

## 柴油机喷油压力波形的符号描述与结构模式分类\*

吴波 杨叔子\*\* 李白诚

(华中理工大学)

**摘要** 波峰和波谷是波形上基本的局部形态特征。基于波峰、波谷之间的支配关系,本文提出了一种规则波形的结构特征抽取与符号描述方法,进而建立了一个基于该方法的柴油机喷油压力波形结构模式分类系统,并通过实例验证了该系统的有效性。

**关键词** 结构模式识别,分类,波形分析,波形理解,特征抽取,符号描述,压力波形,柴油机

**分类号** TP391.4

柴油机燃油系统的状态信息主要体现在喷油压力波形中。喷油压力波形是一种规则信号,其状态信息直接反映在信号波形的结构形态上,因而可以采用结构模式识别方法直接对其理解和释义,即通过一定的方法,抽取波形的结构特征,并用符号表达,以此作为结构分类器的输入,实现信号模式分类,从而识别信号所反映的状态。本文据此建立了一个关于喷油压力波形的结构模式分类系统,该分类系统作为柴油机状态知识的获取工具和燃油系统状态识别与故障诊断的有效手段成为基于知识的柴油机故障诊断系统中的一个重要组成部分。

## 1 压力波形结构特征抽取与符号描述

## 1.1 基本定义

**定义1** 波形为平面点的有序集合  $W = \{(x_i, y_i) | x_i < x_{i+1}, i = 1, 2, \dots, N\}$ 。对于任一给定波形  $W$ , 其  $y_i$  的值都由  $x_i$  确定, 因此, 可以将波形简记为  $W[x_1, x_N]$ 。同理, 将波形  $W[x_1, x_N]$  在任一区间  $[x_i, x_j]$  的子波形简记为  $W[x_i, x_j]$ 。

**定义2** 峰点  $p_i$  为波形  $W[x_1, x_N]$  上的一点  $(x_i^f, y_i^f) \in W[x_1, x_N]$ , 且满足: 对于任意小的正数  $\delta$ , 若  $x \in [x_i^f - \delta, x_i^f + \delta]$ , 都有  $y \leq y_i^f$ 。

**定义3** 谷点  $v_i$  为波形  $W[x_1, x_N]$  上的一点  $(x_i^v, y_i^v) \in W[x_1, x_N]$ , 且满足: 对于任意小的正数  $\delta$ , 若  $x \in [x_i^v - \delta, x_i^v + \delta]$ , 都有  $y \geq y_i^v$ 。

\* 国家自然科学基金资助项目

\*\* 杨叔子是国防科技大学兼职教授, 中国科学院学部委员

\*\*\* 1991年8月15日收稿

**定义 4** 峰点序列为某一波形  $W[x_i, x_j]$  上所有峰点的有序集合, 记为  $P[x_i, x_j]$ , 且  $P[x_i, x_j] = \{(x_k^f, y_k^f) | x_i \leq x_1^f < x_2^f < \dots < x_k^f < \dots \leq x_j^f\}$

**定义 5** 谷点序列为某一波形  $W[x_i, x_j]$  上所有谷点的有序集合, 记为  $V[x_i, x_j]$ , 且  $V[x_i, x_j] = \{(x_k^v, y_k^v) | x_i \leq x_1^v < x_2^v < \dots < x_k^v < \dots \leq x_j^v\}$

## 1.2 主导峰与主导谷

波峰和波谷是波形上基本的局部形态特征, 也是波形结构描述中最常选用的基元形式。但是, 对于某些表现为自嵌套形式的波形, 如果只是简单地以波峰或波谷作为基元, 那么很可能出现波形语义的非自然描述, 使波形的主要特征混杂在次要因素中不能明显地表达, 从而使波形难以准确有效地理解和识别。为了避免波形的这种非自然描述, 更有效地抓住波形的主要结构特征, 我们给出了主导峰和主导谷的概念。

