

结构与可靠性

基于灰色预测分析的船用低速柴油机轴承磨损研究

李孝连, 姚玉欣

(中船动力研究院有限公司, 上海 200129)

摘要: 基于某型船用低速柴油机安装的 XTS-W 轴承监控系统的监测数据, 建立了船用低速柴油机轴承磨损灰色系统预测分析模型。采用该模型对轴承磨损量进行预测, 并将预测值与系统监测值对比。结果显示: 在不充分满足灰色预测分析模型要求的情况下, 部分监测点的预测精度仍较高, 表明所建立的预测分析模型可用于预测船用低速柴油机轴承的磨损状况。

关键词: 船用低速柴油机; 轴承; 监控系统; 灰色预测分析

中图分类号: TK423.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)02-0025-04

Research on the Bearing Wear of Marine Low-Speed Diesel Engines Based on Grey Prediction Analysis

Li Xiaolian, Yao Yuxin

(China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200129)

Abstract: Based on the monitoring values of XTS-W bearing monitoring system installed in a marine low-speed diesel, a grey system prediction and analysis model for bearing wear was established. The bearing wear value was predicted using the model and was compared with the monitoring value. The results show that the method of grey prediction analysis is feasible in the prediction of bearing wear value of marine low-speed diesel engines.

Key words: marine low-speed diesel engine; bearing; monitoring system; grey prediction analysis

0 引言

现代科学技术的发展, 使船用低速柴油机的工作性能有了很大的提高; 与此同时, 对柴油机强度的要求也越来越高。而微小故障就可能影响柴油机的安全运行。对引发柴油机故障的部件的统计^[1]表明: 十字头轴承、曲柄销轴承和主轴承的占比高达 20% 以上, 是柴油机的第二大故障源; 其中, 十字头轴承和曲柄销轴承(动态轴承)约占 15%, 主轴承(静态轴承)约占 7%。因此, 监测、识别和预测轴承的工作状态, 准确判断轴承是否出现异常磨损, 对提高轴系统工作的可靠性, 保证船用低速柴油机的正常运行有着十分重要的意义。

1 轴承监控系统简介

目前轴承监控系统大多通过测量位移传感器表面到十字头在下止点时的位置间的距离来监控柴油机轴承的磨损情况。任意一处轴承的厚度变化都会导致一个或多个十字头的下止点位置发生变化。当磨损量达到限值时, 系统发出报警。采用该系统的主要目的是: 及时发现并预警轴承的故障, 以防止因轴承过度发热引发其他部件潜在损坏, 如十字头销、曲拐或曲柄箱变形, 曲柄箱燃爆等。另一个目的是: 基于轴承状况勘验检查, 而不是定时开验检查, 这样既可减少定时拆检轴承的工作, 也可避免因拆检导致轴瓦损坏风险提高。目前该技术已经广泛应用于实船, 船东反馈良好。

收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-10-15

作者简介: 李孝连(1986—), 工程师, 主要研究方向为船用柴油机结构设计, li-xiaolian@163.com。

本文介绍的是某型船用低速柴油机安装的 AMOT 公司的 XTS-W 轴承监控系统。该系统由传感器、接线盒、信号处理单元 (SPU)、接口单元和 PC 机等五部分组成^[2]。

1.1 传感器

系统采用的传感器包括位移传感器和温度传感器。该位移传感器是一种高速智能传感器,测量传感器表面到十字头滑块在下止点的位置间的距离,测量范围最大 5 mm,可精确到 0.01 mm^[3]。温度传感器为 PT100 热电阻温度传感器,是集温度、湿度采集于一体的智能传感器。

1.2 信号处理单元 (SPU) 与接线盒

信号处理单元 (SPU) 处理传感器的数据并存储于内部缓存器中,使用 RS485 总线与 PC 机实现实时数据和历史数据访问。为简化线路和便于维修管理,在传感器与信号处理单元 (SPU) 之间安装接线盒。

1.3 PC 机和接口单元

PC 机为触摸屏面板,提供形象直观的用户图形界面 (GUI)。轮机管理人员在用户图形界面操作和管理系统,察看监测的实时数据、故障报表、故障分析等,跟踪轴承运转状态。接口单元将机舱监测报警系统和船舶自动化系统连接在一起,同时为 PC 机配备 18 V 直流不间断电源。

