

# 基于缸盖振动加速度的柴油机燃烧始点识别\*

唐娟 程勇 刘杨 马宗正

(山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061)

**【摘要】** 利用振动加速度信号对柴油机燃烧始点进行了识别。通过模拟计算的方法分析了缸盖表面振动加速度特征点和燃烧始点的关系,表明缸盖表面振动加速度和缸内压力二次导数具有相似的变化趋势,可利用压缩冲程中振动加速度峰值之前的过零点估计燃烧始点出现时刻。在195型柴油机上进行的台架实验结果表明,以缸内压力信号识别的燃烧始点为参考点,振动加速度识别的燃烧始点偏差在 $\pm 1.5^\circ\text{CA}$ 之内,基于缸盖振动加速度识别柴油机燃烧始点是可行的。

**关键词:** 柴油机 振动加速度 燃烧始点

**中图分类号:** TK421<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)03-0006-05

## Estimating Diesel Engine Combustion Timing Based on Vibration Acceleration of Cylinder Head

Tang Juan Cheng Yong Liu Yang Ma Zongzheng

(College of Energy and Power Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

### Abstract

Estimating combustion timing in diesel engine by cylinder head vibration acceleration was presented. The correlation between the vibration acceleration and the second derivative pressure was compared based on a 195 diesel engine finite element model. Results showed that the vibration acceleration and the second derivative pressure had the similar trend before the peak pressure, and the combustion timing was supposed to be identified by the zero vibration acceleration at this range. Experiments were conducted on a 195 diesel engine and the results verified that the combustion timing could be determined by the vibration acceleration of cylinder head with the deviation within  $\pm 1.5^\circ\text{CA}$ .

**Key words** Diesel engine, Vibration acceleration, Combustion timing

### 引言

燃烧始点对柴油机性能具有重要的影响,是柴油机电子喷射闭环控制的重要反馈参数。判别柴油机燃烧始点的主要方法有缸内压力识别法<sup>[1-3]</sup>、噪声识别法<sup>[4]</sup>和振动信号识别法<sup>[5-6]</sup>。缸内压力是燃烧过程的直接反映,是直接有效的燃烧始点识别方法,在实验研究中得到了广泛的应用,但在实际应用中受到传感器成本、安装和使用寿命的局限。噪声法利用实测的内燃机燃烧噪声信号对燃烧始点进行识别,文献[4]依据20 kHz以上噪声信号的包络线

特征点出现时刻确定了燃烧始点位置。振动信号识别法利用实测的缸盖或机体表面振动信号识别燃烧始点,具有传感器安装方便、价格低、容易测试等优点。

振动加速度是柴油机中常用的振动信号,但振动加速度具有非平稳时变的特点,导致利用振动加速度识别燃烧始点还存在一定难度。为此,本文采用模拟计算的方法,结合振动力学,对振动加速度和燃烧始点的关系进行分析,找出利用振动加速度判断燃烧始点的方法。并在195型柴油机上进行台架实验,利用实测振动加速度和缸内压力信号对燃烧

收稿日期: 2010-04-02 修回日期: 2010-06-07

\* 国家自然科学基金资助项目(50876055)和清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目(KF09112)

作者简介: 唐娟, 博士生, 主要从事内燃机工作过程及测试技术研究, E-mail: tangjuan@mail.sdu.edu.cn

通讯作者: 程勇, 教授, 主要从事内燃机工作过程及测试技术研究, E-mail: cysgd@sdu.edu.cn

始点进行识别,证明利用振动加速度识别燃烧始点的可行性。

## 1 研究对象及实验装置

以单缸 195 型柴油机为研究对象,测量了不同工况下 195 型柴油机的缸内压力和缸盖表面振动加速度信号。实验中加速度传感器采用 CA - YD - 102 型压电式传感器,冲击极限 5 000 g,安装谐振频率 40 kHz,轴向灵敏度 15 pC/g,量程为 200 mm/s,频率范围 4 Hz ~ 4 kHz,传感器直接安装于缸盖表面。缸内压力传感器采用 AVL 公司的 12QP250 型压电传感器,电荷放大器采用江苏联能电子生产的 YE5850A 型放大器。用北京阿尔泰公司生产的 USB2002 数采系统进行数据采集,各通道采样频率设为 50 kHz。