**定义 6** 设  $p_i = (x_i^f, y_i^f)$ ,  $p_j = (x_j^f, y_j^f)$ ,  $x_i^f \neq x_j^f$ , 且  $x_i^f < x_j^f$ , 为波形  $W[x_1, x_N]$  上任意两个峰点,  $\epsilon_{ij} = P[x_i^f, x_j^f]$  为从  $p_i$  到  $p_j$  的峰点序列, 它是  $W[x_1, x_N]$  的峰点序列  $P[x_1, x_N] = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  的子列。令  $\phi_{ij} = V[x_{i-1}^f, x_j^f]$  (若  $p_i = p_1$  使  $x_{i-1}^f = x_1$ ),  $\phi'_{ij} = V[x_i^f, x_{j+1}^f]$  (若  $p_j = p_n$  使  $x_{j+1}^f = x_N$ )。  $\phi_{ij}$  和  $\phi'_{ij}$  均是  $W[x_1, x_N]$  的谷点序列  $V[x_1, x_N]$  的子列。

(1) 如果  $\epsilon_{ij}$  和  $\phi_{ij}$  均单调非降, 则  $p_j$  相对于  $p_i$  是主导峰,  $p_i$  是  $p_j$  的从属峰。显然,  $p_k = (x_k^f, y_k^f)$  ( $k \neq j$ )  $\in P[x_i^f, x_j^f]$  都是  $p_j$  的从属峰。

(2) 如果  $\epsilon_{ij}$  和  $\phi'_{ij}$  均单调非增, 则  $p_i$  相对于  $p_j$  是主导峰,  $p_j$  是  $p_i$  的从属峰。显然,  $p_k = (x_k^f, y_k^f)$  ( $k \neq i$ )  $\in P[x_i^f, x_j^f]$  都是  $p_i$  的从属峰。

(3) 如果  $p_i$  除自身外, 不隶属于波形中其它任何波峰, 则  $p_i$  是一个主导峰点。

在这里, 我们并没有特别给出主导谷的定义, 事实上, 主导谷的概念已经包含在上述定义中, 利用上述定义识别主导峰点后, 主导谷点也就随之确定。

注意到上述定义是借助于波峰(谷)的相对高度来定义的, 没有考虑波峰(谷)所包含区域的相对大小, 因而可能会出现伪主导峰和伪从属峰。为了对此进行必要的修正, 我们定义支配强度和从属度两个概念。

**定义 7** 设  $p_d$  是波形  $W[x_b, x_c]$  的主导峰,  $x_b, x_c$  均为与  $p_d$  相邻的主导谷点,  $P[x_b, x_c] = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}\}$  是  $p_d$  的从属峰序列,  $p_d \in P[x_b, x_c]$ 。支配强度  $Q(p_i)$  为该主导峰对其从属峰  $p_i$  支配程度的量度

$$Q(p_i) = \frac{S(p_d)}{S(p_i)}, \quad i_1 \leq i \leq i_k, i \neq d$$

式中,  $S(p_i)$  为从属峰  $p_i$  的强度, 当  $i < d$  时, 为波形与  $x_b$  和  $p_i$  的右端点的连线所围成区域的面积; 当  $i > d$  时, 为波形与  $x_c$  和  $p_i$  的左端点所围成区域的面积。  $S(p_d)$  为该主导峰的强度, 为波形与  $x_b, x_c$  的连线所围成区域的面积。

当  $Q(p_i)$  大于阈值  $T_d$  时, 认为  $p_d$  强烈支配  $p_i$ , 否则, 认为  $p_i$  是  $p_d$  的伪从属峰, 此时, 波群  $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_i$  (当  $i < d$ ) 或  $p_i, p_{i+1}, \dots, p_{ik}$  (当  $i > d$ ) 从原波群中分裂出来, 形成独立的波群,  $p_i$  为该波群的主导峰。

