

文 / 靳功(北京飞机维修工程有限公司)

# 可靠性研究在飞机维护中的应用

## Application of Reliability Research in Aircraft Maintenance

**可**靠性研究工作始于第二次世界大战期间。当时，美国生产的飞机由于电子设备经常出现故障近半数不能使用。为了解决这个问题，美国国防部组织人力展开对电子管的可靠性研究，标志着可靠性研究的起步。

1950年美国国防部成立了“电子设备研究小组”，1952年成立了“电子设备可靠性咨询组”，并于1957年提出了一系列的AGREE报告，这成为以后进行可靠性研究的基础；从这时起可靠性作为一门学科已确定了基本方向。在上个世纪60年代末，美国提出了以可靠性为中心的维修分析(Reliability Centered Maintainability Analysis)，并把此方法用于民航飞机维修大纲的制定；在优先考虑安全性和经济性的基础上，以飞机系统的可靠性特征为依据，对该系统的功能、故障模式及后果进行逻辑性的分析，从而确定适当而有效的维护措施。并初步确定了以可靠性为中心的维修性分析(RCMA)的主要工作步骤：

- (1) 确定重要功能产品；
- (2) 进行故障模式和影响分析；
- (3) 应用逻辑决策图确定预防性维修工作类型；
- (4) 确定预防性维修工作的间隔时间；
- (5) 提出预防维修工作维修级别的建议；

(6) 进行维修间隔探索。

从1954年开始，美国每年都要举行可靠性年会，组织一些高级社团，学院和政府执行人员，可靠性和维修性学科专家等，进行可靠性技术的研究和讨论，并成立了可靠性专业委员会，使可靠性技术成为了国际化的技术。

我国在20世纪60年代初进行了有关可靠性评估的研究工作。自1984年开始，在国防科工委的统一领导下，制定了一系列关于可靠性与可维修性的基础规定和标准。1985年科工委颁发的“航空技术装备寿命与可靠性工作暂行规定”是我国航空工业的可靠性与可维修性工程全面进入工程实践和系统发展阶段的一个标志。1987年和1988年先后颁发的国家军用标准GJB368-87“装备维修性通用规范”和GJB450-88“装备研制与生产的可靠性通用大纲”可以说是目前最具代表性的基础标准。

80年代后期，可靠性研究得到了迅速发展。1993年原国防科工委所发的文件《航空装备可靠性和可维修性工程管理暂行规定》中更加强调了航空装备可靠性和可维修性的重要意义，提出“可靠性和可维修性工程是航空装备各系统的重要组成部分，各级有关部门应按常规武器研制程序，将其纳入型号研制计划加强管理”。

### 可靠性研究的方法

在进行可靠性研究时，故障树分析和故障树仿真是最常用的两种方法。

#### 1. 故障树分析

故障树分析所使用的故障树有两种作用，一是已知故障为顶事件，通过建造的逻辑故障树，分析与判断发生此故障的环节与原因(底事件)，这是自上而下的故障分析。二是求顶事件(故障)的发生概率，由底事件的已知故障概率情况，按逻辑建树，自下而上的分析，通常用于故障与发生事件的预测以及计算其可靠度。

#### 2. 故障树仿真

通过应用故障树仿真分析方法可以得到系统可靠性的点估计值，还可以得到各种统计值的分布函数，采用曲线和直方图等形式表达出来，对于深入了解系统具有很大帮助。此外，借助于仿真的运行过程，还可以观察系统内各个部分的可靠性所产生的作用，并且获得系统内部更加多的可靠性信息，这对于改进系统或重新设计系统均有很大的启发和指导。