## 2 加速度识别燃烧始点的模拟分析

利用振动加速度识别柴油机燃烧始点,需对振动加速度和燃烧始点的关系进行分析,通过模拟计算的方法获得两者的关系可排除其他激励源的干扰,有利于问题的分析。柴油机为多自由度振动系统,传统数学建模方法建立的单自由度或多自由度模型,计算过程复杂,模型也不够精确,有限元方法的出现,解决了复杂结构的建模及求解问题<sup>[7]</sup>。本文采用 ABAQUS 有限元软件对柴油机缸盖表面振动加速度信号和燃烧始点的关系及利用振动加速度识别燃烧始点的可行性进行了模拟分析。

### 2.1 模型建立及边界条件设置

采用 ABAQUS 建立 195 型柴油机机体、缸盖有限元模型如图 1 所示。模型采用 10 节点四面体网格单元,模型总单元数为 63 302 个,节点数为 19 694。

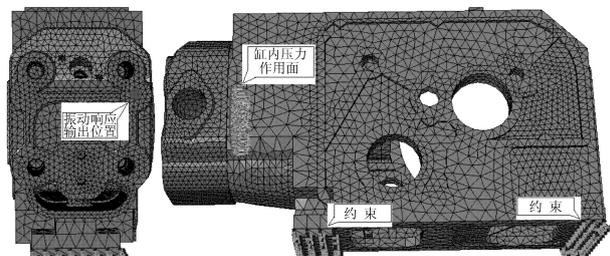


图 1 195 型柴油机有限元模型图

Fig. 1 195 diesel engine finite element model

研究用发动机通过机体底部的支架和实验台连接,计算中假定支架不发生变形,将支架的相关节点进行约束,约束如图 1 所示。

为分析燃烧始点和振动加速度的关系,对机体受力进行了简化,只考虑缸内压力作用,忽略侧压

力、曲轴轴承力等作用。缸内压力由实验获得,作用于气缸火力面上。

根据材料属性得材料密度为  $7.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 113 GPa,泊松比为 0.27。

### 2.2 数学模型

模型采用的动平衡有限元控制方程为

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = R(\dot{q}, q, t)$$

式中  $M, D, K$ ——系统质量、阻尼和刚度矩阵

$R(\dot{q}, q, t)$ ——非线性载荷列矢量,本文指缸内压力

$\ddot{q}, \dot{q}, q$ ——加速度、速度和位移列矢量

ABAQUS 采用 Newton - Raphson 法来求解上述动平衡控制方程,能够直接获得系统任意一点的振动输出。

### 2.3 模拟振动加速度特点

图 2 为 1 200 r/min、40 N·m 工况,以实测缸内压力为边界条件,利用有限元模型计算得到的缸盖表面振动位移和缸内压力、振动加速度及压力二次导数对比结果。由图可见,模拟缸盖表面振动位移和缸内压力有相近的变化趋势。峰值压力前,缸内压力随曲柄转角增大,为平衡缸内压力的变化,缸盖产生弹性变形,变形量随力的增大而增大;峰值压力后,振动位移随缸内压力的减小而减小,但由于系统的弹性和惯性作用,位移减小过程中可能产生振荡,振荡特性取决于系统的质量、阻尼和刚度。可见,峰值压力前,缸盖表面振动位移能较好地反映出缸内压力变化。加速度是位移的二次导数,因此,峰值压力前,理论上缸盖表面振动加速度和压力二次导数也有相似的变化趋势。

