

# 根据飞轮瞬时转速诊断发动机各缸燃烧差异的探讨

程勇 胡玉平

(山东工业大学动力系, 济南 250061)

唐向臣

(济南微机电应用研究所)

吴波 张立梅

(山东工业大学)

TK421.2

**摘要** 对于在用的汽车、拖拉机与工程机械用发动机来说,是无法采用示功器同时测录各缸示功图并根据以评判各缸的燃烧过程的。本文介绍了一种根据飞轮瞬时转速诊断发动机各缸燃烧差异的方法,并以R4102及R6102工程机械用柴油机为例,研究探讨了根据多缸机飞轮瞬时转速推求各缸间燃烧压力差异的原理。文中对推求偏差进行了分析讨论,得出在压缩上止点后10 CA~80 CA期间,各缸间燃烧压力差值的推求偏差在±0.1 MPa。

**关键词** 发动机;瞬时转速;诊断;燃烧

飞轮 燃烧诊断

柴油机

## 引言

在发动机运行中,各缸作功能力的差异程度对经济性、动力性、排放和噪声等指标均有重要影响。因此,发动机燃烧故障的诊断是人们关注的问题。

通常,可以在发动机实验室内,在性能试验台架上,采用示功器测录各缸示功图,并根据以评判各缸的燃烧过程。但是,对在用的汽车、拖拉机与工程机械用发动机是难以应用上述方法的。因此,有必要探索一种简易可行的在线诊断方法。

测量运行中的发动机飞轮瞬时转速是一种较成熟和较经济的测量技术。作者在文献[1]中曾阐述了这种测量技术,并介绍了借助实测飞轮瞬时转速图形成性判断各缸工作均匀性的方法。作者在文献[2]中阐述了一种用飞轮瞬时转速定量判断各缸压缩性的方法。在本文中,作者拟介绍用飞轮瞬时转速诊断发动机燃烧故障的方法,它可测定多缸机各缸间燃烧压力的差别。

## 1 诊断测定各缸间燃烧压力差别的原理和实例

多缸发动机运转工作时,各缸均按进气-压缩-膨胀-排气循环工作,而各缸工作循环始点又间隔一定曲轴转角。通常非增压机中,在每一工作循环中,膨

胀冲程是气体对曲轴作功,其余冲程则为曲轴对气体作功。因此,在某一缸完成一个工作循环期间,飞轮转速将会呈现有规律的波动,其波动次数等于气缸数目。对于发火间隔均匀的3、4、6缸,转速波形的间隔也将是均匀的。

例如,4缸四冲程柴油机工作时,飞轮瞬时转速将呈现如图1所示的波动。图1中每一波的谷点分别接近对应于相应缸的压缩上止点,若各缸工作顺序为1-3-4-2时,则图中第1~4波谷点分别接近对应于第4、2、1、3缸的压缩上止点,每一波的形状与对应缸膨胀作功能力有关,也即与燃烧过程进展状况有关,因此,每一谷点后飞轮转速变化情况将反映对应气缸的燃烧情况。据此可借助飞轮转速波形的差异判断各缸燃烧过程的差异。

根据惯量加速原理,在第1缸曲轴转角为 $\varphi_k$ 时,作用于飞轮上的剩余扭矩等于飞轮角加速度与运动件转动惯量的乘积,即

$$\Delta T_k = G \cdot \alpha_k \quad (1)$$

此时,还存在

$$\Delta T_k = \sum_{i=1}^i M_{jk} - T_m \quad (2)$$

式中: $\Delta T_k$ —— $\varphi_k$ 曲轴转角时,作用于飞轮上的剩余扭矩, N·m;

G——运动件转动惯量, N·m·s<sup>2</sup>;

原稿收到日期为1998-06-22,修改稿收到日期为1998-08-25。

天津大学内燃机燃烧学重点实验室开放基金及山东省自然科学基金资助项目。

$\alpha_k$ —— $\varphi_{1k}$ 曲轴转角时,飞轮的角加速度,rad/s<sup>2</sup>;  
 $i$ ——气缸数目;  
 $M_{jk}$ —— $\varphi_{1k}$ 曲轴转角时,第  $j$  缸输出扭矩,N·m;  
 $T_m$ ——发动机平均阻力矩,N·m。