#### (1)故障树仿真的优点：

a. 对提高系统的可靠性大有帮助。故障树仿真能够处理各种可靠性问题，并且能够比较全面地激发系统可能发生的故障模式，这样就很容易找出影响系统可靠性的薄弱环节。在研制阶段就可以较早地发现这类故障模式，做到及早发现，及早纠正。这也是提高可靠性的最有效的途径。

b. 节省可靠性投入。对于复杂的系

统,用硬件直接进行试验,费用很大。而采用可靠性仿真,可以重复进行多次试验(甚至是上万次)。只要仿真模型和原始数据准确,对系统作一次可靠性仿真试验,就相当于一次实际系统的运行。这样的仿真试验能够在短时间内完成上千次的运行,从而节省了大量的人力、物力和财力,也保证了系统的研制周期。

c. 有效性强。对于实际运用很多系统,其寿命分布类型多种多样,用一般的解析方法估计其可靠性参数值,常与实际值有较大的差距,引起整个系统可靠性分析的误差,而采用故障树仿真则要精确得多。采用仿真可以处理很多复杂的寿命分布类型,这大大增强了处理复杂系统和较多寿命分布类型系统的能力。

d. 通用性好。可靠性仿真过程中建立的数据库、可靠性仿真类型、计算机系统(包括硬件和软件)通过局部修改、调整,可以应用到不同型号的可靠性研究中,这样有利于各行各业可靠性工作的开展。

### 可靠性研究在飞机维护中的应用

下面 B737 方向舵改装为例阐述可靠性研究在飞机维修中的应用。

由于出现数起重大事故,FAA 要求波音公司着手改变其 B737 方向舵的设计,以确保这一全球应用最广的商业机型的安全。这一要求是在由美国政府及工业界 22 名专家组成的小组经过长期调查后提出的,之前,曾有指控称 B737 方向舵的设计存在漏洞,并因此导致多起飞行事故的发生。此改变将涉及为 B737 的方向舵安置两个阀门,这两个阀门各司其职互不可替代,以取代目前只有一个阀门的设计,新的设计到 2003 年才最终落实。

#### 1. 改装前的方向舵系统

图 1 显示的是改装前的方向舵机械操

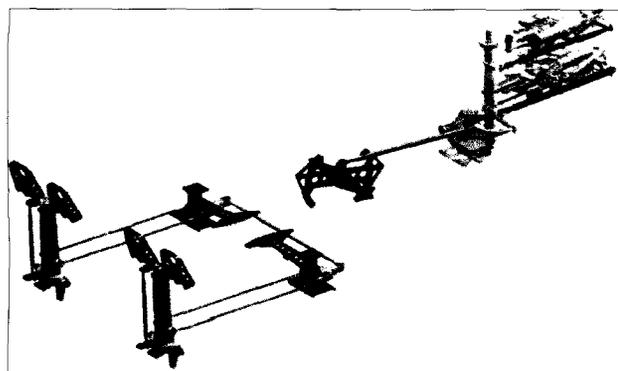


图 1 改装前的方向舵机械操控系统

控系统,改装前的方向舵控制机构:

- 三个独立工作的作动器。
- 两个作动器共用一个双同心的伺服活门。
- 一个双通道负载控制杆连接到双同心的伺服活门上。
- 三个独立的液压系统:两个主液压和一个备用系统。

#### 2. 改装后的方向舵系统

图 2 显示的是改装后的方向舵操作系统:

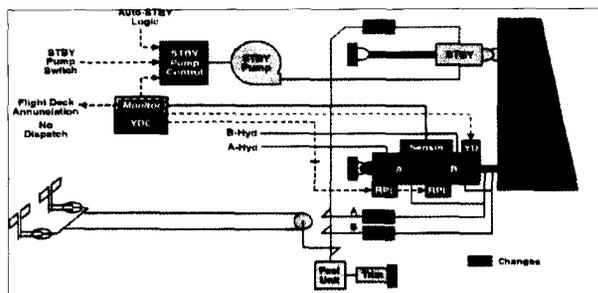


图 2 改装后的方向舵操作系统

- 三个独立的作动器。
- 三个独立的伺服活门。
- 三个独立的活门输入连杆。
- 三个独立的液压系统:两个主液压系统,一个备用液压系统(当探测到两个主液压系统有故障时自动供压)

