核电厂无线通信网络电磁兼容性研究

吴银伟，郭 璇，孙琦毓

(中国核电工程有限公司，北京 100840)

摘要：随着无线通信技术的迅猛发展，在核电厂建设无线通信网络来承载智慧核电的各类智能应用已成为智慧核电发展的必然趋势。对无线通信技术在核电厂应用亟待解决的瓶颈问题，即无线通信设备对仪表和控制设备的电磁干扰问题进行了详尽的分析，对电磁兼容相关标准进行了研究。结合核电厂电磁兼容测试，给出了无线通信网络在核电厂应用的理论依据和建议性措施，为无线通信技术在核电厂的应用提供了技术支持和理论支持。

关键字：核电厂；无线通信；电磁兼容性

Research of wireless communication system in nuclear power plant

WU Yinwei，GUO Xuan，SUN Qiyu

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract：With the rapid development of wireless communication technology, the construction of wireless communication system in nuclear power plant to carry all kinds of intelligent applications of smart nuclear power has become the inevitable trend of the development of smart nuclear power. The bottleneck of the application of wireless communication technology in nuclear power plant is analyzed in detail, that is, the electromagnetic interference of wireless communication equipment to instrument and control equipment, and the related standards of electromagnetic compatibility are studied. Combined with the electromagnetic compatibility test of nuclear power plant, the theoretical basis and suggestive measures for the application of wireless communication system in nuclear power plant are given. The technical and theoretical support for the application of wireless communication technology in nuclear power plant are provided.

Key words：nuclear power plant; wireless communication; electromagnetic compatibility

0 引言

随着 5G、物联网、工业互联网和人工智能等新技术的不断发展，在核电厂中引入以上新技术，通过信息化和智能化技术与核电厂工业技术之间的融合，提升核电厂运维、管理智能化水平，已成为核电技术发展的重要方向和关键突破口。无线通信网络作为核电厂智能化发展的基础设施以及核电厂信息传输的主动脉，其建设需求是非常迫切的。然而，目前国内外核电厂并未大规模应用无线通信网络的原因之一，就是尚未解决无线通信网络与核电厂内仪表控制系统等设备的电磁兼容性问题。

1 核电厂电磁兼容现状

电磁兼容对于核电厂的安全运行起着非常重要的作用，20 世纪 90 年代曾多次因电磁干扰问题引起核电机组的误停堆和误动作。随着核电厂自

动化程度的提高，越来越多的先进设备和先进控制系统应用在核电厂，使得这一安全风险更加突出。

由于我国电磁兼容研究起步较晚，在电磁兼容领域内还存在较多的空白。在以往的核电设计中，各个电站各类设备的电磁兼容要求方面还未形成统一的认知。在具体执行过程中，各设备供货商、设计院所对电磁兼容的理解也存在一定的分歧，在具体要求上分化较为严重，由此导致欠设计或过设计现象的发生，开展核电厂电磁兼容的研究已经迫在眉睫。

2 核电厂电磁兼容性分析

2.1 概述

电磁兼容性是指设备或系统在其电磁环境中符合要求运行，并不对其环境中的任何设备产生无法忍受的电磁骚扰的能力。电磁兼容性包括两个方面的要求：一方面是指设备在正常运行过程中对所在环境产生的电磁骚扰不能超过一定的限值；另一方面是指设备对所在环境中存在的电磁骚扰具有一定的抗扰度，即电磁敏感性。

产生电磁干扰的重要电磁现象包括射频电磁场辐射、静电放电、浪涌、电压暂降与短时中断和脉冲磁场等。经过对以上各种电磁现象进行分析后发现，无线通信系统与仪表和控制系统的电磁兼容问题主要为射频电磁场领域，这就要求无线通信系统的基站/天线设备、移动终端设备、仪表和控制系统设备同时满足射频电磁场辐射发射和抗扰度相关标准要求，从而达到互不干扰的目标。

2.2 电磁兼容性相关标准研究

2.2.1 技术文件

通过查阅大量电磁兼容性资料得出，无线通信技术在核电厂的应用，最有力的技术支持是EPRI TR-102323《电厂设备电磁干扰试验导则》，这是 EPRI 电磁干扰工作组对美国数个运行核电厂综合电磁辐射环境进行测量分析后，提交的专门针对核电厂电磁干扰问题的技术报告。

