

目 录

前言

- 1.飞机维修的重要作用
- 2.“飞机维修”课程的相关技术知识
- 3.“飞机维修”课程的内容与目标
- 4.学习“飞机维修”课程的意义
- 5.学习要求

第一章 绪论

1.1 航空维修的概念

- 1.1.1 航空维修的内涵
- 1.1.2 航空维修的分类
- 1.1.3 航空维修的级别
- 1.1.4 航空维修的特点

1.2 航空维修的形成与发展

- 1.2.1 形成与发展概况
- 1.2.2 维修指导思想的转变

1.3 航空维修的内容

第二章 航空维修理论

2.1 航空维修理论概述

- 2.1.1 航空维修理论的含义
- 2.1.2 航空维修理论的研究范畴

2.2 可靠性与维修性

- 2.2.1 可靠性
- 2.2.2 维修性

2.3 以可靠性为中心的维修理论

- 2.3.1 以可靠性为中心的维修理论的形成
- 2.3.2 以可靠性为中心的维修理论主要内容
- 2.3.3 以可靠性为中心的维修理论的重要作用

第三章 飞机维修内容的确定

3.1 飞机维修大纲与航空公司维修方案

3.1.1 预防性维修大纲

3.1.2 航空公司维修方案

3.2 飞机维修分析

3.2.1 系统和设备以可靠性为中心的维修分析

3.2.2 结构以可靠性为中心的维修分析

3.2.3 区域检查分析

3.2.4 维修间隔期与维修级别

3.3 小飞机检查方案和老龄飞机补充要求

3.3.1 小飞机检查方案

3.3.2 老龄飞机补充要求

第四章 飞机检测与故障诊断技术

4.1 飞机检测技术

4.1.1 飞机检测的概念

4.1.2 虚拟仪器技术

4.1.3 自动测试设备

4.1.4 机内测试技术

4.2 飞机故障诊断技术

4.2.1 故障诊断的基本概念

4.2.2 故障诊断的技术方法

4.2.3 飞机典型故障及其诊断

4.2.4 故障诊断仪器及其应用

4.2.5 远程故障诊断

4.3 飞机故障机理分析

4.3.1 飞机故障宏观规律

4.3.2 飞机故障机理分析

4.4 飞机故障诊断程序与分析方法

4.4.1 故障诊断的程序

4.4.2 故障分析的方法

第五章 飞机软件维护

5.1 软件维护的概念

5.1.1 软件故障

5.1.2 软件维护

5.2 软件的可维护性

5.2.1 软件可维护性的基本概念

5.2.2 影响软件可维护性的因素

5.3 软件故障及其排除

5.3.1 软件维护的基础

5.3.2 软件维护的过程

5.3.3 软件维护的关键技术

第六章 飞机维修质量管理

6.1 飞机维修全面质量管理

6.1.1 飞机维修质量

6.1.2 全面质量管理

6.2 飞机维修的质量控制

6.2.1 飞机维修质量特征

6.2.2 维修质量过程控制及工具

6.3 维修差错的系统分析

6.3.1 维修差错

6.3.2 维修差错的系统分析

6.3.3 维修差错的系统管理

6.4 维修的经济性分析

6.4.1 磨损及其补偿

6.4.2 飞机使用的经济决策

6.4.3 降低维修成本的对策

6.5 飞机维修中的人为因素

6.5.1 人为因素概述

6.5.2 产生人为差错的原因

6.5.3 减少人为差错的措施

前言

1. 飞机维修的重要作用

(1) 保证飞行安全的主要因素

(2) 提高航空运输经济效益

2. “飞机维修”课程的相关知识

3. “飞机维修”课程的内容与要求

4. 学习“飞机维修”课程的意义

5. 学习要求

共六章，内容主要包括飞机维修理论、飞机维修技术及飞机维修质量管理。

第一章 绪论

科学技术的进步,航空装备的发展和作战使用需求的变化,不断推动着航空装备维修(简称航空维修)向前发展,使航空维修从分散的、定性的、经验的阶段进入到了系统的、定量的、科学的阶段,显著提高了航空维修的综合效益,从而引起了当代航空维修界对科学维修的高度重视,航空维修理论研究与实践取得了一系列新的进展。

1.1 航空维修的概念

1.1.1 航空维修的内涵

1. 维修的概念

维修,就是维护和修理的简称。维护就是保持某一事物或状态不消失、不衰竭、相对稳定;修理就是使损坏了的东西恢复到能重新使用即恢复其原有的功能。维修是伴随着生产工具的使用而出现的,随着生产工具的发展,机器设备大规模地使用,人们对维修的认识也在不断深化。目前,维修这个术语已在多个标准中给出了定义,虽然各标准对维修的定义略有区别,但基本上都认为:维修是为使装备保持、恢复和改善规定技术状态所进行的全部活动,其最终目的是提高装备的使用效能,这种认识,较为准确地反映了维修的本质属性。

随着以信息技术为核心的高新技术的快速发展,新技术、新工艺、新设备、新材料的不断涌现,维修已发生了深刻的变化。维修由事后排除故障到事前预防故障,由保障使用的辅助手段到成为生产力(战斗力)的重要组成部分,由硬件维修扩展到软件维护,由侧重技术层面的作业到实行全系统全寿命的维修管理,维修已从一种分散的活动发展为一种多层次、多专业的系统工程活动;从一种以经验为主的技艺活动发展为建立在现代科学技术基础之上的一门新兴学科,并在科学技术发展的推动和作战使用需求的拉动下,不断向更高阶段发展。

2.故障及其分类

从维修内涵及其发展过程来看,维修可以看作是一种与故障作斗争的创造性的过程与活动。故障是指产品不能执行规定功能的状态;对不可修复的产品如电子元器件、弹药等则称其为失效。对故障以及故障特性的科学认识,是实现科学维修的重要基础。可从多种角度、不同层次来认识故障,如故障分类、故障模式、故障后果、故障规律等,这里主要介绍故障分类。

故障按其发展的过程,可分为功能故障与潜在故障。功能故障是指产品已经丧失其规定功能的状态,简称故障;潜在故障是指产品将不能完成规定功能的可鉴别状态。如飞

机轮胎在磨损过程中,先磨去胎面胶,然后露出胎身帘线层,最后才会发生故障,露出胎身帘线层就是飞机轮胎即将不能完成规定功能的可鉴别状态,即为潜在故障。

故障按其可见性,可分为明显功能故障与隐蔽功能故障。明显功能故障,是指正常使用装备的人员能够发现的故障,这类故障一般由操作人员凭感觉器官或是在用到某一功能时发现的;隐蔽功能故障是指正常使用装备的人员不能发现的故障,它必须在装备停机后作检查或测试时才能发现,如一些动力装置的火警探测系统一旦发生故障就属于隐蔽功能故障。

故障按其相互关系,可分为单个故障与多重故障。单个故障是指由装备或其部件自身的故障引起的原发性故障,或由另一个装备或其部件等引起的继发性故障。多重故障,是指由连续发生的两个或两个以上独立故障所组成的故障事件,其后果可能比其中任何单个故障所造成的后果都严重。多重故障与隐蔽功能故障有着密切的关系,如果隐蔽功能故障没有及时发现和排除,它与另一个故障结合,就会造成多重故障,可能产生严重后果。

1.1.2 航空维修的分类

1.维修工作的种类

从不同的角度出发,航空维修有不同的分类方法,最常见的是按照维修的性质和功能,将其分为预防性维修、修复性维修、改进性维修和战场抢修四种基本类型。

预防性维修(PM, Preventive Maintenance),是指为预防故障或提前发现并消除故障征兆所进行的全部活动。主要包括清洁、润滑、调整、定期检查等。这些活动都是在故障发生前预先实施的,目的是消除故障隐患,防患于未然。预防性维修主要用于故障后果会危及安全和影响任务完成,或导致较大经济损失的情况。由于预防性维修的内容和时机是事先加以规定并按照预定的计划进行的,因而也称为预定性维修或计划维修。

修复性维修(CM, Corrective Maintenance),是指航空装备发生故障后,使其恢复到规定技术状态所进行的全部活动。主要包括故障定位、故障隔离、分解、修理、更换、组合、安装、调校以及检测等。由于修复性维修的内容和时机带有随机性,不能在事前做出确切安排,因而也称为非预定性维修或非计划维修。

改进性维修(IM, Improvement Maintenance),是指为改进已定型和部署使用的航空装备的固有性能、用途或消除设计、工艺、材料等方面的缺陷而在维修过程中,对航空装备实施经过批准的改进和改装。改进性维修也称改善性维修,它是维修工作的扩展,实质是修改航空装备的设计。

战场抢修

2. 维修的方式

航空维修方式是指航空装备维修时机和工作内容的控制形式。进行任何一项维修工作,除了要有正确的操作外,还要控制维修的时机和内容。由于航空装备各种维修工作的工作量有所不同,需要重点控制的是拆卸、更换等重大维修项目进行的时机。因此,有些国家将维修方式称为控制、拆卸、更换时机的形式。科学地确定维修方式,对增强维修工作的针对性、经济性具有重大意义。在长期的维修实践中,人们对控制拆卸和更换时机的维修方式形成了比较稳定的做法,到20世纪60年代,美国民航界归纳总结为定时方式、视情方式和状态监控(事后)方式。

定时方式(HT, Hard Time Process),是指航空装备使用到预先规定的间隔期,按事先安排的内容进行的维修。其中“规定的间隔期”一般是以飞机、发动机的主体使用时间为基准的,可以是累计工作时间、日历时间或循环次数等。维修工作的范围从装备分解后清洗、检查直到装备大修。定时维修方式的优点是可以预防那些不拆卸就难以发现和预防的故障所造成的故障后果。定时方式以时间为标准,维修时机的掌握比较明确,便于安排计划,但针对性、经济性差,工作量大。

视情方式(OC, On Condition Process),是对航空装备进行定期或连续监测,在发现其有功能参数变化,有可能出现故障征兆时即进行的维修。视情维修是基于这样一种事实进行的,即大量的故障不是瞬时发生的,故障从开始到发生,总有一段出现异常现象的时间且有征兆可寻。因此,如果采用监控某一项或某几项技术参数就能跟踪故障迹象过程的办法,则可能采取措施预防故障发生或避免故障后果,所以也称这种维修方式为预知维修或预兆维修方式。视情方式的针对性和有效性强,能够较充分地发挥航空装备的使用潜力,减少维修工作量,提高使用效益。

状态监控方式(CM, Condition Monitoring Process),是在航空装备发生故障或出现功能失常现象以后进行的维修,亦称为事后维修方式。对不影响安全或完成任务的故障,不一定必须做拆卸、分解等预防性维修工作,可以使用到发生故障之后予以修复或更换,但并不是放任不管,仍需要在故障发生之后,通过所积累的故障信息,进行故障原因和故障趋势分析,从总体上对航空装备可靠性水平进行连续监控和改进。状态监控方式不规定航空装备的使用时间,因而能最大限度地利用其使用寿命,使维修工作量达到最低,是一种最经济的维修方式。这种维修方式仅适用于那些发生故障对飞行安全或完成任务无直接影响,并且不会导致继发性故障的设备、机件。

这三种维修方式,发展有先后,但并无高级低级、先进落后之分,它们各有各的使用特点和适用范围,关键在于它们的针对性和适应性。对于飞机、发动机等复杂装备,总体而言,由于它们系统复杂,组成单元众多,一般都是采取三种维修方式相结合的办法。而且,随着航空装备的发展,以及可靠性工程、维修性工程等技术的发展,这三种维修方式已逐渐融合,成为更加合理的维修工作类型。

三种主要维修方式的对照表

序号	项目	定时方式(HT)	视情方式(OC)	状态监控方式(CM)
1	含义	产品在规定的时间内间隔翻修或更换。翻修将使产品恢复到或接近于原规定的技术状态;	对产品技术状况的参数进行连续或周期性的监控和测定,根据技术状况与标准状况的比较结果确定是否进行翻修或更换;	不规定维修时间,而是不断依靠收集、分析产品的使用资料来监控该产品的可靠性,进而按分析结果采取相应措施,使产品一直工作到出现故障再修理或更换;
2	特点	1. 属预防性的维修方式。以时间为标准进行翻修或更换; 2. 定时分解检查或报废不能随时监控产品何时出现故障; 3. 管理工作简单,但针对性差,维修工作量大,不经济;	1. 属预防性的维修方式。是按产品的某些状况标准来控制其可靠性。故能反映产品的实际情况,做到维修更有针对性,更经济; 2. 由于要不断地定量分析视情数据以确定产品的最佳更换期,故对数据积累要求高;	1. 属非预防性的维修方式。是不断分析产品的故障和历次资料进而评定产品的可靠性及维修大纲的有效性。产品出现故障后,采取相应措施解法。故能最大限度发挥产品的效能,最为经济; 2. 没有如同视情那样的“状况”的鉴定工作;
3	监控方式	定期更换或翻修中检查其技术状况;	不断监控产品技术状况的变化,在故障前更换;	故障后更换,不断监控产品总体状况(可靠性或质量),将其控制在可接受的水平;
4	需具备的基本条件	根据产品研制试验分析和使用情况,确定其寿命和翻修间隔;	应提供产品视情要求、技术状况参数、监控手段(方法和设备)、视情资料、良好的可达性等;	故障必须对飞行安全无直接影响,也无隐蔽功能;应建立数据收集分析系统;评定产品可靠性并符合要求;
5	适用范围	1. 故障对飞行安全有直接危害而又发展迅速,且不能采用视情方式的产品; 2. 具有不能进行原位检查的隐蔽功能*的产品; 3. 确有耗损期并且在进入耗损区的残存概率比较大的产品;	1. 故障对飞行安全有危害而又发展缓慢的产品; 2. 具有能进行原位检查的隐蔽功能*的产品; 3. 确有发展缓慢的耗损故障,能查出故障初始状况,且能评估出从潜在故障发展为功能故障所需的时间;	1. 无隐蔽功能*,且故障对安全无直接危害的非耗损型产品; 2. 对耗损型产品,原则上可用 HT 或 OC,但故障后修复费用小于预防性维修费用的产品,宜选用 CM;

*隐蔽功能指的是产品功能中断后,不能由履行正常职责的空勤组察觉;或当需要产品工作时,其功能是否良好不能由履行正常职责的空勤组察觉。

3. 维修工作的类型

航空维修工作的类型是按所进行的预防性维修工作的内容及时机控制原则划分的,可分为保养、操作人员监控、使用检查、功能检测、定时拆修、定时报废及综合工作七种类型。它们是按照所需资源和技术要求由低到高的顺序排列的。这些工作类型对明显功能故障来说,是预防故障本身发生;对隐蔽功能故障来说,并不是预防故障的本身,而是预防该故障与其他故障结合形成多重故障,归根结底是预防故障引起的严重后果。

保养(Servicing),是指为保持航空装备固有性能而进行的表面清洗、擦拭、通风、添加油液或润滑剂、充气等工作,是对技术、资源要求最低的维修工作类型。

操作人员监控(Operator Monitoring),是操作人员在正常使用航空装备时对其状态进行监控的工作。这类监控包括对航空装备所做的使用前检查,对航空装备仪表的监控,通过噪声、振动、温度、操作力的改变等感觉来发现潜在故障,但它对隐蔽功能不适用。

使用检查(Operational Check),是按计划进行的定性检查工作,如采用观察、试验、操作手感等方法检查,确定航空装备能否执行规定功能。如对火灾告警装置、应急设备、备用设备的定期检查等,其目的是发现隐蔽功能故障,减少发生多重故障的可能性。

功能检测(Functional Inspection),是按计划进行的定量检查工作,以确定航空装备的功能参数是否在规定限度之内。通常需要使用仪表、测试设备等,以发现潜在故障。

定时拆修(Reword at Some Interval),是指航空装备使用到规定的时间予以拆修,使其恢复到规定状态的工作。

定时报废(Discard at Some Interval),是指航空装备使用到规定时间予以废弃的工作。

综合工作(Combination of Tasks),是指实施上述两种或多种类型的预防性维修工作。

1.1.3 航空维修的级别

1. 部队级别划分

航空维修级别(Maintenance Level),是根据航空维修的深度、广度及维修时所处场所划分的等级。航空维修级别是科学组织维修工作,合理配置维修资源,提高维修综合效益的重要条件,是确定维修作业体制、设置维修机构的重要依据。

航空维修级别,主要是依据航空装备发展水平、维修思想、维修作业内容等而确定的。由于世界各国国情、军情的不同,航空维修级别的划分也不是一种模式。我国空军和多数国家空军对航空维修实行三级维修,即基层级维修、中继级维修和基地级维修。

基层级维修(Organizational Maintenance),是由直接使用航空装备的单位对装备所进行的维修。主要包括日常维护保养、周期性检测、定期检修、一般性改装、飞机结构小修和轻度战伤飞机抢修等。

中继级维修(Intermediate Maintenance),是由航空兵师等修理机构对航空装备所进行的维修。主要包括飞机机体结构中修,机载设备、机件的中修、大修,部分零配件的修配制造,较大的改装和战伤飞机的抢修等。

基地级维修(Depot Maintenance),是指由空军航空修理工厂或航空装备制造厂对航空装备进行的维修。主要包括航空装备大修,技术复杂的改装,事故修理,零备件的制造,平时、战时飞机抢修支援或技术支援等。

维修级别的划分不仅要考虑维修本身的需要,还要考虑到作战使用和保障要求,并且要与作战指挥体系相适应,以便在不同的建制级别上组建不同级别的维修机构。因此,在不同国家或一个国家的不同军兵种之间,维修级别的划分不尽相同。随着航空装备科学技术水平的不断提高和可靠性、维修性、保障性的不断改善,有的国家出于减轻机动作战保障的负担和节约人力、物力资源的考虑,并根据航空装备实际,制定了“二级维修”计划(TLM, Two Level Maintenance),即取消中继级维修,目前仍在试行。

2. 民航级别划分

在航空器维修计划中把维修工作依据不同的维修内容分为航线维修、低级维修、高级维修三类,每一类都有相应的维修设施。

①航线维修。内容有:

A. 航前/过站检查:包括绕机一周的目视检查和例行的勤务工作,主要是检查飞机外观和飞机的技术状态,调节有关参数,排除故障,添加各类工作介质(润滑油等)。

B. 航后检查:一般是在夜间进行,24小时内执行一次,除了航前检查的工作外还要排除空地勤人员反映的运行故障。

航线维修是在航站完成,一般只需要简单的检测仪器和维修或拆换。现代飞机在设计中使很多零部件设计成航线可拆换件(LRU),就是为了在这些部件有故障时可在航站上迅速拆换,排除故障。

②初级维护,指低级的定期维护。欧美飞机的定检周期按飞行小时或起落架次分为A、B、C检等级别。波音系列飞机规定为A检和C检,如对波音737-300,A检的间隔为200小时,B检间隔为800小时,C检间隔为3200小时,每次定检都有规定的维护和检查项目。

这种检查要在维修基地进行,飞机要进入机库,因此机库是初级维修的必要设施。机库首先要有足够的面积停放飞机,还需要相应的工作平台、机械设备和检修设备。

③高级维修,属于高级维修的是中检和D检(结构检查)。中检的间隔时间以年来计算,内容包括结构检查、客舱更新,停场时间在10天以上,又叫大修、翻修。D检是飞机最高级别的检修,间隔时间在20000飞行小时以上。D检除包括前面级别的各种维修项目之外,还要对发动机进行大修、系统结构的深入检查及改装等。进行高级维修除需要机库外,还要有相应的各种车间,如发动机车间、无线电仪表车间、必要的航材库、发动机试车台等。机库内还应有一定的总装区,以保证维修后的零部件的放置和安装。D检后的飞机都要进行试飞,为此还应有试飞的部门和设施。

●维修单位等级

中国民航总局适航司曾将维修等级分为四级，不同等级的维修单位，承担不同等级的预定维修工作。

一级维修单位：能承担一型或多型飞机、发动机、附件、特设机件的大修，以及机体结构检查（D级检修）和各级检修；

二级维修单位：能承担飞机C检（含）以下的各级检修、更换发动机、发动机热部件检查和部分附件、特设机件的校验和修理；

三级维修单位：同上。非民航局直属运输通用航空企业下属的执管飞机单位；

四级维修单位：仅能承担航线维护。

近年来，各维修单位的隶属关系有所变化，但反映维修能力和资源配置的格局没有大的改变，一级维修单位，相当现在六大骨干航空公司的维修基地；二、三级维修单位相当中小航空公司（分公司）的航修厂、机务工程部；四级维修单位相当于分散在各经停航站的机务维修站。一般一、二、三级维修单位，内部都有内外场维修范围及相应维修组织的划分，四级维修单位则列属于外场维修。按中国民航适航管理规定：民用航空器和/或航空器部件的维修工作分类为：校验、改装、修理、翻修、航线维修和定期检修。习惯上，大都把前四类通称为内场维修，而把航线维修（包括航前航后和短停）及部分可在停机坪进行的定期检修，通称为外场维修。可见，外场维修所涵盖的内容，不单纯是指航线维修。当前，“外场”的概念，包容了航线维修及结构检查（不含）以下的全部维修工作内容。从事外场维修的工程技术人员和技术工人众多。外场维修工作质量，对保证航空器准时正常运行，对及时掌握航空器及其部附件的技术参数变化，对保证/恢复航空器固有可靠性水平，保持航空器持续适航，对航空公司的运营安全和效益，都有极大影响。

1.2 航空维修的形成与发展

航空维修的最终目的，是以最经济的资源消耗来获取航空装备最大限度的作战使用效能。为了实现这一目的，国内外航空维修界进行了长期不懈的实践探索。纵观航空维修百年历程，是一个对维修客观规律认识不断深化的过程，是一个使维修活动逐渐符合维修客观规律的过程，可以说航空维修的发展过程就是一部追求科学维修的发展史。

1.2.1 形成与发展概况

1.初始阶段

----专职维修人员和专门维修机构从无到有的发展

2.建国初--20世纪70年代

----维修方式和维修组织，在原苏联模式的基础上走自己的路

3.20世纪70年代以后

----逐步与国际接轨

1971年10月，联合国大会通过了恢复我国在联合国一切合法权益的重大决议；同年11月，国际民航组织第74届理事会第16次会议通过决议，承认中华人民共和国的代表为中国惟一合法代表，并于1974年9月，选举中国为国际民航组织理事国。国际关系的新变化和中外交往的新发展，推动着我国民航运输事业前进的步伐，并促使中国民航进入国际民航活动的新阶段。

60年代中期，我国开始引进英制子爵号涡桨发动机飞机和三叉戟喷气发动机飞机。1971年，引进美制波音707四发喷气式飞机，80年代以后，大批欧美飞机如波音747、767、737、757、777，MD-82，A300、A310、A340，MD-11等，取代苏制

飞机而构成中国民航的主力机群。维修方式，自然沿用制造厂家推荐的维修大纲，一般都由机务大队（中队）担负航前航后短停维修和结构检查（不含）以下的定期工作；航修厂担负部附件的校验修理；大修厂担负结构检查和重大的改装。这期间，西方和原苏联以可靠性为中心的维修理论在我国维修界广为传播，提出了与传统维修思想不同的新观念，要点如下：

（1）航空装备的可靠性和安全性，是由设计制造所决定的固有性能，只有改进设计才能提高其可靠性和安全性，有效而及时的维修，只能保持和恢复其固有水平，但不能提高它，维修不良，反而会降低其可靠性和安全性。

（2）安全性是重要的，当分析故障对安全性有不利影响时，必须确定应做的维修工作。与安全无关的维修工作，只有在经济上是合理的时候才做。

（3）定时维修方式的分解检查，虽然能判明项目有无故障，但不能有效鉴定零件可靠性下降的程度。用先进的检测手段进行原位检测和监控，在很多条件下可以代替传统的离位检查。

（4）复杂系统的故障不遵循浴盆式数学模型的描述，其概率很难确定，必须建立完备的数据收集和分析系统。

这些论点，与我们长期实践摸索出的一些结论性概念，许多是不谋而合的，因而很快为我所用，推动了维修方式和维修管理体制的改革。

1980年6月16日，民航局在北京首都机场组建了我国第一个维修基地，将原来的机务大队、航修厂（民航101）、大修厂、航材处、机务处合而为一，从组织结构上实现了外场维护、内场修理的合一，实现了生产、技术、航材保证的合一。变内外场分割的管理形式为系统管理，特别为适应现代维修管理的要求，强化了信息管理，建成了比较灵敏的数据收集分析系统，成立了独

立的质量检验系统和健全的质量控制、技术保证系统。从而使维修管理由过去主要是物流管理，转变为物流、信息流平行管理，且信息流的成分猛然加大的格局。这是维修工作的一大飞跃。维修基地组织形式的基本构架是：航班飞机内外场保证统一指挥协

调的基地职能机关——计划生产处、技术处、质量控制处、航材处、外站处和其他科室；实施维修生产的有：组织外场维修（航前、航后、短停维护及 A、B 级检查）的机务大队，担负 C 检和 D 检的飞机维修部，担负发动机修理、单元体检查的发动机维修部，担负部附件修理校验的附件维修部，担负零备件制造及表面处理的机械加工部。实践表明，这种组织形式尽管还存在缺陷，但从发展看，还是有生命力的，富有成效的。是实行“以可靠性为中心的维修”之可行组织形式。

1989 年 8 月，中国国际航空公司与德国汉莎航空公司以北京维修基地为基础，合资成立北京飞机维修工程公司，使这种组织形式得以完善和深化。接着，广州民航与美国合资成立广州飞机维修工程公司，各大航空公司先后按新的维修理论调整了维修组织，采用新的维修方式，逐步实现与国际民航接轨。

1.2.2 维修指导思想转变

1. 20 世纪 40 年代——事后维修

1903 年，随着莱特兄弟第一架飞机的上天，航空维修也随之产生。早期航空装备的维修，主要是处于“裂了就焊、坏了就换”，即出了故障再修的状况，对维护保养、预防故障还没有深刻的认识和引起高度的重视。

2. 20 世纪 50 年代——预防为主

随着航空装备的发展及其应用范围的扩大，飞行安全成为一个突出的问题。因为飞机在空中飞行，一旦在“空中抛锚”，不能像汽车这样的地面装备可以停下维修，而可能会导致严重事故，为此，在 20 世纪 40 年代—50 年代形成了比较明确的“故障—维修”概念模式，即装备（机件）要工作→工作必磨损→磨损出故障→故障危及安全。基于这种感性认识，提出并建立了“质量第一、预防为主”的维修思想，主张“多做工作、勤检查，把故障消灭在萌芽状态”，开始把保证飞行安全确立为一个重要的维修理念，按照“维修工作走在故障前面”的要求开展维修，主要采取定时维修和离位维修。这种维修思想虽然认识到了维修是安全使用的前提和保证，但维修还是作为一项专门的业务技术而出现。直到 20 世纪 50 年代末，随着航空装备的大发展及其规模化应用，航空维修逐渐建立了相对独立和完善的管理体系，但维修的主导思想依然是传统的经验维修观念，定时维修方式依然是预防性维修的主要控制方式。

“质量第一、预防为主”这种预防性维修，是建立在对航空装备使用及其故障特性直观认识基础之上的，基本适应了当时航空装备的使用需求，对预防故障、保证航空装备使用安全发挥了重要作用。

预防性维修,在维修发展历程中具有重要的历史地位.但在该阶段,维修还只是被看作是一种单纯的技术性活动,一种比较复杂的操作技艺。虽然在这个阶段,随着航空装备规模的扩大和应用的广泛,开始了对科学维修的思考和探索,在维修技术、维修手段、维修体制以及故障机理等方面开展了研究,一些新兴理论如运筹学、可靠性、概率论与数理统计开始运用到维修工作中,但维修本身并没有得到科学的认识,也缺乏科学的维修理论指导。

20 世纪 50 年代末,随着信息技术、新材料、新工艺等高新技术在航空装备中的应用,航空装备现代化、自动化和智能化程度不断提高,航空装备使用的规模和范围越来越大,维修费用急剧上升,而航空装备的可用率却不断下降,原有的维修方式已无法适应维修的实际需求,因此,科学维修成为更为迫切的内在需要。突出表现是:故障不再简单地是时间的函数;早检查、多检查未必就能预防所有故障;故障未必都危及飞行安全等。通过对大量维修资料和故障数据的统计分析,人们逐渐认识到维修的出发点和落脚点,应该是“可靠性”而不是“故障”。

3. 20 世纪 60 年代——以可靠性为中心 (RCM)

从 1960 年起,美国民航界运用现代科学技术,对航空维修的基本规律进行了深入研究,随即提出了新的认识,经过近 10 年的探索,到 60 年代后期,形成了以可靠性为中心的维修理论(RCM,Reliability-Centered Maintenance),创立了预防性维修工作的逻辑决断法,据此改革了单一的定时维修方式并取得了成功,这是维修从技艺发展成为科学的重要标志。以可靠性为中心的维修是在对装备设计特性、运行功能、故障模式和故障后果科学分析的基础上,运用可靠性理论、逻辑决断、数理统计等新理论、新技术、新方法确定维修的必要性、可行性和有效性,最终制定出实用、合理的维修计划或大纲,科学指导维修实践。

随着以可靠性为中心的维修理论的建立,该理论在世界范围内得到了广泛的应用,并不断发展。1968 年,RCM 首次用于制定波音 747 飞机维修大纲,获得了成功,在实际应用过程中对该理论作了进一步的充实,形成了《航空公司、制造公司维修大纲制定书》,在 20 世纪 70 年代,RCM 被世界各国广泛用于新老军用、民用飞机维修大纲的制定或修订,并推广应用到其他装备上。1978 年,美国联合航空公司 F. S. 诺兰等人受美国国防部的委托,在原有以可靠性为中心维修理论的基础上,研究提出了一种新的逻辑决断法。该方法从功能系统到零件自上而下地确定重要功能产品,有效筛选了非重要功能产品,大大减少了逻辑决断分析的工作量,从此人们把制定预防性维修大纲的这一类逻辑决断法称为“RCM”。

20 世纪 80 年代以来,随着航空装备的更新换代和维修实践的深入,对维修规律的认识得到进一步深化。人们认识到航空维修是一种综合性的系统工程活动,是技术过程与管理过程的统一,是航空装备寿命周期过程的有机组成部分,从而逐渐形成了全系统全寿命维修思想和全系统全寿命维修管理理论,使航空维修跃升到了一个新的发展阶段。

1.3 航空维修的内容

(1) 航空维修设计,包括航空维修品质设计和维修保障设计。维修品质设计主要有:可靠性设计、维修性设计、保障性设计、安全性设计、人素工程设计等。维修保障设计主要有:提出维修方案(确定维修等级、维修方针、维修指标、维修保障要求),制定维修保障计划(详细的维修计划或维修大纲和维修管理计划)、维修工具设备设计、维修设施设计、维修人员技术培训设计、维修零备件保障设计、维修技术文件资料设计、装备封装及运输设计等。航空维修设计的基本任务就是从设计制造上保证航空装备具有良好的维修品质,并提供一个经济而有效的维修保障系统。航空维修设计从方案论证开始,贯穿于装备研制全过程,由设计制造部门与使用维修部门共同完成。

(2) 航空维修作业,是指在航空装备服役期内直接对其进行的维修操作活动和采取的各种技术措施,主要包括航空装备的维护与修理。航空维修作业是维修战斗力(生产力)的具体体现,也是整个航空维修系统赖以存在和发展的基础。维护包括飞行机务准备、飞机定期检修和日常保养;修理包括小修、中修和大修(翻修),以及航空装备改装等。

(3) 航空维修管理,包括航空维修系统的构建及其管理,即确定管理体制、作业体制和航空维修系统的构成与布局;航空维修系统的运行管理,即制定维修方针政策、维修规划、维修法规,实施信息管理、质量控制、安全管理、效能分析和战时维修的组织指挥等;航空维修系统要素的统筹管理,即对维修人员、维修手段、维修备件、维修设施、维修经费及其他维修资源的管理。

(4) 航空维修科研,主要研究维修理论、政策,参与新型装备的研制论证及其技术预研,研究航空装备的合理使用和现有装备的改进、改装,研究制定维修技术法规,分析研究事故、故障,提出预防措施,改革维修手段,开发应用新的维修工艺技术等。由专门的科研机构及相关院校、训练机构,以及各级维修机构负责组织。

(5) 航空维修的培训 是组织实施航空维修人员的专业技术培训,使之具有与本职工作相适应的理论知识、技术水平和管理能力,分为生长教育训练和继续教育训练(上岗训练、日常训练、换装训练、晋职训练、函授和自学考试等),由专门的院校、训练机构和各级维修机构分工负责完成。

第二章 航空维修理论

2.1 航空维修理论概述

2.1.1 航空维修理论的含义

航空维修工作分为两个范畴，即维修技术和维修组织管理，它们之间是紧密相连的。维修技术是对“物”——民用航空器及其装备、维修手段和设施而言，而维修组织管理是对“事”——服务于航空维修目的的各项工作的，或者称为“航空维修工程”。对这个“事物”的客观规律进行研究，对它们进行概括和总结，结合运用系统工程理论、航空工程专业理论、可靠性理论和管理科学，构成了航空维修理论。这个理论的定义，可以这样说：它是反映航空维修工作客观规律的科学，是研究以最高的飞机使用可靠性、最低的消耗，为保障安全、正常地完成飞行任务提供有关航空维修技术、维修管理以及维修设计等的应用工程科学。

2.1.2 航空维修理论的研究范畴

1. 航空维修技术理论

它是反映航空维修技术工作客观规律的科学，主要内容有：

(1) 故障研究。预防和排除故障是航空维修工作的重要内容之一。故障研究包括故障机理、故障规律和模式、故障率、故障预防、故障预测的研究；分析、判断、排除故障的理论根据和最佳程序的研究；各种条件排除故障和修理手段及其理论根据的研究等。

(2) 民用航空器及其装备的质量检查和监控。质量检查和监控是实现维修的重要手段，是外场维修人员大量地、反复地进行的一项技术工作。在这方面涉及的理论有自动检测与监控；无损检验与无损探伤；原位检查以及最佳检测程序的研究等。

(3) 环境、工作负荷和机械老化（飞机年龄老化）对民用航空器及其装备的影响的研究。包括由于环境恶化导致腐蚀和损伤，飞机使用时间超过经济寿命的 75% 以上所导致的疲劳裂纹、磨损和腐蚀，飞机在使用中的振动、加速度、冲击等引起的机械应力变化等方面的影响。因此，研究环境谱与载荷谱及其对航空器及其装备影响的客观规律，对于通过地面检查，做好故障预防工作有着重要的作用。

(4) 维修规程（或方案）的研究。根据航空器及其装备的固有可靠性、故障规律、环境影响等条件，选取最佳的维修工艺、维修周期、维修程序的理论根据和实施方法的研究，对于指导维修技术工作，取得最佳维修效果，实现维修目的有着重要的意义。

2.航空维修管理理论

它的研究对象，主要有以下 6 个方面：

(1) 维修管理的决策分析。维修工作中，从一些重大决策问题，如制订整个维修工作方针原则，确定维修组织机构的设置和布局，研究与发展规划等，直到一些具体问题，如飞机维护、修

理和使用的安排，维修方案（或持续适航性维修大纲、翻修的方针、损坏的结构或机件是修复还是报废）等，都需要改变只凭直接经验作出决策的状况，而代之以运筹学决策。

(2) 维修方式或工作类型的研究。维修方式是 60 年代在国外民航界提出的。它是在可靠性工程理论和分析的基础上总结多年的维修实践，提出了控制维修活动的基本方式，或者维修工作基本类型。目前，西方国家比较系统地提出的理论，主要是“以可靠性为中心的维修”理论，推广以 MSG-3 文件来制订新型民用飞机的初始维修大纲。

(3) 维修经济性的研究。这个研究的目的是对付出的费用与取得的效果之间作出最佳的权衡，所以也叫“费用效果分析”或“费用因素分析”。实际上，经济性分析几乎贯穿在一切决策与权衡中，即任何工作都要从宏观和微观上按经济基本原理来进行经济决策，如对预防性维修费用估算、飞机经济寿命费用估算、飞机或机件的翻修费用等。

(4) 维修组织的研究。结合现代民航的特点，研究采取何种维修结构形式和体制，把人力、资金和设施进行最合理的安排，充分发挥各级组织的职能。

(5) 维修工效的研究。这个研究是以维修人员在维修作业中的操作活动为主要研究对象，以提高操作效率为目的。它不仅涉及人的生理、心理特点，还包括环境对人的活动的影响。它的理论属于行为科学的范畴，是现代管理理论的一个重要分支，称为“管理行为学”或“工效学”。

(6) 维修信息系统的研究。航空维修方面的信息，主要是组织实施维修工作所需的各种数据资料。维修信息不仅用于指导维修实践，同时也是维修理论研究（包括维修技术理论、维修组织方面的理论和维修设计理论）必不可少的依据。为了保证及时、

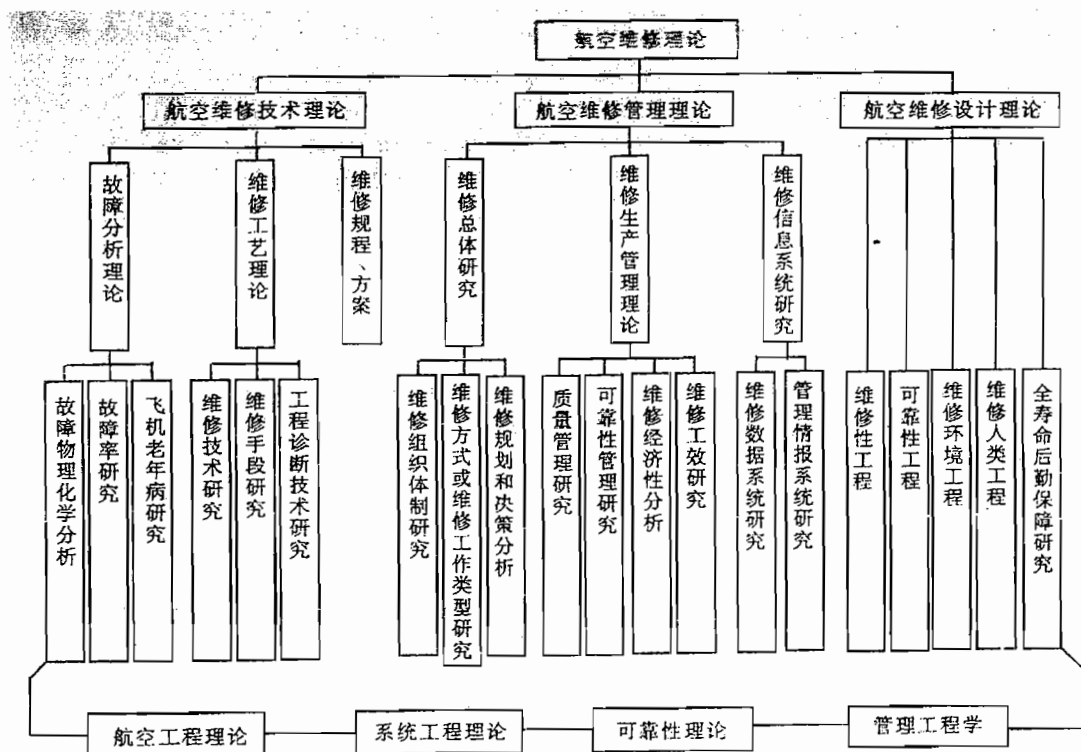
准确和可靠的信息，必须建立以应用电子计算机为管理手段的、完整的信息系统，包括数据收集和处理系统以及管理情报系统。

3.航空维修设计理论

它主要是指有关飞机维修性能的设计理论。飞机的可维修性（如可达性、易装性、易修性、互换性、维修安全性等），是飞机全面质量指标之一，它是制造条件赋予飞机的一种客观属性，它是决定维修工作量与维修经济性的物质条件。维修人员是在这一物质条件下，发挥其主观能动性的，例如检查手段的改进，检查仪器的改装与研制，提高飞机维修性的加装、改装以及向制造厂家提出改进维修性的建议等。

飞机维修性和可靠性密切相关，为了从根本上改变维修工作面貌，实现维修现代化，很重要的问题就是从根本上改进飞机的固有可靠性和维修性。作为航空器及其装备的使用单位，应及时向制造厂家提出可靠性、维修性的要求。因此，维修设计理论自然就成为航空维修理论的组成部分之一。

● 航空维修理论系统图



2.2 可靠性与维修性

2.2.1 可靠性

可靠性工程是指为了达到航空装备的可靠性要求而进行的有关设计、试验、生产等一系列的技术和管理活动，其主要目标是解决航空装备经久耐用的难题，保证航空装备在作战使用过程中不出故障或少出故障。可靠性工程作为一门独立的学科，是 20 世纪 40 年代美国空军为解决机载电子设备的可靠性问题率先开始研究的，于 50 年代后期发展成为一门独立的工程学科。经过半个多世纪的发展，可靠性工程日渐成熟，在提高航空装备作战能力、改善生存性、提高机动性、减少维修负荷，降低维修保障费用等方面发挥了重要作用。

1.可靠性的概念

可靠性(Reliability)通常是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。

在这里,产品是一个非限定性术语,可以是某个装备系统,也可以是组成系统中的某个部分乃至元、器件等。在可靠性定义中,以下“三个规定”是很重要的。

(1)“规定的功能”。可靠性是保证完成规定功能的质量特性,定义产品的可靠性,首先要定义和规定其功能。电视机的功能是接收电视台发出的电视信号,能看,能听;洗衣机的功能是洗衣服;雷达的功能是发现搜索目标,测出距离和方位;枪、炮的功能是射击……这些是产品的规定功能。许多产品规定的功能并不是单一的,而是多种多样的,电视机还可以接录像机。显然,工厂制造出来的合格产品本来是具有完成规定功能的能力的,但如果出了故障,坏了,就不能完成规定的功能;可靠性就是要产品不出毛病,能完成规定功能。但是应当强调,一是规定的功能是指按产品技术文件中规定的功能。电视机能看见图像、能听见声音,而图像“跳舞”,噪声大就失去了规定功能;二是功能应指规定的全部功能,而不是其中的部分功能,即要注意产品功能的多样性;三是规定功能还应包括故障或完成功能的判断准则,如,枪、炮不是打响就合格,散布大到一定程度就不能完成规定功能,但散布大到什么程度就算失去规定功能,应加以规定。

(2)“规定的时间”。这是可靠性定义中的核心。因为离开时间就无可靠性可言,而规定时间的长短又随产品对象不同和使用目的不同而异。例如,火箭弹要求在几秒或几分钟内可靠地工作;地下电缆、海底电缆系统则要求几十年、上百年内可靠地工作。产品的规定时间,是广义的时间或“寿命单位”,它可以是使用小时数(如电视机、雷达、电机等),行驶公里数(如汽车、坦克),射击发数(如枪、炮、火箭发射架),也可以是储存年月(如弹药、导弹等一次性使用而长期储存的产品)。

(3)“规定的条件”。这是产品完成规定功能的约束条件,包括多方面,如装备使用(工作)时所处的环境(指产品工作所处的环境温度、湿度、振动、风、砂、霉菌等)、运输、储存、维修保障和使用人员的条件等。这些条件对产品可靠性都会有直接的影响,在不同的条件下,同一产品的可靠性也不一样。例如,实验室条件与现场使用条件不一样,它们的可靠性有时可能相近,有时可能相差几十倍,所以不在规定条件下就失去了比较产品可靠性的前提。

2.可靠性的量度

对某一装备来讲,到某个时间为止,它可能已经发生了故障,也可能还没有发生故障,这种在一定条件下可能发生也可能不发生的事件称为随机事件。由于故障的发生具有随机性的特点,所以可靠性的量化,常用概率或者随机变量来描述。

用可靠性来衡量产品指标,过去只是定性的分析,即采用可靠性是“好”还是“不好”这样模糊的标准,而没有定量的概念。自从可靠性工程诞生以后,将可靠性量化,就可以对各种产品的可靠性提出统一而明确的要求。

可靠性的基本工作是和故障作斗争,可靠性的研究也是从产品本身的故障入手的,而故障的发生带有偶然性。对某一装备来讲,到某个时间为止,它可能已经发生了故障,也可能还没有发生故障,这种在一定条件下可能发生也可能不发生的事件称为随机事件。由于故障的发生具有随机性的特点,所以,可靠性的量化常用概率或者随机变量来描述。

产品可分为可修复产品和不可修复产品两大类。可修复产品是指通过修复性维修能恢复到规定状态或值得修复的产品;不可修复产品是指通过修复性维修不能恢复到规定状态或不值得修复的产品。航空装备上的绝大多数产品都属于可修复产品,它们在使用过程中都是可以修复或通过更换新的零部件而完全恢复原来的使用性能。可修复产品可靠性常用的量度有可靠度函数、故障分布函数、故障分布密度函数、故障率函数、可靠性参数等。

(一) 可靠度函数

(1) 定义。产品在规定的时间内和规定的条件下,完成规定功能的概率称为产品的可靠度函数,简称可靠度,记为 $R(t)$ 。

假设规定的时间为 t ,产品在规定的条件下的寿命为 T ,只有 $T > t$ 的产品才能完成规定功能,而 $T > t$ 是一个随机事件,则

$$R(t) = P\{T > t\} \quad (2-1)$$

显然,这个概率值越大,表明产品在 t 完成规定功能的能力越强,产品越可靠。

(2) $R(t)$ 的性质。

① $0 \leq R(t) \leq 1$;

② $R(0) = 1$,表示产品开始工作时完全可靠, $R(\infty) = 0$,表示产品最终都会发生故障;

③ $R(t)$ 是非增函数,表示随产品使用时间增加可靠性降低。

(3) $R(t)$ 的估计。由数理统计知识可知,当统计的同类产品数量较大时,概率可以用频率进行估计。假如 $t=0$ 时 N 件产品开始工作,到 t 时刻有 $N_f(t)$ 个产品故障,还有 $N_s(t)$ 个产品继续工作,则频率为

$$R^*(t) = \frac{N_s(t)}{N} = \frac{N - N_f(t)}{N} = 1 - \frac{N_f(t)}{N} \quad (2-2)$$

式(2-2)可以用来作为时刻 t 的可靠度的近似值,称为经验可靠度,或可靠度的统计值。

(4) 任务可靠度。 $R(t)$ 是从零时刻算起的,而在实际使用中,人们关心的是飞机、发动机或机件在执行任务过程中(如一次飞行、一个起落)中某一段工作时间的可靠度,即已经工作了时间 t ,再继续工作一段时间 Δt 的可靠度,则称从 t 时刻工作到 $t + \Delta t$ 时刻的条件可靠度为任务可靠度,记为 $R(t + \Delta t | t)$ 。由条件概率公式,有

$$R(t + \Delta t | t) = P\{T > t + \Delta t | T > t\} = \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (2-3)$$

则

$$R(t + \Delta t | t) = \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (2-4)$$

经验任务可靠度为

$$R^*(t + \Delta t | t) = \frac{R^*(t + \Delta t)}{R^*(t)} = \frac{N_s(t + \Delta t)}{N_s(t)} \quad (2-5)$$

(二) 故障分布函数

(1) 定义。产品在规定的时间内和规定的条件下,丧失规定功能(即发生故障)的概率,称为产品的故障分布函数(或不可靠度),记为 $F(t)$ 。设产品寿命为 T ,规定时间为 t ,则

$$F(t) = P\{T \leq t\} \quad (2-6)$$

式中: $F(t)$ 为在规定的条件下,产品寿命不超过 t 的概率。

(2) $F(t)$ 的性质。

- ① $0 \leq F(t) \leq 1$;
- ② $F(0) = 0$, 表示产品未使用时故障数为零, $F(\infty) = 1$, 表示产品最终全部发生故障;
- ③ $F(t)$ 是非减函数。当产品工作时间增加时,其故障数不可能减少,只可能不改变或者增加,因此为非减函数。

从上述分析可看出, $R(t)$ 和 $F(t)$ 是两个对立事件的概率,则有

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2-7)$$

$R(t)$ 、 $F(t)$ 随时间 t 的变化关系,见图 2-1。

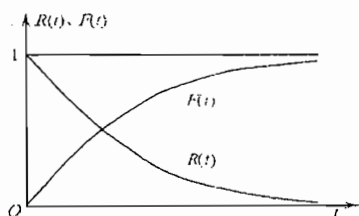


图 2-1 $R(t)$ 、 $F(t)$ 随 t 的变化

(3) $F(t)$ 的估计。

$$F^*(t) = \frac{N_f(t)}{N} = \frac{N - N_r(t)}{N} = 1 - \frac{N_r(t)}{N} \quad (2-8)$$

例 2-1 对某种元件 100 个在相同条件下进行寿命试验,每工作 100h 统计一次,得到结果如图 2-3 所示,试估计该种元件在各检测点的可靠度。

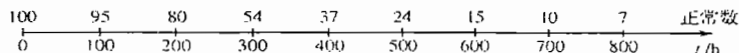


图 2-3 元件寿命试验统计结果

解:依题意计算结果见表 2-1。

表 2-1 例 2-1 计算结果

时刻 t_i/h	在 $(0, t_i)$ 内故障数 r_i	$R^*(t) = \frac{N - N_f(t)}{N}$
0	0	1.00
100	5	0.95
200	20	0.80
300	46	0.54
400	63	0.37
500	76	0.24
600	85	0.15
700	90	0.10
800	93	0.07

由表 2-1 可画出 $R(t)$ 的曲线(见图 2-2)。

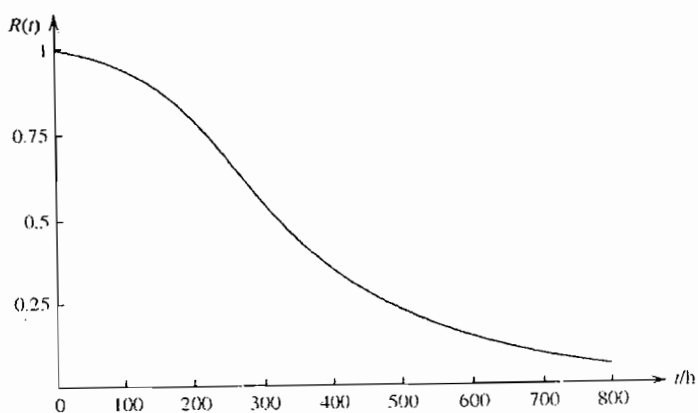


图 2-2 表 2-1 的 $R(t)$ 曲线

从图 2-4 可以估计出不同时刻的可靠度值。例如,在 $t = 250\text{h}$ 这一时刻,对应的可靠度为: $R(250) \approx 0.68$ 。反之,若给定可靠度为 0.90,也可按图估计出对应的时间 t_0 ,即 $R(t_0) = 0.90$ 时, $t_0 = 130\text{h}$ 。

