

航空发动机的雷电与 HIRF 适航测试试验

Airworthiness Tests of Lightning and HIRF for Aero Engine

■ 段泽民 司晓亮 李志宝 / 中国航空工业合肥航太

2019年上半年,中国航空工业合肥航太电物理技术有限公司(合肥航太)完成了国内首次包括发动机控制系统的整机级雷电间接效应试验以及整机级高强辐射场(HIRF)防护试验,标志着我国拥有了完成发动机整机级雷电及HIRF防护适航取证试验的能力。

中国航空工业合肥航太电物理技术有限公司(合肥航太)于2019年上半年完成了国内首次包括发动机控制系统的整机级雷电间接效应试验以及整机级高强辐射场(HIRF)防护试验,标志着我国拥有了完成发动机整机级雷电及HIRF防护适航取证试验的能力。

雷电长久以来一直被看作是威胁飞机飞行安全的恶劣天气(如图1所示),而高强辐射场则是主要来自于雷达、无线电、电视和其他地基、船载或机载射频(RF)发射器发射的强人为电磁环境,这两种因素对飞机上的敏感电子装置的抗电磁干扰能力提出了极高的要求。

航空发动机系统是飞机上最关键的系统之一,如果在飞行中出现难以恢复的故障,如空中停车等,会给飞行安全带来灾难性的后果。因而,无论对固定翼飞机还是旋翼机,发动机的位置一般被当作抗雷电环境最为严苛的1区,是对雷电防护要求最高的区域。因此,在民航飞机的适航审定中,关于发动机系统的雷电防护和高强辐射场防护都已成为强制性条款。例如,CCAR-33部中提到:在声明的环境条件下,



图1 被雷电击中的客机

包括电磁干扰(EMI)、高强辐射场(HIRF)和闪电条件,发动机控制系统功能不会受到有害影响。为了满足上述要求,合肥航太结合国际先进经验以及立足自主研发,完成了国内首次包括发动机控制系统在内的整机级雷电间接效应试验以及整机级HIRF防护试验。

发动机雷电防护试验

现代雷电学认为,雷电可在100km高度大气层内出现,雷电电压幅值可达GV量级,电流幅值可达100kA量级。据统计,地球上每天要发生800

万次雷电,固定航线的飞机平均每年记录1次遭雷击事件,其中幅值达到200kA的雷电约占总数的1%。

雷电对发动机系统的影响主要分为直接效应和间接效应两大部分。直接效应主要来自于雷电带有的巨大能量,容易造成介质击穿、弧根热损伤、冲击波效应、电力损伤等;而间接效应则是指电磁能量通过孔隙耦合和扩散作用,在发动机的电力电子器件上感应出高阈值的浪涌电压,导致系统故障。

燃气涡轮发动机由传统的全金属结构发展到金属加复合材料结

构，现在还出现了全复合材料结构的发动机，随着复合材料所占比重的不断增加，发动机导电性降低，更容易遭雷电破坏。与金属壳体相比，复合材料壳体屏蔽效能降低，内部电磁环境恶化，尤其是现代发动机控制系统逐渐由机械液压式控制系统转为全权限数字电子控制（FADEC）系统，对复杂电磁环境下发动机防护提出了更高的要求。对于现代直升机推进系统，多采用复合材料制造螺旋桨桨叶，雷电打击到螺旋桨桨叶上可能会出现介质击穿、附着点弧根热损伤、冲击波损伤、电动力损伤，使桨叶出现穿孔、破裂、热解等直接效应。

因此，发动机包括控制系统（如图2所示）的整机级雷电防护试验是飞机整机级雷电防护试验中不可或缺的重点内容，验证发动机系统在实际安装运行工况下对雷电环境的响应是否符合适航标准的要求，它的作用是设备级、系统级试验所不能取代的，更是发动机的适航取证强制要求的项目。

航空发动机雷电防护试验首先由雷电分区试验开始，以此对不同区域所面对的雷电环境作出不同的规定，可以有效防止过度防护和防护不足的问题，是后续雷电防护试验的基础。以固定翼运输机为例，发动机一般安装在机翼上，因其前沿突出的外形特征和所处位置，一般位于雷电打击1A区，代表雷电首次回击打击点的所在，不出现雷电悬停；前沿略向后，长度与飞机飞行速度有关的一片区域，一般位于1C区，代表雷电首次回击的传导电流区域；再向后的一片区域位于2A区，代表扫掠回击区；发动机的后

沿部分定义为1C区，表示雷电首次回击的离开通道可能一直在这里悬停。不同的雷电分区表示试验中应用不同的试验波形，其中，对1区的防护要求最高，2区次之，3区较低。

过往收集到的雷击事件报告表明，当雷电打击涡喷发动机时，发动机可能会发生失速或转速下降，甚至可能完全熄火，但还没有案例说明这些故障是不可恢复的，出现上述情况的发动机都通过重新启动和加大功率恢复了运行。由于通过实验室模拟雷电环境复现发动机熄火或失速不现实，所以还没有关于此类故障机理的定量分析。但研究人员一般认为，此类事件是由于沿机体扫掠的雷电通道掠过发动机进气道附近所带来的冲击波效应，造成进气中断而产生的。统计发现，此类事件在大飞机上发生的概率低于小飞机上发生的概率，也从侧面印证了尺寸小的进气口更易受雷电冲击波影响。除非飞行员确定这种故障的原因，通常观察不到发动机

