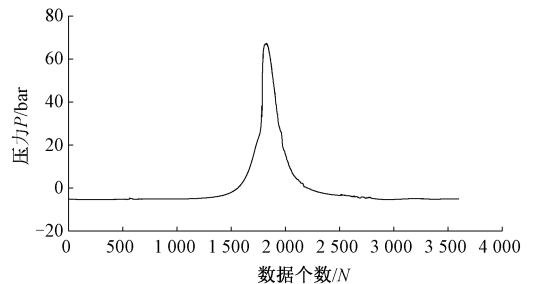


图8 畸点压力数据取舍判断之后的示功图曲线(1 000 r/min)

Fig. 8 Indicator diagram curve after judgment of distortion point pressure data(1 000 r/min)

示功图曲线较小失真的条件下,获得了平滑、连续的示功图曲线。

参考文献

- [1] 赵晓云,宋绪丁.一种四次NURBS曲线反求控制顶点方法及应用[J].仪器仪表学报,2020,41(11):270-277.
ZHAO X Y, SONG X D. An inverse computation control vertex method for the quartic NUBS curve and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

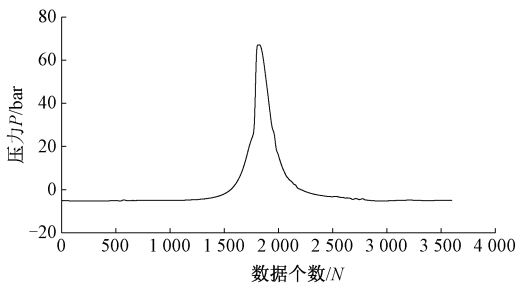


图 9 光顺处理之后的示功图曲线(1 000 r/min)

Fig. 9 Indicator diagram curve after smoothing(1 000 r/min)

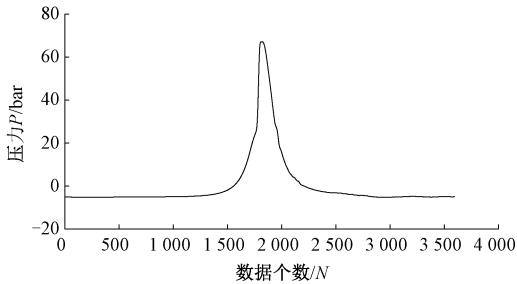


图 10 最终的示功图曲线(1 000 r/min)

Fig. 10 Final indicator diagram curve(1 000 r/min)

2020,41(11):270-277.

- [2] 潘戎蕙,夏志澜,俞臻. 电子示功器在大型船舶柴油机动装置能耗管理中的应用研究[J]. 柴油机,2016,38(5):13-17.
PAN X H, XIA ZH L, YU ZH. Research on application of electronic indicator in energy consumption management of large marine diesel engine power plant [J]. Diesel Engine,2016,38(5):13-17.
- [3] 许友林,陈丹丹,熊玲. 舰船柴油机缸内工作过程监测系统设计与实现[J]. 船海工程,2015,34(4):54-56.
XU Y L, CHEN D D, XIONG L. Design and implementation of in-cylinder working processes monitoring system for marine diesel engines[J]. Ship & Ocean Engineering,2015,34(4):54-56.
- [4] 许冠杰. 基于测试系统的发动机燃烧分析[D]. 镇江:江苏大学,2016.
XU G J. Engine combustion analysis based on test system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2016.
- [5] 杨昆,范焕羽,欧阳光耀. 舰船用柴油机燃烧放热规律数值分析方法[J]. 航海工程,2018,47(1):65-70.
YANG K, FAN H Y, OUYANG G Y. Method and correction of combustion law of marine diesel engine[J]. Ship & Ocean Engineering,2018,47(1):65-70.
- [6] 郭岩. 内燃机缸压数据采集与燃烧分析系统的研发[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
GUO Y. The development of cylinder pressure acquisition and combustion analysis [D]. Wuhan: Huazhong

University of Science & Technology,2013.