2002 年，电磁干扰工作组开始关注高频通信系统的影响。高频通信系统通常运行在 1 GHz 以上，核电厂当时没有任何来自 1 GHz 以上频率的电磁发射和敏感度限值的数据。电磁干扰工作组对四个核电厂 1 GHz 以上电磁发射数据进行了测量，数据记录如图 1 所示。通过图 1 可以看出，最高电平辐射发射出现在 7.2 GHz，场强为 108 dB·μV/m，比推荐的敏感度限值 140 dB·μV/m (10 V/m)低 32 dB，测量到的信号为发电设施通信间的微波信号；其他频率的辐射发射基本在 90 dB·μV/m 以下。

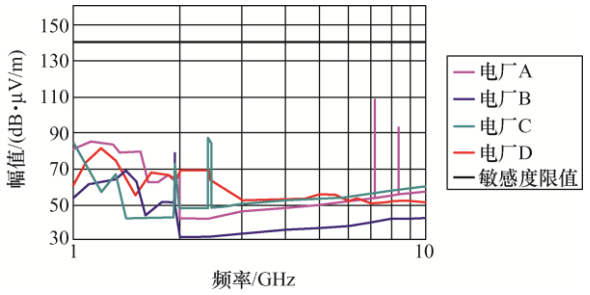


图 1 四个核电厂 1 GHz 以上电厂综合辐射发射

Fig. 1 Comprehensive radiation emission of four nuclear power plants above 1 GHz

TR-102323 第 5 章指出，对 1 GHz 以上频率的电磁发射和敏感度进行试验是非常必要的，并给出了适用的试验要求和试验方法，与 RG1.180 的试验要求和试验方法是相同的。

TR-102323 第 6 章对推荐的试验限值进行了裕量分析，如图 2 所示。其中，对高频辐射电场发射的裕量分析指出：电厂内所有测量到的辐射发射都在设备敏感度试验限值之内。从图 2 可以看出，除了移动收发器所在频段，设备敏感度试验限值和 100～200 kHz 频率处最高电厂综合辐射发射数值之间的裕量为 43 dB·μV/m(大于 141 倍)，200 kHz 以上的频段的裕量更大；移动收发器工作频段 1 GHz 以上频率的电磁发射限值和设备敏感度限值之间的裕量大于 60 dB·μV/m(大于 1 000 倍)。这个差值提供了充足的裕量，并合理地确保了电磁兼容性。

