

锅炉过热器剩余寿命非等间隔灰色预测

刘玉梅, 蒋寿生, 袁文华

(邵阳学院 机械与能源工程系, 湖南 邵阳, 422004)

摘要:为预测锅炉过热器剩余寿命,利用超声波技术对已运行12 a的某锅炉过热器管内壁氧化膜厚度进行无损测量,并以等间距时间序列为基础,把非等间距数列转化为等间距时间序列,进行1次累加生成处理,建立锅炉过热器剩余寿命非等间隔灰色预测模型GM(1,1);利用锅炉过热器管内壁氧化膜厚度部分检测数据对锅炉过热器剩余寿命进行非等间隔灰色预测。研究表明:锅炉过热器剩余寿命非等间隔灰色预测结果精度高,该锅炉过热器剩余寿命至少还有3.7 a。

关键词:锅炉;过热器;剩余寿命;灰色预测

中图分类号:TK223.3*2

文献标志码:A

文章编号:1672-7207(2010)03-1202-05

Non-equidistance grey forecast on residual life prediction of superheater in boiler

LIU Yu-mei, JIANG Shou-sheng, YUAN Wen-hua

(Department of Mechanical and Energy Engineering, Shaoyang College, Shaoyang 422004, China)

Abstract: In order to forecast residual life prediction of superheater in boiler, the thickness of oxide layer in the inside surface of the pipes for boiler superheater that was working for 12 a was tested using ultrasonic technique. Based on interval sequence that is turned from a series of non-equidistance, a non-equidistance grey GM(1,1) model of residual life about superheater in boiler was established after accumulating procession. The residual life about superheater in boiler was forecasted based on non-equidistance grey forecasting theory using data of experiment from the thickness of oxide layer in the inside surface of the pipes. The results show that the precision of non-equidistance grey forecasting is high, and the residual life about superheater in boiler is no less than 3.7 a.

Key words: boiler; superheater; residual life; grey forecasting

随着火力发电机组服役期的延长和调峰次数的增多,锅炉过热器已越来越成为火力发电厂中最常见和最频繁的易失效部件^[1-4]。由于电力需求迅猛发展,促使火力发电机组容量也迅速增大,导致锅炉过热器爆管造成的经济损失也明显增大^[5-8]。对于炉管内壁氧化层的测量,目前无损测试方法主要有超声波法、硬度法、阻抗光谱法、全息干涉法、电磁法^[9]。Cotter等^[10]认为采用超声波法测量炉管内壁氧化层厚度比其他方法更快捷、方便,有较大的优越性。因此,采用超声

波法定期对锅炉过热器氧化膜厚度进行检测,以此预测锅炉过热器剩余寿命,及时更换存在安全隐患的炉管,对确保锅炉过热器安全生产具有重要意义^[11],但这往往需做大量的相关试验。灰色系统理论中的非等间隔灰色预测方法^[12-14]为利用部分已知信息对系统运行行为和演化规律进行正确把握提供了新思路。为了预测与充分利用高温锅炉过热器的剩余寿命,本文作者以某火电公司锅炉过热器为研究对象,在已获得部分检测结果的基础上,利用非等间隔灰色预测方法

收稿日期:2009-08-10;修回日期:2009-10-25

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(09JJ6077)

通信作者:刘玉梅(1967-),女,山西大同人,副教授,从事机械优化设计及可靠性评价理论方法的研究;电话:0739-5305016;E-mail: sxliuyumei@126.com

对锅炉过热器的剩余寿命进行建模和预测。

1 锅炉过热器管内壁氧化膜厚度测量

锅炉过热器内壁金属在高温下形成的氧化膜与管内壁金属紧密结合,形成了一个固体与固体紧密结合的界面(氧化膜/管子内壁)^[15]。通过对锅炉过热器炉管的割管检查及超温爆管的管样检查发现:氧化膜是一层与管壁金属基体结合紧密的、致密的氧化、腐蚀产物层;在570℃以下时,所形成的氧化膜主要由 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 组成;在570℃以上时,氧化膜主要由 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 和 FeO 组成;在正常情况下,其厚度一般为0.1~1.0 mm,并且氧化层厚度由管壁的向火面到背火面依次减薄,锅炉过热器管也因氧化膜的存在而导致管壁的有效壁厚减小,管壁的应力也相应增加;同时,由于氧化膜对锅炉过热器管的导热性影响较大,从而导致管壁的导热性能变差,炉管管壁的平均运行温度大大提高,使管子长期处于超温状态,当发展到一定程度时,最终将导致锅炉过热器失效。

