



·前沿技术与交叉科学·

脉冲中子闪烁探测器的工程可靠性设计与提升*

马烈华, 陈爽, 李洪涛, 彭旭升, 张波涛, 李波, 王城, 艾杰

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对一种在复杂环境条件下进行脉冲中子探测的闪烁探测器, 开展了一系列的可靠性设计、保证工作。在设计上通过双通道冗余备份、抗振设计等方式提升了探测器的固有可靠性。此外还采取可靠性建模及指标分配的方式明确了探测器各部件的任务可靠性目标, 通过 FMECA 分析方法研究了探测器各部件的故障模式及其影响, 确定了可靠性重要部件。通过运用环境应力筛选试验及可靠性强化试验, 进一步提升了探测器的可靠性。经初步验证, 采取上述可靠性设计保障技术的脉冲中子探测器, 其任务可靠度可达到 99.9% 以上。

关键词: 脉冲中子; 闪烁探测器; 可靠性; FMECA

中图分类号: O59; V417.3

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230130

Engineering reliability design and improvement for pulsed neutron scintillation detector

Ma Liehua, Chen Shuang, Li Hongtao, Peng Xusheng, Zhang Botao, Li Bo, Wang Cheng, Ai Jie

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O.Box 919-120, Mianyang 621900, China)

Abstract: A series of reliability design work is carried out for a scintillation detector which can detect pulsed neutrons in complex environment. In the design, the inherent reliability of the detector is improved by means of redundant backup of test channels and anti-vibration design. The mission reliability objectives of each component of the detector are defined by means of reliability modeling and index assignment. Through FMECA analysis method, the failure modes and their effects of each component of the detector are studied, and the important component of reliability is determined. The reliability of the detector is further improved by using environmental stress screening test and reliability enhancement test. It is proved that the mission reliability of the pulsed neutron detector with the above reliability design assurance technology is not less than 0.999.

Key words: pulsed neutron, scintillation detector, reliability, FMECA

中子是一种电中性粒子, 很容易进入原子核并与原子核发生反应, 是研究物质结构和动力学性质的理想探针, 其可诱发核裂变链式反应的特性也可用于核能的利用开发。在中子科学技术的发展、利用过程中, 催生了一系列中子探测器, 它们除了用于中子物理研究本身之外也被广泛应用于材料、生命、环境等科学研究领域以及无损探伤、活化分析、石油测井、安检反恐等工业及国防应用领域^[1]。常见的中子探测器按照其内部中子灵敏介质的不同可分为气体探测器、闪烁探测器、半导体探测器等。其中基于有机塑料闪烁体的闪烁探测器由于其 H 原子含量高, 对快中子的探测效率很高, 同时还具有 γ 敏感度低、化学性质稳定、不易潮解、不易碎裂、耐辐照等优点, 在脉冲快中子测试的工程应用领域上具有独特的优势^[2]。随着我国“制造质量强国”战略的逐步推行落实, 在相关工程应用领域越来越重视可靠性工作^[3-4], 以可靠性研究为代表的通用质量特性研究工作正在成为航空航天国防及工业应用领域的新热点^[5-7]。而当前国内对于中子探测器的研究关注点大部分仍集中在探测效率、计数率、 n/γ 分辨、位置分辨等探测性能上^[8-10], 对于探测器如何适应恶劣工作环境以及在如何提升在各种使用场景下的性能稳定性及可靠性方面, 相关的研究尚在起步阶段。实际上, 无论是国防工业应用还是大科学装置建设, 探测器的工作场景

* 收稿日期: 2023-05-13; 修订日期: 2023-10-22

联系方式: 马烈华, 69488054@qq.com。

通信作者: 艾杰, aj_caomu@126.com。

往往伴随着复杂的环境因素。提升探测器在复杂环境条件下的工作可靠性对于保障任务目标、提高工程效率、节省资源成本均具有十分重要的意义。本文针对一种需要在振动、冲击、高低温、湿热及其复合应力作用的复杂环境下进行脉冲中子探测的闪烁探测器,开展了一系列的可靠性设计保证工作,取得了较好的效果。

