

航空电源电磁兼容性测试技术研究

赵金奎^{1,2} 张敏¹ 孙海荣¹

1. 中航工业陕西航空电气有限责任公司, 陕西 兴平 713107

2. 中航工业西北电磁兼容性监督检测中心, 陕西 兴平 713107

摘 要: 航空电源作为重要的机载设备, 其电磁兼容性是否符合要求需要通过试验进行严格验证。对航空电源开展电磁兼容性测试, 目的就是要确定其是否出现电磁干扰超标现象, 判断其抵抗外界电磁干扰的能力。本文对航空电源的特点、航空电源进行电磁兼容性测试的必要性、试验准备、主要试验内容进行介绍; 结合航空电源实际的电磁兼容性测试, 对航空电源的电磁兼容性测试技术进行研究, 对航空电源试验的特点进行分析, 并提出航空电源电磁兼容性试验中的注意事项。

关键词: 航空电源; 电磁兼容性 (EMC); 电磁干扰 (EMI); 测试技术

中图分类号: XXXX **文献标识码:** A

Research of EMC Test Techniques for the Aircraft Power Supply

Zhao Jinkui^{1,2} Zhang Min¹ Sun Hairong¹

1. AVIC Shaanxi Aero Electric Co., Ltd., Xingping 713107, China

2. AVIC Northwest EMC Supervising and Detecting Center, Xingping 713107, China

Abstract: The aircraft power supply is an important air-borne equipment, the electromagnetic compatibility (EMC) is in conformity with the relevant standards need to strict test. The aircraft power supply for EMC testing, the purpose is to determine whether there is electromagnetic interference (EMI) exceed the standard phenomenon, and judge its resistant to external EMI ability to know. In the paper, the characteristics of the aircraft power supply, the necessity of EMC testing for the aircraft power supply, test preparation and test content are introduced. EMC test combined with the actual of the aircraft power supply, EMC testing technology of the aircraft power supply, the characteristics of the aircraft power supply EMC test are analyzed, and put forward some notifications and suggestions needing attention of the aircraft power supply test of EMC.

Key words: the aircraft power supply; electromagnetic compatibility (EMC); electromagnetic interference (EMI); test technique

引言

航空电源结构复杂、布局特殊, 产品和系统内电缆间、产品间、电缆与产品间等各种电磁耦合现象随处可见。随着近几年航空电源系统的研制进一步向大功率、高转速、快速大功率变换、高度集成化方向发展, 航空电源在有效空间内所包含的电子设备越来越密集, 使大功率器件、连接电缆、信号传输线等的数量急剧增加, 导致航空电源的电磁兼容性问题越来越突出, 而产品没有良好的电磁兼容性不但会影响自身的正常工作状态和输出电源的电能质量, 而且还会产生大量的电磁干扰影响邻近电

子设备和其他机载用电设备的正常工作。依据产品技术规范、试验大纲及 GJB 151A/152A—1997、GJB 1389A—2005 等资料和相应标准的要求, 大部分航空电源在装机前都要求进行相关项目的电磁兼容性测试, 特别是对航空电源产品和系统进行电磁兼容性测试, 是重要的鉴定试验项目之一, 是全面考核电源产品和系统整体电磁兼容性的重要手段。

对于单个的航空电源电器产品而言, 其电磁兼容性测试相对简单, 而对于一套完整的航空电源系统来说, 它含有发电机、电器及各类配试产品, 进行电磁兼容性试验时参试产品数量多、产品间线路连接复杂, 并且许多航空电

源系统还需要专门的测试辅助设备,极大地增加了试验难度。而试验是检验产品是否合格的重要方法和手段,电磁兼容试验与测量具有重要意义,正如美国肯塔基大学的 C. R. Paul 教授在一篇文章中所说的:“对于最后的成功验证,也许没有任何其他领域像电磁兼容那样强烈地依赖于测量。”

1 航空电源的特点

航空电源系统的主要功能是产生或存储机载用电设备所需的电能,以保证机上各种用电设备工作时电能的供应。航空电源系统由主电源、辅助电源、应急电源、二次电源及外部(地面)电源供电控制等设备和分系统组成。

航空主电源是飞机正常工作状态时,为各种机载用电设备提供电能的系统,一般都是由航空发动机直接或间接传动的发电系统。二次电源是根据机上用电设备用电性质的不同将航空主电源的电能转变为另一种或多种形式电能的装置,以满足机载用电设备对不同电能形式的需求。

