

面向航空电源辐射发射的混响室测试方法及其测量不确定度分析



薛威^{1,2}, 孙静¹, 高永明², 付朝阳^{1,3}, 高田¹

1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072

2. 咸阳威思曼高压电源有限公司, 陕西 咸阳 712046

3. 西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518063

摘要:混响室(RC)凭借其建造成本低和测试空间大等优势,广泛应用于航空电源等设备的电磁兼容(EMC)测试,但现有标准忽略了混响室测试的统计特性对电磁兼容特性评估的影响。针对这一问题,本文建立了辐射功率测量值的统计理论模型,并在不同场景下开展了大量混响室测试。结果表明,所建立的理论模型能够准确地估计测量不确定度。在此基础上,讨论分析了不同因素对测量不确定度的影响,并提出了一种基于置信区间的电源辐射发射风险评估方法。

关键词:航空电源; 电磁兼容; 混响室; 辐射发射; 测量不确定度

中图分类号: V242

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.04.002

信息化作战环境下,军用飞机对先进电子和通信系统的依赖程度日益加深^[1]。作为机载设备的核心部件^[2],航空电源在频繁的开关操作、电容和电感的寄生效应、电压和电流的瞬态变化等多重因素共同作用下,会产生显著的高频噪声,并通过线缆、散热片等途径以电磁波的形式向外辐射^[3],干扰周围设备的正常工作,甚至威胁整个机载系统的稳定性和可靠性^[4]。电磁兼容测试是评估军用机载设备应对复杂电磁环境能力的重要手段,对武器装备研发和国防实力提升有着重要意义。

在电磁兼容领域的研究中,国外学者主要聚焦于数学建模和电磁仿真技术,如采用有限元分析^[5]、时域有限差分^[6]等数值分析方法,构建精确的电源模型以研究其辐射特性。相比之下,国内更侧重于测试技术的优化和标准化建设^[7]。

电波混响室是一种广泛应用于电磁兼容测试的设备,其核心结构为一个电大尺寸的金属腔体,通过机械搅拌和源搅拌等技术,在工作区域内形成各向同性、极化随机、统计均匀的电磁环境^[8]。混响室具有低功率产生高场强、测

试配置简单灵活、测试空间大和建造成本低等显著优势^[9],因此,在电磁兼容测试领域应用广泛^[10-12]。然而,混响室中电磁场的边界条件非常复杂,传统的确定性电磁理论难以有效求解相关问题,统计电磁理论则成为混响室领域的主流分析方法。基于统计理论开展的混响室测试,离不开对待测量的概率分布和测量不确定度的研究。但是,目前国内针对电源辐射发射测试的相关标准(如 GB/T 9254.1^[13])通常仅提供固定的辐射建议限值,未能充分考虑测量结果的统计特性,这可能导致辐射功率是否超标的误判风险增加。

为克服现有研究在电源辐射发射测试方面的局限,本文建立了辐射功率测量值的概率分布和不确定度的统计模型。通过对多种电源进行大量辐射发射测试,验证了理论模型的正确性,同时深入讨论了测量不确定度对辐射发射评估的影响。在此基础上,提出了基于置信区间判断电源辐射功率是否超标的方法。本文不仅能够可靠地评估电源辐射发射带来的风险,还完善了混响室电磁兼容测试分析的相关理论,对混响室测试和电源电磁兼容特性等领域

收稿日期: 2024-09-30; 退修日期: 2024-12-13; 录用日期: 2025-02-18

基金项目: 航空科学基金(2022Z062053002); 陕西省青年科技新星项目(2024ZC-KJXX-087)

引用格式: Xue Wei, Sun Jing, Gao Yongming, et al. Reverberation chamber based radiated emission measurements of aviation power supplies and associated uncertainty analyses[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(4): 9-16. 薛威, 孙静, 高永明, 等. 面向航空电源辐射发射的混响室测试方法及其测量不确定度分析[J]. 航空科学技术, 2025, 36(4): 9-16.

研究提供了重要的理论参考和实践指导。

1 测试原理

基于混响室的辐射发射测试环境如图1所示,一次完整的辐射发射测试流程主要包括:(1)通过参考测试得到混响室的功率传输函数 G_{REF} ;(2)通过待测设备测试得到待测设备工作时接收天线的净接收功率 P_{REC} 。待测设备的辐射功率 P_{TRP} 可表示为

$$P_{\text{TRP}} = \frac{P_{\text{REC}}}{G_{\text{REF}}} \quad (1)$$

参考测试在参考天线和接收天线间进行,参考天线和接收天线分别连接至网络分析仪的两个端口,网络分析仪采集并存储每个搅拌位置(搅拌器或转台)下的 S 参数。完成所有搅拌位置的测量后,参考测试中的功率传输函数为^[14-15]

$$\hat{G}_{\text{REF}} = \frac{\langle |S_{21, \text{REF}}|^2 \rangle_{N_{\text{REF}}}}{\eta_{\text{R}} \eta_{\text{M}} (1 - |\Gamma_{\text{R}}|^2) (1 - |\Gamma_{\text{M}}|^2)} \quad (2)$$

