

改进欧拉算法在油液光谱分析趋势预测中的应用

郑长松, 马 彪

北京理工大学车辆传动国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 基于原子发射光谱油液分析是大型机械设备磨损状态监测与故障诊断的重要技术, 由于灰预测理论在趋势预测方面具有明显的优势, 文章利用油液原子发射光谱分析结果, 结合灰预测理论, 建立了某综合传动油液中金属元素 Fe 趋势变化的灰预测模型。在模型参数辨识求解上首次引入了改进欧拉算法, 解决了避免原灰预测模型在实际应用过程中出现的预测结果主要依赖于第一个实测值的问题, 使得预测结果更准确。将该算法结合原子发射光谱分析 Fe 元素浓度的阈值制定, 有效地捕捉到综合传动发生故障的征兆信息, 及时采取措施防止综合传动的故障, 具有很好的推广应用价值。

关键词 光谱油液分析; 改进欧拉算法; 综合传动; 趋势预测; 灰理论

中图分类号: TH165.3 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)04-1078-05

引 言

原子发射光谱分析法是利用物质受电能或热能激发后发射出特殊光谱的性质来判断物质组成的方法。任何物质都有特定的发射和吸收光谱, 通过测定物质的发射光谱就可以相应测定出物质的成份和含量^[1]。元素的浓度愈高, 则受激发后, 它产生的辐射线的强度也愈高, 从而得到元素光谱的定量分析值(浓度)。从机械设备润滑系统中, 定期地、持续地采取油样并进行光谱分析, 就可以获得反映设备工作状态的各种信息及其变化^[2]。利用油液原子发射光谱分析进行大型机械设备的状态监测、故障预测是现在国内研究的重要课题之一^[3,4]。

任意一个复杂机械系统, 其将来的系统状态并不是完全孤立的, 必然与该系统现在和过去的状态存在着或多或少的联系, 预测技术正是基于这一点发展建立起来的。灰色理论冲破了经典数学的限制, 它把一切随机量都视为在一定范围内变化的灰色量。尽管表征系统行为特征的数据是杂乱无章的, 然而灰色理论却认为它同样具有某种功能, 具有某种因果关系, 只是不经数据处理, 难以识别, 而在数据生成以后, 其规律性就会显现出来, 灰色建模理论正是基于这样一种观点。灰色系统理论对样本容量的要求较低, 并可在不完全信息中通过一定的数据处理找出系统各因素之间的关系。

本文所研究的某军用履带装甲车的综合传动, 其故障产生及发展过程具有不确定性因素, 因此我们可以将其视为一

个灰色系统。灰色理论用于故障预测的原理是把被预测系统看成是一个灰色系统, 利用存在的已知信息去推知含有故障模式的不可知信息的特性、状态和发展趋势, 并对未来故障的发展作出预测和决策。

1 传统 GM(1, 1) 模型的建立^[5]

对于动态系统的预测, 最为有效的工具就是灰色 GM 模型, 其中应用最广泛的就是 GM(1, 1) 模型, 该模型是由一个单变量的一阶微分方程所构成的, 建模必须基于动态系统的非负观测数据序列。

设非负离散数据序列为 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$, GM(1, 1) 模型要求处理的数据具有一定的平滑性、非负性等。

从灰理论 GM(1, 1) 的建模过程来看, 灰色预测模型的可靠性及预测精度在很大程度上取决于原始数据列 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ 的光滑性, $x^{(0)}(k) = (k = 1, 2, 3, \dots, n)$ 的光滑性越好, 灰色模型的预测精度越高, 改善 $x^{(0)}(k)$ 的光滑度是提高 GM(1, 1) 模型精度的有效方法。其光滑性和原始数据序列的级比有关, 定义级比

$$\delta(k) = \frac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

当 $\delta(k) \in \left(-e^{-\frac{1}{n+2}}, e^{\frac{1}{n+2}}\right)$, 能保证原始序列 GM(1, 1) 模型有较高的精度; 若 $\delta(k) \notin \left(-e^{-\frac{1}{n+2}}, e^{\frac{1}{n+2}}\right)$, 则必须对原始数据序列进行预处理, 常用的方法有: 平移变换、对数变

