

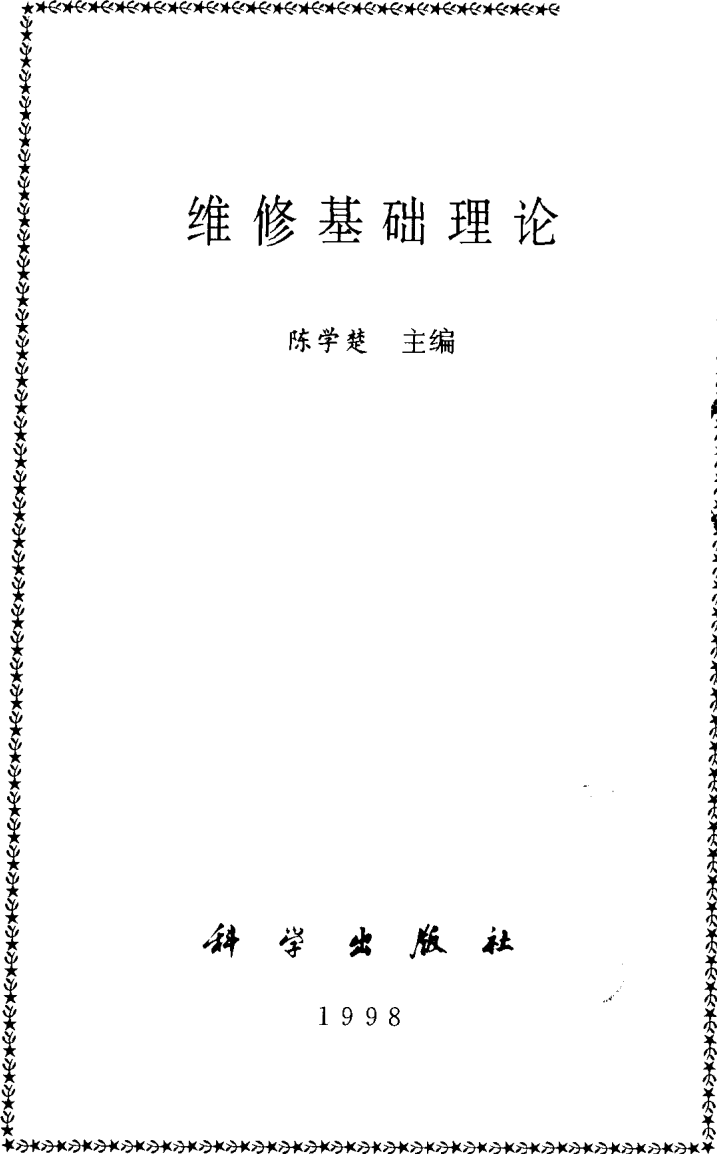
# 维修 基础理论

陈学楚 主编

---

科学出版社





# 维修基础理论

陈学楚 主编

科学出版社

1998

## 内 容 简 介

本书系统地介绍设备维修的一般性基础理论。主要内容包括:以可靠性为中心维修的理论,维修间隔期的确定,结构维修,维修质量控制,故障诊断原理,控制系统维修有序性及设备的技术经济分析等。

本书的特点是,注重通用的、一般性的维修理论,不涉及个性的维修内容;注意理论与实践的结合;数学分析简明扼要,突出使用特点,用维修理论指导维修实践。

本书可供从事设备研制、设备管理和维修的科技人员以及装备管理人员阅读,也可作为大专院校的可靠性、管理等专业师生的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

维修基础理论/陈学楚主编. -北京:科学出版社,  
1998. 12

ISBN 7-03-006812-2

I. 维… II. 陈… III. 设备-维修 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 26632 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

北 京 双 青 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

|                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| 1998 年 12 月 第 一 版     | 开本:850×1168 1/32 |
| 1998 年 12 月 第 一 次 印 刷 | 印张:7 %           |
| 印数:1-1 700            | 字数:190 000       |

定 价:11.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

# 序

设备是现代化企业生产的主要工具,是创造物质财富的重要手段.设备发生故障时,不仅会因停产造成损失,而且会危及设备、环境和人身安全.设备的正常运转,离不开维修,即使是高度现代化的机器人和航天飞机也离不开维修.为了预防故障的发生,也需要进行维修.但在维修过程中,常常出现不是维修“不足”,就是维修“过剩”的情况.怎样维修才算正确,怎样才能有效地预防故障,这是企业的设备拥有者所关注的问题.

