

柴油机喷油压力波形的分析方法

吴 波 吴功平 杨叔子 马元镐

(华中理工大学)

摘 要: 本文提出了一种柴油机喷油压力波形的分析方法。分析过程包括两个方面:

基于波形形态特征的句法模式识别和基于数值特征的特征向量的参数匹配。

该方法注重简明和有效。文中给出了分析实例。

关键词: 压力波, 模式识别, 故障诊断, 分析方法

中国图书分类号: TK421·42

任一喷油压力波形都标示着柴油机喷油系统的一种工作状态。波形分析的目的就是要从压力波形中提取足够的状态信息, 判别系统的工作状态。波形的状态信息体现在波形特征中, 包括波形的形态特征和数值特征。前者是对波形形态的定性描述, 后者表征波形参数数值上的约束。本文在对压力波形的分析中, 同时采用波形形态特征和数值特征来描述波形, 力图形成一种简明有效的分析方法。

1 压力波形分析过程

正常状态下的一个典型的压力波及其结构描述示于图1(图1中 S_1 —上升段; S_2 —持续段; S_3 —下降段; S_4 —余波段)。

要进行波形分析, 必须首先解决模式描述问题。

我们可以用上下文无关文法 $G=(S, V_N, V_T, R)$ 来表示模式的形态结构特征。其中, 有穷集合 V_N 为非终结符集或中间模式元集; V_T 为终结符集; $S \in V_N$ 为初始符号, 或称初始模式, 即待识模式。

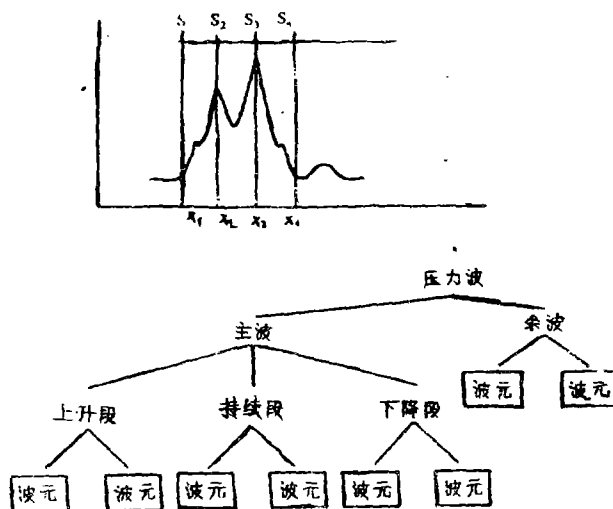


图1 压力波及结构描述

* 收稿日期: 1990.08.02

有穷集合 R 是具有形如

$$R_i: t_i \rightarrow V_i, \quad t_i \in V_N, \quad V_i \in V_N \cup V_T \quad (1)$$

的产生式集。

波形的数值特征我们可以用特征向量 $\alpha = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$ 来表示。其中 β_i 为波形第 i 个数值参数 S_i 的函数。

$$\beta_i = \begin{cases} 1, & (S_i - S_0) / S_0 > T_i \\ 0, & |(S_i - S_0) / S_0| \leq T_i \\ -1, & |(S_i - S_0) / S_0| < -T_i \end{cases} \quad (2)$$

这里 S_0 为参数 S_i 在正常状态下的值或给定值, T_i 为阈值。 β_i 的值分别表示 S_i 过高、正常和过低等三种状态。

对问题范围 Ω 内的每一个模式类 $L_i(G_i, \alpha_i)$ ($i=1, 2, \dots, r$) 都建立一个上下文无关文法 G_i 和相应的特征向量 α_i 。待识别模式 $S(V, \alpha)$ 由句法模式 V 及特征向量 α 组成。其中 V 反映波形的结构关系, 是用基本模式元组成的符号串。

在波形分析过程中, 首先我们用自上而下的剖析算法判别模式 S 在句法上的正确性, 即 S 的句法模式 V 是否可以由给定模式类 L_i 的文法 G_i 产生。如果 S 在句法上是正确的, 并且特征向量能与 L_i 匹配, 即 $\alpha = \alpha_i$, 则表明模式 S 属于给定模式类 L_i , 否则用给定问题范围 Ω 内的其他可能的模式类进行分析。这个过程就是波形分析过程。

