

基于离散灰色模型的 变压器油中溶解气体浓度预测

孙丽萍, 杨江天

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 油中溶解气体浓度分析被广泛用于监测油浸电力设备的早期故障。将改进灰色模型引入变压器油中溶解气体浓度预测。分析了灰色预测模型 GM(1,1) 和离散灰色预测模型 DGM(1,1) 两者之间的关系, 讨论了模型预测的准确性和稳定性。分别用 GM(1,1) 模型和 DGM(1,1) 模型对变压器油中溶解气体浓度进行建模预测。对比分析结果表明: GM(1,1) 模型从离散形式到连续形式的跳跃使得模型不够稳定, 随着发展系数的增加, 预测精度下降。DGM(1,1) 模型是 GM(1,1) 模型的精确形式, 具有更高的预测精度和较好的稳定性, 被推荐替代 GM(1,1) 模型预测变压器油中溶解气体浓度。

关键词: 变压器; 油中溶解气体; 离散灰色模型; 预测

中图分类号: TM 855

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0058-03

0 引言

变压器是电力系统中最重要设备之一, 其正常运行对整个电力系统的可靠运行起着非常关键的作用。变压器发生故障前, 其内部会析出多种气体, 溶解于变压器油中。溶解气体分析(DGA)被公认为是一种探测变压器初期故障的有效手段^[1]。国内外许多学者采用了灰色关联分析^[2]、人工神经网络^[3]、核可能性聚类算法^[4]等方法对油中溶解气体进行分析。根据历史数据对油中溶解气体含量作出预测, 能最大限度地减少变压器损失, 保证电力变压器长期、安全和经济运行^[5]。

灰色模型不需要大量的时间序列数据就能够取得较好的预测效果, 达到较高的精度, 适合于短期预测。但是, 灰色预测模型 GM(1,1) 中, 存在从离散形式到连续形式的跳变, 影响了预测稳定性, 使得有时预测效果并不是十分理想。而离散灰色预测模型 DGM(1,1) 很好地解决了这一问题。

1 GM(1,1)模型和 DGM(1,1)模型

1.1 GM(1,1)模型^[6-7]

GM(1,1) 模型是最常用的灰色预测模型, 它通过一个变量的一阶微分方程揭示数列的发展规律。

设 $X^{(0)}$ 为原始序列, 对 $X^{(0)}$ 一次累加, 得到生成序列 $X^{(1)}$, $Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列。

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)\}$$

式中 $z^{(1)}(k) = \frac{1}{2} [x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)]$, 且 $k = 2, 3,$

$\dots, n$ 。

GM(1,1) 模型的基本形式为

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

对 $X^{(1)}$ 建立一阶微分方程模型

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (2)$$

称为 GM(1,1) 模型的白化形式。

a 和 b 为待定参数, 可用最小二乘法确定。由此可以得到响应函数, 即 $X^{(1)}$ 的灰色预测模型为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = [x^{(1)}(0) - b/a]e^{-ak} + b/a \quad (3)$$

原始数据序列的灰色预测模型为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (1 - e^{-a})[x^{(1)}(0) - b/a]e^{-ak} \\ k = 1, 2, \dots$$

GM(1,1) 模型中的参数 $-a$ 称为发展系数, 反映了 $\hat{X}^{(1)}$ 及 $\hat{X}^{(0)}$ 的发展态势。研究表明, 随着发展系数的增加, GM(1,1) 模型预测的误差迅速增大。当发展系数 $-a \leq 0.3$ 时, 用 GM(1,1) 模型能获得较好预测精度; 当 $0.3 < -a \leq 0.5$ 时, GM(1,1) 模型须谨慎使用; 当 $-a > 0.5$ 时, 应考虑模型修正。

1.2 DGM(1,1)模型^[8]

在 GM(1,1) 模型中式(1)是离散方程, 而式(2)是连续方程, 在预测时将式(1)的参数代入式(2)中, 从离散形式到连续形式的直接跳跃是 GM(1,1) 模型建模的问题所在。

对 GM(1,1) 模型进行改进:

$$x^{(1)}(k+1) = \beta_1 x^{(1)}(k) + \beta_2 \quad (4)$$

称式(4)为 DGM(1,1) 模型, 或称为 GM(1,1) 模型的离散形式。

则 $X^{(1)}$ 的灰色预测模型为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \beta_1^k x^{(0)}(1) + \frac{1 - \beta_1^k}{1 - \beta_1} \beta_2 \quad (5)$$