(三) 故障分布密度函数

(1) 定义。在规定条件下使用的产品,在时刻 t 后一个单位时间内发生故障的概率称为产品在时刻 t 的故障密度函数,记为 $f(t)$,则

$$\begin{aligned} f(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{t < T \leq t + \Delta t\}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{T \leq t + \Delta t\} - P\{T \leq t\}}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = F'(t) \end{aligned} \quad (2-9)$$

式中: $P\{t < T \leq t + \Delta t\}$ 为产品在区间 $(t, t + \Delta t)$ 发生故障的概率。

(2) $f(t)$ 的性质。具有一般密度函数的性质: $\int_0^{+\infty} f(t) dt = 1$ (归一性); $f(t) \geq 0$ (非负性)。

(3) $f(t)$ 的估计。显然也可用频率变化率来估计,即在时刻 t 后(前)一个单位时间内的故障数与总数之比。可近似表示为

$$f^*(t) = \frac{N(t + \Delta t) - N_t(t)}{N} \times \frac{1}{\Delta t} = \frac{\Delta N_t(t)}{N} \times \frac{1}{\Delta t} \quad (2-10)$$

式中: $\Delta N_t(t)$ 为时间间隔 Δt (t 到 $t + \Delta t$) 的故障数。

$f(t)$ 与 $R(t)$ 、 $F(t)$ 之间的关系见图 2-2 图中曲线 $f(t)$ 与横坐标之间的总面积为 1, 即 $\int_0^{+\infty} f(t) dt = 1$ 。因 $F(t) = \int_0^t f(t) dt$, 则

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{+\infty} f(t) dt \quad (2-11)$$

(四) 故障率函数

(1) 定义。在时刻 t 正常工作着的产品, 在其后 $t + \Delta t$ 的单位时间内发生故障的条件概率称为产品在时刻 t 的瞬时故障率, 简称为故障率, 记为 $\lambda(t)$ 。该概念表示, 如果装备工作到 t 时刻还没有发生故障, 那么该装备在随后单位时间内发生的故障概率即为故障率。

设 T 为产品在规定条件下的寿命, t 为规定时间, 则“ $T > t$ ”表示事件“产品在区间 $(t, t + \Delta t)$ 内完成规定功能”或“产品已工作到 t ”; “ $t < T \leq t + \Delta t$ ”表示事件“产品在区间 $(t, t + \Delta t)$ 内发生故障”, 于是产品工作到时刻 t 后, 在 $(t, t + \Delta t)$ 内发生故障的概率为

$$P\{t < T \leq t + \Delta t | T > t\} \quad (2-12)$$

式(2-12)除以 Δt 后, 就得到产品在 $(t, t + \Delta t)$ 内的平均故障率; 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 就成为产品在 t 时刻的瞬时故障率。有

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{t < T \leq t + \Delta t | T > t\}}{\Delta t} \quad (2-13)$$

由条件概率公式, 得

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{t < T \leq t + \Delta t\}}{P\{T > t\}} \times \frac{1}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P\{t \leq t + \Delta t\} - P\{T \leq t\}}{P\{T > t\}} \times \frac{1}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{P\{T \leq t + \Delta t\} - P\{T \leq t\}}{1 - P\{T \leq t\}} = \frac{F'(t)}{R(t)} \\ \lambda(t) &= \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2-14)$$

故障率是可靠性工程中的一个非常重要的概念, 在实践中, 它又是装备的一个重要参数, 故障率愈小, 其可靠性越高; 反之, 故障率愈大, 可靠性就愈差。电子组件就是按故障率大小来评价其质量等级的。

(2) $\lambda(t)$ 的估计。假设在时刻 $t=0$ 时有 N 个产品开始工作, 到时刻 t 有 $N_f(t)$ 个产品发生了故障, 这时还有 $N_s(t)$ 个产品还在继续工作。为了研究产品在时刻 t 后的故障情况, 再观察 Δt 时间, 如果在 t 到 $t + \Delta t$ 时间内又有 $\Delta N_f(t)$ 个产品故障, 那么在时刻 t 尚未发生故障的 $N_s(t)$ 个产品继续工作, 在 $(t, t + \Delta t)$ 内故障的频率为

$$\frac{\Delta N_f(t)}{N_s(t)} = \frac{\text{在时间}(t, t + \Delta t) \text{内故障的产品数}}{\text{在时刻 } t \text{ 仍在工作的产品数}}$$

则工作到时刻 t 的产品在单位时间内发生故障的频率为

$$\lambda^*(t) = \frac{\Delta N_f(t)}{N_s(t)} \times \frac{1}{\Delta t} = \frac{N_f(t + \Delta t) - N_f(t)}{N - N_f(t)} \times \frac{1}{\Delta t} \quad (2-15)$$

其它可靠性参数还有: 平均故障间隔时间等。

3. 飞机的可靠性

(一) 飞机的可靠性

可靠性, 是指飞机及其系统、部件在使用过程中不发生或少发生故障的一种属性, 也即是在规定的使用条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。

1. 规定条件

包括:

• 环境条件，例如温度、湿度、振动、冲击、噪音、辐射、大气腐蚀等；

• 负荷条件，例如施加电压与电流大小、机械负荷的大小等；

• 运输条件，例如空运、水运、铁路运输、公路运输等；

• 贮存条件，例如长期贮存、短期贮存、贮存环境等；

• 使用维修条件，例如人一机结合、人的技术熟练程度、保障设备和器材供应等；

• 工作方式，例如连续工作或间隔工作等。

总之，飞机及其机件处于不同的条件下，它的可靠性是不同。使用条件越恶劣，可靠性就越差。飞机设计要充分考虑和分析上述种种使用条件的适应范围。

3. 规定时间

是指飞机及其机件的使用期、贮存期或使用寿命。飞机及其机件在此期限内，它的可靠性一般都是随着时间的增长而降低的。也就是说，飞机及其机件的可靠性是有时间性的。飞机及其机件在某一时限内是可靠的，过了这一时限，就可能出故障或损坏。因此，可靠性又称产品质量的时间指标。

3. 规定功能

是指飞机及其机件使用性指标。如航程、速度、高度、功率、频率、精度、灵敏度、分辨力、作用距离等。所谓可靠与否，是针对能否完成使用性能指标而言的。但是，可靠性与使用性能指标又有区别。可靠性是一个与许多因素有关的，在一定使用条件下具有时间概念的综合性质量指标。它不同于性能指标，不能直接用仪器来测量，只能在试验、鉴定和调查研究的基础上作出统计估计。

可靠性涉及航空技术装备的设计、制造、运输、安装、使用 and 维修等各个环节。可靠性与维修性关系十分密切，可靠性好就直接减少维修的频数、维修范围和工作内容。从这个意义上讲，可靠性是维修性的基础，是衡量飞机维修品质的一个重要方面，现代航空维修思想，确立以可靠性为中心，要求在装备的全寿命过程中，要围绕保持、恢复航空器的固有可靠性水平，做好设计、制造和维修工作。

(二) 可靠性的主要指标

飞机及其机件在设计中的可靠性主要指标有：

- (1) 可靠度 $R(t)$
- (2) 不可靠度 $F(t)$
- (3) 故障密度函数 $f(t)$
- (4) 故障率 $\lambda(t)$
- (5) 平均故障间隔时间 MTBF (可修件)
- (6) 故障前平均时间 MTTF (不可修件)

2.2.2 维修性

维修性工程是为了达到装备的维修性要求所进行的一系列技术与管理活动,目的是赋予装备良好的易于维修的本质属性,工作重点是通过装备维修性需求的科学论证,确定合理的维修需求,并通过设计、分析、制造和验证等系统工程活动,赋予装备良好的维修品质。维修性工程还应当包括维修性的管理,使用过程维修信息的科学管理等。

维修性工程始于 20 世纪 50 年代。随着航空装备的复杂化而导致维修工作量加大和费用增加,维修性问题逐渐引起军方的重视,从而开展了维修性设计研究。1966 年,美国国防部先后颁发了《维修性验证、演示和评估》、《维修性大纲要求》、《维修性预计》三个维修文件,它们标志着维修性工程已成为一门独立的学科。70 年代,随着集成电路及数字技术的发展,装备维修的重点从过去的拆卸、更换转到故障检测和隔离,故障诊断能力、机内测试成为维修性研究的重要内容。80 年代美国国防部颁发了《系统及设备维修性管理大纲》,强调测试性是维修性大纲的一个重要组成部分,测试性成为一种独立的设计特性。90 年代以来,为解决装备存在的诊断能力差、机内测试虚警率高等问题,美、英等西方国家开展了综合诊断和人工智能技术应用的研究,美国国防部陆续颁发了《综合诊断》、《系统和设备测试性大纲》等军用标准和文件,推动了维修性工程的深入发展。

1. 维修性的概念

维修性是装备的一种质量特性,即由设计赋予的使装备维修简便、迅速、经济的固有属性。它同“维修方便”这类传统的要求似乎很接近,但维修性与传统要求有着质的区别,它有其明确的定义。即维修性是产品在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复其规定状态的能力。其中“规定条件”主要指维修的机构和场所,以及相应的人员与设备、设施、工具、备件、技术资料等资源。“规定程序和方法”是指按技术文件规定的维修工作类型(工作内容)、步骤、方法。“规定的时间”是指规定维修时间。在这些约束条件下完成维修即保持或恢复产品规定状态的能力(或可能性)就是维修性。

产品在规定约束条件下能否完成维修,取决于产品的设计和制造,比如维修部位是否容易达到,零部件能否互换,检测是否容易等。所以,维修性是产品的质量特性。这种质量特性可以用一些定性的特征来表达,也可以用一些定量的参数来表达(

维修性表现在产品的维修过程中。这里的维修包括预防性维修、修复性维修、战场损伤修复和保养,更全面地说还包含改进性维修以及软件的维护。因此,各种军用装备、民用设备都需要具有维修性。飞机、舰船、车辆、火炮、雷达等装备,平时、战时都要维修,维修性问题自然很重要。像导弹、弹药这类长期储存、一次性使用的装备,尽管发射、飞行过程不会维修,但在储存乃至发射前都要维修,故同样需要维修性。对这类产品更强调的是不工作状态的维修性。可见,各种装备都需要维修性,但可能有不同的侧重点。

除硬件的维修性外,计算机软件也有维修性问题,习惯称为软件可维护性。

装备的测试是维修过程的重要环节。产品是否能够及时地确定其状态并将其内部故障隔离到需要修理的位置,本来就是维修性的重要内容。随着装备的发展,特别是电子系统和设备的普遍应用,测试问题越来越重要、越来越突出。在某些场合,人们把测试性能作为一种单独的特性进行研究。但一般地说,维修性仍然包含测试性。

2. 维修性的量度

由维修性的基本含义可知,维修性不同于可靠性,涉及到人、环境等诸多不确定因素,所以人们一般从定性的角度来描述它,但对于装备的维修性,仅有定性是不够的,还要量化,以便能更好地确定装备维修性的优劣程度。由于维修时间是一个随机变量,因此,一般从维修性函数出发来研究维修时间的各种统计量。下面是几种主要的维修性量度。

(1) 维修度

维修度是指可修复产品在规定的维修条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,由故障状态恢复到能完成规定状态的概率,一般记为 $M(t)$ 。

在维修度的定义中,变量是维修时间。需要指出的是,维修时间因故障情况不同而异,是一个随机变量,有其统计分布形式。在某种意义上,维修时间与可靠性中的故障时间分布类似,但有两点不同:一是维修度中的时间是一个狭义的时间概念,而可靠性的时间概念是一个广义的时间概念,它可以是飞行小时,也可以为起落次数、循环次数、公路里程、射击次数等;二是可靠性描述的是装备在规定的时间内不发生故障的概率,而维修性描述的是装备在规定时间内完成维修事件的概率。

设某产品发生故障后修复到完好状态的时间为 τ , t 是规定的维修时间, $t=0$ 时故障,则维修到 τ 时刻的维修度 $M(t)$ 为

$$M(t) = P\{\tau \leq t\} \quad (2-26)$$

式(2-26)表示,维修度是在一定的条件下,完成维修的时间 τ 小于或等于规定维修时间 t 的概率,显然 $M(t)$ 是一个概率分布函数。由于 $M(t)$ 是表示产品从 $t=0$ 开始到某一时刻 t 内完成维修的概率,是对时间的累积概率,与 $F(t)$ 相似,是时间 t 的增值函数,有

$$0 \leq M(t) \leq 1, M(0) = 0, M(\infty) = 1 \quad (2-27)$$

式(2-27)表明,同一时刻 t 的 $M(t)$ 值越大时,产品越容易维修。

如果维修的是 N 件产品,设在 $t=0$ 时均处于故障状态,经时间 t 的维修以后,在 t 时刻的累积修复数为 $N_r(t)$,则在 t 时刻的经验维修度为

$$M^*(t) = \frac{N_r(t)}{N} \quad (2-28)$$

(2) 维修密度函数

设维修度 $M(t)$ 连续可微,定义维修度的导数为维修密度,记为 $m(t)$,有

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M(t + \Delta t) - M(t)}{\Delta t} \quad (2-29)$$

假设如果需要维修的产品数为 N , 在 Δt 时间间隔内产品由故障状态恢复到完好状态的修复数为 $\Delta N_r(t)$, 由式(2-28)得

$$\Delta M^+(t) = \frac{\Delta N_r(t)}{\Delta t} \quad (2-30)$$

由式(2-29)、式(2-30)得维修密度的经验值为

$$m^+(t) = \frac{1}{N} \times \frac{\Delta N_r(t)}{\Delta t} \quad (2-31)$$

维修密度函数表示单位时间内修复数与送修总数之比, 即单位时间内产品预期被修复的概率

由式(2-31)得

$$dM(t) = m(t) dt \quad (2-32)$$

$$M(t) = \int_0^t m(t) dt \quad (2-33)$$

此外, 维修时间 τ 在一个小区间 $(t, t + \Delta t)$ 内取值的概率为

$$P(t < \tau \leq t + \Delta t) = m(t) \Delta t \quad (2-34)$$

(3) 修复率

产品在 $t=0$ 时故障, 经过 $(0, t)$ 修理后, 尚未修复的产品在 $t + \Delta t$ 单位时间内完成修复的条件概率, 记为 $\mu(t)$, 有

$$\begin{aligned} \mu(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P\{t < \tau \leq t + \Delta t | \tau > t\} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{P\{t < \tau \leq t + \Delta t\}}{P\{\tau > t\}} = \frac{1}{\Delta t} \times \frac{m(t) \Delta t}{1 - M(t)} = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \end{aligned} \quad (2-35)$$

则修复率的经验值为

$$\mu^+(t) = \frac{\Delta N_r(t)}{[N - N_r(t)] \cdot \Delta t} \quad (2-36)$$

式(2-36)中各变量含义同前。

由式(2-29)、式(2-35), 有

$$\mu(t) = \frac{\frac{dM(t)}{dt}}{1 - M(t)} \quad (2-37)$$

即

$$\mu(t) dt = -d \ln[1 - M(t)] \quad (2-38)$$

$$\int_0^t \mu(t) dt = \ln[1 - M(t)] \quad (2-39)$$

$$M(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt} \quad (2-40)$$

若维修时间服从指数分布即修复率为常数 μ , 则

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (2-41)$$

$$m(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (2-42)$$

其它维修性参数还有: 平均修复时间等。

3. 固有维修性和使用维修性

维修性是一种设计特性, 但这种特性在使用阶段又会受多方面的影响。主要是:

(1) 维修组织、制度、工艺、资源(人力、物力)等对装备使用维修性水平的影响。在装备设计确定的情况下, 其固有维修性不变, 但使用维修性水平却可能因维修的组织、制度和工艺是否合理, 资源保证是否充分而发生变化。

(2) 使用维修可能影响固有维修性的保持。固有维修性取决于设计的技术状态,但不良的维修措施或工艺可能破坏零部件的互换性、可修复性、识别标志乃至维修的安全性,给以后的维修带来困难。

(3) 通过改进性维修可望提高装备的维修性。装备在使用维修中暴露的维修性问题,提供的数据,为维修性的改进提供了依据。结合维修,特别是结合在基地级维修(以及某些中继级维修)中进行装备改进,可能提高其维修性。

与可靠性相似,维修性也可分为固有维修性和使用维修性。固有维修性也称设计维修性,是在理想的保障条件下表现出来的维修性,它完全取决于设计与制造。然而,使用部门、部队最关心的是使用中的维修性,同时使用阶段也要开展维修性工作。

使用维修性是在实际使用维修中表现出来的维修性。它不但包括产品设计、生产质量的影响,而且包括安装和使用环境、维修策略、保障延误等因素的综合影响。使用维修性不能直接用设计参数表示,而要用使用参数表示,例如可用平均停机时间(MDT)、使用可用度(A_0)等表示。这些参数通常不能作为合同要求,但却更直接地反映了作战使用需求。在使用阶段考核维修性时,最终还是要看使用维修性。

由于使用阶段的活动对装备维修性有相当大的影响,所以,在使用中要通过多方面的活动,采取措施保持甚至提高装备的维修性,并为新装备研制提供信息。使用阶段的维修性工作与可靠性相似,不再累述。

4. 飞机的维修性

(一) 飞机的维修性

维修性,是指飞机及系统、部件在规定的时间和规定条件下,按规定的方式和方法进行维修时,能保持和恢复其良好的技术状态的可能性,或表示对可修件所进行的维修难易程度。

维修性是维修飞机及其机件所需工作量大小、人员多少、费用高低,以及维修保障设施先进还是落后的综合反映。因此,维修性直接关系到飞机及其机件的可靠性、有效性、安全性和经济性。

维修性用维修时间概率来表示,说明飞机及其机件按照规定的方式和资源进行维修时,能保持或恢复到规定状态的一定的时间的概率。

维修性用维修费用概率来表示,说明飞机及其机件按照规定的方式和资源进行维修时能在一定的时间内维修费用不超过Y元的概率。

(二) 维修性的主要指标

飞机的维修性是通过各项指标的综合作出评定的。这些指标涉及维修时间、维修人员的工时、维修频数、维修费用等。

(三) 维修性设计内容和主要要求

维修性设计，与可靠性设计一样，在飞机设计过程中，必须通过对飞机各系统、设备、机件等等维修性指标分配的预测，进行维修保障分析和确定维修保障因素的影响等工作步骤，方能实现。

与维修性有关的飞机设计内容分为：维修简便、维修停飞时间短、维修费用低、有防维修差错措施和降低对维修人员要求等五个方面。

1. 维修简便

(1) 可达性

a. 飞机的系统、设备的检查点、测试点、检查窗、润滑点以及燃油、液压等系统的维护点都要布局在便于接近（可达）的位置。

b. 给维修人员在拆装设备、机件时提供的空间应大于必要的维修空间。工作舱口开口的尺寸、方向、位置等都要使操作者有比较合适的维修姿态，以保证一定的工作效率。

c. 飞机的系统，设备、机件应根据故障次数的多少调整工作的难易、拆装时间的长短、重量的大小、标牌位置和安装特点等，将其配置在可达性不同的部位上，尽量做到在检查、检或拆卸任一故障机件时，不必拆卸其他设备的机件。

d. 飞机上各专业的系统、设备、机件均应尽量采用专舱、单层布局。以免维修时交叉作业。

(2) 互换性

a. 飞机、设备、部件的互换性，首先应从使用维修需要出发，再结合制造和检修的经济性综合权衡决定。

b. 设计飞机的设备、组合件、部件、零件时，设计人员应根据使用维修条件，提供合理的使用容差，并保证其物理（结构、外形、材料）和功能上的互换性。

c. 应尽量采用标准化的设备、部件和零件。

d. 故障率高的和外场不易排除和修复的飞机部件和设备，应有良好的互换性。

e. 发动机和发动机舱的装配件的更换与拆装要容易，时间要

短。双发发动机安装点应完全相同，允许任何同型发动机可以在左右位置上安装使用。

f. 保证系统、设备和维修保障设施相互间的相容性，使之能配套使用。

(3) 飞机的保障设备和专用工具要少

2. 维修停飞时间短

(1) 在设计思想上应采用：

- a. 无维修的设计和很少需要进行预防性维修的设备和机件。
- b. 标准的、经过使用实践考验的设计、设备和机件。
- c. 简单、可靠、耐用的设计和机件。
- d. 能减轻故障后果的破损安全设计。

e. “最坏情况”设计技术和在设备、机件寿命期内有允许使用和磨损的容差的设计。

f. 单元体设计

(2) 在故障的诊断、监控与排除上，应做到：

a. 重要的设备、系统尽可能有故障显示，机上自检装置和故障诊断手段，以便迅速查明故障，正确作出判断。

b. 判断故障时，对维修人员技术水平不应要求过高；检测设备、故障诊断手段的使用维修也不应过分复杂。

c. 发动机要设有监控装置。

d. 要能简易迅速进行系统、设备、部件等故障的排除、修复或排除后的检查工作。在设计时应尽量把故障隔离在可更换或可修理的单元体、组合件或附件上。要采用外场能进行的更换调整或修理等方式进行排除。

(3) 在缩短维修和维修准备时间上，要求：

a. 设计飞机的系统、设备、部件时，采用的材料、工艺、结构以及要求的维修环境条件都应从使用部门的维修能力和条件出发，以便于维修排除和迅速准确地进行调整 and 校准工作，缩短维修和维修准备的时间。

b. 机上应设置进行检测的连接装置，尽量创造条件，使飞机上的部件、设备、系统能进行原位维修。

c. 设备、部件、导管、电缆的拆装、连接、紧固，检查窗口的开关都要做到简易、快速和牢固，以缩短维修的拆装和工作时间。

d. 维修工作中的大量日常保障工作，如各种油料和特种液体、气体的加灌、充填等尽量机械化、自动化。

3. 维修费用低

(1) 尽量减少非必需的维修，每飞行小时的维修工时要少。

(2) 专用的工具、设备和维修设施要少，维修条件不应过高。并要求注意提高维修经济效益。

(3) 可修性要好，工作中容易发生磨损或故障的机件，应设计成可拆装的组合件，使容易发生磨损或故障的部分，能够进行局部处理，不致因某个局部超出容限而使整个机件报废。

(4) 零备件和器材的消耗率小，不需要不必要的、繁琐的维修数据和资料。

(5) 对维修人员技术水平要求不高。

4. 有防维修差错措施

(1) 设计时，应有将维修差错减少至最低限度的措施，以防止在连接、装配、安装、盖口盖、充填和其他维修操作中发生差错的可能性。要做到即使发生维修差错也能立即发觉，不致导致损坏设备、发生事故等后果。

(2) 注意减少维修工作中的危险、肮脏、繁琐、单调等容易引起人为差错的因素。

(3) 维修标志、符号和技术数据应清晰准确。

a. 凡是需要维修人员引起注意或容易发生维修差错的机件和部位，都应在容易看见的位置设置维修标志、符号和说明标牌，说明标牌应标有准确的数据和有关的注意事项。

b. 飞机上和说明标牌上的标志、符号及其颜色的含义应符合有关文件的规定，并与维修设备上的统一。

c. 对于有固定操作程序的操纵装置都应有操作顺序号码和运动方向的标记。

d. 飞机的主要结构件上应打印与维修有关的物理性质特征的标记,如能否焊接、燃烧、加温等。

5. 降低对维修人员要求

(1) 需要的维修人员和维修专业要尽量少。

(2) 维修对象和维修设备应容易进行维修操作。

(3) 维修人员的操作和工作应按逻辑和程序安排。

(4) 维修程序和规程应简单、明确、有效。

(5) 要尽量减轻维修人员的劳动强度。

2.3 以可靠性为中心的维修理论

2.3.1 以可靠性为中心的维修理论的产生

1. 传统的维修观念

18 世纪末,蒸汽机、车床等机器设备大量使用。那时,需要有维修人员在工作现场随时应付可能发生的故障和由此引起的生产事故,机器设备实行“不坏不修,坏了才修”的事后维修。20 世纪初,流水生产线出现。如果某一工序发生故障,造成停机,会迫使全线停工。为了不使生产中断,1925 年美国首先实行预防性的定时维修,即事先采取适当的维修活动,主动防患于未然,以预防故障和事故的发生。这种定时维修,在减少事故和停机损失上明显优于“不坏不修,坏了才修”的事后维修,迅速传遍世界各地,在装备维修中占据了统治地位。飞机和火车是最早实行定时维修的装备,以求保障安全。

定时维修观念认为:装备(或机件)要工作→工作必磨损→磨损出故障→故障危及安全,到使用寿命必须翻修,翻修得越彻底就越安全,维修工作做得越多就越可靠。

2. 以可靠性为中心的维修理论的产生 (MSG-1 与 MSG-2)

1959 年,美国联合航空公司针对过剩维修提出“维修效果到底如何”的问题,1960 年美国联邦航空局与联合航空公司组成维修指导小组(MSG, Maintenance Steering Group)开始研究这个问题。两年后,1961 年 11 月 7 日颁布了《联邦航空局/航空工业可靠性大纲》(FAA/Industry Reliability Program)。该大纲指出:“过去人们过分强调控制拆修间隔期以达到满意的可靠性水平,然而经过深入研究后深信,可靠性和拆修间隔期的控制并无必然的直接联系。因此,这两个问题需要分别考虑。”联合航空公司的赫西和托马斯在研究报告中陈述:“根据联合航空公司对多种机件使用经验的分析,其结果差不多总是和浴盆曲线的简单图形相矛盾。耗损特性往往不存在。”“在一开始为新型飞机的机件预定的翻修时限来表示的有用寿命,往往和以后的实际使用经验有很大差别。”他们对发动机附件、电子、液压、空气调节等四个系统的研究结果指出:“这些机件显示了早期故障后,接着出现均衡的故障率,但并未出现耗损。”大多数设备定时翻修对控制可靠性是毫无作用的,即不存在一个“正确”的翻修时限,其结论是:“固执地遵守翻修时限概念将引起早期故

障增加,在一个机件翻修之后的一个短时间内不能防止故障的发生;使本来有较高翻修时限的某些设备不能充分发挥其使用潜力,并妨碍对机件在较长的总使用时间情况下进行可靠性的探索。如果一个机件无耗损,就应该留在飞机上直到发生故障才更换。”这是对传统定时维修观念的挑战。

随后,1961年11月开始对航空发动机进行改革试验,1963年2月又在DC-8飞机和B-720飞机上进行试验,发现尽管翻修时限不断延长,但可靠性却未见下降。1964年12月联邦航空局发出AC120-17通报,“允许使用单位在制定自己的维修控制上有最大的灵活性”。1965年1月联合航空公司按AC120-17通报要求进行“涡轮喷气发动机可靠性大纲”试验,效果明显。1965年首次出现了“逻辑决断图”。

1968年出现“MSG-1手册:维修的鉴定与大纲的制定”,首次提出定时、视情和状态监控的三种维修方式,用于制定B-747飞机预防性大纲,这是以可靠性为中心的维修实际应用的第一次尝试,并获得了成功。例如对该型飞机每飞行两万小时所做的结构大检查只需6.6万工时,而按照传统方法,对于一架小得多的不怎么复杂的DC-8飞机,进行相同的结构检查需要400万工时,相差60倍。

1970年形成的“航空公司/制造公司的维修大纲制定书——MSG-2”,用于制定洛克希德L-1011和道格拉斯DC-10飞机的初始维修大纲,结果很成功。经济上得益于这种方法的例子是,按传统的维修大纲,需要对DC-8飞机的339个机件进行定时拆修,而基于MSG-2的DC-10飞机维修大纲中只有7个这样的机件,甚至涡轮喷气发动机也不属于定时拆修的机件。这样不仅大大节省了劳动力,降低了器材备件的费用,而且使送厂拆修所需的备份发动机库存量减少了50%以上。这种费用的降低是在不降低可靠性的前提下达到的。1972年欧洲编写了一个类似的文件(EMSG-2,European MSG-2)作为空中客车A-300及协和式飞机的初始维修大纲的依据。1974年美国陆、海、空三军推广MSG-2。1974年苏联民航飞机采用三种维修方式。

3.以可靠性为中心的维修理论的发展(MSG-3、RCM)

1978年,美国联合航空公司诺兰等受国防部的委托发表了《以可靠性为中心的维修》专著,该专著对故障的形成、故障的后果和预防性维修工作的作用进行了开拓性的分析,首次采用自上(系统)而下(部件)的方法分析故障的影响,严格区别安全性与经济性的界限,提出多重故障的概念,用四种工作类型(定时拆修、定时报废、视情维修、隐患检测)替代三种维修方式(定时、视情、状态监控),重新建立逻辑决断图,使以可靠性为中心的维修理论又向前迈进了一大步,从此人们把制定预防性维修大纲的逻辑决断分析方法统称为RCM(Reliability-Centered Maintenance)。1980年西方民航界吸收了RCM法的优点,将“MSG-2”修改为“MSG-3”,用于B757、B767飞机。

20 世纪 70 年代末 80 年代初,我国空军创导维修理论的研究,指导维修改革,由单一的定时改为定时与视情相结合的维修方式,延长歼六等 6 种飞机的翻修时限,取消 50h 定检制度,效果显著,随后总部推广全军。1983 年我国空军首次确立以可靠性为中心的维修思想。

1984 年美国国防部发布指令 DoDD4151.16《国防设备维修大纲》,规定三军贯彻 RCM。1985 年美国空军颁发 MIL-STD-1843(USAF)《飞机、发动机及设备以可靠性为中心的维修》;1986 年美国海军颁发 MIL-STD-2173(AS)《海军飞机、武器系统和保障设备以可靠性为中心的维修要求》。1988 年发布 MSG-3 修改 1,1993 年发布 MSG-3 修改 2。1990 年 9 月在诺兰的指导下,英国阿兰德维修咨询有限公司莫布雷在 RCM 和“MSG-3 修改 1”的基础上,结合民用设备的实际情况,提出了“RCM2”,10 余年来已为 40 多个国家的 1200 多家大中型企业成功地进行了以可靠性为中心维修的咨询、培训和推广应用工作,在钢铁、电力、铁路、汽车、海洋石油、核工业、建筑等行业得到了广泛应用。

1989 年我国发布了航空工业标准 HB6211《飞机、发动机及设备以可靠性为中心维修大纲的制定》,并运用于轰炸机和教练机维修大纲的制定。1992 年总后勤部、国防科工委发布了国家军用标准 GJB1378《装备预防性维修大纲的制定要求与方法》,并于 1994 年 3 月颁布了该标准的《实施指南》,指导各类武器装备维修大纲的制定。2001 年我国海军装备部完成《维修理论及其应用研究》项目,深入贯彻 RCM。2002 年我国空军装备部制定《推进空军航空装备科学维修深入发展三年规划》。2003 年总装备部对陆军地面雷达等 10 余种装备推广应用 RCM。

4. MSG-2 与 MSG-3

(1) MSG-2 文件

1968 年,美国各航空公司的代表,从可靠性方案管理经验出发,合作编写了一本名为《维修研究和方案拟订》的 MSG-1 手册(MSG 是维修大纲发展领导小组英文名称的缩写)。其中航空公司与飞机制造厂家共同为世界上第一架宽体民航飞机——B747-100 拟订了初始维修大纲的决断逻辑和各航空公司/制造厂家程序。此文件后来在 1970 年修改为可以用于拟订一切新型运输飞机维修大纲的 MSG-2 号文件《航空公司/飞机制造厂家维修大纲的计划文件》。文件所用的二元逻辑决断方法是一项新技术,它要求深入审查飞机的设计,定出全机所有的重要维修项目,即影响安全,影响隐蔽功能——系统或部件里机组平时不知其能否正常起作用的一些重要功能,影响飞机使用性能或影响维修费用的项目。研究每个重要维修项目的失效、故障或损坏的模式(即失效是如何发生的?有何后果?),然后根据‘是’和‘否’二元决断,给每一个项目定出合适的维修方式。

其中不适于预定做维修工作的就采用“状态监控”维修方式,简称“监控”方式。这种方式不是预防性的,而是依赖于—

个故障的情报收集和分析系统，监视机件的工作状态以决定是否
需要采取措施，它允许这些项目用到出现故障、损坏或失效。这
种方式被承认为第三种主要的维修方式。

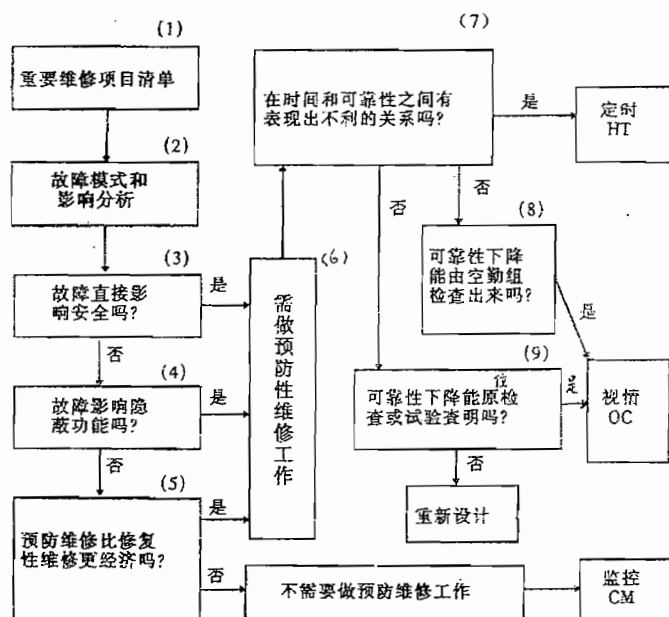


图 2-3 MSG-2 飞机系统和发动机逻辑决断图

● 南方航空公司的决断图

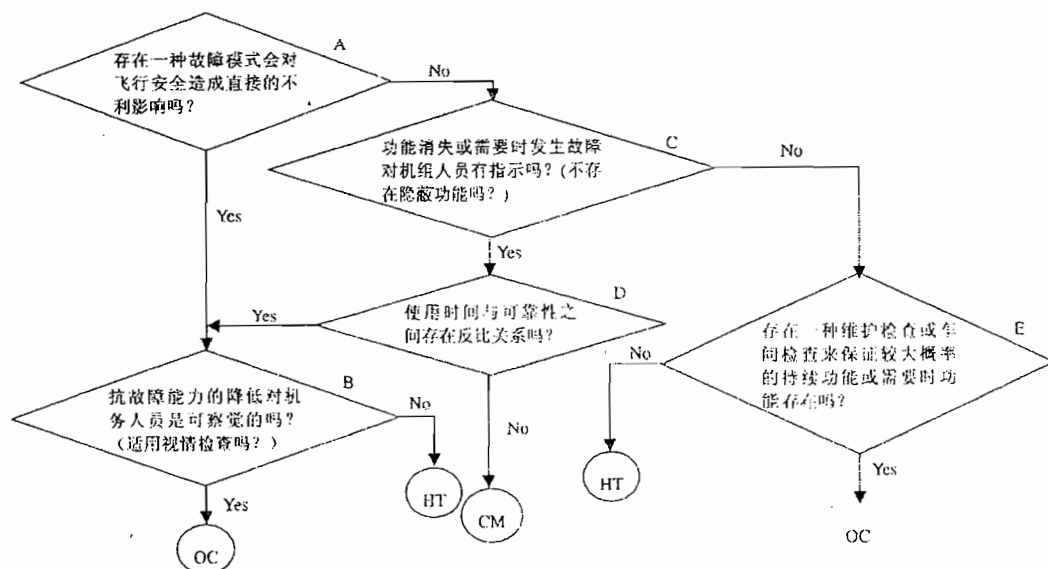


图 2-4 中国南方航空(集团)公司 MSG-2 判定逻辑

MSG-2 逻辑的意义在于最终将安全、经济效果连接在一起，把以前所用的经验判断数量化。

●MSG-2 的应用

由于 MSG-1 在波音 747 飞机上的成功应用, 航空运输业的发展以及管理当局的参与和推动, 使 MSG-2 很快得到了推广应用, 不仅在美国, 而且在欧洲、苏联和中国, 也都有很多应用实例。

1. 在美国的应用

美国民航和军方, 都对 MSG-2 给予很高的评价并参与或批准这些应用, FAA 在 1972 年的一份文件中指出: “……这些程序形成了对飞机设计的系统审查, 使得在缺乏使用经验的情况下, 对每个部件和系统都能采用最好的维修方式。”美国国防部的评论认为: “MSG-2 逻辑分析是完全适用于军队的。”

在民用飞机方面, 应用 MSG-2 制订了 DC-10、L1011 等新型号飞机的维修大纲; 改造了 B707、B737、B727、DC-8、DC-9 等飞机的维修大纲; 在军用飞机方面, 用 MSG-2 制订或改造的飞机维修大纲很多, 这些机种主要有: B-52、P-3、F-4、F-106、F-111、F-4J 等。

2. 在欧洲的应用

欧洲在认真研究 MSG-2 的基础上, 做了适当修改, 称为 EMSG-2 (1972 年)。用它制订了 A300、协和式、VFW614、三叉戟等型飞机的维修大纲。

3. 应用 MSG-2 取得效益的典型事例

MSG-2 的应用, 取得了巨大的经济效益, 主要事例有: 按照传统的维修原理, DC-8 飞机的初始维修大纲中有 339 个项目要定时翻修, 而用 MSG-2 原理制订的 DC-10 维修大纲, 只规定 7 个项目要翻修, 同时, 取消了发动机的定时翻修要求, 使备用发动机数量减少了 50%。波音 707 原来 99% 的项目采用定时翻修, 后来减少为

40%, 每飞行小时机体的维修费用由 1963 年的 56 美元减少为 1973 年的 40 美元, 同时, 飞机的故障率也下降了。另外, 按照 MSG-2 大纲, 波音 747 飞机在 20000 小时的结构检查仅用 6.6 万工时, 而比 747 小的 DC-8, 在同一时间的结构检查累计要用 400 万工时; 到 1975 年, DC-8 飞机的维修大纲用 MSG-2 分析后, 翻修时限由 1200 小时延长到 2500 小时, 定时维修的项目减少到 10 件。据文献记载, 从 1963 年至 1973 年的 10 年中, 美国民航每飞行小时的维修费用减少了 30%。上述效益, 是在不降低飞机安全性和使用可靠性的条件下取得的。由于视情维修能在更接近发生机件故障前进行维修, 避免了拆装可能带来的新故障。从这个意义上说, 不仅节约了费用, 还提高了飞机的使用可靠性。

4. 在我国的应用

在 80 年代初, 我国民航应用 MSG-2 改进了安-24 飞机的维修工作, 重新评审了三叉戟飞机的维修工作, 在保证安全的前提下, 取得了很好的效益。从 1984 年开始, 针对运七飞机维修工作多、间隔短、寿命低 (不少附件仅 200 小时) 的状况, 进行了综合研究。从改变单一寿命规定开始, 采用可靠性分析、厂内试验、领先使用、抽样检查等方法, 延长了机载设备的使用时限; 之后, 应用改进的 MSG-2 逻辑图, 编写了运七基本型、100 型飞机的维修大纲, 于 1990 年 5 月批准执行; 后来, 又用改进的 MSG-2 逻辑图, 制订了运七 H-500、运八 F-100 和运八 F-200 飞机的维修大纲。改进后的 MSG-2 在中国的成功应用, 推动了维修思想的变革, 促进了国产民用飞机的发展, 取得了显著的社会经济效益。

(2) MSG-3 文件

他们认为 MSG-2 存在以下一些缺点：

- ①MSG-2 未谈及确定维修周期的原则；
- ②结构检查大纲制订法较粗，在安全性和经济性方面缺乏明确的区分；
- ③对具体的做法缺乏解释性的说明；
- ④对隐蔽故障缺乏恰当的处理；
- ⑤未论及怎样根据使用经验改进维修大纲和改进产品。

针对上述缺点，并参考了诺兰等人提出的 RCM 逻辑决断图和 RCM 决断法制订了第三个以可靠性为中心的《MSG-3 维修大纲制订文件》，

●MSG-3 的特点

(1) MSG-3 包括两个独立的决断部分：

- ①飞机的系统/动力装置分析部分；
- ②飞机的结构部分的决断分析部分。

每一个部分都有其本身的内容说明和单独逻辑决断图，应用时不必互相参照。

(2) MSG-3 采用了“自上而下”的分析方法，同 RCM 决断分析法一样，对飞机系统/动力装置的分析是从故障的后果来开始分析的。它从“功能故障的发生对在履行正常职责的空勤组来说是明显的吗？”这一问题开始逐步进行分析。对飞机结构的分析则是从评定结构项目的重要与否着手来逐步向下分析的。

(3) MSG-3 建立故障后果的类别以后，在选定所需做的维修工作时，只需要问该类别有关的问题，这样就简化了分析评定工作。有关选择维修工作的问题，其先后程序的原则是先考虑宜最优先做的和最经济的，先易后难，逐步往下分析。

(4) MSG-3 逻辑决断的方针是确定维修工作的类型，如润滑/保养、使用/目视检查、检查/功能检查……等，而不是像 MSG-2 那样去确定维修方式，如定时、视情和状态监控等。

(5) MSG-3 对明显的或隐蔽的功能故障做了明确的划分，因而对隐蔽功能的处理比 MSG-2 更为严密。

(6) MSG-3 对从经济上和安全使用上来说宜做的工作也做了明确的区分。

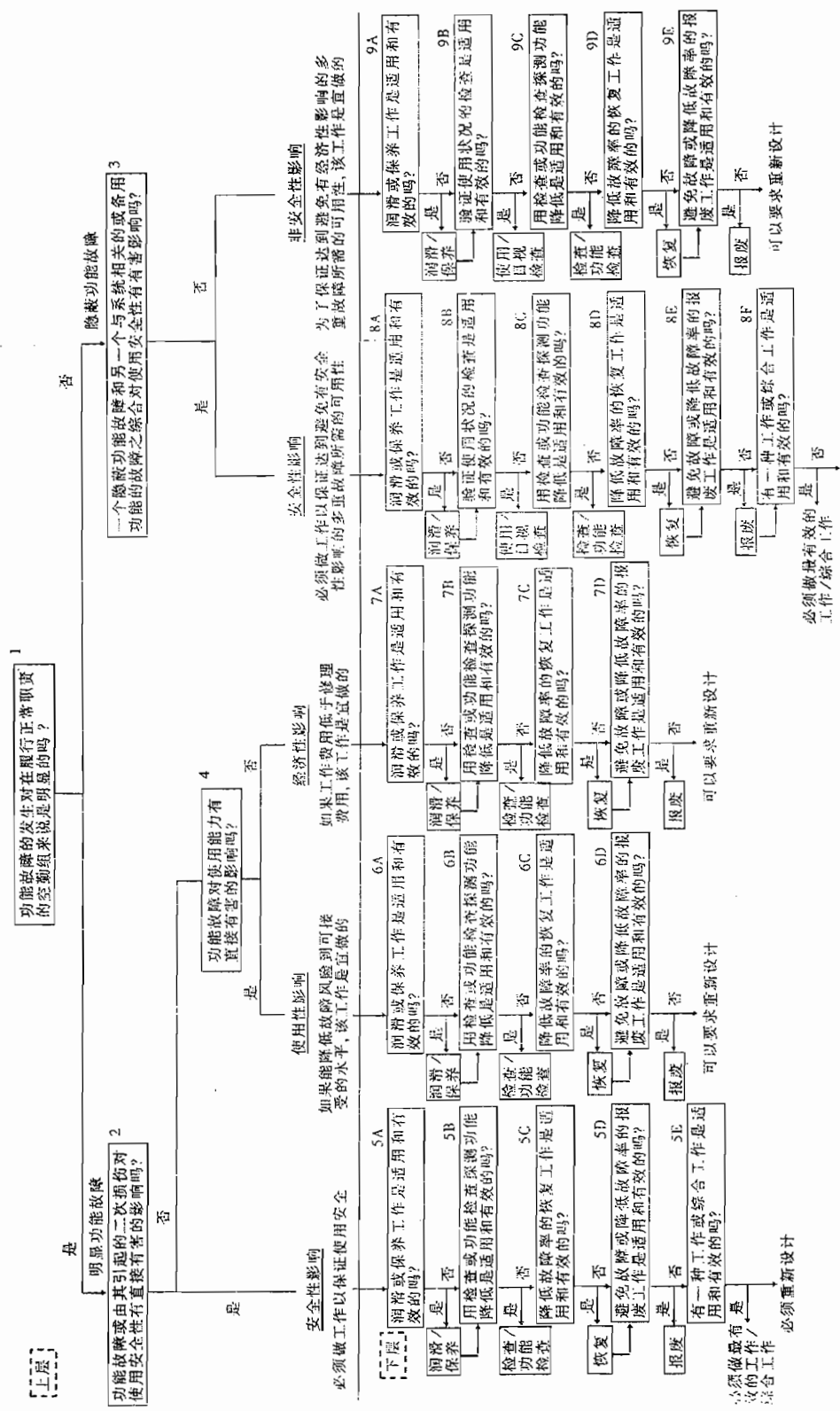


图 2-5 MSG-3(R2)系统/动力装置逻辑决断图

● 明显的
安全影响
分支

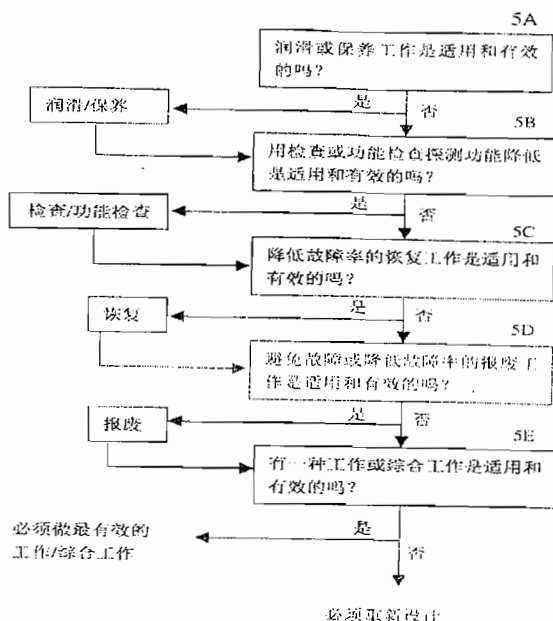


图 2-6. 明显的安全性影响分支

(3) MSG-2 与 MSG-3 对照

● 主要改进

MSG-2 1970.3	MSG-3 1980.9
1. 按照 MSG-2 制订飞机维修大纲, 能以最低的费用来保持飞机固有的安全性、可靠性水平; 2. 系统/附件“自下而上”分析, 按三种维修方式(HT、OC、CM)分类; 3. 结构: 以评级系统为主。	1. 明确区分了安全性、隐蔽性等项目并分类; 2. 系统/附件“自上而下”分析, 以工作类型取代三种维修方式; 突出了润滑; 3. 结构中包括了损伤容限和补充结构检查大纲要求; 结构的决断逻辑, 不再包括特定的评级系统。 4. 首次提出在新机研制中发展 MSG 思想, 并要求理解 MSG-3 思想。

● 维修方式和维修工作类型

MSG-2		MSG-3 维修工作类型	MSG-3R1 维修工作类型	MSG-3R2 维修工作类型
维修方式	维修工作	润滑/保养(LU/SV)	LU/SV	LU/SV
定时(HT) 视情(OC) 监控(CM)	勤务 检查 试验 校准 更换	空勤组监控(CR)	取消	取消
		使用检查(OP)	OP/VC	使用检查/目视检查(OP/VC)
		检查/功能检查(IN/FC)	IN/FC	IN/FC
		恢复(RS)	RS	RS
		报废(DS)	DS	DS
		综合工作		
维修方式和维修工作并用		取消维修方式,只给出相应的维修工作,并在维修大纲中给出了故障影响类别		

2.3.2 以可靠性为中心的维修理论主要内容

1. 定时维修的作用（辩证地对待定时维修）

传统的定时维修观念认为,装备老,故障就多,故障主要是耗损造成的,故障的发生与使用时间有关,达到一定使用寿命后故障率迅速上升,必须进行定时维修,以预防故障的发生。而以可靠性为中心的维修理论认为,对某些简单装备(指只有一种或很少几种故障模式能引起故障的装备,例如具有金属疲劳或机械耗损的机件等而言,“装备老,故障就多”是对的,应按照某一使用时间或应力循环数来规定使用寿命,定时维修对预防故障是有用的,这与传统的认识是一致的。但对大多数的复杂装备(指具有多种故障模式能引起故障的装备,例如飞机及其各分系统、设备等)而言,装备老,故障不见得就多;装备新,故障不见得就少,故障不全是耗损造成的,许多故障的发生具有偶然性,故障的发生与使用时间的长短关系不大,不必规定使用寿命,定时维修对预防故障的作用甚微,相反,还会带来早期故障和人为差错故障,一些故障恰恰是因为预防故障所进行的维修工作引起的,结果增大了总的故障率。可是,传统的维修观念仍然坚信有一个可以找到的并且不得超越的使用寿命,以为这样做能有效地控制故障。维修实践表明,规定拆修寿命并不能防止故障的出现,在到达拆修寿命之前总有一定数量的装备出现故障,在到达拆修寿命之后仍有相当数量的装备未出现故障,而且装备的拆装不可避免地会增加早期故障和人为差错故障,同时,这种做法也不利于维修的科学管理,难以准确把握装备的故障特性和使用规律。

对一些易磨损、疲劳的机件,为控制其出现严重故障后果,规定一个安全寿命或经济寿命仍是必需的。早期的飞机结构比较简单,装有活塞式发动机,飞机上的系统、机件大都是机械的、液压的或气动的,故障模式多为机械磨损和材料疲劳,因而故障的发生往往同使用时间有关,表现出集中于某个使用时间的趋势;又由于没有采用冗余技术,飞机的安全性与其各系统、机件的可靠性紧密相关,必须通过经常检查、定时维修和定时翻修来控制飞机的可靠性,因此,预防性维修工作做得越多,飞机也就越可靠。翻修间隔期的长短是控制飞机可靠性的重要因素,这种传统的定时维修观念同早期飞机的发展水平和当时的维修条件是相适应的,对保证飞行安全和完成飞行任务曾经起到了应有的作用。今天,其合理的部分作为三种维修方式之一的定时方式保存了下来,以可靠性为中心的维修理论是对传统维修观念的继承和发展。

