



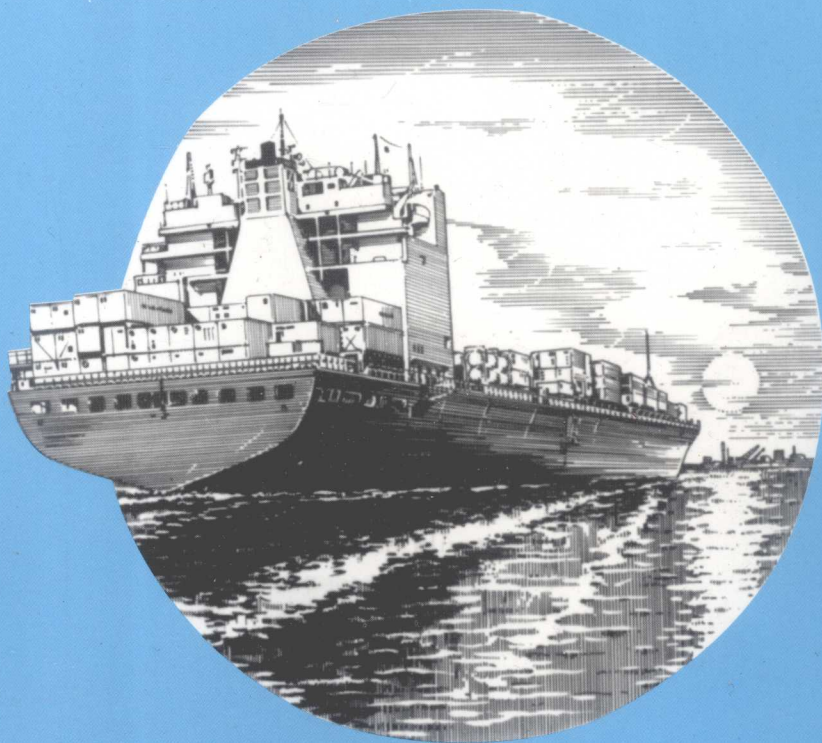
交通航海职业技术教育教材

符合 STCW 公约要求
交通职业技术学校教学指导委员会
航海类学科委员会推荐
交通部科技教育司审定
中华人民共和国海事局认可

轮机维护与修理

李春野 主编

叶福杭 主审



大连海事大学出版社

交通航海职业技术教育教材

轮机维护与修理

李春野 主编

叶福杭 主审

大连海事大学出版社

内 容 提 要

本书是按照交通职业技术学校教学指导委员会航海类学科委员会制定的《轮机维护与修理教材编写大纲》的要求编写的。

书中着重介绍船舶主、副柴油机主要零件的损坏形式、损坏机理及检修工艺。内容包括：维修理论、磨损和腐蚀的损坏机理；船机零件缺陷检验和故障诊断技术、修理工艺；柴油机、增压器、轴系、舵系和泵的主要零件检修。

图书在版编目 (CIP) 数据

轮机维护与修理/李春野主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2000.12
(交通航海职业技术教育教材)

ISBN 7-5632-1454-2

I. 轮… II. 李… III. 船舶—轮机—维修—技术—教育—教材
IV. U676.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 87611 号

大连海事大学出版社出版

(大连市凌水桥 邮政编码 116026 电话 4728394 传真 4727996)

<http://www.dmupress.com>. E-mail: cbs @ dmupress.com

丹东日报印刷厂印装

大连海事大学出版社发行

2001年3月第1版

2001年3月第1次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 11.75

字数: 293 千

印数: 0001—4000 册

责任编辑: 程策群

封面设计: 王 艳

定价: 18.00 元

前 言

航海职业教育系列教材是交通部科教司为适应《STCW 78/95 公约》和我国海事局颁发的《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》而组织编写的。编审人员是由交通职业技术学校教学指导委员会航海类学科委员会组织遴选的，都有较丰富的教学经验和实践经验。教材编写的依据是交通部科教司颁发的“航海职业教育教学计划和教学大纲”（高职教育），也融入了中等职业教育“教学计划和教学大纲”。本系列教材是针对三年高职教育和五年高职教育编写的，对于四年中等职业教育可根据考试大纲在满足操作级的要求上选用，也适用于海船驾驶员和轮机员考证培训和船员自学。

