

文章编号:1671-6833(2003)04-0037-05

坦克发动机常见故障信号特征与诊断

郑世仿<sup>1</sup>, 韩 捷<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 71332 部队装备处,河南 浉池 472400; 2. 郑州大学机械工程学院,河南 郑州 450002)

**摘 要:** 坦克发动机故障目前维修模式落后,故障确诊困难.通过大量试验研究,得出了坦克发动机常见故障在缸体表面、缸盖系统等的振动机理及其信号特征,并研究了气门漏气、发动机拉缸、运转不平衡等常见故障的信号特征,选取了相关、频域、小波等信号分析方法,并以喷油过早、喷油不正常、后燃型、发动机缸体、高压油管振动信号的频域分析等实例证明了信号特征及其分析方法的适用性和有效性.

**关键词:** 发动机; 振动信号; 故障机理; 诊断技术; 小波分析

**中图分类号:** TP 227; TH 165 **文献标识码:** A

0 引言

故障诊断技术自 70 年代诞生以来受到工业界的广泛关注,逐步成为工业设备正常运行必须的技术保障<sup>[1,3]</sup>.但其在军备方面的应用,在我国处于空白.作为机械化装备代表的新型坦克,其自动化程度越来越高,技术保障要求也随之增高.发动机作为坦克的动力来源,其性能直接影响坦克的作战能力.坦克在野战条件下工作环境恶劣,维护保养更加困难.根据坦克实际运行状况对发动机进行状态监测和故障早期诊断,防止或减少事故显得尤为重要.而目前部队的军用设备仍采用计划维修和事后维修的落后管理模式.设备检修和维护仍采用眼看、耳听、手模等方式,仅凭维修人员的感觉和经验进行判别.这种方式下,判断结果受到维修人员主观经验等状况的影响,故障诊断准确性难以得到保证.

振动信号对故障的反应速度快,信息丰富,量值变化范围大,另外振动信号传递特性好,测试简单、方便.本文探讨的即为坦克发动机的振动机理、信号特征及其故障诊断技术.

1 96 式坦克发动机振动机理与故障分析

96 式坦克发动机型号为四冲程、水冷、废气涡轮增压直接喷射式高速柴油发动机,12 个气缸分两排呈“V”型 60°夹角排列,额定功率 537 kW<sup>[3]</sup>.

96 式坦克发动机主要振源分为四类:一是由

发动机运转中的不平衡惯性力或力矩引起的周期性振动,一般表现为有规律的低频谐振,振动频率随转速升高而升高;二是由相关联运动件之间存在间隙产生的机械撞击和爆燃压力引起的振动,一般表现为高频冲击振动;三是进排气气体流经气门时产生的振动;四是发动机由于制造、安装时的偏差等引起的随机振动.

若假设发动机为  $n$  自由度线性系统,由若干离散质量、弹簧组成,其振动方程为

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [Q] \quad (1)$$

式中  $[Q]$  为激振力矩阵  $[M]$  为质量矩阵  $[C]$  为阻尼矩阵  $[K]$  为刚度矩阵.

由于坦克结构复杂,振动源很多,用式(1)进行理论计算难度大,精度差.通过实地调研和实验分析研究发动机的振动比较简单有效.通过实验测得的响应比理论计算更接近于实际,因此分析结果也更加可靠.

1.1 缸体表面振动特征

缸体表面的振动包含着丰富信息,尽管影响缸体振动的振源很多,且多种振动混在一起,但在频域内,它们有各自的频率范围,表现出各自的频率特征.通过试验发现,气体爆发压力对缸体振动的影响主要集中在 500 Hz 以下和 3~6 kHz 的频段;活塞与缸套撞击产生的振动主要通过缸套和冷却水腔传至缸体,其振动频率一般为 1~2 kHz;飞轮等旋转件质量不平衡、齿轮啮合、曲轴扭振对缸体表面的振动仅限于低频段.

收稿日期:2003-06-10; 修订日期:2003-07-26

作者简介:郑世仿(1966-),男,山东省五莲县人,71332 部队军官,郑州大学硕士研究生,主要从事军备管理和指挥工作.

1.2 缸盖系统振动特征

发动机缸盖系统受到的作用力是多个频率特性各不相同的冲击载荷,情况比较复杂,但有实际影响的只有燃烧气体力和进气门关闭时的瞬态冲击、排气门关闭时的瞬态冲击及排气门开启时的气体冲击等激励源的激励力,试验测试信号如图 1 所示.

