doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.041

基于实时性优化的内燃机燃烧分析系统研究

王兆文　郭　凯　武文杰　覃国宇　杨　灿　成晓北
（华中科技大学能源与动力工程学院，武汉 430074）

摘要：采用缸压传感器、数据采集卡、光电编码器和 LabVIEW 软件，搭建在线缸压采集和实时燃烧分析系统平台，研究 HCCI 和 RCCI 燃烧模式的循环波动特性。针对单循环缸压测量过程中的通道效应干扰，基于频谱分析，采用 FFT、线性插值法和 IFFT 等方法相结合的滤波方式，实现共振峰的在线自适应识别与实时滤波，较好地减少了单循环缸压的干扰误差，使单循环的实时燃烧分析成为可能。随后，基于实时滤波后的缸压曲线，计算得到内燃机的最大压力升高率、燃烧放热率、爆发压力等重要燃烧参数。利用程序算法中同步性良好的生产者/消费者运算模式提高数据的共享能力，实现了数据实时运算与数据快速储存的并行处理，提高了燃烧计算的实时性；针对发动机不同工作阶段采用了不同精度层次的计算方法，减少了进排气、压缩和膨胀阶段的计算耗时，在计算量较大的燃烧放热率计算部分，通过适当简化计算公式和公式节点运算模块来提高燃烧系统的实时性。最后，分析了燃烧分析系统的实时性，并进行了燃烧分析系统的实验验证。

关键词：内燃机；燃烧分析系统；缸压在线滤波；实时性；优化
中图分类号：TK4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2020)01-0372-11　　**OSID**：

Development of Real-time Combustion Analysis System for IC Engine Based on Real-time Optimization

WANG Zhaowen　GUO Kai　WU Wenjie　QIN Guoyu　YANG Can　CHENG Xiaobei
(*College of Energy and Power Engineering*, *Huazhong University of Science and Technology*, *Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: The homogeneous charge compression ignition (HCCI) and reactivity controlled compression ignition (RCCI) engines are very sensitive to the in-cylinder compression temperature, the spatial distribution of fuel and air, and the component of fuels. Variation of these facts will result in the cyclic variation in IC engine. Based on the needs of cyclic variation research in HCCI engine and RCCI engine, an online cylinder pressure acquisition and real-time combustion analysis system adopting in-cylinder pressure sensor, data acquisition card, photoelectric encoder and LabVIEW software was built. In order to improve the real-time performance of combustion analysis system, only single cycle cylinder pressure was collected and calculated. There were much pressure fluctuation in single cycle cylinder pressure resulting from channel effect and other effect, and a real-time filtering of in-cylinder pressure was adopted to reduce the interference error of single cycle in-cylinder pressure data. The filtering methods based on spectrum analysis, like fast Fourier transformation (FFT), linear interpolation and inverse fast Fourier transform (IFFT), can realize the online adaptive identification and auto pressure smooth for the single cycle in-cylinder pressure, which made the real-time combustion analysis system for HCCI and RCCI mode possible. Then, based on the smoothed cylinder pressure, some important combustion parameters such as the maximum pressure increase rate, combustion heat release rate and in-cylinder peak pressure were calculated. In order to further improve the real-time performance of the combustion analysis system, the producer/consumer operation mode which can achieve the synchronized process of real-time data calculation and fast data storage was used. The improved data sharing ability can improve the real-time ability of the combustion calculation. Different accuracy levels of calculation methods were adopted for different working stages in engine, which can reduce the calculation time for intake, exhaust, compression and expansion stages. In combustion stage, which had the largest calculating workload, the

收稿日期：2019－05－09　修回日期：2019－05－31
基金项目：国家自然科学基金项目(51576083)
作者简介：王兆文(1978—)，男，副教授，主要从事内燃机燃烧和排放控制研究，E-mail：wangzhaowen1978@163.com

appropriate simplified calculation formulas and formula node operation modules were adopted to improve the real-time performance. Finally, the real-time performance of the combustion analysis system was analyzed and an experimental verification of the combustion analysis system was carried out.

Key words: IC engine; combustion analysis system; cylinder pressure online filtering; real-time performance; optimization

0　引言

HCCI（均质压燃）燃烧模式和 RCCI（反应控制压燃）燃烧模式是目前可以实现高效、低污染的内燃机燃烧技术，具有较高的热效率和较低的排放水平[1-2]。在 HCCI 和 RCCI 的研究过程中发现，缸内的压缩温度、油气混合气的混合程度以及不同燃料的组分配比都对 HCCI 和 RCCI 的燃烧过程影响较大[3-4]，即使较细微的缸内环境变化都会对燃烧过程造成比较敏感的影响，从而使得发动机的循环波动率较大。为了准确研究这些循环波动率，需进行缸内燃烧的实时分析。

在内燃机常规性能台架实验中，内燃机燃烧情况无法直接测量。缸内燃烧品质对内燃机的各项性能都有很大影响，通过分析缸内爆发压力，对发动机缸内燃烧情况进行分析和判断，可以为发动机性能的优化提供方向。燃烧分析系统可以定量地呈现缸内不可观测的实际燃烧状况，包括放热率、最大压力升高率、循环变动率等[5]。目前，在常规发动机燃烧分析中，普遍采用 50 ~ 100 个循环的平均值进行燃烧分析[6-7]。采用多个循环平均的方法，可以消除因滤波不足带来的测量噪声，但将多个循环数据进行平均处理，尤其是对 50 个、甚至 100 个循环的数据进行平均处理，掩盖了发动机燃烧不稳定的本质，在发动机燃烧不稳定性研究中很难被采用。大多数采用平均处理方法的燃烧分析仪，往往其滤波效果不佳，直接采用这种燃烧分析仪进行单循环的燃烧分析，则明显波动太大。

基于上述问题，为了对 RCCI 和 HCCI 循环波动率进行研究，本文基于 LabVIEW 软件平台，搭建实时燃烧分析系统，以缸压曲线为基础计算出内燃机缸内燃烧的放热规律[8]，研究不同的喷油策略等对内燃机缸内燃烧性质的影响。

1　总体架构

根据内燃机燃烧分析的原理和基本准则[9-10]，设计的实时燃烧分析系统的总体框架如图 1 所示。

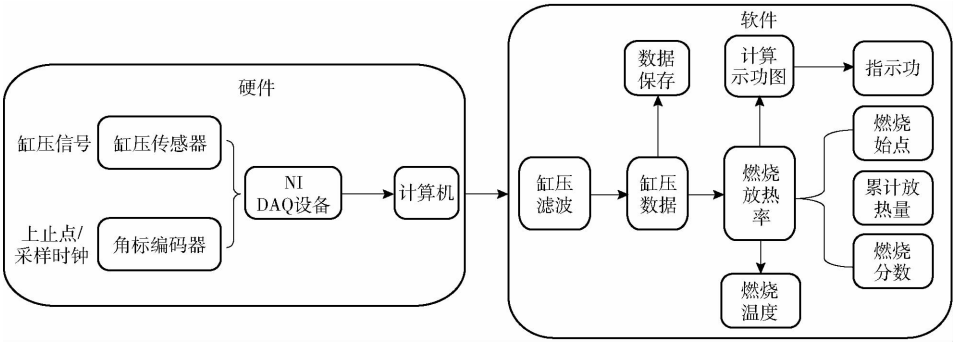

图 1　实时燃烧分析系统的总体框架

Fig. 1　Overall framework of combustion analysis system

实时燃烧分析系统的主要功能有：

（1）基于角标相位的缸压采集。为了提高燃烧分析的精度，本文角标相位采集频率为 0.1°CA。

（2）压缩上止点自适应标定。压缩上止点的位置准确性，将会直接影响示功图的准确性，对放热率的计算尤为重要。因此，燃烧分析计算之前，需要先准确标定压缩上止点的相位。本系统在每次 RCCI 和 HCCI 实验研究之前，先进行不同转速的倒拖实验，采用压缩线法自适应地修正压缩上止点的偏移量。

