

DOI: 10.19666/j.rlfed.202306040

# 基于加权朴素贝叶斯的干式空心电抗器 状态评估方法

赵启承<sup>1</sup>, 张波<sup>2</sup>, 洪金琪<sup>3</sup>, 韩国文<sup>4</sup>, 韩文芳<sup>4</sup>, 陈锋<sup>4</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;

2. 国网浙江省电力有限公司超高压分公司, 浙江 杭州 311121;

3. 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000;

4. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

[摘要] 实际运行状态的干式空心电抗器在故障诊断时, 减少故障误报率和漏报率是其研究的重点和难点。对此, 提出基于加权朴素贝叶斯的干式空心电抗器状态评估方法。首先建立基于多物理场耦合的电抗器匝间短路故障仿真模型, 并通过搭建电抗器运行试验平台验证了仿真方法的有效性; 然后仿真和分析了多运行状态下电抗器电流幅值、电流谐波、阻抗角和热点温度等特征量变化规律, 获取电抗器正常和已知故障样本集; 最后提出基于多状态特征量的加权朴素贝叶斯电抗器状态评估方法。算例结果表明: 该方法具有分类准确率高、训练样本少等优点, 是电抗器运行状态识别和分类的有效方法。

[关键词] 干式空心电抗器; 等效模型; 加权朴素贝叶斯; 状态评估

[引用本文格式] 赵启承, 张波, 洪金琪, 等. 基于加权朴素贝叶斯的干式空心电抗器状态评估方法[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 144-152. ZHAO Qicheng, ZHANG Bo, HONG Jinqi, et al. A state evaluation technique for dry-type air-core reactors based on weighted Naïve Bayes[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 144-152.

## A state evaluation technique for dry-type air-core reactors based on weighted Naïve Bayes

ZHAO Qicheng<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>, HONG Jinqi<sup>3</sup>, HAN Guowen<sup>4</sup>, HAN Wenfang<sup>4</sup>, CHEN Feng<sup>4</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. EHV Branch Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311121, China;

3. Shaoxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Shaoxing 312000, China;

4. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In the actual operation status of dry-type air-core reactor, the focus and difficulty of the fault diagnosis method is to reduce the false alarm rate and the missing alarm rate. About it, this paper proposes a weighted Naïve Bayes state evaluation method for a dry-type air-core reactor. First, a simulation model of a reactor inter-turn short circuit fault is established using multi-physical field coupling, and the effectiveness of the simulation method is validated by constructing a reactor operation test platform. Second, simulation and analysis of reactor current amplitude, current harmonics, impedance angle, and hot spot temperature under multiple operating conditions are performed to obtain the reactor's normal and known fault sample sets. Finally, a weighted Naïve Bayes state evaluation model is developed using multi-state feature quantities. The example demonstrates that this method is effective for reactor operation state recognition and classification because it has high classification accuracy and requires fewer training samples.

**Key words:** dry-type air core reactor; equivalent model; weighted Naïve Bayes; state evaluation

修回日期: 2023-06-20

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (5500-202119131A-0-0-00)

Supported by: Science and Technology Project of State Grid Headquarters (5500-202119131A-0-0-00)

第一作者简介: 赵启承 (1970), 男, 高级工程师, 主要研究方向为并联电容器装置等无功补偿设备的运行与事故分析, 13958123040@139.com。

通信作者简介: 韩国文 (1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备状态评估, hanguowen6677@163.com。

近年来,随着干式空心电抗器(简称电抗器)使用率和故障率逐渐增多,其对电力系统的安全性造成较大威胁。因此,对电抗器状况进行评估,及时掌握其健康状态,将对电力设备及其系统的长期稳定运行具有重要意义。

为了实现电抗器状态的有效评估,国内外学者开展了大量的研究工作,但是传统的评估方法仍以故障诊断为主,主要方法有:

1) 阈值诊断法<sup>[1-3]</sup>,该方法以不同标准、规程为依据,设定某个物理量阈值为预警值,通过比较检测状态量与预警值来判断电力设备运行状态。如温度检测法,当电力设备的温度超过设定阈值后,温度控制器就会发出报警信号。但是,此类方法灵敏度较低,不易及时准确发现设备故障。

2) 特征气体诊断法<sup>[4-5]</sup>,该方法通过分析电力设备绝缘劣化产生的气体,根据特征气体含量比值来判断其运行状态以及故障严重程度。目前所提供的比例编码不能覆盖所有故障类型,当气体含量比值不在给定编码范围内时,该方法便无法用于诊断故障。

3) 时域波形诊断法<sup>[6-8]</sup>,利用电力设备的电流电压数据来分析电力设备运行状态,当电力设备电压或者电流值异常时,设备保护装置将发出报警信号。但是,在电力设备故障初期,电气参数的变化较小,通过电气参数变化来识别故障特征可靠性不高。

4) 频域特性诊断法<sup>[9-10]</sup>,获取监测信号测量数据后,通过分析数据频谱特征并与标准数据进行对比,来判断电力设备的运行状态。

由于传统故障诊断方法大多依据单一的状态参量对电抗器进行诊断,难以对设备运行状态进行综合有效评估。此外,随着电力系统中大量传感器和测量仪器的投入使用,传统的故障诊断方法也难以满足日益增长的状态数据分析需求<sup>[11-15]</sup>。因此,亟需探索新的智能方法,建立基于多源数据融合的干式空心电抗器状态评估模型。鉴于电抗器实际故障数据样本少且获取困难,故本文拟采用基于小训练样本集的朴素贝叶斯分类方法<sup>[16-18]</sup>。

