

核电厂事故温度环境对压力变送器的影响分析

邹树梁¹, 黄有骏^{1,2}

(1. 核设施应急安全作业技术与装备湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001;
2. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:压力变送器广泛应用于核电厂压力、液位、流速等工艺参数的测量. 大部分安装在安全壳内的压力变送器均经过了设计基准事故的鉴定, 但超设计基准事故高温环境对其的影响仍未知. 本文采用鉴定曲线包络法及仿真技术对其在设计基准事故和超设计基准事故下的工作情况进行了分析, 给出了上述工况高温环境对其的影响, 并通过分析结论, 对该仪表耐高温性能的改进方向提出了建议.

关键词:核电厂; 事故; 温度环境; 压力变送器

中图分类号:TL361

文献标识码:B

Analysis of the Impact of Accident Temperature Environment on Pressure Transmitter in Nuclear Power Plant

ZOU Shu-liang¹, HUANG You-jun^{1,2}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Emergency Safety Technology and Equipment for Nuclear Facilities, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Pressure transmitters are widely used in measuring of process parameters in nuclear power plant. Most of the pressure transmitters located in containment vessel have passed the DBA qualification, but whether they could survive in high-temperature environment in DBDA is unknown. In this article, we made analysis about the characteristics of pressure transmitter, and used both envelope and simulation methods to study how temperature affects the transmitter in DBA and BDBA condition. At last, we gave some suggestions on way of improving the resistance to elevated temperature of transmitter according to the study.

key words: nuclear power plant; accident; temperature environment; pressure transmitter

收稿日期: 2013-12-27

作者简介: 邹树梁(1956-), 男, 江西安福人, 核设施应急安全作业技术与装备湖南省重点实验室教授, 博士研究生导师. 主要研究方向: 核设施应急安全技术与装备.

0 引言

在核电厂中,为了使核岛和常规岛的各种设备安全经济地运行,必须对压力加以监视和控制^[1]. 压力变送器广泛应用于核电厂压力、液位、流速等工艺参数的测量. 特别是应用于核蒸汽供应系统压力参数、稳压器及蒸汽发生器液位、一回路冷却剂流速等测量的压力/压差变送器,还参与核电厂保护系统所需工艺参数的监测,对核电厂的安全起到非常重要的作用.

目前安装在安全壳内的压力变送器大多经过了核级鉴定,具备在正常工况及设计基准事故(DBA, Design Basis Accident)下 ze 常 ze 作的能力. 但在超设计基准事故(BDBA, Beyond Design Basis Accident)工况下,目前无法通过型式试验确定压力变送器是否可以保持其可用性. 而基于 IAEA NS-G-1.1 的 HAD102/14《核动力厂安全重要仪表和控制系统》报批稿中提到,在设备鉴定程序中不要求考虑严重事故工况,但是,应以合理可信度和可能程度表明用于响应严重事故的设备能够在预计的严重事故工况下起作用^[2]. 而在法国核电标准 RCC-E《压水堆核岛电气设备设计和制造规则》2005 年版中提到,(严重事故)可能出现的状况很复杂,但一切都表现为辐照、温度和压力条件的严重变化^[3]. 因此,有必要开展温度对于压力变送器的影响分析.

本文基于压力变送器原理及特性,通过运用鉴定曲线包络法及仿真技术对其在事故温度环境下的影响进行分析,探讨其薄弱环节,对今后的改进提供一定的思路.

1 核电厂压力变送器特性

1.1 核电厂压力变送器类型

核电厂压力变送器多采用电容式和扩散硅式,其中以电容式为主. 其原理是敏感元件电容器受到压力后,电容量产生的变化可以反映被测压力的变化. 通过一定的测量线路将电容值转换为电压、电流或频率信号并放大. 该类型压力变送器具有灵敏度高、动态响应好、过载能力强等诸多优点,但同时很容易受线路寄生电容、电缆电容和温度、湿度等外界干扰.

