

# 机车柴油机燃油喷射及燃烧室系统 故障诊断方法的研究

周虹玮 陈泽深

盛宏至

(铁道部科学研究院)

(中国科学院力学所)

**提 要:** 本文以柴油机性能研究的理论为基础, 系统地分析了机车柴油机燃油喷射系统和燃烧室系统故障的主要形式及其主要故障的诊断问题。诊断方法的突出特点是直接通过对柴油机燃油喷射和燃烧过程的分析, 揭示导致其性能恶化的原因。由此而建立的高压油管压力波统计分析法和显著性检验的诊断方法, 缸内示功图(倒拖示功图和燃烧示功图)和放热规律分析的方法, 较好地解决了燃油喷射及燃烧室系统故障的诊断问题。此外, 通过长、短通道实测示功图的对比, 验证了用逆滤波加选频滤波方法(简称 IARF 法)消除长通道示功图测量误差的准确性, 为今后诊断工作的实用化提供了可靠的保证。

**关键词:** 柴油机 故障诊断 燃油喷射系统 燃烧室系统 油管压力波 显著性检验 示功图 放热规律

## 1 前 言

由于柴油机性能随其零部件结构状态的变化而变化, 因此, 若能根据柴油机性能的变化, 准确地判断相关零部件的工作状态, 并据此及时选择最佳的修理方式和合理的修程, 不但有利于其性能的恢复和使用寿命的延长, 而且有助于克服修理中的盲目性, 避免无功修理和过度修理, 提高工作效率和经济效益。为此, 深入开展柴油机故障诊断的研究是很有意义的。

柴油机性能的优劣, 是以其能量转换的结果为主要依据的。为保证柴油机设计性能的发挥, 除满足必要的进、排气要求外, 更重要的是要有效地控制喷油及合理的组织燃烧。燃油喷射系统作为柴油机精密的核心部件, 燃烧室系统作为柴油机能量转换的核心场所, 一方面两系统工作状态的变化, 将极大地影响柴油机的性能; 另一方面其故障在多数情况下难以直接判断。因此, 借助现代检测技术和数据处理技术, 诊断机车柴油机燃油喷射系统和燃烧室系统故障是非常重要的和完全必要的。

## 2 燃油喷射系统和燃烧室系统故障诊断方法的理论研究

### 2.1 柴油机性能故障特征与燃油喷射系统和燃烧室系统的故障形式

柴油机性能是衡量其热功能量转换程度的综合标志, 其性能故障主要是指柴油机原有性

本文收到日期: 1995 年 10 月 10 日

能的恶化或品质下降, 它是对柴油机所处工作状态的宏观描述。

柴油机在正常工作过程中, 要求燃油喷射系统根据柴油机工况, 在最佳时刻和预定的时间内, 定量地将燃油以一定的压力雾状喷入气缸, 以便与缸内空气充分混合, 迅速彻底地燃烧; 要求燃烧室系统具有一定的容积, 合理的形状及良好的密封性, 以保证燃烧室内工质的有效燃烧, 最大限度地实现能量转换。由于柴油机对燃油喷射系统和燃烧室系统的要求很高, 加之它们的工作环境又极为恶劣, 因此, 其故障情况也相对较多<sup>[1]</sup>。燃油喷射系统的故障按其形式, 可归纳为定时类、密封类、压力失常和零件损坏等几种类型; 而燃烧室系统的故障则主要是系统密封性能下降和压缩比失常等形式<sup>[2]</sup>。对应此类故障, 柴油机性能特征主要表现为: 排温高、油耗大、功率不足及爆压不正常等。

## 2.2 高压油管内压力波的波动特征

燃油系统在正常工作状态下, 伴随柴油机循环工作过程中间歇喷油过程的完成, 高压油管内的压力波呈现为有规律、稳定的波动过程。一旦这种有规律的压力波动过程发生变化, 即意味着燃油喷射系统工作状态的变化和零部件故障的产生。损坏部位及损坏程度的不同, 对应的油管压力波动规律的畸变程度也将有所不同, 如图1所示。