本文以干式空心电抗器为研究对象,采用场-路耦合方法对电抗器匝间短路故障进行仿真分析,同时将电场、磁场、温度场和流场进行双向耦合,建立电抗器的电磁-热-流多物理场耦合模型。此外,搭建了电抗器运行试验平台,根据试验与仿真结果对比验证了仿真方法的合理性和准确性。在电抗器运行状态评估中,首先模拟和分析了不同运行状态下电抗器的电气和温度特征量变化规律,并获

取多变量样本数据集;进而提出了基于加权朴素贝叶斯的电抗器状态评估方法,利用小样本训练实现电抗器运行状态等级的识别和分类。与朴素贝叶斯方法和基于单状态特征量的评估模型对比,测试结果证明所提方法具有较高的分类正确性和可靠性。

## 1 电抗器场-路耦合模型及试验验证

由于电抗器实际故障样本少且获取困难,而开展电抗器故障试验的成本高。因此,本文采用场-路耦合方法模拟电抗器匝间短路故障,实现电抗器不同程度故障的再现模拟和分析,并通过搭建电抗器运行试验平台测试和验证所建模型的准确性和有效性。

### 1.1 电抗器多物理场耦合模型

以 1 台型号为 CKGKL-120-10-12 的户外干式空心串联电抗器为模拟仿真对象,电抗器结构参数见表 1。由于干式空心电抗器呈轴对称结构,建立二维轴对称模型,结果如图 1 所示。

表 1 干式空心电抗器结构参数  
Tab.1 Structural parameters of dry-type air-core reactor

包封数	层数	并绕根数	匝数	高度/m	内径/m	外径/m
1	1	2	67.833 3	0.429 15	2.500 0	2.537 8
	2		67.333 3	0.425 99		
	3		67.000 0	0.423 88		
	4		66.833 3	0.422 82		
	5		67.000 0	0.423 88		
	6		67.166 7	0.424 93		

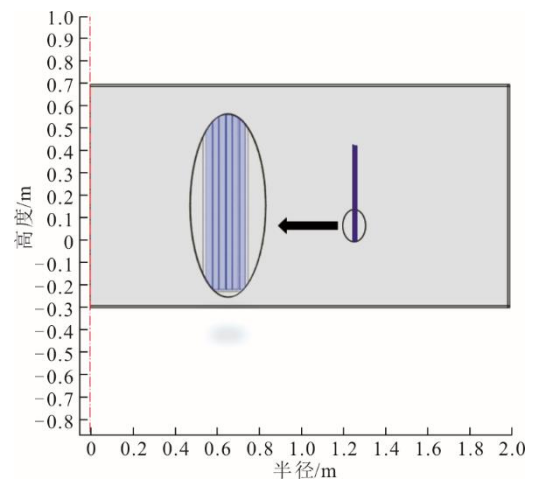


图 1 电抗器二维轴对称模型

Fig.1 Two dimensional axisymmetric model of reactor

图 1 中蓝色部分为电抗器绕组,绕组绝缘材料为环氧树脂,其余部分为空气域。为了简化计算,忽略星型架及包封撑条。在干式空心电抗器多物理场耦合仿真模型中,使用材料的参数见表 2。

表2 干式空心电抗器材料参数  
Tab.2 Material parameters of dry-type air-core reactor

参数	线圈导体 (铝)	包封绝缘 (环氧树脂)	空气
相对介电常数	1	1	1
相对磁导率	1	1	1
电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	3.774×10 <sup>7</sup>	10	10
恒压热容/(J·(kg·K) <sup>-1</sup> )	900	1 200	1 004
导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	238.000	0.350	0.023
比热率			1.4
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 700.000	1 200.000	1.225

对于电抗器的电磁场仿真,求解区域可分为导体区域和非导体区域。其中,导体区域电磁场控制方程为:

$$\begin{cases} \nabla \times \frac{1}{\mu_1} (\nabla \times \mathbf{A}_1) + \sigma_1 (\nabla \varphi_1 + j\omega \mathbf{A}_1) = \mathbf{J} \\ \nabla^2 \varphi_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{A}_1$  和  $\varphi_1$  分别为导体区域的矢量位函数和标量位函数;  $\sigma_1$  和  $\mu_1$  分别为导体的电导率和磁导率;  $\mathbf{J}$  为外施电流密度。

非导体区域的控制方程为:

$$\begin{cases} \nabla \times \frac{1}{\mu_2} (\nabla \times \mathbf{A}_2) = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{A}_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{A}_2$  为非导体区域的矢量位函数;  $\mu_2$  为非导体区域的磁导率。

对电磁场求解域设置磁绝缘边界条件为:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \quad (3)$$

对于电抗器的温度场仿真,需要考虑热传导、热对流 2 种热量传递方式。其中,固体中的传热控制方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = Q \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $c$  为比热容;  $T$  为温度;  $t$  为时间;  $k$  为导热系数;  $Q$  为热源。

流体中的传热控制方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla T - k \nabla^2 T = Q \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{u}$  为流体的速度。

对于电抗器周围的流场仿真,考虑到因其瑞利数较小,则选择层流冷却数学模型,其对应控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \\ \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $p$  为流体压强;  $\eta$  为流体动力黏度;  $g$  为重力加速度。