本世纪50年代以前,维修基本上是一门技艺,缺乏系统的理论指导,当时采用的是定时维修的方式.随着设备的大型化、自动化和智能化程度的提高,维修费用急剧上升,设备可用率不断下降,原有的维修方式已无法适应客观的需求.从1960年起,美国民航界运用现代科学技术,对飞机维修的基本规律作了探索,到60年代后期,首次提出以可靠性为中心的维修理论,并据此改革单一的定时维修方式,突破传统的做法,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理论认为,一切维修活动归根到底都是为了保持和恢复设备的可靠性.根据设备的可靠性状况,以最少的维修资源消耗,用逻辑决断分析法来确定所需的维修内容、维修类型、维修间隔期和维修级别,制定出预防性维修大纲,从而达到优化维修的目的.在这种理论指导下进行设备维修,既能改善维修质量,提高设备可用率,保障使用安全,又可节约维修费用.因此许多国家已将此理论广泛应用于军事装备和民用设备.

1987年7月,我国发布了《全民所有制工业交通企业设备管理条例》,该条例是在总结国内外设备管理与维修理论的基础上制定的,它对加强和规范企业的设备管理工作起到了重要的指导作

用.

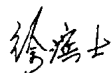
陈学楚等撰写的《维修基础理论》一书,依据理论和实践相结合的原则,详细阐述了以可靠性为中心的维修理论,突出了设备的使用和维修特色.相信它的出版,对传统维修观念的转变和新的维修理论的应用,对设备管理的改革将会起积极的推动作用,从而有利于提高设备的工作效率和企业的经济效益.

中国工程院院士

中国设备管理协会副会长

全军装备维修表面工程研究中心主任

装甲兵工程学院教授



1998年8月

## 前 言

设备的维修离不开维修理论的指导. 维修理论的核心内容是以可靠性为中心的维修. 60年代后期以来,许多国家应用这种理论指导维修,收效显著. 为了吸收这些有益的经验,我们编著了《维修基础理论》一书,书中介绍了指导设备维修的一般性基础理论,希望它对提高企业经济效益有所帮助.

本书依据理论与实践相结合的原则阐述维修理论,由于维修理论涉及众多的专业和学科知识,读者可以根据需要选读其中有关内容,也可跳过有关数学分析部分,直接阅读实际应用的内容.

参加本书编著的人员有陈学楚(第一、二、三、五、七、八章)、董蕙茹(第四章)、吴松林(第六章). 全书由陈学楚主编. 由于作者水平有限,错漏之处难免,希望读者指正.

本书在编著过程中,得到李意起、何国伟、甘茂治、王乃鹏、王立群、陈云翔、寇雅楠、郑东良诸位专家、教授的大力支持,特此致谢.

编著者

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第一章 绪论</b> .....            | 1   |
| 1.1 维修和维理论 .....               | 1   |
| 1.2 可用性及其影响因素.....             | 11  |
| 1.3 故障过程和故障率曲线.....            | 19  |
| 参考文献 .....                     | 37  |
| <b>第二章 以可靠性为中心的维理论</b> .....   | 39  |
| 2.1 以可靠性为中心维理论的内容.....         | 39  |
| 2.2 以可靠性为中心维修的数学分析.....        | 61  |
| 2.3 制订预防性维修大纲简介.....           | 70  |
| 参考文献 .....                     | 75  |
| <b>第三章 设备预防性维修间隔期的确定</b> ..... | 77  |
| 3.1 隐患检测间隔期.....               | 77  |
| 3.2 视情维修间隔期.....               | 81  |
| 3.3 定时维修间隔期.....               | 86  |
| 参考文献 .....                     | 99  |
| <b>第四章 结构寿命与结构维修</b> .....     | 100 |
| 4.1 结构设计原理与结构寿命 .....          | 100 |
| 4.2 结构以可靠性为中心的维修分析 .....       | 107 |
| 参考文献.....                      | 125 |
| <b>第五章 维修质量控制</b> .....        | 127 |
| 5.1 维修质量控制的基本统计工具 .....        | 127 |
| 5.2 人为差错及其预防 .....             | 157 |
| 参考文献.....                      | 163 |
| <b>第六章 故障诊断的原理和方法</b> .....    | 164 |
| 6.1 古典诊断学原理 .....              | 165 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 6.2        | 模糊诊断法 .....             | 172        |
| 6.3        | 故障信息图像分析 .....          | 180        |
|            | 参考文献 .....              | 196        |
| <b>第七章</b> | <b>控制系统的维修有序性 .....</b> | <b>197</b> |
| 7.1        | 非单调关联系统 .....           | 197        |
| 7.2        | 控制系统的三态性 .....          | 200        |
| 7.3        | 质蕴含集和卡诺图法 .....         | 203        |
| 7.4        | 维修有序性 .....             | 206        |
|            | 参考文献 .....              | 208        |
| <b>第八章</b> | <b>设备的技术经济分析 .....</b>  | <b>209</b> |
| 8.1        | 设备的磨损及其经济后果 .....       | 209        |
| 8.2        | 设备磨损的补偿 .....           | 212        |
| 8.3        | 技术经济评价的基本方法 .....       | 215        |
| 8.4        | 设备大修理的经济界限 .....        | 222        |
| 8.5        | 设备更新的经济寿命 .....         | 223        |
|            | 参考文献 .....              | 226        |



