DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190072

基于关联规则与变权重系数的变压器状态综合评估方法

谭贵生[1]，曹生现[2]，赵 波[2]，魏宏建[3]，刘丹丹[4]

(1.云南大学旅游文化学院，云南 丽江 674100；2.东北电力大学自动化工程学院，吉林 吉林 132012；
3.阜阳师范大学，安徽 阜阳 236037；4.云南电网有限责任公司丽江供电局，云南 丽江 674100)

摘要：为了提高变压器诊断的准确性和适应设备检修的发展趋势，克服传统智能算法的局限性，提出一种基于关联规则和变权重系数的变压器状态综合评估的方法。根据试验和监测数据建立评估体系，通过 9 种综合故障和 24 种单项故障状态量，利用关联规则分别计算置信度和变权重系数，结合变压器的运行状态与检修对照关系，诊断变压器的整体指标。实验结果表明该方法准确率达到 91%，能够准确评估电力变压器的健康状态。该方法可为运维人员做设备检修提供科学指导方案，也为其他高压设备的状态评估提供参考和借鉴。

关键词：电力变压器；状态评估；关联规则；变权重系数；故障诊断

An assessment of power transformers based on association rules and variable weight coefficients

TAN Guisheng[1], CAO Shengxian[2], ZHAO Bo[2], WEI Hongjian[3], LIU Dandan[4]

(1. Tourism and Culture of Yunnan University, Lijiang 674100, China; 2. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 3. Fuyang Normal University, Fuyang 236037, China; 4. Lijiang Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Corporation, Lijiang 674100, China)

Abstract: To enhance the accuracy of the fault diagnosis of power transformer and adapt to the development trend of power equipment condition, and overcome the limitations of traditional intelligent algorithms, a method of comprehensive evaluation of power transformer status based on association rules and variable weight coefficients is proposed in this paper. According to the experimental tests and monitored data, the evolution system is established. Through 9 comprehensive diagnosis faults and 24 single fault status, the belief confidence and variable weight coefficients calculated by the correlation rules, as well as the relationship between the running status of power transformer and the related maintenance records, the overall performance of power transformer can be derived. The experimental results reveal that the accuracy of the method can reach to 91%, which can accurately assess the health status of the power transformer. Also, the proposed method can guide the maintenance personnel to service equipment and provide reference for the status evaluation of the other high-voltage power equipment.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB5100803), National Natural Science Foundation of China (No. 51606035), Project of Science and Technology Department of Jilin Province (No. 20190302079GX), and Project of Education Department of Yunnan Province (No. 2016ZDX261).

Key words: transformer; condition assessment; association rule; variable weight coefficient; fault diagnosis

0 引言

电力变压器是电力系统中的核心设备，能够起到枢纽作用，变压器的健康状态直接影响电网的运行稳定程度，严重的变压器故障会造成系统分裂，导致经济损失和生命安全。准确的状态评估可以减少变压器的维护费到 20%~50%[1]。近年来，国内外学者和专家提出大量关于变压器的状态评估和可靠性评价方法。随着人工智能的发展，如人工神经网络[2]、支持向量机[3-4]、故障树分析方法[5]、贝叶斯网络[6]、关联规则[7]等智能算法进行变压器的故障诊断和状态评估；但单一智能故障诊断难以准确判

基金项目：国家重点研发计划项目资助(2018YFB5100803)；国家自然科学基金项目资助(51606035)；吉林省科技厅项目资助(20190302079GX)；云南省教育厅项目资助(2016ZDX261)

断；为了克服单一算法的缺陷，结合几种算法进行组合或者改进算法变成新算法，实验结果表明评估状态有很大提升[8-9]；这些研究都存在共性的问题，数据种类少，数据量少，故障类型少，不具备完全数据组。为了保证变压器状态评估的准确性，需要在完备数据情况下，对状态维护和预防维护起到重要作用。但变压器维护具有特殊性，难以收集完备数据组，目前绝大部分的权重主要依赖于专家经验，文献[10-11]采用层次分析法在变压器状态评估中的应用，评估的置信度增大，但是存在模糊判断，很难满足判断矩阵的一致性。文献[12-14]中的变压器故障是由某一个或者几个故障征兆状态量能做出诊断的，采用关联规则来评估变压器综合状态，结果表明不同故障类型与征兆状态量密切相关。如何利用设备信息样本集来评价电力变压器的综合状态的研究成为研究的热点。

