

文章编号:1673-5005(2010)02-0114-05

基于灰色系统理论的常压蒸馏装置腐蚀预测

王正方^{1,2}, 王 勇¹, 刘秀华³

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061; 2. 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061;
3. 淄博市特种设备检验研究所, 山东 淄博 255030)

摘要:针对某炼油厂炼制中东进口原油后常压蒸馏装置设备冲刷腐蚀明显加重的问题,在常压蒸馏塔顶换热器入口分配管弯头处进行定点测厚,对其厚度减薄情况进行监测。弯头壁厚数列是准光滑序列,它的一次累加生成具有准指数规律,可以建立灰色微分方程。针对此灰色腐蚀系统建立GM(1,1)模型,利用此模型对原始数据序列进行模拟的平均相对误差为1.90%,而通过对原始数据序列加上100进行平移,然后再从预测结果中扣除增加量的方法得到改进的GM(1,1)模型,平均相对误差为1.31%,模型精度得到提高。采用全部数据建立改进的GM(1,1)模型,对弯头的壁厚进行模拟,对未来可能的壁厚进行区间预测。结果表明:弯头在2 a的使用期内是安全的,3 a后弯头极有可能蚀穿;采用灰色系统理论对冲刷严重的部位进行寿命预测是可行的,有助于制定合理的检修周期,保障设备的安全。

关键词:腐蚀预测;灰色系统模型;GM(1,1)模型;弯头

中图分类号:TE 62; TE 985.9 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.023

Grey system prediction of corrosion on oil atmospheric distillation equipment

WANG Zheng-fang^{1,2}, WANG Yong¹, LIU Xiu-hua³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. School of Mechanical Engineering in Shandong University, Ji'nan 250061, China;
3. Boiler & Pressure Vessel Inspection Institute of Zibo, Zibo 255030, China)

Abstract: A refinery plant processes Middle East crude oil, so the equipment is exposed to washing erosion seriously. The elbow on the entrance of the atmospheric distillation tower top exchangers was always eroded. The thickness of elbow was measured every month, and the thickness change was monitored. The thickness series is quasi smooth sequence, and GM(1,1) model was established by grey system theory according to quasi exponent law. The average relative error is 1.90% using the model. Adding a number 100 to the thickness series of the elbow, then subtracting it from the result, the improved GM(1,1) model was established. The average relative error is 1.31%, and the prediction precision was increased. The full data were used to create an improved GM(1,1) model to predict the thickness of elbow in the future. The results show that the elbow life can reach 2 a, but can not reach 3 a. It is feasible to predict the elbow life using the grey system model for eroding corrosion, can help for setting down overhaul period and ensure the safety of equipment.

Key words: corrosion prediction; grey system model; GM(1,1) model; elbow

长期以来,我国炼化企业的生产装置一直沿用一年一次停车大检修的做法。目前常减压催化裂化等主要生产装置已经部分实现了三年一修^[1-2]。某炼油厂第三常减压装置加工进口中东原油,硫含量

超过1.5%,酸值在0.3 mg/g左右。中东原油轻油收率高,符合我国对燃料油的需求,但是常压蒸馏塔顶气相产品流量大,设备冲刷腐蚀严重。常压蒸馏

收稿日期:2009-06-16

基金项目:国家质量监督检验检疫总局科技项目(2005QK112)

作者简介:王正方(1971-),男(汉族),山东淄博人,高级工程师,博士,研究方向为压力容器与管道安全工程。

装置塔顶低温部位属于 HCl—H₂S—H₂O 型腐蚀^[3,4]。塔顶换热器入口分配管弯头处由于流体产生湍流,冲刷腐蚀特别严重^[5,8]。采用 RBI (Risk Based Inspection-基于风险的检测),可以对常减压装置进行风险评价,但是费用十分昂贵。RBI 只能评估整台设备或者整条管道风险的等级,不能对管线分段分析,对于这种由于冲刷腐蚀造成局部失效的形式并不适用^[9]。在生产中只能通过加强操作工人巡检的力度,发现泄露之后进行带压堵漏,或者采用外面包盒子处理,有时不得不关掉该组换热器,造成非计划检修,严重影响企业效益。灰色系统理论成功地用于社会系统、经济系统等不确定系统^[10]。进口原油由于产地不同,性质相差很大,影响腐蚀速度变化的因素很多,数据无规律性,笔者采

