

Research and Practice on Electrical Test of Excore Detector of AP1000 Reactor

Shuanglong Li

China Nuclear Industry Fifth Construction Co., Ltd., Shanghai, 201500

Abstract

The external nuclear measuring instrument is a part of the protection and safety monitoring system of nuclear power plant, which plays an important role in the operation of nuclear power plant. Based on the analysis of the structure of AP1000 nuclear measuring instrument, this paper analyzes and verifies the function, principle and influencing factors of its electrical test project, which is helpful to improve the installation and test method, and is more beneficial to the analysis of field construction problems and the provision of solutions.

Keywords

nuclear measuring instrument, electrical test, principle, problem analysis, solution

AP1000 堆外核测仪表电气试验探究与实践

李双龙

中国核工业第五建设有限公司, 中国·上海 201500

摘要

堆外核测仪表是核电厂保护与安全监视系统的一部分, 在核电厂运行中起着至关重要的作用。本文以剖析 AP1000 核测仪表结构为切入点, 分析验证其电气试验项目的作用、原理、影响因素, 有助于改进安装、试验方法, 更有益于有针对性的对现场施工问题进行分析, 提供解决办法。

关键词

核测仪表; 电气试验; 原理; 问题分析; 解决方法

1 引言

AP1000 是先进的第三代核电技术, 堆外核测仪表由 Mirion 公司设计制造。由于其结构复杂, 试验方法罕见, 电气试验原理不易理解, 在施工过程中极易产生困惑, 不能从根本上掌握试验, 特别是在处理施工问题时, 不能有针对性分析、解决问题。为保证后续的堆外核测仪表建安施工能够安全、高效的进行, 遂通过本文对其结构、试验原理进行详细的分析, 对后续施工提出改进优化措施。

2 设备介绍

2.1 堆外核测仪表系统介绍

堆外核测仪表 (JE92) 属于保护和安全监控系统 (PMS) 的核仪表子系统 (NIS)。NIS 子系统处理堆芯外中子通量探测器来的信号, 基于堆芯周围中子通量水平来监测反应堆功率^[1]。

核仪表子系统包括下面的硬件:

- ①源量程 SR 探测器、中间量程 IR 探测器和功率量程 PR 上部和下部探测器
- ②源量程 SR 和中间量程 IR 前置放大器
- ③核仪表系统机柜
- ④就地接线、端子盒和安全壳贯穿件

2.2 堆外核探测器结构分析

2.2.1 源量程探测器结构

源量程探测器由 BF3 比例计数管组件 (组件 A) 和基座组件 (组件 B) 构成。组件 A 执行其探测器功能, 组件 B 执行其底座支撑功能。两段组件机械的连接起来, 最后安装于仪表竖井中。自带电缆通过电缆导管引到 EJ 箱处。源量程探测器电气结构如下图所示。由图可以看出源量程探测器功能由组件 A 执行, 组件 B 对组件 A 起支撑作用, B 组件与仪

表竖井在电气上不隔离。BF3 比例计数器阳极板 A、B 通过自带三同轴电缆中心导体引出。BF3 比例计数器阴极 A、B (气体容积 1A、1B 外壳)、探测器铝腔室外壳通过三同轴电缆内屏蔽层引出。组件钛合金外壳与三同轴电缆外屏蔽层导通。中心导体与内屏蔽层绝缘性能由气体容积 1A、1B、2、4 决定,该 4 个腔室充满 BF3 气体及部分绝缘填充材料。内屏蔽层与外屏蔽层绝缘由气体容积 3 及自带电缆绝缘材料决定。组件 A 通过其顶部陶瓷支撑、底部陶瓷支撑和三同轴电缆玻璃纤维胶带包裹实现与大地电气隔离。