1 探测器结构及固有可靠性设计

1.1 探测器结构及功能组成

脉冲中子闪烁探测器在结构上主要由探测器壳体、有机塑料闪烁体、光电倍增管、高压模块及线路板几大部分组成,图1为其简化的功能原理框图。探测器的工作任务剖面为单次脉冲中子的探测,需给出脉冲中子的产额及波形(即中子强度的瞬态变化),因此探测器工作在微分模式。

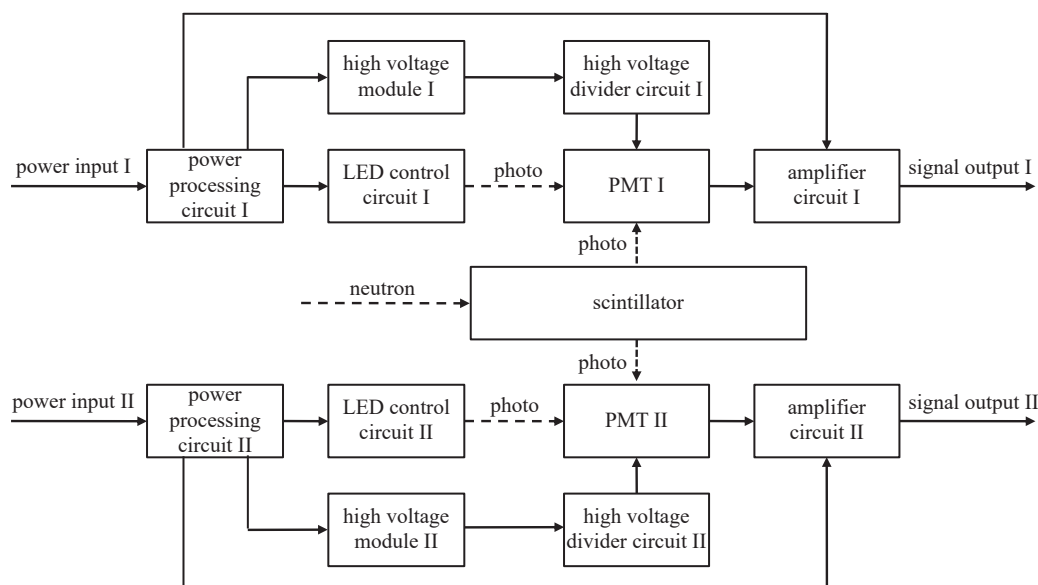


Fig. 1 Functional principle diagram of the detector

图1 探测器功能原理框图

为了在无脉冲中子入射的情况下监测确认探测器的工作状态,在探测器内部设置了“灯控及LED电路”模块。该模块可产生周期性的脉冲电流并驱动LED发光(脉冲宽度约 $1\mu\text{s}$,脉冲间隔周期约 7s),经过光电倍增管及放大电路后形成探测器的自检信号。

1.2 固有可靠性设计

元器件的可靠性是探测器可靠性的基础。为保证探测器的固有可靠性,其使用的所有元器件包括光电倍增管、高压模块等关键器件,均选用了厂家最高质量等级的产品,且在指标选择上采用降额设计的方法,降额等级一般不低于II级。元器件在装机前按照相关的质量控制要求进行元器件DPA及二次筛选,尽量筛选出可能存在内部缺陷的元器件。

为提高探测器的固有可靠性,基于冗余设计的思想,在一个探测器内部设计了两套相对独立的信号处理系统,两套系统共用一个闪烁体模块。外部脉冲快中子入射至闪烁体并通过核反冲原理使闪烁体中产生大量光子,2个光电倍增管均可收集部分光子并将其转化为电信号,经后续放大电路放大后输出2路测试信号。在执行任务时,只要获取任意一路测试信号即可测得脉冲中子的产额、波形等相关信息。