# 第一章 绪 论

随着科学技术的发展和生产自动化程度的提高,维修已成为生产过程中必不可少的迅速发展新兴领域. 60年代出现的以可靠性为中心的维修理论,30多年来已在世界各国得到广泛应用,效果甚为显著.以可靠性为中心的维修理论是指导维修的通用的共性基础理论,本书主要阐述这一维修基础理论.至于机械、液压、气动、结构、电子、电器等不同专业学科的指导维修的个性理论,属于各自专业学科研究的范畴,本书不赘述.

## 1.1 维修和维修理论

### 1.1.1 维修的基本概念

维修是对设备或产品进行维护和修理的简称.这里的维护是指为保持设备良好工作状态所做的一切工作,包括清洗擦拭、润滑涂油、检查调校,以及补充能源、燃料等消耗品;修理是指恢复设备良好工作状态所做的一切工作,包括检查、判断故障,排除故障,排除故障后的测试,以及全面翻修等.由此可见,维修是为了保持和恢复设备良好工作状态而进行的活动.

维修是伴随设备(如蒸汽机、皮带车床)的使用而出现的.随着生产的发展,人们对维修的认识也在不断地深化.最早认为,维修是为了排除设备故障及预防故障的发生;后来认为,维修是设备使用的前提和安全的保障,因为如果设备发生故障,生产将被迫停止,服务中断,甚至会危及人身和设备安全,导致严重后果.

随着自动化程度的不断提高,以及机器人的出现,生产对维修的依赖性也不断增大.维修能提高设备的可用率和完好率,延长设备的使用寿命,从而增加产品数量,提高产品质量.维修是生产力

的重要组成部分. 同样, 武器装备只有经过维修, 才能形成战斗力, 否则, 再好的装备也不能用于作战. 因此, 维修也是战斗力的重要组成部分.

维修是投资的一种选择方式. 维修投资是使固定资产的生产力得以维持下去的那一部分投资. 正像投资购买固定资产形成生产力一样, 维修投资同样能创造经济效益. 在一定周期内, 不仅可以收回维修投资成本, 而且还能增值. 如果称固定资产投资为一次性投资的话, 那么, 维修投资则是一种重复性的投资.

此外, 维修还是企业售后服务的一种手段. 通过售后服务, 建立企业信誉, 扩大市场销售, 其作用也是不可低估的.

工业的发展和人口的增长, 使自然资源的消耗急剧增加, 工业废品堆积如山, 环境污染严重. 通过维修的手段, 发展三“Re”业, 即 Repair(修理)、Recycling(再生)和 Reuse(再利用), 以修复旧设备, 延长使用寿命, 节省材料和能源消耗; 改造旧设备, 翻修老厂, 减少扩建工厂的用地, 使资源得以再生和再利用. 所以, 维修对保护环境也具有重要意义.