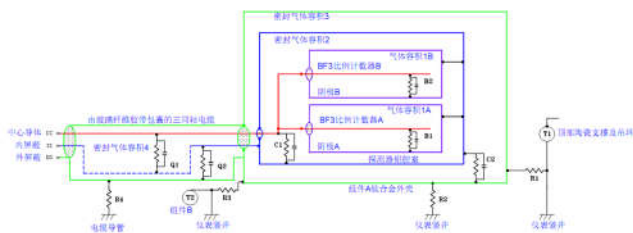


图 1 源量程探测器电气结构图

2.2.2 中间量程探测器结构

中间量程由裂变电离室 (组件 A)、延长管组件 (组件 B) 和基座组件 (组件 C) 组成。相比于源量程,中间量程多了一个延长管组件,目的是让裂变电离室核中子感应室中心线与堆芯中心线保持同一标高用以测量。三段组件机械的连接起来,最后安装于仪表竖井中。自带电缆通过电缆导管引到 EJ 箱处。中间量程探测器电气结构如下图所示。由图可以看出中间量程探测器功能由组件 A 执行,组件 B、C 对组件 A 起支撑作用。组件 B、C 与仪表竖井在电气上不隔离。下图的密封气体腔室 1 为裂变电离室,内部有信号、高压两极板,两极板相对的表面镀有 4.99g 的铀 (1%U234、90%U235)。两极板分别由高压、信号自带三轴电缆的中心线引出,裂变电离室内冲有氩氮混合气以保证两极板的绝缘性能。高压、信号三轴电缆内屏蔽层均与裂变电离室铝制外壳相连,外屏蔽层均与组件钛合金外壳相连。自带三轴电缆中心导体和内屏蔽层间以及内屏蔽和外屏蔽层间填充有高纯度石英和氮气,保证了三轴电缆的绝缘性能。石英绝缘材料使三轴电缆在高温、辐射环境下传输脉冲信号具有更好的绝缘性能。外屏蔽层是薄壁半刚性镍合金管,具有一定的可塑性,大大增加了自带电缆敷设的难度^[2]。

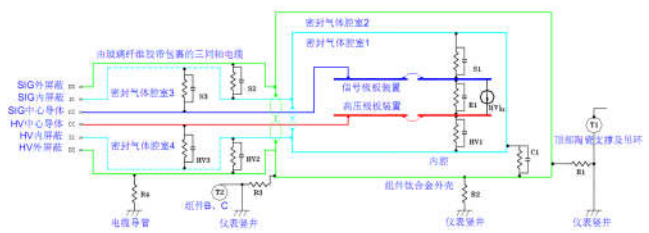


图 2 中间量程探测器电气结构图

2.2.3 功率量程探测器结构

功率量程探测器由上部非补偿电离室 (组件 A)、延长管 (组件 B)、下部非补偿电离室 (组件 C) 和基座 (组件 D)。其中上部、下部非补偿电离室中心线分别与堆芯上部、下部四等分点在同一标高,用以执行功率量程的测量。四段组件机械的连接起来,最后安装于仪表竖井中。自带电缆通过电缆导管引到 EJ 箱处。功率量程探测器结构如下图所示:

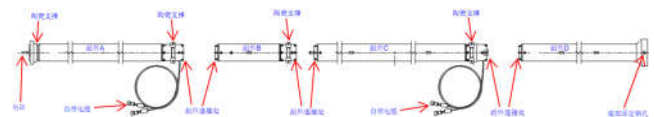


图 3 功率量程探测器结构图

功率量程探测器电气结构如下图所示。功率量程探测器功能由组件 A、C 执行,组件 B、D 起支撑作用。非补偿电离室由两块带有硼涂层的极板和铝制腔室构成。腔室内充满氩氮混合气和氧化铝绝缘物质。组件钛合金外壳和电离室外壳通过 HV 和 SIG 同轴电缆的屏蔽层引出至三同轴接头的内屏蔽层。HV 和 SIG 极板分别通过 HV 和 SIG 的同轴电缆中心线引出至三同轴接头的中心导体。同轴电缆的中心线和屏蔽层间填充有紧密的氧化铝绝缘物质以保证其在高温和电离辐射环境下的电气性能。

