

基于 LabVIEW 的柴油机燃烧分析系统

郭 霆, 龚 嫚, 周根明, 聂垒鑫
(江苏科技大学 能源与动力学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 为了研究柴油机气缸内的工作过程, 将现场可编程门阵列 (FPGA) 和可编程自动化控制器 (PAC) 技术运用到柴油机燃烧分析系统中, 开发了一种基于嵌入式平台的柴油机燃烧分析系统。进行了总体方案的设计, 阐述了系统的硬件设计和软件程序。该系统以 LabVIEW 作为开发语言, 采用工业以太网组建采集网络, 能够满足柴油机缸压信号采集及分析所需要的各项要求。该系统通过对采集得到的缸压信号进行起止点确定、数值均化、光顺等处理后得到了示功图, 同时通过编程实现了两种示功图之间的转换。测试结果表明, 该系统能够实时采集缸压信号并经计算处理得到示功图, 也可以实现两种示功图之间的转化。测得示功图后, 利用热力学的基本公式就可以求出工质的热力参数, 从而可以为柴油机的故障诊断、性能优化等提供参考。

关键词: LabVIEW; 现场可编程门阵列; 柴油机; 燃烧分析; 可编程自动化控制器

中图分类号: TH39; U664.121; TK422; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)09-1101-05

Diesel engine combustion analyzer based on LabVIEW

GUO Ting, GONG Man, ZHOU Gen-ming, NIE Lei-xin

(School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In order to research the working process of the cylinder, a diesel engine combustion analyzer was developed using the field programmable gate array (FPGA) and programmable automation controller (PAC) blocks of LabVIEW, which is based on embedded platform. A general planning was designed to elaborate the hardware design and software program. The LabVIEW was used as its development language, the industrial ethernet was used to send and receive signals, and the demands to acquisition and analysis of cylinder pressure were satisfied. Correction of TDC, data homogenization and smoothening of indicator diagram of the cylinder signals were researched, at the same time, the transformation between the two kinds of indicator diagram was discussed. Test results show that the system could collect real-time cylinder pressure, and the indicator diagram is obtained by computing the cylinder pressure signal. With the indicator diagram and the thermal dynamic fundamental formulas, the thermal parameters of the working medium are obtained. The results provide the reference for the fault diagnosis, performance optimization of diesel engine, etc..

Key words: LabVIEW; field programmable gate array (FPGA); diesel engine; combustion analyzer; programmable automation controller (PAC)

0 引 言

现代船舶中最重要的动力装置是柴油机, 其在动力性和经济性方面具有独特的优势, 因此, 充分运用计算机和网络技术, 开展对柴油机的监控技术研究有着极其重要的意义^[1]。在柴油机的工作过程中, 燃烧是

个主要过程, 对柴油机工作性能影响最大。燃烧过程的好坏直接影响热能转变为机械功的数量和效率。所以它对柴油机的功率指标、经济性指标、工作可靠性和使用寿命都有很重要的影响^[2]。研究柴油机气缸内的工作过程, 最常见且最简便的是分析示功图。示功图是气缸内工质压力随曲轴转角变化的图形, 利用气

缸压力可以求出工质温度、功和热量等热力参数,从而可以分析柴油机工作过程的优劣。虽然国外的分析系统技术较为成熟,功能强大,但价格昂贵,使用操作不方便,技术保密,维修困难。上世纪 80 年代以后通过我国广大柴油机测试工作者们的努力创新,加快了国内相关分析系统开发研究的进度。如浙江大学的柴油机示功图测量处理系统、上海内燃机研究所的 EAS900 燃烧分析系统、大连海事大学研制的柴油机示功图自动测取装置等。与国外研究的燃烧分析仪相比,受传感器精度、微机内存、A/D 转换速率等因素的制约,硬件水平无法与进口专用设备抗衡,但在应用软件开发上各有特点,功能上与进口产品类似,能满足一般放热规律研究的需要^[3]。

现在专用于船舶柴油机的示功器比较少,本研究针对某船用柴油机设计一套基于 FPGA 及 PAC 技术的燃烧分析系统,测得缸压和曲轴转角信号,经处理后得到示功图,同时对上止点的确定进行讨论。