考虑环境温度的影响,设置温度场恒温边界条件为:

$$T|_S = T_0 \quad (7)$$

式中:  $S$  为温度场边界;  $T_0$  为环境温度。

在电抗器电磁-热-流多物理场耦合模型中,通过计算电抗器各个包封中产生的电磁损耗,并将其作为热源加载到温度场和流体场中进行耦合求解。在电磁场与温度场的双向耦合过程中,电磁损耗作为热源会改变温度场的分布,而温度场的变化又会导致导体电导率的改变,进而影响电磁场的分布。在温度场与流体场的双向耦合过程中,温度场分布的变化会导致流体场中气体的密度、导热系数、流速等参数变化,而这些参数的改变又会影响温度场的分布。电磁-热-流多物理场耦合关系如图 2 所示。

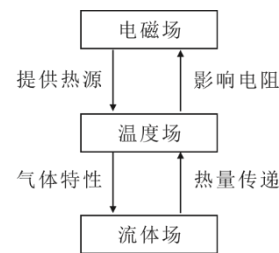


图2 电抗器多物理场耦合关系

Fig.2 Multi-physical field coupling relationship of reactor

## 1.2 基于场路耦合法的电抗器匝间短路故障模型

随着干式空心电抗器运行年限的增长,绕组匝间绝缘会逐渐老化。而绝缘失效则会引起局部放电,继而导致匝间电弧性短路故障<sup>[19-20]</sup>。故障点处电弧放电产生的高温会烧毁短路点周围绝缘,并逐渐熔化线圈中的金属导线,进而产生金属熔接性短路故障。其中,电弧放电是一个复杂的物理过程,根据 Mayr 电弧模型,电弧放电过程大体可分为起弧、燃弧、熄弧 3 个阶段,此时,电弧电阻也呈现出周期性,其在 1 个周期内的电阻值变化过程如图 3 所示。当电抗器发生匝间短路故障时,被短路的绕组部分会形成一个短路环,将该短路匝线圈设为第  $n+1$  层,其等效电路如图 4 所示。

此时短路环的等效电阻  $R_{n+1}(t)$  由电弧电阻  $R_a(t)$  和短路线圈导线电阻  $R_s$  串联组成,即:

$$R_{n+1}(t) = R_s + R_a(t) \quad (8)$$

此时短路环的电阻  $R_{n+1}(t)$  为时变参数值。

将正常的绕组线圈等效为一次侧电路,其流过的电流、等效电抗和电阻分别表示为  $I_1'$ 、 $L_1'$ 、 $R_1'$ ,

而将短路环等效为二次侧电路，其流过的电流、等效电抗和电阻分别表示为  $\dot{i}'_{n+1}$ 、 $L_{n+1}$ 、 $R_{n+1}$ 。则电抗器匝间短路故障电路如图 5 所示。

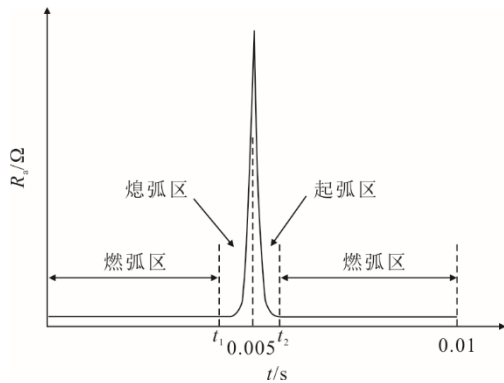


图 3 电弧电阻变化曲线  
Fig.3 Arc resistance variation curve

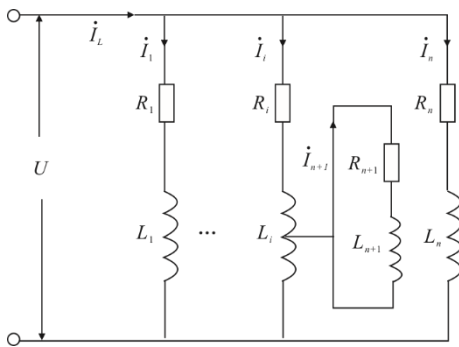


图 4 电抗器匝间短路故障等效电路  
Fig.4 Equivalent circuit of reactor inter turn short circuit fault

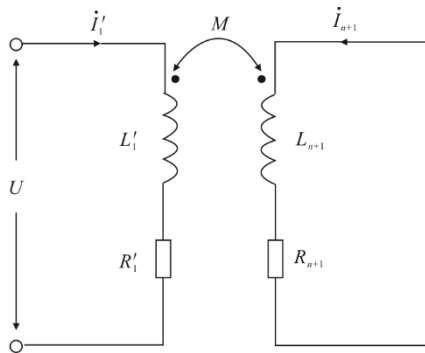


图 5 电抗器匝间短路故障电路  
Fig.5 Inter turn short circuit fault circuit of reactor

对电抗器匝间短路故障电路列写 KCL 电路方程组，得：

$$\begin{bmatrix} R'_1 + j\omega L'_1 & j\omega M \\ j\omega M & R_{n+1} + j\omega L_{n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}'_1 \\ \dot{i}_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： $M$ 为一、二次侧绕组之间的互感。整理式(9)并提取虚部，得到电抗器等效电感为：

$$L_{eq}(t) = L'_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_{n+1}}{R_{n+1}^2(t) + \omega^2 L_{n+1}^2} \quad (10)$$

基于上述电抗器多物理场耦合模型与匝间短路故障模型，建立电抗器场-路耦合模型如图 6 所示。将不同严重程度故障点依次设置在电抗器不同位置，即可模拟和分析电抗器匝间短路故障。