收稿日期: 2008-04-08, 修订日期: 2008-07-16

基金项目: 车辆传动国家重点实验室基金项目(9140C3406070705)和高等学校学科创新引智计划项目(B08043)资助

作者简介: 郑长松, 1975年生, 北京理工大学讲师 e-mail: zhengyuanye@126.com

换、方根变换。

对满足 $\delta(k) \left[-e^{-\frac{1}{n+2}}, e^{\frac{1}{n+2}} \right]$ 的数据序列, 首先要弱化其随机性, 突出它的内在规律性, 采用累加算法, 对 $x^{(0)}$ 进行一次累加生成处理, 即可得到一个生成序列 $x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$, 其中

$$x^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k x^{(0)}(m), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

对生成序列 $x^{(1)}$ 建立一阶线性微分方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} = ax^{(1)} = u \quad (3)$$

a, u 为待辨识参数, 用最小二乘法求解可得

$$\hat{a} = [a \quad u]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N^T \quad (4)$$

式(4)中

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

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix}$$

求出 $\hat{a}$ 后, 就可得到微分方程的解

$$\hat{x}^{(1)}(k) = \begin{cases} x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \\ x^{(0)}(k) - \frac{u}{a} e^{-a(k-1)} + \frac{u}{a} \end{cases} \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

对 $\hat{x}^{(1)}$ 序列作一次累减生成, 即可得到原始数据序列的模型

$$\begin{cases} \hat{x}^{(0)} = x^{(0)}(1) \\ \hat{x}^{(0)}(k) = (1 - e^a) \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-a(k-1)} \end{cases} \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

GM(1, 1) 模型中, 参数 a 为发展系数, 它反映了 $\hat{x}^{(0)}(k)$ 和 $\hat{x}^{(1)}(k)$ 的发展趋势。 u 为灰色作用量, 其作用量是外生的, 即外部加入的, 或者说事先给定的。灰作用量的存在,

是区别灰色建模与一般输入输出建模的试金石, 是内涵外延化的体现, 是灰色系统理论着重系统内涵开发的表现, 也是灰系统观点与灰箱观点的重要分水岭。

2 模型精度检验

灰色模型的主要用途之一便是进行预测, 只有通过检验的模型才能用来作预测。灰色预测模型精度检验方法一般有三种: 残差大小检验法: 以模型计算值与原始值之差来检验, 检验每个拟合值与原始值的接近程度如何, 是一种直观的算术检验方法; 关联度检验: 是验证两条函数曲线(在此为原始序列曲线与模型计算数据模拟曲线)的几何形状相似性、接近度的检验; 后验差检验: 是按残差分布统计特征来检验的一种方法, 是能反映出拟合度好坏的一种统计规律。在以上三种检验法中, 常用的是后验差检验法。

设原始数据序列为 $x^{(0)}$, 相应的模型模拟序列为 $\hat{x}^{(0)}$, 则残差序列 ε 为

$$\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

原始数据序列 $x^{(0)}$ 的均值、方差如下

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k) \quad (8)$$

$$s_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - \bar{x})^2 \quad (9)$$

残差序列 ε 的均值、方差如下

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(k) \quad (10)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon})^2 \quad (11)$$

指标 c 是后验差检验的两个重要数据。 $c = \frac{s_2}{s_1}$ 称为均方差比值, c 越小, 表明模型的精度越高; 模型的精度等级划分如表 1 所示^[6]。

Table 1 The distinguishing of model precision

检验参数	精度等级			
	一级(好)	二级(合格)	三级(勉强)	四级(不合格)
均方差比值 c	$c \leq 0.35$	$0.35 < c \leq 0.50$	$0.50 \leq c < 0.65$	$c \geq 0.65$

从上面的建模过程可以看出: 模型具有微分、差分、指数兼容的性质, 因此其性质是非唯一的, 是灰的; 模型参数严格地说是可调的, 非唯一的, 因此参数是灰的; 模型的结构, 随时间而变换, 因此结构是灰的; 模型形似微分方程, 却不是一般的微分方程, 形似差分方程, 却不是一般的差分方程, 形似指数函数却不完全是指数函数, 这表明模型机理的非唯一性, 即模型构造机理是灰的; 模型是常数系数性质的, 然而却排斥某些数。因此模型与参数的包含关系是非唯一的, 即模型的分布是灰的。

