

# 基于机械诊断信息的设备运行可靠性研究

何正嘉<sup>1,2</sup>, 蔡改改<sup>1,2</sup>, 申中杰<sup>1,2</sup>, 曹宏瑞<sup>1,2</sup>, 李兵<sup>1,2</sup>

(1.西安交通大学机械工程学院,西安 710049;2.西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710049)

**[摘要]** 针对传统可靠性分析方法必须依赖大样本统计数据、利用概率统计求解设备可靠性的不足,提出两种利用运行状态信息实现小样本条件下设备运行可靠性评估的方法:基于归一化小波信息熵的可靠性评估和基于损伤定量识别的可靠性评估。基于归一化小波信息熵的可靠性评估对设备运行过程中的振动信号采用第二代小波包进行分解与重构,获得多个分解频带信号,计算分解频带信号的相对能量和归一化信息熵,根据归一化信息熵获取反映设备运行状态可靠性的重要指标——可靠度;基于损伤定量识别的可靠性评估定义了新的运行可靠性评价指标——隶属可靠度,在故障定量诊断的基础上,建立了损伤程度与运行可靠性评价指标之间的联系。在制氧压缩机运行可靠性评估和机车轮对轴承运行可靠性评估的成功应用,表明所提出的方法合理、有效,为机械设备实现缺乏大样本、非概率统计模型的可靠性评估提供了新理论与新技术。

**[关键词]** 机械设备;运行可靠性;归一化信息熵;隶属可靠度

**[中图分类号]** TH17 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)01-0009-06

## 1 前言

机械设备出厂后长周期安全可靠运行创造的价值远远超过其自身的价值,保证产品在运行过程中的安全可靠是机械产品竞争的关键<sup>[1]</sup>。历经近一个世纪的发展,传统可靠性工程在理论和应用方面取得了丰硕成果,其数学基础是概率论和数理统计,需要大样本失效数据;而单台或小样本机械设备难以满足大样本统计条件,模型应用困难。此外,传统可靠性评估的某些方法(如故障树分析)基于二值假设的逻辑代数,而设备失效本质是渐变退化的物理过程,具有不确定性(模糊性、随机性)。人们深入思考了可靠性这一老问题的过去、现在和将来<sup>[2]</sup>。1994年,黄洪钟批判性地评述了传统可靠性理论,指出离散二值逻辑假设和概率假设的不合理性<sup>[3]</sup>。2009年,Zio E洞察到可靠性面临的新挑战,提出基于状态监测的维护以确保系统的可靠运行,减少故障和提高生产率是追求的目标<sup>[4]</sup>。

目前,设备的运行动态信号已用于设备的动态运行性能评估。2011年,Zuo M J等利用振动信号

来评估齿轮箱的健康状况<sup>[5]</sup>;2011年,Ding F和Chen B J等利用数控机床加工振动信号分别建立比例故障率模型和Logistic回归模型,合理评估了机床加工和刀具磨损的可靠性<sup>[6,7]</sup>;2012年,Fong Bernard提出利用状态监测信息评估电子工业生产线中个体设备的可靠性<sup>[8]</sup>。然而,这些方法中可靠性评估模型的建立依旧依赖大量先验知识和历史样本数据,评估精度必然取决于样本的大小。

针对小样本条件下运行的机械设备,摆脱传统可靠性评估方法的困境,研究新的可靠性评估方法已成为可靠性工程的强烈需求。目前尚有以下问题亟待解决:如何在缺乏概率统计的条件下进行可靠性评估,如何根据设备运行信息而非概率统计获得可靠性工程的重要指标可靠度。信息熵是一种反映系统状态不确定性的有效指标,基于信息熵进行电力系统及机械设备监测诊断已见成果<sup>[9,10]</sup>,但利用信息熵进行可靠性分析尚不多见。损伤定量识别指标反映了设备故障的严重程度,但如何建立损伤定量识别指标与可靠性指标之间的映射关系尚待研究。

本文分别从信号能量分布和故障定量诊断的

**[收稿日期]** 2012-10-10

**[基金项目]** 国家自然科学基金重点项目(51035007);博士点基金优先发展领域(重点)(20110201130001);国家重点基础研究发展计划(2009CB724405;2011CB706805)

**[作者简介]** 何正嘉(1942—),男,浙江杭州市人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为机械设备状态检测故障诊断;E-mail:hzj@mail.xjtu.edu.cn