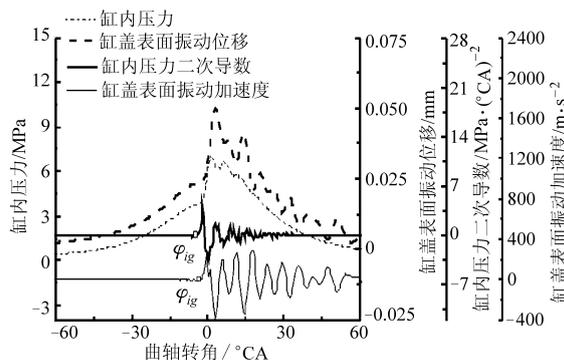


图 2 模拟计算振动信号和缸内压力信号对比结果

Fig. 2 Comparison of simulated vibration responses and in-cylinder pressure

### 2.4 燃烧始点的识别

对柴油机来说,通常可利用压力升高率曲线折点法、压力突升法和示功图压缩线分离点法识别燃烧始点<sup>[8]</sup>。压力升高率曲线折点法将压升率曲线在压缩冲程中的折点作为燃烧始点,当压升率曲线

出现折点时,压力二次导数趋于零,因此,压力二次导数在压缩冲程中的过零点也可看作燃烧始点,同理,缸盖表面振动加速度在压缩冲程中的过零点也可看成燃烧始点,如图2中 $\varphi_{ig}$ 所示。

为分析该方法的适应性,模拟了1200 r/min不同负荷工况下的缸盖表面振动加速度信号,图3为

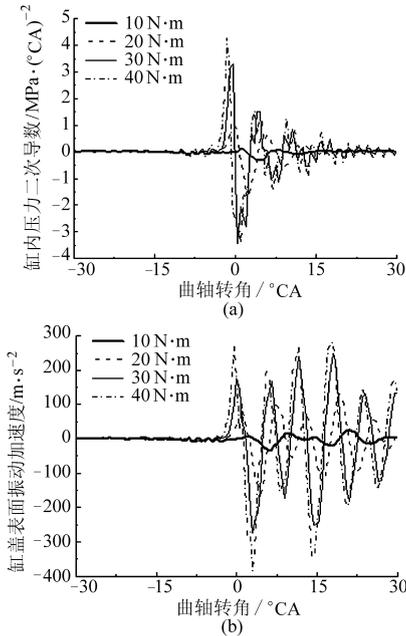


图3 不同工况模拟缸盖振动加速度和压力二次导数

Fig.3 Simulated vibration acceleration and the second derivative of in-cylinder pressure under different operating conditions