式中, η_{M} 和 η_{R} 分别为接收天线和参考天线的辐射效率; Γ_{M} 和 Γ_{R} 分别为接收天线和参考天线的反射系数; $S_{21, \text{REF}}$ 为传输系数; N_{REF} 为参考测试的样本数; $\langle \cdot \rangle$ 为求样本平均。

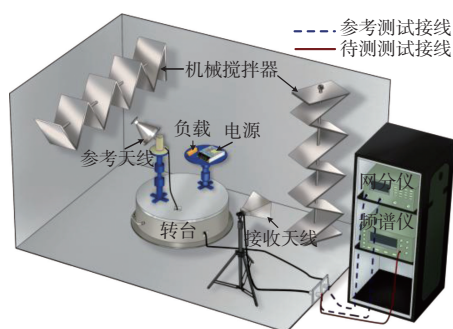


图1 基于混响室的辐射发射测试环境示意图

Fig.1 Setup for the radiated emission measurement in a reverberation chamber

待测设备测试在待测设备和接收天线间进行,待测设备正常工作,接收天线与频谱仪连接。频谱仪采集并存储每个搅拌位置下接收天线的接收功率 P_{M} 。完成全部搅拌位置的测量后,待测设备测试中接收天线的净接收功率为

$$P_{\text{REC}} = \frac{\langle P_{\text{M}} \rangle_{N_{\text{M}}}}{\eta_{\text{M}} (1 - |\Gamma_{\text{M}}|^2)} \quad (3)$$

式中, N_{M} 为待测设备测试的样本数,结合式(1)~式(3),待测设备辐射功率的测量值可表示为^[16]

$$\hat{P}_{\text{TRP}} = \frac{\langle P_{\text{M}} \rangle_{N_{\text{M}}} \eta_{\text{R}} (1 - |\Gamma_{\text{R}}|^2)}{\langle |S_{21, \text{REF}}|^2 \rangle_{N_{\text{REF}}}} \quad (4)$$

式中, P_{TRP} 为待测设备辐射功率的真实值, $\hat{P}_{\text{TRP}}$ 为对 P_{TRP} 的估计。

2 混响室法测量辐射发射的统计模型

在场均匀性良好的混响室中,根据Hill的平面波积分理论^[17]可知,随机变量 $X = |S_{21, \text{REF}}|^2$ 和 $Y = P_{\text{M}}$ 均服从指数分布,分别记为 $X \sim E(\lambda_{\text{REF}})$, $Y \sim E(\lambda_{\text{M}})$;指数分布参数 $\lambda_{\text{REF}} = C_{\text{RC}}/Q$, $\lambda_{\text{M}} = C_{\text{RC}}/(QP_{\text{TRP}})$;其中, $C_{\text{RC}} = 16\pi^2 V/\lambda^3$, Q 、 V 、 λ 分别表示混响室的品质因数和体积、以及波长。变形可得 $\lambda_{\text{REF}} X \sim E(1)$, $\lambda_{\text{M}} Y \sim E(1)$ 。当样本间相互独立时, X_i , $i = 1, 2, \dots, N_{\text{REF}}$ 和 Y_i , $i = 1, 2, \dots, N_{\text{M}}$ 均为独立同分布的随机变量。为了便于推导,令 $R = \sum_{i=1}^{N_{\text{REF}}} X_i$, $G = \sum_{i=1}^{N_{\text{M}}} Y_i$,则 $\lambda_{\text{REF}} R$ 和 $\lambda_{\text{M}} G$ 分别服从自由度为 $2N_{\text{REF}}$ 和 $2N_{\text{M}}$ 的卡方分布,分别记为 $\lambda_{\text{REF}} R \sim \chi^2(2N_{\text{REF}})$ 和 $\lambda_{\text{M}} G \sim \chi^2(2N_{\text{M}})$,进而将(4)式改写为

$$\frac{\lambda_{\text{M}} \hat{P}_{\text{TRP}}}{\lambda_{\text{REF}} \eta_{\text{R}} (1 - |\Gamma_{\text{R}}|^2)} = \frac{\lambda_{\text{M}} G / 2N_{\text{M}}}{\lambda_{\text{REF}} R / 2N_{\text{REF}}} \quad (5)$$

