

基于现场的电磁干扰工程分析方法

李君惠¹, 曹德垚², 陈超², 吴健国³

(1.四川九洲空管科技有限责任公司, 四川 绵阳 621000;

2.陆军航空兵军事代表局驻成都地区军事代表室, 成都 610036;

3.中航工业直升机研究所, 江西 景德镇 333001)

摘要: **目的** 探讨机载平台的通信设备电磁干扰故障分析方法。**方法** 以某型机载平台的电子通信设备电磁干扰故障为对象, 在满足 GJB 151 或 DO-160 等电磁兼容要求和测试标准基础上, 分析安装条件、系统架构及工作原理, 通过计算和必要的测试建立故障分析数据表单, 对被干扰设备非正常工作条件进行解析和仿真测试, 得出解决方案。**结果** 总结出基于现场的电磁干扰工程分析方法。**结论** 外场条件下测试手段有限, 通过该方法, 可结合平台实际安装情况, 给出针对性的有效解决方案。

关键词: 电磁兼容; 电磁干扰; 机载电子设备; 工程电磁分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.05.004

中图分类号: TJ410.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)05-0014-05

Engineering Analysis of Electromagnetic Interference Based on Field

LI Jun-hui¹, CAO De-yao², CHEN Chao², WU Jian-guo³

(1.Sichuan Jiuzhou Aerocont Technologies Co., Ltd, Mianyang 621000, China;

2.Chengdu Station of Army Aviation Military Representatives Office, Chengdu 610036, China;

3.The Helicopter Institute of China National Aviation Corp Industry, Jingdezhen 333001, China)

ABSTRACT: Objective To discuss analysis technique for EMI failure of communication equipment in airborne platform.

Methods EMI failure in electronic communication equipment of a certain airborne platform was taken as the researching object.

Based on requirement and test standard of the EMC (GJB151 or DO160), installation condition, system architecture and working principle were analyzed. The failure data form was established by calculations and necessary tests; and the solution was obtained by analyzing and simulating the abnormal working condition of jammed equipment. **Results** Analysis technique based on EMI experiment was concluded. **Conclusion** Based on the actual platform installation, this analysis technique could provide effective solutions under limited testing method in external conditions.

KEY WORDS: electro-magnetic compatibility (EMC); electro-magnetic interference (emi); airborne electronic equipment; engineering analysis of electromagnetic

对于机载、舰载或其他大型装载平台、电气系统及电子设备而言, 电磁兼容是个永恒的话题。由于电路中信号源、非线性器件的存在, 产生了不同强度的无用电磁信号, 通过数个传播途径, 产生的电磁干扰

会造成对系统或设备功能不同程度的影响^[1]。

对电气系统或电子设备来说, 设计之初需要遵循电磁兼容设计规范、系统间兼容性设计要求、以及测试标准要求。例如根据用户的不同使用环境, 电子设

收稿日期: 2018-01-03; 修订日期: 2018-03-05

作者简介: 李君惠 (1973—), 女, 四川成都人, 高级工程师, 主要研究方向为微波射频技术发展、电磁兼容仿真设计、空管系统及设备测试技术等。

备需要满足 GJB 151^[2]或 DO-160^[3]等军用或民用电磁兼容要求和测试要求。通常采用仿真设计、测试评估等技术可以保证电气系统或电子设备自身具有一定的抗扰度，辐射或传导电磁干扰小于一定的门限值，能够符合测试标准的定量要求^[4]。小到设备功能电路、模块及分机的布线、布板及布局，大到装载平台上的设备、天线及电缆走线、位置摆放等，都需要进行各层级系统仿真。尤其是模拟仿真各种电磁辐射干扰情况，慎重设计系统或设备安装布局，以确保各系统或设备能够适应装载平台环境、运行良好、可靠工作。

在实际现场，总会出现电气设备被复杂电磁信号干扰，导致工作不正常的情况。现场可采用的测试手段非常有限，仅能得到少数数据信息，要分析得出原因、快速解决故障采用工程分析方法较为可行。