- [7] 杨升. 内燃机燃烧排放分析系统的开发与应用研究[D]. 南宁:广西大学,2016.
YANG SH. Development and application research of the combustion and emission analysis system in internal combustion engines[D]. Nanning: Guang Xi University,2016.
- [8] 张维君. 基于 PSO_SVDD 的柴油机缸内工作过程评估[D]. 大连:大连海事大学,2018.
ZHANG W J. Evaluation of in-cylinder working process for diesel engine based on POS-SVDD [D]. Dalian: Dalian Maritime University,2018.
- [9] 吕欣. 汽车发动机燃烧分析系统开发[D]. 北京:北京交通大学,2015.
LV X. Development of engine combustion analysis system on automobile [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2015.
- [10] 王可,唐忠辉,孙兴伟. 基于拉格朗日乘法对曲线点云数据的光顺处理[J]. 沈阳工业大学学报,2013,35(3):309-313.
WANG K, TANG ZH H, SUN X W. A curve fairing processing algorithms of point cloud data[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2013, 35 (3): 309-313.
- [11] 秦德,陈海. 内燃机示功图自适应性滤波处理的研究[J]. 小型内燃机与车辆技术,2015,44(5):7-11.
QIN D, CHEN H. A study on adaptive filtering methods of indicator diagrams in internal combustion engines [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique,2015,44(5):7-11.
- [12] 谢智洋,欧阳光耀,周加东. 共轨柴油机缸内燃烧信息的获取与分析[J]. 内燃机,2015(5):1-3.
XIE ZH Y, OUYANG G Y, ZHOU J D. Acquisition and analysis on the common-rail diesel engine in-cylinder combustion information [J]. Internal Combustion Engines,2015(5):1-3.
- [13] 周喜宁. 基于局部能量极小值的船体曲线曲面光顺方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
ZHOU X N. Research on fairing of hull curves and surfaces based on local energy minima [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2015.
- [14] 李茂月,马康盛,王飞,等. 基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(8):55-66.
LI M Y, MA K SH, WANG F, et al. Research on the preprocessing method of blade point cloud based on structured light on-machine measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2020,41(8):55-66.

- [15] 余永华,张立浩,杨建国.船用柴油机缸压在线监测系统开发[J].中国航海,2017,40(2):14-18.
YU Y H, ZHANG L H, YANG J G. Development of online cylinder pressure monitoring system for marine diesel engines[J]. Navigation of China, 2017, 40(2): 14-18.
- [16] 章虎冬.参数三次样条曲线的局部优化光顺算法[J].西安邮电学院学报,2011,16(2):68-70.
ZHANG H D. An optimal fairing algorithm for planar cubic spline curves[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2011, 16(2): 68-70.
- [17] 赵罡,王爱增,穆国旺.基于小波的非均匀B样条曲线自动光顺算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(11):1925-1931.
ZHAO G, WANG A Z, MU G W. Wavelet-based automatic fairing algorithm for non-uniform B-spline curve[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(11): 1925-1931.
- [18] 李长春,李元金.基于多阈值分割和B样条插值的CT图像金属伪影去除方法研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(7):128-132.
LI CH CH, LI Y J. Research on metal artifacts reduction for CT image based on multi-threshold segmentation and B-spline interpolation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 128-132.
- [19] 张连伟,刘大学,刘肖琳,等.基于图形处理器的点云快速光顺[J].计算机工程与科学,2011,33(4):86-92.
ZHANG L W, LIU D X, LIU X L, et al. Fast smoothing of cloud-points using graphics processors[J]. Computer Engineering & Science, 2011, 33(4): 86-92.
- [20] 王可,唐忠辉,孙兴伟.一种点云数据曲线光顺处理算法[J].组合机床与自动换加工技术,2013,(2):64-69.
WANG K, TANG ZH H, SUN X W. A curve fairing processing algorithms of point cloud data[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013, (2): 64-69.
- [21] 廖伯荣.汽油机加速瞬态工况燃烧特性研究[D].长沙:长沙理工大学,2015.
LIAO B R. Study on Combustion characteristics of gasoline engine under accelerated transient operating conditions[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.
- [22] 曹国豪,余永华,杨建国.基于单片机系统的船用柴油机示功图测量系统研制[J].航海工程,2014,39(1):84-87.
CAO G H, YU Y H, YANG J G. Development of an indicator diagram measurement system based on microcontroller for a marine diesel engine[J]. Ship & Ocean Engineering, 2014, 39(1): 84-87.
- [23] ZHANG Y, ZHU Q J, GAO S, et al. Optimization of technological parameters of straw fiber-based plant fiber seedling pot raw materials[J]. Applied Sciences Volume, 2021, 11(15): 7152-7152.
- [24] CHENG W M, LI X H, YI X. Influence of exhaust gas recirculation on low-load diesel engine performance[J]. Wuhan University journal of Natural Sciences, 2017, 22(5): 443-448.
- [25] 余永华,杨建国.船舶性能监测分析仪研制[J].船舶工程,2016,31(1):8-10.
YU Y H, YANG J G. Development of performance monitoring analyzer for marine diesel engine[J]. Ship Engineering, 2016, 31(1): 8-10.
- [26] 马志豪,刘成,王鑫,等.非道路用重型柴油机燃烧过程优化[J].农业工程学报,2019,35(16):78-86.
MA Z H, LIU CH, WANG X, et al. Optimization of combustion process for non-road heavy-duty diesel engines[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 78-86.
- [27] 马志豪,陈占耀,贾义,等.小功率非道路用柴油机动、经济及排放特性[J].农业工程学报,2017,33(21):78-84.
MA ZH H, CHEN ZH Y, JIA Y, et al. Power, economy and emission characteristics of low power non-road diesel[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 78-84.
- [28] AKHAYERE E, KAVAZ D. Nano-silica and nano-zeolite synthesized from barley grass straw for effective removal of gasoline from aqueous solution: a comparative study[J]. Chemical Engineering Communications, 2021, 208(10): 1419-1435.
- [29] 吕志忠,姜铖,蒋林,等.基于电功率的抽油机示工图测试系统研究[J].机械设计与制造,2019(3):225-228.
LV Z Z, JIANG C, JIANG L, et al. Study on the test system of oil pumping machine diagram based on electric power[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(3): 225-228.
- [30] 马逸飞,丁渭平,王铃燕,等.双筒液力减振器示功特性影响因素及其敏感性分析[J].噪声与振动控制,2018,38(6):162-166.
MA Y F, DING W P, WANG L Y, et al. Analysis on sensitivity and influencing factors of force-displacement characteristics of dual-cylinder hydraulic shock absorbers[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(6): 162-166.

