

利用以太网的柴油机燃烧分析与控制方法研究

方成¹, 杨福源¹, 欧阳明高¹, 高庆文², 白思春³

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084;

2. 玉柴联合动力股份有限公司, 芜湖 241080; 3. 北方发动机研究所, 天津 300400)

Study on Combustion Analysis and Control with Ethernet Communication for Diesel Engine

FANG Cheng¹, YANG Fuyuan¹, OUYANG Minggao¹, GAO Qingwen², BAI Sichun³

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Y&C Engine Co., Ltd., Wuhu 241080, China;

3. China North Engine Research Institute, Tianjin 300400, China)

Abstract: A diesel engine combustion analysis and control system based on a developed combustion analysis tool and with the Ethernet communication was established. Real-time cylinder pressure information was acquired every 0.2 crankshaft angle and sent via the Ethernet of user datagram protocol(UDP) to a combustion analysis and control software, by which combustion indexes were calculated and sent to the engine control unit(ECU) in which closed-loop combustion control was applied with these combustion indexes. A verification test made on a 1.9 L diesel engine demonstrates that this combustion analysis and control system successfully acquires real-time cylinder pressure information, provides combustion indexes, and has the ability to control engine combustion.

摘要: 基于开发的燃烧分析工具,利用以太网通信技术,构建了柴油机燃烧分析与控制系统:缸压采集系统每0.2°的曲轴转角采集一次缸压信号,通过以太网的用户报文协议把缸压信息传递给燃烧分析软件;燃烧分析软件计算出燃烧状态指标,通过控制器局域网传递给发动机电控单元;发动机电控单元利用燃烧状态指标进行燃烧闭环控制。在一台1.9 L高压共轨柴油机上进行的试验结果表明:该系统能够实时采集缸压并计算燃烧状态指标,能够实现指示平均有效压力和燃烧放热中心的闭环控制。

关键词: 内燃机;以太网;燃烧分析;用户报文协议;燃烧状态指标;燃烧闭环控制

Key words: IC engine; Ethernet; combustion analysis; user datagram protocol; combustion indexes; closed-loop combustion control

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2017.02.004

中图分类号: TK421.2

文献标识码: A

0 概述

随着国民经济发展,环境污染和能源安全成为

突出问题。传统内燃机在能源消耗和污染物排放中都占据重要位置,因此对柴油机节能减排提出了更高的要求。通过合适的反馈途径对柴油机燃烧进行

收稿日期: 2015-04-22

基金项目: 科技部国际科技合作计划专项基金项目(2012DFA81190)

作者简介: 方成(1980—),男,博士生,主要研究方向为柴油机及混合动力系统控制, E-mail: fc99@mails.tsinghua.edu.cn;

欧阳明高(联系人),教授,博导, E-mail: ouymg@tsinghua.edu.cn。

控制,是节能减排的方法之一。反馈途径包括曲轴瞬时转速、离子电流信号、振动信号和缸压信号。缸压信号是其中最直接的一种反馈形式,包含的信息也最丰富^[1],但基于缸压信息的控制计算量大。

一般用燃烧分析仪进行缸压信号的在线分析和信息储存,AVL、Dewetron 和 Kistler 等公司都有相应的燃烧分析仪产品,但是这些产品结构复杂,价格昂贵,而且这些燃烧分析仪使用的缸压采集方法和燃烧指标计算方法无法直接用于燃烧控制。清华大学从 2008 年开始进行基于缸压信号的燃烧控制研究,开发了多代燃烧状态分析单元(in-cylinder combustion analysis tool, iCAT),用于缸压信号采集和燃烧状态指标计算,但是能够实时计算的燃烧状态指标受限于单片机性能^[2-5]。本研究开发了利用以太网的燃烧分析与控制系统,基于 iCAT 的缸压采集技术,缸压采集系统通过以太网实时将缸压信息发送给 PC 机上的燃烧分析软件,由该软件进行燃烧状态指标的计算,再通过控制器局域网(controller area network, CAN)把这些指标发送给发动机控制单元(engine control unit, ECU)。这套系统把燃烧状态指标计算从 iCAT 中旁路,实现了缸压采集与燃烧状态指标计算的分离。