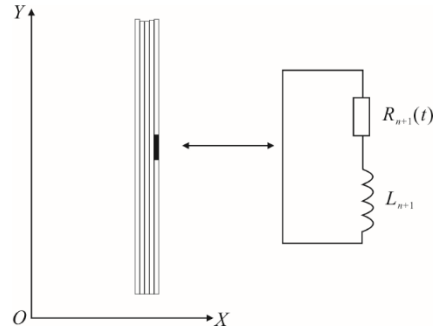


图 6 电抗器场-路耦合模型  
Fig.6 Field circuit coupling model of reactor

### 1.3 电抗器模型试验验证

#### 1.3.1 额定运行试验

为了验证电抗器多物理场耦合模型的正确性和有效性，搭建电抗器运行试验平台，照片如图 7 所示。其中，试验对象为 CKGKL-120-10-12 型干式空心电抗器，试验中用到的测量设备包括 HJ12-2 型电压互感器、HL28-13 型电流互感器、天铂 H60 型红外成像仪。其中，试验电抗器的额定参数见表 3。

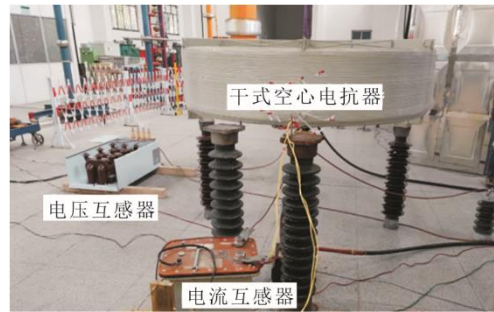


图 7 电抗器试验平台  
Fig.7 Reactor test platform

表 3 干式空心电抗器额定参数  
Tab.3 Rated parameters of dry-type air-core reactor

额定电压/kV	额定电流/A	额定容量/kVA	电感/mH
10.000	144.500	120.135	18.314

基于该试验平台，对电抗器施加 10 kV 电压，利用电压互感器、电流互感器测量流过电抗器的实时电流值，并计算电抗器阻抗角；利用红外成像仪测量电抗器额定工况下电抗器运行 2 h 后热点温度值。电抗器试验特征量与仿真特征量对比见表 4。

表 4 电抗器试验特征量与仿真特征量对比  
Tab.4 Comparison between test feature and simulation feature of reactor

特征量	试验值	仿真值
电流幅值/A	144.313	142.836
阻抗角/(°)	87.35	86.58
热点温度/°C	105.79	112.34

由表 4 可知, 流过电抗器总电流仿真误差为 1.023%, 电抗器阻抗角仿真误差 0.882%, 电抗器的热点温度仿真误差为 6.19%, 温差均在合理范围内, 证明了电抗器电磁仿真模型以及温度场仿真模型的准确性。

### 1.3.2 匝间短路试验

为了验证基于场-路耦合的电抗器故障模型的有效性, 搭建电抗器匝间电弧性短路试验平台, 其中, 电弧发生装置由固定部分与滑动部分组成, 固定部分包括固定底座和固定电极、滑动部分包括滑动块和移动电极, 2 个电极均接引出线, 具体结构如图 8 所示。

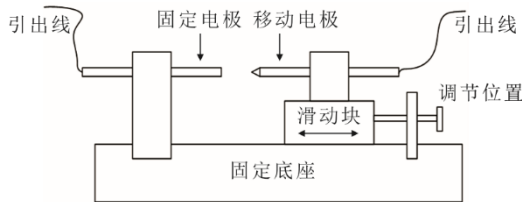


图 8 电弧发生装置  
Fig.8 Arc generator

为防止电抗器引出线触碰下星型架引发短路, 利用支柱绝缘子将引出线抬高, 并连接电弧发生装置, 电抗器匝间电弧性短路试验平台如图 9 所示。对电抗器施加 10 kV 电压, 利用电流互感器测量流过电抗器的实时电流值。其中, 故障电抗器试验电流与仿真电流对比见表 5。由表 5 可知, 流过故障电抗器的总电流仿真误差为 0.755%, 由此证明电抗器故障模型用于电磁仿真的准确性。

对流过故障电抗器的电流进行频谱分析, 计算电流谐波总畸变率 (total harmonic current distortion, THDi) 为:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1} \times 100\% \quad (11)$$

式中:  $I_i$  为第  $i$  次谐波电流有效值;  $I_1$  为基波电流有效值。



图 9 电抗器匝间电弧性短路试验平台  
Fig.9 Reactor turn-to-turn arc fault test platform

表 5 故障电抗器试验电流与仿真电流对比  
Tab.5 Comparison between test current and simulation current of fault reactor

试验电流/A	仿真电流/A	误差率/%
145.721	144.621	0.755

由于电抗器在匝间短路工况下短时运行温度会快速上升, 因此, 对故障电抗器施加 10 kV 电压运行 30 s 后, 利用红外成像仪测量其外表面热点温度值。故障电抗器试验特征量与仿真特征量对比见表 6。由表 6 可知, 流过故障电抗器的电流 THDi 仿真误差约为 12.20%, 这是由于试验站 10 kV 电源电压存在一定谐波。阻抗角仿真误差为 0.804%, 由此证明了该故障电抗器电磁仿真模型的准确性。热点温度仿真结果与匝间电弧性短路故障试验相比误差为 6.84%, 证明所建场路耦合模型用于温度场仿真时也具有较高的计算精度。