#### 3. 改装后的方向舵系统具有四大优势

##### (1) 更高的可靠性。

a. 在飞行操纵系统中有多个部件执行同样的功能,目的就是要防止由于某一个部件失效后对飞机的安全不会产生影响。

b. 方向舵脚踏继续保留着,为机组提供又一种方法去控制方向舵的位置,遇到飞机配平故障时,机组本能的操作反应优先于预先设置的程序。

##### (2) 经过改装后,使飞机由于方向舵

系统的不正常工作导致的飞机失控情况降到最低。机组在方向舵系统出现不正常工作时,通过脚踏就能很容易的抵消这种偏差。

(3) 改装后的方向舵系统在功能上和原系统是一致的,在设计上具有更低的技术风险。

(4) 安装改装后的方向舵系统不会产生新的潜在危

险情况,对飞机的结构影响极微小。改装后的方向舵主 PCU 将继续使用原来结构的连接点,系统需要加装新的导线支架。

波音公司给出了改装 B737-300 飞机方向舵系统的施工步骤,从硬件结构上,我们能够看到方向舵系统的控制组件更加复杂,控制通道多元化了,从而提高了系统的可靠性。但是波音公司没有提供相关的理论依据和技术参数,为了更深入的学习和研究此系统,接下来的针对方向舵系统进行的可靠性研究是十分必要的。

#### 4. 从原理上对 B737-300 飞机方向舵系统的改装进行研究

(1) 划分单元部件 在了解了方向舵操纵系统的硬件结构之后,为了方便后面对其进行故障树分析,需要从零件在操纵系统中所完成的功能和作用出发,把系统划分为若干个标准单元部件的

集合。这里所指的标准单元部件是指那些通过系统试验,在设备上经过使用,并证明在规定的条件下性能比较稳定的部件。从可靠性的角度考虑,标准单元部件应该是满足维修更换要求,且具有可靠性指标的部件。在方向舵操纵系统中,标准单元部件即可能是电子器件或机械液压器,也可能是有关器件组成的部件。

(2) 标准单元部件的类型 按照在方向舵操纵系统中各自所起的功能和作用,可将标准单元部件分为以下几种类型:动力源部件、机械液压部件、输出部件、执行部件、反馈部件。

对 B737-300 方向舵系统的单元部件分类结果如表 1 所示。

#### 5. 故障树分析

依据方向舵系统的单元部件划分,建立故障树。建树之前,作如下规定:

(1) 本故障树建树工作将着重分析 B737-300 飞机方向舵系统的任务可靠性,即系统在规定的任务剖面内完成规定功能的能力;

(2) 各个底事件之间互相独立;

(3) 组成控制系统的各个单元部件,只能处于正常和故障两种状态中的其中一种,不存在第三种状态。

在此确定故障树的顶事件为方向舵系统发生故障。由底事件的已知故障概率情

表1 方向舵系统的单元部件分类

编号	单元部件名称	类别	代号
1	A 液压系统	动力源部件	1#
2	B 液压系统		2#
3	备用液压系统 (当 A 或 B 系统压力低时自动工作)		3#
4	公共交流汇流条		4#
5	电平直流汇流条		5#
6	方向舵主 PCU	机械液压部件	6#
7	方向舵备用 PCU		7#
8	驾驶员方向舵脚蹬	输出部件	8#
9	方向舵配平控制电门		9#
10	偏航阻尼系统		10#
11	方向舵控制钢索执行部件		11#
12	后扇型盘		12#
13	扇型盘输入杆		13#
14	扭力管		14#
15	下曲柄		15#
16	中曲柄		16#
17	上曲柄		17#
18	方向舵配平作动器	18#	
19	感觉定中组件输入杆	19#	
20	主 PCU 输入杆	20#	
21	备用 PCU 输入杆	21#	
22	方向舵配平指示器 (28 交流电马达作动)	反馈部件	22#
23	EICAS 显示		23#