（3）缸压在线自适应滤波。本系统基于频谱分析，消除掉通道效应和缸内压力波的振荡噪声。

（4）缸压燃烧分析。主要包括燃烧放热率、燃烧温度、压力升高率、CA50 等参数的计算，并得到发动机的循环变动曲线。

（5）采集和分析数据的实时储存。基于 TDMS 的高速储存特性，快速记录缸压和计算结果。

2　实时性要求及软件实现

本文燃烧分析系统设计的主要目标是为了方便 HCCI 和 RCCI 燃烧研究，包含其循环波动率研究。因此，要求燃烧分析系统具有较高的实时性。在下

一循环数据采集完成前,完成放热率等的分析计算,并将计算结果与原始缸压同时显示;即要求在一个循环内,完成燃烧情况的计算分析。

目前市场上的燃烧分析系统,如 AVL 和 DEWETRON 的燃烧分析系统,进行发动机燃烧分析时,大多采用 50 ~ 100 个循环缸压的平均值来进行燃烧计算,虽然有利于滤除每个循环缸压的波动,能反映所研究发动机的平均燃烧情况。但对于研究燃烧波动性而言,平均方法的实时性较差。为了提高燃烧系统的实时性,同时兼顾测量系统的噪声消除,本系统采用自适应滤波子程序,先将采集的一个循环内缸压进行自适应滤波,去除噪声后,直接进行燃烧分析计算。避免因进行多循环缸压的平均计算而导致等待时间较长的问题,提高了整个燃烧系统的实时性。

影响燃烧系统实时性的另外两个因素分别为:①燃烧计算和计算结果储存在同一个循环内完成,导致整个计算循环占时较长。为解决这个问题,本文采用生产者/消费者模式,使数据存储工作与燃烧计算工作并行运行,从而能缩短整个燃烧系统的计算时长。②燃烧阶段的计算较复杂,计算时间较长。为解决这个问题,针对不同工作阶段分别采用不同精度层次的计算策略,适当简化计算公式以及公式节点运算模块以提高计算效率。

2.1 缸内压力的实时采集及自适应滤波

采用 kistler - 6125C 型缸压传感器、安世通 S4001 型角标传感器,通过 LabVIEW 与 NI 6351 采集卡通信,进行实验发动机的缸压采集。由于结构限制,角标传感器安装在内燃机曲轴上。角标传感器将旋转器件的转速和相位信息转换为数字化的角度信号。具体为输出 3 组方波脉冲信号 A、B、Z。信号 A 每循环输出 7 200 个方波,作为外部时钟信号源,即每 0.1°CA 曲轴转角采集一次缸压。信号 B 和信号 A 功能相同,故而采集系统中只需选用信号 A 和信号 B 中的一个。信号 Z 每循环输出 2 个方波,作为采集系统的触发信号源,信号 Z 的位置与发动机压缩上止点位置始终保持固定的相位关系,故而上止点信号可通过信号 Z 来表示;实验时,当缸压采集系统检测到信号 Z 的上升沿方波信号,采集系统启动。信号 A 作为外部采集时钟,即每个循环采集 7 200 个缸压。

在实际发动机中,放热率计算对缸压测量过程中的干扰特别敏感,缸压测量存在误差会将放热率误差放大几十倍,因此,燃烧计算中,需要去除缸压曲线中的杂波干扰,从而提高燃烧分析的准确性。缸压测量过程中的干扰主要有两种:由于安装条件的限制,或者基于保护缸压传感器的需求,会在缸压传感器与燃烧室之间留有一段连接通道,导致通道效应[11]。实际缸压测量时,燃烧压力波在缸内的反复振荡会导致测量压力具有一定的波动性。

本文服务对象是一台单缸 RCCI 实验机,其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 单缸 RCCI 实验机技术参数

Tab.1 Parameters of single cylinder RCCI engine

参数	数值
标定有效功率/kW	55
标定转速/(r·min^{-1})	1 900
标定扭矩/(N·m)	360
最大扭矩(转速)/(N·m)(r/min)	360(1 000)
最高爆发压力限值/MPa	24
缸径/mm	123
冲程/mm	156
压缩比	16.5

为了减少缸压中的信号干扰,缸压采集完成后,对实测缸压进行傅里叶变换,得到频谱分析图,并分析其共振峰[12]的频率分布范围。图 2 为测量的转速 1 400 r/min,50% 负荷工况下原始缸压的频谱图。

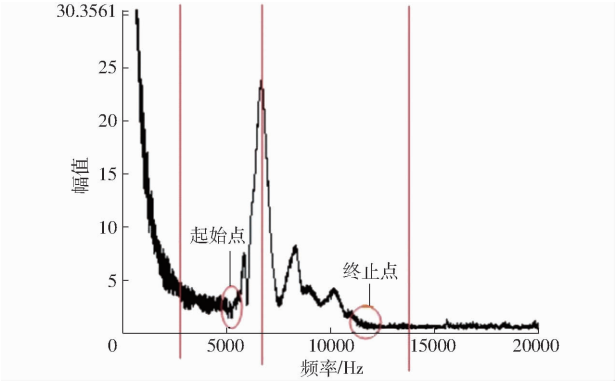

图 2 频谱局部划分图

Fig.2 Spectrum analysis map

由图 2 可知,干扰频率范围为 5 000 ~ 11 700 Hz。通道效应共振频率[13]计算公式为

$$f=\frac{a}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{LV}} \tag{1}$$

式中 a——该环境下的气体声速

S——该通道的截面面积

L——通道长度

V——整体空腔的容积体积

结合频谱分析图计算得到,本文测量系统的共振频率为 7 000 Hz,由此可知,本实验中单缸机的主要干扰来源为通道效应,并且干扰信号的频率属于中频段。

本文选用基于 Butterworth 滤波器[14]设计的零相位滤波、小波[15]滤波和频谱滤波 3 种滤波方式进

行缸压的滤波。

使用基于 Butterworth 滤波器设计的零相位滤波对原始缸压信号进行处理，将 5 000 Hz 设为截止频率，得到的结果如图 3 和图 4 所示。由图 3 可以看出，相位与原数据保持一致，但处理后的缸压曲线中仍然存在波动，这是由 Butterworth 滤波器的频率响应特性决定的，它不能将截止频率之后的频率对应的能量完全去除。图 4 表明，缸压的轻微波动对放热率的计算存在很大影响，使得进一步分析变得困难。

