

Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法 在设备运行趋势分析中的应用

汪 攀, 刘毅敏

(武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北 武汉, 430081)

摘要: 基于某企业设备运行时轴承状态自上次检修以来的历史数据, 采用 Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 检验相结合的方法对其运行趋势进行分析, 并与一元线性回归法分析结果相比较。结果表明, Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法相结合, 适用于设备运行状态的趋势分析, 可在基于状态监测的预防性维修工作中推广应用。

关键词: 设备检修; 预防性维修; 状态监测; Sen's 斜率估计; Mann-Kendall 法

中图分类号: TN911.7 文献标志码: A 文章编号: 1674-3644(2014)06-0454-05

设备故障严重影响企业的市场竞争力。在设备发生故障后才进行维修, 不但增加了检修时间, 还提高了备件成本, 给生产带来很大影响, 而基于设备状态监测的预防性维修则可以有效地避免过剩维修或维修不足^[1]。

设备运行状态的趋势分析是基于状态监测的预防性维修的重要基础。设备出现故障前都会有一些可以观察到的信号(如温度、振动、噪声等)变化, 这些信号属于时间序列。时间序列的趋势分析通常采用线性回归算法, 但这种算法的斜率受异常值的影响较大^[2]。而在实际生产中, 设备运行状态数据的分布特征不明确, 且在设备运行过程中受环境等因素的影响, 其可能存在部分异常值, 因此采用线性回归算法不能得到精确的分析结果。非参数检验法 Sen's 斜率估计法和 Mann-Kendall 法则不受异常值的影响, 更适宜于存在异常值的时间序列的趋势分析。Sen's 斜率估计法计算的是序列斜率对的中值, 抗噪性强, 但不能实现序列趋势的显著性判断。非参数检验 Mann-Kendall 法不需要样本遵从一定的分布, 可以实现序列趋势的显著性判断, 但不能得到序列的斜率^[2]。因此, 本文采用 Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法相结合的方法来分析设备的运行趋势。

1 预防性维修系统框图

预防性维修系统采用离线数据来评估设备的

状态, 其流程如图 1 所示。

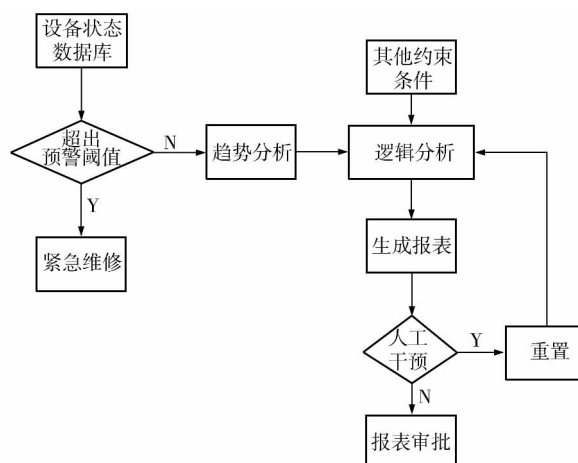


图 1 预防性维修系统流程

Fig. 1 Flow chart of the preventive maintenance system

2 Sen's 斜率估计

采用 Sen's 斜率估计法计算序列的斜率 β 。斜率 β 表示此序列的平均变化率以及时间序列的趋势, 当 $\beta > 0$ 时, 序列呈上升趋势; 当 $\beta = 0$ 时, 序列趋势不明显; 当 $\beta < 0$ 时, 序列呈下降趋势。

对于时间序列 $x_t = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, Sen's 斜率的计算公式为

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (1)$$

式中: Median 为取中值函数。

收稿日期: 2014-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174106)。

作者简介: 汪 攀(1987-), 男, 武汉科技大学硕士生。E-mail: fromwp@163.com

通讯作者: 刘毅敏(1973-), 女, 武汉科技大学副教授。E-mail: 94095806@qq.com

3 Mann-Kendall 法检验

采用 Mann-Kendall 法判断序列的突变点以及每段区间的趋势情况,实现序列的显著性判断。

3.1 检验序列的趋势

对时间序列 $x_t = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 作如下假设^[3]:

(1) H_0 假设。假设序列中的数据为独立同分布随机样本,即无显著趋势。

(2) H_1 假设。假设序列存在上升或下降单调趋势。

在 H_0 假设下,定义检验统计量 S 为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

其中, sgn 为符号函数, $\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases}$ 。

式(2)中,当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 近似服从正态分布。将 S 标准化得到 Z ,利用统计检验值 Z 进行显著性检验,其公式如下:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$\text{var}(S) = (n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5))/18 \quad (4)$$