3 灰模型的不足

灰色系统理论在许多科学领域中已有较多的应用, 它的灰模型 GM(1, 1) 通常是对时间、距离等进行等间隔采样序列进行预测。当然, 也可以对非等间隔的时间、距离进行采样序列预测^[7], 非等间隔灰色建模方法可归纳为两类: 一类是对非等间隔序列进行一次累加生成后, 将微分方程近似为差分方程建模求解^[8]; 另一类是先根据非等间隔序列构造出等间隔序列, 再利用等间隔序列建模求解^[9]。等间隔 GM(1, 1) 模型和非等间隔 GM(1, 1) 模型, 都是基于累加数

据序列,采用一阶单变量微分方程,对生成序列进行拟合,得到预测模型,其相应的微分方程如式(3)。

采用最小二乘法可以求出参数值 a, u , 然后得到微分方程的解。但是在实际的预测过程中,由于系统受到多方面的因素的影响,其结果并非一条平滑的函数曲线。同时,预测结果和实测结果的残差大小,很大程度上取决于对微分方程的求解。目前普通 GM(1, 1)模型中求解参数 a, u 大都取实际样本的初始值 $x^{(0)}(1)$ 作为初始条件,但这样的选取并非最优初始条件。实际样本的初始值与我们要预测的未来值之间关系并不密切,用这个值作为一个严格条件来确定预测模型是不够科学的。虽然边值条件对生成的微分方程中参数的估计值没有影响,但由式(5)和(6)可知生成序列和原始序列的预测值均与初始值 $x^{(0)}(1)$ 有关,它对预测值具有指数修正的作用。

4 改进欧拉算法灰预测模型

本文在 GM(1, 1)模型求解方面,引入改进欧拉算法。改进欧拉算法的优势在于求解微分方程时,其每一步的迭代算法都是依据前一步的结果来进行预测的,并对预测结果用梯形公式加以校正。结合油液分析预测,其预测模型的预测结果和前一个油样的分析结果有很大的相关性,将改进欧拉算法的每一个迭代步对应预测步,即可完全依据最近的一个测试结果来预测下一步的结果,这样能够得到比依据式(6)得到的预测结果更接近实测值。

改进欧拉公式^[10]如式(11)

$$\begin{cases} \hat{y}_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n) \\ y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [f(x_n, y_n) + f(x_{n+1}, \hat{y}_{n+1})] \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中, $\hat{y}_{n+1}$ 为第 $n+1$ 步的预测公式,而 y_{n+1} 为第 $n+1$ 步的校正公式。 h 为迭代步长。将该公式应用到式(3)的求解过程中,则式(11)中 $f(x_n, y_n) = u - ax^{(1)}(n-1)$, 结合

计算机编程,式(11)则改写成

$$\begin{cases} x_p^{(1)} = x^{(1)}(k) + h(u - ax^{(1)}(k)) \\ x_c^{(1)} = x^{(1)}(k) + h(u - ax_p^{(1)}) \\ x^{(1)}(k+1) = \frac{1}{2}(x_p^{(1)} + x_c^{(1)}) \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

式(12)可以用来计算 $x^{(1)}$ 序列的预测值,其中: h 为序列的步长,初始值 $x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$ 。再将预测值累减生成,即可得到 $x^{(0)}$ 序列在各离散点的预测值。

5 案例分析

通过上面所建立的油液分析预测模型,将其应用于某综合传动样机的可靠性实验故障预测。为保证能顺利完成寿命与可靠性试验,并且了解该科研产品在工作各个阶段的磨损情况,采用油液分析的方法对其工作过程进行全程监测,对所取的油样进行及时分析,并对光谱分析的结果进行预测,以此来达到对故障的预测。

根据综合传动油液分析状态监测,按照取样工况定时取样,表 2 为运行前期 20 个小时的油样光谱分析数据。

Table 2 The result of oil spectrum analysis

油样 编号	运行时间 / h	光谱分析/($\mu\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)			
		Fe	Cr	Pb	Cu
1	0	2.4	0.1	9.9	0.3
2	1	6.8	0.2	13.2	19
3	10	8.8	0.1	14.3	16.8
4	20	15.1	0.4	18.6	22.9

按照本文所介绍的建模方法,针对表 2 的油液监测数据,基于前期的实测数据建立欧拉算法的预测模型。对该综合传动的下一个取样点的金属元素浓度值进行预测,其结果和实测结果如表 3 所示。

