

飞机级高场强辐射场验证替代方法研究

彭泽清, 吴藻菡, 刘焯树

(中国航空无线电电子研究所, 上海 200233)

[摘要] 为了解决飞机级高场强辐射场(HIRF)验证技术难点, 结合防护要求, 对其验证替代方法进行了研究, 分别包括低电平扫描场法、低电平扫描电流法、混响室法、差模电流注入法、低电平直接注入法和表面环线电流注入法, 对六种替代方法的验证机理、验证难点进行了分析, 总结了各种方法的优缺点, 并给出了推荐的HIRF防护验证替代方法顺序。

[关键词] 高场强辐射场防护; 低电平扫描法; 混响室法; 差模电流注入法; 低电平直接注入法; 表面环线电流注入法

[中图分类号] V216

[文献标识码] A

[文章编号] 1006-141X(2020)04-0060-06

Research on the Alternative Method of Aircraft HIRF Verification

PENG Ze-qing, WU Zao-han, LIU Ye-shu

(China National Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: In order to solve the technical difficulties of aircraft High Intensity Radiated Field (HIRF) verification, alternative methods of aircraft HIRF verification are studied based on the requirements of aircraft HIRF protection. The alternative methods include Low-Level Swept Field Test, Low-Level Swept Current Test, Reverberation Chamber Test, Differential-Mode Current Injection Test, Low-Level Direct Drive Test and Surface Rounding Wires Current Injection Test. Verification mechanism and difficulties of six alternative methods are analyzed, and the advantages and disadvantages of each method summarized. According to its application scope and advantages and disadvantages, the recommended order of alternative method for HIRF protection verification is given.

Key words: HIRF protection; low-level swept field test; reverberation chamber test; differential-mode current injection

飞机级 HIRF 防护要求是指模拟飞机在飞行过程中遭遇高功率雷达扫描时, 遭遇的高场强电磁环境, 无论是标准 GJB 1389A-2005 还是适航条款 § 航条款 A-20、AC-21-1317 均有 HIRF 防护要求, 是飞

机飞行安全的重要保障, 因此需要对飞机进行整机的 HIRF 验证工作。

飞机级 HIRF 防护要求是指模拟飞机在飞行过程中遭遇高功率雷达扫描时, 遭遇的高场强电磁环

收稿日期: 2020-01-19

引用格式: 彭泽清, 吴藻菡, 刘焯树. 飞机级高场强辐射场验证替代方法研究 [J]. 航空电子技术, 2020, 51(4): 60-65.

境, 无论是标准 GJB 1389A-2005 还是适航条款 § 航条款 A-20、AC-21-1317 均有 HIRF 防护要求, 是飞机飞行安全的重要保障, 因此需要对飞机进行整机的 HIRF 验证工作。

HIRF 验证方法可采用常规的高场强辐射法, 但由 GJB 1389A 和适航条款 § 适航条款采用常可知, 瞬时场强高达上千 V/m, 甚至上万 V/m, 常规的高场强辐射法需要大功率天线及大功率功率放大器, 成本极高, 因此需要对其替代方法进行研究, 本文在 ARP 5583A-2010、GJB 8848-2016 及本实验室研究成果基础上,

对六种替代方法进行了研究, 分别为低电平扫描场法、低电平扫描电流法、混响室法、差模电流注入法、低电平直接注入法和表面环线电流注入法, 对六种方法的验证机理、验证难点、各方法的适用范围进行了分析, 最后给出了推荐的替代验证方法顺序, 为飞机外部射频电磁环境 HIRF 验证或飞机级适航取证提供参考。

1 飞机级 HIRF 验证替代方法机理分析

1.1 低电平扫描场法

飞机均含有金属或者复合材料蒙皮, 该蒙皮具有一定的电磁衰减作用, 在 HIRF 环境下, 经过飞机蒙皮的电磁衰减, 耦合到蒙皮内的电磁场小于外部辐射的电磁场, 因此只需要对飞机级蒙皮内的设备进行对应衰减后的低场强辐射试验, 即可完成飞机级的 HIRF 验证, 飞机蒙皮的电磁衰减能力通常使用屏蔽效能来表述, 也称为其传递函数, 在有飞机蒙皮屏蔽效能数据情况下, 只需要简单将 HIRF 环境减去其屏蔽效能, 将获得到低场强用于验证即可, 低电平扫描场法使用频率为 100 MHz~18 GHz。

