

电磁发射系统改进 FAHP - 神经网络健康评估方法*

曾德林, 鲁军勇, 郑宇锋

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要:准确定量评估电磁发射系统发射前的健康状态意义重大。针对模糊层次分析方法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)在评估电磁发射系统串行结构同级元素健康值时存在较大偏差,且无法适用系统非线性变权重需求的缺陷,提出改进FAHP-神经网络方法。通过在计算同级元素健康指数时构造能够满足串行结构健康评估的非线性函数进行计算,并在数学上证明该方法的有效性;通过引入神经网络系统,在已有的系统先验信息和测量数据的基础上训练模型解决系统健康评估非线性变权重需求。基于电磁发射系统脉冲成形网络系统建立健康评估模型,开展评估试验。结果表明,提出的方法健康评估精度较高,在各种系统健康状态下,评估结果均符合系统实际的健康状况;对比传统的FAHP,提出的改进方法评估精度大幅提升,且在评估试验中没有出现故障误报和漏报的情况,从而验证了提出方法的可行性和工程实用价值。

关键词:健康评估;模糊层次分析方法;神经网络;电磁发射;脉冲成形网络

中图分类号:TN95 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2020)06-067-10

Improved FAHP-neural network health evaluation method for electromagnetic launch system

ZENG Delin, LU Junyong, ZHENG Yufeng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: It is of great significance to accurately and quantitatively evaluate the health status of electromagnetic emission system before launch. Focusing on the large deviation of health value in evaluating the serial structure of electromagnetic emission system when applying the FAHP (fuzzy analytic hierarchy process) method, which fails to meet the requirement of nonlinear variable weight of the system, an improved FAHP-neural network health assessment method was proposed. The improved method can be calculated by constructing a nonlinear function that can satisfy the serial structure health assessment when calculating the health index of the same-level elements, and the effectiveness of the method was testified from the aspect of mathematics. On the basis of the known prior information and measured data, the neural network model was introduced to solve the nonlinear variable weight requirement of system health evaluation. An improved health evaluation model based on the pulse forming network system of an electromagnetic launch system was established and evaluation experiments were carried out. The results show that the proposed evaluation method has high assessment accuracy, and the results are in line with the actual health status of the system under various health conditions. Compared with the traditional FAHP method, the proposed method can greatly improve the accuracy of evaluation, and have no error and leakage, which verifies the feasibility and practicability of the method.

Keywords: health assessment; fuzzy analytic hierarchy process; neural network; electromagnetic launch; pulse forming network

随着电磁发射技术的发展,各种复杂大型电磁发射武器装备相继出现^[1-2],超高功率的发射工况和瞬时连续稳定的发射需求急需高度可靠的健康评估技术精确评估每一次发射前的系统健康状况,提供是否允许继续发射的决策,从而大幅提高系统可靠性和安全性^[3]。

目前,国内外关于设备健康状态评估的方法较多^[4-6],包括灰色关联分析方法、基于动态权重

的模糊专家系统、针对数据驱动的健康评估方法等,这些方法在结构不是很复杂的设备和系统上均有较好的应用实例。然而,电磁发射系统作为复杂大系统的典型代表,包含的子系统、设备和元器件极多^[7-8],其复杂的结构拓扑为系统精确的健康评估带来了巨大挑战。目前在复杂大系统的健康评估上使用最广、效果最好的依然是层次分析方法(Analytic Hierarchy Process, AHP)及其衍

* 收稿日期:2019-04-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51522706,51877214,51607187);国家重点基础研究发展计划资助项目(613262)

作者简介:曾德林(1992-),男,福建长汀人,博士研究生,E-mail:18670387476@163.com;

鲁军勇(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:jylu@xinhuanet.com

生方法。融合模糊理论的模糊层次分析方法 (Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP) 改善了 AHP 的权重确定问题,其实用性和简洁性获得了越来越广泛的使用^[9-11]。

将 FAHP 应用到电磁发射系统的健康评估中,能够取得一定的评估效果。然而,传统的 FAHP 在计算上一层级的健康指数时只考虑了同级元素的并联结构,当同级元素为串行时,由于被其他元素较高的健康值稀释,评估结果往往偏差较大。电磁发射系统由于特殊的工作原理(非周期瞬时脉冲工况),某些同级元素在元素均健康时(元素工作良好),其评估模型权重不变(类似于传统评估模型),但是当其健康值下降甚至是故障时,其权重必须要变得足够大(如此才能反映该元素对系统故障状态贡献的变化),对这种非线性的变权重需求,FAHP 无法适用。

本文从 FAHP 的局限性出发,提出构造健康指数计算函数的方法和引入神经网络系统解决非线性变权重需求的改进 FAHP - 神经网络方法,实现了电磁发射系统的高精度评估。

1 FAHP 健康评估方法

1.1 一般步骤

FAHP 用于复杂系统健康评估的一般流程如图 1 所示。首先根据系统的层级组成和相互关系构建详尽的层次对象模型;其次咨询设备设计人员、生产人员、试验人员及相关专家,对每一层级的各个元素两两打分,对所有人给出的结果进行平均后,建立模糊互补矩阵;而后校验模糊矩阵的一致性,并推导各元素的权重向量;最后计算每一级的评估结果向量,按照自下而上的顺序,依次计算每一级的健康评估值,最终得到全系统的健康评估值^[12]。

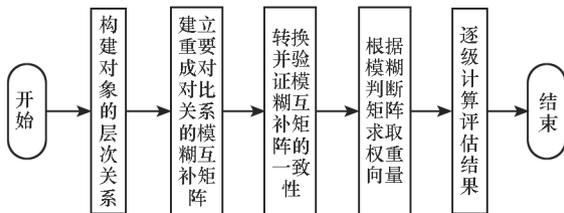


图 1 FAHP 健康评估方法评估流程

Fig.1 Assessment process of FAHP method

1.2 模糊一致矩阵

相比于 AHP 健康评估方法,引入了模糊理论的 FAHP 评估方法最大的不同是引入了模糊一致

矩阵,并且通过模糊一致矩阵来求得同级元素的权重值。

设 n 元同级元素分别为 a_1, a_2, \dots, a_n , 分别比较两两元素的重要程度得到模糊判断矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, r_{ij} 表示元素 a_i 对元素 a_j 的重要程度且满足 $r_{ij} \in [0, 1]$ 。当两元素同样重要时, $r_{ij} = 0.5$; a_i 更重要时, $r_{ij} > 0.5$; a_j 更重要时, $r_{ij} < 0.5$ 。

