

柴油机燃油系故障的模糊诊断

阎学文¹, 许 安¹, 李爱国², 康敬东¹

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 湖北交通职业技术学院 机电工程系, 湖北 武汉 430079)

摘 要:为了定量检测柴油机燃油系 3 个精密偶件的状态、实现柴油机不解体故障诊断,研制了嵌入式电阻应变压力传感器;采用常规测试仪器,利用正交试验方法,测得不同磨损程度精密偶件的组合在工作中的压力波形;通过对燃油系供油压力变化过程、影响因素以及实测压力波形的分析,选取用于故障诊断的显著性特征参数;根据燃油系故障特点及其与特征参数的关系,采用模糊综合评判法和模式识别法作为诊断模型,并依据试验结果求得模糊关系矩阵。结果表明,利用模糊数学模型对柴油机燃油系故障进行诊断是可行的。

关键词:机械工程;柴油机;燃油系;故障;诊断;压力传感器;特征参数;模糊综合评判

中图分类号:TK428

文献标识码:A

Fussy diagnosis on defaults of diesel's engine fuel system

YAN Xue-wen¹, XU An¹, LI Ai-guo², KANG Jing-dong¹

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Mechanic and Electronic

Engineering, Hubei Vocational and Technical Institute of Transportation, Wuhan 430079, Hubei, China)

Abstract: A flush-type conductor strain pressure sensor was developed to conduct quantitative monitoring over the running state of the three precision jointed parts in the fuel system so that a new fault diagnosis method can be found without disassembling the diesel engine. With normal test instruments, the different pressure waves were detected on the combination of different jointed parts with different degrees of wear during operation. The salient feature data most suitable for such diagnosis were selected through conducting an analysis on the relationship between the pressure variations inside the fuel system and the factors affecting the process and the data of field tests on these variations. Based on the relationship between the feature of the faults and the feature data, a fussy comprehensive judgment method and a fault mode recognition method were obtained as the model for such diagnosis. A fussy relation matrix was worked out according to the test results. Application results show that the method of using fussy mathematic model to diagnose diesel engine fuel system's defaults is feasible and practical. 3 figs, 7 refs.

Key words: mechanical engineering; diesel engine; fuel system; default; diagnosis; pressure sensor; feature data; fussy comprehensive judgment

0 引言

柴油机燃油系故障约占柴油机周期故障的70%,而这些故障基本都发生在3个精密偶件(柱塞副、出油阀副和针阀副)上。长期以来,对这3个偶件的检测主要是凭使用和维修人员的工作经验,利用解体检查做出判断。为了减少由于解体检查而造成的人力、物力和财力的浪费,利用现代技术进行燃油系不解体故障诊断是非常必要的^[1-7]。

针对目前燃油系故障诊断所存在的问题,本文主要研究的内容有:①研究适合现场使用的燃油系故障诊断所需的压力传感器;②探索燃油系精密偶件磨损对喷油压力波的某些特征参数的影响机理,进而确定喷油压力曲线上反映偶件磨损状态的特征参数;③确定瞬时转速等因素对压力波形上所选特征参数影响的修正方案,使修正后的特征参数与偶件磨损之间具有明显的规律;④根据特征参数与偶件状态之间的规律,选择适合这一规律的数学模型,研究所选模型在诊断应用中的优缺点。

1 测试方案

1.1 测试信号的选择

国内外很多资料表明,柱塞泵-闭式自动喷油器燃油系的喷油规律是直接由燃油压力波动确定的;而理论计算喷油规律,其准确程度取决于所建立的边界条件是否与实际状态一致。通过这些建立在系统结构和状态基础之上的边界条件来计算喷油规律,能全面反映系统结构和状态。系统结构一般在设计研究时已确定,而系统的状态主要由3个精密偶件的状态来决定。因此,任一偶件状态发生变化,一定会影响到压力波形的变化。由此得出结论:喷油压力变化曲线综合反映了燃油系统的工作性能和各偶件的实际状态。因此,把燃油压力作为燃油系故障诊断试验的测取信号。