图 1 为低电平扫描场法飞机蒙皮屏蔽效能测试原理, 在有飞机蒙皮情况下, 天线辐射一定大小的场强, 记录场探头测量值 E_{10} , 将飞机蒙皮去除情况下, 天线辐射同样大小的场强, 记录场探头测量值 E_{11} , 其飞机蒙皮的屏蔽效能 SE 可用下式表示:

$$SE = 20\text{Log}\left(\frac{E_{10}}{E_{11}}\right) \quad (1)$$

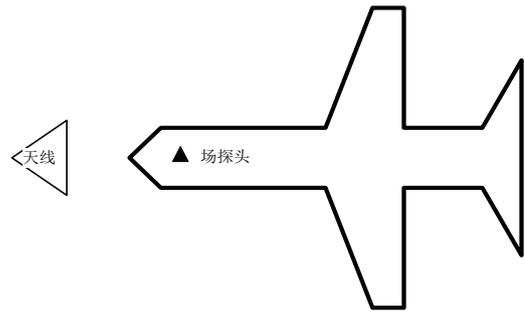


图 1 飞机蒙皮屏蔽效能测试示意图

1.2 低电平扫描电流法

低电平扫描电流法机理为在飞机遭受外部 HIRF 环境时, 电磁场通过其蒙皮耦合到飞机内部设备电缆上, 或者通过蒙皮缝隙直接耦合到其电缆上, 只要找到外部 HIRF 环境对应内部电缆上感应电流的关系, 称为传递函数, 在确保系统响应处在线性区情况下, 就可直接在电缆上通过电流探头注入相应大小的电流, 从而完成飞机级的 HIRF 验证, 其测试频段为 10 kHz~400 MHz。

图 2 低电平扫描电流法传递函数的测试原理, 将电流监测探头布置在所关注设备的电缆端口, 天线辐射一定大小的外部场强 E_{20} , 使用 EMI 接收机测量探头数据 I_{20} , 其传递函数 TF 为:

$$TF = 20\text{Log}\left(\frac{E_{20}}{I_{20}}\right) \quad (2)$$

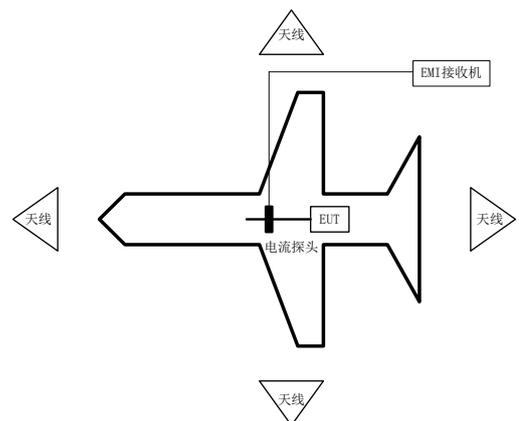


图 2 低电平扫描电流法传递函数测试示意图

1.3 混响室法

混响室一般由安装搅拌器的屏蔽室构成, 典型混响室示意图如图 3 所示, 机理为注入的电磁场利用金属壁面不断反射, 在工作区域通过场的叠加形

成HIRF环境,在进行飞机HIRF验证前,需要进行场校准,具体的校准方法参考GB 17626.21-2014和RTCA/DO-160G-2010得出其注入功率 P_{Fwd} 与叠加场强 E_{max} 的关系,再利用该关系将HIRF环境 E_{HIRF} 转换成需要注入混响室的功率 P_{Target} ,其表达式可用下式表示:

$$P_{Target} = 20 \log \left(\frac{E_{HIRF}}{E_{max}} \right) + P_{Fwd} \quad (3)$$

