

城轨车辆辅助三相变压器健康状态评估

刘宇轩,赵峰

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院,甘肃 兰州 730000)

摘要:基于免疫原理,对100%低地板城轨车辆辅助三相变压器进行定量的健康状态评估。首先建立车辆辅助三相变压器分层分析模型,并利用免疫原理构建变压器的免疫监控模型;同时采用层次分析法、模糊统计法和熵权法相融合的合作博弈法计算变压器各关键性能指标的复合权重;最后得到变压器的健康状态。研究表明:将合作博弈法应用于健康状态评估能紧密结合变压器的分层分析模型,并能直观地看到变压器中各关键性能指标的定量健康状态信息,节约判断变压器是否健康的时间,有效完成城轨车辆辅助三相变压器的健康状态评估。

关键词:城轨车辆;辅助三相变压器;健康状态评估;免疫原理;合作博弈法

中图分类号:U273 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed20684

Health Assessment of Three-phase Transformer Aided by Urban Rail Vehicle

LIU Yuxuan, ZHAO Feng

(College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University,
Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Based on the immune principle, the health status of the auxiliary three-phase transformer of 100% low floor urban rail vehicles was quantitatively evaluated. Firstly, the hierarchical analysis model of vehicle-assisted three-phase transformer was established, and the immune monitoring model of transformer was constructed based on immune principle. At the same time, the composite weight of transformer performance index was calculated by cooperative game method which combined analytic hierarchy process, fuzzy statistics method and entropy weight method. Finally, the health status of transformer was obtained. The results show that the proposed health condition assessment method can be closely combined with the hierarchical analysis model of transformer, and can intuitively obtain the health status information of each performance index of transformer, and effectively complete the health condition assessment of three-phase transformer assisted by urban rail vehicles.

Key words: urban rail vehicle; auxiliary three-phase transformer; health condition assessment; immune principle; cooperative game method

本文在国家重点研发计划“轨道交通新型供电制式车辆与车载储能技术”项目支持下,通过采集相关数据完成研究。到目前为止,以城轨车辆电气系统为对象的健康状态评估的相关文献比较匮乏,大部分文献都只针对动车组的电气系统或机械系统而进行健康状态评估。文献[1]提出将免疫原理应用于评估供电线路的健康状态;文献[2-4]针对动车组电气系统建立健康状态评估模型,但不能贴合实际城轨车辆电气系统,在

设备及指标选取上仍需进行更细致划分;文献[5]针对高铁牵引供电系统建立健康状态评估模型,虽然模型在设备指标划分上比较细致,但采用的评估算法略显单调,仍可寻找新的算法进行融合;文献[6]提出从经济方面建立设备权重的隶属度模型,可以结合实际车辆系统进行改进;文献[7]基于多层免疫原理建立高铁牵引供电系统的免疫监控模型,但模型仍需改进贴合实际车辆系统;文献[8]使用层次分析法对电梯控制系统进行

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB1201003-020)

作者简介:刘宇轩(1995—),男,硕士,Email:2412209445@qq.com

故障分析,但该单一方法在计算设备指标权重时仍存在较大主观专家影响;文献[9]在规划城市轨道交通网系统中利用模糊统计法确定交通指标体系,该方法优点在于计算简便,但最终结果不够精确;文献[10]同时运用层次分析法和熵权法来计算供应链指标权重,在一定程度上能够减少主观权重影响,但仍可结合更多的客观计算权重方法来使结果更加精确。文章通过查阅文献,将免疫原理应用于搭建城轨车辆辅助三相变压器免疫监控模型,并使用层次分析法、模糊统计法、熵权法相融合的合作博弈法计算变压器指标权重,最大限度减少权重受主观性差异和矩阵阶数的影响。

1 基于免疫原理的辅助三相变压器健康状态评估模型

1.1 辅助三相变压器的分层分析模型

文章选取占车辆健康状态权重影响较大的辅助三相变压器进行分析,搭建变压器的分层分析模型如图1所示。通过确定指标可以把评估过程中的定性和定量因素统一结合起来,使评估过程更加规范^[11]。