2. 潜在故障与功能故障（提出潜在故障概念,开展视情维修）

潜在故障是即将发生功能故障的可鉴别的状态,功能故障是指机件丧失了规定的功能,见图 2-1。

以可靠性为中心的维修理论提出的潜在故障概念是,首先,使机件或装备在潜在故障阶段就得到更换或修理,意味着能有效地防止功能故障的出现,达到使用安全性的目的;其次,使机件或装备一直使用到临近功能故障的潜在故障状态才更换或修理,意味着几乎利用其全部有用寿命,达到使用经济性的目的。潜

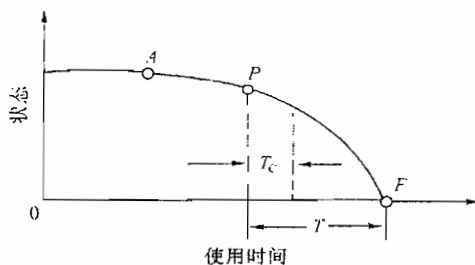


图 2-1 潜在故障发展到功能故障的示意图

A—故障开始发生点; P—潜在故障点;

F—功能故障点。 T_c —检测间隔期

在故障概念的创立,正是现代维修理论的一个重要贡献。

视情维修是当装备或其机件有功能故障征兆时即进行拆卸维修的方式。潜在故障的确定,为采用视情维修奠定了基础。采用视情维修的依据是多数机件的故障模式有一个发展过程,在机件尚未丧失其功能之前有征兆可寻,可根据某些物理状态或工作参数的变化来判断其功能故障是否即将发生。由于检测和诊断手段的不同,同一故障模式在功能故障发生之前可能有几个潜在故障点,应尽早检测出相应的潜在故障点,以达到避免出现功能故障之目的。

在定时和视情维修二者在技术上都可行时,以前采用定时,以可靠性为中心的理论采用视情维修。

3. 隐蔽功能故障和多重故障 (提出隐蔽功能故障和多重故障概念, 控制故障风险概率)

隐蔽功能故障是正常使用设备的人员不能发现的功能故障。多重故障是指由连续发生的两个或两个以上独立故障所组成的故障事件,它可能造成其中任一故障不能单独引起的后果。多重故障与隐蔽功能故障有着密切的关系。如果隐蔽功能故障没有被及时发现和排除,就有可能引发多重故障,产生严重的后果。现以用泵 A 和备用泵 B 组成的供油系统为例来分析隐蔽功能故障和多重故障的含义。

如果备用泵 B 发生了故障,在正常情况下,用泵 A 会继续工作,所以不会意识到泵 B 已发生了故障。换言之,只有到泵 A 也发生故障时,泵 B 故障本身才会产生直接影响。泵 B 显示出的隐蔽功能有两个特征,一是该泵的故障本身在正常情况下对正常使用泵的人员是不明显的;二是直到泵 A 发生了故障,或者有人定期检查泵 B 是否处于工作状态时,才会发现有故障。即只有泵 A 发生了故障,泵 B 的故障才会产生后果。当泵 B 处于故障状态时,泵 A 的故障就称为多重故障。由此说明这样一个事实,隐蔽功能故障本身并没有直接的后果,但具有能增大多重故障风险的间接后果,即隐蔽功能故障的唯一后果是增大了多重故障的概率。

随着装备现代化、自动化程度的提高及使用环境的变化,对装备安全性、环境性和可靠性的要求也更严格,为此常采用一些保护装置来保障装备的正常运转,如各种备用系统、冗余构件、应急备用发电装置等,而且采用这类保护装置的趋势还在继续增长之中。这类保护装置的功能是保证被保护装备的故障后果比未采用保护措施情况下的故障后果要轻。但是,当被保护装备工作正常时,保护装置的隐蔽功能故障并没有引起直接的后果,因此,隐蔽功能故障常常容易被忽视,不注意检查就不能及时发现已存在的问题。一旦被保护装备也有故障时,就会出现多重故障,甚至可能造成严重的后果。

有时维修工作难以保证所要求的可用度,为了把多重故障的概率降低到一个可以接受的水平,只有从设计上采取必要的措施。例如更改设计,用明显功能代替隐蔽功能,或者并联一个甚至几个隐蔽功能,虽然仍是隐蔽功能,但可以降低多重故障发生的概率。

(可增加检测频率,及早发现隐蔽故障)

4.故障的后果（区分不同的故障后果，采取不同的对策，重新设计才能改变故障的后果）

故障一旦发生，有的会造成装备毁坏、人员伤亡或环境严重污染；有的只是需花费更换故障件的费用，影响不大。人们关心故障的实质是它所产生的后果，所以，预防故障的根本目的不仅限于预防故障本身，而且在于避免或降低故障的后果。要不要进行预防性维修工作，不是受某一种故障出现的频率所支配，而是由故障后果的严重程度所支配的。

1978年诺兰发表的RCM逻辑决断法将故障后果分为安全性（环境性）、隐蔽性、使用性和非使用性四种。

（1）安全性（环境性）后果。安全性后果是指故障导致人员伤亡、装备严重损坏的后果；环境性后果是指故障导致违反国家环境保护要求的后果。

（2）隐蔽性后果。隐蔽性后果是指隐蔽功能故障所引起的多重故障所造成的后果。

（3）使用性后果（经济性的）。使用性后果是指故障影响装备的使用能力或生产能力的后果。这种后果最终体现在经济上，如延误航班所造成的经济损失加上修理费用。

（4）非使用性后果（经济性的）。非使用性后果是指故障不影响装备的安全、环境保护要求以及使用，只涉及修复性维修费用的后果。这种后果也体现在经济性上。

· 1992年我国国家军用标准《装备预防性维修大纲的制定要求与方法》（GJB1378）从明显功能故障和隐蔽功能故障两方面，将严重故障后果分为安全性后果、任务性后果、经济性后果、隐蔽安全性后果、隐蔽任务性后果和隐蔽经济性后果六种。

针对不同的故障后果，采取不同的对策。如果故障后果严重，则需竭尽全力防止发生，至少将故障风险降低到可以接受的水平，否则需更改设计；如果故障影响甚微，除了日常清洁、润滑之外，不必采取任何措施，直到故障出现以后再排除即可。

传统的维修观念认为，预防性维修能够避免故障的发生，能够改变故障的后果；以可靠性为中心的维修理论认为，预防性维修能够降低故障发生的频率，但不能改变故障的后果，只有通过设计才能改变故障的后果。

5.预防性维修的作用（科学评价预防性维修的作用）

传统的维修观念认为，如果装备的固有可靠性水平有某些不足之处，只要认真做好预防性维修工作，总是可以得到弥补的。而以可靠性为中心的维修理论认为，装备的固有可靠性是设计和制造时赋予装备本身的一种内在的固有属性，是在装备设计和制造时就确定了的属性。固有可靠性包括装备的故障模式和故障后果的状况，平均故障间隔时间或故障率的大小，故障察觉的明显性和隐蔽性，抗故障能力及下降速率，安全寿命的长短，预防性维修费用和修复性维修费用的高低等固有属性。装备本身作为维修对象，其固有可靠性是维修的客观基础，对维修工作的效率和效益具有决定性意义。固有可靠性水平是有效的预防性维修工作所能期望达到的最高水平。有效的预防性维修工作能够以最少的资源消耗达到装备的固有可靠性水平，或者防止固有可靠性水平的降低。维修不可能把可靠性提高到固有可靠性水平之上，不能弥补装备固有可靠性的不足，最高只能接近或达到装备的固有可靠性水平。没有一种维修能使可靠性超出设计时所赋予的固有水平，要想超过这个水平，只有重新设计，或者实施改进性维修。

各种故障的后果是装备固有可靠性的属性。预防性维修虽然能够预防故障出现的次数,从而降低故障发生的频率或概率,但不能改变故障的后果。故障后果的改变,不取决于维修而取决于设计。只有通过设计,才能改变故障的后果。例如采用冗余技术或损伤容限设计,使其不再具有安全性的后果;也可通过设计,增加安全装置,把故障发生的概率降低到一个可以接受的水平。对具有隐蔽性后果的故障,通过设计,例如用明显功能代替

隐蔽功能,使其不再具有隐蔽性的后果;也可通过设计,并联一个甚至几个隐蔽功能,虽然仍是隐蔽性的,但可以把多重故障概率降低到一个可以接受的水平。对具有使用性后果的故障,通过设计,也可将其改变为可以接受的经济性的后果。

6. 预防性维修工作的确定 (确定预防性维修工作的基本思路)

以可靠性为中心的维修理论是按故障的不同后果,并按维修工作既要技术可行又要值得做的基本思路来确定预防性维修工作的,见表 2-2。

表 2-2 确定预防性维修工作与更改设计的基本思路

技术可行 又值得做	故 障 后 果			
	安全性(环境性)后果	隐蔽性后果	使用性后果	非使用性后果
是	预防性维修	预防性维修	预防性维修	预防性维修
否	必须更改设计	更改设计	也许需要更改设计	也许宜于更改设计

“技术可行”、“值得做”是具有特定含义的。“技术可行”是指该类维修工作与装备或机件的固有可靠性特性是适应的;“值得做”是指该类维修工作能够产生相应的效果。

“技术可行”分为定时维修、视情维修和隐患检测三种情况。

(1) 定时维修的技术可行。装备或机件必须有可确定的耗损期;装备或机件的大部分能工作到该耗损期;通过定时维修能够将装备或机件修复到规定的状态。

(2) 视情维修的技术可行。装备或机件功能的退化必须是可探测的;装备或机件必须存在一个可定义的潜在故障状态;装备或机件在从潜在故障发展到功能故障之间必须经历一较长时间段。

(3) 隐患检测的技术可行。隐患检测的技术可行是指能否确定隐蔽功能故障的发生。

“值得做”也分三种情况。

(1) 对安全性后果、环境性后果和隐蔽性后果,要求能将发生故障或多重故障的概率降低到规定的、可接受的水平;

(2) 对使用性后果,要求预防性维修费用低于使用性后果的损失费用加修理费用;

(3) 对非使用性后果,要求预防性维修费用低于修理费用。

故障后果是确定预防性维修工作的一个重要依据。对于具有安全性和环境性后果或隐蔽性后果的故障,只有当预防性维修工作技术可行并且又能把这种故障发生的概率降低到一个可以接受的水平时,预防性维修工作才需要做;否则,就必须更改设计。对于具有使用性后果的故障,只有当预防性维修费用低于使用性后果所造成的损失费用加上排除故障费用时,预防性维修工作才需要做;否则,就不必做,也许需要更改设计。对于具有非使用性后果的故障,只有当预防性维修费用低于修理费用时,预防性维修工作才需要做;否则,就不必做,也许宜于更改设计。而对于一些后果甚微或后果可以容忍的故障,除了日常清洁、润滑之外,不必采取任何预防措施,让这些机件一直工作到发生故障之后才做修复性维修(事后维修)工作。这时唯一的代价只是排除故障所需的费用,而机件的使用寿命可以得到充分的利用。也就是说,不是根据故障而是根据故障的后果来确定预防性维修工作的,这比预防故障本身更为重要。这就使得不做预防性维修工作的机件数目远远大于需要做预防性维修工作的机件数目。例如现代飞机的几万件机件中往往只有几百件需要做预防性维修工作,因此日常维修工作量大幅度地减少,从而提高了预防性维修工作的针对性、经济性和安全性。

7.初始预防性维修大纲的制定(预防性维修大纲的制定与完善)

预防性维修大纲是预防性维修要求的汇总文件,一般包括进行预防性维修工作的产品(项目)、维修方式(维修工作类型)、间隔期及维修级别等。飞机还包括结构项目的检查等级、间隔期及维修级别等,作为编制其他维修技术文件(如维修技术规程或维修规程、修理工艺规程、维修工作卡)和装备维修资源(如器材备件、测试设备、人员数量和技术等级等)的依据。

初始的预防性维修大纲由承制方制定,在论证阶段订购方应提出减少或便于维修的设计要求,提出预定的维修间隔期等;在方案阶段开始进行系统级的以可靠性为中心的维修分析;在工程研制阶段,全面展开以可靠性为中心的维修分析,形成初始的维修大纲,并要经过鉴定和审批。在生产和使用阶段,订购方与承制方共同协作,根据统计资料不断修订与完善大纲。

过去,重设计轻维修,初始预防性维修大纲是在设备投入使用后才去制定,一经制定以后不再进行修定。现在初始预防性维修大纲是在设备投入使用前制定,但一般是不够完善的。需要在使用过程及时进行动态修定,才能逐步趋于完善。一个完善的预防性维修大纲不能单独由使用维修部门或研制部门制定出来,只有双方长期共同协作才能完成。

2.3.3 以可靠性为中心的维修理论的重要作用

1.有效保证飞机的使用安全

以可靠性为中心的维修把安全性和环境性要求放在首位,与传统的预防性维修通过“多做工作,勤检查”来杜绝可能出现的各种故障具有根本性的不同,它不是根据故障而是根据故障后果来确定预防性维修工作,因而能辩证地对待定时维修,科学地规定安全寿命,有效地监控装备使用状态,运用先进的维修技术,采取合理的维修措施,高效地保证装备的使用安全。20 世纪 50 年代,美国民航大型运输机每百万次飞行的事故约 60 起,其中 $\frac{2}{3}$ 的事故是因机件故障引起的;到 2000 年,每百万次飞行的事故约 2 起,其中 $\frac{1}{6}$ 的事故是因机件故障引起的。可见,以可靠性为中心的维修已使大型运输机成为最安全的交通工具。

2.大幅度减小维修工作量, 提高利用率和出勤率

以可靠性为中心的维修是根据故障的后果以及既技术可行又值得做时,才做预防性维修工作的,消除了那些不必要的或起副作用的维修工作,增加了那些被人们忽视的而必须做的维修工作,有效地克服了传统预防性维修工作“维修过度”或“维修不足”的缺点,做到“维修适度”,提高了维修的针对性和适用性。40 余年来,民用飞机实行 RCM,使飞机维修间隔期增长了 10 倍以上,维修工作量减少到原来的 $\frac{1}{10}$ 以下,从而明显地提高了装备利用率和出勤率。

3.显著改善维修的经济性

由于大幅度地减少了预防性维修的工作量和维修工时,节省了人力费用和器材备件费用,停用时间减少,可用时间增长,从而显著改善了维修的经济性。

第三章 飞机维修内容的确定

3.1 飞机维修大纲与航空公司维修方案

3.1.1 预防性维修大纲

1. 预防性维修大纲的概念和目的

(1) 预防性维修大纲的概念

维修大纲是经管理当局批准的针对某一特定运输类飞机及装机发动机制订的初始最低预定维修/检查要求,是承运人制订其维修方案的基础和框架。

(2) 制定预防性维修大纲的目的

制定预防性维修大纲,即以可靠性为中心的维修大纲(简称大纲),其目的如下。

(1) 通过逻辑决断法来确定既技术可行又值得做的预防性维修工作,以最少的资源消耗保持和恢复设备的安全性和可靠性固有水平。装备的安全性和可靠性固有水平是由设计与制造所赋予的,只有进行既技术可行又值得做的工作,这些水平才能充分地体现出来;如维修不良或不当,就会损害其固有水平或消耗过多的维修人力、物力资源。

(2) 通过制定维修大纲,能发现将有重大影响或严重后果的设计缺陷,是提高装备可靠性、维修性、保障性和安全性的重要途径。

2. 维修大纲的主要内容

预防性维修大纲一般应包括下述内容:

(1) 需进行预防性维修的产品和项目

这里的“产品”是指设备的功能系统和设备的各分析层次的硬件;“项目”是指某些设备结构的各分析层次,由于其最低分析层次有可能是一个结构零件上的某一部位,不能单独成为一个产品,故称为项目。

(2) 需要采用的维修方式或维修工作类型

维修方式是指定时方式(定时维修)、视情方式(视情维修)和状态监控方式(事后维修)三种;维修工作类型是指定时拆修、定时报废、视情维修和隐患检测四种,或保养、操作人员监控、使用检查、功能检测、定时拆修、定时报废和综合工作七种。

(3) 每项预防性维修工作的维修间隔期

维修间隔期是定时方式、视情方式、各类维修工作类型或某级结构检测的间隔时间。这个时间的确定需进行工龄探索。工龄探索是以设备的使用可靠性数据等信息为基础,对最佳维修间隔期的探索过程。当设备未投入使用前,因使用数据缺乏,常常根据经验和类似产品的使用经验,确定一个保守的初步的维修工作和其间隔期,随着设备使用时间的增长,通过工龄探索等方法,逐步使所选择的维修工作和其间隔期更加实用和合理。

(4) 每项预防性维修工作的维修级别

各项预防性维修工作的维修级别的确定取决于使用要求,各

级维修的技术条件(人员技能、设施、备件等)和维修的经济性。一般应将工作确定在耗费最低的维修级别上进行,其合理确定需要有相应的信息资料,也可采用计算分析。

由上所述可知,预防性维修大纲包括预防性维修工作的产品和项目(干什么,what)、维修方式或维修工作类型(如何干,how)、维修间隔期(何时干,when)、维修级别(何处干和谁来干,where & who)等内容。

3.制定维修大纲的方法和过程

- (1)系统和设备以可靠性为中心的维修分析
- (2)结构以可靠性为中心的维修分析
- (3)区域检查分析
- (4)预防性维修工作组合

3.1.2 航空公司维修方案

1.维修方案的概念及其内容

1. 定义

维修方案又称持续适航维修方案。该方案在范围和内容上必须足够详细和全面,以便可以按照相应的规章、局方的规定和批准的标准,完成飞机的维修工作,使其处于适航状态。该方案应包括在航空承运人手册中。根据这些要求,给出维修方案的定义如下:

维修方案是民用航空承运人或飞机用户根据飞机构型、运行环境和维修经验,执行航空器维修大纲(MRB报告)或技术维修规程、适航和运行规章要求及制造厂建议而制定的计划维修检查要求。

2. 维修方案的内容

维修方案的制定是装备寿命周期中的重要工作,它对于装备的设计方案和装备的维修保障有着重大的影响,其形成过程是个反复迭代的过程,常常需要进行各种综合权衡分析。借助于维修分析工具,可方便地加以综合得出可供选择的维修方案。维修方案的主要内容包括:①预期的维修类型(如计划维修、非计划维修)及主要内容;②维修策略(不修复、局部可修复和全部可修复)与约束;③维修级别的划分、职责及任务;④维修保障方式,如部队建制保障、承制方保障或两者结合等;⑤主要保障资源的基本要求,预计的主要维修资源;⑥维修活动的约束条件,如费用、测试设备可靠性、保障设施利用率、人员效率等;⑦维修环境条件等。

2 修理策略(维修原则)

- (1)不可修复
- (2)局部可修复
- (3)全部可修复

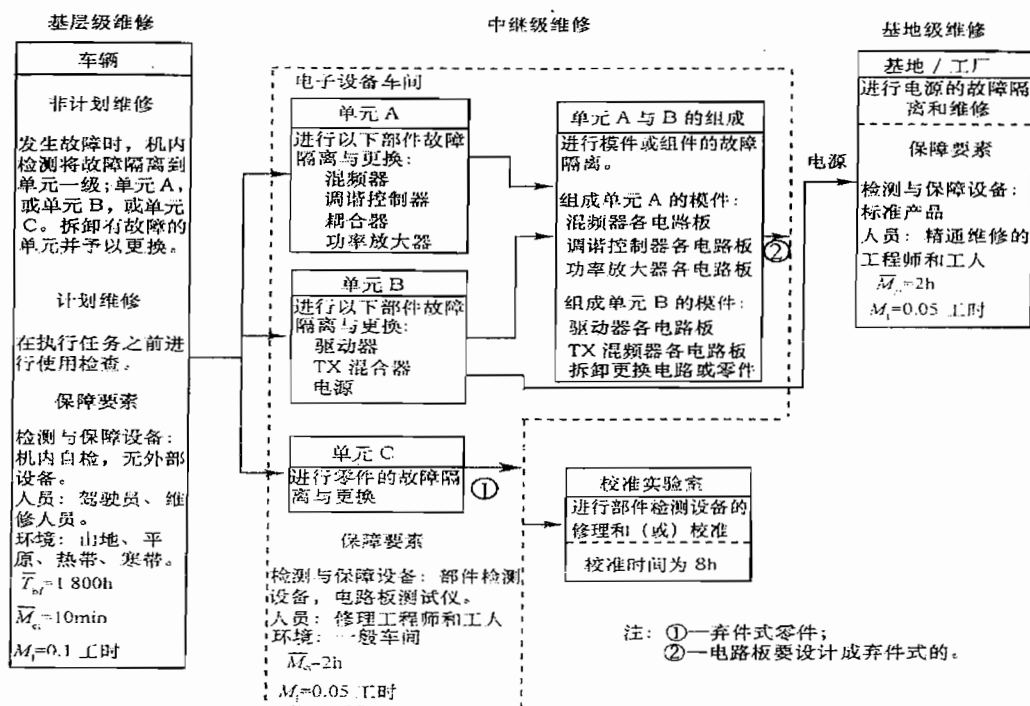


图 3-1 某装备的修理策略

3. 维修方案的执行

维修方案的执行计划，有的称为维修方案的第二部分，有的称为维修工作执行计划（MIOS），并附相应工作单。其功用是将“方案”变成工作者的施工指令。它通过工作单和工作单组合，解决计划管理中“做什么”、“何时做”、“怎么做”、和“由谁做”的问题，通常由生产计划部门完成。在完成这些工作时，要充分考虑人为因素的影响，达到安全、效益的综合平衡，向用户提供高质量的飞机；

维修方案的制订和实施过程，是由维修大纲制订文件、维修大纲、维修计划文件、维修方案和维修手册五种维修要求变成工作单（工卡）的过程，又叫由 5M 到 J 的过程

3.2 飞机维修分析

如前所述，制定预防性维修大纲的方法是以可靠性为中心的维修分析。该方法包括：

- (1) 系统和装备以可靠性为中心维修分析方法
- (2) 结构以可靠性为中心的维修分析方法
- (3) 区域检查分析方法

现将以上三种方法介绍如下。

3.2.1 系统和设备以可靠性为中心的维修分析

系统和设备的以可靠性为中心维修分析的一般步骤如下：

- a. 确定重要功能产品；
- b. 进行故障模式和影响分析(FMEA)；
- c. 应用逻辑决断图确定预防性维修方式或维修工作类型；
- d. 确定预防性维修工作的间隔期(
- e. 确定维修级别(
- f. 进行维修间隔期探索。

1. 分析所需的信息

进行系统和设备以可靠性为中心的维修分析时,根据分析进程的要求,应尽可能收集下述有关信息,以保证分析工作进行。

(1) 产品概况,如产品的构成、功能(包含隐蔽功能)和余度等；

(2) 产品的故障信息,如产品的故障模式、故障原因和影响、故障率、故障判据、潜在故障发展到功能故障的时间、功能故障和潜在故障的检测方法等；

(3) 产品的维修保障信息,例如维修所需的工具、备件、设备、人力等；

(4) 费用信息,如预计的研制费、维修费、器材备件费等；

(5) 类似产品的上述信息。

2. 确定重要功能产品

现代复杂设备是由大量零部件组成的,如果都要求进行详细的维修分析,则工作量很大,也无必要。事实上,许多产品的故障对整个设备并不会产生严重的影响,这些故障发生后能够及时地加以排除即可,其故障后果往往只影响事后的修理费用,而且该费用一般比预防性维修的费用低。因此,没有必要对所有的产品逐一进行分析,只对会产生严重故障后果的重要功能产品(项目)(FSI, Functionally Significant Item)才需作维修分析,从而剔除那些明显不需要做预防性维修工作的产品。

重要功能产品是指其故障会有下列后果之一的产品：

- (1) 安全性或环境性后果；
- (2) 使用性或任务性后果；
- (3) 经济性后果；
- (4) 隐蔽性后果。

确定重要功能产品的方法是将设备的功能系统分解为分系统、组件、直至零部件,如图 4.9 所示。

再沿着系统、分系统、组件……的次序,自上而下按产品的故

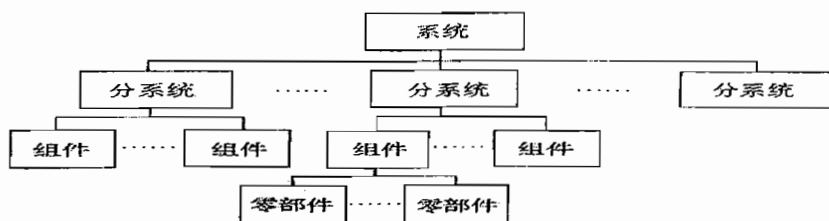


图 3-2 系统的分解图

障对设备使用的后果来确定重要功能产品,直至产品故障后果不再是严重时为止。低于该产品层次的都是非常重要功能产品(NFSI)。

3. 逻辑决断分析

重要功能产品的逻辑决断分析是系统的以可靠性为中心的维修分析的核心内容,它是应用逻辑决断图来确定各重要功能产品需做的预防性维修工作或其他处置。

例 1 用 MSG-2 决断 (该图曾讲过)

例 1 用 MSG-2 决断 (该图曾讲过)

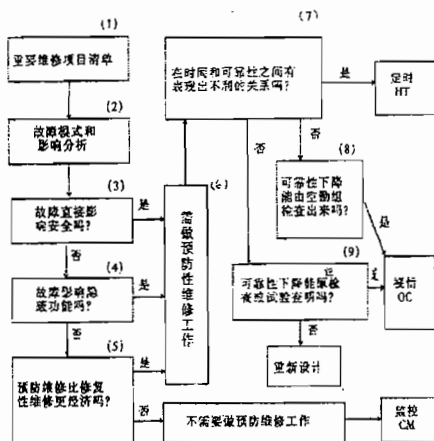


图 3-3 MSG-2 飞机系统和发动机逻辑决断图

表 3-1 MSG-2 逻辑决断图示例

重要维修项目	故障形式和影响	对决断图上(3)(4)(5)问题的回答			对决断图上(7)(8)(9)问题的回答			经决断后应做的维修工作
		(3)	(4)	(5)	(7)	(8)	(9)	
飞行操纵系统	失灵影响飞行性能	是			需	否	是	报情
发动机灭火瓶	漏或打不开不能灭火	否	是		需	是		定时
陀螺地平仪	不工作,飞行员无法判断飞机姿态	是			需	否	是	报情
飞行记录器	失灵不能作记录	否	否	否	不需			监控
机身气密座舱构件	严重划伤,爆裂引起座舱失密	否	有		需	是		定时

表 3-2 维修工作选择的原则

工作	通用性	有效性		
		安全件	使用件	经济件
润滑或保养	消耗性材料的补充必定会降低功能恶化的	工作必须能降低故障的风险性	工作必须能降低故障发生风险到一个可接受的水平	工作必须是有经济效果的
使用/目视检查	故障状况必须是能够确定的	工作必须能保持达到隐藏功能的适当的可用性,以降低发生多重故障的风险	不适用	工作必须能保持达到隐藏功能的适当的可用性,以避免发生有经济影响的严重故障,并且必须是有经济效果的
检查/功能检查	抗故障能力的下降必须是可探测的,在功能故障和功能恶化情况之间存在合理的一致	工作必须能降低发生故障的风险,以保证安全使用	工作必须能降低发生故障的风险到一个可接受的水平	工作必须是有经济效果的,即维修工作的费用必须低于预防故障的费用
更换	项目必须在具有可量化的使用期内显示出功能恶化的特性,并且该项目的头部分必须能生存到该使用期,还必须能把项目恢复到抗故障能力规定的标准	工作必须能降低发生故障的风险,以保证安全使用	工作必须能降低发生故障的风险到一个可接受的水平	工作必须是有经济效果的,即维修工作的费用必须低于预防故障的费用
报废	项目必须在具有可量化的使用期内显示出功能恶化的特性,并且该项目的大部分必须能生存到该使用期	安全寿命限制必须能降低发生故障的风险,以保证安全使用	工作必须能降低发生故障的风险到一个可接受的水平	经济寿命限制必须是有经济效果的,即维修工作的费用必须低于预防故障的费用

3.2.2 结构以可靠性为中心的维修分析

1 概述

结构以可靠性为中心的维修分析的一般步骤如下：

- a. 确定重要结构项目；
- b. 进行故障模式和影响分析；
- c. 应用逻辑决断图确定预防性维修要求；
- d. 损伤评级并确定检查要求；
- e. 确定维修级别，一般应将检查工作确定在耗费最少的维修级别上。

2. 飞机的结构

飞机的结构主要是指机身、机翼、尾翼和起落架。

(1) 静强度与刚度设计

(2) 安全寿命(抗疲劳)设计

(3) 损伤容限设计与耐久性设计

例

1. 安全寿命结构 (Safe - Life)

安全寿命结构是经试验和评估能够在使用寿命期内承受预期的重复可变载荷而不会出现裂纹的飞机结构。安全寿命结构经常是非冗余度布局的结构元件。它们是对安全有重要影响的关键元件。

安全寿命结构的完整性，是通过制订使用时间限制来达到的。根据试验结果进行保守计算制订的使用寿命，一般都属适航性限制项目，常用于飞机的起落架及其相邻结构。图 9.2 - 1F，是典型的安全寿命结构，它包括起落架和轮轴等。

安全寿命结构要求有一个预防及检查环境损伤和偶然损伤的维修大纲，以保证构件能使用至给定的寿命。

对安全寿命件，在服役至规定时限，应强制拆除，予以报废。对安全寿命件的损伤修理，必须在设计单位的帮助下进行。

2. 破损安全结构 (Fail - Safe)

破损安全结构是结构元件在出现严重损伤时，其余度结构能承受损伤件原来承受的载荷而不会发生灾难性的破坏。它是从整体结构的观点来考虑安全的，破损安全结构的特点是多路传力或冗余载荷路径。典型的破损安全结构详见图 9.2 - 1A - E，主要有以下实例：

机翼和尾翼结构中的多路传力蒙皮和桁条板、多块弦向连接的展向整体壁板、破损安全梁、背靠背双传力元件，和其它替换传力线路的结构等（如图 9.2 - 1A、B、C）；

机身结构中的破损安全剪切带、破损安全框弦、多元件传力、蒙皮和长桁壁板等（如图 9.2 - 1D、E）。

3. 损伤类型

(1) 环境损伤

(2) 偶然损伤

(3) 疲劳损伤

4. 结构分析所需的信息

(1) 结构项目外部的防环境损伤措施和所用的防护层的种类;

(2) 重要结构项目的名称、编码、位置、范围、图形、设计方法、主要受力情况、检查通道、材料、加工情况、内部结构项目故障后是否会有外部迹象、余度、研制费用与维修费用等;

(3) 已有的静强度试验、疲劳试验、损伤容限试验和耐久性试验的数据;

(4) 损伤容限结构项目设计中的结构检查计划;

(5) 类似结构的使用经验;

(6) 重要结构项目的损伤评级系统。

5. 确定重要结构项目

按故障后果将结构项目划分为重要结构项目 (SSI, Structural Significant Item) 和非重要结构项目 (NSSI)。凡其损伤会使装备削弱到对安全或使用产生有害影响的结构项目应为重要结构项目, 其余为非重要结构项目。对重要结构项目需要通过评级确定检查要求, 对非重要结构项目不需要评级, 只需按以往经验或研制方的建议确定适当的检查。

重要结构项目的确定按结构的层次自上而下地进行, 在每一层次上综合考虑故障后果、设计原理、环境损伤和偶然损伤的敏感性、结构分解检查数据等, 凡是故障会对使用安全产生有害影响的项目, 安全寿命或单途径传力损伤容限项目, 以及在腐蚀性大的环境下使用的或易产生环境及偶然损伤的项目, 都是重要结构项目, 按照这种方法分析, 直到下一层次的项目不再重要为止。

6. 应用逻辑决断图确定预防性维修要求

结构的以可靠性为中心的维修分析逻辑决断图如图 3-4。分析是从顶部方框开始的。图中标有 $D_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 的方框表示一项逻辑决断, 按其决断结果为“是”或“否”决定流程的走向。标有 $P_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 的方框表示一项处理过程。

决断过程如下:

(1) D_1 : 把结构项目分为重要结构项目和非重要结构项目。

(2) P_1 : 对于非重要结构项目, 按以往的经验确定适当的工作; 如采用新材料或新技术时按承制方的建议。

(3) P_2 :对重要结构项目分别对环境损伤和偶然损伤进行评级,按评级结果选择下列各项要求:检查等级,首检期,检查间隔期,维修间隔期探索计划。

(4) D_2 :评审所确定的重要结构项目的环境损伤和偶然损伤检查要求是否可行。如有无检查通道、用户有无所需的检查设备等。如不可行,应修改该项目的设计。

(5) D_3 :把各重要结构项目分为损伤容限或耐久性项目,安全寿命项目或静强度项目。

(6) P_3 :列出安全寿命重要结构项目或静强度重要结构项目的环境损伤和偶然损伤检查要求。此外,对安全寿命重要结构项目,由承制方提出安全寿命值。对于静强度重要结构项目,无疲劳损伤检查要求。

(7) D_4 :分析确定疲劳损伤是否需要预定检查才能发现。若不需要,则只需列出对环境损伤和偶然损伤的检查要求(P_5),不必另定对疲劳损伤的检查要求。

(8) P_4 :通过评级确定对疲劳损伤的各项检查要求:检查等级,首检期,检查间隔期,维修间隔期探索计划。

(9) D_5 :判定所确定的疲劳损伤检查要求是否可由环境损伤与偶然损伤的检查要求来满足。如果答案是肯定的,则对所分析的项目不必另定疲劳损伤预定检查要求,此时只需列出对环境损伤和偶然损伤的检查要求(P_5)。

(10) D_6 :判定确定的疲劳损伤检查要求是否可行。如有无检查通道、用户有无所需的检查设备等。如不可行,应修改该项目的设计。

(11) P_6 :列出该重要结构项目的三类损伤的检查要求。

7. 损伤评级并确定检查要求

每个重要结构项目都要进行损伤严重程度的损伤评级。评定该项目对损伤的敏感性和探测及时性的级号,以便按级号大小来确定相应的检查要求。通常级号小表示损伤的影响大,对检查的要求高。

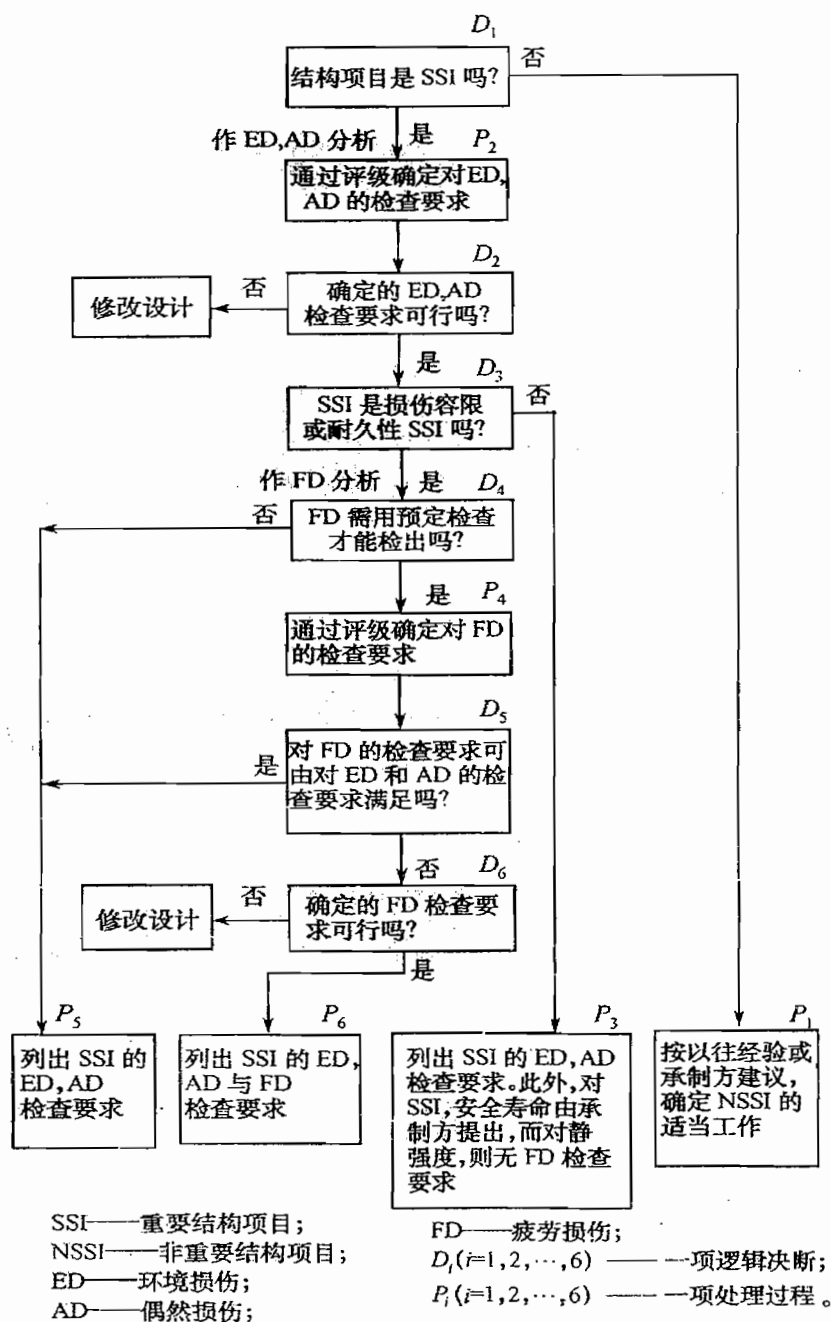


图 3-4 结构以可靠性为中心的维修分析逻辑决断图

3.2.3 区域检查分析

通过对飞机每个区域的重要性、环境和状况的分析,制订出该区域的预防性检查工作项目和周期,称为区域检查要求。区域检查工作,尽可能结合该区域内的重要维修项目和重要结构项目的检查来完成。它是重要维修项目和重要结构项目检查工作的补充,是对非重要维修和非重要结构项目技术状态的监控。这里需要特别指出,在不少飞机的区域检查大纲中,包含了重要维修项目和重要结构项目的检查工作。

1. 检查要求

区域检查主要对某区域内系统和结构的以下损坏进行检查:

- (1) 通道和电线、管路之间可能发生的摩擦;
- (2) 系统元件的固定和锈蚀;
- (3) 任何种类的外漏;
- (4) 接头、金属和复合材料结构的损坏等。

飞机区域检查与系统检查大纲和结构检查大纲之间的关系,应在维修大纲的相关项目中标注出来。

区域检查方法主要包括巡视检查和一般目视检查(GVI),有时也称内部、外部目视检查。

2. 制订程序

区域检查大纲的制订程序如下:

(1) 按照 ATA 规范要求,将飞机划分为若干主区和子区,并对每一区进行编号,应注意划分好相邻区域的界面,防止重复和遗漏。图 3.5-1 为典型飞机的主区划分。

(2) 区域情况说明,用图示说明区域的位置,口盖(编号、固定方式和打开方法等)及其离地高度、接近方法。

(3) 区域分析:以子区为单位,对每个区域从以下方面进行分析:

- 重要性;
- 可检性;
- 安装因素(包括数量和易检程度);
- 环境因素(包括温度、噪音/振动、气候/液体等环境造成损坏)。

(4) 区域检查综合:

根据对每一区域分析的结果(诸因素等级号和该区域内重要维修项目和重要结构项目的检查周期),综合研究,提出该区域的检查要求和检查周期。

有的制造厂在区域分析时,将该区域内的系统和附件均逐一列出,将准备列入区域检查的 MSI 和 SSI 要求单独列出,并注明区域的接近要求,对区域检查要求的制订和实施很有帮助。

有的制造厂将区域大纲制订程序归纳为矩阵逻辑图的形式(如图 3.5-2),并增加了项目转移要求,即将 MSI 和 SSI 分析中周期和接近方式相同的目视检查项目并入区域检查。

3. MSG-3 维修大纲的分析流程

飞机的 MSG-3 维修大纲,包括系统/动力装置大纲、结构检查大纲和区域检查大纲,图 3.5-3 “MSG-3 维修大纲分析流程”体现了系统/动力装置大纲、结构检查大纲和区域检查大纲的制订流程和相互关系。这三类维修检查要求有机结合,增加通用要求和各自的说明,就形成一份完整的飞机维修大纲。

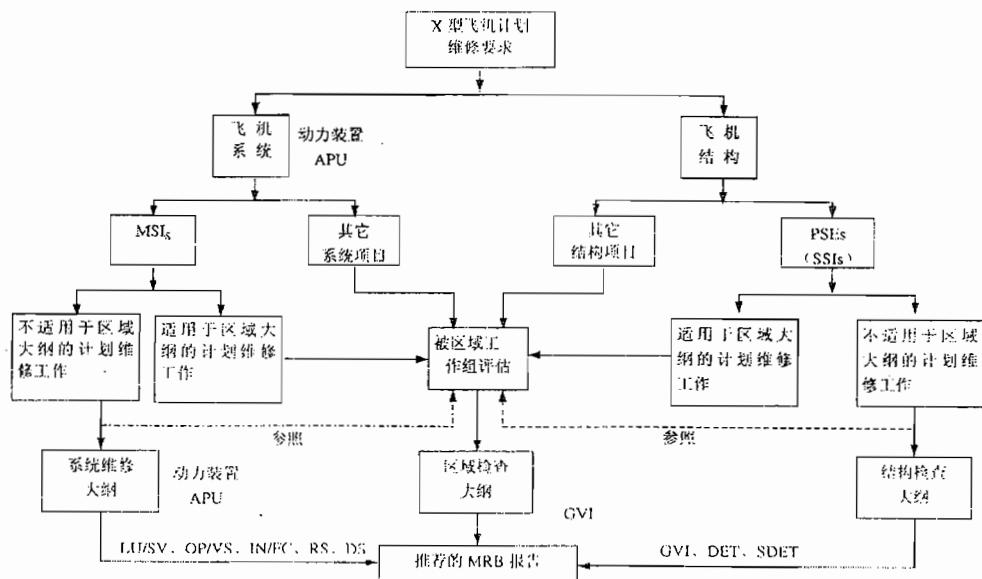


图 3-5 MSG-3 维修大纲分析流程

3.2.4 维修间隔期与维修级别

1. 维修间隔期的确定

2. 维修级别的分析与确定

(1) 维修级别分析

维修级别分析过程

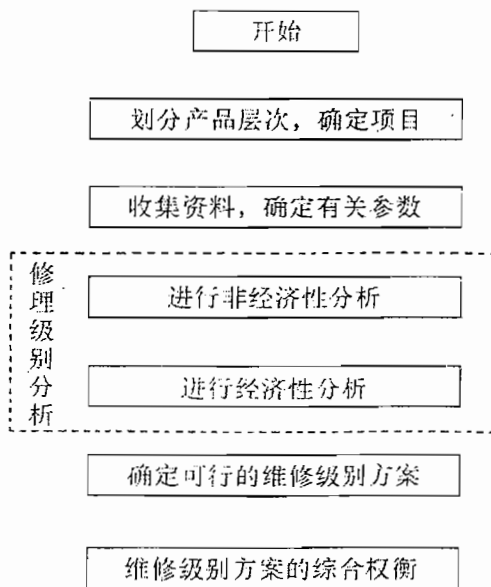


图 3-6 维修级别分析的一般流程

(2)维修级别分析决策树

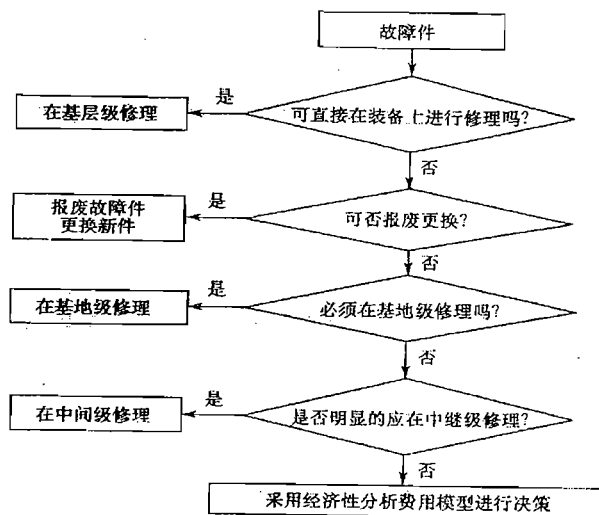


图3-7

(3)经济性分析分析模型

3.3 小飞机检查方案和老龄飞机补充要求

3.3.1 小飞机检查方案

(FAR—美国联邦航空条例)

根据 FAR91 部的要求, 每个承运人必须确定对所执管飞机的检查方案。使用何种检查方案, 可以依据飞机大小、推进器的形式以及营运的类型来确定。

一、大、小飞机的定义

在 FAR91 部中, 对大、小飞机的定义如下:

最大审定起飞重量在 5700 千克 (12500 磅) 或以下的飞机定义为小飞机。

最大审定起飞重量大于 5700 千克 (12500 磅) 的飞机定义为大飞机。

二、小飞机的三种检查方案

FAA 对小飞机的检查方案要求, 可以归纳为年检、100 小时检查和渐进式检查三种形式。这些要求适用于在美国注册的所有小飞机。承运人可以任选一种形式作为所执管飞机的检查大纲, 但执行 100 小时检查的飞机仍需每年完成一次年检。

1. 年检

FAA 对私人用小飞机有年检要求。

年检即每 12 个日历月必须按 FAR43 部附录 D 的要求对飞机进行全面检查。

年检的实施可以是一个合格的修理站, 或是一名 FAA 检验授权证书的持有人。

获得检验授权证书的人员必须具有 A/P 执照, 对持有 A/P 执照两年以上工作经历的人员, 才可通过考试得到检验授权证书。检验授权证书有效期为一年, 每年需更换一次。

年检执行情况可以记录于飞机履历本或飞机维修记录中。

2. 100 小时检查

FAA 对于租凭营运的飞机要求进行每 100 小时检查。

100 小时检查即每 100 飞行小时必须完成一次 FAR43 部附录 D 要求的飞机的检查。

100 小时检查的范围和深度与年检相同。

100 小时检查可以由持有 A/P 执照的机械员或修理站来完成，它不要求机械员必须有检验授权证书。

100 小时检查不能取代年检，因此，进行 100 小时检查的飞机，每年仍需有一次由授权检验员完成的年检。

3. 渐进式检查

渐进式检查是小飞机的另一种检查方式，它是将飞机的检查内容在 12 个月日历月内按阶段分开完成，并必须保证飞机在所有时间内均处在适航状态。

这种渐进式检查方法必须能够符合制造厂家的技术规范要求及 FAA 批准的数据和适航指令的要求。

(1) 飞机的所有人或承运人要向 FAA 提交一本检验程序手册并在手册中说明：

- a. 对检查工作的说明包括检查责任的连续性；
- b. 如何保存检查记录；
- c. 检查间隔是按飞行小时还是日历天确定的；
- d. 检查间隔是基于：
 - (a) 制造厂家的建议；
 - (b) 自己的勤务经验；
 - (c) 失效和缺陷的历史状况；
 - (d) 飞机的营运种类。
- e. 日常和详细的检查表格的样本及它们的使用说明；
- f. 报告和记录的样本及它们的使用说明。

(2) 该检验程序手册必须呈交 FAA 批准。

(3) 持有机身类资格的修理站、有检验授权证书的 A/P 执照持有人，可以实施渐进检查工作。

渐进式检查的频度和细节，必须使航空器在每 12 个月日历月内得到全部检查，并且必须与制造厂推荐及 § 91.409 要求的该航空器所从事的运行种类相符。

三、年检和 100 小时检查的内容

FAR91 部第 409 条规定，任何人不得营运一架飞机，除非在过去的 12 个月之内该飞机已按 FAR43 部附录 D 的要求进行了年检。

FAR43 部附录 D 中包括了对小飞机年检或 100 小时检查的检查项目要求，它的基本内容如下：

(1) 在进行年检或 100 小时检查之前，应先拆除或打开所有检查必需的盖板、接近口盖、整流罩；

(2) 完全清洁飞机及其发动机；

(3) 检查下列部位：

- a. 机身；
 - b. 系统和附件；
 - c. 蒙布和蒙皮。
- (4) 检查客舱和驾驶舱及其附件；
 - (5) 检查发动机和吊舱及其附件；
 - (6) 检查起落架及其附件；
 - (7) 检查所有机翼、中央翼及其部件；

- (8) 检查尾翼及其部件；
- (9) 对装有螺旋桨的飞机应检查螺旋桨；
- (10) 检查无线电和电子设备组件；
- (11) 检查未列在上述项目之中的其它项目（如装用）。

四、必须另外补充的检查要求

根据 FAR § 91.411 和 § 91.413 要求，执行上述三种检查的飞机，应补充以下工作：

- 1. 高度表和静压系统检查：每 24 个月按照 FAR43 部附录 E 进行检查；
- 2. 空中交通管制应答机检查，每 24 个月按 FAR43 部附录 F 进行检查校验。

3.3.2 老龄飞机补充要求

1. 概述

2. 老龄飞机研究的主要问题

3. 飞机使用寿命新概念

4. 老龄飞机的 SSID 大纲

(SSID-补充结构检查文件（大纲）)

经老龄飞机结构工作组评审后，补充、修订了各型飞机的补充结构检查大纲，其情况如下：波音 727 和 737-100/200/200C 飞机的 SSID 大纲修改版，FAA 已颁发适航指令 (FAA AD98-11-04R1, Amed39-10984)，中国民航的适航指令为 CAD98-B737-15R2 (修正案 39-2451)，该指令适用于所有的同型号的飞机。指令所规定的检查门槛值如下：

B737-200C 累计飞行 46000F_c

B737-200 累计飞行 66000F_c

也就是说，所有达到和超过相应门槛值的同类飞机，都应按要求完成首次检查。而这些项目的重复检查要求，应按照 DTR 检查表确定。因此，该指令要求用户根据制

造厂颁发的 SSID 文件 (D6-37089 更改 D)，修订原有的维修方案，经批准后执行；该指令还要求对修理过的 SSI 项目和补充型号合格证 (STC's) 项目 (更改和改装过的项目)，增加损伤容限和可检性评审并进行裂纹检查。另外，该指令还要求，今后对该型飞机进行改装和修理后的 12 个月内，应完成损伤容限评估，并制订相应的检查要求。

5. 中国民航的老龄飞机维修

中国航空承运人目前使用的机队，总体上是较年轻的。但是，在历史上，曾经有不少使用中的飞机进入了老龄阶段。主要有安-24、波音 707、运五和里 2 等。对这些飞机技术状况，管理部门和航空公司及时进行了研究分析，采取了技术措施，保证了安全飞行。主要做过的工作归纳如下：