本系列教材包括职能理论和职能实践两个部分，在内容上有严格的分割，但又相互补充。

这套系列教材的特点是：

1.全面体现了《STCW 78/95 公约》和《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》中强调的：教育必须遵守知识更新的原则，强调技能，培养能适应现代化船舶管理的复合型人才要求的精神。

2.始终贯穿“职业能力”作为培养目标的主线，根据“驾通合一”、“机电合一”及课程内容不能跨越功能块的原则，打破原有的学科体系，按功能块的要求对课程内容进行了全面的调整、删减，抓住基本要素重新组合。各课衔接紧凑，避免重复教学，并跟踪了现代科学技术，有较强的科学性和先进性。

3.编写始终围绕着职业教育的特点，内容以“必需和够用”为原则，紧扣大纲，深广度适中，不但体现了理论和实践的结合，也体现了加强能力教育和强化技能训练的力度。

4.编写过程中还把品格素质、知识素质和身心素质等素质教育的内容交融并贯穿其中，体现了对海员素质能力培养的力度。

本系列教材在编审过程中尽管对“编写大纲和教材”都经过了集体或专家会审，也得到海事局和海运单位的大力支持，但可能还有不足之处，希望多提宝贵意见，以便再版修改并进一步完善。

交通职业技术学校教学指导委员会航海类学科委员会

1999.8

编 者 的 话

本书是按照交通职业技术学校教学指导委员会航海类学科委员会制订的教学大纲及据此制订的“轮机维护与修理编写大纲”而编写的。编写大纲汇集了相关水运职业技术学校的意见，由编审人员共同讨论制定。

本书的编写旨在为交通职业技术学校的在校学生提供一本符合《STCW 78/95公约》及《中华人民共和国海船船员适任考试和评估大纲》要求的《轮机维护与修理》教材。在制定编写大纲和编写过程中，除按《公约》和《考试大纲》的要求选择内容和论述深度外，在此基础上还有适当扩展。

本书着重介绍船舶主、副柴油机主要零件的损坏形式、损坏机理及其检修工艺。编者在编写过程中，融入了多年的教学和生产实践经验，全面准确地反映了大纲的要求，内容丰富，具有针对性。

书中第一章、第六章第一节、第八章由李春野高级讲师编写；第二章、第三章、第四章、第五章由胡强生讲师编写；第六章第二节、第七章、第十章由艾镇高级讲师编写；第九章由崔吉超讲师编写。全书由李春野主编，叶福杭高级讲师主审。

在编写过程中，大连海运学校的王忠忱老师、左春宽老师、李宏彪老师审阅了书稿的部分章节，在此深表感谢。

由于编者水平有限，不当之处在所难免，诚盼指正。

编者

2000.10

目 录

第一章 维修概论	(1)
第一节 维修理论简介	(1)
第二节 现代维修方式	(2)
第二章 船机零件磨损	(5)
第一节 摩擦	(5)
第二节 磨损	(7)
第三章 船机零件的腐蚀与防护	(13)
第一节 化学腐蚀	(13)
第二节 电化学腐蚀	(14)
第三节 穴蚀	(17)
第四章 船机零件的疲劳断裂	(20)
第一节 疲劳断裂	(20)
第二节 防止疲劳断裂的措施	(25)
第五章 缺陷检验与故障诊断	(28)
第一节 船机零件的缺陷检验	(28)
第二节 船机故障诊断技术	(33)
第六章 专用检修量具、工具和物料	(42)
第一节 专用量具和工具	(42)
第二节 检修物料	(47)
第七章 修理工艺	(52)
第一节 零件清洗	(52)
第二节 机械加工修复法	(54)
第三节 焊补修理	(56)
第四节 粘结修复法	(56)
第五节 金属扣合修复法	(59)
第六节 电镀工艺	(62)
第七节 喷涂与喷焊	(69)

