

# 起动电流在发动机气密性检测中的应用\*

程利军, 张英堂, 李志宁, 任国全, 郑海起

(军械工程学院一系 石家庄, 050003)

**摘要** 针对传统的发动机气密性检测需要拆卸发动机的缺点, 提出了一种基于起动电流的不解体实车在线检测方法。在对发动机不供油起动阶段各缸工作行程、起动阻力矩、瞬时转速、电压和电流的变化规律及相互关系进行了理论建模后, 通过柴油机智能检测节点同步采集的实测信号验证了理论模型的正确性。针对 F3L912 型柴油机提取工作相位难的问题, 采用压缩上止点指数来定位压缩行程上止点, 进而实现故障缸的定位, 并引入了归一化的气缸密闭性参数来判断气缸密闭一致性。在对正常、轻微漏气及严重漏气 3 种工况下提取的参数进行分析后, 证实了提取的参数能够有效区分这些工况。本研究方法在实车在线不解体的情况下实现了发动机气密性故障的定性、定缸和定量判断。

**关键词** 柴油机; 故障诊断; 起动电流; 起动电机; 气缸密封性; DSP

**中图分类号** TK421.42; TH165+.3

## 引言

气缸密封性与气缸、气缸盖、气缸衬垫、活塞、活塞环和进排气门等零件的技术状况有关<sup>[1-2]</sup>。这些零件组合起来构成了发动机的“心脏”。由于某些零件的磨损、烧蚀、结胶、积碳、断裂和开裂等原因, 会引起气缸密封性下降, 进而影响发动机的动力性、燃油经济性、排放净化性及使用寿命<sup>[3-4]</sup>。传统的发动机气密性检测需要逐个拆开喷油器或火花塞后安装压力传感器来测试, 不仅费时费力, 而且容易由于操作不当而造成误差<sup>[5-6]</sup>。笔者在研究了发动机起动过程中的电流特性后, 利用 DSP 系统、外卡式电流传感器及光电传感器, 研制了基于发动机起动电流特性的在线检测装置, 在任何地点都可对发动机气缸密闭一致性进行检测并对漏气缸的漏气程度做出初步诊断, 及时发现轻微故障, 避免重大事故的发生。

## 1 柴油机智能检测节点硬件结构

柴油机智能检测节点结构及各传感器位置如图 1 所示。光电式传感器对准与曲轴同轴的带轮最上端, 带轮上在第 1 缸上止点处粘有反光纸带; 电流传感器套在蓄电池搭铁线上, 传感器箭头指向蓄电池负极; 电压衰减器接在起动电机的正负极; 磁电式

转速传感器安装在柴油机飞轮上方。

本研究中磁电式转速传感器是在理论分析阶段使用, 在实际应用中可不接。各传感器信号通过抗混叠低通滤波器后接到 ADC 的模拟输入端。DSP 处理后的诊断结果可直接通过 CAN 总线传出。试验

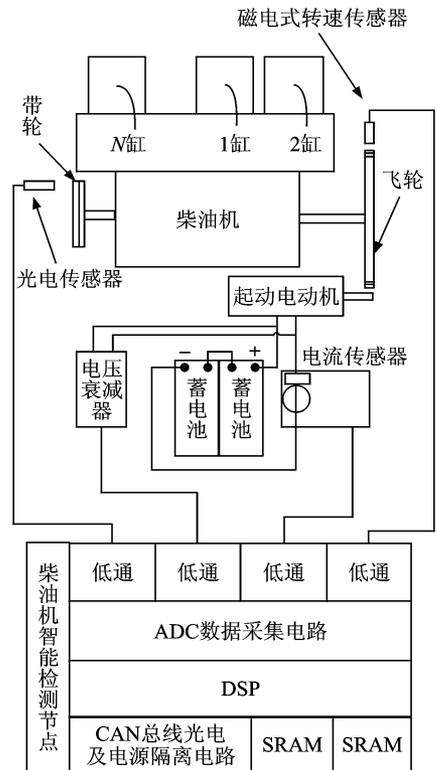


图 1 柴油机智能检测节点硬件结构及连接图

\* 河北省自然科学基金资助项目(编号: E20007001048)  
收稿日期: 2011-02-08; 修改稿收到日期: 2011-04-06

机型为 F3L912 型三缸四冲程柴油机,发火顺序为 1,2,3。采样频率统一设为 60 kHz,在只测电流、电压及光电传感器的情况下统一设为 20 kHz 即可。漏气故障设置在第 3 缸,通过将排气门间隙调节为负值模拟漏气故障。