由于探测器需要在较为恶劣的振动冲击环境条件下工作,为提高探测器在特定工作环境条件下的可靠性,主要采取了两种手段。一是选用抗振型微通道板光电倍增管(MCP-PMT)作为探测器的光电转换器件。相较于打拿极型的光电倍增管,微通道板光电倍增管的结构更加简洁紧凑,其陶瓷管体结构也比传统的玻璃管体结构更加坚固。其内部用于电子倍增的部件为一层或两层拼接的微通道板(MCP),通过特定的装架工艺将其固定在管体内部,在振动环境下不易晃动,可保证输出信号的稳定性和可靠性。二是在探测器装配调试完成后,在探测器内部注入硅凝胶,硅凝胶固化后对探测器内部起到进一步的加固作用,确保探测器在振动、冲击等应力加载作用下保持各个部组件之间的位置稳定性^[4],避免装配结构变化导致的探测器性能变化或失效。

2 可靠性建模及指标分配

2.1 可靠性模型

建立可靠性模型的目的是为了分配、预计和评估探测器的可靠性。可靠性模型分为基本可靠性模型和任务可靠性模型。其中基本可靠性的关注点在于无故障的持续时间或概率, 任务可靠性则定义为在规定任务剖面内完成规定功能的能力^[12]。根据项目特点, 探测器的任务可靠性是更受关注的指标, 下文所述的可靠性均指代任务可靠性。

根据探测器工作原理及内部功能部件组成框架, 建立任务可靠性模型如图 2 所示。图中连接系统包括连接器以及连接器与线路板之间、各功能模块之间的连接线路。

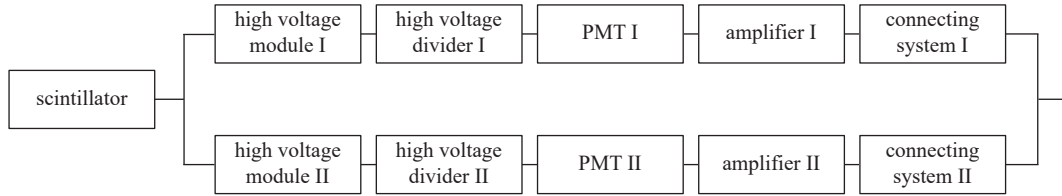


Fig. 2 Reliability model of pulsed neutron detector

图 2 脉冲中子探测器的可靠性模型

根据模型, 如假设探测器两路测试通道的各功能部件的可靠性相同, 那么其任务可靠度的计算公式如下

$$R_T = R_S [1 - (1 - R_G R_{FY} R_{PMT} R_F R_L)^2] \quad (1)$$

式中: R_T 为探测器的整体任务可靠度; R_S 为闪烁体的任务可靠度; R_G 为高压模块的任务可靠度; R_{FY} 为分压器的任务可靠度; R_{PMT} 为光电倍增管的任务可靠度; R_F 为放大器的任务可靠度; R_L 为连接系统的任务可靠度。

2.2 可靠性指标分配

可靠性分配是把系统的可靠性指标按照一定的准则分配给各组成单元, 其目的是将整体可靠性指标转换为单元的可靠性指标, 使之协调一致。通过可靠性指标分配, 可以使各级设计人员明确其可靠性设计要求。为提高可靠性分配结果的合理性和可行性, 可靠性指标的分配按照如下原则进行:

- a) 组成单一的功能部件分配较高的可靠性指标, 复杂度高、组成元器件多的功能部件分配较低的可靠性指标;
- b) 对环境适应性强的功能部件分配较高的可靠性指标, 对环境因素较为敏感的功能部件分配较低的可靠性指标;
- c) 对未曾出现过可靠性问题的功能部件分配较高的可靠性指标, 对曾有故障发生的功能部件分配较低的可靠性指标。

