

浅谈核电站高剂量辐射区域火灾探测系统

结合国内在役及在建核电站的火灾探测系统建设方案,探讨在高剂量辐射区域内,如何选用火灾探测器,保证火灾探测的有效性和可维修性。

佟成玲^{1,2}/1.上海交通大学机械与动力工程学院 2.上海核工程研究设计院



佟成玲/工程师

火灾不管是发生在家庭还是发生在企业,造成的后果都是破坏性的。核电站如果发生此类事故,其后果则会影响电厂工作人员和邻近地区居民的健康和安定,并给环境造成长期的潜在危害,同时还会中断上百万用户的电力供应。

1975年3月22日发生在Browns Ferry核电站的火灾是一个极为重要的事件,它使美国核电工业的消防和规章发生了根本性的改变。这场火灾不但破坏了电力供应,还损坏了核电站控制系统及设备的电缆,从而破坏了正常和备用反应堆冷却系统的运行,并影响了运行人员对核电站的监控能力。如果多个安全系统发生故障,核电站的工作人员就必须进行紧急维修,以使安全关闭反应堆所必需的系统恢复工作。

由此可见,火灾探测系统对现场火灾的监测,对于核电站的安全生产有着重要意义。它的正常工作能够使运行人员保持对现场设备的监测,及时干预火情,防止事故扩大。虽然火灾探测系统的设计主要是以指令性消防规范为基础的,但核电站设计对可满足特定环境要求的性能型规范越来越重视。性能型设计可通过对性能、风险因素、内部配置以及特定环境条件的评估来确定最佳的火灾探测系统。设计该系统时,设计者必须考虑如下因素:①房间内的气流特

点和空气变化速率;②每个探测器的覆盖面积和所要求的灵敏度;③房间大小和特点;④房间环境条件;⑤紧急响应系统的报警。

现从核电站的特殊性出发,结合国内在役及在建核电站的火灾探测系统建设方案,探讨在高剂量辐射区域(主要为反应堆厂房)内,如何选用火灾探测器,保证火灾探测的有效性和可维修性。

火灾探测设备分析及性能比较

国内主要核电站在高剂量辐射区域所选择的火灾探测设备主要有点式感烟型火灾探测器、点式感温型火灾探测器和极早期空气采样烟雾探测器。下面对各类型探测器的工作原理、性能比较及核辐射对其工作和维修的影响进行简要概述。

1. 火灾探测器工作原理

(1) 点式感烟型火灾探测器

点式感烟型火灾探测器的功能:在初燃生烟阶段,能自动发出火灾报警信号,以期将火扑灭在未成灾害之前。根据结构不同,点式感烟型火灾探测器可分为离子式感烟探测器和光电式感烟探测器。

1) 离子式感烟探测器。离子式感烟探测器是由一个放射源(Am^{241})、外置的采样室和内置的离子参考样本室组成,如图1a所示。当放射源照射空气中的物质时,一部分物质变成带正电的离子,另一部分物质变成带负电的离子。带正电的离子和带负电的离子在电场的作用下形成了一个电场,如图1b所示。

关键词/Keywords

核电站·
高辐射剂量区域·
火灾探测·
有效性·
可维修性·

当烟雾进入采样室后与带电的离子结合，带电离子的减少使电场电压产生了变化，烟雾越多电压变化就越大。当电压增加量达到一定值时，开关电路动作，发出报警信号。

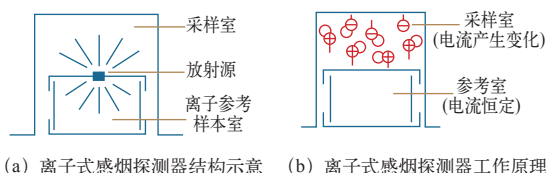


图1 离子式感烟探测器结构和工作原理

2) 光电式感烟探测器。光电式感烟探测器有一个迷宫式烟雾探测室，里面设有一个光源和一个感光元件。由于是迷宫式设计，光源的光线一般不能照射到感光元件上，如图2a所示。当有烟雾进入后，光线在烟雾中产生散射，从而有部分光线射到感光元件上，如图2b所示。烟雾越浓，散射到感光元件上的光线就越多，感光元件再把光信号转换为电信号输出，当产生的电信号超过阈值时，则输出报警信号。