表 6 故障电抗器试验特征量与仿真特征量对比  
Tab.6 Comparison between test feature and simulation feature of fault reactor

特征量	试验值	仿真值
电流 THDi/%	0.41	0.36
阻抗角/(°)	85.83	85.14
热点温度/°C	45.62	48.74

## 2 电抗器多状态特征量

为了有效评估电抗器的运行状态, 不仅需要确定电抗器的状态特征量, 分析其不同故障严重程度下的变化规律, 而且需利用电抗器场路耦合模型获取多特征量样本集, 用于电抗器状态评估模型的训练和测试。

### 2.1 电抗器状态特征识别与分析

电抗器发生匝间电弧性短路故障后, 电抗器等效电感是一个时变参数<sup>[9]</sup>。此时, 流过电抗器的电流不仅含有工频正弦波, 还含有大量谐波分量。其中, 电流的谐波分量幅值会随着电抗器故障严重程

度不同而发生改变。因此，本文将流过电抗器的电流幅值及谐波总畸变率作为状态特征量。此外，在故障发展过程中随着电抗器等效电感的变化，电抗器的阻抗角也随之改变。因此，将电抗器的阻抗角作为状态特征量。

电抗器发生匝间短路故障时，其短路环中会产生较大的感应电流，由(9)式可得，其感应电流值为：

$$i_{n+1} = - \frac{j\omega M}{R_{n+1} + j\omega L_{n+1}} \quad (12)$$

感应电流  $i_{n+1}$  产生的焦耳热导致短路点处温度急剧上升，并主要通过热传导方式将热量传递到绝缘介质附近。而温升的增高会加速绝缘材料的老化并使其失去绝缘性能<sup>[21]</sup>，进而导致电抗器匝间短路范围扩大，使得电抗器整体温度迅速升高，最终引起电抗器起火烧毁。因此，将电抗器的热点温度亦作为状态特征量。

综上所述，确定干式空心电抗器运行的状态特征量为电流幅值、电流谐波总畸变率、阻抗角和热点温度。

### 2.2 不同故障程度的多状态特征量

本文通过在电抗器最外层中部设置不同匝数的匝间短路故障，仿真不同故障程度的电抗器运行状态，从而获取多状态特征量样本。

利用不同故障程度下电抗器的电磁仿真，获取的电流幅值随短路匝数变化曲线如图 10 所示。当匝间短路故障发生时，流过电抗器的电流幅值明显升高，当短路匝由 1 匝增至 12 匝，流过电抗器的电流幅值共增加了 26.58 A。

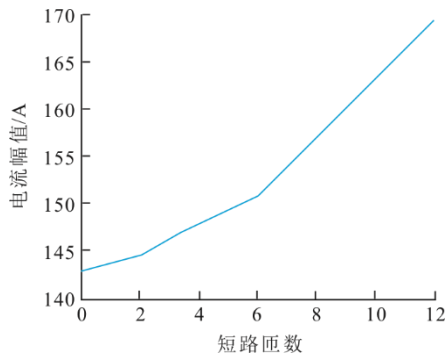


图 10 电抗器电流幅值随故障严重程度变化  
Fig.10 Variation diagram of reactor current amplitude with fault severity

电流谐波总畸变率随短路匝数的变化曲线如图 11 所示。随着故障严重程度的增加，电抗器电流谐波总畸变率逐渐增加，当电抗器短路匝数增至 12 匝后，电流谐波总畸变率含量达到 5.12%。

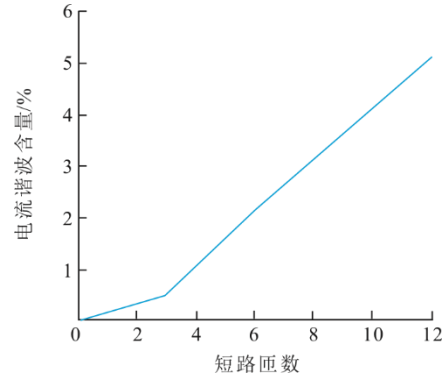


图 11 电抗器电流谐波总畸变率随故障严重程度变化  
Fig.11 Variation diagram of reactor THDi with fault severity

对不同故障程度的电抗器计算其阻抗角，得到阻抗角随短路匝数的变化曲线如图 12 所示。当短路匝数由 1 匝增加到 12 匝，电抗器的阻抗角从 87.41°降低到 71.79°。

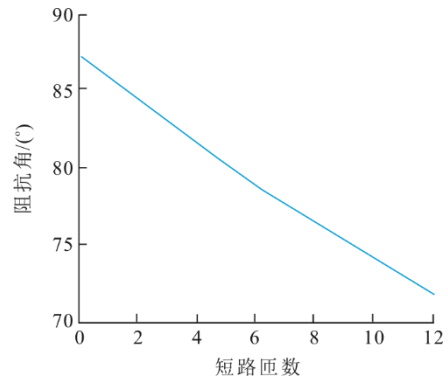


图 12 电抗器阻抗角随故障严重程度变化  
Fig.12 Variation diagram of reactor impedance angle with fault severity

绘制不同故障程度下运行 30 s 后的电抗器最热点温度随短路匝数的变化曲线如图 13 所示。电抗器发生匝间短路后，热点温度急剧增长，当短路匝数扩大到 12 匝时，热点温度达到 74.59 °C，可以通过热点温度来表征电抗器的运行状态。

