

基于灰色模型的电力变压器可靠性分析

张庆平, 闫振华, 周秀, 李秀广, 牛勃

(国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011)

摘要: 针对电力变压器可靠性建模精度要求高、但可靠性数据较少这一问题, 将电力变压器看做是一个灰色系统, 分别利用灰色 GM(1,1) 模型和无偏灰色 GM(1,1) 模型建立电力变压器的可靠性分析的数学模型, 通过数据拟合得到电力变压器相应的故障率数据, 对拟合精度进行检验后发现本文提出的可靠性建模方法精度高、实现快捷, 是一种有效可行的电力变压器可靠性研究方法, 其分析结果可为制定电力变压器的维护与维修策略以及状态检修工作提供依据。

关键词: 电力变压器; 可靠性建模; 灰色系统; 灰色 GM(1,1) 模型

中图分类号: TM411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 - 3643(2019)05 - 0059 - 04

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2019.05.011>

Reliability analysis on power transformer based on gray model

ZHANG Qingping, YAN Zhenhua, ZHOU Xiu, LI Xiuguang, NIU Bo

(Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750011, China)

Abstract: The power transformer is regarded as a grey system, and it requires high - precision reliability models. So a mathematical model for reliability analysis of power transformer is established based on unbiased grey GM (1,1) model and grey GM (1,1) model. Then, using power transformer reliability index statistics, through data fitting, the corresponding fault rate data of power transformer are obtained. After checking the fitting accuracy, it is found that the reliability modeling method has high precision and fast implementation. The modeling of power transformer system is effective, accurate and convenient, and the results provide a theoretical basis for repair strategy and condition - based maintenance.

Keywords: power transformer; reliability; gray theory; gray GM(1,1) model

DOI: 10.3969/j.issn.1672 - 3643.2019.05.011

收稿日期:2019 - 06 - 10

作者简介:张庆平(1989)男,硕士研究生,主要从事高压试验以及外绝缘防护工作。

随着现代社会经济的快速发展,我国对电力供应的需求逐步加大,电力变压器作为输变电系统最重要的核心设备之一,担负着大量输送电能的重任,它的运行状况直接决定了电力系统的稳定性、可靠性以及安全性^[1]。目前众多高校以及科研单位都将电力变压器作为电力系统研究的重点对象之一,尤其是对变压器可靠性的研究越来越受到专家学者的重视。长期以来,大多数研究都集中在电力变压器的状态评估和故障诊断方面^[2-4]。电力变压器故障主要分两类:一类是严重故障,一旦发生就会严重影响电力系统稳定运行。研究这类情况下的失效率通常是把电力变压器看成是不可修复系统,其主要可靠性指标是失效率,通过对变压器运行数据的统计,可获得失效率的统计值,并由此计算得出可靠性函数的估计值^[5-6]。另一类是电力变压器发生故障后往往还可维持一段时间工作,只要处理得当,就不会带来大的损失。研究这类情况下的失效率通常是把电力变压器看成是可修复系统^[7-8]。针对电力变压器建模精度要求高,但可靠性数据较少这一问题,利用电力变压器可靠性指标统计数据,结合灰色模型建立电力变压器的可靠性分析的数学模型,对电力变压器的可靠性进行建模分析,通过拟合得到对应时间段的故障率,不需要电力变压器故障率服从某个特定的分布函数,建模精度得到很大的提高,最后通过对比可知本文提出的可靠性建模方法精度高、实现快捷,是一种有效可行的电力变压器可靠性研究方法,其分析结果可为电力变压器以后的状态检修工作提供一定的理论依据。

1 灰色 GM(1,1)模型的建立

对灰色过程建立的模型称为灰色模型(Grey Model),简称 GM^[9]。灰色模型是揭示系统内部事物连续发展变化过程的模型,其模型建立过程如下所示。

(1) 设原始数据序列为

$$\lambda^{(0)} = [\lambda^{(0)}(1), \lambda^{(0)}(2), \dots, \lambda^{(0)}(i), \dots, \lambda^{(0)}(n)]$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

(2) 累加生成,根据公式(1)将原始数据序列累加生成新的数据序列。

$$\lambda^{(1)}(j) = \sum_{i=1}^j \lambda^{(0)}(i) \quad (1)$$

式中: $j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

累加后生成新的序列为

$$\lambda^{(1)} = [\lambda^{(1)}(1), \lambda^{(1)}(2), \dots, \lambda^{(1)}(j), \dots, \lambda^{(1)}(n)]$$

