

# 一种新的无人机系统级电磁兼容测试法\*

李 勃<sup>1</sup>, 黄大庆<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016;  
2. 南京航空航天大学 无人机研究院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 分析了实际电磁环境对无人机的影响, 得到对无人机造成伤害的电磁环境场强极限值在  $0.1 \sim 8 \times 10^3$  MHz 频段中为  $60 \sim 200$  V/m。根据无人机中存在的辐射干扰和传导干扰的共性特征, 得到无人机系统级电磁辐射极限场强在  $0.1 \sim 2 \times 10^3$  MHz 频段中为  $10 \sim 60$  V/m。由此提出了一种具有实际可操作性的无人机电磁兼容测试法。依照军标 GJB3567-99 以及在实际飞行场地中进行测试, 结果显示, 通过该测试的无人机各机载设备工作正常。

**关键词:** 电磁兼容; 无人机; 系统级; 测试

**中图分类号:** TN973.3; V279 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)02-0031-05

## An Innovative EMC Test Method at the System Level of UAV

LI Bo<sup>1</sup>, HUANG Daqing<sup>2</sup>

(1. College of Information Science and Technology //  
2. Unmanned Aerial Vehicle Research Department, Nanjing University of  
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The real electro magnetic (EM) environment effect on unmanned aerial vehicle (UAV) is analyzed. And the max harmful outside word EM environment level to UAV is gained as  $60 \sim 200$  V/m in  $0.1 \sim 8 \times 10^3$  MHz bandwidth. The EMC standard at the system level of UAV is advanced as  $10 \sim 60$  V/m in  $0.1 \sim 2 \times 10^3$  MHz bandwidth after analyzing the common EM radiated and conducted characteristics of UAV. Therefore, an operable EMC test method at the system level was proposed. The UAV was tested in real flying ground and by simulated electromagnetic pulse (EMP) test according to military testing method GJB3567-99. The results reveal that all air-borne equipments based on this test can work normally and do not degrade.

**Key words:** electromagnetic compatibility; unmanned aerial vehicle; system level; test

无人机电磁兼容性设计的最终目的是保证全系统的电磁兼容性, 这个“兼容性”有两层含义: 一是无人机系统内各分系统、子系统、设备之间电磁环境的兼容性, 二是无人机系统与外部电磁环境的兼容性<sup>[1]</sup>。无人机系统的电磁兼容性与设备的安装位置、电缆的敷设方法以及机内的实际电磁环境等因素密切相关, 而这些状态在设备级电磁兼容测试中是无法模拟的。因此, 尽管我们严格要求关

键设备必须按照国军标 GJB-151A、GJB-152A 的要求进行设备级的电磁兼容性测试, 但以保证全机电磁兼容作为最终目的, 系统级电磁兼容性测试仍是必不可少的一项工作。

由于武器装备平台的复杂性, 涉及到系统电磁兼容性的规范、标准, 目前国际上也只提出了相关的接口要求, 而没有具体的测试内容和测试方法<sup>[2-5]</sup>。现今, 我国颁布施行的 GJB1389-92, 主

\* 收稿日期: 2008-10-08

基金项目: 总装备部“十五”国防科学技术预先研究项目(014132506021)

作者简介: 李勃(1977年生), 男, 博士研究生; E-mail: libonet0222@sina.com

要是参考美军标 MIL - E - 6051D (1967. 9. 7) 制定的, 而美国已用 MIL - STD - 464 (1997. 3. 18 美国国防部接口标准, “系统电磁环境要求”) 代替以下标准: MIL - STD - 1818A (1993. 10. 4); MIL - E - 6051D (1967. 9. 7); MIL - B - 5087B (1964. 10. 15); MIL - STD - 1385B (1986. 8. 6); 对此, 国内还没有相应的标准出版<sup>[6]</sup>。而且, 由于美国的经验、方法及电磁环境不完全符合我国的实际情况, 这就需要我们进一步研究与探索, 在理论分析的基础上, 结合无人机使用的实际电磁环境效应, 提出适合无人机使用电磁环境的系统级电磁兼容测试项目、测试方法和相应的指标, 为将来无人机系统级电磁兼容测试标准的建立奠定一个基础。

## 1 无人机系统级电磁兼容的测试

### 1.1 飞机环境电平测试

当机上电子设备工作时 (有发射能力的电子设备处于发射状态), 测试规定频段内, 飞机外部的各个部位和各个设备舱内电磁干扰的强度。它是衡量飞机辐射强度的一个重要手段。环境电平测试通常使用干扰接收机配合相应的接收天线, 在飞机周围和设备舱内的不同位置进行测量, 如图 1 所示。测量时, 飞机上的电子设备应当工作在典型工作方式。

