

基于模糊综合评判和层次分析法的 中子管故障风险评估

雷柏茂^{1,2,3}, 李江燕^{1,2,3}, 梁佩博^{1,2,3}, 杨林森⁴, 孙强⁴

(1. 工业和信息化部电子第五研究所, 广东 广州 510610;

2. 广东省电子信息产品可靠性技术重点实验室, 广东 广州 510610;

3. 电子信息产品可靠性分析与测试技术国家地方联合工程中心, 广东 广州 510610;

4. 北京信成科技集团, 北京 100038)

摘要:中子管是一种用途广泛的关键部件,然而目前国产中子管的可靠性水平与国外相比还有一定差距,难以满足各行业的使用需求。本文分析了中子管的主要故障模式,采用模糊综合评判和层次分析法对中子管故障进行了多级模糊综合评判,并对中子管故障风险进行了评估。结果表明,中子管总体故障风险水平中等,故障风险前3位的部件为靶、氘氟储存器和加速极,在设计和使用中应重点关注靶释放氘气,靶膜氧化,氘氟储存器吸气剂局部破损,绝缘瓷管破损,加速极离子加速、聚焦不稳定等故障。

关键词:中子管;模糊综合评判;层次分析法;故障风险

中图分类号:TL816

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2019)11-2247-10

doi:10.7538/yzk.2018.youxian.0788

Risk Assessment of Neutron Tube Failure Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation and Analytic Hierarchy Process

LEI Baimao^{1,2,3}, LI Jiangyan^{1,2,3}, LIANG Peibo^{1,2,3}, YANG Linsen⁴, SUN Qiang⁴

(1. *The Fifth Electronics Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology,*

Guangzhou 510610, China; 2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Electronic Information*

Products Reliability Technology, Guangzhou 510610, China;

3. *National Joint Engineering Research Center of Reliability Test and Analysis*

for Electronic Information Products, Guangzhou 510610, China;

4. *Beijing Century Science & Technology Group, Beijing 100038, China)*

Abstract: The neutron tube is a key component with a wide range of use. However, the reliability level of domestic neutron tube is still far from that of foreign countries, and it is difficult to meet the need of various industries. In this paper, the main failure mode of neutron tube was analyzed. The fuzzy comprehensive evaluation and analytic hierarchy

收稿日期:2018-10-29;修回日期:2019-01-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFF0104203);广东省省级科技计划资助项目(2017B090903006);工业装备环境可靠性设计与试验军民融合创新中心能力建设资助项目(2017KZ010107)

作者简介:雷柏茂(1987—),男,湖南郴州人,高级工程师,博士,从事结构力学、疲劳耐久性 & 可靠性分析研究

网络出版时间:2019-03-18;网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190315.0956.002.html>

process were used to evaluate the neutron tube failure in multiple stages, and the risk of neutron tube failure was evaluated. The results show that the overall risk of neutron tube failure is medium, and the top three components of failure risk are target, D-T storage and acceleration pole. The focus on the failure modes, such as target helium release, target membrane oxidation, partial damage of the D-T storage, porcelain tube break, unstable accelerating and focusing of the acceleration pole, should be paid during design and use.

Key words: neutron tube; fuzzy comprehensive evaluation; analytic hierarchy process; failure risk

中子管作为可控中子源的核心关键部件,在石油测井、在线成分分析、中子照相、爆炸物与毒品检测等领域得到了广泛的应用^[1-5]。由于国外在高性能长寿命中子管技术上对我国实行严格的技术封锁,国产中子管技术在中子产额、高温稳定性和可靠性等方面与国外相比还具有一定差距,国产中子管的可靠性尚不能完全满足各行业的使用需求^[6-9]。因此,对中子管的潜在故障风险进行分析评估,针对中子管薄弱环节进行设计改进,对提高中子管的可靠性水平具有重要的参考价值。

影响中子管可靠性的因素较多,故障模式及影响分析是一种重要的可靠性分析方法,该方法通过分析系统所有可能的故障模式、故障发生的原因及故障产生的影响,对故障严酷度、发生度和检测度进行评分,从而求出风险顺序数^[10-12]。然而,对于不同的系统和部件,故障严酷度、发生度和检测度对风险的贡献程度不尽相同,系统中不同部件的故障对系统风险的贡献程度也不同。传统故障模式及影响分析方法无法体现贡献程度的差别,对故障严酷度、发生度和检测度进行评分的主观性较大,存在一定的局限性。