还原值为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1)=(1-\beta_1^{-1})\beta_1^k x^{(0)}(1)+\beta_1^{k-1}\beta_2$$
$$k=1,2,\cdots$$

1.3 GM(1,1)模型和 DGM(1,1)模型的关系

首先,将 $z^{(1)}(k)=[x^{(1)}(k)+x^{(1)}(k-1)]/2$ 代入 GM(1,1)模型的基本形式,有

$$x^{(1)}(k+1)=\frac{1-0.5a}{1+0.5a}x^{(1)}(k)+\frac{b}{1+0.5a}$$
$$k=1,2,\cdots,n-1$$

(6)

式(6)形式与式(4)相同,因此得关系式

$$\frac{1-0.5a}{1+0.5a}=\beta_1,\quad \frac{b}{1+0.5a}=\beta_2$$

将 e^{-a} 和 $\beta_1=\frac{1-0.5a}{1+0.5a}$ 用麦克劳林公式展开得:

$$e^{-a}=1-a+\frac{a^2}{2!}-\frac{a^3}{3!}+\cdots+(-1)^n\frac{a^n}{n!}+o(a^n)$$

$$\beta_1=\frac{1-0.5a}{1+0.5a}=1-a+\frac{a^2}{2}-\frac{a^3}{2^2}+\cdots+$$

$$(-1)^{n+1}\frac{a^{n+1}}{2^n}+o(a^{n+1})$$

若只考虑前 4 项,则 e^{-a} 和 β_1 的差值为

$$e^{-a}-\beta_1=\frac{a^3}{12}$$

因此,当 $|a|$ 取值很小时, $\beta_1\approx e^{-a}$, 将 $a=\frac{2(1-\beta_1)}{1+\beta_1}$

和 $b=\frac{2\beta_2}{1+\beta_1}$ 代入式(3),则式(1)的响应函数变为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1)=x^{(0)}(1)\beta_1^k+\frac{1-\beta_1^k}{1+\beta_1}\beta_2$$

(7)

$$k=1,2,\cdots,n-1$$

形式与式(5)完全相同。

以上分析说明,GM(1,1)模型预测发生偏差的原因在于白化形式中的 e^{-a} 与离散形式中的 β_1 之间有微差,当发展系数 $-a$ 取值较小时,微差对整个预测模型的影响较小,预测精度较高,GM(1,1)模型与 DGM(1,1)模型可以相互代替,而当发展系数 $-a$ 较

大时,微差对整个预测模型的影响很大,预测精度降低,使得预测结果不理想。

2 预测实例

变压器内油和固体绝缘材料在电或热的作用下产生的各种气体中,对诊断变压器绝缘状态有价值的气体有氢气(H₂)、甲烷(CH₄)、乙烷(C₂H₆)、乙烯(C₂H₄)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)^[9-10]。气体浓度可以由气象色谱法检测。

表 1 为某 110 kV 变压器油中溶解气体浓度的 6 组色谱数据。用前 5 组数据作为历史数据建立预测模型,将第 6 组数据作为预测对比。

表 1 某 110 kV 变压器油中溶解气体浓度数据

Tab.1 Gas dissolved in oil of 110 kV power transformer

编号	$\rho/(\text{mL}\cdot\text{L}^{-1})$					
	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
1	15.3	57.4	41.6	1 736.4	61.5	20.9
2	16.5	57.9	43.2	1 681.3	61.4	21.0
3	8.0	50.0	32.4	1 465.6	57.1	19.1
4	18.2	63.2	47.3	2 002.4	72.5	22.7
5	18.6	63.4	47.9	1 950.8	72.6	23.0
6	19.1	65.4	49.8	2 088.8	76.9	23.4