角度出发,提出基于“归一化小波信息熵”和“损伤定量识别”的可靠性评估方法,建立设备运行状态信息与可靠性指标之间的映射关系,评估设备的运行可靠性。

## 2 基于归一化小波信息熵的可靠性评估

基于归一化小波信息熵的运行设备可靠性评估方法,采用第二代小波包(SGWP)<sup>[11,12]</sup>分析机械设备振动信号,计算归一化小波信息熵并将其转换为[0, 1]区间数值,以此作为定义在[0, 1]区间的可靠度评估运行设备的可靠性。一台大型制氧压缩机运行可靠性评估实例表明,归一化小波信息熵可替代概率统计得到可靠度,从而正确评估压缩机运行可靠性。

### 2.1 第二代小波包分解和重构算法

信号序列  $S = \{x(k), k \in Z\}$ , 其中  $x(k)$  为序列  $S$  中的第  $k$  个样本,  $Z$  为正整数集合, 分成偶序列  $s_e = \{s_e(k), k \in Z\}$  和奇序列  $s_o = \{s_o(k), k \in Z\}$ <sup>[12,13]</sup>。

$$s_e(k) = x(2k) \quad k \in Z \quad (1)$$

$$s_o(k) = x(2k+1) \quad k \in Z \quad (2)$$

计算第二代小波包第  $l$  层分解的各个频带信号:

$$s_{l1} = s_{(l-1)e} - P(s_{(l-1)e}) \quad (3)$$

$$s_{l2} = s_{(l-1)e} + U(s_{l1}) \quad (4)$$

.....

$$s_{l(2^l-1)} = s_{(l-1)2^{l-1}e} - P(s_{(l-1)2^{l-1}e}) \quad (5)$$

$$s_{l2^l} = s_{(l-1)2^{l-1}e} + U(s_{l(2^l-1)}) \quad (6)$$

式中,  $P$  和  $U$  分别是第二代小波预测器和更新器。

第二代小波包重构过程是保留相应频带信号, 将其他频带信号置零, 然后按照式(7)~式(14)进行重构。

$$s_{(l-1)2^{l-1}e} = s_{l2^l} - U(s_{l(2^l-1)}) \quad (7)$$

$$s_{(l-1)2^{l-1}o} = s_{l(2^l-1)} + P(s_{(l-1)2^{l-1}e}) \quad (8)$$

$$s_{(l-1)2^{l-1}e}(2k) = s_{(l-1)2^{l-1}e}(k) \quad k \in Z \quad (9)$$

$$s_{(l-1)2^{l-1}e}(2k+1) = s_{(l-1)2^{l-1}o}(k) \quad k \in Z \quad (10)$$

.....

$$s_{(l-1)e} = s_{l2} - U(s_{l1}) \quad (11)$$

$$s_{(l-1)o} = s_{l1} + P(s_{(l-1)e}) \quad (12)$$

$$s_{(l-1)e}(2k) = s_{(l-1)e}(k) \quad k \in Z \quad (13)$$

$$s_{(l-1)e}(2k+1) = s_{(l-1)o}(k) \quad k \in Z \quad (14)$$

### 2.2 小波包信号分解频带能量

对设备运行过程中产生的动态信号, 通过双正

交第二代小波包将信号分解1次并对每个频带分别重构, 得到  $2^l$  个分解信号  $x_{li}(k)$ , 第  $i$  分解频带信号的能量  $E_{li}$  和相对能量  $\tilde{E}_{li}$  分别为

$$E_{li} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{li}(k))^2 \quad (15)$$

$$\tilde{E}_{li} = E_{li} / \left( \sum_{i=1}^{2^l} E_{li} \right) \quad (16)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, 2^l$ ;  $k = 1, 2, \dots, n$ ,  $n \in Z$ 。显然, 相对能量总和  $\sum_{i=1}^{2^l} \tilde{E}_{li} = 1$ 。

### 2.3 归一化小波信息熵

归一化小波信息熵  $Ent$  定义如下:

$$Ent = - \sum_{i=1}^{2^l} (\tilde{E}_{li} \log_2 \tilde{E}_{li}) \quad (17)$$

式中, 对数的底取  $2^l$ , 则  $Ent \in [0, 1]$ 。如果  $2^l$  个频带具有相同的相对能量, 则相当于等概率分布, 此时  $Ent = 1$ ; 若全部能量集中在一个频带里, 则表明设备状态单一、确定, 容易得到  $Ent = 0$ 。