航空电源系统的特点:系统整体结构紧凑,包含的产品和设备数量多,线路连接复杂。航空电源受安装空间的限制,通常结构都非常紧凑,产品和设备之间的电缆庞杂,导致系统内部各个设备之间的电磁耦合情况非常复杂。另一方面,航空电源在装机状态下所处的电磁环境非常恶劣,在同一环境下其他机载电子、电气设备在工作状态下又可能会影响系统的工作性能,整个系统的电磁兼容性会因所处空间电磁环境的变化而发生改变。航空电源系统的这些特点决定了开展系统电磁兼容性试验验证工作必须充分、有效,最大限度地发现潜在的电磁干扰问题和可能存在的敏感现象,同时还需避免电磁兼容性欠试验和过试验。

2 航空电源 EMC 试验的必要性和复杂性

2.1 航空电源 EMC 试验的必要性

随着电力电子技术的迅猛发展,电子系统性能指标要求越来越高,航空电源系统也不例外,系统的功能越来越复杂,系统集成度越来越高,系统的功率密度进一步增大,导致潜在

的电磁干扰大大增加,系统内电磁环境也越来越恶劣。另外,这种复杂的电子系统往往采用多种工作模式,在设备和产品级试验时很难考虑周全;而对于系统中参与试验的产品或设备尚未进行产品级 EMC 测试而要在系统试验中进行全面考核的产品,在这种情况下进行系统的 EMC 试验就显得更为必要和重要。因此,为了保证复杂的航空电源系统在实际装机状态下能够正常可靠地工作,避免在 EMC 设计中出现欠设计,对系统开展 EMC 试验就是一项十分必要的工作。

航空电源 EMC 试验的目的就是寻求该自身的兼容性以及系统在特定的电磁环境下的兼容性。航空电源系统 EMC 试验是必要的,通过对整个系统进行 EMC 试验,可以定量掌握系统内产品之间、系统与所处环境之间的 EMC 试验数据,全面判断系统的电磁兼容性。

2.2 航空电源 EMC 试验的复杂性

与设备和产品级 EMC 测量相比,航空电源系统的 EMC 试验更加复杂,试验难度也更大。为此可以从如下几个方面加以理解。

(1) 由于每个系统都有各自的特点,目前还没有针对单个具体系统的 EMC 试验标准。我国参考美军标 MIL - E - 6051D 编制出版了 GJB 1389—1992《系统电磁兼容性要求》标准;2005 年 10 月 2 日重新修订发布的 GJB 1389A—2005 代替 GJB 1389—1992 于 2006 年 1 月 1 日实施,标准名称未变,是目前最新版本的系统电磁兼容性标准。相对于航空电源系统,目前还没有针对性的电磁兼容性标准,但是 GJB 1389A—2005 等标准给出了一些应该遵从的原则,航空电源系统 EMC 试验可以参考这些现有标准进行测试,现在主要就是将这些原则用于工程。中航工业组织人员编制的 Q/AVIC ×××× - ××××《航空电源电磁发射和敏感度要求及测量方法》已编制完成并通过审查即将出版,该标准对航空电源产品及系统的 EMC 测试要求及方法做出了更为具体和明确的说明,填补了国内航空电源 EMC 测试缺少对应标准的空白。

(2) 对航空电源系统来说,系统含有多台电子、电气产品,产品之间是否会构成干扰,需要试验来验证,如何合理地安排这些试验是个复杂的问题。

(3) 由于航空电源系统是由发电机、电器产品组成的大型电气系统,往往有多种工作模式要运行。要求整个系统在 EMC 实验室进行测试时,需要特殊的试验保障条件。无论从系统 EMC 试验对测试设备和辅助设施的需求,还是从被测系统的复杂性来看,要完成航空电源系统的 EMC 测试任务,存在一定的难度。

航空电源的电磁兼容性试验涉及的面比较广、内容庞杂,从试验的准备到开展必须理清思路、全面考虑,才能顺利完成试验,得到准确的测试结果。航空电源系统进行电磁兼容性试验验证时,可以借鉴设备级的 EMC 测试方法,也可以参考其他系统的 EMC 试验规范开展检测。总体而言,航空电源系统的 EMC 试验具有较高的复杂性,但是却非常必要,为了能顺利开展试验,试验前的各项准备工作就显得尤为重要。