鉴于以上分析，本文提出基于关联规则和变权重的变压器状态综合评价的方法，根据试验和监测数据建立评估指标，通过不同的故障类型和征兆值，利用关联规则计算置信度和变权重系数，综合判断电力变压器的健康状态；实验结果表明该方法能够评估变压器的健康状态。

1　建立状态评估因素集与评分标准

根据变压器状态评估体系建立，遵循状态指标选取的五个原则，选择合理、全面的变压器指标体系，既能保证诊断的准确性和有效性，也能保证建立状态评估模型的合理性。

1.1 状态评估因素集

电力变压器的状态信息较为复杂，根据国家电网公司的《油浸式变压器(电抗器)状态评价导则(Q/GDW169—2008)》[15]、《电力设备预防性实验规程》[16]、《变压器油中溶解气体分析和判断导则(GB/T7252-2001)》[17]和文献[7,13]中给出的故障类型和故障征兆变量。本文提取 9 种电力变压器故障类型作为综合故障指标如表 1 所示。选取 24 种变压器的试验和监测单项状态量作为征兆值如表 2 所示。

表 1 9 种变压器故障类型

Table 1 9 fault types of power transformers

序号	综合状态量	序号	综合状态量
F_1	绕组故障	F_6	绝缘老化
F_2	铁芯故障	F_7	绝缘油劣化
F_3	电流回路过热	F_8	局部放电
F_4	绝缘受潮	F_9	油流放电
F_5	电弧放电		

表 2 变压器的试验和监测单项状态量

Table 2 Experimental and monitoring data of transformer

序号	单项状态量	序号	单项状态量
1	H_2 含量	13	体积电阻率
2	C_2H_2 含量	14	铁芯接地电流
3	CH_4 含量	15	铁芯绝缘电阻
4	C_2H_4 含量	16	绕组直流电阻互差
5	C_2H_6 含量	17	绕组短路阻抗初值差
6	CO 相对产气速率	18	中性点油流静电电流
7	CO_2 相对产气速率	19	纸板聚合度
8	绝缘油介损	20	局部放电量
9	油中含水量	21	油中含气量
10	油击穿电压	22	绕组绝缘介损
11	绝缘电阻吸收比	23	糠醛含量
12	极化指数	24	绕组电容初值差

1.2 状态的评语集与评分标准的对照

借鉴国家电网公司在设备状态检修规章把电力变压器的运行状态分为 5 个等级，分别为优秀、良好、一般、故障、严重故障共 5 个运行状态[18]。上面 5 种电压器的运作状态可以作为评价体系，评语集合表示为 ={优秀，良好，一般，故障，严重故障}={[85~100], [60~85], [40~60], [20~40] , [0~20]}，给出对应检修的策略如表 3 所示。

表 3 运行状态评分值与检修状态对照表

Table 3 Status and scores of power transformer

评分	85~100	60~85	40~60	20~40	0~20
状态描述	优秀	良好	一般	故障	严重故障
检修策略	正常运行	延期检修	计划检修	尽快检修	立即检修

2　评估指标权重系数计算

变压器是一个复杂系统，通常变压器故障分为 9 种故障类型，评估状态指标和健康状态都是从局部到整体的过程，本文采用关联规则和变权重系数来评估变压器的综合状态。

2.1 关联规则

关联规则是数据挖掘重要手段之一，主要指寻找同一个事件中出现的不同项的相关性，即事务数据库中不同项之间的相关性。根据关联规则的定义[19]，事务数据库为Θ，$|\Theta|$是事务库的个数，假设 A 与 B 是Θ的子集事务，则满足 $A\subset\Theta$，$B\subset\Theta$，且 $A\cap B$ 为空集，则 $A\Rightarrow B$ 的式子为关联规则，A 和 B 为关联规则的前件和后件。关联规则的有效性和可信度都是由支持度和置信度来衡量的。

支持度是数据库Θ中 $A\cup B$ 的百分比，如式(1)

所示；支持度越高，说明 A 与 B 的关联程度高；当支持度等于 1 时，说明 A 和 B 的关系十分可靠。

$$Sup(A\to B)=P(A\cup B)=\frac{\sigma(A\cup B)}{|\Theta|}\times 100\%=\frac{\sigma(A\cup\Theta)}{|\Theta|}\times 100\% \tag{1}$$