(a) 缸内压力二次导数 (b) 缸盖表面振动加速度

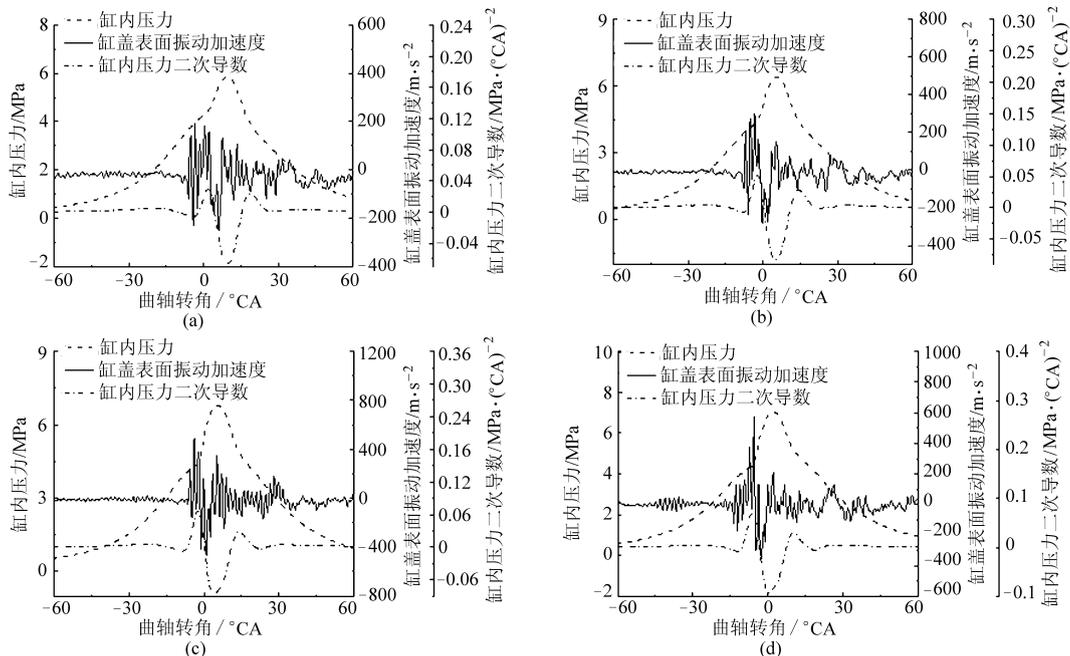


图4 不同工况下实测的缸内压力、压力二次导数和缸盖表面振动加速度信号

Fig.4 Measured in-cylinder pressure, the second derivative of in-cylinder pressure and vibration acceleration

(a) 10 N·m (b) 20 N·m (c) 30 N·m (d) 40 N·m

不同工况下缸内压力二次导数曲线和模拟缸盖振动加速度对比曲线。由图可见,各工况下,峰值压力前的模拟计算振动加速度和压力二次导数都有相似的变化趋势。根据压力二次导数和振动加速度确定的燃烧始点如表1所示。由表可见,模拟计算振动加速度可识别柴油机燃烧始点出现时刻,以压力二次导数识别的燃烧始点为基准,则加速度识别的燃烧始点波动在 $1^{\circ}\text{CA}$ 之内。

表1 压力二次导数和模拟加速度识别的燃烧始点  
Tab.1 Combustion timing identified by the second derivative of the in-cylinder pressure and simulated vibration acceleration

工况 /N·m	压力二次导数 识别的燃烧始 点/ $^{\circ}\text{CA}$	振动加速度 识别的燃烧始 点/ $^{\circ}\text{CA}$	偏差 / $^{\circ}\text{CA}$
10	0.3	0.5	0.2
20	-3.7	-3.1	0.6
30	-3.3	-2.5	0.8
40	-3.1	-2.1	1.0

注:燃烧上止点为 $0^{\circ}\text{CA}$ 。

### 3 实验验证

图4为1400 r/min不同负荷工况下实测的缸盖表面振动加速度信号和缸内压力二次导数曲线。由图可见,峰值压力前,实测振动加速度信号和缸内压力二次导数有相近的变化趋势,但由于振动加速度对高频信息敏感,因此,实测加速度信号中存在高频干扰成分。根据文献[9]可知,燃烧阶段前