在时域内,缸盖表面振动信号的波形与激振力(如燃烧始点、气门落座参数)的作用时间和强度密切相关,一旦发动机出现故障,相应的激励信号在作用时间和能量强度等方面会发生改变,据此可以获取特征参数进行故障诊断.对于多缸机,邻缸的激励力不容忽视,此时时间信息显得尤为重要.这是发动机缸盖振动信号的基本特性.

在频域内,对一个工作循环的缸盖振动信号进行功率谱分析,可以发现谱峰处于三个区域,即 1.5kHz 以内的低频部分,2.5~5kHz 的中频部分和 6~10kHz 的高频部分,而且中高频部分的能量远大于低频部分.将振动信号分段后进行区间功率谱分析,进气门和排气门关闭产生的振动响应能量都集中在 7.5kHz 以上的高频区域;燃爆压力产生的振动响应则包括低中高三个区域,但最高频率不超过 7.5kHz.当发动机出现故障时,

相应频带内的能量或谱峰值对应的频带范围将发生改变,从而可以提供诊断特征.

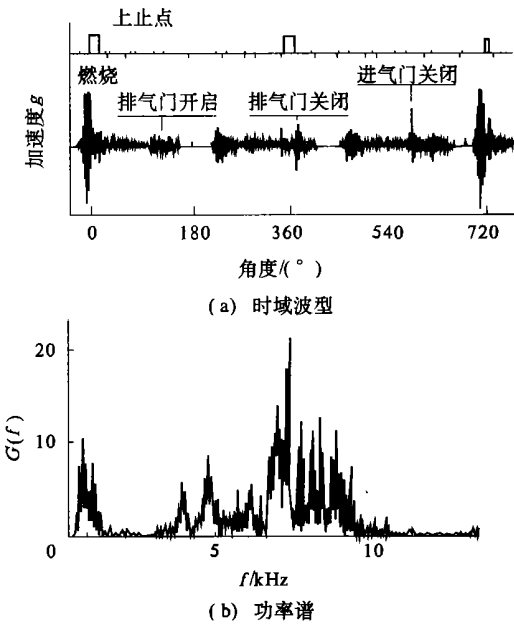


图 1 气缸盖振动响应时域波形及其功率谱  
Fig. 1 Time domain signal and power spectrum of vibration from cylinder cap

1.3 常见故障的故障机理和信号特征

96 式坦克常见故障机理及信号特征见表 1.

表 1 96 式坦克发动机常见故障机理及振动信号特征  
Tab. 1 Mechanisms and signal characteristics of common faults of 96 tank engine

常见故障	故障机理	振动信号特征						
		峰值	平均幅值	峭度	脉冲指标	相关系数	振动功率	模极大值
气门漏气故障	压缩压力低,起动时困难;气门与座有异常造成间隙;气门弹簧折断;气门与座、导杆、气门锁盘破裂等	大	大	大	大	增大	增大	大
气门间隙异常	间隙过大,气门落座时冲击增大,噪声增加,气门晚开早关;间隙过小,气门早开晚关,严重时关闭不严	大	大	大	好	增大	增大	增大
拉缸	润滑失常;发动机温度过高;缸内不清洁;机油中含杂质、柴油或水;活塞环划伤增大	增大	增大	增大	增大	高频增大	增大	
功率不足	加负荷后转速降低;气门漏气或配气定时调整不当;空气滤清器堵塞;磨损过度	增大	增大	增大	增大	增大	增大	增大
喷油器与喷油泵异常	①喷孔堵塞;②针阀磨损;③喷油器弹簧折断;④柱塞偶件磨损;⑤出油阀卸载圆柱带磨损	喷油器振动总功率会增大.高压油管自相关系数较大,在②,③,④,⑤时喷油压力降低,振动减弱,幅值减小,峭度下降,总功率减小,模极大值小;在①时则相反						

运转不均衡 喷油时间不准或喷油质量不好造成间歇爆发;机器安装不平稳;漏气严重;气缸积水  
剧烈振动,有明显噪声,幅值、峭度增加,振动总功率增大

表 2 是不同故障状态下的高压油管振动信号总功率值. 由表中可以看出, 在启喷压力降低、喷油器弹簧折断和针阀发生磨损的情况下, 振动总功率减小, 说明在此状态下高压油管振动减弱. 而

在喷油孔发生堵塞和针阀下卡死时, 振动总功率增大, 说明此时高压油管振动加剧. 可以利用所求得的振动信号的总功率与不同故障状态下的振动信号总功率值相比较, 从而判断不同的故障.