Table 3 The result of testing and forecast value

油样 编号	运行时间/h	光谱分析实测值/($\mu\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)				预测值/($\mu\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)			
		Fe	Cr	Pb	Cu	Fe	Cr	Pb	Cu
1	0	2.4	0.1	9.9	0.3				
2	1	6.8	0.2	13.2	19				
3	10	8.8	0.1	14.3	16.8				
4	20	15.1	0.4	18.6	22.9	11.42	0.139 8	14.997	17.08
5	30	24.5	0.3	22.7	27.2	19.596	0.559 2	19.507	23.28
6	40	45.9	0.1	26.1	30.6	31.795	0.419 3	23.807	31.11
7	50	50.1	0.2	23.1	23.9	59.567	0.139 8	27.373	27.65
8	60	45.5	0.8	27.3	27.5	59.048	0.762	24.226	24.33
9	70	72.5	1	14.9	29	65.017	1.118 2	28.631	27.96
10	80	92.7	0.9	17.1	27.8	94.086	1.155 8	15.626	29.48
11	90					119.99			

从表 3 的预测结果和实测结果来看,前 5 个油样的预测结果基本符合,当预测第 6 个油样时,其预测值 Fe 和 Cr 浓度突然偏高,而此时的实测值也偏高。继续预测第 7 个油样

的 Fe 和 Cr 浓度,其值亦突然增加,而在第 10 个油样取样时,其实测值继续偏高(图 1)。说明该综合传动出现异常磨损,而其他合金元素 Cu 和 Pb 浓度没有出现异常,此时应在

以下的取样监测中加密取样。当预测第 11 个油样的 Fe 浓度时, 预测值达到了 $119.99 \mu\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ 。结合阈值制订 (见郑长松的学位论文), Fe 浓度连续两个油样超过了阈值, 说明该综合传动内部出现了故障。根据元素浓度相关性判断, 有

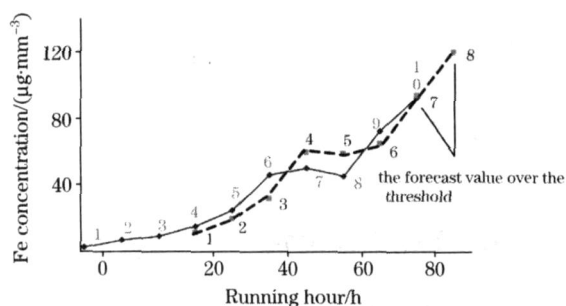


Fig 1 The forecast of the Fe concentration

可能是齿轮出现了异常磨损, 建议停机检查。

通过停机检查, 发现综合传动前传动轴轻微松动, 间隙增加。开箱检查, 发现输入轴花键齿轮磨损, 必须更换花键轴。分析齿轮磨损的原因, 是因为设计图纸上该花键齿轮模数有误。

6 结 论

(1) 提出了将改进欧拉算法应用于灰色理论模型的求解, 有效的提高了预测模型的精度。

(2) 结合阈值制定, 将油液光谱分析趋势灰预测应用到某综合传动的可靠性试验中, 成功地捕捉到了综合传动的故障异常征兆信息, 有效的防止了故障的发生。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Jin-wei, CHENG Wei, FENG Ya-hui (赵金伟, 程 薇, 封亚辉). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2004, 24(6): 733.
- [2] FENG Xin-lu, SHI Yong-gang, WANG Qing-hua, et al (冯新沪, 史永刚, 王清华, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 1999, 19(4): 559.
- [3] MIN Shun-geng, LI Ning, ZHANG Ming-xiang (闵顺耕, 李 宁, 张明祥). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2004, 24(10): 1205.
- [4] YANG Yur-wei, CHEN Guo (杨虞微, 陈 果). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2005, 25(8): 1339.
- [5] DENG Ju-long (邓聚龙). Gray Theory (灰理论基础). Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press (武汉: 华中科技大学出版社), 2002.
- [6] LIU Si-feng, GUO Tian-bang, DANG Yao-guo (刘思峰, 郭天榜, 党耀国). The Application and Theory of the Gray System (灰色系统理论及其应用). Beijing: Science Press (北京: 科学出版社), 1999.
- [7] WEI Hai-jun, WANG Hong-zhi, SUN Pei-ting, et al (魏海军, 王宏志, 孙培廷, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2005, 25(7): 1125.
- [8] ZHANG Hong, LI Zhuo-guo, CHEN Zhao-neng (张 红, 李柱国, 陈兆能). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2004, 24(5): 619.
- [9] GAN Min-liang, ZUO Hong-fu, YANG Zhong, et al (干敏梁, 左洪福, 杨 忠, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2000, 20(1): 64.
- [10] DING Li-juan (丁丽娟). Numerical Analysis (数值分析). Beijing: Beijing Institute of Technology Press (北京: 北京理工大学出版社), 2005.

