

2003025

# 基于曲轴瞬时加速度分析的发动机 启动过程着火判定与应用\*

杨福源 张京永 王晓光 周明 欧阳明高  
(清华大学, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

**[摘要]** 提出不同于失火判定的基于曲轴瞬时加速度分析的发动机启动过程着火判定方法, 即通过两次启动过程的瞬时加速度对比寻找喷油启动过程的着火始点。理论分析和试验表明该方法不仅可以准确识别着火始点, 而且识别精度也从循环级提高到角度级。试验在一台6缸电控共轨柴油机上进行。

**叙词:** 电控发动机, 启动过程, 燃烧始点判定, 曲轴瞬时加速度

## Judgement and Application of Ignition Moment During Engine Startup Period Based on Crankshaft Transient Acceleration Analysis

Yang Fuyuan, Zhang Jingyong, Wang Xiaoguang, Zhou Ming & Ouyang Minggao  
Tsinghua University, State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Beijing 100084

**[Abstract]** This paper brings forward an ignition detection method based on crankshaft transient acceleration analysis. It compares the transient acceleration of two startup procedures and then find out the ignition moment (start of combustion) during startup period. Crankshaft dynamics analysis and real test show that this method can identify the ignition moment, with the accuracy improved from cycle level to angle level. The test is carried out on a 6-cylinder common rail diesel engine.

**Keywords:** Electronically controlled engine, Startup period, Ignition moment, Crankshaft transient acceleration

### 1 序言

新排放法规提出的苛刻要求使柴油机技术跃上了电子控制的平台, 迎来了电控柴油机的新时代。世界各大汽车公司在燃油系统方面先后推出了电控分配泵、电控单体泵、高压共轨以及电控泵喷嘴等新型燃油喷射系统。其中高压共轨系统以其灵活的多段喷射和无需改动发动机本体等独特优势受到普遍关注。

柴油机的启动性能尤其是低温启动性能是评价柴油机性能优劣的指标之一, 国内外开展了大量的研究工作以改善柴油机的启动性能<sup>[1]</sup>。采用高压共轨燃油喷射系统等电控措施以后, 通过参数优化,

将可对柴油机启动过程的喷油量、喷油正时、喷射压力等参数进行优化。作为前提条件, 对柴油机启动过程着火时刻的准确判定十分重要。同时, 电控技术在柴油机上的广泛应用也为柴油机状态检测与控制提供了新的可能。

在20世纪90年代, 通过分析缸内压力和发动机曲轴转速波动的对应关系, 在汽油机上开始利用发动机曲轴的瞬时转速判定发动机的失火情况。研究表明, 瞬时转速的异常波动反映了某个(或多个)气缸的非正常燃烧, 由此通过对喷油量的反馈控制实现发动机的稳定工作。Citron S J. 等人比较早地研究了发动机转速波动和缸内压力的关系<sup>[2]</sup>, 之后发动机瞬时转速被广泛用于电控汽油机的失火检测和喷射控制<sup>[3, 4]</sup>, 并在OBD-II标准中作了规定。在

\* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2001CB209205)。

原稿收到日期为2002年7月21日, 修改稿收到日期为2002年9月23日。

把瞬时转速用于失火判定时,对曲轴转角的定位精度和系统响应时间要求并不高,仅需达到某缸的某个循环。对6缸4冲程发动机来说,其曲轴转角分辨率为 $120^{\circ}\text{CA}$ 。

文中在理论分析和试验基础上,提出了一种判定起动循环燃烧始点的方法。即通过对相同条件下电动机拖动和喷油启动过程中的曲轴瞬时加速度的对比分析,得到两个过程曲线的分离位置,从而判定缸内燃烧始点。

## 2 启动过程着火循环的判定方法

发动机启动过程的评价指标目前仅是启动时间(次数)有标准可循。因此,要优化发动机启动过程的控制参数必须确切知道发动机的启动过程着火循环。即从该循环开始,发动机的指示功大于机械损失,输出功为正,亦即发动机转速从何时开始持续超过起动机拖动转速。