### 2.4 基于归一化小波信息熵的可靠度

当设备出现故障时, 运行状态数增加, 不确定性也增强, 归一化小波信息熵必然增加, 设备的可靠性降低, 其可靠度自然减小。由于归一化小波信息熵和可靠度都定义在[0, 1]区间, 在得到归一化小波信息熵后, 可由如下关系得到发生故障的设备的运行可靠度  $R$ :

$$R = 1 - Ent \quad (18)$$

### 2.5 工程应用

某钢厂一台制氧压缩机由电机、增速齿轮箱和压缩机组成(见图1)。增速齿轮箱输出轴转速为14 885 r/min。整台设备运行中唯独齿轮箱振动增大, 并发出高频噪声。该齿轮箱4个轴承均是滑动轴承, 用加速度传感器测振, 采样频率为20 kHz。结果发现3号轴瓦座振动最大, 瓦温最高, 超过50℃。振动波形如图2所示, 经第二代小波包3层分解和重构得到8个频带, 相应的频带分别为0~1.25 kHz, 1.25~2.5 kHz, 2.5~3.75 kHz, 3.75~5 kHz, 5~6.25 kHz, 6.25~7.5 kHz, 7.5~8.75 kHz 和 8.75~10 kHz, 每个频带的相对能量示于图3。由图3可知, 其频带能量分布较广, 前两个频带的能量之和超过总能量的一半, 从第3到第7频带都有能量分布, 加之3号轴瓦座振动和温度都高于其他3个轴瓦, 诊断认为3号轴承发生损伤缺陷。停机检修发现轴瓦乌金出现大面积裂纹, 多处碎裂。根据式(17)计算得到设备

的归一化小波信息熵为0.717 3,熵值较大,表明设备因轴瓦故障运行状态不确定性较大。根据式(18)计算得到设备的运行可靠度为0.282 7,表明设备运行状态恶化,可靠度很低。

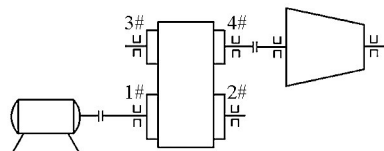


图1 制氧压缩机结构简图

Fig. 1 The structure diagram of the compressor

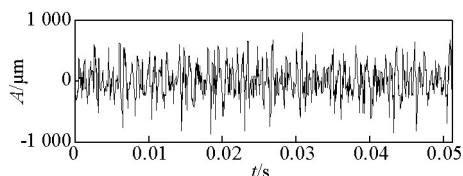


图2 检修前齿轮箱3号轴瓦座振动波形

Fig. 2 Vibration signal waveform of 3# bearing before repaired

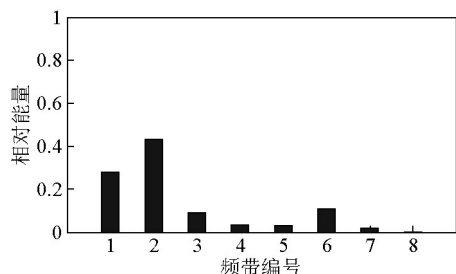


图3 检修前第二代小波包3层分解频带相对能量

Fig. 3 Relative energy of SGWP frequency band before repaired

更换3号轴瓦后开机,设备振动减弱,高频噪声得到明显改善。检修后开机的3号轴瓦座振动波形如图4所示,其第二代小波包3层分解和重构频带相对能量示于图5。图4与图2相比,振动幅值减小,波形结构有变化。经第二代小波包3层分解和重构得到图5中8个频带的相对能量。与图3相比,能量主要集中在第2频带,从第3到第7频带能量分布显著减少。检修后设备运行状态相对单一,能量比较集中和确定。根据式(17)计算得到设备的归一化小波信息熵为0.360 8,熵值较小,表明设备因轴瓦故障运行状态不确定性较小。根据式(18)计算得到设备的运行可靠度为0.639 2,表明设备运行状态得到改善,可靠度提高。检修前后的计算结果如表1所示。

表1 检修前后归一化小波信息熵和可靠度

Table 1 The normalized wavelet information entropy and the reliability degree before and after repaired