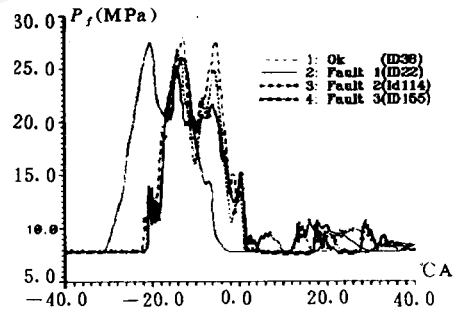


图1 几种不同故障状态下的油管压力波形

## 2.3 油管压力波形直接比较分析法

油管压力波形直接比较法, 是以波形中特征点的变化为诊断依据的。根据油管压力波直接测量的结果, 可得到供油始点、喷油始点、喷油持续期(角)以及最高喷油压力和残余压力等特征参数, 将其与同一工况标准状态的特征值相比较, 即可初步判断燃油喷射系统状态是否正常。但是, 由于动态参数测量中不可避免地存在有随机波动误差, 因此, 即使燃油喷射系统状态完全一致的情况下, 也难以保证油管压力波特征点的值完全相同, 从而使直接比较法的应用有一定的局限性。为此本文提出了油管压力波相关分析与统计分析的方法。

## 2.4 油管压力波相关分析与统计分析

### (1) 线性相关特征参数

将两油管压力波数据序列  $[X_{1i}]$  和  $[X_{2i}]$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 视为一长度为  $2N$  的新的数据序列  $[X_k]$  ( $k = 1, 2, \dots, 2N$ ), 其几何平均值和标准差分别为  $\bar{X}$  和  $s$ , 则可定义  $[X_{1i}]$  和  $[X_{2i}]$  的线性相关特征参数  $R_N$  为:

$$R_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_{1i} - \bar{X}}{s} \right) \left( \frac{X_{2i} - \bar{X}}{s} \right) \quad (1)$$

### (2) 典型相似性量度特征参数

对于给定的两油管压力波数据序列, 可定义:

$$R_S = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{1i} \cdot X_{2i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_{1i}^2 \cdot \sum_{i=1}^N X_{2i}^2}} \quad (2)$$

$R_S$  为两油管压力波典型相似性量度, 它相当于归一化的相关系数。

### (3) 压力波统计分析结果的显著性检验

将同一工况相同曲轴转角下的两油管压力波序列  $[X_{1i}]$  和  $[X_{2i}]$  所构成的差值数据序列  $[\Delta X_i]$ , 进行统计<sup>[3]</sup>, 并对统计结果按  $t$  检验规则<sup>[4]</sup> 检验。在显著检验水平  $\alpha$  下, 若式:

$$|\Delta X_{AV}| > \frac{\Delta S}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \quad (3)$$

成立, 即认为两组压力波所对应的燃油喷射系统的状态存在显著差异。

式中:  $n$ ——样本量;  $\Delta S$ ——标准差;  $\Delta \overline{X_{AV}}$ ——平均差;

$t_{\alpha}(n)$ —— $t$  分布的上  $100\alpha$  百分点。

## 2.5 示功图和放热规律的特征分析

从柴油机示功图中, 可直接得到爆发压力  $P_e$ 、压缩压力  $P_c$ 、平均指示压力  $P_i$  和着火相位(燃烧始点)等有效信息<sup>[5]</sup>。但仅依靠上述信息, 还不足以充分反映柴油机燃烧状态的变化。为更直观地反映柴油机燃烧过程的特征, 尚需对其燃烧放热规律进行分析。

直喷式机车柴油机在稳定工况下的放热率大都具有双峰值的特征<sup>[6]</sup>。这是由于其燃烧系多点同时着火的预混合燃烧, 燃烧反应速率很高; 加之反应又在接近上止点的准等容条件下进行, 所以很快出现一个放热率的峰值。该峰值的相位愈靠近上止点, 且其幅值愈大, 则愈趋近于理想的等容加热循环, 相应的动力性能、经济性能都可以提高。但是, 由于压升率及爆发压力随之增大, 易导致工作粗暴。进入主燃烧期后, 伴随着燃烧室内压力和温度的显著提高, 扩散燃烧反应速率很高, 因此, 放热率又出现一个峰值。该峰值的相位及幅值主要与喷油规律及可燃混合气的形成速度有关。为防止燃烧粗暴和尽量减少过后燃烧, 应合理地组织燃烧, 增大这一时期的放热量。运用示功图和放热规律分析诊断柴油机工作过程故障, 是以实际状态与正常状态计算结果的特征相比较而确定的。