用灰色系统理论的方法对常压蒸馏装置的腐蚀问题进行研究。

1 腐蚀监测情况

炼制进口原油,采用一脱三注工艺,可以有效地减缓整个装置设备的腐蚀。用电阻探针在常压蒸馏塔顶测得的腐蚀速度最高达 2.6 mm/a,平均约为 1 mm/a,说明采用碳钢材料是可以的。但是,分配管弯头等部位由于流体的冲刷作用,局部腐蚀速度远高于直管段,多次发生泄露,造成非计划停车。塔顶换热器入口分配管弯头规格为 Φ219 mm×9 mm,材料为 20[#]钢。在弯头外部拐弯部位 100 mm 范围内,采用超声波测厚仪定点测厚的方法,每隔一个月测量弯头的壁厚,共测 18 次,数据见表 1。

表 1 弯头壁厚

Table 1 Elbow thickness

mm

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
第 1 点	8.83	8.81	8.85	8.74	8.36	8.36	7.85	7.65	7.53	7.14	7.54	7.36	7.03	6.65	6.24	5.84	5.63	4.86
第 2 点	8.92	8.88	8.05	8.87	8.56	7.81	7.62	7.52	7.44	6.83	6.85	6.53	6.25	6.23	5.83	5.33	5.23	5.39
第 3 点	8.87	8.87	8.23	8.23	7.89	7.63	7.99	7.14	7.06	7.22	6.32	6.36	6.51	6.31	6.01	5.62	5.04	5.06
第 4 点	8.86	8.56	8.75	7.96	7.65	7.36	7.46	7.01	7.11	6.85	6.71	6.57	6.36	6.01	5.78	5.69	5.43	5.13
平均值	8.87	8.78	8.47	8.45	8.115	7.79	7.73	7.33	7.285	7.01	6.855	6.705	6.5375	6.3	5.965	5.62	5.3325	5.11

2 GM(1,1)模型的建立

取弯头的壁厚为 X⁽⁰⁾,这是一个非负的序列, X⁽⁰⁾=(x⁽⁰⁾(1),x⁽⁰⁾(2),...,x⁽⁰⁾(n)),n=1~18。

X⁽¹⁾为 X⁽⁰⁾的一次累加生成,表示为

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)).$$

对 X⁽⁰⁾进行准光滑性检验,

$$\rho(k) = x^{(0)}(k)/x^{(1)}(k-1).$$

当 ρ(k) ∈ [0, ε], ε < 0.5 时,称 X⁽⁰⁾是准光滑序列。计算得当 k > 2 时,弯头壁厚数列为准光滑序列。

检验 X⁽¹⁾是否具有准指数规律:

$$\sigma^{(1)}(k) = x^{(1)}(k)/x^{(1)}(k-1).$$

当 σ⁽¹⁾(k) < 2 时,称 X⁽¹⁾具有准指数规律。计算得 σ⁽¹⁾(k) < 2,因此弯头壁厚数列为准光滑序列,它的一次累加生成具有准指数规律,满足光滑条件,可以建立灰色微分方程。

Z⁽¹⁾为 X⁽¹⁾的紧邻均值生成,Z⁽¹⁾=(Z⁽¹⁾(2), Z⁽¹⁾(3),...,Z⁽¹⁾(n)),其中

$$Z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1),$$

k=2~18,则

$$x^{(0)}(k) + \alpha x^{(1)}(k) = b$$

称为 GM(1,1)模型,一阶方程一个变量

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + \alpha x^{(1)} = b$$

为灰色微分方程的白化方程,其中 a, b 为待识别参数,称 a 为发展系数, b 为灰色作用量。a, b 通过 X⁽¹⁾的最小二乘法求得:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y,$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -Z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y = [(x^{(0)}(2)x^{(0)}(3)\dots x^{(0)}(n))]^T.$$

白化方程的解为

$$x^{(1)}(t) = \left(x^{(1)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-at} + \frac{b}{a}.$$

灰色微分方程的时间响应序列为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(1)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a}.$$