1.2 压力传感器

通过对自行设计的3种传感器的对比试验,确定本次试验采用嵌入式电阻应变传感器。这种传感器性能较好,测试灵敏度高,测试信号的信噪比大,信号重现性好,可满足现场测试要求。

传感器标定到 2.94×10^7 Pa,其非线性1.16%,滞后0.36%,灵敏度0.730 6。

1.3 测试装置

试验在6120Q型柴油机上进行,压力传感器安装在第一缸喷油器端。测试设备的连接见图1。

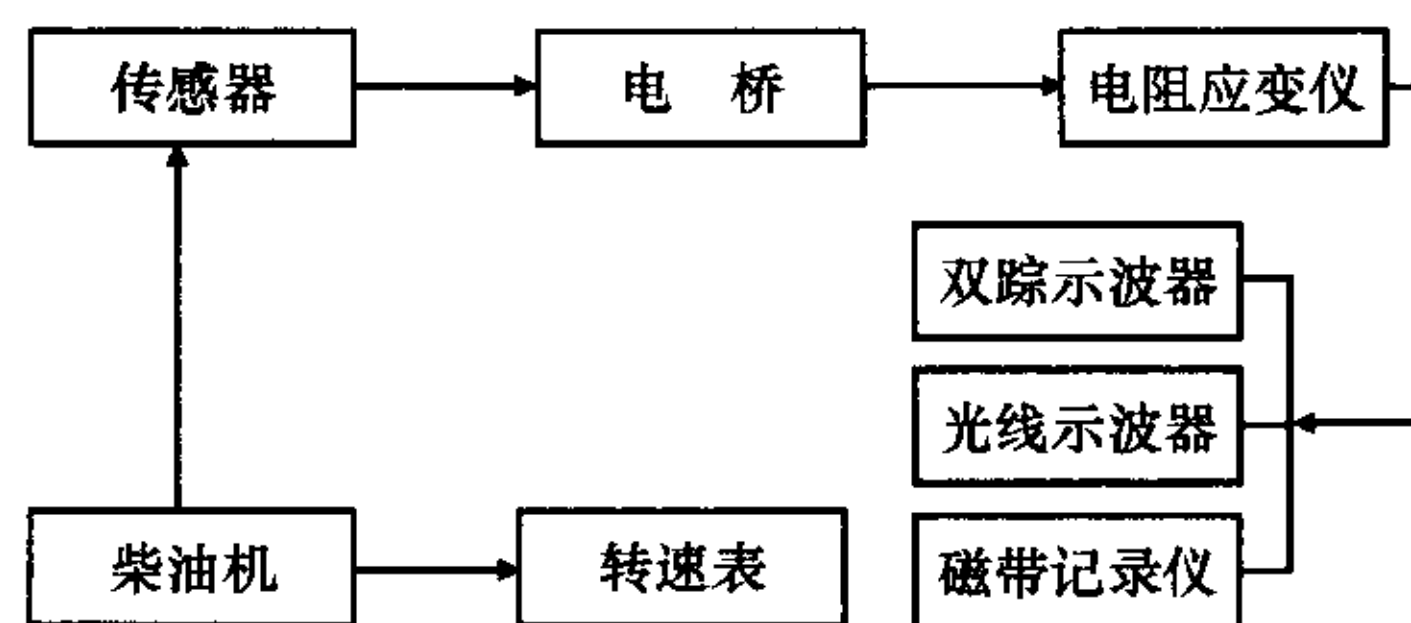


图1 测试设备连接框图

2 诊断参数

2.1 燃油压力波形分析

首先对转速在500 r/min测得的正常状态下的压力波形进行分析,见图2。

当柱塞上行到关闭进油孔时(图2中a点),随着柱塞的上行,柱塞顶油腔内的压力开始升高,当压力升高到大于高压油管残余压力和出油阀弹簧作用在出油阀上的压力之和时,出油阀开启(图2中b点)。高压油管腔内油压骤然上升,当此压力升高到克服喷油器调压弹簧力时,针阀开启,喷油器开始喷油。由于柱塞上升速度还在继续增加,供油量大于喷油量,压力又继续快速上升,因而出现了如图2中c点附近的压力波动。实际上,这种打开针阀出现的压力波动峰值,比克服调压弹簧力的压力值为大,因为还要克服针阀运动的摩擦力、惯性力。另外,惯性力是随加速度的增大而增大的,所以打开针阀的压力波动峰值还随转速的升高而升高。