式中: n 为序列中数据的个数; m 为序列中结(重复出现的数据组)的个数; t_i 为结的宽度(第 i 组重复数据组中的重复数据个数)。

采用双边趋势检验,在给定显著水平 α 下,当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时,接受 H_0 假设,即趋势不显著;否则接受 H_1 假设,即 $Z > Z_{1-\alpha/2}$ 表明序列呈显著上升趋势, $Z < -Z_{1-\alpha/2}$ 表明序列呈显著下降趋势。

3.2 检验序列的突变点

构造一个序列^[4]:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

其中, $r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i)。$

定义统计变量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k = 1, \dots, n) \quad (6)$$

其中, $UF_1 = 0, E(S_k) = (k(k+1))/4, \text{var}(S_k)$

$$= (k(k-1)(2k+5))/72。$$

UF_k 为标准正态分布,是按时间序列 x 的顺序 (x_1, x_2, \dots, x_n) 计算出的统计量序列。给定显著性水平 α ,查正态分布表,若 $|UF_k| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。按时间序列 x 的逆序 (x_n, \dots, x_2, x_1) ,重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k, k = (n, n-1, \dots, 1), UB_1 = 0$ 。通过分析序列 x 可以进一步分析序列的变化趋势。当 UF_k 或 UB_k 的值大于 0 时,则表明序列呈上升趋势,其值小于 0 则表明呈下降趋势。当统计量 UF_k 或 UB_k 的值超过显著性水平范围时,表明上升或下降趋势显著。当 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时刻。

4 设备运行趋势分析实例

4.1 数据来源

某企业有一套设备运行状态监测系统,负责全厂 2000 余台设备状态数据的采集。本文使用的数据来自该企业某个油泵 2013 年 12 月 1 日至 2013 年 12 月 30 日期间设备运行时的轴承前端 L 值、轴承前端水平振动值和轴承前端温度值(以下分别简称为 L 值、振动值和温度值)的记录。其中, L 值是指由瑞典 Vibrationsteknik AB 公司生产的 VTM36 轴承状态检测仪所特有的 L -方法测定的轴承状态值。

4.2 一元线性回归分析

首先对轴承 L 值、振动值、温度值的时间序列进行一元线性拟合,结果如图 2~图 4 所示。从图 2~图 4 可以看出,轴承 L 值、振动值、温度值均呈上升趋势。

线性拟合结果的斜率 k 表示各值的平均变化率。定义趋势幅度 p 为

$$p = (n-1)k \quad (7)$$

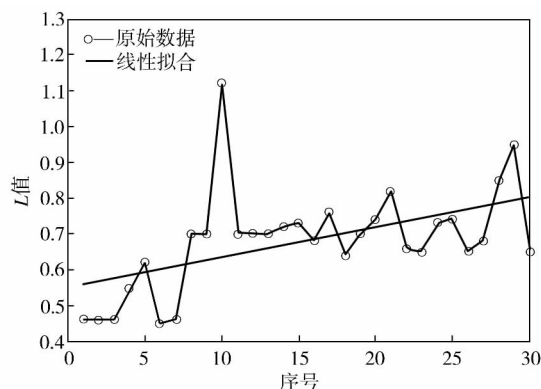


图2 轴承 L 值一元线性拟合曲线

Fig. 2 Linear fitting curves of the L value for the bearing

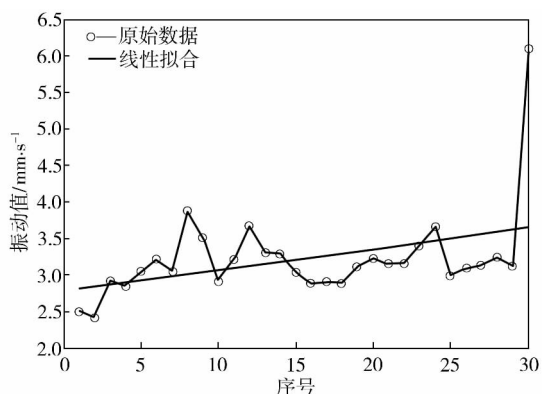


图3 轴承振动值一元线性拟合曲线

Fig. 3 Linear fitting curves of vibration value for the bearing

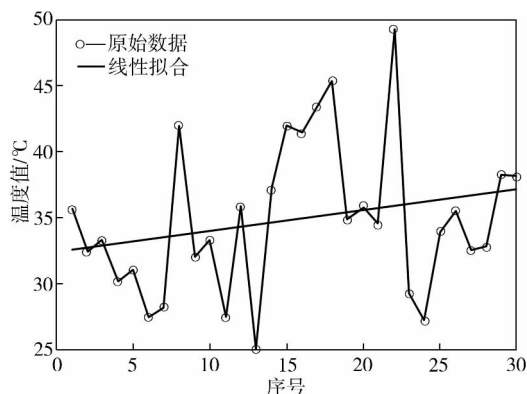


图4 轴承温度值一元线性拟合曲线

Fig. 4 Linear fitting curves of temperature for the bearing

序列的一元线性回归分析结果如表1所示。

表1 轴承L值、振动值和温度值的一元线性回归分析结果

Table 1 Linear regression analysis results of L value, vibration value and temperature for the bearing