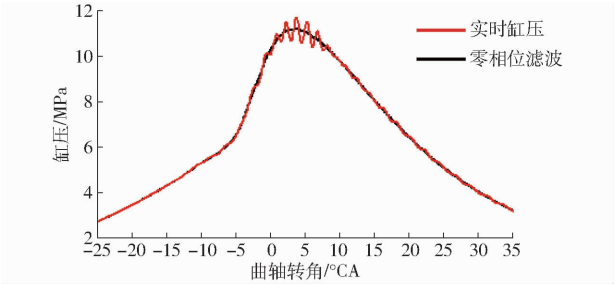

图 3　Butterworth 滤波器前后缸压曲线

Fig. 3　Cylinder pressure curves after Butterworth filter

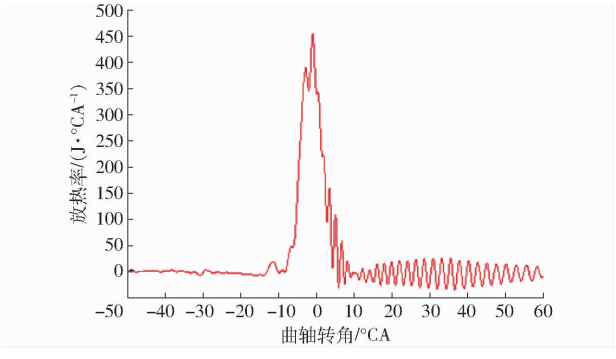

图 4　Butterworth 滤波器后放热率曲线

Fig. 4　Heat release rate curve after Butterworth filter

本文通过调用 Matlab 的小波去噪函数的方法进行缸压的滤波设计，包括小波变换软阈值滤波与小波变换硬阈值滤波[16]。缸压曲线经小波软阈值去噪滤波后，放热率曲线波动仍然较大，且发生了一定的变形，不利于进行燃烧计算和分析，其缸压曲线如图 5 所示，放热率曲线如图 6 所示。

而经小波硬阈值去噪滤波后，缸压曲线如图 7 所示，放热率曲线如图 8 所示。可以发现，该结果与小波软阈值滤波的结果类似，缸压曲线情况较好，但放热率曲线仍有较大波动和变形。这是因为小波变换滤波在高频自适应滤波方面表现出色，但本文缸压的干扰频段基本处于中频段，导致基于小波变换的滤波方式不够理想。

最后，本文采用频谱分析下的广义频率抽样滤波方法[12]进行了缸压的干扰信号去除。由于通道效应的频率范围属于中频段，因此在频谱分析中截

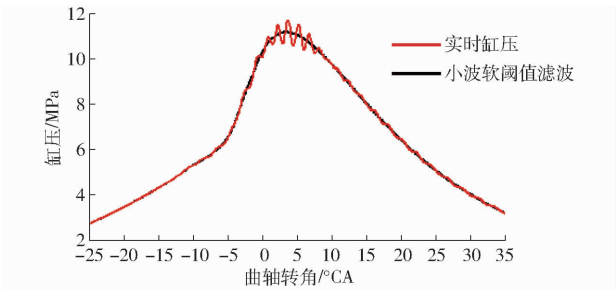

图 5　小波变换软阈值滤波器前后缸压曲线

Fig. 5　Cylinder pressure curves after wavelet soft-threshold filter

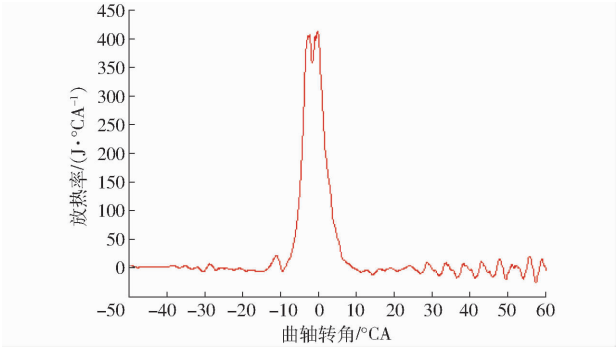

图 6　小波变换软阈值滤波器放热率曲线

Fig. 6　Heat release rate curve after wavelet soft-threshold filter

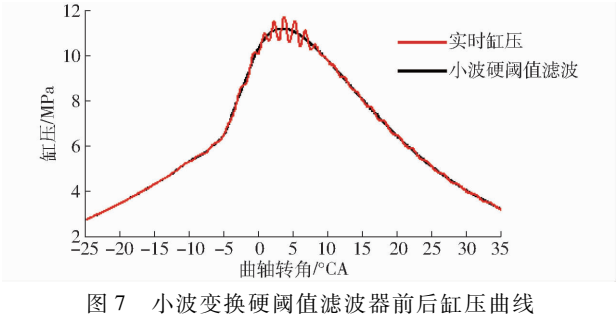

图 7　小波变换硬阈值滤波器前后缸压曲线

Fig. 7　Cylinder pressure curves after wavelet hard-threshold filter

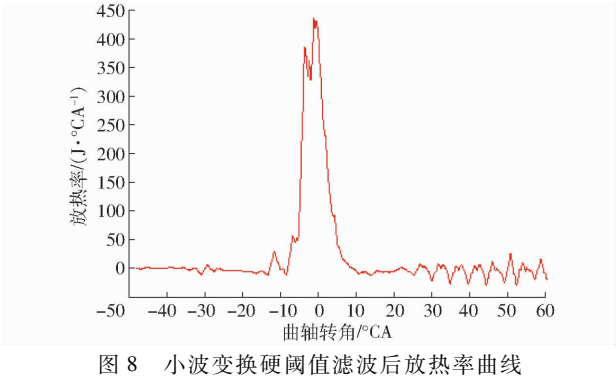

图 8　小波变换硬阈值滤波后放热率曲线

Fig. 8　Heat release rate curve after wavelet hard-threshold filter

取部分数据，并在这段数组中查找最大值所在的位置，以最大值为分界线，在前半段查找最小值，其对应的索引为起始点；在后半段查找最小值，其对应的

索引为终止点。采用线性插值的方法利用一条线段替换该共振峰,得到滤波后的频谱图,如图 9 所示。在实际在线运算过程中,根据共振峰所处的实际频率范围,定位其在频谱中所处的位置,具体程序框图如图 10 所示。

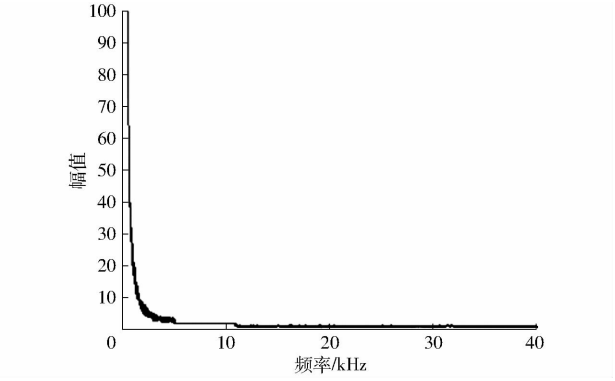

图 9 缸压曲线频谱插值

Fig. 9 Spectrum map after interpolation

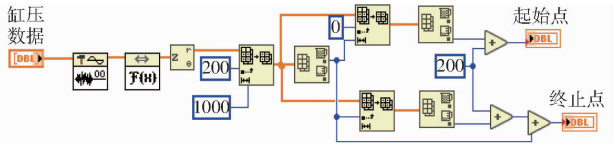

图 10 频谱共振峰位置查找程序框图

Fig. 10 Program diagram for finding formant

频谱滤波程序框图如图 11 所示,将得到的缸压曲线频谱作为实部,与进行快速傅里叶变换(FFT)得到的虚部结合,转换成复数,然后进行快速傅里叶逆变换(IFFT),得到滤波后的缸压曲线如图 12 所示,放热率曲线如图 13 所示。结合共振峰的自适应查找算法与 FFT、IFFT 频谱插值算法实现缸压曲线的自适应滤波,既无 Butterworth[14] 这类滤波器截止频率后滤不彻底的问题,又能很好地完成滤波的预期效果。