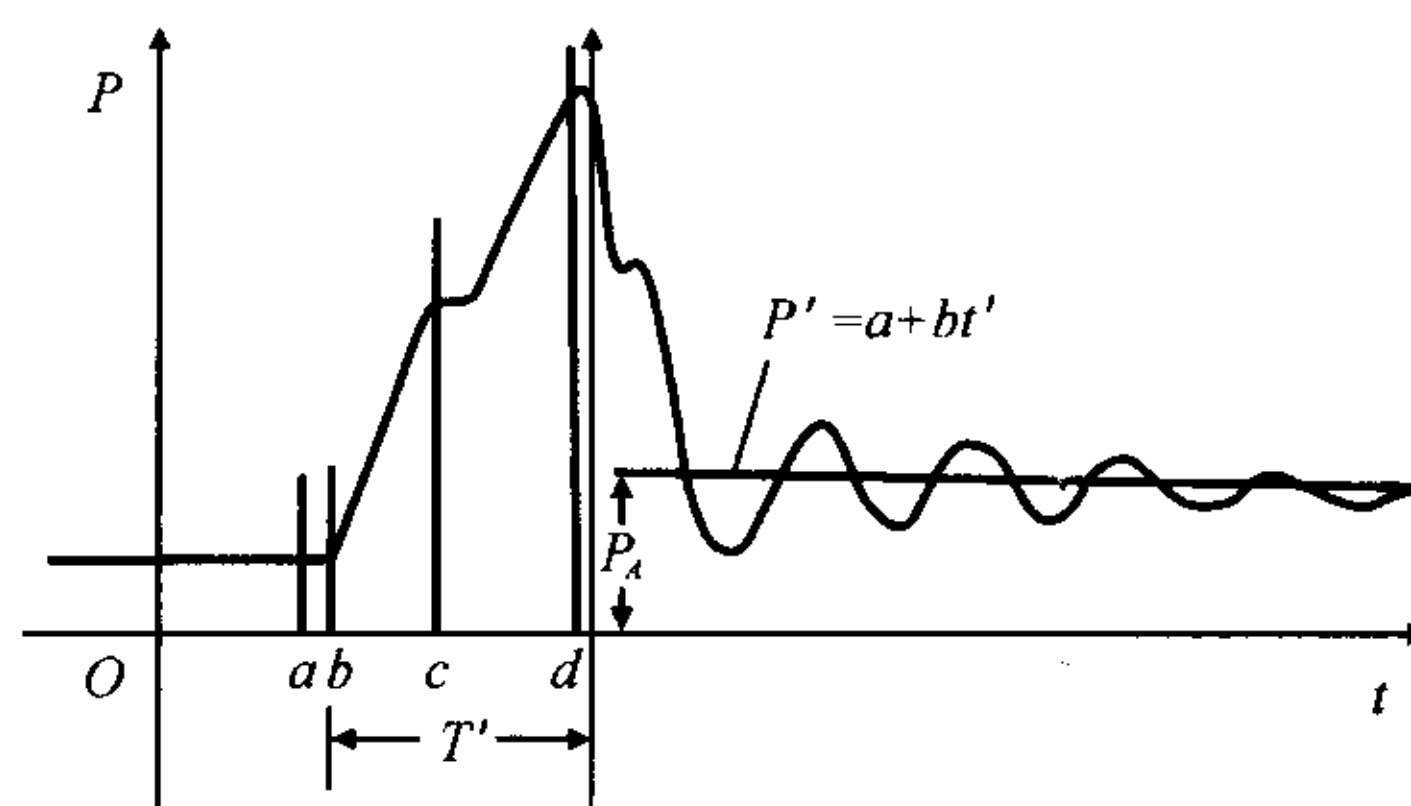


图2 喷油压力变化曲线

在图2中d点,回油孔开始打开,但由于开始时的开度很小,喷油泵的供油量较大,所以压力有所上升;随着回油孔开度的增大,曲线急剧下降,稍后针阀即关闭,最后出油阀关闭。由于燃油的高速流动迅速截止而引起震荡,此震荡逐渐衰减,压力趋于平稳,这时的压力就是油管残余压力。