通过缸内压力传感器分析气缸压力在一个循环中的变化,从而判定发动机的工作状况是目前广泛采用的分析柴油机启动过程的手段。柴油机工作循环的实测气缸压力曲线如图1。在无燃烧情况下,随活塞的上下运动,缸内气体经过压缩和膨胀过程,其压力曲线是单调连续的单峰曲线(图中虚线所示);当存在缸内燃烧时,不仅缸内压力的峰值增大,且在压力上升过程中出现台阶(有时为双峰)。因此,根据台阶位置就可以判定发动机着火时刻。作为循环内的发动机工作过程分析手段,缸内压力监测被广泛应用于发动机研发、燃烧分析、排放控制等领域。

尽管如此,这种方法还存在以下不足。

(1)多通道多循环连续采集时信号调试不便,且示波器的数据传输速率和数据量受到硬件限制。

(2)必须在缸盖上加工安装孔以安装缸内压力传感器。受缸盖上冷却水道空间的影响以及传感器对位置和角度的要求,加工这样的安装孔并不容易。即便对某些发动机可以利用电热塞孔安装传感器,一般也都需要对原孔进行再加工。

(3)缸内压力传感器是高精度电子元器件,要求耐高温、体积小、宽域、偏差小、响应快,因此价格昂

贵。

(4)传感器的安装形式对测量结果有较大影响。传感器伸入气缸的深浅、端部形状、环隙大小都可能影响发动机的压缩比、功率、排放指标等,并可能出现缸内压力振荡等信号失真现象<sup>[5]</sup>。

考虑到发动机是否启动的外在表现是发动机的转速是否高于电动机的拖动转速。而电控发动机又必须具有转速信号的发生和采集装置。因此,通过对发动机曲轴瞬时转速信号的分析来判定发动机的启动过程着火循环不但十分便利,而且将可能开辟一个新的发动机状态测试途径。

## 3 曲轴瞬时加速度动力学分析

作为一种容积式的往返运动机械,内燃机曲轴的角速度变化由作用于曲柄上的转矩 $T$ 和运动系统惯性质量 $m$ 决定。在惯性质量一定的情况下,曲轴加速度 $j$ 的变化反映作用于曲柄上的转矩的变化。

在启动过程中,作用于曲柄的转矩 $T$ 由三部分组成:外部驱动力矩和阻力矩 $T_{\text{motor}}$ 、缸内气体对活塞的作用力矩、惯性力矩。即

$$T = T_{\text{motor}} + (F_g + F_j) \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos\beta} r$$

式中 $F_g$ 为缸内气体对活塞的作用力, $F_j$ 为往复惯性力,其他参数见图2。往复惯性力 $F_j$ 为

$$F_j = -mj = -mr\omega^2 \left[ \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos\beta} + \lambda \frac{\cos^2\alpha}{\cos^3\beta} \right]^{[6]}$$

式中 $\lambda$ 为曲轴半径 $r$ 与连杆长度 $l$ 之比, $\lambda = r/l$ 。

$F_j$ 与加速度的积分(转速)有关。在条件相同的两次启动过程中(一次喷油、一次拖动),在燃烧开始前两者所受惯性力相同,即惯性力不影响对燃烧始点的判定。

气体作用力 $F_g$ 可分为两部分,即无缸内燃烧时的气体作用力 $F_m$ 和燃烧引起的压力增加 $\Delta F_c$ 。在电动机(起动机)拖动发动机开始转动的循环中, $\Delta F_c = 0$ ,这时 $F_g = F_m$ ;在喷油启动过程中, $\Delta F_c \neq 0$ , $F_g = F_m + \Delta F_c$ 。