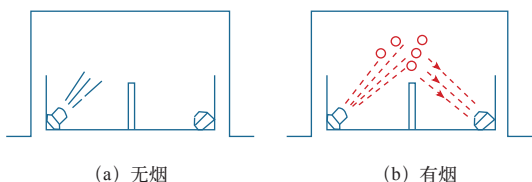


图2 光电式感烟探测器工作原理

(2) 点式感温型火灾探测器

点式感温型火灾探测器主要是利用热敏元件来探测火灾。在火灾初始阶段，除有大量烟雾产生外，物质在燃烧过程中会释放出大量的热量，周围环境温度急剧上升。该种类探测器中热敏元件的阻值随温差发生变化，从而将温度信号转变成电信号，并进行报警处理。根据结构原理不同可分为双金属片型、膜盒型和热敏电子元件型三种。根据其作用原理可分为定温式、差温式和差定温式三种。下面仅对最常用的两种感温探测器进行介绍。

1) 双金属片型感温探测器。该类型探测器是应用两种不同膨胀系统的金属片作为敏感元件的，一般制成差温和定温两种形式：定温式是当

环境温度上升达到设定温度时，定温部件立即动作，发出报警信号；差温式是当环境温度急剧上升，其温升速率达到或超过探测器规定的动作温升速率时，差温部件立即动作，发出报警信号。双金属片型感温探测器结构如图3所示。其中，图3a示意的探测器是利用两种膨胀系统不同的金属片制成，它利用双金属片的弯曲变形，达到温度报警的目的。当金属片受热时，膨胀系数大的金属就要向膨胀系数小的金属方向弯曲，如图3a中虚线所示，使接点闭合，将信号输出。图3b示意的探测器是利用双金属的反转，反转方式如图所示。双金属的圆盘像虚线那样反转使接点闭合，将信号输出。图3c示意的探测器是利用金属膨胀系数的不同，由膨胀系数大的金属外筒和膨胀系数小的内部金属板组合而成，根据其膨胀系数的差使接点闭合，将信号输出。

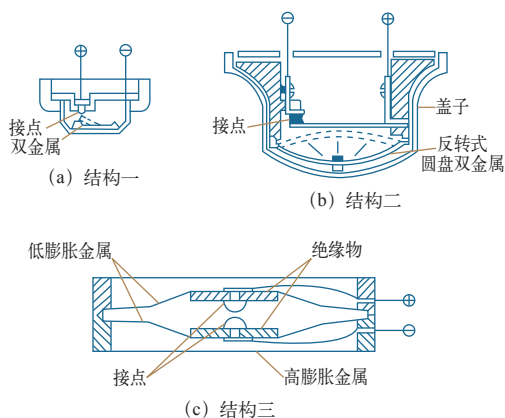


图3 双金属片型感温探测器结构示意图

2) 膜盒型感温探测器。该类型探测器主要由感热室、膜片、泄漏孔及接点等构成。当有火灾时，感热室内的空气随着周围温度的急剧上升而迅速膨胀，膜片受压使接点闭合，发出报警信号。如果环境温度缓慢变化时，由于泄漏孔的作用，空气室内的气体被泄漏，膜片保持不变，接点不会闭合。膜盒型感温探测器结构如图4所示。

(3) 极早期空气采样烟雾探测器

空气采样探测是一种基于高能LED光能技术和智能信号处理器控制技术的烟雾探测装置，该探测器主要由抽气泵、过滤器、激光腔和控制电路

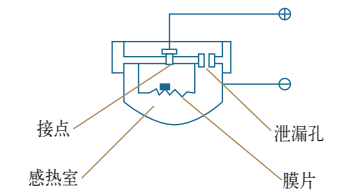


图4 膜盒型感温探测器结构示意图

等组成。抽气泵通过采样管网从被保护区抽取空气作为样本送入激光腔，在激光腔内利用激光照射空气样本，其中烟雾粒子所造成的散射光被阵列式接收器接收，接收器将光信号转换成电信号后送至探测器的控制电路，信号经处理后转换为烟雾浓度以及设定的报警阈值，产生一个适宜的输出信号。