从以上分析可见,燃油压力波形是各偶件的相对运动决定的,因此当偶件的状态改变时,压力波形必然发生变化。

分析表明:柱塞副磨损后,喷油压力波的变化为喷油时间 T' 延长、喷油压力上升趋缓、主喷射

曲线下的面积增加;对残余压力 P_A 的影响:当各缸柱塞磨损基本一致时,对二次压力波有轻微影响,当某缸柱塞较其他缸磨损明显严重时, P_A 将增加。出油阀副磨损后,不同程度地影响了燃油喷射时间、压力上升斜率、二次压力的波动、残余压力值和主喷射曲线下的面积。喷油器针阀副磨损后,对喷油时间 T' 、主喷射曲线下的面积、曲线上升斜率都有影响。

2.2 诊断特征参数的选择

选择诊断特征参数为:

(1)燃油压力开始上升到最大喷射压力所用的时间 T' (喷油时间);

(2)主喷射结束后,残余压力波的拟合直线 $P' = a + bt'$ 在主喷射曲线结束点的压力值 P_A (残余压力);

(3)反映曲线上升斜率和主喷射曲线波动大小的参数 S' ,即油压波动差值平方和 $S' = \sum_{i=1}^n (p_i - p_{i-1})^2$ 。

3 燃油系故障诊断理论及其应用

3.1 燃油系故障诊断理论的选择

目前由症状推断故障的常用方法主要有经验法、统计分析法、参数识别法、逻辑推理法和模糊诊断法等。燃油系是一个复杂的系统,在故障诊断中,很难得到一种在各种故障之间具有良好类间分离性的特征值。模糊诊断法正是研究和处理此类模糊性现象的一种科学的诊断方法。它的主要特点是与概率论互相渗透,能够处理和研究不具良好类间分离性的模糊性问题。

从本文试验的结果来看:各种故障引起喷油压力波特征参数的变化是明显的;故障的程度不同引起的特征值变化也不一样;同一故障会引起几个特征值发生不同程度的变化;而某些特征值的大小又是几种偶件故障的综合反映。因此各种征状与系统偶件故障之间的相互关系常常是不确定的。而偶件的故障主要是由磨损造成的,“磨损”一词从数量的角度来看本身就是一种模糊性的概念。因此,在燃油系故障诊断中引入模糊数学的方法是适宜的。

通过具体的分析、比较,本文采用模糊综合评判法和模式识别法作为诊断模型。

3.2 模糊综合评判法在燃油系故障诊断中的应用

针对燃油系,取故障论域

$$U = \{\text{柱塞故障 } u_1, \text{出油阀故障 } u_2, \text{喷油器故障 } u_3\}$$

在区域 U 中各元素隶属于“磨损”,对这一模糊概念的隶属度组成一相应的模糊向量

$$Y = \{u_{y_1}, u_{y_2}, u_{y_3}\}$$

取症状论域

$$V = \{\text{供油开始到最大压力的时间 } T', \text{残余压力 } P_A, \text{油压波动差值平方和 } S'\}$$

相似地, V 中各元素对“偏离正常值”这一模糊概念的隶属度组成一相应的模糊向量

$$X = \{v x_1(T'), v x_2(P_A), v x_3(S')\}$$

症状和故障之间存在一模糊关系,这一关系可表达为

$$Y = X \circ R$$

式中:“ \circ ”为广义模糊算子; R 为模糊关系矩阵。根据对本文试验及结果的具体分析,以及各种运算模型,选择加权平均型模型,即 $M(O, \oplus)$ 模型作为运算模型。

