

# 基于神经网络和瞬时转速的发动机失火故障研究\*

王维琨, 江志农\*, 张进杰

(北京化工大学 诊断与自愈工程研究中心, 北京 100029)

**摘要:**针对发动机在实际运行中经常会出现单缸或者多缸失火这种典型的故障现象,从发动机瞬时转速的角度出发,对发动机气缸受力与发动机曲轴瞬时转速之间的关系进行了理论研究,建立了其数学模型,利用 Matlab 仿真软件对瞬时转速曲线进行了仿真,确定并提取出了特征参数,比较了正常情况下和单缸不点火情况下瞬时转速曲线及其特征参数的变化,并把这些变化作为下一步诊断发动机失火故障的判断依据;最后,建立了一个 BP 神经网络并对其进行了训练,同时把仿真数据和实例数据输入到网络中进行了理论验证和实例验证。研究结果表明,发动机的失火故障与发动机瞬时转速之间存在一定的关系,利用瞬时转速可以对发动机失火故障进行诊断;利用 BP 神经网络方法诊断发动机失火故障具有速度快、效率高的特点。

**关键词:**发动机;失火故障;BP 神经网络;故障诊断

**中图分类号:**TK418;TH165.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2013)07-0824-04

## Study on engine misfire fault based on neural networks and instantaneous angular speed

WANG Wei-kun, JIANG Zhi-nong, ZHANG Jin-jie

(Diagnosis & Self-Recovery Engineering Research Center, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Aiming at the typical phenomenon of the engine misfire fault in the actual operation, the research was started from the instantaneous crankshaft speed of the engine. The relationship between the engine misfire fault and instantaneous crankshaft speed was briefly described. A mathematical model was established and the feature parameters were determined. Then, the Matlab was used to simulate it and BP neural networks were used to detect and analyse the engine misfire fault. The results indicate that there is a certain relationship between the engine misfire fault and the instantaneous crankshaft speed of the engine. Using instantaneous crankshaft speed can diagnose the engine misfire fault. Using BP neural networks can also diagnose the engine misfire fault and it has the features of fast and efficiently.

**Key words:** engine; misfire fault; BP neural networks; fault diagnosis

## 0 引言

燃气发动机在工业、农业、能源和交通运输等领域都有广泛应用,是现代动力设备的主要成分,其运行状态直接关系到生产安全性和生产效率。但是由于发动机运动部件较多,内部结构又相对复杂,而且经常在高温、高压等恶劣条件下工作,所以故障率较高<sup>[1]</sup>。因

此对发动机的故障进行诊断是十分必要的。

对发动机的诊断方法主要有性能参数分析法、油液分析法、振动监测法和瞬时转速分析法<sup>[2-5]</sup>。每种方法都有各自的优缺点,如振动监测法虽然诊断速度快、准确率高、定位性强,能够实现早期报警,但是由于发动机结构的复杂性和状态的不确定性,振动的激励源众多且相互之间存在干扰,这种方法只能适用于当前

机器,可移植性较差。神经网络在故障诊断中的应用起源于上世纪80年代末,经过长时间的发展和国内外众多学者的深入研究,其在故障诊断领域已经有了广泛应用<sup>[6-7]</sup>。

本研究通过把曲轴的瞬时转速与BP神经网络结合起来,提出一种对发动机气缸故障诊断的方法。

## 1 曲轴瞬时转速与气缸失火故障之间的理论研究

### 1.1 气缸受力理论研究

发动机工作时曲轴受力(矩)是周期性变化的,这个力矩与气缸的气体压力、往复惯性力之间存在一定的关系,当发动机某个气缸发生失火故障时,其气体压力的变化会带动力矩的变化,同时会使得曲轴的瞬时转速发生改变。

由文献[8]可知,所有气缸的动力扭矩为:

$$T_X = \sum_{i=1}^n T_i R = R \sum_{i=1}^n P_i \left( \sin(\theta + \varphi_i) + \frac{\lambda}{2} \sin 2(\theta + \varphi_i) \right) - \frac{1}{2} m \omega^2 R^2 \sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda}{2} \sin(\theta + \varphi_i) - \sin 2(\theta + \varphi_i) - \frac{3\lambda}{2} \sin 3(\theta + \varphi_i) \right) - \frac{T_L}{I_o \cdot \omega} \quad (1)$$

式中:  $T_X$ —有气缸的动力扭矩,  $T_L$ —总的阻力扭矩,  $\lambda$ —曲轴半径与连杆长度之比,  $n$ —气缸个数,  $\varphi_i$ —第  $i$  个气缸的点火角度。

