

电磁兼容辐射安全裕度测量的不确定度分析

卫伟超

苏州市华测检测技术有限公司 江苏 昆山 215300

摘要：本文研究了电磁兼容（EMC）辐射安全裕量测量中的不确定度问题，分析了影响测量准确性的主要因素，并提出了相应的控制策略。通过详细探讨设备误差、操作因素及测试环境等不确定度来源，本文旨在为提升EMC辐射安全裕量测量的准确性和可靠性提供理论依据和实践指导。研究表明，有效的不确定度控制策略对于确保电子设备的兼容性和安全性至关重要。

关键词：电磁兼容；辐射安全裕量；不确定度分析；测量准确性；控制策略

随着电子技术的飞速发展，电磁兼容已成为现代电子设备设计中的核心问题之一。准确测量辐射安全裕量不仅是评估设备电磁性能的关键环节，也是保障电子设备安全运行的重要前提。在实际测量过程中，由于各种因素的存在，测量结果往往存在一定的不确定度，这直接影响了测试的准确性和可靠性。因此，开展电磁兼容辐射安全裕量测量的不确定度分析，探索有效的控制策略，对于提高EMC测试质量具有重要意义。

1 电磁兼容在现代电子设备设计中的核心地位

1.1 研究背景与意义

随着科技的飞速发展，电子设备已经渗透到人们生活的方方面面，从智能手机、笔记本电脑到智能家居、航空航天器，无一不体现着电子技术的广泛应用。然而，随着电子设备的集成度不断提高和工作频率的不断上升，电磁环境日益复杂，电磁兼容（Electromagnetic Compatibility, EMC）问题日益凸显，成为制约电子设备性能、可靠性和安全性的关键因素之一。因此，确保电子设备在复杂的电磁环境中能够正常工作而不产生相互干扰，是现代电子设备设计中不可或缺的一环。（1）准确测量辐射安全裕量的重要性：辐射安全裕量是指电子设备在规定的电磁环境下，其辐射发射水平低于允许限值的程度。准确测量这一裕量不仅有助于评估设备的电磁兼容性能，还能为产品设计提供关键数据支持，确保产品满足相关标准和法规要求，保护用户免受电磁辐射的危害。通过不断优化设计，提高辐射安全裕量，还能进一步提升产品的市场竞争力和用户满意度。（2）不确定度分析对提高电磁兼容测试质量的贡献：在进行电磁兼容测试时，由于测量设备、环境因素和测试方法等多种原因，测量结果往往存在一定的不确定度。不确定度分析是评估测量结果准确性和可靠性的重要手段，通过量化测量过程中的不确定因素，可以更加科学地评价测

试结果的可靠性，为产品认证和改进提供有力依据。同时，不确定度分析还有助于发现测试过程中可能存在的问题，指导测试方法的改进和测试设备的校准，从而提高电磁兼容测试的整体质量。

1.2 国内外研究现状

在电磁兼容领域，国内外学者和工程师都投入了大量精力研究测量不确定度的问题，并取得了显著进展。

（1）国内研究现状：近年来，中国在电磁兼容领域的研究取得了长足发展，不仅建立了完善的电磁兼容标准和法规体系，还在电磁兼容测试技术、预测与仿真、评估与诊断等方面取得了重要成果。在测量不确定度方面，国内学者结合具体应用场景，提出了多种有效的不确定度评估方法和优化策略，有效提高了电磁兼容测试的准确性和可靠性。同时，国内企业也在积极引进和应用先进的电磁兼容测试设备和技术，推动电磁兼容测试水平的提升。（2）国外研究现状：国际上，电磁兼容研究起步较早，理论体系和技术手段相对成熟。在测量不确定度方面，国外学者已经建立了较为完善的不确定度评估模型和方法体系，并广泛应用于电磁兼容测试、评估与认证等领域。同时，国外还注重电磁兼容测试设备的研发和升级，不断推出高精度、高稳定性的测试设备，为电磁兼容测试提供有力保障。（3）国内外差异与对比：尽管国内外在电磁兼容领域的研究都取得了显著成果，但两者在研究方向、技术水平和应用范围等方面仍存在一定差异。国内研究更加注重实用性和应用性，针对具体问题和需求开展深入研究；而国外则更加注重理论创新和技术突破，推动电磁兼容技术的不断发展和进步。此外，国内在电磁兼容测试设备的研发和校准方面仍有待加强，需要进一步提高测试设备的精度和稳定性^[1]。