当第 1 缸处于膨胀冲程时,其它各缸分别处于不同的冲程,即

$$\varphi_{jk} = \varphi_{1k} + (Z-1) \frac{180 \cdot \tau}{i} \quad (3)$$

式中: $\varphi_{jk}$ ——当第 1 缸处于  $\varphi_{1k}$  时,第  $j$  缸曲柄相对于该缸进气上止点的位置,CA;

$Z$ ——与各缸工作顺序有关的系数, $Z=1,2,\dots,i$ ;

$\tau$ ——冲程数。

因此,式(2)中的  $M_{jk}$  可表达为

$$M_{jk} = \frac{p_{jk} - p_0 - K(\cos\varphi_{1k} + \lambda\cos 2\varphi_{1k})}{\cos\beta_{jk}} \cdot F \cdot r \cdot \sin(\varphi_{jk} + \beta_{jk}) \quad (4)$$

式中: $p_{jk}$ ——在  $\varphi_{1k}$  时,第  $j$  缸气缸压力,MPa;

$p_0$ ——曲轴箱气体压力,MPa;

$F$ ——活塞面积,cm<sup>2</sup>;

$r$ ——曲柄半径,cm;

$K$ ——惯性系数, $K=r \cdot \omega^2 \cdot m / (981 \cdot F)$ ;

$\omega$ ——曲轴角速度,rad/s;

$m$ ——每缸往复运动件质量,kg;

$\beta_{jk}$ ——第  $j$  缸在  $\varphi_{1k}$  时,连杆与气缸中心线夹角;

$\lambda$ ——曲柄半径与连杆长度之比。

对于工作间隔均匀的 3、4、6 缸机,在正常状况时,各缸的进气、压缩与排气过程可认为分别相近,则可推导得第  $j$  缸在膨胀冲程相对应位置与第 1 缸的气体压力差  $\Delta p_{jk}$  [2], 即

$$\Delta p_{jk} = p_{jk} - p_{1k} = \frac{\Delta T_{1k} - \Delta T_{jk}}{F \cdot r \cdot \sin(\varphi_{1k} + \beta_{1k})} \cdot \cos\beta_{jk} \quad (5)$$

式中: $p_{1k}$ ——第 1 缸在膨胀冲程  $\varphi_{1k}$  时气体压力,MPa;

$p_{jk}$ ——第  $j$  缸在膨胀冲程  $\varphi_{1k}$  时气体压力,MPa;

$\Delta T_{1k}$ ——对应图 1 中  $\varphi_{1k}$  时的剩余扭矩,N·m;

$\Delta T_{jk}$ ——对应图 1 中  $\varphi_{1k}$  时的剩余扭矩,N·m。

图 1 是 R4102 型直喷式柴油机在转速  $n=1500$  r/min 和平均有效压力  $p_e=0.775$  MPa 时的飞轮瞬时转速曲线,图 2 是按上述原理推求得的各缸与第 1 缸间的燃烧膨胀压力差  $\Delta p$ 。