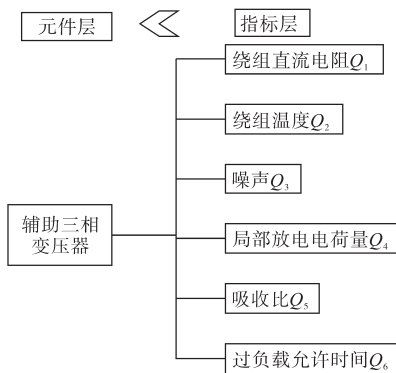


图1 辅助三相变压器分层分析模型

Fig.1 Assisted hierarchical analysis model of three-phase transformer

图1中将该变压器分成两级系统,第1级为元件层,第2级为指标层,各指标是从辅助三相变压器的物理特性和运行状态两方面选取的。从指标层进行计算最终完成辅助三相变压器的健康状态评估。

1.2 辅助三相变压器的免疫监控模型

将生物免疫原理应用于变压器健康状态监控中,构建免疫监控模型。首先通过对比收集到的数据,将异常数据抗原挑出(即识别过程),然后将抗原向后传递进行具体问题检测匹配(即免疫过程),最后管理人员将对应解决方案发送到

执行人员手中进行故障修复(即管理过程)。免疫监控流程图如图2所示,辅助三相变压器免疫监控模型^[12]如图3所示。

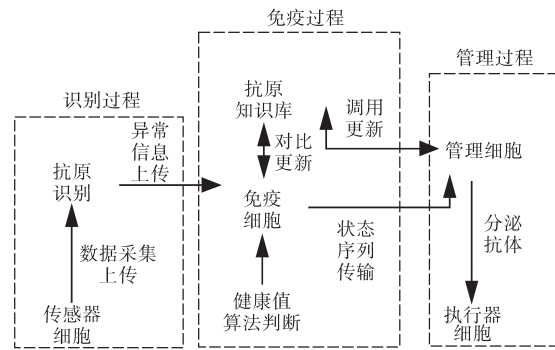


图2 免疫监控流程图

Fig.2 Flow chart of immune surveillance

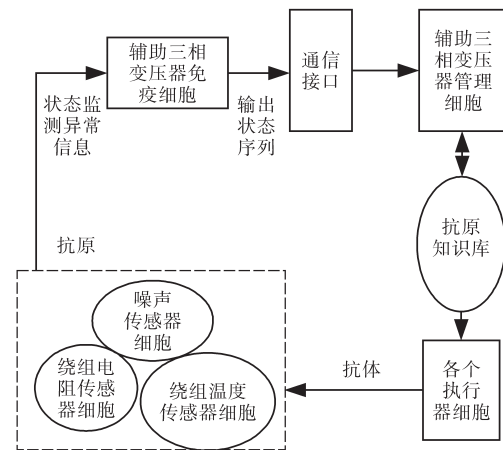


图3 辅助三相变压器免疫监控模型

Fig.3 Assisted three-phase transformer immune monitoring model

1.2.1 识别过程

根据前述提到的变压器分层模型,设立各指标对应的传感器细胞进行数据采集,其中吸收比、过负载允许时间、局部放电电荷量均可通过计算采集到的初始数据得到。将采集的数据上传进行抗原识别,即实际数据与各指标标准范围进行对比,若数据在正常范围内,则代表无抗原,若数据异常,则代表有抗原注入系统,需将异常抗原信息传递到免疫细胞。

1.2.2 免疫过程

免疫细胞代表数据中继处理器,安装在元件层,负责收集并汇总该元件各传感器细胞上传的异常信息,将收集到的异常抗原信息进行计算,即利用合作博弈法确定权重,并用免疫原理计算元件健康值,将结果上传管理细胞,同时将故障信息存入抗原知识库。抗原知识库代表故障数据库,在免疫监控系统运行时,会把检测到的故障信息不断存入数据库,方便以后对比调用。