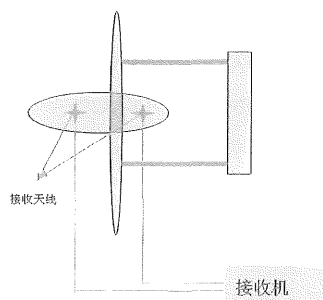


图 1 飞机环境电平测试框图

Fig. 1 Scheme of environmental electric level testing

将电场探头和波导天线分别置于前后设备舱内, 接通机上的所有用电设备, 并处于工作状态 (有发射能力的设备处于发射状态), 用场强接收机记录规定频段内的场强值。通常要求电磁环境电平应低于限值 (电场辐射发射) 6 dB, 因为这样才能保证由于环境场引起的测量误差在 1 dB 以内。

在屏蔽暗室中可以将限值规定在 GJB151A -

97 的 RE102 的极限值, 对无人机而言为: 24 dB $\mu$ V/m (2 MHz ~ 100 MHz) 和 24 dB $\mu$ V/m ~ 69 dB $\mu$ V/m (100 MHz ~ 18 GHz, 按频率对数线性增加)。

### 1.2 机载天线耦合电平测试

当机上电子设备工作时, 测试在接收天线的工作频带内和带外所接收到的干扰电平的量化指标, 并针对接收机的灵敏度进行考核。测试的关键技术是怎样选择测量接收机的带宽。测量时通常直接将接收机和飞机上的天线相连, 飞机上所有电子设备均在工作状态, 能够发射的设备必须处在发射状态。

将与被测天线相连接的电缆从其接收机端断开, 并与电磁兼容检测车中的场强接收机相连, 如图 2 所示。测量接收机的带宽应与机载接收机的带宽一致, 此时测量在接收通带内的干扰信号电平, 并与接收机的灵敏度进行比较。

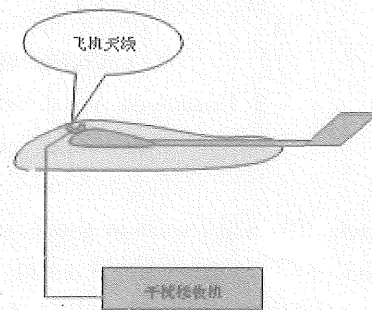


图 2 机载天线耦合电平测试框图

Fig. 2 Scheme of coupling level between airborne antennas testing

天线之间的耦合度 (亦称隔离度), 它与频率、天线参数、天线空间位置和极化等紧密相关。该参数直接影响辐射干扰、系统内兼容、系统间干扰、安全裕量等指标, 是系统 EMC 测试的重要参数。天线驻波系数  $S$  可以表示成:

$$S = \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \quad (1)$$

式中:  $\gamma$  为反射系数,  $\gamma = \sqrt{\frac{P_r}{P_i}}$ ;  $P_r$  为天线反射功率;  $P_i$  为天线输入功率; 天线驻波系数  $S \leq 1.2 \sim 2.0$  (对短波段  $S \leq 2 \sim 3.5$ )。

天线耦合度要求为:

$$L_{ACdB} = P_{tdB} + A_{tdB} + A_{rdB} - L_{RdB} - L_{fdB} - L_{rsdB} - R_{sdB} + L_{mdB} \quad (2)$$

式中:  $L_{AC}$  为天线耦合度;  $L_R$  为路径损耗;  $P_i$

为发射天线输入功率； $R_s$  为接收机灵敏度； $A_t$  为发射天线增益； $A_r$  为接收天线增益； $L_f$  为接收机阻带滤波器衰减； $L_n$  为接收机选择性； $L_m$  为辐射干扰安全裕度。