置信度是数据库Θ中 A 与 B 的关系，通常用 A 出现时 B 的概率，如式(2)所示；置信度太低，说明可信度不可靠。

$$C(A\to B)=P(B\mid A)=\frac{P(A\cup B)}{P(A)}\times 100\% \tag{2}$$

在电力变压器状态评估过程中，考虑指标的合理性，用支持度来验证，步骤如下：

1) 事务数据库 Θ_i，即第 i 类故障出现的次数。

2) 确定项集 I_{ij}，即第 i 类故障中第 j 个状态指标的单项故障次数。

3) 确定项集 F_i，即第 i 类综合故障发生的次数。

电力变压器出现故障至少有 1 项综合故障类型；综合故障类型由几种单项故障征兆值呈现出来。如 $X_{ij}\Rightarrow F_i$ 的前件与后件的关系：前件 X_{ij}={24 种故障征兆}；后件 F_i={9 种故障类型}；其中 $i=1,2,\cdots,9$，$j=1,2,\cdots,24$。由式(2)可得变压器的置信度的计算如式(3)所示。

$$C(I_{ij}\to F_i)=P(F_i\mid X_{ij})=\frac{P(X_{ij}\cup F_i)/|\Theta_i|}{P(X_{ij})/|\Theta_i|}\times 100\%=\frac{\sigma(X_{ij}\cup F_i)}{\sigma(X_{ij})}\times 100\% \tag{3}$$

根据式(3)计算变压器9种状态量的置信度 C_i。

2.2 权重系数

根据关联规则找出变压器故障征兆与故障类型潜在的联系，其关系存在关联性和独立性，为了保证故障征兆状态的准确性，采用置信度的大小分配权重系数，保证评估系统的准确性。

常权重系数是变压器单项状态量与总的单项状态量的比值，如式(4)所示。

$$\theta_{ij}=\frac{c_{ij}}{c_{1j}+c_{2j}+\cdots+c_{ij}+\cdots+c_{in_i}} \tag{4}$$

式中：θ_{ij} 为 F_i 中 X_{ij} 的常权重系数；c_{ij} 为 F_i 中 X_{ij} 的置信度；n_i 为 F_i 中 i 的总个数。

以表 4 中的“绕组故障”为例，验证综合故障类型指标的合理性，选取最小支持度阈值 $S_{\min}$=70%，并计算常权重系数。“绕组故障”是由 4 个单项状态量组成，包括：H_2 含量、绕组短路阻抗初值差、绕组绝缘介损和绕组电容量初值差；绕组故障总数据库为Θ，4 个单项状态量为 X_{11}、X_{12}、X_{13} 和 X_{14}，绕组故障为 F_1。表 4 中的总数据库Θ为 968，4 个单项超标的次数分别为 102、112、108、110 次；4 个单项超标的总次数分别为 396、115、237、112 次，而绕组故障的次数为 116 次，根据式(1)可以分别计算出“绕组故障”的支持度：

$$S_{11}=\frac{P(X_{11}\cup F_1)}{P(F_1)}\times 100\%=\frac{102}{116}\times 100\%=87.9\%$$

$$S_{12}=\frac{P(X_{12}\cup F_1)}{P(F_1)}\times 100\%=\frac{112}{116}\times 100\%=96.6\%$$

$$S_{13}=\frac{P(X_{13}\cup F_1)}{P(F_1)}\times 100\%=\frac{108}{116}\times 100\%=93.1\%$$

$$S_{14}=\frac{P(X_{14}\cup F_1)}{P(F_1)}\times 100\%=\frac{110}{116}\times 100\%=94.8\%$$

“绕组故障”的 4 个单项故障的支持度都大于 70%，所以综合故障类型指标是合理的。根据式(3)可以分别计算出“绕组故障”的置信度：

$$C_{11}=\frac{P(X_{11}\cup F_1)}{P(X_{11})}\times 100\%=\frac{102}{396}\times 100\%=25.8\%$$

$$C_{12}=\frac{P(X_{12}\cup F_1)}{P(X_{12})}\times 100\%=\frac{112}{115}\times 100\%=97.4\%$$

$$C_{13}=\frac{P(X_{13}\cup F_1)}{P(X_{13})}\times 100\%=\frac{108}{237}\times 100\%=45.6\%$$

$$C_{14}=\frac{P(X_{14}\cup F_1)}{P(X_{14})}\times 100\%=\frac{110}{112}\times 100\%=98.2\%$$

计算常权重系数由式(4)可得

$$\theta_{11}=\frac{c_{11}}{c_{11}+c_{12}+c_{13}+c_{14}}=0.0965$$

同理可得：$\theta_{12}=0.3649$，$\theta_{13}=0.1707$，$\theta_{14}=0.3679$；其余的常权重系数按以上步骤计算可得。