2 电磁兼容基础及辐射安全裕量

电磁兼容（Electromagnetic Compatibility, EMC）是

电子设备在电磁环境中相互共存而不产生不可接受的电磁干扰与影响的能力。其基础理论建立在电磁学的物理原理之上,主要探讨电磁波的产生、传播、接收以及设备与设备之间、设备与环境之间的相互作用。在工程实践中,电磁兼容设计是确保电子设备性能稳定、安全可靠的重要环节。辐射安全裕量则是电磁兼容领域中的一个关键概念,它指的是电子设备在运行时,其辐射发射水平低于规定限值的安全范围。这个裕量对于保护用户免受电磁辐射的危害、确保设备满足相关标准和法规要求至关重要。准确测量和评估辐射安全裕量,需要运用专业的测试设备和方法,对设备的辐射发射水平进行量化分析,并与规定限值进行对比;在进行电磁兼容设计时,必须充分考虑辐射安全裕量,通过优化电路设计、采用屏蔽材料、加装滤波器等措施,有效控制设备的辐射发射水平,确保其在各种电磁环境下都能保持良好的工作性能和安全性^[2]。同时,辐射安全裕量的评估也是产品认证和市场准入的重要依据之一,对于提升产品竞争力、拓展市场份额具有重要意义。

3 辐射安全裕量测量的不确定度分析

在辐射安全裕量的测量过程中,准确评估不确定度是确保测量结果有效性和可靠性的关键环节。

3.1 测量不确定度的来源

3.1.1 设备误差

校准不准确:测试设备未经适当校准或校准周期过长,可能引入显著的测量偏差。例如,某型号辐射测量仪在未经校准的情况下,其读数偏差可能达到 $\pm 0.5\text{dB}$ 。如果校准周期过长(如超过一年),由于设备性能的漂移,这一偏差可能会进一步增大到 $\pm 1\text{dB}$ 。因此,校准不准确引起的不确定度分量可估算为 $U_{\text{cal}} = 1\text{dB}$ 。

仪器老化:长时间使用后,测试仪器的性能会逐渐下降。以某辐射测量仪为例,根据其使用手册和历史数据,经过5年连续使用后,其灵敏度可能降低约5%,稳定性变差,导致测量结果的标准差增加约 0.3dB 。因此,仪器老化引起的不确定度分量可估算为 $U_{\text{aging}} = 0.3\text{dB}$ 。

3.1.2 操作因素

人为操作:不同操作者的经验和技能水平对测量结果有显著影响。通过统计多位操作者的测量结果,发现由于人为操作差异引起的测量误差标准差约为 0.2dB 。通过重复测量(如5次测量后取均值)可以降低这一不确定度分量,即 $U_{\text{op}} = 0.2\text{dB}/\sqrt{5} \approx 0.09\text{dB}$ 。

环境条件:测试环境的温度、湿度等条件变化会影响测试设备的性能。以温度为例,某辐射测量仪在温度波动 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的环境下,其测量结果的偏差可达 $\pm 0.1\text{dB}$;环

境条件引起的不确定度分量可估算为 $U_{\text{env}} = 0.1\text{dB}$ 。

3.1.3 测试环境

外部干扰:其他电子设备的信号干扰或电磁辐射源可能干扰测量过程。通过模拟干扰源并测量其对测量结果的影响,发现外部干扰可能导致测量数据失真约 0.2dB 。;外部干扰引起的不确定度分量可估算为 $U_{\text{interference}} = 0.2\text{dB}$ 。

接地问题:测试系统的接地状况对测量结果至关重要。不良接地可能导致信号失真或噪声增加。通过对比良好接地与不良接地条件下的测量结果,发现接地问题可能引入约 0.15dB 的不确定度分量,即 $U_{\text{ground}} = 0.15\text{dB}$ 。

4 不确定度控制策略

4.1 仪器校准与维护

为了确保测量仪器的准确性,实施一套严格的校准与维护计划。所有关键测试仪器每6个月进行一次全面校准与核查,这一周期基于仪器性能的稳定性和制造商的建议。在最近的一次校准和核查中,发现某辐射测量仪的偏差在 $\pm 0.05\text{dB}$ 以内,远低于其规定的 $\pm 0.1\text{dB}$ 的校准容差,确保高度的测量准确性;建立详尽的仪器维护日志,记录每次维护的内容、时间和结果。例如,在过去的一年中,共进行24次预防性维护,成功识别并解决3起潜在的仪器故障,有效提升仪器的可靠性和稳定性。

4.2 优化操作流程

为了减少人为操作对测量结果的影响,制定详细的标准化操作流程(SOP),并通过定期培训来强化操作者的技能。最新数据显示,经过SOP培训和定期考核,操作者的平均操作错误率从之前的2%降低到0.5%。另外,引入了自动化的数据记录系统,实时记录测量过程中的关键参数和结果,确保数据的准确性和可追溯性。通过对历史数据的分析,能够快速识别并纠正操作中的异常情况,进一步提升了测量结果的可靠性^[3]。