表 2 不同故障状态下的高压油管振动信号总功率值

Tab .2 Total power of signal from high pressure oil pipe of different faults

$10^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-4}$

正常喷射	启喷压力降低 18.5MPa	针阀磨损	喷孔堵塞 4 个	喷油器弹簧折断	针阀下卡死
1.557 9	1.191 6	0.848	1.712 0	0.307 9	70.348

## 2 坦克振动信号分析方法研究

### 2.1 自相关分析

自相关函数  $R_x(\tau)$  是描述信号  $x(t)$  在一个时刻的取值与另一个时刻的取值之间的依赖关系, 反映波形与自己相差一个时间  $\tau$  值时的相似程度. 不同状态下的振动信号其自相关性是不同的, 这是利用自相关函数进行故障诊断的依据. 本文采用数值分析方法计算各工况下振动信号的自相关函数, 然后计算其自相关系数  $\rho_x(n)$ . 理论上, 信号序列幅值比较平缓、波动较小, 其自相关性较大, 表现为自相关函数图的幅值较大. 实际中, 机械设备正常运转时, 其自相关函数值相对较小, 机械设备发生故障时, 其自相关函数出现峰值.

### 2.2 频域分析

频域分析相当于“透视机”, 是机械故障诊断中用得最为广泛的信号处理方法之一. 工程上所测得的信号一般为时域信号, 然而由于故障的发生、发展往往引起信号频率结构的变化, 频域分析的目的是把复杂的时间历程波形, 经傅立叶变换分解为若干单一的谐波分量来研究, 以获得信号的频率结构以及各谐波幅值和相位信息. 上述的坦克常见故障特征中, 频谱也是主要的特征.

自功率谱密度函数是在频域中对信号能量或功率分布情况的描述, 它可由自相关函数的傅里叶变换求得, 也可以直接用 FFT 分析求得.

振动信号自功率谱密度函数曲线下的面积就表示了振动信号的总功率. 对于离散的振动信号序列, 可用下式计算总功率:

$$P = \sum_{n=0}^{N-1} G(f_n) \Delta f \quad (2)$$

式中:  $G(f_n)$  为自功率谱密度函数;  $\Delta f$  为频率分辨率;  $N$  为自功率谱的长度.

### 2.3 幅域分析

上述的坦克常见故障特征中, 信号的峰值、均值、峭度等变化明显. 因此坦克的故障诊断需要在

信号幅值上进行的各种处理. 有量纲幅域诊断参数的值常因负载、转速等条件的变化而改变, 实际中很难加以区分. 改善的办法是引入量纲为一的幅域参数, 它们对信号的幅值和频率的变化不敏感, 即和机器工作条件关系不大, 而对故障足够敏感.

振动信号的幅域特征参数计算简单, 比较直观, 可以选取对故障比较敏感的特征参数作为振动检测和故障诊断的依据.

### 2.4 小波分析

小波分析(wavelet analysis) 是一种信号的时频分析方法<sup>[4]</sup>, 被誉为“显微镜”, 它具有多分辨率分析的特点, 在时域和频域同时具有良好的局部化性质, 可以对信号聚焦到任意细节, 并对突变信号有着很强的识别能力, 能够从振动信号中提取微弱特征信号进行故障诊断. 小波分析在故障诊断中的应用前景非常广阔<sup>[5,9]</sup>.

传统的信噪分离相当于信号通过一个低通或带通滤波器. 采用多分辨率分析和小波包分析的方法, 则相当于同时采用多个滤波器, 一并得到不同频段的信息, 并同时保留了信息的时间特性.

在故障诊断领域中, 故障的发生引起信号峰值的突变点称为奇异点. 信号奇异性大小用 Lip 指数衡量, 它反映了故障的程度.

小波变换和信号奇异性有下述关系. 通常采用的小波为紧支集小波, 即存在  $k > 0, |x| > k, \psi(x) = 0$ . 设  $x_0$  为奇异点, 则  $f(x)$  的小波变换为

$$W(s, x) = \frac{1}{S} \int_{x_0 - sk}^{x_0 + sk} -f(x) \psi\left(\frac{x-t}{S}\right) dt \quad (3)$$

对固定的尺度, 有  $s = s_0$ , 若在  $x$  的某一邻域内有:  $|W(s_0, x)| \leq |W(s_0, x_0)|$ , 则  $(s_0, x_0)$  为小波变换的模极大值点.