在电力变压器故障诊断中，常权重系数会偏离正常值，一定程度上使权重所占比例大大提高，不能准确反映变压器的实际运行情况，严重影响变压器的综合状态的评价。为了保证综合评价指标的均衡性，引用文献[19]的变权重系数如式(5)所示。

$$\theta_i'=\frac{\theta_i}{x_i}/\sum_{y=1}^{n}\frac{\theta_y}{x_y} \tag{5}$$

式中：θ_i' 为 F_i 中变权重系数；x_i 为 F_i 的评分值；n 为综合状态量的个数；θ_i 为 F_i 中权重系数。

把均衡函数引入形成综合指标的变权重系数如式(6)所示[20]。

$$\theta_i'=\theta_i x_i^{a-1}/\sum_{y=1}^{n}\theta_y x_y^{a-1} \tag{6}$$

表 4 变压器故障之间的关联和权重

Table 4 Constant weights and correlation of all status parameters

综合状态量	故障次数	单项状态量	单项状态量异常次数	单项状态量总次数	支持度	常权重系数
F_1 绕组故障	116	X_{11} H_2 含量	102	396	0.879 3	0.096 5
		X_{12} 绕组短路阻抗初值差	112	115	0.965 5	0.364 9
		X_{13} 绕组绝缘介损	108	237	0.931 0	0.170 7
		X_{14} 绕组电容量初值差	110	112	0.948 3	0.367 9
F_2 铁芯故障	136	X_{21} 铁芯接地电流	126	130	0.926 5	0.392 8
		X_{22} 铁芯绝缘电阻	128	408	0.941 2	0.127 2
		X_{23} C_2H_6 含量	124	178	0.911 8	0.284 7
		X_{24} C_2H_4 含量	105	218	0.772 1	0.195 3
F_3 电流回路过热	119	X_{31} C_2H_4 含量	104	218	0.873 9	0.178 3
		X_{32} 绕组直流电阻互差	115	309	0.966 4	0.139 1
		X_{33} CO 相对产气速率	111	123	0.932 8	0.337 3
		X_{34} CO_2 相对产气速率	109	118	0.917 9	0.345 3
F_4 绝缘受潮	141	X_{41} 绝缘油介损	132	430	0.936 2	0.075 7
		X_{42} 油中含水量	129	357	0.914 9	0.089 0
		X_{43} 油击穿电压	130	231	0.922 1	0.138 7
		X_{44} 绝缘电阻吸收比	125	131	0.886 5	0.235 1
		X_{45} 极化指数	120	126	0.851 1	0.234 7
		X_{46} 体积电阻率	124	431	0.879 4	0.070 9
		X_{47} H_2 含量	135	396	0.967 4	0.084 0
		X_{48} 铁芯绝缘电阻	119	408	0.844 0	0.071 9
F_5 电弧放电	120	X_{51} H_2 含量	102	396	0.850 0	0.196 2
		X_{52} 绕组直流电阻互差	115	309	0.958 3	0.283 5
		X_{53} C_2H_2 含量	105	218	0.875 0	0.366 9
		X_{54} 局部放电量	85	422	0.041 7	0.153 4
F_6 绝缘老化	122	X_{61} 绝缘油介损	107	430	0.959 0	0.078 4
		X_{62} 体积电阻率	108	431	0.885 2	0.078 9
		X_{63} 绕组绝缘介损	115	237	0.942 6	0.152 8
		X_{64} 油中含气量	114	422	0.934 4	0.085 1
		X_{65} 糠醛含量	119	126	0.975 4	0.297 5
		X_{67} 纸板聚合度	120	123	0.983 6	0.307 3
F_7 绝缘油劣化	107	X_{71} 绝缘油介损	102	430	0.953 3	0.149 7
		X_{72} 油中含水量	95	422	0.887 9	0.142 1
		X_{73} 油击穿电压	92	231	0.859 8	0.251 3
		X_{74} 体积电阻率	97	431	0.906 5	0.142 1
		X_{75} 铁芯绝缘电阻	103	408	0.962 6	0.159 3
		X_{76} 油中含气量	88	357	0.822 4	0.155 5
F_8 局部放电	134	X_{81} H_2 含量	123	396	0.917 9	0.110 2
		X_{82} 绝缘直流电阻互差	120	309	0.895 5	0.137 8
		X_{83} 局部放电量	134	217	1.000 0	0.219 2
		X_{84} 油中含水量	116	357	0.865 7	0.115 3
		X_{85} 油中含气量	121	422	0.903 0	0.101 7
		X_{86} CH_4 含量	129	145	0.962 7	0.315 8
F_9 油流放电	93	X_{91} 绝缘油介损	87	430	0.935 5	0.096 4
		X_{92} 体积电阻率	90	431	0.967 7	0.099 0
		X_{93} C_2H_2 含量	81	154	0.871 0	0.260 6
		X_{94} 油中含气量	85	422	0.914 0	0.095 5
		X_{95} 中性点油流静电电流	93	96	1.000 0	0.459 5