当模糊判断矩阵满足式(2)的“加性一致性”条件时,其为模糊一致矩阵,可用于求取权重。

$$r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5 \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

1.3 同级元素权重计算

通过模糊一致矩阵计算同级元素权重是 FAHP 基于 AHP 的最大改进^[10]。常用的权重计算表达式为:

$$\omega_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{na} \sum_{k=1}^n r_{ik} \quad (3)$$

式中, ω_i 表示第 i 个元素 a_i 所占的权重值;系数 a 为权重转换系数,要求:

$$a \geq \frac{n-1}{2} \quad (4)$$

a 取值越小,表示两两元素权重差异越大,一般由专家直接给出。

1.4 逐级计算评估结果

传统 FAHP 中每一层级的评估结果为 H_k , 其上一级的健康评估结果为 H_{k-1} , 设第 k 级包含 n 个同级元素,则:

$$H_{k-1} = \sum_{i=1}^n \omega_{ki} \cdot H_{ki} \quad (5)$$

如此可以逐级求得全系统健康评估值。

2 电磁发射系统健康评估分析

2.1 电磁发射系统原理

电磁发射系统为典型的复杂大系统,包括电磁弹射系统、电磁轨道炮系统、线圈炮系统等,通常由四大分系统组成(如图 2 所示)。储能分系统储存多次电磁发射用的能量,然后按照一定的时间压缩给功率变换分系统充电,再瞬时对发射装置放电,把弹丸(发射物体)加速到指定的速度,控制分系统协调控制整个发射过程。发射过程中能量经过两次压缩,瞬时功率超过 GW(高能级电磁轨道炮瞬时功率超过 20 GW)^[1]。

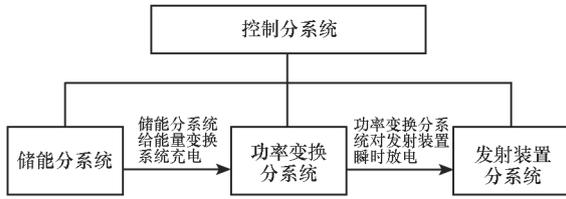


图 2 电磁发射系统一般结构

Fig. 2 Typical electromagnetic emission system

2.2 传统 FAHP 健康评估方法局限性

2.2.1 串行结构需求

传统的 FAHP 健康评估方法中,依据健康指数计算上一层级健康值的计算方法如式(5)所示,其在结构上可以表示为如图 3 所示的并行结构。图中 LRU A1 ~ LRU An 表示系统第 k 个层次的不可更换单元,其健康值分别为 $H_{k1} \sim H_{kn}$,上一层级健康值 H_{k-1} 的计算为并行结构计算。

当系统的同一层级为并行结构部件时,传统方法固然可行,然而在实际的电磁发射系统的机构拓扑中,有很多类似于串行结构的电气拓扑,如图 4 所示。

对于图 4 所示的串行结构,在系统工作过程中,当不可更换单元 LRU A1 ~ LRU Am 任何一个部件故障,整个层级的系统都将无法正常工作,健康评估结果应当评估为故障。然而按照式(5)的传统计算方法,将很容易因为别的部件健康值较高而稀释故障部件较低评分对上一层级的影响,从而出现较大的评估偏差。由此在串行结构评估中必须要满足:任何一个部件故障,上个层级的健康评估必须也是故障。

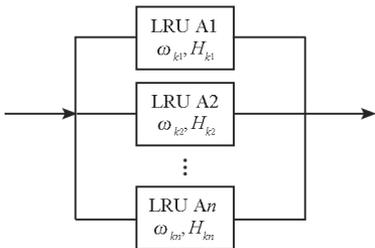


图 3 传统 FAHP 方法并行健康指数计算示意图

Fig. 3 Parallel health index calculation of traditional FAHP method

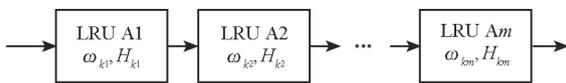


图 4 系统串行结构

Fig. 4 System serial structure

2.2.2 非线性变权重需求

在电磁发射系统的各个分系统或是各个设备

还处于可以正常工作健康范畴时(健康值大于故障上限),系统的各个子系统或子设备只负责本系统的功能,互相之间保持相对的独立性,上一层级健康值的求取可以依照 FAHP 确定的权重计算。然而,当某个子系统出现故障(健康值低于故障上限)时,整个系统将没有办法工作,此时该子系统的权重必须要足够大,使得全系统健康评分也为故障。

另外,为了提高电磁发射系统的可靠性,对于某些易坏的模块或设备,往往会设计一定的冗余。当损坏模块还在冗余的范围内时,各同级部件仍然可以较为独立地考虑,其权重也可以由初始权重决定;当损坏元素超过冗余范围时,损坏的元素权重又要相应地提高到足够大,使全系统健康评分低于故障上限。

综上,当遇到上述情况,则所在部件的权重会随着本部件和同级其他部件的健康值的改变而改变,即:

$$\omega_{ki} = f(H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{kn}) \quad (6)$$

式中: ω_{ki} 表示第 k 层级的第 i 个元素的权重; f 为 n 个变量的非线性函数,函数形式将非常复杂。

不管是对于串行结构还是变权重的需求,传统的 FAHP 都无法完成精确的健康评估,必须要探索新的健康评估方法。

3 改进 FAHP - 神经网络健康评估方法

3.1 确定评估准则

首先给器件或是系统都打上一个健康值 H , $H \in [0, 1]$, 值越接近 1 表示评估的对象越健康,越接近 0 则故障程度越高。为了得到多变量耦合作用下的电磁发射系统健康评估准则,从实际的使用情况出发给不同的健康值分了四个等级:

1) 健康: 分值 $H \in [0.9, 1]$ 。处在这个健康值内的系统或器件均认为健康,可以继续电磁发射工作。

2) 亚健康: 分值 $H \in [0.8, 0.9)$ 。处于这个健康值内,则说明系统性能开始退化,但是仍然能继续完成电磁发射任务。

3) 堪用: 分值 $H \in [0.5, 0.8)$ 。处于这个分数段内,说明系统的性能退化较大,勉强可以继续电磁发射任务,但必须要严密监控,一有问题则停下任务进入维修。

4) 故障: 分值 $H \in [0, 0.5)$ 。评估值处于此分数段内,说明系统已经故障,必须要停下发射任务进入维修。

各个评价等级的分数段的划分决定了系统极

限安全使用的评估准则。根据电磁发射系统瞬时超大功率的工况,将故障和堪用等级的分数段长度设置为健康和亚健康分数段长度的 3~5 倍,如此可保证系统可靠工作,降低故障风险。

3.2 构造函数健康指数计算方法

如 2.2.1 小节分析,对于串行结构,传统的健康指数计算方法不可行,必须要提出新的健康指数计算方法。同样以图 4 中 m 个第 k 层级元素的健康指数为对象,上一层级的健康值 H_{k-1} 存在以下约束条件:

1) 最大健康值为 1, 即:

$$\exists H_{k1} = H_{k2} = \dots = H_{km} = 1, H_{k-1} = 1 \quad (7)$$

2) 当有第 k 层级元素处于故障态时,健康值 H_{k-1} 也必须处于故障态, 即:

$$\forall H_{ki} < D_1, H_{k-1} < D_1 \quad (8)$$

3) 健康值 H_{k-1} 必须处于子层级元素健康值范围内, 即:

$$\min(H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{km}) \leq H_{k-1} \leq \max(H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{km}) \quad (9)$$

综上分析,按照式(7)~(9)的约束,构造健康指数计算函数:

$$H_{k-1} = \begin{cases} \sum_{i=1}^m \omega_{ki} \cdot H_{ki}, Hm \geq D_1 \\ Hm + (HD - Hm) \cdot \sum_{i=1}^m (\omega_{ki} \cdot H_{ki}), Hm < D_1 \\ HM = \max(H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{km}) \\ Hm = \min(H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{km}) \\ HD = \min(HM, D_1) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)是一个多元非线性不连续函数,且满足约束式(7)~(9)。证明如下:

1) 当 $H_{k1} = H_{k2} = \dots = H_{km} = 1$ 时,由式(10)

得到 $H_{k-1} = \sum_{i=1}^m \omega_{ki} = 1$,式(7)得证。

2) 当存在 $H_{ki} < D_1$ 时,代入式(10)得

$$H_{k-1} < Hm + (HD - Hm) = HD \leq D_1$$

式(8)得证。

3) 当 $Hm \geq D_1$ 时,

$$H_{k-1} = \sum_{i=1}^m \omega_{ki} \cdot H_{ki} \leq \sum_{i=1}^m \omega_{ki} \cdot HM = HM$$

$$H_{k-1} = \sum_{i=1}^m \omega_{ki} \cdot H_{ki} \geq \sum_{i=1}^m \omega_{ki} \cdot Hm = Hm$$

当 $Hm \leq D_1$ 时,

$$H_{k-1} = Hm + (HD - Hm) \cdot \sum_{i=1}^m (\omega_{ki} \cdot H_{ki}) \geq Hm$$

$$H_{k-1} = Hm + (HD - Hm) \cdot \sum_{i=1}^m (\omega_{ki} \cdot H_{ki}) \leq HD \leq HM$$

综上得证,构造出的函数能够满足串行结构的健康评估要求。

3.3 神经网络非线性变权重评估方法

3.3.1 非线性变权重需求分析

如 2.2.2 小节分析,电磁发射系统同层级元素会有变权重需求,即随着各个元素的健康值的变化,其元素的权重也要发生变化。式(6)是一个多元非线性函数,其自变量是同层级的各个元素健康值,且函数形式未知,随着不同的系统需求将会呈现非常复杂的非线性特征。

在高级别的电磁发射系统中,同层级的元素数量往往会非常大,且各元素健康值对某个元素的权重影响又千变万化,几乎无法构造合适的非线性函数 f 。神经网络系统,因其灵活的神经元配置和深度自学习特性,很适合用来解决多元非线性函数问题。

3.3.2 神经网络求取非线性变权重方法

通过构建神经网络系统求取权重的方法如图 5 所示。

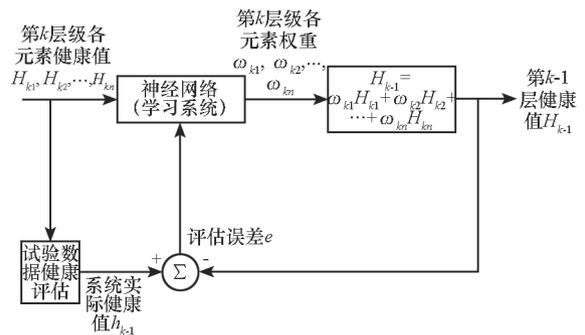


图 5 神经网络非线性变权重计算方法框图

Fig. 5 Neural network nonlinear variable weight calculation method

将神经网络系统当成一个能够自学习的多输入多输出系统,输入为第 k 层级各元素健康值 $H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{kn}$ (图中取有 n 个同级元素),输出为第 k 层级元素权重 $\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn}$ 。神经网络系统是一个能够自学习的非线性系统,针对不同的输入值能够输出不同的权重值。按照并行结构的健康值计算式(5)能够计算得到上一层级的健康值 H_{k-1} 。同时,针对同样第 k 层级各元素健康值,根据历史数据、系统的特定非线性需求或先验信息,可以求出上一层级实际的健康值 h_{k-1} ,再以此作为神经网络模型的监督样本训练神经网络模型,然后获取最优的结构参数,求取非线性变权重值。