第八章 柴油机主要零部件的检修	(74)
第一节 气缸盖的检修.....	(74)
第二节 气阀与阀座的损伤及修理.....	(76)
第三节 气缸套的检修.....	(79)
第四节 活塞组件的检修.....	(82)
第五节 曲轴检修.....	(94)
第六节 轴承检修.....	(105)
第七节 精密偶件的检修.....	(110)
第八节 活塞运动部件的校中.....	(114)
第九节 活塞运动部件的平台检验.....	(120)
第九章 船舶主要设备的检修	(124)
第一节 柴油机吊缸检修.....	(124)
第二节 增压器检修.....	(127)
第三节 泵的检修.....	(134)
第四节 轴系的检修.....	(139)
第五节 舵系的检修.....	(161)
第十章 修船管理	(166)
第一节 船舶修理的类别和要求.....	(166)
第二节 修船的组织工作.....	(167)
第三节 轮机坞修工程.....	(171)
第四节 试验与试航.....	(176)

第一章 维修概论

第一节 维修理论简介

一、维修科学

船舶无论是停泊还是航行，都会受到内部因素（设计、材料、制造和安装工艺等）或外部环境的影响，使其技术状态不断下降，最后导致故障发生，使船舶全部或部分设备丧失功能。为确保船舶正常运行，就需要对船舶实施维修。维修又统称为修理，是指为保持或恢复船舶机械和设备的规定功能所采取的技术措施。

船舶维修分为预防维修和故障维修两种。预防维修是预防机械设备发生故障或失效而进行的维修；故障维修是在故障发生后进行的维修。维修与故障是矛盾的两个方面。故障使船舶丧失功能，而维修使船舶保持或恢复功能。对于故障与维修的研究形成了维修科学。可靠性理论和可维修性理论是维修科学的重要理论基础。

二、可靠性和可维修性概念

1. 可靠性

1) 可靠性定义

可靠性并非新的概念，它早已被人们在日常生活中普遍使用。在专业领域里使用则是最近二十多年的事情，而在海运界应用可靠性理论来工作的历史更短，确切地说是刚刚开始。

船舶设备或系统的可靠性是其固有特性之一。它是指设备或系统的功能随时间的延长而保持稳定的程度，也就是说设备或系统在规定的条件下和在规定的时间内完成规定功能的能力。

在上述定义中，规定的条件、时间和功能是对可靠性作的定量解释，使之更严密。船舶设备和系统的规定功能是在设计时赋予的、在规定的条件下所能显示的技术性能。然而，只有在规定的时间内保证设备和系统的这些性能，才有可能讨论可靠性问题。因为即使最可靠的船舶也不能保证其设备和系统在无限长的时间里保持其初始性能参数不变。

衡量可靠性的指标有：可靠度、故障率、平均故障间隔期、平均寿命等。

2) 可靠性研究的内容

(1) 在可靠性理论方面 利用数学、物理、化学等基础理论对故障现象和故障率进行分析、控制、测量、预测和综合，主要研究可靠性指标量化、可靠性分析方法、可靠性准则及提高可靠性的方法等。

(2) 在可靠性技术方面 主要有可靠性设计、可靠性制造与工艺、可靠性试验、可靠性评估和可靠性标准等。主要研究发生故障的机理、形式及危害性分析、寿命的确定与试验方法等。

(3) 在可靠性管理方面 包括制定有关可靠性的计划、制度、规范及情报资料、数据搜集与处理等。

(4) 船舶可靠性课题 主要有积累和搜集船舶各类设备的可靠性信息；确定船舶最佳修理间隔期以及设备维护工作最佳周期的方法；确定船舶设备最佳配件的方法；预测船

船舶结构和设备状态的方法；确定可靠度在经济上的合理性。

2. 可维修性

1) 可维修性定义

可维修性是指发生故障的机械或设备在规定的时间内通过维修使之保持或恢复到使用条件下完成规定功能的能力。

可维修性是通过设计赋予船舶机械或设备的一种固有属性。良好的可维修性可使船舶或机械便于维修，对维修方法和维修人员的技术水平要求不高，且所需的维修时间少，维修费用低。