式中：a为均衡函数。当$a=1$时，综合变权系数等于常权重系数；当$0.5<a<1$时，综合状态量要求程度不高；当$0\le a<0.5$时，剔除综合状态量严重缺陷值。当故障状态量评分较低时，根据式(5)和式(6)进行调整权重系数，避免权重系数不均衡，若评分值较低，说明权重系数大，表示变压器故障越严重；能反映变压器的实际运行情况。

3　电力变压器状态评估步骤

根据状态评估因素集与评分标准建立评估体系，运用关联规则找出综合状态量与单项状态量的联系，通过权重计算方法和状态评分标准进行变压器的综合状态评估，评估体系流程图如图 1 所示。

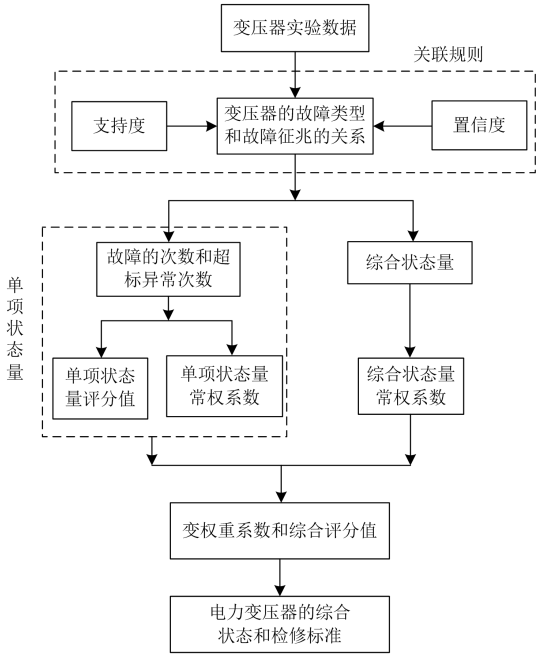

图 1　电力变压器的评估步骤

Fig. 1 Flow chart of transformer condition assessment

(1) 从电力企业信息平台收集整理变压器的实验数据，选取常见的 9 种变压器综合故障类型和 24 种单项故障状态指标。

(2) 根据关联规则相关理论再结合变压器的实际运行情况，建立单项状态量与综合状态量的关系如表 4 所示。为了保证故障征兆状态的准确性，并检验各单项状态量必须满足最小支持度阈值。

(3) 根据步骤(2)建立状态评估体系，由式(3)和式(4)计算各单项状态量的常权重系数和支持度。

(4) 表 2 中 24 种单项状态量是不同量纲和标度，需要进行无量纲处理，采用式(7)进行无量纲处理，即可计算出综合状态量中单项状态量的评分值为

$$x_{ij}=\frac{x_{ij0}-x_z}{x_c-x_z}\times 100 \tag{7}$$

式中：x_z为注意值；x_c为初始值；x_{ij0}为实测值。如果$x_{ij}<0$，则令$x_{ij}=0$，若$x_{ij}>100$，则$x_{ij}=100$。

(5) 综合状态量评分值是由单项状态量的评分和常权重系数计算得出

$$x_i=\sum_{j=1}^{9}x_{ij}\theta_{ij} \tag{8}$$

式中，x_i为F_i的评分值。

(6) 设$\theta_i=1/9$，取$a=0$，由式(6)分别求出变压器 9 种综合状态评分值和对应的变权重系数。

(7) 根据变压器的变权重系数和综合评分值，计算变压器整体的评分值为

$$F=\sum_{i=1}^{9}x_i\theta_i' \tag{9}$$

整体评分值对照设备状态检修规程中的 5 个等级如表 3 所示；可以判断变压器故障的部位范围以及严重程度，给出对应的检修标准。

4　变压器故障诊断的应用实例

4.1　实例分析

为了验证本文提出方法的有效性，从西南某电网公司和文献[21-22]中收集整理 968 组电力变压器故障样本，统计各故障次数及单项状态量异常次数；由关联规则原理计算变压器的单项故障的支持度和常权重系数如表 4 所示。