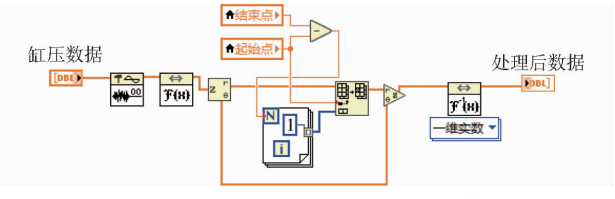

图 11 基于 FFT 与 IFFT 滤波程序

Fig. 11 Diagram of filter program based on FFT and IFFT

为了分析不同滤波方式的效果,本文解析了 Butterworth 零相位滤波、2 种小波变换滤波和频谱滤波对燃烧初始阶段压力升高率、燃烧始点偏移量和放热率波动指数的影响,其中,燃烧初始阶段压力升高率表示缸内从未燃烧到燃烧这个突变过程的放热斜率,滤波前后应当接近;燃烧始点偏移量表示滤波前后的燃烧始点偏移情况,滤波前后的差距越小越好;放热率波动指数表示滤波后的放热率波动情况,

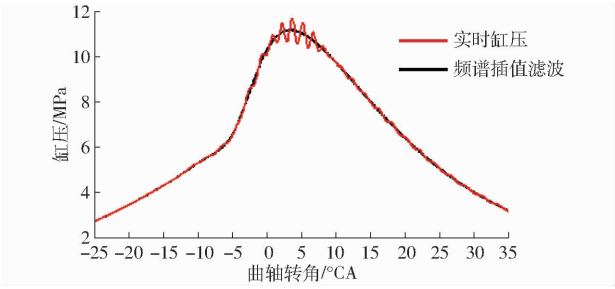

图 12 频谱插值滤波前后的缸压曲线

Fig. 12 Pressure curves of cylinder after spectrum-interpolation filter

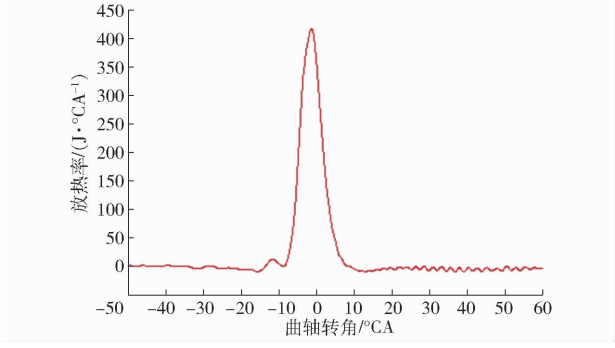

图 13 频谱插值滤波器后放热率曲线

Fig. 13 Heat release rate curve after spectrum-interpolation filter

滤波目的是减少放热率的高频波动。3 个特征量的对比如表 2 所示。

表 2 滤波数据的衡量参数分析

Tab. 2 Analysis of filtered data by different filter modes

滤波方法	燃烧始点偏移量/°CA	燃烧初始阶段压力升高率/(MPa·°CA⁻¹)	放热率的波动指数
无滤波	0	0.954 1	18.652 3
零相位	0.4	0.867 6	0.364 0
小波变换软阈值	1.4	0.924 0	0.257 1
小波变换硬阈值	0.6	0.942 9	0.319 8
频谱插值	0.4	0.880 5	0.168 6

由表 2 可知,小波变换滤波对初始阶段压力升高率的保留效果较好,但小波变换软阈值滤波会对燃烧始点的位置产生较大的影响,小波变换硬阈值滤波放热率曲线的高频波动较大,且两种方法都会使放热率曲线产生不恰当的变形;Butterworth 零相位滤波的放热率波动最大,并且对燃烧初始阶段压力升高率的保留效果不好;而频谱插值滤波的燃烧始点偏移量和放热率的波动指数都最小,便于进行分析计算,且燃烧初始阶段压力升高率的下降不明显。综合来看,频谱插值滤波方法对数据的处理能力最优,得到的放热率曲线较为平滑(图 13),同时具有较好的可靠性和准确性。

为了验证缸压曲线实时处理的可行性和可靠

性，分别对单循环缸压和多循环平均缸压进行频谱插值滤波，滤波结果如图 14 和图 15 所示。

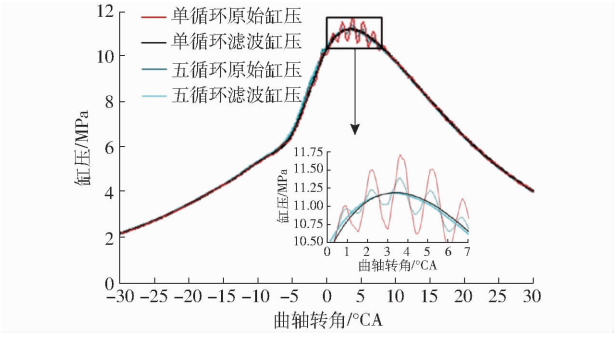

图 14　单循环缸压和多循环平均缸压滤波结果对比

Fig. 14　Comparison between single cyclic cylinder pressure and multi-cyclic average cylinder pressure

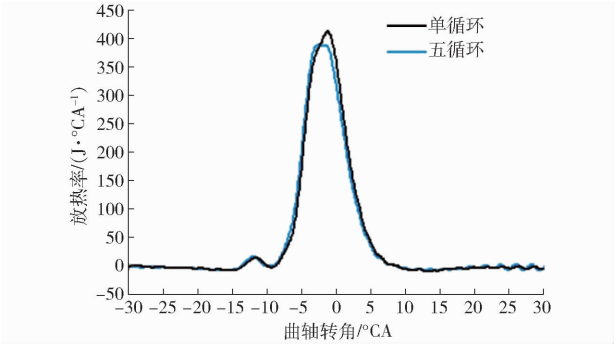

图 15　单循环缸压和多循环平均缸压滤波后燃烧放热率对比

Fig. 15　Comparison between single cyclic heat release rate and multi-cyclic average heat release rate

由图 14、15 可知，虽然多循环平均后的缸压曲线的波动更小，但不同循环缸压滤波后的缸压图形基本重合，放热率曲线的形状也基本一致。在实时分析下，经过频谱插值滤波后的单循环缸压可以较为精确地反映内燃机运行的实际过程，具有较好的精确度和可行性。

2.2　燃烧分析计算的基础理论

实时将采集到的缸压进行燃烧分析，关键在于放热率的计算。基于频谱图的缸压自适应滤波方式是为提高缸压曲线测量的精度，得到更准确的燃烧参数。

发动机的工作循环遵循热力学第一定律，其能量守恒方程式为[17]

$$Q_B = \Delta U + W + Q_W \tag{2}$$

式中　Q_B——燃烧放热量

ΔU——内能变化量

W——做功量　　Q_W——散热量

以相位角 $\Delta\varphi$ 为采集步长采集缸压得到缸压曲线，采集步长的燃料燃烧放热量 $\mathrm{d}Q_B$ 等于采集步长的内能变化量 $\mathrm{d}U$、做功量 $\mathrm{d}W$ 和散热量 $\mathrm{d}Q_W$ 之和，相应量除以 $\Delta\varphi$ 即可获得放热率为

$$\frac{\mathrm{d}Q_B}{\Delta\varphi} = \frac{\mathrm{d}U}{\Delta\varphi} + \frac{\mathrm{d}W}{\Delta\varphi} + \frac{\mathrm{d}Q_W}{\Delta\varphi} \tag{3}$$

即

$$\mathrm{d}Q_B = \mathrm{d}U + \mathrm{d}W + \mathrm{d}Q_W \tag{4}$$

同理第 i 个单位步长内可以表示为

$$\mathrm{d}Q_{Bi} = \mathrm{d}U_i + \mathrm{d}W_i + \mathrm{d}Q_{Wi} \tag{5}$$

为求出燃烧放热率 $\mathrm{d}Q_{Bi}$，需分别对 $\mathrm{d}U_i$、$\mathrm{d}W_i$、$\mathrm{d}Q_{Wi}$ 进行计算，具体计算流程图如图 16 所示。