句法分析是继基元的选取及识别之后进行的, 因此, 对于未知模式 S , 必须首先在句法指导下, 完成对波形片段和基元的识别。图2表示了整个波形分析过程。

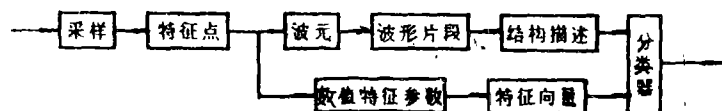


图2 波形分析过程

2 压力波形的特征抽取及描述方法

2.1 压力波形的结构描述

压力波形包含上升段、持续段、下降段和余波段四个波形片段, 分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 。

波形片段是对波形层次的划分, 每个波形片段可用一个四元组 (N, b, c, P) 来描述, 其中 N 是波形片段名, b 、 c 分别为其左右边界点的采样序号, P 是波形片段的语义描述, 它是由组成波形片段的基元的语义符号串组成。

在一个压力波周期中, 我们以上升段的起点作为波形描述的起点, 则四个波形片段分别为 (S_1, x_1, x_2, P_1) , (S_2, x_2, x_3, P_2) , (S_3, x_3, x_4, P_3) , (S_4, x_4, x'_1, P_4) 。其中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别为段分界点, x'_1 为下一周期的开始点。

根据压力波形的特点, 在不同的波形片段内我们分别选取不同的基元型式, 以更有效

地描述压力波的特征。

基元是对波形局部形状特征的描述,我们用四元组 (N, b, c, P) 来表示。其中 N 是基元的语义符号, b, c 分别为其左右边界点, P 是基元的语义向量, N 的取值由 P 的值决定。

考虑到峰谷点邻域内的抛物线特征对波形的描述没有太大的意义,同时也为了使问题简化,我们在基元的分析和识别中忽略这种抛物线特性,而认为在峰谷点邻域内分别为正斜率或负斜率直线段。

选取的基元有五种基本类型:直线基元 L 、波峰基元 P_1 、波谷 I 型基元 V_1 、波谷 II 型基元 V_2 和单峰点基元 P_0 。

在 S_1 中存在两类基元型式:直线基元 L 和波谷 I 型基元 V_1 , 其语义向量分别为 $P=(S, L)$ 和 $P=(h)$ 。其中, S, L, h 分别为直线基元的斜率、线段长度和波谷基元 V_1 的深度的函数。

S_1 中所有可能的基元见表 1, 其中基元 P 仅可能发生在启喷点处。

在 S_2 中仅存在一种基元类型。若其左右边界点重合, 即 $x_2=x_3$, 为单峰点基元 P_0 , 其语义向量 $P=(0)$ 。否则为波谷 II 型基元 V_2 。 V_2 由 S_2 中的波谷和相邻的波峰构成, 其语义向量 $P=(h_1, h_2, w)$ 。语义参量 h_1, h_2, w 分别为图 3 中基元参量 h_1^*, h_2^*, w^* 的函数。

S_2 中所有可能的基元见表 2。

S_3 中基元的选取及识别与 S_1 类似, 这里不再详述。表 3 列出了所有可能的 S_3 中的基元。

在 S_4 中存在两类基元:直线基元 L 和波峰基元 P_1 , 其语义向量分别为 $P=(S, L)$ 和 $P=(P_w)$ 。直线基元是水平线段, $S=0$, L 是线段长度的函数。 P_w 是波峰大小的量度, 它是波峰幅值和波峰基元宽度的函数。

表 4 列出了所有可能的 S_4 中的基元。

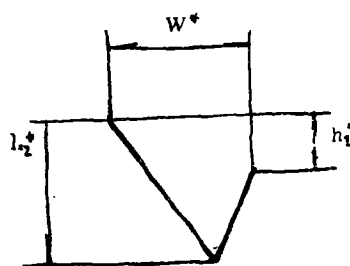


图 3

表 1 S_1 中基元

| 语义符号 | 语 义 | 语义向量 P |
|-------|-------------|----------|
| l_1 | 长, 大的正斜率 | $(1, 2)$ |
| m_1 | 中等长度, 大的正斜率 | $(1, 1)$ |
| s_1 | 短, 大的正斜率 | $(1, 0)$ |
| v_1 | 浅谷 | (0) |
| q_1 | 深谷 | (1) |
| p_1 | 短, 小的正斜率 | $(0, 0)$ |