对于伪主导峰, 考虑波形中两相邻的主导峰点  $p_i = (x_i^f, y_i^f)$  和  $p_j = (x_j^f, y_j^f)$ , 不失一般性, 设  $y_i^f < y_j^f$ 。  $v_{r1} = (x_{r1}^v, y_{r1}^v)$ 、  $v_{r2} = (x_{r2}^v, y_{r2}^v)$ 、  $v_{r3} = (x_{r3}^v, y_{r3}^v)$  为与  $p_i, p_j$  相邻的主导谷点, 且有  $x_{r1}^v < x_i^f < x_{r2}^v < x_j^f < x_{r3}^v$ 。从  $v_{r1}$  到  $v_{r3}$  所形成的子波形为  $w = W[x_{r1}^v, x_{r3}^v]$ 。

**定义 8** 从属度  $R(p_i, p_j)$  为  $p_i$  和  $p_j$  所代表的两相邻主导峰相关程度的量度

$$R(p_i, p_j) = \frac{S(w)}{S(v_{r2})}$$

这里,  $S(w)$  为波形与  $v_{r1}$ 、 $v_{r3}$  的连线所围成区域的面积。  $S(v_{r2})$  为波形与  $p_i$ 、 $p_j$  的连线所围成区域的面积。

如果  $R(p_i, p_j)$  大于阈值  $T_r$ , 则认为  $p_j$  从属于  $p_i$ , 是伪主导峰。这时, 将  $p_i$ 、 $p_j$  合并,  $p_i$  为合并后的峰群的主导峰。

### 1.3 压力波形符号化方法

压力波形的描述是通过对波形的分段符号化处理来实现的, 包括波形片段、波形基元的选取、识别和描述。图 1 为一个典型的柴油机喷油压力波形。

波形片段是对波形结构层次的划分。根据柴油机喷油过程及压力波形的结构特点, 压力波形可分为上升段、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  $S_4$ , 如图 1 所示,  $x_{s1}$ 、 $x_{s2}$ 、 $x_{s3}$ 、 $x_{s4}$  为段分界点。

波形基元是对波形局部形态特征的描述, 为了更有效地表达波形的这种局部形态, 根据波形的特点, 在不同的波形片段内分别选取不同的基元形式。表 1 给出了各波形

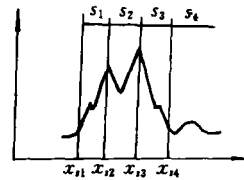


图 1 压力波形

片段内选取的基元及其符号表示。其中, 在  $S_1$  和  $S_3$  中作为波峰基元的分别是该段内递增和递减的波峰。  $S_1$ 、 $S_3$

表 1 压力波形基元

| 波形片段名 | 基元类型 | 语义符号  | 语 义             |
|-------|------|-------|-----------------|
| $S_1$ | 波峰   | $p$   | 波峰              |
|       | 直线   | $l_1$ | 长, 大的正斜率        |
| $S_2$ | 波谷   | $a$   | 主导谷, 且左端点高于右端点  |
|       | 波谷   | $b$   | 主导谷, 且左端点低于右端点  |
|       | 波谷   | $c$   | 主导谷, 且左、右端点高度接近 |
|       | 单峰点  | $p_0$ | 峰点              |
| $S_3$ | 波峰   | $p$   | 波峰              |
|       | 直线   | $l_3$ | 长, 大的负斜率        |
| $S_4$ | 波峰   | $d$   | 主导峰             |
|       | 直线   | $l_4$ | 长水平线            |

和  $S_4$  中的直线基元仅存在于该段内无波峰基元时。单峰点基元仅存在于当  $S_2$  段左、右边界点重合即  $x_{s2} = x_{s3}$  时, 此时  $S_2$  中不存在波谷基元。

波形片段和基元识别后, 我们得到各波形片段的语义描述, 波形  $W[x_1, x_N]$  的符号描述式可用下式表示

$$S = W[x_1, x_N] = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$$

式中,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  分别为各段内的基元的语义符号串。

## 2 压力波形结构模式分类系统

### 2.1 波形模式描述与模式库的建立

波形结构模式用上下文无关文法  $G=(S, V_N, V_T, R)$  表示。其中, 有穷集合  $V_N$  为非终结符集;  $V_T$  为终结符集, 其元素为模式中所有可能的基元符号,  $S \in V_N$  为初始符号, 即