1. 安-24 老龄飞机的研究

安-24 是原苏联生产的运输机，制造方原规定飞机技术寿命为 15000 起落，30000 飞行小时，15 年（先到为准）。当飞机使用到 15000 起落和 15 年后，仍希望继续使用，经民航局领导批准，组织了安-24 飞机的寿命研究和试验。经过全机疲劳试验和对试验机的拆检分析、飞机使用维修状况检查、服务通告评审等，最后将飞机的技术寿命

延长到 25000 起落, 25 年 (飞行小时仍按原规定)。该项工作的主要情况如下:

(1) 选择有代表性的 B3402 (出厂号为 0532) 飞机, 于 1990 年 5 月至 1991 年 5 月在陕西耀县飞机试验研究所进行了全机疲劳试验;

(2) 试验载荷谱是根据 21 架安-24 飞机在 95 条航线实测的突风和机动载荷谱导出的。

(3) 试验机于 1969 年出厂, 实际飞行 17735 小时, 19953 次起落。该机结构已完成了制造方所要求的 14 项服务通告、技术状况合格, 从航班飞行中调至试验基地, 之后进行全机疲劳试验;

(4) 该机试验至 38200 次飞行时, 发现第一条裂纹, 试验至 45569 次飞行时, 转入剩余强度试验。该机在承受 100% 限制载荷时, 保持了规定的三秒钟, 之后继续加载, 在 108% 的限制载荷 (又称破损安全载荷) 时, 机翼断裂。

(5) 经试验分析认为, 安-24 飞机最危险部位是机翼 2 号肋后梁下缘条的外螺栓孔, 该处由孔边初始裂纹 (1.27mm) 扩展到剩余强度试验, 曾经历了 28500 次试验 (飞行次数); 机翼的 7a 肋下缘条螺钉孔是机翼的次危险部位;

(6) 经试验和机队检查分析后认为, 安-24 飞机可以安全飞行至 25000 起落和 25 年, 并明确了应执行改装的服务通告, 补充了维修检查要求。

这是在国内进行的首次老龄飞机全机延寿疲劳试验, 取得了很多宝贵经验, 对其它机型的延寿具有重要的参考价值。

2. 其它老龄飞机的维修

在 20 世纪 70 和 80 年代, 民航局组织了里 2、伊尔-14 和运五等机型进入老龄期的飞机延寿试验, 在保证飞行安全的前提下, 延长了飞机服役期限, 对促进国民经济发展起了重要作用。在运五飞机使用后期, 曾发现了机身隔框疲劳裂纹, 发动机架固定接头断裂和起落架楔形接头断裂等故障, 有关部门及时进行了分析研究, 并制定了相关的补充检查要求。

在波音 707 飞机的使用维修中, 贯彻执行了该型飞机的 SSID 和补充改装和检查通告。在检查中, 发现三起水平安定面后梁接头的严重裂纹, 及时按规定进行了修理和更换。

波音 747 飞机机身 41 段结构和发动机吊架改装, 是影响该型飞机结构完整性的重大改装。国内不仅具备了这些改装能力, 而且承担了不少国外飞机的改装和修理, 积累了老龄飞机维修改装的新经验。

3. 飞机的腐蚀检查和预防

在 80 年代中期, 飞机腐蚀曾是中国民用飞机发生的主要故障, 并耗费了大量的维修工时。典型的有波音 707 飞机客舱窗框和蒙皮腐蚀; 波音 707 和伊尔 18 飞机机身、厕所下部地板梁, 甚至操纵钢索腐蚀; 安-24 飞机机身下部大面积腐蚀; 波音 737 飞机龙骨梁腐蚀等。管理当局对这些问题非常重视, 通过各种方式和途径设法解决, 实施了很多改进和改装、用严格管理、改进设计、加强检查等, 逐步减少了飞机的腐蚀损坏。后来严格执行各型飞机的 CPCP 要求, 使飞机结构的腐蚀得到了较好的控制。运七飞机的维修大纲, 吸取了安-24 飞机的腐蚀检查和防护经验, 除个别飞机外, 很

少发现使用原因造成的机身腐蚀。

运五等专业飞机长期停放和农药污染造成了飞机结构的腐蚀, 这是有待深入研究和持续预防的故障, 要求进行持续的预防检查, 并根据具体情况, 采取针对性的技术防护措施。

第四章 飞机检测与故障诊断技术

4.1 飞机检测技术

4.1.1 飞机检测的概念

1. 飞机检测的含义

航空装备检测的基本任务是获取对航空装备在使用和维修保障过程中有用的信息。航空装备检测是伴随航空装备自身的发展而不断变化的,航空装备检测所涵盖的内容也是随着装备功能的提高、结构的复杂而不断丰富和完善的。航空装备检测的雏形是依靠人眼的目视、声音的辨析、简单的测量和比较等形式,随着电子设备在航空装备中的不断应用,航空装备检测的概念演化为借助专门的仪器、设备、测试系统,通过适当方法与必要的信号分析及数据处理,由测得的信号求取与研究对象有关量值的一种过程。由此可见,由于检测对象不同,检测方式也千差万别;对不同检测对象所进行的检测,其检测方法的采用、检测知识的使用与组织、检测信息的类型与获取也都是不同的,因此,航空装备检测的概念将随着装备的发展而不断变化。通过对航空装备检测技术的不断更新,人们将获得对装备本身更加客观的认识,通过掌握其运动规律,促进航空装备的发展;同时,航空装备的发展也对航空装备检测技术提出了新的要求。

综上所述,不管何种形式的航空检测,信号测取和信息处理是其所具备的基本特征。所谓信号测取,是指以确定被测物属性量值为目的的一组操作;所谓信息处理是对测取到的信号进行分析处理的一种过程,通过相应的处理,使信息可以表征被测对象运动与状态的某种特征与属性。把握检测所具备的两个基本特征,可将航空装备检测界定为:在检测技术发展的基础上,结合航空装备特点,采取的一种对航空装备进行信号测取、检验、信息处理和决策输出等集多种形式于一体的过程。它远远超越了普通检测所能达到的“测量”范畴,是随着不同领域的科技进步,航空装备实现工作状态综合处理的结晶。

2. 飞机检测的分类

由于航空装备种类众多,各种设备运行状态又千差万别,且其服役条件和使用环境也各不相同,因此,航空装备检测的分类方法有很多。

● 根据检测的目的分类

(1) 定期检测和连续检测。定期检测,就是每隔一定的时间,对正在使用的系统或设备进行一次常规检查和测试。连续检测则是采用特定的仪器仪表对某一个系统或设备进行连续的监视和测量。一般对于非常重要的设备,一旦出现问题可能造成严重的影响,或者这种问题的发生和发展很难预料,无疑就需要对其采用连续检测。

(2) 直接检测和间接检测。直接检测就是直接对被测设备的状态信息进行测量,以确定系统或设备的工作状态。间接检测则是通过加工系统或设备运行中的二次信息来间接达到对系统或设备工作状态的间接确定,如飞行参数的地面分析与处理。

(3) 功能检测和运行检测。功能检测是指专门为判断系统或设备的某项功能时而对其进行的检测。对于大修后出厂的设备,需要验证其各项功能是否符合技术标准时,一般采用这种方式。运行检测则是对正在运行的系统或设备进行状态监测,以便根据监测结果,对其可能发生的问题进行早期处理。

(4)在线测试和高线测试。在线检测是指对现场正在运行中的系统或设备进行的检测过程。离线检测是根据现场特定的某些记录设备将现场设备的状态信息记录下来,然后结合检测对象的历史数据进行测量对比、分析的一种过程。

(5)常规检测和特殊检测。常规检测就是指系统或设备在正常服役条件下进行的检测,平时所说的检测一般属于这种类型,但有些需要在特殊情况下进行,需要模拟特殊的使用条件或工作环境来获取信号,这样的检测过程称之为特殊检测。

● 根据检测的信号分类

由于检测信号的不同,从而派生出来各种不同的检测方法,出现了利用振动声学、热学、力学、电学等理论的现代测试技术,主要包括声振检测、无损检测、温度检测、污染检测、交叉检测、压力强度检测和电气检测。

3. 飞机检测的作用

● 性能测试

性能测试主要包括设备出厂前的性能检验、设备维修过程中的定期检测、设备使用过程中的状态监测等。①出厂前性能检验。设备出厂前或大修后都要进行性能测试,采用先进的检测技术,不仅可以提高设备的检验质量、降低检验人员的劳动强度,而且还可以提高工效。目前,自动检测技术已成为设备质量检验的主要手段。②维修中的定期测试。设备在使用一定的时间后,都必须按有关技术要求进行性能测试,以检查设备的工作状态。因此,检测技术是保证设备可靠使用的重要手段。③使用过程中的状态监测,是指在设备工作过程中,对其主要性能进行连续或周期性测量和监控,当被监控对象出现故障时即发出告警信号,并可自动切换到备份单元,使系统继续工作或中止系统运行。所以,先进的检测技术也是保证装备得以良好使用的重要环节。

● 故障诊断

故障诊断主要包括故障检测和故障定位,它是检测领域的一个重要分支。故障检测,其目的在于发现故障,是根据设备检测的结果,按照一定的逻辑进行推理后来判断设备是否已经发生故障。故障定位,又称故障隔离,是指发现故障后,找出故障的具体部位,故障定位的等级随诊断的目的不同而不同。

4. 飞机检测系统的构成

航空装备检测系统的基本结构从功能上可以分为测试控制和数据处理两大部分。

(1)测试控制,是指对被测设备和测试辅助设备运行状态的参数进行检测和控制,包括测试、显示和控制三个基本环节。显示功能要求被测参数能够传递到其他测试设备或显示屏上实时显示输出。控制功能要求对被测设备的测试状态进行控制,以便测量被测设备在不同状态下的参数,同时也要保证整个测试设备及辅助测试设备的安全。

(2)数据处理,是指对被测设备检测得到的数据进行分析和处理的一种过程。数据处理分为数据的前处理和数据的后处理。数据的前处理是指在测试过程中对采集到的数据立即进行处理、分析和存储,以便得到瞬时参数信息,从而了解被测设备的运行状态。数据的后处理是指在测试结束后,对保存下来的各个参数进行分析处理、建立数据库和存档。

4.1.2 虚拟仪器技术

20 世纪 90 年代以来,测试仪器在计算机技术发展的迅猛推动下从传统仪器模式脱颖而出,出现了一种新的测试仪器——虚拟仪器。虚拟仪器(VI, Virtual Instrument)是计算机技术和仪器技术相结合的产物,是利用计算机技术,将测试仪器的测试功能进行有效“集成”,在以计算机为母体的环境中,体现仪器或系统全部测试功能的一种仪器系统。它把计算机本身、相关仪器硬件与特定软件结合起来,使得虚拟仪器除继承传统仪器的已有功能外,还增加了许多传统仪器所不能及的先进功能。虚拟仪器的最大特点是其灵活性,通过对虚拟仪器软件的定制,用户在使用过程中可以根据需要添加或删除仪器功能,以满足各种需求。虚拟仪器能充分利用计算机丰富的软硬件资源,可以突破传统仪器在数据处理、表达、传送、存储方面的限制。

● 虚拟仪器的演变与发展

虚拟技术的出现,改变了过去测试仪器必须由厂家制造、用户必须按规定程序操作而不能改变仪器功能的模式。使用虚拟仪器,用户可以充分发挥自己的才能、想象力,按自己的意愿随心所欲地设计自己的仪器系统,从而满足用户不同的应用需求。虚拟仪器这种功能模式的演变是伴随着计算机软硬件的发展而发展的,具体表现如下。

(1) 计算机技术是虚拟仪器发展的动力。电子测量仪器经历了由模拟仪器、带 IEEE488 接口的智能仪器到可编程虚拟仪器的发展历程。其中的每一次飞跃无不以高

性能计算机的发展为动力。由于计算机技术、特别是计算机总线技术的发展,导致了虚拟仪器的诞生以及虚拟仪器在 PXI 和 VXI 两大领域的快速发展。

(2) 软件技术是虚拟仪器发展的关键。有了具有一定运算能力的计算机和必要的仪器硬件之后,构造和使用虚拟仪器的关键在于应用软件的设计与开发。基于软件在虚拟仪器技术中的重要作用,美国国家仪器公司提出的“软件即仪器”(The Software Is the Instrument)形象地概述了软件在虚拟仪器中的重要作用。

虚拟仪器技术经过十几年的发展,其内涵、外延都在不断丰富和扩展,由于它与信息技术关系密切,所以虚拟仪器技术正在走标准化和开放性的道路。通过设计仪器类库、仪器驱动程序和标准编程接口等技术,使测试系统软件与硬件相互分离,用户在进行测试系统升级或更换仪器时,不需要修改测试软件源代码,从而大大节省了测试系统升级费用,缩短了系统升级周期。

1. 虚拟仪器的系统结构

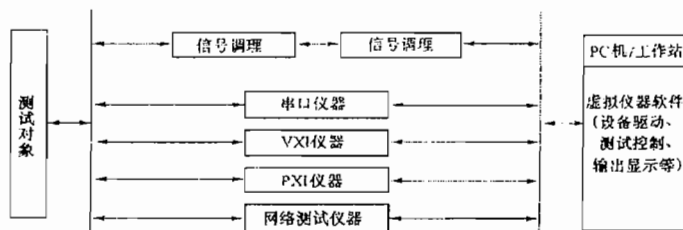


图 4-1 虚拟仪器系统结构图

2. 虚拟仪器的特点

结合虚拟仪器系统的一般结构,不难发现相对于传统仪器来说它具有以下特点。

(1) 强调“软件即仪器”的全新概念。在虚拟仪器中,仪器功能和性能的实现,除了必备的硬件系统之外,大多采用硬件软件化或以软件代替硬件的技术方式,来完成复杂的控制、分析或处理任务,从这个意义上讲,虚拟仪器对软件更具依赖性。

(2) 打破传统仪器小而全和仪器资源不能共享的应用现状。虚拟仪器可将传统仪器的公共部分,如数据显示、储存、打印及微处理器控制管理等环节,由同一计算机来完成,无论开发何种功能的仪器都可利用或共享这些公共资源,而无需重复设计。

(3) 具有模块化程度高、开放及互换性好等特点。这种特点使虚拟仪器可以方便而经济地构建各类自动测试系统。用户可根据自己的需要选购具有不同功能的模块化仪器,根据测试任务的不同而灵活组合,可以提高仪器资源的再用性。

(4) 可以自定义仪器功能。传统的仪器在出厂时,其功能已经确定,用户不能根据自己的需求而随时进行修改。而虚拟仪器则可借助通用数据采集装置,通过编制不同的软件测试方案,构造具有任意功能的仪器,故“软件就是仪器”的概念在这里再次体现。

(5) 采用虚拟仪器,硬件测试设备与计算机之间的数据“交流”将变得非常方便、直接与迅速。对于普通测试设备,一般所得到的测试数据需要测试人员手工实时记录。如果数据量比较大,就将使测试过程变的冗长、复杂,不可避免地会引起测试误差。采用虚拟仪器技术,测试设备所得到的测试结果将会实时地通过计算机总线,传输到计算机的存储设备,以备分析使用。

虚拟仪器与传统仪器的比较见表4-1。

表 4-1 虚拟仪器与传统仪器的比较

虚 拟 仪 器	传 统 仪 器
功能由用户定义	功能由仪器厂商定义
可通过不同数据通道连接周边各仪器、设备	只能连接有限的设备
测试数据可存储、分析	测试数据无法进行二次分析
软件是关键	硬件是关键
价格相对低廉	价格相对昂贵
开放、灵活、可重复使用和配置	系统封闭、功能固定、可扩展性差
技术更新快(周期为1年~2年)	技术更新慢(周期为5年~10年)
开发和维护费用低	开发和维护费用高
自动化、智能化程度高,可进行远距离数据采集与传输	功能单一、操作不便

3. 虚拟仪器系统的应用

4.1.3 自动测试设备

自动测试设备就是可以自主完成对被测对象的整个测试工作的一种系统或设备,包括数据采集、数据分析处理以及测试结果的显示输出。实现某种自动测试任务的设备总体称为自动测试系统(ATS, Automatic Test System)。

1. 自动测试设备的功能

自动测试设备一般具有连续监测、故障检测、故障定位和故障辨识四大功能。

(1) 连续监测。这种情况下,自动测试设备通常与被测系统构成整体,可以连续或周期地监视和记录被测设备在运行过程中的各种状态和有关参数。一旦发现被测设备出现故障,便可以及时发出报警信号,以使用户处理。

(2) 故障检测。它只是检测被测设备是否存在故障,而不能对故障作出定位。它与连续监测功能的区别在于它通常是离线测试的。

(3) 故障定位。它的功能是指通过测试,不仅可确定被测设备是否存在故障,而且可定位故障点和故障元件。根据定位区域的大小可分为元件级定位、模块级定位和功能级定位等。定位区域越小,要求测试设备越复杂,所需要的测试技术也越高。

(4) 故障辨识。它可用作故障参数的识别和分析现有故障对系统运行的影响,同时也可做故障原因的分析,以使用户能对故障作出相应的反应。

2. 自动测试设备的结构与类型

自动测试设备的组成包括五个部分。①控制器,主要是计算机,如小型机、个人计算机、微处理机、单片机等,是系统的指挥控制中心。②程控仪器、设备,包括各种程控仪器、激励源、程控开关、程控伺服系统、执行元件,以及显示、存储记录等器件,它们能完成具体的测试、控制任务。③总线与接口,是连接控制器与各程控仪器、设备的通路,完成消息、命令、数据的传输与交换,包括机械接插件、插槽、电缆等。④测试软件,是为了完成系统测试任务而编制的各种应用软件。例如,测试主程序、驱动程序、I/O 软件等。⑤被测对象,随测试任务不同,被测对象往往是千差万别的,它由操作人员采用非标准方式通过电缆、接插件、开关等与程控仪器、设备相连。

自动测试设备按使用结构和类型大致可分为三类:基本型、标准接口型与闭环控制型。

● 基本型

图 8-3 为基本型自动测试设备的结构示意图。它能完成对多点、多种随时间变化参量的快速、实时测量,并能排除噪声干扰,进行数据处理信号分析,由测得的信号求出与研究对象有关信息的量值或给出其状态的判别。

● 标准接口型

自动测试设备的结构形式可分为专用接口型和标准通用接口型。专用接口型是将一些具有一定功能的模块相互连接而成。由于各模块千差万别,专用接口型在组建设备时相互间的接口十分麻烦。标准通用接口型自动测试设备也是由模块(如台式仪器或插件板)组合而成,所有模块的对外接口都按规定标准设计。在构建设备过程中,若模块是台

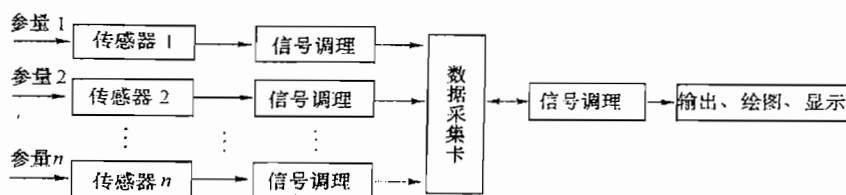


图 4-2 基本型自动测试设备结构示意图

式仪器,将各模块接插件直接连接起来,若模块为插件板,只要将各插件板插入标准机箱即可。在现有的航空装备自动测试设备中,标准通用接口型的典型代表是基于 VXI 总线的自动测试设备。VXI 总线自动测试设备采用机箱式结构,一个接插模块就相当于一台仪器或特定功能的器件,多模块共存于同一机箱组成一个测试设备。目前这种形式的测试设备在我军航空装备中应用较多,也是较为先进的系统。

● 闭环控制型

闭环控制型是指应用于闭环控制系统中的测试设备。闭环控制型的控制过程大体上可归纳为三个环节:①实时数据采集。对过程中有关物理量的瞬时值进行检查。②实时判断决策。对采集的表征过程状态的物理量进行运算分析、判断决策,并按已定的原则决定下一步过程控制的措施。③实时控制。根据决策,按照自动控制理论实时地对各执行机构发出控制信号。

显然,由计算机控制的自动测试设备,其基本型就是闭环控制系统的前两个环节,这是以计算机为中心的现代测试设备应用于大规模、现代化航空装备中的主要形式。对于第三个环节,某些大型装备的现场监测设备也属于这种范畴。随着网络技术的发展和通信技术的不断成熟,基于网络的航空装备远程监测系统将是闭环控制型测试设备的一个新代表,目前此类系统的雏形已经在航空装备远程监测上进行尝试性开发,相信不久的将来,闭环控制型远程监测设备将成为航空装备维修保障的重要手段。

4.1.4 机内测试技术

较早的航空装备,主要采用分离式器件,影响测试诊断的因素主要是设备的分解、更换及组装等工作;现代航空装备则主要采用各种大规模集成电路,装备内部的各模块拆卸非常方便,影响这类装备测试诊断的主要因素是故障的查找与隔离。因此,提高装备检测速度和故障检测率,采用机内测试(BIT,Built In Test)进行自动检测和故障隔离是一种必然。

1. 机内测试技术及其作用

机内测试在国外学术界被称为 BIT,BIT 在国内学术界的翻译还有多种,如机内自检测、机内自测试、机内自检等,其基本含义大致相同。一般意义上的机内测试是指装备本身不用外部测试设备就能完成对系统、分系统的功能检查、故障诊断与隔离以及性能测试等操作,是联机检测技术的发展。

航空装备 BIT 是改善航空装备测试性与诊断能力的重要途径。BIT 是航空装备测试和维修的重要手段,它的出现使以前用手工完成的绝大多数测试任务实现了装备检测的自动化。具体而言,BIT 技术对于航空装备有这几方面的重要作用。①提高诊断能力,具有良好层次性设计的 BIT 可以测试芯片、电路板、系统各级故障,实现故障检测与故障分离的自动化;②简化设备维修,BIT 的应用可以大量减少维修资料、备件补给库存量、维修人员数量;③降低总体费用,BIT 虽在一定程度上增加了产品设计难度和生产成本,但从综合试验、维修、检测和提高设备可靠性等方面来看,将会显著降低航空装备寿命周期费用。

航空装备 BIT 是改善航空装备测试性与诊断能力的重要途径。BIT 是航空装备测试和维修的重要手段,它的出现使以前用手工完成的绝大多数测试任务实现了装备检测的自动化。具体而言,BIT 技术对于航空装备有这几方面的重要作用。①提高诊断能力,具有良好层次性设计的 BIT 可以测试芯片、电路板、系统各级故障,实现故障检测与故障分离的自动化;②简化设备维修,BIT 的应用可以大量减少维修资料、备件补给库存量、维修人员数量;③降低总体费用,BIT 虽在一定程度上增加了产品设计难度和生产成本,但从综合试验、维修、检测和提高设备可靠性等方面来看,将会显著降低航空装备寿命周期费用。

常规 BIT 是提高航空装备武器性能和作战效能的重要技术手段,在提高系统测试性、简化维修过程、降低保障费用等方面可以发挥重要的作用。但目前常规 BIT 在理论和应用方面尚存在着许多有待解决的问题,归纳如下。①功能相对简单,诊断技术单一,诊断能力差,如 BIT 不能检测和隔离电缆、导线和连接器故障,且难以满足超大规模集成电路的测试要求;②航空电子设备测试虚警率高,不可重现、重测问题严重;③信息不能集中显示和处理,BIT 结果显示界面不友好,系统过于复杂,使用不方便;④BIT 设计资源由各研制单位和设计部门独立开发,难以共享,既不利于设计部门之间的统一,也不利于设计、生产、使用部门的协调。因此,从 20 世纪 90 年代初开始,随着专家系统、神经网络等智能理论和方法在应用中逐渐成熟,这些理论和方法逐渐渗入到 BIT 应用的方方面面,智能 BIT 应运而生。智能 BIT 的出现,在提高 BIT 综合性能,降低维修成本,改善装备测试性等方面起到了重要作用。

2. 智能 BIT

智能 BIT 就是将包括专家系统、神经网络、模糊理论、信息融合等在内的智能理论应用到 BIT 的设计、检测、诊断、决策等方面,提高 BIT 综合效能,从而降低设备全寿命周期费用的一种理论、技术和方法。智能 BIT 研究的主要内容包括 BIT 智能设计、BIT 智能检测、BIT 智能诊断和 BIT 智能决策。

(1) BIT 智能设计。它包括:根据系统设计特点、战备完好率、测试性条件等诸多要求和限制,科学地确定一个完整的 BIT 参数体系;根据系统特性,依据自顶向下的原则顺序确定 BIT 的总体方案,综合权衡各方面条件,合理确定各项技术指标;根据系统设计要求,采用 BIT 专家系统,加快 BIT 设计进程,保证 BIT 的设计质量;以新型电子电路系统中含有边界扫描机制的微处理芯片为基础,寻找最优化的基于边界扫描的电路 BIT 的设计方案。

(2) BIT 智能检测。它包括:准确采集和测量被测对象的各种信号和参数,针对不同测试对象,合理应用各种新型智能传感器,减少体积、功耗,提高精度和稳定性,减少后端数据处理难度;针对基于边界扫描机制的电路板日益增多的情况,研究基于边界扫描机制的智能电路板级的 BIT 检测方案;对检测过程中得到的原始状态数据进行必要的滤波处理,以减少由于检测噪声和干扰造成的 BIT 虚警;在 BIT 状态检测过程中单个测点得到的数据往往只能反映被测对象的部分信息,不同测点的信息之间可能存在冲突,为了提高

检测的有效性,有必要对不同测点得到的数据信息进行融合处理。

(3) BIT 智能诊断。根据掌握的被测对象故障模式和特征参量,结合检测得到的系统状态信息,判断被测对象是否处于故障状态,并找出故障地点和故障原因。近年来在智能故障诊断领域的研究成果中,大多相关理论都可应用于 BIT 的智能诊断。

(4) BIT 智能决策。包括故障发展预测、设备剩余寿命预测以及针对各种故障采取应对措施的一种策略。决策的主要依据是故障危害程度分析;决策的内容主要有降级运行、跳闸保护、余度供电等多种被选的处理方案;决策的方式可分为现场决策和远程支持决策。

上述四个方面的智能 BIT 都有很高的实际应用价值,在航空维修领域有着重要的发展潜力。

3.中央维护系统

例 A320 飞机的中央维护系统

4.2 飞机故障诊断技术

故障诊断技术的发展及其在航空维修领域的广泛应用,避免了航空装备的突发故障,消除或有效控制了重大突发事件的发生;为预知装备的维修周期提供了可靠依据,增强了航空维修的计划性、针对性和主动性,避免了维修的盲目性,对提高维修效率、改善维修质量、降低维修负荷、缩短维修周期具有重要作用。

4.2.1 故障诊断的基本概念

故障诊断是根据装备运行状态信息查找故障源,并确定相应决策的一门综合性的新兴学科。这门学科从 20 世纪 60 年代一出现就受到人们的青睐,经过 40 多年的发展,已取得了长足的进步。从以信号分析为基础的一般诊断方法发展到以知识处理为基础的智能诊断系统,在航空、航天、交通、能源、石化、冶金、电子等许多重要领域都得到比较广泛的应用。

1.故障诊断的含义

故障诊断,“诊”在于客观状态检测包括采用各种测量、分析和鉴别方法;“断”则需要确定故障特性、故障模式、故障类别、故障部位,乃至说明故障产生的原因等,这是诊断技术的关键。故障诊断侧重研究突发性、破坏性、随机性的故障,最大限度地消除或控制严重后果的产生。故障诊断突出了诊断的目的性,即寻找和发现故障状态而进行诊断,也包括无故障状态在内,但强调故障状态的重要性。

2.故障诊断的发展与要求

故障诊断的发展方向是与容错控制、冗余控制、监控控制和余度管理等可靠性系统设计相结合的,最终实现主动维修、监测控制、容错控制、自治控制、可信性设计等。对于航空装备来说,故障诊断应是针对整个系统的综合诊断。

(1) 实时化。航空装备可靠性、安全性要求高,使用环境恶劣,技术状态瞬息万变,因此,故障诊断应能做到实时化。故障诊断要达到实时化,必须满足许多非常严格的要求,实时化不是死板地要求在线实时诊断,而是要提高诊断反应速度,尽量达到实时诊断,从而提高诊断效率,为维修策略的制定争取时间。

(2) 智能化。故障诊断智能化的基本要求是在缺乏领域专家的情况下,能够准确、迅速而自主地完成诊断任务;更进一步的要求是诊断系统能够在运行过程中,半自主甚至是全自主地学习吸收新的领域专家知识,从而自我完善,不断改善故障诊断的准确性。

(3) 系统化。故障诊断的系统化有两层含义。首先,由于故障征兆信息的多样化,不同的故障诊断技术可能相互验证,也可能相互矛盾,因此必须强调多故障征兆信息的系统化融合诊断,以提高诊断的准确度;其次,对于像航空装备这样的复杂装备,可能同时存在多种故障,各故障之间相互联系、相互影响,因此必须完成由传统单故障诊断到多故障并行诊断的转变,同时能区别对待局部故障和系统故障。

(4) 早期化。航空装备故障可分为原发型故障和诱导型故障,故障诊断必须能够检测航空装备寿命周期内的各种故障。通常航空装备寿命早期发生原发型故障的可能性较小,而是显露出一定的故障征兆,这些潜在故障在运行过程中会不断积累,从而导致某些突发的诱导型故障发生,此时如果能够准确诊断,对保证航空装备使用安全具有重要意义。

(5) 网络化。网络化是装备故障诊断的重要发展方向。由于航空装备是一类非常复杂的装备,故障及其表现形式也非常复杂,为提高对疑难故障的诊断速度和准确性,充分利用资源从而降低故障诊断成本和风险,有必要发展和应用基于 Internet 的远程联合诊断技术。

对故障诊断来说,在以下几个方面需大力研究:反馈系统(闭环系统)中的故障诊断;小幅值故障、软性故障和早期故障检测;执行器、过程和传感器中故障的诊断;除突变性故障外的故障的早期预报;动态系统中的在线实时故障检测;系统过渡过程检测和过渡过程中的故障检测;动态系统启动和结束过程中的故障检测;(鲁棒、自适应)阈值选择和确定等。

4.2.2 故障诊断的技术方法

1.故障诊断的原理与内容

故障诊断的基本原理主要是采用合适的观测方式(包括合适的传感装置、人的感官、设备调试),在设备的合适部位,测取装备有关状态的特征信号;采用合适的征兆提取方法,从特征信号中提取有关状态的征兆;采用合适的状态识别方法,从特征推理中识别出

有关的状态;采用合适的状态分析方法,从征兆与状态推理中识别出有关状态的发展趋势,包括故障的早期诊断与故障预测;采用合适的决策形成方法,从有关状态及其趋势形成正确的干预决策;或深入系统下一层次,继续进行诊断;或已达到指定的系统层次,导出调整、控制、自诊治、维修等某一决策。

故障诊断主要包括故障检测、故障分离和故障修复三个方面,统称为故障的检测、分离和修复。衡量故障诊断系统性能的指标有:及时性(速度),敏感性和鲁棒性,误报率、漏报率、错报率和确诊率;全面性(针对所有类型故障)。

(1) 故障检测。故障检测是指确定装备是否发生故障的过程。在进行故障检测之前,需做以下假设:装备中的故障导致装备参数有变化,如故障使输出变量、状态变量、残差变量、模型参数、物理参数等其中之一或多个有变化。这是所有故障诊断方式都必须遵守的假设条件。在标称情况下,认为这些变量满足一已知模式,而当装备任一部件发生故障时,这些变量偏离其标称状态。根据系统输出或状态变量的估计残差的特性来判断故障。目前研究的目标是检测的及时性、准确性和可靠性及最小误报率和漏报率。

(2) 故障分离。故障分离是指根据残差方向和结构来分离出故障的部位,判断故障的种类,估计出故障的发生时间、大小和原因,进行评价与决策的过程。故障分类是将故障按其严重程度进行分类,以便采取相应措施。故障评价和决策是指根据故障的类别、严重程度,决定是否采取修复、补救、隔离或改变控制率等措施,以防止故障的影响和传播,预防灾难事故的发生。

(3) 故障修复。故障修复是指根据故障诊断结论,或改变控制率,或控制重构,或系统重构,使整个系统在故障发生的情况下,保证系统稳定并改善系统性能。如对传感器故障修复来说,可用一冗余传感器或一估计值代替故障传感器的输出值。故障修复是自主系统和智能系统的重要环节,将故障状态检测、故障诊断与自动控制紧密联系起来,使故障诊断具有更深远的意义和广阔的应用前景。故障修复理论和方法是目前和将来的研究方向。

2.故障诊断的技术方法

(1) 振动诊断法。以平衡振动、瞬态振动、机械导纳及模态参数为检测目标,进行特征分析、谱分析和时频域分析,也包括含有相位信息的全息谱诊断法和其他方法。

(2) 声学诊断法。以噪声、声阻、超声、声发射为检测目标,进行声级、声强、声源、声场、声谱分析。超声波诊断法、声发射诊断法属于此类,应用较多。

(3) 振声诊断法。为了能验证或获取更多信息,将振动诊断方法与声学诊断方法同时应用,能够得到较好的效果。

(4) 温度诊断法。以温度、温差、温度场、热象为检测目标,进行温变量、温度场、红外热象识别与分析。红外热象诊断法就是其中一种。

(5) 强度诊断法。以力、扭矩、应力、应变为检测目标,进行冷、热强度变形、结构损伤容限分析与寿命估计。

(6) 污染物诊断法。以泄漏、残留物、气、液、固体的成分为检测目标,进行液、气成分变化、气蚀、油蚀、油质磨损分析。油样诊断法与铁谱诊断法属于此类,应用较多。

(7) 压力流量诊断法。以压差、流量压力及压力脉动为检测目标,进行气流压力场、

油膜压力场、流体湍动流量变化等分析。

(8) 电参数诊断法。以功率、电信号及磁特性等为检测目标,进行物体运动、系统物理量状态、机械设备性能等分析。

(9) 光学诊断法。以亮度、光谱和各种射线效应为检测目标,研究物质或溶液构成、分析构成成分量值,进行图形成象识别分析。

(10) 表面形貌诊断法。以裂纹、变形、斑点、凹坑、色泽等为检测目标,进行结构强度、应力集中、裂纹破损、气蚀、化蚀、摩擦磨损等现象分析。

(11) 性能趋向诊断法。以装备的各种主要性能指标为检测目标,研究和分析装备的运行状态,识别故障的发生与发展,提出早期预报与维修计划,估计装备剩余寿命。

(1) 光学一目视检查法

保证飞机安全的重要检查手段,分三类:

① 巡视(一周)检查

② 一般结构目视检查

③ 特殊零部件详细目视检查

注意裂纹、腐蚀、螺钉松动、间隙、漆层完好性;结构目视检查可要求打开检查口盖、整流罩;油箱要放泄燃油并清洗;某些部位需除去涂层。

可用工具:手电筒、反光镜、放大镜、内窥镜

优点:

缺点:宽度小于 0.01mm 的裂纹及内部裂纹不能发现

(2) 无损探伤

(飞机维修最常用的检测技术,可检测微小裂纹或内部裂纹)

无损探伤是在对所探对象无任何损害的情况下实行检测的一种技术。飞机的安全性除了需要管理方面的规范外,还需要借助技术手段对飞机结构及各部件进行测试。目前,最常用的手段是无损探伤。例如,用 X 射线透视舱门,用超声波检查螺栓,并用电磁原理检查轮子和铆钉等等。目的是在金属疲劳威胁安全之前,就把它探测出来。除此之外,飞机检测还有其它方式。

● 超声波诊断法

超声波检测具有灵敏度高、指向性好、穿透能力强、检测速度快等优点。它既可检测材料或构件的表面缺陷、又可以检测内部缺陷,尤其对裂纹、叠层和分层等平面状缺陷,具有很强的检出能力。

检测适用于钢铁、有色金属和非金属,也适用于铸件、锻件、轧制的各种型材和焊缝等。但是,一般说来超声检测只适用于检查几何形状比较简单的工作。对于管材、棒材、平板、钢轨和压力容器焊缝等几何形状较简单的材料或构件,可以实现高速自动化检测,通常采用水浸法或喷水探头。除了探伤以外,超声波法还可用来测量厚度、硬度、淬硬层深度,检测材料的弹性模量和晶粒度,测量零件或构件中的应力,以及进行液位和流量的测量等。声阻检测法适用于检测胶接结构的质量和强度。

超声波诊断原理

* 发生和接收

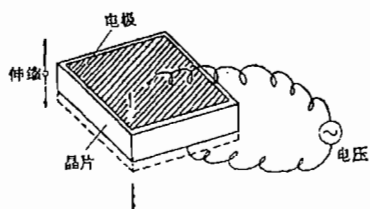


图 4-3 超声波的发生

* 工作原理

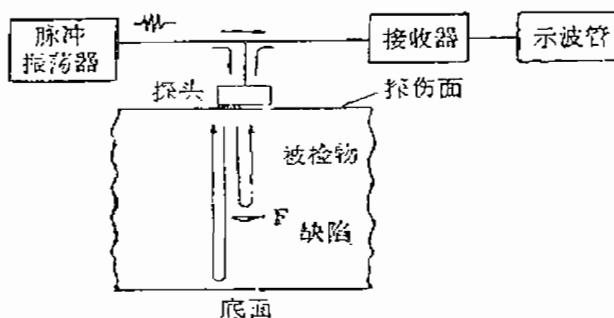
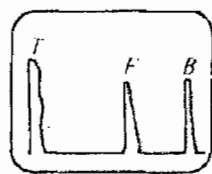


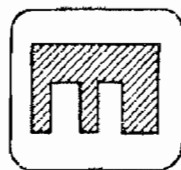
图 4-4 脉冲反射法的原理

三种显示:

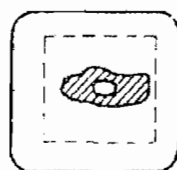
横标是探头轨迹,
纵标代表传播时间(距离),能
显示纵截面上缺陷分布与深度



(a)



(b)



(c)

图 4-5 A 型、B 型、C 型显示

(a) A 型显示: (b) B 型显示: (c) C 型显示

横标代表传播时间(距离),
纵标代表幅度(确定缺陷
位置)

只显示内部缺陷图象,
不能显示缺陷深度

●X 射线诊断法

射线检测法适用于检测材料或构件的内部缺陷。对体积型缺陷比较灵敏，而对平面状的二维缺陷不敏感，只有当射线入射方向与裂纹平面相一致的时候，才有可能检出裂纹缺陷。所以，射线检测法一般适用于焊缝和铸件检查，因为焊缝和铸件中通常存在的气孔、夹渣、密集气孔、冷隔和未焊透、未熔合等缺陷往往是体积型的。

透照原理

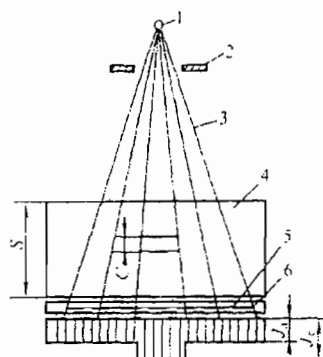


图 4-6 射线透照原理图

1—射线源；2—限制射线圆锥体的光阑；
3—射线；4—工件；5—铅片；6—铅盒

●声发射诊断法

声发射技术是根据结构内部发出的应力波判断结构内部损伤程度的一种新的无损检测方法，它与超声、X 射线等常规无损检测方法主要区别在于声发射技术是一种动态无损检测方法，它能连续监视结构内部损伤的全过程。当物体（试件或产品）受外力或内应力作用时，缺陷处或结构异常部位因应力集中而产生塑性变形，其储存能量的一部分以弹性应力波的形式释放出来，这种现象称为声发射而用电子学的方法接收发射出来的应力波，进行处理和分析以评价缺陷发生、发展的规律和寻找缺陷位置的技术统称为声发射技术。

接受声发射表面波的压电换能器

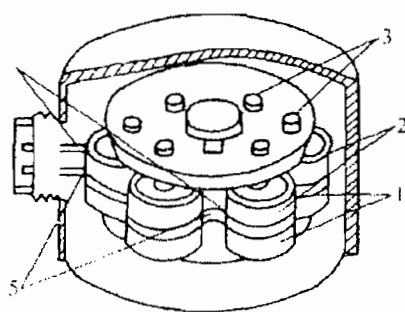


图 4-7 接收表面波垂直振动

高频分量换能器

1—压电环（上）；2—压电环（下）；

3—紧固螺丝；4—下底面连接导体；

5—上底面连接导体

● 涡流检测法

原理

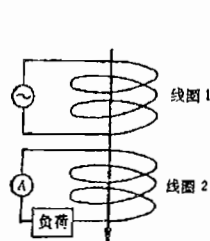


图 4-8 电磁感应现象

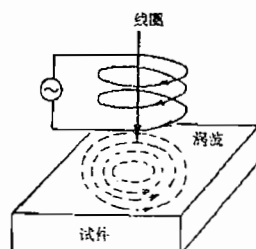


图 4-9 涡流的产生

线圈分类

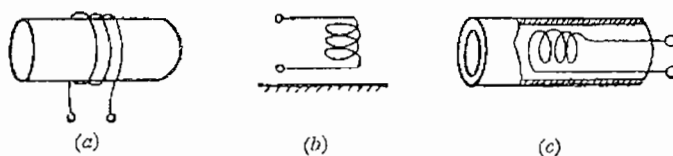


图 4-10 探测线圈的分类

检测系统结构

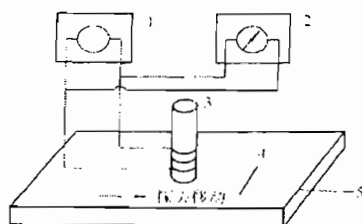


图 4-11 涡流检测系统的基本结构

1—振荡器；2—电压表；3—探头；

4—裂纹；5—工件

(3)无损探伤方法的选取

●表面裂纹的检测

表 3-2 表面裂纹的无损探伤方法

材料 序号	铝合金	钢	钛合金
1	目视	目视	目视
2	涡流	磁粉	渗透
3	渗透	渗透	涡流
4	X射线	X射线	X射线

●隐藏面裂纹的检测

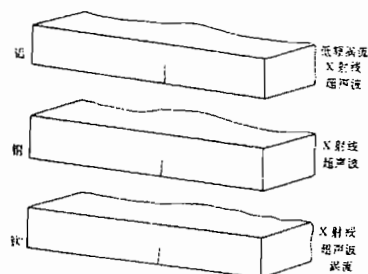


图 4-12 隐藏面裂纹的检测

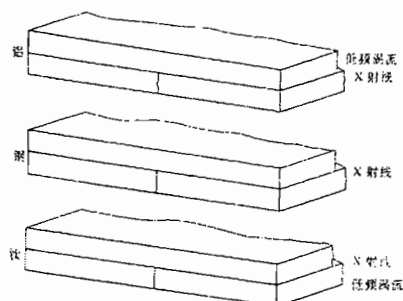


图 4-13 第二面裂纹的检测方法

●紧固件孔裂纹的检测

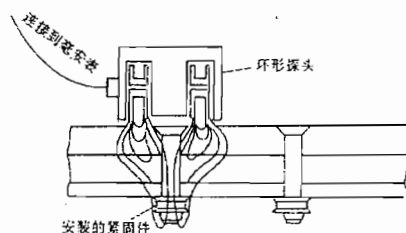


图 4-14 紧固件孔边裂纹的检测

低频涡流检测(优先)

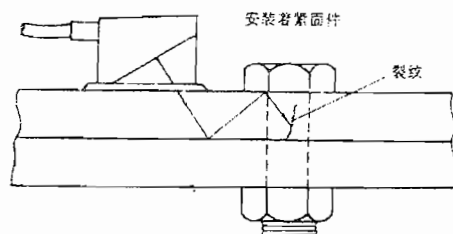


图 4-15 超声波检测(铝合金、合金钢、钛合金)

超声波检测

●腐蚀的检测

- ① X射线检测: 桁条、框架
- ② 超声波数字厚度检测: 蒙皮厚度
- ③ 低频涡流检测: 蒙皮凸起、裂纹

4.2.3 飞机典型故障及其诊断

1. 旋转机械故障诊断

● 转子系统的故障诊断

对于转子系统可以采用各种方式测取振动、噪声、强度、磨屑或声发射等物理量,用以早期发现转子在运转中的异常现象,并采取适当的维护措施,以防止破坏性事故的发生。转子系统的故障,往往都是以异常振动的形式表现出来的。显然,从转子系统的振动及其谱分析中,一般可以获得较多的、重复性好的、可靠性高的故障信息,据此来判断故障。所以,依靠处理分析转子系统振动信号来诊断故障的方法,已成为最有效的方法。

● 油膜涡动

油膜涡动是在某一种突然开始的转速下,轴承中发生的流体动力不稳定性,其特点是产生某些正比于转轴径向幅偏移的切向力,在油膜内各力的作用下,引起油膜涡动,它是转子的中心绕着轴承中心转动的一种亚同步振动现象。通过分析轴承的振动可监测油膜涡动。在层流的假设下,油膜的平均周向速度为轴颈表面周向速度的一半。实际上,油膜涡动频率总是小于轴回转频率之半,据统计分析,涡动频率为轴回转频率的42%~48%。

● 油膜振荡

随着转子回转频率的增加,油膜涡动频率也增加,两者保持着约为50%的恒定比。当轴的回转频率约为其一阶临界回转频率的两倍时,随着转子回转频率的增加,涡动频率却保持不变。这种不同步的油膜涡动将引起交变的作用力,在不同步的油膜涡动和系统共振两者共同作用下,将出现剧烈的振动现象,即所谓油膜振荡。在转子的轴向和颈向安装两个加速度振动传感器,可绘出转子的轴心轨迹。油膜振荡时,轴心轨迹呈不规则的发散曲线,若发生碰摩,则轴心轨迹呈花瓣形状。

● 旋转失速与喘振

旋转失速和喘振是压缩机工作时,由于气动现象而引起的叶片受激振动。其中旋转失速是压缩机中最常见的一种不稳定现象。目前常用的诊断方法是通过监测每级叶片后的压力变化幅度来判断压气机是否进入旋转失速或喘振。

(1) 旋转失速。旋转失速产生的基本原理见图4-16。当压缩机流量减小时,会使叶片进口冲角增大到临界冲角,此时在某种流动干扰或叶片加工、安装误差的影响下,在叶

片2的背面将发生流体分离,出现失速。叶片2失速后,不能产生足够的压力来保持它周围气体的规则流动,形成流量减少区域,流道将部分或全部被堵塞。被阻滞的气流又会使周围的气流偏转,从而引起叶片3上的冲角增大和叶片1上的冲角减小,即偏转气流使阻滞区一边的叶片(叶片3)进入失速,而另一边的叶片(叶片1)脱离失速,因而气流失速区从每一叶片的压力面向负压面方向移动,也就是说失速区会以一定的速度向叶片旋转运动的反方向传播。试验观察结果表明,失速区传播的相对速度低于叶片旋转的绝对速度,因此相对坐标而言,观察到的失速区沿转子的旋转方向移动,故习惯上将失速区的这种相对叶片的旋转运动称为旋转失速。

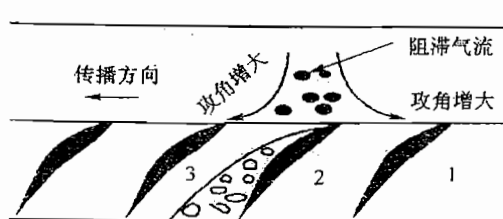


图4-16 旋转失速的基本原理示意图

叶片的压力面向负压面方向移动,也就是说失速区会以一定的速度向叶片旋转运动的反方向传播。试验观察结果表明,失速区传播的相对速度低于叶片旋转的绝对速度,因此相对坐标而言,观察到的失速区沿转子的旋转方向移动,故习惯上将失速区的这种相对叶片的旋转运动称为旋转失速。

(2) 喘振。喘振一般是由旋转失速加剧而引起的,但喘振除了与压缩机内部气体流动情况有关之外,还与相连的管路系统的工作特性有密切的联系。

● 齿轮故障诊断

用振动频谱来分析齿轮传动存在的问题看起来很简单,但解释它们却很困难,要发现早期的齿轮缺陷尤其困难,主要原因是传感器的安装受到限制和多振源产生一个复杂的频谱。在传动中,一般存在啮合频率和自振频率。此外,由于齿轮的频率分量常被齿隙、偏心、载荷以及其他缺陷造成的脉冲所调制,从而出现旁瓣或边带。一般说来,当在啮合频率处有峰值时,意味着齿轮有问题;当出现啮合频率的高次谐波时,意味着劣化程度加剧;当出现边带,且边带峰值达到一定值时,意味着齿轮故障已很严重,到了失效的边缘。

● 滚动轴承故障诊断

对滚动轴承进行状态监测和故障诊断的实用方法是振动分析。滚动轴承的振动可以分为与轴承的弹性有关的振动和与轴承滚动表面状况有关的振动两种类型。前者无论轴承正常与否,都会产生振动,在一定程度上代表了振动系统传递特性;而后者则反映了轴承的损坏状况。此外,在滚动轴承运转过程中还可能由于润滑剂而产生的流体动力振动和噪声。概括起来,滚动轴承故障的主要形式有:疲劳剥落、磨损、塑性变形、腐蚀、滚动轴承的胶合、保持架损坏,但在实际应用中,最常见和最具有代表性的故障类型通常只有疲劳剥落损伤、磨损和胶合。

2. 液压系统故障诊断

液压系统中有许多故障与机械、电气系统中的故障不同,其故障的特点是具有“扩散性”,即系统中某一元件发生了故障,往往会导致一系列元件发生故障。例如,滤油栅发生破损后,通常会引起泵、阀和执行元件的损坏故障。因此,对液压系统进行在线监测,及时发现和排除故障,对保证液压系统使用的可靠性具有特殊的重要意义。

根据液压系统故障的特点,已形成多种专用的故障诊断方法,而其中较有效的方法是:以分析诊断对象的逻辑关系、系统参数以及系统的热力学过程为基础的诊断方法。

液压系统发生故障时,常常不易立即找出故障的部位和根源。因为液压系统的压力和流量不像电气系统的电压和电流那样容易检测,而且故障的根源有多种可能性。为了

避免盲目查找故障,必须根据液压系统图,按一定的思维方法,合乎逻辑地来分析故障所在,减少怀疑对象,逐渐逼近,找出故障发生部位,这种查找故障的方法就是常用的逻辑诊断法。