模糊综合评判法采用模糊数学的分析方法,将风险数据采用模糊集进行描述,并结合层次分析法考虑部件和评判因素对系统风险的贡献程度,采用加权方法对故障风险进行模糊综合分析,能有效解决传统故障模式及影响分析方法难以对模糊概念进行精确定量评价、受主观影响较大的问题,在许多行业得到了较广泛的应用^[13-16]。

本文在分析中子管结构组成和主要故障模式的基础上,采用模糊综合评判和层次分析法

对中子管故障进行多级模糊综合评判,并开展故障风险评估,为进一步改进中子管设计、提高其可靠性水平提供参考依据。

1 中子管组成结构及故障模式

1.1 中子管组成结构

中子管是将离子源、加速极、靶等结构全部密封在管体中构成的一种典型的电真空器件,其组成结构如图1所示,主要包括管体、离子源、氘氚储存器、加速极、靶和二次电子抑制结构等。工作时,氘氚储存器加热释放的氘氚混合气体在离子源阳极高压及磁场作用下发生电离形成等离子体,加速极和离子源之间的高压电场从离子源等离子体中引出并加速氘氚混合束轰击在靶上,与靶上注入的氘氚发生核反应产生中子,反应方程为:

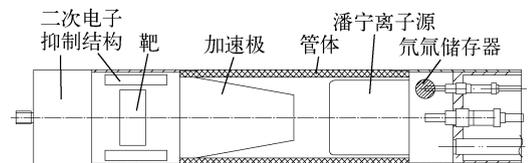
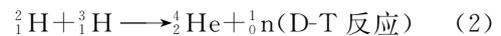
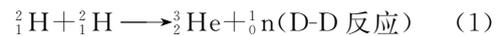


图1 中子管组成结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure for neutron tube

D-D 反应释放出能量约为 2.5 MeV 的快中子, D-T 反应释放出能量约为 14 MeV 的快中子。

中子管管体提供了密闭的真空环境和高压绝缘条件并支撑管内各部件。氘氚储存器存储中子管工作所需的氘氚气体,工作时通过吸放气控制管内气压。离子源产生等离子体束并使

其有效引出。加速极提供中子管工作时所需的高压引出电场。靶是氘源及中子产生场所,同时导出离子束流轰击靶膜时产生的热量。二次电子抑制结构抑制并降低束流在轰击靶面时产生的二次电子,起到降低无效靶流的作用。

1.2 中子管主要故障模式

中子管故障主要表现为无法达到预期稳定产额、真空度下降或丧失、绝缘能力下降、无法产生中子等。根据中子管的组成结构和功能可

分析得知,管体故障主要表现为密封性或绝缘性丧失;离子源故障主要是电离功能异常或丧失、离子流异常波动;氘源储存器故障主要是吸、放气能力异常或丧失;加速极故障主要是高压电场加载异常,离子加速、聚焦不稳定等;靶故障主要是吸附氘源气体能力下降、不稳定或丧失,靶流异常或氘压升高;二次电子抑制结构的故障主要表现为二次电子抑制能力下降、不稳定或丧失。中子管的主要故障模式如图2所示。

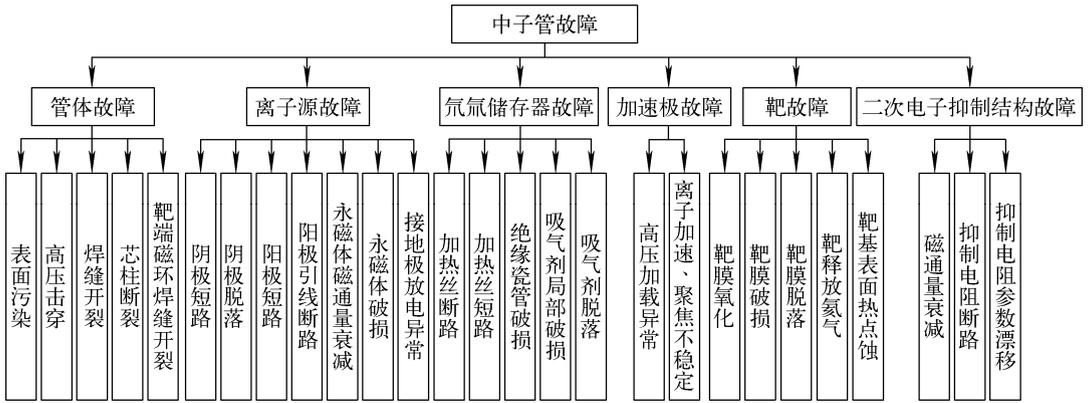


图2 中子管故障模式
Fig.2 Failure mode of neutron tube

2 评估模型及方法

本文采用模糊综合评判和层次分析法对中子管故障进行风险评估。模糊综合评判法基于模糊数学,对不方便量化的系统合成模糊关系,将一些模糊因素定量化,从而对多个因素进行评判。该方法可定量地研究和处理客观存在的模糊因素,充分考虑因素的中间过渡状态。层次分析法是一种对多目标进行分析决策的方法,将1个多目标的复杂问题分解成若干个因素,并按关系分组形成层次结构,从而确定层次中各因素的相对重要性。