1.2.3 管理过程

管理细胞相当于车辆安全信息监测总台,通过处理元件输出的状态监测序列,针对不同故障元件分泌抗体,即制定各种维修措施,将指令传递到执行器细胞,同时将不同抗原对应的抗体同样记录于抗原知识库。抗体代表具体维修方法,执行器细胞代表检修工人或检修装置,目标是维修各元件使其达到健康状态。

2 免疫细胞算法判断

2.1 基于层次分析法确定权重

层次分析法是计算权重的主观方法,根据以往专家经验对指标权重进行初步计算,优点是能快速得到初始数据权重值,缺点则是过于依赖以往经验,不利于实时数据分析。根据图1建立的模型,确定各指标之间的隶属关系,然后对指标层中每2个指标进行比较,得到一个对于指标层所有指标相对元件层的 n 阶判断矩阵 A :

$$A=(a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

其中 $a_{ij} > 0 \quad a_{ij} = 1/a_{ji} \quad a_{ii} = 1$

文中采用1-9比例标度法得到2个指标比较结果,如表1所示^[3]。

表1 1-9比例标度法
Tab.1 1-9 scaling method

标度值	含义	标度值	含义
1	同等重要	7	非常重要
3	重要	9	极度重要
5	很重要	2,4,6,8	取每两个标度的中间值

由于在建立比较矩阵过程中,专家主观思维意见和指标个数导致矩阵阶数不同存在差异性,需要对初始相对权重值进行一致化计算。利用下式检验所构建矩阵的一致性:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中: CI 为 A 的一致性指标; λ_{\max} 为 A 的最大特征值; n 为指标总数; RI 为 A 的一致性指标,取值如表2所示^[3]; CR 为 A 随机一致性比率。

表2 1~11阶比较矩阵的RI值
Tab.2 1~11 RI values of pairwise comparison matrices

n	RI	n	RI
1	0.00	7	1.32
2	0.00	8	1.41
3	0.58	9	1.45
4	0.90	10	1.49
5	1.12	11	1.51
6	1.24		

通常,当 $n \geq 3$ 且 $0 < CR < 0.10$ 时,各指标能分配到正常的权重值, A 偏离一致性程度合理;否则,要按表2重新调整 A 的取值^[13]。

计算判断矩阵 A 的最大特征值及特征向量,并进行归一化计算得到初始权重向量:

$$W^{(1)} = [w_1^{(1)} \quad w_2^{(1)} \quad \dots \quad w_n^{(1)}] \quad (4)$$

式中: $w_1^{(1)}, w_2^{(1)}, \dots, w_n^{(1)}$ 分别为 n 个指标的初始权重。

2.2 基于模糊统计法确定权重

模糊统计法是计算权重的客观方法,它的优点在于面向对象可以是大量模糊数据并能进行分类讨论,缺点是在计算权重时无法准确考虑到每一个指标实时状态。传感器细胞在指标层采集到实时数据,使用模糊统计法确定指标间隶属度关系。将辅助三相变压器健康状态划分为5个水平,定义评估集为^[14]

$$T_s = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\} \\ = \{\text{健康, 亚健康, 轻度病变,} \\ \text{中度病变, 严重病变}\} \quad (5)$$

各健康指标 Q_i 隶属于评估集 T_s 的隶属度为

$$\lambda_i^{(s)} = \frac{\delta_{is}}{n} \quad (6)$$

式中: δ_{is} 为 Q_i 隶属于 T_s 的频数。

结合 Q_i 和对评估体系的分析,决定采用效益型和成本型两种隶属度分布公式^[6]。根据辅助三相变压器的设计标准与运行特点,设定在 (a, b) 内进行取值,同时在该集合内插入3个等分点设为 c_2, c_3, c_4 将集合 (a, b) 四等分,设定 Q_i 的实际值为 z ,得到以下两种类型的函数表达式^[15]。

