

秦山第三核电厂辐射监测系统标定方法

刘正山¹ 张庆利¹ 刘晋瑾¹ 苗宇星¹

耿利新¹ 庄 昀² 董建峰² 贺常娥²

(1. 中国辐射防护研究院,山西太原,030006;

2. 秦山第三核电联营有限公司,浙江海盐,314300)

摘 要

放射性气溶胶、碘和惰性气体等监测仪的标准标定方法和标定装置目前在国内还没有建立,故国内核设施现场配备的各种气溶胶、碘和惰性气体等监测仪还无法进行有效的标定。针对秦山核电三期辐射监测系统的现状,对用于废液、气溶胶、碘、惰性气体等辐射监测仪表的标定方法进行了初步摸索和确定。通过在202和103两次大修中的检测给出了初步标定结果,并得出了各类仪表的传递系数。通过检测和标定,提高了辐射监测仪表的可信度。同时对在标定中存在的问题进行了初步分析和探讨。

关键词:秦山第三核电厂 辐射监测系统 标定

Calibration Method of Radiation Monitoring System at TQNPC

(In Chinese)

LIU Zhengshan¹ ZHANG Qingli¹ LIU Jinjin¹ MIAO Yuxing¹

GENG Lixin¹ ZHUANG Yun² DONG Jianfeng² HE Change²

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan, Shanxi, 030006;

2. Third Qinshan Nuclear Power Co. Ltd. , Haiyan, Zhejiang, 314300)

ABSTRACT

The calibration methods and calibration device for standard monitor of radioactive particulate, iodine, noble gas and so on are not yet set up at home. On consideration of the present situation of the radiation monitoring system at the Third Qinshan Nuclear Power Co. Ltd. , we have studied the calibration method of these radiation monitoring instruments used for measuring the waste liquid, particulate, iodine and noble gas produced during the operation of nuclear reactor. Through the check against these instruments during the No. 202 and No. 103 overhaul, we got initially the method of the calibration and obtained the transfer coefficient of calibration when secondary solid sources are used for calibration. Through the testing and calibration, the credibility of the radiation monitoring system is enhanced. And at the same time, the problems existing in the calibration are discussed.

Key words: TQNPC, Radiation monitoring system, Calibration

引言

中国辐射防护研究院和挂靠在中辐院的核工业仪表检测中心,即国防科工委华北放射性计量站,从2006年开始共同对秦山第三核电厂(TQNPC)用于废液、气溶胶、碘、惰性气体等辐射监测系统的仪表进行了检测。对于这些仪表目前尚未有相应的现场标定国标可循,因此检测基本上是按仪器出厂标准进行的。检测的目的是为了验明这些仪表的性能指标是否符合出厂标准,是否满足监测要求,判断是否可以继续使用在相应的监测通道上,及如何根据监测结果获得待测量真值。检测工作包括了对仪表工作状态的调整,对仪器的分辨率、线性、重复性和稳定性等性能指标的测量,以及在现场情形,用固体源校准来确定校准因子的方法。标定中所使用的所有放射源,其量值均可追溯到国家计量标准。

通过检测和标定,可以提高仪表的可信度,使之在核电运行过程中提供可靠的安全信息,为核电的安全运行提供质量保证。

1 标定方法说明

对仪表进行定期检测的目的,主要是为了及时发现仪表性能是否发生变化,以提高测量结果的可信度,最终还要求得出校准因子,以便可由校准因子乘上仪表示值得出待测量的约定真值。

在检测中,各监测系统的初始显示值为 min^{-1} ,但不同的监测系统测量对象并不相同。表1中厂家给出的 $0.122 \text{ Bq}/\text{min}^{-1}$ 、 $0.673 \text{ Bq}/\text{min}^{-1}$ 等原始校准因子,是系统在出厂前用标准气体(液体)源校准求得的。

