

# 灰色预测法在机械测试中的应用

陈庆斌, 秦树人

(重庆大学测试中心, 重庆 400044)

**摘要:**通过运用灰色系统理论建立关于轴承磨损量的灰色预测模型, 计算结果表明, 预测模型的计算值与实际测定值之间非常接近, 而且可进一步预测设备运行状态趋势。灰色系统理论, 其理论的简洁和思想方法的新颖特点表明, 它将成为机械设备故障诊断的有力工具。灰色预测法的引进, 丰富了设备状态监测与故障诊断技术学科的基础理论, 推动了该学科向更高水平发展, 预示了该学科具有更广阔的应用前景。

**关键词:**灰色系统理论; 灰色预测; 机械测试; 诊断与预报; GM

**中图分类号:** TH814, TP391.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-4984(2007)05-0010-04

## Application of grey prediction to machinery test and diagnosis

CHEN Qing-bin, QIN Shu-ren

(Test Center, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** This paper introduced a bearing abrasion quantity's gray prediction model established by use of grey system theory. It is shown that the result of model calculation is very close to the measured data, and that further forecast on the tendency of the equipment condition could possibly be made by this model. Grey system theory, as traits of concise theory and novelty thoughway, indicated that it become a powerful tool with machinery fault diagnosis. Introduction of grey prediction into the mechanical engineering could enrich the basic theory of condition monitoring and fault diagnostic technique, so as to promote the development of this discipline towards a higher level and a wider application prospect.

**Key words:** Grey system theory; Grey prediction; Machinery test; Diagnosis and forecasting; GM

灰色系统理论是邓聚龙教授于 1982 年创立的, 在社会经济系统中已得到了广泛的应用, 取得了较好的成果。由于其理论的简洁和思想方法的新颖, 灰色理论中的灰色预测、关联度分析, 灰色聚类和灰色决策都有可能成为设备故障诊断的有力工具。灰色系统理论是一种研究某些既含有已知信息又含有未知或未确知信息的系统理论和方法。它从杂乱无章的、有限的、离散的数据中找出数据的规律, 然后建立相应的灰色模型进行预测。灰色理论的实质是对原始随机数列采用生成信息的处理方法来弱化其随机性, 使原始数据序列转化为易于建模的新序列。而故障诊断过程是利用有限的已知信息, 通过信息处理对含有不可知信息的系统(设备)进行诊断、预测、决策的过程。由此看出, 灰色理论恰是设备故障诊断的合适工具。

随着以可靠性为中心的维修技术的发展以及机

械的自动化程度的提高, 对机械设备的可靠性提出了更高的要求, 一旦机械设备某部件发生故障, 将影响整个机械设备的正常运行, 所以必须要求在故障发生之前能够有效地预测其发生或发展趋势。目前, 现场用于监测设备运行状态的物理量是振动量、压力、温度、噪声、磨损量等容易测得的量, 这些物理量随着运行状态变化, 有随时间增加而增大的趋势。测得的数据大体有如下特点: (1)  $X(t) \geq 0$ ; (2)  $X(t) \geq X(t-1)$ 。这两个特点表明数据有较强的趋向性, 完全符合灰色建模的数据特征可以用灰色来模拟设备状态预测。灰色理论建模不是寻找数据的概率分布和统计规律, 而是通过数据处理的方法来寻找数据间的规律, 这恰恰弥补了概率统计方法的不足。灰色预测模型 GM (Gray Model) 是用原始数据列  $\{x^{(0)}(k)\}$  累加生成数列  $\{x^{(1)}(k)\}$ , 并用此累加数据建立微分方程而间接描述  $\{x^{(0)}(k)\}$ , 通过累加生成加强了确定性因素蕴含了随机因素, 很好地满足了设备运行状态预测模型的要求。

收稿日期: 2007-03-12; 收到修改稿日期: 2007-05-08

基金项目: 国家 863 计划项目 (2005AA420350)

作者简介: 陈庆斌 (1983-), 男, 贵州镇远人, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能测试与虚拟仪器技术。