待识别模式，有穷集合  $R$  是具有形如

$$r_i: \ell_i \rightarrow v_i, \ell_i \in V_N, v_i \in V_N \cup V_T$$

的产生式规则集。

在故障模拟试验的基础上，运用领域知识，对问题范围  $\Omega$  内的每一个模式类  $L_i$ ，都分别建立一个上下文无关文法  $G(i)$ ，作为一个标准模式对应柴油机燃油系统的一种工作状态（包括正常状态与各种故障状态）。标准波形模式的集合形式模式空间，构成波形模式库，作为基于知识的柴油机诊断系统中知识库的一部分。表 I 给出了模式库中对应燃油系统正常工作状态与出油阀卸压环失效这一故障状态的波形模式的描述文法。

表 2 波形的模式描述（机型 4-135G 800 转/分 小负荷）

| 模式类别   | $L_1$   | $L_2$  |
|--------|---|--|
| 状态     | 正常状态  | 出油阀卸压环失效   |
| 典型波形   |    |   |
| 模式描述文法 | $G(1) = (S, V_N, V_T, R)$<br>$V_N = \{S, S_1, S_2, S_3, S_4\}$<br>$V_T = \{p, b, l_3, l_4, d\}$<br>$R = \{r_1, r_2, \dots, r_7\}$<br>$r_1: S \rightarrow S_1 S_2 S_3 S_4$<br>$r_2: S_1 \rightarrow p$<br>$r_3: S_2 \rightarrow b$<br>$r_4: S_3 \rightarrow p$<br>$r_5: S_3 \rightarrow l_3$<br>$r_6: S_4 \rightarrow l_4$<br>$r_7: S_4 \rightarrow d$ | $G(2) = (S, V_N, V_T, R)$<br>$V_N = \{S, S_1, S_2, S_3, S_4\}$<br>$V_T = \{p, a, c, d\}$<br>$R = \{r_1, r_2, \dots, r_8\}$<br>$r_1: S \rightarrow S_1 S_2 S_3 S_4$<br>$r_2: S_1 \rightarrow p$<br>$r_3: S_2 \rightarrow a$<br>$r_4: S_2 \rightarrow c$<br>$r_5: S_3 \rightarrow p$<br>$r_6: S_3 \rightarrow S_3 p$<br>$r_7: S_4 \rightarrow d d d$<br>$r_8: S_4 \rightarrow S_4 d$ |

## 2.2 波形分类系统

图 2 为波形结构模式分类系统的组成框图。分类系统的输入是经过预处理的待识别波形，输出是待识别波形所属的模式类别。基于主导峰（谷）的符号化方法获取待识别波形的结构特征及其符号描述模式，作为结构分类器的输入。自上而下的剖析算法用来识别与输入模式最相匹配的模式类别。如果待识别波形的符号描述模式能由模式库中某一给定模式类  $L_i$  的文法  $G(i)$  产生，则表明待识别波形属于该模式类  $L_i$ ，否则，用模式库中其它可能的

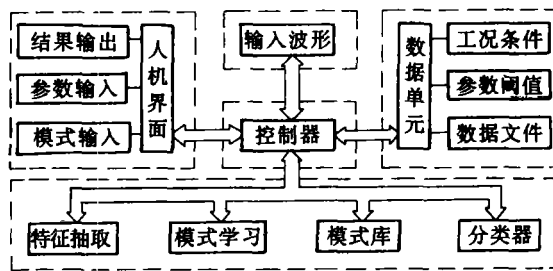


图 2 波形分类系统

模式最相匹配的模式类别。如果待识别波形的符号描述模式能由模式库中某一给定模式类  $L_i$  的文法  $G(i)$  产生，则表明待识别波形属于该模式类  $L_i$ ，否则，用模式库中其它可能的