极早期空气采样烟雾探测器工作原理如图5所示。

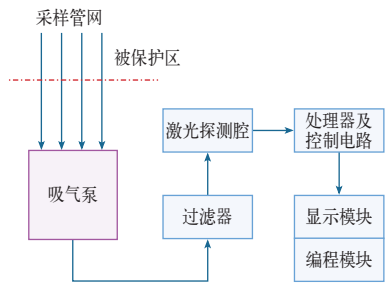


图5 极早期空气采样烟雾探测器工作原理示意图

2. 火灾探测器性能比较

(1) 感烟和感温探测器性能比较

从监测的火灾特性的角度来看，极早期空气采样烟雾探测器也属于感烟探测器的一种。因此上文描述的各类探测器主要分为感烟和感温两种类型。

核电站的防火设计采用纵深防御的基本原则，其中有一条要求快速探测与报警并扑灭现已发生的火灾，限制火灾的损害。相对于感烟探测器，感温探测器反应比较慢，因此其不能很好地满足快速探测与报警的要求。

其次，核电站高剂量辐射区域（主要为反应堆厂房）内的房间结构比较特殊，可能存在房间高度大于8 m的区域，根据GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》中点型感烟/感温探测器的设置规定，这些区域是不适合部署点型感温探测器的，因为其不能保证火灾探测的有效性。

由此可见，从满足探测的有效性及快速性要求来说，在高剂量辐射区域选择感烟探测器更加可靠。

(2) 离子和光电探测器性能比较

两种点式感烟型火灾探测器的基本性能对比如表1所示。

表1 点式感烟型火灾探测器基本性能对比表

序号	基本性能	离子感烟探测器	光电感烟探测器
1	对燃烧产物颗粒大小的要求	天然物质的烟雾粒子，直径0.01~0.1 μm	有机物质的烟雾粒子，直径1~10 μm
2	对燃烧产物颜色的要求	无要求，均合适	不适用于黑烟、浓烟，适合于白烟、浅烟
3	对燃烧方式的要求	适合于明火、炽热火，对阴燃火响应性能差	适合于阴燃火，对明火反应性差
4	大气环境（温度、湿度、风速）的变化	适应性差	适应性好
5	探测器安装高度的影响	适应性好	适应性差
6	对可燃物的选择	适应性好	适应性差

由此可见，离子感烟探测器和光电感烟探测器不仅在工作原理上不同，在性能特点上也是各有所长。一般而言，离子感烟探测器比光电感烟探测器具有更好的外界条件适应性，适用于大多数现场条件复杂的场所，诸如办公室、楼梯、走廊、配电间和空调器机房等，这些地方大多为单纯报警，不需要联动灭火控制，相对而言，能准确、迅速报警是主要的，偶尔一、二次误报警不会造成什么损失。光电感烟探测器较适合于化学实验室、计算机房和放射性场所等外界环境单一或有特殊要求的场所。