2 轴承磨损分析研究

2.1 灰色预测模型

灰色预测模型是灰色系统理论最重要的内容之一,也是预测理论体系中一个新的研究分支^[4]。灰色预测模型基于最小二乘方法的指数拟合曲线,具有微分、差分、指数兼容等特性。针对轴承正常寿命周期中大量存在的灰色不确定性预测问题,利用少量有效数据和灰色不确定性数据 (4~5 个数据即可进行预测),来揭示轴承磨损的未来发展趋势。此外,建立灰色预测模型时,须要对数据进行累加生成和累减生成,通过灰色序列生成找寻数据演变的规律,弱化了随机因素的干扰,对于分析容易受各种随机因素影响的轴承磨损是非常适用的。

2.2 轴承磨损数据分析处理

某型船用低速柴油机正常工况下运行时,间隔固定时间,由 XTS-W 轴承监测系统的位移传感器测得轴承磨损数据。相关数据可见表 1。

在表 1 中,“时间 (天)”表示监测的周期数和本次监测与上次监测之间的时间间隔,本文采用等周期监测数据的灰色系统分析方法,数据采集的

平均时间间隔大约为 20 天,共开展 9 次采集。对监测的数据分别进行灰色分析检验,结果如表 2 所示。

表 1 轴承磨损数据 单位: μm

缸号	时间 (天)								
	1 (0)	2 (20)	3 (40)	4 (60)	5 (80)	6 (100)	7 (120)	8 (140)	9 (160)
1 缸	45	63	58	64	70	63	68	67	75
2 缸	42	37	45	49	48	52	47	53	58
3 缸	31	34	28	32	29	29	30	28	35
4 缸	61	65	58	52	68	59	65	68	74
5 缸	66	61	81	74	87	131	108	117	142
6 缸	22	42	34	49	42	36	44	48	54

注:监控系统设置的预报警点为 0.25 mm,报警点为 0.5 mm。

表 2 监测磨损数据灰色分析检验

缸号	准光滑条件	指数规律条件	C/P 预测结果	关联度检验
1 缸	满足	不满足	合格	差
2 缸	满足	不满足	勉强合格	差
3 缸	满足	不满足	不合格	差
4 缸	满足	不满足	不合格	好
5 缸	满足	不满足	合格	好
6 缸	满足	不满足	勉强合格	好

从上面的检验结果可以看出:六个缸的监测数据光滑性均较好,但不满足指数规律条件。用灰色分析方法对数据进行初步处理分析:NO.1 缸和 NO.2 缸轴承磨损监测数据的关联度不好;NO.3 缸和 NO.4 缸的轴承磨损监测数据的后验差比值 C 和小误差概率 P 的预测结果不合格;NO.6 缸轴承磨损监测数据的后验差比值 C 和小误差概率 P 的预测结果勉强合格。故选取 NO.5 缸的轴承磨损状态进行灰色系统分析预测。

(1) 给定原始数据组

$$x_0(t) = \{x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(9)\} \\ = \{66, 61, 81, 74, 87, 131, 108, 117, 142\} \quad (1)$$

(2) 光滑性检验

对原始监测磨损量数据列 $x_0(t)$ 做累加:

$$x_1(t) = \sum_{i=1}^t x_0(i) \quad t=1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

得到一个新序列:

$$x_1(t) = \{x_1(1), x_1(2), x_1(3), \dots, x_1(n)\} \\ = \{66, 127, 208, 282, 369, 500, 608, 725, 867\} \quad (3)$$

对 $x_0(t)$ 进行准光滑性检验:

$$\rho(t) = \frac{x_0(t)}{x_1(t-1)} \quad t=2, 3, \dots, n \quad (4)$$

得到光滑比 $\rho(t)$ 为: 0.924 2, 0.637 8,

0.355 8, 0.308 5, 0.355 0, 0.216 0, 0.192 4, 0.195 9。可见 $\rho(t)$ 大部分小于 0.5, 基本满足准光滑条件检验。

(3) 指数规律检验

灰色分析系统中采用含有指数函数的拟合及预测的函数, 所以应对数据序列进行准指数规律的检验。检验 x_1 是否具有准指数规律:

$$\sigma_1(t) = \frac{x_1(t)}{x_1(t-1)} \quad t = 2, 3, \dots, n$$

$$= \{1.924 \ 2, 1.637 \ 8, 1.355 \ 8, 1.308 \ 5, 1.355 \ 0, 1.216 \ 0, 1.192 \ 4, 1.195 \ 9\} \quad (5)$$