但在工程中采用标准溶液或气体对仪器进行校准很困难,因此,一般都采用固体标准源法进行校准,即在仪器制造过程中,利用标准液体/气体源标定一次,得到仪器的初级响应 S_1 ,然后再用已知活度的标准固体源测量得出对固体源的次级响应 S_2 ,两相比较,得到其转换系数 K :

$$K = \frac{Q_1/C_1}{Q_2/A_2}$$

式中: K ——仪器对标准液体/气体源的响应与标准固体源的响应的转换系数;

Q_2 ——仪器对恒定几何位置的固体源的响应, min^{-1} ;

A_2 ——固体源的活度, Bq ;

Q_1 ——仪器对标准溶液或气体的响应, min^{-1} ;

C_1 ——标准溶液或气体的浓度, Bq/m^3 。

在现场对仪器进行标定时,得到仪器在恒定几何位置下对固体源的次级响应,考虑了源的衰变后,乘以转换系数,就可得到仪器的灵敏度。也就是说由系统对次级固体源的确定的几何条件下的响应的变化,就可以推算出系统灵敏度的变化,即可用来修正原始校准因子。比如,对气溶胶监测系统,厂家给出的原始校准因子为 $S_1 = 0.122 \text{ Bq}/\text{min}^{-1}$,同时用次级固体标准源在确定的几何条件下测得的次级响应为 $S_2 = 7.12 \times 10^5 \text{ min}^{-1}/\mu\text{Ci}$ 。之后,若系统在现场使用过程中在相同的几何条件下测得对次级固体源的响应变化为 $S'_2 = 5.67 \times 10^5 \text{ min}^{-1}/\mu\text{Ci}$,则说明系统的灵敏度变低了一个因子 $(7.12 \times 10^5)/(5.67 \times 10^5) = 1.26$ 。也就是系统的校准因子变大了,应当用这个值来修正系统的原始校准因子。即此时系统的读

数 $X(\text{min}^{-1})$ 所对应的待测约定真值为 $X \times S_1 \times (S_2/S'_2)$ 。

表 1 TQNPC 辐射仪表厂家提供的出厂数据

型号	监测对象	量程	检查源	灵敏度/初级源响应
LEMS—600 67882	废液	10^4 Bq/m^3	MX-9B(V19): $9 \mu\text{Ci } ^{137}\text{Cs}$ 检查源, β 本底约 77 min^{-1}	$3.30 \times 10^2 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
CAM—300 PIGEF 67883, 67884, 67885	气溶胶	$(2 \times 10^{-2}) \sim 10^5 \text{ Bq/m}^3$	MX-9B(V19): $9 \mu\text{Ci } ^{137}\text{Cs}$ 检查源, β 本底约 100 min^{-1} ; γ 本底约 100 min^{-1}	$0.122 \text{ Bq}/\text{min}^{-1}$
	碘	$10^{-3} \sim 10^4 \text{ Bq/m}^3$	MX-9B(V22): $10 \mu\text{Ci } ^{133}\text{Ba}$ 检查源, 本底约 100 min^{-1}	$0.673 \text{ Bq}/\text{min}^{-1}$
	惰性气体	$10^3 \sim 10^{10} (\text{Bq} \cdot \text{MeV})/\text{m}^3$	MX-9B(V24): $10 \mu\text{Ci } ^{133}\text{Ba}$ 检查源, 本底约 $200 \sim 500 \text{ min}^{-1}$	$463 (\text{Bq} \cdot \text{MeV})/\text{m}^3/\text{min}^{-1}$

一般情况下, 厂家本来应当将此几何条件提供给用户, 最好是将测量的几何条件连同次级固体标准源一起提供给用户。对于 TQNPC 来说, 厂家提供的标定数据皆是建立在型号为 RG—001 的参考几何条件上的, 但此参考几何条件厂家没在提供设备时一块提供给 TQNPC, 故厂家灵敏度/初级源响应是无法传递到 TQNPC 现场。