累减还原得到 X⁽⁰⁾的预测值

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)(1 - e^a)e^{-ak}.$$

采用 Matlab 语言编程计算出 $\hat{x}^{(0)}$ 的值,见表 2。

表 2 误差检验结果
Table 2 Error test results

序号	$x^{(0)}/\text{mm}$	GM(1,1)模型			改进的 GM(1,1)模型		
		$\hat{x}^{(0)}/\text{mm}$	残差 e/mm	相对误差 $\Delta/\%$	$\hat{x}^{(0)}/\text{mm}$	残差 e/mm	相对误差 $\Delta/\%$
1	8.870	8.8700	0	0	8.87	0	0
2	8.780	8.9097	0.1297	1.4776	8.8010	0.0210	0.2393
3	8.470	8.6362	0.1662	1.9625	8.5764	0.1064	1.2563
4	8.450	8.3711	-0.0789	0.93358	8.3523	-0.0977	1.1566
5	8.115	8.1141	-0.0009	0.010633	8.1286	0.0136	0.1675
6	7.790	7.8651	0.0751	0.96342	7.9054	0.1154	1.4812
7	7.730	7.6236	-0.1064	1.3763	7.6826	-0.0474	0.6128
8	7.330	7.3896	0.0596	0.81284	7.4603	0.1303	1.7782
9	7.283	7.1627	-0.1223	1.6783	7.2385	-0.0465	0.6382
10	7.010	6.9429	-0.0671	0.95784	7.0171	0.0071	0.1017
11	6.855	6.7297	-0.1253	1.8275	6.7962	-0.0588	0.8576
12	6.705	6.5231	-0.1819	2.7124	6.5757	-0.1293	1.9277
13	6.5375	6.3229	-0.2146	3.2828	6.3557	-0.1818	2.7802
14	6.300	6.1288	-0.1712	2.7176	6.1362	-0.1638	2.6002
15	5.965	5.9406	-0.0244	0.40824	5.9171	-0.0479	0.8032
16	5.620	5.7583	0.1383	2.4606	5.6984	0.0784	1.3958
17	5.3325	5.5815	0.2490	4.6698	5.4802	0.1477	2.7707
18	5.110	5.4102	0.3002	5.8743	5.2625	0.1525	2.9843

3 误差检验

预测模型的精度可以采用相对误差检验、关联度检验和后验差检验等方法^[1]进行检验,本文中采用相对误差检验(表 2),预测模型精度达到合格级别。残差为

$$e^{(0)}(i) = x^{(0)}(i) - \hat{x}^{(0)}(i)$$

残差平方和为

$$s = e^T e = 0.3866$$

相对误差为

$$\Delta(i) = \frac{|\hat{x}^{(0)}(i) - x^{(0)}(i)|}{x^{(0)}(i)} = \frac{|e^{(0)}(i)|}{x^{(0)}(i)}$$

平均相对误差为

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta(i) = 1.8959\%$$

4 GM(1,1)模型的改进

腐蚀系统是一个广义的能量系统,建立的 GM(1,1)模型是一个指数函数,用来建模的数据较小时,曲线靠近坐标轴,预测误差较大。在原始数据序列中加上一个数,建立改进的 GM(1,1)模型,使曲线偏离坐标轴,然后从预测结果序列中减去所加的数,可以提高预测精度,本文加数为 100。从表 2 可以看出,改进的 GM(1,1)模型平均相对误差为 1.3084%,模型的精度有所提高。原始数列平移对

误差的影响见表 3。

随着平移的加大,残差平方和与平均相对误差均呈减小趋势,平移距离超过 100 000 时,对提高模型精度失去作用。

表 3 原始数据数列平移对误差的影响
Table 3 Influence of original data series translation on error

序号	增加的数值	残差平方和 s	平均相对误差 $\Delta/\%$
1	100	0.1898	1.3084
2	200	0.1857	1.2911
3	300	0.1843	1.2850
4	400	0.1836	1.2820
5	500	0.1832	1.2801
6	600	0.1829	1.2788
7	700	0.1827	1.2779
8	800	0.1826	1.2773
9	900	0.1825	1.2767
10	1000	0.1824	1.2763
11	10000	0.1816	1.2729
12	100000	0.1815	1.2725
13	1000000	0.1815	1.2725

5 部分信息模型和新陈代谢模型

取全部 18 个月的数据建立模型,改进的 GM(1,1)模型平均相对误差为 1.31%,相对误差最大为 2.98%。事实上任何一个灰色系统在发展过程中随着时间的推移,会有一些随机的扰动因素加入其中,使系统的发展受到影响。在原油加工过程中,

原油的含硫量、活性硫的含量、氯化钠、氯化钙等杂质的含量不同,性质有很大差异,在蒸馏前需要进行脱盐处理,脱盐的程度也不同。操作人员在加工过程中需要加入缓蚀剂、水、碱液进行中和,这个灰色系统的参数时刻都在变化。取原始数列中第1~6月份的数据建立模型,预测第7~18个月的壁厚,见表4。可以看出用部分数据建立模型短期内预测精度较高。