或发动机短舱的其他损坏。对于上述情况，除了重新点火启动发动机，别无其他防护措施。

发动机HIRF防护试验

与雷电不同，HIRF环境是人类活动所造成的，并且在可预见的未来，伴随着各种大功率、超大功率电磁波发射装置的增加和使用，HIRF环境总体上只会越来越严苛。在适航标准中规定的HIRF外部环境中，电场强度峰值可达到7200V/m。

外部HIRF环境会穿透飞机并形成内部射频环境，而电子/电气系统就暴露其中。内部射频环境的产生是由一系列因素相互作用引起的，比如飞机的孔缝耦合、飞机内部结构和线路的再辐射，还有典型的飞机电子共振效应等。所以飞机的内部射频场是一个综合的结果，也是不均匀的，强度、波形和波阻抗可能在宽频内变化。另外影响导线对HIRF耦合的一个重要因素是导线相对电磁场的极化方向，且当



图2 发动机数字电子控制器雷电间接效应试验



图3 整机HIRF试验外场

机体或导线长度是波长的整数倍或1/2、1/4时，易因谐振达到最大耦合。飞机对HIRF效应防护的能力与使用不同的系统安装布局有关。在飞机整体设计层面上，设计目标是降低安装电子/电气设备附近的HIRF内部环境。在系统层面上，设计目标是健全的系统安装布置；同时，对HIRF效应具有强健的系统度量标准（软件和硬件），以及结构防护与防护装置的设计也是必要的。适航验证将飞机上各系统的失效状态分为灾难性(A)、危险性(B)、重大性(C)3个HIRF审定等级，发动机系统就属于A类，即功能失效会影响飞机飞行安全，带来灾难性后果的系统。

发动机适航符合性验证方法包括验证试验和仿真分析。验证试验包括整机级试验、系统级试验、设备级试验，而合适的仿真分析虽然可以帮助减少不必要的试验，但不能取代试验。对发动机这种A类系统的符合性验证方式是最繁杂的，要求进行设备级、系统级和整机级的符合性验证，一般从整机级验证开始，使各系统、设备所在区域的场强符合验证要求后，再进行分项试验。所以，整机级试验具有特殊

的意义。整机级HIRF符合性验证是一个系统的持续性工作，应有一个明确的HIRF符合性计划，以便清晰地识别和规定HIRF审定要求、HIRF防护设计、设计试验和用来作为符合性一部分的分析行为。HIRF符合性计划在执行前应提交适航，并得到适航当局批准。如果飞机、系统或装置在适航当局批准后进行设计更改，修订的HIRF符合性计划也应提交适航当局获得批准。

发动机整机HIRF防护试验是为了测量被试飞机关键位置实际射频环境以及电子/电气系统或设备互联导线上的感应情况。对试验中测试电缆和区域的选择须经过分析讨论，并得到适航当局的认可，从数百根电缆束中选择典型设备的电缆和位置进行试验。这样既能满足定型考核试验的要求，又可以兼顾试验周期。

实际操作中要先确认被试直升机装备执行关键功能和重要功能的电子设备是按实际装机情况敷设电缆，之后试验将按照标准规定布置试验环境，包括对直升机关键位置实际射频环境和电子/电气系统、设备互联导线上的感应情况进行测量，并与合格判据对比以得出鉴定结论。

合肥航太对被测飞机应用了发动机整机HIRF低电平耦合(LLC)试验。这里的低电平耦合试验包括低电平扫描电流(LLSC)和低电平扫描场(LLSF)试验方法。低电平扫描电流试验测试了发动机两侧控制系统电缆束的传递函数曲线，而低电平扫描场试验测试了发动机关键设备安装区域的衰减系数曲线。通过对这些随频段而变化的曲线与实际HIRF环境数据进行处理，把测试结果与合格判据做对比，最后得出结果。这种方法的优点有：可大量多次试验，减少随机性误差；把整机暴露到远场，能更好模拟真实环境；具备模式选择能力，测试结果更可靠；试验成本较低，试验设备更易搭建等。

合肥航太已开展了对AC312E直升机的整机HIRF试验（如图3所示），具备发动机整机HIRF防护试验能力，并针对发动机控制系统进行了测量。

结束语

我国目前已经能够完成飞机雷电和HIRF整机防护测试试验，但是发动机的雷电与HIRF防护测试试验水平仍需进一步提高，未来应加强对发动机系统关于雷电与HIRF耦合效应机理的研究，加强对适航标准的理解，同时要重视高水平仿真在适航取证中的积极作用，以进一步提高我国发动机雷电与HIRF试验与适航审定能力。

航空动力

（段泽民，中国航空工业合肥航太总工程师、合肥工业大学教授，主要从事飞行器雷电与静电防护、飞行器强电磁环境效应及防护和脉冲功率技术等研究）