基于现场的电磁干扰工程分析方法是指在外场实际使用环境下，对出现的电磁干扰故障从设备本身、安装环境等信息资源中，提取出有用数据进行分析、帮助判断，并有效解决问题的综合分析手段。文中以某型机载平台的电子通信设备干扰故障为例，主要对工程分析方法的思路进行介绍。

1 机载平台电磁兼容故障现象简述

故障现象描述：在某直升机平台上，当 VHF 电台（简称超台）以 X_1 、 X_2 及 X_3 三个频段发射时，空管应答机与地面测试设备联试时出现应答概率明显下降甚至无应答的现象。关闭超台发射后，空管应答机应答概率恢复正常。超台和空管应答机的架构如图 1 所示。

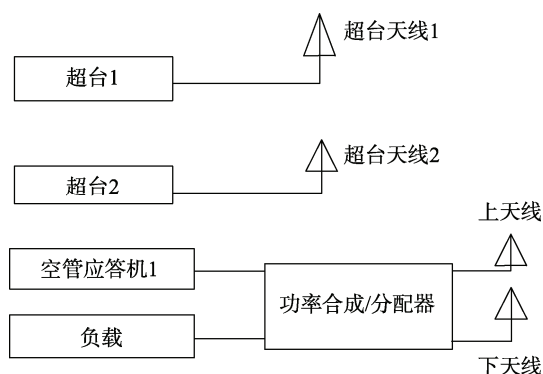


图 1 VHF 电台和空管应答机的架构组成

由图 1 可知，该机载平台上装有 2 台相同的 VHF 电台，分别通过天线 1 和天线 2 进行发射及接收，统一简称超台 1、超台 2；一台空管应答机，通过上、下天线发射及接收电磁信号。地面试验时，应答机与地面测试设备进行无线联试，进行应答率检测。

空管应答机主要用于空中交通管制中，机载空管应答机接收地面二次雷达或其他机载询问机的询问

信号，进行相应模式的回答，实现地面机场或询问飞机对飞机航班、位置等的监视^[5]。

现场地面联试时，一般采用地面测试设备模拟询问信号，进行应答机主要功能及性能的验证。应答机接收到 1030 MHz 有效询问信号后，才能发出 1090 MHz 应答信号，应答概率则由地面测试设备根据收到的正确应答次数进行统计，其基本工作原理如图 2 所示。

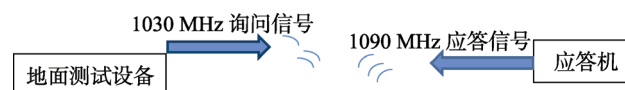


图 2 应答机工作原理

2 基于现场的电磁干扰分析方法与故障数据构建

电磁故障采用仿真建模方式进行干扰分析是最为科学的方法，基本思路是采用 Systemvue、EMPro 等专业仿真软件，建立相对精准的平台三维结构模型、设备数字模型等，可以进行电磁环境和设备的条件参数仿真，根据需要改变其中的条件参数值，模拟出故障趋势图，进一步分析得到解决方案。仿真建模中，建模准确度、仿真人员专业能力、对系统和设备的熟知程度等因素均会影响分析结果，不易得到与实际干扰类似的数据结果，需反复修改参数，不断迭代，仿真耗时较长。从长期来看，能达到一次投入、数据长期有效和反复修改使用的效果。

工程分析方法作为仿真分析的补充方法，其优势是针对性强、时间响应迅速，更适用于现场干扰故障应急处理。该方法依据规范和流程化的分析手段，可确保分析数据无遗漏，分析判断方向无失误，能帮助快速定位原因，解决电磁干扰故障。

2.1 分析方法思路

图 3 给出了工程电磁干扰分析方法的主要流程：通过对干扰数据、干扰触发条件的逐一分析，明确定位干扰原因；进行故障复现验证干扰原因是否判断准确；原因定位准确，针对具体问题形成解决方案。