## 3 坦克故障诊断实例

### 3.1 正常燃烧型

当气缸工作正常时, 气缸内由燃料燃烧产生的压力与气体的压缩压力迭加为 1 个波峰, 表现

在振动上就是一次激振,产生一个较大的峰值,如图 2 所示.

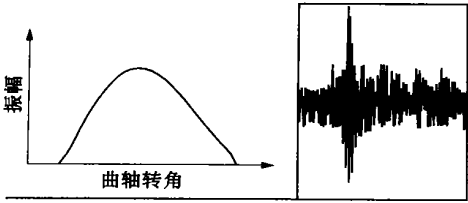


图 2 正常燃烧型振动示意图及波型  
Fig .2 Signal and wave pattern of normal explosion

3.2 喷油过早——陡峭型

如图 3 所示信号,陡峭型压力升高相当剧烈,这应是喷油时间过早,活塞还在向上止点移动时,柴油便燃烧起来,因此导致压力增长过快.实际通过检查喷油角度,发现提前了 19°,验证了喷油时间过早与陡峭型振动信号的对应性.

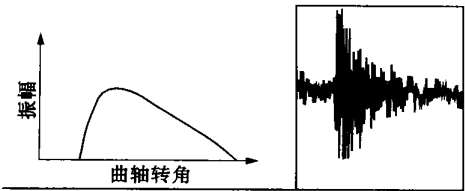


图 3 陡峭型振动示意图及波型

Fig .3 Signal and wave pattern of steep fronted vibration

3.3 喷油不正常——双波峰型

如图 4 所示信号,由于喷油器出现故障造成的,如喷油器的针阀卡在出油位置或出油阀因磨损严重而失去作用,不能正常开启和关闭,造成喷油嘴处滴油,引起第二次燃烧甚至第三次燃烧,导致压力多次剧烈升高.实际检查该缸喷油器,发现喷嘴处较湿,说明雾化不良.

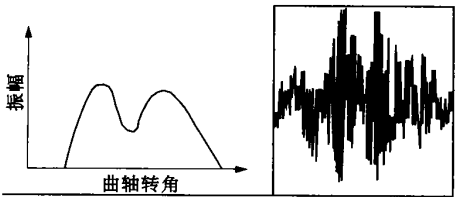


图 4 双波峰型振动示意图及波型

Fig .4 Signal and wave pattern of double humped vibration

3.4 后燃型

如图 5 所示,信号,波型较宽,具有连续较大的振动.主要原因是喷油滞后引起许多柴油不能在上止点附近燃烧完,导致混合气后燃严重,能量

浪费比较大,它的结果是造成排气温度升高.实际通过测量分析排气温度发现该缸的排气温度高于其它各缸的排气温度.验证了喷油滞后与振动信号的对应性.

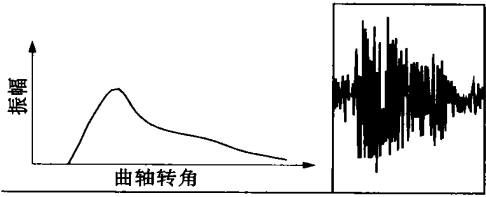
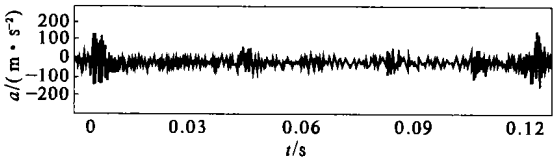


图 5 后燃型振动示意图及波型

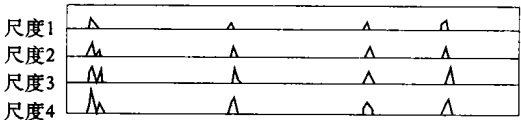
Fig .5 Signal and wave pattern of after combustion vibration

3.5 利用小波分析缸盖振动奇异信号

图 6 是发动机冲击响应信号及其模极大值在各尺度上的分布,其 4 次冲击形成 4 个主要的奇异点,对它进行奇异性分析,清晰反映了冲击信号的位置和大小.统计此信号的奇异性指数,其大小即为诊断的依据.



