第14卷 第3期 郑州工学院学报 Vol.14 No.3
1993年 9月 Journal of Zhengzhou Institute of Technology Sep. 1993

旋转机械故障的精密预报模式及方法*

韩 捷

(机械工程系)

摘 要: 大型旋转机械设备故障的特性预报，是一项具有重大生产实际意义的新课题。本文首先提出精密预报这一新概念，借助于灰色预测理论的 GM（1.1）模型对其预报模式进行了研究，提出精密预报的关键是把预报从传统的时域转向频域。文章还针对渐发性的旋转机械故障，对其精密预报方法进行了探讨。并用一台大型 CO_2 压缩机组的长期监测数据进行了验证。

关键词: 机械故障，灰色理论，预报

中图分类号: TP39; TP277.

大型旋转机械设备在运行过程中，经常发生许多难以预料的故障，这些故障往往给生产带来很大损失。针对这种情况，近年来，许多大型关键设备都配置了国内或国外的监测与诊断系统，这些系统在生产实际中发挥了巨大作用，使设备的现代化管理跃上了一个新的台阶。然而，这些系统一般是在机组已经出现故障以后，才能捕获其动态信息并诊断故障的性质。

随着科学技术的进一步发展以及生产实际的需要，现场往往盼望一种预报手段，能够预报机组在未来一定时间里的运行状态。其基本要求一是未来一段时间内机组会不会出现故障，二是如果会，可能是什么故障。显然，这两个问题的解决，就可以赢得时间，及早做出零部件配置，人员安排等抢修计划，大大减少损失。

在以往的工作中，人们仅仅注意到对时域参数的预测预报，比如振动 P−P 值等，并用其预测值来判断设备在未来所处的状态。这属于第一个问题，应该说，这是一个很大的进步。但是，它只能做出未来一段时间内机组会不会发生故障的预报，而不能就故障的种类，或者说是何种故障做出预报。显然，这是很不够的。人们希望了解未来某一时刻机组振动的能量分布状况，以达到了解故障性质的目的，这是第二个问题，是对故障更为精确的预报。本文旨在针对这一问题做一探讨。

所谓精密预报，是相对于机械故障诊断中的精密诊断而提出的。在故障诊断中常对有无故障的识别称为简易诊断，而对于数据处理后，识别故障种类，程度等性质的手段称为精密诊断。在预报中，可以同样称有无故障的预报为简易预报，而称能够预测出故障性质的预报为精密预报。

* 收稿日期: 1992−10−08

1　灰色预测与基本预报模式

可以采用许多种类的预测技术进行设备状态的预报，比如时序分析的 AR(n)、ARMA(m,n)模型等.

灰色理论是近年来兴起的一种新的预测理论，已在经济预测、震变预测和报刊发行等预测中取得了很好的效果. 在故障诊断界，近年来，许多学者也在探讨应用.

以灰色系统理论为基础的基本预报模式中，设反映设备运行状态的向量为 X，一般为等间隔的时间序列数据

$$X^{(0)}=[x^{(0)}_{(1)},\ x^{(0)}_{(2)},\ \cdots,\ x^{(0)}_{(n)}] \tag{1}$$

对上述数据序列建立其灰色预测微分模型 $GM(1,1)$

$$\frac{dx^{(1)}}{dt}+ax^{(1)}=\mu \tag{2}$$

为使模型只含一个变量，具有独立性，因此，可令

$$\hat{a}=[a,\mu]^{T} \tag{3}$$

计算出参数 a 和 μ，就有

$$\hat{X}^{(1)}(k+1)=[x^{(0)}_{(1)}-\frac{u}{a})e^{-ak}+\frac{u}{a} \tag{4}$$

方程(4)即为预报的基本模式，用这一模式，编制相应的软件，即可作出预测

$\hat{X}^{(1)}(n+1)$，$\hat{X}(n+2)\cdots\cdots$

这些值表征了未来时间里机组的运行状态，可以此为依据来评价机组的未来情况.

2　精密预报模式

设有等间隔的数据组时间序列

$$Y_1,\ Y_2,\ \cdots\cdots,Y_n \tag{5}$$

其中 $Y_i(i=1,2,\cdots\cdots n)$ 为等间隔的动态采样数据，即

$$\begin{aligned}Y_1&=[Y_1(1),\ Y_1(2),\cdots,\ Y_1(m)]\\Y_2&=[Y_2(1),\ Y_2(2),\cdots,\ Y_2(m)]\\&\cdots\cdots\\Y_n&=[Y_n(1),\ Y_n(2),\cdots,\ Y_n(m)]\end{aligned} \tag{6}$$

或

$$Y_i=[Y_i(1),\ Y_i(2),\cdots,\ Y_i(m)]\quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{7}$$

对其进行快速付里叶变换或其它频域转换处理，得出各组数据的幅值（相位）向量

$$X_1=[X_1(1),\ X_1(2),\cdots,\ X_1(L)]$$

$$X_2=[X_2(1),\ X_2(2),\cdots,\ X_2(L)] \tag{8}$$
$$\vdots$$
$$X_n=[X_n(1),\ X_n(2),\cdots,\ X_n(L)]$$