由步骤(1)至步骤(3)计算单项状态量的支持度和权重系数。由表 4 可知，单项状态量与综合状态量的关联规则支持度较高，都是大于最小支持度阈值 70%，则建立变压器评估体系是合理的。

步骤(4)计算单项状态量的评分值如表 5 所示；根据运行状态评分值与检修状态的关系，由表 5 可知烃相关含量与绕组相关部分的评分值比较低，说明变压器存在故障需要尽快或者立即检修。

步骤(5)与(6)分别计算综合状态量的评分值和变权重系数如表 6 所示。“电流回路过热”、“绝缘受潮”和“局部放电”综合评分值较低，可以推断变压器可能发生过热或者高能放电，则需要进行检修。

步骤(7)计算变压器整体的评分值，F=7.3，说明变压器存在严重的故障，由此推测变压器故障可能发生在绕组方向。停电后对变压器进行详细的检测，吊铁芯部分发现绕组有烧蚀熔断痕迹，主要是绕组引线的连接不牢固，重新焊接引线，变压器恢复正常运行。

4.2　评估方法的有效性

为了验证评估方法的有效性，收集 200 组样本数据进行验证，其中 140 组数据为故障样本，60 组为正常样本，样本评分结果如表 7 所示。

从表 7 可知，60 组正常样本中有 57 组评分为优秀，3 组为良好。140 组中 95 组数据为严重故障，41 组为故障，4 组为一般故障，其中有的评分值接近 60。评估结果与变压器实际运行状态一致，说明该方法能够真实反映变压器的运行状态。

表 5 单项试验状态量数据

Table 5 Test data of independent status parameter

单项状态量	实测值	初始值	注意值	单项评分
H_2 /(μL/L)	50	6	150	69.4
C_2H_2 /(μL/L)	0.56	0	1.0	44.0
CH_4 /(μL/L)	83	0.99	120	31.1
C_2H_4 /(μL/L)	36	0.29	50	28.2
C_2H_6 /(μL/L)	45	0.55	65	31.0
CO 相对产气速率/(%/月)	107	21.5	350	74.0
CO_2 相对产气速率/(%/月)	1 033	267.5	2 500	65.7
绝缘油介损/%	0.38	0.36	2.0	98.8
油中含水量/(mg/L)	2.3	1.2	15	92.0
油击穿电压/kV	69	71	50	90.5
绝缘电阻吸收比	1.92	2.0	1.3	88.6
极化指数	2.35	2.5	1.5	85
体积电阻率/($10^9\Omega\cdot m$)	443	446	100	99.1
铁芯接地电流/A	90	26.5	500	86.6
铁芯绝缘电阻/MΩ	1 000	1 000	500	100
绕组直流电阻互差/%	1.89	0.16	2.0	6
绕组短路阻抗初值差/%	2.6	1.0	3.0	20
绕组绝缘介损/%	0.51	0.12	0.6	18.8
绕组电容初值差/%	4.5	1.0	5.0	12.5
局部放电量/pC	26.5	95	500	100
油中含气量/%	1.1	1.0	3.0	95
中性点油流静电电流/(μ/L)	0.03	0.023	1.0	99.3
糠醛含量/(mg/L)	0.03	0	4.0	99.3
纸板聚合度	900	1 000	250	96.7

表 6 综合状态量变权重系数和评分值

Table 6 Scores of comprehensive status indices and varying weights

序号	综合状态量	变权重系数	综合评分
1	绝缘受潮	0.037 3	21.8
2	铁芯故障	0.013 3	61.1
3	电流回路过热	0.881 6	0.92
4	绕组故障	0.009 1	89.0
5	局部放电	0.017 4	46.8
6	电流放电	0.009 8	82.7
7	电弧放电	0.008 5	95.4
8	绝缘老化	0.013 4	60.5
9	绝缘油劣化	0.009 5	85.5

表 7 200 组样本评分结果

Table 7 Score of the 200 sample measured data

故障类型	检修状态	优秀	良好	一般	故障	严重故障
	评分	85~100	60~85	40~60	20~40	0~20
正常样本	60	57	3	0	0	0
故障样本	140	0	0	4	41	95