3 航空电源系统 EMC 试验的准备

3.1 航空电源系统 EMC 试验的重点

航空电源系统 EMC 试验的重点,一是检测被试系统自身的电磁辐射发射,看其对被测系统内的敏感设备以及与之相关的周围环境的影响;二是检测被试系统在按要求施加某种干扰的情况下,被试系统自身工作是否正常,性能是否出现下降,是否有敏感现象。考虑到电磁干扰的随机性和航空电源系统的复杂性,依据被测系统技术规范等任务书中规定的 EMC 指标,进行系统 EMC 测试本身是一项非常重要的工程任务,且系统的试验属于大型试验,有一定的风险,试验前一定要做好各项准备工作。

3.2 航空电源系统 EMC 试验的资料准备

3.2.1 EMC 试验大纲

航空电源系统在进行 EMC 试验前,一定要编写详细的电磁兼容性测试大纲,测试大纲资料的编制要具有可操作性,试验大纲主要内容应包括:

(1) 系统测试所依据的 EMC 标准和执行的相关文件,根据系统研制的具体情况,对测试所选用的标准应进行适当的剪裁,具体剪裁内容应在专业技术文件中注明。

(2) 开展系统 EMC 试验目的、要求及具

体内容。

(3) 航空电源系统试验包括的主要产品和设备。

(4) 被试电源系统的布局 and 系统工作模式,工作模式的选择应具有代表性,能客观正确地反映系统实际工作状态时的电磁兼容性。

(5) 系统电磁兼容性测试采用测试标准中的具体试验项目、频率范围以及特殊试验的组成。

(6) 安装在系统中或与系统有关的电子、电气设备的试验条件和步骤,以及试验过程中的操作程序。

(7) 电线和电缆的布线:必须考虑尽量减少耦合并利用现有的空间获得最佳的间距,根据电线和电缆的干扰与敏感特性来制定电线或电缆的分类方法,电线或电缆应有电磁兼容性分类的标识,例如应区分交流电源线、直流电源线、信号线等。

(8) 试验程序的执行与应用,应包括每个产品和设备的工作方式、监控部位和监控方法。

(9) 明确电源系统电压正常的范围,给出监控交、直流电路或交、直流汇流条的方法,以确保系统工作在正常范围内。

(10) 系统 EMC 试验详细项目、试验内容和测试方法。

(11) 系统在 EMC 试验具体项目中的测试部位。

(12) 系统在 EMC 试验之发射试验中的极限要求及敏感度试验中的敏感性判据。

3.2.2 EMC 测试细则

EMC 测试细则应在 EMC 试验大纲的指导下完成,应是更为具体的测试技术要求,应具有较强的可操作性。主要内容应包括:

(1) 试验前准备:包括 EMC 实验室、测试设备和一些与系统 EMC 测试有关的辅助设备的放置、连接等应明确,与 EMC 测试有关的技术文件必须齐全,被测试系统与其环境界面应有明确的规定。

(2) 测试系统自校准:包括实验室的背景噪声、注入系统的干扰信号的校准和确认、辐射干扰场强的校准等。

(3) 测试项目:因根据被试电源系统的装机平台确定具体测试项目。

(4) 测试步骤:对组装后电源系统的各项

目测试顺序、测试方法给出具体要求。

(5) 数据采集和测试数据处理, 根据标准要求编制和出具测试报告。

(6) 参加试验的单位及分工。

(7) 技术安全措施及有关问题说明, 必要时制定试验安全预案。

3.3 航空电源系统 EMC 试验的辅助设备

航空电源系统在进行 EMC 试验前, 要做好各种准备工作, 尤其是要根据被试航空电源系统的特点, 准备必要的辅助试验设备。进行航空电源系统的基本辅助试验设备有拖动系统、冷却装置、模拟负载、测试设备等。

拖动系统是模拟航空发动机的装置, 驱动发电机按要求的速度旋转。根据电源系统中被试产品的需要, 配备相应的冷却装置。一般用阻性、感性和容性负载, 以模拟实际的负载情况, 负载的性质、功率特性根据试验的需求配置。航空电源系统在试验时需要测试和监控的参数有稳态参数和动态参数, 其中包括电压、电流、频率、波形参数等, 试验时需要根据所测系统(交流、直流)与实际需要和试验精度要求配置相应的测试设备。