曲轴的瞬时转速:

$$f(\theta) = \frac{d\theta}{d\theta} = \frac{R}{I_o \cdot \omega} \sum_{i=1}^n P_i \left( \sin(\theta + \varphi_i) + \frac{\lambda}{2} \sin 2(\theta + \varphi_i) \right) - \frac{m\omega R^2}{2I_o} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda}{2} \sin(\theta + \varphi_i) - \sin 2(\theta + \varphi_i) - \frac{3\lambda}{2} \sin 3(\theta + \varphi_i) \right) - \frac{T_L}{I_o \cdot \omega} \quad (2)$$

它表示曲轴角速度在一个较小的转角内的平均值。对于一般情况,  $\omega$  和  $T_L$  是常量,所以瞬时转速是曲轴转角  $\theta$  的函数,是周期函数。再定义  $\varepsilon$  为瞬时转速波动率,  $\varepsilon = f(\theta)/\omega$ , 可以得出  $\varepsilon$  也是随曲轴转角  $\theta$  做周期性变化的,且与切向力成正比,根据公式(1, 2),可以认为瞬时转速波动率是正弦信号的叠加,可以用这个波形对气缸故障进行诊断。

### 1.2 特征参数的选取

对发动机气缸进行故障诊断,就必须选取某些特

征参数。以一个四冲程的四缸V型发动机为对象,点火顺序是:2#缸-1#缸-4#缸-3#缸,各个物理参数已知,在4个气缸上安装动态压力传感器,以测量整个周期的压力数据。用Matlab对公式(1)进行仿真,得出波形图如图1所示。

可以看到瞬时转速波动率在一个周期内的波形图,参照文献[8]中的方法,本研究选取的特征参数为瞬时转速的峰值和谷值,分别对应图中标出的8个点,即:

参数1(瞬时转速峰值):

$$A(i) \max = \{ \max(A(i)), i=1, 2, \dots, n, n \text{ 为气缸个数} \};$$

参数2(瞬时转速谷值):

$$A(i) \min = \{ \min(A(i)), i=1, 2, \dots, n, n \text{ 为气缸个数} \}.$$

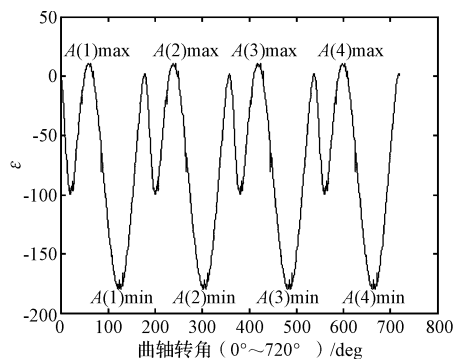


图1 正常瞬时转速波动率随曲轴角变化曲线及特征参数的选取

## 2 BP神经网络

### 2.1 BP神经网络故障诊断原理

BP网络(误差反向传播神经网络)应用极为广泛,是一种多层向前型神经网络,采用S型函数作为传递函数,能实现从输入到输出的任意非线性映射<sup>[9-10]</sup>。BP神经网络从结构上分为输入层、隐层、输出层3部分,层与层之间是全连接的形式,同一层之间无连接。BP网络在进行故障分类时,不需要建立故障模式的数学模型,并且具有自学习、自适应的能力,通过学习的网络还具有自动提取故障特征的能力,所以适合于故障诊断。

### 2.2 BP神经网络的局限性

随着BP神经网络应用范围的扩大,国内外不少专家学者都对其进行了大量研究,同时也暴露了一些缺点和不足,主要有以下几个方面<sup>[11]</sup>:

(1)训练时间长。如果碰到复杂的问题,BP网络的训练时间可能达到几小时甚至更长,其主要原因是

由于学习速率小。但是,可以通过改变学习速率来达到提高训练效率的目的。

(2)完全不能训练。在训练网络的过程中,如果权值调的过大,会出现网络麻痹现象,使得训练停顿下来。不过可以通过选取较小的初始权值或者较小的学习速率避免这种现象的发生,但这又使得训练时间变长。

(3)局部极小值。BP 网络可以得到一个收敛的解,但不能完全保证这个解是全局最小解,也可能是一个局部极小解。这是由采用的梯度下降算法自身的局限性导致的。

虽然 BP 网络存在一些不足之处,但这并不能完全否定 BP 神经网络在故障诊断中的应用,只要合理地 对网络进行改进,将其应用于对故障进行诊断的方法还是有效的、可行的。

### 3 故障情况模拟

正常工作时,气体压力扭矩是有规律的周期性变化,当单缸故障产生时,气体压力扭矩图形会有差别,从而对波形周期产生影响,使曲线发生畸变,而且当不同缸发生故障时,根据点火顺序,会在不同的曲轴转角处产生波形畸变,从而可以据此判断出故障缸号。