模式类的文法进行分析。

### 2.3 实例

图3为4-135G柴油机实际运行时得到的喷油压力波形。由前述的波形符号化方法，我们得到该波形的符号描述式

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = p + c + pp + ddddd$$

将其作为分类器的输入模式。分类系统的输出为模式类  $L_2$ ，即此时柴油机处于出油阀卸压环失效的故障状态。这说明输入波形的符号描述模式  $S$  符合  $L_2$  的文法  $G(2)$ 。自上而下的剖析算法如下：

$$\begin{aligned} S &\xrightarrow{r_1} S_1 S_2 S_3 S_4 \xrightarrow{r_2} p S_2 S_3 S_4 \xrightarrow{r_4} p c S_3 S_4 \\ &\xrightarrow{r_6} p c S_3 p S_4 \xrightarrow{r_5} p c p p S_4 \xrightarrow{r_8} p c p p S_4 d \\ &\xrightarrow{r_8} p c p p S_4 d d \xrightarrow{r_8} p c p p S_4 d d d \xrightarrow{r_7} p c p p d d d d d \end{aligned}$$

检查结果发现柴油机出油阀卸压环带严重磨损，导致卸压容积失去作用。可见，分类系统的识别结果与实际情况相符。

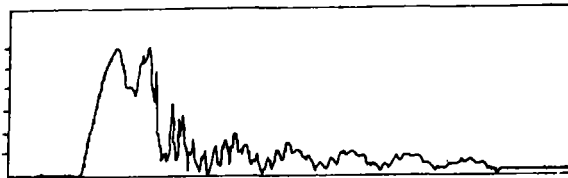


图3 实际的压力波形

### 3 结论

本文以柴油机喷油压力波形为对象研究了规则波形的结构特征提取、表达与结构模式分类问题。作为状态知识的一种获取方法，规则波形的结构模式分类在基于知识的诊断系统中起着重要作用。

基于波峰或波谷之间的支配关系的波形结构特征抽取与描述方法是一种有效的波形符号化处理方法。该方法一方面使波形特征的符号表达简单、自然、直观，符合人类专家的认知方式；另一方面又有效地表达了波形的主要特征。尽管这是针对喷油压力波形提出的，但这种描述思想同样适用于其它类似的规则波形。

### 参 考 文 献

- 1 Skordalaks E. Syntactic ECG processing A Review, Pattern Recognition, 1986, 19(4): 305~313
- 2 Ehrich R W, Forth J P. Representation of Random Waveform by Telational Tree: IEEE Trans. on Computer, 1976, C-25(7): 725~736
- 3 Sanker P V & Rosenfeld A Hierachical. Representation of Waveform. IEEE Trans on PAMI, 1979, (1): 73~80
- 4 Fu K S. Syntactic Pattern Recognition Application. New York: Springer, Berlin Heidelberg, 1977
- 5 Stochman G, Kanal L N & Kyle M C. Strutural Pattern Recognition of Carotid Pulse Waves Using a General Waveform Parsing Systems. Comm. ACM, 1976, 19(12)

(下转第 42 页)

# A Study on the Method of Resonant Sound Wave for Measuring Micro—Displacement

Wang Shiming Zhu Xinjian

(Department of Precision Machinery and Instrument)

## Abstract

There are many methods for measuring microdisplacement accurately, but they can not be satisfied in engineering. In this paper, the principle of the resonant method for measuring displacement has been discussed. An experimental method has been put forward. It is shown that this method is wide in measurement range, high in accuracy and strong in anti-disturbance capability.

**Key words** microdisplacement measuring, sound wave, resonant pipe

~~.....~~

(上接第 16 页)

# Symbolic Representation and Sural Pattern Parsing for Fuel Pressure Waveform of Diesel

Wu Bo Yang Shuzi Li Baicheng

(Huazhong University of Science and Technology)

## Abstract

An approach to feature extraction and symbolic representation of the fuel injection pressure waveform of diesel is proposed based on peak dominance relation between peak and trough in this paper. A waveform parsing system with application to structural pattern recognition of the pressure waveform based on the representation is described. The experiments have shown it is effective to the waveform recognition.

**Key words** feature extraction, structural pattern recognition, parsing, waveform analysis, waveform interpretation, symbolic representation, pressure waveform, diesel