3.4 航空电源系统 EMC 试验中的测试准备

在航空电源系统 EMC 试验正式开始测试前, 应做好系统的安装调试等准备工作。由于航空电源系统性能各异、运行环境不同, 没有通用的标准测试方法, 测试一般参考 GJB 1389A—2005《系统电磁兼容性要求》和 GJB 151A/152A—1997 进行。由发电机、电器等组成的航空电源系统, 往往有多种工作模式, 整个系统要求在专业 EMC 实验室进行, 需要特殊的试验条件来保证测试的顺利进行。

根据编制的系统 EMC 测试大纲和测试细则等文件资料完成所有参与系统试验的产品、系统负载、测试监控设施等的连接, 做好各类辅助设备和配套设施的安装等工作。

根据测试大纲等资料规定的系统工作状态, 通过拖动系统将发电机升速到规定的转速下, 然后启动系统正常工作, 监测各项参数是否正常, 在需要测试的不同负载情况下整个电源系统的工作状态应正常、稳定, 随后就可以投入

正式的航空电源系统的电磁兼容性试验了。

4 航空电源 EMC 试验的主要内容

4.1 关于标准的引用和剪裁

航空电源系统的电磁兼容性测试主要依据 GJB 151A/152A—1997 和 1389A—2005 等国家军用标准执行, 这些标准规定了军用电子、电气、机电等设备及其分系统电磁发射和敏感度特性的要求和测量方法, 是针对各种军用电子、电气、机电等设备及其分系统电磁兼容性测试的总要求。而针对具体的航空电源系统来说, 进行电磁兼容性测试取决于系统的性质、类型以及预定使用的平台, 所以这就涉及到测试过程中对所采用的 GJB 151A/152A—1997 等标准进行剪裁的问题。

关于对标准进行剪裁的问题, GJB 151A—1997 中的描述为: “为了避免造成电磁兼容性欠设计和过设计, 对于在特定系统或平台内使用的设备或分系统, 当具体电磁环境和工程分析表明本标准的要求不完全适用时, 可对本标准要求要求进行剪裁, 加严或放宽要求, 以满足整个系统的性能, 提高效费比, 降低成本。但所剪裁的内容应列入设备和分系统的规范、合同或定单中。”

4.2 航空电源开展 EMC 测试的基本项目

涉及航空电源 EMC 测试要求的基本项目见表 1。

表 1 航空电源 EMC 测试要求项目

项目	名称
CE101	25Hz ~ 10kHz 电源线传导发射
CE102	10kHz ~ 10MHz 电源线传导发射
CE107	电源线尖峰信号(时域)传导发射
CS101	25Hz ~ 50kHz 电源线传导敏感度
CS106	电源线尖峰信号传导敏感度
CS114	10kHz ~ 400MHz 电缆束注入传导敏感度
CS115	电缆束注入脉冲激励传导敏感度
CS116	10kHz ~ 100MHz 电缆和电源线阻抗正弦瞬变传导敏感度
RE101	25Hz ~ 100kHz 磁场辐射发射
RE102	10kHz ~ 18GHz 电场辐射发射
RS101	25Hz ~ 100kHz 磁场辐射敏感度
RS103	10kHz ~ 40GHz 电场辐射敏感度

4.3 系统与预定安装平台的关系

航空电源系统的 EMC 测试归纳起来可以分为四类：传导发射测试、辐射发射测试、传导敏感度测试和辐射敏感度测试。在测试过程中，依据系统电磁兼容性测试大纲及相关标准要求进行，一般先进行传导发射、辐射发射项目测试，随后进行传导敏感度、辐射敏感度项目测试。在试验前，一定要对被试航空电源系统的预定安装平台进行确定，表 2 是各类飞机平台的适用表，若某电源系统预期安装在多平台或装置中，则应以其中要求最为严格的那一类为基准。

表中“A”表示该要求适用，“L”表示该项要求应按 GJB 151A—1997 标准相应条款规定加以限制，“S”则表示由订购单位在订购规范中对适用性和极限要求做详细规定，“—”表示该项目要求不适用。