根据上述原则, 以及探测器的任务可靠性目标, 制定了探测器可靠性分配指标如表 1 所示。表 1 中对光电倍增管(PMT)分配了最低的可靠度指标(0.98), 主要是因为其失效模式较多, 且在相似探测器的研发过程中曾出现过由于供电高压模块上电过冲导致管内击穿进而引发探测器故障的严重质量问题^[13], 另外两个分配了 0.99 可靠度指标的放大器及连接系统, 也曾在工程应用中出现过类似问题。根据可靠性指标分配结果及公式(1)计算得到探头的任务可靠度达到 0.998 2。

表 1 脉冲中子探测器可靠性指标分配表

Table 1 Reliability index distribution of pulsed neutron detector

| No | functional unit | reliability distribution value | notes |
|-------|----------------------|--------------------------------|--|
| 1 | scintillator | 0.9999 | It is almost impossible to fail below the softening temperature. |
| 2 | high voltage module | 0.999 0 | — |
| 3 | high voltage divider | 0.999 0 | — |
| 4 | PMT | 0.980 0 | Sensitive to the environment and has a history of failures. |
| 5 | amplifier | 0.990 0 | Has a history of failures. |
| 6 | connecting system | 0.990 0 | Has a history of failures. |
| total | — | 0.998 2 | — |

3 故障模式、影响及危害性分析

FMECA 是一种系统化的可靠性分析程序,是分析产品所有可能的故障模式及其可能产生的影响,并按每个故障模式产生的影响的严重程度及其发生概率进行分类的一种归纳分析方法^[14]。通过 FMECA 分析,可确定系统中潜在的故障模式,以及每种故障模式的原因和影响,找出其中的可靠性关键产品。分析产品可能的故障模式及其影响建立在对产品功能原理、相关特性的了解基础之上,应充分利用本产品及相似产品的故障历史信息。

开展 FMECA 分析,需对产品层次进行定义。中子探测器中的元器件可以作为最低层次,但元器件数量繁多,以此为基础开展 FMECA 存在较大困难。因此在实际工作中将探测器的基本功能单元即闪烁体、高压模块、分压器、光电倍增管、放大电路、灯控电路、连接系统作为最低层次进行分析。对各个功能单元的每种故障模式,分析给出其严酷度等级和概率等级。严酷度等级一般分为 I 类(灾难的)、II 类(致命的)、III 类(中等的)、IV 类(轻度的)四个等级;概率等级一般分为 A(经常发生)、B(有时发生)、C(偶尔发生)、D(很少发生)、E(极少发生)五个等级(概率高低只作为一个相对的比较,不要求给出严格的概率数值)。FMECA 分析结果形成 FMECA 表,可全面呈现产品的故障模式、影响及危害,并给出故障检测方法及相关补偿措施。表 2 列出了脉冲中子探测器中光电倍增管部分的 FMECA 表。从表中可以看到,光电倍增管存在三种严酷度为 II、概率等级为 C 的故障,在探测器各个功能部件中风险最高,因此将其列为探测器中的可靠性重要件,在采购、验收、使用过程中予以重点关注。

表 2 脉冲中子探测器 FMECA 表(光电倍增管部分)
Table 2 FMECA table of the pulsed neutron detector (PMT part)

| function | failure mode | cause of failure | effects of the failure | | severity | probability level | fault detection methods | compensation measures |
|--|---|---|---|---|----------|-------------------|--|---|
| | | | local and higher level effects | final effects | | | | |
| | anode output sensitivity decreases | cathode poisoning / MCP resistance change / vacuum decrease | the decrease of sensitivity of PMT leads to the decrease of neutron sensitivity | The test task failed or the test result showed a large deviation. | II | C | self inspection/neutron sensitivity test | monitor the storage performance of the multiplier tube and install it after stabilization strengthen the screening of multiplier tubes and design discharge protection circuits |
| photoelectric conversion and electronic multiplication | anode output discharge | decrease of vacuum / interelectrode voltage resistance | anode abnormal output damaged amplifier, no neutron signal output | The test task failed or the test result showed a large deviation. | II | C | self inspection/neutron sensitivity test | improving microchannel board resistance and optimizing voltage divider circuits |
| | anode output drift exceeds the prescribed limit | temperature drift of resistance of MCP | neutron sensitivity distortion | There is a big deviation in the test results. | II | C | neutron sensitivity testing during temperature testing | |