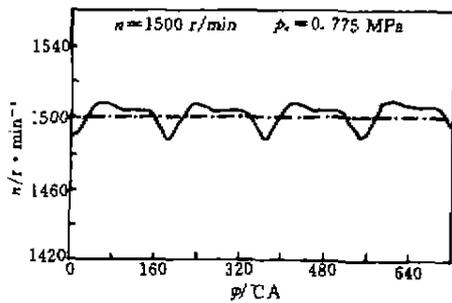


图 1 4缸四冲程柴油机的瞬时转速

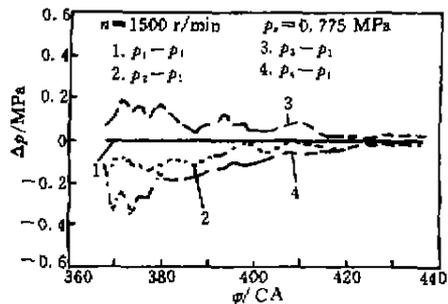


图 2 R4102 柴油机各缸与第 1 缸间的燃烧膨胀压力差  $\Delta p$

图 2 表明,在燃烧膨胀过程中各缸压力不相等,第 3 缸压力高于第 1 缸,表明该缸有较高的作功能力,第 2、4 缸压力低于第 1 缸,此两缸作功能力较差。

## 2 偏差分析

图 3~图 5 分别示出按各缸示功图计算得的压力差值(图中实线)与按飞轮瞬时转速推求得的压力差值(图中虚线)。它们表明在  $\varphi_k=(370\sim 440)$  CA 期间,两种方法得出的结果走向一致,它们间的偏差随  $\varphi_k$  的加大而减小。若以示功图计算得值为基准,飞轮瞬时转速法推求的偏差大多在  $\pm 0.1$  MPa 内。

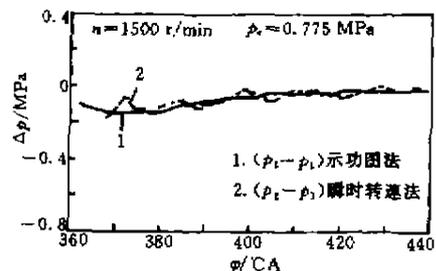


图 3 燃烧膨胀冲程中第 2 缸与第 1 缸的压力差

根据式(5)可推导得按此法求得的  $\Delta p_{jk}$  的标准偏差为

$$\sigma_{\Delta p_{jk}} = A \cdot \sqrt{\sigma_{\Delta T_{1k}}^2 + \sigma_{\Delta T_{2k}}^2} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{\Delta p_{jk}}$  ——  $\Delta p_{jk}$  的标准偏差;

$\sigma_{\Delta T_{1k}}$  ——  $\Delta T_{1k}$  的标准偏差;

$\sigma_{\Delta T_{2k}}$  ——  $\Delta T_{2k}$  的标准偏差;

$A$  —— 与  $\varphi_k$  有关的系数,  $A = \frac{\cos \beta_{1k}}{F \cdot r \sin(\varphi_k + \beta_{1k})}$ 。

式(6)表明,  $\sigma_{\Delta p_{jk}}$  与系数  $A$  有关。在  $\varphi_k = (360 \sim 440)$  CA 范围内,  $A$  值随  $\varphi_k$  增大而减小。若  $\sigma_{\Delta T_{jk}}$  与

$\sigma_{\Delta p_{jk}}$  在  $(360 \sim 440)$  CA 燃烧膨胀过程中任一曲轴转角下均相同, 则  $\sigma_{\Delta p_{jk}}$  随  $\varphi_k$  增大而减小, 在  $(360 \sim 370)$  CA 内有较大误差。

因此, 用飞轮瞬时转速法推求得的在  $(370 \sim 440)$  CA 燃烧膨胀期间的  $\sigma_{\Delta p_{jk}}$ , 可以作为燃烧故障简易诊断的依据。

图 6、图 7 分别示出了 R6102 型柴油机飞轮瞬时转速与各缸燃烧膨胀压力的差异。图 7 表明, 在该工况下, 各缸燃烧过程不均衡, 第 3、5 缸作功能力较高, 而第 2、4、6 缸作功能力较低。