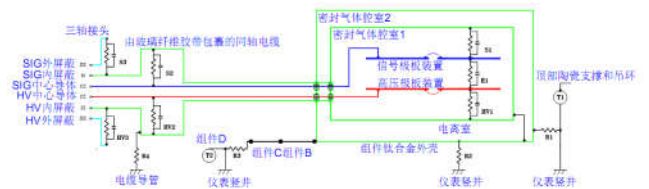


图 4 上部非补偿电离室电气结构图

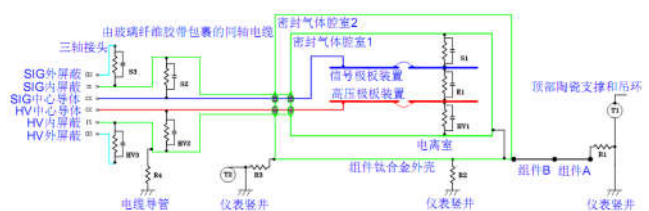


图 5 下部非补偿电离室电气结构图

3 试验原理分析及应用

3.1 设备选用

表 1 试验设备清单

序号	名称	型号	数量
1	静电计	Keithley 6517B	1 台
2	高压电源	Keithley 2290E-5	1 台
3	电容桥	GR1659	1 台
4	SHV (M) -MHV (F) 转接头	PE9265	1 个
5	三轴转接头	6171	1 个
6	静电计适配器	E-2709	1 个
7	探测器接线盒	E-2353	1 个
8	三轴转 BNC 接头	E-3211	2 个
9	BNC (M) -BNC (M) 测试线	N/A	2 根
10	BNC (M) -MHV (M) 测试线	N/A	2 根
11	BNC T 接头	N/A	2 个
12	BNC 短接帽	N/A	2 个

注: M 即 Male, 公; F 即 Female, 母

E-2353、E-2709、E-3211 几个适配器各接口满足如下关系:

表 2 适配器接口关系一览表

三轴端口	E-2353		E-2709		E-3211
	CW 接口	IS 接口	HV 接口	TUT 接口	
中心导体	中心导体	/	/	中心导体	中心导体
内屏蔽	/	中心导体	中心导体	/	屏蔽
外屏蔽	屏蔽	屏蔽	屏蔽	屏蔽	

3.2 试验原理分析

三种堆外核测探测器电气试验项目基本一致,但由于其结构的差异,试验项目也略有不同。堆外核测探测器的试验大致分为三个阶段,分别是安装前本体测试(B级仓库)、安装后本体测试(壳内接线箱处)以及现场 NIS 电缆端接后系统试验(壳外 PMS 机柜处)^[1]。

3.2.1 电容测试

电容测试其目的是为了验证中心导体回路与内外屏蔽回路之间完整的电气连续性。中心导体回路对屏蔽层回路存在一定的电容值,如果中心导体回路(包括同轴电缆中心线和极板装置)有断路,中心导体回路与屏蔽层回路之间环境有改变(包括极板与腔室间隙、填充物密度等),电容值均会变化。为了确保探测器内部极板装置及自带电缆结构未受到损害,通过测量接头中心导体回路对屏蔽层回路的电容进行验证。

由出厂试验报告可知,三种探测器的电容均在 1000 到 3000pF 之间,验收标准要求测量值与出厂值偏差不超过 $\pm 25\text{pF}$,故电容桥至少需有 1pF 的分辨率,同时鉴于安装后

试验增加的 NIS 电缆电容,量程至少达到 20nF。

3.2.2 绝缘测试

传统的绝缘电阻测试方法是使用兆欧表进行测量,基于以下条件不推荐采用传统方法测量。

①被测设备接口为三同轴,且测试时屏蔽层、中心导体等需要进行短接处理,使用传统兆欧表达不到良好的接触效果;

②测试时需要连续可调的电压,且泄露电流的测量要达到 0.1pA 的分辨率。

测试推荐使用高压电源和静电计,由高压电源提供测试电压,静电计测量回路电流,进而通过欧姆定律 $R=U/I$ 计算得到绝缘电阻值。

下面以上部功率量程为例,简要解析内屏蔽层和中心导体短接对外屏蔽层绝缘电阻测试 (IS+CC-OS)。

假设 HV 为被测试接头、SIG 为非被测试接头,由上部功率量程结构图可知:HV 接头和 SIG 接头的内屏蔽层为公共端,探测器自带电缆为两同轴,三同轴只存在于接头处。参考下图的接线,可以看出该试验相当于测量 HV 接头中心导体回路、HV 接头内屏蔽回路、SIG 接头中心导体回路、SIG 接头内屏蔽回路和 SIG 接头外屏蔽回路对 HV 接头外壳的绝缘电阻。将非被测试接头短接,目的是为了使其 SIG 极板带电,避免因测试时两极板间的电势差和 SIG 极板与屏蔽层的电势差产生的泄露电流对测试结果产生影响^[4]。