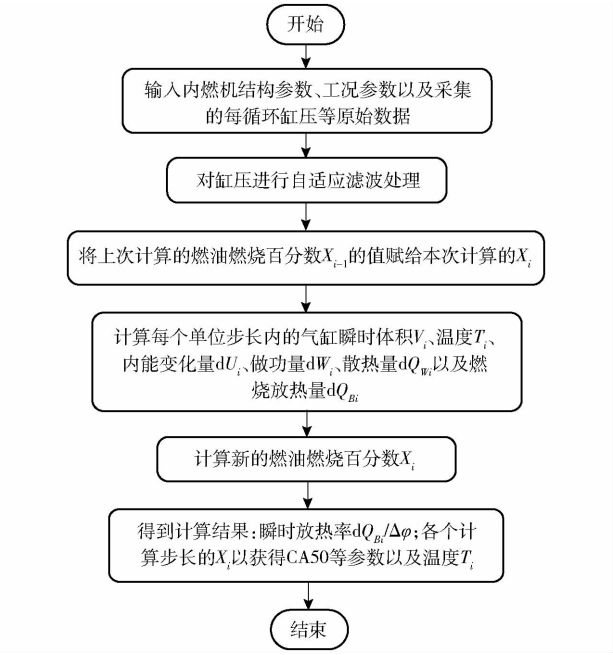

图 16　放热率计算流程图

Fig. 16　Flow chart of heat release rate calculation

2.3　基于实时优化的燃烧分析程序结构

发动机转速越高，对应每个循环所用的物理时间就越少，故而留给实时系统的计算分析和数据储存的时间越少。

为了提高实时燃烧分析系统的实时性，实时燃烧分析系统采用不同精度层次的计算方法。针对进排气阶段，压力波动较小，做功和温度变化量都较小，计算曲轴节点为 1°CA 曲轴转角；针对压缩和膨胀阶段，需要精确计算温度变化量和能量变化量，以提高传热等的计算精度，计算节点为 0.5°CA 曲轴转角；针对燃烧阶段，反映燃烧特性及循环变动情况，需要重点计算，计算节点为 0.1°CA 曲轴转角。

同时，为了提高实时燃烧分析系统的实时性，本系统的多循环架构采用生产者/消费者设计模式[17]，保证数据分析的同步性。如图 17 所示，生产者-消费者循环对数据的共享能力较好，可以将生产者循环中采集到的数据与分析结果以队列的形式及时送给消费者循环。因为消费者循环又可以看成一个单独工作的循环，其工作不影响生产者单元下一循环的数据采集和分析过程。很好地解决了上一循

环数据由于存储过程的耗时较长,而导致的下一循环数据无法采集,以及缓存区数据溢出的现象。

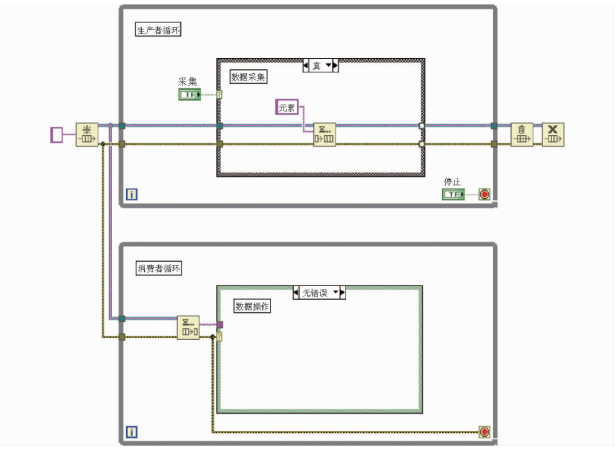

图 17 生产者/消费者设计模式

Fig. 17 Producer/Consumer mode

采用 For 语句作为主计算循环,将 7 200 个缸压点导入主计算循环,计算相邻点的差值。由于相邻数据间隔为 0.1°CA,计算的相邻两点斜率即为气缸压力数据的压力升高率[19]。用数组最大值与最小值函数计算得到最大压力升高率。同时将计算得到的爆压 p_{max}、最大压力升高率导入波形图表,在线实时显示这两种参数的多循环波动情况。图 18 为压力升高率、爆压计算程序框图;图 19 为实验过程中实时循环最大压力升高率和最高爆发压力的波动情况。

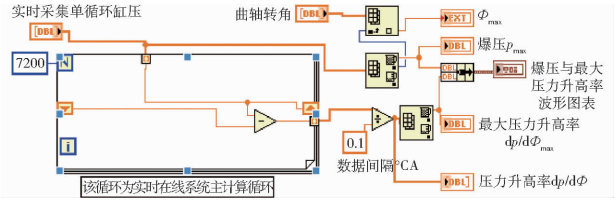

图 18 压力升高率、爆压计算程序框图

Fig. 18 Program diagram of pressure rise rate and maximum pressure calculation

放热率和放热量是衡量发动机燃烧状态的关键指标[20],因此,放热率和放热量的计算是整个燃烧分析计算的重心,同时也是计算量最大,耗时最长的计算内容。为了提高该部分内容的计算速度,采用适当简化计算公式以及采用公式节点运算模块来提高燃烧系统的实时性。

由上文所述,累计放热量是对各单位步长内的放热量进行迭代求和,而计算瞬时放热率需要获得每个步长的 dU_i、dW_i、dQ_{Wi},相应的计算方法如下

$$dU_i = U_{i+1} - U_i \tag{6}$$

其中 $$U_i = nC_vT - n_aC_vT_a$$

式中 n——当前时刻物质的量

C_v——定容比热容

T——当前时刻温度

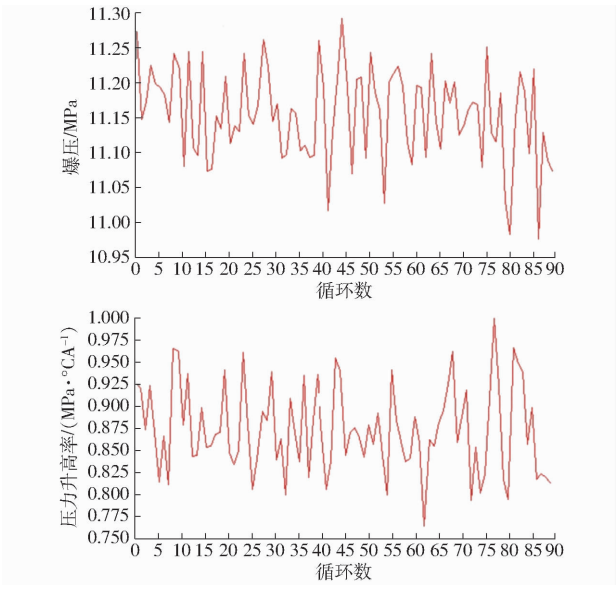

图 19 实时循环的压力升高率、爆压计算波动图

Fig. 19 Real-time pressure rise rate and maximum pressure

n_a——压缩初始点时刻的物质的量

T_a——压缩初始点时刻的温度

对于做功量,则有

$$dW_i = \frac{p_i + p_{i+1}}{2}(V_{i+1} - V_i) \tag{7}$$

式中 p_i——当前时刻压力

p_{i+1}——下一时刻压力

V_i——当前时刻气体体积

V_{i+1}——下一时刻气体体积

散热量为气缸内工质与气缸内壁的换热量,包括工质与活塞、气缸盖及内壁之间的换热 3 部分

$$dQ_{Wi} = \frac{1}{\omega}a_g[(A_t(T - T_{wt}) + A_b(T - T_{wb}) + A_w(T - T_{ww})] \tag{8}$$