本文采用的评估模型和方法^[17-20]如下。

1) 确定隶属度矩阵 R

通过专家调查对评价指标进行数据采集,得到每个评价指标的对应模糊评语频率,将归一化频率作为每个评价指标对应模糊评语的隶属度,从而建立隶属度矩阵 R:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, r_{ij} 表示第 $i (i=1, 2, \dots, m)$ 个评价指标在第 $j (j=1, 2, \dots, n)$ 个模糊评语上的频率, $\sum_{j=1}^n r_{ij} = 1$ 。

2) 确定相对权重

采用层次分析法确定复杂系统各评价指标的相对权重。对于评价指标 u_x 和 $u_y (x=1, 2, \dots, m, y=1, 2, \dots, m)$,可按照表1所列的九标度指标重要程度判断表来确定它们之间的相对重要程度。

表1 九标度指标重要程度判断表
Table 1 Nine-scale judgement of indicator important degree

相对重要程度	判断取值 a_{xy}	说明
u_x 与 u_y 同等重要	1	重要程度介于上述两
u_x 比 u_y 稍微重要	3	相邻判断取值之间时,
u_x 比 u_y 明显重要	5	可取中间值 2,4,6,8
u_x 比 u_y 强烈重要	7	
u_x 比 u_y 极端重要	9	

由以上定义,对于任意的评价指标 u_x 和 u_y ,按九标度指标重要程度判断表有 $a_{xy} = 1/a_{yx}$ 。对于系统的 m 个评价指标,可构造 $m \times m$ 判断矩阵 \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = (a_{xy})_{m \times m} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

可按式(5)计算判断矩阵的特征值 λ :

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \lambda\mathbf{X} \quad (5)$$

其中, \mathbf{X} 为特征向量。当判断矩阵 \mathbf{A} 具有完全一致性的条件下,有唯一非零、最大的特征值 $\lambda_{\max} = m$ 。一般情况下,判断矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值 λ_{\max} 稍大于矩阵阶数 m ,且其余特征根接近于 0。

为了保证应用层次分析法得到的评价指标相对权重基本合理,需进行一致性检验。可按式(6)计算一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (6)$$

根据一致性指标 CI 计算一致性比例 CR,即:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

其中,RI 为平均一致性指标,它与 m 有关,具体取值列于表 2。

当一致性比例 $CR \leq 0.1$ 时,认为判断矩阵具有较好的一致性,此时最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量 \mathbf{X} 进行归一化处理得到相对权重向量 $\tilde{\mathbf{X}}$;当一致性比例 $CR > 0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性不可接受,需进行适当的修正。

表 2 平均一致性指标值

Table 2 Indicator value of average consistency

阶数	RI	阶数	RI
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12		

3) 确定模糊综合评判集

根据各评价指标的相对权重向量 $\tilde{\mathbf{X}}$ 和隶属度矩阵 \mathbf{R} ,可根据式(8)所示的广义模糊合成运算得到模糊综合评判集 \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \tilde{\mathbf{X}} \odot \mathbf{R} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (8)$$

其中, \odot 表示广义模糊合成运算。

本文选取的模糊算子 b_j 为:

$$b_j = \sum_{i=1}^m \tilde{x}_i r_{ij} \quad (9)$$

4) 模糊综合评判

模糊综合评判集 \mathbf{B} 是一模糊向量,不够直观。为了直观而明确地表达评判结果,采用模糊等级向量 $\mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ 将模糊向量清晰化,将其转化为一简单分数作为模糊综合评判值 Z 。

$$Z = \mathbf{B} \cdot \mathbf{C}^T \quad (10)$$

3 中子管故障多级模糊综合评判

按照图 1 所示的中子管故障层次结构,进行多级模糊综合评判。建立二级评价指标和模糊评语(表 3)。采用层次分析法得到中子管故障二级评价指标的相对权重(表 4)。

表 3 中子管故障二级评价指标和模糊评语

Table 3 Secondary evaluation indicator and fuzzy comment of neutron tube failure

严酷度 U_1	发生度 U_2	检测度 U_3	模糊风险等级及风险值
非常严重(v_{11})	经常出现(v_{21})	无法检测(v_{31})	很大, [80, 100]
严重(v_{12})	较常出现(v_{22})	很难检测(v_{32})	较大, [60, 80]
一般(v_{13})	偶尔出现(v_{23})	有机会检测(v_{33})	中等, [40, 60]
较轻微(v_{14})	较少出现(v_{24})	基本可检测(v_{34})	较小, [20, 40]
轻微(v_{15})	极少出现(v_{25})	肯定可检测(v_{35})	很小, [0, 20]

