

民用飞机动力装置系统FHA研究

Study of Powerplant System FHA of Commercial Aircraft

朱岩 崔凝 戚学锋 唐宏刚 / 上海飞机设计研究院

摘要: 将功能危害性评估方法引入动力装置系统的安全性评估中, 并以某型飞机动力装置系统为例, 具体介绍了评估功能危害性的过程, 为民机动力装置系统安全性评估提供一定参考。

关键词: 功能危害性评估; 动力装置系统; 民用飞机

Keywords: FHA; powerplant system; commercial aircraft.

0 引言

某型飞机的设计目标是“确保安全性, 提高经济性, 注重环保性, 改善舒适性”, 其中“确保安全性”摆在突出位置。动力装置系统作为飞机的动力源, 是最主要的高危险事故源之一。

SAE ARP 4761是飞机系统安全性评估的设计指南, 其中功能危害性评估(FHA)是最重要的安全性评估方法之一。动力装置系统作为飞机最复杂的系统之一, 相应地, 其FHA评估也较为复杂。本文将SAE ARP 4761中提出的FHA过程应用于动力装置系统安全性评估中, 并以某型飞机动力装置系统FHA为例, 具体介绍了典型动力装置系统的FHA过程。

1 动力装置系统FHA过程

FHA过程是一种自上而下识别功能失效状态并评估其影响的方法, 包括两个级别, 即飞机级FHA和系统级FHA, 动力装置系统FHA属于后者。

根据SAE ARP 4761对FHA过程的定义, FHA的目标是, 根据已有的功能定义, 识别功能所有的失效模式,

结合飞行阶段确定功能失效状态及其对飞机的危害影响等级。需要注意的是, 同一功能失效模式在不同的飞行阶段, 对飞机的危害影响有可能是不同的, 因此失效状态也不同。

根据FHA过程要求, 动力装置系统FHA过程可分为如下步骤。

- 识别与分析动力装置系统的所有功能(内部功能和交互功能);
- 识别并说明与动力装置系统功能相关的失效状态, 考虑在正常和恶化环境下的单一和多重失效;
- 确认失效状态的影响;
- 确认失效状态对飞机的危害影响等级;
- 向低层次失效状态提出要求;
- 鉴别证明失效状态影响等级所要求的支持材料;
- 鉴别用于验证失效状态的符合性的方法。

1.1 动力装置系统功能定义

通常动力装置系统级功能应来源于飞机的设计需求和对动力装置系统功能界面的定义, 并遵循自上而下的分解过程。一般而言, 飞机对动力装置系统

的功能要求主要体现在正推力及控制、反推力及控制, 以及作为飞机能源系统的动力源等三个方面。此外, 出于安全考虑, 还需要有短舱防冰功能和发动机状态指示告警功能, 但出于工程应用需要, 这两项功能往往作为环控系统和航电系统的子功能。

功能来源于自上而下的需求分解, 应避免一开始就以现有动力装置系统方案出发, 进而将各子系统的功能汇总而成所谓的动力装置系统级功能。

1.2 动力装置系统失效状态

确定动力装置系统功能后, 考虑到功能丧失(可结合是否通告再次细分)和功能异常两种情况, 以及具有一定详细程度的系统方案, 进而确定动力装置系统的功能失效模式。结合具体的飞行状态, 确定动力装置系统失效状态。

确定动力装置系统失效状态时, 一方面来源于动力装置系统功能失效的分析, 另一方面应参考飞机级FHA确定的失效状态结果。一般来说, 前者的分析结果来源于具体功能的失效分析, 因此失效模式分类较为完整细致, 后者的分析结果来源于飞机顶层

自上而下的梳理,往往在初期时分析较为笼统。为实现飞机级和系统级FHA之间的追溯性,失效状态需要前后对照保持一致。通常采取的做法是将飞机级FHA确定的失效状态与其下一级结果作为系统级FHA的输入,对照前后两种分析方法的结果,对飞机级FHA失效状态进行补充或删减。

另外,考虑到多重动力装置系统的耦合失效,需要综合考虑多重动力装置系统同时失效的状态,如两台发动机同时丧失推力等。

1.3 动力装置系统失效状态影响

确定动力装置系统失效状态影响时,首先是分析失效状态对动力装置系统的具体影响,进而分析对飞机、机组和乘客的影响。由于飞机级和系统级定义的失效状态的可追溯性,飞机级影响与系统级影响可能相同。