1 系统设计

利用以太网的柴油机燃烧分析与控制系统框架如图 1 所示。该系统采用分布式结构:缸压采集系统负责采集缸压信号,通过以太网把缸压信息发送给 PC 机上的燃烧分析软件;燃烧分析软件使用缸压信息计算燃烧状态指标,并通过 CAN 总线发送给 ECU; ECU 得到燃烧状态反馈信息后对发动机进行控制。

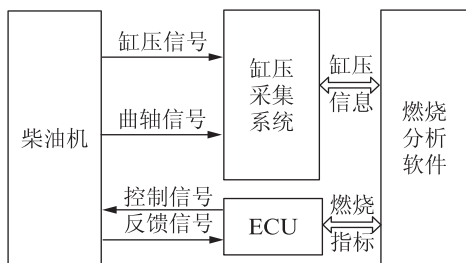


图 1 利用以太网的燃烧分析与控制系统

相比于原先 iCAT 与 ECU 组成的燃烧闭环控制系统^[4],该燃烧分析与控制系统把燃烧状态指标计算功能旁路,改由 PC 机上燃烧分析软件计算,利用了 PC 机强大的计算能力。

为降低系统的成本,缸压采集系统使用 Beru 压阻式缸压传感器,利用磁电/霍尔型曲轴转速传感器和 60—2 齿的曲轴齿盘建立角度基准,通过曲轴转

速信号的倍频操作,产生曲轴转角为 0.2° 的缸压采集触发信号^[4]。缸压采集系统的核心采集芯片和最新一代 iCAT 一样,使用 MPC5644A 芯片^[3]。iCAT 通过 CAN 或者 FlexRay 总线,向上位机传递实时缸压信息^[6]。对于 6 缸柴油机,如最高转速为 3 000 r/min,每隔 0.2° 的曲轴转角采集一次缸压信号,1 s 内需要传递的数据为 1 080 000 字节(1 个缸压信息用 2 字节表示),于是传递的波特率需要达到 8.64 Mbps,而 CAN 总线达不到该波特率,Flexray 总线虽然能达到该波特率,但总线负荷非常高。本研究开发的缸压采集系统使用波特率为 100 Mbps 的以太网实时传递缸压数据。

PC 机上的燃烧分析软件通过以太网得到实时缸压数据和角度信息,计算出指示平均有效压力(indicated mean effective pressure, IMEP)、燃烧放热中心(50% of the mass fraction burned, MFB50 或 CA50)、燃烧放热率(rate of heat release, ROHR)和累积放热率(accumulated heat release, AHR)等燃烧状态指标。这些燃烧状态指标和原始缸压信息既能在界面中实时显示,也能保存成 MDF 格式的文件,用于离线分析(如 Matlab)。

2 缸压采集系统开发

开发的缸压采集系统硬件框架如图 2 所示。该硬件主要包括缸压信号处理、转速信号处理、缸压采集控制单元、通信与主控制单元、电源模块、以太网通信和状态显示等部分:(1) 包含 6 路缸压信号处理电路,能够同时采集 6 缸缸压信号,提供 3.3 V 缸压传感器供电;(2) 兼容常见的磁电型/霍尔型转速信号,提供 5 V 电源,用于霍尔传感器供电;(3) 缸压采集频率,最高为 938 kHz,适用的发动机最高转速,4 缸柴油机为 6 000 r/min,6 缸柴油机为 4 000 r/min;(4) 缸压采集单元使用 Freescale 公司 CPU 最高频率为 150 MHz 的 MPC5644A 芯片^[7];(5) 通信及主控制单元使用 Freescale 公司的 MPC5604E 芯片,该芯片集成以太网控制器^[8];(6) 缸压采集单元与主控制单元之间,通过周端串行接口(serial peripheral interface, SPI)传递控制命令及缸压数据;(7) 既可以使用 220 V 交流电源供电,也可以使用 8~32 V 直流电源供电。