(3) 构造累加矩阵 B 和常数向量 Y ,根据公式(2)生成 $\lambda^{(1)}$ 的紧邻均值序列。

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(\lambda^{(1)}(k) + \lambda^{(1)}(k-1)) \quad (2)$$

式中: $k = 2, 3, \dots, n$ 。

紧邻生成序列为

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

则存在常数向量 Y 和累加矩阵 B 为

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

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$$

(4) 建立模型微分方程,对累加后的数据序列 $\lambda^{(1)}$ 建立 GM(1,1)模型的微分方程为

$$\frac{d\lambda^{(1)}(k)}{dt} + a\lambda^{(1)}(k) = b \quad (3)$$

解上述微分方程得:

$$\lambda^{(1)}(k) = (\lambda^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (4)$$

式中: a —发展系数;

b —灰色作用量。

(5) 模型参数辨识,设参数向量 $\hat{a} = [a, b]^T$,利用最小二乘法对 a 的值进行估计,其近似解为:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (5)$$

将公式(4)还原便可得到预测函数为

$$\begin{cases} \hat{\lambda}^{(0)}(k) = l e^{-a(k-1)} \\ \hat{\lambda}^{(0)}(1) = \lambda^{(0)}(1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $l = (1 - e^a)(\lambda^{(0)}(1) - \frac{b}{2a}), k = 2, 3, 4,$

..., n。

(6) 模型精度检验, 记 k 时刻的已知数据为 $\lambda^{(0)}(k)$, 模型计算值为 $\hat{\lambda}^{(0)}(k)$, 则有残差和相对误差分别为

$$\varepsilon(k) = \lambda^{(0)}(k) - \hat{\lambda}^{(0)}(k)$$

$$\Delta k = \frac{|\varepsilon(k)|}{\lambda^{(0)}(k)}$$

则平均相对误差为

$$\psi = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \Delta k \quad (7)$$

残差平方和为

$$s = \varepsilon^T \varepsilon = [\varepsilon(2), \varepsilon(4), \dots, \varepsilon(n)] \begin{bmatrix} \varepsilon(2) \\ \varepsilon(3) \\ \vdots \\ \varepsilon(n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

2 无偏灰色 GM(1,1) 模型的建立

无偏灰色 GM(1,1) 模型作为灰色 GM(1,1) 的改进型模型, 消除了灰色 GM(1,1) 模型在原始数据序列增长率较大时容易出现失效的现象, 因此更加精确可靠, 其应用范围较灰色 GM(1,1) 模型广泛^[10-11]。此外, 无偏灰色 GM(1,1) 模型无需进行累减还原, 简化了建模步骤, 提高了模型计算速度^[12], 在各个领域都得到了较好地应用。它的建模基本步骤与灰色 GM(1,1) 模型建模步骤有相似之处, 在计算出灰色 GM(1,1) 模型发展系数 a 、灰色作用量 b 之后, 再计算出无偏灰色 GM(1,1) 模型的参数 A 、 C , 其值分别为

$$A = \frac{b}{2+a} \quad (9)$$

$$C = \ln \frac{2-a}{2+a} \quad (10)$$

建立无偏灰色 GM(1,1) 模型

$$\begin{cases} \hat{\lambda}_h^{(0)}(1) = \lambda^{(0)}(1) \\ \hat{\lambda}_h^{(0)}(k) = Ae^{C(k-1)} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $k=2, 3, \dots, n$ 。

最后进行模型精度检验, 其过程与灰色 GM(1,1) 模型的精度检验过程一样, 在此不再重复。

无偏灰色 GM(1,1) 模型的建立流程如图 1 所示。

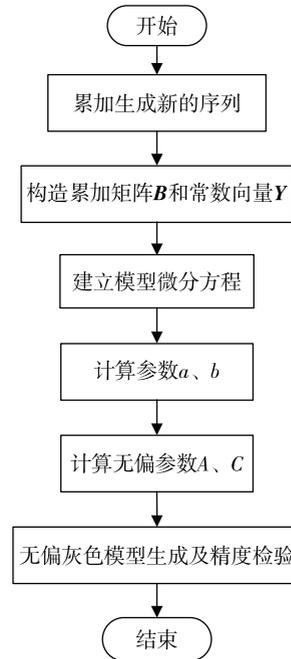


图 1 无偏灰色 GM(1,1) 建模流程

3 实例分析

由于电力变压器失效的完善统计数据极少, 并且现有统计资料多以电力变压器容量为基准量, 不符合可靠性分析的需要, 并且通过大量调查统计得到全面的失效数据存在较大困难, 所以本文仅对电力变压器故障率进行建模预测。文献[5]中统计得出了某种电力变压器 13 年的故障率, 如表 1 所示, 用其中前 10 年的数据来建立可靠性模型, 用最后 3 年的数据来验证预测数据的准确性。