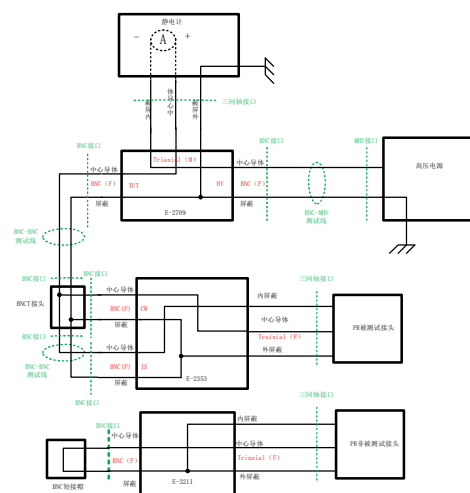


图 6 功率量程 IS+CC-OS 绝缘电阻测量原理图

3.2.3 阿尔法电流测试及极板绝缘评估

阿尔法电流是针对中间量程探测器进行的特殊试验。由于中间量程探测器两极板有高浓缩铀涂层,在高压下会激发

极板产生带电 α 粒子，鉴于此，极板间的绝缘泄露电流不能通过加电压直接获取。为了评估极板间的绝缘水平，需要消除带电 α 粒子的影响。激发高浓缩铀产生 α 粒子所需要的电压很低，且产生饱和粒子流的电压也相对较低，所以通过测量不同电压等级下的极板间电流（包括 α 电流及绝缘泄露电流），来评估极板绝缘性能。

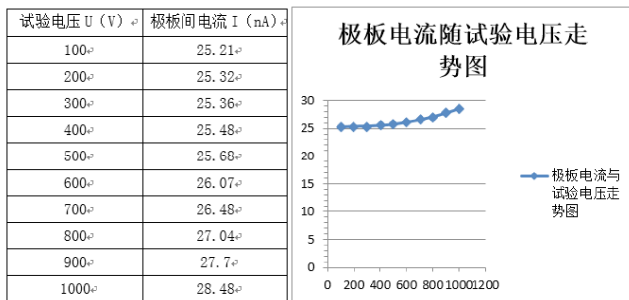


图7 极板电流随试验电压走势图

由原理图可知：高电压是加在 HV 极板上，HV 极板在向外发射 α 粒子的同时向外泄露电流（向外：不仅是对 SIG 极板，也是对内屏蔽层腔室），静电计接在 SIG 极板后端，因此，静电计只能测量到流经 SIG 极板的电流，该电流包括 SIG 极板接收的 HV 极板发射的 α 粒子流，以及 HV 极板泄露过来的泄露电流。由于 α 粒子流带正电，泄露电流的方向是由高压端指向低压端，这两种电流方向一致，均都是由 HV 极板流向 SIG 极板。所以，在电压增加的过程中极板电流是不断增大的，而激发 α 粒子所需的电压很低，增大的部分就是由于电压升高，而增加的泄露电流。上表测量数据也证实了这一点。

由此，就可以通过计算（U200、I200），（U800、I800）两点之间的斜率，来评估极板间的绝缘性能。

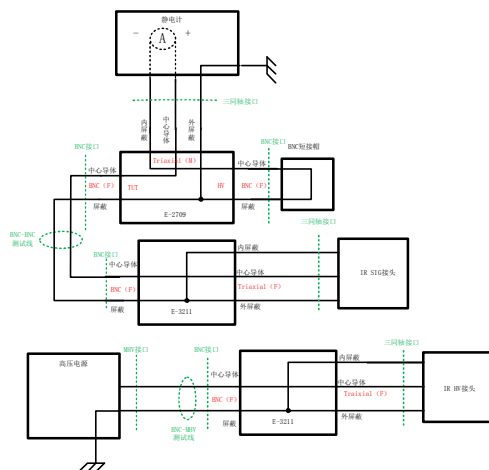


图8 阿尔法电流测试原理图

3.2.4 时域反射测试 (TDR)