表 4 中子管故障二级评价指标判断矩阵及相对权重

Table 4 Secondary evaluation indicator judgement matrix and relative weight of neutron tube failure

二级评价指标	严酷度 U_1	发生度 U_2	检测度 U_3	相对权重
严酷度 U_1	1	1	3	0.428 6
发生度 U_2	1	1	3	0.428 6
检测度 U_3	1/3	1/3	1	0.142 9

3.1 管体故障模糊综合评判

根据专家调研情况统计管体故障一级评价指标各模糊评语出现的概率,构建隶属度矩阵。中子管管体故障一级评价指标各评语的隶属度矩阵列于表 5。采用层次分析法得到的中子管管体故障一级评价指标的判断矩阵及相对权重列于表 6。

根据中子管管体故障一级评价指标的隶属度矩阵及相对权重,按照式(8)、(9)进行一级模糊综合评判,得到的结果为管体故障二级评价指标评语的隶属度矩阵。再结合表 4 的二

级评价指标相对权重,按照式(8)、(9)进行二级模糊综合评判,得到模糊综合评判集。本文中取模糊风险等级向量 $C=[90,70,50,30,10]$,代入式(10),可得中子管管体故障的二级模糊综合评判集的清晰化结果为 $Z=48.417$,对照表 3 可知管体故障的风险等级为中等。

3.2 离子源故障模糊综合评判

根据专家调研结果,中子管离子源故障一级评价指标各评语的隶属度矩阵列于表 7。采用层次分析法得到的中子管离子源故障一级评价指标的判断矩阵及相对权重列于表 8。

表 5 中子管管体故障一级评价指标评语的隶属度矩阵

Table 5 Membership degree matrix of primary evaluation indicator comment for neutron tube body failure

一级评价指标	严酷度评语 V_1					发生度评语 V_2					检测度评语 V_3				
	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{21}	v_{22}	v_{23}	v_{24}	v_{25}	v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{34}	v_{35}
表面污染	0	0.6	0.2	0.2	0	0	0	0.6	0	0.4	0	0	0.2	0.2	0.6
高压击穿	0.6	0.4	0	0	0	0	0	0.4	0.4	0.2	0	0.2	0.2	0.4	0.2
焊缝开裂	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0.2	0.8	0	0	0	0	0.8	0.2
芯柱断裂	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0.2	0.6	0.2	0	0	0	0.8	0.2
靶端磁环焊缝开裂	0.6	0.2	0.2	0	0	0	0	0.2	0.6	0.2	0	0	0	0.8	0.2

表 6 中子管管体故障一级评价指标判断矩阵及相对权重

Table 6 Primary evaluation indicator judgement matrix and relative weight of neutron tube body failure

一级评价指标	表面污染	高压击穿	焊缝开裂	芯柱断裂	靶端磁环焊缝开裂	相对权重
表面污染	1	2	4	8	7	0.497 1
高压击穿	1/2	1	2	4	3	0.241 6
焊缝开裂	1/4	1/2	1	2	2	0.127 8
芯柱断裂	1/8	1/4	1/2	1	1	0.063 9
靶端磁环焊缝开裂	1/7	1/3	1/2	1	1	0.069 7

表 7 中子管离子源故障一级评价指标评语的隶属度矩阵

Table 7 Membership degree matrix of primary evaluation indicator comment for neutron tube ion source failure

一级评价指标	严酷度评语 V_1					发生度评语 V_2					检测度评语 V_3				
	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{21}	v_{22}	v_{23}	v_{24}	v_{25}	v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{34}	v_{35}
阴极短路	0.4	0.4	0.2	0	0	0	0	0	0.6	0.4	0	0.2	0	0	0.8
阴极脱落	0.4	0.4	0.2	0	0	0	0	0	0.2	0.8	0	0.2	0.4	0.2	0.2
阳极短路	0.6	0.4	0	0	0	0.2	0	0.2	0.6	0	0	0	0	0	1
阳极引线断路	0.6	0.2	0	0.2	0	0	0	0	0.4	0.6	0	0.4	0	0.2	0.4
永磁体磁通量衰减	0	0.2	0.2	0.6	0	0	0	0.4	0.4	0.2	0	0	0.2	0.2	0.6
永磁体破损	0.2	0	0.2	0.6	0	0	0	0	0.4	0.6	0	0	0.4	0.2	0.4
接地极放电异常	0	0.4	0.6	0	0	0	0	0.6	0.4	0	0	0.4	0.4	0	0.2