指标	检修前	检修后
归一化小波信息熵	0.717 3	0.360 8
可靠度	0.282 7	0.639 2

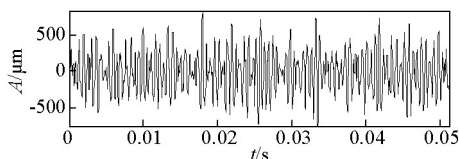


图4 检修后齿轮箱3号轴瓦座振动波形

Fig. 4 Vibration signal waveform of 3# bearing after repaired

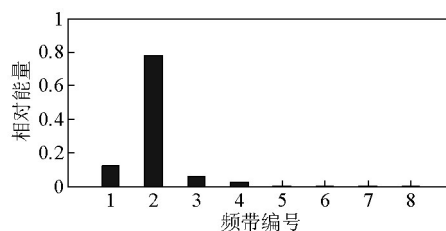


图5 检修后第二代小波包3层分解频带相对能量

Fig. 5 Relative energy of SGWP frequency band after repaired

### 3 基于损伤定量识别的运行可靠性评估

滚动轴承是大型设备的关键部件之一,也是机械设备中最易损坏的零件之一,滚动轴承的运行可靠性直接关系到机械设备的运行安全,依据“短板效应”,选取滚动轴承作为机械设备的关键薄弱环节,建立滚动轴承损伤定量识别特征指标与其运行可靠性指标之间的映射关系模型。基于损伤定量识别特征指标建立的运行可靠性评价指标间的关系模型存在不确定性。然而通过信号处理可解决随机不确定性,通过模糊数学可解决模糊不确定性。在此基础上计算其运行可靠性评价指标,实现运行可靠性评估,确保设备运行安全可靠。

#### 3.1 滚动轴承的损伤定量识别

改进的冗余第二代小波变换采用系数标准化方法对冗余第二代小波的分解过程进行改进,有效消除了冗余第二代小波分解过程带来的误差积累<sup>[4]</sup>。本研究在改进的冗余第二代小波变换中引入冲击脉冲法(SPM),实现了滚动轴承的损伤定量识别。

当滚动轴承存在损伤时,设备运行动态信号呈现单边振荡衰减特性,SPM规定了一个只与轴承工作状态有关的标准分贝值 $S_i$ ,其计算公式为

$$S_i = 20 \log \frac{2000 \times SV}{N \times D^{0.6}} \quad (19)$$

式中, $N$ 表示轴的转速; $D$ 表示轴承内径; $SV$ 表示冲击值。依据分贝值,有如下轴承运行状态判断标准:

$$\begin{cases} 0 \leq S_i \leq 21 \text{ dB} & \text{正常状态} \\ 21 \text{ dB} < S_i \leq 35 \text{ dB} & \text{早期故障} \\ 35 \text{ dB} < S_i \leq 60 \text{ dB} & \text{严重故障} \\ S_i > 60 \text{ dB} & \text{失效} \end{cases} \quad (20)$$

将基于改进的冗余第二代小波变换的滚动轴承损伤定量识别方法归纳为以下4点<sup>[14]</sup>。

1)对原始信号进行冗余第二代小波变换,计算不同频带对应的标准化系数。

2)通过标准化系数改进冗余第二代小波变换结果。

3)对改进的冗余第二代小波变换结果进行Hilbert包络解调分析,获取不同频带信号的包络谱幅值。

4)根据式(19)计算不同频带中故障特征频率处的分贝值,将分贝值最大的频带作为敏感频带,依据敏感频带特征频率处对应的分贝值获取损伤定量识别特征指标。

### 3.2 基于损伤定量识别的运行可靠性评估模型

为建立损伤定量识别特征指标与设备运行可靠性的关系模型,首先定义一种能够用同一尺度量化设备运行状态、隶属于设备运行安全可靠的评价指标——隶属可靠度,表征设备安全运行可能性的大小,其取值范围定义为[0, 1]。基于故障定量诊断,获取滚动轴承在*t*时刻的损伤定量识别特征指标*S<sub>t</sub>*。依据故障诊断基础研究,当*S<sub>t</sub>*超过一定的阈值之后,*S<sub>t</sub>*值越大,滚动轴承运行状态越危险,其隶属于运行安全可靠的程度越低,即其隶属可靠度*R<sub>k</sub>(S<sub>t</sub>)*越小,滚动轴承在运行过程中属于连续退化状态,选用降半正态分布描述*S<sub>t</sub>*与其隶属可靠度之间的映射函数关系,但对于降半正态分布,当*S<sub>t</sub>*趋于无穷大时,*R<sub>k</sub>(S<sub>t</sub>)*趋于零,工程实际中当损伤到达一定阈值轴承即失效,因此对降半正态分布函数的尾部进行修正,当*S<sub>t</sub>*大于失效阈值时,令*R<sub>k</sub>(S<sub>t</sub>)=0*。利用尾部修正的降半正态分布函数建立基于损伤定量识别的滚动轴承运行可靠性评估模型为