4 可靠性保障与提升方法

4.1 环境应力筛选

为保障脉冲中子探测器产品的可靠性,在研制过程中开展了环境应力筛选试验。环境应力筛选试验中最有效也是最常见的种类为温度循环试验和随机振动试验。温度循环试验使试验件交替膨胀和收缩,同时在试验件内产生热梯度,导致内部热应力的加剧,潜在缺陷会随循环数增加而被逐渐激发。随机振动试验使试验件在不同频率上同时受到激发应力,具有不同固有频率的元器件同时在共振,从而使安装不当、内部有结构缺陷的元器件受扭曲、碰撞等而损坏的概率增加。

从脉冲中子探测器的设计及应用实际条件出发,参考相关通用方法^[15]制定了温度循环筛选试验条件(图 3)及随机振动筛选试验条件(图 4)。依此按照缺陷剔除随机振动筛选(每向 7.5 min)→缺陷剔除温度循环筛选(10 次循环)→无故障检验温度循环筛选(8 次循环)→无故障检验随机振动筛选(每向 7.5 min)的顺序进行。

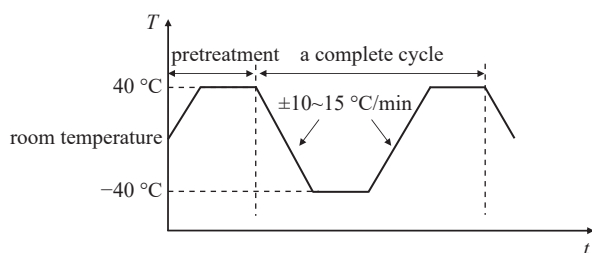


Fig. 3 Settings of temperature cycle screening test

图3 温度循环筛选试验条件

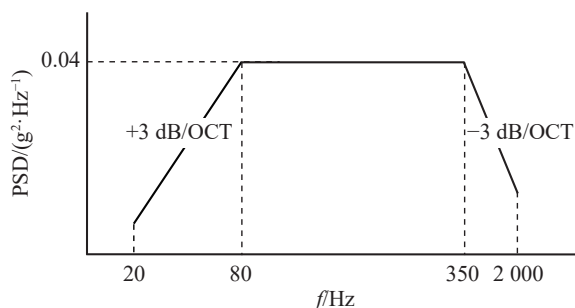


Fig. 4 Settings of random vibration screening test

图4 随机振动筛选试验条件

在温度循环试验中, 上限温度为 40 °C, 下限温度为 -40 °C, 上下限温度的保持时间均为 4.5 h, 温变速率为 10~15 °C/min。前 10 次温度循环为缺陷剔除阶段, 如在该阶段探测器始终未出现故障, 则跳过无故障检验温度循环筛选阶段直接进入无故障检验随机振动筛选; 如在此期间出现故障, 则对探测器进行修复, 排除故障后重新进行该循环试验。在随机振动筛选中, 按照探测器的方向敏感性, 在 O_x (轴向) 和 O_y (横向) 两个方向开展试验, 试验过程中对探测器全程加电并进行性能的检测。

环境应力筛选可以发现和排除探测器的早期失效, 使其进入寿命“浴盆曲线”中的随机失效阶段, 以稳定的可靠性水平投入后续使用。需注意的是筛选应力的量值不能超过产品的设计极限, 应以激发潜在缺陷又不损坏产品中完好部分为原则。