### 1 问题的提出

设备的威胁是为了保持或恢复其完成规定功能的能力而采取的技术管理措施。设备维修有预防性维修和事后维修, 其目的是以最低的费用很好地保持或迅速地恢复设备的功能。事后维修是在机械设备发生故障后才进行的维修, 是一种原始的维修方式, 因故障造成停机停产的经济损失大, 维修时间长, 费用高。预防性维修是指机械未发生停机或损失之前所进行的维修。随着设备或系统机构的日趋复杂, 以及因发生故障所造成的经济损失日益增加, 事后维修的局限性越来越明显。因此预防性维修变得越来越重要, 成为一种不可缺少的方法。预防维修有两种基本的形式。

(1) 定期维修: 它是根据使用经验及统计资料, 规定出相应的维修程序, 每隔一定时间就进行一次维修, 它立足于概率论的理论基础。然而, 对所规定的维修周期, 往往受多种因素, 特别是受偶然性故障的影响, 不能完全符合实际, 常造成设备失修或维修次数增多, 对维修人员要求高, 维修费用增加。

(2) 视情维修: 它是对设备进行连续性状况监控, 当一个或几个监测的特性参数下降到某种标准值以下时就进行维修, 它立足于实效物理基础之上, 要配有十分可靠的监控装置, 其投资费用大。

### 2 灰色系统预测模型 GM(1, 1) 及其新陈代谢模型的建立

不确定性问题是广泛存在的, 我们把具有不确定内涵或外延的系统称之为灰色系统, 而预测问题是不确定系统中的关键问题。机械设备故障产生及发展过程具有不确定因素, 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征、状态和发展趋势, 并对未来故障的发展作出预测和决策, 其过程即是一个灰色过程的白化过程。建模是系统中各因素间关系的具体化、数量化的表示。灰色建模是将无规律的原始数列经生成后, 得到较有规律的生成数列建立灰微分方程, GM 模型所得数据必须经过逆生成作还原后才能用。一般的灰微分方程为 GM(n, N), 其中 n 为灰微分方程的阶数, N 为灰微分方程中变量的个数。在故障诊断及状态监测中, GM(1, 1) 模型是最常用的一种灰色模型, 它是由一个只包含单变量的一阶灰微分方程构成的模型。设有原始序列:

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

对无规律可循的非原始序列  $x^{(0)}$  进行一次累加生成, 得数列:

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

其中  $x^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k x^{(0)}(m)$

数学证明, 累加生成可使任意非负数列转化为保持信息的单调递增数列, 见图 1, 这使得预测有规律可循。同时, 累加生成具有概率意义, 由实际问题可知, 累加生成具有统计意义, 且累加的规律性由发掘原始信息的内涵而得, 保持了与原始信息的关联性。

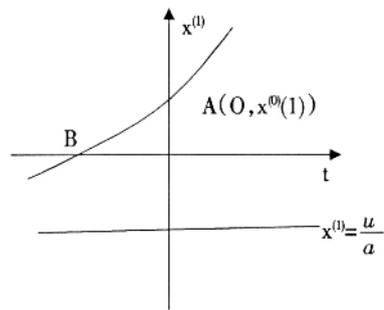


图 1 GM(1,1)模型的变化曲线

其一般形式为:

$$x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = u \quad (3)$$

若记  $x^{(0)} = \{x^{(0)}(k) | k=1, 2, \dots, n\}$  为原始数据序列, 而  $x^{(1)}$  为  $x^{(0)}$  的一次累加生成序列, 即系统的累计总量, 且:

$x^{(1)} = \{x^{(1)}(k) | k=1, 2, \dots, n\}$ ,  $z^{(1)}$  为  $x^{(1)}$  的邻均值等权生成序列, 且  $z^{(1)} = \{z^{(1)}(k) | k=1, 2, \dots, n\}$ , 其中:

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \quad k=2, 3, \dots, n \quad (4)$$

对生成序列用一阶单变量微分方程进行拟合, 得到灰色白化形式的灰色动态模型:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = u \quad (a, u \text{ 为待解参数}) \quad (5)$$