3.3.3 多输入单输出非线性 BP 神经网络系统

如图 6 所示,用于健康评估的自学习系统为一个多输入单输出(输入为同一层级具有非线性

需求的各元素健康值,输出为上一层级系统的健康值)的系统,映射变换过程经过了两次非线性变化,见式(11):

$$H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{km} \rightarrow \omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{km} \rightarrow H_{k-1} \quad (11)$$

构建矩阵形式的两层神经网络系统如图6所示。图中,输入向量 $P = [H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{km}]$ 为第 k 层级 m 个变权重需求元素; $b^1 = [b_{s1}^1, b_{s2}^1, \dots, b_{s1}^1]$ 为第一层神经元的阈值向量,大小为 $S^1 \times 1$; IW^1 为第一层(输入层)神经元与输入向量的连接权向量,大小为 $S^1 \times m$,表达式为

$$IW^1 = \begin{bmatrix} iw_{1,1}^{1,1} & iw_{1,2}^{1,1} & \dots & iw_{1,R}^{1,1} \\ iw_{2,1}^{1,1} & iw_{2,2}^{1,1} & \dots & iw_{2,R}^{1,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ iw_{S^1,1}^{1,1} & iw_{S^1,2}^{1,1} & \dots & iw_{S^1,R}^{1,1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

n^1 为第一层神经元的中间运算结果,即连接权向量与阈值向量的加权和,大小为 $S^1 \times 1$,即

$$n^1 = IW^1 \cdot p + b^1 \quad (13)$$

a^1 为第一层神经元的输出向量,大小为 $S^1 \times 1$,即

$$a^1 = f^1(IW^1 \cdot p + b^1) \quad (14)$$

同样的方法可以推得,第二层神经元输出 H_k 为上一层级健康值,大小为 1×1 ,即

$$\begin{aligned} H_k &= f^2(IW^2 \cdot a^1 + b^2) \\ &= f^2[IW^2 \cdot f^1(IW^1 \cdot p + b^1) + b^2] \end{aligned} \quad (15)$$

其中: f^1 和 f^2 为传输函数,函数类型可变,包括 S 型函数、sigmoid 函数、sigmoidal 函数等; b^2 为输出层神经元的阈值向量; IW^2 为输出层神经元与输出向量的连接权向量,大小为 $1 \times S^1$,即

$$IW^2 = [iw_{1,1}^{2,2}, iw_{1,2}^{2,2}, \dots, iw_{1,S^1}^{2,2}] \quad (16)$$

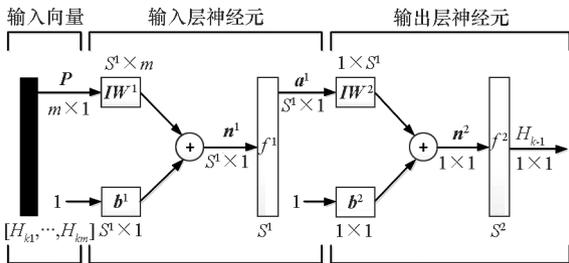


图6 多输入单输出双层神经网络结构图

Fig. 6 Multi-input single-output double layer neural network

3.3.4 神经元个数和传输函数选择优化

采用双层神经网络系统且输出层只有一个神经元主要要考虑的是模型参数训练效率和学习系统过拟合和泛化能力的折中。当神经元层数越多,每层的神经元数量越大,则学习系统贴近真实系统的能力越强,但是相应地其训练的样本也必

须要越多越全面;当神经元层数越少,每层神经元数量越少,则学习系统发生过拟合的风险会增加,从而偏离真实的系统。

电磁发射系统,尤其是高能级的电磁发射系统,其兴起和发展的时间较短^[2],没有办法获取大量的样本数据,所以神经网络系统层数不能过多;采用两层神经网络,通过调节输入层神经元数量同样可以降低过拟合的风险。

输入层神经元个数 S^1 的选取直接影响评估的精度,所以需要进行优化。按照评估的经验通常取 $m \leq S^1 \leq 3m$,此时神经网络系统较为简单且能够保持较高精度。传输函数 f^1 、 f^2 的选择直接影响学习系统参数收敛的效率,因此以收敛步数 $Epochs$ 和训练均方误差 $error$ 作为改变 S^1 和传输函数 f^1 、 f^2 的判断条件,一般可令条件为:

$$\begin{cases} Epochs \leq 2000 \\ error \leq 0.001 \end{cases} \quad (17)$$

当选择的 S^1 、 f^1 、 f^2 满足式(17)时,则模型有效,否则必须要继续搜索更优参数。

3.4 改进 FAHP - 神经网络健康评估建模流程

综合分析,电磁发射系统改进 FAHP - 神经网络健康评估方法实施健康评估的流程如图7所示。在建立对象层级关系后需要进行结构关系和权重需求分析,得到并行结构、串行结构和变权重需求三种情况,并分别采用传统 FAHP、构造函数的 FAHP 和神经网络方法求取上一层级的健康值,最后逐级计算健康值后,综合起来最终得到较为精确的全系统健康评估结果。

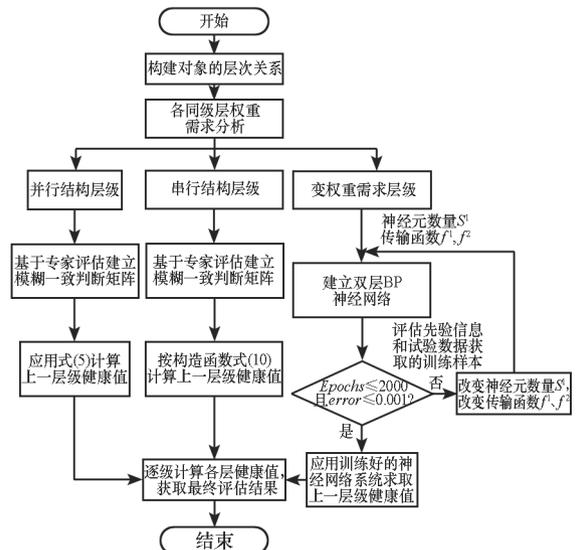


图7 电磁发射系统改进 FAHP - 神经网络方法健康评估流程

Fig. 7 Improved FAHP-neural network health assessment process for electromagnetic launch system