1 系统组成

燃烧分析系统主要由两部分构成:高速数据采集系统和软件。

1.1 高速数据采集系统

数据采集系统主要由缸内压力传感器、电荷放大器、编码器、数据采集卡及 PAC 等组成,如图 1 所示。

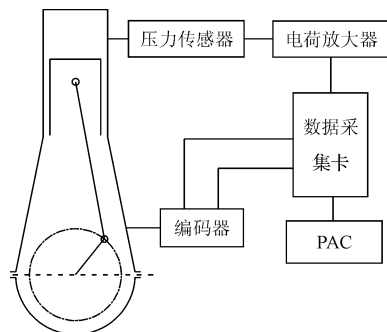


图 1 高速数据采集系统

压力传感器采用压电式传感器,它的优点是频带宽、灵敏度高、信噪比高、结构简单、工作可靠和重量轻等。电荷放大器将压电传感器输出的电荷信号转化为电压信号,该系统采用 YE-5851 型电荷放大器,其具有体积小、结构坚固、高增益、频带宽,具有短路保护等优点。编码器用于测量同步脉冲信号和触发信号,为了测量方便,本研究选用光电编码器。数据采集卡采用 NI 公司的 NI9205,其分辨率为 16 位,最高采样率为 250 kS/s。可编程自动化控制器(PAC)结合了 PLC

与 PC 的优点。NI 公司生产的 PAC 产品 NI CompactRIO(简称 CRIO)是一种可重复配置的嵌入式控制和采集系统,拥有坚固的硬件架构,其中包含 I/O 模块、带有可重新配置的现场可编程门阵列(FPGA)的机箱、实时控制器。利用 NI CompactRIO 可以快速建立嵌入式控制或采集系统,且该系统与自定义设计的硬件电路的性能和优化性不相上下^[4]。该系统采用 NI CRIO9081,其带有 8 槽 Spartan-6 LX75 FPGA 机箱,1 个 MXI-Express 端口、4 个 USB 高速端口、2 个千兆以太网端口和 2 个用于连接和扩展的串行端口,是一个能承担高级处理任务的理想系统。

1.2 软件设计

该系统采用 NI 公司的 LabVIEW2012 作为开发软件。LabVIEW 与常见的编程语言相比,最大的特点就在于它是一种图形化编程语言,广泛应用于各个领域,尤其是在测试测量与控制方面,它是一个标准的数据采集和以期控制软件。

本研究通过 LabVIEW FPGA 进行数据采集,在电脑上编程 FPGA 采集程序,编译下载到 FPGA 芯片上,控制硬件逻辑实现对数字信号的采集。传统的 FPGA 编程需要专门的编程工具和编程语言,而 NI 的 FPGA 工具包以 LabVIEW 作为基本开发环境,结合 NI 公司的 FPGA 板卡,研究者可以像编写常规的 LabVIEW 程序一样编写 FPGA 程序,不需要更多的 FPGA 方面的专业知识^[5]。

由于 FPGA 运行的精确性,VI 内不同线程之间和不同 VI 之间通过 FIFO 传递数据比较容易,但是 RT 与 FPGA 之间传递数据比较麻烦,这是因为高速采集过程中 FPGA 运行速度在“ μs ”甚至“ ns ”的级别,而 RT 系统一般在“ ms ”的级别,这种情况下,RT 如果需要独缺全部数据,又不能出现数据丢失的情况,就必须采用 DMA FIFO 方式传递数据。项目中创建的 FIFO 如图 2 所示。

因此本研究采用 DMA FIFO 实现与 RT HOST 之间的数据传输,并通过共享变量方式实现与人机交互界面的数据传输。

2 示功图数据预处理

示功图数据预处理包括上止点的确认、数值均化及光顺处理。

2.1 示功图上止点的确定

活塞改变运动方向时的位置称为止点,距离曲轴中心最远处的止点称为上止点。柴油机运动件之间存



图 2 FPGA 项目

在的间隙及压力传感器测压通道的影响,通常会使动态上止点总是偏离静态上止点。上止点的定位误差对示功图的数据处理具有非常大的影响,上止点的误差为 $\pm 1^\circ$ (曲轴转角)时,累计放热量的最大偏差约 7% ~ 9%^[6]。确定上止点的方法很多,其中有代表性的是直接测量法、倒拖法、多变指数法等。倒拖法是测量柴油机在不发火时的压力示功图。在理想情况下,缸内压力在上止点是对称分布的,压力的峰值所在位置就是上止点^[7]。在实际燃烧过程中,由于泄漏损失和热量损失,总是使上止点位置提前于倒拖示功图上止点位置,研究者可以采用先确定倒拖峰值压力位置,再对动态上止点进行校正的方法来确定上止点。