1.4 动力装置系统失效状态影响等级

根据SAE ARP 4761中的定义,失效状态影响分为5个等级,即灾难性的、危险的、重大的、较小的和对安全性无影响的。失效状态的影响等级与失效概率之间的关系如表1所示。

动力装置系统失效状态影响等级的具体确定原则依赖于以往的事故数据、规章指导材料和设计经验等。

CS-E 510(g)中规定了典型的动力装置系统失效及影响等级,可以作为动力装置系统失效状态确定的重要参考。详细定义包括:

1) 发动机失效的唯一后果只是部分或全部丧失推力或功率(以及相应的发动机提供其他功能的能力),该失效视为较小的发动机影响。

2) 下述影响视为危险的发动机影响。

- a. 非包容性的高能碎片;
- b. 发动机客舱供气中有毒物过度

聚集以致机组或乘客丧失行动能力;

c. 与飞行员指令相反方向产生显著推力;

d. 不可控的着火;

e. 发动机安装系统失效导致发动机意外分离;

f. 发动机桨叶的脱离;

g. 丧失安全关闭发动机能力。

3) 其他的在上述1)和2)之间的影响应视为重大的发动机影响。

1.5 动力装置系统失效状态分配要求

对于每个动力装置系统的失效状态,必须分配概率要求和相应的定性设计要求。对于重大级别以上的失效状态,通常还应结合定量故障树分析进行失效状态分解和概率分配。

1.6 动力装置系统失效状态影响等级支持材料

如有必要,需要提供包括模拟、分析和飞行试验在内的支持材料,以证明动力装置系统失效状态的影响等级。

1.7 动力装置系统失效状态要求符合性方法

对于每个确定的动力装置系统失效状态,还需要分析、确定系统将如何满足安全性目标,具体的安全性目标验证流程如图1所示。通常的符合性

方法包括定量和定性的FMEA、FTA和CCA。

2 某型飞机动力装置系统FHA实例

2.1 确定动力装置系统功能

飞机级对动力装置系统的功能要求包括提供设定的正推力、提供设定的反推力、提供动力源等三个方面。本文以提供设定的正推力功能为例,介绍动力装置系统FHA后续过程。

2.2 确定功能的失效状态

针对提供设定的正推力,失效模式可以分为推力丧失和推力控制异常两大类。

针对推力丧失的分析,需结合推力丧失的程度,考虑部分丧失、完全丧失等失效模式,并结合单发和双发失效,细分出具体的失效模式,如表2所示。

针对推力控制异常的分析过程与推力丧失类似,但应结合动力装置系统控制方案,进一步细化失效模式。

飞行阶段可以大致划分为地面、起飞、空中、着陆四个阶段,根据分析的需要,可以进一步细化。

2.3 确定失效状态影响

以“起飞和空中阶段单发推力

表1 失效状态的影响等级与失效概率之间的关系

影响等级	较小的	较大的	危险的	灾难性的
失效状态分类	IV	III	II	I
定性概率要求	可能的	极少的	极端少的	极不可能的
定量概率要求 (每飞行小时)	$<10^{-3}$	$<10^{-5}$	$<10^{-7}$	$<10^{-9}$
对飞机的影响	轻微降低安全性裕度	显著降低安全性裕度或功能能力	大大降低安全性裕度或功能能力	所有失效状态妨碍继续安全飞行和着陆
对乘员的影响(包括乘务人员)	给乘员带来某些不方便	给乘员某些不舒服	对乘员产生不利影响	
对飞行机组的影响	轻微增加机组的工作负担	显著增加机组的工作负担或有条件地削弱机组的效率	更大的工作负担或体力疲劳以致不可能依赖机组去准确或全部执行任务	