4 电磁发射系统评估模型与评估实验

为充分验证提出的健康评估方法能够高精度评估电磁发射系统健康状态且全面优于传统的FAHP健康评估方法,以某高能型电磁发射武器的能量调节系统为研究对象,开展评估实验,验证提出方法的优越性。

4.1 大规模 PFN 系统

大规模脉冲成形网络 (Pulse Forming Network, PFN) 是当前高能级电磁轨道炮的核心能源分系统。电磁轨道炮大规模 PFN 网络系统的电气结构如图 8 所示。发射周期内,储能系统负责给 PFN 充电,然后再通过瞬时脉冲放电电推动发射弹丸高速运动。

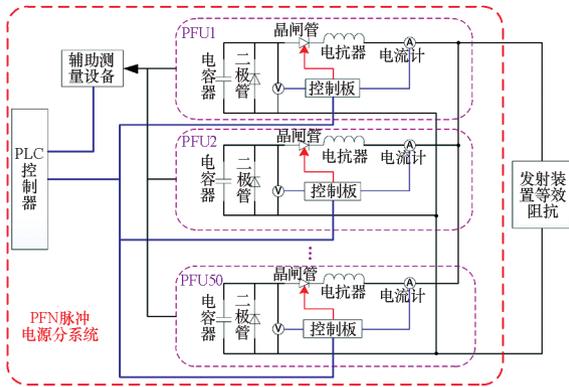


图 8 大型电磁炮 PFN 系统电气结构

Fig. 8 Electrical topology of large rail gun PFN system

大规模 PFN 系统主要包含 50 个脉冲成形单元(Pulse Forming Unit, PFU)模块、可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)和总体辅助设备;每个模块均包括电气结构、控制板和电压电流计。发射时,首先由各个模块的电容器接收来自储能系统的电能并储存在电容器中,然后每个模块的控制板接收 PLC 控制程序命令,按照设定的时间序列触发开关组件中的晶闸管使模块按照时序并联瞬时对负载放电,从而加速发射弹丸至几千米每秒。

PLC 控制器是整个 PFN 系统的控制核心,肩负采集辅助测量设备的状态、测量数据和控制各模块执行时序放电的功能。

4.2 建立对象层次关系并分析权重需求

基于实际的控制流程和结构拓扑并根据图 8 画出的对象层次关系图如图 9 所示。

按照系统的结构和功能,图 9 标明了系统的层级,区分了同层级之间的串行、并行和非线性权重需求的关系。PFN 是整个系统最为复杂的部分,分为了四层结构;按模块分,每个模块的初始部件健康值(即评估模型的输入)有 6 个,记为 A_i ,如此可以得到评估模型的输入向量为 $A = [A_1, A_2, \dots, A_{307}]$;对象层次涉及的模糊一致矩阵包括 $[R_1]_{5 \times 5}$ 、 $[R_2]_{2 \times 2}$ 、 $[R_3]_{3 \times 3}$ 和 $[R_4]_{4 \times 4}$;非线性权重需求的层级包括各个模块之间的健康值权重和第一层级的健康值权重计算。系统最终的健

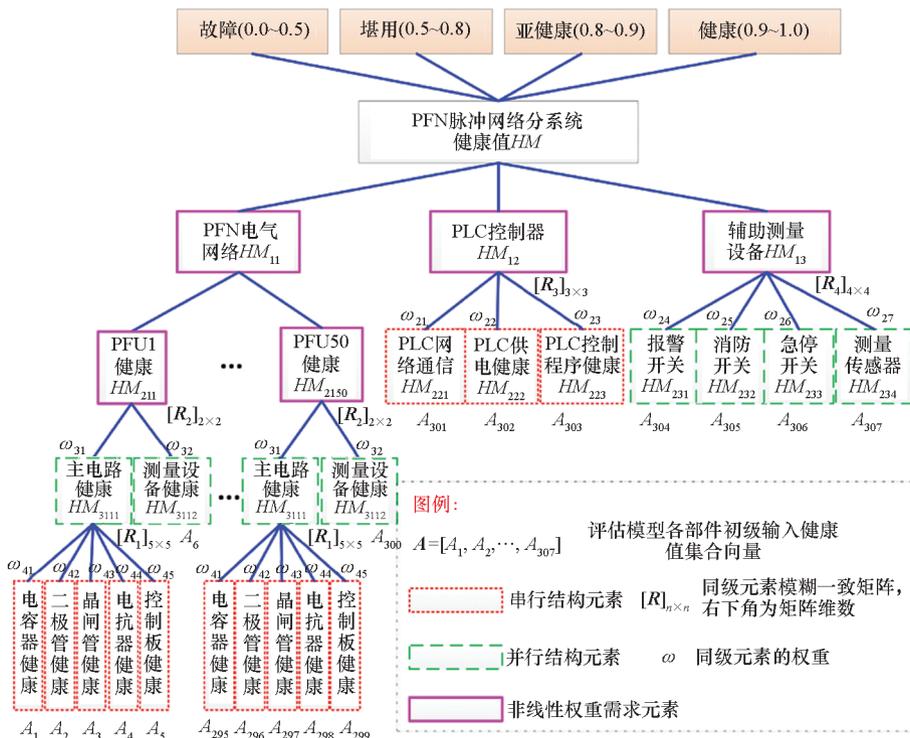


图 9 PFN 系统层次关系图

Fig. 9 PFN system hierarchy

康评级分为健康、亚健康、堪用和故障四个等级。应用提出的改进 FAHP - 神经网络健康评估方法可以建立精确的健康评估模型。

4.3 建立健康评估模型和参数获取

4.3.1 系统健康评估模型和权重

应用提出的改进 FAHP - 神经网络健康评估方法,在 MATLAB 建立精确的健康评估模型,如图 10 所示。 $A = [A_1, A_2, \dots, A_{307}]$ 为不可替换单元的健康值,并作为模型的输入; R_1, R_2, R_3, R_4 为模糊一致矩阵;模型包括 PFN 电气神经网络和分系统综合神经网络,两个神经网络结构均为双层神经元结构,后者的输出为 PFN 脉冲分系统的健康值 HM 。