$$R_k(S_t) = \begin{cases} 1 & M_A \leq S_t \leq M_B \\ e^{-n(S_t - M_B)^2} & M_B < S_t \leq M_C \\ 0 & S_t > M_C \end{cases} \quad (21)$$

依据式(20),给定隶属可靠度判断标准。当0≤*S<sub>t</sub>*≤21 dB时,滚动轴承运行状态正常,定义其隶属可靠度为1;当21 dB < *S<sub>t</sub>* ≤ 35 dB时,滚动轴承出现不同程度的轻微故障,其可靠性开始下降;当*S<sub>t</sub>* = 35 dB时,滚动轴承介于轻微故障与严重故障之间,根据“亦此亦彼”的数学取值原理,此时定义其隶属可靠度为0.5,并将其作为滚动轴承不可靠的临界

值,因此当21 dB < *S<sub>t</sub>* ≤ 35 dB时,定义其隶属可靠度范围为0.5≤*R<sub>k</sub>(S<sub>t</sub>)* < 1;当35 dB < *S<sub>t</sub>* ≤ 60 dB时,滚动轴承出现不同程度的严重故障,定义其隶属可靠度范围为0≤*R<sub>k</sub>(S<sub>t</sub>)* < 0.5;滚动轴承寿命终点标准分贝值为60 dB,因此当*S<sub>t</sub>* > 60 dB时,定义其隶属可靠度为0。

据此,可得*M<sub>A</sub>*, *M<sub>B</sub>*, *M<sub>C</sub>*的值分别为*M<sub>A</sub>*=0 dB, *M<sub>B</sub>*=21 dB, *M<sub>C</sub>*=60 dB。则基于损伤定量识别的滚动轴承运行可靠性模型为

$$R_k(S_t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq S_t \leq 21 \text{ dB} \\ e^{-0.0035(S_t - 21)^2} & 21 \text{ dB} < S_t \leq 60 \text{ dB} \\ 0 & S_t > 60 \text{ dB} \end{cases} \quad (22)$$

至此,一旦获得了滚动轴承损伤定量识别特征指标,将其引入到该模型中即可获得其隶属可靠度,实现其运行可靠性评估。

### 3.3 工程案例分折

我国铁路运输业高速重载战略的实施,对机车的安全性和可靠性提出了更高的要求。电力机车走行部运行环境恶劣复杂,其轮对轴承极易出现磨损、剥落、胶合等损伤,易诱发各种行车事故。为确保行车安全,必须评估其轮对轴承运行可靠性。所采集到的机车轮对轴承振动信号往往包含大量随机噪声,因此利用改进的冗余第二代小波变换对其轮对轴承振动信号进行分析,依据SPM获取其损伤定量识别特征指标,利用建立的运行可靠性评估模型评估轴承的运行可靠性。

利用本文提出的方法评估3种不同运行状态下某机车轮对轴承的运行可靠性。轴承型号为552732QT,相关参数见表2。试验过程中轴承转速为390 r/min,采样频率为12.8 kHz,轴承外圈故障特征频率为46.88 Hz。

表2 552732QT型滚动轴承参数

Table 2 The geometric parameters of the tested bearing

内径/mm	外径/mm	滚子直径/mm	滚子个数	接触角/(°)
160	290	34	17	0

图6为滚动轴承运行时不同状态下(正常状态、外圈轻微故障、外圈严重故障)采集到的振动信号。为获取轴承损伤定量识别特征指标,首先利用改进的冗余第二代小波变换对以上振动信号进行4层分解,对各频带信号进行Hilbert包络解调,利用SPM计算不同状态下轴承最大冲击脉冲分贝值,获得3种状态下故障特征频率处分贝值最大的频带波形及其包络解调谱图,如图7~图9所示。