1.2 变送器信号传送方式

压力变送器输出信号与电源的传输方式分为两线制、三线制、四线制三种形式. 两线制变送器优点很多,可大大减少装置的安装费用,有利于安全防爆

等. 目前核电厂内的变送器基本上都是两线制的.

1.3 信号制及供电方式

信号制是仪表的统一的联络信号,有气压信号,电信号包括模拟信号、数字信号、频率信号和脉宽信号等. 由于其采用二线制,目前核电厂压力变送器普遍采用的信号制是具有活零点的 4 ~ 20 mA 直流电信号.

仪表都需要电源供给能量,供电方式大致有两种:交流供电和直流集中供电. 同样由于二线制,因此必须是单电源供电. 目前核电厂普遍采用 24 V 直流集中供电方式.

2 运用鉴定曲线包络法分析

2.1 压力变送器的鉴定

根据 GB/T 12727—2002《核电厂安全系统电气设备质量鉴定》,设备鉴定方法主要有运行经验法、论证分析法、型式试验法. 对于仪表在事故工况下鉴定,相关的仪表运行经验极少,通过单纯的论证分析也很难令人信服. 因此多采用型式试验法. 但上述标准的制订主要参考自 IEC 60780—1998,其配套的试验程序 EJ/T 1197—2002《核电厂安全级电气设备质量鉴定试验方法与环境条件》只给出了 DBA 工况下的鉴定试验方法^[4-5]. 换言之,我国尚无 BDBA 工况下仪表鉴定的相关法规和标准. 其他国际上的主流核电标准中,用于安全级仪表质量鉴定的标准主要有 IEEE 323、IEC 60780 及 RCC-E,其中也没有一个标准强制要求已建成核电厂在 BDBA 工况下对仪表进行鉴定^[6-7]. 因此只能通过其 DBA 工况鉴定曲线对仪表进行环境包络分析.

以国内核电厂保有量最大的 M310 机组为例,该机组最早从法国引进,依据的标准为 RCC-E. 该标准将安全级仪表鉴定分为 K1、K2、K3 三级^[8]. 其中安装在安全壳内且需要在事故或事故后环境条件下完成其规定功能的仪表必须经过 K1 鉴定程序的鉴定. 同时该标准也给出了相应的配套试验程序及鉴定曲线.

2.2 鉴定曲线包络法

鉴定曲线包络法属 GB/T 12727—2002 给出的三个鉴定方法中的论证分析法. 其思路为将仪表鉴定时的环境条件曲线与严重事故的环境条件曲线进行包络对比,结合仪表环境敏感因素的分析,评价仪表在严重事故条件下性能是否受到影响. 由于该方法基于型式试验数据,具有很好的可信度和可操作性.

鉴定曲线包络法对仪表在超设计基准条件下

可用性分析的基本要素进行了归类,主要要素包括仪表类型、仪表位置、持续可用时间以及仪表鉴定数据. 其中仪表类型决定了仪表的材料特性、不同类型仪表失效模式均不尽相同^[9];仪表位置可以细化用于分析的超设计基准环境条件,提高分析工作的准确性;持续可用时间可以明确需要其完成规定功能的时间长度;仪表鉴定数据是仪表在进行相应基准事故试验时的数据,是可用性分析的基础.

2.3 分析实例及结果

以秦山二期核电厂 1、2 号机组安全壳压力仪

表为例. 该仪表鉴定等级为 K1 级,安装位置为安全壳环廊,假设需要其执行功能的时间为 24 h^[10]. 在事故序列的选取中,考虑到其可信度及涵盖的事故现象,这里选取同福岛核事故类似的全厂断电(SBO, Station Black Out)事故序列. 此事故序列中,假设全厂断电后电源未能及时恢复,所有能动系统不可用,辅助给水系统不可用,安注箱和非能动氢气复合器可用. 发生全厂断电事故后,由于假设电源没有恢复,所有能动设备及辅助给水系统不可用. 其事故序列见表 1.