通过向混响室注入功率 P_{Target} 进行试验完成飞机HIRF验证,混响室测试频段为混响室最低使用频率约为18GHz。

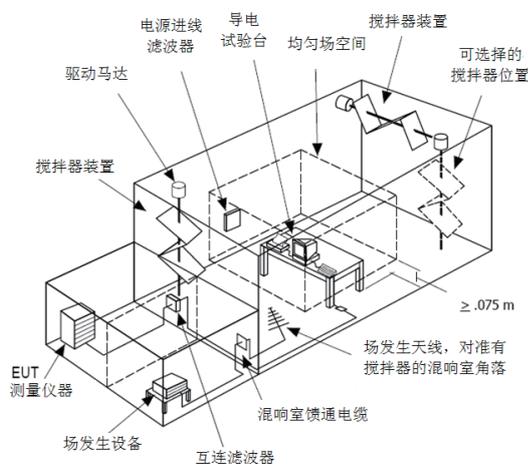


图3 典型混响室示意图

1.4 差模电流注入法

差模电流注入法与低电平扫描电流法类似,其机理为在两系统之间电缆上串加一个差模注入模块,差模注入模块如图5所示,总共包含5个端口,J1、J2端口为直通端口,用于天线或互联设备与被测飞机级设备之间正常信号传输,J3端口用于信号监测、J4端口用于信号注入、J5端口用于接50欧匹配负载,飞机在HIRF环境下,电磁场通过其蒙皮耦合到飞机内部设备电缆上,或者通过蒙皮缝隙直接耦合到其电缆上,就可通过差模注入模块监测端口监测其耦合电压值,只要找到外部HIRF环境对应内部电缆上耦合电压的关系,称为传递函数,在确保系统响应处在线性区情况下,就可直接在电缆上通过差模注入模块直接注入相应大小电压,从而完成飞机级的HIRF验证,该方法频率为10kHz~18GHz。假如天线辐射一定大小的场强 E_{40} ,此时监测差模注入模块监测端口电压值 V_{40} ,其传递函数可用下式表示:

$$TF = 20 \log \left(\frac{E_{40}}{V_{40}} \right) \quad (4)$$

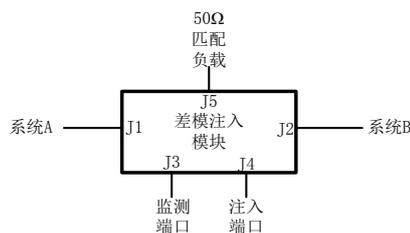


图5 差模注入模块示意图

1.5 低电平直接注入法

低电平直接注入法的机理为在外加HIRF环境对飞机作用机制的首个环节是在飞机外壳蒙皮形成表面感应电流分布,而此表面感应电流产生的反射/散射再与入射场矢量叠加形成飞机外部的总电磁环境,该总的电磁环境通过外壳蒙皮以及蒙皮上的孔缝、穿舱管道等“进入点”耦合到飞机内部设备,因此低电平直接注入法试验的途径是找到外部HIRF环境与辐射下飞机蒙皮产生的表面感应电流之间的传递函数,通过在飞机蒙皮直接注入等量大小的感应电流即可替代飞机外部HIRF环境,该方法频率为10 kHz~400 MHz,该方法有两种布置,分别称为全回路导体直接电流注入法和接地平板直接电流注入法,其原理一致,具体以全回路导体直接电流注入法进行介绍。

测试原理如图6所示,为了获得飞机蒙皮表面电流与外部HIRF环境的等效关系,将电流检测探头布置在所关注设备的电缆端口,在只有天线辐射场强 E_{50} 情况下,测量检测探头电流值 I_{50} ,同时使用表面电流探头监测飞机蒙皮上的感应电流 I_{51} ,测量时探头的绝缘面须紧贴待测的导电表面,旋转探头使它输出最大响应表面电流,沿垂直电流方向按传感线圈宽度逐次对关注区域覆盖测量,相加全部测量值得到关注区域总表面电流;在飞机蒙皮表面直接注入一定大小的电流值 I_{52} ,使监测探头的电流值为 I_{50} ,同时可监测飞机关注区域蒙皮表面电流 I_{53} ,确认 I_{53} 与 I_{51} 的等价性,此时其传递函数可用下式表示:

$$TF = 20 \log \left(\frac{E_{50}}{I_{52}} \right) \quad (5)$$

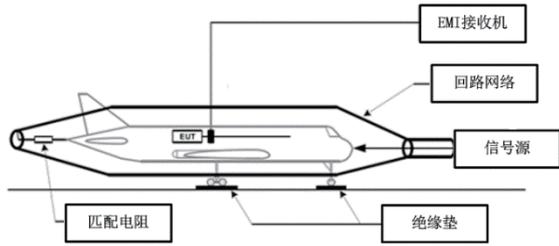


图 6 低电平直接注入法示意图

1.6 表面环线电流注入法

表面环线电流注入法是由低电平直接注入法演变而来, 考虑到在外部 HIRF 环境下, 飞机蒙皮表面会生成一定规律分布的感应电流, 如果在飞机外表面布置导电环线, 该感应电流会在导电环线中激励出一定量的感应电流, 反过来, 只要在导电环线中注入一定的电流, 其将在飞机蒙皮表面产生感应电流, 只要该电流与 HIRF 环境下产生的电流等价, 在飞机内部形成同样的电磁环境, 就能满足飞机 HIRF 验证的要求, 该方法的使用频率为 10 kHz~3 GHz。

测试原理如图 7 所示, 在只有天线辐射场强 E_{60} 情况下, 测量检测探头电流值 I_{60} , 同时使用表面电流探头监测飞机蒙皮上的感应电流, 得到关注区域总表面电流 I_{61} ; 在飞机蒙皮表面布置表面环线, 表面环线需要垂直布置, 在表面环线注入一定大小的电流值 I_{62} , 使监测探头的电流值为 I_{60} , 同时监测飞机关注区域蒙皮表面电流 I_{63} , 确认 I_{63} 与 I_{61} 的等价性, 此时其传递函数可用下式表示。

$$TF = 20\text{Log}\left(\frac{E_{60}}{I_{62}}\right) \quad (6)$$

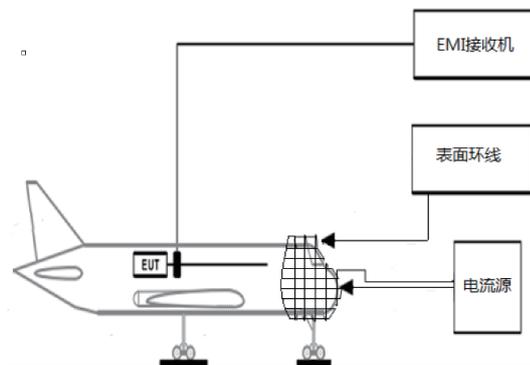


图 7 表面环线电流注入法示意图

2 飞机级 HIRF 验证替代方法应用分析

每一种飞机级 HIRF 验证替代方法因其机理、试验频段和试验布置不同, 其应用场景也不相同。

2.1 低电平扫面场法

该方法的关键点在于得出外部 HIRF 环境与内部耦合场在不同频点之间的关系, 称为传递函数, 即屏蔽效能, 在测量飞机蒙皮屏蔽效能时, 需要将飞机内部设备去除, 此时由于空腔谐振会导致某些测量区域在某些频点发生谐振, 导致其屏蔽效能极差, 因此需要在发生谐振的腔体内安装金属搅拌器, 改善该频点谐振情况。

低电平扫描场法的出发点是利用低场强替代 HIRF 环境进行验证, 如果在飞机某些区域, 如驾驶舱、飞机外部, 其屏蔽效能极差, 甚至为 0dB, 会导致其“低电平”变大, 相比于高场强辐射法, 已经没有优势, 此时, 该替代方法不适合。该方法传递函数获取较需要测量多个区域, 对同一测试区域需要天线在不同位置 and 不同极化情况下测试, 测试较为复杂。