另外，在 TR-102323 第 4 章发射源的控制中指出，大部分电厂在关键设备附近对移动式收发器进行了管理控制，以确保其不超越其他设备的

敏感度限值。还提出了使用隔离区域来控制移动式收发器，并给出了关键设备与移动式收发器距离的计算公式。隔离区域控制进一步降低了移动式收发器对数字设备的电磁干扰。

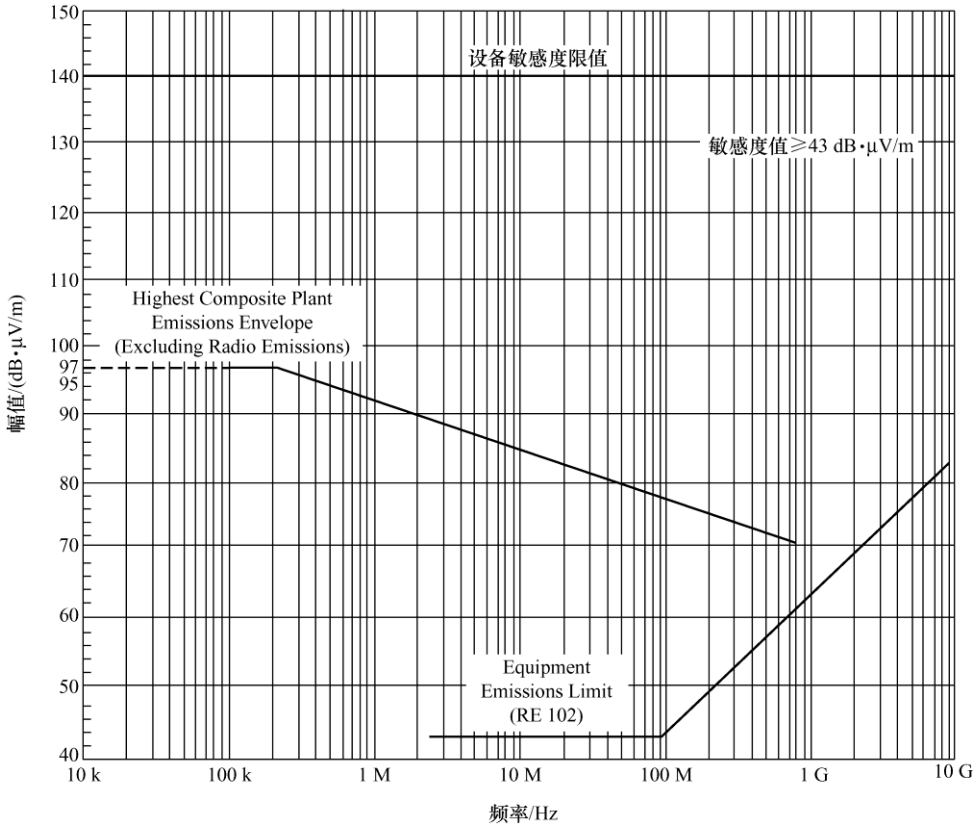


图 2　高频辐射发射试验限值和裕量分析

Fig. 2 Limit and margin analysis of high frequency radiated emission test

TR-102323 第 7 章给出了通过工作组的测量分析得出的结论。运行经验表明，大多数核电厂电磁干扰、射频干扰问题是由于瞬间干扰和对移动通信设备缺乏管控的原因造成。短期记录的固定辐射发射未必会捕获瞬间事件，最可能影响数字设备运行的电磁干扰、射频干扰发射器是移动式收发器。基于对核电厂干扰源的认识，一般的发射测试以静态和瞬间干扰进行。制定了程序用于测量几个电厂观察到的最高辐射发射环境。因数字式改进，电厂辐射发射数据已经从七个电厂中得出，并用于为电磁兼容性提供依据。电磁干扰工作组评估了设备敏感度和辐射发射试验限制，并将其与测量到的最高综合电厂辐射发射场强进行了比较，得出以下结论：

1) 推荐的抗扰度试验场强涵盖了最高综合电厂辐射发射场强。

2) 设备抗扰度试验场强与最高综合电厂辐射发射场强之间的裕量足够解决不确定性和其他分析变量，并合理地保证了电磁兼容性。

3) 推荐的设备辐射发射限值足够低于最高综合电厂辐射发射场强，确保了新设备安装后增加的辐射发射不会引起电厂总体辐射发射场强的增加。

电磁干扰工作组同时推荐了限制电磁干扰的电厂实践，这是一套应满足的设计条件，用来帮助确保观察到的电厂最高辐射发射场强是有界的，没有超过推荐的设备抗扰度试验限值。推荐的辐射发射和抗扰度限值已经保守的建立，以确保未来核电厂工业环境下数字化设备的电磁兼容性。

2.2.2　美国核管会管理导则

美国核管会管理导则《安全相关仪表和控制

系统电磁和射频干扰评估导则》(RG1.180)是最适用于核电厂仪表和控制系统的电磁兼容标准，针对性、适用性以及可用性都很强。这是美国核管会专门针对核电厂仪表和控制系统的电磁兼容性问题制定的一个管理导则。该导则给出了美国核管会可以接受的关于对核电厂安全相关仪控系统发射试验和敏感性要求和具体试验方法：美国军标 MIL-STD-461E《设备和分系统电磁干扰特性控制要求》和国际标准 IEC 61000。

对于射频辐射发射，RG 1.180 规定，可以按照美国军标 RE102(10 kHz～18 GHz 电场辐射发射)的试验方法进行，并给出了运行包络图，如图 3 所示。只要无线通信设备辐射发射水平在运行包络图以内，都是符合 RG1.180 要求的。

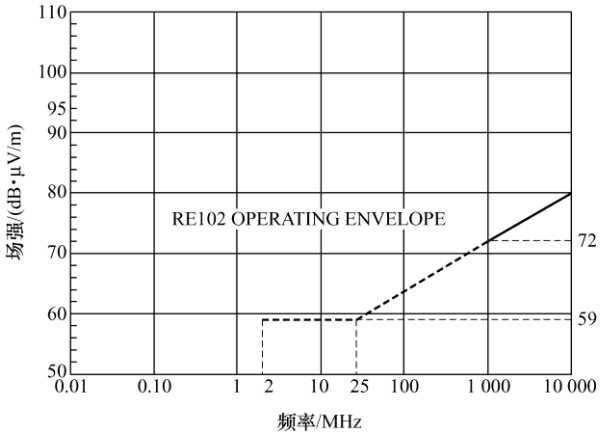


图 3　1 GHz 以上电场辐射发射包络

Fig. 3 Radiated emission envelope of electric field above 1 GHz

对于辐射抗扰度，RG1.180 第 4.3.3 节指出:“IEC 61000-4-3 中试验等级 3 是与核电厂环境最相似的，并要求试验等级为 10 V/m。这个试验等级与 MIL-STD-461E 中 RS103 中 10 V/m 的运行包络是相等的。在辐射抗扰度试验上，这个试验等级是可接受的。”这一要求明确了核电厂安全相关仪表和控制系统的抗扰度试验等级至少应为 10 V/m。