式中 ω——角速度 A_t——缸盖面积

A_b——活塞顶面积

A_w——缸套壁的面积

T_{wt}——缸盖表面温度

T_{wb}——活塞顶表面温度

T_{ww}——缸套壁表面温度

a_g——瞬时平均换热系数,采用 Sitkei 准则公式得到

LabVIEW 的公式节点运算模块具有 C 语言的部分功能,可以定义参数的数据类型,同时可以使用判断语句等一些运算。公式节点运算模块的运行速度直接影响系统实时性的效果。相较于 LabVIEW 调用 Matlab 的 MathScript 节点来计算放热率,公式节点运行模块时间占比更小,有利于实时性能的保证。结合上文的燃烧放热规律计算理论基础,在 LabVIEW 软件系统中搭建放热率计算模型。

首先是单位做功量 dW_i 与单位换热量 dQ_{Wi}。实时体积 V_i 是计算做功量的基础，实时体积计算模块如图 20 所示。



图 20　实时体积计算模块

Fig. 20　Module for real time cylinder volume calculation

LabVIEW 公式节点可以灵活地编辑计算公式，在实际计算放热率的过程中，为了简化运算，提高实时性，往往只在压缩和做功冲程的部分曲轴转角范围内进行燃烧计算。系统选用计算范围为 -150 ~ 150°CA，其余部分对燃烧的放热分析影响较小，对其忽略以减小计算量，有利于保证计算的实时性。燃烧计算中，首先进行了做功量的计算，其具体程序如图 21 所示。

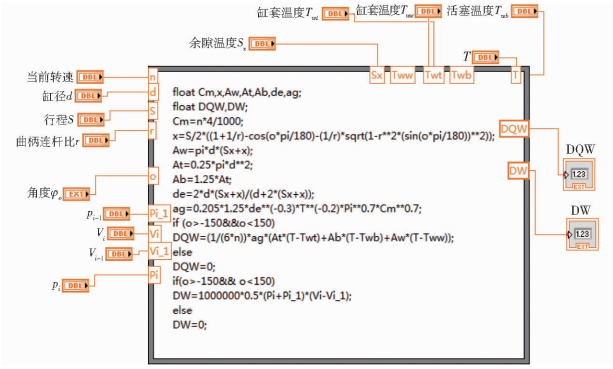

图 21　dW_i 与 dQ_{Wi} 的 LabVIEW 实现

Fig. 21　Calculation program for dW_i and dQ_{Wi}

内能变化量 dU_i 的计算程序如图 22 所示，与前文中 dW_i 与 dQ_{Wi} 的计算程序框图一样，公式节点的应用使得 dU_i 的计算得以实现，采用迭代的计算模式，前一瞬时已燃烧的燃料百分比通过移步寄存器缓存后用于下一瞬时的计算。

前文得到 dW_i、dQ_{Wi} 与 dU_i 相加既可以得到放热率计算 dQ_i，继而得到整个循环的 dQ。瞬时放热率公式为

$$A_{HRR_i}=\frac{dQ_i}{\Delta\varphi} \tag{9}$$

采用旋转一周输出 3 600 个方波的角标传感器，因此采集步长为 0.1°CA，即式中 $\Delta\varphi$ 为 0.1。

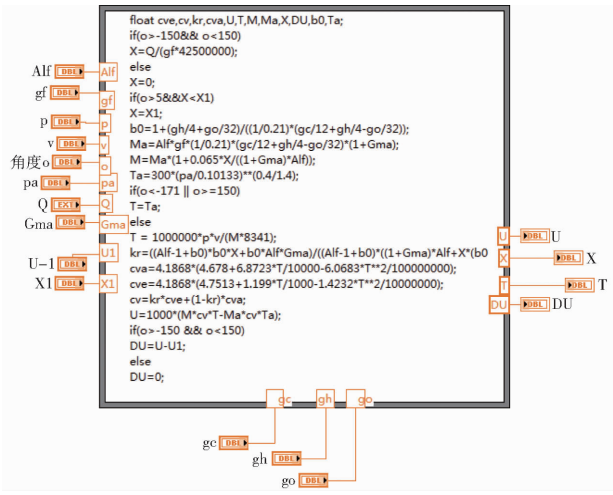

图 22　dU_i 的 LabVIEW 实现

Fig. 22　Calculation program for dU_i

2.4　基于实时分析的数据存储格式

系统采用 TDMS 的数据存储格式，LabVIEW 中 TDMS 文件相对于其他文件拥有高速、易存取的优势[21]，其写入速度最高可达 372 Mb/s。快速的写入速度更利于实时系统的开发。在实际操作过程中，实验者可自主定义保存的文件位置、文件夹名称、文件名。图 23 为实时系统中消费者循环的数据保存程序。

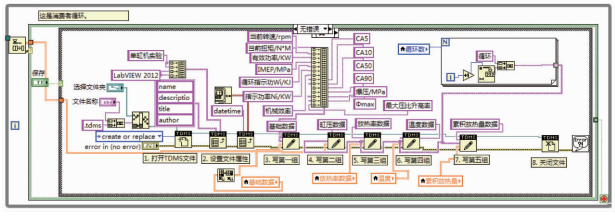

图 23　数据保存程序框图

Fig. 23　Program diagram for data saving

3　实时性能分析

燃烧分析系统的实时性要求在下一循环数据采集完之前，主计算循环的数据分析与显示必须运算完成，同时将数据共享给消费者循环进行储存。本节将分析各个程序模块的时间占比，来说明本系统的实时性能。发动机每循环用时计算式为

$$t=\frac{2\times 60}{n_1} \tag{10}$$

式中　n_1——转速

以发动机 1 400 r/min 的运转速度为例，那么一个工作循环的时间为 85.7 ms。

图 24 是燃烧分析开始前的各个数据处理程序模块时间占比计算程序框图。主要包含平均化处理、上止点标定和自适应滤波程序 3 个模块的运算时间。该框图采用顺序结构，在平均化处理前读取计算时钟，在滤波程序完成后，将当前时钟与之前的

计算机时钟相减,即测得上述 3 个模块每次运算所用的时间,记为 t_1。

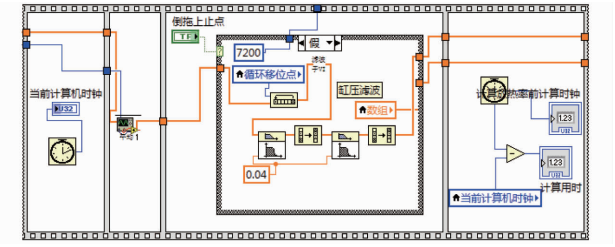

图 24 缸压预处理模块占时分析

Fig. 24 Time analysis for cylinder pressure data pre-process

同理,可以采用顺序结构对燃烧放热率模块运算时间进行统计[21],得到燃烧分析程序模块运算所用时间,记为 t_2。缸压预处理和燃烧放热率计算模块的时间占比结果如表 3 所示。所有计算模块的运算时间总和小于 63 ms,小于循环缸压采样时间 85.7 ms,表明该燃烧分析系统在 1 400 r/min 的转速下可以满足实时性。

表 3 1 400 r/min 转速下程序各模块时间占比

Tab. 3 Time proportions of each program modules at speed of 1 400 r/min

程序模块	运算时间/ms	时间占比 t_i/t/%
缸压预处理	2 ~ 3	2.33 ~ 3.50
放热率计算	50 ~ 60	58.30 ~ 70.00

取放热率计算时间为 60 ms,预处理时间为 3 ms,总体计算时间 63 ms,按照式(10),反求该时间下的发动机运行速度,可得发动机转速 n_1 为 1 900 r/min。这表明本文的燃烧分析系统,单循环燃烧计算,最高适用发动机转速为 1 900 r/min。