故障的逻辑诊断法是一种预诊的方法。当一个复杂的液压系统出现故障时,不可能将所有的液压元件都逐个拆开检查,也不能漫无边际地乱拆、乱查,而只能根据故障现象,分析故障产生的原因,找出引起故障的元件后,再进行拆卸、检查和排除。当查找液压系统故障时,通常有两种出发点:一是从主机故障出发,液压系统故障引起主机本身故障而使执行机构不能正常工作;二是从系统故障出发,液压系统故障在短时间内,没有影响到主机,如过多的泄漏和温度的变化等。

对某一被检元件组成的液压系统进行基本检验,以分析判断该被检元件故障时,均以热、噪声、泄漏等为线索,这对诊断液压系统故障极为有效。诊断主机故障,可参考如下顺序:

第一步:执行机构在启动时,明确已产生的故障,如运动速度不符合要求,输出的力不合适,没有运动,运动不稳定,运动方向错误,动作顺序错误,爬行等。不论出现哪种故障,都可以指出故障的基本方向,如流量、压力、方向、方位等。

第二步:查阅液压系统图,从系统组成识别每个元件在系统中的作用。

第三步:列出对故障可能发生影响的元件目录。

第四步:从元件目录中列出检查的重点和部位,进行初步试验,并进行分析。

第五步:在完成初步试验的基础上,进行调整与校正,并判断反常信号,如过高的温度,噪声过大、有振动等。

第六步:根据初步检查中所找出的故障元件,进行修理和更换。如果初步检查未找出故障元件,则应利用各种附加仪器对每个零件进行更彻底的检查。

第七步:在重新启动主机前,要考虑每个元件对故障的影响,并防患于未然。

液压系统的故障形式及故障诱因很多,在进行故障诊断中,了解液压系统中常见的典型故障及其诱发原因,既有助于选择简便而有效的诊断方法,又有利于获得准确的诊断结论。

3. 数字系统故障诊断

数字系统故障诊断技术的发展,是同数字系统中的元件、结构和应用,尤其是数字计算机的发展紧密联系的。处理该类故障有两种基本策略,均可用硬件和软件结合起来实现。第一种策略是采用冗余技术,将故障的影响掩盖起来。这种策略主要用于高可靠性的,而且在一段时间内既要保证连续运行,但又无法修理的地方如航天、航空等,但随着故障的增多,最后故障的影响总不能全部掩盖起来。第二种策略是及时诊断,及时修理。

数字系统故障诊断的基本思想是“黑箱”理论,即被测对象是一个“神秘”的不可及“黑箱”,在不允许打开“黑箱”但又要了解“黑箱”的情况下,通过施加一系列的激励,再根据相应的输出响应去分析判断“黑箱”中的奥秘。其中测试器要完成四項工作:向被测对象送出测试的激励信号;接收被测对象在相应激励下的响应信息;根据激励与响应之间的关系分析并决策下一个激励矢量;根据激励序列和响应序列来确定故障的类型和地点。

最初的故障诊断系统主要用于功能测试,且需使用特殊的硬件设备。随着系统的复

杂化,专用仪器及硬件设备逐渐成为辅助手段,而主要依靠故障诊断软件,但其只能检查系统功能,而不是系统的硬件设备。主要做法是令系统作一些复杂的运算或执行一些复杂的逻辑操作,根据操作结果是否正确来判断系统功能是否正常。常用的算法是罗思的D算法。

4.故障诊断实例

●铁谱技术诊断发动机故障

英国“东方航线”在1976年—1977年的4个月间完成了一项评价铁谱技术的试验计划。从装备在Eastern's L-1011飞机上的罗尔思-罗伊斯RB211型发动机上,每隔50飞行小时取一次油样,送到位于苏格兰格拉斯哥的国家工程实验室(NEL)开展铁谱分析,利用直读式铁谱仪进行跟踪趋势分析,在本试验中,规定若连续出现两个高于基准值的读数便可报警。试验的发动机共有55台,以其中的第10093号发动机为例,根据前5个油样读数情况(发动机处于正常运行状态)计算出该发动机的正常基准读数;第6次油样开始,油样读数突然增加,大大超过基准读数,此时发动机的主要故障表现为因燃气轮机状态恶化造成压缩机启动失速,拆卸后发现微型低压定位轴承损坏。

●某发动机磨损故障分析

某型发动机在工作时出现“发动机综合故障”信号。发动机停止工作后,对发动机进行了检查。飞行参数显示:出现“发动机综合故障”信号是发动机的振动值超标引起的,在第一次出现“发动机综合故障”信号时,振动值达到102mm/s;后两次出现“发动机综合故障”信号时,振动值已达到140mm/s,且信号持续时间比较长。

对发动机滑油检查发现,滑油呈黑色,滑油滤下面滤片间有较多金属屑,对滑油进行光谱分析,结果见表4-2。

表4-2 滑油光谱分析结果 (单位:10⁻⁶)

Fe	Al	Cu	Cr	Zn	Cd	Si	Ag	Pb	Ti	Sn	Mg
73.15	4.44	7.37	7.45	0.96	2.98	3.51	3.39	1.17	13.42	5.41	8.90

从表9-1看出,Fe、Al、Cu、Cr、Ag和Ti等超标,Fe元素浓度已达到73.1510⁻⁶。对该发动机进行分解检查,故障情况如下:

(1) 高压压气机转子叶片叶尖、鼓筒磨损;静子机匣涂层及静子叶片叶尖磨损。

(2) 低压涡轮轴断裂。断裂部位在与高压涡轮盘内孔相邻处,断口平齐。低压涡轮轴前断口边缘有严重摩擦和高温氧化痕迹,摩擦表面有一层薄金属屑并有微裂纹,磨损处向内呈锥形收缩。

(3) 高压转子叶片叶尖严重磨损。高涡盘内孔沿圆周约1/3处与低涡轮相磨,相磨处的痕迹与低涡轴前段断裂处基本吻合。低涡转子叶片叶尖磨损,前封严篦齿损坏,后封严篦齿断裂,低导蜂窝组织磨损,封严装置和内环损坏。高导梳形板严重磨损。旋流器内径和后端面均磨损。

(4) 后轴间轴承保持架磨损严重,一处断裂,有过烧形貌,断开处的1个滚棒脱落,滚棒表面有严重剥落,部分滚棒粘连在保持架内,内钢套断裂数块,断口氧化严重。

4.2.4 故障诊断仪器及其应用

1. FFT 动态分析仪

基于 FFT 的数字式频谱分析仪又称 FFT 动态分析仪。信号经放大器进入低通滤波器,滤去高于分析频率量程的频率成分,防止高频成分混叠到分析频率之内,然后再通过模数转换变成数字量,经过中央处理机或者专用的信号处理芯片进行快速傅里叶变换,即可实现频谱分析的功能。FFT 运算部件及分析处理软件:①由通用计算机或微型计算机的 CPU 来进行;②由专用的 FFT 硬件来执行,可以用逻辑电路和运算部件组成或由专门的 DSP 信号处理芯片(如 TMS320 系列)来完成;③由软硬件结合的方式来进行。

用软件来作 FFT 动态分析仪以及相应的自、互功率谱,相关函数,相干函数,传递函数,概率统计,数字滤波等,具有极大的灵活性和扩展性,且价格也较为适宜,但速度慢、实时性差,而硬件处理则实时性好,但扩展性差,选用何种方式的频谱分析仪应根据应用场合,主要由实时性要求以及扩展性和价格等因素来决定。选用时应注意:分析频率量程;频率分辨率;动态范围和最小的电压输入量程;道间匹配和幅值精度。FFT 动态分析仪典型分析功能:

- (1) 时间域。时间波形、瞬态记录,自/互相关函数,脉冲响应,倒谱。
- (2) 频率域。线性谱,自/互功率谱,相干函数,相干输出功率,传递函数。
- (3) 幅值域。振幅概率密度函数,振幅概率分布函数,阶比分析,各种计算功能。

在考虑分析处理功能和实际运用中,请注意选取使用重叠处理和平均技术,包括 RMS 平均(功率平均)和线性平均(时域平均、频域平均)。

对于连续运转装备,根据它在运转中产生的代表其动态特性的振动信号,采用频谱分析仪分析信号的特征,可以在不停车的条件下实现在线监测和故障诊断;对于静设备和工程结构,可以对它施加人工激励,然后根据反映其动态特性的响应,同样可以诊断出是否存在损伤或裂纹。另一方面,在产品的无损检验中,振动诊断也有它的特殊地位,例如焊接和胶接的质量用超声波或 X 射线透视无法判别的情况下,用振动诊断可以明显地区别开;轴的裂纹检测常用振动诊断技术,对转子的不平衡诊断常用振动诊断技术。齿轮诊断,采用啮合谐波分析方法。

2. 超声波诊断仪

超声波诊断仪亦称超声波探伤仪,是一种用于探测固体材料内部各种缺陷的仪器。通常,超声波诊断仪由同步器、时基器、发射器、接收器、显示器和电源、探头等部分组成。

超声波诊断技术在工业中的应用日益广泛,由于诊断对象、目的要求、诊断方法等不同,目前市场上供应的超声波诊断仪品种繁多,可按照发射波的连续性、缺陷显示方式、通道数分为若干类别。在利用固体声波进行缺陷诊断的声学仪器中,超声波诊断仪属于被动性探伤仪一类,因为它是靠人为的向固体内发射超声波,再依据超声波在固体内传播

时,由于各种缺陷所引起的传输特性的变化而工作的。另一类声学诊断仪则是靠直接拾取固体内部的声信息而工作的,称为能动性探伤仪,如声发射诊断仪等。目前大量使用的是脉冲反射式超声波探伤仪。超声波监测常用于管壁腐蚀、铸锻焊件缺陷、活塞式发动机活塞裂纹等关键零件的现场监测。

3. 红外仪器

红外技术是设备状态监测和故障诊断的高新技术,与那些已很成熟的行业相比,红外仪器的制造尚在发展中。红外仪器可概括为两类即红外点温仪和红外热像仪。当前,工业民用热像仪的水平已相当高,它在检测的速度、精度方面都是先进的。红外点温仪的种类很多,用途十分广泛。在许多应用中,热像仪和几个点温仪一起使用。热像仪多用于高级的诊断和大范围复杂的检测,点温仪则多用于检测单独的连接处和对小面积进行简易诊断。这两类非接触式的红外测温设备,在国内外的设备状态监测和故障诊断中有不可取代的作用。

4. 润滑油分析仪器

润滑油分析是实现机械设备诊断的重要手段之一。采用润滑油分析技术进行机械设备状态监测和故障诊断的特点是:不拆机,无需安装传感器(随机监测除外);操作易于掌握,有的方法十分简单和直观;信息量较大;需有一个严密的管理体系(如油样的递送、机器状态的反馈等),作为工作的组织保证;需要建立一个数据库,以完成大量数据的管理工作。润滑油分析仪器主要有发射光谱仪和直读式铁谱仪。

● 发射光谱仪

发射光谱仪采用各种激发源将被分析物质的原子打到激发态,再将受激后发出的辐射线经分光系统按波长(频率)分开。通过对特征谱线的考察和对其强度的测定可以判断某种元素是否存在以及它的浓度值。图4-17是美国 Baird 公司 MOA 型直读发射光谱仪的原理图,它是目前比较适合开展润滑油光谱分析进行技术诊断的设备之一。激发光源采用电弧,一极是石墨棒,另一极是缓慢旋转的石墨转盘。石墨盘的下半部浸入盛在油样盒内的被分析油样中。当它旋转时,便把油样带到两极之间。电弧穿透油膜使油样中微量金属元素受激发出特征辐射线。经光栅分光,各元素的特征辐射照到相应的位置上。由光电倍增管、接收辐射信号,再经电子线路的信号 A/D 转换处理,便可直接读出油样中各元素的含量。整个分析序可由计算机控制,电动打字机自动将结果打印在打印纸上。该光谱仪分析速度快,40s 便可得出 20 种元素的测量结果。

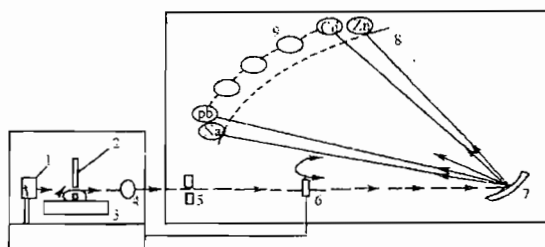


图4-17 MOA 型直读发射光谱仪原理方框图

1—汞灯;2—电极;3—油样;4—透镜;5—入射狭缝;
6—折射板;7—光栅;8—出射狭缝;9—光电倍增管。

● 直读式(DR)铁谱仪

直读式铁谱仪是在分析式铁谱仪的基础上发展起来的,其原理见图4-18。被分析油

样在虹吸作用下流经位于磁铁上方的玻璃材质的沉积管内。油中磨粒在磁场的作用下，按其粒度大小依序沉积在玻璃管内壁上（见图 4-19），由光导纤维将两束光引至大磨粒（大于 $5\mu\text{m}$ ）和小磨粒（ $1\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ ）的沉积位置；再用光敏探头接收穿过沉积磨粒层后的光信号，并完成光电转换；仪器内的电子线路将这个与磨粒沉积量相关的电信号放大和进行 A/D 变换，最终在数显屏上直接显示出分别表征油样为大、小磨粒浓度的两个相对读数 D_1 和 D_2 。

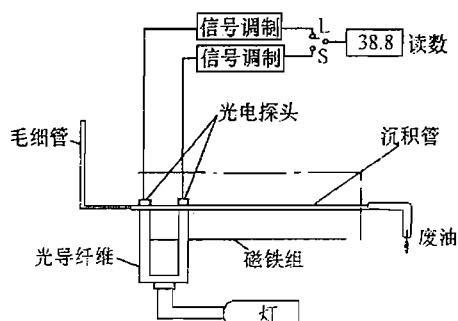


图 4-18 直读式铁谱仪简图

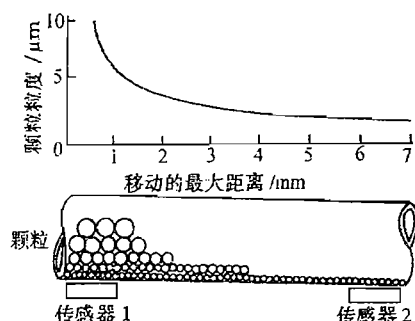


图 4-19 直读式铁谱仪沉积管内磨粒沉积状态

直读式铁谱仪分析速度快，重复性好，因此被称为铁谱技术中的定量方法，它更适用于开展设备状态跟踪监测工作，先由它完成大量油样的磨粒浓度测定，建立监测基准线，一俟发现磨损急速发展，再采用分析式铁谱仪系统观察磨粒形态，分析磨粒成分，探明磨损机理，判断失效类型。因此在采用铁谱技术开展设备故障诊断的应用时，直读式和分析式铁谱仪应成套购置，配合使用。

4.2.5 远程故障诊断

1. 系统的组成:

- ④ 现场机务保障单元
- ④ 远程故障诊断中心

2. 原理

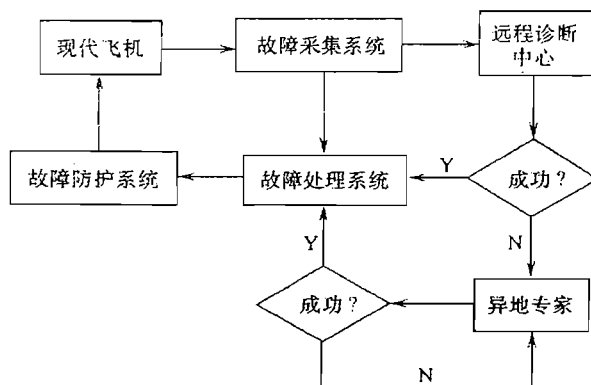


图 4-20 远程故障诊断原理图

4.3 飞机故障机理分析

4.3.1 飞机故障宏观规律

航空装备故障的演变规律,是人们进行维修工作的基础和必须掌握的知识。航空装备故障的宏观规律,将故障作为一个随机事件来看待,研究装备故障发生频率与使用时间关系之间的统计规律,一般以故障率随时间变化的关系曲线表示即故障率曲线。对航空装备故障宏观规律的认识和掌握,在很大程度上反映了航空维修理论研究和维修实践的成果,表明了人们对航空维修规律的认识程度。目前,在航空装备故障宏观规律研究过程中,先后提出了浴盆曲线规律、复杂装备无耗损规律,以及全寿命故障率递减规律等有代表性的研究成果。

1. 典型故障率曲线(浴盆曲线)

故障率浴盆曲线模型于1950年—1952年提出,1959年正式命名,是最经典的故障率曲线,见图4-21。

● 早期故障期

早期故障期主要指装备的使用初期,其特点是故障率较高,但随时间增加而迅速下降。装备早期故障率高的原因主要有:元器件不合格,设计制造和工艺缺陷等。对于早期故障,不适合采取预先更换措施,而应采取排除措施,否则会使装备平均故障率保持在高水平上。

● 偶然故障期

偶然故障期指装备的有用寿命期,故也称有用寿命期,其特点是故障率低而稳定。在偶然故障期,故障原因是由于设计缺陷、工艺缺陷、材料缺陷、使用维护不当、环境应力超过极限值等随机性因素造成的,因而装备故障的发生是随机的。在偶然故障期,不宜采用定期预防更换的维修方法,因为定期更换并不能降低装备的故障率。

● 耗损故障期

耗损故障期一般出现在装备有用寿命的末期,在某一时间装备故障率开始随时间的增加而迅速增加,并且表现出故障集中出现的趋势。耗损故障期的显著特点是故障率随时间增加而急剧增长。引起耗损故障的原因主要是诸如电子元器件和机械零件的老化、疲劳、腐蚀、磨损和损耗等,因而可采用预防更换等预防性维修措施,以控制故障率剧增的趋势,但预防更换的时机应选在装备进入耗损故障期或故障率增长到不可接受的水平之前。

浴盆曲线的提出,在航空维修理论研究和维修实践中具有重要的作用和地位。首先,浴盆曲线在一定程度上反映了航空装备的故障规律和形成过程,航空装备故障多种多样,但有一个形成过程,必须从源头入手,在航空装备研制过程中,严把质量关,进行严格的筛选,保证航空装备性能质量的稳定可靠。其次,浴盆曲线在一定程度上为科学维修提供了技术途径,有效的维修必须与航空装备故障特性相适应,即应充分利用和发挥航空装备的有用寿命,只做该做的维修工作。

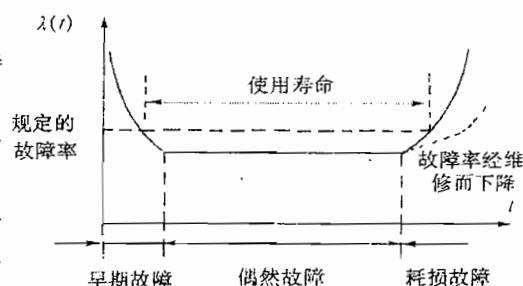


图 4-21 浴盆曲线

维修理论和实践表明,浴盆曲线并不是万能和完美的,浴盆曲线所揭示的故障规律,只适用于简单设备或一二种故障模式占主导地位的设备,适用范围十分有限,大多数的航空装备并不具有浴盆曲线所描述的完整的故障过程。因此,对待浴盆曲线这一经典的故障率曲线,我们同样应从辩证的角度来认识,既要充分认识浴盆曲线在航空维修中所发挥的作用;又应从发展的角度,根据航空装备更新换代及其功能结构、使用特点,积极探索航空装备故障新的规律特征。

2.基本故障率曲线(6种)

复杂装备无耗损区规律源于人们对航空装备故障率曲线的研究。20世纪60年代,美国联合航空公司积极开展维修改革,对大量的航空装备的故障特性进行了统计分析,绘制了许多装备、部件的故障率曲线,发现航空装备的故障率曲线主要有六种基本形式,见图10-2。图中A曲线有明显的耗损期,符合浴盆曲线,约占装备机件总数的4%;B曲线也有明显的耗损期,约占2%;C曲线无明显的耗损期,但随时间增长,故障率也在增加,约占5%;D、E、F曲线根本无耗损期,约占89%。因此,航空装备(或设备)可分为有耗损特性和无耗损特性两类。有耗损特性的只占总装备、设备数的11%,往往是单体机件或简单机件如飞机轮胎或飞机结构元件,这11%的装备、机件可以规定寿命;无耗损特性的航空装备、机件占89%,往往是些复杂装备,如航空电子设备、飞机空调系统、液压系统等,这89%的装备、机件不需要规定寿命。这表明,大多数航空装备在正常使用期内的故障率基本上是常数,而随着航空装备的复杂化,其故障发生规律已不同于早期的简单装备。

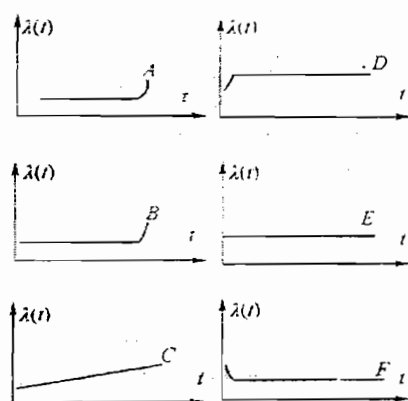


图4-22 航空装备故障率模型

3.故障率曲线与飞机维修

经上述分析可知,故障率曲线能够灵敏地反映航空装备故障特性随时间变化的趋势,据此可制定出有效的维修计划和维修对策,因而故障率曲线在航空维修领域十分有用,已被广泛地用于航空装备质量标准的制定、检查验收和维修策略的制定等过程。例如,根据故障率曲线可以判断航空装备是否存在早期故障、耗损型故障,装备质量是否符合标准。

(1) 故障率增加。航空装备经过一段时间的使用之后,故障率开始随时间的延长而迅速增加,进入耗损故障期。如果在装备进入耗损故障期之前按维修间隔期限定时更换,可以遏制装备故障率急剧增长的趋势,即定时更换有效果。

(2) 故障率不变。由于故障率是一个常数,而其任务能力仅与故障率和任务时间有关,因此,即使按一定的间隔期限 T 定时更换,故障率不会发生变化,任务能力也不会有所改善,即用新品或工作时间短的机件去更换工作时间长的机件是没有效果的,如果在这种情况下实施更换修理,结果只能是引起附加的早期故障,增加人为差错故障等。

(3) 故障率降低。由于故障率随使用时间的增加而减少,如果这时在一定的维修间隔期限内实施更换修理,试图用新品更换在用品,就相当于用故障率高的机件更换故障率低的机件,不仅不能降低装备总的故障率,反而会产生相反的效果,每次定时更换都会引

起故障率的升高,使平均故障率保持在一个高的水平上。

4.3.2 飞机故障机理分析

一般而言,故障的发生是由其微观原因引起的,而所观察到的只是其外表的现象,因此故障分析一般可从微观和宏观两方面入手即进行微观分析和宏观分析。微观分析是从物理、化学或材料强度等方面研究故障发生在装备的部位和形式,即对装备故障机理进行分析,这是一种寻根探源的做法。

1. 飞机典型故障模式及故障机理

故障机理是引起故障的物理、化学和材料特性等变化的内在原因,分析掌握航空装备的故障机理,研究装备发生故障的内因和外因,从根本上采取措施,对提高装备可靠性,增强维修的针对性,具有十分重要的作用。

✎ 航空装备故障主要影响因素

航空装备在使用过程中,除了承受设计所规定的各种正常应力作用之外,还要承受外部各种环境因素的影响,因此,航空装备发生故障一般有两种情况:一是由于装备本身缺陷而引起的故障;二是装备在正常工作的情况下,由于外部环境因素而引起的故障。表10-1列出了主要因素对航空装备故障模式的影响。

✎ 航空装备故障模式及其机理分析

航空装备结构复杂,使用环境多变,各系统、设备的故障机理多种多样,本节仅对航空电子、军械、特设、器件的常见故障模式作简单介绍。航空电子、特设、军械等一般由半导体器件、集成块、电子元器件、各种机械零件、电气接触件(继电器、电门等)、弹性膜盒、塑料橡胶件、光学零件、电气连接器等组成,其常见故障模式和故障机理见表4-3。

(1) 集成块。集成块常见故障模式有电极间开路或时通时断、电极间短路、引线折断、封壳裂缝、热电阻增加、可焊性差、电参数变化等。电极间开路或时通时断,主要是由于电极间金属电迁移、电蚀和工艺缺陷等;电极间短路,是由于电极间金属电扩散、金属化学工艺缺陷和外来异物等所致;引线折断的原因有线径不匀、引线强度不够、热应力和机械应力过大、焊料疲劳和电蚀等;封壳裂缝是由封装工艺缺陷和环境应力过大等所致;可焊性差,是由引线材料缺陷、引线金属镀层不良、引线表面污染、腐蚀和氧化等引起;电参数漂移,主要是材料缺陷可移动离子引起的反应等。

(2) 电子管。电子管在使用过程中发生故障的概率是比较高的,如某型飞机的电子产品,因电子管损坏而造成产品的故障占整个电子系统故障总数的86%。电子管常见的

故障模式一般有阴极衰老、管内真空度下降、灯丝断丝和管子插脚接触不良等几种。引起阴极衰老的原因是管子阴极表面涂层蒸发、耗损;真空度下降则是由于管内气体向外渗透和管内电极除气不干净所造成的;灯丝断丝是由于振动、冲击等应力使得灯丝震断,以及过电流和过电压等使灯丝烧断;电子管插脚接触不良,是由于管脚氧化造成的,尤其是工作电流较大的大功率管、整流管、速调管等,由于通过管脚的电流大,管脚金属温度高,表面氧化快,更容易造成接触不良。

(3) 电阻器。电阻器常见故障模式有阻值变化、开路失效、短路失效、机械损伤、接触不良等。阻值变化,多由原材料成分缺陷、工艺缺陷造成;开路失效是由于线径不匀、电蚀、污染、热老化、电压电流过载和引线疲劳断裂等所致;短路失效主要由电应力和热应力过大所致;机械损伤,是因冲击和振动等机械应力过大造成电阻器集体裂缝、膜体擦伤和瓷棒断裂等造成;接触不良,一般由加工工艺缺陷、引线疲劳和电蚀导致帽盖与金属膜、炭膜接触不良。

表 4-3 各主要因素对航空装备的影响

影响因素	对故障模式的影响
高温	对温度敏感的材料,如绝缘材料的绝缘性、润滑油脂的黏性和润滑性、塑料和橡胶件的尺寸及机械性能等均明显下降;电子元器件的参数漂移变化;弹性元件的弹性和金属材料的机械强度降低;外表涂、镀层起泡甚至脱落;配合零部件的几何尺寸发生变化;炸药的安定性、火药的易燃性有显著下降
低温	轴承等活动部件的润滑油黏度增大,部件间摩擦力增加;塑料、橡胶等高分子材料尺寸变化、发硬、变脆、易损坏、折断,密封漏油、漏气;电子元器件参数漂移变化;各种材料制成的零件,因收缩率不同造成配合间隙等恶化,甚至使机件卡死;火药和固体燃料燃速下降
潮湿	降低材料表面的绝缘电阻;零件的电阻降低后,介质损耗和介质常数等增加;降低零件耐腐蚀性,加快表面锈蚀;非金属材料受潮后膨胀,尺寸变化;导线受潮后,抗电强度差,容易击穿
盐雾	零部件表面光洁度破坏,影响配合;零件机械强度下降
低气压	密封零部件漏气、漏液和变形;电气接点容易烧损;抗电强度下降,产品容易击穿
霉菌	光学镜片观察模糊、损坏;金属零件腐蚀加快;材料绝缘性能破坏;产品表面质量破坏
沙尘	转动和滑动零部件磨擦增加,易卡死,油路、气路堵塞;继电器、开关等电气接点接触不良,跳弧;精加工面擦伤
振动	结构机械疲劳损伤;零部件结合松动、脱落,甚至破坏;产品接触不良、断路,导线焊点、插头脱落、松动;电真空器件的电极、熔断器的熔丝振断;仪表指示摆动或偏摆;固定不好的电缆、导线束之间产生摩擦,若与临近尖锐部分相碰,会使绝缘层磨损;两种材料之间(如金属与玻璃)之间的粘接脱开
电磁辐射	电气电子产品受干扰;仪电产品错误动作

(4) 电容器。电容器常见故障模式有漏电流过大、短路失效、开路失效、容量变化等。漏电流过大,原因是材料绝缘不良、电应力过大、浪涌电流过大和浸渍物老化等;短路失效,主要由于电扩散、介质击穿、污染和浸渍分解、潮湿环境、腐蚀和浪涌电流过大所致;开路失效,是因所加电压过高、使用条件恶劣、电迁移、引线疲劳、氧化和接触电阻变大而导致电极开路,浪涌电流过大亦可烧毁引线和金属箔;容量变化,多因材料缺陷、工艺缺陷和环境因素等造成,容量超差一般出现在脉冲工作状态,因脉冲电流过大而使电容器发热。

(5) 接触件。接触件包括开关、接插件、接触器、继电器和启动器等。继电器、电门的主要故障模式有触点粘接、积炭等。触点粘接,一是由于触点通过电流过大,表面温度过高;二是通断速度低;三是接触性负载,触点之间跳火。这三个方面的原因都会造成金属转移加速,导致触点粘接;积炭故障机理是触点表面氧化造成的。开关、接插件、电缆插头、插座等,其故障模式主要以机械故障为主,表现为接触不良,主要是磨损、疲劳和腐蚀等所致,如连接部分表面氧化、磨损、污染,使导电面积减小,接触电阻增加造成接触不良,以及插头插座经常插拔,受机械挤压、碰撞,使插孔扩孔、弹簧失效、零件变形等。

(6) 电机。电机类产品常见故障模式有积炭多、卡死、工作不正常。积炭多是由于电机炭刷磨损,炭粉堆积所致;电机卡死是由于炭刷、整流子与转子间隙小或者移相电容量变化而使电机卡死;工作不正常是由于磨损后的炭刷、整流子与转子接触面积减小,造成电机火花干扰大,影响其他设备的正常工作。

(7) 仪表指示器。仪表指示器的常见故障模式有指示迟滞和指针卡死。指示迟滞是清洗指示器时,酒精等清洗剂内不挥发的物质与灰尘等杂物混合粘附于轴尖和轴承的工作面,使得摩擦力矩增大;指针卡死往往是由轴尖或指针机械变形所致。

(8) 光学镜片。光学镜片常见故障模式有镜片发霉、发雾和脱胶等。镜片发霉是因为霉菌孢子的菌丝与镜片表面沾染的油污、汗液结合后,孢子获得养料,繁殖出新的孢子,使得镜片出现小霉点或网状的霉面;发雾是由于在高低温突变的条件下,水气在镜片表面凝结,加上表面粗糙度高,由于不及时擦拭而致;脱胶是由于胶的膨胀系数比光学玻璃大,环境温度突变时,两者的伸缩率不同,使得胶层破裂,局部脱落。

从寿命周期过程来看,航空装备及其设备、元器件的故障机理主要包括:设计缺陷、生产工艺缺陷、使用和维修不当以及环境影响等。需要强调两方面:一是装备或设备、零部件的故障机理有时并不表现为单一性,一种故障机理有时会诱发另外的故障机理,从而产生复杂的交互作用,此时就不能用单一的故障机理来分析装备故障,如由于其他部分蒸发出来的物质、磨损的粉末或者发热、振动导致的二次故障就属于这种情况;二是应加强软件故障分析,前面更多地介绍了硬件的故障模式,而随着航空装备信息化程度的提高,大量编程软件的元器件、集成电路、控制系统的使用,软件故障呈上升的趋势。软件故障一是由于软件本身存在各种缺陷;二是病毒的侵蚀;三是使用和维修环境的恶劣如电磁辐射、电压波动、振动、高温、潮湿等。

2.故障模式及危害性分析

故障机理给出了故障模式的微观分析,但在航空维修实践中,由于航空装备功能结构的复杂性,如何有效地对故障模式进行系统分析,是故障分析的另一个重要问题。故障模式、影响及危害性分析(FMECA, Failure Mode, Effect and Criticality Analysis)提供了一种方法。FMECA是故障分析的一种有效方法,可以深入地分析航空装备及其分系统、部件等所有可能的故障模式、故障原因及后果,便于发现薄弱环节,增强维修的针对性。

● 基本概念

(1) 故障模式。故障的表现形式,它是一般能观察得到的故障现象,如断裂、接触不良、泵漏油、仪表的参数漂移、电子元器件短路等。航空装备在使用过程中,故障模式是最基本的故障数据,由此分析故障产生的原因,寻找薄弱环节,改进装备可靠性;在研制阶段,故障模式分析是FMECA的基础,因此有必要弄清装备寿命周期过程中的全部故障

模式。典型的故障模式有：工作中断、工作时续时断、工作性能下降、提前或滞后接通等。表 4-4 列出了常见的故障模式。

表 4-4 常见的故障模式

序号	故障模式	序号	故障模式	序号	故障模式	序号	故障模式
1	结构故障(破损)	9	内漏	17	流动不畅	25	输入过小
2	物理性质的卡死	10	外漏	18	错误动作	26	输出过大
3	颤振	11	超出允许上限	19	不能开机	27	输出过小
4	不能保持正常位置	12	超出允许下限	20	不能关机	28	无输入
5	不能开	13	意外运行	21	不能切换	29	无输出
6	不能关	14	间断性工作不稳定	22	提前运行	30	电短路
7	错误开机	15	漂移工作不稳定	23	滞后运行	31	电开路
8	错误关机	16	错误指示	24	输入过大	32	电泄漏

(2) 故障影响。故障模式对产品使用、功能或状态所导致的结果。对产品故障后所造成的影响应考虑：引起工作能力下降或功能的丧失；引起昂贵的维修费用；与安全有关；某一故障模式高频率地发生。分析时将其分为局部的、高一层次的和最终影响三级。对飞机上的机载设备而言，三级是指设备级、系统级和飞机整机。一般来讲，对安全造成影响的是那些没有冗余或替代工作的模式，如有冗余或替代工作模式，则需考虑多重故障造成的影响，如应急装置同时故障造成的严重后果。对每一级的影响根据不同程度分成不同级别。对航空装备而言，具体可分为：

自身影响(装备本身)，分为三级：Ⅰ级，产品功能丧失；Ⅱ级，产品功能下降；Ⅲ级，产品有故障征候。

对上一级影响(系统)，分为四级：Ⅰ级，系统完全丧失功能；Ⅱ级，系统功能下降；Ⅲ级，有故障征候；Ⅳ级，无影响。

最终影响(飞机)，可分为严重等级事故、等级事故、影响任务完成、停飞、计划外维修、无影响等几种情况。

(3) 危害度。危害度是指某种故障模式所产生后果的严重程度。可分为四类：Ⅰ类(灾难性)造成人员伤亡、飞行器、船舶、车辆被毁；Ⅱ类(严重)，造成人员严重伤亡、重大经济损失或导致任务失败的系统严重损坏的故障；Ⅲ类(临界)，造成人员轻伤、一定经济损失或系统性能下降；Ⅳ类(轻度)，不足以导致人员伤害、一定的经济损失或系统损坏的故障，但导致计划外维修。

基本分析过程

故障模式、影响及危害性分析的基本过程如下：

(1) 定义系统。通过对所分析对象的深入了解，明确系统的组成、任务(功能)，描述系统的运行或工作程序及方式，规定系统的使用环境条件，明确系统故障定义和判据，绘制系统的功能框图和可靠性框图。

(2) 填写故障模式影响分析表格。表 4-5 是一种典型的故障模式影响分析表格，

在实际应用时可适当剪裁。表中各栏填写如下：

表 4-5 故障模式影响分析表

初始约定层次 任 务 审 核 第 页 共 页
约定层次 分析人员 批准 填表日期

代码	装备或功能标志	功能	故障模式	故障原因	任务阶段与工作方式	故障影响			故障检测方法	补偿措施	危害度类别	备注
						局部影响	上一层次影响	最终影响				

代码：被分析装备代码；

装备或功能标志：被分析装备功能的名称；

功能：简要填写装备所需完成的功能；

故障模式：确定并说明装备约定层次中所有可预测的故障模式，根据系统定义中的功能描述及故障判据的规定要求，假设出各装备的故障模式；

故障原因：说明各故障模式对应的各种原因，如设计缺陷、元器件选用不当等；

任务阶段与工作方式：简要说明发生故障的任务阶段与工作方式；

故障影响：指各假设的故障模式对装备使用、功能或状态所导致的后果，应评价每个故障模式对局部、上一层次和最终的影响；

故障检测方法：记录维修人员的检测方法，如目视检查、仪器检测或自动报警等；

补偿措施：评价消除或减轻故障影响的补偿措施，包括设计补偿措施和维修应急措施；

危害度类别：根据故障模式的最终影响确定每个故障模式及装备的危害度类别。

备注：记录有关的注释与说明。

(3) 填写故障模式、影响及危害性分析表格。见表 4-6，前面各栏与故障模式、影响分析表格相同，其余各栏填写如下：

表 4-6 故障模式、影响及危害性分析表

初始约定层次 任 务 审 核 第 页 共 页
约定层次 分析人员 批准 填表日期

代码	装备或功能标志	功能	故障模式	故障原因	任务阶段与工作方式	危害度类别	故障概率或故障率数据源	故障率 λ_p	故障模式频数比 α_j	故障影响概率 β_j	工作时间 t	故障影响危害度 C_{mj}	装备危害度 C_r	备注

(4) 危害性分析。危害性分析可分为定性和定量分析。若装备故障率数据或技术状态数据不足，应选择定性分析，按照故障模式发生的概率等级来评价相应的故障模式，并据此绘制出危害性矩阵，见图 4-23。若数据充足，则应采用定量分析。定量分析可根据式

$$C_r = \sum_{j=1}^n C_{mj} = \sum_{j=1}^n \lambda_p \alpha_j \beta_j t$$

来计算装备故障的危害性 C_r 。

危害性矩阵横坐标为危害度类别,纵坐标为装备故障模式的发生概率等级,同时还可列出危害度 C_r 。利用危害性矩阵,可将装备每个故障模式发生概率等级对应其危害度类别标在相应位置,即可表示装备各故障模式的危害性分布。若某故障模式的分布点在矩阵对角线上离分布点投影越远,该模式的危害性越大,越需尽快采取措施。利用危害性矩阵,可用来确定和比较装备每一故障模式的危害程度,进而为确定和改进维修措施提供依据。

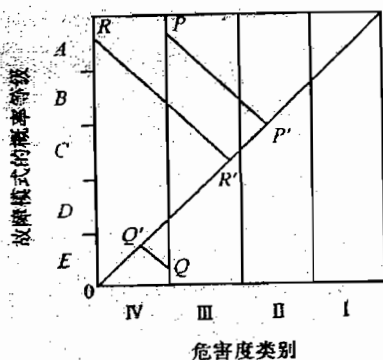


图 4-23 危害性矩阵

■ FMECA 在航空维修中的应用

FMECA 作为故障分析的一种有效方法,主要用于设计和研制阶段,随着应用的深入和扩展,该方法已逐渐延伸到使用和保障阶段。可以充分利用在航空装备使用过程中故障数据的积累进行 FMECA,找出危害性较大和故障概率等级较高的故障模式,制定出有针对性的维修措施,增强维修的有效性。

下面以某型机载雷达收发机磁控管为例进行 FMECA。限于篇幅,只给出其故障模式影响分析表(见表 4-7)和危害性矩阵(见图 4-23)。

表 4-7 给出了磁控管的四个故障模式:振荡不稳、打火、振荡弱和不振荡。为方便起见,仅对振荡不稳(模式 P)、打火(模式 Q)、振荡弱(模式 R)三种模式绘制了危害性矩阵(见图 4-23)。振荡不稳的发生概率为 0.25,概率等级为 A 级,危害度为 III 类;漏气打火的发生概率为 0.015,概率等级为 E 级,危害度为 III 类;因阴极耗损而导致振荡弱的概率为 0.3,等级为 A 级,但其危害度仅为 IV 类。由图 10-3 可看出,模式 P 的投影长度 OP' 最长,即振荡不稳的危害性最大,因此,老炼磁控管是预防磁控管振荡不稳的有效措施。

表 4-7 某型机载雷达磁控管 FMECA 表

代码	装备名称	功能	故障模式	故障原因	故障概率及等级	危害度类别	故障影响		故障危害		措施
							分机	全机	人员	物品	
V ₁	磁控管	产生大功率微波振荡	振荡不稳	腔体残余气体	0.25/A	III	大	大		危险	老炼
			打火	腔体漏气	0.015/E	III	严重	严重		危险	换管
				灯丝引线碰地	0.1/B	III	大	大		危险	预防检查
				灯丝滤波电容击穿	0.05/E	III	大	大			预防检查
				输出装置接触不良	0.165/C	III	大	大		危险	维修
			振荡弱	阴极耗损	0.30/A	IV	大	大			换管
				磁铁 H 降低	0.02/C	III	较大	较大			充磁
			不振荡	灯丝开路	0.05/C	III	严重	严重		危险	预防检查
				灯丝滤波电容开路	0.05/C	III	严重	严重			预防检查

注:故障概率以磁控管总故障数为 1 来计算

4.4 飞机故障诊断的程序与分析方法

航空装备系统结构的复杂性,使用要求的特殊性,对故障分析提出了更高的要求。因此,必须从系统的角度,按照一定的程序,运用科学的方法和先进的技术工具,及时、准确地发现和定位故障,更好地满足航空装备的作战使用需求。

4.4.1 故障诊断的程序

树立程序观念是科学维修的一个显著标志,建立科学合理的故障分析程序,可以准确、高效地发现故障,确定故障,及时恢复装备完好。程序的制定是运用系统理论和已有的知识、经验,采用从现象到本质、逻辑思维分析方法和理论与实践相结合的原则,把原因和行为目标采用流程图或故障树的形式排列出来。根据维修实践经验,通过归纳总结,故障分析的一般性程序可分为五个基本过程:摸清情况,分析原因,确定部位,排除故障,测试验证。

1. 摸清情况

(1) 记录和掌握原始状态情况,通过对设备履历本、工作记录和发生故障前状态的了解,为故障分析判断提供重要依据。

(2) 分析故障现象,如机件形状、颜色、温度、声音、参数等方面所表现的不正常现象。

(3) 分析产生故障的条件,包括故障发生前的征兆、做过的工作、故障件的履历,以及产生故障时的气候特点、有关仪表的信号指示、飞机的飞行状态和飞行员的操纵情况等。

(4) 向飞行员了解飞机使用情况及在飞行中出现的不正常现象,产生故障时的飞行高度、速度、飞行状态、仪表指示,以及飞行员的感觉等。

(5) 检查飞机上与故障有关的附件的状况,检查时,先观察附件外部有无损伤,然后通过试车、通电、通压,进一步检查附件的工作情况。

2. 分析原因

根据故障现象和有关情况,结合相关系统和故障件的构造特点、工作原理、材料性质等进行分析,列出所有可能引起故障的内部和外部原因,按其顺序汇编成故障排除流程图或故障树的形式,加以对比、分析和判断。

3. 确定部位

确定进一步查找故障具体部位的检查顺序,按已汇编的故障排除流程图,取其可能性大的部位作进一步的检查,以逐步缩小分析、判断的范围,以便查明故障的具体部位:

(1) 确定检查顺序。依照由易到难,由简到繁,先分析导致故障的最大可能性因素。

(2) 故障隔离。通过检查、测试或试验,逐步排除与故障无关的或只起间接作用的因素,从而确定故障的原因,最后判定引起故障的机件或零件,找出故障部位。

4. 排除故障

采用洗涤、润滑、调整、校正、修理和换件等方法,使系统的功能、性能参数恢复到规定

状态。随着航空装备和维修技术的发展,机载设备的维修性、通用化和模块化程度的提高,快速简便的故障诊断仪器的应用,外场维修中排除故障的方法将向以换件为主的方向发展。

5. 测试验证

故障排除后,要做全面检查、验证,确保故障完全排除。在排除故障的同时,还要根据故障原因采取必要的预防措施,以避免故障重复发生。

4.4.2 故障分析的方法

1. 外推法

外推法,是进行系统故障评估和分析的一种十分有效的定性与定量相结合的方法,它可分为前推、后推和旁推三种类型。前推就是根据历史的经验和数据推断出未来事件发生的概率及其后果。如果历史数据具有明显的周期性,就可据此直接对故障作出周期性的评估和分析,如果从历史记录中看不出明显的周期性,就可用一曲线或分布函数来拟合这些数据再进行外推,此外还应注意历史数据的不完整性和主观性。后推是在没有历史数据可供使用时所采用的一种方法,由于航空装备故障具有较强的不确定性和不可重复性,所以在系统故障评估和分析时常采用后推法。后推是把未知的可能发生的故障事件及其后果与一已知故障事件及其后果相联系,把未来故障事件归结到有数据可查的造成这一故障事件的初始事件上,从而对故障事件作出分析评估。旁推就是利用类似故障事件的信息数据进行外推,用某一故障事件的历史记录对新的类似设备在使用过程中可能发生的故障事件的危险性进行评估和分析,当然这还得充分考虑新环境的各种变化。这三种外推法在航空装备故障原因的查找和分析评估中已得到广泛采用。

2. 故障树分析

FMEA 作为一种单因素分析方法,它是针对单个故障进行分析,且在反映环境条件对装备故障的影响方面也具有一定的局限性,而故障树分析法可以克服这些不足。故障树分析法(FTA, Fault Tree Analysis)是 1961 年—1962 年期间,美国贝尔电话实验室的 Watson 和 Mearns 等人在分析和预测民兵式导弹发射控制系统安全性时首先提出并采用的故障分析方法,并逐渐推广到航空、航天、核能、电子、化工等行业,以及经济管理和军事行动决策等领域。目前国际上公认故障树分析是可靠性分析和故障诊断的一种简单、有效的方法。

故障树分析法开始是应用在装备设计过程中,是分析系统故障和原因之间关系的因果逻辑模型,是一种演绎的分析方法,它在故障分析中的应用主要是遵循从结果找原因的原则,其基本途径首先是从某一不希望出现的事件(顶事件)开始,然后列出其原因的子系统或系统组成单元,并用逻辑门把这些原因和顶事件联结起来,从而构成了故障树图,即在前期预测和识别各种潜在故障诱因的基础上,运用逻辑推理的方法,沿着故障产生的路径,确定故障发生的概率,并提供各种控制故障因素的备选方案和对策措施。这种步骤在每一原因和原因的原因之间重复进行,如此类推,直到所有事件都得到充分展开为止。

故障树分析法不仅能分析硬件的故障影响,而且可以分析软件、环境、人为因素的影响;不仅能反映单元故障对装备的影响,而且能反映故障组合对装备的影响,并能把这种影响的中间过程用故障树清晰地表示出来,从而确定出装备故障原因的各种可能组合方式及其发生概率,计算出装备故障概率,以便采取相应的措施。同时,故障树分析有固定的分析流程,可以用计算机来辅助建树和分析,可大大提高管理效率。

第五章 飞机软件维护

5.1 软件维护的概念

5.1.1 软件故障

软件是指计算机程序及其有关的文档。

软件故障(failure)是指软件中的缺陷(fault)使软件丧失在规定的限度内执行所要求功能的能力。

1. 软件故障的形成

软件故障来自两个方面,一是软件本身在开发中的差错所引起的,属软件内部故障;二是软件载体(存储器、运算器、线路等)的偶然故障引起的,属外界因素。这里主要分析软件本身的问题。

软件出错的基本原因是软件产品存在缺陷。在一定的条件下,计算路径经过某个存在的缺陷,激活该缺陷,导致错误。因此,要解决软件故障问题最根本的一条途径就是要保证软件产品没有缺陷。

软件产品缺陷主要是在软件开发过程中造成的,不可能保证绝对没有缺陷,除非它特别简单。因为一般中等复杂的软件产品存在非常多的运行状态(计算路径),而软件开发过程中可视性又差,开发过程中不可能保证将每种状态都检查到。实际上只能做到尽可能使软件少含缺陷。要达到这个目的,需要在软件开发的各个阶段(见表 1)减少差错。

表 1 软件内部故障的形成

基本活动	故障表现	产生原因	差错性质
用户需要说明	不符合实际需要	对系统的认识不清楚 用户需求表述不准确	需求差错
软件需求分析	不符合用户需要	对用户需要理解有误 需求分析不够或有误 规格说明表达不准确	需求规格 说明差错
软件设计	不符合用户需要 不符合需求规格说明 容错能力不够	对用户需要和软件需求规格说明理解不够 对编码有关技术和约束认识不够 设计不当 设计说明有误	设计差错
编码	不满足设计要求	对设计说明理解不够 所用技术不当 偶然失误	编码差错
软件测试	不满足要求,残留差错太多	测试设计有误 测试资源不够 测试管理欠缺	测试差错

2. 软件故障的模式

软件故障是由于设计过程中引入的缺陷在运行时被激发而引起的。其失效模式有多种分类方法。其中一类是按运行时失效、

运行时间不符合要求和输出结果不符合要求三种情况,将软件失效模式分为:程序无法启动运行、程序运行中非正常中断、程序运行陷入死循环、程序运行对其他单元或环境产生了有害影响,程序运行时轻微超时,程序运行时明显超时,程序运行时严重超时,输出数据精度轻微超差、输出数据精度中度超差、输出数据精度严重超差、输出结果错误、输出格式不符合要求、打印字符不符合要求等。

3. 软件故障与硬件故障的差别

软件故障与硬件故障的主要差别可归纳如表 2 所列。

表 2 软件故障与硬件故障的有关差别

序号	硬件故障	软件故障
1	故障是由于物理、化学等原因引起的。硬件产品是物理实体,有散差,会自然老化,且存在使用耗损	故障主要是开发软件时缺陷引起的,也可能与载体有关。软件产品是逻辑思维的表示,无散差,不会自动变
2	硬件产品研制和生产过程可视性较好,便于控制	软件产品设计和生产过程可视性差,难控制
3	产品故障不只是设计故障,生产过程、使用过程和物料变化均能造成内部故障	产品故障均为开发过程中的“设计故障”,复制过程不会直接地而只能通过载体造成内部故障
4	若硬件产品的零部件及其接合部均无故障,且各组成部分之间是协调配合的,则产品无故障;若有故障,就会在运行中暴露	程序是指令序列,即使每条指令本身都是正确的,但由于程序运行状态一般很多,不能保证指令的动态组合完全正确,故通常存在故障,而且只有在一定的系统状态和输入条件下故障才暴露出来
5	硬件产品行为可用连续函数描述,故障的形成有物理原因,有耗损现象,故障有前兆,故障与使用时间有关系(分增加、不变和减少三种情况)	软件产品行为变化的数学模型是离散的,故障的形成无物理原因,无耗损现象,故障无前兆,故障与使用时间无关系,但与程序、测试、改正时间有关系