注: ρ 为气体浓度。

表 2 为 GM(1,1)模型和 DGM(1,1)模型对历史数据拟合情况对比。数据 6 采用 2 种模型的预测对比如表 3 所示。

容易看出,GM(1,1)模型与 DGM(1,1)模型对历史数据模拟精度相当,当发展系数较小时,GM(1,1)和 DGM(1,1)模型都有很高的拟合精度,随着发展系数的增大,拟合误差也增大。DGM(1,1)模型有更高的预测精度,特别是当 GM(1,1)模型的发展系数较大时,用 GM(1,1)模型预测误差也较大,而用 DGM(1,1)模型预测,仍能获得很高的预测精度。因此,DGM(1,1)模型解决了预测稳定性问题,更适于变压器油中溶解气体浓度预测。

表 2 GM(1,1)模型和 DGM(1,1)模型建模对比

Tab.2 Contrast between GM(1,1) modeling and DGM(1,1) modeling

编号	模型	H ₂		CH ₄		CO		CO ₂		C ₂ H ₄		C ₂ H ₂	
		$\rho' / (\text{mL} \cdot \text{L}^{-1})$	$\varepsilon / \%$	$\rho' / (\text{mL} \cdot \text{L}^{-1})$	$\varepsilon / \%$	$\rho' / (\text{mL} \cdot \text{L}^{-1})$	$\varepsilon / \%$	$\rho' / (\text{mL} \cdot \text{L}^{-1})$	$\varepsilon / \%$	$\rho' / (\text{mL} \cdot \text{L}^{-1})$	$\varepsilon / \%$	$\rho' / (\text{mL} \cdot \text{L}^{-1})$	$\varepsilon / \%$
1	GM(1,1)	15.30	0	57.40	0	41.60	0	1 736.4	0	61.50	0	20.90	0
	DGM(1,1)	15.30	0	57.40	0	41.60	0	1 736.4	0	61.50	0	20.90	0
2	GM(1,1)	12.63	23.45	54.11	6.55	38.20	11.57	1 574.4	6.36	58.63	4.51	20.00	4.76
	DGM(1,1)	13.34	19.15	54.33	6.17	38.65	10.53	1 583.8	5.80	58.81	4.22	20.04	4.57
3	GM(1,1)	14.25	78.13	57.00	14.00	41.03	26.64	1 700.5	16.30	63.20	10.68	20.93	9.58
	DGM(1,1)	14.61	82.63	57.10	14.20	41.24	27.28	1 705.2	16.35	63.31	10.88	20.95	9.69
4	GM(1,1)	16.07	11.70	60.05	4.98	44.08	6.81	1 836.6	8.28	68.14	6.01	21.91	3.48
	DGM(1,1)	15.99	12.14	60.01	5.05	44.01	6.96	1 835.9	8.31	68.15	6.00	21.91	3.48
5	GM(1,1)	18.12	2.58	63.25	0.24	47.34	1.17	1 983.6	1.68	73.46	1.18	22.93	0.30
	DGM(1,1)	17.50	5.91	63.08	0.50	46.96	1.96	1 976.6	1.32	73.36	1.05	22.90	0.43
平均	GM(1,1)		23.17		5.15		9.24		6.52		4.48		3.62
误差	DGM(1,1)		23.97		5.18		9.35		6.35		4.43		3.63
GM(1,1)发展系数		0.12		0.05		0.07		0.08		0.08		0.05	

注: ρ' 为气体浓度拟合值; ε 为相对误差,下同。

表 3 GM(1,1)模型和 DGM(1,1)模型预测对比
Tab.3 Contrast of predictions between
GM(1,1) and DGM(1,1)

气体 类型	GM(1,1)			DGM(1,1)	
	$\rho''/(\text{mL}\cdot\text{L}^{-1})$	$\varepsilon/\%$	$-a$	$\rho''/(\text{mL}\cdot\text{L}^{-1})$	$\varepsilon/\%$
H ₂	20.43	6.96	0.12	19.16	0.31
CH ₄	66.63	1.88	0.05	66.30	1.38
CO	50.85	2.11	0.07	50.10	0.60
CO ₂	2 142.4	2.57	0.08	2 128.10	0.88
C ₂ H ₄	79.20	2.99	0.08	78.97	2.69
C ₂ H ₂	24.01	2.61	0.05	23.95	2.35

注： ρ'' 为气体浓度预测值； $-a$ 为发展系数。

3 结论

上述分析表明,GM(1,1)模型具有局限性。预测模型从离散形式到连续形式的直接跳跃使得预测结果有时不理想。随着发展系数的增加,模拟误差也迅速增大。只有当发展系数很小时,才可以作为灰色模型的精确形式。