- [31] 武炜,陈标,吴剑锋,等. 基于五点三次平滑算法的入库流量反推研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(12): 100-102.
WU W, CHEN B, WU J F, et al. Study on reverse deduction of reservoir-inflow based on cubical smoothing algorithm with five-point approximation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(12): 100-102.
- [32] 於鹏,严良文,余越,等. 五点三次平滑算法在 PPG 信号降噪中的应用[J]. 计量与测试技术, 2020, 47(6): 47-53.
YU P, YAN L W, YU Y, et al. The application of five-point cubic smoothing algorithm in noise reduction of PPG signal[J]. Metrology & Measurement Technique, 2020, 47(6): 47-53.
- [33] 张玲玲,杨青乐,杨万成,等. 柴油机振动信号非平稳周期特征的极坐标增强研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(5): 33-37.
ZHANG L L, YANG Q L, YANG W CH, et al. Research on polar enhancement of non-stationary cycle feature for diesel engine vibration signal [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(5): 33-37.
- [34] DU Y, ZHAO P, ZHANG T, et al. Fault recognition of indicator diagrams based on the dynamic time warping

distance of differential curves [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021(1): 1-7.

作者简介



杨光, 2000 年于吉林建筑大学获得学士学位, 2004 年和 2016 年于长春理工大学获得硕士学位和博士学位, 现为长春理工大学副教授, 主要研究方向为智慧农机和汽车非标设备开发。

E-mail: guangyang1975@126.com

Yang Guang received B. Sc. from Jilin Jianzhu University in 2000, M. Sc. and Ph. D. from Changchun University of Science and Technology in 2004 and 2016, respectively. He is an associate professor at Changchun University of Science and Technology. His main research interests include intelligent agricultural machinery and development of automobile non-standard equipment.



魏亨蝶, 2020 年于长春理工大学获得学士学位, 现为长春理工大学硕士研究生, 主要研究方向为传感与信号处理。

E-mail: 2298769412@qq.com

Wei Hengdie received B. Sc. from Changchun University of Science and Technology in 2020. She is currently a M. Sc. candidate at Changchun University of Science and Technology. Her main research interests include sensing and signal processing.