若忽略燃油喷射及可燃混合气形成对气缸压力

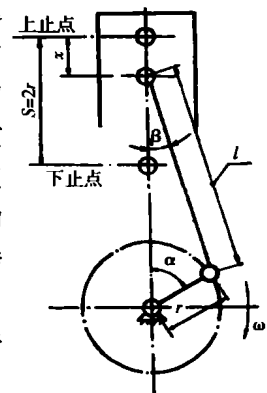


图2 正置曲柄连杆机构

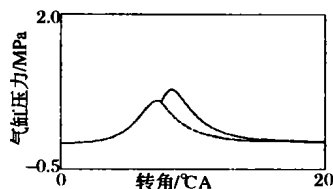


图1 柴油机气缸压力随转角的变化

的影响,假设燃烧始点的曲轴转角为  $\theta_s$ ,则在相同曲轴起始位置( $\alpha$ 、 $\beta$ )和相同拖动转矩( $T_{motom} = T_{motros}$ )条件下,当  $\theta < \theta_s$  时,  $T_m - T_s = 0$ ;当  $\theta \geq \theta_s$  时,  $T_m - T_s \neq 0$ 。当  $\theta \geq \theta_s$  时,两个过程的曲轴瞬时加速度差  $j_s - j_m \neq 0$ 。因此根据喷油启动和拖动过程的加速度变化,可以判定燃烧是否开始。

#### 4 试验方案及测试设备

试验工作在一台日本五十铃汽车公司生产的6缸高压共轨柴油机上进行。该发动机可实现多段喷射控制,装备有曲轴转角信号传感器。试验中,直接从原线束中引出相关信号到高速数据采集仪。图3为测试系统示意图。

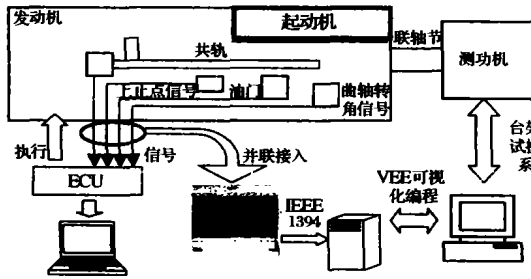


图3 测试系统示意图

试验在 ISUZU6HK1 高压共轨柴油机上进行。发动机的主要参数如表1所示。发动机自带三菱起动机,型号 M008T60971,24V。数据采集设备采用美国安杰伦(Agilent)公司的800kHz高速数据采集仪。在 VEE 可视化编程界面下,采集仪捕获的数百万字节数据经由目前传输速率最高的 IEEE1394 高速数据接口传到计算机,离线状态下利用 MATLAB 数学工具箱对信号进行分析。

表1 发动机主要配置及参数

项目	规格
型式	直列6缸
排量/L	7.8
燃油喷射系统	DENSO ECD-U2 高压共轨系统
增压器	带废气放气阀的废气涡轮增压器
曲轴转角位置传感器	磁电式

#### 5 试验结果及分析

##### 5.1 曲轴瞬时转速和加速度信号的可重复性

在相同的发动机润滑条件、负载、电瓶电压、环境温度等条件下,从相同的曲轴起始位置由起动机

拖动发动机,重复若干次试验,对比其曲轴转速和加速度曲线(图4)。从4次重复性测试结果可以看出,曲轴瞬时转速和加速度信号具有非常好的重复性,说明在连续重复过程中,发动机的状态具有较好的一致性,对测试结果的影响很小。因而可以认为两个过程具有可比性。

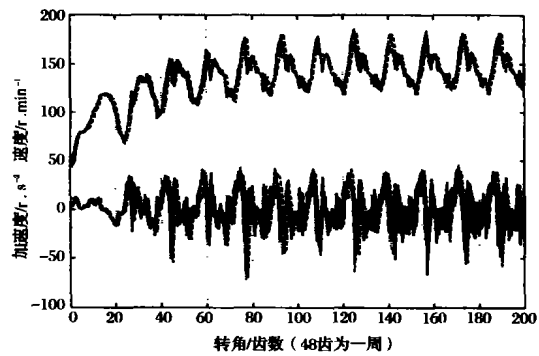


图4 曲轴瞬时转速和加速度信号的可重复性

为了从定量角度评价其重复性,可以利用数学上的相关性分析方法计算这些信号的相似性。相关性系数越接近1.0,表示信号越相似。利用 MATLAB 数学工具箱对测试结果进行的信号相关性分析结果如图5。

