

# 民机飞控电子系统辐射发射适航 试验技术研究

路宽<sup>1,2</sup>, 李爱军<sup>1</sup>, 李林晓<sup>1</sup>, 汪天博<sup>2</sup>, 王建元<sup>2</sup>

(1.西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129; 2.航空工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:**国内首次承担国产大型客机研制,缺乏机载系统级适航鉴定的技术经验,同时国内外辐射发射研究基本以仿真评估为主,然而仿真结果仅能作为参考,不能在适航鉴定过程中作为符合性证据,并且国内缺少复杂机载系统级的试验经验。以民机飞控电子系统辐射发射鉴定试验为例,将适航符合性需求转化为工程需求,分析民机飞控系统复杂性特征,搭建飞控电子系统级辐射发射试验系统,完善系统级适航鉴定试验和优化过程,为国内外民机复杂系统适航鉴定提供经验。试验结果表明飞控电子系统的辐射发射会因系统试验环境不同而显著变化,同时必须考虑到试验搭建设置对试验通过性的影响,并表明试验符合性满足 RTCA/DO-160G 要求。

**关键词:**适航;辐射发射;鉴定试验;飞控电子系统

**中图分类号:**V216.5<sup>+</sup>7

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2758(2022)02-0337-07

随着电子技术的不断更新发展,民用飞机上的机载电子设备也日益更新,系统越来越复杂<sup>[1]</sup>。面向适航鉴定,系统复杂性及先进设备带来了辐射发射的新挑战:系统如何在复杂环境下通过机载设备辐射发射考核。

针对辐射发射,目前国内外学者主要在产品的芯片发射、屏蔽效能、交联电缆的电磁设计与防护等方面进行了理论分析、计算仿真以及试验测试等相关工作。Heidari 等<sup>[2]</sup>提出一种统计方法来评估印刷电路板(PCB)上的电子系统辐射发射,采用无穷小电偶极子模拟板级的辐射发射情况。马振洋等<sup>[3]</sup>采用仿真手段对机载电子设备屏蔽效能进行研究。Jullien 等<sup>[4]</sup>提出一种基于电磁兼容(EMC)规范方法来设计电缆束,并通过建模方式对直升机发动机控制功能设备进行了仿真结果的验证。Hackl 等<sup>[5]</sup>提出通过改善接缝屏蔽方法,可使辐射发射(RE)电压电平降低。Rafiq 等<sup>[6]</sup>提出了电缆线束接地时差模信号最坏包络预测的等效电路模型和方法,使用电路模拟来计算感应信号。Chen 等<sup>[7]</sup>提

出一种用于表征共模源的基于分量级测量的方法,该方法可用于预测各种线束配置的共模电流。Walunj 等<sup>[8]</sup>提出了确定量线束辐射效率的简单策略,并结合测量的部件级辐射发射水平来预测线缆束的辐射发射情况。

以上文献均对辐射发射做出相关研究,但对民机适航鉴定参考性不大,原因在于:

- 1) 试验设置不需要满足适航符合性;
- 2) 研究对象不具备系统复杂性;
- 3) 验证方法多为仿真评估,缺乏型号试验支持。

国产民用大飞机项目促成国内单位首次承担飞控电子系统级鉴定试验,而目前这在国内机载系统级适航鉴定研究领域属于空白。

本文将以前国产大飞机自主研制为背景,将适航符合性要求转化到工程化方案制定上,分析民机飞控系统复杂性特征,搭建飞控电子系统级辐射发射试验系统,完善系统级适航鉴定试验和优化过程,为国内外民机复杂系统适航鉴定提供经验。

收稿日期:2021-06-18

作者简介:路宽(1987—),西北工业大学博士研究生,主要从事民机飞行控制系统设计与验证研究。

通信作者:李爱军(1972—),西北工业大学教授,主要从事飞行器控制系统设计与智能控制研究。e-mail: liaijun@nwpu.edu.cn

# 1 辐射发射试验适航符合性要求

机载系统辐射发射试验的考核要求,源于 FAR-25.1353 电子设备及安装(a)条款中“除非在极小可能的情况下,飞机任何可能产生的电气干扰不得对飞机或其系统产生危险的影响”,对于机载系统供应商来说,主要是通过合格鉴定试验来表明对该条款的符合性。

在民用航空方面,美国航空无线电委员会(RTCA)第 135 分会(机载设备环境条件和试验方法分会)制定 RTCA/DO-160G<sup>[9]</sup> 机载电子设备环境试验方法第 21 章中规定了详细的辐射发射测试方法和极限值,以验证被安装的设备符合对干扰控制的能力要求。