## 2.6 示功图数据处理

实测示功图一般都含有误差, 必须对其进行必要的数据处理, 才可用于故障诊断分析。燃烧过程中, 着火源迅速膨胀所产生的压力波将在燃烧室内传递与反射, 而传感器所测得的压力只是它所在位置的局部压力, 常常记录下该点缸内的压力波动, 并不代表整个燃烧室的平均压力。但所有放热率计算模型都是以燃烧室内压力均匀的假设为前提的, 并且在计算中需要对气缸压力求导, 会放大微小的波动, 因此, 如果不进行适当的信号处理, 主要的规律和特征可能无法辨认。示功图数据处理的传统方法主要是“数据光滑”法, 该方法只适用于短通道或无通道测量的结果。若考虑到测压“通道效应”(特别是长通道)等因素的影响, 更为可靠的方法是“逆滤波加选频滤波法(简称 IARF 法)”<sup>[2,7]</sup>。

## 3 诊断实例分析

本文根据燃油喷射系统中喷油定时变化、启喷压力变化和针阀密封不良等故障形式, 以及燃烧室系统中活塞环和排气门漏气等故障形式的模拟试验结果<sup>[2]</sup>, 在合理选择诊断路径的前提下, 进行了相应的诊断分析。

### 3.1 宏观性能参数分析

根据柴油机功率、比油耗、排气温度、爆发压力、烟度等宏观热工参数及增压系统工作

状态,一般可以初步断定柴油机是否存在性能故障。但要进一步诊断故障是否属燃油喷射系统或燃烧室系统,并且要准确把握其故障程度,则油管压力波统计分析和气缸压力示功图及燃烧放热率分析是十分有效的手段。

由试验所得的柴油机正常状态与其故障状态下的宏观性能参数如表1、2所示。

表1 燃油喷射系统故障模拟试验结果

试验工况		$n = 1\ 200\text{rpm}$			$N_e = 17.664\text{kW}$
状态	编号	爆压 $\varphi_{max}$ (MPa/CA)	比油耗 (g/kWh)	排温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	故障说明 ( $P_f$ : MPa, $\varphi_f$ : $^{\circ}\text{CA}$ )
正常	ID38	5.477/188	285.32	265	$P_{fo} = 17.65$ , $\varphi_{fo} = -29$
故障1	ID22	5.810/185	308.02	267	$\varphi_{fo} = -35$
故障2	ID31	5.590/188	288.40	271	针阀密封面轻磨
故障3	ID114	5.805/186	295.23	275	$P_f = 15.69$
故障4	ID155	5.939/186	297.92	295	$P_f = 13.73$

表2 工质泄漏故障模拟试验结果

试验 工况	状态	编号	爆发压力 (MPa)	比油耗 (g/kWh)	排气温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	曲轴箱压差 (mm H <sub>2</sub> O)
1	正常	ID38	5.477	285.32	265	8
	泄漏1	ID71	5.137	299.44	292	8
	泄漏2	ID133	4.944	304.19	278	14
	最大相对差值%		9.73	6.55	10.19	75
2	正常	ID39	5.789	262.23	350	8
	泄漏1	ID72	5.503	268.63	380	8
	泄漏2	ID134	5.274	274.04	365	14
	最大相对差值%		8.90	4.50	8.57	75

备注 工况1:  $n = 1\ 200\text{rpm}$   $N_e = 17.7\text{kW}$ ; 工况2:  $n = 1\ 200\text{rpm}$   $N_e = 26.5\text{kW}$

### 3.2 燃油喷射系统故障诊断

#### (1) 两实测油管压力波的直接比较

图2~5分别为正常状态与表1中所对应的故障状态的油管压力波形对比图。图示表明同一工况、不同工作状态下的油管压力波特征值间有着不同程度的差异。值得说明的是,如果已知待检状态存在故障,则油管压力波形直接比较法,更宜于判断故障的类别。