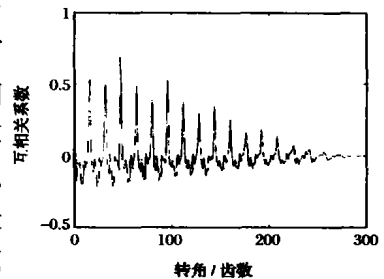


图5 重复测试时曲轴加速度的相关性分析

从图5可以看出,两次拖动过程的加速度互相关特性有如下特点:(1)加速度互相关函数在延时为0时取得最大值;(2)延时为0时相关系数非常接近1。

因此,对4次测试结果的分析表明它们确实具有非常好的相关性,亦即可重复性。

##### 5.2 基于曲轴瞬时加速度分析的着火始点判定

5.2.1 基于加速度曲线的直观判定 将喷油启动与电机拖动时的曲轴瞬时转速和加速度曲线相比较,可以得到如图6的结果。从图中可以看到:

(1)在启动开始的曲轴第一圈(48个齿为曲轴转动一周)内,喷油启动时的速度和加速度曲线与拖动时几乎重合。说明在启动过程的第一个阶段发动机曲轴的瞬时信号在循着拖动线的轨迹移动,这与第3节的理论分析相吻合。

(2)从转过约60齿位置开始,启动时的加速度线脱离拖动线,振荡加剧。说明因发动机某缸(配合凸轮轴信号可判定发火缸)着火燃烧使得气体作用

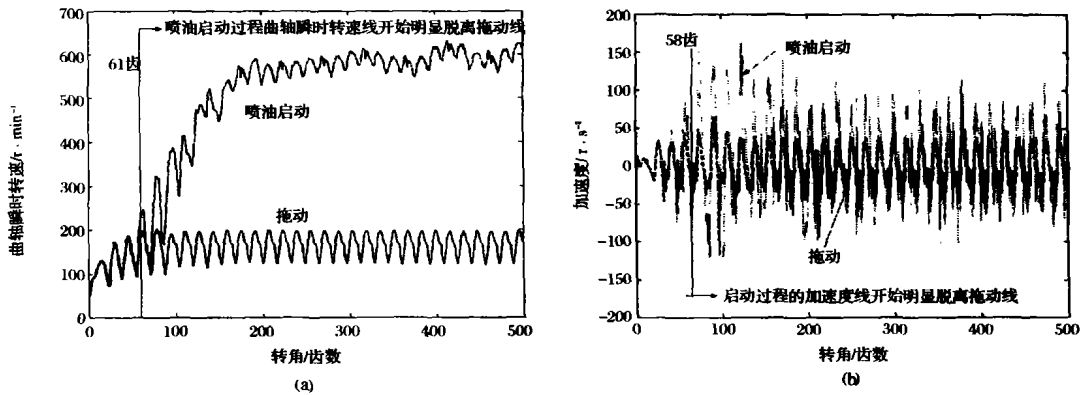


图6 喷油启动与拖动过程的曲轴瞬时速度和加速度曲线的分离

力增大,导致发动机曲轴角加速度和转速脱离原拖动线。

(3)进一步观察还发现转速线的分离点比加速度线分离点落后3个齿(15°CA),这与速度是加速度对时间的积分导致加速度变化在先、速度变化在后的理论相一致,也说明利用曲轴瞬时加速度信号分析可以更早判知缸内燃烧状态的变化。

把启动和拖动过程曲轴瞬时信号数据相减,得到图7的曲线。可以看到,因信号间存在微小的相位差使得差值信号的波动加剧,分离点的位置并不明显。为此,尝试通过对信号能量进行放大的分析方法寻找分离点。