1) 效益型函数表达式如下:

$$\lambda_i^{(1)} = \begin{cases} 1 & z \geq b \\ (z - c_4)/d & c_4 \leq z < b \\ 0 & z < c_4 \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda_i^{(s)} = \begin{cases} 0 & z \geq c_{5-s+2} \\ (c_{5-s+2} - z)/d & c_{5-s+1} \leq z < c_{5-s+2} \\ (z - c_{5-s})/d & c_{5-s} \leq z < c_{5-s+1} \\ 0 & z \leq c_{5-s} \end{cases} \quad (8)$$

$$\lambda_i^{(s)} = \begin{cases} 0 & z \geq c_2 \\ (c_2 - z)/d & a \leq z < c_2 \\ 1 & z < a \end{cases} \quad (9)$$

式中: a 为最差临界值; b 为最优临界值。

2) 成本型函数表达式如下:

$$\lambda_i^{(1)} = \begin{cases} 1 & z < a \\ (c_2 - z)/d & a \leq z < c_2 \\ 0 & z \geq c_2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda_i^{(s)} = \begin{cases} 0 & z < c_{s-1} \\ (z - c_{s-1})/d & c_{s-1} \leq z < c_s \\ (c_{s+1} - z)/d & c_s \leq z < c_{s+1} \\ 0 & z \geq c_{s+1} \end{cases} \quad (11)$$

$$\lambda_i^{(5)} = \begin{cases} 0 & z < c_4 \\ (c_5 - z)/d & c_4 \leq z < b \\ 1 & z \geq b \end{cases} \quad (12)$$

其中 $a=c_1$ $b=c_5$
 $d=(b-a)/4$ $s=2,3,4$

式中: a 为最优临界值; b 为最差临界值。

根据指标层中各指标的健康等级隶属度,构建对应评估矩阵:

$$D_i = [\lambda_i^{(1)} \lambda_i^{(2)} \lambda_i^{(3)} \lambda_i^{(4)} \lambda_i^{(5)}] \quad (13)$$

传感器细胞可以根据计算得到的隶属度值对应传递状态监测量。设5个区间中最大隶属度为

$$e_i = \max \{ \lambda_i^{(s)} \} \quad s=1,2,\dots,5 \quad (14)$$

假设当指标 Q_i 隶属于“中度病变”或“严重病变”(即 $e_j = \lambda_j^{(4)}$ 或 $e_j = \lambda_j^{(5)}$)时输出状态监测信息为1;当指标 Q_i 隶属于“健康”、“亚健康”或“轻度病变”(即 $e_j = \lambda_j^{(1)}$, $e_j = \lambda_j^{(2)}$ 或 $e_j = \lambda_j^{(3)}$)时输出状态监测信息为0。

各指标客观修正权重为

$$\alpha_i = \frac{1/e_i}{\sum 1/e_i} \quad (15)$$

最后得到综合权重:

$$\beta_i = \frac{\alpha_i w_i^{(1)}}{\sum \alpha_i w_i^{(1)}} \quad (16)$$

指标层综合权重向量:

$$W^{(2)} = [\beta_1^{(2)} \beta_2^{(2)} \dots \beta_n^{(2)}] \quad (17)$$

2.3 基于熵权法确定权重

熵权法同样是一种确定权重的客观方法,是根据指标监测值来确定指标权重大小,具有客观性的优点,但缺点是单一采用熵权法对于指标差异程度小的评估问题,得到的权重准确度会降低,应用性不高^[6]。主要计算步骤如下:

1)对原始数据进行归一化处理。通过传感器采集到的设备指标,针对有 n 个对象, m 个评估指标,第 i 个元件第 j 个指标的原始数据矩阵^[7]:

$$X = [X_{ij}] \quad X_{ij} \geq 0 \quad i = 1,2,\dots,n; j = 1,2,\dots,m_i \quad (18)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个元件第 j 个指标的原始数据权重。并利用下式对原始数据进行处理:

$$p_{ij} = X_{ij} / \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (19)$$

得到处理后的矩阵:

$$P = [p_{ij}]_{n \times m}$$

式中: p_{ij} 为归一化后的数据权重。

2)确定信息熵。对于指标层中的某个指标 X_j ,其信息熵为

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (20)$$

其中 $k=1/\ln n$

3)确定权重。第 i 个元件第 j 个指标的权重定义为

$$w_{ij}^{(3)} = \frac{1 - E_{ij}}{m_i - \sum_{j=1}^{m_i} E_{ij}} \quad (21)$$

第 i 个对象的指标权重向量:

$$W^{(3)} = [w_{i1}^{(3)} \ w_{i2}^{(3)} \ \dots \ w_{im_i}^{(3)}] \quad (22)$$

2.4 基于合作博弈法确定综合权重

上述各单独的主观或客观算法均有不足,但若将它们三者进行有效组合,得到合作博弈法,对指标赋值,就可以得到更为准确的组合权重。计算组合权重的步骤如下^[18]:

1)计算 $w_i^{(l)}$ 与 $w_i^{(y,l)}$ 的一致性系数 $L_i^{(l)}$:

$$L_i^{(l)} = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} [w_{ij}^{(l)} - \overline{w_i^{(l)}}] [w_{ij}^{(y,l)} - \overline{w_i^{(y,l)}}]}{\{ \sum_{j=1}^{m_i} [w_{ij}^{(l)} - \overline{w_i^{(l)}}]^2 \}^{1/2} \{ \sum_{j=1}^{m_i} [w_{ij}^{(y,l)} - \overline{w_i^{(y,l)}}]^2 \}^{1/2}} \quad (23)$$

式中: $w_i^{(y,l)}$ 为除 $w_i^{(l)}$ 外的 $y-1$ 种权重的组合权重; m_i 为系统中第 i 个对象的个数;“-”表示平均值。

2)当 $y=3$ 时, $w_i^{(y,l)}$ 的计算公式为

$$\begin{cases} w_i^{(3,1)} = \frac{w_i^{(2)} + w_i^{(3)}}{2} & l = 1 \\ w_i^{(3,2)} = \frac{w_i^{(1)} + w_i^{(3)}}{2} & l = 2 \\ w_i^{(3,3)} = \frac{w_i^{(1)} + w_i^{(2)}}{2} & l = 3 \end{cases} \quad (24)$$

3)计算第 i 个对象的第 j 个指标的组权重 w'_{ij} 的公式为

$$w'_{ij} = \sum_{l=1}^3 w_{ij}^{(l)} L_i^{(l)} \quad (25)$$

4)将 w'_{ij} 归一化得到:

$$w_{ij} = \frac{w'_{ij}}{\sum_{j=1}^{m_i} w'_{ij}} \quad (26)$$

最后,基于合作博弈法的指标组合权重向量如下式:

$$W^{(4)} = [w_{i1} \quad w_{i2} \quad \dots \quad w_{in}]$$

2.5 计算健康值

根据前文提到的免疫原理,可以直接计算得到元件的健康值。传感器细胞将采集到的数据信息汇总上传到免疫细胞,输出一个状态监测序列向量^[19]:

$$K_I = [K_1 \quad K_2 \quad \dots \quad K_n] \quad I=1,2,\dots,n \quad (27)$$

式中: n 为某元件传感器细胞总数; K_I 为前文的状态监测信息。

指标层对元件层的影响因子为

$$\gamma_E = K_I w_i^T \quad (28)$$

可以得到元件的健康值为^[20]

$$H = 1 - \gamma_E \quad (29)$$

其中, $H \in [0, 1]$, H 越大,代表元件健康状态越好。通过求取健康值,实现了辅助三相变压器的健康状态评估。表3给出了健康值与各健康状态的对应关系^[7]。

表3 健康值与健康状态的划分

Tab.3 Distribution of health values and health status

健康值	健康状态
1~0.960 0	健康
0.959 9~0.9	亚健康
0.899 9~0.8	轻微病变
0.799 9~0.6	中度病变
0.599 9~0	严重病变