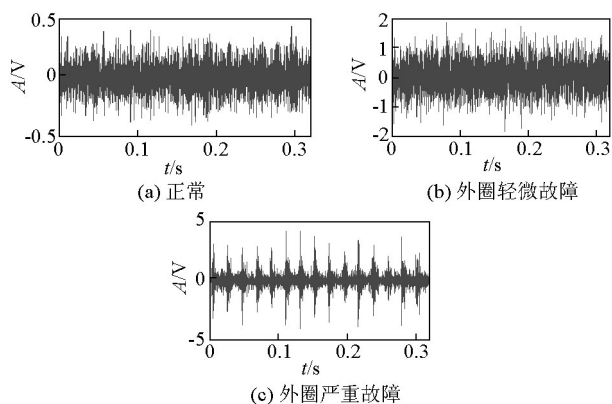


图6 运行时不同状态下滚动轴承振动信号  
Fig.6 Vibration signals of the running bearing

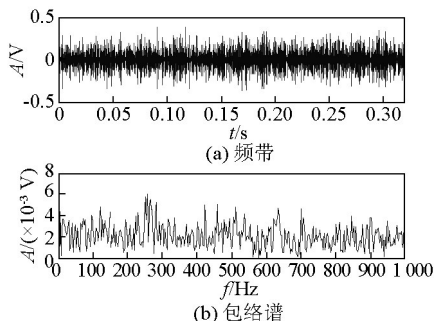


图7 正常状态下故障特征频率处分贝值最大的频带及其包络谱

Fig.7 The frequency band of the fault characteristic frequency with maximize decibel value and its Hilbert spectrum of normal state

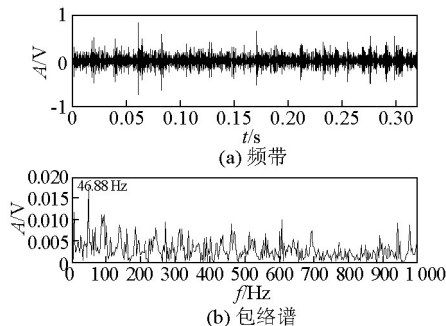


图8 轻微故障状态下故障特征频率处分贝值最大的频带及其包络谱

Fig.8 The frequency band of the fault characteristic frequency with maximize decibel value and its Hilbert spectrum of minor fault status

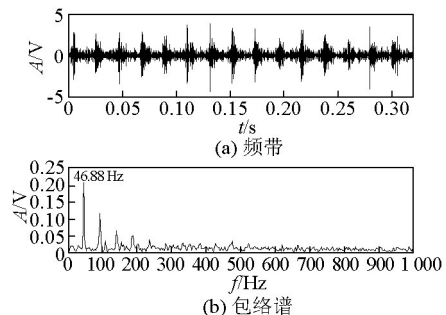


图9 严重故障状态下故障特征频率处分贝值最大的频带及其包络谱

Fig.9 The frequency band of the fault characteristic frequency with maximize decibel value and its Hilbert spectrum of serious fault status

利用式(19)计算3种状态下故障特征频率处对应最大分贝值分别为16.5 dB, 31.6 dB, 48.9 dB。将其代入已建立的滚动轴承运行可靠性评估模型中,可得不同状态下对应的隶属可靠度分别为 $R_k(16.5)=1$ ,  $R_k(31.6)=0.6749$ ,  $R_k(48.9)=0.0549$ 。利用所得隶属可靠度值评估滚动轴承不同状态下的运行可靠性,结果见表3。

表3 运行可靠性评估结果

Table 3 Operation reliability assessment results

	状态(a)	状态(b)	状态(c)
$S_i/\text{dB}$	16.5	31.6	49.8
$R_k(S_i)$	1	0.6749	0.0549
运行可靠性 评估结果	运行安全 可靠	运行可靠性降低,需 在短期内进行检修	运行不可靠,需 立即停机检修

#### 4 结语

针对机械设备可靠性评估的特点与难点,研究提出基于机械诊断信息的设备运行可靠性评估方法。针对两种不同的机械设备,分别提出归一化信息熵的运行可靠性评估方法和基于损伤定量识别的运行可靠性评估方法。

从信号能量分布的角度出发,提出运行设备的归一化小波信息熵转换为可靠度的评估方法,通过在制氧压缩机运行可靠性评估的应用实例表明,归一化小波信息熵可替代概率统计得到定义于[0, 1]区间的可靠度,正确评估了压缩机的运行可靠性。