因此，从满足探测环境要求来说，在高剂量辐射区域选择光电感烟探测器更加可靠。

(3) 新型探测器和传统探测器性能比较

传统点式感烟探测器和极早期空气采样烟雾探测器的基本性能对比如表2所示。

由表2的比较可见，传统点式感烟探测器和极早期空气采样烟雾探测器不仅在工作原理上不

表2 传统感烟探测器和新型感烟探测器基本性能对比表

序号	基本性能	传统点式感烟探测器	极早期空气采样烟雾探测器
1	探测原理	外界烟雾扩散至传感室里，并达到一定浓度才能探测并报警，属于被动式探测。主要采用光电管和放射源、单向模拟或开关量址技术	主动抽取外界的空气，只要空气中有烟尘就能及时报警，属于主动式探测。主要采用激光前向散射技术和前馈神经网络技术
2	烟雾扩散	由于烟雾的热上升特性，烟雾首先上升并附着于天花板上，只有当烟雾聚集量超过探测器的安装高度时才能进入传感室	主动抽气式探测系统能够将最初产生的少量烟雾吸取到传感室内，并可垂直布管，不管多高的空间都能探测到烟雾
3	灵敏度	5%~9% obs/m，当探测器报警的时候，给值班人员扑灭火灾的时间只有几分钟。灵敏度由人工设定	0.005%~20% obs/m连续可调，当探测器报警的时候，给值班人员扑灭火灾的时间有100~200 min。灵敏度由设备自动设定，只需人工设定每年可忍受的误报率
4	安装维护	使用一定时间必须清洗并重新标定，维护工作量大，并且维护费用较高	系统的采样管网与主机无电气连接，只需定期清洗过滤网上的灰尘，维护工作量小，并且无需费用
5	高气流环境	不适合安装在高气流环境之中	高气流环境对本系统无影响
6	抗干扰能力	由于控制器和探测器之间由电源线和信号线相连，电线比较长，易形成天线效应，感应空间电磁波，尤其是在通信、计算机房等强电磁干扰区域，轻则影响探测器和控制器的信号传输，重则可能损坏控制器和探测器的内部元件，误报率高	采样由采样管道、采样管取样孔组成，无须走电线，所有电子元件都在系统探测器的机壳之内，不易受到外界电磁场的干扰，误报率接近为零。可用于防爆和强电磁及辐射场所，以及微波暗室、军火库和油库等
7	组网能力	只能与控制器主机组网，并且距离十分有限	可以独立组网，也可以通过接口与计算机联网，或者以继电器开关量接口与传统报警控制系统联网
8	抗环境气流影响	受环境气流的影响很大，在许多强气流的位置，根本无法报警	不受环境气流的影响
9	光学器件的清洗	时间一长，传统感烟探测器的光学器件上会布满灰尘，使传感器的灵敏度下降，甚至失效，产生在火灾探测中绝对不允许的漏报现象。必须由人工逐个检测并拆下清洗，工作量很大且易损坏器件	由于探测器主要为抽气式的，所以设备会主动利用抽进的空气对光学器件进行不断地清洗，使光学器件始终保持最佳工作状态，不会产生漏报现象。设备不用人工清洗

同，在性能特点上也存在很大的差异。点式感烟探测器为被动工作方式，等待烟依靠空气自然对流到达后才能探测。在火灾早期，通常烟的扩散速度很慢，需经过较长的时间才能到达探测器，有的根本就到达不了。探测器无法实现超早期火灾探测报警。其次，点式感烟探测器使用的传感器是靠黑烟遮挡住光源或放射源而报警，对人眼看不见的烟它无法探测到。而极早期空气采样烟雾探测器恰好在这两方面发挥了优越性，大大地提高了火灾探测的灵敏度与可靠性。

因此，从满足核电站的安全特性要求来说，在高剂量辐射区域选择极早期空气采样烟雾探测器更加可靠。

3. 辐射对火灾探测器有效性的影响

由上述内容可知，点式感烟/感温火灾探测器

内部结构主要由敏感元件及电路（转换电路、抗干扰电路、保护电路和指示电路）组成。敏感元件主要将火灾燃烧的特征物理量转换成电信号，电路主要将敏感元件转换所得的电信号进行放大并处理成火灾报警控制器所需的信号。这些电路中的电子元器件在受到辐射后，性能会衰退，半导体增益降低，工作点漂移，造成探测器的可靠性下降，可能引起误报警。甚至这些电子器件会完全损坏，设备不可用，从而根本无法实现探测报警功能。

而对于极早期空气采样烟雾探测器而言，其只需要在被保护区域布置采样管网，后端的主设备均设置在非剂量区或者低剂量区域（需加装机箱进行防护）。因此，该设备的探测性能不会