表 1 变压器的故障率

序号	故障率	序号	故障率
1	0.010 009	8	0.144 880
2	0.022 238	9	0.174 031
3	0.041 022	10	0.199 475
4	0.063 021	11	0.228 410
5	0.081 329	12	0.265 411
6	0.101 815	13	0.288 640
7	0.124 143		

根据式(1)对变压器故障率进行一次累加生成得累加序列为

$\lambda^{(1)} = [0.010\ 009, 0.032\ 247, 0.073\ 270, 0.136\ 291, 0.217\ 621, 0.319\ 437, 0.443\ 581, 0.588\ 461, 0.762\ 493, 0.961\ 968]$

由式(2)对 $\lambda^{(1)}$ 进行一次紧邻均值生成,得到紧邻生成序列为

$Z^{(1)} = [0.021\ 128, 0.052\ 759, 0.104\ 781, 0.176\ 956, 0.268\ 529, 0.381\ 509, 0.516\ 021, 0.675\ 477, 0.862\ 231]$

由式(5)得:

$$\hat{a} = [a, b]^T = [-0.201\ 745, 0.037\ 193]^T$$

即 $a = -0.201\ 745, b = 0.037\ 193$;

由式(3)可得 GM(1,1)模型的微分方程为

$$\frac{d\lambda^{(1)}(k)}{dt} - 0.201\ 745\lambda^{(1)}(k) = 0.037\ 193$$

由式(4)可得上述微分方程的解为

$$\lambda^{(1)}(k) = 0.181\ 051\ 1e^{0.201\ 745k} - 0.171\ 042$$

由式(6)可得 GM(1,1)模型预测函数为

$$\hat{\lambda}^{(0)}(k) = 0.018\ 669e^{0.201745(k-1)}, k = 2, \dots, n$$

由式(11)可得无偏灰色 GM(1,1)模型预测函数为

$$\hat{\lambda}_h^{(0)}(k) = 0.020\ 682e^{0.222677(k-1)}, k = 2, \dots, n$$

分别利用 GM(1,1)模型和无偏 GM(1,1)模型对故障率进行拟合,拟合后的故障率见表 2,可靠性模型参数见表 3,同时分别对 2 种模型的拟合结果进行优度检验,其结果见表 4。

表 2 拟合后的故障率

序号	故障率	
	GM(1,1)	无偏 GM(1,1)
1	0.010 009	0.010 009
2	0.022 842	0.025 841
3	0.027 948	0.032 287
4	0.034 195	0.040 339
5	0.041 839	0.050 401
6	0.051 192	0.062 972
7	0.062 635	0.078 678
8	0.076 636	0.098 302
9	0.093 768	0.122 821
10	0.114 728	0.153 455

表 3 模型参数

a	b	A	C
-0.201 745	0.037 193	0.020 682	0.222 677

表 4 模拟误差

模型	平均相对误差	残差平方和
GM(1,1)	0.214 251	0.027 189
无偏 GM(1,1)	0.105 321	0.012 011

通过表 4 可知,无偏 GM(1,1)模型的精度要高于传统 GM(1,1)模型的精度,分别利用 2 种模型对电力变压器的故障率进行预测,预测结果如表 5 所示。

表 5 故障率预测值

序号	故障率	
	GM(1,1)	无偏(GM1,1)
1	0.140 374	0.191 729
2	0.171 753	0.239 551
3	0.210 146	0.299 298

由文献[13]可知,当发展系数 $-a \leq 0.3$ 时,无偏 GM(1,1)模型可用于中长期预测,因此利用已建立的灰色 GM(1,1)模型可对电力变压器的故障率进行中长期预测。从表 2 与表 5 可以看出,电力变压器的故障率是随其运行时间的增长而变大的,在运行了一段时间后应对其进行相应的维护和检修。

4 结 论

电力变压器运行环境的不确定性以及其元器件材料性质会随时间和负荷的变化而发生一定变化,所以可以将电力变压器看成一个复杂的灰色系统,因此利用无偏 GM(1,1)模型可以较为准确地对电力变压器故障率进行中长期预测。电力变压器作为电力系统的枢纽设备,其运行可靠性直接关系到电力系统的安全稳定运行,目前电力企业一般采用通过设备状态评价、风险评估、检修决策的状态检修模式,而本文利用灰色模型对电力

(下转第 69 页)