表 1 SBO 事故序列
Table 1 The accident sequence of SBO

事故序列 代码	始发 事件	假设条件					备注
		SG 二次 侧给水	稳压器 安全阀	高、低压安注	安注箱	非能动氢气 复合器	
SBO	SBO	失效	主动卸压	失效	可用	可用	低压熔堆

根据事故序列,可以对安全壳内的环境温度进行模拟计算,将计算出的事故后仪表安装位置环境温度曲线同鉴定温度曲线进行包络对比. 包络对比图如图 1 所示.

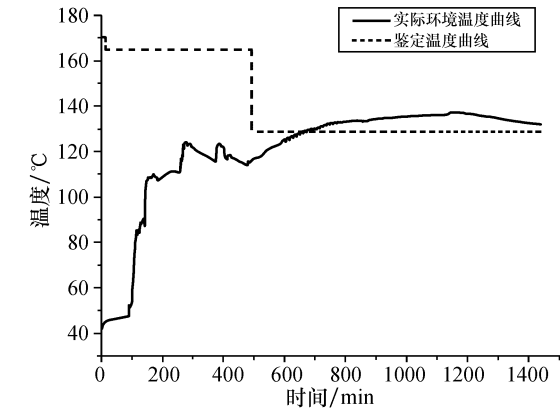


图 1 鉴定温度曲线同实际环境温度曲线包络对比图
Fig.1 Envelope of evaluation trial and environmental curve in temperature

对比图 1 中两条曲线可以看出,事故发生后 600 min 内,仪表的鉴定温度曲线包络了环境温度曲线,但此后环境温度持续长时间超出了鉴定温度,但超出幅度不大. 由于电容式仪表对温度非常敏感,因此无法直接判断仪表性能是否会受到影响. 考虑到事故初期(前 600 min)实际环境温度曲线原低于鉴定温度曲线,因此可以使用 IEC 60780 推荐的阿伦纽斯方程来检验超出包络部分

对其的影响. 仪表的预计实际工作时间 L_a 可由如下公式表示:

$$L_a = L_q e^{-1 \left(\frac{E}{K_b} \right) \left(\frac{1}{T_q} - \frac{1}{T_a} \right)}$$

式中 L_q 为鉴定寿命, T_a 为加速老化温度, K; T_q 为寿命鉴定时温度, K; E 为材料激活能, eV; K_b 为波尔兹曼常数. 但在此公式的运用上,由于压力变送器中材料的复杂性,激活能的选取是个难点. 若取其激活能最低的元器件材料值 0.78 eV, 环境温度取该时间内最高值 136 °C, 鉴定温度取该时间内最低值 129 °C, 其计算结果为 $L_a = 16.371 \text{ h}$ ($L_q = 24 \text{ h}$, $T_q = 403.15 \text{ K}$, $T_a = 409.15 \text{ K}$, $K_b = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$), 因取值较为保守, 计算结果无法满足 24 h 使用的要求. 因此无法判断该变送器受在事故工况高温环境的影响情况, 同时也说明了即使压力变送器通过了 DBA 工况的温度鉴定, 无法保证其在bdba 温度环境下能够正常运行.

3 运用仿真技术分析

由于压力变送器中最容易受温度影响的为电路部分, 而运用电路仿真软件可以直观地给出电路的输出波形, 同时也可以对其温度效应进行分析. 根据这一特性, 本文建立压力变送器等效电路, 分析其温度效应. 这里根据前文中核电厂压力变送器的结构特点及输出特征, 建立的压力变送器的等效电路(信号输出部分)如图 2. 该变送器采用二线制 24 V 直流供电, 在仿真中设定其正常工作时输出信号为 $I_1 = 0 \text{ mA}$, $I_2 = 16 \text{ mA}$, $TD = 10 \text{ ms}$, $TR =$

30 ms, TF = 30 ms, PW = 300 ms, PER = 1 s.