编码器的分辨率会给倒拖示功图的峰值压力位置精度带来误差,为了减少该误差,笔者采用“五点四次拟合法”来准确确定倒拖示功图的峰值压力。“五点四次拟合法”就是用四次函数按照最小二乘法来拟合压缩压力曲线 P ,其公式为:

$$P = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi + \alpha_2 \varphi^2 + \alpha_3 \varphi^3 + \alpha_4 \varphi^4 \quad (1)$$

对式(1)进行求导,得到:

$$dp/d\varphi = \alpha_1 + 2\alpha_2 \varphi + 3\alpha_3 \varphi^2 + 4\alpha_4 \varphi^3 \quad (2)$$

令 $dp/d\varphi = 0$,求得点 φ_T 即为压缩压力的最大峰值点相位,得:

$$dp/d\varphi = \alpha_1 + 2\alpha_2 \varphi + 3\alpha_3 \varphi^2 + 4\alpha_4 \varphi^3 = 0 \quad (3)$$

从实际采集的数据 (p_i, φ_i) 中选取 p 值最大的点及前后相邻两点的数代入式(1),得到 5 个方程,联立求出 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 的值。代入到式(3)即可求出 φ_T 。大量模拟计算表明,这种方法所确定的 φ_T 的误差不大于 0.025°CA ^[8]。

工质与外界的热量交换会对多变指数产生很大影

响,多变指数在压缩过程的前期会下降,在后期由于工质的散热会使其上升。上止点的误差会使多变指数的值发生突变,因此可以利用这一特性来校正动态上止点^[9]。

缸内气体热力状态方程式为:

$$PV^n = C \quad (4)$$

式中: n —多变指数, C —常数。

对式(4)取对数,则为:

$$\log C - n \log V = \log P \quad (5)$$

解得:

$$n_i = - \frac{d[\log P_i]}{d[\log V_i]} \quad (6)$$

式中: n_i —第 i 点的多变指数, P_i —第 i 点的气缸压力, V_i —第 i 点的气缸容积。

本研究计算由式(3)得到的压力峰值位置的多变指数值,再向前以 0.1°CA 步长取值试探,多变指数变化最小的位置即为上止点。

2.2 数组均化

缸压传感器由于受到自身的物理特性和外界环境影响,会产生一定的随机误差,通过对所测数据进行多周期均化能够消除随机误差及偶然误差,本研究编码器的分辨率设为 0.5°CA ,一个工作循环理论采集 1 440 个数据,采集 50 个周期。对所测得的数据在 LabVIEW 中进行处理,将每个周期对应曲轴转角的压力值相加求平均,再舍弃可疑数值。

(1)计算各点压力平均值 $\bar{P}$:

$$\bar{P}_\varphi = \sum_{i=1}^n P_\varphi^i / n \quad (7)$$

式中: n —所测周期数。

(2)计算或然误差 γ_φ :

$$\gamma_\varphi = 0.6745 \sigma_\varphi = 0.6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_\varphi^i - \bar{P}_\varphi)^2}{n - 1}} \quad (8)$$

(3)舍弃可疑读数:

$$\frac{d}{r} = \frac{P_\varphi^i - \bar{P}_\varphi}{\gamma_\kappa} \quad (9)$$

表 1 剔除标准表

采集周期 n	5	10	15	20	50	100
d/r	2.5	2.9	3.2	3.3	3.8	4.2

剔除标准表如表 1 所示。如果某一测量值 P_φ^i 的 d/r 的绝对值大于表 1 的 d/r ,则舍弃这一值。

(4)计算可疑读数后各曲轴转角压力平均值:

$$\bar{P}_\varphi = \sum_{i=1}^n P_\varphi^i / n' \quad (10)$$

式中: n' —舍弃可以读数后剩下的数值个数。

2.3 光顺处理

在柴油机示功图数据的测量过程中,由于受压力波的扰动及曲轴连杆运动的随机性等的影响会使所测得示功图曲线不是连续光滑的,光顺处理能够消除曲线的小波动,使曲线光滑。常用的光顺处理方法有五点三次光顺法、七点光顺法及样条函数光顺法,本研究采用五点三次光顺法^[10]。假设 m 次多项式为平滑所得采样值:

$$y(x) = a_0 + a_1x + \cdots a_mx^m \quad (11)$$

采用最小二乘法原理确定式(11)中的系数 a_m ($m = 0, 1, \cdots, m$),再代入式(11)中,并令 $x = 0, \pm 1, \pm 2$, 可得到五点光顺公式为:

$$y'_1 = \frac{1}{70}(69y_1 + 4y_2 - 6y_3 + 4y_4 - y_5) \quad (12)$$

$$y'_2 = \frac{1}{35}(2y_1 + 27y_2 + 12y_3 - 8y_4 + 2y_5) \quad (13)$$

$$y'_i = \frac{1}{35}[-3(y_{i-2} + y_{i+2}) + 12(y_{i-1} + y_{i+1}) + 17y_i] \quad (14)$$

$$y'_{m-i} = \frac{1}{35}(2y_{m-4} - 8y_{m-3} + 12y_{m-2} + 27y_{m-1} + 2y_m) \quad (15)$$

$$y'_m = \frac{1}{35}(-y_{m-4} + 4y_{m-3} - 6y_{m-2} + 4y_{m-1} +$$

$$69y_m)(i = 2, 3, \cdots, m - 2) \quad (16)$$

LabVIEW 计算程序如图 3 所示。

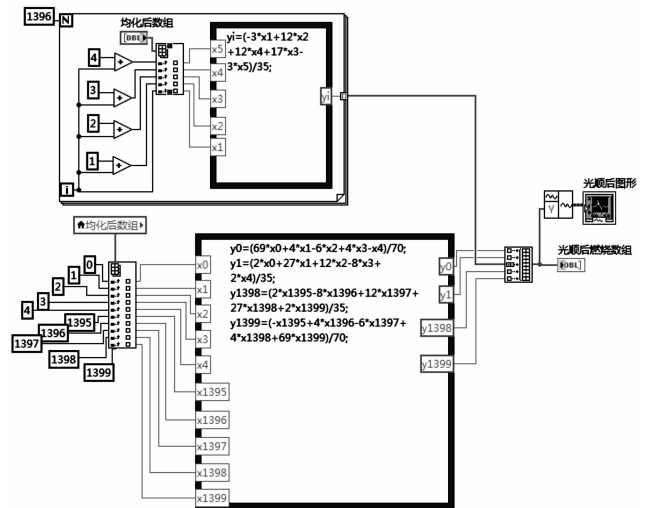


图 3 光顺计算程序

3 $P-\varphi$ 图转 $P-V$ 图

通过以上计算,所得到的是 $P-\varphi$ 示功图,由于 $P-V$ 示功图更能直观地显示柴油机对外输出功的大小,需要将 $P-\varphi$ 示功图转化为 $P-V$ 示功图。气缸工作容积与曲轴转角之间的关系为:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \left\{ \frac{S}{\varepsilon - 1} + \frac{S}{2} \left[\left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \sin\left(\frac{\pi\varphi}{180}\right) - \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2\left(\frac{\pi\varphi}{180}\right)} \right] \right\} \quad (17)$$

式中: V —气缸容积, L ; φ —曲轴转角, $^\circ CA$; D —气缸直径; ε —压缩比; S —活塞行程; λ —曲柄连杆比。

计算程序如图 4 所示。

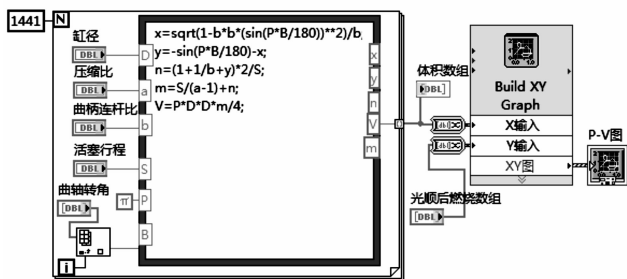


图 4 $P-\varphi$ 图转 $P-V$ 图

经转化所得到的 $P-V$ 示功图如图 5 所示。

4 系统测量精度分析

在气缸压力的测量及数据处理过程中通常有以下几个方面的误差。

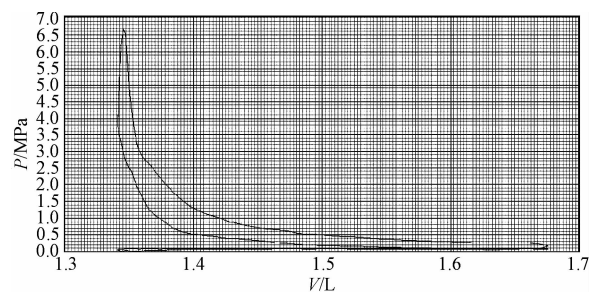


图 5 $P-V$ 示功图

4.1 传感器标定

传感器的线性度和标定装置的精度在很大程度上影响着传感器的标定精度。除此之外,对于压电式传感器来说其输出信号并不是与压力信号成比例的,而是输出信号的变化量与压力信号的变化量成比例。为此,就必须对测得的压力信号进行基准压力修正,但是还是没有一种十分有效的方法来解决这一问题。