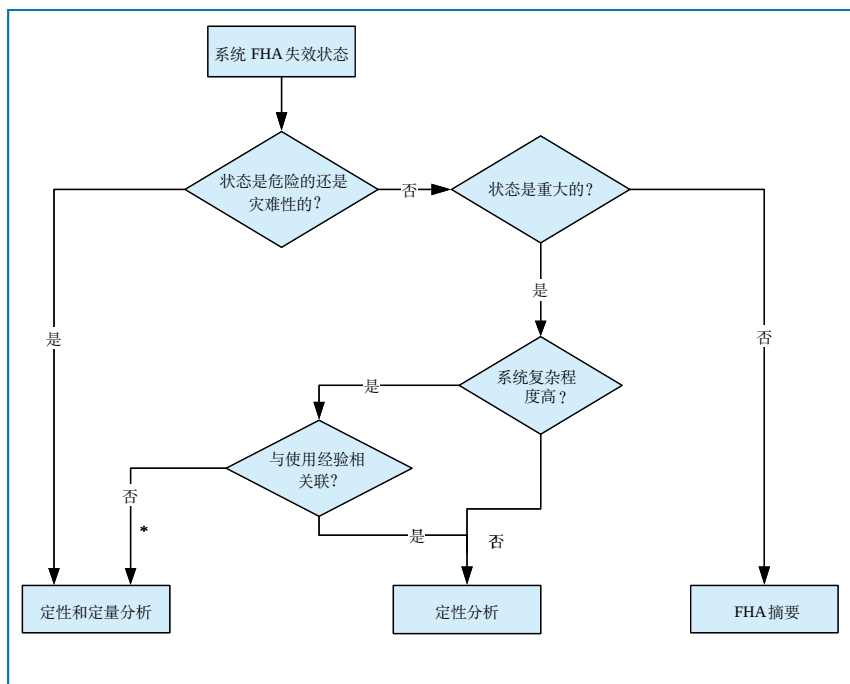


图 1 安全性目标验证方法

表 2 推力丧失失效模式

项目	推力丧失失效模式
1	单发推力部分丧失
2	单发推力完全丧失
3	双发推力部分丧失
4	双发推力完全丧失
5	单发推力完全丧失,另一发推力部分丧失

完全丧失”失效状态为例进行分析。单侧动力装置系统失去向飞机提供推力的能力，同时丧失向该侧的电源系统、液压系统和气源系统提供相应能源的能力。此外，对飞机其他系统和控制能力的影响是轻微降低了飞行安全性裕度；对乘客无明显影响；轻微增加了飞行机组的工作负担。

2.4 确定失效状态影响等级

根据确定的失效状态影响，结合失效状态影响等级与失效概率之间的对应关系，可以确定“起飞和空中阶段单发推力完全丧失”失效状态的影响等级为IV级，即较小的。

此外，根据CS-E 510(g)(1)中的规

定，发动机部分或全部推力丧失的影响等级也是较小的。

2.5 确定失效状态分配要求

根据CS-25 AMC 25.901(c)中的建议，单发空中停车（IFSD）采用每飞行小时 1×10^{-4} 的失效概率是可接受的保守分析值。同时也认可自上而下地采用运营、试验和其他相关经验得到的相似部件数据计算出的失效概率，以及相似动力装置系统安装的实际运营数据。因此，针对“起飞和空中阶段单发推力完全丧失”失效状态，虽然影响等级定为IV级，但采用的概率要求为每飞行小时 1×10^{-4} 。

2.6 确定失效状态影响等级支持材料

由于“起飞和空中阶段单发推力完全丧失”失效状态的影响等级为IV级，可以考虑采用性能分析与飞行试验来验证故障影响等级。

2.7 确定失效状态要求符合性方法

由于“起飞和空中阶段单发推力完全丧失”失效状态的影响等级为

IV级，可以考虑采用FHA摘要和定量的FMEA方法。为了清晰了解失效状态发生的原因，还可采用定性的FTA法，分析飞机其他交联系统失效导致的“单发推力完全丧失”。

另外，根据航线运营的经验，通常“单发推力完全丧失”的验证通常是利用相似发动机的运营数据进行的可靠性增长预计来说明新研发发动机的失效率。

3 结论

针对动力装置系统，本文运用SAE ARP 4761中提出的FHA过程进行分析，并以某型飞机动力装置系统FHA为例，具体介绍了典型动力装置系统FHA过程，提出了动力装置系统FHA过程的方法性建议和范例，为民机动力装置系统安全性评估提供了一定参考。更深入的动力装置系统FHA需要结合飞机交联系统和动力装置系统详细技术方案进一步开展。

参考文献

- [1] SAE ARP 4761, Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment [Z]. 1996-12.
- [2] 郭百鑫. 民用飞机机载系统和设备安全性评估过程的指南和方法 [M]. 上海: 民航华东地区管理局适航审定处, 2007-12.
- [3] CS-E Amendment 3, Certification specifications for large aeroplanes [Z]. 2010.
- [4] CS-25 Amendment 8, Certification specifications for large aeroplanes [Z]. 2009.

作者简介

朱岩，工程师，主要从事动力装置系统安全性评估和安装工作。