	一元线性回归方程	斜率 k	30天趋势幅度 p	趋势
L 值	$y = 0.0084x + 0.5508$	0.0084	0.243	上升
振动值	$y = 0.0285x + 2.7829$	0.0285	0.827	上升
温度值	$y = 0.157x + 32.3905$	0.1570	4.553	上升

4.3 Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法分析

本实例中时间序列长度为30,采用统计量 Z 来进行趋势检验,检验中取显著性水平 $\alpha = 0.05$, $Z_{1-\alpha/2} = Z_{0.975} = 1.96$ 。

由 Sen's 斜率估计计算得到斜率 β 的值。

定义趋势幅度为

$$p = (n-1)\beta \quad (8)$$

采用 Mann-Kendall 法对该序列进行仿真,结果如图5~图7所示。观察图5~图7的 UF_k 统计量曲线可知轴承L值、振动值和温度值在每个时间段的变化趋势,大于零的区域为上升趋势,小于零的区域为下降趋势。 UF_k 与 UB_k 曲线在显著水平线以内的交点便是序列的突变点。

从图5可以看出,L值在第8个测量点(2013

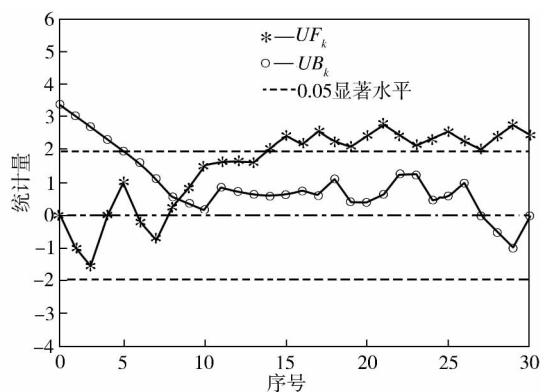


图5 轴承L值的Mann-Kendall统计曲线

Fig. 5 Mann-Kendall statistical curves of L value for the bearing

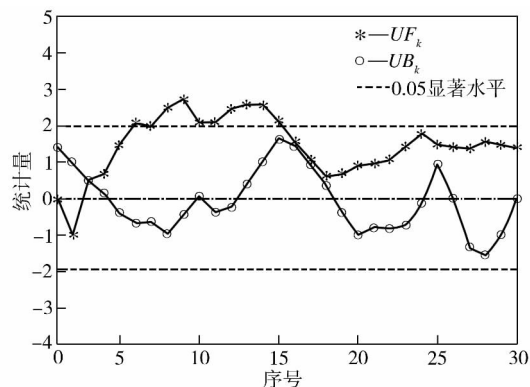


图6 轴承振动值的Mann-Kendall统计曲线

Fig. 6 Mann-Kendall statistical curves of vibration value for the bearing

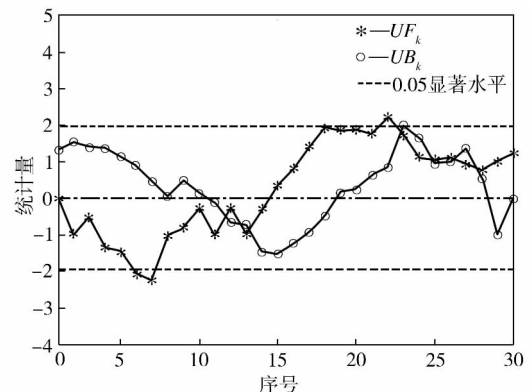


图7 轴承温度值的Mann-Kendall统计曲线

Fig. 7 Mann-Kendall statistical curves of temperature for the bearing

年12月8日)开始突变,从第14个测量点(2013年12月14日)开始呈显著上升趋势。

从图6可以看出,振动值在第3个测量点(2013年12月3日)开始突变,并从此开始,呈上升趋势。从第6个测量点(2013年12月6日)到第15个测量点(2013年12月15日)间,序列呈显著上升趋势。

从图7可以看出,温度值在第1个测量点(2013年12月1日)到第14个测量点(2013年12月14日)间,序列呈下降趋势,尤其在第6和

第 7 个测量点(2013 年 12 月 6 日、7 日),序列呈显著下降趋势;从第 15 个测量点(2013 年 12 月 15 日)开始,序列呈上升趋势。

Sen's 斜率估计和 Mann-Kendall 检验的结果如表 2 所示。

表 2 轴承 L 值、振动值和温度值的 Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 分析结果

Table 2 Analysis results based on Mann-Kendall and Sen's slope methods of L value, vibration value and temperature for the bearing