## 1.1 试验目的

辐射发射试验的目的是考核设备发出的电磁干扰不会超过规定的水平。这些辐射可以在连接的被测件(EUT)之间的线缆上进行,也可以从一根电缆辐射到另一根电缆或 EUT 上。这些辐射能量也可以直接从 EUT 孔缝发射出来。

## 1.2 辐射发射原理

从 EMC 角度来看,可将一个电路中传递信号分成 2 类,即差模和共模<sup>[10]</sup>。传递信号电路需要 2 个导体构成,作为信号往返路径。当电流在 2 个导体中的幅度相同、方向相反时,这种传输模式称为差模。然而在实际情况中,差模难以单独存在于电路中。电路与其周围结构间的大量寄生参数导致有电流从电路流向周围结构,如电路板上的金属平面、设备的金属外壳等。由于电路与其周围结构不能严格对称,从电路流向周围的电流破坏了差模信号的平衡,其往返电流不再能够相互抵消,没抵消的那部分便形成共模。共模电流在电路中传输时通常为同相位的,然后通过电路周围的其他结构返回,形成完整回路。电路中差模与共模电流的路径如图 1 所示,其中  $I_d$  为差模电流,  $I_c$  为共模电流。

当信号以差模方式传输时,由于电路中的电流幅度相同、方向相反,所以当电路在空间上的路径十分接近时,其在空间中产生的电磁场方向相反,而幅度近似相等,几乎可以相互抵消。即差模传输信号如果没有形成较大的环路面积时,在空间中电磁场的辐射比较小。共模信号的幅度相对于差模信号要小得多,但其传输路径使得在空间中产生的电磁场

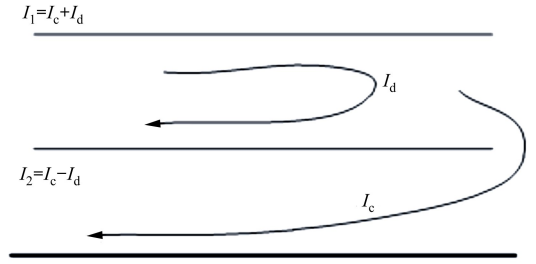


图 1 电路中的差模电流与共模电流

不能很好地相互抵消,所以共模电流通常能产生较高的电磁场辐射。

综上所述,被测产品辐射发射通常来源于 2 类:形成了较大环路面积的差模信号和共模信号。

## 1.3 试验方法

RTCA/DO-160G 中辐射发射试验的测量频率范围为 100 MHz~6 GHz;将 EUT 和试验测试设备按照图 2 进行连接和布置。EUT 工作时,通过天线接收辐射和干扰测量仪器(如频谱分析仪)扫频测试结果来记录 EUT 辐射发射的射频噪声电平和波形。

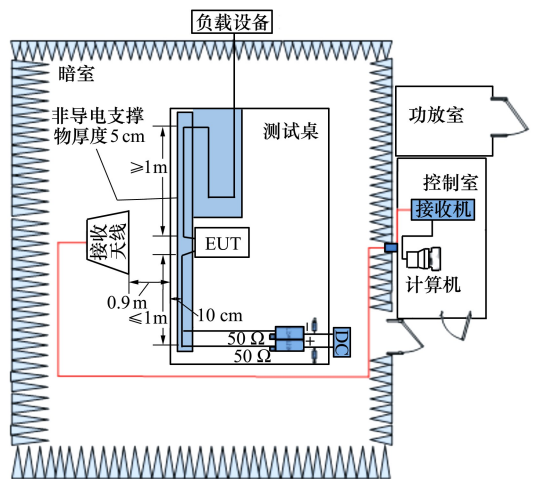


图 2 辐射发射试验布置图

## 1.4 符合性布局要求

RTCA/DO-160G 辐射发射试验对现场布局提出明确要求,现场布局直接影响到适航审查符合性及试验通过性。辐射发射试验布局示意图如图 2 所示,需要特别注意以下要求。

1) EUT 布置: EUT 应布置在试验台接地平板上,如果 EUT 有外部接地端子,应将其连接到接地平板上,以确保试验期间满足安全操作条件。搭接线长度应符合安装说明的规定。