处理成方波的曲轴转速信号输入给单片机的时间处理器单元(time processing unit, TPU)管脚,该管脚功能设置成输入捕捉(input capture, IC)。在转速信号的边沿中断中,得到发动机 6° 曲轴转角对应的时间,利用倍频技术和转速预测技术,得到 0.2° 曲轴转角的时间,把定时中断时钟(periodic

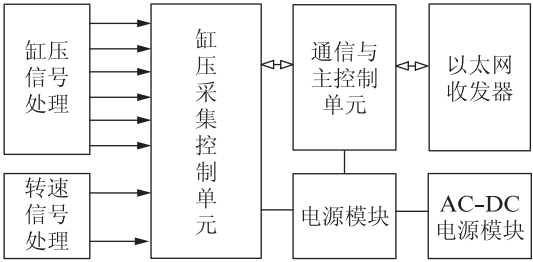


图 2 硬件框架

interrupt timer, PIT)的定时间隔设置为该时间,并利用该 PIT 触发 AD 采集^[3]。

由于 MPC5644A 没有以太网控制功能,所以使用 MPC5604E 作为通信与主控单元,该单片机通过以太网从上位机获取采集命令,并把采集的缸压数据传送给上位机。缸压采集控制单元和通信与主控单元之间使用两路 SPI 总线进行通信,一路 SPI 用于传递控制命令,一路 SPI 用于传递缸压数据。

缸压采集系统在以太网基础上,参照 TCP/IP 架构^[9],在网络层、传输层和应用层上实现的协议如图 3 所示,主要包含:(1) 网际协议(internet protocol, IP),通过 IPv4 地址进行寻址操作,发送 IP 报文并进行报文的分包和重组;(2) 地址解析协议(address resolution protocol, ARP),建立网络层的逻辑地址(IP 地址)与物理地址(MAC 地址)的映射;(3) 网际控制报文协议(internet control message protocol, ICMP),用于传递控制信息,包括报告错误、交换受限控制和状态信息等;(4) 用户报文协议(user datagram protocol, UDP),提供面向事务的简单不可靠信息传送服务,本研究用 UDP 协议传递控制命令和缸压数据;(5) 动态主机配置协议(dynamic host configuration protocol, DHCP),缸压采集系统主动连接 DHCP 服务器,根据服务器的动态分配,得到设备 IP 地址;(6) 自动 IP 分配协议(automatic IP, AUTOIP),在 DHCP 不使能的情况下,自动给设备分配 IP 地址。

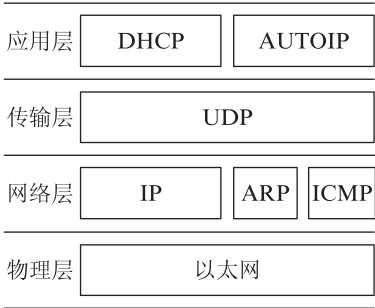


图 3 以太网网络协议

在 UDP 协议基础上,设计了缸压采集系统专用的通信协议,如图 4 所示,一共包括以下三类型信

息:(1) CTO(command transmission object)是燃烧分析软件发送给缸压采集系统的控制命令,包括连接命令、配置命令、采集命令、查询命令和数据读取命令等;(2) CRO(command response object)由缸压采集系统发送给燃烧分析软件,是针对 CTO 的响应;(3) DTO(data transmission object)由缸压采集系统主动发送给燃烧分析软件,包含缸压原始数据。表 1 所示为 DTO 格式定义。

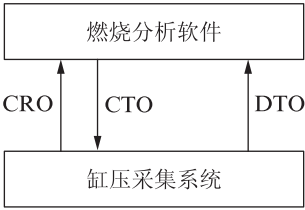


图 4 以太网通信协议

表 1 DTO 格式定义

字节	含义	备注
0	0xF0	
1~2	数据总长度	
3	保留	
4~7	圈序号	标示发动机圈序号
8~11	圈起始时间	单位 ms
12~13		单位 μ s
14~17	该圈总共历经时间	单位 μ s
18~n-1	缸压数据	缸压数据长度为 n-11