当发动机转速大于 1 900 r/min 时,整个燃烧分析模块(含数据预处理模块)的计算耗时比该工况下的缸压采集耗时长,使得一个工作循环内无法完成燃烧放热率的计算,即无法保证燃烧分析系统的单循环实时性。此时,可以对相邻 m 个循环内的缸压进行平均化处理,即 m 个循环进行一次放热率计算,为主计算循环的数据处理提供了更多的时间。当选择 m 个循环进行一次燃烧计算时,本文燃烧系统可满足 $m \times 1\,900$ r/min 转速下的实时计算。在 HCCI 和 RCCI 发动机研究中,一般 m 取 1 或 2 即可包含发动机所有工况,从而能符合大多数 HCCI 和 RCCI 发动机燃烧分析的需求。

4 实验验证

采用 DEWETRON 公司的 DEWE - 800 型燃烧分析系统检验本文开发的燃烧分析系统的精度。对比测量了某重型柴油机多组工况下的燃烧数据,其主要技术参数如表 4 所示。在对比测量中,DEWE - 800 型燃烧分析系统和本文开发的燃烧分析系统采用相同的 kistler - 6125C 型缸压传感器和角标传感器。DEWE - 800 型燃烧分析系统接线如图 25 所示。

表 4 某重型柴油机技术参数

Tab. 4 Technical specification of heavy diesel engine

参数	数值/型式
型式	四冲程、直列六缸
缸径 × 冲程/(mm × mm)	123 × 156
排量/L	11.12
压缩比	17.3
发火次序	1 - 5 - 3 - 6 - 2 - 4
额定功率(转速)/kW(r/min)	308(1 900)
最大扭矩/(N·m)	2 000



图 25 DEWE - 800 型燃烧分析系统及接线

Fig. 25 DEWE - 800 combustion analysis system

采集的缸压等数据,采用 DEWESoft 软件进行燃烧分析处理。在缸压采集和燃烧分析处理中,DEWE - 800 型系统采用 100 个循环的平均缸压作为燃烧计算缸压,而本系统采用单循环滤波后数据进行计算。最大扭矩点和额定工况点下缸压对比如图 26 ~ 29 所示,放热率对比如图 30、31 所示。

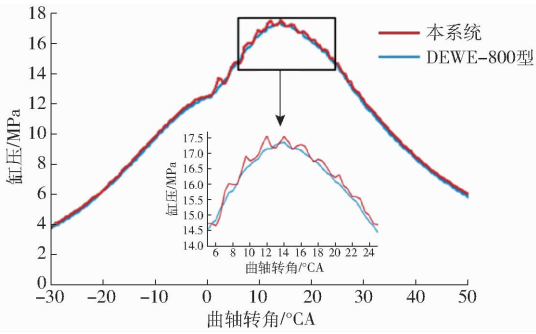

图 26 最大扭矩工况下,两种燃烧分析系统测量的缸压对比

Fig. 26 Comparison of cylinder pressure measured by two combustion analysis systems under maximum torque conditions

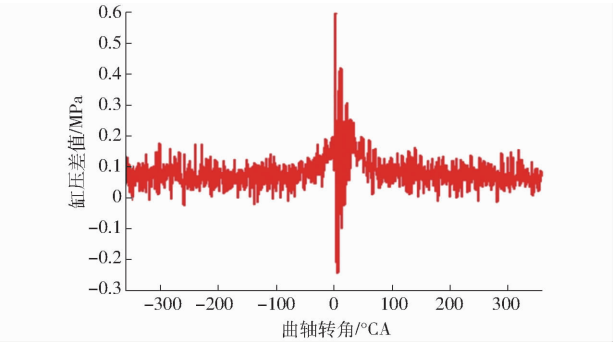

图 27　最大扭矩工况下，两种燃烧分析系统测量的缸压差值

Fig. 27　Difference of cylinder pressure measured by two combustion analysis systems under maximum torque conditions

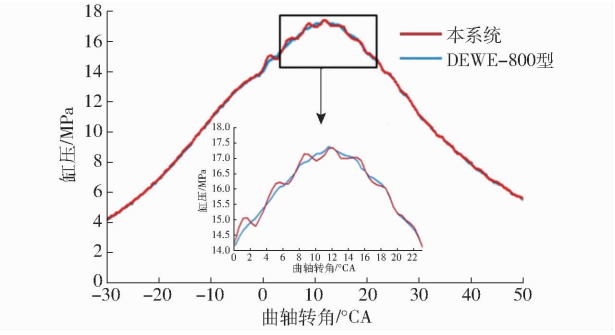

图 28　额定工况下，两种燃烧分析系统测量的缸压对比

Fig. 28　Comparison of cylinder pressure measured by two combustion analysis systems under rated conditions

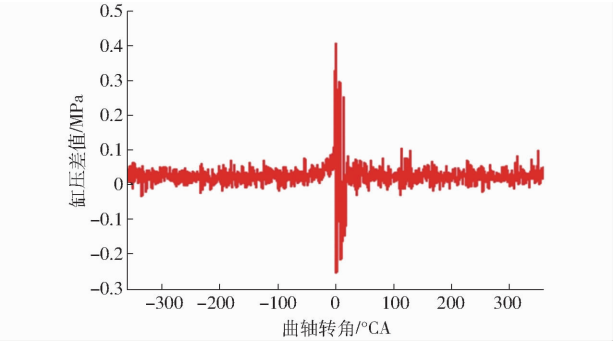

图 29　额定工况下，两种燃烧分析系统测量的缸压差值

Fig. 29　Difference of cylinder pressure measured by two combustion analysis systems under rated conditions

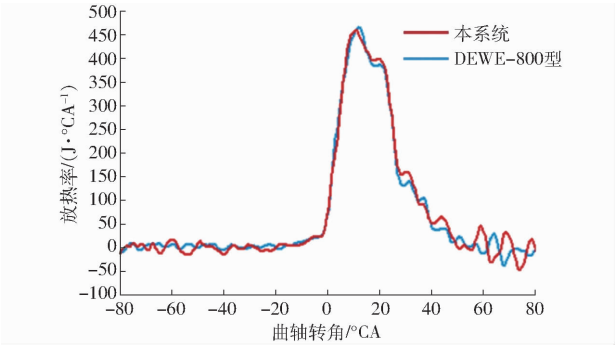

图 30　最大扭矩工况下，两种燃烧分析系统放热率对比

Fig. 30　Comparison of heat release rate between two combustion analysis systems under maximum torque conditions

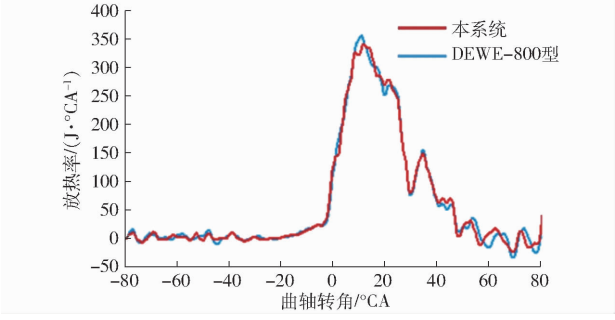

图 31　额定工况下，两种燃烧分析系统放热率对比

Fig. 31　Comparison of heat release rate between two combustion analysis systems under rated conditions

由图 26～29 可知，发动机最大扭矩工况和额定工况下，2 种燃烧分析系统采集的缸压形状吻合很好，缸压最大差值都小于 0.5 MPa；由图 30、31 可知，发动机最大扭矩工况和额定工况下，两种燃烧分析系统计算获得的放热率曲线吻合较好。