4.2 曲轴转角分度误差

在该系统中,采用的编码器分辨率为 0.5°,即编码器每转 0.5°,系统采集一个缸压信号,四冲程柴油机一个工作循环采集到 1 440 个点,把各点相连就得到了压力曲线,但是两采集点之间的压力值是存在误差的,若提高编码器的精度则可以提高测量精度,但与此同时采样点数也会急剧增加,这也增加了系统的工作负荷。

4.3 数据处理精度

由于受压力波的扰动及曲轴连杆运动的随机性等的影响会使所测得示功图曲线不是连续光滑的,为提高曲线光滑度,研究者常常采用对数据进行光顺处理,去除了一些奇异点,但是这些点中有些是燃烧过程的实际情况点,这在一定程度上带来了误差。

5 结束语

本研究采用 FPGA 和 PAC 技术,以 LabVIEW 作为编程语言,运用工业以太网组建采集网络,以 NI 公司的 PAC 产品 cRIO9081 作为控制和采集系统,开发了一种基于嵌入式平台的柴油机燃烧分析系统,该系统性能稳定可靠,操作简单方便,可以对柴油机气缸工作过程进行实时的运行状态监测,同时具有显示及存储功能。

本研究还探讨了上止点确定、数值均化、光顺处理及两种示功图之间的转化等问题。研究表明,该系统可以实时采集与处理缸内压力数据得到示功图,从而可以为柴油机故障诊断、工作过程优化等提供支持。

参考文献 (References) :

[1] 贾 军,梁述海. 基于 NI cRIO 的柴油机转速控制的半实物仿真[J]. 机电工程,2011,28(11):1332-1335.

[2] 钱耀南. 船舶柴油机[M]. 大连:大连海事大学出版社,2007.

[3] 毛宏雨. 基于示功图的船用柴油机燃烧过程的研究[D]. 大连:大连海事大学轮机工程学院,2010.

[4] NI 公司. 测量与自动化产品目录[M]. National Instruments 公司,2007.

[5] 陈树学. LabVIEW 宝典[M]. 北京:电子工业出版社,2011.

[6] 王 波. 内燃机高速数据采集及处理的研究[D]. 洛阳:河南科技大学车辆与动力工程学院,2006.

[7] 李秋峰. 内燃机燃烧分析测控系统开发[D]. 天津:河北工业大学机械工程学院,2007.

[8] 黄宜谅,程 勇. 用热力学方法确定直喷式柴油机上止点[C]. 中国内燃机测试学术年会论文集,1986.

[9] 何学良,李疏松. 内燃机燃烧学[M]. 北京:机械工业出版社,1990.

[10] 李敏秋. 船用柴油机示功图数据采集与燃烧分析系统的研究[D]. 大连:大连海事大学轮机工程学院,2011.

[编辑:洪炜娜]

(上接第 1062 页)

[10] 黄逊彬,何 宁,李 亮,等. 氧化锆陶瓷微细铣削工艺参数实验研究[J]. 工具技术,2011,45(12):31-34.

[11] KASAI T, HARIO K, KARAKI D T. Improvement conventional polishing conditions for obtain super smooth surface of compound semiconductor wafers [J]. **Annals of CIRP**, 1990,39(1):432-437.

[12] XING T, YUAN J L, LI W, et al. Study on the surface quality of LiNbO₃ wafer by CMP [J]. **Key Engineering Materials**,2003(259-260):644-647.

[13] 刘冬梅,林 奎. 新型药品研磨机的结构设计[J]. 机电

技术,2012(2):91-93.

[14] YUAN J L, LIN B, SHEN Z W, et al. New ultra-precision polishing technology of glass BK-7 optical plate [J]. **Key Engineering Materials**,2001(202-203):235-238.

[15] KOMANDURI R, LUCCA D A, TAN I Y, et al. Technology advances in fine abrasive processes [J]. **Annals of the CIRP**,1997,46(2):545-596.

[16] KOMANDURI R. On material removal mechanisms in finishing of advanced ceramics and glasses [J]. **Annals of CIRP**,1996,45(1):509-513.

[编辑:张 翔]