3 燃烧分析软件开发

使用 Visual C++ ,基于 MFC 的多页面架构,开发了燃烧分析软件,该软件的处理流程如图 5 所示。通过以太网从缸压采集系统得到原始信息,原始信息包括圈序号、圈起始时间、圈历经时间和缸压信息等。软件对原始信息的处理,包括建立循环和时间基准、线性化、IIR 滤波、上止点识别、零漂处理、指标计算、角度时间转换、显示和储存等。流程为:(1) 燃烧分析软件得到发动机一圈的缸压数据,把原始信息按照发动机循环进行数据整理,同时还得到缸压信息对应的时间信息,该时间信息包括该循环中每圈起始时间和历经时间,可由此把缸压数据与时间一一对应。(2) 线性化,为了降低缸压采集系统的计算负荷,原始缸压信息为直接获取的传感器信号 AD 值,需要根据缸压传感器特性来得到缸压信号物理值。(3) 滤波,本研究使用 SG(Savitzky-Golay)滤波,该方法取前 n 个点和后 n 个点,共 2n+1 个点,采用最小二乘法拟合的方法拟合出 k 阶曲线,用该曲线在该点的值作为平滑后的结果。

(4) 零漂处理,压电式缸压传感器的信号会产生严重的零漂,需要对零漂进行单独处理,本研究使用进气压力对零漂进行修正。(5) 上止点识别,通过对倒拖缸压曲线的分析,燃烧分析软件能够自动识别上止点,并记录该上止点所在的位置,进行燃烧状态指标计算。(6) 循环平均,根据设定参数,对缸压数据进行循环平均。(7) 参数计算,对处理后的缸压

数据,结合发动机气缸几何参数,进行燃烧状态指标的计算。(8) 显示,在燃烧分析软件中,按照燃烧状态指标的特性,可以选择使用 param- φ 、param- t 和 param- v 的方式对各个指标进行显示,比如缸压信号 p ,可以显示成 p - φ 图、 p - t 图和 p - v 图。(9) 储存,缸压信息及燃烧状态指标,可以保存成 MDF/TXT 格式的文件,便于离线分析。

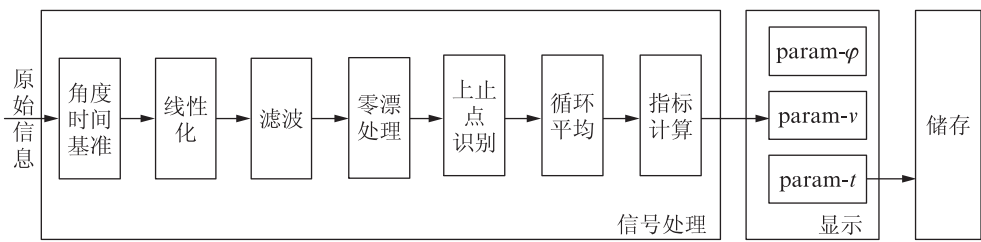


图 5 燃烧分析软件流程

燃烧分析软件计算出的燃烧状态指标,包括各缸的最高燃烧压力 $p_{\max}$ 、压升率 $dp/d\varphi$ 、IMEP、泵气平均有效压力 (pump mean effective pressure, PMEP)、ROHR、AHR、最高燃烧压力位置 (position of peak pressure, PPP)、压升率最大位置 (maximum ratio position, MRP) 和 CA50 等,计算方法参考文献[4]。

4 燃烧闭环控制算法

通过 IMEP 和 CA50 的反馈控制实现燃烧闭环控制:调整喷油脉宽,可以改变 IMEP;调整喷油定时,可以改变燃烧相位,从而改变 CA50;虽然调整喷油定时也可以影响 IMEP,但喷油定时的小范围波动对 IMEP 的影响不大。该双输入双输出 (two-in-two-out, TITO) 的控制器可以解耦成两个独立的闭环控制器^[3-5],如图 6 所示。