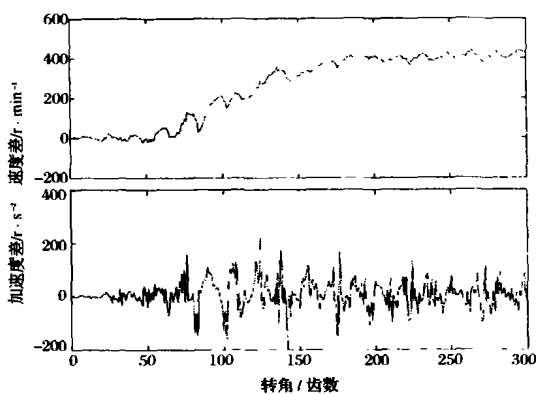


图7 喷油启动与拖动过程曲轴信号的差值

### 5.3 通过计算方均差分析差值信号

设拖动信号为  $x_t(t)$ , 启动信号为  $x_q(t)$ , 则两信号的方均误差为

$$\overline{\epsilon^2} = \frac{1}{t_T} \int_0^T [x_t(t) - x_q(t)]^2 dt$$

式中  $t_T$  为信号的时间总长度。

若考察  $(\tau, \tau + \Delta\tau)$  积分区间内的两信号方均差变化,即

$$\overline{\epsilon^2(\tau)} = \frac{1}{\Delta\tau} \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} [x_t(t) - x_q(t)]^2 dt$$

则当两信号出现明显的差别时,  $\overline{\epsilon^2(\tau)}$  将大于某一阈值  $\epsilon_{\text{depart}}^2$ 。因此在  $\overline{\epsilon^2(\tau)} - \tau$  曲线中,找到  $\overline{\epsilon^2(\tau)}$  大于  $\epsilon_{\text{depart}}^2$  点相对应的  $\tau$  值,即为分离点。

对于  $\Delta\tau$  的选取,  $\Delta\tau$  较大时,积分区间长度较大,对两信号的不一致情况反应较好;但随着  $\Delta\tau$  的增加,时间分辨率将下降。基于该6缸机的曲轴信号每16齿为一周期,选择1/4周期(4齿)作为衡量尺度。所得方均误差  $\overline{\epsilon^2(\tau)} - \tau$  曲线如图8。

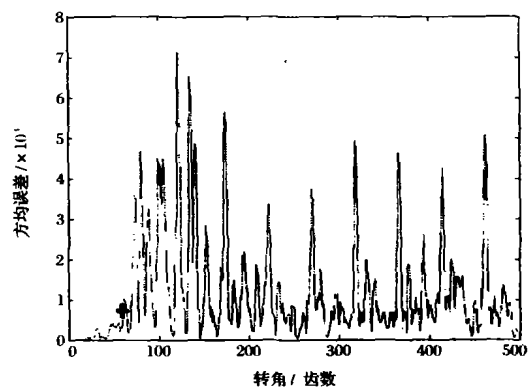


图8 通过计算信号的方均差寻找分离点

因为两信号均为功率有限信号,依据  $P = \frac{1}{t_T} \int_0^T x^2(t) dt$ , 计算得到信号功率。拖动信号  $P_t = 575.7044$ , 启动信号  $P_q = 4210.7$ 。

选取启动信号功率的2%为分离点的方均差判据,即  $\sqrt{\epsilon_{\text{depart}}^2} = 2\% P_q$ , 则  $\epsilon_{\text{depart}}^2 = 0.7 \times 10^4$ , 分离点在第58个采样点附近(图8中的标记点)。此结果与基于加速度曲线的判断结果相符。

### 5.4 应用

基于上述方法,测试了喷油提前角对启动过程的影响。方法是:保持0~500r/min内的目标循环

喷油量和目标轨道压力不变,分别把喷油定时设定为上止点前 $5^{\circ}\text{CA}$ 、 $8^{\circ}\text{CA}$ 、 $12^{\circ}\text{CA}$ ,测得如图9的曲线。可以明显看出,提前角为 $5^{\circ}\text{CA}$ 、 $8^{\circ}\text{CA}$ 和 $12^{\circ}\text{CA}$ 三种启动条件下的加速度分离点的位置是不同的,分别在曲轴转过59齿、123齿和75齿位置。可以说,不同喷油提前角对燃烧的影响通过曲轴瞬时加速度信号反映了出来,瞬时加速度信号是可以区分不同喷射参数下的缸内燃烧状况的。