令 $Z = \hat{P}_{\text{TRP}}$, $a = \lambda_{\text{M}} / [\lambda_{\text{REF}} \eta_{\text{R}} (1 - |\Gamma_{\text{R}}|^2)]$,则 aZ 服从自由度为 $2N_{\text{M}}$ 和 $2N_{\text{REF}}$ 的中心 F 分布,记为 $aZ \sim F(2N_{\text{M}}, 2N_{\text{REF}})$ 。可以推得 $\hat{P}_{\text{TRP}}$ 的概率密度函数为

$$f(z) = \begin{cases} \frac{\Gamma(N_{\text{M}} + N_{\text{REF}}) N_{\text{M}}^{N_{\text{M}}} N_{\text{REF}}^{N_{\text{REF}}} a^{N_{\text{M}} - N_{\text{REF}} - 1}}{\Gamma(N_{\text{M}}) \Gamma(N_{\text{REF}}) (N_{\text{M}} a z + N_{\text{REF}})^{N_{\text{M}} + N_{\text{REF}}}}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

进而可得 $\hat{P}_{\text{TRP}}$ 的期望和方差分别为

$$E[\hat{P}_{\text{TRP}}] = \frac{N_{\text{REF}}}{a(N_{\text{REF}} - 1)} \quad (7)$$

$$\text{VAR}[\hat{P}_{\text{TRP}}] = \frac{N_{\text{REF}}^2 (N_{\text{M}} + N_{\text{REF}} - 1)}{a^2 N_{\text{M}} (N_{\text{REF}} - 1)^2 (N_{\text{REF}} - 2)} \quad (8)$$

为验证所建立的统计模型,应消除参数 a ,因此,可以计算 $\hat{P}_{\text{TRP}}$ 的相对不确定度

$$\text{STD}_{\text{relative}}[\hat{P}_{\text{TRP}}] = \sqrt{\frac{N_{\text{M}} + N_{\text{REF}} - 1}{N_{\text{M}} (N_{\text{REF}} - 2)}} \quad (9)$$

辐射功率的测量不确定度受多方面因素的影响,但是在搅拌良好的混响室条件下,独立样本数对不确定度的影响最为显著,因此,现有研究往往采用统计理论模型进行不确定度评估^[18-20]。

3 试验环境

本文以常见的两款开关电源为测试对象,介绍电源辐射发射的混响室测试环境及相关参数配置。

3.1 待测电源

航空电源系统涵盖发电、储能、转换和分配等环节,与常见的开关电源一样,均需要满足电磁兼容要求。尽管两者的应用场景和设计复杂度存在差异,但其电磁兼容测试标准和程序类似,因此,对一般开关电源的测试结果可为航空电源的电磁兼容特性分析提供有效参考。本文选取两款常见的交流转直流开关电源作为测试对象,如图2所示。开关电源A输入为220V/50Hz交流电,输出为24V直流电,额定功率为76.8W;开关电源B输入为220V/50Hz交流电,输出为12V直流电,额定功率为50.4W。两款开关电源的金属外壳均可拆卸,负载为阻值25Ω的纯阻性发热电阻。

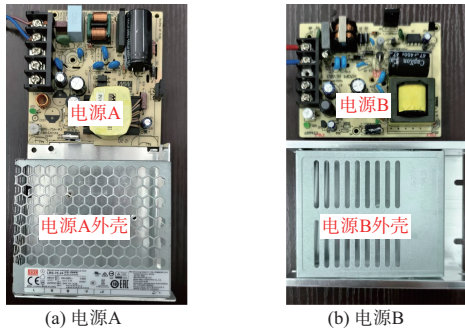


图2 待测电源照片

Fig.2 Photographs of the power supplies under test

3.2 试验设置

本文的所有测试均在一个内部尺寸为1.50m×1.44m×0.92m的混响室进行。为确保测试和分析的全面性,分别在4种不同的场景(有外壳的电源A、无外壳的电源A、有外壳的电源B和无外壳的电源B)下进行电源辐射发射的混响室测试。如图3所示,参考天线和待测电源分别放置在转台边缘的两个支架上,支架的高度和位置可自由调节,接收天线放置于转台旁的泡沫上。

参考测试和待测设备测试的频段范围均为0.4~4GHz,且采用相同的搅拌配置,即两次测试的样本数相同。鉴于测量不确定度随独立采样数的增加而降低,且混响室内电磁模态的混叠程度随频率的降低而减弱,因此,在保证样本间独立性的同时,为了在不同频段尽可能获取更多的样本,本文将测试频段分成低频和高频两个频段,并设置了不同的机械搅拌数。具体而言,在0.4~2GHz的频段范围内,转台每步旋转36°,每个转台位置下搅拌器步进36°旋转一周,共100个样本;在2~4GHz的频段范围内,转台每步旋转18°,每个转台位置下搅拌器步进18°旋转一周,共400个样本。

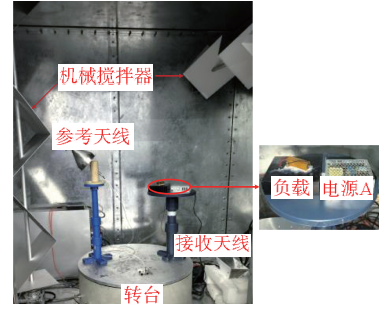


图3 电源辐射发射测试的混响室内部照片

Fig.3 Photograph of the inner setup of RC for radiated emission measurements of the power supplies