2.2 低电平扫描电流法

该方法在同样的输入功率下, 相比于高场强辐射法, 其测试效率提高几十倍, 电流注入参数也比较容易控制, 易于实现, 测试重复性较好。其缺点为测试频段较窄, 仅可到 400 MHz, 超过 400 MHz, 一方面其波长与线缆长度可比拟, 所以在线缆上会产生明显的驻波效应, 此时监测的电流值和注入响应与注入位置密切相关, 从而影响测试的重复性, 另一方面, 电流注入探头的应用频率有一定的限制, 随着频率的升高, 注入探头内部铁氧体环的相对磁导率迅速下降, 由于磁滞现象及涡流的存在, 磁芯的损耗会显著上升。

低电平扫描电流法主要针对的是飞机内的线缆, 没有考核到设备机箱本身, 因此该方法应于低电平扫面场法结合进行飞机级 HIRF 验证。对于其传递函数的测量, 其方法与低电平扫描场法一致。

2.3 混响室法

混响室替代法是利用金属壁面不断反射形成叠加场, 能量利用率较高, 混响室工作空间的场是统计上均匀、各向同性的, 因此该方法更能模拟飞机在实际飞行中遭遇的 HIRF 环境, 发射天线不需要

转换极化，即可完成试验。

混响室最低适用频率受限于混响室尺寸，混响室尺寸越大，其最低使用频率越低，依据标准 IEC 61000-4-21，其最低规定频率为 80 MHz。混响室工作空间也受限于混响室尺寸，且由于工作空间需要离搅拌器、壁面、发射天线至少 $\lambda/4$ ，此外受试飞机放置在工作空间，需要确保飞机的加入不能影响其场均匀性，因此混响室工作空间较小，仅适用于小型飞机。

2.4 差模电流注入法

差模电流注入法需要在线缆中串加差模注入模块，因此该方法仅适用于射频线缆及双线，对于射频线缆及双线，差模电流注入法具有其测试效率较高，注入参数容易控制、易于实现，测试重复性较好等优点。

该方法中的差模注入模块，市面上目前暂无该类设备可供选择，需要单独研制，射频线缆或双线中的传输信号类型、信号功率均对其研制有一定影响，因此也限制了该方法的使用，一般可采用定向耦合器原理进行研制，对于其传递函数的测量，其方法与低电平扫描场法一致。

2.5 低电平直接注入法

目前主要有两种低电平电流注入方式：全回路导体直接电流注入和接地平板直接电流注入，如图 8 和图 9 所示。全回路导体直接电流注入适用于小型飞机，当飞机尺寸变大时，其回路导体布置受限，宜采用接地平板直接电流注入。

低电平直接注入法，也叫直接电流注入法（DCI），一个突出的优点是一次整机试验就能同时完成对所有机载设备的 EMC 安全裕度评估，其效率比高场强辐射法高得多；其缺点是使用频率受限，很难在 400 MHz 以上频率使用，超过频率 400 MHz 将使测试的一致性变差，主要原因是飞机上孔缝的存在，低电平直接注入时，飞机蒙皮表面的电流分布难以与采用辐射法时相同，此外低电平直接注入法注入装置内产生的高阶模会使装置内的电磁场强度和均匀性发生很大变化。该法传递函数获取较为复杂，在不同辐射位置、不同辐射极化时，其飞机蒙皮上的感应电流大小在不同区域有所区别，这增加了测试难度。