(下转第74页)

3) 参数选取。本工程为不接地系统。根据标准^[3,7]：保护装置1的 U_c 取 $1.1U_m$ （13.2 kV）； U_c 取 $1.38U_m$ （16.56 kV）；保护装置2、3的 U_c 可不考虑； U_c 取 $1.1U_m$ （13.2 kV）。标称放电电流是冲击波形8/20 μ s放电电流的峰值。依据文献[7]的分类要求，标称放电电流均为5 kA。按设备耐受值，据前文式（1）计算操作保护水平；据前文式（2）计算雷电保护水平。陡波冲击电流是波头时间1 μ s、幅值同标称放电电流。在其作用下的残压应与设备的绝缘要求配合^[4]。鉴于电压等级和陡波起源于GIS内开关，本工程可不考虑。方波通流容量表征了避雷器的通流容量，根据标准^[7]的要求，标称放电电流为5 kA的保护装置1持续时间电流冲击（方波冲击电流）的试验要求为150 A。保护装置2、3最少要达到保护装置1的要求。综上所述，保护装置各基本参数如表7所示。

表7 基本参数

序号	参数	1	2、3
1	持续运行电压/kV	≥ 13.2	不考虑
2	额定电压/kV	≥ 17	≥ 13.2
3	标称放电电流/kA	5（峰值）	5（峰值）
4	雷电冲击电流下残压峰值 (5 kA, 8/20 μ s) /kV	≤ 53.5	≤ 53.5
5	陡波冲击电流下残压峰值 (5 kA, 1/3 μ s) /kV	不考虑	不考虑
6	操作冲击电流下残压峰 (250 A, 30/160 μ s) /kV	≤ 49.3	≤ 41.1
7	2 ms方波通流容量/A	≥ 150	≥ 150

结束语

过电压保护装置的应用和选型是民用工程电气设计中的一个重要组成部分。正确进行过电压保护装置的设计，将减小系统中各类过电压对设备的损坏及干扰，最大限度地保证系统的安全运行。

（收稿日期：2015-03-15） EA

（上接第56页）

受到辐射剂量的影响。同时，由于探测器的全封闭性，分析后的空气样本又被重新送回被探测的房间内，保证从高辐射剂量区采集的空气不会外泄。

4. 辐射对火灾探测器可维修性的影响

在核电站正常运行时，高辐射剂量区域是不允许人员进入的，此时如果设置在此区域的火灾探测设备发生故障，将无法维修，造成该区域失去火灾监测能力。由表2的比较可见，极早期空气采样烟雾探测器具有灵活布管，主动采样的特性，其可突破传统点式感烟探测器在安装维护上的局限性，不为设施的高度、广度及环境所限制，安装简便，易于维护。如果探测设备发生故障，也可及时维修，不会造成火灾监测能力的降低或失效。

结束语

从火灾探测的快速性、有效性及可靠性，从安装维护的便利性来说，在高辐射剂量区域选择极早期空气采样烟雾探测器更符合核电站的安全

要求。但由于其造价昂贵，在核电站中并没有得到广泛的使用。在该限制条件下，针对不同的探测区域，更应合理选择满足火灾危害性分析及辐射环境要求的探测手段，优化组网方案，组建最佳的探测系统。这样既提高了监测高辐射剂量区域的可靠性和有效性，实现了对监测核电站高辐射剂量区域所用探测器的可维修性，又可节约工程造价。

参考文献

[1] 郑燕宇, 陆明浩. 智能型极早期空气采样火灾探测技术探讨 [J]. 智能建筑与城市信息, 2004, 92 (7): 44-47.

[2] 蔡叶发, 李腾龙, 周博. 抽气式火灾探测系统在核电站中的应用 [J]. 电力安全技术, 2008, 10 (2): 62-63.

[3] 梁华. 建筑弱电工程设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

[4] GB 50116—2013 火灾自动报警系统设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

（收稿日期：2014-10-15） EA