### 1.3 屏蔽效能测试

对于有人机而言，屏蔽效能通过金属物理材料计算出来，一般不做测量。但是无人机采用多种复合材料，对其屏蔽参数计算困难，必须经过测量。

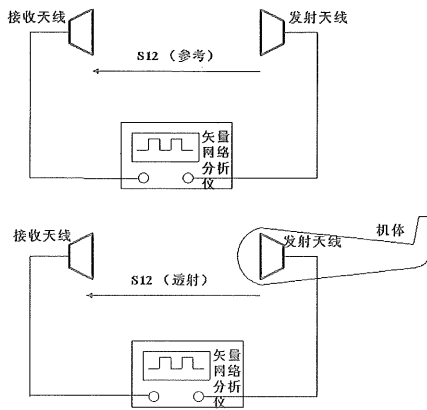


图 3 屏蔽效能测试框图

Fig. 3 Scheme of shielding efficiency testing

无人机的屏蔽效能可以采用直接照射测量法，如图 4 所示，利用网络分析仪和两个双脊喇叭天线来测量。首先进行无屏蔽时的测量，测试在标准暗室内进行。选定两天线的相对位置，由网络分析仪提供发射信号，喇叭天线接收的信号也送入网络分析仪，由分析仪测量接收点的接收功率，设为参考值  $P_1$ 。然后将发射天线置于待测机体内进行穿透信号的测试，测量采用与无屏蔽时相同的发射信号，再次记录网络分析仪的测量结果  $P_2$ ，则屏蔽效能即为  $SE = 10 \lg (P_1 / P_2)$ 。

屏蔽效能最低要求可以从 GJB151A - 97 中求得。对空军而言，飞机的外部或安全性关键从 10 kHz ~ 40 GHz 承受场强为 200 V/m；对飞机内部的设备要求能承受的场强 10 kHz ~ 1 GHz 为 20 V/m，1 GHz ~ 40 GHz 为 60 V/m，显然屏蔽效能最低要求为 20 dB。

### 1.4 飞机系统辐射敏感度测试

按照军标的要求测试，在飞机蒙皮外对准被测设备的位置，通过天线辐射，验证飞机分系统和设备抵御外界干扰的能力，测试覆盖规定频段。对于无人机全部由飞控系统通过计算机总线进行控制，所以对于飞控计算机尤其要进行此项测试。

笔者经过多次测试，统计得出了无人机应能承

受的外部电磁辐射强度标准如图 4 所示，图中  $H_{max}$  表示外部辐射最大场强值， $f$  表示频率。无人机在实际飞行中，可能受到各种地面发射机的主波束照射。该标准便是根据这些发射机的发射频率和功率平均值，再综合了各类飞行场地的电磁环境平均值后统计得出的<sup>[7-8]</sup>。

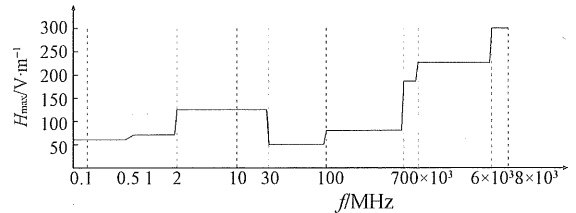


图 4 无人机系统辐射敏感度指标

Fig. 4 Limit of radiation sensitivity of UAV at the system level

在微波暗室中，按照 GJB3567 - 99 军用飞机雷电防护鉴定试验方法中的模拟雷电波形 C，通过天线分别对机头、翼尖、垂尾和设备舱等部位进行辐射，检验受试无人机是否出现硬件受损、软件受扰和产生误动作等情况。在实际飞行场地中，用地面电源车对无人机供电，接通各参试设备，使无人机系统处在满负荷工作状态下。按照图 5，将电场探头置于发射天线 1 m 处（对施加的电磁辐射强度进行监测），用敏感度测试系统通过电磁辐射天线对被测设备进行辐射，观察无人机各机载设备是否能正常工作。

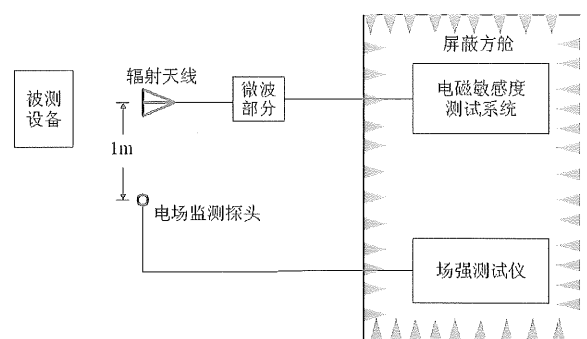


图 5 系统辐射敏感度测试框图

Fig. 5 Scheme of radiation sensitivity testing at the system level

### 1.5 系统内相互作用试验

系统内相互作用是指机载设备全部开启时，各设备都应正常工作。主要指无线电遥控各指令正常工作，无线电遥测参数指示在精度范围内，定位系

统精确定位,各任务装载运转正常,这是任何无人机在飞行试验前和地面联调时必须进行的项目。

测试应在电磁兼容分析中所认为的相互作用最强的状态下进行,特别要考虑有动态转换过程的设备,在状态转换时给飞机系统带来的电磁环境的变化。例如起落架升降运动时、侦察设备舱旋转时、不同频段的测控数据链转换时等等,运用排列组合的方法对设备逐一进行一对一的相互干扰检查,观察一般选在敏感设备的终端。在不能使用仪器的地方允许凭视觉、听觉主观判断,根据观测和判断的结果确定是否兼容。