随着生产力的提高和市场经济的发展, 维修观念有了更多的涵义. 维修已从单纯为了排除设备故障, 发展到了通过维修改善设备使用率, 进而成为企业生存和发展的重要手段. 维修好比一座“水中的冰山”(如图 1.1 所示), 在“水面”上可以直接看到的那一小部分代表设备维修, 而与设备维修有关的各个方面, 大部分是隐藏在“水面”下的, 如投资、生产力、战斗力、可用率、安全, 以及增加产品数量, 提高产品质量, 延长设备寿命, 节约材料和能源, 售后服务和环境保护等. 它提示人们, 不能只看到外露的一小部分, 而要考虑到“水下”的关系到企业生产效益的各个方面, 否则企业在前进的航行中可能会触礁. 只有对“水上”、“水下”部分都给予重视, 才能获得多方面的效益, 提高企业的竞争力.

### 1.1.2 维修的分类

从不同的角度出发, 维修可有不同的分类方法, 最常用的是按

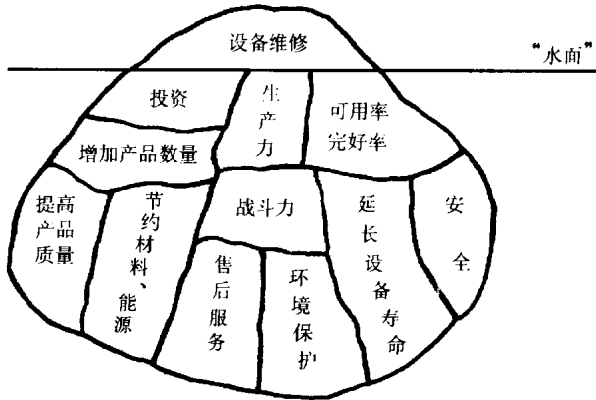


图 1.1 维修“冰山”观念示意图

照维修的目的与时机,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。

### 1. 预防性维修

预防性维修( PM, Preventive Maintenance)是指通过对设备的检查、检测,发现故障征兆以防止故障发生,使其保持在规定状态所进行的各种维修活动。预防性维修包括擦拭、润滑、调整、检查、更换和定时拆修(即定时翻修)等。这些活动是在故障发生前预先对设备(或其机件)进行的,目的是为消除故障隐患,防患于未然。这种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。预防性维修可分为定时拆修、定时报废、视情维修和隐患检测四种维修类型。

#### (1) 定时拆修

定时拆修(RW, Rework at Some Interval)是指设备使用到规定的时间予以拆修,使其恢复到规定的状态。此处的“规定的时间”可以是规定的间隔期、累计工作时间、日历时间、里程和次数等。拆修的工作范围可以从将设备分解后清洗直到设备全面翻修,对于不同的设备,拆修的技术难度、资源要求和工作量的差别都较大。

拆修的好处是可以预防那些不拆开就难以发现和预防的故障所造成的故障后果.工作的结果可以是设备的继续使用,或者是设备需要重新加工后才能使用.

### (2) 定时报废

定时报废(DS, Discard at Some Interval)是指设备使用到规定的时间予以废弃.定时报废较之定时拆修是一种资源消耗更大的预防性维修工作.工作的结果或者是设备更换零部件,或者是报废.

有时把定时拆修和定时报废这两种预防性维修类型统称为定时维修(HT, Hard Time Maintenance).定时维修适用于已知寿命分布规律的而且有耗损期的设备.这种设备故障的发生、发展同使用时间有明确的关系,设备的大部分能工作到预期的时间以保证定时维修的有效性.

### (3) 视情维修

视情维修(OC, On Condition Maintenance)是指经过一定的时间间隔后,将观察到的设备运行状态与适用的标准进行比较的工作.工作的结果可以是设备能继续使用到下一个检查期或重新加工后使用,也可以是设备零部件的更换或者报废.

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,故障从开始发生到发展成为最后的故障状态,总有一段出现异常现象的时间,而且有征兆可查寻.因此,如果找到跟踪故障迹象过程的办法,则就可能采取措施预防故障发生或避免故障后果.所以也称这种维修为预知维修或预兆维修(predictive maintenance).前苏联民航界称这种维修为监控状态参数的视情维修或临近故障状态的视情维修.

### (4) 隐患检测

隐患检测(IH, Inspection for Hidden Failure)是指在某一具体的时间间隔内,为发现设备已存在的但对操作人员来说尚不明显的功能故障(称之为隐蔽功能故障)所进行的检测工作,也称之为隐蔽功能检测或使用检查.