模糊向量 X 中各元素的隶属度均为 $[0, 1]$;根据试验结果及具体分析确定隶属函数

$$v x_1(T') = \begin{cases} T'/5.3 & 0 \leq T' \leq 5.3 \\ 1 & T' > 5.3 \end{cases}$$

$$v x_2(P_A) = \begin{cases} \frac{1}{0.43}(P_A - Z)^{1.08} & 0 \leq (P_A - Z)^{1.08} \leq 0.43 \\ 1 & (P_A - Z)^{1.08} > 0.43 \end{cases}$$

$$v x_3(S') = \begin{cases} 0 & (S' - Z_1) \geq 0.95 \\ 1 - \frac{(S' - Z_1)}{0.95} & 0 < (S' - Z_1) < 0.95 \\ 1 & 0 < (S' - Z_1) \leq 0 \end{cases}$$

式中: Z, Z_1 均为修正值

$$Z = \begin{cases} 0.0549(1 - (Q - 0.88)/0.29) & Q \leq 1.17 \\ 0 & Q > 1.17 \end{cases}$$

$$Z_1 = \begin{cases} 0.25525(1 - (Q - 0.88)/0.29) & Q > 1.17 \\ 0 & Q \leq 1.17 \end{cases}$$

式中: Q 为最大喷油压力。

根据试验中的故障向量和特征值向量,求得模糊关系矩阵为

$$R' = \begin{bmatrix} 5.68 & 0.69 & 6 \\ 3 & 5 & 4.9 \\ 6 & 6 & 4 \end{bmatrix}$$

诊断程序如图3所示。

3.3 模式识别法在燃油系故障诊断中的应用

把各种典型故障状态下测得喷油压力变化曲线上的特征值,计算成隶属度,组成模糊向量,存入计算机中;把待测故障状态的特征值组成的模糊向量,也输入到计算机中;经过模糊逻辑运算,得出待测的