为此, TQNPC 和计量院共同定制了型号为 NIM—DS0401 的几何条件, 按照厂家提供的标定程序, 通过在相同工作状态下对 TQNPC 几何条件 NIM—DS0401 下的测试, 与厂家标准几何条件的测试数据进行比较, 就可以建立起一种合适的传递方法: 以厂家提供的灵敏度作为初级响应, 在 TQNPC 几何条件 NIM—DS0401 下进行次级响应测试, 计算多台监测系统的平均次级源响应, 根据对应的初级响应计算出传递系数 K , $K = \text{次级源平均响应} \times \text{初级源响应}$, 根据此传递系数, 可将 TQNPC 几何条件下标定数据溯源到厂家 APTEC-NRC 公司。

2 标定结果

按照以上标定方法, 在 2006 年和 2007 年的 202 和 103 大修中对相关辐射监测系统进行了检测。

2.1 废液监测系统

厂家提供的 γ 灵敏度为 $330 \text{ Bq}/(\text{m}^3/\text{min}^{-1}) (^{137}\text{Cs})$, 以此作为初级响应。 ^{133}Ba 作为次级源核素, 在 TQNPC 几何条件 NIM—DS0401 下进行次级响应测试, 在“积分”模式, 0.15 MeV , 1 min 定时条件下进行。在 202 大修和 103 大修期间测试具体数据列于表 2。

2.2 气溶胶监测仪

厂家提供的灵敏度为 $0.122 \text{ Bq}/\text{min}^{-1}$, 以此作为初级响应。 ^{99}Tc 和 ^{36}Cl 作为次级源核素, 在 TQNPC 几何条件 NIM—DS0401 下进行次级响应测试, 在“积分”模式, 0.10 MeV , 1 min 定时条件下进行。在 202 大修和 103 大修期间对 6 台气溶胶监测仪测试具体数据以及仪表在出厂时测试的数据列于表 3。

表 2 废液监测仪响应传递测试表

废液监测仪响应传递						
测试日期	HV/V	次级源响应/(cpm/ μ Ci)		初级响应/ (Bq/($m^3 \cdot min^{-1}$))	传递系数 K/ (Bq/($m^3 \cdot \mu$ Ci))	几何条件
2006-10-22 (202 大修)	710.8	1.51×10^5	平均 1.63×10^5	330	5.38×10^7	TQNPC NIM—DS0401
2007-04-29 (103 大修)	777.2	1.74×10^5				

表 3 气溶胶监测仪响应传递测试表

气溶胶监测仪响应传递												
测试日期		核素	探头编号	HV/V	测试参数	次级源响应 S_2 / (min^{-1}/μ Ci)		初级响应 S_1 / (Bq/ min^{-1})	传递系数 $K = S_2 \times S_1$	几何条件		
出厂	2000-06-15	^{36}Cl	MD002406	770	“积分”	7.12×10^5	平均: 7.14×10^5	0.122	8.71×10^4 Bq/ μ Ci	NRC RG— 001		
	2000-06-15		MD002405	670	0.10 MeV	7.12×10^5						
	2000-08-02		MD002807	710	1 min 定时	7.12×10^5						
	2000-04-13		MD001605	680		7.12×10^5						
	2000-04-14		MD001606	630		7.12×10^5						
	2000-07-11		MD002803	580		7.26×10^5						
	2000-06-15	^{99}Tc	MD002406	770	“积分”	2.03×10^5	平均: 2.05×10^5		2.50×10^4 Bq/ μ Ci			
	2000-06-15		MD002405	670	0.10 MeV	1.94×10^5						
	2000-08-02		MD002807	710	2 min 定时	1.97×10^5						
	2000-04-13		MD001605	680		2.10×10^5						
	2000-04-14		MD001606	630		2.16×10^5						
	2000-07-11		MD002803	580		2.08×10^5						
	202/ 103 大修	2006-10-22	^{36}Cl	02112041	668	“积分”	3.74×10^5	平均: 3.60×10^5	0.122		4.39×10^4 Bq/ μ Ci	TQNPC NIM— DS0401
		2006-10-16		MD002405	750	0.10 MeV	3.31×10^5					
2006-10-17		MD002807		790	1 min 定时	3.65×10^5						
2007-05-04		MD001605		720		3.65×10^5						
2007-04-28		MD001606		697		3.64×10^5						
2007-04-26		MD002803		650		3.59×10^5						
2006-10-22		^{99}Tc	02112041	668	“积分”	6.42×10^4	平均: 6.26×10^4		7.64×10^3 Bq/ μ Ci			
2006-10-16			MD002405	750	0.10 MeV	5.78×10^4						
2006-10-17			MD002807	790	2 min 定时	6.26×10^4						
2007-05-04			MD001605	720		6.20×10^4						
2007-04-28			MD001606	697		6.35×10^4						
2007-04-26			MD002803	650		6.56×10^4						