严格地讲,隐患检测不是预防性工作,这是因为在故障发生之后才寻找故障的.之所以认为是预防性的,是因为其目的在于预防,如果隐蔽功能故障没有被发现,就可能引起连锁性的第二次,甚至多次故障(多重故障)的发生.

## 2. 修复性维修

修复性维修(CM, Corrective Maintenance)是指设备(或其机件)发生故障后,使其恢复到规定状态所进行的维修活动,也称排除故障维修或修理.修复性维修包括:故障定位、故障隔离,分解、更换、再装、调校、检验,以及修复损坏件等.

对那些不会影响设备的安全和生产任务的早期故障、偶然故障和耗损故障,如果采用定时维修、视情维修等预防性维修则效果不佳,但是也不能放任不管,仍需要在故障发生之后,通过所积累的故障发生的信息,进行故障原因和故障趋势分析,从总体上对设备的可靠性水平进行连续监控.这种不危及安全和任务的故障,在它发生之后,从总体上对设备的可靠性水平进行连续监控的工作,称为状态监控维修(CMM, Condition Monitoring Maintenance).状态监控维修的结果除更换零部件或重新修复设备外,还可采用转换维修类型和更改设计的决策.

状态监控维修不规定设备的使用时间,因此能最充分地利用设备寿命,使维修工作量达到最低,是一种最经济的维修工作,目前应用较为广泛.前苏联民航界称状态监控维修为监控可靠性水平的视情维修,或用到故障的视情维修.这种维修属于修复性维修的范畴.

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,因而也可称之为计划维修(scheduled maintenance).修复性维修因其内容和时机带有随机性,不能在事前做出确切安排,因而也可叫做非计划维修(unscheduled maintenance).

### 3. 改进性维修

改进性维修(IM, Improvement Maintenance)是利用完成设备维修任务的时机,对设备进行改进或改装,以提高设备的固有可靠性、维修性和安全性水平。

这种结合维修工作进行的改进和改装,是维修工作的扩展,实质上是修改设备的设计,应属于设计、制造的范畴。但由于维修部门职责是保持、恢复设备的良好状态,也最了解设备使用维修中的毛病在哪里,因此在设备固有可靠性、维修性和安全性水平不足时,提出改进性维修是进行有效预防性维修和修复性维修工作而采取的一种补充手段,也是设备改进循环中的一个必要环节。

### 4. 战场抢修

战场抢修(BDAR, Battlefield Damage Assessment and Repair)是指战斗中装备遭受损伤或发生故障后,在评估损伤的基础上,采用快速诊断与应急修复技术,对装备进行战场修理,使之全部或部分恢复必要功能或自救能力。这种抢修虽然属于修复性的,但修理的环境、条件、时机、要求和所采取的技术措施与一般修复性维修不同,是一种独立的维修类型。

## 1.1.3 维修理论的产生与发展

### 1. 维修理论的涵义

维修理论是研究设备维修的本质和规律的理论,包括维修设计理论、维修技术理论和维修管理理论。该理论是建立在概率统计、可靠性工程、维修性工程、断裂力学、模糊数学、故障物理、故障诊断理论和现代管理理论等现代科学基础上的一门综合性工程技术应用理论,用于指导设备全寿命的维修优化,以获得最佳维修效益,保证设备使用的可靠性和安全性。

维修理论的核心内容是以可靠性为中心的维修<sup>[1]</sup>。这种理论

认为,一切维修活动,归根到底都是为了保持、恢复设备的可靠性.根据设备及其机件的可靠性状况,运用逻辑决断分析法来制订设备的维修大纲,确定所需的维修内容和合理的维修类型、适当的维修间隔期和维修级别等,从而达到优化维修的目的.在这种理论指导下进行设备维修,既能提高质量和可用率,保证使用安全,又能节约费用.维修理论不仅适用于军事装备,也适用于民用设备,在30多年的实践中不断地得到完善和发展,已在世界许多国家广泛应用.

## 2. 维修理论的产生

本世纪50年代以前的维修,基本上属于一门操作技艺,缺乏系统的理论.当时的机器大多数采用皮带、齿轮传动.由于设备简单,可以凭眼睛看,耳朵听,手摸等直观判断或通过师傅带徒弟传授经验的办法来排除故障.因此认为维修是一门技艺,这是符合当时客观实际的.