4.3 故障类型的准确率

验证关联规则与变权重系数的变压器故障的准确率，从电力企业信息平台收集整理 500 组变压器故障数据，对 9 种故障类型准确度分析，结果如表 8 所示。

表 8 9 种故障类型的准确率

Table 8 Precision of 9 diagnosis faults

故障类型	样本数据	故障数据	准确率%
绕组故障	88	81	92.0
铁芯故障	55	48	87.3
电流回路过热	73	67	91.7
绝缘受潮	54	54	100
电弧放电	50	42	84.0
绝缘老化	65	61	93.8
绝缘油劣化	56	44	78.6
局部放电	29	29	100
油流放电	30	28	93.3

由表 8 可知：绝缘老化和绝缘受潮的故障准确率能够达到 100%，绝缘油劣化的准确度最低能够达到 78.6%，可以得出具体的故障类型准确度。

4.4 对比分析

本文再从电力企业信息平台收集整理变压器实验的 300 组样本数据与传统算法进行对比分析，结果如表 9 所示。

表 9 各类算法对比

Table 9 Result of different algorithms

样本	组数	正确评估数		准确率%	
		本文方法	常权重方法	本文方法	常权重方法
正常	150	140	139	93.3	92.7
单故障	105	94	74	89.5	70.4
多故障	45	39	27	86.7	60.0
总计	300	273	240	91.0	80.0

(1) 常权重方法对 300 组原始数据处理，得出故障诊断准确率约为 80%。

(2) 由表 9 所示：正常运行的准确率为 93.3%；单一故障准确率为 89.5%; 多故障的准确率为 86.7%。

综合故障是由正常运行数据、单一故障和多故障构成的，正常运行数据的正确率最高，则会影响综合诊断的准确率；实验结果表明，综合故障正确率为91%。

(3) 综合故障准确率比常权重方法提高了 11%，而单一故障提高 19.1%，多故障高了 16.7%，则本文方法在正常、单故障和多故障的准确率都比常权重方法略高。

(4) 基于关联规则与变权重系数变压器状态评估，引入变权重公式，该方法准确率可以达到 91%，能够准确反映电力变压器的真实运行状态。

5 结论

(1) 建立变压器的评估体系和评分标准，由 9 种常见变压器故障与 24 种试验和监测指标构成变压器的评估体系，把单项状态量与综合状态量有机地结合在一起，有利于准确评价变压器的真实运行状态。

(2) 采用关联规则与变权重系数方法计算支持度、置信度和常权重系数；为了避免专家经验的主观问题，引入变权重公式，解决劣化不均衡问题，实验结果表明变压器的综合评价准确率达到 91%。

(3) 通过实验结果的比较，关联规则的变权重系数方法比常权重系数的准确率高 11%，说明该方法可行性、有效性和实用性；可为运维人员做设备检修提供科学指导方案，也为其他高压设备的状态评估提供参考和借鉴。

参考文献

[1] 龙鹏, 盛戈皞, 刘亚东, 等. 基于可拓理论的变压器在线监测状态综合评价[J]. 华东电力, 2011, 39(9): 1390-1394.
LONG Peng, SHENG Gehao, LIU Yadong, et al. Synthetic condition assessment of transformer on-line monitoring based on extension theory[J]. East China Electric Power, 2011, 39(9): 1390-1394.

[2] WANG Xuelei, LI Qingmin, LI Chengrong, et al. Reliability assessment of the fault diagnosis methodologies for transformers and a new diagnostic scheme based on fault info integration[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2292-2298.

[3] 何怡刚, 陈铭, 张大波, 等. 基于古林法和层次可拓的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 38-44.
HE Yigang, CHEN Ming, ZHANG Dabo, et al. Transformer condition assessment based on A.J.Klee method and extension hierarchy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 38-44.

[4] 李留文, 刘丹丹, 谭贵生. 基于粗糙集与支持向量机的变压器故障诊断[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 78-82.
LI Liuwen, LIU Dandan, TAN Guisheng. Transformer fault diagnosis method based on rough set and support vector machine[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 78-82.

[5] 陈金猛, 李屹. 基于故障树的变压器质量缺陷分类方法研究[J]. 变压器, 2017, 54(9): 43-46.
CHEN Jinmeng, LI Yi. Research on quality defect classification method for transformer based on fault tree analysis[J]. Transformer, 2017, 54(9): 43-46.