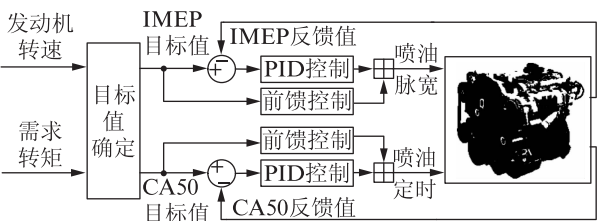


图 6 燃烧闭环控制系统

5 试验验证

在发动机台架上进行试验,该台架配备 HT250 型交流电力测功机(用于记录发动机转速和动力系统转矩)、MEXA-7100DEGR 排放分析仪(用于记录 NO_x、THC 和 CO 排放)和 Cambustion 公司的 DMS500 颗粒分析仪等设备。试验用发动机为奇瑞 4

缸 1.9 L 高压共轨柴油机,发动机参数如表 2 所示。

表 2 发动机参数

项目	参数
柴油机型号	Chery SQR481A
发动机型式	直列四冲程、直喷、水冷、增压、中冷
缸数×缸径/mm×行程/mm	4×81×92.4
总排量/L	1.905
压缩比	17.5
标定功率/kW	83(4 000 r/min)
最大扭矩/(N·m)	271(2 000 r/min)

图 7 所示为发动机工作在 1 500 r/min、60 N·m, 1 800 r/min、50 N·m 和 2 000 r/min、40 N·m 时使用燃烧分析软件计算出的燃烧放热率曲线。在这些工况点,使用汽油和柴油按照体积比 7 : 3 混合而成的燃油。

由燃烧分析工具计算出 3 个工况点的燃烧状态指标(CA50、IMEP、 $p_{\max}$ 、PPP、 $(dp/d\varphi)_{\max}$ 和 MRP) 的 500 个循环的平均值,如表 3 所示。

图 8 为发动机工作在 1 500 r/min、40 N·m 时该燃烧闭环控制系统的控制效果。在 776 s 时,系统从开环控制切换到闭环控制,CA50 的闭环控制目标值是上止点后 6.5°曲轴转角,IMEP 的闭环控制目标值是 420 kPa。从图 8 中可以看出,CA50 和 IMEP 都顺利控制到了目标值;同时,开环控制时 CA50 和 IMEP 在 4 缸间的散差都较大,通过闭环控制,减少了各缸间的不均匀。

另外,测量了控制系统反馈路径的延时:(1) SPI 通信(波特率 18.75 Mbps)6 缸缸压数据传递时间约为 10 ms;(2) 以太网通信(波特率为 100 Mbps)数据传递时间约为 5 ms;(3) PC 机任务切换时间约为 10 ms;(4) PC 机计算时间约为 5 ms;(5) CAN 通信

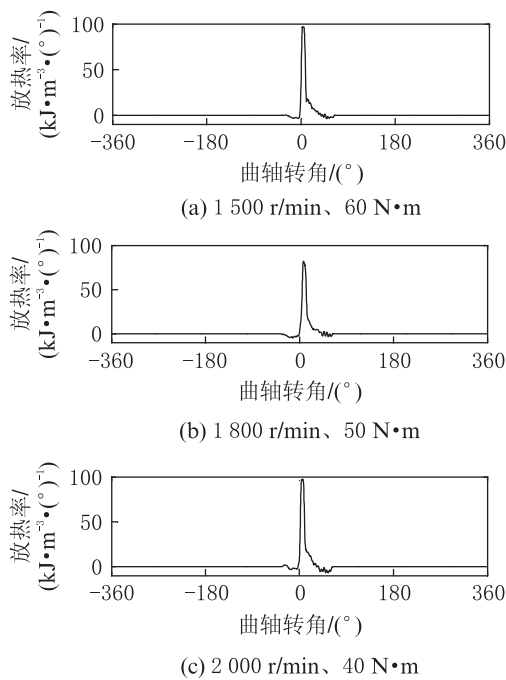


图7 燃烧放热率曲线

表3 燃烧状态指标计算结果

项目	参数		
工况	1 500 r/min、 60 N·m	1 800 r/min、 50 N·m	2 000 r/min、 40 N·m
CA50/(°)	5.30	10.60	6.20
IMEP/(10 ⁵ ·Pa)	6.53	5.63	6.94
p _{max} /(10 ⁵ ·Pa)	84.66	66.16	89.25
PPP/(°)	6.85	12.10	7.90
(dp/dφ) _{max} /(10 ⁵ ·Pa·(°) ⁻¹)	15.45	7.62	13.54
MRP/(°)	5.20	9.70	5.80