Improved Euler Algorithm for Trend Forecast Model and Its Application to Oil Spectrum Analysis

ZHENG Chang-song, MA Biao

National Key Lab of Vehicular Transmission, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The oil atomic spectrometric analysis technology is one of the most important methods for fault diagnosis and state monitoring of large machine equipment. The gray method is preponderant in the trend forecast at the same time. With the use of oil atomic spectrometric analysis result and combining the gray forecast theory, the present paper established a gray forecast model of the Fe/Cu concentration trend in the power-shift steering transmission. Aiming at the shortage of the gray method used in the trend forecast, the improved Euler algorithm was put forward for the first time to resolve the problem of the gray model and avoid the non-precision that the old gray model's forecast value depends on the first test value. This new method can make the forecast value more precision as shown in the example. Combined with the threshold value of the oil atomic spectrometric

analysis, the new method was applied on the Fe/Cu concentration forecast and the premonition of fault information was obtained. So we can take steps to prevent the fault and this algorithm can be popularized to the state monitoring in the industry.

Keywords Oil spectrometric analysis; Improved Euler method; Power-shift steering transmission; Trend forecast; Gray theory

(Received Apr. 8, 2008; accepted Jul. 16, 2008)



P. W. J. M 鲍曼斯逝世

著名光谱化学专家 P. W. J. M 鲍曼斯于 2008 年 10 月 26 日逝世,享年 76 岁。

鲍曼斯 1932 年生于荷兰,于阿姆斯特丹大学化学物理系毕业。1961 年获博士学位。1961 ~ 1968 年间在阿姆斯特丹大学任教,从事原子光谱分析,发射光谱光源激发机理的研究。1966 年出版专著:“Theory of Spectrochemical Excitation”1968 年他进入 Eindhoven 的 Philips 研究实验室,曾任该实验室主任研究员

1970 年起他的研究方向集中在 ICP 光谱分析,包括光源装置、分析条件优化、基体效应、干扰校正、分析性能、数据评价、计算机控制、谱线数据库等,为奠定光谱分析基础做出了重要贡献。1987 年“Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy”专著出版,共两卷,他的另外一本著作:“Line Coincidence Tables for ICP-AES”是光谱干扰校正最重要的工具书。该书 1980 年第一版,1984 年第二版。1984 年起,他开始研究高分辨率光谱分析性能和谱线本征物理轮廓。谱线本征物理轮廓和光谱仪带通的卷积是最终解决光谱干扰校正,实现自动化分析的根本途径。

鲍曼斯 1972 年任 Spectrochimica Acta Part B 原子光谱学的欧洲编辑,1979 ~ 1994 年任 Spectrochimica Acta Part B 主编。他是科技电子出版的先行者之一,1989 年创刊了“Spectrochimica Acta Electronica”,他还是 Progress in Analytical Spectroscopy, ICP Information Newsletter, Talanta, Analyst 的编委,1991 ~ 1995 年间任《光谱学与光谱分析》顾问,鲍曼斯是 23 届国际光谱大会(CSI XXIII)主席,1990 年荣获美国化学会分析化学部授予的“光谱化学分析奖”。1995 年他被德国化学会分析化学分会光谱学组授予“Bunsen-Kirchhoff”奖。他通晓荷、英、德、法语言。受中国光谱学会之邀,鲍曼斯偕夫人曾于 1985 年访华并作“高分辨率光谱分析性能”的专题讲演。之后又到上海,桂林作学术访问和旅游。鲍曼斯退休后的兴趣和爱好集中在艺术和历史上。

鲍曼斯是中国光谱学界熟悉的老朋友,是世界著名的光谱化学专家,我们以沉痛的心情怀念鲍曼斯,敬重他对原子光谱分析所做出的重大贡献。

(《光谱学与光谱分析》期刊社 根据黄本立院士提供的材料整理)