[6] 马利洁, 朱永利, 郑艳艳. 基于并行变量预测模型的变压器故障诊断及优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 82-89.
MA Lijie, ZHU Yongli, ZHENG Yanyan. Research on transformer fault diagnosis and optimization based on parallel variable prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 82-89.

[7] 刘从法, 罗日成, 雷春燕, 等. 基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 104-107.
LIU Congfa, LUO Richeng, LEI Chunyan, et al. Power transformer condition assessment based on AHP grey fixed-weight clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 104-107.

[8] 林晓宁, 蔡金锭. 基于粗糙集理论的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 22-29.
LIN Xiaoning, CAI Jinding. Evaluation of transformer oil-paper insulation based on rough set theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 22-29.

[9] 颜君凯, 马宏忠, 李凯, 等. 基于振动信号的变压器绕组松动故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 122-128.
YAN Junkai, MA Hongzhong, LI Kai, et al. Vibration signal based diagnosis method for looseness fault of transformer winding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 122-128.

[10] 司马莉萍, 舒乃秋, 李自品, 等. 基于 SVM 和 D-S 证据理论的电力变压器内部故障部位识别[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 72-77.
SIMA Liping, SHU Naiqiu, LI Zipin, et al. Identification of interior fault position based on SVM and D-S evidence theory for electric transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 72-77.

[11] RAJARAMAN P, SUNDARAVADAN N A, MALLIKARJUNA B, et al. Robust fault analysis in transmission lines using synchrophasor measurements[J].

Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 108-110. DOI: 10.1186/s41601-018-0082-4.

[12] 熊浩, 孙才新, 张昀, 等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 55-60.
XIONG Hao, SUN Caixin, ZHANG Yun, et al. A hierarchical grey evaluation model for operation condition of power transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 31(7): 55-60.

[13] 吴广宁, 袁海满, 高波, 等. 基于特征评估与核主元分析的电力变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2533-2540.
WU Guangning, YUAN Haiman, GAO Bo, et al. Fault diagnosis of power transformer based on feature evaluation and kernel principal component analysis[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2533-2540.

[14] 张玉振, 吉兴全, 于永进, 等. 基于时空信息融合的矿用变压器绝缘状态评估方法[J]. 工矿自动化, 2017, 43(9): 75-82.
ZHANG Yuzhen, JI Xingquan, YU Yongjin, et al. Insulation condition assessment method of mine-used transformer based on spatio-temporal information fusion[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(9): 75-82.

[15] 国家电网公司企业标准. 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则: Q/GD169—2008[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
State Grid Corporation of China. Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors): Q/G DW169—2008[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

[16] 中国电力工业部. 电力设备预防性试验规程: DL/T596—1996[S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
Power Industry Ministry of China. Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596—1996[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.

[17] 变压器油中溶解气体分析和判断导则: GB/T 7252—察院 2001[S].
Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: GB/T 7252—2001[S].

[18] 王福忠, 邵淑敏. 基于模糊综合评价法的变压器运行状态评估[J]. 计算机仿真, 2015, 32(6): 141-145.
WANG Fuzhong, SHAO Shumin. Fuzzy strategy on running state evaluation of oil immersed power transformer[J]. Computer Simulation, 2015, 32(6): 141-145.

[19] 汪培庄, 李洪兴. 知识表示的数学理论[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994.

[20] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 58-64.
LIU Wenqi. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1997, 17(4): 58-64.

[21] 谢龙君, 李黎, 程勇, 等. 融合集对分析和关联规则的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 277-286.
XIE Longjun, LI Li, CHENG Yong, et al. A fault diagnosis method of power transformers by integrated set pair analysis and association rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 277-286.

[22] 宋人杰, 刘瑞英, 刘耀伟, 等. 基于层次灰关联分析的变压器状态评估关键指标体系构建及应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2509-2515.
SONG Renjie, LIU Ruiying, LIU Yaowei, et al. Key indicator system establishment and application for transformer condition assessment based on hierarchy grey relation analysis[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2509-2515.

收稿日期：2019-01-16；　修回日期：2019-05-05

作者简介：

谭贵生(1986—)，男，硕士，讲师，研究方向为电力设备故障诊断与电力系统分析等；E-mail: tgs_jl@163.com

曹生现(1974—)，男，博士，教授，博士生导师，研究方向为换热设备研究和分析、测试等；E-mail: csxlb_jl@163.com

赵　波(1985—)，男，博士，副教授，研究方向为表面污垢监测与控制，新能源发电检测技术与自动化装置等。E-mail: rerbertzhao@163.com

(编辑　周金梅)