以 1#缸停止点火为例,根据公式(1)得到的故障曲线和正常曲线如图 2 所示。

可以看到,正常时和单缸停止点火时瞬时转速波动率曲线是有明显差别的,而产生差别的位置就处在不点火气缸(1#缸)的点火角度上。这种差别为下一步根据特征参数进行故障诊断提供了理论依据。

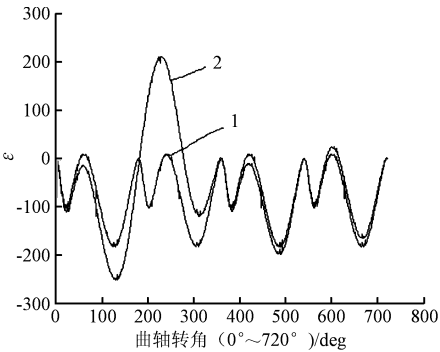


图 2 1#缸停止点火故障与正常瞬时转速波动率曲线  
1—正常曲线;2—故障曲线

## 4 利用 BP 神经网络的数据处理

### 4.1 样本的获取

由上文可知,发动机正常工作时和某一气缸不点火时这两种状态下瞬时转速波动率曲线是有明显差别的,并且发动机气缸不点火故障是典型的、最常见的故障之一。本研究用 Matlab 编程分别提取出正常工作、1#缸不点火、2#缸不点火、3#缸不点火、4#缸不点火时的特征参数,每种情况下提取 100 组,共 500 组,作为网络的训练样本,再重新提取 5 种状态下各 20 组作为测试样本。故障模式分类及故障、测试样本部分数据如表 1~3 所示。

表 1 故障模式分类

| 故障模式   | 对应描述 |
|--------|------|
| 正常     | 0    |
| 1#点火故障 | 1    |
| 2#点火故障 | 2    |
| 3#点火故障 | 3    |
| 4#点火故障 | 4    |

表 2 故障样本数据

|      | A(1) max  | A(2) max  | A(3) max  | A(4) max  | A(1) min   | A(2) min   | A(3) min   | A(4) min   |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 正常   | -8.356 2  | -5.836 5  | -7.693 2  | -1.694 4  | -183.783 6 | -179.278 3 | -187.675 9 | -186.761 6 |
| 1#失火 | -15.354 7 | 214.859 9 | -8.635 2  | 30.214 3  | -254.554 7 | -117.802 4 | -202.751 8 | -165.526 8 |
| 2#失火 | 214.859 9 | -8.635 2  | 30.214 3  | -15.354 7 | -117.802 4 | -202.751 8 | -165.526 9 | -254.554 7 |
| 3#失火 | -8.635 2  | 30.214 3  | -15.354 7 | 214.859 9 | -202.751 8 | -165.526 8 | -254.554 7 | -117.802 4 |
| 4#失火 | 30.044 0  | -13.908 8 | 217.320 7 | -7.403 6  | -165.144 4 | -253.991 3 | -118.257 7 | -200.187 0 |

表 3 测试样本数据

|      | A(1) max  | A(2) max  | A(3) max  | A(4) max  | A(1) min   | A(2) min   | A(3) min   | A(4) min   |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 正常   | -7.378 3  | -8.836 1  | -8.280 7  | -5.871 2  | -189.776 4 | -172.279 3 | -188.692 6 | -180.109 4 |
| 1#失火 | -14.870 8 | 214.694 8 | -9.539 3  | 28.570 6  | -254.422 8 | -119.406 9 | -199.526 1 | -164.445 9 |
| 2#失火 | 216.136 7 | -11.426 9 | 27.911 5  | -13.990 0 | -117.488 0 | -200.094 4 | -165.233 2 | -255.569 8 |
| 3#失火 | -10.203 2 | 29.605 6  | -12.591 6 | 215.628 1 | -201.248 7 | -163.819 9 | -252.363 9 | -118.145 6 |
| 4#失火 | 28.094 3  | -15.815 3 | 215.565 4 | -10.760 5 | -163.922 9 | -254.655 6 | -118.782 8 | -202.254 6 |

### 4.2 BP 神经网络的训练

神经网络训练过程实际上就是得到权值跟阈值的

过程。本研究通过对输入样本进行训练,建立预期的网络。根据已有的数据和经验积累,形成大量的输入

与输出组,通过网络自学习来建立权值和阈值并不断对其进行调整,最终使网络的实际输出与目标向量尽可能接近。本研究采用的 BP 神经网络,输入层神经元个数为 8 个,输出层神经元个数为 5 个,隐层神经元个数为 17 个。隐层和输出层神经元的激励函数取“tansig”和“logsig”,网络训练函数取“trainlm”,系统总误差为 0.01。网络的训练情况如图 3 所示。