2.3 碘监测仪

厂家提供的灵敏度为 $0.673 \text{ Bq}/\text{min}^{-1}$, 以此作为初级响应。 ^{137}Cs 作为次级源核素, 在 TQNPC 几何条件 NIM—DS0401 下进行次级响应测试, 在“积分”模式, 0.10 MeV , 1 min 定时条件下进行。在 202 大修和 103 大修期间对 6 台碘监测仪测试具体数据以及仪表在出厂时测试的数据列于表 4。

表 4 碘监测仪响应传递测试表

碘监测仪响应传递									
测试日期	探头编号	HV/V	测试参数	次级源响应 $S_2/$ ($\text{min}^{-1}/\mu\text{Ci}$)		初级响应 $S_1/$ ($\text{Bq}/\text{min}^{-1}$)	传递系数 $K=S_2 \times S_1$	几何条件	
出厂	2000-06-14	MD002401	490	“积分” 0.10 MeV 1 min 定时	1.10×10^5	平均: 1.05×10^5	0.673	7.08×10^4 Bq/ μCi	NRC RG— 001
	2000-06-14	MD002402	494		1.07×10^5				
	2000-08-02	MD002805	522		1.10×10^5				
	2000-04-14	MD001602	616		1.04×10^5				
	2000-07-11	MD002801	562		1.10×10^5				
	2000-04-14	MD001601	468		1.11×10^5				
202 大修	2006-10-17	MD002401	531	8.81×10^4	平均: 8.57×10^4	0.673	5.77×10^4 Bq/ μCi	TQNPC NIM— DS0401	
	2006-10-19	MD002402	517	8.73×10^4					
	2006-10-15	MD002805	543	9.14×10^4					
103 大修	2007-04-28	MD001602	658	8.23×10^4					
	2007-04-27	MD002801	571	8.18×10^4					
	2007-05-04	MD001601	559	8.33×10^4					

2.4 惰性气体监测仪

厂家提供的灵敏度为 $463(\text{Bq} \cdot \text{MeV})/(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$, 以此作为初级响应。 ^{137}Cs 作为次级源核素, 在 TQNPC 几何条件 NIM—DS0401 下进行次级响应测试, 在“积分”模式, 0.10 MeV , 1 min 定时条件下进行。在 202 大修和 103 大修期间对 6 台惰性气体监测仪测试具体数据以及仪表在出厂时测试的数据列于表 5。

经过 202 和 103 两次大修后, 最后确定了 TQNPC NIM—DS0401 几何条件下的次级源响应及传递系数, 见表 6。202/103 大修标定数据作为首次标定数据, 以后标定以此为依据。

3 标定中存在的问题及分析探讨

(1) 标定过程中发现, 对于采用微分模式的监测系统(如碘监测系统), 工作高压的变化会导致峰位漂移, 对测量结果准确性影响较大。因此, 定期检查工作高压是否偏离校准值很有必要, 特别是对于采用微分模式进行测量的监测系统。

(2) 系统对检查源的测量值是衡量监测系统是否正常工作的重要参数之一(对于采用微分模式监测的系统, 其工作状态的变化在检查源测量结果上有明显的体现)。因此, 进行长期稳定性的监测是很有必要的。定期测量并记录检查源值, 可以确保系统处于正常工作状态。