况,按照逻辑建树,自下而上的分析,得出顶事件的可靠度。

#### 6. 结果分析

通过对 B737-300 方向舵系统完整而详细的故障树分析和故障树仿真,得到了如下的分析结果:

(1) 方向舵系统改装前的可靠度是 99.98154%, 方向舵系统改装后的可靠度是 99.99999%。通过改装,系统的可靠度增加了 0.1845%;

(2) 对方向舵系统进行 10000 次仿真,系统改装前的 MTBF 是 3355.0185 小时;系统改装后的 MTBF 是 3386.3222 小时,增加了 31.3037 小时;

(3) 对方向舵系统进行 10000 次仿真,系统改装前,可靠度开始下降的时间发生在 1530 小时;系统改装后,可靠度开始下降的时间发生在 1640 小时,系统可靠度开始下降的时间延迟了 110 小时;

(4) 系统发生故障的高峰期是在 3000 飞行小时以后,此时故障发生的频率较高;系统改装前可靠度在此时是

76.08%;系统改装后可靠度在此时是 82.07%,所以应该及时把关键部件拆下检查、修理,防止在以后的运营中发生较大事故。

(5) 本文只是选择了方向舵系统中比较重要和主要部件进行了研究和分析,所以对于可靠度、MTBF、可靠度开始下降时间等,只是定性研究数字;

(6) 从求得的最小割集和对底事件重要度进行仿真的结果来看: B737-300 方向舵系统的关键件和重要件主要集中在以下基本部件上:

a. 方向舵系统的输出部件: 例如方向舵脚蹬的支撑结构、方向舵配平电门、偏航阻尼组件等。而且从最小割集列表中得到: 偏航阻尼组件是方向舵系统中非常关键的部件,这就需要在日常维护中注意它的状态,并适当缩短其维修间隔;

b. 方向舵系统的动力源部分: A 液压系统、B 液压系统、115 伏电源;

c. 方向舵系统的执行部分: 操作钢索、扭力管、后扇型盘、主 PCU 输入

杆等;

d. 方向舵系统的机械液压部件: 主 PCU 液压关断活门、备用 PCU 液压关断活门;

e. 对于其他的反馈部件、执行部件及未提及的部件,一般都具有双通道和并联措施,或者由于可靠性非常高,对整个系统的可靠性影响微乎其微,因此不作为关键部件考虑。

#### 总结

笔者结合日常遇到的由于方向舵系统故障造成飞机停场的事件,和目前国内大规模的 B737-300 飞机的方向舵系统改装工作,运用可靠性分析与仿真技术对方向舵系统的工作原理和硬件构造进行了深入研究。对于那些关键部件在制定维护大纲 (CAMP) 时就要适度缩短其维修间隔,并对换下的故障件进行修理监控;对于不是很重要或者可靠性高的件就要延长其拆换检查间隔,减少飞机停场;这对于航空公司既追求经济效益最大化,又追求安全运营最大化是非常有指导意义的。● (编辑 苏宁)

#### · 简讯 ·

#### 波音任命新民用飞机集团 CEO

Boeing Appoints New CEO and COO of its Commercial Airplanes Unit

9月5日,波音公司董事长、总裁兼首席执行官吉姆·迈克纳尼 (Jim McNerney) 任命斯科特·卡森 (Scott E. Carson) 为波音民用飞机集团总裁兼首席执行官。

今年 60 岁的卡森已在波音工作了 34 年,此前他担任民用飞机集团负责销售的副总裁。他将取代艾伦·穆拉利 (Alan Mulally) 的位置。穆拉利将离开波音公司,担任福特汽车公司首席执行官。

波音还任命了 58 岁的詹姆斯·贾米森 (Jim M. Jamieson) 为波音民用飞机集团首席运营官。贾米森目前在波音公司芝加哥总部担任工程、运营和技术副总裁,他将向卡森汇报工作并负责监管飞机运营和产品研发。