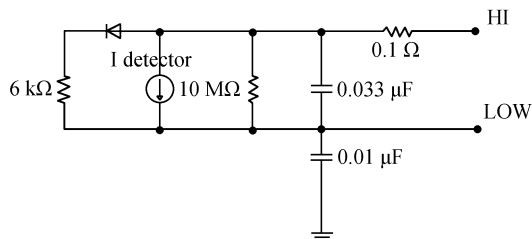


图2 压力变送器简化等效电路

Fig. 2 Simplified equivalent circuit of pressure transmitter

选用 PSpice 作为仿真工具. 在指定室温

(27 °C) 和 DBDA 工况 (136 °C) 两种工作温度条件下进行仿真. 在敏感元器件容差值为 5% 情况下, HI-LOW 间的输出信号对比如图 3 所示.

由图可以看出, 在 BDBA 温度环境下, 变送器输出电流较室温偏高, 且即使在室温变送器无信号输出的情况下, 变送器仍有大约 1 mA 的微电流输出, 该情况可能由于高温下变送器绝缘及屏蔽性能下降, 电源中漏电流引入输出线路所致. 另元器件在长期高温下参数也产生了一定变化, 导致输出信号偏离正常值较多. 由此可以看出, 高温下压力变送器精度下降, 但具有规律性. 并且在一定程度上可以保持信号输出, 为操纵员对电厂状态的判断起到一定作用.

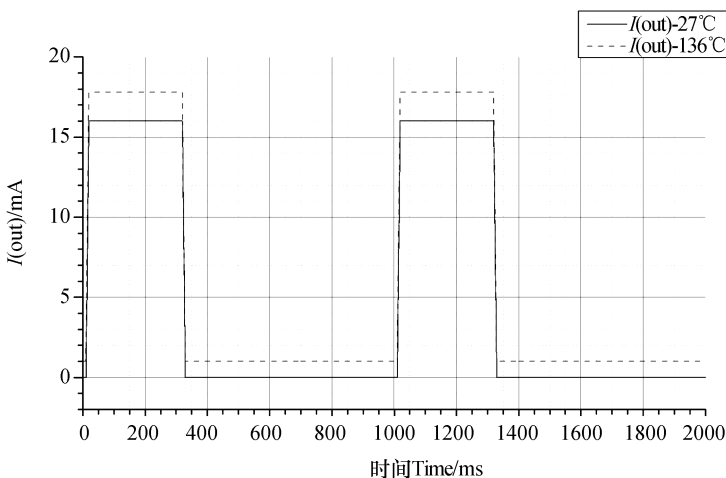


图3 室温和 BDBA 温度环境下输出波形

Fig. 3 Output signal in normal and BDBA temperature environment

4 结 论

本文以安全壳压力仪表为实例, 通过对核电厂压力变送器结构及特点的分析, 运用鉴定曲线包络法及仿真分析法对其在核电厂事故高温环境下受到的影响进行了分析. 结论如下: 在正常环境和 DBA 温度环境下, 压力变送器均经过了型式试验的可信鉴定, 可以确定其能保持正常工作; BDBA 温度环境下, 压力变送器仍能输出信号, 但精度会受到影响, 其主要是绝缘及屏蔽性能下降所致, 元器件参数有一定变化但幅度不大, 在一定程度上仍可以作为电厂状态的参考.

进一步改进压力变送器在高温下的工作性能, 本文提出两点建议: 1) 将变送器安装在安全壳中受温度影响更低的位置; 2) 电子元器件的性能提升有限且成本较高, 因此可以将重点放在提

升其防护外壳、电缆、接插件的耐高温性能上, 并且在电缆敷设时注意信号电缆和供电电缆之间的绝缘, 避免漏电流的产生.

参考文献:

- [1] 夏虹. 核工程检测技术[M]. 1 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009.
- [2] IEC 61513 nuclear power plants-instrumentation and control for systems important to safety-general requirements for systems[S]. Geneva: IEC. ,2001.
- [3] RCC-E design and construction rules for electrical equipment of nuclear islands [S]. France: AFCEN. 2005, 12.
- [4] 唐华雄, 严加洪, 汪伟, 等. CPR1000 严重事故仪表鉴定要求的对比分析及应用[J]. 核科学与工程, 2012, 32(S2): 179-184.