	统计检验值 Z	Sen's 斜率 β	30 天趋势幅度 p	趋势
L 值	2.873*	0.008 26	0.240	显著上升
振动值	1.374	0.012 48	0.362	上升
温度值	1.249	0.146 88	4.260	上升

注: *表示通过了 0.05 显著性检验。

比较表 1 和表 2 可知, Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法相结合的方法用于分析设备运行趋势时,得到的趋势结果与一元线性回归得到的趋势结果一致,轴承 L 值、振动值、温度值均呈上升趋势,其中 L 值呈显著上升; L 值、振动值、温度值在 30 d 内的增幅分别为 0.240、0.362、4.260,与一元线性回归得到的相应值仅分别相差 0.003、0.465、0.293,差值较小,表明本文方法具有可行性。

4.4 设备运行趋势分析

采用本文方法对设备运行趋势进行分析。定义幅度变化率 R 为

$$R = p/E \tag{9}$$

式中: E 为该序列的平均值。

式(9)中, $R>0$ 表示序列呈上升趋势, $R<0$ 表示序列呈下降趋势。该企业根据设备维修历史数据以及长期的维修经验,总结出了设备出现或者将要出现问题时的轴承 L 值、振动值和温度值的幅度变化率阈值分别约为 20%、20%和 30%,幅度变化率超过阈值时,表明设备运行趋势差。

轴承 L 值、振动值和温度值中,只要有一个指标的趋势结果为差,就进入逻辑分析模块,依据一系列逻辑分析,判断该设备是否需要检修,并最终生成检修报表。由 Sen's 斜率估计和 Mann-Kendall 法对该企业油泵的运行趋势进行分析,结果如表 3 所示。由表 3 可知,该设备轴承振动值、温度值的幅度变化率均在正常范围内,但轴承 L 值趋势幅度变化率达到了 36.41%,超过了其阈值(20%),故该设备须进入逻辑分析模块,对其

需要进行何种检修进行决策。

表 3 设备趋势分析结果

Table 3 Results of equipment trend analysis

	幅度变化率 $R/\%$	趋势结果	突变时间
L 值	36.41	差	2013.12.08
振动值	7.94	好	2013.12.03
温度值	12.65	好	2013.12.15

5 结语

将 Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法相结合用于设备运行趋势的分析,由 Sen's 斜率估计法计算时间序列的斜率,实现序列的趋势幅度估计,由 Mann-Kendall 法获得序列的突变时间及实现序列趋势的显著性分析,既可获得与一元线性回归法一致的结果,又可避免一元线性回归法受设备运行参数异常值影响的缺陷,适用于设备运行状态的趋势分析,可在基于状态监测的预防性维修工作中推广应用。

参 考 文 献

[1] 秦涛. 基于状态监测的铁路线路预防性维修策略研究[D]. 北京:清华大学,2012:8-9.

[2] 陈水蓉. 趋势分析在水质管理中的应用研究[D]. 天津:天津师范大学,2010:16-19.

[3] 张爱静. 东北地区流域径流对气候变化与人类活动的响应特征研究[D]. 大连:大连理工大学,2013:30-32.

[4] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:69-71.

(下转第 472 页)

Controlled blasting demolition of three frame brick structure buildings in complex environments

Liu Fugao^{1,2}, Zhong Dongwang¹, Zhu Kuan^{1,3}

(1. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. Zhejiang Jingan Blasting Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310011, China; 3. Gezhoubu Explosive Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: The general design principle, blasting parameters and safety preventive measures for the blasting demolition of three five-storey frame brick structure buildings are introduced. The determination of blasting cut height, selection of blasting parameters, design of the detonating network, pre-treatment method and corresponding safety protection measures are analyzed. Actual blasting effectiveness shows that the blasting design and all safety protection measures are reasonable and feasible.

Key words: blasting demolition; frame brick structure building; millisecond blasting; blasting parameter

[责任编辑 尚 晶]

(上接第 457 页)

Application of Sen's slope estimation and Mann-Kendall method in the trend analysis of equipment operation

Wang Pan, Liu Yimin

(College of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Based on the historical data of the bearing status of a certain equipment in a certain petrochemical company since its last maintenance time, the equipment's running trends were analyzed by combining Sen's slope estimation with Mann-Kendall method and the unitary linear regression method. Results show that the combination of the Sen's slope estimation with the Mann-Kendall method can be applied to equipment operating status trends' analysis. This approach can be used successfully in the preventive maintenance works based on condition monitoring.

Key words: equipment repair; preventive maintenance; condition monitoring; Sen's slope estimation; Mann-Kendall method

[责任编辑 郑淑芳]