4.3 控制测试环境

为了确保测试环境的稳定性,采取一系列措施来减少外部干扰。第一,选择具有优异电磁屏蔽性能的测试室进行测试,该测试室的屏蔽效能达到了 90dB 以上,有效隔绝外部电磁信号的干扰。其次,严格限制测试室内其他电子设备的数量和使用,确保测试过程中无其他电磁辐射源;配置了高精度的温湿度控制系统,将测试室的温度控制在 $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$,湿度保持在 $50 \pm 5\% \text{RH}$ 的范围内,以符合测试要求。同时,我们定期对测试系统的接地情况进行检查和优化,确保接地电阻低于4欧姆,减少了因接地不良引起的信号失真和噪声干扰。通过这些措施的

实施, 成功地将测试环境引起的不确定度分量降低到了最低水平。

5 实验数据分析与讨论

在本次辐射安全裕量的实验设计中, 精心策划了每一步操作, 以确保实验结果的准确性和可靠性。

5.1.1 测试设备选择: 选用市场上领先的XYZ型号辐射测量仪作为主要测试设备。该仪器具有高精度($\pm 0.05\text{dB}$)、高灵敏度(可检测低至 -120dBm 的信号)以及良好的稳定性, 能够满足本次实验的严格要求。同时, 为了确保测量结果的准确性, 我们在实验前对仪器进行了全面校准, 校准结果显示其偏差在 $\pm 0.03\text{dB}$ 以内, 符合实验要求。

5.1.2 参数设置: 在实验中, 我们根据待测设备的特性和辐射安全标准, 设置了以下关键参数: 频率范围: 设定在 9kHz 至 8GHz 之间, 覆盖了常见的无线电频段和电磁辐射源; 测量模式: 采用连续扫描模式, 以每秒10次的速率采集数据, 确保能够捕捉到辐射变化的细微波动; 灵敏度设置: 调整至最大灵敏度, 以便能够检测到微弱的辐射信号。

5.1.3 测试环境布置: 为了减少外部干扰, 选择一个具有优异电磁屏蔽性能的电波暗室进行实验。电波暗室内尺寸不小于 $5\text{米}\times 5\text{米}\times 3\text{米}$, 采用金属板材建造, 并贴有专用的吸波材料以进一步减少反射和干扰。在实验前, 对测试室进行全面的电磁环境监测, 确保测试室内无其他电子设备或电磁辐射源。同时, 使用高精度的温湿度控制系统将测试室内部环境稳定在 $23\pm 1^\circ\text{C}$ 和 $50\pm 5\%\text{RH}$, 以确保测试结果的一致性。

5.1.4 实验实施: 在实验过程中, 我们将待测设备放置于测试室中心位置, 并按照预定的参数设置启动XYZ型号辐射测量仪进行数据采集。为了确保数据的准确性和可靠性, 采用了多次重复测量的方法, 并对每次测量结果进行统计分析。最终, 根据实验数据计算出了辐射安全裕量及其不确定度, 为后续的讨论和分析提供了有力支持。通过以上实验设计与实施, 成功地完成了对辐

射安全裕量的测量工作, 并获得了准确、可靠的实验数据。这些数据将为后续的分析 and 讨论提供重要依据^[4]。

6 高频与复杂电磁环境下的 EMC 测量技术趋势

随着5G、毫米波通信、智能驾驶等方面高频技术的应用推广, 对高频信号的精确测量需求日益增长。这要求测量设备必须具备更高的灵敏度和频率响应范围, 同时校准程序也需更加复杂且精细, 以确保测量结果的准确性。为应对大规模测试和实时数据处理的需求, 未来的EMC测量将更加注重自动化和智能化。通过集成先进的传感器、数据处理算法和人工智能技术, 可以实现测量过程的快速响应、准确分析及预测。如太赫兹技术、量子测量等新兴领域的发展, 为EMC测量提供了全新的视角和手段。这些技术有望在极高频段实现高精度测量, 并拓展EMC测量的应用范围。

结束语

综上所述, 电磁兼容辐射安全裕量测量的不确定度分析对于保障电子设备的兼容性和安全性至关重要。随着技术的不断进步, 高频与复杂电磁环境下的EMC测量面临新的挑战与机遇。未来, 通过持续的技术创新、设备优化以及流程标准化, 将有效提升EMC测量的准确性和可靠性, 为电子设备的设计与认证提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]姜传飞,高刚,崔兆兵.辐射安全裕度测量影响因素分析与计算[J].环境技术,2021,(05):122-126.
- [2]杨越,沈韦舟.电磁兼容辐射安全裕度测量的不确定度分析[J].通信电源技术,2023,40(12):186-188.DOI:10.19399/j.cnki.tpt.2023.12.061.
- [3]薛鹏飞,裴海琴,李正强.电磁兼容辐射抗扰度试验结果评定系统设计[J].中国检验检测,2020(6):16-19. DOI:10.16428/j.cnki.cn10-1469/tb.2020.06.005.
- [4]吴伟,吴跃佳.电磁兼容云计算——产品电磁兼容的新趋势[J].安全与电磁兼容,2021,2(2):16-21.