参考测试中网络分析仪的采样间隔设置为1MHz,待测设备测试中频谱仪的采样间隔同样设置为1MHz。鉴于计算电源辐射发射的相对不确定度需要多个独立的辐射发射样本,本文采用9点测试法^[21]开展测试:调节支撑电源和参考天线的支架,使电源和参考天线位于三个不同的高度(高度间距大于最低测试频率的半波长),且在每个高度调节电源和参考天线使其朝向三个正交方向。

4 试验结果分析

本节将展示两种不同输出功率的电源在有无外壳时的辐射发射测量结果和不确定度,同时基于置信区间给出一种更可靠的电源辐射发射风险评估方法。

4.1 样本独立性检验

鉴于电源辐射功率的统计模型是独立样本数的函数,因此,在分析电源辐射发射的统计特性前,必须检验样本间的独立性。现有研究通常采用样本的一阶自相关系数判断样本间的独立性或相关性^[22]

$$r(1) = \frac{\sum_{i=1}^N (S_{21}(i) - \langle S_{21} \rangle)(S_{21}(i+1) - \langle S_{21} \rangle)}{\sum_{i=1}^N (S_{21}(i) - \langle S_{21} \rangle)^2} \quad (10)$$

式中, $S_{21}(i)$ 为第 i 个搅拌位置(搅拌器或转台)样本; $S_{21}(i+1)$ 为 $S_{21}(i)$ 循环平移一位后的样本。当样本的 $|r(1)|$ 小于指定的阈值(通常选取 $e^{-1} \approx 0.37$)时,样本是相互独立的。转台和搅拌器样本的 $|r(1)|$ 如图4所示。需要指出的是,使用任意一组转台或搅拌器样本计算得到的 $|r(1)|$ 与阈值间的关系是一致的,因此,这里只展示了一组样本的计算结果。可以看出在整个频段上, $|r(1)|$ 基本低于阈值。因此,可以认为0.4~2GHz的100个样本相互独立,同时2~4GHz的400个样本相互独立。

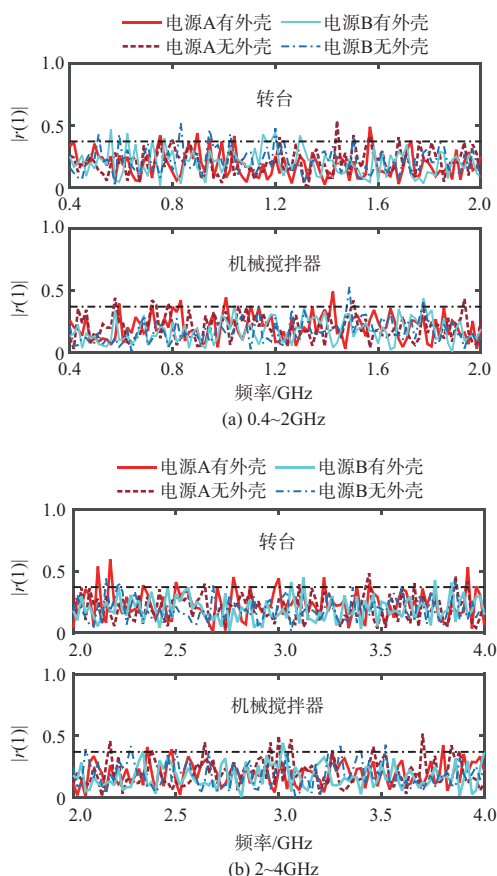


图4 转台和搅拌器样本的一阶自相关系数幅值

Fig.4 The amplitudes of the first order autocorrelation coefficient of one set of platform and stirrer samples

4.2 测量结果分析

图5展示了两种开关电源在有外壳的两种情况下工作时的辐射功率。电源A的输出电压是电源B的两倍,因此,在相同的负载条件下,电源A的输出功率是电源B的4倍。测试结果表明,输出功率较大的电源A的辐射功率显

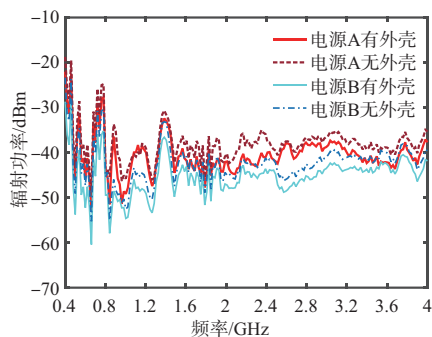


图5 两种电源在有外壳两种情况下,辐射功率的测量值

Fig.5 Measured radiated power of two power supplies in cases with and without covers