为了定量检验所开发燃烧系统的准确程度，对比了两种燃烧分析系统计算的燃烧参数，如表 5 所示。

由表 5 可知，两种燃烧分析系统在燃烧始点、燃烧持续期、最大缸压、最大缸压位置、最大放热率和最大放热率位置都吻合较好，误差都在 2.5% 以内，符合工程应用要求。表明本文开发的燃烧分析系统具有较高的精度，可以在发动机中实际使用。

表 5　两种燃烧系统计算燃烧参数对比

Tab. 5　Comparisons of combustion parameters for two combustion analysis systems

转速/(r·min⁻¹)	功率/kW	喷油始点/°CA	燃烧系统	最大缸压/MPa	最大缸压位置/°CA	燃烧始点/°CA	燃烧持续期/°CA	最大放热率/(J·°CA⁻¹)	最大放热率位置/°CA
1 300	272	352.51	DEWE－800 型	173.85	374.00	364.50	20.5	437.18	372.00
			本系统	175.77	372.00	366.50	21.0	432.60	371.00
			偏差/%	1.11	－0.53	0.55	2.44	－1.05	－0.27
1 900	308	349.15	DEWE－800 型	173.97	371.50	362.50	20.5	377.88	370.50
			本系统	173.64	372.00	363.00	20.5	362.24	371.50
			偏差/%	－0.19	0.13	0.14	0	－4.14	0.27

5　结论

（1）针对测量缸压过程中的通道效应等干扰，设计缸压的自适应滤波，对比传统的滤波方法，该方法具有较好的自适应性，且滤波效果有所改善，为基于单循环的实时燃烧分析系统提供了基础。

(2)合理分配内存资源。将缸压采集、燃烧计算与显示、数据储存模块独立运算,彼此数据共享,既为每个模块提供充足的时间,保证了实时性,又避免在转速过高的情况下数据溢出。

(3)针对发动机进排气、压缩、燃烧、膨胀等不同阶段采用了不同精度层次的计算方法,减少了进排气、压缩和膨胀阶段的计算耗时。

(4)在保证精度的前提下,采用公式节点运算模块对以能量守恒为基础的计算公式进行快速计算,以提高实时性。

(5)基于 LabVIEW 软件平台,搭建了缸压在线采集与实时燃烧分析系统平台,系统实时性能良好,与平均化处理相结合,可以适应不同转速下的发动机的实时燃烧分析。

参 考 文 献

[1] DONG S, CHENG X, OU B, et al. Experimental and numerical investigations on the cyclic variability of an ethanol/diesel dual-fuel engine[J]. Fuel, 2016, 186: 665 - 673.

[2] 王志, 张志福, 徐帆, 等. 多缸汽油 HCCI 发动机燃烧循环变动的研究[J]. 内燃机工程, 2010,31(3): 1 - 6.
WANG Zhi, ZHANG Zhifu, XU Fan, et al. Study of cycle variation in a multi-cylinder gasoline HCCI engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(3): 1 - 6. (in Chinese)

[3] SAXENA S, BEDOYA I D. Fundamental phenomena affecting low temperature combustion and HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(5): 457 - 488.

[4] SHAHBAKHTI M, KOCH C R. Characterizing the cyclic variability of ignition timing in a homogeneous charge compression ignition engine fuelled with n-heptane/iso-octane blend fuels[J]. International Journal of Engine Research, 2008, 9(5): 361 - 397.

[5] 常汉宝, 刘伯运, 刘敏林. 基于虚拟测试技术的柴油机燃烧分析系统[J]. 柴油机, 2003(1): 14 - 17.

[6] 任川江, 曾东建, 冷松蓬. 柴油机怠速循环波动特性研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 7 - 12.
REN Chuanjiang, ZENG Dongjian, LENG Songpeng. Study on cyclic variation of diesel engine in idle condition[J]. Journal of Xihua University(Natural Science), 2016, 35(5): 7 - 12. (in Chinese)

[7] 王建群, 南金瑞, 孙逢春, 等. 基于 LabVIEW 的数据采集系统的实现[J]. 计算机工程与应用, 2003(21): 122 - 125.
WANG Jianqun, NAN Jinrui, SUN Fengchun, et al. Realization of the data acquisition system based on LabVIEW[J]. Computer Engineering and Applications, 2003(21): 122 - 125. (in Chinese)

[8] 刘永长. 内燃机工作过程模拟[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.

[9] 朱访君, 吴坚. 内燃机工作过程数值计算及其优化[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.

[10] 史绍熙, 盛宏至. 内燃机示功图处理用的三种数字滤波方法[J]. 内燃机学报, 1986, 4(4): 289 - 304.
SHI Shaoxi, SHENG Hongzhi. Three digital filtering methods for proeessing indieator diagrams of internal combustion engines[J]. Transactions of CSICE, 1986, 4(4): 289 - 304. (in Chinese)

[11] 石磊, 刘琳玥, 吴波, 等. 利用广义频率抽样滤波法处理振荡示功图[J]. 山东内燃机, 2003(1): 26 - 29,33.

[12] 李自有. 基于虚拟仪器技术的内燃机燃烧分析系统开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
LI Ziyou. The development of combustion analytical system of internal combustion engine based on virtual instrument technology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)

[13] 赵秀亮, 程勇, 王丽梅, 等. 基于振动速度信号在线识别最大压力升高率[J]. 内燃机学报, 2016, 34(1): 74 - 80.
ZHAO Xiuliang, CHENG Yong, WANG Limei, et al. On-line identification of maximum rate of pressure rise based on vibration velocity signals[J]. Transactions of CSICE, 2016, 34(1): 74 - 80. (in Chinese)

[14] 王军, 张幽彤, 王宪成, 等. 基于小波变换的柴油机气缸压力信号降噪[J]. 测试技术学报, 2008, 22(2): 140 - 144.
WANG Jun, ZHANG Youtong, WANG Xiancheng, et al. De-noising of cylinder pressure signal in diesel engine based on wavelet transform[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(2): 140 - 144. (in Chinese)

[15] 陶珂. 小波去噪质量评价方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
TAO Ke. A study of validity assessment of wavelet de-noising[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)

[16] BABRAUSKAS V, PEACOCK R D. Heat release rate: the single most important variable in fire hazard[J]. Fire Safety Journal, 1992, 18(3): 255 - 272.

[17] 黄世泉, 金晅宏. 基于 LabVIEW 的生产者/消费者模式研究[J]. 电子科技, 2017, 30(9): 75 - 77,81.
HUANG Shiquan, JIN Xuanhong. Research on producer/consumer pattern based on LabVIEW[J]. Electronic Sci. & Tech., 2017, 30(9): 75 - 77,81. (in Chinese)

[18] 侯玉春, 黄震, 李德钢, 等. 发动机缸内压力信号频谱分析及滤波方法的研究[J]. 振动与冲击, 2005(4): 14 - 17,134.
HOU Yuchun, HUANG Zhen, LI Degang, et al. Study on frequency band analysis and filtering for pressure signal in engine cylinder[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005(4): 14 - 17,134. (in Chinese)

[19] SPLITTER D, HANSON R, KOKJOHN S, et al. Reactivity controlled compression ignition (RCCI) heavy-duty engine operation at mid-and high-loads with conventional and alternative fuels[C]. SAE Paper 2011 - 01 - 0363,2011.

[20] 丰伟伟, 杨世文, 南金瑞, 等. LabVIEW 中 TDMS 文件和 SQL 数据库数据处理速度的研究[J]. 仪器仪表与分析监测, 2011(1): 10 - 12.

[21] 王俊峰, 何明, 王焕宇. 基于 LabVIEW 的顺序结构在变速采集中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(2): 33 - 35.