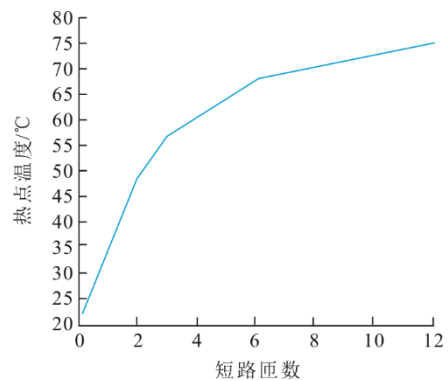


图 13 电抗器热点温度随故障严重程度变化  
Fig.13 Variation diagram of reactor hot spot temperature with fault severity

### 3 电抗器运行状态评估模型

在建立电抗器状态评估模型前，需要先确定电抗器的运行状态等级。此外，为了减弱输入属性之间相关性的影响，利用加权朴素贝叶斯分类器来评估电抗器的运行状态。

#### 3.1 电抗器运行状态等级

根据《油浸式变压器（电抗器）状态导则》DL/T 1685—2017，电抗器的运行状态标准可分为 5 级，具体见表 7。

表 7 电抗器运行状态分级及维修策略  
Tab.7 Operating status classification and maintenance strategy of reactor

健康指数	状态分级	维修策略
0~1.5	优	延期维修
1.5~4.0	注意	计划维修
4.0~5.5	良	优先维修
5.5~7.0	中	尽快维修
7.0~10.0	差	立即维修

#### 3.2 电抗器状态评估模型

为了提高模型的泛化能力，对评估模型的特征量以正常运行电抗器的特征量作归一化处理。具体来说，设某个待评估电抗器的特征向量为  $\mathbf{x}=(x_1, x_2, x_3, x_4)$ ，其中  $x_1、x_2、x_3、x_4$  分别为测量电流幅值/正常电流幅值、测量 THDi、测量阻抗角/正常阻抗角、测量热点温度/正常热点温度。此外，设电抗器的运行状态 5 个等级，用  $l_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$  来表示，其中  $l_1、l_2、l_3、l_4、l_5$  分别表示电抗器优、注意、良、中、差 5 种状态等级。

根据贝叶斯定理，可计算电抗器运行状态的后验概率  $P(l_i|\mathbf{x})$  为：

$$P(l_i|\mathbf{x}) = \frac{P(\mathbf{x}|l_i)P(l_i)}{P(\mathbf{x})} \quad (13)$$

其中，类条件概率  $P(\mathbf{x}|l_i)$  是所有属性上的联合概率，难以从有限的训练样本直接估计求得。为了降低贝叶斯公式中估计后验公式的难度，朴素贝叶斯采用了属性条件独立性假设，即对已知类别，假设每个属性独立地对分类结果产生影响。

此时，式(13)可表示为：

$$P(l_i|\mathbf{x}) = \frac{P(l_i) \prod_{j=1}^4 P(x_j|l_i)}{P(\mathbf{x})} \quad (14)$$

在式(14)中，对于不同的状态特征量， $P(\mathbf{x})$  均相同，则朴素贝叶斯分类器可表示为：

$$P(l_i|\mathbf{x}) = \alpha \cdot P(l_i) \prod_{j=1}^4 P(x_j|l_i) \quad (15)$$

式中： $P(l_i)、P(x_j|l_i)$  均可通过训练样本数据获得。设训练样本总数为  $N$ ，第  $l_i$  个电抗器状态等级的数量为  $N_{l_i}$ ，则类先验概率可估计为：

$$P(l_i) = \frac{N_{l_i}}{N} \quad (16)$$

考虑到电抗器状态特征量取值的连续性，采用概率密度函数来估计条件概率  $P(x_j|l_i)$ 。由于工程问题中的统计数据往往满足正态分布规律，则条件概率可估计为：

$$P(x_j|l_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{l_i,j}} \exp\left(-\frac{(x_j - \mu_{l_i,j})^2}{2\sigma_{l_i,j}^2}\right) \quad (17)$$

式中： $\mu_{l_i,j}$  和  $\sigma_{l_i,j}$  分别为第  $l_i$  类样本中第  $j$  类属性取值的均值和方差。

然而，属性条件独立性假设在一定程度上限制了朴素贝叶斯分类的适用范围，本文针对干式空心电抗器的特征量相关性，利用特征加权的方式减弱特征相关性对分类准确性的影响。此时，基于特征加权朴素贝叶斯的干式空心电抗器状态评估表达式  $c(x)$  为：

$$c(x) = \arg \max_{l_i \in I} \alpha \cdot P(l_i) \prod_{j=1}^4 P(x_j|l_i)^{w_j} \quad (18)$$