船舶机械和设备的可维修性在日常维修保养工作中便能体现。例如，损坏的零件是否容易拆卸和更换；日常的维修保养工作是否容易进行；设备是否便于检测和调整等。所以，良好的可维修性能可获得较好的维修效果。否则，不仅会增加维修时间和费用，而且还会影响船舶机械和设备的使用寿命。

2) 研究可维修性的意义

船舶维修的目的是迅速而又经济地保持和恢复船舶机械和设备的可靠性。也就是说在机械或设备发生故障之后，要求以最佳的维修质量、最低的维修费用和最短的维修时间来恢复其规定的功能。然而，研究船舶可维修性的意义不只在于此，船舶良好的可维修性更是船舶海上安全航行的重要保障，在海上发生故障后船员能够及时修复，保证船舶继续航行。船舶可维修性还是船舶可靠性的必要补充，因为机械和设备的可靠性能提高是有限的，况且随着机械和设备复杂程度的加大，其可靠性有下降的趋势，在航行中通过维修可增强其工作可靠性，船舶可维修性愈好愈有利于弥补设备可靠性的不足。船舶机械和设备具有较高的可维修性是实现工业化修船的必要条件。由于修船是单件、小批生产，带来了一系列缺点，如果实现定型化、标准化、通用化和可维修性设计，则可实现修船的工业化。

船舶良好的可维修性可由下列几点来衡量：

- (1) 所需的维修机械和设备数量少，维修的次数少；
- (2) 因维修造成的停航时间少；
- (3) 机械和设备的保养、维修时间间隔长，即维修周期长；
- (4) 保养和维修工时少；
- (5) 对船员的维修技能要求不高；
- (6) 维修工具简单和通用化程度高；
- (7) 备件数量少；
- (8) 便于检查、调整和拆换。

衡量船舶可维修性的定量指标有：可维修度、修复率、平均修复时间及有效度等。

第二节 现代维修方式

一、两种维修思想

正确的维修思想是维修客观规律的反映，它又反过来指导维修实践。有了正确的维修思想指导，才能确立正确的维修方针、政策和进行维修立法，以及建立高效率的维修体制和维修保障体系。因此，维修思想的建立是维修管理首先要解决的问题。

随着人们对维修规律认识的深化，维修指导思想也在发生变化。在 20 世纪 30 年代之前，对设备维修没有明确的维修指导思想，而是采取坏了就修，不坏不修，听其自然的态

度。维修工作缺乏科学预见，往往导致严重的停机事故，不仅影响使用，还危及安全和造成较大的经济损失。总结实践教训，为了防患于未然，产生了“定期预防维修”的指导思想并建立了一整套预防维修制度。近年来由于对可靠性和可维修性理论的深入研究，又形成了“以可靠性为中心”的维修思想。

1. 定期预防维修思想

从 20 世纪 30 年代开始人们已经注意到设备的安全使用，认识到设备一经使用就会有耗损，而耗损到一定程度就会发生故障和事故，危及安全生产。于是产生了预防维修的思想，提出了积极预防和预防为主方针，主张在设备耗损到导致故障之前对设备进行预防性维修。由于当时缺乏先进的检测手段，又单纯地认为设备耗损只是时间函数，就规定按期限进行拆卸检修，形成了“定期预防维修”。

定期预防维修的特点是：

(1) 从满足船舶正常在航率的需要出发，有计划地、定期地对船舶及设备进行轮换修理；

(2) 每次计划修理所完成的工程量应保证设备工作到下一个计划修理期；

(3) 根据各类修理安排了统一的修理间隔期，在间隔期内又安排各种维护保养工作作为预防性维护措施。

因此定期预防维修对防止设备事故、恢复设备功能、保证安全等方面起到了积极有益的作用。

定期预防维修的出发点是：认为故障只是时间函数，故障的发生和发展都同时间有关，而任何故障的发生又都可能直接影响安全使用。于是通过多做工作，多定期检修来预防故障，以确保安全使用。显然，这种维修思想对于预防与时间有关的故障是行之有效的。如船体、管系的腐蚀，机械磨损，电缆老化等。