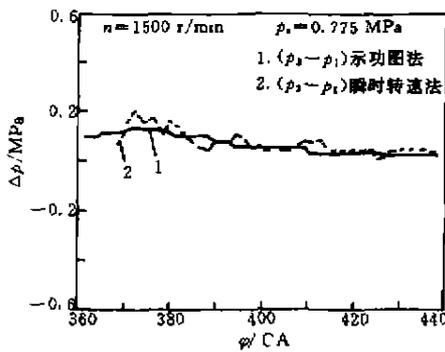


图 4 燃烧膨胀冲程中第 3 缸与第 1 缸的压力差

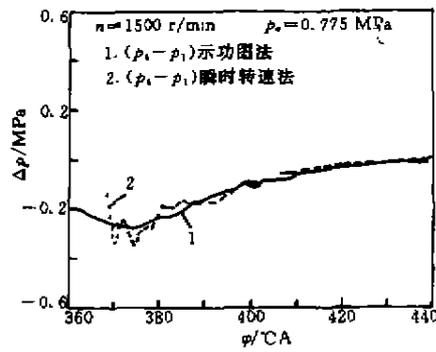


图 5 燃烧膨胀冲程中第 4 缸与第 1 缸的压力差

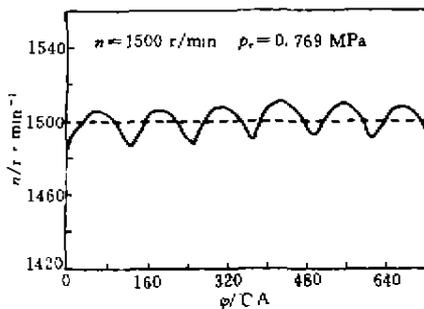


图 6 R6102 柴油机瞬时转速

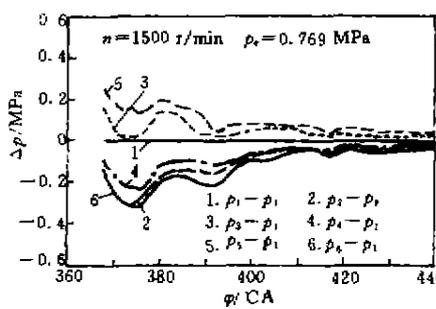


图 7 由图 6 瞬时转速推求的各缸与第 1 缸间燃烧压力差

### 3 结论

(1) 对于在用动力装置的多缸内燃机, 欲求其各缸间燃烧压力差异, 如果用示功器、压力传感器同时测录各缸示功图的方法是难以应用的, 而用飞轮瞬时转速法则可以推求燃烧膨胀过程中多缸机各缸间的气体压力差, 从而为燃烧故障诊断提供依据。

(2) 阶段研究表明, 刚性轴系的 R4102、R6102 工程机械用柴油机, 转速在 1500 r/min 时, 在压缩上

止点后  $(10 \sim 80)$  CA, 用飞轮瞬时转速法, 推求各缸燃烧压力差异, 尽管偏差不小, 可达  $\pm 0.1$  MPa, 但作为在用动力的一种简易在线快速诊断的方法, 仍不失有好的应用前景。

(3) 提高诊断精度的研究工作, 特别是对于车用高速、有轴系扭振的内燃机, 如何提高、处理瞬时转速测量精度等问题, 均有待于继续深入探讨。

感谢黄宜琼教授对研究工作的指导, 在此深表敬

意和缅怀。

### 参 考 文 献

- 1 Huang Yiliang, et al. An Investigation on Transient Rotational Speed of Internal Combustion Engine. SAE Paper 911821
- 2 张立梅等. 用飞轮瞬时转速诊断气缸压缩性. 内燃机学

报, 1996, 14(2): 161~165

- 3 Zhang Limei, et al. Diagnosis of the Working Unevenness of Each Cylinder by the Transient Crankshaft Speed. SAE Paper 960463

## Estimation of Combustion Pressure Distinction Between Cylinders Using Transient Speed of Flywheel

Cheng Yong Hu Yuping

(Power Dept., Shandong University of Technology)

Tang Xiangchen

(Jinan Computer Application Institute)

Wu Bo Zhang Limei

(Shandong University of Technology)

### Abstract

As to the engines on vehicles or tractors etc, it is hard to evaluate the combustion process of each cylinder according to the indicator diagram measured with the indicator simultaneously. In this paper, the authors propose a new method to estimate combustion pressure distinction between cylinders using transient speed of flywheel. The principle of this method and estimated results of R4102 and R6102 diesel engine are described, the estimated errors of the combustion pressure are within  $\pm 0.1$  MPa.

**Key words** Engine; Transient speed; Estimation; Combustion