#### (2) 实测油管压力波的统计分析和显著性检验

统计分析结果和在显著性检验水平  $\alpha = 0.01$  条件下的检验结果列于表3。统计分析结果表明,4种待检状态的燃油系统确实存在故障。

此外,由  $\Delta\bar{X}_{AV}$  与

$$\frac{\Delta S}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \quad (4)$$

的差距以及其它一些特征参数比较,可以发现它们各自的故障程度是不相同的。

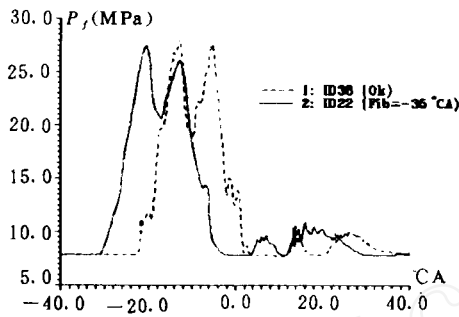


图 2 故障1 (ID22) 与正常状态的实测油管压力波

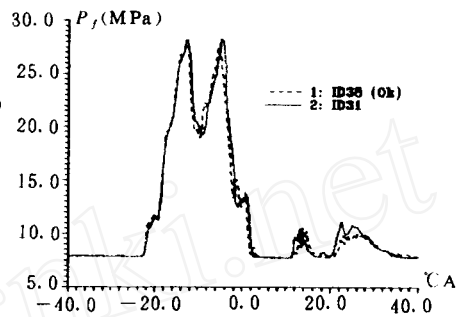


图 3 故障2 (ID31) 与正常状态的实测油管压力波

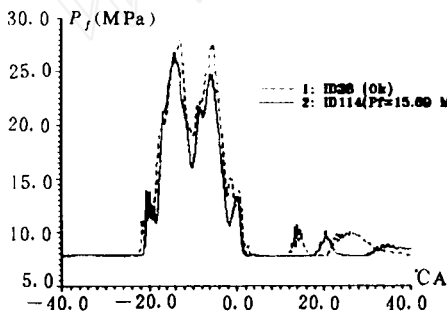


图 4 故障3 (ID114) 与正常状态的实测油管压力波

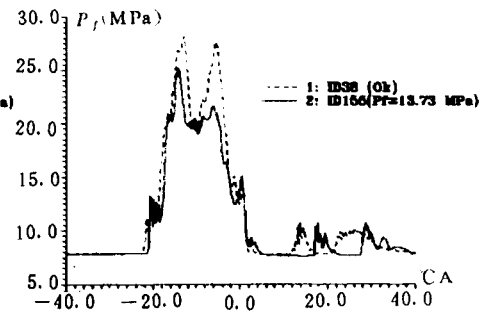


图 5 故障4 (ID155) 与正常状态的实测油管压力波

表 3 实测油管压力波统计分析结果

项 目	统计分析参数					显著性检验		
	名称	$\Delta \bar{X}_{AV}$	$\Delta S$	$A_w$	$R_N$	$R_S$	公式(4)	显著差异
ID38—22		0.158 8	0.267	0.399 9	0.884 3	0.930 9	0.107	有
ID38—31		0.024 8	0.051 6	0.057 3	0.979 8	0.999 1	0.020 7	有
ID38—114		0.092 7	0.147 1	0.173 9	0.794 2	0.991 7	0.059	有
ID38—155		0.121 8	0.185 5	0.221 9	0.669 9	0.981 4	0.074 4	有
工 况		$n = 1\ 200\ \text{rpm}$					样本容量 $n = 45$	
		$N_e = 17.664\ \text{kW} (24\ \text{PS})$					$t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) = 2.689\ 6$	

### 3.3 燃烧室系统故障诊断

#### (1) 倒拖示功图分析

图 6 为不同泄漏状态下同一转速倒拖示功图的对比结果。由倒拖示功图可见，泄漏越严重，压缩压力下降越明显，倒拖示功图对应的面积  $F = \int P d\varphi$  也越小。显然，此面积的减小系

工质泄漏造成, 因此, 可用压缩示功图面积的变化来衡量泄漏程度  $\xi_L$  的大小, 即可定义:

$$\xi_L = \frac{F_1}{F_0} \cdot 100\% \quad (5)$$

其中:  $F_1$ —— 泄漏状态下的倒拖示功图面积;  $F_0$ —— 正常状态下的倒拖示功图面积;