或

$$X_i=[X_i(1),\ X_i(2),\cdots,\ X_i(L)]$$
$$(i=1,2,\cdots,n) \tag{9}$$

将其按特征频率下的值组成预报序列

$$X_1^{(0)}=[X_1^{(0)}(1),\ X_2^{(0)}(2),\cdots,\ X_n^{(0)}(1)]$$
$$X_2^{(0)}=[X_1^{(0)}(2),\ X_2^{(0)}(2),\cdots,\ X_n^{(0)}(2)]$$
$$\vdots \tag{10}$$
$$X_L^{(0)}=[X_1^{(0)}(L),\ X_2^{(0)}(L),\cdots,\ X_n^{(0)}(L)]$$

或

$$X_j^{(0)}=[X_1^{(0)}(j),\ X_2^{(0)}(j),\cdots,\ X_n^{(0)}(j)]$$
$$(j=1,2,\cdots,L) \tag{11}$$

分别建立其微分预报模式 $GM_j(1,1)$ $(j=1,2,\cdots L)$

$$\frac{dX_1^{(1)}}{dt}+a_1X_1^{(1)}(1)=u_1$$
$$\frac{dX_2^{(1)}}{dt}+a_2X_2^{(1)}(1)=u_2$$
$$\vdots \tag{12}$$
$$\frac{dX_L^{(1)}}{dt}+a_LX_L^{(1)}(1)=u_L$$

或

$$\frac{dX_j^{(1)}}{dt}+a_jX_j^{(1)}(1)=u_j$$
$$(j=1,2,\cdots,L) \tag{13}$$

分别计算a和μ

$$\hat{a}_j=\begin{bmatrix}a_j\\ \mu_j\end{bmatrix}\quad (j=1,2,\cdots\cdots L) \tag{14}$$

得出其精密预报模式

$$X_1^{(1)}(k+1)=[X_1^{(0)}(1)-\frac{u_1}{a_1}]e^{-a_1k}+\frac{u_1}{a_1}$$
$$X_2^{(1)}(k+1)=[X_2^{(0)}(1)-\frac{u_2}{a_2}]e^{-a_2k}+\frac{u_2}{a_2}$$
$$\vdots \tag{15}$$

$$X_L^{(1)}(k+1)=[X_L^{(0)}(1)-\frac{u_L}{a_L}]e^{-a_l k}+\frac{u_L}{a_l}$$

即

$$X_j^{(1)}(k+1)=[X_j^{(0)}(1)-\frac{u_j}{a_j}]e^{-a_j k}+\frac{u_j}{a_j} \quad (j=1,2,\cdots,L) \tag{16}$$

按(16)的预报模式，即可给出一步预报谱值

$$X^{(1)}{}_{(n+1)}=[X_1^{(1)}{}_{(n+1)},\ X_2^{(1)}{}_{(n+1)},\ \cdots,\ X_L^{(1)}{}_{(n+1)}] \tag{17}$$

S步预报谱值

$$X^{(1)}{}_{(n+s)}=[X_1^{(1)}{}_{(n+s)},\ X_2^{(1)}{}_{(n+s)},\cdots,X_L^{(1)}{}_{(n+s)}] \tag{18}$$

预报谱值的变化就确定了机组未来时刻的运行状态和故障性质。比如预报值中1X的高值。预示着未来可能的故障为不平衡，而2X的高成分标志着不对中将占主导地位，等等。所有这些是简易预报所不能完成的。

3 预报序列值讨论

精密预报与简易预报的最大不同之处，在于其预报序列值不同。简易预报的预报序列一般是随时间变化的时域量，比如振动P-P值，部件随时间变化的磨损量等。精密预报则不同。它的序列值为若干组随时间变化的频域量，比如幅值，相位等。所以有必要对其进行转换方法和转换精度方面的讨论。

3.1 变换方法

3.1.1 快速富里叶法（FFT）

最常用的把信号从时域转到频域的方法是FFT法，大部分监测系统都有此功能，可以直接转换。

FFT对数据转换点数有严格要求，即必须满足：　　$N=2^m$，满足这一条件的有效转换谱线为$L=N/2.56$。这是采样定理所决定的。亦即，若进行全频带的精密预报，其模型总数为$N/2.56$个。

3.1.2 正交法

实际中，往往并不需要做全频带的预报，而是对感兴趣的几个频率下的值做出决断，这种情况下，可用正交法。

由三角函数的正交特性

$$\int_0^T \sin(ipt)\sin(jpt)dt=\begin{cases}0 & (i\neq j)\\ T/2 & (i=j)\end{cases}$$

$$\int_0^T \cos(ipt)\sin(jpt)dt=0 \tag{19}$$

某些关键频率下的幅值为

$$A_j=\frac{2}{T}\int_0^T X(t)\sin(jpt)dt \tag{20}$$

式中，A为幅值，T是周期，

将方程(20)离散化，则

$$A_j=\frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i\sin(jpt) \tag{21}$$

用这种方法,可以迅速求出某一特征频率下的值.

3.2 预报序列的精度

无论用 FFT 法还是正交法，保证其转换精度是十分重要的，不准确的预报序列会导致预报结果的误差增加，以致产生误报.