由于氧化膜/管内壁界面两侧物质的密度不同,声阻抗不同,给超声波的测量提供了可能。超声波检测技术对氧化膜厚度的检测与氧化膜自身的阻抗特性、氧化膜的厚度与超声波波长等参数相关。设母材阻抗为 Z_1 ,氧化膜声阻抗为 Z_2 ,锅炉过热器管基体声阻抗为 Z_3 ,且 $Z_1=Z_3 > Z_2$,则氧化膜厚度 δ 可表示为:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \arcsin \frac{2\gamma}{(m-1/m)\sqrt{100^2 - \gamma^2}} \quad (1)$$

式中: γ 为声压反射率,%; λ 为异质薄层中的超声波波长,m; m 为基体介质声阻抗与薄层介质声阻抗的比值。

当超声波垂直入射到氧化膜/管内壁的界面上时,由于钢的声阻抗与 Fe_3O_4 的声阻抗不同,会产生一定程度的反射。测量时,首先由超声波探测仪发出高频脉冲电压,通过电缆送至高频探头,在探头中产生频率为10~100 MHz的超声波,通过透声楔及耦合剂将超声波传至被测管的内壁中。当超声波遇到金属/氧化膜界面时,有1个反射回波至探头转换成高频脉冲电压,这个高频脉冲电压通过连接电缆反馈至超声波探测仪后,依据声波在氧化膜中的传播速度,可精确地读出内壁氧化膜的厚度,其测量精度可达 ± 0.05 mm。

2 非等间隔灰色预测建模方法

GM(1,1)模型^[16-17]是以等间隔序列为基础的,因而,使用GM(1,1)模型的前提条件是数据序列必须满足等时距的要求。而在实际工程特别是过热器内壁氧化膜的厚度监测领域,一般存在非等间距的监测数列问题,将非等间距数列作等间距处理后,再使用GM(1,1)模型,其结果并不一定符合实际情况。因此,必须把实际工作中所得到的非等间隔原始数据序列变换成等间隔序列,经1次累加生成后,才能近似地拟合成一阶微分方程即GM(1,1)模型。其建模方法如下。

设有非等间隔原始时间序列:

$$Y_i^{(0)}(t) = \{y_i^{(0)}(1), y_i^{(0)}(2), \dots, y_i^{(0)}(n)\} \quad (2)$$

其建模步骤如下。

Step 1: 求平均时间间隔 Δt_0 :

$$\Delta t_0 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i = \frac{1}{n-1} (t_n - t_1) \quad (3)$$

Step 2: 求各时段与平均时段的单位时段差系数 $\mu(t_i)$ 。

$$\mu(t_i) = \frac{t_i - i\Delta t_0}{\Delta t_0}, i \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (4)$$

Step 3: 求各时段总的差值 $\Delta y_i^{(0)}(t_i)$:

$$\Delta y_i^{(0)}(t_{i+1}) = \mu(t_i)[y_i^{(0)}(t_{i+1}) - y_i^{(0)}(t_i)] \quad (5)$$

Step 4: 计算等间隔序列的灰度 $x_i^{(0)}$:

$$x_{i+1}^{(0)} = y_i^{(0)}(t_i) - \Delta y_i^{(0)}(t_{i+1}), i \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (6)$$

于是,得到等间隔序列为:

$$X_i^{(0)} = \{x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}\} \quad (7)$$

Step 5: 对 $X_i^{(0)}$ 建立GM(1,1)模型,得时间响应函数。

对原始离散时间序列进行1次累加生成处理:

$$x_i^{(1)} = \sum_{j=1}^i x_j^{(0)}; i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