需要说明的是，图 3 中所进行的仿真复现与软件仿真有所区别，主要以试验室测试场景仿真为主，在试验室中搭建被干扰设备测试环境，以信号源为主要仪器模拟现场可疑干扰信号注入被干扰设备，力求试验室复现故障现象。解决方案则在复现故障的基础上进行，找到问题点进行故障排除，故障排除方法有效后，方可作为解决方案。

在该干扰示例中，依据工程分析方法思路进行的电磁干扰三要素分析结果如图 4 所示。

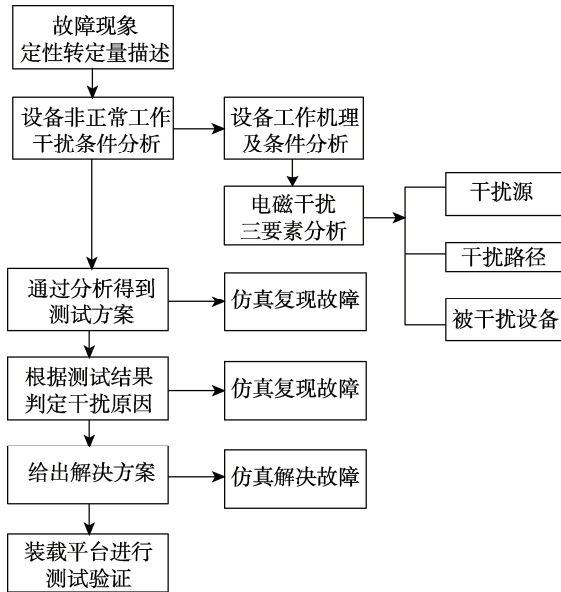


图3 电磁干扰工程分析方法思路

通过三要素分析,能够有针对性地采用干扰源屏蔽、滤波;途径阻断;敏感源提高抗干扰能力等多种

方法得出解决故障的实施方案^[6]。

2.2 基于现场的故障数据构建

应答机应答概率不正常故障主要原因有:应答机没有收到询问信号或信号被干扰,导致无应答或应答次数下降,应答概率为0或概率下降;应答机发射信号被干扰,导致地面测试设备灵敏度降低,处理的有效应答次数降低,应答概率下降。

根据现场处理措施“关闭超台发射机”,再进行地面测试设备和应答机联试,应答机概率恢复正常的现象,可以判断干扰源为超台发射机,干扰对象为应答机或地面测试设备,导致应答概率下降^[7]。电磁干扰信号的类型主要包括同频干扰、交调及互调、阻塞干扰等,由应答机和地面测试设备灵敏度和调制方式等信息,可知相应抗干扰条件的容限值,按照超限条件进行排查即可确定干扰原因^[8]。