著高于电源B,说明输出功率大的开关电源在工作时会产生更多的电磁辐射。

从图5还可以看出,当电源的金属外壳被拆除后,其辐射功率显著增加。这表明金属外壳对电磁辐射具有一定的屏蔽作用。金属外壳通过物理遮挡有效减少了辐射能量的泄漏,从而降低电源对外部环境的电磁干扰。拆除外壳后,电磁能量得以自由传播,导致辐射功率明显增大。这一结果凸显了金属外壳在开关电源的设计和使用中对电磁屏蔽的重要性。

4.3 统计不确定度分析

为了充分验证不确定度的理论模型,本节分别在0.4~2GHz和2~4GHz两个频段,计算了辐射功率测量值的相对不确定度,结果如图6所示。相对不确定度的经验值通过9次独立重复试验获得,可以看出,在不同测试频段和不同独立样本数的条件下,相对不确定度的测量值与理论值均表现出良好的一致性,这充分证明了所建立的理论模型能够准确地估计电源辐射发射测量的统计不确定度。此外,图6还表明,电源的输出功率大小以及是否配备金属外壳对相对不确定度的测量结果无显著影响,即测量不确定度不受待测物自身特性的影响,这进一步证明了理论模型的准确性和有效性。

待测设备辐射功率的相对不确定度是独立采样数的函数,为了研究二者间的关系,图7展示了两种电源辐射功率测量值在3GHz处的相对不确定度随独立样本数的变化情况。可以看出,无论独立样本数的多少,待测电源输出功率的大小,以及电源是否配备金属外壳,相对不确定度的理论值和经验值都高度一致,这充分验证了辐射发射的测量方法和理论不确定度模型的准确性和可靠性。

此外,图7体现了统计测量的一个重要特性:测量不确定度随独立样本数的增加而降低,尤其是当独立样本数较少时,增加独立样本数能够显著降低测量不确定度,提高测量的可信度。但是,当独立样本数增加到一定程度后,不确定度的改善不再显著。这表明在实际测试中,无需无限地增加独立样本数,应根据实际情况确定合适的样本量,在保证测量精度的同时提高测量效率。

4.4 基于置信区间的判别方法

为了评估电源的辐射发射是否超标,必须将测试结果与相关标准中规定的限值进行比较。GB/T 9254.1提供了混响室测试中设备在1GHz以上频段的辐射发射建议限值,以及辐射功率 P_{rad} 与等效的3m距离时,自由空间电场强度 E_{rad} 的转化关系

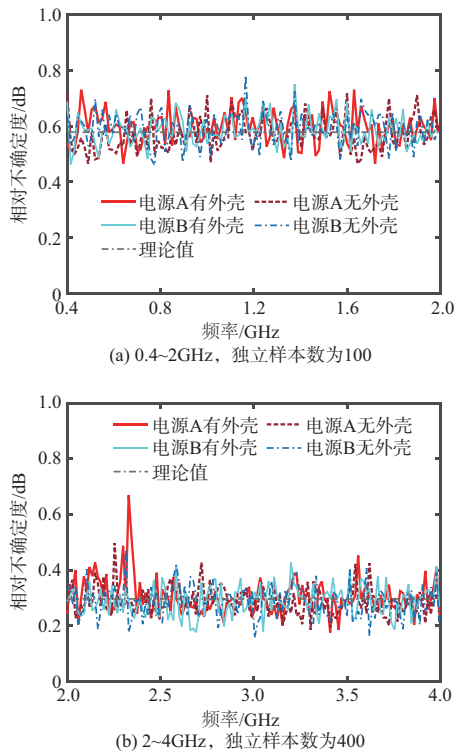


图6 两种电源在有外壳两种情况下,辐射功率测量值的理论与经验相对不确定度

Fig.6 Analytical and empirical relative STDs of the measured radiated power of two power supplies in the cases with and without covers

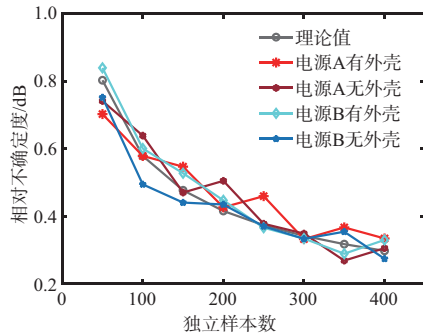


图7 辐射功率在3GHz处测量值的理论和经验相对不确定度随独立样本数的变化曲线

Fig.7 Analytical and empirical relative STDs of the radiated power measured at 3GHz as functions of number of independent samples

$$E_{\text{rad}} = P_{\text{rad}} + 97.53\text{dB} \quad (11)$$

鉴于标准未提供设备在1GHz以下频段的辐射发射建议限值,本文仅将1~4GHz频段的辐射功率转化为等效的自由空间电场强度值。此外,为了体现独立样本数对测量结果的影响,图8展示了独立样本数为10和100两种情况