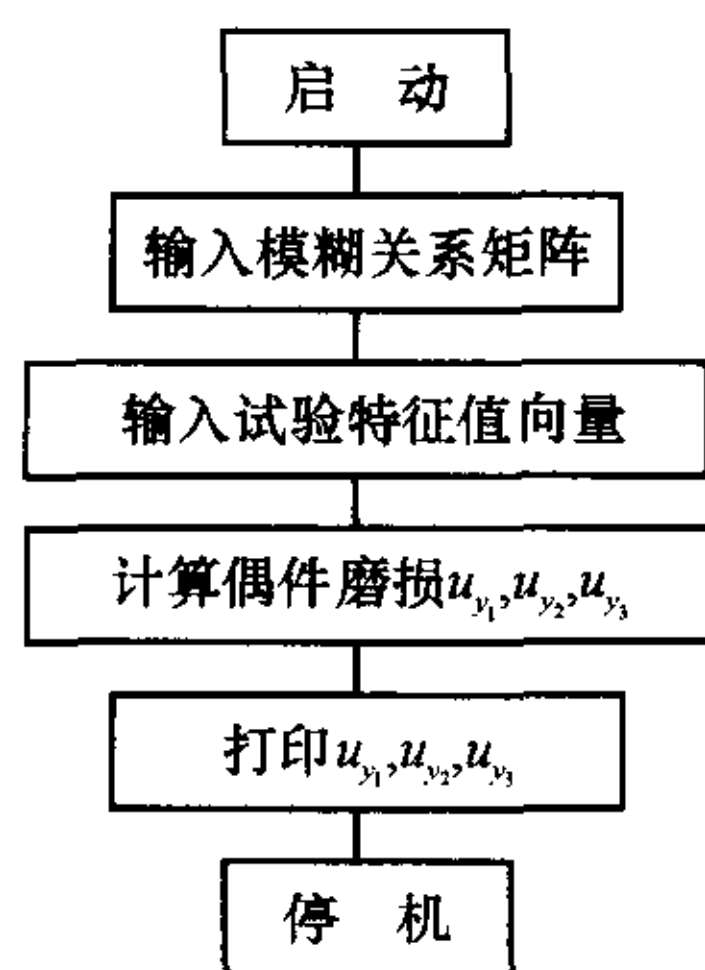


图3 诊断程序框图

模糊集与哪个典型故障的模糊集最“贴近”,就可断定它属于该种故障的状态。

因本文中有的偶件的状态改变对每一特征值几乎都有相应的影响;而有的偶件仅对某两个特征值影响较大。鉴于此种情况,选用欧几里德距离公式作为对燃油系进行模式识别

的数学模型。

4 结 语

(1)测录的燃油压力波形信噪比大,波形重现性好,表明本文研制的传感器性能稳定,测试灵敏度高,能满足现场测试要求。

(2)选择燃油压力开始上升至最大压力时间 T' 、喷油结束时残余压力 P_A 、油压波动差值平方和 S' 为对燃油系故障诊断的特征参数;并修正了主要因素对 3 个特征值的影响,使修正后的特征参数随偶件状态变化趋势明显,规律性较强。

(3)根据偶件磨损的模糊性和特征参数与偶件状态之间的相互关系的不确切性,在燃油系故障诊断中引入模糊数学的方法。选择了 $M(O, \oplus)$ 模型作为模糊综合评判的数学模型;再根据特征值组成的模糊向量与故障模糊向量之间的关系,用统计法计算出模糊关系矩阵;这种数学模型能够进行定量计算,从而为燃油系故障的定量诊断提供了一种科学的诊断理论。

(4)对燃油系故障进行模式识别的数学模型选择欧几里德距离公式,避免了由于系统非线性给诊断带来的误差;按此方法计算待测故障特征值组成的模糊向量,与事先测好的各典型故障状态下特征值组成的模糊向量的距离来确定故障类别,这是对燃油系故障进行有级定性诊断的一种简单而又实用的方法。

参考文献:

References:

[1] 乔新勇,康 葳,张小明. 柴油机喷油器启喷压力无损检测方法研究[J]. 内燃机工程,2004,25(6):75-77.

QIAO Xin-yong, KANG Wei, ZHANG Xiao-ming. Study of nondestructive measurement for fuel starting injection pressure in diesel engines[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(6): 75-77.

[2] 罗 阔,郭继崇. 柴油机燃油与调节过程故障诊断的试验研究[J]. 内燃机工程,2004,25(4):65-67.

LUO Kuo, GUO Ji-chong. Experimental research on failure diagnosis of fuel system in diesel engines[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(4): 65-67.

[3] 张小明,刘建敏,安 钢,等. 基于小波包变换的柴油机燃油喷射系统故障诊断[J]. 内燃机工程,2004,25(2):66-68.

ZHANG Xiao-ming, LIU Jian-min, AN Gang, et al. Fault diagnosis of diesel fuel injection system based on wavelet packet transform[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(2): 66-68.

[4] 张永祥,孙云岭,李 军,等. 柴油机瞬时转速测量中误差处理技术研究[J]. 内燃机工程,2005,26(6):66-68.

ZHANG Yong-xiang, SUN Yun-ling, LI Jun, et al. Research on transient rotating speed measurement errors process technology for diesel engines[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005, 26(6): 66-68.

[5] 司利增. 柴油机燃油系统构造及维修[M]. 北京:电子工业出版社,2004.

SI Li-zeng. Structure and maintenance of diesel engine fuel system[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004.

[6] 李战慧,李自光,肖 平. 基于模糊数学的智能压路机故障预测[J]. 筑路机械与施工机械化,2004,21(3):43-45.

LI Zhan-hui, LI Zi-guang, XIAO Ping. Based on fuzzy mathematics fault forecast of intelligent roller[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2004, 21(3): 43-45.

[7] 候媛彬. 基于粗糙集理论的运输机故障诊断与分类[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):104-107.

HOU Yuan-bin. Fault diagnosis and classification based on rough set theory to conveyance machine[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 104-107.