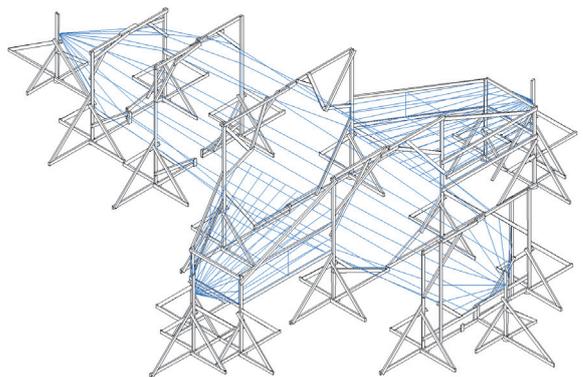


图 8 全回路导体直接电流注入法示意图

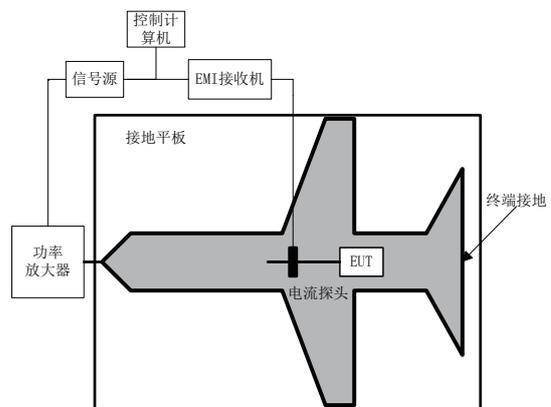


图 9 接地平板直接电流注入法示意图

2.6 表面环线电流注入法

表面环线电流注入法需要在环绕飞机的感兴趣区域的外表面敷设若干不同方位导电环线（选择适当导线线径和绝缘层厚度，可与飞机表面共同构成特性阻抗约 50 欧的微带线，与端接的测量接收机较好地匹配以获得重复性好的测量数据。选择适当环线圈数可相应提高表面环线在环线检测灵敏度及减小注入电流功率电平），将导电环线作为传感器，测量辐照下飞机蒙皮表面感应电流在环线中产生的感应电流（理论上用 2 个相互垂直的表面环线就可全面、完整地反映出其与飞机表面电流之间的耦合关系），该方法可在整机整体布置表面环线，但布线难度较大，需要耗费较大精力，可考虑采取局部布置环线的方法进行验证。

表面环线电流注入法以“路”替代“场”，操作性强，费效比高，当采用整机整体布置表面环线时，一次整机试验就能同时完成对所有机载设备的 EMC 安全裕度评估，其缺点是表面环线电流注入法替代飞机 HIRF 试验的等价性、有效性、适用范围及其

评估研究成果较小, 需要进一步研究, 且在整机整体布表面环线难度较大。对于其传递函数的测量, 其方法与低电平扫描场法一致。

3 结束语

本文对六种飞机级 HIRF 验证替代方法低电平扫描场法、低电平扫描电流法、混响室法、差模电流注入法、低电平直接注入法和表面环线电流注入法进行了机理分析, 对除混响室外的其他方法的传递函数求解进行了介绍, 并对其六种飞机级 HIRF 验证替代方法的应用进行了分析, 得出低电平扫描电流法和低电平扫描面场法需要结合进行验证, 混响室适用于小尺寸飞机, 差模注入电流法仅适用于射频线缆或双线系统, 低电平直接注入法与表面环线电流注入法具有一次试验能完成全机试验的优点, 但操作难度相对较大。

本文依据其技术难点、可操作性及效费比, 依次推荐的试验次序为: 混响室法(大小合适), 低电平扫描场法加低电平扫描电流法, 低电平直接注入法, 差模电流注入法, 表面环线电流注入法。

参 考 文 献

- [1] SAE ARP5583A. (R) Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field (HIRF) environment[S]. 2010.
- [2] FAR AC-25.1317. High-intensity radiated field (HIRF) protection requirement[S].2007.

- [3] AC-21-1317. 航空器高强辐射场(HIRF)保护要求[S]. 2006.
- [4] GJB8848. 系统电磁环境效应试验方法[S]. 2016.
- [5] GJB1389A. 系统电磁兼容要求[S]. 2005.
- [6] GB17626.21. 电磁兼容试验和测量技术混波室试验方法[S]. 2014.
- [7] GUIDO A. R. HIRF transfer function observations: notes on results versus requirements and certification approach. [J] IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, (57).
- [8] SERGIO F. R. Validation procedure of low level coupling -tests on real aircraft structure [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012.
- [9] 方愔. 外场飞机 HIRF 试验替代技术: 表面环线电流注入法 [A]. 第 22 届全国电磁兼容学术会议论文选 [C]. 成都: 中国电子学会电磁兼容分会, 2012.
- [10] 彭泽清. 基于混响室与暗室抗扰度试验相关性分析 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [11] 潘晓东. 基于定向耦合装置的宽频带差模电流注入试验技术 [J]. 电子学报, 2014, (6): 1103-1109.