以新生成的时间序列 $x^{(1)} = \{x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}\}$ 为基础的一阶灰色微分方程GM(1,1)为:

$$dx^{(1)}/dt + ax^{(1)} = b \quad (9)$$

式中: a 和 b 为待辨识参数。

设参数向量 $\hat{X} = (a, b)^T$, 取 $Y_n = (x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots,$

$$x_n^{(0)})^T, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -Z(2) & 1 \\ M & M \\ -Z(n) & 1 \end{bmatrix}。其中, Z(i) = (x_i^{(1)} + x_{i-1}^{(1)})/2,$$

则向量 \hat{X} 的最小二乘解为:

$$\hat{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_n \quad (10)$$

一阶灰色微分方程 GM(1, 1)模型的离散响应方程为:

$$\hat{x}_{i+1}^{(1)} = (x_1^{(1)} - b/a)e^{-at} + b/a \quad (11)$$

式中: $x_1^{(1)} = x_1^{(0)}$ 。为了能与原始数据序列进行比较, 将非等间隔序列中的时间 t_i (即以 $i = t_i / \Delta t_0$) 代入模型, 即

$$\hat{x}_{i+1}^{(1)} = (x_1^{(1)} - b/a)e^{-a t_i / \Delta t_0} + b/a \quad (12)$$

将 $\hat{x}_{i+1}^{(1)}$ 计算值进行累计还原, 即可得到原始数据的估计值:

$$\hat{x}_{i+1}^{(0)} = \hat{x}_{i+1}^{(1)} - \hat{x}_i^{(1)} \quad (13)$$

一阶灰色微分方程 GM(1, 1)模型的拟合残差中往往还有一部分动态有效信息, 可以通过建立残差 GM(1, 1)模型对原模型进行修正。

采用后验差对一阶灰色微分方程 GM(1, 1)模型进行检验。记 0 阶残差为:

$$\varepsilon_i^{(0)} = x_i^{(0)} - \hat{x}_i^{(0)}; \quad i=1, 2, \dots, N \quad (14)$$

式中: $\hat{x}_i^{(0)}$ 是通过一阶灰色微分方程 GM(1, 1)模型得到的预测值。残差均值为:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^{(0)} \quad (15)$$

残差方差为:

$$S_1^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i^{(0)} - \bar{\varepsilon})^2 \quad (16)$$

原始数据均值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{(0)} \quad (17)$$

原始数据方差为:

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^{(0)} - \bar{x})^2 \quad (18)$$

为此, 可以计算以下后验差检验指标。

后验差比值 C 为:

$$C = S_1 / S_2 \quad (19)$$

小误差概率 P 为:

$$P = P\{|\varepsilon_i^{(0)} - \bar{\varepsilon}| < 0.6745 S_2\} \quad (20)$$

按照上述 2 项指标, 可从表 1 所示的精度检验等级中查出一阶灰色微分方程 GM(1, 1)模型预测时的精度等级。

表 1 精度检验等级

Table 1 Testing grade of precision		
预测精度等级	P	C
好(Good)	> 0.95	< 0.35
合格(Qualified)	> 0.80	< 0.5
勉强(Just mark)	> 0.70	< 0.45
不合格(Unqualified)	0.70	0.65

3 锅炉过热器剩余寿命预测

某电厂 1 号炉于 1990 年投产, 截止到 2005 年 1 月大修, 机组共运行 4 500 d, 启停 53 次。其过热器材料为钢 102, 设计压力为 13.7 MPa, 设计温度为 540 。采用配高温探头(测温范围为 10~600)的超声波测厚仪 DM4DL 对 2005 年 1 月大修后的锅炉过热器向火面管内壁氧化膜厚度进行无损测量, 其检测结果如表 2 所示。

表 2 锅炉过热器管内壁氧化膜厚度测量结果

Table 2 Measurement results of thickness of oxide layer in inside surface of pipes for boiler superheater					
时间间隔/d	0	88	204	310	408
氧化膜厚度/m	3.496	3.544	3.597	3.612	3.631