## 2 起动阶段电流变化理论分析

发动机起动阶段,起动机产生的转矩  $M$  和起动电流  $I_s$  之间的关系为

$$M = C_m \Phi I_s \quad (1)$$

其中: $M$  为起动力矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ ); $C_m$  为电机常数,与电机结构有关; $\Phi$  为磁通量 ( $\text{Wb}$ ); $I_s$  为起动电流。

在电机内部,电枢在磁场(通常由励磁电流产生)中旋转,电枢绕组切割磁场的磁力线,从而在绕组中感应出反电动势  $E_s$ , $E_s$  与电动机转速  $n$  的关系为

$$E_s = C_e \Phi n \quad (2)$$

其中: $C_e$  为与电动机结构有关的常数。

起动机电枢端电压  $U$ 、电枢内阻  $R_s$  及电枢电流  $I_s$  之间的关系为

$$I_s = (U - E_s) / R_s \quad (3)$$

式(3)又称为电动机的电压平衡方程式。由于反电动势  $E_s$  与电源电压方向相反,而电枢内阻  $R_s$  又很小,通常在  $0.02 \Omega$  左右,所以反电动势的大小对电枢电流  $I_s$  的影响很大。只要反电动势  $E_s$  有较小的变化,就会引起电枢电流  $I_s$  较大的变化。

发动机不供油起动过程各缸工作行程及各信号理论变化关系如图 2 所示,图中带数字 1,2,3 的向上箭头分别为 1,2,3 缸上止点,向下箭头为相应缸的下止点。

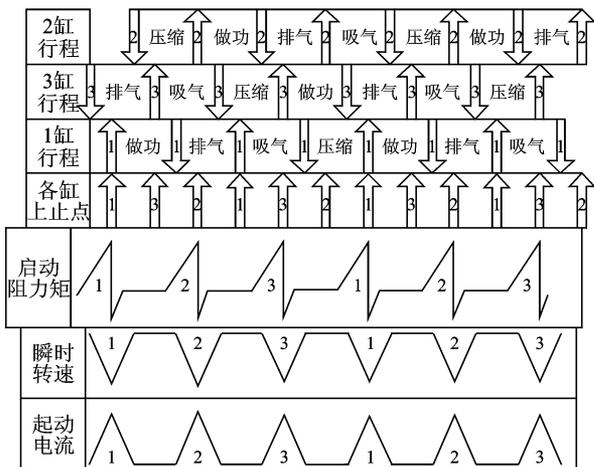


图 2 F3L912 柴油机不供油起动各信号关系理论示意图

发动机起动过程中的起动阻力矩  $M_s$  由机械阻力矩、惯性阻力矩和气缸压缩空气的反力矩组成。正常情况下,前两种阻力矩变化不大,可视为常数。压缩空气反力矩具有周期波动性,在每个缸的压缩行程上止点时具有峰值,且与气缸密闭性有直接的关系。

当发动机不供油起动时,在各缸气密性良好的工况下,瞬时转速信号将在各缸压缩行程上止点处形成最小值,而起动电流将在各缸压缩行程上止点处形成峰值。当某缸气密性不好时,瞬时转速信号和起动电流信号在相应故障缸压缩行程上止点形成的最小值和峰值将不明显,甚至消失。

## 3 实际起动各信号分析

图 3~图 5 分别为正常、第 3 缸轻微漏气及严重漏气工况下采集的各传感器信号。图中黑色上三角标出的 1 缸上止点光电信号为 1 缸压缩行程末端的上止点。

观察图 3~图 5 可以看出,各信号的实测波形基本与理论分析的变化趋势一致。图 4 中当 3 缸轻微漏气时,3 缸对应的瞬时转速最小值变大,对应的起动电流峰值变小。图 5 中 3 缸严重漏气时,其对应