4.2 可靠性强化

可靠性强化试验是 20 世纪 90 年代由美国波音公司提出的一种可靠性试验技术, 其原理是通过提高环境应力来快速激发一些潜伏极深的或间歇性的故障, 配合故障模式及失效物理分析, 能够在产品早期研制工作中发现、研究和纠正故障, 为产品设计改进提供有效信息, 以提升可靠性。

可靠性强化选择的应力类型应根据试验对象的特点进行选择, 对于探测器或电子学类产品, 其敏感环境应力主要是温度应力、振动应力、湿度应力、电循环应力。基于这个特点, 制定了多种环境应力步进试验条件, 抽取少量探测器进行可靠性研究。其中对发现探测器潜在故障较为有效的步进试验为以下三种:

a) 低温步进试验: 起点温度 -10 °C, 步长 10 °C (即每次试验降低 10 °C), 终止温度 -30 °C, 每步保温时间 2 h (认为此时探测器内部温度已经平衡) 后, 对探测器进行 30 min 的加电测试, 加电电压覆盖探头的额定工作电压、上限电压和下限电压, 每种电压下的测试时间不少于 5 min;

b) 高温步进试验: 起点温度 50 °C, 步长 10 °C, 终止温度 70 °C, 每步保温时间 2 h 后, 对探测器进行 30 min 加电测试(加电及测试方式与低温步进试验相同);

c) 随机振动步进试验: 分 O_x 、 O_y 、 O_z 三个方向分别开展试验; 以探测器随机振动抽验 PSD 谱为基准, 起点为 1.1 倍基准 PSD, 步长为 0.2 倍 PSD, 终点为 1.5 倍 PSD; 每次试验加载时间为 5 min, 期间探测器保持加电并进行测试(加电及测试方式与低温步进试验相同)。

除上述三种试验外, 还开展了交变湿热、模拟运输振动、气压、电压拉偏、电压骤变、电压瞬断等多种步进试验, 此处不进行展开介绍。

在高温步进试验中, 发现了探测器内一种用于限流保护的自恢复保险丝器件在 60 °C 高温下额定电流下降引发的故障; 在随机振动步进试验中, 发现了一起集成电路芯片引脚接触不良引发的故障。针对上述发现的问题, 分别采取了自恢复保险丝器件换型及电路焊接工艺改进的措施, 经过验证, 改进措施有效。通过开展可靠性强化试验, 发现了探测器设计及工艺中存在的薄弱环节, 采取相关改进措施后有效提升了探测器的固有可靠性。

5 可靠性初步验证

为研究脉冲中子探测器产品的真实可靠性水平, 在同批次生产探测器中随机抽取 9 台开展了可靠性验证试验。可靠性验证试验采取随机振动与温度复合应力加载的方式, 具体试验条件由系统总体单位根据典型任务剖面的环境应力及探测器的应力敏感特性制定。由于探测器采用了双通道冗余备份的设计, 只要一个测试通道正常工作即可完成任务目标, 因此可靠性样本可按照测试通道进行统计, 在得到测试通道的任务可靠度后, 再计算探测器整体的任务可靠度。根据统计, 共获得 54 个成功样本数, 0 个失败样本数。按照寿命指数模型对探测器测试通道

的任务可靠性进行评估^[16],其任务可靠度最优单侧置信下限为 0.971(置信度 0.8)。按照可靠度并联模型计算,该脉冲中子探测器的任务可靠度预计可达 0.999 以上,达到了设计预期目标。

6 结 论

为保证脉冲中子闪烁探测器在恶劣工作环境下的任务可靠性,开展了一系列的可靠性设计保证及提升工作。在设计上通过元器件质量控制、双通道冗余备份、环境适应性提升设计等方式提升探测器的固有可靠性,同时借助可靠性建模和 FMECA 分析方法对探测器的组成部件的可靠性提出了要求。为进一步提升探测器的可靠性,在研制过程中引入了环境应力筛选方法,同时通过开展可靠性强化试验对探测器的可靠性薄弱环节进行研究,取得了良好的效果。经初步验证,本次研制的脉冲中子闪烁探测器的任务可靠度可达 0.999 以上,达到了设计预期目标。