根据表 2, 由式(3)可得锅炉过热器向火面管内壁氧化膜厚度非等间隔灰色预测的平均时间间隔 $\Delta t_0 = 102$ d, 由式(4)可得知锅炉过热器向火面管内壁氧化膜厚度非等间隔灰色预测的单位时间差系数 $\mu(t_i) = \{-0.137, 0, 0.039, 0\}$, 故各时段总的差值 $\Delta x_i^{(0)}(t_i) = \{-0.066, 0, 0.006, 0\}$ 。等间隔点的灰度为:

$$X_j^{(1)}(t_i) = \{3.496, 0, 3.550, 6, 3.597, 0, 3.611, 4, 3.631, 0\}$$

由以上数据建立 GM(1, 1)模型:

$$\hat{x}_{i+1}^{(1)} = 498.972 \exp(0.007\ 084\ 5t_i/102) - 495.476 \quad (21)$$

将 $\hat{x}_{i+1}^{(1)}$ 计算值进行累计还原,即可得到锅炉过热器向火面管内壁的氧化膜厚度非等间隔灰色预测的估计值 $\hat{x}_{i+1}^{(0)}$:

$$\hat{x}_{i+1}^{(0)} = 3.522\ 5 \exp(0.007\ 084\ 5t_i/102) \quad (22)$$

锅炉过热器管内壁的氧化膜厚度非等间隔灰色预测结果如表3所示。对上述残差进行后验差检验,求得:

$$C < 0.35, P = 1.00 > 0.95$$

这表示锅炉过热器管内壁的氧化膜厚度非等间隔灰色预测精度为一级(好(Good))。可见:该方法建模数据少,计算简便,预测结果精度高,可在较大程度上缩短检测时间和节省实验费用。

表3 锅炉过热器管内壁的氧化膜厚度非等间隔灰色预测
Table 3 Non-equidistance grey forecast on thickness of oxide layer in inside surface of pipes for boiler superheater

参数	时间间隔/d			
	88	204	310	408
氧化膜测量厚度/m	3.544	3.597	3.612	3.631
氧化膜预测厚度/m	3.544	3.573	3.600	3.624
残差/m	0	-0.024	-0.012	-0.007
相对误差/%	0	-0.670	-0.330	-0.190

利用式(21)可以预测任意时刻锅炉过热器向火面管内壁的氧化膜厚度。可对若干年后所能达到锅炉过热器向火面管内壁的氧化膜厚度进行评估,以确定锅炉过热器能安全运行的年限。预测时采用目前较新的美国《管道腐蚀减薄验收准则》进行评定:

$$\delta_p = 0.875\delta_{nom} \quad (22)$$

式中: δ_{nom} 为正常时管道的壁厚,即无氧化膜时的壁厚; δ_p 为评定寿命时的最大腐蚀坑深度剩余壁厚。

已知锅炉过热器管壁厚度为 6.0 mm,由式(23)可知:当锅炉过热器经氧化,其壁厚为 5.25 mm 时,锅炉过热器达到最大寿命。根据式(22)所示的 $\hat{x}_{i+1}^{(0)}$ 计算式可知 锅炉过热器管壁厚 6.0 mm 的 12.5%估计在 1 351 d 后将全部氧化,经计算,其寿命还有 3.7 a。

4 结论

(1) 由于氧化膜/管内壁界面两侧物质的密度不同,声阻抗不同,可采用 10~100 MHz 的超声波无损测量锅炉过热器管内壁氧化膜厚度,其检测精度可达 ± 0.05 mm。

(2) 采用非等间隔灰色预测建模方法对锅炉过热器向火面管内壁的氧化膜厚度进行拟合和预测,结果表明:该方法建模数据少,计算简便,预测结果剪度高,对缩短检测时间、节省实验费用均具有一定的现实意义。

参考文献:

- [1] Evans H E, Mitchell G P, Lobb R C, et al. A numerical analysis of oxide spallation[J]. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, 1993, 440(1908): 1-22.
- [2] Evans H E. Spallation models and their relevance to steam grown oxides[J]. Materials at High Temperatures, 2005, 22(1/2): 155-166.
- [3] Steiner H, Konys J. Stresses in oxidized claddings and mechanical stability of oxide scales[R]. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2006.
- [4] 姜求志,王金瑞,马士林,等.火力发电厂金属材料手册[M].北京:中国电力出版社,2000.
JIANG Qiu-zhi, WANG Jin-rui, MA Shi-lin, et al. Manual of metal material used in coal-fired power plants[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [5] Ennis P J, Quadackers W J. Implications of steam oxidation for the service life of high-strength martensitic steel components in high-temperature plants[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007, 84(1/2): 82-87.
- [6] 钱余海,李美栓,张亚明.氧化膜开裂和剥落行为[J].腐蚀科学与防护技术,2003,15(2): 90-93.
QIAN Yu-hai, LI Mei-shuan, ZHANG Ya-ming. Cracking and spalling behavior of thin oxide scale[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2003, 15(2): 90-93.
- [7] 边彩霞,周克毅,胥建群,等.锅炉过热器蒸汽侧氧化膜瞬态应力的有限元分析[J].动力工程,2008,28(5): 696-700.
BIAN Cai-xia, ZHOU Ke-yi, XU Jian-qun, et al. Finite element analysis on transient stresses of oxide scales at steam side of boiler superheater[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(5): 696-700.
- [8] 鲁玉龙,薛守洪,徐蓓,等.火电厂 1 025 t/h 锅炉高温过热器爆管分析[J].腐蚀科学与防护技术,2008,20(3): 193-196.

- LU Yu-long, XUE Shou-hong, XU Pei, et al. Experimental studies on bursting problem of high temperature superheater of a 1 025 t/h boiler[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(3): 193-196.
- [9] 李萌盛, 王丽芳, 谢霞, 等. 硬度法预测锅炉高温管道的剩余寿命[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2004, 27(5): 518-521.
- LI Meng-sheng, WANG Li-fang, XIE Xia, et al. Estimation of the remaining life of boiler superheat tubes by the hardness concept[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2004, 27(5): 518-521.
- [10] Cotter D J, Michaels J E. High frequency ultrasonic thickness and acoustic velocity measurement methods for advanced material and component characterization[C]//8th European Conference on Nondestructive Testing. Barcelona, 2002.
- [11] 高宏波, 谢守明, 赵杰, 等. 在役电站锅炉导汽管组织状态评估与剩余寿命预测[J]. 热力发电, 2004(6): 71-76.
- GAO Hong-bo, XIE Shou-ming, ZHAO Jie, et al. Microstructure state evaluation and residual life prediction for steam conduit of boilers in service[J]. Thermal Power Generation, 2004(6): 71-76.
- [12] 王贵成, 曹平, 林杭, 等. 用灰色理论确定边坡最优监测点及安全系数[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(3): 574-578.
- WANG Gui-cheng, CAO Ping, LIN Hang, et al. Determination of optimum monitoring point of slope and safety factor using grey system theory[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(3): 574-578.
- [13] 张红, 李柱国, 陈兆能. 非等间隔阶跃灰色模型在滑油光谱分析中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(5): 619-621.
- ZHANG Hong, LI Zhu-guo, CHEN Zhao-neng. Unequal interval jump grey modeling and its application to the spectral analysis of lubricating oil[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(5): 619-621.
- [14] 袁文华, 鄂加强, 龚金科, 等. 柴油机连杆轴颈磨损量组合预测模型及应用[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(3): 71-74.
- YUAN Wen-hua, E Jia-qiang, GONG Jin-ke, et al. A combined forecasting model on wear rate of crankpin in diesel and its application[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(3): 71-74.
- [15] 谢国胜, 尹志民, 张德屯. 用内壁氧化膜测量技术预测过热器管剩余寿命[J]. 华北电力技术, 2003(4): 6-8.
- XIE Guo-sheng, YIN Zhi-min, ZHANG De-tun. Life prediction of superheater tubes by wall oxide film measuring technique[J]. North China Electric Power, 2003(4): 6-8.
- [16] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1986: 4-25.
- DENG Ju-long. Grey forecast and decision[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1986: 4-25.
- [17] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 10-40.
- LIU Si-feng, GUO Tian-bang, DANG Yao-guo. Grey system theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 1999: 10-40.

(编辑 陈灿华)