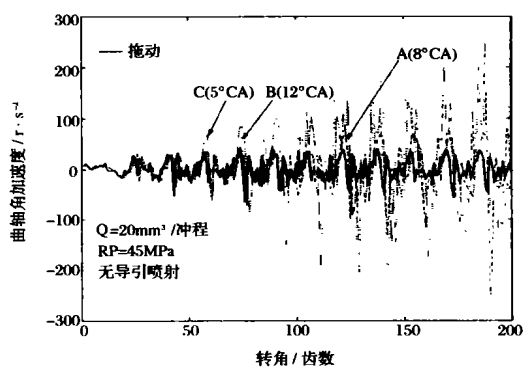


图9 不同喷油正时的起动过程曲轴加速度对比

## 6 结束语

基于上述理论分析和试验。可以得到以下结论。

(1)在相同启动条件下,从试验用的高压共轨柴油机曲轴瞬时信号上得到了重复性非常好的瞬时速

度和加速度信号,说明连续进行的两个启动过程的曲轴瞬时加速度信号具有可比性。

(2)理论分析和试验表明,若忽略燃油喷射及可燃混合气形成对气缸压力的影响,对比拖动和喷油启动过程的曲轴瞬时加速度信号可以判定发动机启动循环缸内燃烧的始点。

(3)该方法不同于失火判定,利用加速度信号可以更早判知缸内气体状态的改变,其判定精度从循环级提高到了角度级。

(4)直接利用电控发动机必备的曲轴转角传感器,避开了安装缸内压力传感器的繁琐,使用相当便利。

## 参考文献

- 1 李德桃. 柴油机冷启动的基础研究和改善措施. 北京: 科学出版社, 1998
- 2 Citron S J, O'Higgins J E, and Chen L. Cylinder by Cylinder Engine Pressure and Pressure Torque Waveform Determination Utilizing Speed Fluctuations. SAE Paper 890486
- 3 Lee D and Rizzoni G. Detecting of Partial Misfire in IC Engines Using Measurement of Crankshaft Angular Velocity. SAE Paper 951070
- 4 Williams J. An Overview of Misfiring Cylinder Engine Diagnostic Techniques Based on Crankshaft Angular Velocity Measurements. SAE Paper 960039.
- 5 Tadashi Tsurushima, Eiji Kunishima, Yasuo Asaumi, Yuzo Aoyagi. The Effect of Knock on Heat Loss in Homogeneous Charge Compression Ignition Engines. SAE paper 2002-01-0108
- 6 陆际清, 孟嗣宗. 汽车发动机设计. 北京: 清华大学出版社, 1990

(上接第166页)

29 Stefaan W R. Duym. Simulation Tools, Modelling and Identification for an Automotive Shock Absorber in the Context of Vehicle Dynamics. Vehicle System Dynamics 2000, (33)

30 Ichiro Kido. Suspension Vibration Analysis for Road Noise Using Finite Element Model. SAE paper 1999-01-1788

(上接第209页)

## 6 结论

如果今后电池性能不能得到提高以及向小型轻量化发展, EV行驶距离, 装载量得不到改善, 则EV的用途是有限的。作为城市和地区的交通系统的一个补充, 在电动车简易代步车、家庭第二辆车、老年用车等方面可能会有所进展。

对HEV而言, 由于具有与ICEV同样的性能, 加之其节

省能源、低 $\text{CO}_2$ 排出和低排放气体的特征, 只要价格方面能够得到解决, 可以预计能够顺利地被市场所接受, 其普及量也将大幅度地增长。

## 参考文献

- 1 JEVA: 1999年度电动机中长期普及及计划报告书
- 2 JEVA: 关于电动机(2001年)  
(金东瀛 译自 自動車技術 2002.1)