1 500 Hz 的振动信号和燃烧信息最为密切,为此,对实测振动加速度信号进行了滤波处理,处理的振动

加速度和缸内压力、压力二次导数对比波形如图 5 所示。

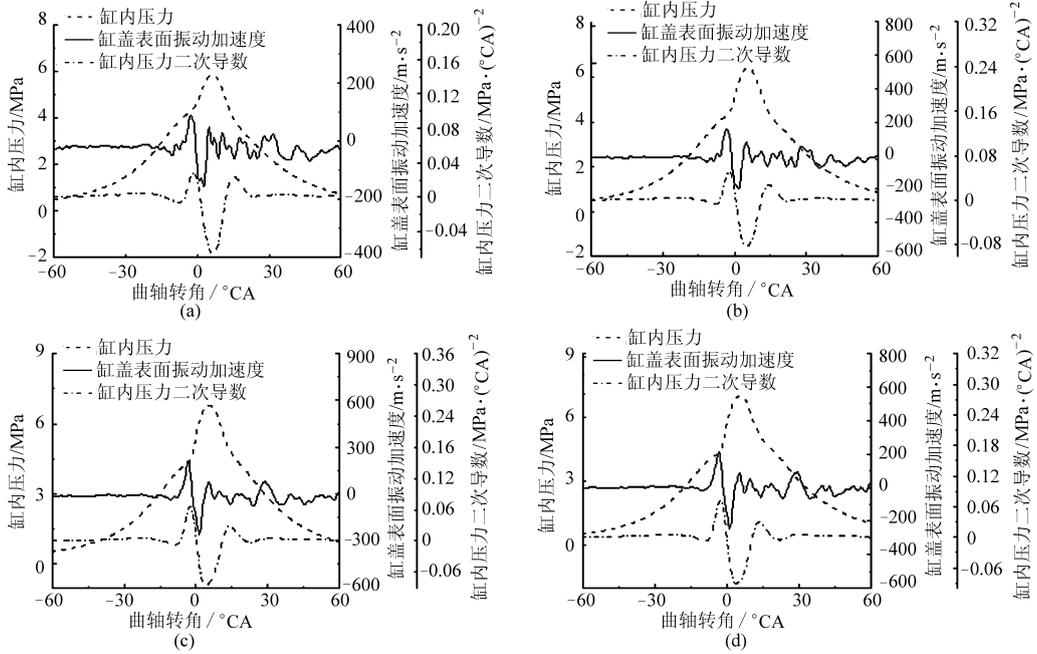


图 5 不同工况下实测的缸内压力、压力二次导数和滤波后的缸盖表面振动加速度信号

Fig. 5 Second derivative of in-cylinder pressure and filtered vibration acceleration

(a) 10 N·m (b) 20 N·m (c) 30 N·m (d) 40 N·m

利用不同工况下处理后的振动加速度信号和缸内压力二次导数分别对燃烧始点进行识别,结果如

表 2 所示。

表 2 不同工况缸盖表面振动加速度信号和压力二次导数识别的燃烧始点对比结果

Tab. 2 Combustion timing identified by cylinder head vibration acceleration and the second derivative of in-cylinder pressure under different operating conditions

工况 /r·min <sup>-1</sup> (N·m)	压力二次导数 识别的燃烧 始点/°CA	振动加速度 识别的燃烧 始点/°CA	两方法识别的 相位偏差 /°CA	工况 /r·min <sup>-1</sup> (N·m)	压力二次导数 识别的燃烧 始点/°CA	振动加速度 识别的燃烧 始点/°CA	两方法识别的 相位偏差 /°CA
怠速	-8.5	-8.2	0.3	1 200(10)	-7.3	-7.9	-0.6
800	-7.3	-7.0	0.3	1 200(20)	-8.2	-9.7	-1.5
800(10)	-8.8	-9.1	-0.3	1 200(30)	-8.2	-9.1	-0.9
800(20)	-9.6	-9.3	0.3	1 200(40)	-8.5	-8.5	0
800(30)	-10.0	-8.8	1.2	1 200(50)	-8.5	-9.1	-0.6
800(40)	-10.3	-9.6	0.7	1 400(10)	-5.5	-4.7	0.8
1 000(10)	-9.7	-10.0	-0.3	1 400(20)	-6.1	-6.2	-0.1
1 000(20)	-9.7	-10.3	-0.6	1 400(30)	-6.4	-6.7	-0.3
1 000(30)	-9.4	-8.8	0.6	1 400(40)	-7.0	-7.8	-0.8
1 000(40)	-10.3	-10.3	0	1 400(50)	-7.0	-7.0	0

注:燃烧上止点为 0°CA。

由表可见,不同工况下,两种方法得到的燃烧始点偏差在 -1.5 ~ 1.2°CA 之间,在工程范围内,该偏差是可以接受的。因此,可认为基于缸盖表面振动加速度识别柴油机燃烧始点是可行的。