表4 GM(1,1)模型误差检验结果

Table 4 Error test results of GM(1,1) model

序列	$x^{(0)}/\text{mm}$	$\hat{x}^{(0)}/\text{mm}$	残差 ε/mm	相对误差 $\Delta/\%$
1	8.87	8.87	0	0
2	8.78	8.7883	0.0083	0.0945
3	8.47	8.5541	0.0841	0.9929
4	8.45	8.3205	-0.1295	1.5325
5	8.115	8.0873	-0.0277	0.3413
6	7.79	7.8546	0.0646	0.8293
7	7.73	7.6224	-0.1076	1.3920
8	7.33	7.3908	0.0608	0.8295
9	7.283	7.1596	-0.1234	1.6944
10	7.01	6.9289	-0.0811	1.1569
11	6.855	6.6987	-0.1563	2.2801
12	6.705	6.4691	-0.2359	3.5183
13	6.5375	6.2399	-0.2976	4.5522
14	6.3	6.0112	-0.2888	4.5841
15	5.965	5.7830	-0.182	3.0511
16	5.62	5.5553	-0.0647	1.1512
17	5.3325	5.3281	-0.0044	0.0825
18	5.11	5.1013	-0.0087	0.1703

表4中误差平均值为1.5696,7~10月的误差平均值为1.2682,7~18月的平均误差为2.0385。由于炼制的原油来自十几个国家,混到一起炼制,腐蚀环境变化较大,对弯头的腐蚀速度也不一样,越早的腐蚀数据对弯头冲刷腐蚀速度的影响越小。保持用来建模的数据为6个,建立的模型为新陈代谢模型。新陈代谢模型是部分数据模型的一种,但是它通过增加最新的信息,去掉旧的信息,更能反映灰色系统未来短期内的变化情况,提高短期内预测的精度。

6 弯头壁厚的区间预测

由于整个装置的设备是按计划检修的,弯头的寿命是否可以坚持到下一次停车检修,是灰色预测需要解决的问题。弯头的承压管子的计算厚度^[12-13]为

$$\delta = \frac{p_c D_o}{2[\sigma]_t - p_c}$$

式中, δ 为计算厚度,mm; p_c 为承受压力,MPa; D_o 为

外径,mm; $[\sigma]_t$ 为设计温度下材料的许用应力,MPa。计算得: $\delta = 1.2538 \text{ mm}$ 。

采用第1~18月的全部数据,用改进的GM(1,1)模型预测第19~36个月的弯头可能的壁厚,见表5。

表5 弯头壁厚区间预测结果

Table 5 Prediction results of elbow thickness interval

预测月份	δ_m	δ_{\min}	δ_{\max}
19	5.0452	4.6826	5.4056
20	4.8284	4.4647	5.1882
21	4.6120	4.2472	4.9713
22	4.3960	4.0301	4.7549
23	4.1805	3.8135	4.5388
24	3.9654	3.5973	4.3233
25	3.7508	3.3816	4.1081
26	3.5366	3.1663	3.8935
27	3.3229	2.9515	3.6792
28	3.1096	2.7371	3.4654
29	2.8968	2.5232	3.2521
30	2.6843	2.3097	3.0391
31	2.4724	2.0967	2.8267
32	2.2608	1.8841	2.6146
33	2.0497	1.6720	2.4030
34	1.8391	1.4603	2.1919
35	1.6288	1.2490	1.9811
36	1.4190	1.0382	1.7708

到36个月的时候预测弯头壁厚为1.038~1.771 mm,也就是说弯头的使用寿命可达36个月,但是十分危险。从表5中可以看出,将检修周期定为24个月是安全的,如果计划延长到3a,是十分危险的,需要提前采取一些措施,例如在外面包盒子处理,增加加强板等。实际上弯头的平均腐蚀速度达到了2.51 mm/a,要实现常压蒸馏装置达到3a一次停车检修的目标,应该对弯头的材料进行升级,选择更加耐蚀的材料,例如Cr5Mo或者不锈钢。

冲刷腐蚀是由于油品的不稳定引起的,设备出入口、弯头、三通等部位腐蚀速率远大于直管段,虽然平均腐蚀速率最大为2.6 mm/a,但是设备局部由于流体冲刷的作用,远大于电阻探针测得的腐蚀速率。基于风险的检测可以给出整个装置的风险等级,但是不能解决局部冲刷腐蚀的问题。在常压蒸馏装置遭受冲刷腐蚀严重的部位,象常一线、常二线、常三线、常压炉转油线等部位,可以凭经验确定,或者利用GARMBIT建模,采用FLUENT进行数值模拟找出冲刷腐蚀严重的部位,进行定点测厚,取得数据建立灰色模型,进行灰色预测,制定合理的检修计划,避免安全事故的发生。