从故障定量诊断角度出发,提出一种基于设备损伤定量识别的运行可靠性评估方法。该方法定义了隶属可靠度用以表征设备的运行可靠性,将机车轮对轴承不同运行状态的特征指标通过运行可靠性评估模型映射到无量纲的[0, 1]内,衡量了轴承的运行可靠性。

基于归一化小波信息熵的可靠性评估利用相对能量计算运行可靠度,不易受设备的转速、载荷等工作环境的影响,适用于故障前后设备运行状态不确定性变化较大的情况。基于损伤定量识别的可靠性评估直接建立了损伤程度与可靠度之间的联系,其研究思想适用于设备故障后振动变化明显的情况。

关键机械设备运行可靠性评估往往面临缺乏由大样本可得概率统计数据的难题,基于机械诊断信息的运行可靠性评估为解决这一难题开辟了新途径。本文的方法避开了传统可靠性分析利用大样本统计数据,依赖概率统计求解设备可靠性的

过程,建立设备损伤定量识别特征指标与运行可靠性评价指标之间的映射关系模型,利用设备的运行状态信息实现小样本条件下设备运行可靠性评估,为机械设备的运行可靠性评估提供了新理论与新技术。

#### 参考文献

- [1] 张义民. 机械可靠性设计的内涵与递进[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 167-181.
- [2] O'Connor P D T. Commentary: Reliability-past, present, and future [J]. Reliability, IEEE Transactions on, 2000, 49(4): 335-341.
- [3] 黄洪钟. 对常规可靠性理论的批判性评述——兼论模糊可靠性理论的产生、发展及应用前景[J]. 机械设计, 1994(3): 1-6.
- [4] Zio E. Reliability engineering: Old problems and new challenges [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 125-141.
- [5] Feng Zhipeng, Zuo M J, Hao Rujiang, et al. Gear damage assessment based on cyclic spectral analysis [J]. Reliability, IEEE Transactions on, 2011, 60(1): 21-32.
- [6] Ding F, He Z J. Cutting tool wear monitoring for reliability analysis using proportional hazards model [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(5-8): 565-574.
- [7] Chen B J, Chen X F, Li B, et al. Reliability estimation for cutting tools based on logistic regression model using vibration signals [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(7): 2526-2537.
- [8] Fong Bernard, Li C K. Methods for assessing product reliability: Looking for enhancements by adopting condition-based monitoring [J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2012, 1(1): 43-48.
- [9] El-Safty S, El-Zonkoly A. Applying wavelet entropy principle in fault classification [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2009, 31(10): 604-607.
- [10] Lin J L, Liu J Y, Li C W, et al. Motor shaft misalignment detection using multiscale entropy with wavelet denoising [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(10): 7200-7204.
- [11] Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 1998, 4(3): 247-269.
- [12] Sweldens W. The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1996, 3(2): 186-200.
- [13] 何正嘉, 陈进, 王太勇, 等. 机械故障诊断理论及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [14] Li Zhen, He Zhengjia, Zi Yanyang, et al. Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2008, 79(3): 318-338.

## Study of operation reliability based on diagnosis information for mechanical equipment

He Zhengjia<sup>1,2</sup>, Cai Gaigai<sup>1,2</sup>, Shen Zhongjie<sup>1,2</sup>, Cao Hongrui<sup>1,2</sup>, Li Bing<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**[Abstract]** The traditional reliability analysis has such shortcomings that it relies on probability statistics with the large sample statistical data. This study proposes two operation reliability assessment methods which use running condition monitoring information to realize the reliability evaluation under small sample. They are the reliability evaluation methods based on the normalized wavelet information entropy and the damage quantitative identification respectively. Vibration signals of mechanical equipment are decomposed and reconstructed by means of second generation wavelet package to acquire decomposed signals in sub-frequency bands, so that full condition information of running equipment can be adequately used. We take relative energy in each sub-frequency band to calculate normalized information entropy. The reliability degree, an important reliability index, is transformed by using the normalized wavelet information entropy to assess operation reliability for running equipment. A new operation reliability assessment index called membership reliability degree is defined and an operation reliability assessment model is built based on quantitative damage diagnosis. Successful applications have been achieved to assess operation reliability of an oxy-generator compressor and the wheel bearings in electric locomotives, which demonstrated that the proposed approaches are reasonable and effective. The paper provides new approaches without large sample size, which are independent of probability to operation reliability assessment for large machinery.

**[Key words]** mechanical equipment; operation reliability; normalized information entropy; membership reliability degree