2) 接地平板:接地平板采用紫铜板、黄铜板、铝板。紫铜板和铝板厚度至少应为 0.25 mm,黄铜板的厚度至少为 0.5 mm。接地平板面积大于 2.5 m<sup>2</sup>,短边至少为 0.75 m,两端与暗室或屏蔽室金属墙壁水平搭接,搭接间隔应不大于 1 m。直流搭接电阻建议不大于 2.5 mΩ。

3) 电搭接:只有 EUT 设计和安装说明中有规定时,设备外壳才能与安装基座等搭接在一起或将其搭接在接地平板上。搭接线应与安装说明中的规定相符。试验时设备、连接器和线束的电搭接应符合适用的安装接口文件中规定的飞机实际安装情况,试验报告中应描述采用的搭接方法。

4) 互连线缆:构型符合安装接口文件规定。长度至少 3.3 m,不超过 15 m。敷设 1 m 长度,按实际情况分隔,平行于配置前边界布线,剩余部分则按“Z”字型向后排列,最近线缆距接地平板前缘 10 cm,和 EUT 连接处的弯曲部分不应超出接地平板前缘。与接地平板隔离按飞机安装方式进行绑扎,非导电支撑物支撑于接地平板上方 5 cm 处。

5) 电源线:构型符合安装接口文件规定。长度要求 1 m±10 cm。电源线与控制线和信号线按机上实际情况布线,若机上实际布线未知,电源线应与控制线和信号线分开布线。按实际情况分隔,平行于配置前边界布线。当电源回线为本机地时,直接连接至试验台(长度小于 1 m)接地平板(符合规定接口文件)。非导电支撑物支撑于接地平板上方 5 cm 处。

### 1.5 通过/失败判据

将试验中测得的 EUT 发射的传导/辐射射频噪声电平和波形与 RTCA/DO-160G 第 21 章对应类别的射频噪声限制曲线对比,若 EUT 的辐射射频噪声低于限制电平,则说明 EUT 的射频电磁噪声发射得到了有效控制,符合需求,试验通过;否则应判定为失败。

## 2 飞控电子鉴定系统描述

飞控电子鉴定系统(FCE qualification system)的建立适用于 RTCA/DO-160G 环境、电磁、电源及集成 HIRF 闪电试验,通过系统级鉴定试验,表明 EUT 和鉴定试验系统在适航鉴定系统中的符合性。

### 2.1 飞控电子鉴定系统

一个典型民机飞控电子鉴定系统,应该满足实际系统的交联,组成部分如图 3 所示。

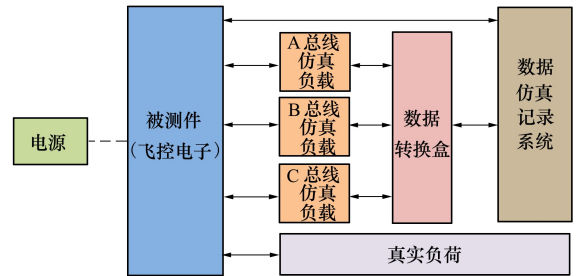


图 3 典型飞控电子鉴定系统

被测件(EUT):主要考核对象,飞控电子系统中主要为飞控电子。

真实负载:实际飞机设备(如飞机指令传感器)。

仿真负载:仿真飞机设备,需设计为与真实设备相同的电源载荷,闪电/电磁干扰保护电路,数据接口等。

试验电缆:尽可能逼近机上构型符合 RTCA/DO-160G 要求的电缆。

鉴定试验软件:基于飞控实际软件版本开发,状态与鉴定版本保持一致。

系统判据:基于飞控系统功能及安全性需求,需要在飞控电子系统运行中实施判据监控。

数据获取系统:实现鉴定系统的数据通讯和采集,并具备加载鉴定系统判据、实时监控和数据获取功能。

在鉴定系统连接和基础检查后,试验操作人员先对数据仿真记录系统进行上电,通过数据仿真设置输入数字激励;待系统环境稳定后,对系统进行上电,待系统稳定后,调整真实负载输入端参数,在全局复位后,使系统在预期的工作场景下运行。待系统运行稳定后,施加鉴定环境条件,考核系统并实时监控,同时记录数据结果。

### 2.2 飞控电子鉴定系统辐射发射试验准备

辐射发射试验本身很简单,但在型号首飞和鉴定中却证明是耗时最长的试验,原因是飞控电子鉴定系统的规模和复杂性,原本对 EUT 的考核,演化为对于整个鉴定系统的考核。为顺利通过辐射发射鉴定考核,应提前做好以下准备:

1) EUT 辐射发射摸底:在 EUT 进入系统前,应

先完成 EUT 辐射发射的 LRU 级工程摸底, 确保 EUT 本身通过, 或者规定出 EUT 在特定频点的超限容差, 这项数据一般来自于以往同类产品的经验数据和摸底工程数据, 例如允许某飞控产品在 RTCA/DO-160G 第 21 章 M 类 120 MHz 超限 6 dB。

2) 试验电缆和连接器: 试验电缆和连接器的选取需要充分代表该 EUT, 用于支持适航审定。安装的逼真程度取决于机载系统的关键性等级。对于电传飞控系统这类极其关键系统, 需要极高的逼真度。

3) 系统布局设计: 依据试验室场地实际情况、系统具体连接组成情况, 设计系统布局, 主要依据 RTCA/DO-160G 对试验件的布置要求。由于飞控电子鉴定系统数量庞大, 实验室一般只有提供一个独立暗室, 因此一般将整个飞控系统按照陪试件的 2 个部分分成尽可能远的 2 个区域块, 将所有负载等陪试件也放入测试区。

民航飞控电子鉴定系统布局设计如图 4 所示。

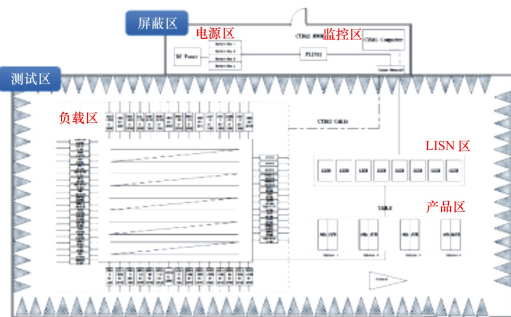


图 4 飞控电子鉴定系统布局设计

4) 系统屏蔽、接地和搭接: 恰当的电气屏蔽、接地和搭接是系统通过辐射发射试验的关键要素。按照飞机级需求, 采用就近接地和搭接方式, 满足最大阻抗测量要求, 某型号中要求系统接地最大阻抗不得高于 5 mΩ。

### 3 适航鉴定试验过程

2020 年笔者与团队进行了为期数月的民航飞控电子系统级辐射发射鉴定试验, 期间进行了大量改善优化工作, 最终顺利通过某型号适航鉴定试验审定。现将适航辐射发射鉴定试验技术工作经验总结如下。

#### 3.1 初始试验摸底

在初始布局时, 主要考虑将被测件尽可能远离

陪试件和负载, 电缆按 RTCA/DO-160G 要求布置走向, 搭建飞控电子鉴定系统辐射发射试验布局, 初始布局照片如图 5 所示。



图 5 飞控电子鉴定系统初始布局照片

在完成初始集成布局后, 进行辐射发射试验摸底, 结果如图 6 所示。

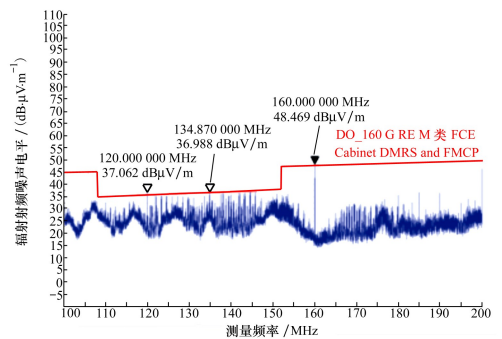


图 6 系统初始布局辐射发射效果 (100~200 MHz)

#### 3.2 技术分析

根据测试结果, 辐射发射的超标点分布在 160 MHz 以下, 该频段对应的电磁波波长较长, 远大于被试产品上孔缝的尺寸, 初步定位为互连线缆的辐射导致测试结果超标。

针对 RTCA/DO-160G《机载设备环境条件和试验程序》布局要求, 进行分析, 发现系统布局中存在以下问题。

1) 部分线缆未放置在金属桌面上而是悬在空中。金属桌面为线缆上的共模干扰电流提供了回流路径, 当互连线缆下方存在完整的金属桌面时, 共模干扰电流将在桌面上沿着电缆同走向回流, 这将一定程度上减小线缆在空间的电磁辐射。而当线缆悬空放置时, 共模电流无法从金属桌面回流, 增大了干扰电流的环路面积, 增大了线缆的空间辐射。