7 结束语

弯头遭受冲刷腐蚀,其残余壁厚的时间序列是准光滑序列,一次累加生成符合准指数规律,可以建立灰色GM(1,1)模型,进行剩余壁厚的预测。通过对模型的预测值与原始数据的误差检验,可以看出预测模型具有较好的精度。通过对原始数据序列增加一个数值,使模型曲线偏离坐标轴,得到改进的GM(1,1)模型,可以提高灰色系统模型的预测精度。预测结果表明弯头寿命在24个月内是安全的,要想达到36个月的使用寿命,需要在下次改造时对弯头的材料进行升级。灰色预测模型可以解决RBI不能对管道分段的问题,可用来单独对常压蒸馏装置冲刷严重的部位进行寿命的预测。

参考文献:

- [1] 胡洋,薛光亭.加工高酸值原油设备腐蚀与防护技术进展[J].石油化工腐蚀与防护,2004,21(4):5-8.
HU Yang, XUE Guang-ting. Corrosion of equipment in processing high acid value crude and development of corrosion prevention technologies [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2004, 21(4): 5-8.
- [2] 吴迪,王瑞旭.加工高硫高酸原油对胜利炼油厂装置运行的影响[J].齐鲁石油化工,2005,33(3):194-198.
WU Di, WANG Rui-xu. Influence of high sulfur and high acid crude oil processing on refining plant operation of Shengli refinery [J]. Qilu Petrochemical Technology, 2005, 33(3): 194-198.
- [3] 王正方,王勇,赫庆坤.基于灰色系统理论的常压塔顶腐蚀影响因素分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(5):119-123.
WANG Zheng-fang, WANG Yong, HE Qing-kun. Effect factors analysis of corrosion of oil atmospheric distillation tower based on grey system theory [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(5): 119-123.
- [4] WANG Zheng-fang, WANG Wei-qiang, QI Hui. Grey correlation analysis of corrosion on the first oil atmospheric distillation equipment [C]//Proceeding of the 2009 WASE International Conference on Information Engineering, IEEE Computer Society, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan c2009:373-376.
- [5] 刘小辉.炼油装置设备的腐蚀监测[J].石油化工腐蚀与防护,2002,19(4):8-11.
LIU Xiao-hui. Equipment corrosion monitoring of refinery process units in Maoming petrochemical company [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2002, 19(4): 8-11.
- [6] 毕延进,虞志华.炼制进口原油常减压装置的腐蚀问题[J].石油化工腐蚀与防护,2003,20(1):5-10.
BI Yan-jin, YU Zhi-hua. Corrosion of atmospheric-vacuum distillation unit processing imported crudes [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2003, 20(1): 5-10.
- [7] 胡洋,薛光亭,毕延进,等.腐蚀监测技术在胜利炼油厂的应用[J].化工设备与防腐,2002,5(1):60-62.
HU Yang, XUE Guang-ting, BI Yan-jin, et al. Application of corrosion monitoring technology on Shengli oil refinery plant [J]. Chemical Equipment & Anticorrosion, 2002, 5(1): 60-62.
- [8] WANG Zheng-fang, WANG Yong, ZHANG Jian. Grey correlation analysis of corrosion on oil atmospheric distillation equipment [C]//Proceeding of the 5th International Conference on Fuzzy System and Knowledge Discovering, IEEE Computer Society, Shandong University, Ji'nan, c2008:13-17.
- [9] 陈学东,王冰,杨铁成,等.基于风险的检测(RBI)在中国石化企业的实践及若干问题讨论[J].压力容器,2004,21(8):39-45.
CHEN Xue-dong, WANG Bing, YANG Tie-cheng, et al. Practice of RBI in Chinese petrochemical enterprises and discussion about its several questions [J]. Pressure Vessel Technology, 2004, 21(8): 39-45.
- [10] 刘思峰,郭天榜,党耀国.灰色系统理论及应用[M].北京:科学出版社,1999:40-77.
- [11] 邓化凌,王勇,宋云京.某一循环流化床锅炉II级过热器管材失效分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(5):84-87.
DENG Hua-ling, WANG Yong, SONG Yun-jing. Failure analysis for second superheater tubes in a circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(5): 84-87.
- [12] GB150-1998 钢制压力容器[S].国家技术监督局,1998-10-01.
- [13] HG20582-1998 钢制化工容器强度计算规定[S].国家石油和化学工业局,1998-03-01.

(编辑 沈玉英)