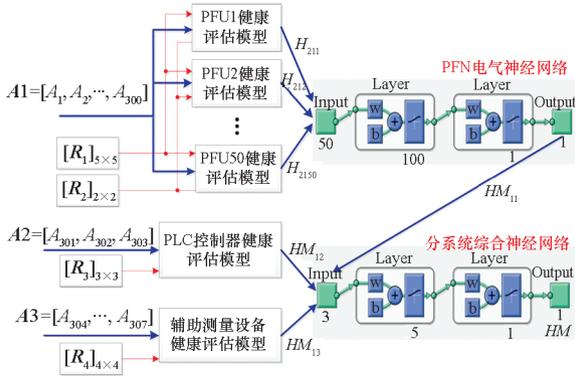


图 10 大规模 PFN 健康评估模型

Fig. 10 Large scale PFN health assessment model

按照模型的层次对象,召集专家打分获取模糊一致矩阵集合,取模糊矩阵到权重的转换系数 $a = (n - 1) / 2$,可以计算得到权重向量:

$$[R_1]_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.6 & 0.5 \\ 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.4 & 0.3 \\ 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.4 \\ 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.5 & 0.4 \\ 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$[R_2]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.95 \\ 0.05 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$[R_3]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.4 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$[R_4]_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.3 & 0.8 \\ 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.9 \\ 0.7 & 0.6 & 0.5 & 1 \\ 0.2 & 0.1 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$\omega 1 = [0.24 \quad 0.14 \quad 0.19 \quad 0.19 \quad 0.24]$$

$$\omega 2 = [0.95 \quad 0.05]$$

$$\omega 3 = [0.267 \quad 0.366 \quad 0.367]$$

$$\omega 4 = [0.25 \quad 0.317 \quad 0.383 \quad 0.05]$$

4.3.2 HM_{11} 神经网络模型和模型参数获取

模型中用到神经网络的同级元素有两处:一是 PFN 健康值计算,包含 50 个元素;二是分系统综合健康值计算,包含 3 个元素。根据系统先验信息和前期测试数据可以得到样本值,用于训练神经网络自学习系统。

1) PFN 健康评估训练样本

此处神经网络的输入是一个 50 维的向量,结合实际系统的使用和已有的数据,可以获得以下先验信息:

①每个模块可以认为是无差别的,即其初始权重可认为均相等(为 0.01),且随着 PFU 自身健康值 H 的变化,其权重的非线性变化趋势是一样的;

②评估 PFN 电气网络健康时,必须要考虑冗余的模块数量,在此处的系统中有 5 个冗余模块,即损坏模块大于 5 时系统方可认定为故障;

③健康评估准则遵循当 $H < 0.5$,则认定为故障原则。

因此,可令每个 PFU 单元有 4 种健康等级取值:

$$HM_{21i} = 0.95, 0.85, 0.65, 0.25 \quad i = 1, 2, \dots, 50 \quad (18)$$

分别对应健康、亚健康、堪用和故障四个等级。依托 50 个模块取值的不同组合计算 HM_{11} :

$$HM_{11} = \begin{cases} \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} HM_{21i}, & \forall HM_{21i} > 0.5 \\ \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{50} HM_{21i} + \frac{kreal - k}{2kreal}, & \exists HM_{21i} < 0.5, k < 2kreal \\ \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{50} HM_{21i} + 0.5e^{-k}, & \exists HM_{21i} < 0.5, k \geq 2kreal \end{cases} \quad (19)$$

式中, k 为健康值小于 0.5 的模块数, $kreal = 5$ 表示此系统有 5 个冗余模块。式(19)表明当所有模块都不故障时,PFN 电气网络的健康值是所有模块的健康和权重乘积的和,当存在模块故障时必须要考虑系统的故障。式(19)很明显地表明,当故障模块个数超过冗余模块 5 时,全系统健康值小于 0.5。

由此,应用蒙特卡洛的方法,每个模块的健康值如式(18)随机抽取一种取值,模拟生成 1 万个训练样本。为尽量保证数据贴近实际,取 8000 个样本为没有一个模块故障,2000 个样本包含故障模块。

2) PFN 健康评估神经网络模型

根据前面的分析,构建双层神经网络模型,取输入层神经元数量 $S^1 = 100$,考虑到各个模块的无差别非线性要求,故可令:

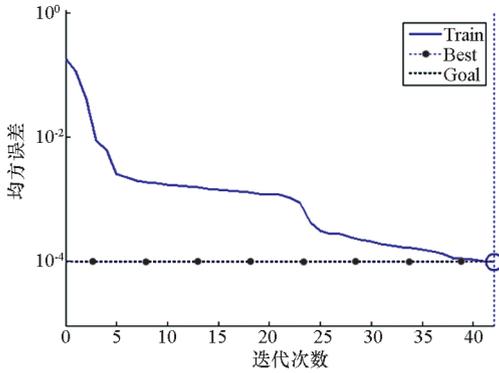
$$iw_{1,i}^{1,1} = iw_{2,i}^{1,1} = \dots = iw_{S^1,i}^{1,1} \quad i = 1, 2, \dots, 100 \quad (20)$$