将故障现象定性转定量描述的目的是为了抽取有用的输入数据,便于更清晰地进行分析。由2.1描述可知,能够抽取的输入数据见表1。通过输入数据

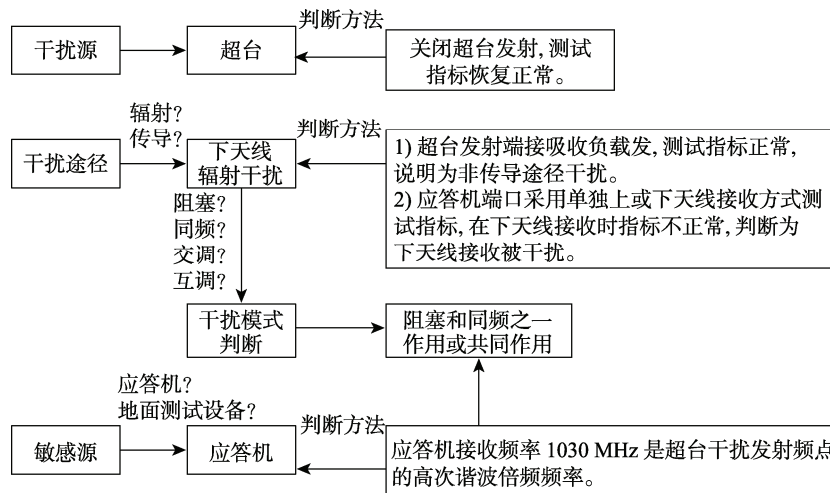


图4 电磁干扰三要素分析

表1 分析数据构建表

序号	输入数据信息	数据代号	用途	备注
1	超台发射频段	X1\X2\X3	用于判断和空管应答机接收频率的关系	
2	超台	发射功率 Pt0	应答机端口阻塞干扰值计算	
3		应答概率 C	是否故障的门限数据值	
4	空管应答机	发射功率 Pt1	用于地面测试设备接收强度计算	该例中,超台
5		接收灵敏度 Pr1	用于应答机干扰信号门限值分析	发射频段处
6	地面测试设备	发射功率 Pt2	用于应答机接收强度计算	于空管应答
7	两设备天线距离	接收灵敏度 Pr2	用于地面测试设备干扰信号门限值分析	机接收频率
		超台1到上天线 D11	上天线端口超台1干扰信号衰减值计算	的低次分频
		超台1到下天线 D12	下天线端口超台1干扰信号衰减值计算	频率及接收
		超台2到上天线 D21	上天线端口超台2干扰信号衰减值计算	带宽内。
		超台2到下天线 D22	下天线端口超台2干扰信号衰减值计算	
8	地面联试设备至应答机天线距离	到上天线 D31	有效询问及应答信号信道衰减值计算	
		到下天线 D32	有效询问及应答信号信道衰减值计算	

可以了解辐射源的最大能量值、敏感源的接收端口干扰信号强度等有效信息，通过计算得到分析数据，为干扰机理分析提供依据。

3 电磁干扰测试干扰源判定

通过上述计算和分析，可以得到以下测试方案。

1) 应答机干扰容限有线测试。通过实验室仿真测试，采用标准仪器进行干扰源模拟，测试得到注入应答机端口的抗阻塞和同频干扰能力数据，作为干扰排查依据。

2) 电台端口发射功率有线及无线测试。在应答机端口测试超台辐射主频功率值，判断是否超过应答机阻塞干扰极限要求。

在超台 1 和超台 2 端口分别测试发射主频高次谐波功率值，去除超台 1 及超台 2 天线离上、下天线的距离带来的空间传输损耗影响后，判断是否超过应答机同频干扰极限要求。

干扰工作机理分析：通过测试和数据对比，发现应答机接收的超台 2 发射机主频辐射强度超过了阻塞极限要求；超台主频高次谐波分量处于应答机同频干扰的临界点，应答机概率故障由电台阻塞及同频干扰共同引起。经实地观察，超台 2 天线位置离应答机下天线距离过近，超台发射时，辐射到应答机端口的超台主频信号超过了应答机最大抗阻塞功率，设备内接收前端放大器饱和，非线性失真产生了丰富的谐波成分。由于超台主频 X1/X2/X3 三个频段均为应答机接收主频的低次分频及附近频率，应答机内部产生的谐波恰好落在接收带内。其次，超台高次倍频同频信号也进入应答机接收通道，以上信号均无法抑制，导致了接收机无法正常工作^[9]。

4 形成现场解决方案

针对分析结果，可选的解决方法有两个。

1) 在载机平台上改变天线安装位置，使得两个设备保持一定的安全距离。

2) 不改变天线物理位置，在应答机上加装抗阻塞滤波器，抑制超台的大功率主频信号，增强应答机抗阻塞干扰能力。在超台增加大功率低损耗带外抑制滤波器，加强高次谐波的抑制，避免对应答机造成同频干扰。

方法 1) 中，超台或空管应答机天线的挪动，都会对载机现有结构造成影响，也不排除会对其他电气设备形成新的电磁干扰，实现风险和落实难度大，最终决定不考虑调整超台或应答机天线物理位置。