5 航空电源 EMC 试验中的注意事项

5.1 航空电源通用项目试验中的注意事项

在航空电源系统级电磁兼容性试验中，应

关注如下几点：

- (1) 试验样机要保证良好接地；
- (2) 系统的电缆敷设状态应尽量与真实使用状态或实际装机状态接近，要考虑尽量减少耦合并利用现有的空间获得最佳的间距，这样的测试数据才最接近电源系统实际工作状态时的结果；
- (3) 要在系统进入稳定状态后开始测试，以保证测试状态的一致性和可重复性；
- (4) 在辐射发射测试中采用有源杆天线接收辐射场时，天线的接地平板一定要与放置产品的接地板良好搭接，防止由于天线搭接不良而导致测试结果出现较大误差；
- (5) 敏感度测试前要明确系统工作正常的判据，试验中要密切观察系统变化，做到实时监测，若系统工作异常，则应先停止注入干扰，待系统恢复正常后测试其敏感度阈值；
- (6) 测试过程中的检测参数（如测量带宽、驻留时间、扫描步长等）应严格按照标准规定的要求设置，确保不同测试时间测试结果的一致性。

表 2 要求项目对飞机平台的适用性

平台 要求项目		陆军飞机 (含航线保障设备)	海军飞机	空军飞机	陆军地面	海军地面	空军地面
要求项目适用性	CE101	A	L	—	—	—	—
	CE102	A	A	A	A	A	A
	CE107	S	S	S	—	—	—
	CS101	A	A	A	A	A	A
	CS106	S	S	S	S	S	S
	CS114	A	A	A	A	A	A
	CS115	A	A	A	L	—	L
	CS116	L	A	A	L	A	A
	RE101	A	L	—	—	—	—
	RE102	A	A	A	A	A	A
	RS101	A	L	—	L	L	—
	RS103	A	A	A	A	A	A

5.2 航空电源重点项目试验中的注意事项

在进行 RE102、RS103 等采用天线测试项目时，要注意：RE102 项目电场辐射发射测试

用来测量航空电源系统对外的电磁辐射，测试时天线距离系统配置边界 1m，并尽可能将系统最大辐射方向对准测量接收天线；RS103 项目电场辐射敏感度测试用来检验航空电源系统壳

体及所有电缆抗辐射干扰的能力,测量的目的是当由测量系统按 EMC 标准要求给航空电源施加定量的辐射干扰时,检测整个系统工作是否正常,测试时发射天线距离系统配置边界 1m,并尽可能将系统较敏感部位对准测量发射天线。在系统进行电磁兼容性试验时,与试验无关的所有设备要搬离试验区,防止对测试结果造成负面影响。

6 结论

随着航空电源系统的研制进一步向大功率、高度集成化方向发展,航空电源系统在有效空间内所包含的电子、电气设备越来越密集,使系统的功率密度增大,使大功率器件、连接电缆、信号传输线等的数量急剧增加,导致航空电源系统及其配套产品的电磁兼容性问题越来越突出,而系统没有良好的电磁兼容性不但会影响自身的正常工作状态和系统输出的电能质量,而且还会产生大量的电磁干扰影响邻近电子设备的正常工作。本文通过总结航空电源电磁兼容试验的共性问题,使航空电源的 EMC 测试更加科学、全面、合理,为今后其他航空电源的 EMC 测试提供参考,从整体上提升航空电源的电磁兼容性测试水平。

参考文献

[1] GJB 151A—1997. 军用设备和分系统电磁发射和

敏感度要求 [S]. 北京:国防科学技术工业委员会, 1997.

[2] GJB 152A—1997. 军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量 [S]. 北京:国防科学技术工业委员会, 1997.

[3] GJB 1389A—2005. 系统电磁兼容性要求 [S]. 北京:中国人民总装备部, 2006.

[4] CLAYTON R P. 电磁兼容导论 [M]. 闻映红, 等, 译. 北京:机械工业出版社, 2006.

[5] 孔繁斌, 赵金奎. GJB 151A/152A—97 标准应用探讨 [J]. 电源技术应用, 2008, 3.

[6] WESTON D A. 电磁兼容原理与应用 [M]. 杨自佑, 王守三, 译. 北京:机械工业出版社, 2006.

[7] 沈颂华. 航空航天器供电系统 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.

作者简介:

赵金奎 (1975—), 男, 高级工程师, 研究方向:航空电源产品的试验、电磁兼容性检测与研究。

张敏 (1981—), 女, 工程师, 研究方向:仪器设备的计量与测试。

孙海荣 (1975—), 女, 高级工程师, 研究方向:仪器设备的计量与测试。