DGM(1,1)模型和 GM(1,1)模型的建模机理是一样的,都是基于累加生成和最小二乘法的指数拟合,因此两者的模型拟合精度相当。DGM(1,1)模型是 GM(1,1)模型的改进,解决了 GM(1,1)模型预测时从离散形式到连续形式的直接跳跃,因而能有效地提高预测精度,有较好的稳定性,所以被推荐替代 GM(1,1)模型。

参考文献:

[1] DUVAL M. New techniques for dissolved gas-in-oil analysis[J]. Electrical Insulation Magazine,2003,19(2):6-15.
[2] 宋斌,余平,罗云柏. GRA 方法在变压器故障诊断中的应用研究[J]. 电力自动化设备,2003,23(4):64-66.
SONG Bin,YU Ping,LUO Yun-bai. Application study on fault diagnosis of transformer by gray relational analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(4):64-66.
[3] DUVAL M,DUKARM J J. Improving the IEC table for transformer failure diagnosis with knowledge extraction neural networks

[J]. Power Delivery,2005,20(4):2509-2516.
[4] 熊浩,孙才新,廖瑞金. 基于核可能性聚类算法和油中溶解气体分析的电力变压器故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):162-166.
XIONG Hao,SUN Cai-xin,LIAO Rui-jin. Study on kernel-based possibilistic clustering and dissolved gas analysis for fault diagnosis of power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(20):162-166.
[5] 王有元,廖瑞金,陈伟根,等. 基于油色谱分析的变压器故障在线预测方法[J]. 重庆大学学报,2005,28(7):34-37.
WANG You-yuan,LIAO Rui-jin,CHEN Wei-gen,et al. Online fault predicting method based on dissolved gas analysis for transformer[J]. Journal of Chongqing University,2005,28(7):34-37.
[6] 李思峰,党耀国. 预测方法与技术[M]. 北京:高等教育出版社,2005.
[7] WANG You-yuan,LIAO Rui-jin,SUN Cai-xin,et al. A GA-based grey prediction model for predicting the gas-in-oil concentrations in oil-filled transformer[C]//Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Indianapolis, USA:IEEE,2004:74-77.
[8] 谢乃明,刘思峰. 离散 GM(1,1)模型与灰色预测模型建模机理[J]. 系统工程理论与实践,2005,25(1):93-99.
XIE Nai-ming,LIU Si-feng. Discrete GM(1,1) and mechanism of grey forecasting model[J]. Systems Engineering Theory & Practice,2005,25(1):93-99.
[9] 程鹏,佟来生,吴广宁,等. 大型变压器油中溶解气体在线监测技术进展[J]. 电力自动化设备,2004,24(11):90-93.
CHENG Peng,TONG Lai-sheng,WU Guang-ning,et al. Technical achievements of on-line monitoring of dissolved gas in transformer oil[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(11):90-93.
[10] 操敦奎. 变压器油中气体分析诊断与故障检查[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

孙丽萍(1981-),女,山东胶州人,硕士研究生,研究方向为故障诊断与预测(E-mail:sun.liping@163.com);
杨江天(1971-),男,河南焦作人,副教授,博士,研究方向为故障诊断与预测。

Prediction of gas dissolved in transformer oil
using discrete grey model

SUN Li-ping,YANG Jiang-tian

(School of Mechanical,Electronic and Control Engineering,
Beijing Jiaotong University,Beijing 100044,China)

Abstract: Dissolved gas analysis is widely used to detect incipient faults in oil-filled power equipments. The modified grey model is introduced to predict the gas dissolved in oil of power transformers. The relationship between the grey model(GM(1,1) model) and the discrete grey model (DGM(1,1) model) is analyzed,and their prediction precisions and stabilities are discussed. The gas-in-oil concentration of a power transformer is predicted using the GM(1,1) model and the DGM(1,1) model respectively. Results show that,the transform of the GM(1,1) model from discrete form to continuous form makes the model unstable,and the prediction precision decreases along with the increase of the development coefficient. The DGM(1,1) model,as the precise form of the GM(1,1) model,has better precise and stability,with which it is suggested to replace the GM(1,1) model in gas-in-oil prediction.

Key words: transformer; dissolved gas; discrete grey model; prediction