美国核管会标准审查大纲“9.5.2 通信系统”一节指出，虽然非安全相关系统不作为 RG 1.180 的一部分，但为了确保安全相关仪表和控制系统能够安全运行，对非安全相关系统的电磁干扰和射频干扰控制是必要的。如果可行，来自于非安全相关系统的辐射发射应与安全相关系统辐射发射控制在同等水平。

因此，非安全相关系统——无线通信系统可以按照 RG 1.180 的要求来进行电磁兼容性试验。

2.2.3　国际标准系列

最新版 IEC 62003—2020《核电厂仪表、控制和电力系统电磁兼容性试验要求》扩展了标准适用范围，增加了电力系统设备，并为解决无线通信技术在核电厂的使用提供了指导。本规范还加强了对核电厂电磁环境的描述，以便在选择自定义测试级别或测试豁免时提供支持，并为核电厂内设备安装地点的电磁环境特性提供指导。

本标准第 7 章规定，对于仪表控制设备及电气设备，其射频辐射抗扰度试验应符合 IEC 61000-4-3 (GB/T 17626.3—2016)中第 3 级的要求，且试验频率上限要达到 6 GHz。本规定涵盖了目前无线通信系统的工作频率，即达到与无线通信系统的电磁兼容。为了进一步降低无线通信系统的干扰水平，同样提出了按照自由空间传播模型计算隔离区域，与美国电力研究院的建议一致。

本标准第 8 章规定，对于仪表控制设备及电气设备，同样需要控制其电磁发射水平，以确保核电厂总体电磁发射环境处于本规范中提出的水平。表 1 给出了具体的辐射发射限值。

表 1　核电厂仪表、控制和电气设备的辐射发射限值

Tab. 1 Radiation emission limits for instrumentation control and electrical equipment of nuclear power plants

频率范围/MHz	场强/(dB・μV/m)
30～230	40
230～1 000	47
1 000～3 000	76 56
3 000～6 000	80 60

2.2.4　无线通信标准

针对无线通信，我国制定了 GB/T 22451—2008《无线通信设备电磁兼容性通用要求》。本标准提出了无线通信设备具体的发射和抗扰度要求

及具体试验方法。

本规范规定了各类无线通信设备具体需要测量的电磁骚扰项目，有传导骚扰、辐射骚扰和谐波电流等。

本规范规定的辐射发射具体限值如表 2、表 3 所示。

表 2 无线通信设备辐射发射限值要求 1

Tab. 2 Requirements 1 for radiation emission limits of wireless communication equipment

非电信中心辐射骚扰限值	
频率范围/MHz	准峰值限值/(dB・μV/m)
30～230	30
230～1 000	37

注：1.在过渡频率处(230 MHz)应采用较低的限值。
2.当出现环境干扰时，可以采用附加措施。
3.可以采用测试距离不小于 3 Md 其他替代场地进行测试，但当出现争议时，以 10 m 测试结果为准。

表 3 无线通信设备辐射发射限值要求 2

Tab. 3 Requirements 2 for radiation emission limits of wireless communication equipment

非电信中心辐射骚扰限值(1~6 GHz)		
频率范围/GHz	平均值限值 /(dB・μV/m)	峰值限值 /(dB・μV/m)
1～3	50	70
3～6	54	74

注：1.在过渡频率处(3 GHz)应采用较低的限值。
2.当出现环境干扰时，可以采用附加措施。

本规范规定的辐射抗扰度限值要求如表 4 所示。

表 4 无线通信设备辐射抗扰度限值要求

Tab. 4 Radiation immunity limit requirements of wireless communication equipment

频率范围/MHz	试验等级/(V/m)
80～800	3
800～960	10
960～1 400	3
1 400～2 500	10
2 500～2 700	3

注：如有相应的产品标准，试验等级以产品标准的等级为准。

2.2.5 电磁兼容标准对比分析

通过对以上标准的对比可以发现，由于军标系列的标准是在距被测设备 1 m 处进行试验，其他系列标准是在距被测设备 3 m 或 10 m 处进行试验，因此从近场电磁环境的复杂度上来讲，军标似乎更加严格。但从辐射发射限值与抗扰度限值的裕度值(8 dB)来看，以上标准所规定的辐射发射限值和抗扰度限值都留有非常大的裕量。从理论上来讲，如果设备满足以上标准的规定，都是可以实现电磁兼容的。

3 核电厂电磁兼容测试

3.1 无线通信设备电磁兼容试验

通过以上电磁兼容性分析得出：无线通信系统在核电厂的应用，首先需要按照以上标准的要求进行无线通信设备的辐射发射和抗扰度试验，这是最基本的要求。目前已有部分无线通信设备满足相关规范的要求。