表2 S_2 中基元

| 语义符号 | 语 义 | 语义向量 P |
|-------|-----|------------|
| a | 右高谷 | (-1, 0, 0) |
| b | 右高谷 | (-1, 0, 1) |
| c | 右高谷 | (-1, 1, 0) |
| d | 右高谷 | (-1, 1, 1) |
| e | 左高谷 | (1, 0, 0) |
| f | 左高谷 | (1, 0, 1) |
| g | 左高谷 | (1, 1, 0) |
| h | 左高谷 | (1, 1, 1) |
| i | 等高谷 | (0, 0, 0) |
| j | 等高谷 | (0, 0, 1) |
| k | 等高谷 | (0, 1, 0) |
| l | 等高谷 | (0, 1, 1) |
| P_0 | 单峰点 | (0) |

表3 S_3 中基元

| 语义符号 | 语 义 | 语义向量 P |
|-------|-------------|--------|
| l_3 | 长, 大的负斜率 | (1, 2) |
| m_3 | 中等长度, 大的负斜率 | (1, 1) |
| s_3 | 短, 大的负斜率 | (1, 0) |
| v_3 | 浅谷 | (0) |
| q_3 | 深谷 | (1) |

表4 S_4 中基元

| 语义符号 | 语 义 | 语义向量 P |
|-------|---------|--------|
| l_4 | 长水平线 | (0, 2) |
| m_4 | 中等长度水平线 | (0, 1) |
| s_4 | 短水平线 | (0, 0) |
| a_4 | 小峰 | (0) |
| b_4 | 大峰 | (1) |

在求出各基元的语义向量 P 后, 从表 1~4 中即可确定各基元的语义符号。

在波元识别过程中, S_2 中的波谷基元 V_2 和 S_4 中的波峰基元可能会出现波元语义非自然表达, 而导致分析失败。为此我们提出了主导峰(谷)的概念。在基元识别时, 仅考虑主导峰(谷), 而忽略从属峰(谷), 使我们对基元的表达更自然化。下面我们仅给出主导峰的定义, 主导谷与此完全类似。

对任意两个峰点 P_1 和 P_2 , 令 φ_{12} 为 P_1 、 P_2 间的峰点序列, ξ'_{12} 为 P_1 、 P_2 间的各点序列, V'_1 为 P_1 远离 P_2 的相邻谷点, ξ_{12} 为 (V'_1, ξ'_{12}) 组成的序列。

定义 1 如果这样构成的序列 φ_{12} 和 ξ_{12} 单调非减, 则 P_2 相对于 P_1 是主导峰, P_1 是 P_2 的从属峰。

定义1 没有考虑峰谷的绝对高度,也没有考虑波峰(谷)的宽度,因而可能会产生伪从属峰,为此,我们定义支配强度。

定义2 设 P 是峰群 P_1, P_2, \dots, P_k 的主导峰,支配强度 $Q(P_i)$ 为主导峰 P 对从属峰 P_i ($i=1, 2, \dots, k$) 的支配程度的量度。

$$Q(P_i) = \frac{S(P)}{S(P_i)} \quad (3)$$

其中 $S(P_i)$ 为波峰 P_i 大小的量度,它是 P_i 的峰值 y_i 和宽度 w_i 的函数。 $S(P)$ 是主导峰 P 的大小的量度。

$$S(P) = \sum_{i=1}^k S(P_i) \quad (4)$$

当 $Q(P_i) > 3$ 时,我们说主导峰强烈支配 P_i ,否则 P_i 属于另一峰群,是 P 的伪从属峰。

波形片段和基元识别后,我们得到待识别波形 S 的句法模式 V 。

2.2 波形的特征向量 α

根据压力波的特点,选取下列参数作为数值特征参量:

- ①最大压力 P_m ; ②残余压力 P_0 ; ③启喷压力 P_j ; ④余波段最高压力 P_r ;
⑤启喷角 φ_j ; ⑥喷油持续角 φ_r ; ⑦喷油量 Q

上述各特征参数值都可以从压力波形得到或近似得到,由式(2)即可得到波形的特征向量 α ($P_m^*, P_0^*, P_j^*, P_r^*, \varphi_j^*, \varphi_r^*, Q^*$)。