### 4 结论

(1) 基于单缸 195 型柴油机有限元模型,对缸内压力产生的缸盖表面加速度进行了模拟,结果表明,峰值压力前的缸盖表面振动加速度和压力二次

导数有相似的变化趋势,可利用振动加速度在压缩冲程中的过零点判断燃烧始点。

(2) 台架实验结果表明,不同工况下,以压力二次导数识别的燃烧始点为基准,则利用缸盖表面振

动加速度识别的燃烧始点偏差在  $\pm 1.5^\circ\text{CA}$  之内。

(3) 模拟计算和实测结果均表明,利用缸盖表面振动加速度识别柴油机燃烧始点是可行的。

#### 参 考 文 献

- 1 沈希忠,史习智,杜海平,等.柴油发动机气缸压力和燃烧始点的辨识[J].数据采集与处理,2002,17(3):317~320.
- 2 Schiefer D, Maennel R, Nardoni W. Advantages of diesel engine control using in-cylinder pressure information for closed loop control [C]. SAE Paper 2003-01-0364, 2003.
- 3 Leonhardt S, Müller N, Isermann R. Methods for engine supervision and control based on cylinder pressure information [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, 4(3): 235~245.
- 4 Ball A D, Gu F, Li W. The condition monitoring of diesel engines using acoustic measurements part 2: fault detection and diagnosis [C]. SAE Paper 2000-01-0368, 2000.
- 5 白佳宾,罗维东,刘立,等.基于 Hilbert-数学形态变换的柴油机燃烧始点辨识[J].农业装备与车辆工程,2007(2):20~23.
- 6 Olivier Grondin, Jonathan Chauvin, Fabrice Guillemain. Combustion parameters estimation and control using vibration signal: application to the diesel HCCI engine [C]//IEEE Conference on Decision and Control, 2008:5 621~5 627.
- 7 Lomas N S, Hayek S I. Vibration and acoustic radiation of elastically supported rectangular plates [J]. Journal of Sound and Vibration, 1977, 52(1):1~25.
- 8 何学良,李疏松.内燃机燃烧学[M].北京:机械工业出版社,1990.
- 9 程勇,吴亚兰,纪少波,等.基于振动信号的柴油机缸内燃烧状态估计方法[J].农业机械学报,2008,39(9):10~14. Cheng Yong, Wu Yalan, Ji Shaobo, et al. Estimation of combustion status in diesel engine based on vibration signal [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 10~14. (in Chinese)

(上接第5页)

#### 参 考 文 献

- 1 Zelenka P, Telford C. 采用辅助燃烧再生的载重汽车用颗粒过滤系统的开发[J].国外内燃机,2003(3):50~54. Zelenka P, Telford C. Development of the particulate filter system with combustion-supporting regeneration for motorlorry[J]. Foreign Diesel Locomotive, 2003(3):50~54. (in Chinese)
- 2 Paul Zelenka, Clive Telford, Dave Pye, et al. Development of a full-flow burner DPF system for heavy-duty diesel engines [C]. SAE Paper 2002-01-2787, 2002.
- 3 Magdi K Khair. A review of diesel particulate filter technologies [C]. SAE Paper 2003-01-2303, 2003.
- 4 Zheng Haishan, Jason M Keith. Ignition analysis of wall-flow monolith diesel particulate filters [J]. Catalysis Today, 2004, 98(3):403~412.
- 5 龚金科,梅本付,王劲,等.车用柴油机微粒捕集器热再生的一维数值模拟[J].车用发动机,2005(5):45~47,60.
- 6 Timo Deuschle, Uwe Janoske, Manfred Piesche. A CFD-model describing filtration, regeneration and deposit rearrangement effects in gas filter systems [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 135(1~2):49~55.
- 7 龚金科,伏军,王曙辉,等.柴油机微粒捕集器背压信号采集系统动态响应特性的研究[J].内燃机工程,2008,29(5):62~66.
- 8 龚金科,吁璇,伏军,等.柴油机喷油助燃再生系统微粒捕集器油气匹配研究[J].农业机械学报,2010,41(4):1~5. Gong Jinke, Yu Xuan, Fu Jun, et al. Study on fuel-air matching forms in burner-type diesel particulate filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 1~5. (in Chinese)
- 9 Evdokia Kladopoulou, Athanasios G Konstandopoulos. A virtual sensor for soot load estimation in diesel particulate filters [C]. CPERI Paper, Themi, Thessaloniki, 2004.
- 10 龚金科,余明果,王曙辉,等.柴油机单元块旋转式过滤体 DPF 微波再生研究[J].农业机械学报,2011,42(1):2~7. Gong Jinke, Yu Mingguo, Wang Shuhui, et al. Study on rotary unit-block diesel particulate filter regeneration with microwave [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1):2~7. (in Chinese)