(下转第 16 页)

从表 3 和 4 来看,深圳地表建筑室内氡浓度水平随建筑层数的增加而升高,高层建筑室内氡浓度比低层建筑的要高很多.地表三类建筑的室内氡浓度不同调查结果都处于同一水平,变化不大,但相对 1986 年的调查结果都偏高不少.由于本项目调查地下设施是深圳市如地铁、地下停车场等现代具有代表性的地下设施.它们拥有独立的通风管道,通风条件好,空气流通率大,因此本次调查的地下设施氡浓度比前人测得的地下室氡浓度值低.

3 总 结

于 2013 年 7 月下旬采用 RAD-7 静电收集式连续测氡仪对深圳福田区划分的八个区域的公共场所室内氡辐射照射水平进行了调查,采样点数 44,室内氡浓度平均值是 26.7 Bq/m^3 ,几何平均值为 22.3 Bq/m^3 ,几何偏差为 1.9.此次调查结果表明高层建筑的室内氡浓度远高于平均值,而深圳市高层建筑居多,所以有必要对深圳市的高层建筑室内氡浓度辐射照射水平进行长期监测.

参考文献:

[1] 符适,孙浩,张浩.深圳市光明新区土壤氡浓度水平及分布规律调查[J].广东科技,2010,19(20):6-8.

[2] 贺小凤,王国胜.深圳市某高校校园内土壤氡浓度的测定[J].深圳信息职业技术学院学报,2013,11(1):29-32.

[3] 石劲松,邱国华,杜喜臣.深圳市环境放射性异常带识别与影响因素分析[J].世界核地质学科学,2010,27(3):182-186.

[4] 蔡勇明,唐文祥,陈佳慎.深圳特区公共场所 ^{222}Rn 浓度调查[J].中华放射医学与防护杂志,1994,14(5):305-307.

[5] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation [R]. Vienna:UNSCEAR,2006.

[6] Naval Facilities Engineering Command US. Navy Radon assessment and mitigation program guidebook for radon management in non residential buildings[S]. 2010,7.

[7] Chen J, Tokonami S, Sorimach A, et al. Preliminary results of simultaneous radon and thoron tests in Ottawa [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2008, 130(2):253-256.

[8] 卓维海,陈波,李德红,等. CR-39 探测器对 α 粒子入射角度和能量响应的实验研究[J].原子能科学科学技术,2008,42(S1):322-325.

[9] 朱立,尚冰.室内氡核建材装修材料放射性评价[C].中国环境科学学会学术年会,2013:253-261.

[10] 刘祖森,戈其君,张炳尧,等.广东大亚湾核电站运行前深圳市环境辐射水平及其所致居民剂量[J].中华放射医学与防护杂志,1997,17(3):193-196.

(上接第 4 页)

[5] 王广金,刘燕,刘江燕,等.核电厂 1E 级电气设备鉴定试验研究[J].核动力工程,2008,29(4):131-134.

[6] 骆邦其,林继铭. CPR1000 核电站严重事故重要缓解措施与严重事故序列[J].核动力工程,2010,31(S1):74-80.

[7] Negin C A, Lorenzi M E, Bergeron C F. Instrument performance under severe accident conditions: ways to acquire information from instrumentation affected by an ac-

cident[R]. California:EPRI,1993.

[8] 王泽平,周涛,付涛.中、美、法核电标准比较研究[J].华北电力大学学报(社会科学版),2009(4):1-5.

[9] Hom A J, James R W, True D E. Assessment of existing plant instrumentation for severe accident management [R]. California:EPRI,1993.

[10] 竺艺,张圣.国内核电厂设备的安全分级研究[J].中国设备工程,2012(9):24-27.