对应试验的几种泄漏故障的泄漏程度如表 4 所示。由表中结果可见, 活塞环完全损坏时的泄漏程度较为严重。

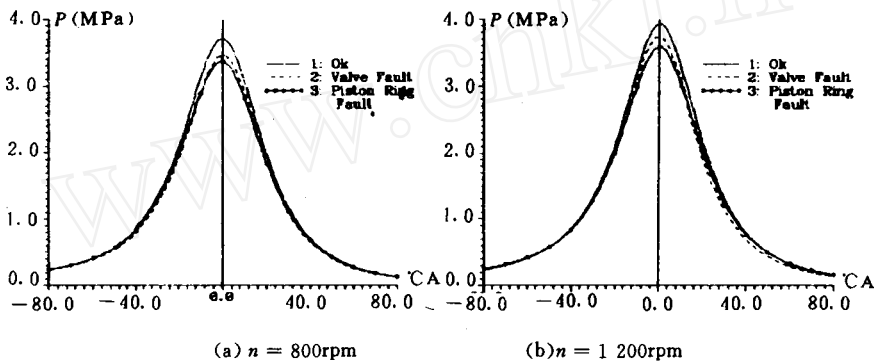


图 6 不同泄漏状态下倒拖示功图的变化

表 4 泄漏程度计算结果 [ $n=1200\text{rpm}$ ]

状态说明	$F_1$	$\xi_L$	试验编号
正常状态	2 271.51	1.0	YSID38
排气门漏气	2 194.28	0.966	YSID71
活塞环断裂	2 132.95	0.939	YSID133

## (2) 工作示功图和放热规律分析

缸内工质的泄漏, 不但造成压缩压力下降, 改变燃烧过程, 降低燃烧效率, 而且减少工质数量, 使柴油机输出功率减小。此外, 泄漏部位不同对柴油机的影响也不尽相同。

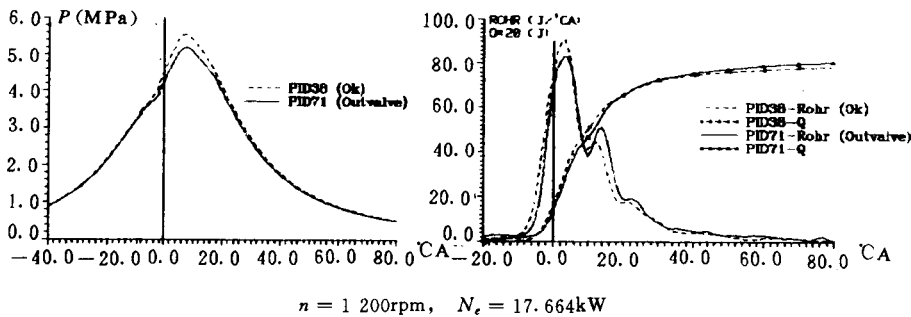


图 7 排气门泄漏与正常状态的实测示功图及放热率

值得说明的是, 燃烧室系统泄漏状态下燃烧放热率的计算, 应采用变质量分析模型<sup>[2]</sup>。图

7 和图 8 分别为不同泄漏状态下, 实测示功图和采用变质量模型计算所得的放热规律计算结果与正常状态间的比较。比较结果表明, 不同泄漏状态下, 爆发压力和燃烧放热率均有不同程度的变化。爆发压力和放热率第一峰的峰值随泄漏程度的增加而逐渐降低, 如图 9 所示。