这样我们得到待识别波形的描述式 $S = (V, \alpha)$ 。

3 波形识别

本节我们以正常状态压力波为例,说明波形的识别过程。图4所示的波形作为输入的待识别波形。

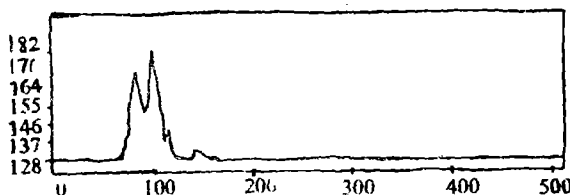


图4 输入波形

$L_n(G_n, \alpha)$ 是正常状态下的波形模式,上下文无关文法。

$$G_n = (S, V_n, V_T, R); \quad V_n = \{S, S_1, S_2, S_3, S_4\}$$

$$V_T = \{m_1, l_1, V_1, P_1, d, m_3, S_3, l_3, V_3, S_4, a_4, l_4\}$$

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_{11}\}$$

$$r_1: S \rightarrow S_1 S_2 S_3 S_4; \quad r_2: S_1 \rightarrow m_1 V_1 l_1$$

$$r_3: S_1 \rightarrow m_1 V_1 m_1; \quad r_4: S_1 \rightarrow m_1 P_1 l_1$$

$$r_5: S_1 \rightarrow m_1 P_1 m_1; \quad r_6: S_2 \rightarrow d$$

$$r_7: S_3 \rightarrow m_3 V_3 m_3 V_3 m_3; \quad r_8: S_3 \rightarrow l_3 V_3 m_3$$

$$r_9: S_3 \rightarrow m_3 V_3 S_3 V_3 m_3; \quad r_{10}: S_4 \rightarrow S_4 a_4 l_4$$

$$r_{11}: S_4 \rightarrow l_4$$

$$\text{特征向量 } \alpha_n = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$$

表5 输入波形波形片段描述

| N | b | c | P |
|-------|-----|-----|-----------------------|
| S_1 | 68 | 83 | $m_1 V_1 l_1$ |
| S_2 | 83 | 100 | d |
| S_3 | 100 | 118 | $m_3 V_3 S_3 V_3 m_3$ |
| S_4 | 118 | 123 | $S_4 a_4 l_4$ |

待识别波形由 $S=(V, \alpha)$ 描述。其中 V 和 α 分别为待识别波形的句法模式和特征向量, 由前述的波形描述方法从输入波形中得到。表5为输入波形波形片段的结构描述。则波形的句法模式

$$V = m_1 V_1 l_1 d m_3 V_3 S_3 V_3 m_3 S_4 a_4 l_4$$

其特征向量: $\alpha = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$

显然, 输入波形的句法模式 V 可以由 L_n 的文法 G_n 产生。自上而下的剖析过程如下:

$$S \xrightarrow{r_1} S_1 S_2 S_3 S_4 \xrightarrow{r_2} m_1 v_1 l_1 S_2 S_3 S_4 \xrightarrow{r_6} m_1 v_1 l_1 d S_3 S_4 \\ \xrightarrow{r_9} m_1 v_1 l_1 d m_3 v_3 s_3 v_3 m_3 S_4 \xrightarrow{r_{10}} m_1 v_1 l_1 d m_3 v_3 s_3 v_3 m_3 s_4 a_4 l_4 = V$$

并且 $\alpha = \alpha_n$ 。

可见输入的待识别波形 $S \in L_n$, 即为正常状态下的压力波形。

参 考 文 献

- (1) George Siockman, L.N.Kanal and M.C.Kyle. Structural Pattern Recognition of Carotid Pulse Waves Using a General Waveform Parsing Systems. Comm.ACM, 19, Dec.1979
- (2) P.V.Sankar and A.Rosenfeld. Hierarchical Representation of Waveforms. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol.PAMI-1, No.1, Jan, 1979
- (3) K.S.Fu. Syntactic Pattern Recognition Applications. Springer, Berlin Heidelberg, New York, 1977
- (4) 周冠雄. 计算机模式识别—结构方法. 华中理工大学出版社, 1987

Pattern Recognition of Oil Jet Pressure Waveform of Diesel Engine

Wu Bo Wu Gongping Yang Shuzi Ma Yuangao
(Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: An analysis method of oil jet pressure waveform of diesel engine is presented in this paper. The analysis procedure includes two aspects: Syntactic approach to pattern recognition based on the morph of waveform and feature vector marching based on the value of the waveform feature parameters. A waveform parsing example is given in the paper.

Keywords: pressure waves, waveform analysis, pattern recognition, fault diagnosis, analytical methods