表 8 中子管离子源故障一级评价指标判断矩阵及相对权重

Table 8 Primary evaluation indicator judgement matrix and relative weight of neutron tube ion source failure

一级评价指标	阴极 短路	阴极 脱落	阳极 短路	阳极引线 断路	永磁体磁 通量衰减	永磁体 破损	接地极 放电异常	相对权重
阴极短路	1	2	1	1	1/2	1/2	1	0.117 6
阴极脱落	1/2	1	1/2	1/2	1/4	1/4	1/2	0.058 8
阳极短路	1	2	1	1	1/2	1/2	1	0.117 6
阳极引线断路	1	2	1	1	1/2	1/2	1	0.117 6
永磁体磁通量衰减	2	4	2	2	1	1	2	0.235 3
永磁体破损	2	4	2	2	1	1	2	0.235 3
接地极放电异常	1	2	1	1	1/2	1/2	1	0.117 6

根据中子管离子源故障一级评价指标的隶属度矩阵及相对权重,按照式(8)、(9)进行一级模糊综合评判,得到离子源故障二级评价指标评语的隶属度矩阵,再结合表4的二级评价指标相对权重,按照式(8)、(9)进行二级模糊综合评判,得到模糊综合评判集。中子管离子源故障的二级模糊综合评判集的清晰化结果为 $Z=$

41.431,对照表3可知离子源故障的风险等级为中等。

3.3 氘氚储存器故障模糊综合评判

根据专家调研结果,中子管氘氚储存器故障一级评价指标各评语的隶属度矩阵列于表9。采用层次分析法得到的中子管氘氚储存器故障一级评价指标的判断矩阵及相对权重列于表10。

表 9 中子管氘氚储存器故障一级评价指标评语的隶属度矩阵

Table 9 Membership degree matrix of primary evaluation indicator comment of neutron tube D-T storage failure

一级评价指标	严酷度评语 V_1					发生度评语 V_2					检测度评语 V_3				
	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{21}	v_{22}	v_{23}	v_{24}	v_{25}	v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{34}	v_{35}
加热丝断路	0.6	0.2	0.2	0	0	0	0	0.2	0.6	0.2	0	0	0	0.2	0.8
加热丝短路	0.6	0.2	0.2	0	0	0	0	0.2	0.6	0.2	0	0	0	0.2	0.8
绝缘瓷管破损	0.4	0.6	0	0	0	0	0	0	0.8	0.2	0	0.2	0.4	0.2	0.2
吸气剂局部破损	0	0.6	0.4	0	0	0	0.2	0	0.8	0	0.4	0.2	0.4	0	0
吸气剂脱落	0.2	0.8	0	0	0	0	0.2	0	0.6	0.2	0.2	0.6	0.2	0	0

表 10 中子管氘氚储存器故障一级评价指标判断矩阵及相对权重

Table 10 Primary evaluation indicator judgement matrix and relative weight of neutron tube D-T storage failure

一级评价指标	加热丝断路	加热丝短路	绝缘瓷管破损	吸气剂局部破损	吸气剂脱落	相对权重
加热丝断路	1	1	1/7	1/5	1/3	0.053 2
加热丝短路	1	1	1/7	1/5	1/3	0.053 2
绝缘瓷管破损	7	7	1	1/2	4	0.328 9
吸气剂局部破损	5	5	2	1	7	0.455 9
吸气剂脱落	3	3	1/4	1/7	1	0.108 9

根据中子管氘氚储存器故障一级评价指标的隶属度矩阵及相对权重,按照式(8)、(9)进行一级模糊综合评判,得到的结果为氘氚储存器故障二级评价指标评语的隶属度矩阵。再结合

表4的二级评价指标相对权重,按照式(8)、(9)进行二级模糊综合评判,得到模糊综合评判集。中子管氘氚储存器故障的二级模糊综合评判集的清晰化结果为 $Z=51.995$,对照表3可知氘

氙储存器故障的风险等级为中等。

3.4 加速极故障模糊综合评判

根据专家调研结果,中子管加速极故障一

级评价指标各评语的隶属度矩阵列于表 11。

采用层次分析法得到的中子管加速极故障一级评价指标的判断矩阵及相对权重列于表 12。

表 11 中子管加速极故障一级评价指标评语的隶属度矩阵

Table 11 Membership degree matrix of primary evaluation indicator comment of neutron tube acceleration pole failure