在探测器回路端接完成后，在 PMS 机柜处对整个探测器回路进行域反射 (TDR) 测试，目的是为了验证整个回路的阻抗连续性，形成 TDR 波形，为以后的运行作参考。

同轴电缆的特性阻抗与导体的大小、间隔以及导体绝缘材料种类决定，所以，特性阻抗与电缆的长度无关。电缆的特性阻抗可以根据电缆类型（一般会印刷在电缆外皮上）查阅相关资料获取。

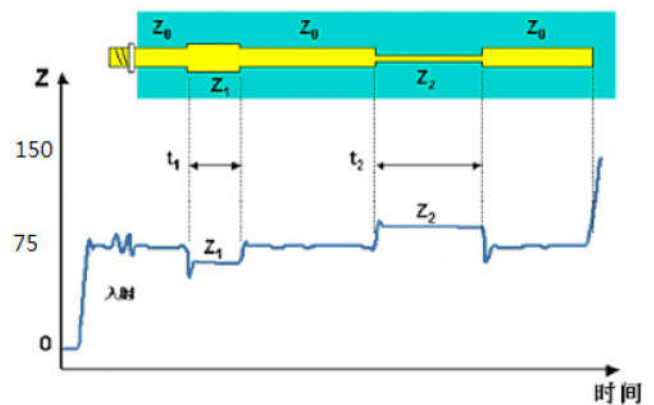


图9 传输线路阻抗测试波形示意图

上图是传输路线阻抗测试波形示意图，由图可以看出，传输线路的特性阻抗会通过 TDR 波形反馈出来，波形上升代表阻抗上升，有断路趋势，波形下降代表阻抗降低，有短路趋势。

探测器自带电缆、壳内 NIS 电缆、贯穿件馈通以及壳外 NIS 电缆特性阻抗均为 75Ω ，电缆的扭结、弯折、短路、断路、接头对接不牢固等故障都可以通过 TDR 测试直观的展现出来。一般情况下，经过前期的许多测试（连续性、电容、绝缘等）的验证，回路一般不会出现问題，TDR 测试更大的意义是为了通过波形记录当前回路的阻抗状态，为以后运行检修提供最原始的参考依据。

4 试验问题及解决办法

4.1 源量程探测器隔离测试不合格

探测器安装到现场后，部分探测器隔离测试不合格。隔离测试测量的是电气功能组件与大地之间的隔离性能。使用万用表测试，应不小于 $10M\Omega$ 。

参考探测器的结构，经分析，安装后隔离电阻来源于：

- ①探测器电气功能组件与电气支撑组件之间的陶瓷连接；
- ②探测器与仪表竖井之间的陶瓷支撑；

③探测器自带电缆的外层玻璃纤维包裹。

隔离电阻不合格原因可能是：

①探测器电气功能组件与电气支撑组件之间的陶瓷连接受潮、破裂、损坏；

②探测器与仪表竖井之间的陶瓷支撑受潮、损坏；

③探测器自带电缆的外层玻璃纤维包裹、受潮。

由于安装前隔离测试合格，且安装过程控制及其严格，基本可以排除陶瓷绝缘损坏的可能。鉴于探测器安装于堆芯底部，位置较低，很有可能是受潮引起。经过现场查看，电缆导管一端用 Hub 密封，一端进入 EJ 箱，EJ 箱门长期关闭，那么导管中一旦有潮气就很难散去。遂采取持续对导管持续通风的方法，解决了基本所有隔离测试不合格问题。

最终唯一个源量程探测器，通风之后仍无明显改善。由于该探测器导管比较特殊，入 EJ 箱处是个与自带电缆三同轴接头大小相近的方形孔，且孔边缘无圆角等保护处理，自带电缆又是半刚性的硬管，穿自带电缆过程中很有可能将玻璃纤维包裹损坏。经过抽出自带电缆排查发现并无任何损坏。最终将问题锁定在探测器本身，将探测器从仪表竖井管中取出发现探测器陶瓷支撑表面有受潮迹象。经过通风处理，最终达到了要求。

4.2 功率量程探测器内部极板电流不稳定问题

功率量程探测器内部极板电流测试过程中，极板电流不稳定，有正负变化，且超过标准要求 2pA 的限制。经分析探测器电流测量推荐使用的指针表型号已停产，作为替代的数字表虽然有更高的测量精度，但由于其采样频率很高，对于微电流的测量非常灵敏，能够每时每刻反映电流的真实值。对于指针表来说，灵敏度比不上数字表，测量的是电流变化趋势，指针会维持在变化幅度的平均值。