令: $a = \max(\sigma_1(t))$, $b = \min(\sigma_1(t))$, $\delta = a - b$, 当 $\delta < 0.5$ 时, 称 x_1 具有指数规律。 $\delta = a - b = 0.728 \ 3 > 0.5$, 虽然不满足指数规律条件, 但 0.728 3 与 0.5 十分接近, 可以对其建立灰色预测模型。这里 $\sigma_1(t)$ 称为序列 x_1 的级比。

2.3 轴承磨损分析预测

轴承磨损量灰色分析模型的动态微分方程为:

$$\frac{dx_1}{dt} + \alpha x_1 = \mu \quad (6)$$

式中: α 为发展灰数, μ 为内生控制灰数。

设 $\tilde{a}$ 为待估参数向量, $\tilde{a} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \mu \end{bmatrix}$, 利用最小二

乘法求解可得:

$$\tilde{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \quad (7)$$

式中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} [x_1(1) + x_1(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2} [x_1(2) + x_1(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2} [x_1(n-1) + x_1(n)] & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y_n = [x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(n)]^T.$$

计算得:

$$B = \begin{bmatrix} -96.5 & 1 \\ -167.5 & 1 \\ -245 & 1 \\ -325.5 & 1 \\ -434.5 & 1 \\ -554 & 1 \\ -666.5 & 1 \\ -796 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y_n = [61, 81, 74, 87, 131, 108, 117, 142]^T,$$

$$\tilde{a} = \begin{bmatrix} -0.104 \ 56 \\ 57.185 \end{bmatrix}$$

建立时间响应离散化函数:

$$\tilde{x}_1(k+1) = (x_0(1) - \frac{\mu}{\alpha})e^{-\alpha k} + \frac{\mu}{\alpha} = 612.91e^{0.104 \ 56 k} - 546.91 \quad (8)$$

预测数值:

$$\tilde{x}_0(k) = \tilde{x}_0(k+1) - \tilde{x}_0(k)$$

$$= \{67.556, 75.002, 83.268, 92.446, 102.64, 113.95, 126.51, 140.45, 155.93\} \quad (9)$$

(1) 残差大小检验: 对磨损预测值和实际磨损监测值的误差进行逐点检验。

按预测模型计算 $\tilde{x}_1(t)$, 并进行累减, 生成 $\tilde{x}_0(t)$, $t = 1, 2, 3, \dots, n$ 。分别计算残差及相对误差:

$$e(t) = x_0(t) - \tilde{x}_0(t)$$

$$= \{-6.555 \ 8, 5.998 \ 4, -9.268 \ 2, -5.445 \ 9, 28.365, -5.947 \ 4, -9.506 \ 5, 1.550 \ 1\} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{e(t)}{x_0(t)}$$

$$= \{-0.107 \ 47, 0.074 \ 054, -0.125 \ 25, -0.062 \ 597, 0.216 \ 53, -0.055 \ 069, -0.081 \ 252, 0.010 \ 916\} \quad (11)$$

(2) 关联度检验: 考察磨损预测值与建模序列曲线的形状接近程度。

关联度 r 是各关联系数 $\lambda(t)$ 累加后在 n 维空间的平均值。分辨系数 γ 是在 $(0, 1)$ 中取定的实数, 一般取 $\gamma = 0.5$ 。当关联度 $r > 0.6$ 时, 认为关联度可以接受, 即通过关联度检验; 否则关联度不可接受, 关联度检验不通过。

$$\lambda(t) = \frac{\min(|e(t)|) + \gamma \max(|e(t)|)}{|e(t)| + \gamma \max(|e(t)|)}$$

$$= \{0.758 \ 6, 0.779 \ 6, 0.670 \ 9, 0.801 \ 5, 0.369 \ 8, 0.781 \ 6, 0.664 \ 1, 1.000 \ 0\}$$

$$r = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\lambda(t)) = 0.728 \ 3 \quad (12)$$

结果显示满足关联度检验。

(3) 后验差检验: 对残差分布的统计特征进行检验, 由后验差比值 C 和小误差概率 P 共同描述。

记原始数据序列 x_0 及残差数列 e 的方差分别为 S_1^2 , S_2^2 , 则:

$$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_0(t) - \tilde{x}_0)^2 = 760 \quad (13)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (e(t) - \bar{e})^2 = 125.24 \quad (14)$$

$$\text{式中: } \tilde{x}_0 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_0(t), \quad \bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e(t).$$