由于故障的识别依赖于随转速变化而改变的特征频率下的值，所以，如果采样间隔不随转速而变化，就会造成特征频率的漂移，而幅值产生较大误差．解决这一问题的方法是，采用整周期采样法，便可保证主要频率的准确定位，达到保证幅值精度的目的．以每周采 32 点，共采 16 周，总点数 N＝512 为例，则采样频率为

$$\Delta t=\frac{1}{32\cdot f} \tag{22}$$

其中，f为转速频率

$$\Delta f=\frac{1}{\Delta t N}=\frac{1}{16}f \tag{23}$$

即 $$f=16\Delta f \tag{24}$$

Δf 为分辨率，可以看出，转速频率总是 16 倍的 Δf，保证了准确的频率定位，十分便于跟踪，对于正交法来说，整周期采样更是其先决条件.

对于目前国际上推出的大部分系统来说，其采样多用同步整周期，比如美国的 *DDM* 系统、*TDM* 系统等．这些系统为本文所述方法提供了方便.

4 预报实例

将本文所述方法编程，对一台大型化肥企业的 CO_2 压缩机组的长期监测数据进行实例验证.

某大型化肥厂的 CO_2 机组在相当长一段时间内，$1X$ 谱值连续上升，$\frac{3}{4}X$ 则连续下降，$\frac{1}{4}X$ 则保持相对稳定．这样，原来怀疑机组有旋转失速下旬不得不重新考虑．然而，如果能够知道机组的进一步运行情况，将会大大有助于新的判断，机组的原始参数如表 1.

表 1 预报序列幅值

序列	1	2	3	4	5
1X	176.49	179.54	205.43	211.5	228.45
3／4X	109.95	104.35	83.28	60.5	47.2

为进一步推论 $1X$ 和 $\frac{4}{3}X$ 的能量发展情况，对这两个特征频率下的幅值进行预报。

分别对 $1x$ 和 $\frac{4}{3}x$ 的幅值建立灰色模型，经可靠性识别，得出以下模型，

$$X_1(k+1)=2416.7e^{0.0734k}-2240.25$$
$$X_2(k+1)=-450.85e^{-0.2847k}+560.8 \tag{24}$$

其模拟值和预报值列于表2.

表2　模拟计算值及预报值

	模　拟　值					预 报 值	
序　列	1	2	3	4	5	6	7
1x(mv)	176.49	184.03	198.05	213.13	229.36	246.82	265.62
3/4(mv)	109.95	104.38	80.47	61.75	47.39	36.37	27.91

预报表明，$1x$ 的值将会继续大幅度增加，$\frac{3}{4}x$ 的值将继续下降，有理由怀疑机组目前存在一种逐发的不平衡因素，而工艺状况良好。

若干天后，机组的实际值和预报值相差无几。停车检查，发现固联于转子上的一法兰上的螺栓被逐渐磨坏，显然，这是 1x 上升的主要原因。

5 结　　语

一般说来,用于监测机组运行的物理量以及它们的处理结果，往往随着故障的发展而逐渐加大，这一特点对于应用GM(1.1)模型进行预报有很重要的意义，符合GM(1.1)模型所建立的一阶微分方程和其指数形式的解。这是设备状态灰色预测方法合理性的内在机理。

从另一方面看，GM（1.1）用于精密预报对故障的趋势性效果较好，而对其随机影响反映有所不足。所以，如何在运用GM（1.1）进行精密预报的同时，加人随机因素的影响预测，是今后的主要工作。比如是否可以和反映随机影响较好的时间序列AR（n）或ARMA（m，n）联合应用。有关这一方面的研究内容，将另文发表。

根据本文的讨论，有如下结论:

①机械故障的精密预报是本文提出的新概念。理论与实践表明，这一理论和方法是可行的，对于实际生产具有重要意义。

②灰色预测模型GM（1.1）预报速度快，简单、合理，结果反映较好。但考虑到随机影响，其模型有改进的必要。

③保证预测序列值自身的精度，可采用同步整周期采样及其它措施。

④作为本方法的推广，也可用于其它处理结果的预报。

参 考 文 献

〔1〕 Han Jie. Accurate Forecast Model and Method on Rotating Mechanical Faults. IMCI'92, 1992,10.

〔2〕 邓聚龙. 灰色预测与决策. 华中工学院出版社1986.8.

〔3〕 Haykin,s. Nonliner Method of Spectral. Analysis. Springer–Verlag Berlin Heidelbe, New York, 1979.

Accuracy Forecast Model and Method on Rotating Mechanical Faults

Han Jie

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: It is a nwe work to accutately forecast rotating mechanical faults and has greater actual production signficance. The paper suggests the new conception of accuracy forecasting first. It studies the forecast model by means of GM(1.1) model based on grey theory. It points out that key step is to change the forecasting from time field to freguency field. The paper investigates the accuracy method according to the gradual developing rotating mechanical faults. It also proves the method by the monitoring data of a Co_2compressor in long time and discusses the possibility to improve the model.

Keywords: mechanical fault, grey theory, forecast.