2) 互联电缆并未按实际情况足够分开, 增大了

互连电缆之间的耦合,干扰信号耦合在大量的互连电缆上,增大了线缆的空间辐射。

3) 部分被测产品放置在木桌子上,由于搭接阻抗不够低,不但没有为干扰电流流入地提供低阻抗路径,反而有可能引入新的共模干扰源并增加辐射发射。

4) 不同金属桌的连接处没有良好搭接。当干扰电流穿过不同金属桌之间的连接处时,如果没有良好搭接而存在缝隙将改变电流的路径,增大对外辐射。

5) 由于没有足够的金属接地桌,导致试验电缆没有尽可能展开而是卷曲或形成环路,增加了线缆的对外辐射。同时 RTCA/DO-160G《机载设备环境条件和试验程序》中对于适航鉴定试验考核集中在以下 2 点:①试验结果通过性;②适航符合性。

摸底时采用的试验布局也不能满足对于 RTCA/DO-160G 中符合性的布局要求,因此需要对试验布局进行重新优化。

### 3.3 系统布局优化

通过以上分析,采取以下策略进行整改:

1) 调用更多金属试验桌,将 2 个 EUT 桌移动到一起;允许桌子间使用粘合铜带,以提高这 2 个 EUT 桌之间的接地,并提供 EUT 桌、试验电缆桌和负载桌更多接触面积。

2) 将 EUT 的试验电缆束尽可能分开,减少耦合辐射发射。

3) 通过固定物将所有桌子垫为等高,确保电缆在穿越不同桌面时,具备更好的走向,并严格满足 RTCA/DO-160G 要求。

4) 对于所有非 EUT 设备,也需要确保所有线缆束都保持在桌子上面 5 cm 处,因为它们的电缆都直接连接到 EUT。经过布局优化后,最终飞控电子鉴定系统布局如图 7 所示。



图 7 飞控电子鉴定系统布局优化

### 3.4 系统鉴定

在完成布局优化后,对飞控电子系统进行鉴定考核,需要满足以下条件:

1) 飞控系统在考核过程中处于正常工作模式下,如图 8 所示。



图 8 飞控电子鉴定系统处于正常工作模式

2) 飞控电子系统在布局优化后改善效果,如图 9 所示。

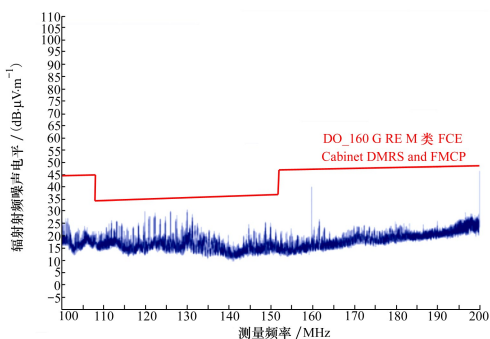


图 9 飞控电子鉴定系统布局优化后辐射发射效果改善(100~200 MHz)

试验结果表明,通过对 3.2 节中问题进行整改,辐射发射结果显著改善,对比图 6 和图 9,在 100~150 MHz 之间,系统辐射发射普遍下降 5~10 dB,在 140 MHz 附近,辐射发射下降更加明显,达到 15~20 dB。对于 160 MHz 的单点超标,经过整改后,也由原来的 48 dB,下降到 40 dB,主要由系统电缆走向的搭接改善导致,而不是由产品发射导致超标。

3) 飞控电子鉴定系统在辐射发射全频段(100~6 000 MHz)考核过程中满足鉴定试验大纲中辐射发射要求,如图 10 所示。在适航鉴定试验中同时满足结果通过性和适航符合性的双重要求。

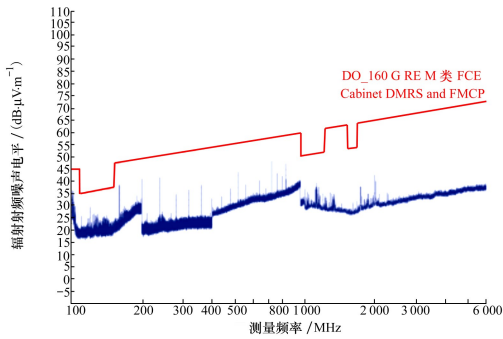


图10 飞控电子鉴定系统通过全频段辐射发射鉴定(100~6 000 MHz)