方法 2) 是针对空管应答机应答概率故障提出的解决方案。实际中，应答概率仅为应答机的一个性能

指标，需要考虑方案变动后造成的应答系统全局指标变化风险。例如滤波器增加了系统插入损耗，引起应答机接收灵敏度下降、发射功率损耗以及电台发射功率降低，会使应答机和电台本身监视或通信作用距离指标下降；新增滤波器的安装方式引起平台结构适应性改进也应当一并考虑。因此，在现场按照分别在电台和应答机端口增加带外抑制滤波器，同时增加滤波器进行应答机概率测试验证，综合考量应答机和电台本身的指标冗余度、阻塞和同频干扰对应答概率造成的影响程度，以最小代价形成实际解决方案。

根据分析数据，进行了抗阻塞滤波器设计，重点做了带外抑制和低插损指标设计，尽量兼顾对应答机的其他重要指标影响。电台发射同频干扰滤波器采用低插损货架滤波器产品，在 L 波段的抑制度 20 dB 以上即可满足要求。滤波器完成设计后，整个应答机系统进行现场测试验证。

现场试验中，应答天线端口增加抗阻塞滤波器有明显改善效果。超台发射时，应答机全动态范围应答概率满足指标要求（标准值为灵敏度时应答概率优于 90%），实际测试中，接收灵敏度以下 3 dB 附近概率为 90% 以上。此时在电台端口追加同频干扰抑制滤波器，接收灵敏度以下 3 dB 概率提升为 100%。

由此可知，增加抗阻塞滤波器后应答机接收灵敏度有约 3 dB 余量，说明应答机系统工作可以接受天线端口的滤波器插损，加之应答机的发射功率也有一定设计余量，增加抗阻塞滤波器对应答机的重要指标无影响，增加该滤波器可行。

电台发射端口增加同频干扰抑制滤波器使得应答概率由 90% 上升为 100%，证明了应答概率干扰影响大部分由阻塞干扰引起，同频干扰产生影响较小（概率影响为 10% 左右）。经现场测试，电台发射功率几乎无冗余量，考虑到增加抗阻塞滤波器已能满足应答概率要求，为避免电台发射功率损失，造成电台作用距离影响，在电台发射端口不加装同频干扰滤波器，以增加抗阻塞滤波器作为最终解决方案，如图 5 所示。

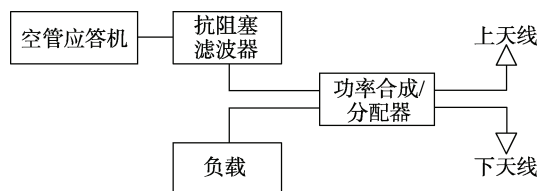


图 5 实际现场解决方案

5 结语

文中简要描述了机载平台的系统间电磁干扰问

题,以必要的现场干扰门限值、实验室测试数据及设备指标数据等构建了数据表单,对机载平台电磁干扰原因进行了全面梳理,从而确定了干扰源,据此提出了解决方案并通过现场检测验证。

通过该研究,总结出电磁干扰的工程分析方法,在有限的现场测试及试验条件下,能够帮助工程师理清思路,逐一分析疑似干扰源,结合载机平台实际情况,给出有效的解决方案。

参考文献:

[1] 刘培国. 电磁兼容基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
 [2] GJB 151B—2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感

度要求与测量[S].
 [3] RTCA DO-160E, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment[S].
 [4] 王培章, 钱祖平, 于同彬. 电磁兼容技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
 [5] RTCA DO-181E, Minimum Operational Performance Standards for Air Traffic Control Radar Beacon System / Mode Select (ATCRBS/Mode S) AirborneEquipment[S].
 [6] GJB/Z 124—99, 电磁干扰诊断指南[S].
 [7] MIL-STD-464, Electromagnetic Environment Effects Requirements for Systems[S].
 [8] 杨克俊. 电磁兼容原理与设计技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
 [9] 缪星星. 机舱内电子设备与通信导航系统间的电磁兼容性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.