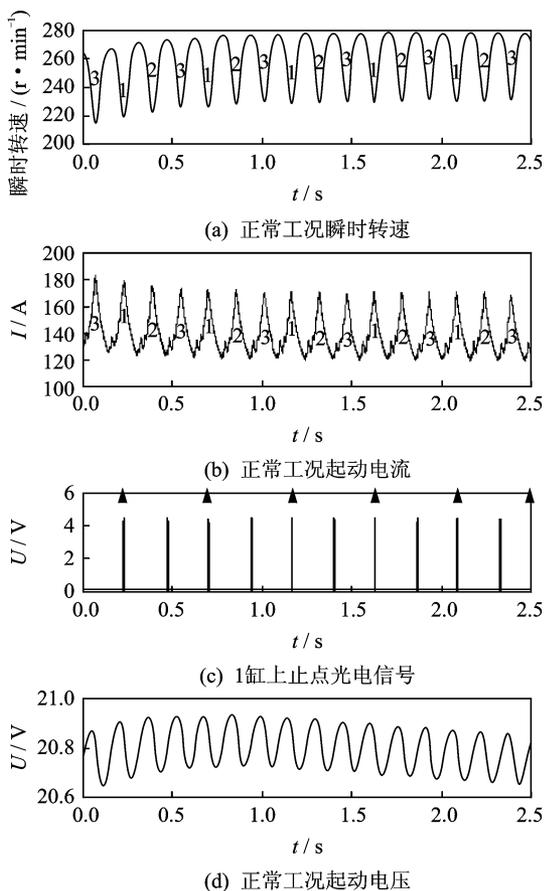


图 3 正常工况不给油起动各信号波形

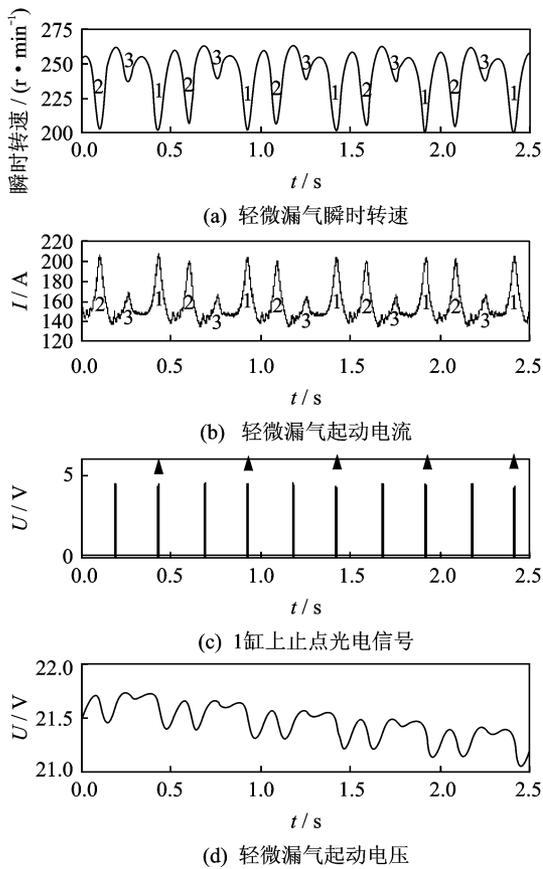


图4 第3缸轻微漏气工况不给油起动各信号波形

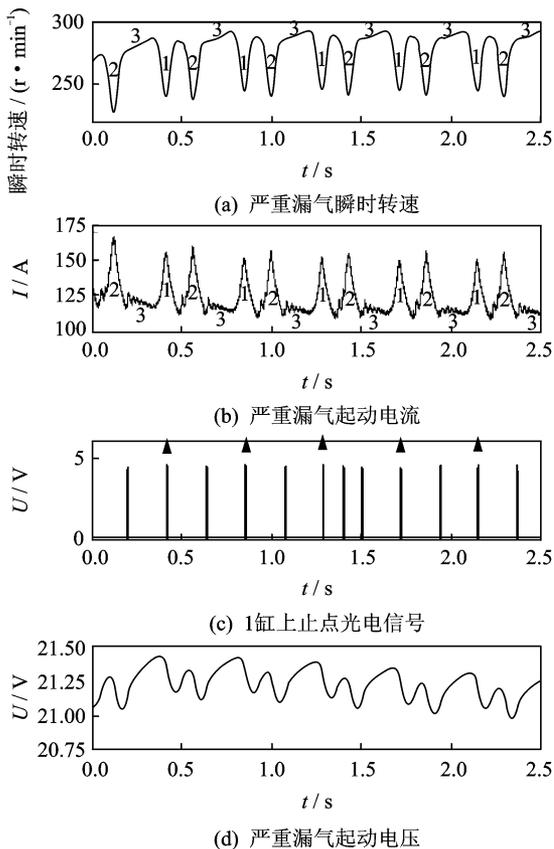


图5 第3缸严重漏气工况不给油起动各信号波形

的瞬时转速没有任何下降趋势,所对应的起动电流峰值也几乎消失。

#### 4 气缸密闭一致性检测

本研究采用起动电流配合第1缸上止点光电信号来检测气缸密闭一致性。由于起动过程中前1.5 s的电流信号有较大的冲击,因此本系统在检测到起动开关信号后1.5 s再开始采样,共采集3 s的数据。由于起动电压低于17 V时说明蓄电池放电已超过允许限度<sup>[7]</sup>,因此当系统检测到起动电压1.5 s后的平均值低于17 V时,直接通过CAN总线发送报警信息,此时需要拆下蓄电池送充电间充电。

本研究采用光电传感器采集的上止点信号结合3缸柴油机电流信号的特点来定位压缩行程上止点。

由于第1缸上止点分为压缩行程上止点和排气行程上止点,为了区分这两种上止点,本研究利用光电信号结合起动电流信号共同定位发动机工作相位。由图2~图5可以看出,虽然第1缸每个上止点都出现光电信号,但电流信号只有在压缩行程的上止点才出现峰值,而在排气行程的上止点是最低点。同理第2缸和第3缸的上止点也有同样的现象,因此可以利用三缸柴油机的这一特点进行压缩行程上止点的确定。

在此引入1缸压缩上止点指数 $P$ 来确定1个1缸上止点光电信号是否是压缩行程上止点

$$P = \sum_{i=1}^3 \Delta_i \quad (4)$$