### 1.6 无人机系统辐射场强测试

该测试是为了确定无人机系统实际的辐射场强,避免给人员、燃油和军械造成电磁发射危害。综合考虑无人机内可能存在的干扰源以及它们的干扰特性<sup>[9-11]</sup>,就可以根据国军标 GJB151 A、GJB152A 和具体的系统裕量要求计算出无人机系统应满足的辐射极限标准,如图 6 所示,图中  $H'_{\max}$  表示系统辐射场强极限值,  $f$  表示频率。

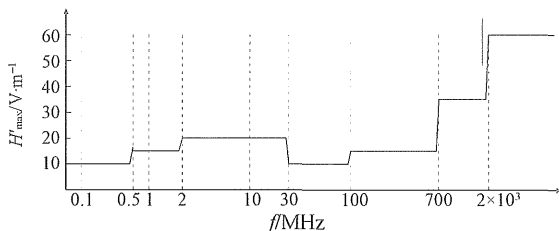


图 6 无人机系统辐射场强极限值标准

Fig. 6 Limit of radiation of UAV at the system level

无人机系统电磁辐射极限值标准曲线与 GJB151A 标准中的 RE102 (辐射发射) 曲线基本类似,但由于无人机工作的电磁环境的复杂性,因此该曲线中的极限值与国军标 RE102 不同,而且曲线不是呈直线递增,而是呈波浪式上升。

对无人机系统辐射极限值的计算时,主要考虑的是各干扰源远场辐射的情况,这是为了得到最坏的辐射发射情况。因为近场时,场强随距离的增加 3 次方减少;而远场时,电场随距离的增加而 1 次方下降。辐射极限值由实际受干扰的接收设备的工作频率、距离发射源的距离、敏感度值和天线增益决定。在实际应用中,辐射极限值应根据各低频敏感设备和低频电磁场的泄漏、耦合情况和各个频段电磁场的抑制情况来确定。在高频范围内 (700 MHz 以上),天线、孔缝处泄漏的电磁场大,但空间衰减也大,而且也容易采取抑制措施,所以可以

适当放宽极限值;而对处于短波接收频率范围内 (10 kHz ~ 30 MHz) 的辐射,极限值应严加控制。

大部分调谐式接收机的灵敏度可以达到  $1 \mu\text{V}$ ,因此我们对这项指标要求十分严格。测试前应首先对环境电磁场进行测量,并且只有环境场测量值至少低于相应极限值 6 dB 才能确保该项测试的准确性。在整个测试频段内,需由多付天线覆盖相应工作频段,并在每个频段内的测试数目不少于表 1 的要求。测试框图如图 7 所示,测试时要求测量天线距离被测机体 1 m,天线中心离地面 1.2 m,并且应使测量天线对准被测系统各设备的最大发射面。测试需在水平和垂直两种天线极化方向进行,并要求测得的最大发射值不能超出相应的极限值。

表 1 系统辐射场强在各频段测试数目要求

Table 1 Testing number requirement of systems radiation at different frequency band

频段/MHz	0.01 ~ 2	2 ~ 32	32 ~ 100	100 ~ 1 000	1 000 ~ 18 000	18 000 ~ 40 000
每个频段最少测量数目 / 个	10	20	20	10	20	5

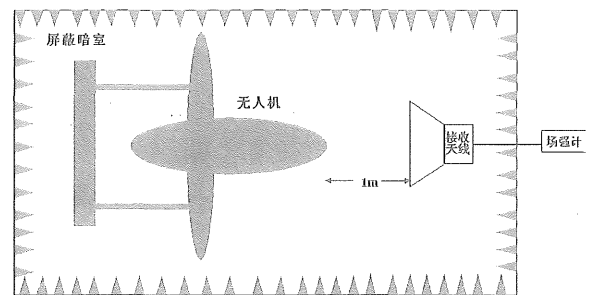


图 7 无人机系统辐射场强测试框图

Fig. 7 Scheme of radiation testing at the system level

## 2 无人机系统级电磁兼容测试总结

在微波暗室中,按照 GJB3567-99 军用飞机雷电防护鉴定试验方法中的模拟雷电波形 C,通过天线分别对机头、翼尖、垂尾和设备舱等部位进行辐射,受试无人机并未出现硬件受损、软件受扰和产生误动作等情况。在实际飞行场地中,用地面电源车对无人机供电,接通各参试设备,使无人机系统处在满负荷工作状态下。将电场探头置于发射天线 1 m 处 (对施加的电磁辐射强度进行监测),用 410 A 敏感度测试系统通过电磁辐射天线对被测设备进行辐射,当辐射场强大于环境电平 20 dB 时,