式中  $x^{(1)}(t)$  为  $x^{(0)}(t)$  的一次累加值, 即系统的累加值; 而方程左边第一项为系统的逐年增量, 即系统发展速度。可见, GM(1, 1) 模型是描述和研究系统存量与系统流量之间的动态关系的微分方程, 参数 a 和 u 可按最小二乘法求解得到。

记:  $\hat{a} = [a \ u]^T$ , 运用最小二乘法求解得:

$$\hat{a}=[a \ u]^T \notin B^T \cdot B)^{-1} \cdot B^T \cdot Y$$

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

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

则白化形式的数据预测模型为:

$$\hat{x}^{(1)}(t) \notin x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} e^{-at} + \frac{u}{a} \tag{6}$$

式中, a为发展系数; u为灰作用量; k为某 t 时刻。

离散形式为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) \notin x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} e^{-ak} + \frac{u}{a} \tag{7}$$

可得到原始数列的预测值:

$$\begin{cases} \hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1) \\ \hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1) \end{cases} \tag{8}$$

(其中 k=2, ..., n)

生成的残差 (绝对误差):

$$\epsilon^{(0)} = x^{(0)} - \hat{x}^{(0)} \tag{9}$$

相对误差:

$$E^{(0)} = \epsilon^{(0)} / x^{(0)} \times 100\% \tag{10}$$

在 GM(1, 1) 模型中, 对于给定不同的原始数据, 或对原始数据列中的数据取舍不同, 所得的模型不同。如在原模型的原始数据中增加最新的信息, 按补充了新信息后的全新数列建模得到的模型称为新信息模型。新信息模型反映了系统的最新信息, 但随着时间的推移, 原始数据越来越多, 计算量越来越大, 为此常常采取增加新信息与去掉旧信息同时进行的方式建立模型, 并采取增加的项和去除的项相等情况下的等维新信息来处理, 这种建模方法又称新陈代谢建模法, 具体处理方法同前。

### 3 建立 GM(1, 1) 灰色预测模型的步骤

(1) 数据处理: 将原始数据列  $x^{(0)}(t)$  做一次累加, 得到生成数据列  $x^{(1)}(t)$ , 即:

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$$

(2) 构成数据矩阵 B 与数据列  $Y_N$ :

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

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

(3) 计算模型系数 a 和待辨识参数 u:

$$\hat{a}=[a \ u]^T \notin B^T \cdot B)^{-1} \cdot B^T \cdot Y_N$$

(4) 建立时间响应模型  $\hat{x}^{(1)}(t)$ :

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) \notin x^{(0)}(1) - u/a e^{-at} + u/a$$

(5) 将时间响应离散化:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) \notin x^{(0)}(1) - u/a e^{-ak} + u/a$$

(6) 将 k 值代入离散模型式计算预测累加值  $\hat{x}^{(1)}(k)$ 。

(7) 将预测累加值还原为预测值:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1)$$

(8) 求出  $x^{(0)}(k)$  与  $\hat{x}^{(0)}(k)$  的绝对误差及相对误差:

$$\epsilon^{(0)} = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)$$

$$E^{(0)} = \epsilon^{(0)} / x^{(0)} \times 100\%$$

### 4 灰色系统理论用于设备预测预报的实例

灰色系统理论将一切随机量看作是在一定范围内变化的灰色数, 将随机过程看作是在一定范围一定时区内变化的灰色过程。它将无规律的原始数据经生成后, 使其变为较有规律的生成数列再建模。通过灰色数的不同生成方式, 数据不同取舍, 来调整、修正、提高精度。将定期维修的时间间隔视为灰色序列, 通过建立其灰微分方程的动态数学模型进行维修时间间隔的预测, 为定期预防性维修周期提供参考值, 通过综合分析最后确定其维修时间间隔。本例以一台空压机的轴向止推轴承磨损量为依据, 数据如表所示。

表 1 轴承套磨损量实测值(单位: mm)

测试日期	7月30日	8月10日	8月20日	8月30日	9月10日	9月20日	9月30日	10月10日
磨损量	0.1168	0.1245	0.1346	0.1499	0.1727	0.1930	0.2184	0.2489