式中： $w_j$  为第  $j$  个特征的权值。

由式(18)可以看出，权值  $w_j$  越大的特征对分类结果的影响越大。因此，特征权重  $w_j$  的选取对干式空心电抗器状态评估模型的性能十分重要。

电抗器状态评估模型计算流程如图 14 所示。

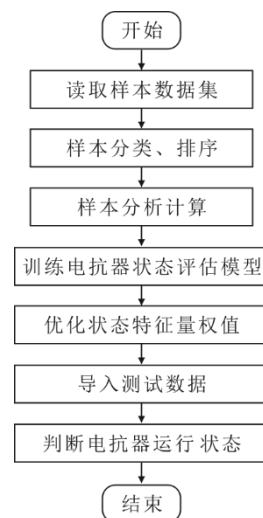


图 14 电抗器状态评估流程  
Fig.14 Flow chart of reactor state assessment

由图 14 可见,在电抗器状态评估时,首先将训练样本按照不同运行状态标记进行分类和排序,并统计不同状态等级的样本数量,计算对应的  $P(l_i)$ 。然后,计算不同状态等级下样本中不同类型属性取值的均值和方差。以电抗器状态评估模型预测准确率为优化目标函数,以各状态特征量的权值  $w_j$  之和为 1 作为约束条件,利用训练样本对电抗器状态评估模型进行训练,优化各状态特征量的权值  $w_j$ 。最后,导入测试数据,利用式(17)求得  $P(x_j|l_i)$ ,利用式(18)计算  $c(x)$ ,并给出电抗器运行状态评估结果,

### 3.3 实例分析

对第 2 节中所建立的电抗器多状态特征进行处理,考虑到电抗器实际运行时的电压波动范围为  $\pm 5\%$ ,在该范围内采用随机激励下的电抗器多物理场仿真,生成 200 组仿真数据作为贝叶斯分类器的训练样本,具体见表 8。

表 8 训练样本  
Tab.8 Simulation parameter setting

运行状态类型	样本数	特征量
优	140	电流幅值、电流谐波总畸变率、 阻抗角、热点温度
注意	15	
良	15	
中	15	
差	15	

利用包含 5 种运行状态等级的测试数据进行分析,为了验证本文所提出的加权朴素贝叶斯状态评估模型的准确性,与标准朴素贝叶斯分类预测结果进行对比,结果见表 9。

表 9 状态分级结果  
Tab.9 Status classification results

状态分级	样本数量	正确数量	
		朴素贝叶斯	加权贝叶斯
优	16	16	16
注意	16	16	16
良	16	16	16
中	16	13	14
差	16	10	13

从表 9 中可以看出,朴素贝叶斯分类算法对电抗器状态评估的准确率为 88.75%,而加权贝叶斯分类算法对电抗器状态评估的准确率为 93.75%,证明加权贝叶斯分类算法在针对电抗器状态评估方面具有更好的准确性。

为了验证多状态特征量对电抗器状态评估模型准确率的影响,将基于多状态特征量的电抗器状

态评估模型与基于单特征量、二特征量及三特征量的评估模型预测准确率进行对比,结果见表 10。

表 10 基于多特征量的状态分级结果  
Tab.10 State classification results based on multiple feature quantities

电抗器运行状态评估模型	准确率/%
基于单特征量 (电流谐波)	75.00
基于二特征量 (谐波、温度)	83.75
基于三特征量 (幅值、谐波、温度)	88.75
基于四特征量 (电流幅值、电流谐波、阻抗角、热点温度)	93.75

从表 10 中可以看出,利用基于四特征量样本的电抗器状态评估模型的准确率最高,约为 93.75%,而基于单特征量的电抗器状态评估模型的准确率仅为 75.00%。随着多种特征量的引入,分类准确率不断提高。通过实例分析证明了本文所提出的基于多状态特征量和加权贝叶斯分类的电抗器状态评估方法能够准确地识别电抗器运行状态。

## 4 结 论

本文通过确定电抗器运行状态特征量,建立了基于加权朴素贝叶斯分类的干式空心电抗器状态评估模型,并通过实例分析证明了模型的准确性和有效性。主要结论为:

- 1) 建立干式空心电抗器电磁-热-流多物理场耦合模型,并采用场路耦合方法仿真电抗器匝间短路故障,通过搭建电抗器运行试验平台验证了仿真方法的准确性。
- 2) 分析电抗器匝间短路故障后电流的幅值、谐波分量、阻抗角及热点温度的变化规律,确定了电抗器运行状态特征量,并建立了不同运行状态等级的特征量样本集。
- 3) 提出了基于加权朴素贝叶斯分类算法和多特征量的电抗器状态评估方法,并与标准朴素贝叶斯方法和基于单特征量的评估方法进行对比,所提方法的预测准确率有明显提高。

### [参 考 文 献]

[1] 吴冬文. 35 kV 干式电抗器温度场分布及红外测温方法研究[J]. 变压器, 2013, 50(9): 62-65.  
WU Dongwen. Temperature field distribution and infrared temperature measurement method research of 35 kV dry-type reactor[J]. Transformer, 2013, 50(9): 62-65.

[2] 裴运军, 林良顺, 胡泰. 一种改良型干式空心电抗器的无线测温装置设计[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(10): 79-82.  
PEI Yunjun, LIN Liangshun, HU Tai. Design of wireless temperature measurement device based on an improved