下电源辐射发射的测量值及其95%置信区间。置信区间范围可由随机变量的分布推导得到,第2节中已确定 aZ 服从分布 $F(2N_M, 2N_{\text{REF}})$,所以 Z 的95%置信区间为

$$(a^{-1}F_{0.975}(2N_M, 2N_{\text{REF}}), a^{-1}F_{0.025}(2N_M, 2N_{\text{REF}})) \quad (12)$$

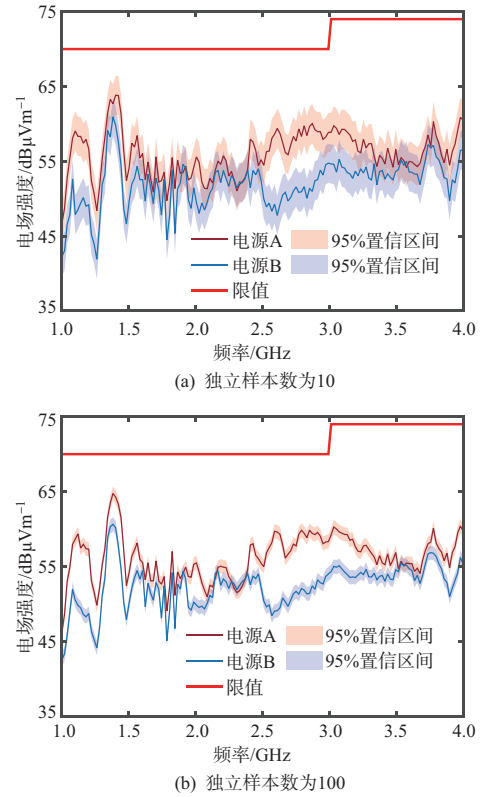


图8 有外壳的两种电源辐射发射测量值与建议限值的比较

Fig.8 Comparison between measured and recommended limits for radiated emissions of two power supplies with covers

从图8可以看到,当独立样本数为10时,辐射发射测量值的95%置信区间较宽,表明测量结果的不确定性较大。当独立样本数增加至100时,置信区间显著变窄,表明测量值更加稳定和可靠。可以推断当独立样本数较少时,测量值与真实值间可能存在较大差异,测量误差不可忽略,这可能导致对辐射发射是否符合标准的误判。

鉴于混响室测试的统计特性和测量结果的不确定性,在评估电源是否符合辐射标准时,需要充分考虑独立样本数的影响。通过使用测量值95%置信区间的上限与建议限值进行比较,可以提供更可靠的评估结果。这种方法考虑了混响室法测量辐射发射的统计特性,能够有效避免因独立样本数不足而导致的误判风险。

5 结果讨论

辐射功率的测量不确定度主要来源于有限的独立样本数,但测试设备的精度、线缆特性等因素同样会对测试结果产生影响。表1与表2总结了待测设备测试与参考测试中的主要不确定度来源,以及相应的标准不确定度估计值。表中的标准不确定度来自相关标准^[23]、厂家提供的数据手册和参考文献^[24],而非通过实际测量获得。一般情况下,数据手册提供的是最大误差值,因此,表1与表2中的部分值可能会略大于实际情况。此外,表中“—”表示该不确定度来源同时存在于参考测试和待测设备测试,且其影响可以相互抵消。

表1 待测设备测试中的不确定度

Table 1 Uncertainties in device under test measurement

不确定度来源	标准不确定度/dB
失配:接收部分(频谱仪、线缆和接收天线之间)	0.41
线缆:接收部分	0
插入损耗:接收天线输入端线缆	—
插入损耗:接收天线输入端衰减器	0
频谱仪(绝对水平精度)	0.07
环境温度对待测设备的影响	0.1
杂项不确定度	0.1
频率分辨率	—
待测设备测试合成不确定度	0.44

表1中待测设备测试的合成不确定度为 $u_{\text{dut}}=0.44\text{dB}$,表2中参考测试的合成不确定度为 $u_{\text{ref}}=0.75\text{dB}$ 。参考测试的功率传输函数 G_{REF} 由 N_{REF} 个独立样本平均得到,待测设备测试的接收功率 P_{REC} 由 N_{M} 个独立样本平均得到,因此辐射功率的合成相对不确定度为

$$u_{\text{combined}}^{\text{relative}} \approx \sqrt{\frac{u_{\text{dut}}^2}{N_{\text{M}}} + \frac{u_{\text{ref}}^2}{N_{\text{REF}}} + \text{STD}^{\text{relative}}[\hat{P}_{\text{TRP}}]^2} \quad (13)$$