3.2 电磁兼容性联合测试

为了保证核电厂运行后无线通信设备确实不会对仪表和控制系统设备产生电磁干扰，可对无线通信设备、仪表和控制系统设备进行电磁兼容性联合测试。

目前已有部分无线通信设备厂家与仪表和控制设备进行了电磁兼容性联合测试。所有被测仪表和控制设备在试验前均保持正常运行状态，测试过程模拟核电厂的检修场景(机柜门打开)，无线通信网络进行语音通话、短信、数据传输、业务漫游、设备开关机、搜网、寻呼、挂断、电池插拔和最大功率、360° 以及零距离电磁干扰等测试。整个测试过程中，仪表和控制设备未出现工作异常现象，表明无线通信系统对所测仪表和控制设备未产生电磁干扰。为了比较其他无线通信设备对仪表和控制设备的影响，测试过程中还增加了无线对讲机和 LTE 手机的电磁干扰测试。测试结果表明，无线对讲机通话时，造成 KMH 仪表、数显表、动圈表和无纸记录仪数据监测值发生大幅度偏离，LTE 手机通话时对 KMH 仪表和动圈表造成指针轻微晃动。

以上电磁兼容性联合测试表明，小功率无线

通信系统不会对仪表和控制设备产生电磁干扰，但无线对讲机、LTE 手机等功率相对较大的设备可能会对仪表和控制设备产生不同程度的电磁干扰。因此，在核电厂运行及维护过程中，建议谨慎使用。

3.3 核电厂现场电磁兼容测试

为了切实保证核安全，部分核电厂已将满足规范要求的无线通信设备引入核电厂实地电磁环境中进行联合测试，验证是否会对仪表和控制设备及其他敏感设备产生电磁干扰。电磁兼容测试主要包括扫频测试和典型设备电磁干扰测试。测试主要选取具备代表性的仪控、阀体、泵体和柜体类设备作为测试对象，对不同功率等级、不同距离进行电磁干扰测试。从测试结果来看，小功率 WiFi、LTE 等制式无线信号基本未对测试对象产生干扰，GSM 等功率稍大的无线信号对个别测试对象产生了不同程度的干扰现象，后续核电厂应避免此类无线信号引入。

4 结束语

通过对电磁兼容相关标准、导则及相关技术报告的研究，提出以下几点建议：

1) 理论上，无线通信系统和仪控系统的发射及抗扰度同时满足规范的要求，则二者在电磁兼容性上不会产生问题。这是无线通信系统在核电厂应用的理论依据。

2) 满足规范要求的无线通信设备与仪控设备进行的联合测试表明无线通信系统没有对仪控系统产生电磁干扰，印证了理论分析的正确性。

3) 核电厂运行后的电磁环境是非常复杂的，为了切实保证核安全，建议将满足规范要求的无线通信设备引入核电厂实地电磁环境中进行联合测试，验证是否会对仪表和控制设备及其他敏感设备产生电磁干扰，必要时可以设置隔离区域，通过对无线通信系统的管理控制，确保核电厂安全可靠运行。

4) 建议制定核电行业电磁兼容标准，规定核电厂设备的电磁兼容性能，作为系统设计、设备制造及试验的依据。主要包括设备的发射限值、抗扰度试验项目及等级要求、电磁兼容现场测试的方法以及新建和已建电站在测试方法上是否有所区别等。

5) 如果按照这样的技术路线，解决了无线通信的电磁干扰问题，无线通信技术即可应用于核电厂，助力智慧核电在未来实现更多的智能应用。

参考文献

[1] 徐义亨. 控制工程中的电磁兼容[M]. 上海：上海科学技术出版社，2017.

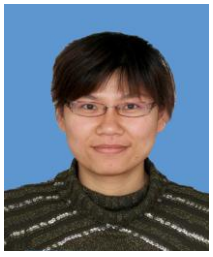
[2] 苏东林. 系统级电磁兼容性量化设计理论与方法[M]. 北京：国防工业出版社，2015.

[3] Nuclear power plants – Instrumention, control and electrical power systems – Requirements for electromagnetic compatibility testing: IEC 62003—2020[S].

[4] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Guidelines for evaluating electromagnetic and radio-frequency interference in safety-related instrumentation and control systems: RG 1.180—2003[S].

[5] Guidelines for electromagnetic interference testing of power plant equipment: EPRI.TR-102323—2004[S].

作者简介：



吴银伟

吴银伟(1982—)，女，高级工程师，长期从事核电厂通信专业相关设计和研究工作。

(收稿日期：2020-12-31)EA