随着生产的发展,出现了流水线生产.为了使生产不致中断,本世纪20年代美国首先实行预防性的定时维修,即事先在某一固定时刻对设备进行分解检查,更换翻修,以预防故障的发生,防患于未然.这种定时维修在减少故障和事故,减小停机损失,提高生产效益上,明显优于早先的对设备“不坏不修,坏了才修”的事后维修.因此,定时维修迅速传遍世界各地,在设备维修中占据了统治地位.我国从第一个五年计划开始,各大型企业由前苏联引进的计划预防维修,也属于这种定时维修.

这种传统的定时维修基于这样一个概念,即设备的每个机件工作时就会出现磨损,磨损就会引起故障,有故障就存在不安全性.因而每个机件的可靠性与使用时间有直接的关系,都有一个可以找到的并且在使用中不得超越的寿命——定时拆修间隔期,即“到寿”必须拆修,以确保安全性和使用的可靠性;并且认为,拆修得越彻底,分解得越细,防止故障的可能性就越大;定时维修工作做得越多,则可靠性越高.针对影响安全的故障问题,设计人员采

用多余度技术,因而大大削弱了故障与安全之间的关系,不过仍然认为拆修间隔期与可靠性之间的关系并没有改变.为此常常靠缩短定时拆修间隔期的办法来预防故障的发生,然而超出人们意料的是故障仍旧发生.于是认为所定的拆修间隔期仍然过长,因此就再缩短拆修间隔期来预防故障的发生.但发现,不管怎样缩短拆修间隔期,或加大拆修范围及拆修的深度,无论维修活动进行得多么充分,很多故障仍然不能防止和有效减少,故障率(单位时间内故障发生的次数)反而增加.频繁的维修,不仅限制了设备的使用,降低了可用率,而且消耗了大量的人力和物力,增加了维修费用.50年代末,美国航空公司的维修费用约占使用总费用的30%,美国空军有30%的人力和将近三分之一的经费用于维修,维修费用超过了购置费用,形成了“买得起,用不起”的现象.由此使人们对多做维修工作能预防故障的效果产生了怀疑.1960年,美国联合航空公司首先提出“我们懂得飞机维修的基本理论吗?”和“我们懂得为什么要做所做的事吗?”两个问题.如何以最小的消耗取得最佳的维修效果,也就成为当时摆在人们面前的一个紧迫问题.

1960年,美国联邦航空局与联合航空公司双方的代表组成一个维修指导小组(MSG, Maintenance Steering Group),对可靠性与拆修间隔期之间的关系进行研究.由于可靠性工程、维修性工程、故障物理学和故障诊断技术等新兴学科的相继出现,以及概率统计和管理科学的新发展,为研究维修问题提供了理论基础.他们经过多年的实践,不仅积累了维修经验,而且还取得了足以进行科学研究的实践数据和资料.在此基础上,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),大纲中指出:“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.”

这个研究成果对于传统维修观念——机件两次拆修间隔期的长短是影响可靠性的重要因素——是一个直接的挑战.于是,1961



年 11 月开始对航空发动机进行维修改革试验,1963 年 2 月又在 DC-8 飞机和波音 720 飞机上进行试验. 试验结果证明,尽管其拆修间隔期不断延长,但可靠性却未见下降. 所以联邦航空局 1964 年 12 月发出 AC120-17 通报,“允许使用单位在制订自己的维修控制上有最大的灵活性.”1965 年 1 月联合航空公司按此通报进一步进行“涡轮喷气发动机可靠性大纲”试验. 接着,人们尝试将各种可靠性大纲中所学到的东西综合起来,以研究出一种通用的制订预防性维修大纲的方法,1965 年首次出现了一种初始的“决断图”方法,经完善后,1968 年 7 月出现“MSG-1 手册:维修的鉴定与大纲的制订”<sup>1)</sup>,用于制定波音 747 飞机预防性维修大纲,这是以可靠性为中心的维修理论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.

以可靠性为中心的维修理论在使用中进一步得到完善,1970 年 3 月形成的“航空公司/制造公司的维修大纲制订书——MSG-2”<sup>[2]</sup>,用于制订洛克希德 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和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.

70 年代初,美军装备的维修费用以相当惊人的幅度增长,而与此同时采用 MSG-2 的民航维修费用却下降了 30%,因而引起

---

1) MSG-1 HDBK: Maintenance Evaluation and Program Development, 1968.