一级评价指标	严酷度评语 V_1					发生度评语 V_2					检测度评语 V_3				
	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{21}	v_{22}	v_{23}	v_{24}	v_{25}	v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{34}	v_{35}
高压加载异常	0.4	0.4	0.2	0	0	0	0	0.8	0	0.2	0	0.2	0.4	0.2	0.2
离子加速、聚焦不稳定	0	0.6	0.4	0	0	0	0	0.4	0.4	0.2	0	0.8	0	0	0.2

表 12 中子管加速极故障

一级评价指标判断矩阵及相对权重

Table 12 Primary evaluation indicator judgement matrix and relative weight of neutron tube acceleration pole failure

一级评价指标	高压加载异常	离子加速、聚焦不稳定	相对权重
高压加载异常	1	1/3	0.25
离子加速、聚焦不稳定	3	1	0.75

模糊综合评判,得到加速极故障二级评价指标评语的隶属度矩阵。再结合表 4 的二级评价指标相对权重,按照式(8)、(9)进行二级模糊综合评判,得到模糊综合评判集。中子管加速极故障的二级模糊综合评判集的清晰化结果为 $Z=51.037$,对照表 3 可知加速极故障的风险等级为中等。

3.5 靶故障模糊综合评判

根据专家调研结果,中子管靶故障一级评价指标各评语的隶属度矩阵列于表 13。采用层次分析法得到的中子管靶故障一级评价指标的判断矩阵及相对权重列于表 14。

根据中子管加速极故障一级评价指标的隶属度矩阵及相对权重,按照式(8)、(9)进行一级

表 13 中子管靶故障一级评价指标评语的隶属度矩阵

Table 13 Membership degree matrix of primary evaluation indicator comment of neutron tube target failure

一级评价指标	严酷度评语 V_1					发生度评语 V_2					检测度评语 V_3				
	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{21}	v_{22}	v_{23}	v_{24}	v_{25}	v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{34}	v_{35}
靶膜氧化	0	0.2	0.6	0.2	0	0	0.6	0.2	0.2	0	0.2	0.8	0	0	0
靶膜破损	0.2	0.4	0	0.4	0	0	0.2	0	0.8	0	0.2	0.4	0.4	0	0
靶膜脱落	0.6	0.2	0.2	0	0	0	0	0.2	0.6	0.2	0.2	0.4	0.4	0	0
靶释放氦气	0	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0	0	0.4	0.6	0	0	0
靶基表面热点蚀	0	0.6	0.2	0.2	0	0	0.2	0.2	0.6	0	0	0.8	0.2	0	0

表 14 中子管靶故障一级评价指标判断矩阵及相对权重

Table 14 Primary evaluation indicator judgement matrix and relative weight of neutron tube target failure

一级评价指标	靶膜氧化	靶膜破损	靶膜脱落	靶释放氦气	靶基表面热点蚀	相对权重
靶膜氧化	1	5	5	1/5	5	0.244 5
靶膜破损	1/5	1	3	1/8	1/2	0.062 2
靶膜脱落	1/5	1/3	1	1/8	1/4	0.036 7
靶释放氦气	5	8	8	1	5	0.559 8
靶基表面热点蚀	1/5	2	4	1/5	1	0.096 8

根据中子管靶故障一级评价指标的隶属度矩阵及相对权重,按照式(8)、(9)进行一级模糊综合评判,得到靶故障二级评价指标评语的隶属度矩阵。再结合表4的二级评价指标相对权重,按照式(8)、(9)进行二级模糊综合评判,得到模糊综合评判集。中子管靶故障的二级模糊综合评判集的清晰化结果为 $Z=54.871$,对照

表3可知靶故障的风险等级为中等。

3.6 二次电子抑制结构故障模糊综合评判

根据专家调研结果,中子管二次电子抑制结构故障一级评价指标各评语的隶属度矩阵列于表15。采用层次分析法得到的中子管二次电子抑制结构故障一级评价指标的判断矩阵及相对权重列于表16。

表15 中子管二次电子抑制结构故障一级评价指标评语的隶属度矩阵
Table 15 Membership degree matrix of primary evaluation indicator comment of neutron tube secondary electron suppression structure failure