(续)

序号	硬件故障	软件故障
6	开发、生产、使用、备料和管理过程都会产生故障,均需加强控制	一般应主要在开发过程中采取技术和管理措施来减少故障
7	同一品种规格的不同零部件的适当冗余可提高可靠性	容错设计中冗余部件不能相同,必须保证其设计相异性,否则,将严重影响效果
8	使用过程中出现故障后,产品维修通常是修复失效的零部件状态,可靠性只能尽量保持,但不能提高	使用过程中出现故障后软件维护通常要修改软件,产生新版本;只要维护过程合理,可以提高可靠性
9	维修性设计适当时,维修某零部件一般不会波及它处	维护时修改一处常会影响它处,必须考虑这种波及面,保证修改结果完全正确

5.1.2 软件维护

1. 软件维护的概念

软件维护 (Software Maintenance) 是指软件产品交付使用之后,为纠正错误、改进性能或其他属性,使软件产品适应改变了的环境而进行的修改活动。

软件投入使用过程中,由于许多内在的和外在的原因,必须对软件进行维护。已经交付使用的软件不可避免仍然存在故障,需要维护排除,尤其是危及安全的关键软件中的故障,不及时排除,会产生灾难性的后果。例如,20 世纪 60 年代中期,美国首次金星探测计划因在用 FORTRAN 语言编写的程序中某条 DO 语句漏掉了一个逗号而惨遭失败,造成探测飞船丢失的后果。1996 年 6 月 4 日,阿里安 5 型运载火箭在首次发射时,由于软件质量问题,在火箭升空约 40s 时,在大约 4000m 的高空,火箭开始偏离飞行

轨道,随后发生爆炸。1999 年 4 月 30 日美国用大力神 4B 火箭发射军用通信卫星,因软件问题导致通信卫星未进入预定的地球同步轨道。

此外,使用中用户将会提出各种改进要求,需要通过软件维护提升来满足用户的需求,实现软件功能的扩充和性能的改善。又由于使用环境的变化,软件会不相适应,也需要通过维护使其适应使用环境。同时,还需要为用户提供技术咨询,提供软件问题报告和软件修改报告,建立维护档案等。

硬件故障时,其维修过程是通过检测、诊断,隔离到故障部件,然后拆卸更换,再检查(见图 1)。软件故障时,使用者(如软件

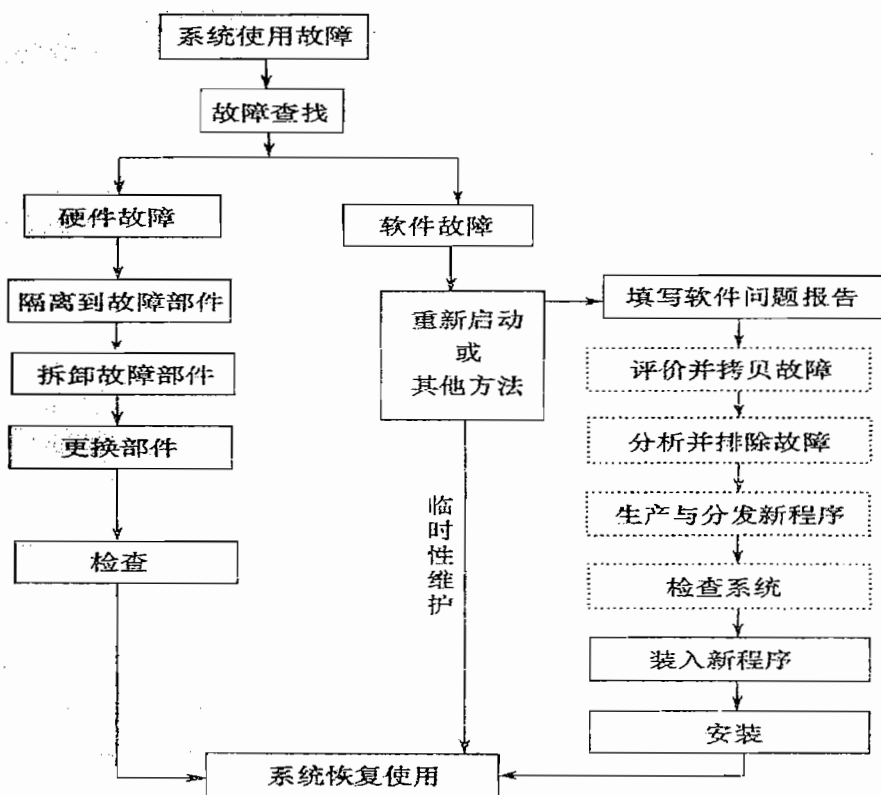


图 1 硬、软件故障的不同修复过程示意图

维护的外场分队)会先尝试重新启动系统,或采用某些其他的替代方法,做临时性维护;而正式维护是依据用户填写的软件问题报告,通过专用检测的工具、设备拷贝复制(再现)软件故障,经过评价,分析确定是软件故障后,必须重新设计软件以排除故障,然后生产、拷贝和分发,经过如图 1 所示的过程才能使系统恢复使用。

2. 软件维护的内容

软件维护主要是根据环境变化、条令、战术、互操作性要求的变更而进行的一系列活动。如:对软件进行维护和提高系统效能;改正隐藏的错误;适应整个系统状态的变更;等等。软件维护内容

主要包括程序的维护、数据文件的维护、代码的维护及因硬件变化而带来的软件变化。

(1) 程序的维护。系统的业务处理是以计算机为主的,并且处理的业务量、数据及业务量的变化会引起程序的变化。一般来说,系统的主要维护工作量,就是对程序的修改。

(2) 数据文件的维护。系统对数据的需求是不断变化的,要经常对文件或数据库进行修改,增加或减少数据库的新内容和建立新文件。

(3) 代码的维护。随着系统的变化,旧的代码不能适应于新的要求,必须进行修改。代码的变更包括制定新的或修改旧的代码系统。重要的问题是新代码的推广使用。

(4) 因硬件变化而带来的软件变化。在一段时间内,硬件需要更新,或是用另外的部件代换有故障的部件等,随着硬件的变化,其编程的软件也要相应地调整或修改。

3. 软件维护的分类

通常按软件维护预期的目的不同,将软件维护分为下列四种类型。

(1) 改正性维护(Corrective Maintenance)。为了改正软件系统中的“错误”,使软件能够满足预期的正常运行状态的要求而进行的维护。通常把诊断和改正错误的过程称为改正性维护,或称纠正性维护。其主要内容包括设计错误、程序错误、数据错误、文档错误。

(2) 适应性维护(Adaptive Maintenance)。为使软件产品在改变了的环境下仍能使用而进行的维护。例如,软件运行的操作系统发生变化、软件驱动的外围设备增加或者发生变更。

(3) 完善性维护(Perfective Maintenance)。为了增加软件的功能或满足用户提出的新要求,对主要软件系统的功能和质量做进一步的修改和补充而进行的维护。这项维护活动通常占软件维护工作的大部分。

(4) 预防性维护(Preventive Maintenance)。为了改进软件效

率、可靠性和可维护性而进行的维护。这项维护活动相对较少。

从上述关于软件维护的定义不难看出,软件维护绝不仅限于纠正使用中发现的错误。事实上在全部维护活动中一半以上是完善性维护。

4. 软件维护方案

软件维护方案是对软件维护工作的总体初步构想。主要包括:维护方案描述;系统保障等级描述;保障周期描述(从交付到交付后);维护工作剪裁说明。规定了软件维护的程度、交付后工作剪裁、提供维修人员或部门的设想、寿命周期费用的估算等。软件维护方案应在软件开发的早期制订。

① 软件维护程度也称软件维护范围。主要规定维护机构将为用户提供多少维护。按其范围一般可分四级:一级指完全维护。即为软件维护提供全面维护工作,包括改正性维护、适应性维护、完善性维护、培训、提供帮助、全部文档、交付保障等。二级指改正性维护。除不提供适应性维护、完善性维护外,与一级维护范围相同。三级指有限改正性维护。只提供必要的改正性维护。四级指有限软件配置管理。

② 软件交付后维护工作剪裁。主要是在维护方案中说明在软件交付后,各维护机构所承担的职责,明确各维护机构活动的内容。通常不同的维修机构所承担的任务是不一样的。

③ 软件维护主体的设想。根据维护工作选择合适的维护机构或组织,维护主体的设想需要考虑软件维护机构的能力。一般应考虑长期费用、启动费用、地点、资格、历史情况、可用度、计划、领域知识等因素。

④ 寿命周期费用估算。寿命周期费用通常是限制维护范围的主要约束。根据维护范围、维护主体、工作内容等估计寿命周期费用。费用的估算影响到软件的维护程度。

5. 维护计划

在完成了软件维护方案的基础上,应着手确定维护计划。维

护计划是维护软件产品时,说明管理方法和技术途径的文档。装备软件维护计划是其计算机资源全寿命管理规划的一部分。软件维护计划主要解决以下问题:

- ① 为何提供软件维护;
- ② 由谁完成何种工作;
- ③ 各机构和人员的职责;
- ④ 估计所需维护人员配额;
- ⑤ 如何完成这些工作;
- ⑥ 资源保障;
- ⑦ 在何处完成维护;
- ⑧ 何时进行软件维护。

(1) 软件维护的艰巨性

软件是复杂的知识密集型的产品,它是一种逻辑思维的描述,是把概念、规程、算法、效率和质量等方面的问题融为一体的知识产物,与硬件产品相比,开发软件更具有高度脑力劳动的过程特征,且大多数是由手工生产的,要开发出差错少又能基本上检测、发现和改正软件故障是很费工时的。软件维护和软件开发则是同类性质的劳动,软件故障的产生、发现和改正是人的能力和管理水平的函数,软件维护也是很费工时的。软件维护工作量可用下列公式表示

$$M = P + K \cdot e^{(c-d)}$$

式中 M ——软件维护的总工作量;

P ——生产性工作量;

K ——经验常数;

C ——程序复杂程度(非结构化设计和缺少文档都会增加软件的复杂程度);

D ——维护人员对软件的熟悉程度。

上式表明,如果软件的开发途径不好(即没有使用软件工程方

法),而且原来的开发人员不能参加维护工作,那么维护工作量将按指数规律增加。

软件维护人员实施软件维护的技术水平与软件开发人员的要求是同样的,甚至要求还更高一些,以求准确的发现已经存在的缺陷和故障,都属于知识密集型劳动。所以,软件维护不仅费时,而且费钱。软件生产和使用的实际数据表明,软件维护费用和软件产品报废开支在软件的总开发中占很大比例。美国 1990 财年国防部计算机预算中,硬件费用 56 亿美元,软件费用 256 亿美元。软件寿命周期费用比例为:软件开发 30%,软件维护保障 70%,生成一行代码的平均费用约为 75 美元,而开发后期或软件交付后修改一行代码的平均费用约为 400 美元。软件故障和失效造成几十亿、几百亿的经济损失。在过去的几十年中,软件维护的费用稳步上升。1970 年用于维护已有软件的费用只占软件总预算的 35%~40%,1980 年上升为 40%~60%,1990 年上升为 70%~80%。目前国外许多软件开发组织把 60% 以上的人力用于维护已有的软件,而且随着软件数量增多和使用寿命延长,这个百分比还在持续上升。软件维护费用占据了生存期费用总额中最大的份额。

(2) 软件维护的重要性

随着计算机技术的飞速发展以及现代局部战争条件下信息化要求的不断提高,计算机资源在武器装备中应用越来越普遍,所占比重愈来愈大。近 20 年来,计算机软件已被广泛应用于各型武器装备系统和自动化指挥系统,对提高武器装备的作战能力和指挥能力起到了重要作用。特别是在以信息处理为主要任务的系统中,如指挥、控制、通信、计算机、情报、监视、侦察(C³ISR: Integrated Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance)系统,计算机软件已不再仅仅是系统的组成部分,实际上软件本身已自成系统,通过它把各个分系统综合成为一个整体,协调一致地完成或辅助完成各项作战任务。也就是说,人们已经逐步认同软件是武器装备系统的神经中枢,软件就是装备,软件也是形成战斗力的重要因素。但是,如果软件出

现故障而又未进行维护时,可能出现通信中断,控制失灵,情报失真,目标丢失,指挥瘫痪,其后果十分严重,所以,必须认真做好软件维护工作。

5.2 软件可维护性

5.2.1 软件可维护性的概念

软件可维护性亦称软件维修性,是指软件产品可以被理解、修改、测试和完善,以适应新的环境和条件的难易程度。与软件文档、源代码、实现等有关。软件的可维护性是一种与软件维护有关的属性,具体包括:

(1) 可分析性。软件为了诊断缺陷或故障原因或对需修正的部分进行定位所需努力的一种属性。

(2) 易修改性。软件为了修改、排除故障或适应环境变化所需努力程度的一种属性。

(3) 稳定性。由于修改带来不期望风险的一种属性。

(4) 测试性。为了验证修改完的软件符合要求所需努力程度的一种属性。

软件可维护性对软件而言是一个比硬件维修性更重要的属性。硬件维修性仅作为其可靠性的一个补充,在设计过程中,往往可能与可靠性、性能等属性相冲突。而软件可维护性则与其可靠性相一致。可以说,一个软件的可维护性好,则必定其可靠性好,保障性也好。因此,软件的可维护性是软件开发的各阶段应该不断追求和完善的目标。

5.2.2 影响软件可维护性的基本因素

软件生存周期每个阶段的工作都和软件可维护性有密切关系。软件开发在需求定义、设计、编码和测试中,有许多因素都影响着软件的可维护性。这些因素可分为与开发方法、文档和开发环境相关的因素。

1. 影响可维护性的开发方法

开发方法对可维护性的影响表现为良好的设计,完善的文档资料,以及一系列严格的复审和测试,使得一旦发现错误时比较容易诊断和纠正;当用户有新要求或者外部环境变化时软件能较容易地适应,并且能够减少维护引入的错误。因此,在软件生存周期的每个阶段都必须充分考虑维护问题,并且为软件维护工作做准备。

维护就是在软件交付使用后进行的修改,修改之前必须理解修改的对象,修改之后应该进行必要的测试,以保证所做的修改是正确的。如果是改正性维护,还必须预先进行调试以确定故障。因此,影响可维护性的因素主要有下述三个:

(1) 可理解性

软件可理解性表现为外来读者理解软件的结构、接口、功能和内部过程的难易程度。模块化、结构化设计、详细的设计文档、源代码内部的文档和良好的高级程序设计语言等等,都对改进软件的可理解性有重要贡献。

(2) 可测试性

诊断和测试的难易程度主要取决于软件容易理解的程度。良好的文档对诊断和测试是至关重要的。此外,软件结构、可用的测试工具和调试工具,以及以前设计的测试过程也都是非常重要的。维护人员应该能够得到在开发阶段用过的测试方案,以便进行回归测试。在设计阶段应该尽力把软件设计成容易测试和容易诊断的。

(3) 可修改性

软件容易修改的程度和软件的设计原理、规则直接有关。耦合度(模块之间的相互依赖程度)、内聚度(模块所执行的诸任务在功能上的相互关联程度)、局部化、控制域与作用域的关系等等,都影响软件的可修改性。

上述三个可维护因素是紧密相关的。维护人员在理解一个程序之前不可能修改它;如果不能进行完善的诊断和测试,则表面正确的修改可能引进其他故障。

2. 文档

文档是影响软件可维护性的决定因素。由于长期使用的大型软件系统在使用过程中必然会经受多次修改,所以文档比程序代码更重要。

软件系统的文档可以分为用户文档和系统文档两类。用户文档主要描述系统功能和使用方法,并不关心这些功能是怎样实现的;系统文档描述系统设计、实现和测试等各方面的内容。

总的说来,软件文档应该满足下述要求:

(1) 必须描述如何使用这个系统,没有这种描述即使是最简单的系统也无法使用;

(2) 必须描述怎样安装和管理这个系统;

(3) 必须描述系统需求和设计;

(4) 必须描述系统的实现和测试,以便使系统成为可维护的。

3. 影响可维护性的环境因素

环境因素反映了硬件和软件资源的性能、质量对可维护性的直接或间接影响。例如,在配置高级语言的计算机系统中,开发人员不得不采用汇编语言编程,从而降低了软件的可维护性。具体影响因素有:

- (1) 是否具有合格且训练有素的软件人员;
- (2) 是否采用可理解的系统结构;
- (3) 是否具有容易处理的系统;
- (4) 是否采用标准化的程序设计语言;
- (5) 是否采用标准化的结构文件;
- (6) 是否有标准化操作系统的支持;
- (7) 测试情况的有效性;
- (8) 内部的纠正工具;
- (9) 用于维护的计算机的有效手段。

5.2.3 软件可维护性的定量

可维护性是一个难以定量表示的技术指标。但是通过维护活动中一些可度量的属性的统计分析和研究,可以间接地对软件可维护性做出估计。Gilb 提出了与维护期间工作量有关的度量属性,它们是:

- (1) 问题识别时间;
- (2) 管理延迟时间;
- (3) 搜集维护工具时间;
- (4) 分析问题时间;
- (5) 规范说明修改时间;
- (6) 主动校正和修改时间;
- (7) 局部测试时间;
- (8) 整体测试时间;
- (9) 维护复审时间;
- (10) 总的恢复时间。

这些数据反映了维护全过程检错—纠错—验证的周期,可以粗略的认为这个周期越短,维护越容易,可维护性越好。

5.3 软件维护的实施

5.3.1 软件维护的基础

在软件工程化之前,软件的开发是由一个人或少数几个人采用所谓“三自一包”(自己设计、自己编程、自己测试、自己包维护)的“手工作坊”方式进行的。软件开发行为无规范,软件开发过程混乱,软件质量差,除程序代码外,无文档资料,所开发的软件除原开发者外,他人无法接替开发、维护、扩展,软件透明性差,软件维护难以摆脱特定厂商的控制和垄断,影响软件的使用,甚至陷入瘫痪。

解决问题的必由之路是以软件工程为基础,实施软件工程方法开发软件,使软件的生产工业化。所谓软件工程就是软件开发、运行、维护和引退的系统方法。软件工程方法开发软件称为软件工程化。软件工程化的本质是软件过程工程化,而软件过程

是指开发和维护软件及其相关产品(如设计文档、代码、用户手册等)的一系列活动,包括软件工程活动和软件管理活动。通过软件过程工程化将软件的生产过程分阶段并加以规范化。这个过程应该是可控制的、可重复的、可预测的。软件也要像硬件那样进行工业化生产,软件设计工程师出软件设计图纸(即系统需求分析、软件需求分析、软件结构设计、软件详细设计等),合格的软件编程人员按软件详细设计报告编程,软件检测人员检查软件的设计、编程是否符合要求(即软件集成与鉴定测试,系统集成与鉴定测试),做到设计、生产、检验“三足鼎立”,相互制约。从而增加软件的透明性,提高软件的质量。统计表明,随着软件开发过程的改进,软件产品生产质量提高了1~2个数量级。

软件维护和软件开发一样,要提高软件维护的质量,也必须以软件工程为基础,实施软件维护过程工业化,增加软件的透明性,以保证即使软件开发人员不再从事或中断工作后,他人也能够接替开发、维护和扩展。

5.3.2 软件维护的过程

软件维护过程包括三部分内容:理解现有软件;修改现有软件;评审和验收修改后的软件。

1. 维护报告

维护报告应该用标准化的格式表达所有软件维护要求。软件维护人员通常给用户提供一个空白的维护要求表——软件问题报告,这个表格由要求一项维护活动的用户填写。如果遇到了一个错误,那么必须完整描述导致出现错误的环境(包括输入数据,全部输出数据,以及其他有关信息)。对于适应性或完善性的维护要求,应该提出一个简短的需求说明书。由维护管理员和系统管理员评价用户提交的维护要求表。

维护要求表是由用户提供的文件,它是计划维护活动的基础。软件组织内部应该制定出一个软件修改报告,它给出下述信

息：

- (1) 满足维护要求表中提出的要求所需要的工作量；
- (2) 维护要求的性质；
- (3) 这项要求的优先次序；
- (4) 与修改有关的事后数据。

在拟定进一步的维护计划之前,把软件修改报告上送审查批准。

2. 维护的事件流

维护的事件流描绘了由一项维护要求而引起的一串事件(图2)。首先应该确定要求进行的维护类型。用户常常把一项要求看作是为了改正软件的错误(改正性维护),而开发人员可能把同一项要求看作适应性或完善性维护。当存在不同意见时必须协商解决。

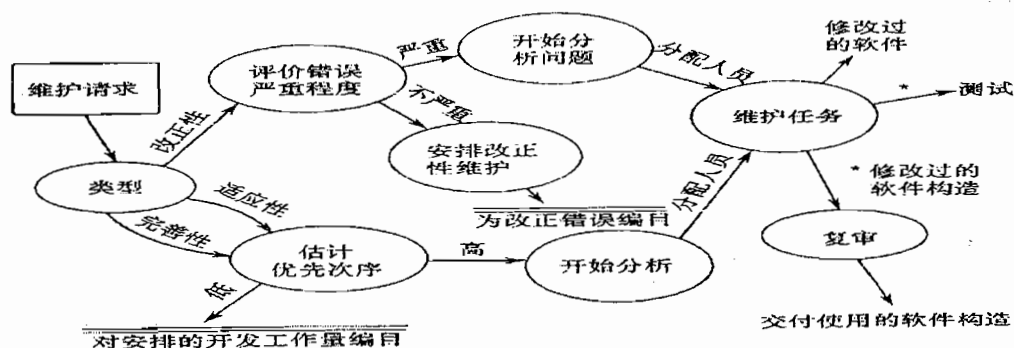


图 2 维护阶段的事件流

从图 2 描绘的事件流看到,对一项改正性维护要求的处理,从估量错误的严重程度开始。如果是一个严重的错误(例如,一个关键性的系统不能正常运行),则在系统管理员的指导下分派人员,并且立即开始问题分析过程。如果错误并不严重,那

么改正性的维护和其他要求软件开发资源的任务一起统筹安排。

适应性维护和完善性维护的要求沿着相同的事件流通路前进。应该确定每个维护要求的优先次序,并且安排要求的工作时间,就好像它是另一个开发任务一样(从其目标来看,它都属于开发工作)。如果一项维护要求的优先次序非常高,可能立即开始维护工作。

不管维护类型如何,都需要进行同样的技术工作。这些工作包括修改软件设计、复查、必要的代码修改、单元测试和集成测试(包括使用以前的测试方案的回归测试),验收测试和复审。不同类型的维护强调的重点不同,但是基本途径是相同的。维护事件流中最后一个事件是复审,它再次检验软件配置的所有成分的有效性,并且保证事实上满足了维护要求表中的要求。

当然,也有并不完全符合上述事件流的维护要求。当发生恶性的软件问题时,就出现所谓的紧急“救火”维护要求,这种情况需要立即把资源用来解决问题。如果对一个组织来说,“救火”是常见的过程,那么必须怀疑它的管理能力和技术能力。

在完成软件维护任务之后,进行环境复查常常是有好处的。一般说来,这种复查试图回答下述问题:

• 在当前环境下设计、编码或测试的哪些方面能用不同方法进行？

- 哪些维护资源是应该有而事实上却没有的？
- 对于这项维护工作什么是主要的(以及次要的)障碍？
- 要求的维护类型中有预防性维护吗？

环境复查对将来维护工作的进行有重要影响,而且所提供的反馈信息对有效地管理软件组织十分重要。

3. 保存维护记录

对于软件生存周期的所有阶段而言,前期记录保存常常都是不充分的,而软件维护则根本没有记录保存下来。由于这个原因,我们往往不能估价维护技术的有效性,不能确定一个产品程序的

“优良”程度,而且很难确定维护的实际代价是什么。

保存维护记录遇到的第一个问题就是,哪些数据是值得记录的? Swanson 提出了下述内容:

- (1) 程序标识;
- (2) 源语句数;
- (3) 机器指令条数;
- (4) 使用的程序设计语言;
- (5) 程序安装的日期;
- (6) 自从安装以来程序运行的次数;
- (7) 自从安装以来程序失效的次数;
- (8) 程序变动的层次和标识;
- (9) 因程序变动而增加的源语句数;
- (10) 因程序变动而删除的源语句数;
- (11) 每个改动耗费的人时数;
- (12) 程序改动的日期;
- (13) 软件工程师的名字;
- (14) 维护要求表的标识;
- (15) 维护类型;
- (16) 维护开始和完成的日期;
- (17) 累计用于维护的人时数;
- (18) 与完成的维护相联系的纯效益。

应该为每项维护工作都收集上述数据。可以利用这些数据构成一个维护数据库的基础,并对它们进行评价。

4. 维护评价

缺乏有效的数据就无法评价维护活动。如果已经开始保存维护记录了,则可以对维护工作做一些定量度量。至少可以从下述七个方面度量维护工作:

- (1) 每次程序运行平均失效的次数;
- (2) 用于每一类维护活动的总人时数;
- (3) 平均每个程序、每种语言、每种维护类型所做的程序变动

数;

- (4) 维护过程中增加或删除一个源语句平均花费的人时数;
- (5) 维护每种语言平均花费的人时数;
- (6) 一张维护要求表的平均周转时间;
- (7) 不同维护类型所占的百分比。

根据对维护工作定量度量的结果,可以做出关于开发技术、语言选择、维护工作量规划、资源分配及其他许多方面的决定,而且可以利用这样的数据去分析评价维护任务。

5. 软件维护过程的举例

1993年IEEE计算机学会的软件工程标准分委会颁布了IEEE1219《软件维护标准》,该标准的软件维护过程如图 3 所示。

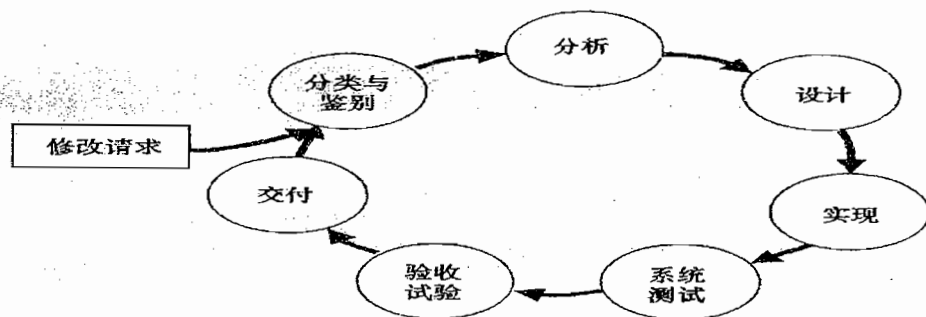


图 3 IEEE1219 的软件维护过程

(1) 修改请求

一般由用户、程序员或管理人员提出,是软件维护过程的开始。

(2) 分类与鉴别

根据软件修改请求,由维修机构来确认其维护的类别(改正性、适应性还是完善性维护),即对软件修改请求进行鉴别并分类,并对该软件修改请求给予一个编号,然后输入数据库。这是整个

维护阶段数据收集与审查的开始。

(3) 分析

先进行维护的可行性分析,在此基础上进行详细分析。可行性分析主要确定软件更改的影响、可行的解决方法及所需的费用。详细分析则主要是提出完整的更改需求说明、鉴别需要更改的要素(模块)、提出测试方案或策略、制订实施计划。最后由配置控制委员会审查并决定是否着手开始工作。

通常维护机构就能对更改请求的解决方案做出决策,仅仅需要通知配置控制委员会就可以了。但要注意的是维护机构应清楚哪些是可以进行维护的范围,哪些不是。配置控制委员会要确定的是维护项目的优先级别,在此之前维护人员不应开展维护更改工作。

(4) 设计

汇总全部信息开始着手更改,如开发过程的工程文档、分析阶段的结果、源代码、资料信息等。本阶段应更改设计的配置管理基线、更新测试计划、修订详细分析结果、核实维护需求。

(5) 实现

本阶段的工作是制订程序,更改计划,并进行软件更改。具体工作为:编码、单元测试、集成、风险分析、测试准备审查、更新文档。风险分析在本阶段的结束时进行。所有工作应该置于软件配置管理系统的控制之下。

(6) 系统测试

系统测试主要测试程序之间的接口,以确保加入了修改的软件满足原来的需求,回归测试则是确保不要引入新的错误。测试是十分重要的,但总是做不到那么好,软件测试一般有两种:手工测试和计算机测试。建立一个并行测试数据库对于软件维护成功具有十分重要的意义。

(7) 验收试验

这是全面综合测试,应由客户、用户或第三方进行。此阶段应报告测试结果、进行功能配置审核、建立软件新版本、准备软件文档的最终版本。

(8) 交付

此阶段是将新的系统交给用户安装并运行。供应商应进行实物配置审核、通知所有用户、进行文档版本备份、完成安装与训练。

实际上,软件维护从软件开发过程就开始存在,可以说是软件开发的一个有机的组成部分。

6. 软件维护的组织

软件维护组织是指进行软件维护时必须建立的机构,是软件

维护实施的主体。软件维护可由软件开发单位来实施,也可由独立的维护单位来保障。它的主要任务是审批维护申请,制定并实施维护计划,控制和管理维护过程,负责软件的维护复查,组织软件维护的评审和验收,保证软件维护任务的完成。在维护活动开展之前就明确维护责任是十分必要的,这样做可以大大减少维护过程中可能出现的混乱。对软件密集系统应建立自己独立的软件维护机构。如美陆军在通信电子司令部成立了负责软件维护的软件工程理事会(SED)、使用与维修部、RDIT(复制、分发、安装和训练)小组等组织。他们对软件维护及人员培训等方面开展了许多组织和研究工作。为了具体实施软件维修,还建立了“编程保障中心”,美空军也成立了软件保障中心。

5.3.3 软件维护的关键技术

从软件开发与维护的研究和实践看,有一系列的软件维护的关键技术有待解决。

软件与硬件故障隔离技术。软件的故障既可能是硬件故障引起的,也可能是软件故障引起的,而两者的故障排除方法完全不同。因此,区分(隔离、鉴别)软件、硬件故障引起的系统故障是维修的关键和先决条件。如何在使用现场快速、方便地隔离软、硬件故障,需要探索和研究。

软件故障隔离技术。软件故障隔离是修正软件缺陷的前提,其技术是又一关键技术和研究重点。要把软件故障一次隔离到故障的分系统、模块直至程序行或数据单元,需要研究分析的技术和工具。

软件故障修正方法。软件故障修正实际上是软件的局部重新设计。然而,局部重新设计不应造成系统或其他部分程序或数据的不协调,引起新的故障。所以,它不同于全新的软件系统设计。同时,软件故障修正的人力、物力和环境条件都有限制。这就要求探讨一些简便、实用的故障修正方法。

现场使用软件试验、检测(含检验)技术和手段(平台)。软件

在开发中的测试技术和方法、手段,已有相当多的研究成果,而对现场使用的软件同样需要进行试验、检验,而且要求快速进行。应当研制快速检测的技术和平台。

软件系统应急维护技术。硬件战伤修理技术已有较多研究和实践,但对软件系统来说却是一个新问题。事实上,因为软件在战场上的战伤源、威胁机理比单纯的硬件系统更复杂,而且软件系统往往要求有更快的反应能力和持续作战能力,所以,对软件系统应急维护更显得重要。应当着重研究软件的各种应急诊断和修复方法,以及装备损伤后可否采用软件硬件互相替代技术进行修复。

第六章 飞机维修质量管理

6.1 飞机维修全面质量管理

6.1.1 飞机维修质量

质量是反映实体满足明确和潜在需要的能力的总和。航空维修质量,是指通过维修使装备满足使用需求所达到的程度,既包括维修过程质量,又包括维修工作质量。维修过程质量,是指维修所达到的保持和恢复航空装备固有可靠性水平。其衡量标准是所维修的航空装备在规定的使用条件下固有功能的实现程度,这虽有多种表现形式,但集中反映在航空装备使用过程中是否发生故障。维修工作质量,是为了保证和提高维修过程质量所开展工作的优劣,如领导工作质量、检查工作质量、保养工作质量、修理工作质量、检验工作质量、信息反馈工作质量等,反映了所做工作对保证和提高维修的质量所起作用的性质和水平,其中最为重要的、起决定作用的是领导工作质量。

维修过程质量和维修工作质量既有区别,又密切相关。维修过程质量由维修工作质量来决定和保证,而维修工作质量又是由维修过程质量来检验和衡量的。航空维修全面质量管理主要就是通过管理维修工作质量来管理维修质量,控制维修工作质量来控制维修过程质量,提高维修工作质量来提高维修过程质量。

6.1.2 全面质量管理

为了保证质量,就需要对生产原材料、劳动工具、生产者的劳动技艺等提出相应的要求,从某种意义上来说,这就是质量管理。所谓质量管理,就是在质量方面指挥和控制组织的协调活动。然而,真正科学意义上的质量管理是从 20 世纪开始的。从 20 世纪初到现在,质量管理大致上经历了质量检验、统计质量控制、全面质量管理三个阶段。

全面质量管理(TQM, Total Quality Management)的诞生,是质量管理发展历史中最为光辉的里程碑,有些专家学者称全面质量管理为“质量系统工程”。随着全面质量管理理论在世界范围内的传播、应用和发展,其思想、原理和方法对于各国质量管理的理论研究

和实际应用的指导价值已得到充分证实,并逐步扩散到航空维修质量管理领域。

维修质量管理,就是为制定和达到装备及其维修质量标准所采取的管理技术、手段及其相应的管理过程。作为特殊产品的航空装备,其质量管理同样也伴随着生产力的发展和科技的进步,历经了从单纯的事后检验把关,到以预防为主的全面质量管理发展阶段。

航空维修全面质量管理是应用全面质量管理的理论、方法与手段对航空维修质量实施的管理过程与管理体制。按照美国著名质量管理专家菲根堡姆的定义,全面质量管理是一种新型的质量管理模式,它不是一种简单的管理方法,而是一种学说,是一整套管理思想、管理理念、技术手段和科学方法的综合体系,而不只是传统的检测技术或统计分析技术。

1. 航空维修全面质量管理的特点

根据全面质量管理的理论、方法和手段,航空维修全面质量管理具有以下特点:

(1) 全面的管理。广义的质量除了装备质量之外还包括工作质量,航空维修全面质量管理所指的质量是广义的质量,即不仅是指装备的维修质量,而且还包括赖以形成装备维修质量的工作质量。

(2) 全过程的管理。装备维修质量与装备质量具有直接关系,装备质量是装备寿命周期过程各种管理和技术活动的综合结果,是一个完整过程所形成的。所以,维修质量和质量一样是设计出来的,生产出来的,而不是靠事后检验得来的。根据这一规律和认识,航空维修全面质量管理要求从维修质量形成的全过程,对设计、生产制造一直到使用和维修保障等各环节来进行有效管理,做到防检结合,以防为主。

(3) 全员的管理。维修质量贯穿装备寿命周期全过程,是各种因素相互作用的结果,也是装备寿命周期过程中每一成员工作质量的综合结果。因此,航空维修全面质量管理需要群众性的参与,从管理人员到操作人员,从直接设计、生产人员到使用、维修保障人员,都有一定的维修质量管理职能;同时,航空维修全面质量管理也需要所有部门的共同努力,建立以质量管理为中心环节的保障体系,将各部门的工作有机组织起来,使人人必须保证维修质量,人人都在为增强维修质量管理恪尽职责。

(4) 综合性的管理。航空维修全面质量管理的综合性特点是指维修质量管理采用的方法是全面的,多样的,是一个由多种管理技术、方法和手段所组成的综合性的管理体系。航空维修全面质量管理有一套完整的质量保证体系包括质量管理职能、责任和信息反馈控制制度,质量标准和管理程序等。

2. 航空维修全面质量管理的运作

航空维修全面质量管理是一个持续的维修质量改进过程,这一过程也称为计划(Plan)、执行(Do)、检查(Check)、处理(Act)过程即 PDCA 循环。由于该循环是由美国的戴明提出,所以又称戴明循环。过程改进的出发点是更好地满足用户需求,所以首先必须从用户的角度来选择应予改进的问题或质量特性,并确定改进的目标和指标,然后依次进行规划、执行、检查和处理,一般可将其分为四个阶段、八个步骤,具体过程分析如下:

(1) 计划阶段。制定质量目标、活动计划和实施方案。维修质量问题可能来自上级指令、制造单位通报或本单位在使用维修中的发现。计划阶段又可分为下述四个步骤:

①找出质量问题。选定目标,采用直方图、帕累托图、控制图等工具,找出质量问题。

②分析质量问题原因。采用因果分析图、散布图等工具,分析产生质量问题的原因或影响因素。

③找出主要原因所在。从各种原因中,用帕累托图、散布图等工具找出影响质量的主要原因,分析原因的主次。

④制定计划措施。针对影响质量的主要原因,提出计划,制定措施,预计效果,并确定具体的执行者、时间、进度、地点、部门、完成方法和成本等,参见表 6-1“5W2H”方法。

以上步骤是规划阶段的工作程序,也是 PDCA 循环的前四个工作步骤。

表 6-1 “5W2H”方法

类型	5W2H	说 明	对 策
主题	做什么	要做的是什? 该项任务能取消吗	取消不必要的任务
目的	为什么做	为什么这项任务是必须的? 澄清目的	
位置	在何处做	在哪儿做这项工作? 必须在那儿做吗	
顺序	何时做	何时是做这项工作的最佳时间? 必须在那个时间做吗	改变顺序或组合
人员	谁来做	谁来做这项工作? 应该让别人做吗? 为何是我来做	
方法	怎么做	如何做这项工作? 这是最好的方法吗? 还有其它方法吗	简化任务
成本	花费多少	现在的花费是多少? 改进后将花费多少	选择一种改进方法

(2) 执行阶段。就是按预定计划和措施要求执行,以贯彻和实施计划目标和任务。这是 PDCA 循环的第五步骤。

(3) 检查阶段。就是对照执行结果和预定目标,检查计划执行的情况是否达到预期的效果,哪些措施有效,哪些措施效果不好,成功的经验是什么,失败的教训又是什么,原因是什么,所有这些问题都应在检查阶段调查清楚。这是 PDCA 循环的第六个步骤。

(4) 处理阶段。它包括两个步骤:①根据上阶段检查的结果,总结经验教训,把成功的经验肯定下来,制订或修改有关的标准或规范,以供今后遵循;②反馈问题,把尚未解决的问题反馈到下一个 PDCA 循环中去,再从第一个步骤开始循环。以上是 PDCA 循环的第七、八个步骤。

PDCA 循环是全面维修质量管理思想方法和科学程序,反映了维修质量管理的一般规律。从 PDCA 循环中人们认识到,维修质量管理是一个持续的不断发展的管理过程,维修质量管理按照 PDCA 循环周而复始不断循环,持续改进维修质量。

6.2 飞机维修的质量控制

6.2.1 飞机维修质量特征

在长期的生产实践和管理过程中,人们发现装备质量和自然界的事物一样,没有两个绝对相同的事物,它们总是或多或少地存在着差异,这就是质量变异的固有特性——波动性。维修质量也一样,同一型号不同装备的维修质量可能不尽相同,同一装备不同时期的维修质量也有差异,因此,维修质量的波动性是客观存在的,只有掌握了维修质量波动的客观规律,才能对维修质量实施有效的控制。维修质量波动性的原因可从来源和性质这两个不同的角度来分析。

1. 维修质量波动性的来源

引起维修质量波动性的原因通常概括为“5M1E”,即:材料(Material),材料成分、物理性能与化学性能等;装备(Machine),装备型号的差异、批次的不同、技术状态的差异等;方法(Methods),维护或保养不当或者使用维修人员操作不当等;操作者(Man),技术水平的差异、熟练程度、工作态度、身体条件以及心理素质等;测量(Measure),测量设备落后、检测方法错误、试验手段落后,不能保证质量性能指标的统一和稳定等;环境(Environment),温度、湿度、亮度、清洁条件,以及装备作战使用环境等。

2. 维修质量波动性的性质

根据以上六方面原因,按其性质可归纳为两类:偶然性原因和系统性原因。

(1) 偶然性原因。是指诸如维修工具的正常磨损,操作或维修人员细微的不稳定性等这样一些原因,它们的出现是由随机性因素造成的,不易识别和测度。由于随机因素是不可避免的,经常存在的,所以,也称偶然性原因为正常原因,是一种经常起作用的无规律的原因。

(2) 系统性原因。是指诸如工具严重磨损,装备不正确调整,操作或维修人员偏离操作或维修规程、标准等这样一些原因,它们容易被发现和控制,采取措施后容易消除。由于这些因素是由明显倾向性或一定规律的因素造成的,因此是可以避免的,也是不允许存在的,所以,也称系统性原因为异常原因,它是一种不经常起作用的有规律的原因。

正常原因所造成质量特性值的波动称为正常波动,并称这时的维修过程处于统计的控制状态,或处于控制状态;异常原因所造成质量特性值的波动称为异常波动,并称这时

的维修过程是处于非统计的控制状态,或处于非控制状态。维修过程处于控制状态时,维修数据具有统计规律性,一旦处于非控制状态,维修数据的统计规律性就受到破坏。因此,维修质量控制的重要任务之一就是要分析维修质量特性数据的规律性,从中发现异常数据并追查原因,消除异常因素,把重点从“事后把关”转移到“事前控制”上来,以消除或控制故障的发生。

6.2.2 维修质量过程控制及工具

1. 维修工作质量过程控制

鉴于航空装备的使用及其维修工作的特点,在随机的环境中,对于不可重复的故障,几乎不能收集到足够数据来有效地使用统计质量过程控制工具,在这种情况下,通过控制维修系统的输入来控制维修过程就显得十分必要。

航空维修工作可看作是将一系列输入经过系统过程变换为一系列输出的活动,其质量控制是通过有效的反馈机制来保证实施的。从图 6-1 可看出,维修系统的主要输入有:维修程序和标准、人员、材料和备件、装备/工具等要素。



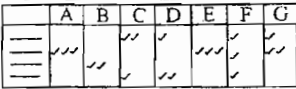
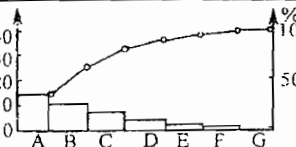
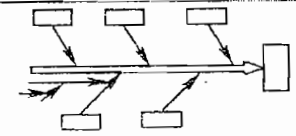
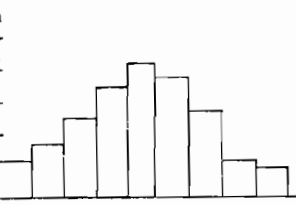
图 6-1 航空维修过程控制示意图

维修工作质量是维修机构管理工作和工作质量的总称,是维修质量的保证和基础,因此上述四个因素是影响维修工作质量的关键。同时,维修工作质量的关键因素就是对重要的、不可重复的工作建立工作质量标准。如果维修工作不符合标准,可运用因果分析图来调查这个不合格维修工作的根本原因。

2. 维修质量控制统计工具

统计质量控制源于 1924 年美国贝尔电话实验室,其首次在设备质量管理中应用数理统计图表,经过多年的实践和发展,应用概率论和数理统计的原理和方法来研究设备质量变化的客观规律,业已成为质量管理的一个重要内容,目前已发展了多种用于维修质量过程控制工具,常用的主要有趋势图、直方图、因果分析图、帕累托图、控制图、散布图等,见表 6-2。

表6-2 质量管理常用工具

质量管理工具			作用
1	调查表		系统地收集数据资料,以便得到清晰的真实情况
2	趋势图		按时间顺序标出特征值
3	帕累托图		寻找影响质量的主要因素
4	因果分析图		表示质量特性与影响质量有关因素之间的关系
5	直方图		分析、掌握质量数据的分布状况
6	控制图		分析、判断工序是否处于受控状态
7	散布图		研究、判断两个变量之间的相互关系

维修质量控制强调以事实数据说话,维修质量控制方法与分析工具运用的有效性也取决于维修数据资料的准确性、客观性和科学性。

维修质量控制的主要对象是部署使用的现役装备,由于现役装备使用和维修保障涉及面广,影响因素多,因而装备的使用和维修保障具有很强的不确定性,因此,为避免数据收集的重复,保障维修信息数据的质和量,保证维修质量控制的有效性,数据收集首先应进行数据需求分析,明确数据收集的内容、目的和标准,制订周密的数据收集计划;其次要采用正确、适合的数据收集方法和技术,确保维修数据的准确性、完整性、及时性和可用性。

A. 直方图

直方图是发生的频数与相对应的数据点关系的一种图形表示,是频数分布的图形表示。直方图有助于形象化地观察数据分布、形状以及离散。直方图的一个主要应用就是确认数据的分布,

常用于如装备维修时间分布、装备故障时间分布、装备停机时间分布等情形。因此,直方图可用于确认重要维修活动的分布,并可直观地观察和粗略估计出正常波动的统计规律或异常波动的特性。

应用直方图进行统计分析,首先将所收集的数据按大小顺序分成若干间隔相等的组;其次以组距为横轴,以各组数据频数为纵轴,将其按比例绘制成若干直方柱排列的图。下面举例说明直方图的具体运用过程。

例 6.1 某型液压泵 88 个故障时间(h):75,61,51,91,91,125,127,52,147,95,140,179,95,140,99,155,112,187,114,149,141,136,152,75,148,73,175,125,153,102,63,128,64,126,60,123,127,33,106,127,147,39,169,44,105,93,48,140,102,91,76,140,80,108,10,14,76,14,75,151,45,82,43,64,89,86,65,87,126,141,106,115,88,87,88,69,68,28,47,102,92,109,190,100,12,110,115,125。试绘制其直方图。

解:(1) 确定分组数

将 n 个数据分成 k 组:当 $n \leq 50$ 时,取 $k = 5 \sim 6$;当 $50 < n \leq 100$ 时,取 $k = 6 \sim 10$;当 $n > 100$ 时,取 $k = 10 \sim 20$ 。若 n 很大时,可根据斯特科(Sturges)经验公式来计算:

$$k = 1 + 3.3 \lg n \quad (6.1)$$

今 $n = 88$,因此取 $k = 9$ 。

(2) 确定组距

应用数据组的极差 R 和分组数 k 来确定组距 d :

$$R = \max_{1 \leq i \leq n} \{x_i\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x_i\} \quad (6.2)$$

$$d = R/k \quad (6.3)$$

今 $R = 190 - 10 = 180$,因此 $d = 180/9 = 20$;也可以采用不等距分组。

(3) 列表计算各组频数

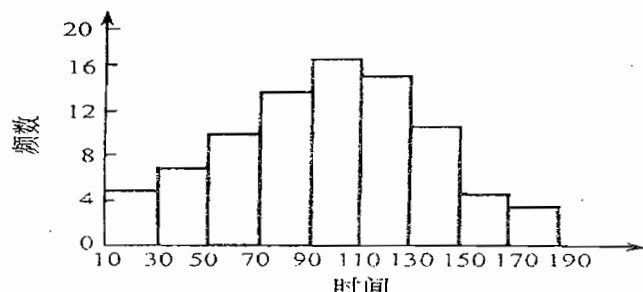
统计各组频数,如表 6.3。

表 6.3 某型液压泵故障时间频数统计

组序	组距	频数 f_i
1	10~30	5
2	30~50	7
3	50~70	10
4	70~90	14
5	90~110	17
6	110~130	15
7	130~150	11
8	150~170	5
9	170~190	4

(4) 绘制直方图

以纵坐标表示频数,横坐标表示各组组距(时间),各组频数为直方柱的高,即可得频数直方图,如图 6.1 所示。如果各个直方柱的高不是取频数 f_i ,而是频率 f_i/n ,便可得到频率直方图,频率直方图与频数直方图的形态完全相同。



析图、散布图等。

B. 因果分析图

因果分析图是表示质量特性与原因关系的图,它把对某项质量特性具有影响的各种主要因素加以归类 and 分解,并在图上用箭头表示其间关系,因而又称为特性要因图、树枝图、鱼刺图等。因果分析图中的后果指的是需要改进的质量特性以及这种后果的影响因素。因果分析图通常可用于装备故障、装备停机时间等原因的确认与分析。

1. 因果分析图的结构

因果分析图的结构由质量特性、要因和枝干三部分组成。质量特性是期望对其改善或进行控制的某些属性,如合格率、缺陷率、故障率、维修工时等;要因是对质量特性施加影响的主要因素,要因一般是导致质量异常的几个主要来源,如维修质量的要因可归纳为“4M1E”;枝干是因果分析图中的联系环节:把全部要因同质量特性联系起来的是主干,把个别要因同主干联系起来的是大枝,把逐层细分的因素(细分到可以采取具体措施的程度为止)同各个要因联系起来的是中枝、小枝和细枝,如图 6.2 所示。

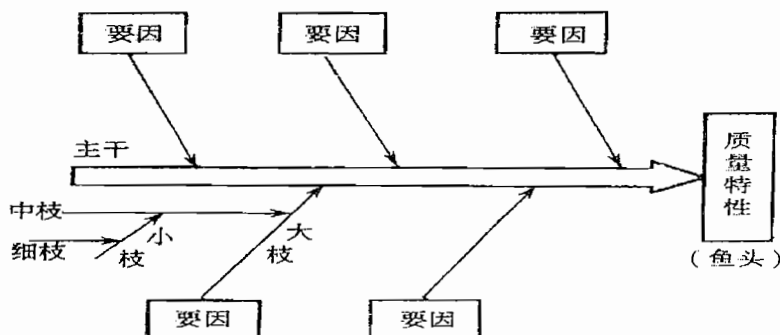


图 6.2 因果分析图的结构

2. 因果分析图的分析步骤

(1) 确定质量特性和需要分析的后果,这种后果通常是一种需要改进和控制的现象。将质量特性或需要分析的后果写在右侧方框内,从左至右画一长箭头指向质量特性。图 6.1 中的需要分析的后果为维修责任事故征候。

(2) 确定影响质量特性或后果的要因,并将其标绘在主干上,要因和主干线的夹角一般为 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$;

(3) 对大枝的要因进行细分,逐步画出中枝、小枝、细枝,大枝线和中枝线的夹角以及中枝线和小枝线的夹角仍为 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。检查确认的所有因素及其相互关系是否恰当,所分析各层次的关系必须是因果关系,要因应一直分析到能采取措施为止,如图 6.3 所示。