对于绝缘测试来说，泄露电流在 10^{-12} 数量级很难评估其稳定程度，应根据大量的试验数据进行统计分析。

从测试结果可以看出测试值大多为正值，且正值绝对值较大。参考试验原理图可知，向 HV 极板加压，电流从 HV 极板向 SIG 极板泄露，静电计应该测量到的电流是正值（试验环境无辐射，不考虑辐射电离电流，且加压时间足够长，不考虑极板间的充电电流）。那么可以进行简单的假想，我们观测到的静电计计数在 1s 内能达到 5 次刷新。静电计采样周期能达到 0.01 电源周期，即 0.2ms，也就是说静电计每秒

能测量 5000 个值。示数在 4.832 到 -2.118 之间波动，如果换成指针表，那么指针“来不及”显示每一个所测到的电流值，而是稳定在幅度区间的平均值。

经过以上分析，可以推断设计方给出的标准值是依据指针表的运作机理评估出来的。以上数据满足试验要求，需要进行处理，即 $I_{计算} = (I_{max} + I_{min}) / 2$ 。

最终经西屋评估数据应采用 $I_{计算} = (I_{max} + I_{min}) / 2$ ，试验结果满足要求。

4.3 绝缘测试泄露电流过大问题

探测器安装到现场后，部分探测器 IS-CC+OS 绝缘测试不合格。

经分析，绝缘测试泄露电流过大原因可能为：

①测试设备、测试盒、测试线和转接头本身存在较大的泄露电流；

②探测器自带电缆绝缘层破坏；

③探测器受潮。

经验证分析：

①对测试设备进行空载试验（除不连接被试品，其余均正常接线），泄露电流不到 0.01pA。以源量程为例，泄露要求不超过 3.33uA（100V，不小于 30MΩ），可见，设备本身对结果的影响是微乎其微的；

②经分析，设备自带电缆是半刚性的合金材料，在要求的弯曲半径内可重复弯曲，对于安装试验裕量相对较大，现场的安装试验活动一般不会对其造成损坏^[9]；

③可能是探测器受潮，但是探测器本身是全封闭的，探测器接头也有保护塞及塑料包裹保护。经检查，接头较清洁，无明显污损现象。使用无水酒精、无毛白布清洁后，白布上有一定的污渍，干燥处理后再次试验，结果达标。

由此可以看出，探测器虽然进行了防潮、清洁保护措施，但在开箱检查、安装前试验过程中，探测器接头还是有灰尘、潮气进入。所以，后续在每次试验前都应进行清洁、干燥处理，试验完成后立即密封保护。不仅如此，因 JE92 与 NIS 电缆端接后需要进行密封、打力矩，且为不可拆卸的，所以在 JE92 端接前一定要做好清洁、干燥处理，以免为安装后系统试验造成影响。

4.4 TDR 测试不理想

探测器自带电缆与 NIS 电缆对接后，为了验证回路的阻

抗特性,需进行 TDR 测试。7 个功率量程探测器 SIG 回路波形与 HV 回路波形相比较,会多出一部分未知波形。剩余的 1 个功率量程 HV 回路波形比 SIG 回路波形多出一部分未知波形。下图是 4 个下部功率量程的 HV 回路与 SIG 回路的波形图。