一级评价指标	严酷度评语 V_1					发生度评语 V_2					检测度评语 V_3				
	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{21}	v_{22}	v_{23}	v_{24}	v_{25}	v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{34}	v_{35}
磁通量衰减	0	0.2	0.4	0.4	0	0	0.4	0	0.2	0.4	0	0	0.2	0	0.8
抑制电阻断路	0	0.6	0	0.4	0	0	0	0.4	0.4	0.2	0	0	0	0.2	0.8
抑制电阻参数漂移	0	0.2	0.6	0.2	0	0	0	0.4	0.4	0.2	0	0	0.2	0	0.8

表16 中子管二次电子抑制结构故障一级评价指标判断矩阵及相对权重
Table 16 Primary evaluation indicator judgement matrix and relative weight of neutron tube secondary electron suppression structure failure

一级评价指标	磁通量衰减	抑制电阻断路	抑制电阻参数漂移	相对权重
磁通量衰减	1	5	1	0.454 5
抑制电阻断路	1/5	1	1/5	0.090 9
抑制电阻参数漂移	1	5	1	0.454 5

根据中子管二次电子抑制结构故障一级评价指标的隶属度矩阵及相对权重,按照式(8)、(9)进行一级模糊综合评判,得到二次电子抑制结构故障二级评价指标评语的隶属度矩阵。再结合表4的二级评价指标相对权重,按照式(8)、(9)进行二级模糊综合评判,得到模糊综合评判集。中子管二次电子抑制结构故障的二级模糊综合评判集的清晰化结果为 $Z=38.677$,对照表3可知二次电子抑制结构故障的风险等级为较小。

表17 中子管故障风险

Table 17 Risk of neutron tube failure

故障类型	故障模糊风险	风险排序
靶故障	54.871	1
氙气储存器故障	51.995	2
加速极故障	51.037	3
管体故障	48.417	4
离子源故障	41.431	5
二次电子抑制结构故障	38.677	6

4 中子管故障风险评估

根据中子管故障模糊综合评判结果,中子管除二次电子抑制结构的潜在故障风险等级为较小外,其他部件潜在故障的风险等级均为中等,总体故障模糊风险水平为中等水平。中子管故障风险列于表17,故障风险前3位的部件为靶、氙气储存器和加速极。

中子管靶潜在故障总体故障风险为中等。根据表14的分析结果,对中子管靶应重点关注靶释放氦气、靶膜氧化等故障,可分别导致中子管氦压升高、靶吸附氙气能力下降或丧失,从而导致中子管无法达到预期稳定产额。可考虑采取抗氧化能力更强的靶膜材料,并提高靶膜固氮能力,同时优化靶基散热结构,避免靶膜温升过高,减少氦气的释放。

中子管氘氚储存器潜在故障总体故障风险为中等。根据表 10 的分析结果,对中子管氘氚储存器应重点关注吸气剂局部破损、绝缘瓷管破损等故障,这些故障可导致吸、放气能力下降或丧失,从而导致中子管无法达到预期稳定中子产额。由于吸气剂局部破损、绝缘瓷管破损多由电流过大导致,因此在使用过程中应注意规范操作,可适当增加外部电流保护器件。

中子管加速极潜在故障总体故障风险为中等。根据表 12 的分析结果,对中子管加速极应重点关注离子加速、聚焦不稳定的故障,这些故障可导致中子管无法达到预期稳定产额,其通常由加速极表面损伤、陶瓷筒体内部附着杂质引起,可考虑改进工艺,提高筒体表面光洁度。

5 结论

本文采用模糊综合评判和层次分析法对中子管开展了故障风险评估,结果表明:中子管总体故障风险水平中等,故障风险前 3 位的部件为靶、氘氚储存器和加速极,在设计和使用中应重点关注靶释放氦气,靶膜氧化,氘氚储存器吸气剂局部破损,绝缘瓷管破损,加速极离子加速、聚焦不稳定等故障。

参考文献:

[1] 乔亚华. 中子管的研究进展及应用[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(6): 1134-1139.
QIAO Yahua. Progress in studies and applications of neutron tube[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, 28(6): 1134-1139 (in Chinese).

[2] 梁峰, 吴军随, 麻惠生. 耐高温长寿命测井中子管[J]. 测井技术, 1999(1): 62-64.
LIANG Feng, WU Junsui, MA Huisheng. High temperature and long-life neutron tube for logging[J]. Well Logging Technology, 1999(1): 62-64(in Chinese).

[3] 贾文宝. 可移动式中子监测隐性爆炸物系统的初步探索与研究[J]. 原子核物理评论, 2005(1): 76-78, 121.
JIA Wenbao. Study of movable system of neutron detecting latent explosive[J]. Nuclear Physics Review, 2005(1): 76-78, 121(in Chinese).