3 实例分析

以某100%低地板城轨车辆中的辅助三相变压器为例进行分析。分别安装传感器细胞用于监测绕组直流电阻 Q_1 、绕组温度 Q_2 与噪声 Q_3 ,同时通过计算得到局部放电 Q_4 、吸收比 Q_5 、过负载允许时间 Q_6 。根据GB1094.11,JB/T10693等可确定 $Q_1 \sim Q_6$ 的标准临界值,即规定抗原识别标准范围。将以上指标分别归类效益型或成本型,如表4所示。

表4 辅助三相变压器指标层参数

Tab.4 Indicator layer parameters of auxiliary three-phase transformer

健康指标	临界值	分布形式
绕组直流电阻 Q_1	$\leq 2\%$	成本型
绕组温度 Q_2	$< 70 \text{ K}$	成本型
噪声 Q_3	$< 78 \text{ dB(A)}$	成本型
局部放电电荷量 Q_4	$< 10 \text{ PC}$	成本型
吸收比 Q_5	≥ 1.3	效益型
过负载允许时间 Q_6	$\leq 2 \text{ h}$	成本型

在某一时刻对该辅助三相变压器进行采样计算,得到各性能指标为 $G = \{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6\} = \{0.8, 36, 45, 5.6, 1.5, 0.9\}$ 。

对指标集 $\{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6\}$ 构造比较矩阵如下式:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 0.5 & 3 & 4 \\ 0.5 & 1 & 2 & 0.5 & 2 & 3 \\ 0.33 & 0.5 & 1 & 0.25 & 0.5 & 2 \\ 2 & 2 & 4 & 1 & 3 & 5 \\ 0.33 & 0.5 & 2 & 0.33 & 1 & 2 \\ 0.25 & 0.33 & 0.5 & 0.2 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

求得 $\lambda_{\max} = 6.217 4$,故 $CI = (6.217 4 - 6) / (6 - 1) = 0.043 48$,根据式(2)对其进行一致化计算 $CR = 0.043 48 / 1.24 = 0.035 06 < 0.1$,符合要求。按步骤对辅助三相变压器进行免疫细胞算法判断:

1) 求出基于层次分析法的组合权重向量:

$$W^{(1)} = [0.2510 \quad 0.1638 \quad 0.0809 \quad 0.3422 \quad 0.1074 \quad 0.0547]$$

2) 对指标 Q_5 采用效益型函数公式,其余指标采用成本型函数公式,分别计算各指标对应5个健康等级的隶属度并构建评估矩阵,再根据式(7)~式(17)求得基于模糊统计法的权重向量:

$$W^{(2)} = [0.244 5 \quad 0.229 1 \quad 0.099 8 \quad 0.268 7 \quad 0.099 4 \quad 0.058 5]$$

3) 利用熵权法计算指标权重。首先根据式(19)计算对应指标信息熵 $E_j = [E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6] = [0.957, 0.981, 0.984, 0.978, 0.994, 0.991]$,再由式(22)确定熵权法的指标权重向量:

$$W^{(3)} = [0.373 9 \quad 0.165 2 \quad 0.139 1 \quad 0.191 3 \quad 0.052 2 \quad 0.078 3]$$

4) 根据式(23)~式(26)计算得到基于合作博弈法的指标权重:

$$W^{(4)} = [0.337 1 \quad 0.167 5 \quad 0.129 9 \quad 0.205 2 \quad 0.075 1 \quad 0.085 2]$$

5) 根据式(27)确定辅助三相变压器免疫细胞输出的状态监测序列向量 $K_I = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$,由式(28)得到 $\gamma_E = 0.218 7$,最后由式(29)得到辅助三相变压器的健康值 $H = 1 - 0.218 7 = 0.781 3$ 。

可以看出,通过某一时刻的随机取值,辅助三相变压器的健康值为0.781 3,处于中度病态状态,将结果上传管理细胞,管理细胞分析故障问题后将维修指令下达给执行器细胞,即相关维修人员需尽快对故障元件进行维修处理。