- dry type air core reactor[J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2016, 32(10): 79-82.
- [3] 陈嵘, 杨松伟, 程泳, 等. 干式空心并联电抗器电磁-流体-温度场耦合计算与分析[J]. *高电压技术*, 2017, 43(9): 3021-3028.  
CHEN Rong, YANG Songwei, CHENG Yong, et al. Electromagnetic-fluid-temperature coupling calculation and analysis of dry-type air-core shunt reactor[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(9): 3021-3028.
- [4] 王梓, 刘溟, 邹建明, 等. 基于TVOC检测的干式空心电抗器过热故障诊断方法[J]. *高电压技术*, 2017, 43(11): 3756-3762.  
WANG Zi, LIU Ming, ZOU Jianming, et al. Diagnostic method of dry-type air-core reactors overheating fault based on monitoring TVOC[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(11): 3756-3762.
- [5] 孙才新, 陈伟根, 李俭, 等. 电器设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1.  
SUN Caixin, CHEN Weigen, LI Jian, et al. Online monitoring and fault diagnosis technology of gas in oil of electrical equipment[M]. Beijing: Science Press, 2003: 1.
- [6] 古亮, 刘肖光, 陈新岗, 等. 干式空心电抗器匝间短路汇流母排电流变化规律的研究[J]. *高压电器*, 2018, 54(10): 145-150.  
GU Liang, LIU Xiaoguang, CHEN Xingang, et al. Research on current imbalance law of bus-bar caused by inter-turn short circuit of dry-type air-core reactor[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(10): 145-150.
- [7] 黄新波, 周岩, 朱永灿, 等. 干式空心电抗器匝间短路故障在线监测技术[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(2): 150-155.  
HUANG Xinbo, ZHOU Yan, ZHU Yongcan, et al. Online monitoring technology of inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor[J]. *Power System Automation*, 2019, 43(2): 150-155.
- [8] 郭哲, 郭志广, 贾跟卯, 等. 空心并联电抗器匝间故障三阶段特性分析及综合保护方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(8): 149-156.  
GUO Zhe, GUO Zhiguang, JIA Genmao, et al. Three-stage characteristic analysis on inter-turn fault and comprehensive protection method for air-core shunt reactor[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(8): 149-156.
- [9] 张波, 王坚俊, 韩文芳, 等. 干式空心电抗器匝间电弧性短路故障特征提取及诊断方法研究[J]. *热力发电*, 2021, 50(12): 145-152.  
ZHANG Bo, WANG Jianjun, HAN Wenfang, et al. Study on feature extraction and diagnosis method of inter-turn arc short circuit fault in dry-type air core reactor[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(12): 145-152.
- [10] 赵春明, 敖明, 王永红, 等. 基于功率因数变化量的干式空心电抗器匝间短路故障在线监测方法[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(3): 87-93.  
ZHAO Chunming, AO Ming, WANG Yonghong, et al. Online monitoring method of inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor based on power factor variation[J]. *Power Capacitor and Reactive Power Compensation*, 2020, 41(3): 87-93.
- [11] 江秀臣, 盛戈皞. 电力设备状态大数据分析的研究和应用[J]. *高电压技术*, 2018, 44(4): 1041-1050.  
JIANG Xiuchen, SHENG Gehao. Research and application of big data analysis of power equipment condition[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(4): 1041-1050.
- [12] 蒲天骄, 乔骥, 韩笑, 等. 人工智能技术在电力设备运维检修中的应用[J]. *高电压技术*, 2020, 46(2): 369-383.  
PU Tianjiao, QIAO Ji, HAN Xiao, et al. Research and application of artificial intelligence in operation and maintenance for power equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(2): 369-383.
- [13] 廖瑞金, 王有元, 刘航, 等. 输变电设备状态评估方法的研究现状[J]. *高电压技术*, 2018, 44(11): 3454-3464.  
LIAO Ruijin, WANG Youyuan, LIU Hang, et al. Research status of condition assessment method for power equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(11): 3454-3464.
- [14] 李刚, 张博, 赵文清, 等. 电力设备状态评估中的数据科学问题: 挑战与展望[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(21): 10-20.  
LI Gang, ZHANG Bo, ZHAO Wenqing, et al. Data science issues in state evaluation of power equipment: challenges and prospects[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(21): 10-20.
- [15] 唐文虎, 牛哲文, 赵柏宁, 等. 数据驱动的人工智能技术在电力设备状态分析中的研究与应用[J]. *高电压技术*, 2020, 46(9): 2985-2999.  
TANG Wenhui, NIU Zhewen, ZHAO Boning, et al. Research and application of data-driven artificial intelligence technology for condition analysis of power equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(9): 2985-2999.
- [16] 耿苏杰, 王秀利. 基于模糊贝叶斯网络的电力设备故障诊断和状态评估[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(1): 63-71.  
GENG Sujie, WANG Xiuli. Fault diagnosis and state estimation of power equipment based on fuzzy Bayesian network[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2021, 27(1): 63-71.
- [17] 魏波涛. 基于贝叶斯深度学习的高维小样本数据分类研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 1.  
WEI Botao. Research on classification of high-dimensional small sample data based on Bayes deep learning[D]. North China Electric Power University, 2020: 1.
- [18] 赵文清, 朱永利, 姜波, 等. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估[J]. *高电压技术*, 2008, 34(5): 1032-1039.  
ZHAO Wenqing, ZHU Yongli, JIANG Bo, et al. Condition assessment for power transformers by Bayes networks[J]. *High Voltage Technology*, 2008, 34(5): 1032-1038.
- [19] 姜志鹏. 干式空心电抗器多物理场分析及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014: 1.  
JIANG Zhipeng. Multi-physics analysis and application research of dry-type air-core reactor[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014: 1.
- [20] 范茜勉. 电抗器匝间短路的影响及检测方法[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016: 1.  
FAN Qianmian. The influence of reactor turn-to-turn short circuit and its detection method[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016: 1.
- [21] 叶占刚. 干式空心电抗器的结构特点及其使用寿命的分析[J]. *变压器*, 1995(8): 23-25.  
YE Zhangan. Analysis of structural characteristics and service life of dry-type air core reactor[J]. *Transformer*, 1995(8): 23-25.

(责任编辑 杜亚勤)