事实上，影响设备故障的因素很多，有许多随机因素（或叫偶然因素），而且许多故障并不是时间因素所造成的。加之船舶设备复杂，很难统一在一个规定的间隔期来进行维修。因此，按规定时间“一刀切”地进行维修就会浪费掉相当一部分设备使用寿命，不经济，做了许多无效的工作。而修理中的分解、拆卸、勘验，又会给设备增加人为损耗和误差，增加了设备的早期故障，甚至缩短了设备寿命。

2. 以可靠性为中心的维修思想

以可靠性为中心进行维修就是从设备的实际可靠状况出发，以可靠性和可维修性理论作指导，研究和解决维修中的各种问题。也就是说在进行维修决策和开展维修工作时必须以设备的实际可靠性状况作为出发点。

从可靠性的研究知道，损耗性故障是与时间因素有关的，而随机故障则与时间无关。因此，并不是所有设备的可靠性都和定期预防维修的时间限制发生直接关系。在可靠性的设计中采取了裕度技术、部分设备和结构损伤容限设计。在此情况下一个机件或一项设备故障已经不能影响使用安全。从实际维修看，早期故障、随机故障以及一些具有隐蔽特征的机件故障，凭借定期预防维修也不能完全排除。

综上所述，既然故障的产生并不与时间有必然的联系，设备的故障又不一定危及安全，有些故障又不能通过定期预防完全消除，因此定期维修就不是最恰当的惟一维修方式。主张采用视情维修作为预防性维修方式。所以，以可靠性为中心的维修思想仍然是“预防为主”，不过将定期预防改为“有针对性”的预防。整个维修过程以设备的可靠性分析为基

础，以维持设备固有可靠性为目标，按设备的实际可靠性指标来控制维修时机，通过逻辑分析决断法来控制维修内容，选择视情维修方式以控制设备的使用可靠性。

两种维修思想的主要区别决定了采取何种维修方式。对于船舶维修而言，预防为主仍然是维修的指导思想。由于船体的经常性损耗占有相当比例（经常性损耗如腐蚀和磨损等），因此定期维修方式仍然普遍使用。另一方面，视情维修是一种较为科学的维修方式，应当结合维修理论的研究开展设备可靠性和可维修性基础研究工作，进行设备可靠性和可维修性论证、设计、控制和分析，逐步变定期维修为视情维修。使船舶维修采取定期维修和视情维修相结合。

二、维修方式

现代维修方式可分为三种：

1. 定时维修方式

是以工作时数确定维修周期，按统一的时间不管技术状况如何而进行的拆卸维修方式。它通常以磨损作为维修的根据，取平均的管理水平，从大部分机件能够坚持工作不发生故障为出发点，将意外损坏的概率限制在一个较小的范围内。以时间为衡量标准的定时维修，掌握维修时机较明确，便于组织和计划管理。但针对性差，维修工作量大，不经济。

2. 视情维修方式

这种方式对一个具体设备不确定其维修期，而是根据不断地定量分析设备技术状态数据来确定最佳维修期。由于视情维修方式是预防性的，能够充分发挥设备的潜力，因此也是最理想的维修方式。

采用视情维修应具备的条件是：必须进行视情设计，为开展视情维修提供先决条件，如标准图谱、临界参数、检查孔等；以现代监控手段为基础，配置各种先进的无损检测仪器、与电子计算机相连接的终端显示装置等进行保护和预警，防止故障发生。例如采取振动监测来诊断柴油机气缸、活塞的故障时，为了连续不断地获得振动信号需采用传感器，因此柴油机应为传感器安装提供检查孔和振动的标准图谱，以便将实测图谱与之比较。在船上主、副柴油机应采用状态监控和故障诊断，为开展视情维修提供先决条件。