[4] 肖坤祥, 冉汉正, 曾清, 等. 高产额中子发生器研制[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(增刊): 713-

717.
XIAO Kunxiang, RAN Hanzheng, ZENG Qing, et al. Development of high yield neutron generator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(Suppl.): 713-717(in Chinese).

[5] 裴宇阳. 中子照相技术及其应用[J]. 现代仪器, 2004(5): 17-22, 16.
PEI Yuyang. Progress in neutron radiography and their application[J]. Modern Instrument, 2004(5): 17-22, 16(in Chinese).

[6] 乔双, 景士伟. 提高中子管产额的措施[J]. 核技术, 2011, 34(12): 893-896.
QIAO Shuang, JING Shiwei. Improving the yield of neutron tubes developed at NNU, China [J]. Nuclear Techniques, 2011, 34(12): 893-896(in Chinese).

[7] 李三庆. 测井用中子管寿命分析[J]. 西安工业学院学报, 2001(4): 355-357.
LI Sanqing. Analysis for lifetime of neutron tube in logging[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2001(4): 355-357(in Chinese).

[8] 刘炯, 骆庆锋, 鲁宁, 等. 影响中子管产额因素的分析[J]. 石油仪器, 2010, 24(6): 22-23, 100.
LIU Jiong, LUO Qingfeng, LU Ning, et al. Analysis on the influence factors of neutron tube yield[J]. Petroleum Instruments, 2010, 24(6): 22-23, 100(in Chinese).

[9] 宋应民, 杨洪广, 张家善, 等. 用于中子测井的自密封靶中子管性能评价[J]. 同位素, 2014, 27(4): 199-202.
SONG Yingmin, YANG Hongguang, ZHANG Jiashan, et al. The parameters test of a sealed D-T logging neutron tube[J]. Journal of Isotopes, 2014, 27(4): 199-202(in Chinese).

[10] GJB/Z 1391-2006 故障模式、影响及危害性分析指南[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2006.

[11] 戴云徽, 韩之俊, 朱海荣. 故障模式及影响分析(FMEA)研究进展[J]. 中国质量, 2007(10): 23-26.
DAI Yunhui, HAN Zhijun, ZHU Hairong. Progress on the study of failure modes and effect analysis[J]. China Quality, 2007(10): 23-26(in Chinese).

[12] 胡海涛, 高朝晖, 何正友, 等. 基于 FTA 和 FMEA 法的地铁牵引供电系统可靠性评估[J]. 铁道学报, 2012, 34(10): 48-54.

- HU Haitao, GAO Zhaohui, HE Zhengyou, et al. Reliability evaluation of metro traction power supply system based on FTA and FMEA methods[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 48-54(in Chinese).
- [13] 崔文彬, 吴桂涛, 孙培廷, 等. 基于 FMEA 和模糊综合评判的船舶安全评估[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007(3): 263-267, 276.
CUI Wenbin, WU Guitao, SUN Peiting, et al. Ship safety assessment based on FMEA and fuzzy comprehensive evaluation methods[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007(3): 263-267, 276(in Chinese).
- [14] 杨丽梅, 蔡长亮, 徐楠. 基于模糊综合评判与 FMEA 的数控机床故障分析[J]. 机床与液压, 2015, 43(15): 197-201, 206.
YANG Limei, CAI Changliang, XU Nan. Fault analysis of CNC machine tool based on fuzzy comprehensive evaluation and FMEA methods [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(15): 197-201, 206(in Chinese).
- [15] 郑晶晶, 张钦礼, 王新民, 等. 充填管道系统失效模式与影响分析(FMEA)及失效影响模糊评估[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(6): 166-171, 3.
- ZHENG Jingjing, ZHANG Qinli, WANG Xinmin, et al. FMEA analysis of backfilling pipeline system and fuzzy evaluation of failure effect[J]. CHINA Safety Science Journal, 2009, 19(6): 166-171, 3(in Chinese).
- [16] ZAFIROPOULOS E P, DIALYNAS E N. Reliability prediction and failure mode effects and criticality analysis (FMECA) of electronic devices using fuzzy logic[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2005, 22(2): 124-156.
- [17] 张小红, 裴道武, 代建华. 模糊数学与 Rough 集理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [18] 陈水利, 李敬功, 王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [19] RACHIERU N, BELU N, ANGHEL D C. Improvement of process failure mode and effects analysis using fuzzy logic[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2564(371): 822-826.
- [20] CHEN S D. Failure mode and effects analysis based on fuzzy utility cost estimation[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2007, 24(9): 68-79.