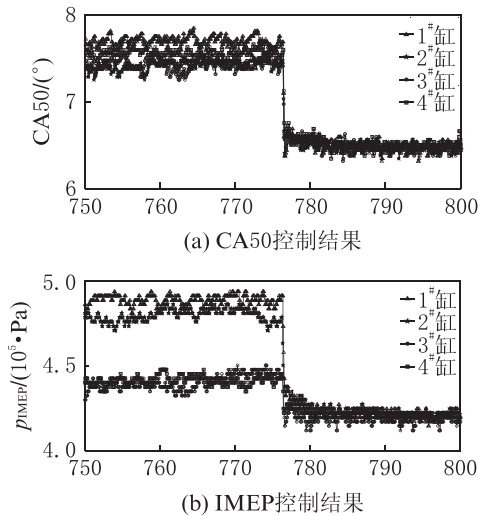


图8 1 500 r/min、40 N·m 闭环控制效果

(8 字节,波特率为 1 Mbps)数据传输时间约为 0.2 ms。整套系统延时约为 30 ms,所以该系统适用于循环间控制,而不适用于循环内和下一循环控制。

6 结论

(1) 在奇瑞 1.9 L 高压共轨柴油机上的试验结果表明:所开发的缸压采集系统能够正确采集并且发送缸压信息给燃烧分析软件;所开发的燃烧分析软件,能够正确计算燃烧状态指标。

(2) 在 1 500 r/min、40 N·m 工况下,采用该系统能够进行 IMEP 和 CA50 的闭环控制。

(3) 该闭环控制系统反馈路径延时约为 30 ms,适用于循环间燃烧控制,不适用于循环内和下一循环的燃烧控制。

参考文献:

[1] SCHIEFER D, MAENNEL R, NARDONI W. Advantages of diesel engine control using in-cylinder pressure information for closed loop control [C]// SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2013,2003-01-0364.

[2] 陈林.混合动力柴油发动机 HCCI-CI 燃烧控制系统研究[D].北京:清华大学,2009.

[3] 方成,杨福源,欧阳明高,等.使用缸压信息的柴油机低温燃烧闭环控制[J].清华大学学报(工学版),2013,53(3):371-377.

FANG C, YANG F Y, OUYANG M G, et al. Closed-loop control of low temperature combustion in diesel engines with cylinder pressure information [J]. Journal of Tsinghua Univ (Sci&Tech), 2013,53(3):371-377.

[4] 方成,高国景,杨福源,等.柴油机控制用燃烧状态分析单元开发研究[J].内燃机工程,2014,35(1):51-56.

FANG C, GAO G J, YANG F Y, et al. Development of control-oriented in-cylinder combustion analysis unit for diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014,35(1):51-56.

[5] 杨福源,杨雨平,欧阳明高,等.柴油机基于缸压的闭环反馈控制技术[J].内燃机学报,2012,30(2):172-178.

YANG F Y, YANG Y P, OUYANG M G, et al. Research on close-loop control strategy of diesel engine based on in-cylinder pressure[J]. Transactions of CSICE, 2012,30(2):172-178.

[6] 程驰,李建秋,方成,等.采用 Flexray 总线通信的柴油机缸压采集系统[J].车用发动机,2014(3):1-5.

CHENG C, LI J Q, FANG C, et al. In-cylinder pressure acquisition system of diesel engine based on flexray bus[J]. Vehicle Engine, 2014(3):1-5.

[7] FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. MPC5644A microcontroller reference manual [M/OL]. [2012-01-16]. <http://www.freescale.com>.

[8] FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. MPC5604E microcontroller reference manual [M/OL]. [2012-06-21]. <http://www.freescale.com>.

[9] FOROUZAN B A. TCP/IP protocol suite, fourth edition[M]. New York: The McGraw-Hill Company, 2010.

[10] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York: The McGraw-Hill Company, 1988.