式中, $\text{STD}^{\text{relative}}[\hat{P}_{\text{TRP}}]$ 为仅考虑了有限独立样本数影响的理论不确定度。

图9为理论和合成相对不确定度随独立采样数的变化曲线。可以看出理论和合成相对不确定度几乎一致。这表

表2 参考测试中的不确定度

Table 2 Uncertainties in reference measurement

不确定度来源	标准不确定度/dB
失配:发射部分(网分仪、线缆和参考天线之间)	0.28
失配:接收部分(网分仪、线缆和接收天线之间)	0.28
网分仪(绝对水平精度)	0.65
网分仪(水平稳定)	0.005
插入损耗:接收天线输入端线缆	—
插入损耗:参考和接收天线输入端衰减器	0
参考测试合成不确定度	0.75

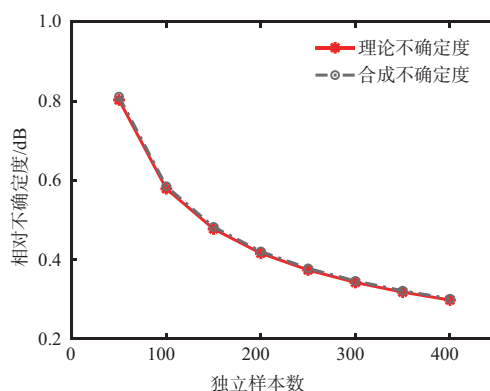


图9 理论和合成相对不确定度随独立采样数的变化曲线

Fig.9 The theoretical and combined relative uncertainties as functions of number of independent samples

明在搅拌良好的混响室中,测量结果的不确定度主要由有限的独立采样数决定,其他误差源的影响相对较小^[25]。

6 结论

本文研究了基于混响室的电源辐射发射测试中的统计问题,建立了电源辐射功率测量值的概率分布和不确定度的理论模型,分析了测量不确定度对辐射发射评估的影响,并讨论了不同因素对测量不确定度的贡献。研究表明:(1)考虑混响室辐射发射测试的不确定度和测量值的置信区间能够更可靠地评估电源辐射发射的风险;(2)在搅拌良好的混响室条件下,测试设备的精度和线缆的特性等因素对总体不确定度的贡献较小。

本文的研究进一步完善了混响室电磁兼容测试的方法和理论。需要指出的是,本文的模型是基于场均匀性良好的混响室建立,并未考虑搅拌不充分导致收发天线间存在直射分量或模态混叠不充分导致Hill平面波理论模型不适用的情况。未来将进一步探索不同混响室条件下的辐射发射测量方法及其不确定度评估方法。

AST

参考文献

- [1] 吕少杰,杨岩,韩振飞. 军用直升机智能自主控制技术发展前景[J]. 航空科学技术, 2020, 31(10): 36-40.
Lu Shaojie, Yang Yan, Han Zhenfei. Research on the development of military helicopter intelligent and autonomous control technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(10): 36-40. (in Chinese)
- [2] 艾凤明,梁兴壮,董润,等. 军用飞机供电系统故障预测与健康关键管理技术[J]. 航空科学技术, 2023, 34(2): 86-95.