4 结论

本文在城轨车辆辅助三相变压器的分层分析模型的基础上,同时搭建辅助三相变压器的免疫监控模型。通过结合两种模型,在免疫细胞算法判断模块,对采集到的初始数据利用层次分析

法构建比较矩阵得到初始相对权重,然后利用模糊统计法,计算指标模糊隶属度,同时辅助以熵权法对其进行权重修正,利用结合了3种主客观计算权重方法的合作博弈法能进一步弥补单一方法的不足。以某100%低地板城轨车辆为例,对其中辅助三相变压器进行了实例分析,实现了城轨车辆辅助供电元件健康状态评估的系统性评估,为后续整个车辆电气系统的故障预警的研究奠定了基础。

参考文献

- [1] 鞠平,左英飞,文福栓,等.电力系统健康诊断[J].电力自动化设备,2004,24(6):22-25.
- [2] 池毓敢.动车组故障预测与健康管理系统研究及应用[J].机车电传动,2018(5):118-124.
- [3] 李渊琴.基于合作博弈法及云模型理论的CRH3型动车组电气系统健康状态评估[D].兰州:兰州交通大学,2018.
- [4] 常振臣,张海峰.动车组PHM技术应用现状及展望[J].电力机车与城轨车辆,2016,1(1):1-4.
- [5] 何正友,程宏波.高速铁路牵引供电系统健康管理及故障预警体系研究[J].电网技术,2012,36(10):259-264.
- [6] 陈绍宽,王秀丹,柏赞,等.基于费用最小的铁路牵引接触网维修计划优化模型[J].铁道学报,2013,35(12):37-42.
- [7] 程宏波,何正友,母秀清.基于多层免疫模型的高铁牵引供电系统健康监测与评估[J].电网技术,2012,36(9):95-101.
- [8] 郝馨颖,宫煜,张斯榕,等.基于层次分析法的电梯电气控制系统故障检修策略分析[J].电子制作,2016(6):89.
- [9] 牟能冶,张锦,陈菊.城市轨道交通规划模糊综合评价方法研究[J].铁道运输与经济,2007(1):60-62.
- [10] 彭红军,王苗苗.基于AHP和熵权法的林浆纸供应链风险评估[J].中国林业经济,2018(5):25-29.
- [11] Wang P, Vachtsevanos G. Fault Prognostics Using Dynamic Wavelet Neural Networks [J]. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 2001, 15(4): 349-365.
- [12] Pecht M. Prognostics and Health Management of Electronic [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2008.
- [13] 周长春,蒋澜,赵新宇.基于AHP和熵权法的航空维修安全模糊综合评价[J].科技创新与应用,2018(23):1-3,5.
- [14] Lu J, Park J, Yang Q. Statistical Inference of a Time-to-failure Distribution Derived from Linear Degradation Data[J]. Technometrics, 1997, 39(4): 391-400.
- [15] Meeker W Q, LuValle M J. An Accelerated Life Test Model Based on Reliability Kinetics[J]. Technometrics, 1995, 37(2): 133-146.
- [16] 王有元,徐海霞,陈伟根,等.电力变压器状态维修策略的灰局势决策方法[J].重庆大学学报,2009,32(12):1419-1424.
- [17] 许婧,王晶,高峰,等.电力设备状态检修技术研究综述[J].电网技术,2000,24(8):48-52.
- [18] 谢庆华,梁剑,左洪福.基于变精度粗糙集的航空发动机送修等级决策[J].系统工程理论方法应用,2006,15(4):380-384.
- [19] 王玘,何正友,林圣,等.高铁牵引供电系统PHM与主动维护研究[J].西南交通大学学报,2015,50(5):942-952.
- [20] 李燕,张瑜,周军伟.动车组故障预测与健康管理系统方案研究[J].铁路计算机应用,2018,9(25):1-7.

收稿日期:2019-08-08

修改稿日期:2019-08-30