3. 事后维修方式

由于有些复杂设备的许多零部件在其部分损坏后仍保持基本功能，无法预见故障，只能在故障发生后进行维修，因此它是一种非预防性维修方式。这种维修方式并非任何维修工作也不做，同样在故障发生前要不断地监控其技术状态和进行经常性的保养工作。

在三种维修方式中一般应首选视情维修方式，其次选定时维修方式，对不直接危及安全的偶然性故障采用事后维修方式。复杂的设备或系统可依具体情况确定维修方式。

第二章 船机零件磨损

第一节 摩擦

两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动或具有相对运动的趋势时，在接触面间产生切向的运动阻力称为摩擦力。这种现象叫做摩擦。根据运动副零件运动形式的不同，我们可以把摩擦分为滑动摩擦、滚动摩擦和复合摩擦三种基本形式。船舶机器上的运动副大多为滑动摩擦，根据其摩擦表面上的润滑状态，又可把滑动摩擦分为干摩擦、液体摩擦、边界摩擦和混合摩擦四种形式。

一、干摩擦

干摩擦是指干净表面间的摩擦，即在摩擦表面间没有任何润滑剂或其他液体时的摩擦。干摩擦时摩擦系数较大，约为 0.1~1.5。

干摩擦是由摩擦表面上高低不平的凸峰间的机械作用与材料变形，以及摩擦表面接触点上的分子作用共同引起的。

运动副零件在相互运动时，两个摩擦表面不可能形成面接触，只是在一些凸起的峰处形成点接触，实际接触面积仅为名义接触面积的千分之几至万分之几，但要承受摩擦面上的全部载荷。因此，接触点上的应力很大，会产生弹性变形。随着载荷的增加，接触点上的应力达到材料的屈服极限 σ_s 时，接触点处产生塑性变形。随着载荷的增加，接触点的数量增加，在未接触部分产生犬牙交错、相互嵌入的现象。

在接触点发生塑性变形的同时，接触点上的氧化膜也被压碎或剪切掉。两个摩擦表面金属分子之间的距离非常小，由于金属分子间的吸引力和相互扩散而溶合在一起，即在接触点处发生粘着，这种现象称为冷焊。

当配合零件继续相互运动时，由于机械作用使冷焊点被剪切断，使有犬牙交错的凸峰被剪切掉。随着不断地运动、不断地摩擦，接触点不断地增多，直到实际接触面积增大到足以承受全部载荷为止，如图 2-1-1 所示。

干摩擦后摩擦表面层的金属性质发生很大变化。首先由于摩擦表面的塑性变形使表层的晶格歪扭、晶粒破碎、滑移等产生加工硬化，从而使表面的硬度提高。其次，由于摩擦副相互运动时，摩擦表面金属塑性变形释放出热量使表面温度升高超过基体金属温度。当温度高于金属再结晶温度时，表面的加工硬化消失且发生再结晶；当温度继续升高时，表面金属被软化发生粘结和相变；摩擦表面继续运动时，接触部分脱开，相变的组织因冷却

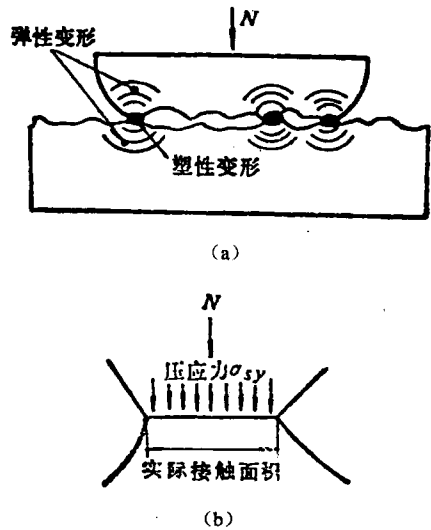


图 2-1-1 干摩擦表面接触情况

(a) 表面接触情况；(b) 实际接触情况

而被淬火，摩擦表面强度和硬度进一步提高。最后，由于摩擦表面与周围介质作用使表面受到影响。例如，当表面上氧化膜被压碎或剪切后，裸露的金属迅速和空气中的氧作用形成新的氧化膜。