参考文献:

- [1] 赵天池. 传感器和探测器的物理原理和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 726-758. (Zhao Tianchi. Physical principles and applications of sensors and detectors[M]. Beijing: Science Press, 2008: 726-758)
- [2] 汲长松. 中子探测实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1998. (Ji Changsong. Neutron detection experiment method[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1988)
- [3] 康锐, 王自力. 可靠性系统工程理论回顾与展望[J]. 航空学报, 2022, 43: 527505. (Kang Rui, Wang Zili. Reliability systems engineering: a research review and prospect[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43: 527505)
- [4] 孙龙, 胡湘洪, 高春雨. 可靠性发展历史与经验启示[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 9(s2): 1-4. (Sun Long, Hu Xianghong, Gao Chunyu. The development history and experience enlightenment[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2021, 9(s2): 1-4)
- [5] 朱美光, 钱秋瑛, 王佳. 红外探测器组件可靠性保证技术[J]. 上海航天, 2014, 31(4): 50-53. (Zhu Meiguang, Qian Qiuying, Wang Jia. Reliability assurance technology of infrared focal plane assembly[J]. *Aerospace Shanghai*, 2014, 31(4): 50-53)
- [6] 张朴真, 何永强, 徐燕菱, 等. 深空探测器指向机构可靠性设计研究[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 33(6): 8-11. (Zhang Puzhen, He Yongqiang, Xu Yanling, et al. Research on reliability design of pointing mechanism of deep space detector[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2022, 33(6): 8-11)
- [7] 李明, 沈璐璐, 李凯. 质谱仪器的可靠性设计研究[J]. 质谱学报, 2020, 41(1): 87-92. (Li Ming, Shen Lulu, Li Kai. Research on reliability design of mass spectrometer[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2020, 41(1): 87-92)
- [8] Zhou Jianrong, Xiu Qinglei, Zhou Xiaojuan, et al. Highly efficient GEM-based neutron detector for China Spallation Neutron Source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, 953: 163051.
- [9] 魏伟伟, 杜强, 王力, 等. 掺钆液闪中子探测器的研制[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 066001. (Wei Weiwei, Du Qiang, Wang Li, et al. Manufacture of gadolinium-doped liquid scintillator detector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 066001)
- [10] Fu Zaiwei, Pan Shangke, Yang Fan, et al. Neutron detection properties of $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$: Ce crystal[J]. *Radiation Measurements*, 2015, 72: 39-43.
- [11] 艾杰, 代红跃, 文延伟, 等. 可在恶劣环境下工作的塑料闪烁探测器研究[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(3): 558-560. (Ai Jie, Dai Hongyue, Wen Yanwei, et al. Study on plastic scintillation detector used in very terrible environments[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2009, 29(3): 558-560)
- [12] 潘勇, 黄进永, 胡宁. 可靠性概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 170-173. (Pan Yong, Huang Jinyong, Hu Ning. An introduction to reliability[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 170-173)
- [13] 马烈华, 龙继东, 陈永涛, 等. 基于高压模块供电的 MCP-PMT 高压击穿故障分析及设计改进[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 095007. (Ma Liehua, Long Jidong, Chen Yongtao, et al. Analysis and design improvement of MCP-PMT high-voltage breakdown fault based on high voltage module power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 095007)
- [14] GJB/Z 1391-2006, 故障模式、影响及危害性分析指南[S]. (GJB/Z 1391-2006, Guide to failure mode, effects and criticality analysis[S])
- [15] 胡湘洪, 高军, 李劲. 可靠性试验[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 80-85. (Hu Xianghong, Gao Jun, Li Jin. Reliability test[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 80-85)
- [16] GJB 899A-2009, 可靠性鉴定和验收试验[S]. (GJB 899A-2009, Reliability testing for qualification and production acceptance[S])