- Ai Fengming, Liang Xingzhuang, Dong Run, et al. Key technologies of prognostic and health management of military aircraft power supply and distribution system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(2): 86-95. (in Chinese)
- [3] 张峻涛. 高压直流电机驱动系统电磁兼容设计改进技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(3): 59-67.
- Zhang Juntao. Research on electromagnetic compatibility test rectification technology of high voltage DC motor driving system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(3): 59-67. (in Chinese)
- [4] 王明皓. 飞机电磁环境效应的特性及控制[J]. 航空科学技术, 2013, 24(3): 1-6.
- Wang Minghao. Characteristics and control for electromagnetic environment effects of aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013, 24(3): 1-6. (in Chinese)
- [5] Sitzia A M, Baker A E. Finite element analysis for power electronics EMC applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32 (3): 1517-1520.
- [6] Choi J, Swaminathan M, Do N, et al. Modeling of power supply noise in large chips using the circuit-based finite-difference time-domain method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47 (3): 424-439.
- [7] 王少宁, 张俊峰. 航天器DC-DC模块电源电磁兼容设计[J]. 安全与电磁兼容, 2007, (4): 62-64+96.
- Wang Shaoning, Zhang Junfeng. Design of EMC for spacecraft DC-DC module supply[J]. Safety & EMC, 2007, (4): 62-64+96. (in Chinese)
- [8] Hill D A. Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40 (3): 209-217.
- [9] Crawford M L, Koepke G. H. Comparing EM susceptibility measurement results between reverberation and anechoic chambers[C]. 1985 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1985: 1-9.
- [10] 熊蒙, 叶琼瑜, 焦琳, 等. 电磁混响室场地性能参数确认方法[J]. 安全与电磁兼容, 2019, (5): 47-50.
- Xiong Meng, Ye Qiongyu, Jiao Lin, et al. Confirmation method of site performance parameters of electromagnetic reverberation chamber[J]. Safety & EMC, 2019, (5): 47-50. (in Chinese)
- [11] 朱赛, 马岚, 李焕然, 等. 电磁混响室的辐射发射快速校准法[J]. 安全与电磁兼容, 2020 (2): 51-53.
- Zhu Sai, Ma Lan, Li Huanran, et al. Fast calibration method of radiation emission of electromagnetic reverberation chamber[J]. Safety & EMC, 2020 (2): 51-53. (in Chinese)
- [12] 张云蕾, 吕炎, 张旭, 等. ISO 11451-5 标准草案解读[J]. 安全与电磁兼容, 2022(6): 86-90.
- Zhang Yunlei, Lu Yan, Zhang Xu, et al. Interpretation on ISO 11451-5 draft[J]. Safety & EMC, 2022(6): 86-90. (in Chinese)
- [13] GB/T 9254.1—2021 信息技术设备、多媒体设备和接收机电磁兼容 第1部分: 发射要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- GB/T 9254.1—2021 Information technology equipment, multimedia equipment and receivers-Electromagnetic compatibility-Part 1: Emission requirements[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [14] Senic D, Remley K A, Williams D F, et al. Radiated power based on wave parameters at millimeter-wave frequencies for integrated wireless devices[C]. 2016 88th ARFTG Microwave Measurement Conference, 2016: 1-4.
- [15] CTIA Wireless Association. Test plan for wireless large-form-factor device over-the-air performance[S]. Washington D. C.: Cellular Telecommunications Industry Association, 2019.
- [16] Xue Wei, Li Furong, Chen Xiaoming, et al. A unified approach for uncertainty analyses for total radiated power and total isotropic sensitivity measurements in reverberation chamber[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-12.
- [17] Hill D A. Electromagnetic fields in cavities: deterministic and statistical theories[M]. USA: Wiley-IEEE Press, 2009.
- [18] Chen Xiaoming. Generalized statistics of antenna efficiency measurement in a reverberation chamber[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62 (3): 1504-1507.
- [19] Xu Qian, Qi Wenjun, Liu Chao, et al. Measuring the total radiated power of wideband signals in a reverberation chamber[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19 (12): 2260-2264.
- [20] Jia Tianyuan, Huang Yi, Xu Qian, et al. Average rician K-factor based analytical uncertainty model for total radiated power measurement in a reverberation chamber[J]. IEEE Access,

- 2020, 8: 198078-198090.
- [21] Remley K A, Wang C M J, Williams D F, et al. A significance test for reverberation-chamber measurement uncertainty in total radiated power of wireless devices[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(1): 207-219.
- [22] Carobbi C F M, Serra R. Analysis of concurrent and correlated stirring mechanisms in reverberation chambers[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023, 65(3): 607-616.
- [23] CTIA Wireless Association. Test plan for wireless device over-the-air performance[S]. Washington D.C.: Cellular Telecommunications Industry Association, 2015.
- [24] 张丽, 郭辉萍, 曹洪龙, 等. GSM手机总全向灵敏度(TIS)的测量不确定度评定[J]. 通信技术, 2009, 42(1): 233-235.
- Zhang Li, Gou Huiping, Cao Honglong, et al. Evaluation on measurement uncertainty of total isotropic sensitivity (TIS) for GSM mobile phones[J]. Communications Technology, 2009, 42(1): 233-235. (in Chinese)
- [25] Holloway C L, Shah H A, Pirkil R J, et al. Reverberation chamber techniques for determining the radiation and total efficiency of antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(4): 1758-1770.

Reverberation Chamber Based Radiated Emission Measurements of Aviation Power Supplies and Associated Uncertainty Analyses

Xue Wei^{1,2}, Sun Jing¹, Gao Yongming², Fu Zhaoyang^{1,3}, Gao Tian¹

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. Wisman High Voltage Power Supply Co., Ltd., Xianyang 712046, China

3. Research and Development Institute of Northwestern Polytechnical University in Shenzhen, Shenzhen 518063, China.

Abstract: Owing to the appealing advantages (e.g., low construction costs and large testing area) of the reverberation chamber (RC), it has been widely applied in electromagnetic compatibility (EMC) testing of various equipment in aviation area, such as aviation power supplies. However, the effects caused by the statistical characteristics of RC-based measurements on the assessment of EMC performance are overlooked in existing standards. To overcome this limitation, a statistical model for RC-based radiated power measurement is established. Extensive RC-based measurements are performed in different scenarios, it is shown that the established model can provide accurate estimation of the measurement uncertainty. Based on this, the effects caused by different factors on measurement uncertainty are discussed and analyzed. In addition, a confidence interval-based method is proposed for risk assessment of the radiated emissions of power supplies.

Key Words: aviation power supply; electromagnetic compatibility; reverberation chamber; radiated emission; measurement uncertainty

Received: 2024-09-30; Revised: 2024-12-13; Accepted: 2025-02-18

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2022Z062053002); Young Star of Science and Technology Program of Shaanxi (2024ZC-KJXX-087)