无人机各机载设备均能正常工作。在该型无人机飞行过程中, 各地面雷达和发射设备使用正常功率对其直接照射 (距离 5 km), 无人机仍能正常接收指令并根据要求完成各项任务, 证明经过系统级电磁兼容测试的无人机能够在实际战场电磁环境下正常工作。

#### 参考文献:

- [1] HAARLACHER B L, STEWART R W. Comparison of common mode impedance measurements using 2 current probe technique versus V/I technique for CISPR 22 conducted emissions measurements [J]. IEEE International Symposium, 2001, 1: 17 - 20.
- [2] US Military Department. MIL - STD - 464, Department of Defense Interface Standard; "Electromagnetic Environmental Effects - Requirements for Systems" [EB/OL]. [http://cryptome.org/mirror/mil\\_std\\_464.htm](http://cryptome.org/mirror/mil_std_464.htm). 2007.
- [3] FIORI F, MUSOLINO F. Comparison of IC conducted emission measurement methods [J]. IEEE Transactions, 2003, 52(3): 839 - 845.
- [4] PARMANTIER J P. numerical coupling models for complex systems and results [J]. IEEE Transactions, 2004, 46(3): 359 - 367.
- [5] ARMSTRONG E K. Specifying lifecycle electromagnetic and physical environments - to help design and test for emc for functional safety [J]. IEEE International Symposium, 2005, 2(1): 495 - 500.
- [6] 赵勋旺, 张玉, 梁昌洪. 舰载多天线系统电磁兼容性分析 [J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 252 - 256. ZHAO Xunwang, ZHANG Yu, LIANG Changhong. Fast EMC analysis of multiple shipborne antennas system [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 252 - 256.
- [7] ARMSTRONG E K. Why EMC immunity testing is inadequate for functional safety [J]. IEEE International Symposium, 2004, 1(2): 145 - 149.
- [8] 王尔申, 胡青, 张淑芳. 基于 GPRS 和 GPS 船载终端系统的电磁兼容设计 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(3): 524 - 529. WANG Ershe, HU Qing, ZHANG Shufang. Electromagnetic compatibility design of terminal system for ship based on GPRS and GPS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(3): 524 - 529.
- [9] KELANDER I, UUSIMAKI M, ARSLAN A N. EMC analysis on stacked packages [M]. EMC - Zurich 2006 17th International Zurich Symposium. New York: IEEE Press, 2006: 602 - 605.
- [10] MEE S, RANGANATHAN S, TAYLOR R. Effective use of emc analysis tools in the automotive product development process [J]. IEEE International Symposium, 2005, 3(4): 744 - 749.
- [11] HANIGOVSZKI N, LANDKILDEHUS J, SPIAZZI G, et al. An EMC evaluation of the use of unshielded motor cables in AC adjustable speed drive applications [J]. IEEE Transactions, 2006, 21(1): 273 - 281.

(上接第 30 页)

- [7] BEIARANO JD. The greatest number of limit cycles of the generalized Rayleigh - Liénard oscillator [J]. J. of Sound and Vibration, 1999, 221 (1): 133 - 142.
- [8] CHEN F, LI C, LLIBRE J. A uniform proof on the weak Hilbert's 16th problem for  $n = 2$  [J]. J. Diff. Eqns, 2006 (221): 309 - 342.
- [9] CHEN G, LI C, LIU C. The cyclicity of period annuli of some classes of reversible quadratic systems [J]. DISC. & Contin. Dyn. Sys., 2006 (16): 157 - 177.
- [10] GASULL A, GUILLAMON A, VILADELPRAT J. The period function for second - order quadratic ODEs is monotone [J]. Qual. Th. Dyn. Sys, 2004 (4): 329 - 352.
- [11] YAKOVENKO S. Qualitative theory of ordinary differential equations and tangential Hilbert 16th problem [C]. CRM Monograph Series 24, Edited by D. Schlomiuk, Amer. Math. Soc. Providence, RI, 2005.
- [12] BONORINO L, BRIETZKE E, LUKASZCZYK JP. Hamiltonian systems and homogeneous solutions of a semilinear elliptic equation [J]. J. Diff. Eqns, 2005 (214): 156 - 175.
- [13] HUANG Chb, LIU J. The limit cycles and homoclinic orbits and their bifurcation of the Bogdanov - Takens system [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008; 29 (9): 1195 - 1202.