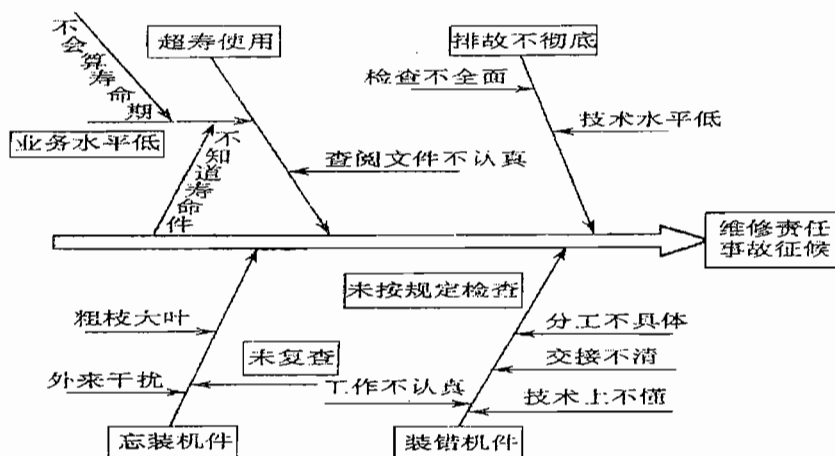


图 6.3 维修责任事故征候因果分析图

(4) 找出影响质量的关键因素,用方框把它们框起来作为制定质量改进措施的重点,如图 6.1 中的“业务水平低”、“未复查”、“未按规定检查”等。

从维修责任事故因果分析图可以看出,影响维修责任事故征候主要因素有“业务水平低”、“未复查”、“未按规定检查”等。现在的问题是,在这几种关键因素中,它们对消除维修责任事故征候的作用如何,哪一种因素是最关键的,因果分析图并未能给出一个肯定的答案。对此,一种常用的技术就是帕累托图,也被称作 ABC 分析。

C. 帕累托图

帕累托图,最早是由意大利经济学家帕累托(V. Pareto)提出来的,用以分析社会财富的分布状况,并发现少数人占有大量财富的现象,所谓“关键的少数与次要的多数”这一关系。后来美国的朱兰(J. M. Juran)将此法应用于质量控制,因为在质量问题中也存在“少数不良项目造成的不合格产品占据不合格品总数的大部分”这样一个规律。帕累托图是用于寻找关键因素的一种工具,在维修质量控制中,常用它确定影响故障、事故和维修中其他问题的

主要因素。帕累托图一般将影响因素分为三类：A类包含大约20%的因素，但它导致了75%~80%的问题，称之为主要因素或关键因素；B类包含了大约20%的因素，但它导致了15%~20%的问题，称之为次要因素；其余的因素为C类，称之为一般因素，这就是所谓的ABC分析法。利用帕累托图便于确定关键因素，利于抓住主要矛盾，有重点地采取针对性管理措施。

1. 帕累托图的结构

帕累托图的结构由两个纵坐标、一个横坐标、几个直方柱和一条折线组成，如图6.4所示，左纵坐标表示频数（件数、次数等），右纵坐标表示频率（用百分比表示）；横坐标表示影响质量的各种因素，按影响程度的大小从左到右依次排列；折线表示各因素大小的累计百分数，由左向右逐步上升，此线称为帕累托曲线。

2. 帕累托图的绘制

以具体实例来描述帕累托图的绘制过程。

例6.2 某飞行队为了找出影响维修责任事故征候的主要因素

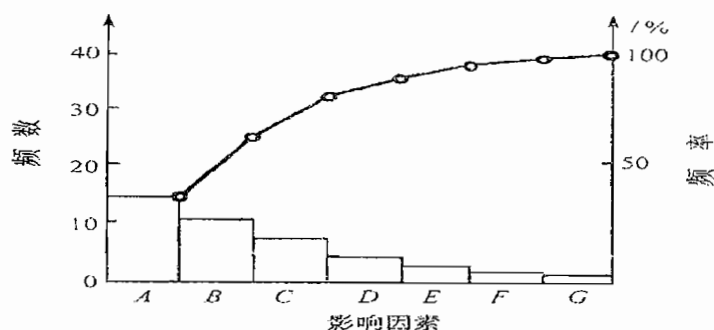


图6.4 帕累托图结构

案，对1973年到1982年的10年间，因维修责任所造成的89次事故征候，按四个方面原因进行了分类统计，其统计数据见表6.2，试绘制其帕累托图。

解：(1) 收集一定的维修质量数据，并将其分成不同的项目或类别（见表6.2）；

(2) 计算各类别的累计频数、频率与累计频率（见表6.4）；

表6.4 维修责任事故征候统计

原因	事故征候频数	频率/(%)	累计频率/(%)
错装机件	52	58.4	58.4
忘装机件	18	20.2	78.6
超寿使用机件	11	12.4	91.0
故障排除不彻底	8	9.0	100.0
总计	89	100.0	

3. 绘制帕累托图

(1) 按一定比例绘制两个纵坐标和一个横坐标：左纵坐标表示频数，右纵坐标表示频率；横坐标表示项目类别，各项目按其频率大小从左向右依次排列，并各占一定相同的宽度，如图6.5所示。

(2) 确定左纵坐标刻度，按频数大小顺序绘制累计频数图。

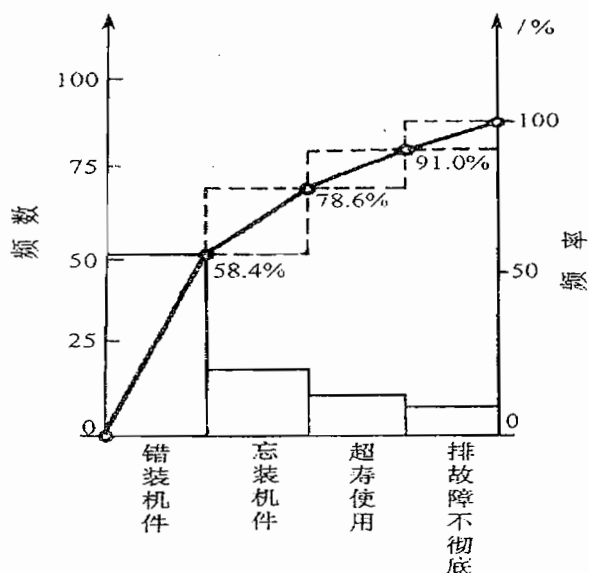


图 6.5 维修责任事故征候原因帕累托图

(3) 确定右纵坐标刻度, 绘制帕累托曲线: 各项目以横坐标线上所占的宽度为底, 以频率为高, 作一系列的直方柱, 最后用统计表上的累积频率在图上描点, 将各点连接起来即为帕累托曲线, 如图 6.5 所示。或者, 把各项目类别的直方柱上移, 移接在前一个直方柱的右顶点(图 6.5 虚线直方柱所示), 然后作第一直方柱和所有虚线直方柱的对角线(方向从左下角到右上角), 这些对角线的连线就是帕累托曲线。

具体的帕累托图结构如图 6.5 所示。

4. 帕累托图的应用

(1) 帕累托图指明了改善维修质量特性的重点。在维修质量控制中, 为了获取更好的维修效果, 应合理地确定所采取措施的对象。从帕累托图可以看出, 直方柱高的前两、三项对质量影响大, 对它们采取措施, 维修质量改善效果显著。

(2) 帕累托图可以反复应用。在解决维修质量问题的过程中, 帕累托图可以而且应该反复应用, 以使问题逐步深化。例如, 从帕累托图中发现维修事故征候的主要原因是错装和忘装机件, 但无法采取具体对策, 此时需要分析错装和忘装的原因, 然后再作错装和忘装的原因帕累托图(第二层次的帕累托图)。一旦采取对策措施后, 应重新收集数据再作帕累托图, 并将其与原来的帕累托图对比, 从而分析验证所采取措施的有效性。

D. 控制图

控制图在质量控制中是非常重要的,而且应用也非常广泛。在维修质量控制中,控制图可用于装备可用性、质量控制、故障次数、停机时间、备件储备等领域,是装备维修质量控制的核心工具。

1. 控制图的概念

控制图是一种应用科学方法对工作过程(如生产过程、维修过程)质量进行测定、记录从而进行管理控制的图形,用于区别质量特性值的波动是由于偶然原因还是系统原因所引起,从而判明工作过程是否处于控制状态的一种工具,是质量控制的一种核心工具。控制图在维修质量控制中的应用,有别于上述讨论的各种质量控制工具,是一种动态的,能够进行过程观察与动态监控的分析工具,如图 6.8 所示。

现以单值控制图(如图 6.8)为例,说明控制图的基本模式。

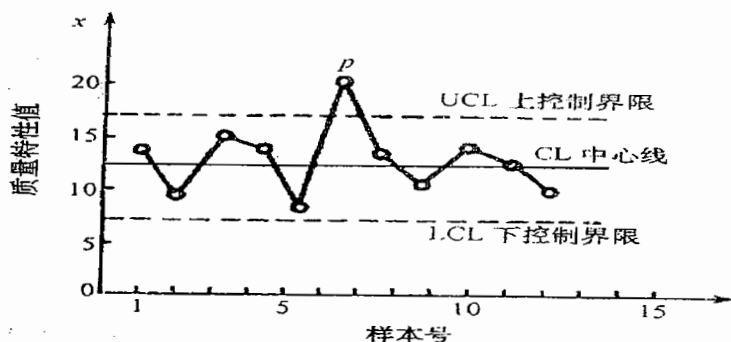


图 6.8 单值控制图

控制图的横坐标表示按时间顺序的抽样样本号,纵坐标表示质量特性值。控制图一般有中心线(CL, Center Line)、上控制界限(UCL, Upper Control Limit)、下控制界限(LCL, Lower Control Limit),控制界限是判断工作过程状态正常与否的标准尺度。把各样本的质量特性值依次逐点描在控制图上,如果点子全部落在上、下控制界限之内,且点子的排列又正常时,即可判断质量是处于控制状态,否则就认为质量过程存在着异常因素(如图 6.8 中的 p 点),应查明原因,予以消除。

2. 控制图的原理

控制图中的控制界限是判断工作过程状态是否存在异常因素的标准尺度,它是根据数理统计的原理计算出来的。若质量特性值服从正态分布,或虽服从二项分布或泊松分布,但样本容量足够大,那么,在正常情况下,各样本质量特性值仅受偶然因素的影响,将只有很少一部分不合质量要求,绝大多数样本质量特性值都应该出现在控制界限之内。因此,在质量控制中,比较通用的方法是按“ 3σ 原则”确定控制界限,而把中心线定为受控对象质量特性值的平均值,即

$$\left. \begin{aligned} \text{CL} &= \mu \\ \text{UCL} &= \mu + 3\sigma \\ \text{LCL} &= \mu - 3\sigma \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

式中 μ —— 正态分布的均值；
 σ —— 正态分布的标准偏差。

正态分布时，在正态曲线下总面积的特定百分数可以用标准偏差的倍数来表示。例如，正态曲线下以 $\mu \pm \sigma$ 为界限的面积为正态曲线下总面积的 68.27%。类似地， $\mu \pm 2\sigma$ 为 95.45%， $\mu \pm 3\sigma$ 为 99.73%，如图 6.9 所示。

画分布曲线图

● 分组

X-横座标：按组每格代表2

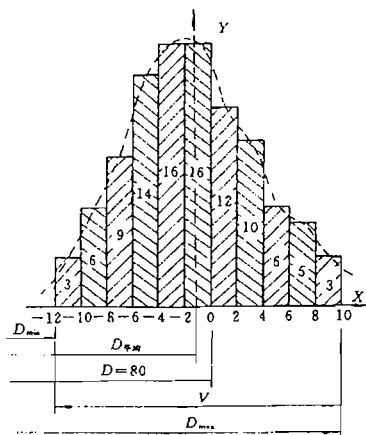
Y-纵座标：个数（按比例）

● 作直方图

● 过各直方图顶线中点，连出尺寸

分布曲线：

求标准差：



$$\sigma = \sqrt{\frac{(D_1 - D_{\text{平均}})^2 m_1 + (D_2 - D_{\text{平均}})^2 m_2 + \dots + (D_n - D_{\text{平均}})^2 m_n}{n}}$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - D_{\text{平均}})^2 m_i}{n}}$$

正态分布 (随机事件的特征)

特征：

(1) 对称于y轴

$$x=0 \text{ 时, } y_{\max} = 1/\sigma \sqrt{2\pi}$$

$x = \pm \sigma$ 处有拐点,

即曲线 上凸

下凹

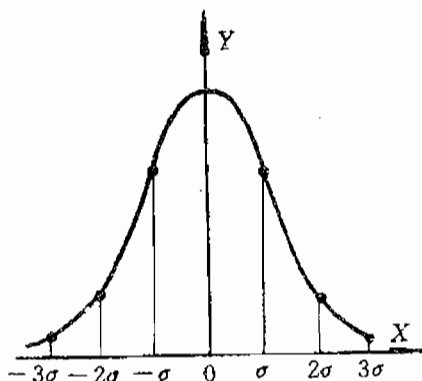


图 . . . 正态分布曲线

(2) $\sigma \uparrow$, $y_{\max} \downarrow$, 曲线平

$\sigma \downarrow$, $y_{\max} \uparrow$, 曲线高

(σ 决定了分散程度)

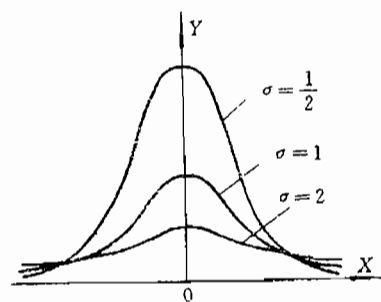


图 . . . 不同 σ 值的正态分布曲线

$$(3) \quad A = \int_{-\infty}^{+\infty} Y \, dx = 1$$

研究面积F与总面积A的关系

① $X = \sigma$, $F = 0.6826$,

说明F的面积占总面积A的68%。

还有约32%的事物未被包括。

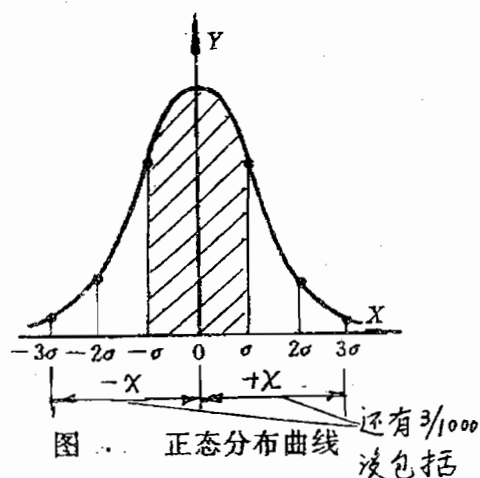
② 当 $X = 2\sigma$, $F = 0.9544$,

有 $1 - F = 0.0456 \approx 5\%$ 事物

未被包括。

③ 当 $X = 3\sigma$, $F = 0.9973$

有 $1 - F = 0.0027 \approx 0.3\%$ 未被包括。



中心线、控制线的确定

中心线— μ

控制线— $\pm 3\sigma$

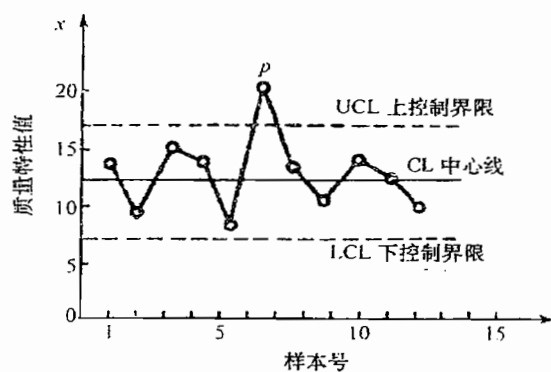


图 6.8 单值控制图

即:

$$\left. \begin{aligned} CL &= \mu \\ UCL &= \mu + 3\sigma \\ LCL &= \mu - 3\sigma \end{aligned} \right\}$$

式中 μ —— 正态分布的均值;

E. 均值—极差控制图($\bar{X}$ -R 图)

$\bar{X}$ --均值

R--极差, R—平均极差

为了计算简便, $\pm 3\sigma$ 改由 R 来确定.

对于 $\bar{X}$ 控制图:

$$\left. \begin{aligned} \text{同理} \quad UCL &= \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \\ LCL &= \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \end{aligned} \right\}$$

式中 A_2 ——与 n 有关的某一常数, 见表 6.5。

对于 R 控制图:

$$\left. \begin{aligned} \text{同理} \quad UCL &= D_4 \bar{R} \\ LCL &= D_3 \bar{R} \end{aligned} \right\}$$

式中, D_3 、 D_4 为与 n 有关的某一常数, 见表 6.5。

表 6.5 计算 3σ 控制界限的几种系数表(n 为分组样本容量)

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_2	1.128	1.693	2.059	2.326	2.534	2.704	2.847	2.970	3.078
d_3	0.8525	0.8884	0.8798	0.8641	0.848	0.833	0.820	0.808	0.797
A_2	1.880	1.023	0.729	0.577	0.483	0.419	0.373	0.337	0.308
D_3						0.076	0.136	0.184	0.223
D_4	3.267	2.575	2.282	2.115	2.004	1.924	1.864	1.816	1.777

例 6.4 统计某装备制动装置的制动片与被制动装置的钢圈之间的制动间隔数据, 如表 6.6 所列。试作 $\bar{x}$ -R 控制图, 并分析其工作的稳定性。

表 6.6 制动间隔统计数据(cm)

样本 组序	日期—时间	测定值				平均值 $\bar{x}$	极差 R
		x_1	x_2	x_3	x_4		
1	10月15日8:15	0.35	0.40	0.32	0.33	0.35	0.08
2	11:30	0.46	0.37	0.36	0.41	0.40	0.10
3	1:45	0.34	0.40	0.34	0.36	0.36	0.06
4	3:30	0.69	0.64	0.68	0.59	0.65	0.10

(续)

样本组序	日期 - 时间	测定值				平均值 $\bar{x}$	极差 R
		x_1	x_2	x_3	x_4		
5	5:10	0.38	0.34	0.44	0.40	0.39	0.10
6	10月18日8:35	0.42	0.41	0.43	0.34	0.40	0.09
7	9:00	0.44	0.41	0.41	0.46	0.43	0.05
8	1:30	0.33	0.41	0.38	0.36	0.37	0.08
9	2:50	0.48	0.52	0.49	0.51	0.50	0.04
10	4:00	0.47	0.43	0.36	0.42	0.42	0.11
11	10月24日8:30	0.38	0.41	0.39	0.38	0.39	0.03
12	11:30	0.37	0.37	0.41	0.37	0.38	0.04
13	2:10	0.40	0.38	0.47	0.35	0.40	0.12
14	4:30	0.38	0.39	0.45	0.42	0.41	0.07
15	6:10	0.50	0.42	0.43	0.45	0.45	0.08
16	10月28日8:10	0.33	0.35	0.29	0.39	0.34	0.10
17	9:20	0.41	0.40	0.29	0.34	0.36	0.12
18	10:50	0.38	0.44	0.28	0.58	0.42	0.30
19	12:00	0.33	0.32	0.37	0.38	0.35	0.06
20	1:30	0.56	0.55	0.45	0.48	0.51	0.11
21	11月3日9:00	0.38	0.40	0.45	0.37	0.40	0.08
22	12:00	0.39	0.42	0.35	0.40	0.39	0.07
23	2:10	0.42	0.39	0.39	0.36	0.39	0.06
24	4:30	0.43	0.36	0.35	0.38	0.38	0.08
25	5:30	0.39	0.38	0.43	0.44	0.41	0.06
合计						10.25	2.19
均值						$\bar{\bar{x}} = 0.41$	$\bar{\bar{R}} = 0.09$

解: 由表 6.5 查得, 当 $n = 4$ 时, $A_2 = 0.729$, $D_3 = 0$, $D_4 = 2.282$, 由表 6.6 求得 $\bar{\bar{x}} = 0.41$, $\bar{\bar{R}} = 0.09$ 。所以, 对于 $\bar{x}$ 控制图

$$CL = \bar{\bar{x}} = 0.41$$

$$UCL = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{\bar{R}} = 0.41 + 0.729 \times 0.09 = 0.48$$

$$LCL = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{\bar{R}} = 0.41 - 0.729 \times 0.09 = 0.34$$

同理, 对于 R 控制图

$$CL = \bar{\bar{R}} = 0.09$$

$$UCL = D_4 \bar{\bar{R}} = 2.282 \times 0.09 = 0.2$$

$$LCL = D_3 \bar{\bar{R}} = 0$$

$$UCL = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 0.41 + 0.729 \times 0.09 = 0.48$$

$$LCL = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 0.41 - 0.729 \times 0.09 = 0.34$$

同理,对于 R 控制图

$$CL = \bar{R} = 0.09$$

$$UCL = D_4 \bar{R} = 2.282 \times 0.09 = 0.2$$

$$LCL = D_3 \bar{R} = 0$$

所绘制的 $\bar{x} - R$ 图如图 6.11 所示。从图可以看出, $\bar{x}$ 图中有第 4, 9, 20 号样本点出界; R 图中有第 18 号样本点出界; 控制界限内的样本点的排列多数偏于中心线以下, 工作过程是否稳定需要进一步查明原因, 作出判断。

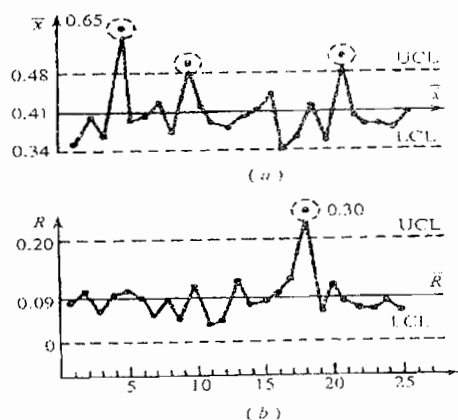


图 6.11 $\bar{x} - R$ 控制图

(a) $\bar{x}$ 图; (b) R 图。

F. 单值 - 移动极差控制图 ($x - R_S$ 图)

当每一较长抽样间隔时间内只能得到一个观测值时可采用单值 - 移动极差控制图, 即 $x - R_S$ 图。其中 x 是样本单值, $\bar{x}$ 是所有单值的平均值。移动极差 R_S 是表示两相邻数之差的绝对值, $\bar{R}_S$ 是所有移动极差的平均值。

对于 x 控制图

$$CL = \bar{x}$$

$$\left. \begin{aligned} UCL &= \bar{x} + 2.66 \bar{R}_S \\ LCL &= \bar{x} - 2.66 \bar{R}_S \end{aligned} \right\} \quad (6.10)$$

对于 R_S 控制图

$$CL = \bar{R}_S$$

$$\left. \begin{aligned} \text{UCL} &= 3.27\bar{R}_S \\ \text{LCL} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6.11)$$

例 6.5 测得某液压泵输出油量数据如表 6.7 所示, 试作 $\bar{x} - R_S$ 图, 并分析其工作的稳定性。

表 6.7 某液压油泵输出油量统计数据(m^3/s)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	合计	均值
输油量 x_i	25.0	25.3	33.8	36.4	33.4	30.8	30.0	24.9	32.3	28.1	300.0	$\bar{x} = 30$
移动极差 R_{Si}		0.3	8.5	2.6	3.0	2.6	0.8	5.1	7.4	4.2	34.5	$\bar{R}_S = 3.83$

解: 单值平均值: $\bar{x} = \sum_{i=1}^{10} x_i / 10 = 300 / 10 = 30$

移动极差平均值: $\bar{R}_S = \sum_{i=1}^9 \bar{R}_{Si} / 9 = 34.5 / 9 = 3.83$

所以, 对于 $\bar{x}$ 控制图

$$\text{CL} = \bar{x} = 30$$

$$\text{UCL} = \bar{x} + 2.66\bar{R}_S = 30 + 2.66 \times 3.83 = 40.2$$

$$\text{LCL} = \bar{x} - 2.66\bar{R}_S = 30 - 2.66 \times 3.83 = 19.8$$

对于 R_S 控制图

$$\text{CL} = \bar{R}_S = 3.83$$

$$\text{UCL} = 3.27 \times 3.83 = 12.5$$

$$\text{LCL} = 0$$

所绘制的图如图 6.12 所示。从图可以看出, 油泵工作处于统计控制状态, 工作是稳定的。

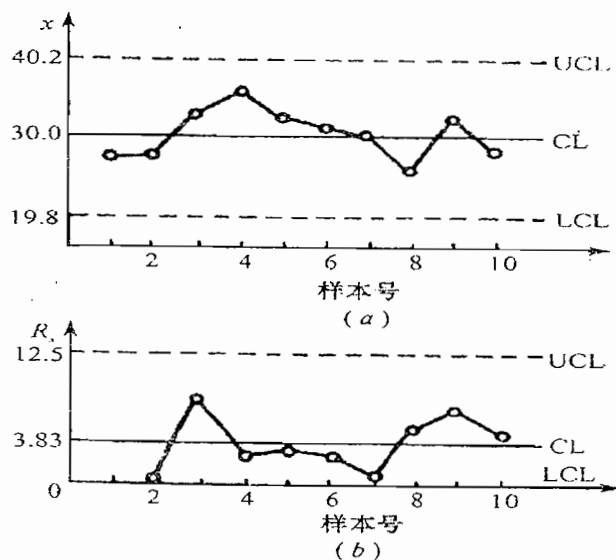


图 6.12 $\bar{x} - R_S$ 控制图

(a) $\bar{x}$ 图; (b) R_S 图。

3. 维修工作影响因素控制

维修工作质量是维修组织管理工作和维修工作质量的总称,是维修质量的保证和基础,维修程序和标准、维修人员、材料与备件、设备和工具等因素是影响维修工作质量的关键。例如维修仪器和工具校验精度的准确性,就可能对维修工作质量造成重要的影响;再如维修人员,如果对维修人力规模、技能水平、工作态度、工作环境等因素缺乏有效的监控,有可能会严重影响维修工作的开展和维修质量的保证。维修工作质量控制的关键就是对重要的、不可重复的工作建立工作质量标准,标准必须精确,可量化以及能够反映实际使用需求。如果维修工作不符合标准,可运用因果分析图来调查分析不合格维修工作的根本原因,图 6.15 是一个控制和改善维修工作质量的决断分析过程示意图。

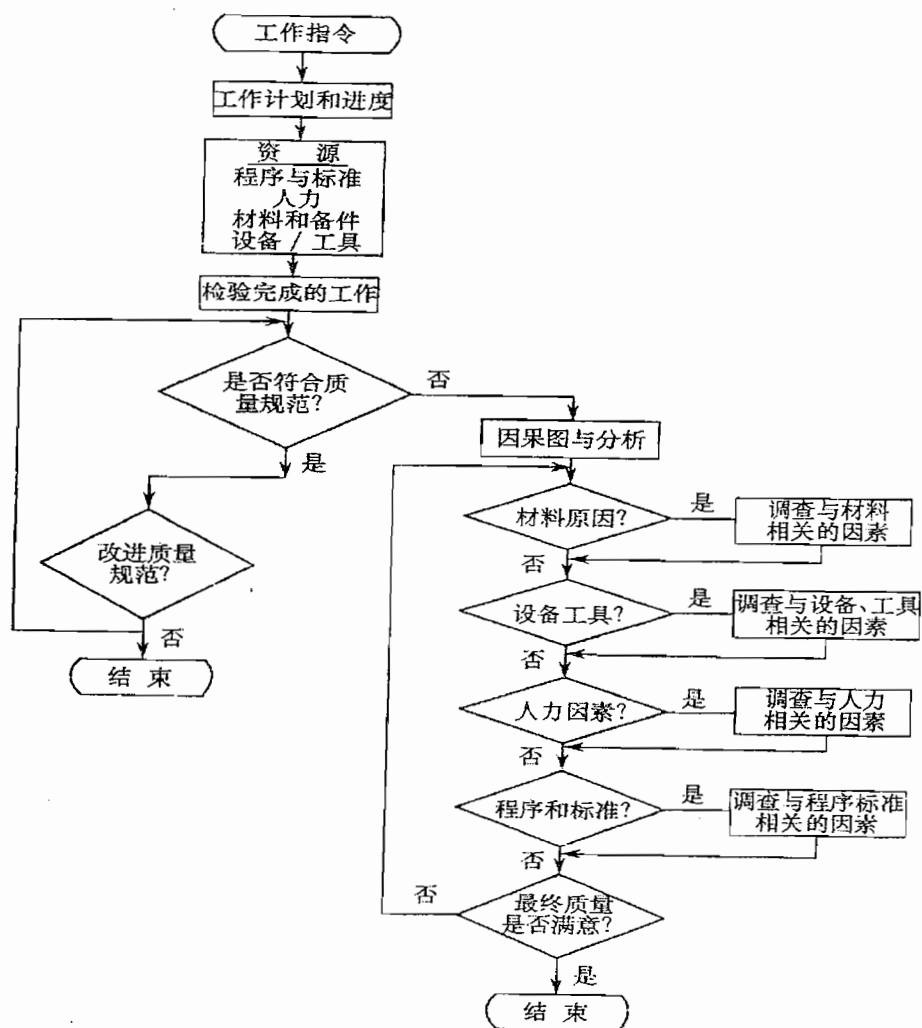


图 6.15 控制和改善维修工作质量示意图

6.3 维修差错的系统分析

随着科技进步,航空装备在使用过程中发生的纯机械原因的各种大小事故已大幅度减少,而由于人的原因所造成的各种事故的比例却大幅度上升,其中很大部分是在维修中造成的。根据 1995 年波音公司对近期有关飞机事故和维修问题进行的详细分析报告,1982 年—1991 年的 10 年间发生事故的 15%(264 起中占 39 起)与维修差错有关。同时,维修差错的研究和管理又有着其自身的特殊性。如在飞行领域,驾驶员的操作失误,空管员的指挥、引导错误,在飞行中可以立即反映出来,而维修人员即使出现失误,它引起故障也可能需要经过几天、几个月或几年时间后才能显现或被发现。因此,维修差错是飞行安全的隐患,研究航空维修必须对航空维修系统中维修人员的行为特点、类型进行分析,从中找出预防维修差错的对策。

6.3.1 维修差错

1. 航空维修差错的含义

航空维修差错是指,在维修活动中,维修人员受到内在、外在因素的影响,发生偏离维修目的、要求的行为偏差,这些行为将会导致秩序、状态的异常,装备损坏或人员伤亡等。航空维修过程中发生的错、忘、漏、损、丢等人为差错和因维修不当引起的事故征候和事故都属于维修差错的范畴。根据航空维修差错导致后果的危害程度,航空维修差错分为三个等级:重大维修差错、较大维修差错和一般维修差错。

航空维修差错是维修人员在维修活动中发生的一种差错,就心理本质而言,与人为差错没有什么不同,是人为差错的一种;另一方面,维修是一种严格受技术条件约束的复杂活动,维修差错与人在这种复杂活动中的心理特点和行为方式密切相关,具有特定的规律和研究预防的方法。如人失手掉下扳手,这是由于各种外界因素的影响或人员本身的心理因素等造成的,就这个事件本身而言,是人为差错;但如果在维修时,扳手掉进了发动机舱,影响了正常的维修工作,增加了不必要的维修工时,甚至导致事故征候或事故,则属于维修差错。

2. 飞机维修中的人力资源

无论在任何一个国家,同其他行业相比,航空维修业的劳动成本都是很高的,目前工时成本已经将近 25 \$ /工时。为此,很多航空公司开始着手建立航空维修的工时统计与分析信息系统,及时监控各种维修项目的计划工时与实际工时消耗,以便合理地调整工时标准,减少不合理的工时消耗,最经济地完成维修任务。

加强维修人员的技术培训,提高维修技能可以提高维修效率,降低人力消耗。目前,各个航空公司都意识到了人员培训的重要性,在培训手段、培训标准上有了很大提高。另外,在维修人力资源管理工作中,根据维修任务的中长期计划,合理地制定人力需求计划,也是保证维修任务顺利完成的必要条件。

表 5-5 1989 年 IATA 成员公司维修人员数量占总员工的比例

公司名称	维修人员数量	公司总人数	维修人员比例 (%)
联邦快递	2 756	82 611	3
美洲航空公司	9 361	75 086	12
英国航空公司	8 420	65 099	13
联合航空公司	9 847	50 959	19
美国航空公司	7 767	49 948	16
汉莎航空公司	10 890	43 565	25
法国航空公司	9 773	39 111	25
环球航空公司	5 044	33 299	15
大陆航空公司	5 746	32 011	18
西班牙航空公司	5 466	29 001	19
泛美航空公司	5 755	28 784	20
荷兰皇家航空公司	5 285	25 000	21
VARIG 航空公司	4 674	24 638	19
沙特阿拉伯航空公司	6 271	24 064	26
意大利航空公司	5 492	22 719	24
日本航空公司	4 843	21 142	23
加拿大航空公司	6 182	21 022	29
瑞士航空公司	3 300	20 917	16
印度航空公司	8 055	20 905	39
巴基斯坦国际航空公司	4 643	19 691	24
快达航空公司	4 400	17 481	25
印度国际航空公司	4 479	17 293	26
东部航空公司	3 191	15 468	21
加拿大国际航空公司	2 045	15 262	13
合计	143 685	795 076	

衡量航空公司维修成本的另外一个因素是维修人员在航空公司总员工中所占的比例，1989 年 IATA 的统计数字如表 5-5 所示。从表中数据可以看出，除个别公司以外，总人数列入 IATA 前 24 名的航空公司的维修人员，一般占本公司总人数的 14%~24%，平均值为 18%，除了少数几个大型航空公司以外，维修人员人数一般与航空公司总人数呈线性关系。这里的 24 家航空公司的员工总数占该年度 IATA 员工总数的 68%，应当注意，并不是所有的大型航空公司都加入 IATA；同时，加入 IATA 的航空公司在 1989 年总的运输量占该年度世界空运量的 73%。

表 5-5 中的统计数字反映出各个航空公司的维修与工程管理水平，先进的维修管理应当依赖于先进的维修设备和优良的培训，提高维修人员的维修水平，尽量降低劳动力的不合理消耗。

航空公司的收益管理是一个复杂的系统工程，认真研究市场，充分发挥内部各个部门包括维修工程部门的潜力，必将有利于提高公司效益。

3. 飞机维修中的人为差错

确保航空维修的质量，概括起来无非是两个方面的内容：一是应用各种科学的管理方法，使质量管理科学化、标准化、定量化；二是重视人的作用，充分调动维修人员的积极性和创造性。随着科学技术的进步，关于人的科学也有很大发展，建立了人为因素这门新的科学，因而有可能从科学角度讨论调动人的积极性问题，减少人的失误。

(1) 人为因素科学

人为因素科学发源于美国，在西欧称为人一机工程。80年代我国学者将它发展为人—机—环境系统工程。

人为因素科学是以人为主体的，运用系统科学的理论和系统工程的方法，正确处理人、机、环境三大要素的关系，深入研究人一机—环境系统最优组合的一门科学。它把人、机、环境看做一个系统的三大要素，在深入研究三者各自性能基础上，从全系统的总体性能出发，通过三者间的信息传递，加工和控制，形成一个相互关联的复杂系统，并具有安全、高效、经济的综合效能。

人为因素科学，或按我国学者的提法，人一机—环境系统工程的研究内容包括七个方面，即：

1) 人的特性研究

例如，人的工作能力；人的基本素质的测试与评价；人的体力负荷、脑力负荷和心理负荷的研究；人的可靠性研究，人为差错研究；人的数学模型、控制模型、决策模型研究；人体测量技术；人员的选拔和培训。

2) 机器特性研究

例如，被控对象动力学的建模技术；机器的防错设计，可靠性和维修性设计。

3) 环境特性研究

例如，环境检测技术；环境控制技术；环境建模技术。

4) 人一机关系研究

主要包括静态人一机关系、动态人一机关系和多媒体技术在人一机关系中应用。静态人一机关系研究主要有作业区域布局与设计；动态人一机关系研究主要有入、机功能分配研究，人工智能研究，人机界面显示和控制技术。

5) 人一环境关系研究

例如，环境因素对人的影响；个体防护措施。

6) 机—环境关系研究

例如，环境因素对机器性能的影响；机器对环境的影响。

7) 人一机—环境系统总体性能的研究

例如，人一机—环境总体数学模型的研究；人一机—环境系统全数学模拟、半物理模拟和全物理模拟技术；人一机—环境系统总体性能分析、设计和评价。

(2) 维修差错

航空维修工作存在大量的人为差错。它直接影响着维修质量和空地安全,影响维修工作效率和经济性。根据波音公司提供资料表明,在1982年至1991年十年间,维修与质量控制中的问题位列重大飞行事故主要原因的第二位。美国GE公司收集数据表明,在与发动机有关的航班延误和取消事件中,50%是由于不正确的维修引起的。许多迹象和经济数据都表明维修差错严重影响维修工作的效能。

事故原因分析

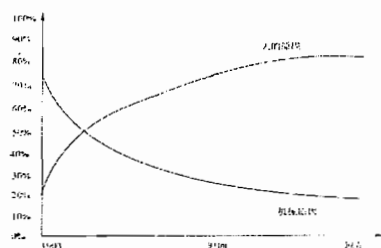


图 1 事故原因分析

中国民航运输机事故统计

我国运输飞行事故中维修所占的比例情况如图 所示: 1949~1998 年为 7.9%, 89~1998 年为 15.7%。

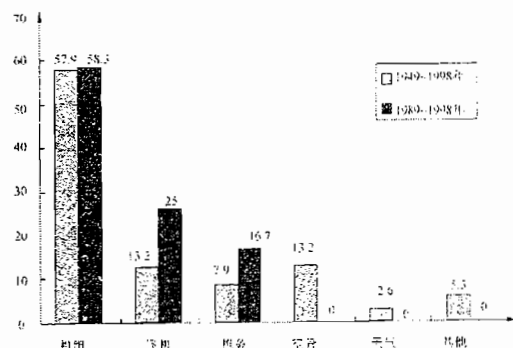


图 1 中国民航运输飞行事故统计

4. 维修差错的类型

根据航空维修差错发生的主导原因,航空维修差错有以下几种类型:

(1) 维护作风型。是指维修人员懂得所维修的航空装备的工作原理,知道航空装备的性能、构造、操作方法和不正确操作的后果,但因责任心不强、盲目蛮干,违反了条例、规程和安全规则所发生的差错。

(2) 技术技能型。是指维修人员缺乏必要专业知识和操作技能,因不懂或不熟悉操作规程和安全规则而发生的差错。

(3) 组织管理型。是指因维修组织不严密或管理混乱而发生的差错。

● 详细解释

5. 维修差错的模式

维修差错与人为因素密切相关。人为因素研究是从第二次世界大战开始的,人为差错的科学性研究始于 20 世纪 50 年代,70 年代得到了进一步的发展。目前,其研究成果在维修安全领域得到了广泛应用,对差错的认识主要有以下三种:

(1) SHEL 模式。由爱德华兹(E. Edwards)教授于 1972 年提出,后由霍金斯(F. Hawkins)发展完善。SHEL 模式认为,差错发生是以人(L)为中心的与硬件(H)、软件(S)、环境(E)及其交互作用引起的。以 L 为中心,每个 L 与 H、L 与 E、L 与 L、L 与 S 相互之间的关系与作用,综合起来就会形成某些结果而表现出来。例如人与环境,维修场所的照明、温度、噪声、空间等对维修差错的发生都有很大的影响;再如人机关系,维修时维修人员有良好的工作姿势,维修部位看得见,够得着,维修工具合适,设备拆装简便,就不易发生维修差错,维修质量和维修工作效率就高;又如人与软件,由于软件使用指南错误、维修程序不清或混乱,往往会引起维修差错。

(2) Reason 模式。由詹姆斯·里森(J. Reason)教授于 1990 年提出。该模式把差错分为“显性差错”和“隐性差错”两大类,事故是“显性差错”和“隐性差错”结合在一起,最后

因局部事件在安全管理体系上打开缺口时发生的。里森教授使用蚊子和池沼作比喻来说明,对待维修差错,不仅要打“蚊子”(各种不安全的维修行为),而且要弄干繁殖蚊子的“池沼”(易于引起维修差错的潜在因素)。传统的维修差错分析,不是通过调查“池沼”来了解“蚊子”,而是企图通过调查“蚊子”来了解“池沼”,紧紧围绕当事人转来转去,这就和打“蚊子”一样。维修差错分析必须从了解什么原因使维修人员产生了失误,找到防止维修差错的真正原因,建立防止同类维修差错发生的对策,即解决“池沼”的问题。

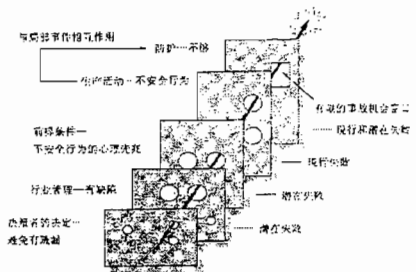


图 6- Reason 模式

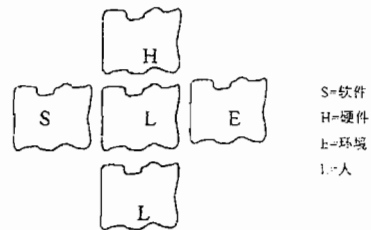


图 6- SHEL 模式

(3) 事故链理论。该理论认为,维修差错的发生通常不是孤立事件的结果,而是多种事件缺陷凑到一起的不幸后果。维修差错发生必须具备三个基本条件:一是装备系统结构上存在着出现差错的可能性;二是人出了问题;三是管理上存在漏洞。在这三个条件中,人是最基本的因素。由于装备是相对固定的,结构上若存在产生差错的可能性,维修差错的发生最终取决于人是否出差错,而且管理也是由人来实施的。维修差错的产生并最终造成危及安全的后果,是由于这三个基本事件交错构成的事故链,这些事件一环扣一环,最终导致事故性后果。因此,维修差错也存在着可控制性,只要将事故链上的某一环节切断即可控制维修差错的发生。

综上所述,从系统的观点来看,维修差错的产生是由人、机、环境以及管理四个方面因素相互作用的结果。其中,人-机是最基本的关系,人是最基本的要素。维修差错很少是由单一的因素形成的,其产生的机理是多层次的、错综复杂的。在实际的维修工作中,正确认识和有效管理人、机、环境和管理这四种因素,可达到减少维修差错、减轻差错后果之目的。

(重点案例)

6.3.2 维修差错的系统分析

1. 维修差错的本质

人们都熟悉维修差错的具体事例,但对维修差错确切含义与主体特征认识不一定深入、完整和准确。维修差错是指在维修活动中,由于受到各种内外在因素影响,维修人员发生的与维修目的要求偏离的行为偏差,并伴随有秩序和状态的异常,以及造成装备损坏或人员伤亡的意外后果。其后果大小确定了维修差错性质的严重程度。

系统工程观点认为,航空维修是人—机—环境系统协调活动。维修差错的发生是由于维修人员在这个系统中的行为破坏了人—机—环境—系统的整体协调性。维修差错本质是人的失误,失误是人的行为发生了偏差,偏离了维修目的。维修行为偏差的表现形式复杂多样,常见的形式是丢、错、漏、损、伤。其中丢、错、漏是直接的行为特征,损、伤则已把行为特征转化为事物特征。从本质上讲,先有人的行为偏差,然后再由行为偏差转化为事物异常。例如忘盖油箱盖的维修差错,本质行为偏差是“忘”,导致的事物是油箱盖未盖。

维修差错特征中涉及后果性描述问题,即差错的具体标准。后果的程度分为三类:一是秩序、状态异常;二是装备损伤;三是人员伤亡。具体的量值标准,尚未统一。一般而言,标准值低,质量管理就越严格。例如,领错航材一事有三种不同情况:一是领来后就发现弄错型号;二是装机后检查中发现弄错;三是使用后才发现弄错。三种情况后果严重程度不同,人们可能对此有不同鉴别标准。最宽的是装机使用后算维修差错,宽的是装机后算差错,最严的是领错就算差错,因为其行为已造成浪费工时的秩序异常后果。

维修差错后果用异常、损坏、伤亡来描述是属于定性的描述。

将异常、损坏、伤亡分别赋予定量的度量。例如工时损失、停场损失、器材经费损失、附加工时以及其他形式损失。将定量的损失程度和危险程度混合,则可将维修差错后果划分为严重、较严重与一般维修差错。

维修差错对维修质量的影响,除了后果严重程度外,还有同类维修差错频繁程度的差别,即多发性与偶发性维修差错之分。严重性和多发性是从两个不同侧面描述维修差错后果,它们都是维修差错的控制重点。

维修差错有四个基本特征：必然性、可积性、突变性和可逆性。

1) 必然性

根据墨菲定律：做某件事，如果存在着发生差错的可能性，那么差错迟早总要发生。完成某一项维修工作，不管发生差错的可能性多么小，当操作次数增多时，迟早总会发生一次差错。

2) 可积性

维修人员在操作过程中，前一个错误可以诱导后一个错误；后一个错误可以发展前一个错误，即差错可以在程序上积累，并且这种积累是阶跃的、非线性的。

3) 突变性

一般地说事物的发展，例如故障，总有一个从量变到质变的过程，但是维修差错则是与人的一次或几次操作错误关联，量变过程极短，即维修差错的产生过程具有突变性。

4) 可逆性

前一个错误可以被后人自觉或不自觉地纠正，二者可以相互抵消。例如，开关装反，则只有正确和错误两种可能，与人的一次或几次操作错误关联，具有突变性，另一方面，开关装反后，由于及时发现或无意地再次出错，则又可装正，这是可逆性。

一般地讲，维修差错发生并危及飞行安全，必须具备三个条件，一是飞机结构上存在出现差错的可能；二是人出了差错；三

是管理上出现漏洞。维修差错的产生以及最终形成危及安全的后果，是由这三个基本事件交错构成的事件链，这些事件一环扣一环，最终导致事故。例如机械员未盖好油箱盖，差错已经形成（设备环节、人员环节），如果检验员没有检查或未发现（人员环节、管理环节），那么差错的积累的结果，就会导致空中冒油，甚至起火导致事故。

● 墨菲定律

墨菲定律(Murphy's law)告诉我们，人们做某一件事情，如果存在着发生差错的可能性，那么，差错迟早总要发生，即维修差错具有必然性。

1949年美国航空工程师墨菲首次提出这条定律，它对消除使用维修中的维修差错具有现实意义。它指明人们做某一件事情，如果存在着发生差错的可能性，那么这种差错事件迟早总要发生，要想防止差错事件的发生，必须消除差错发生的可能性。

长期的安全管理和维修实践，证明了墨菲定律的正确性。例如，在装备维修中，如拆装机件时忘记打开口销、保险丝等这类小概率事件，通过维修人员的努力、维修组织管理的改善以及采取必要的防范措施，可以减少这类差错的发生，但不能杜绝这种差错的发生。维修实践和理论研究表明，维修人员的不安全行为和（或）装备的不安全状态是引起维修差错主要的直接原因。

现代人素工程的研究告诉我们,人的体力、精力是有限的,要求任何时候都不产生任何人的差错是难以做到的,尤其是在工作条件恶劣,身体疲劳,记忆力和思维敏捷性下降时,更容易出现差错。所以维修差错是不可能完全消除的,但可以减少出现的次数。

机件具有产生维修差错的可能性,是机件本身具有的一种属性,从单个维修差错事件的发生来看,它具有偶然性,但从宏观上来看,却具有统计的规律性。不同机件,产生维修差错的统计规律也不相同,但可以通过机件的设计改变这种规律性。例如,防止装错方位可采用定位销或键槽的设计;防止相邻导管接反可采用不同口径或不同螺距、螺纹接头的设计;防止误动操纵把手可采用装联锁电路的设计等,这样可以做到错了装不上、反了接不上、误动把手动不了,即使有了人的差错,也能立即发现,不至于使错误继续下去。通过防错设计可以改变机件产生维修差错的可能性,从而达到预防,甚至消除维修差错的目的。

2. 维修差错判断辅助分析方法

波音公司受美国联邦航空局(FAA)的委托,为确立人为差错的分析方法及其数据库,同美国联邦航空局、联合航空公司、大陆航空公司等一起经过两年时间,建立了维修差错判断辅助分析方法(MEDA, Maintenance Error Decision Aid)。目前维修差错判断辅助分析方法正在进行现场试验和评估,并进一步开发维修差错判断辅助分析方法数据库(软件系统)。维修差错判断辅助分析方法通过建立维修差错的标准化调查方法及趋势分析方法、明确维修过程中人为差错所暴露出来的实际问题、加强设计人员与维修人员之间的交流与沟通来达到既能查明引起维修差错的原因又能防止将来同类维修差错的再次发生之目的。

维修差错判断辅助分析方法是维修差错系统分析与控制的有效工具。维修差错判断辅助分析方法的基础是将注意力集中在造成差错的因素而非致错的维修人员身上,承认维修人员有良好的意图;同时,维修差错判断辅助分析方法从事故链的角度出发,认识到一个维修差错发生的影响因素是多方面的,只要找出影响维修差错的各种因素,消除产生差错系列因素中的一个或几个环节,如改变维修工作程序,修正维修工作方式,提高维修设备性能,维修差错就能避免。

维修差错判断辅助分析方法是一种结构化分析方法,一般分为现场因素分析(Local Factors Analysis)和组织因素分析(Organizational Factors Analysis)两个阶段。第一阶段,维修差错判断辅助分析方法建立了现场维修差错调查的标准程序和技术方法,收集维修差错相关的信息数据资料,调查分析维修差错原因,研究确定对策措施;第二阶段是将现场分析得到的维修差错信息数据收集进维修差错判断辅助分析方法数据库,并利用维修差错判断辅助分析方法数据库进行趋势分析和组织决策。

维修差错判断辅助分析方法全面吸收了人为因素的研究成果,并在系统分析维修差错特性的基础上建立了实用性的剖析维修差错的技术方法,维修差错判断辅助分析方法既能用于维修差错的现场故障调查分析,也能用于维修差错原因的剖析,因此,维修差错判断辅助分析方法对于提高装备的安全性和可靠性,减少维修差错,改善维修效率和效益具有显著的成效,现已在世界上多家航空公司得到了应用,受到了美国联邦航空局的广泛重视。

6.3.3 维修差错的系统管理

1. 行为过程模式

维修差错本质是人的行为偏差,认识和预防维修差错不能仅停留于对问题现象的认识上,应着重对人的维修行为的研究。据美国资料介绍,维修人员在各项工程中,例如在调整、拆卸和校准时的平均可靠度为 0.987,这就意味着维修人员每做 1 000 次这类工作,预料会出现 13 次差错。显然,对维修人员的工效方面给予培训,对维修行为给予指导是极其重要的。