## 4 结 论

辐射发射试验成功的关键是试验现场的搭建设置。试验桌到试验室的合理搭接、试验桌之间的完

整搭接及保持线束高度 5 cm 的接地平面,都能降低辐射发射试验失败的风险。当前试验环境是在桌子之间使用铜带、通过夹子固定桌子铜带尾端的搭接方法来实现的,不能确保可以提供良好的高频低阻抗条件和搭接铜带的整体宽度(除非在桌子上采用导电胶),这就会导致线束在通过不同高度桌面时会有高度差,增加适航符合性鉴定不通过的风险。

由于飞控电子系统的复杂性和需要严格满足的适航符合性,虽然射频辐射发射试验本身并不复杂,但在型号首飞和鉴定中却是耗时最长的试验。系统级适航辐射发射试验的通过,能够显著表明民机飞控系统在复杂电磁环境下能满足 RTCA/DO-160G 的辐射发射要求,为全机辐射发射任务提供有力支撑,同时为其他系统级产品辐射发射适航鉴定提供参考。

## 参考文献:

- [1] 赵春玲. 支线飞机电磁环境效应设计与验证[M]. 上海: 上海交通大学, 2017  
ZHAO Chunling. Design and verification of electromagnetic environmental effects of branch aircraft[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017 (in Chinese)
- [2] HEIDARI Salomeh, MEHRI Milad, MASOUMI Nasser. System level estimation of a PCB electromagnetic radiated emission[C] //2016 IEEE 20th Workshop on Signal and Power Integrity, 2016
- [3] 马振洋, 左晶, 史春蕾, 等. 机载电子设备屏蔽效能测试与优化[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 32-53  
MA Zhenyang, ZUO Jing, SHI Chunlei, et al. Test and optimization of shielding effectiveness of airborne electronic equipment [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(7): 32-53 (in Chinese)
- [4] JULLIEN Charles, GENOULAZ Jérôme, DIEUDONNÉ Anca, et al. EMC harness design applied to helicopter engine from the model to the measurement validation[C] //2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity, New Orleans, 2019
- [5] HACKL Herbert, AUINGER Bernhard, DEUTSCHMANN Bernd, et al. The shielding effect of a multi-cable harness as function of IC output termination impedance[C] //2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2018
- [6] RAFIG M Ahsan, AMIN Muhammad, YOUSAF Jawad. Effect of shielding, grounding, EMI filters & ferrite beads on radiated & conducted emissions[C] //2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, 2013
- [7] CHEN Chinch. Predicting vehicle-level radiated EMI emissions using module-level conducted emis and harness radiation efficiencies[C] //IEEE EMC International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Montreal, 2002
- [8] WALUNJ Sameer, MAKHARASHVILI Tamar, HWANG Chulsoon, et al. Direct measurement and representation of common-mode sources in cable harnesses[C] //IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity, 2020
- [9] RTCA Inc. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment[S]. RTCA/DO-160G, 2010
- [10] MARDIGUIAN Michel. Controlling radiated emissions by design[M]. 3rd ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2014

## Research on airworthiness test technology of radiation emission in civil aircraft flight control electronic system

LU Kuan<sup>1,2</sup>, LI Aijun<sup>1</sup>, LI Linxiao<sup>1</sup>, WANG Tianbo<sup>2</sup>, WANG Jianyuan<sup>2</sup>

(1.School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;  
2.AVIC Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** It is the first time that domestic civil large aircraft has been developed, which lacks the technical experience of airborne system-level airworthiness qualification, and the research of radiation emission at home and abroad is mainly based on simulation evaluation, while the simulation results are used only as a reference in the airworthiness qualification process and cannot be used as evidence of conformity. And there is little airworthiness test experience on complex system-level. In this paper, taking civil aircraft flight control electronic system as an example, translate airworthiness compliance requirements into engineering requirements, analyze the complexity characteristics of civil aircraft flight control system, build flight control electronic system level radiation emission test system, and improve the system level airworthiness qualification test and optimization process, providing experience for the airworthiness qualification of civil aircraft complex system. The results show that the radiation emission of flight control electronic system is greatly affected by the system environment, and it is necessary to consider the influence of test setup layout and show the system compliance to the RTCA/DO-160G requirements.

**Keywords:** airworthiness; radiated emissions; qualification test; flight control electronic system

**引用格式:**路宽, 李爱军, 李林晓, 等. 民机飞控电子系统辐射发射适航试验技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(2): 337-343

LU Kuan, LI Aijun, LI Linxiao, et al. Research on airworthiness test technology of radiation emission in civil aircraft flight control electronic system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(2): 337-343 (in Chinese)