将表 1 中的 8 个数据作为原始数据, 见表 2 所示。

表 2  $x^{(0)}(k)$  的 8 个原始数据

K	1	2	3	4	5	6	7	8
$x^{(0)}(k)$	0.1168	0.1245	0.1346	0.1499	0.1727	0.1930	0.2184	0.2489

对原始数据作累加生成运算, 得到数据列于表 3 中。

表 3  $x^{(0)}(k)$  的累加生成运算值

K	1	2	3	4	5	6	7	8
$x^{(0)}(k)$	0.1168	0.2413	0.3759	0.5258	0.6985	0.8915	1.1099	1.3588

根据以上数据, 按最小二乘法求解(求解过程略)得到参数:

$$a = -0.1198 \quad u = 0.0990$$

由式 5) 得到一次累加数列  $\{x^{(1)}(k)\}$  的预测公式为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 0.9432e^{0.1198k} - 0.8264$$

计算值列于表 4 左栏。

原始数据的  $\{x^{(0)}(k)\}$  预测值  $\{\hat{x}^{(0)}(k)\}$ , 由式(4)求出, 列于表 5 左栏。

回代检验并计算误差。模型计算值与实际值比较见表 4、表 5。

表 4  $\hat{x}^{(1)}(k)$  模型值与实际值  $x^{(1)}(k)$  比较

模型计算值 $\hat{x}^{(1)}(k)$	实际值 $x^{(1)}(k)$	绝对误差 $\epsilon^{(1)}$
$\hat{x}^{(1)}(2) = 0.2368$	$x^{(1)}(2) = 0.2413$	$\epsilon^{(1)}(2) = 0.0045$
$\hat{x}^{(1)}(3) = 0.3722$	$x^{(1)}(3) = 0.3759$	$\epsilon^{(1)}(3) = 0.0037$
$\hat{x}^{(1)}(4) = 0.5247$	$x^{(1)}(4) = 0.5258$	$\epsilon^{(1)}(4) = 0.0038$
$\hat{x}^{(1)}(5) = 0.6967$	$x^{(1)}(5) = 0.6985$	$\epsilon^{(1)}(5) = 0.0018$
$\hat{x}^{(1)}(6) = 0.8905$	$x^{(1)}(6) = 0.8915$	$\epsilon^{(1)}(6) = 0.0010$
$\hat{x}^{(1)}(7) = 1.1090$	$x^{(1)}(7) = 1.1099$	$\epsilon^{(1)}(7) = 0.0009$
$\hat{x}^{(1)}(8) = 1.3553$	$x^{(1)}(8) = 1.3588$	$\epsilon^{(1)}(8) = 0.0035$

从表 5 中的  $\epsilon^{(0)}$  和  $E^{(0)}$  值可看出, 磨损量的模型计算值与实际值之间的差值很小, 说明了预测模型的精度很高, 平均绝对误差  $\epsilon^{(0)}$  小于 0.0019, 平均相对误差  $E^{(0)}$  小于 0.34%。应用预测模型进行两步预测, 以此来判断磨损量的发展趋势, 并作出预报。经计算得:

$$\hat{x}^{(0)}(9) = 0.2777 \quad \hat{x}^{(0)}(10) = 0.3130$$

表 5  $\hat{x}^{(0)}(k)$  模型值与实际值  $x^{(0)}(k)$  比较

模型计算值 $\hat{x}^{(0)}(k)$	实际值 $x^{(0)}(k)$	绝对误差 $\epsilon^{(0)}$	相对误差 $E^{(0)}$
$\hat{x}^{(0)}(2) = 0.1200$	$x^{(0)}(2) = 0.1245$	$\epsilon^{(0)}(2) = -0.0045$	$E^{(0)}(2) = 3.58\%$
$\hat{x}^{(0)}(3) = 0.1354$	$x^{(0)}(3) = 0.1346$	$\epsilon^{(0)}(3) = 0.0008$	$E^{(0)}(3) = -0.57\%$
$\hat{x}^{(0)}(4) = 0.1525$	$x^{(0)}(4) = 0.1499$	$\epsilon^{(0)}(4) = 0.0026$	$E^{(0)}(4) = -1.74\%$
$\hat{x}^{(0)}(5) = 0.1720$	$x^{(0)}(5) = 0.1727$	$\epsilon^{(0)}(5) = -0.0007$	$E^{(0)}(5) = 0.43\%$
$\hat{x}^{(0)}(6) = 0.1938$	$x^{(0)}(6) = 0.1930$	$\epsilon^{(0)}(6) = 0.0008$	$E^{(0)}(6) = -0.42\%$
$\hat{x}^{(0)}(7) = 0.2185$	$x^{(0)}(7) = 0.2184$	$\epsilon^{(0)}(7) = 0.0001$	$E^{(0)}(7) = -0.05\%$
$\hat{x}^{(0)}(8) = 0.2463$	$x^{(0)}(8) = 0.2489$	$\epsilon^{(0)}(8) = -0.0026$	$E^{(0)}(8) = 1.03\%$

表明轴承磨损量有增加的发展趋势, 提醒我们在使用中应该注意进行检查和维修。灰色模型的预测值与实际值的拟合曲线如图 2 所示。

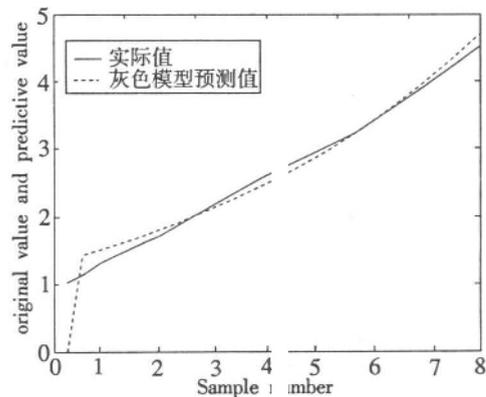


图 2 灰色模型的预测结果曲线

从预测的角度看新陈代谢是最理想的预测模型, 随系统的发展旧数据在模型中的信息已逐步减少, 不断补充新信息及时去掉旧数据, 建模序列更能反映系统当前的特征, 尤其是系统随着变量的积累, 发生质的飞跃或突变时, 与过去系统相比已是面目全非了, 此时去掉旧数据显然是合理的。这也和对系统的定性分析是一致的。从所收集的数据看, 系统初期无故障运行时间较短, 这也符合产品寿命规律的。

## 5 结论

(1) 灰色预测法在国民经济诸多领域的应用已取得成效, 而将其应用于设备运行状态变化趋势预报则不多见。通过实际例子考核, 表明灰色理论在机械测试应用中的可行性。其实在这方面进行探讨, 有理论意义和实用价值。预测预报结果(下转第 52 页)

锅炉运行负荷低时,燃料燃烧不完全,大量的氧气没有被利用,而导致测点处值偏高。由此可见,通过对值的测量也可以间接地了解锅炉负荷的高低。但是值得注意的是在应用值判断的同时还应考虑是否有其它因素影响。

### 3 实例应用分析

应用崂山应用研究所生产的3012H型自动烟(气)测试仪,对SZL10-1.25-A等7种型号锅炉进行实测,以GB5468-91中规定的锅炉出力测试方法测试的锅炉负荷率为准确值,与估算值相比较,其相对误差为-3.89%~3.69%,结果见表3所示。以SZL10-1.25-A型锅炉为例,首先我们将表1值乘以锅炉的额定蒸发量10t/h,与实测烟气流量的值相比,可判断该锅炉的运行负荷介于80%~90%,且接近80%。其次,我们也可以将实测的烟气流量、过量空气系数、额定蒸发量代人(6)式中计算得负荷率为82.7%,结果与通过蒸汽流量表法测量得负荷率值83.2%,相对误差仅为-0.60%。由此可见,此方法不但可行,而且非常之简便。