(a) 发动机冲击相应信号



(b) 发动机冲击相应模极大值

图 6 发动机冲击响应信号及其模极大值分布

Fig .6 Impulse response and mode maximum distribution

3.6 发动机缸体振动信号频域分析

在发动机振动信号处理方面,一般是取其一个工作循环的振动消耗进行频谱分析.图 7 为 96 式坦克发动机工作 209h 和工作 550h 缸体振动信号的功率谱图.从图中可以看出,发动机在正常状态下的振动总功率,主要集中在低频带高频成分,大多由工作循环爆发冲程的第一次冲击产生.过度磨损状态下发动机振动总功率值增大,振动信号的能量主要集中在高频部分,虽然大部分高频成分也由工作循环爆发冲程的第一次冲击产生,但其他部分也产生了一些高频成分,这是正常状态下与过度磨损状态下的一个比较典型的区别.

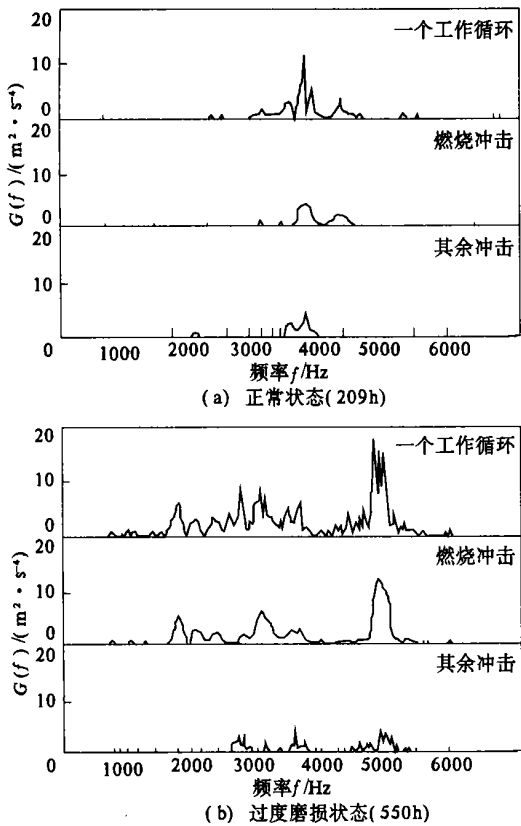


图 7 发动机缸体振动信号功率谱

Fig.7 Power spectrum of the signal from cylinder body

## 4 结论

通过以上分析,可以得出如下结论:96 式坦克

发动机的主要故障可以在发动机振动响应信号中反映出来.通过定量时域识别和波形分析可以有效诊断发动机非正常燃烧及配气相位不正常等故障.不同故障状态下振动信号的总功率以及各频段处的振动能量各不相同,依此可以判断不同的故障.它说明把先进的设备诊断技术应用到 96 坦克发动机的故障诊断中,可以有效的提高故障诊断的准确率,改变部队现有的故障诊断模式,进一步提高我军装甲兵部队的战斗力,对我军装备现代化有着积极的影响.

## 参考文献:

- [1] 韩捷,张瑞林.旋转机械故障机理及诊断技术[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 关惠玲,韩捷.设备故障诊断专家系统原理及实践[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [3] 杨威,黄健.96 式坦克结构与维修[M].解放军出版社,2000.
- [4] 何正嘉.我国小波技术的应用现状与进展[J].振动工程学报,2000,13(增刊):16~32.
- [5] 黄秀珍,韩捷,关惠玲.变速非平稳信号的变尺度预处理方法[J].振动工程学报,2000,13(增刊):63~66.
- [6] ARGOU F. Wavelet analysis of turbulence reveals the multifractal nature of Richardson cascade[J]. Nature, 1989, 338(6210):51~53.

## Signal Characteristic and Diagnosis of Common Faults of Tank Engines

ZHENG Shi-fang<sup>1</sup>, HAN Jie<sup>2</sup>

(1.Equipment Department, 71332 Troop of PLA, Manchi 472400, China; 2.College of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** To improve the maintenance of tank engine, vibration mechanism and signal characteristic of common faults such as valve leakage, scuffing of cylinder bore and unbalance of the engine surface and engine cap are studied through some experiments in this paper. Such methods as correlation analysis, frequency domain analysis and wavelet analysis are chosen and the applicability and validity are proved through examples.

**Key words:** engine; vibration signal; fault mechanism; fault diagnosis; wavelet analysis