如此,神经网络模型虽然神经元数量很大,但是待求变量个数为 301,在 1 万的样本数下可以获取较为精确的模型参数。

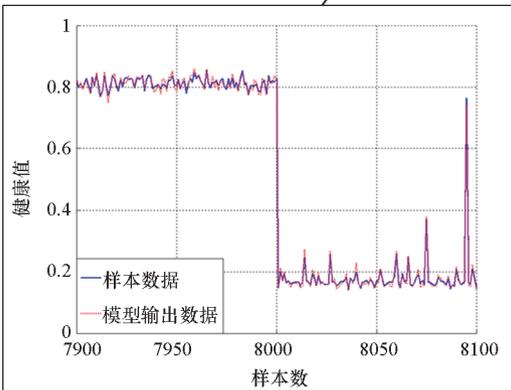
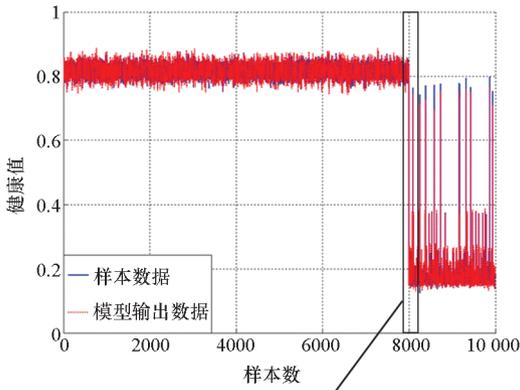
3) 神经网络模型参数

将样本数据代入训练模型,通过优化选择,选取的训练函数为贝叶斯归一化法,得到训练的误差曲线如图 11(a)所示,在第 42 步均方误差收敛至 0.000 1。

用训练得到的模型输出数据和样本数据进行对比,如图 11(b)所示,可以发现神经网络健康评估模型输出与样本几乎一致,说明模型参数取值准确。



(a) 训练误差
(a) Train error



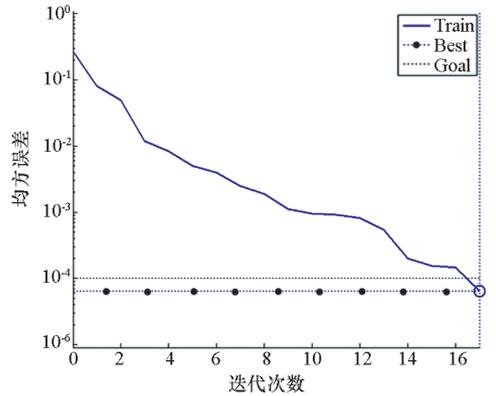
(b) 模型输出值与真实值

(b) Model output and the real value

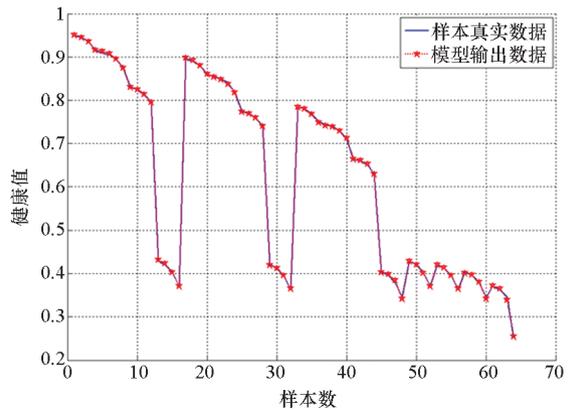
4.3.3 HM 神经网络模型和模型参数获取

基于 4.3.2 小节对 HM_{11} 神经网络模型和参数获取方法的分析,分系统综合神经网络模型要简单得多,只有 3 个输入元素,且按照实际应用分析,辅助测量设备的故障不会造成全系统故障。如此可以依照上一小节的方法获取样本,分别取每个元素有 4 种健康取值,然后可以得到 64 个样本,并对神经网络进行训练和参数优化。

最终得到双层神经网络结构如图 10 中的分系统综合神经网络,输入层神经元个数为 5,得到的模型训练误差如图 12(a)所示,把样本代入训练后的模型得到输出值与样本值的对比曲线如图 12(b)所示,可以发现训练后的模型输出与真实值很接近,由此说明模型参数准确。



(a) 训练误差
(a) Train error



(b) 模型输出与样本对比

(b) Model output and sample comparison

图 12 健康评估神经网络模型训练误差与结果

Fig. 12 Neural network model training errors and results

4.4 评估试验和分析

为验证提出的健康评估方法的有效性,基于某型电磁轨道炮 PFN 网络脉冲系统开展评估试验。

图 11 PFN 电气神经网络模型训练误差与结果

Fig. 11 PFN neural network model training errors and results

4.4.1 单模块健康评估试验

取某个新的 PFU 模块(记作 PFU1)作为试验对象(各个器件均是新的,健康值可以认为是 1),分别依次更换故障的电容器、二极管、晶闸管、电抗器、控制板和测量设备(设故障时器件的健康值取 0.4),然后分别用传统 FAHP 和提出的改进方法进行评估试验,得到结果见表 1。

串行结构器件故障时,模块无法正常工作,所以模块的健康评估值应该小于 0.5,而测量设备故障时不会影响模块正常工作,所以健康评估值大于 0.5。表 1 的评估试验结果表明:传统的 FAHP 评估结果出现较大偏差,无法准确评估系统健康状况,而提出的改进方法则可以很精确地评估系统状态。

表 1 单模块健康评估试验结果

Tab.1 Single module health assessment test results

序号	输入健康值向量 A	说明	传统方法健康值	改进方法健康值	评价
1	[1, 1, 1, 1, 1, 1]	模块正常	健康 (1)	健康 (1)	两种方法评估均符合实际情况
2	[0.4, 1, 1, 1, 1, 1]	电容器故障	亚健康 (0.863 2)	故障 (0.485 6)	传统方法评估错误;改进方法符合实际情况
3	[1, 0.4, 1, 1, 1, 1]	二极管故障	健康 (0.920 2)	故障 (0.491 6)	传统方法评估错误;改进方法符合实际情况
4	[1, 1, 0.4, 1, 1, 1]	晶闸管故障	亚健康 (0.891 7)	故障 (0.488 6)	传统方法评估错误;改进方法符合实际情况
5	[1, 1, 1, 0.4, 1, 1]	电抗器故障	亚健康 (0.891 7)	故障 (0.488 6)	传统方法评估错误;改进方法符合实际情况
6	[1, 1, 1, 1, 0.4, 1]	控制器故障	亚健康 (0.863 2)	故障 (0.485 6)	传统方法评估错误;改进方法符合实际情况
7	[1, 1, 1, 1, 1, 0.4]	测量设备故障	健康 (0.97)	健康 (0.97)	两种方法评估均符合实际情况