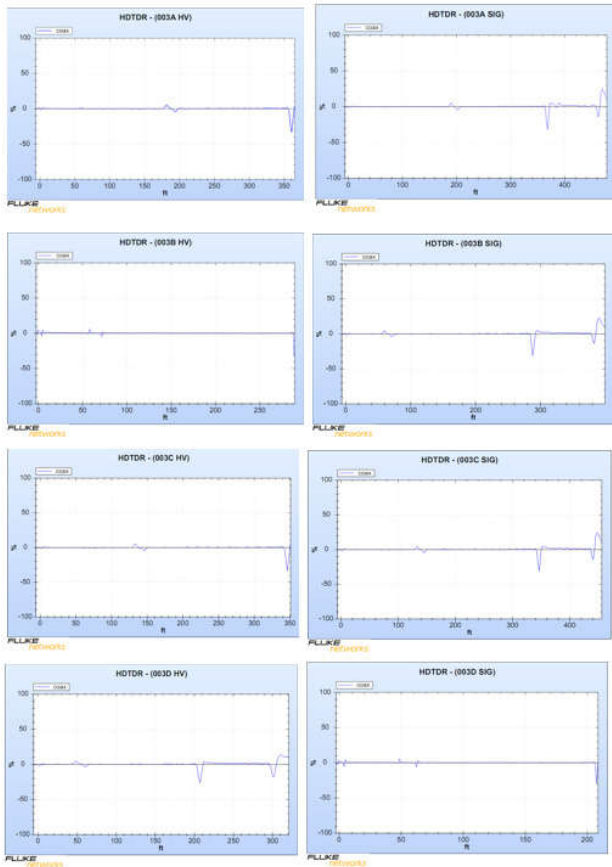


图 10 下部功率量程波形图

根据波形图,各方怀疑下部功率量程 003D 的 HV 回路与 SIG 回路在与 NIS 电缆对接时接反。功率量程探测器结构的特殊性,在密封组件安装后,其 SIG 回路、HV 回路的外屏蔽、内屏蔽层均为导通状态。在不拆解密封组件的情况下已无法通过校线区分探测器的 HV 接头和 SIG 接头。

根据探测器的出厂测试报告以及探测器安装前的电容测试结果,HV 回路与 SIG 回路电容有较大的差值,与探测器对接的两根 NIS 电缆是同路径的,长度基本一致,且对接前的 NIS 电缆电容也是经过测试的。可以通过电容测试来判断接线正确与否。测试数据如下表:

表 3 功率量程 003D 测试数据

	出厂值	现场测试值	NIS 电缆测试值	回路测试值
003D HV	3501pF	3496pF	3940pF	7570pF
003D SIG	3113pF	3108pF	3910pF	7170pF

可以看出,探测器本身 HV 回路与 SIG 回路有大约 400pF 的差值,经验算,最终的 HV 回路与 SIG 回路的电容值也有约 400pF 的差值,可以确定 NIS 电缆端接无误。所以,造成此问题的根本原因在与没有提前对探测器本体进行 TDR 测试(虽然技术手册没有要求),所以后续对于特殊的试验应尽可能的提前预演,持续采集数据,做好参考依据。

综上,大部分试验问题是由于现场环境因素、试验原理理解不透彻、调试数据的持续采集不到位导致。通过以上方法,施工问题得到了有效的解决,施工效率有了显著提高。所以,后续施工中需要继续加强这些方面的改进。

5 结语

堆外核测仪表在核电厂中扮演着举足轻重的角色,是反应堆运行数据的主要来源,为核电厂的安全运行保驾护航。堆外核测仪表繁复的试验项目就是为了能以现有的技术条件,尽可能的从多方面通过试验验证其功能性。堆外核测仪表结构复杂,涉及知识面广,安装、调试难点多,任务重,要求安装调试人员必须静心研究仪表结构、试验原理,才能吃透安装调试的重、难点,施工过程中出现问题才能有针对性的去解决问题。试验的大部分结论不能够直接得出,需要进行繁琐的计算,特别是安装后的系统试验,数据处理涉及壳内、壳外 NIS 电缆测试数据,贯穿件数据,探测器安装前测试数据。为了更高效、高质量的完成试验,必须在 NIS 电缆施工和 JE92 试验前整理制作数据处理表(Excel 表),提前为系统试验准备好一手可靠的数据。

参考文献

- [1] AP1000 保护与安全监视系统核仪表子系统源量程探测器技术手册,APP-JE92-J0M-001.
- [2] AP1000 保护与安全监视系统核仪表子系统中间量程探测器技术手册,APP-JE92-J0M-002.
- [3] AP1000 保护与安全监视系统核仪表子系统功率量程探测器技术手册,APP-JE92-J0M-003.
- [4] 薛莉炯. 数字仪表堆外核测量技术在第三代 AP1000 核电站中的应用,2012.
- [5] 王永新等. 核电站建设阶段堆外核测仪表典型故障诊断与质量控制,2015.