其中: $\Delta_i = I_s(t_a + (i-1)T/N) - I_s(t_a + (i-1)T/N + T/2N)$ ;  $t_a$ 为要检测的1缸上止点信号的时间;  $T$ 为柴油机工作周期;  $t_a$ 与向后推两个上止点的时刻 $t_b$ 的差值即为工作周期 $T$ ;  $\Delta_i$ 为第 $i$ 缸上止点时刻电流值与上止点时刻向后推 $T/2N$ 时刻的电流值的差。

由图2的相位关系可知,如果光电信号是第1缸压缩行程上止点,则 $\Delta_i$ 为电流信号 $I_s$ 在第 $i$ 缸压缩上止点处波峰与波谷的差值,应有 $\Delta_i > 0$ ;如果光电信号是第1缸排气行程上止点,则 $\Delta_i$ 为波谷与波峰的差值,应有 $\Delta_i < 0$ 。

由以上分析可知,如果 $P > 0$ ,说明1缸的上止点光电信号是1缸压缩行程上止点;  $P \leq 0$ ,则说明是排气行程的上止点。

确定 $t_a$ 为1缸压缩行程上止点后,提取归一化参数 $QMX(i)$ 作为第 $i$ 缸气密性是否良好的判断参数。 $0 \leq QMX(i) \leq 1$ ,越小说明第 $i$ 缸气缸密封性越好,越大说明第 $i$ 缸密封性越差。参数表达式如下

$$QMX(i) = \frac{\max(m\Delta_1, m\Delta_2, m\Delta_i, \dots, m\Delta_N) - m\Delta_i}{\max(m\Delta_1, m\Delta_2, m\Delta_i, \dots, m\Delta_N)} \quad (5)$$

其中:  $N$  为发动机总缸数。

$$m\Delta_i = f_{\max}[I_s(t_a + (i-1)T/N)] - f_{\min}[I_s[t_a + (i-1)T/N + T/2N]] \quad (6)$$