在维修活动中,维修人员为实现既定的维修目的,总是根据航空技术装备的状况、器材供应保障条件、任务时限与环境条件、以及维修人员自身条件,决定自己的维修行为。维修行为是由维修目标导向的。维修人员对维修目的认识深度可能不同,与之相应的维修行为则会呈现纷繁杂乱的现象,但导向维修目的的行为过程是有规律可循的。行为科学认为,一切类型的过程,都可以表征为一串感知感觉——识别判断——决定行动的过程。如图 4-1 所示的行为过程模式,它显示了各种维修行为发生的系序关系。

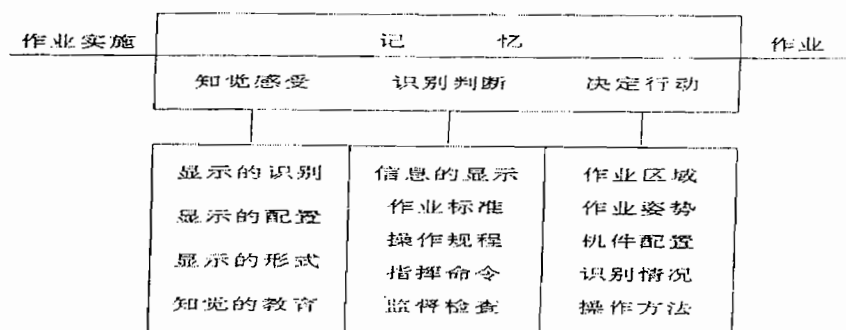


图 4-1 行为系序模块图

2. 维修差错的系统管理

航空维修是一种动态的、多变量的、人为因素起主要作用的开放系统,不确定的因素多,逻辑关系复杂,基本事件的发生概率也很难确定。因此,必须从其根源入手,研究其内在规律,进而采取应对措施,从根本上消除或有效控制维修差错。

(1) 原因分析

正确处理维修差错事件,防止就事论事或简单粗暴处理当事人,而应对事件进行系统分析,从“人、机、料、法、环”等五个方面来分析事件的原因。“人”的因素主要是:人员业务

能力、思想品德、工作作风、团结协作、决断能力等；“机”的因素主要是：产品设计、制造、使用、维修等是否存在缺陷；“料”的因素主要是：维修所用工具、设备、器材是否到位、能否满足维修要求，有无超差、超标；“法”的因素主要是：技术资料是否现行有效、文字是否明确、工艺是否合格、制度是否完善、能否操作、规章制度是否得到落实；“环”的因素主要是：人员是否安排合理，能否得到充分的休息，温度、噪声、污染等是否对维修人员的身心造成了危害，企业文化能否激发人们的工作热情，家庭环境是否影响个人的情绪等。

(2) 摸索规律

维修差错在航空维修工作中是有一定规律可寻的。从广义上讲，维修差错往往容易发生在维修工作或某一个维修活动的“两端点”和“边界线”上，呈“浴盆曲线”，见图 1-1。

依此类推，若把一个航空维修工作整体视为由若干个航空维修活动所构成的话，维修差错易发生在若干个航空维修活动的连接点上。从微观上看，维修差错易发生在每两个工作的“环节连续点”上，如一项具体维修工作的开始与完工阶段、一项排故工作的开始与完工阶段、一道工序的开始与完工阶段、一天工作的开始与完工阶段（即飞行前与飞行后的工作阶段）等，这些都可称之为“环节连接点”。因为人为因素涉及的学科包括认知学、组织心理学、行为学及其他一些学科，在“工作开始阶段”和“工作结束阶段”中，无论从工作者的心理、生理和精力集中程度的角度，还是从工作的实施准备上，都是处于相对的低谷和相对不稳定状态，故人力综合能力 E 呈“倒浴盆曲线”，见图 1-2。另外，在航空维修工作中，尤其是在下半夜 1 点～3 点的时候，人的大脑和精力处于最低点，这种状态下最容易发生类似于“错、忘、漏”等维修差错。由于航空维修工作的连续性，当前一道工序结束而下一道工序开始时，这时正是人力综合能力低谷和人为差错概率高峰的重合区域，是最容易发生维修差错的环节。可见，要杜绝维修差错，重点工作应放在这些易发生维修差错的“端点和边界线上的环节”控制上。因此，要加强这些易发生维修差错环节的宏观管理和微观防范工作，以点代面，防微杜渐，从根本上控制和杜绝维修差错。

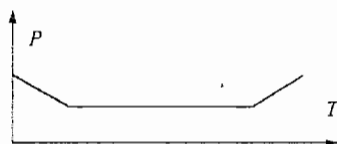


图 1-1 维修差错概率分布



图 1-2 人员综合能力分布

● 应力理论

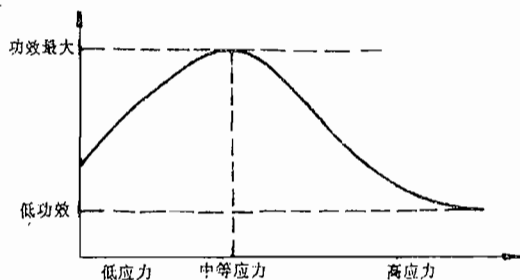


图 1-3 应力 功效曲线

由图 4-2 可看出,应力不完全是消极因素。实际上,中等应力有利于人的工效保持在最佳水平;反之,如果在很低应力下工作,任务单调重复,人的工效也不会达到峰值。另一方面,在超过中等应力的情况下也会使人的工效降低。中等应力定义为使人处于机敏状态的应力。

与职业有关的应力有:工作负荷应力、工作变动性应力等。工作变动性可改变人的行为、生理和认识上的功能形式。操作人员在执行一项具体任务时,受到某些限制,当阻力太大时差错就会上升,下面列出操作者的某些应力特征:

- (1) 反馈给操作者的信息,不能确定其工作正确与否;
- (2) 要求操作者迅速对两个以上显示值作比较;
- (3) 要求操作者在很短时间内作决策;
- (4) 要求操作者长时间监视;
- (5) 完成一项任务所需步骤很多;
- (6) 有一个以上显示值难以辨认;
- (7) 要求同时高速操作多个控制器;
- (8) 要求操作者高速完成各个步骤;
- (9) 要求在从各种来源收集到的数据的基础上必须作出决策。

除了上述与操作有关的应力特征外,还有一些辅助性因素增加有关人员的应力。例如,不愿意做现在的工作;工作可能重复;工作中提拔机会少;缺乏完成现有工作的能力;健康欠佳;在时间要求很紧张情况下工作;工作中上级提出过多要求;做一项凭自己能力和经验不屑去做的工作;有家庭矛盾;必须与性格不合的人一起工作等。

指出应力特征和因素,是要控制总应力,避免任何人在高应力区工作,借以控制人为差错的发生。

(3) 应对措施

通过对上述航空维修差错产生原因和规律的分析可知,只有深刻认识维修差错的偶然性与必然性之间的辩证关系,在管理、制度、程序上下功夫,不断提高人员素质和维修质量,改善工作环境,消除不安全因素,从根本上预防和杜绝维修人员的维修差错问题,才能确保飞行安全。

① 重视安全教育,提高安全意识,做到使其“不忍”。在航空维修系统内开展经常性的安全教育是预防维修差错的一项重要工作内容。要让各级维修管理人员和广大维修人员通过安全法规、规章制度以及安全管理知识的学习,系统掌握安全技术知识,提高安全技术技能,更重要的是通过学习大量活生生的、以血的教训换来的事故案例,增强维修人员的责任感、使命感和道德感。

② 加强监控,做到使其“不敢”。从近年所发生的重大维修差错来看,基本上都与人为因素有关,如不按工作单(卡)的要求进行工作,不按规章制度办事,管理松懈等。严格贯彻落实《规程》、《细则》、技术通报的具体要求,认真执行各级装备主管部门的有关文件精神,基本上就能做到工作程序明确、规章制度齐全、工作标准明确,但对程序、规定、标准在执行方面往往会出现一定的偏差。因此,在航空维修系统内建立有效的监察、监督、检查机制十分重要,必须从“小事”抓起,规范维修人员的行为,培养良好的维护作风。

③ 进行系统建设,做到使其“不能”。对于维修人员个人而言,出现一些差错在所难免,但从系统的角度来看,由于每一维修差错的发生决不是由一个单一的因素造成的,只要将“事故链”中的某一个环节去掉,就可以避免事故的发生。因此,应通过建立、健全安全管理体系和必要的规章制度,加强监督检查,加强工作的计划性,尤其是进行比较大中型的工作时,对所需的各类资源(人、器材、设备、资料)进行充分准备,对每天工作进度、工作量、时间安排、人员搭配等进行详尽的计划安排。此外,还要加强工作现场的组织管理,对每一项工作,做到分工、程序明确,并对现场的维修信息进行及时处理和反馈。最后,还要对工作中可能造成的差错进行评定,采取复查、检验、试验等多种方式进行控制,防止人为差错的发生。

④ 开展防差错设计,做到使其“不会”。通过开展防差错设计,从源头上消除或控制差错发生的可能性;或者通过对维修信息的分析处理,将易发生维修差错的信息迅速反馈,实施针对性的加改装,也能起到预防甚至消除维修差错的作用。装备或设备具有产生维修差错的可能性,是其本身具有的一种属性,从单个维修差错事件的发生来看,它具有偶然性,但从宏观上来看,却具有统计的规律性。不同机件,产生维修差错的统计规律也不相同,但可以通过机件的设计改变这种规律。例如,防止装错方位可采用定位销或键槽的设计;防止相邻导管接反可采用不同口径或不同螺距、螺纹接头的设计;防止误动操纵把手可采用装联锁电路的设计等,这样可以做到错了装不上,反了接不上,误动把手动不了,即使有维修差错,也能立即发现,不至于使错误继续下去。

●操作预防措施

(1) 注意力不集中。在重要场所和位置装上能引起注意的装置,提供比较舒适的工作条件,以及在程序步骤上避免过长的时间间隔;

(2) 疲劳。改变别扭的姿势,避免注意力集中时间过长,排除环境应力和产生疲劳的精神因素;

(3) 注意不到重要指示。通过视觉和听觉方法,把操作人员注意力吸引到出现的问题上来;

(4) 操作员对控制器调整不精确。采用定位销控制器,或采用不需要进行精密调整的控制器;

(5) 接通控制器件顺序不对。对关键的顺序使用连锁装置,并保证功能控制器件按使用顺序排列;

(6) 读错仪表读数。要解决仪表读数清晰度问题,读数时要挪动身体于正前方;

(7) 用错控制器件。使用时不要用力过大,关键的控制器件不要相互离得很近或相似,控制器不要使用难以看懂的标记;

(8) 振动和噪声的刺激。采用噪声隔离措施,不能隔离时可采用非语言的命令形式,如开车时用规范的手势;

(9) 设备有缺陷,该工作时不工作;

(10) 没有遵照规程操作。操作程序不要冗长,不要太慢或太快;防止操作程序遗漏、混乱,有人提出在工作现场放程序录音。

3. 故障报告与纠正措施流程

故障报告、分析与纠正措施系统 (FRACAS, Failure Report, Analysis and Corrective Action System) 是一个装备质量问题报告闭环控制与分析系统,其目的是及时报告装备的各种质量问题,分析问题的原因,制定与实施有效的纠正措施,防止问题的再现,以改善与提高装备质量。典型的故障报告、分析与纠正措施系统工作流程如表 7.1 所列。

故障报告、分析与纠正措施系统是一个闭环系统,该系统不断循环运行,其关键是纠正措施的有效实施,以保障装备的可靠性不断得到增长。维修安全信息数据收集、分析与纠正措施系统的运行情况与之类似,其重点应立足于在装备使用和维修过程中发现故障、纠正故障,以实现维修安全的全系统全寿命的系统管理。因此,故障报告、分析与纠正措施系统不失为一种维修安全系统控制的有效工具和管理途径。

表 故障报告、分析与纠正措施系统工作流程

事件	工作人员	功 能
故障或正常 ↓	使用者 维修人员	- 识别问题,请求维修,解释事件发生 - 纠正问题,记录故障 - 检查纠正结果
故障报告 ↓	维修人员 质量人员	- 产生带有保障数据(时间、地点、设备等)的故障报告 - 保证故障装备完整性,以便准确地对故障装备进行检查控制
记录数据 ↓	可靠性与维修人员	记录所有的故障报告,核实故障数及表格记录,对故障进行分类(固有的、从属的、虚警)
故障评审 ↓	可靠性与维修人员 设计人员	- 确定故障趋势(如相同或类似零件的几种故障) - 对工作程序中的错误进行评审
故障分析 ↓	可靠性与维修人员 故障处理人员 质量人员	- 决定哪种零件、元器件将进行破坏性分析 - 进行故障分析以确定故障原因(例如元器件、零件本身的或外部的) - 检查零件的入厂检验数据
故障纠正 ↓	设计人员 供应商	- 必要的话,重新设计 - 新的零件或新的试验程序
试验后 数据评审	质量人员 可靠性与维修人员	- 评价入厂检验程序,检查重新设计 - 通过收集和评价试验后数据而形成闭环控制

6.4 维修的经济性分析

装备在使用过程中,由于受各种因素的影响,装备会受到不同程度的耗损而逐渐老化,简称为磨损。装备磨损会影响其战术技术性能,从而降低装备的使用价值和经济价值。装备管理部门通常采用修理、改装与更新三种方式来补偿磨损。装备使用的经济性分析是从经济性的角度研究确定采用何种补偿方式,寻求获得最佳效益的途径。第五章曾从经济性方面研究过维修间隔期和维修级别的确定。本章主要研究装备使用经济性决策。

6.4.1 磨损及其补偿

装备在使用或闲置过程中,会逐渐发生磨损,磨损研究是装备经济分析的基础。这里所说的磨损是广义的,含有磨损、老化、贬值、陈旧等。装备的磨损有两种形式,即有形磨损和无形磨损。

1. 有形磨损

有形磨损是指装备实体上的磨损,也叫物质磨损。有形磨损按产生原因又可分为两种类型。

(1) 使用磨损

装备在使用过程中,由于受到外力的作用,其零部件会发生摩擦、振动、疲劳等现象,以致使装备实体产生的磨损。通常表现为零部件原始尺寸的改变,公差配合性质的改变,精确度降低,功能衰退等。这是第一种有形磨损。

(2) 自然磨损

装备在闲置和运行过程中,由于受到种种自然力作用,出现的

腐蚀、生锈、老化、变质等现象。这是第二种有形磨损。

有形磨损的技术后果是装备的生产能力下降,使用价值降低,甚至完全丧失使用价值。有形磨损的经济后果是装备原始价值的部分降低,甚至完全贬值。

装备有形磨损,有一部分通过修理可以消除,属于能消除性的有形磨损;另一部分通过修理不能消除,属于不能消除性的有形磨损。

装备有形磨损程度的度量,应反映其价值损失,可以利用装备的实际价值损失,如修理费用 R 与装备的重置价值之比来表示

$$\alpha_p = \frac{R}{K_t} \quad (11.1)$$

式中 α_p ——装备有形磨损程度;
 K_t ——在确定装备磨损程度时,该类装备的重置价值;
 R ——修理费用。

式(11.1)中的分母 K_t 用装备的重置价值而不用原始价值,是因为修理费用和装备本身的价值必须用同一时期的费用方能进行比较。从经济的角度分析,装备的有形磨损程度不能超过 $\alpha_p = 1$ 的极限。

一般地说,如果采取技术措施,如应用表面工程技术,可以提高装备的耐久性,从而推迟有形磨损的发生,这在技术上总是有效的,经济上是有利的。但必须注意到,增加耐久性是有经济界限的,而这个界限取决于装备的无形磨损。

2.无形磨损

无形磨损是指装备实体形态上看不见的磨损,也叫做经济磨损。它是指由于生产技术与管理水平不断提高,使得生产相同装备的价格下降;或是由于科学技术的进步而出现性能更加完善、生产效率更高、原材料和能源消耗更少的新型装备,使原有的装备显得陈旧落后而贬值。无形磨损也可分为两种形式。

(1) 经济性无形磨损

由于相同结构装备重置价值的降低而带来的原有一价值的贬值,叫做经济性无形磨损,也称第一种无形磨损。

(2) 技术性无形磨损

由于出现性能更完善、结构更先进、生产效率更高的装备而使原有装备在技术上显得落后的贬值,叫做技术性无形磨损,也称第二种无形磨损。

在第一种无形磨损的情况下,虽然造成现有装备部分贬值的经济后果,但装备本身的技术特性和功能不受影响,装备的使用价值并未降低。因此,不会产生提前更换现有装备的问题。不过由于装备本身价值的降低,有可能出现修理费用高于装备本身价值的情况,从修理的角度分析,可能导致影响装备的使用期限。

在第二种无形磨损的情况下,不仅会使原有装备产生价值贬值的经济后果,而且还会造成原有装备的使用价值局部或全部丧失的技术后果。尽管原有装备还能正常工作,甚至还很“年轻”,但它的生产能力已低于社会单位产品的平均水平,使单位产品的成本高于社会平均成本。

在实际生产中,通常用价值损失来度量装备的无形磨损程度,其表达式为

$$\alpha_j = \frac{K_o - K_t}{K_o} \quad (11.2)$$

式中 α_j ——装备无形磨损程度;

K_o ——装备的原始价值;

K_t ——考虑到第一、第二种无形磨损时装备的重置价值。

3.综合磨损

综合磨损是指综合考虑装备的有形磨损和无形磨损,是双重的、综合的磨损。实际上,不存在独立的、单纯的有形或无形磨损,它们是同时并存的,不能截然分开的。

有了装备的有形磨损和无形磨损的度量指标,就可以计算综合磨损程度的指标。

$$\alpha_m = 1 - (1 - \alpha_p)(1 - \alpha_j) \quad (11.3)$$

式中 α_m ——综合磨损程度(用装备原始价值的比率表示);

α_p ——有形磨损程度;

α_j ——无形磨损程度。

装备在两种磨损作用下的剩余价值 K ,可用下式计算

$$K = (1 - \alpha_m)K_o \quad (11.4)$$

整理后得

$$K = (1 - \alpha_m)K_o = [1 - 1 + (1 - \alpha_p)(1 - \alpha_j)]K_o$$

$$= \left(1 - \frac{R}{K_i}\right) \left(1 - 1 + \frac{K_i}{K_o}\right) K_o = K_i - R$$

即

$$K = K_i - R \quad (11.5)$$

从式(11.5)看出,装备的剩余价值 K 等于重置价值 K_i 减去修理费用 R 。

例 11.1 某装备的原始价值 $K_o = 10000$ 元,当前需要修理,其费用 $R = 3000$ 元,若该种装备的重置价值 $K_i = 7000$ 元,求其综合磨损程度及其剩余价值。

解:

$$\alpha_p = \frac{R}{K_i} = \frac{3000}{7000} = 0.43$$

$$\alpha_j = 1 - \frac{K_i}{K_o} = 1 - \frac{7000}{10000} = 0.3$$

$$\alpha_m = 1 - (1 - \alpha_p)(1 - \alpha_j) = 1 - (1 - 0.43)(1 - 0.3) = 0.6$$

$$K = K_i - R = 7000 - 3000 = 4000 \text{ 元}$$

即该装备的磨损程度为 60%,其剩余价值为 4000 元。

4. 磨损补偿

装备在其服役期内,同时会遭受两种磨损,如果继续使用,首

先影响装备使用功能的实现,影响战训任务;其次使装备的使用维修费用迅速增加。故此,为了保证装备的正常运行,使其处于完好的技术状态,需要及时对装备的各种磨损进行相应的补偿。一般的补偿方法有三种:

(1) 装备的修理

它是为恢复装备的原有精度、性能和完好状态,对其主要构成部分和所有已磨损机件进行更换和修理的一系列工作。装备的修理按维修工作量的大小一般分为日常保养、小修、中修和大修等几种形式。但不同装备又有具体划分。

(2) 装备的现代化改装

它是为了改善装备本身的性能和用途,对装备进行技术上革新和结构上的改进,使之达到或局部达到先进装备的水平。

(3) 装备更新

用全新的装备来代替旧装备。更新形式有两种,一种是原型更换,即用结构、性能相同的新装备代替退役装备,它只补偿有形磨损;另一种是技术的更换,即用结构更合理、效率更高、性能更先进的新型设备来更换旧装备。

这三种方式在补偿设备磨损上是并存的,需要根据磨损的性质(哪类磨损)、程度不同,采取不同补偿方式。这三种形式也称为广义的更新。设备磨损形式及其补偿的三种方式的相互关系如图 12.1 所示。

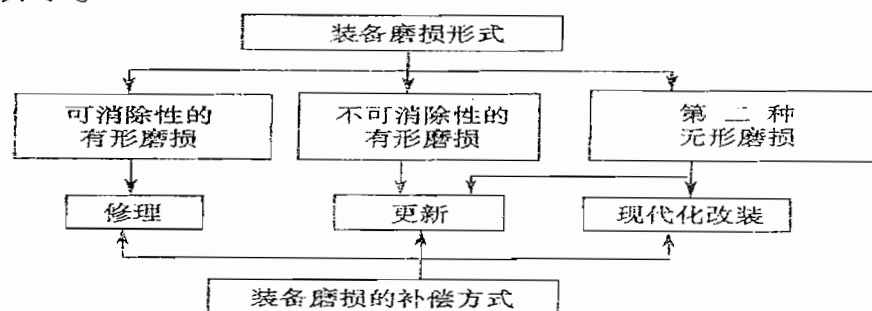


图 12.1 装备磨损形式及其补偿的三种方式的相互关系

5. 磨损补偿的维修技术——表面工程技术

装备物质上的有形磨损和技术上的无形磨损均可通过磨损补偿的维修技术——表面工程技术得到补偿。表面工程是应用各种表面涂层技术和表面改性技术来提高产品质量的工程。对发生在装备零部件表面的磨损、腐蚀、疲劳等有形磨损,通过表面处理、表面加工、表面强化,可以修复表面磨损状况,局部地补偿有形磨损;同时,可以改善技术性能,提高耐用性和可靠性,从而局部地补偿第二种无形磨损。

采用表面工程技术对装备的磨损,不仅能有效地补偿,使其恢复如新,而且能够提高其耐高温、耐磨损、耐腐蚀、抗疲劳、防辐射以及导电、导磁等各种性能,达到恢复使用、延长寿命、节约费用之目的,是装备修理和现代化改装的手段。

6.4.2 飞机使用的经济决策

装备的更新是消除有形磨损和无形磨损的重要手段,决定一台装备是否更新取决于两个条件:一是该装备在性能、技术上是否还能满足作战训练要求;二是继续使用该装备在经济上是否合理。装备更新根据不同情况,可有不同的选择方法,而为达到同一要求的可行更新方案可能会很多。在磨损的三种补偿形式中,装备的现

代化改装有别于一般设备,它一般首先是根据装备技术发展的需要来确定,其次再进行经济性分析。因此,本节仅对装备的大修理和更新两种补偿方式进行经济性分析。

1. 经济分析的方法(费用—效能法)

费用—效能法,亦称效费比法。它是根据所获得的效能与所消耗的费用两个方面来综合评价技术经济性的。当收益难以用金钱来衡量时,常用此法,其表达式为

$$CE = \frac{E}{C} \quad (11.11)$$

式中 CE ——效费比,所获得的效能与所消耗的费用之比;

C ——费用;

E ——效能,它是在规定的条件下设备达到规定使用目标的能力,也就是设备的使用价值。

对武器装备来说,效能就是装备完成任务的能力。武器装备要完成任务,至少需要回答三个问题:

① 需要执行任务时,能随时出动吗?——可用性;

② 出动以后,在完成任务过程中能继续工作吗?——可信性;

③ 能击中目标吗?——固有能力的。

所以效能是可用性、可信性和固有能力的函数。可用性、可信性与可靠性、维修性及保障性的关系密切;固有能力的包含了装备的性能、发现目标能力、攻防能力和生存能力等。

对一个只有工作和故障两种状态的装备,效能通常用下式表达

$$E = A_o DC \quad (11.12)$$

式中 E ——装备效能;

A_o ——装备的可用性;

D ——装备的可信性;

C ——装备的固有能力的。

例如 有 10 架轰炸机,其中 7 架能随时出动,可用性为 $7/10$;这 7 架飞机中,有 5 架能可靠地飞到目的地上空,可信性为 $5/7$;而这 5 架飞机中,又只有 3 架的炸弹能击中目标,固有能力的为 $3/5$ 。把这 10 架飞机作为一个系统来看,其效能

$$E = \frac{7}{10} \times \frac{5}{7} \times \frac{3}{5} = 0.3$$

2. 飞机更新方案的选择

(1) 确定飞机大修经济界限的方法

装备大修是通过全面调整、修复或更换磨损零部件的办法使装备恢复全部或接近全部的性能。但如果一次大修理的费用超过该种装备的制造成本,这种修理显然是不合算的。因此,确定装备大修理的经济界限是

$$R < K_n - L \quad (11.13)$$

式中 R ——一次大修理费用;
 K_n ——当时该装备采购价值(新装备价值);
 L ——装备残值。

如果装备在大修理之后,战术技术性能与同种新装备没有区别的话,则式(11.13)对衡量大修理的经济性是合理的。但实际情况未必如此,装备大修理之后,常常缩短了到下次大修理的间隔期,同时修理后的装备与新装备相比,故障多、停机时间长、使用维修费用增加,对装备完好有影响。所以,只有大修理后使用该装备使用维修成本 C 在任何情况下都不超过用相同新装备使用维修成本 C' 时,即

$$C < C' \quad (11.14)$$

大修理在经济上才是合算的。

以上分析表明,装备大修理的经济界限应同时满足式(11.13)和式(11.14)两个条件,否则就应该报废旧装备。

(2) 飞机原型更新的决策分析

装备更新有两种形式,原型更新和新型更新。但因装备使用用途的特殊性,在进行装备的更新方式选择上,在此仅讨论原型更新方式。一般来说,属于下列情况之一的装备应当报废,购置新装备。

(1) 经过分析预测,大修后装备性能和可靠性等指标不满足使用要求的;

(2) 大修后虽能恢复装备的原有性能、完好状态,但不如更换新装备更经济的;

(3) 装备老化,技术性能落后,耗能高,效率低,使用费用高,仅改装仍不经济的;

(4) 先天质量差,故障多,维修费用太高,役龄虽短但无修复价值的;

(5) 装备已淘汰,配件供应困难,不易解决的。

从经济角度考虑,装备经济寿命是决定装备更新时机的重要依据。

(3)飞机更新方案比较选择(综合比较法)

装备的经济性评价,不仅看投资的多少,还要看使用装备以后,所能完成任务的情况。因此,方案评价时要在考虑分析经济性能同时综合考虑分析其他一些能体现装备效能的指标。

所以,对于装备维修方案决策来说与装备设计论证一样,属于多目标决策,经济性指标只是其中的一个重要部分而已。对多目标的集合体的评价,建议采用“多目标加权评价法”。下面对这一方法的要点作简要介绍。

设: $f_i(x)$ 为目标,对每个目标分别按其在装备服役过程中重要性程度给以相应的加权数 ω_i ,越是重要的目标其加权数越大,然后把加权的目标得分相加,得分高者为优。这种方法可以把目标的定性方面和定量方面结合起来,即把目标的性质方面的指标用直观的数量表达出来。其表达式可归纳为

$$U(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i f_i(x) \quad (11.18)$$

下面举例说明这一方法的具体应用。在表 11.7 中列出了某设备的三个维修决策方案(第 I 方案是更换相同新设备,第 II 方案是大修理,第 III 方案是继续使用原装备)。每个方案都有四个评价目标,假设目标 A 表示战斗性,目标 B 表示可靠性,目标 C 表示机动性,目标 D 表示经济性,各评价目标根据它自身在设备服役中的重要程度,配给一个最高分(35 分、25 分、20 分、20 分)。总分为 100 分。那么,显然目标 A、B、C、D 的最高加权数分别为 0.35、0.25、0.20、0.20。每个目标不同方案将获得不同的加权数,在这一目标上表现最好的方案将得最高分,但不应超过该目标规定的最高权数。把方案的四个目标加权数累计求和,再乘以 100,即可得出该方案的得分总数。

表 方案加权评价表

评价数目	最高分数	最高加权	方 案 加 权		
			更 换	大 修	保 持
A(战斗性)	35	0.35	0.30	0.20	0.20
B(可靠性)	25	0.25	0.20	0.20	0.20
C(机动性)	20	0.20	0.20	0.20	0.20
D(经济性)	20	0.20	0.15	0.20	0.10
总 计	100	1.00	0.85	0.80	0.70

那么方案 I 得分 85 分(100×0.85),方案 II 得分 80 分,方案 III 得分 70 分。看来综合各种方案的各种目标,更换方案得分最高。

6.4.3 降低维修成本的对策

航空器的维修成本指的是航空公司为保证航空器的持续适航性，对航空器进行维护、修理和改装等工作所消耗的成本，即航空公司维修与工程部门的成本消耗。航空器维修成本与航空器经济性、运营环境、劳动力成本、维修管理等因素有关。如何降低维修成本、提高维修质量是世界各个航空公司所面临的共同问题。

1. 飞机的运营成本

下面是刊登在《航空运输世界》和《航空周刊与太空技术》上的世界上某些航空公司的运营成本的情况。

1. 宽体客机的维修成本

下面分析两种型号宽体客机的维修成本，波音 747 和 767，它们分别于 1970 年、1982 年投入运营。波音 747 目前是远程航班的主要机型，它是在 70 年代石油价格上涨以前设计的；波音 767 是继波音 707 之后的中程客机，它的设计时间恰逢石油价格的最高峰，当时的设计目的就是迎合航空公司对低成本经营的需求。

表 1-10 1986 年美国主要航空公司中波音 747 的运营成本
(西北、泛美、环球、联合)

	成本 (\$ / 航班小时)	百分比
机组成本	787	17%
油料消耗	2 030	44%
折旧与租金	672	14%
维护费用	1 117	24%
其他	36	1%
航班小时成本总和	4 642	100%

表 1-11 1986 年美国主要航空公司中波音 767 的运营成本
(美利坚、三角、TWA、联合)

	成本 (\$ / 航班小时)	百分比
机组成本	504	23%
油料消耗	720	32%
折旧与租金	596	27%
维护费用	377	17%
其他	31	1%
航班小时成本总和	2 228	100%

由表 1-10 到 1-11 可以看出：

波音 747 飞机的维修成本占每航班小时运营成本的 25%，而波音 767 则占 17%，这一现象可能是由于 747 的服役时间较长，需要更多的大修所致，从图中也可以看出，747 的折旧成本在总成本中的份额比 767 要低，这是由于不同的历史时期通货膨胀率不同所致。

在波音 747 飞机的总运营成本中，油料消耗占据着相当大的比重，这一点对于大多数的老式飞机也是如此；而对于波音 767 飞机，它的油料消耗在总运营成本中的比重只比其他开支略高一点。

在统计不同航空公司的各项运营成本过程中，对于同类的开支，各个航空公司的数据存在着很大的差异，这里面有核算方面的原因，同时与各航空公司机队的平均年龄以及各公司的实际运营策略有关。

在过去的十几年中，油料价格在 1986 年曾经到达过一个高峰，随后急剧下降了接近 40%。到了 1990 年，中东的石油危机导致了又一次油价上涨，随后又有所回落。

现在，我们假定每个航空公司燃油价格是相同的，那么，另外两项成本——机组成本和维修成本将直接关系到航空器的直接运营成本。其中的机组成本受到培训成本和劳动力市场的因素影响较大，一般很难压缩；而在激烈的航空运输市场中，各个承运人的票价和输入是基本相等的，航空公司能否降低维修成本，成为航空公司取得较高利润的关键。

2. 窄体客机的运营成本

下面是一些在世界航空业广泛应用的窄体客机的统计数字。在窄体客机中，60 年代的波音 727-200 是最老的机型，波音 757 或者麦道-80 作为较新的窄体机型或者说是派生型，在 80 年代进入市场。

表 窄体客机的运营成本项目比例

	B757-200	B727-200	MD-80
机组成本	23%	25%	22%
燃油、税收成本	24%	36%	29%
飞机结构维修	6%	9%	8%
发动机维修	13%	7%	7%
维护设施成本	4%	9%	5%
航空器折旧和租金	29%	14%	28%

表 窄体客机的直接运营成本数值（\$ / 航班小时）

	B757-200	B727-200	MD-80
机组成本	479	466	316
燃油、税收成本	507	651	447
飞机结构维修	119	167	119
发动机维修	266	120	112
维护设施成本	90	158	77
航空器折旧和租金	619	259	428
其他	31	8	10
航空器总运营成本	2 111	1 829	1 539

在上述的表中，航空器运营成本的单位采用美分/座位·公里表示，这种方法有利于分析航空公司的收入，因为公司收入的计量单位也是美分/座位·公里。从有关数据中可以看出：

- 窄体客机维修成本，包括直接维修和改装成本，接近总运营成本的 20%~25%，较老的机型（波音 727-200）所占的比例还要高。

- 虽然波音 757 可以节省燃油，但是它的发动机维修成本较高，总的运营成本并未能降低，图表中的波音 757 安装的发动机包括罗·罗公司和普·惠公司的产品。

· 由于波音 757 可以容纳较多的乘客，同时，它先进的程序使得用两名机组成员就可驾驶，因此波音 757 的机组成本明显低于波音 727。

总之，无论是任何一种型号的航空器，航空公司在维修方面的投资都在运营成本中占有相当的比重，认识分析维修成本的影响因素，采取相应措施来降低成本是当今民航业的重要课题之一。

3. 降低维修成本的对策

从以上的统计数字和分析可以看出，航空器的维修成本在航空公司的运营成本中占有较大规模的份额，如何在保证维修质量和完成商业飞行的条件下降低维修成本是各个航空公司面临的问题。影响航空器维修成本的因素很多，我们可以从以下几个方面进行研究：

■ 实施可靠性管理，优化维修方案

航空公司作为航空器适航性的责任者，在航空器投入运营之日起，就应当按照本公司的维修方案实施航空器的维修工作。航空器的维修方案是具体地对某一架航空器实施维修工作的指导性技术文件，是维修保障设计的一项重要内容。维修方案作为指导航空器维修的工程文件，在航空公司的实际运营过程中应当不断优化、改进，合理地设置维修项目和维修间隔，在保证航空器适航性的同时，最大限度地降低维修成本。

开发某机型的维修方案是一项繁琐而极富科学性的工作，尤其是对于一些新型飞机更是如此，维修方案的科学性直接关系到航空器的维修成本和可利用率，最终直接影响到航空公司的运营成本。

在开发维修方案的过程中，航空公司应当充分利用制造厂商提供的一系列支持和相关的文献，例如航空器的“维修计划文件(MPD)”等。同时，航空公司还可以借鉴、参照其他航空公司在运营这种机型方面的经验，以及适航当局的某些通告和适航指令等文件，合理地制定维修方案。

在最近几十年，无论航空公司采取何种维修方案对航空器进行维修，总是和当时的物质条件有关，即同航空技术的发展水平

有关。早期的飞机是非常简单的，这种简单飞机发生故障的可能性是比较小的，总的可靠度比较高。不过，这种简单飞机是没有冗余度保护的，一旦发生故障，就会造成极其严重的后果，于是，人们便对飞机及其零部件产生了“零部件要工作，工作必然磨损，磨损引起故障，故障危及安全”这样一种直观的认识。

与此同时，还形成了飞机预防维修的指导思想和一套做法。由于认为航空器的可靠性与其使用时间有着直接的关系，定时维修就成为预防维修的唯一方式。由于没有先进的检测手段可供使用，主要靠直观查看，为了进行这种检查就必须将零部件进行分解，因而分解检查也成为预防维修的唯一方法。为了控制个别零部件的

可靠性，需要经常检查外观情况，分解零部件来检查其组成零件的状况，并进行更换和修理；为了控制整个航空器的可靠性，就必须规定一个“翻修寿命”，到寿将全机分解，逐个零件进行翻新修理。就这样按使用时间规定了一整套定期检查、修理和翻修的制度。

从世界各国航空维修发展的历史来看，尽管各国航空器的发展水平和维修水平不同，维修经验和知识的积累程度也有差异，但是这种传统的预防维修思想却是共同的。它统治了航空维修界达数十年之久，直到现代航空维修思想确立之后，才逐渐退出历史舞台。

到了本世纪的后半期，在航空器方面，飞机设计有了改进，可靠性和维修性都有提高。特别是由于冗余技术的采用，飞机的安全性与可靠性之间的联系大大削弱，使飞行安全基本上有了保障。在维修手段方面，检测设备有了很大的发展，磁粉、着色、荧光和 X 光等无损探伤手段已经用于飞机维修，电子计算机也开始在飞机维修管理中应用。加之，民用航空器价格和运营成本过高，使得维修的经济性也已经提到议事日程，迫使人们从经济效益的角度来思考既定维修方针，探讨上述各个方面的变化给飞机维修带来的影响。

现代航空维修工作，是以可靠性为中心的。航空公司制定的维修方案是建立在综合分析航空器固有可靠性的基础上的，根据不同零部件的不同故障模式和后果，而采取不同维修任务和维修间隔，即采取最经济有效的维修，对航空器的可靠性实施最优控制。

航空公司在实际运营过程中，通过实施可靠性管理，对航空器各个系统的性能进行监控，及时调整某些系统的维修项目和维修间隔，使得航空器维修工作既能够保证飞行安全又能最大限度地降低维修成本，达到降低维修成本的目的。

■ 加强维修管理，通过缩短维修周期、提高零部件可靠性来降低库存成本

航空器维修单位的生产效率指的是单位时间圆满完成维修任务的能力。维修单位提高生产效率，缩短维修周期对于降低维修成本起着重要作用。对航空器进行维修，缩短维修周期主要体现在飞机大修、部件翻修和减少人力消耗方面。

现代航空器的成本很高，例如某些配置的波音 777 飞机售价已经超过了 1.6 亿美元，某些配置的波音 747-400 已经超过了 1.8 亿美元。航空公司在通过某种方式购买或者租赁这些航空器之后，必须对其加以充分利用，以便充分发挥它的经济效益。加强航空器的航线维护和高级检修管理，最大限度地缩短停场时间，无疑为航空公司提供了更多的运力；相反，维修工作中的任何延误和拖延都会直接影响航空器的商业飞行任务，最终影响到航空器的利用率。以某些航线管理工作优良的航空公司为例，经营支线的波音 737 飞机日利用率超过 15 小时；更有某些航空公司进行波音 747 的 D 检完成周期缩短到 23 天，从而大大降低停场时间，降低了飞机的运营成本。

航空公司维修工程部门承担的维修工作除了飞机的航线维修和高级检修之外，还要承担大量周转件、可修理件的维修工作，加强对这些维修工作的管理对于提高部件的周转速度、降低库存成

本起着重要作用。

一般来讲，一个部件在一个维修周期的过程可以由图 1-3 所示：



图 1-3 部件的维修周期

从上面整个部件的流动过程可以看出，航空器零部件在整个维修周期中，通过提高飞机可靠性、延长部件的使用时间就可以达到降低周转件数量的目的，从而减少航材的资金占用；同样，通过缩短内场翻修时间，加快航材的周转也可以降低航材储备，从而降低维修成本。

另外，航材零部件使用寿命的提高相对减少了维修工作量，这样可以为维修工程部门节省大量的人力及设备成本。

▲ 航空公司间实施合作维修是降低维修成本的一条重要途径

航空运输业是一个资金高度密集的行业，世界各个航空公司在航空维修方面的投资规模巨大，投资范围包括维修人员的培训、建设大量的维修设施、占用大量资金的航材备件等等，解决这些问题的途径之一是各个航空公司进行航空器的联合维修。航空器合作维修指的是某些航空公司结成联盟，共同承担某型号航空器的维修工作，每个航空公司承担特定的维修项目，实现一定程度上的航材共享，达到互利互惠的目的。

在欧洲，实现航空器合作维修著名的例子有 ATLAS 集团和 KSSU 集团。ATLAS 集团包括法国航空公司、意大利航空公司、西班牙航空公司、汉莎航空公司、比利时航空公司，KSSU 集团包括荷兰皇家航空公司、SAS、瑞士航空公司和 UTA。

在 70 年代，越来越多的宽体客机投入运营，例如波音 747、DC-10 等，航空公司对这些型号的客机进行维修需要大量的投资

来建立相应的维修设施，很多航空公司，包括很多大型航空公司都不能承担这些维修项目。在这种情况下，某些航空公司之间便需求某些联合，于是，出现了一系列的合作维修机构。

ATLAS 各个成员航空公司在购买 DC-10 飞机之前就对飞机驾驶舱的布局、培训标准等问题达成了协议。其他飞机上的非关键设备则由用户具体指定，以便于各个成员公司可以共同分享零部件供应和维修工作，这样就实现了将近 3/4 的主要可修件在整个维修组织中是相同的，为各个航空公司降低备件库存成本奠定了基础。

在合作维修组织中，各个成员航空公司共同分担航空器的维修工作，例如有的承担某种型号的机体结构大修工作，有的承担某种型号或某个厂家的发动机大修，有的则承担电气和机械设备的修理和高级检修工作等等。这样一个公司就有可能为其他航空公司维修飞机，同时，由于飞机的大修或者发动机的大修需要专门的设备、设施，这种分工为航空公司节约了大量的资金。航空器及其零部件的运输并不是一个主要问题，因为各个维修基地之间的距离一般在 1 000 公里之内，另外，航空器的定期检修和发动机的更换周期一般都是比较长的。

虽然合作维修方式在欧洲比较成功，但是这种维修方式在世界其他地区并没有得到广泛的应用，产生这种现象的原因在于：

- 反托拉斯法（美国）；
- 经济的不稳定或者汇率时常变动、汇率管制；
- 关税清算问题或者其他双边障碍；
- 地理问题；
- 成员的维修技术水平问题。

非洲东部航空公司是一个典型的失败例子，这是一个由肯尼亚、坦桑尼亚、乌干达合资兴建的合资公司，其中肯尼亚的收益较大，其他两个成员未能达到预期的收益。另外，再加上外汇、资金的拖欠导致了该合资公司的解体。另外一个地区性航空器合作

种重要方法。目前，各个维修单位在某些项目的维修合同中可能有某些保修承诺，特别是制造人维修单位在这方面的承诺更多，航空公司应当充分利用这些权利，对于一些在承诺范围内的重复故障、系统失效等问题以及造成不良的影响，应当加强理赔工作，降低本公司的损失。

飞机维修练习题1

班号

学号

姓名

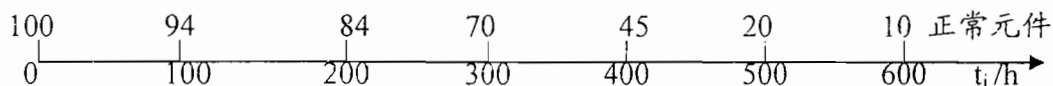
成绩

●笔答题

- 1.什么叫维修？简述飞机维修的重要作用。
- 2.比较功能故障与潜在故障的含义。
- 3.在民用航空器维修计划中把维修工作依内容划分为几类（级）？各需完成哪些工作内容？
- 4.航空维修的主要内容是什么？
- 5.可靠性指的是什么？如何理解可靠性概念中的“三个规定”？

6.在某种航空产品中取 200 个样品进行试验，第 1 个小时内有 8 个故障，第 2 个小时内有 2 个故障，第 3 个小时内有 5 个故障，第 4、第 5 个小时内各有 4 个故障。试估计产品在 1h、2 h、3 h、4 h、5 h 时的可靠度。

7.对某种航空元件 100 个在相同条件下进行老化试验，每工作 100 h 统计一次，得结果如下图，试估计该产品在各检测点的可靠度（列表），并画出 $R(t)$ 曲线图。当该元件的可靠度为 0.8 时，请估计相应的时间是多少。



8.对 50 件已经损坏的飞机附件进行维修，在第 1 个小时内修复了 7 件，在第 2 个小时内修复了 10 件，在第 3 个小时内修复了 6 件，在第 4、第 5 个小时内各修复了 9 件。试估计该产品在维修满 5h 时的维修度。

9.说明 MSG-3 的主要特点。

10.举例说明潜在故障与隐蔽功能故障的区别。

11.简述以可靠性为中心的维修理论的作用。

●思考题

- 12.随着高新技术的快速发展,维修发生了哪些变化?
- 13.航空维修有哪三种方式,它们各有什么特点?
- 14.简述航空维修的特点。
- 15.什么是航空维修理论,它包括哪些内容?
- 16.什么是可靠度函数和故障分布函数?二者之间是什么关系?
- 17.飞机可靠性的指标有哪些?
- 18.什么是飞机的维修性?简述维修性设计的主要内容。
- 19.解释以下代号: RCM MSG-1 MSG-2 MSG-3
- 20.如何辩证的对待定时维修?
- 21.为什么说“要提高飞机的固有可靠性水平,只有重新设计”?

注:笔答题、思考题同等重要(第1—2章)

飞机维修练习题 2

班号

学号

姓名

成绩

● 笔答题

1. 什么是飞机维修大纲？制定飞机维修大纲的目的是什么？

2. 预防性维修大纲一般应包括哪些内容？

3. 什么是维修方案？它与维修大纲有什么区别？

4. 用 MSG-2 逻辑决断图分析确定以下项目的维修方式。（只需仿照表 2-1 列表）
 - (1) 某歼击机活动座舱盖。（提示：座舱盖曾多次空中飞掉）
 - (2) 某舰船方向舵的枢轴轴承。（提示：故障原因是轴承磨损）

5.在系统/设备维修分析中确定“重要功能产品（项目）”的标准是什么？

6.飞机结构损伤分为哪三类？各类损伤是怎样产生的？

7.什么是航空装备检测？航空装备检测的基本任务是什么？

8.什么是虚拟仪器技术？它有什么特点？

9.BIT 是一种什么技术，使用 BIT 有什么作用？

10.解释“故障诊断”中“诊”和“断”的含义。

11.简述诊断液压系统主机故障的顺序步骤。

12.在对数字系统进行故障诊断时，测试器要完成哪几项工作？

13.简述涡电流法的工作原理，并举例说明它的应用。

14.图示并说明“远程故障诊断”系统的工作原理

15.分析航空装备中“集成块”常见的故障模式和产生机理。

16.解释说明故障分析中常用的“外推法”。

17.简述故障诊断的程序。

●思考题

- 1.制定飞机维修大纲的方法有哪些？
- 2.什么是“破损安全结构”？举例说明。
- 3.在飞机结构维修分析中“结构项目”分为哪两种？如何确定重要结构项目？
- 4.简述飞机“区域检查”的内容。（即区域检查要求）
- 5.FAA 对小飞机的检查方案要求中，规定了哪三种检查形式？
- 6.什么是老龄飞机？通过对老龄飞机的研究，结构工作组专家提出了哪些与维修有关的建议？
- 7.简述自动检测设备的功能。
- 8.说明飞机的压缩机产生“旋转失速”的原理。
- 9.简述超声波诊断法的工作原理。
- 10.解释故障率浴盆曲线的意义、作用和地位，说明它与美国联合航空公司提出的故障率曲线（6种）的关系。

注：笔答题、思考题同等重要（第3—4章）

飞机维修练习题3

班号

学号

姓名

成绩

●笔答题

1.什么是软件故障？软件故障是怎样形成的？（简答）

2. 什么是软件维护？软件维护的主要内容有哪些？

3.按软件预期的目的，软件维护分为哪几类？

4.什么是软件的可维护性？它具体包括哪些内容？

5.为什么说区分软件、硬件故障引起的系统故障是维修的关键和先决条件？

6.分析维修质量波动性的“偶然性原因” 和“系统性原因”的特征。

7.依据下表数据，作出某电子产品不良项目（A、B、C、其它）的帕累托图，并找出改进该电子产品的关键因素。

表1 不良项目统计表

不良项目	不良数目	百分率	累计百分率
A	10	43%	43%
B	5	22%	65%
C	3	13%	78%
其他	5	22%	100%
合计	23	100%	—

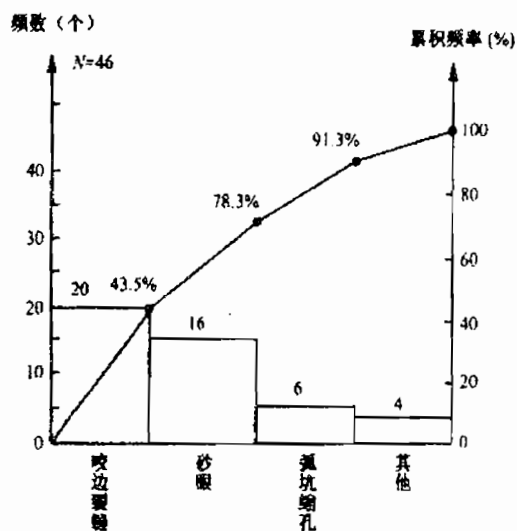
7 题表

9
[
:
:]

10
价

15210807857
15210804202

8.依据某飞机维修厂的焊接缺陷帕累托图，分析指出造成缺陷的主要因素。



8 题图 (帕累托图)

9.下表为某液压泵出油统计数据，作出 X-Rs 控制图，并分析其工作稳定性。

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	合计	均值
出油量	24	25	33	36	33.5	30	24.5	28		
移动极差										

10.某装备原始价值 12000 圆，目前需要修理，修理费用 2000 圆。若该装备重购价 10000 圆，求其综合磨损程度及剩余价值。

11.按照综合比较法，依下表评价飞机的更新方案

评价数目	最高得分	最高加权	方案加权		
			I 更换	II 大修	III 保持
油 耗	40	0.4	0.30	0.20	0.30
可靠性	30	0.3	0.20	0.20	0.20
维修费	30	0.3	0.20	0.20	0.25
总计	100	1.00			

● 思考题

- 1.软件维护方案包括哪些内容？
- 2.影响软可维护性的基本因素是什么？（简答）
- 3.简述软件维护的过程。
- 4.什么是全面质量管理？飞机维修的全面质量管理有什么特点？
- 5.从系统的观点来看，哪些因素会导致产生维修差错？
- 6.飞机大修的经济界限是什么？
- 7.在什么情况下飞机应该报废，购置新飞机。
- 8.航空公司采用哪些办法可以降低维修成本？
- 9.如何能够最大限度地减少飞机维修差错？
- 10 维修差错有哪几种类型？解释其内容。

注：笔答题、思考题同等重要（第5—6章）