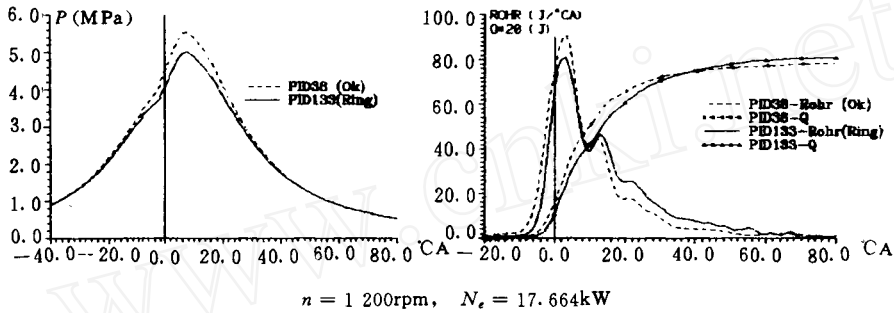


图 8 模拟活塞环断裂与正常状态的实测示功图及放热率

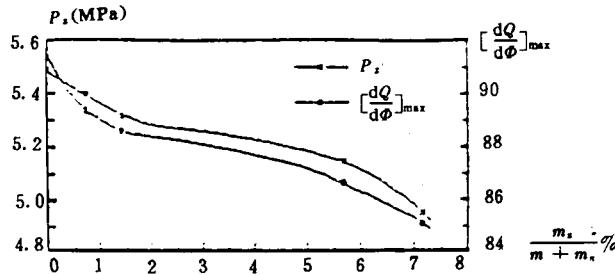


图 9 爆发压力和放热率第一峰值随燃烧室泄漏程度的变化

## 4 结 论

1. 利用实测油管压力波统计分析和显著性检验的方法, 可以准确判断燃油系统是否存在故障。在此基础上, 结合油管压力波特征值的变化及放热规律的分析研究, 不难确定故障的形式和程度。

2. 气缸压力示功图及燃烧放热率分析可以较准确地诊断燃烧室系统的工作状态。使用倒拖(压缩)示功图可确定燃烧室系统是否泄漏及压缩比是否正确, 但不能完全确定配气定时是否正确, 应用燃烧示功图作进一步的分析。

3. 要有效地利用示功图分析燃烧放热率, 首先应做到准确测量和修正示功图。考虑到机车柴油机由于测压通道较长, 实测示功图畸变极大, 为此, 建议采用“IARF”的数字信号处理方法, 对长通道造成的示功图畸变进行校正。该方法的实现, 为从机车柴油机各缸检爆阀处得到准确的爆发压力值、无畸变的示功图与满意的燃烧放热率图, 为柴油机性能故障诊断奠定了基础。

## 参 考 文 献

1 叶 岚. 东风<sub>4</sub>B 型内燃机车柴油机故障分析与处理. 中国铁道出版社, 1993.

- 2 周虹玮. 机车柴油机性能故障诊断的研究. 铁道部科学研究院博士学位论文, 1994, 3.
- 3 白新桂. 数据分析与试验优化设计. 清华大学出版社, 1986.
- 4 浙江大学数学系. 概率论与数理统计. 人民教育出版社, 1979.
- 5 S. D. Haddad. Principles and performance in diesel engineering. 1981.
- 6 魏道远. 内燃机燃烧与排放控制. 中国铁道出版社, 1992.
- 7 盛宏至. 内燃机缸内压力测量的误差分析数值仿真及数字信号处理的研究. 天津大学博士学位论文, 1986.

## Study of Fault Diagnosing for Fuel Injection and Combustion Systems on Locomotive Diesel Engines

Zhou Hongwei, Chen Zeshen

(China Academy of Railway Sciences)

Sheng Hongzhi

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

**Synopsis:** This thesis, based on the achievements of research on diesel engine performance, investigates into the major fault expressions of the fuel injection and combustion systems on locomotive diesel engines and diagnosis of the faults. The diagnosing methods developed here are distinguished for being capable directly revealing the causes of performance decline through of the analysis of fuel injection and combustion processes. The resulting methods of fault diagnosis through statistical analysis of the pressure wave of the fuel pipe-line with significance tests, and the analysis of motored and working indicator diagrams and the normal pattern of the rate of heat release give satisfactory results. In addition, comparisons are made between indicator programs obtained by cylinder pressure measurements both through a long passage and through the short passage between the explosion pressure valve and the combustion chamber domain. In this way the precision of using IARF method (Inverse And Rejection Filtering) to eliminate the distortion resulting from long passage measurements is verified. Thus the reliability involved in future application of the above methods is ensured.

**Key Words:** Diesel engine, Fault diagnosis, Fuel injection system, Combustion system, Fuel line pressure wave, Significance tests, Indicator program, Rate of heat release.