其中

$$f_{\max}(I_s(t)) = \max\{I_s[(t - T/1000) \sim (t + T/1000)]\}$$

$$f_{\min}(I_s(t)) = \min\{I_s[(t - T/1000) \sim (t + T/1000)]\}$$

为测试参数在判断气缸密闭一致性方面的有效性,将正常(样本 1~6)、第 3 缸轻微漏气(样本 7~12)及第 3 缸严重漏气(样本 13~18)工况下提取的参数进行比较,结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,在第 3 缸轻微及严重漏气后,其气密性参数 QMX(3)分别达到 0.7 和 0.9,与正常工况的参数有着明显的不同。在此设定阈值为 0.15,当第  $i$  缸气密性参数 QMX( $i$ )大于 0.15 时,即可判断为第  $i$  缸漏气故障,即各气缸密闭性不一致。QMX( $i$ )的值越接近 1,第  $i$  缸漏气越严重。

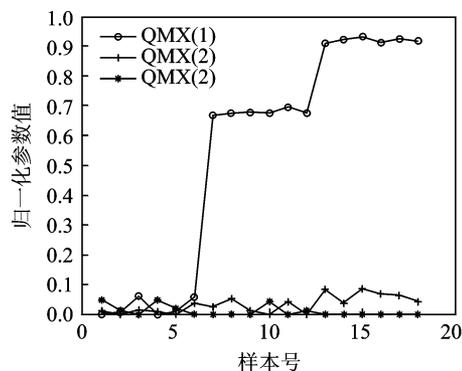


图 6 3 种工况下提取的归一化气密性参数

## 5 结 论

1) 通过实测信号证明了不供油起动过程中发动机起动电流、瞬时转速等信号与各缸工作行程理论关系模型的正确性。

2) 引入压缩上止点指数来定位压缩行程上止点,解决了 F3L912 型柴油机提取工作相位难的问题。提取归一化的气密性参数实现了发动机气密性故障的定性、定缸和定量判断。

### 参 考 文 献

[1] 张光德,黄震,肖一夫,等. 康明斯柴油机气缸漏气测试方法的研究[J]. 柴油机,2000(4):27-31.

Zhang Guangde, Huang Zhen, Xiao Yifu, et al. Measurement of gas leakage from cummins diesel engine cylinders [J]. Diesel Engine, 2000 (4): 27-31. (in Chinese)

[2] 张更云,安钢,王凯,等. 多缸柴油机最大气缸压缩压力测试方法研究[J]. 车用发动机,2009(1):84-87.

Zhang Gengyun, An Gang, Wang Kai, et al. Research on measuring method of maximum cylinder compression pressure for multi-cylinder diesel engine [J]. Vehicle Engine, 2009(1):84-87. (in Chinese)

[3] 郭文勇,朴甲哲,张永祥. 基于瞬时转速的内燃机故障诊断方法[J]. 海军工程大学学报,2001,6(13):55-58.

Guo Wenyong, Piao Jiazhe, Zhang Yongxiang. A method of engine fault diagnosis based on the transient speed [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001,6(13):55-58. (in Chinese)

[4] 张英堂,张中民,沈寿林. 瞬时转速在某自行炮柴油机性能检测中的应用研究[J]. 火炮发射与控制学报,1998(2):15-23.

Zhang Yingtang, Zhang Zhongming, Shen Shoulin. Instantaneous speed in self propelled gun engine performance test [J]. Journal of Gun Launch & Control, 1998(2):15-23. (in Chinese)

[5] 王涛,李艾华,姚良,等. 采用多层核学习机的柴油机气门机构故障诊断[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(4):462-464.

Wang Tao, Li Aihua, Yao Liang, et al. Fault diagnosis of diesel valve train based on multi-layer kernel learning machine [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(4):462-464. (in Chinese)

[6] 齐子元,房立清,张英堂. 特征选择与支持向量机参数同步优化研究[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(2):111-114.

Qi Ziyuan, Fang Liqing, Zhang Yingtang. Synchro-optimization of feature selection and parameters of support vector machine [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(2):111-114. (in Chinese)

[7] 李景飞,高海春,高延怀,等. 装甲车辆电气设备原理与维修[M]. 北京:解放军出版社,2002:77-81.



第一作者简介:程利军,男,1982年6月生,博士研究生、助理讲师。主要研究方向为车辆检测和故障诊断。曾发表《基于排气噪声的柴油机各缸工作不均匀故障诊断》(《内燃机工程》2009年第30卷第3期)等论文。

E-mail:chenglijun2000@sina.com