### 4 结论

本文经理论推导以及实践测试结果均表明,应用烟气流量和过量空气系数这两个监测过程中极易获得的参数来快速判断并且估算燃煤锅炉负荷率是可行的,相对误差仅为-3.89%~3.69%。但是,在实际工作使用中我们还必须注意观察是否会有其它导致烟气流速过高或过量空气系数过大的原因,比如引(鼓)风机匹配不合理,风量过大等,应及时排除,否

(上接第13页)

可为设备维修及其管理人员在线监控设备进行状态、正确制定设备维修计划、确保设备安全运行提供依据。

(2) 应用灰色系统理论建立灰色预测模型,可以对设备运行状态及趋势进行预测预报。实例运算结果表明,磨损量的灰色模型计算值与实际值非常接近,平均绝对误差<sup>(0)</sup>小于0.0019,平均相对误差<sup>(0)</sup>小于0.34%,预测精度很高,这是因为灰色预测法是根据自身数据建立灰微分方程再预测自身的发展特点决定的。

(3) 随着设备状态监测技术的深入发展,灰色系统理论必将在该领域拥有更广阔的应用前景,其深入研究仍需进行。

#### 参考文献

[1] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987.

表3 实测结果与估算结果对照表

锅炉型号	实测值			估算负荷率(%)	相对误差(%)
	烟气流 (标准 m <sup>3</sup> /h)	值	负荷率 * (%)		
SZL10-1.25-A	17854	2.2	83.2	82.7	0.60
DZL2-0.98-A	5766	3.1	90.2	93.0	3.10
DZL4-1.27-A	8809	2.3	97.1	95.8	-1.39
SHL6-1.27-A	17346	3.7	81.3	78.1	-3.89
SHL20/25-400A	31836	1.7	90.3	93.6	3.69
SZL6-1.27-A	16804	2.7	106.5	103.7	-2.60
SZL6-16	13509	2.4	96.4	93.8	-2.68

测量方法为蒸汽流量表法、水箱法或孔板流量法则会加大估测误差。

#### 参考文献

- [1] 杨兴成,王占义.锅炉负荷变化对运行效率的影响及控制[J].应用能源技术,2001,2:21-22.
- [2] 徐旭,陆胜勇,傅刚,等.不同工况飞灰重金属和PAHs特性试验研究[J].燃烧科学与技术,2002,8(2):145-149.
- [3] 朱珍锦,薛来,谈仪,等.负荷改变对煤粉锅炉燃烧产物中汞的分布特征影响研究[J].中国电机工程学报,2001,21(7):87-94.
- [4] GB/T5468-1991.锅炉烟尘测试方法[S].
- [5] 庄德安,刘列英.燃煤工业锅炉热工测试方法[M].北京:机械工业出版社,1980.
- [6] 何兆德,张长春.锅(窑)炉运行管理及测试技术使用手册[M].北京:中国环境科学出版社,1993.
- [7] 庞丽君,孙恩超,等.工业锅炉丛书锅炉燃烧技术及设备[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1991.
- [2] 靳春梅,段志善,等.灰色理论在旋转机械故障诊断于预报中的应用[J].应用力学学报,2000,11(3):74-80.
- [3] 罗佑新,张龙庭,李敏.灰色系统理论及其在机械工程中的应用[M].北京:国防科技大学出版社,2001.
- [4] 施国红.灰色预测法在设备状态趋势预报中的应用[J].中国安全科学学报,2000,11(5):49-54.
- [5] 靳春梅,段志善,等.旋转机械故障智能诊断与预报方法综合研究[J].机械,2000,27增刊:21-23.
- [6] 张业鹏,杨光友,华中平.灰色GM模型在设备维修中应用[J].湖北工学院学报,2002,11(4):39-41.
- [7] 陈举华,郭毅之.GM模糊优化方法在小子样机械系统故障预测中的应用[J].中国机械工程,2002,11(19):44-46.
- [8] 杨江天,岳维亮.灰色模型在机械故障预测中的应用[J].机械强度,2001,12(3):277-279.
- [9] 魏承辉,覃虹桥.灰色系统理论在设备故障诊断中的应用[J].吉首大学学报(自然科学版),2002,12(2):70-74.