4.4.2 PFN 系统健康评估试验

全面检修整个 PFN 系统,更换和维修故障器件和设备,使整个系统的所有部件的评估值均为健康(可以令其为 1)。分别替换不同数量的故障模块(健康评估值为 0.4)、替换故障的 PLC 控制器和测量设备,开展评估试验,结果见表 2。

当 PFU 模块故障的数量小于冗余度 5 时,系统能够正常工作,而当 PFU 模块故障数量大于 5 时,系统无法正常工作,此时系统健康评估值应该

小于 0.5。当 PLC 控制器故障时,系统评价应该为故障,而辅助测量设备故障时,不影响系统正常工作,系统健康评估值应大于 0.5。如表 2 所示,传统的 FAHP 方法评估出现较大错误,而提出的改进方法适应了系统的非线性健康评估需求,有较大的工程实用意义。

表 2 PFN 系统健康评估试验结果

Tab.2 PFN system health assessment test results

序号	输入健康值向量 A	说明	传统方法健康值	改进方法健康值	评价
1	[1, 1, ..., 1] ₁₋₃₀₇	所有器件健康值为 1	健康 (1)	健康 (1)	两种方法评估均符合实际情况
2	[0.4, ..., 0.4] ₁₋₁₂ [1, 1, ..., 1] ₁₃₋₃₀₇	2 个 PFU 模块故障	健康 (0.986 8)	亚健康 (0.883 4)	传统方法评估错误;改进方法符合实际情况
3	[0.4, ..., 0.4] ₁₋₂₄ [1, 1, ..., 1] ₂₅₋₃₀₇	4 个 PFU 模块故障	健康 (0.973 6)	亚健康 (0.828 4)	传统方法评估错误;改进方法符合实际情况
4	[0.4, ..., 0.4] ₁₋₃₆ [1, 1, ..., 1] ₃₇₋₃₀₇	6 个 PFU 模块故障	健康 (0.960 4)	故障 (0.452 4)	传统方法评估错误;改进方法符合实际情况
5	[1, 1, ..., 1] ₁₋₃₀₀ [0.4, ..., 0.4] ₃₀₁₋₃₀₈	PLC 控制器故障	堪用 (0.76)	故障 (0.476 0)	传统方法评估错误;改进方法符合实际情况
6	[1, 1, ..., 1] ₁₋₃₀₃ [0.4, ..., 0.4] ₃₀₄₋₃₀₇	辅助测量设备故障	健康 (0.97)	健康 (0.97)	两种方法评估均符合实际情况

5 结论

基于电磁发射系统健康评估需求分析,针对传统 FAHP 在同级元素串行结构健康指数计算的局限性和无法适用变权重需求健康评估的问题,提出构造函数计算串行元素健康指数和引入神经网络系统解决非线性变权重需求的改进 FAHP - 神经网络健康评估方法,实现了电磁发射系统的高精度评估。针对电磁发射系统的 PFN 系统采用提出的方法进行评估试验,试验表明提出的方法在系统各种健康状态下都拥有较高精度的健康评估能力,相比于传统方法评估试验出现较大偏差的结果,提出的方法有很强的工程适用性。

参考文献 (References)

- [1] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-5.
MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-5. (in Chinese)
- [2] 李军, 严萍, 袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1052-1064.
LI Jun, YAN Ping, YUAN Weiqun. Electromagnetic gun technology and its development [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1052-1064. (in Chinese)
- [3] Fair H D. Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 225-230.
- [4] 曹惠玲, 黄乐腾, 康力平. 基于 AHP 及灰色关联分析法的发动机健康评估研究[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(2): 122-129.
CAO Huiling, HUANG Leteng, KANG Liping. To study on health assessment of aero-engine based on AHP and GRA[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(2): 122-129. (in Chinese)
- [5] 彭炎亮, 李汪根, 刘娇, 等. 基于动态权重和模糊综合评判法的健康评估模型[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(1): 37-43.
PENG Yanliang, LI Wanggen, LIU Jiao, et al. Health assessment model based on dynamic weight and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Computer Systems and Applications, 2017, 26(1): 37-43. (in Chinese)
- [6] Galar D, Gustafson A, Tormos B, et al. Maintenance decision making based on different types of data fusion[J]. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, 2012, 14(2): 135-144.
- [7] Lee B, Ahn S, Kim S H, et al. Operation of a 2.4-MJ pulsed power system for railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2886-2890.
- [8] 田慧, 夏言, 栗保明. 13 MJ 大功率脉冲电源的诊断系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1153-1158.
TIAN Hui, XIA Yan, LI Baoming. Diagnosis system design for a 13MJ pulsed power supply [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1153-1158. (in Chinese)
- [9] 张晶晶, 许修乐, 丁明, 等. 基于模糊层次分析法的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 75-81.
ZHANG Jingjing, XU Xiule, DING Ming, et al. A condition assessment method of power transformers based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 75-81. (in Chinese)
- [10] 徐建军, 闫丽梅, 刘小斌. 模糊层次分析法在变压器脆性分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 94-98.
XU Jianjun, YAN Limei, LIU Xiaobin. Application of fuzzy analytic hierarchy process to analyze the brittleness for transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 94-98. (in Chinese)
- [11] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80-88.
ZHANG Jijun. Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2): 80-88. (in Chinese)
- [12] 吕跃进. 基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法的排序[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(2): 79-85.
LYU Yuejin. Order of fuzzy analytic hierarchy process based on fuzzy consistent matrix [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2002, 16(2): 79-85. (in Chinese)