表 5 惰性气体监测仪响应传递测试表

惰性气体监测仪响应传递									
测试日期		探头编号	HV/V	测试参数	次级源响应 S_2 / ($\text{min}^{-1}/\mu\text{Ci}$)		初级响应 S_1	传递系数 $K = S_2 \times S_1$	几何 条件
出厂	2000-06-14	MD002404	458	“积分” 0.10 MeV 1 min 定时	1.94×10^5	平均: 1.91×10^5	463 ($\text{Bq} \cdot \text{MeV}$) / ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	8.84×10^7 ($\text{Bq} \cdot \text{MeV}$) / $\text{m}^3/\mu\text{Ci}$	NRC RG— 001
	2000-06-14	MD002403	506		1.98×10^5				
	2000-08-02	MD002806	508		1.95×10^5				
	2000-04-14	MD001603	560		1.93×10^5				
	2000-04-14	MD001604	540		1.96×10^5				
	2000-07-11	MD002802	528		1.67×10^5				
202 大修	2006-10-19	MD002404	460		1.51×10^5	平均: 1.50×10^5		6.95×10^7	TQNPC NIM— DS0401
	2006-10-18	MD002403	532	1.56×10^5					
	2006-10-14	MD002806	498	1.52×10^5					
103 大修	2007-04-28	02112039	463		1.50×10^5				
	2007-02-27	MD002802	514		1.38×10^5				
	2007-05-04	MD001603	558		1.53×10^5				

表 6 TQNPC NIM—DS0401 几何条件标定结果

项 目	废液监测系统	气溶胶监测系统		^{131}I 监测系统	惰性气体监测系统
初级源响应	$330 \text{ Bq} / (\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	$0.122 \text{ Bq}/\text{min}^{-1}$		$0.673 \text{ Bq}/\text{min}^{-1}$	$463(\text{Bq} \cdot \text{MeV}) /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)
次级源核素	^{133}Ba	^{36}Cl	^{99}Tc	^{137}Cs	^{137}Cs
202/103 大修次级源平均响应/ ($\text{min}^{-1}/\mu\text{Ci}$)	1.63×10^5	3.60×10^5	6.26×10^4	8.57×10^4	1.50×10^5
TQNPC NIM—DS0401 传递系数 K	5.38×10^7 $\text{Bq}/(\text{m}^3 \cdot \mu\text{Ci})$	4.39×10^4 $\text{Bq}/\mu\text{Ci}$	7.64×10^3 $\text{Bq}/\mu\text{Ci}$	5.77×10^4 $\text{Bq}/\mu\text{Ci}$	6.95×10^7 ($\text{Bq} \cdot \text{MeV}) / (\text{m}^3 \cdot \mu\text{Ci})$

(3) 能量阈值的问题。在正常情况下,低能阈值升高,测量数据应该降低,但在标定中和日常运行中,发现测量数据并不因为低能阈值的升高而降低,反而出现了不规则的变化趋势。有待于进一步的分析探讨和解决。

(4) 本底技术要求。厂家要求:如果没有人为本底,监测仪表本底值小于或等于 77 cpm。这是在厂家几何条件下在没有人本底的条件下的一个推荐值,但在 NIM—DS0401 几何条件下、在 TQNPC 现场下,本底小于或等于 77 cpm 显然是不可能的,并且随着运行时间的增加,仪表的性能存在下降的趋势,也会导致本底的逐步增加,故具体本底小于或等于多少为宜,目前只能是在仪表效率等达到要求的前提下尽量使本底低。以后还需要在这方面做进一步的定量探讨和研究。

4 结 语

放射性气溶胶、碘和惰性气体监测仪的标准标定方法和标定装置目前国内还没有建立,故国内核设施现场配备的各种气溶胶、碘和惰性气体监测仪还无法进行有效的标定。本文只是对秦山核电三期辐射监测系统的现场标定在目前国内技术基础上进行了初步的摸索,还有待于依据 ISO 等国际组织的相关技术标准,进一步开展现场放射性气溶胶等监测仪标定测试方法的研究,并建立起合格的、经专家或主管部门认可的放射性气溶胶、碘和惰性气体等监测仪器的标定方法和标定仪器,使得辐射监测仪器的监测数据可信可靠,充分发挥监测仪器在辐射防护、核安全和核环境的应用与评价中的作用。