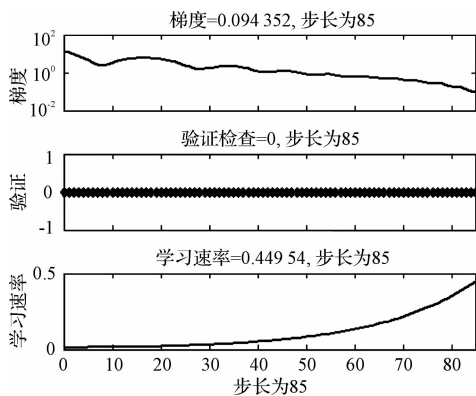


图3 网络的训练情况

#### 4.3 BP 神经网络诊断结果

通过给定在正常、1#、2#、3#、4#缸失火每种情况下 20 组测试样本,系统得到结果的准确率分别为 100%、95%、100%、95%、100%。在实际应用中,还要通过增加训练样本数目或者对网络算法进行改进的方法,使得诊断结果更为准确,系统误差更小。

### 5 实验验证

在实际实验中,本研究对发动机 3 号气缸点火线圈进行破坏,使其在工作中不点火,得到瞬时转速波动率曲线如图 4 所示。本研究用 Matlab 程序提取出曲线的特征参数分别为: -9.213 6, 28.484 3, -13.131 2, 214.830 5, -200.635 6, -165.022 4, -253.570 9, -118.067 2。

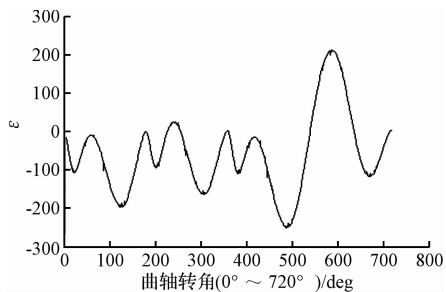


图4 3#缸不点火时瞬时转速波动率曲线

本研究把特征参数代入到已经训练好的神经网络程序中,最后系统给出的响应为:3。这说明是 3#气缸失火,与研究人员诊断的结果一致,证明了利用瞬时转速和神经网络诊断发动机气缸失火故障的可行性。

### 6 结束语

笔者研究了基于瞬时转速和 BP 神经网络技术在发动机气缸故障诊断中的应用,并得出如下结论:

(1) 发动机曲轴瞬时转速信号能够反映发动机气缸的失火故障,提取的特征参数能用于发动机的故障诊断;

(2) BP 神经网络结构简单、方法容易,对发动机故障诊断的准确度比较高,能用于对发动机失火故障的早起预警;

(3) 在实际应用中,应通过大量的样本对网络进行训练,这样才能使得系统的准确性更高。

#### 参考文献(References):

- [1] 范志勇. 基于曲轴转速波动分析的内燃机故障诊断研究[D]. 大连:大连海事大学轮机工程学院,2006.
- [2] 任云鹏. 基于曲轴角加速度的柴油机故障诊断研究[D]. 成都:电子科技大学机械电子工程学院,2006.
- [3] 郑 劲,丁雪兴. 柴油发动机故障诊断技术研究与应用[J]. 机械,2012,39(6):67-70.
- [4] 闫 兵,董大伟,秦 萍. 利用曲轴扭振相位特性诊断内燃机故障缸的新方法[J]. 精密制造与自动化,2003(s1):97-100.
- [5] 汪 海. 基于神经网络技术的汽车发动机故障诊断研究[D]. 西安:陕西科技大学电气与信息工程学院,2006.
- [6] 王秋勤. 基于概率神经网络的发动机故障诊断研究[D]. 昆明:西南林业大学机械与交通学院,2010:20-31.
- [7] 郭 涛. 人工神经网络在汽车发动机故障诊断中的比较研究[D]. 沈阳:东北大学信息科学与工程学院,2008.
- [8] 马 晋,江志农,高金吉. 基于瞬时转速波动率的内燃机故障诊断方法研究[J]. 振动与冲击,2012,31(13):119-124.
- [9] 杨旭志,廖中文. 基于虚拟仪器和神经网络的汽车发动机故障诊断方法的研究[J]. 内燃机与配件,2011(4):10-12.
- [10] 赖祥生. 基于神经网络的发动机故障诊断分析[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2008,25(5):533-540.
- [11] 张德丰. Matlab 神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社,2011.

[编辑:张 翔]