计算得后验差比值: $C = \frac{S_2}{S_1} = 0.405 \ 9$, 小误差

概率: $P = P\{|e(t)| < 0.6745 S_1\} = 0.8889$ 。

磨损量预测模型精度等级 = Max { P 所在级别, C 所在级别}, 而 $0.95 < P = 0.8889 \leq 0.80$, $0.35 < C = 0.4059 \leq 0.50$, 根据表3可知: 磨损量灰色系统分析模型预测合格^[5]。图1为轴承磨损量灰色系统分析方法的 MATLAB 流程图。

表3 各指标数值及对应精度

指标	1级(好)	2级(合格)	3级(勉强)	4级(不合格)
P	$P \geq 0.95$	$0.95 < P \leq 0.80$	$0.70 \leq P < 0.80$	$P < 0.70$
C	$C \leq 0.35$	$0.35 < C \leq 0.50$	$0.50 < C \leq 0.65$	$C > 0.65$

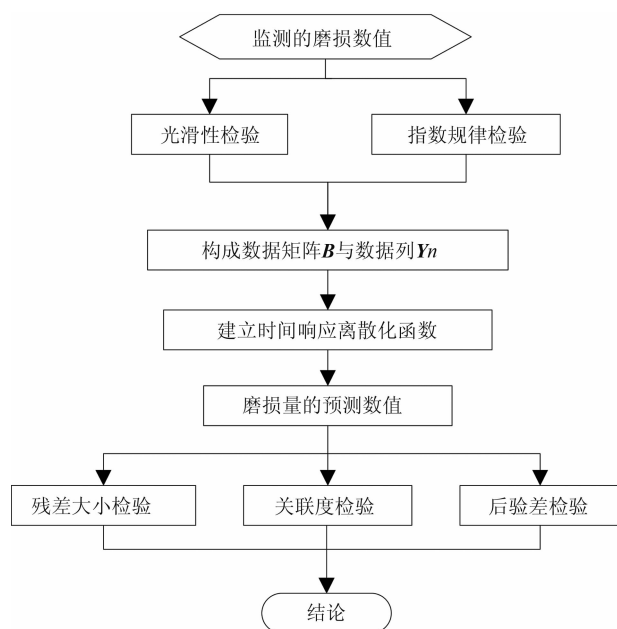


图1 磨损量灰色系统预测分析流程图

5号缸轴承磨损量灰色分析预测数值结果如表4所示。

5号缸轴承磨损量预测值与监测值相差不大。虽然还未达到磨损预报警的数值(250 μm), 但轴承磨损监测数据波动较大, 表明轴承的运行状况开始恶化, 可为轮机人员管理维护提供参考。

表4 5号缸轴承磨损量灰色分析预测值

时间期数	监测数值	预测数值	残差	相对误差/%
1	66			
2	61	67.555 8	-6.555 8	-10.75
3	81	75.001 6	5.998 4	7.41
4	74	83.268 2	-9.268 2	-12.52
5	87	92.445 9	-5.445 9	-6.26
6	131	102.635 1	28.365 0	21.65
7	108	113.947 4	-5.947 4	-5.51
8	117	126.506 5	-9.506 5	-8.13
9	142	140.449 9	1.550 1	1.09
10		155.930 1		

3 结论

在实际运行中船用低速柴油机轴承磨损的影响因素较多, 仅根据数学公式来预测实际的磨损量, 精度往往不高。采用 XTS-W 轴承状态监控系统监测的轴承磨损数据, 在不充分满足灰色系统预测模型要求的情况下, 部分监测点的预测精度仍较高, 表明所建立的灰色系统预测模型具有较高可靠性, 可用于预测船用低速机的轴承磨损状况。

参考文献

- [1] GEMDJIAN E. Early detection of developing crank-pin and crosshead bearing failures in reciprocating machines [C] // ISA. ISA Expo 2007, 2007: 1221-1278.
- [2] AMOT. XTS-W bearing condition monitoring system-software operation, installation & maintenance manual OM-MXTS-W00033 [R]. Richmond: AMOT, 2006.
- [3] AMOT. XTS-W bearing condition monitoring system-installation and mechanical commissioning manual OM-MXTS-W00039 [R]. Richmond: AMOT, 2006.
- [4] 姚天祥, 巩在武. 灰色预测理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 3.
- [5] 黄声享, 尹晖, 蒋征. 变形监测数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 113-115.