所以，干摩擦过程就是由于机械作用、分子作用和化学作用使摩擦表面的物质不断损失和性能发生变化的过程。配合件在运转时发生干摩擦将会使摩擦表面的磨损加大、温度升高及消耗能量增多。在机器运转中应尽量避免出现干摩擦。

二、液体摩擦

摩擦表面完全被润滑剂隔开，两表面没有直接接触，摩擦发生在润滑剂内部，这种摩擦称为液体摩擦，如图 2-1-2 所示。

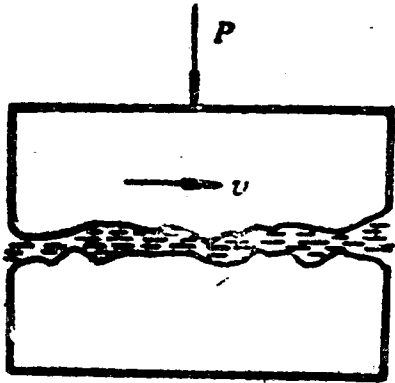


图 2-1-2 液体摩擦

P -零件的法向载荷； v -相对运动速度

液体摩擦的摩擦系数最小，摩擦表面的磨损也最小。利用润滑剂使两摩擦表面隔开的方法有两种，一种是靠摩擦面间有利的几何形状和较高的相对速度而获得一定厚度的油膜来平衡运动件上的作用力从而将摩擦面分开的润滑，叫液体动压润滑。另一种是靠外部供给有一定压力的润滑油来平衡运动件上的作用力而将摩擦表面分开的润滑，叫液体静压润滑。液体动压润滑是实现液体摩擦的较理想情况。在船舶机器中，要建立液体摩擦油膜必须具备以下条件：

(1) 要求摩擦表面具有较高的加工精度和较低的表面粗糙度；

- (2) 要求摩擦副零件要有合适的配合间隙；
- (3) 保证连续而又充足地供给一定温度下粘度合适的润滑油；
- (4) 摩擦副零件必须具有足够高的相对滑动速度；
- (5) 负荷不要太大。

船舶机器在实际运转中，在起动、停车或者是工作在不稳定状态时，摩擦表面间难以实现或保持液体摩擦，以致产生磨损或损伤。

三、边界摩擦

指摩擦副在运动时，在摩擦表面间存在一层极性吸附物形成的厚度小于 $0.1\mu\text{m}$ 的物理吸附膜、化学吸附膜或化学反应膜时的摩擦。边界润滑时摩擦系数为 $0.05 \sim 0.5$ 。

当摩擦表面间加入少量润滑剂时，润滑剂中的一些有机化合物的分子是与金属表面亲和性强的极性分子。因为它的一端是带有强电荷的极性团，当它吸附在金属表面上时，有垂直取向的特性。极性分子吸附在金属表面上可以是单层，也可以是多层，从而形成物理吸附膜即边界膜。在边界膜内，由于分子间的引力作用，使这些极性分子在金属表面紧密地定向排列，分子的内聚力使边界膜具有一定的承载能力。摩擦表面相对运动时，极性分子仍然吸附在金属表面上，只是距金属表面越远的吸附层吸附力越弱。摩擦发生在远离金属表面的极性分子的非极性端之间，因而取代了摩擦表面的直接接触，降低了摩擦系数。图 2-1-3 为边界摩擦模型。

边界膜的存在是有条件的，一旦边界膜破裂，摩擦表面的金属就会发生直接接触，严重的摩擦会使表面烧伤损坏。实验表明，即使在不大的正压力（如几个 mN ）作用下，摩

擦表面一旦开始运动，金属表面个别微小凸峰可能刺破边界膜与另一金属表面接触而产生磨损。接触压应力越大，接触点及周围的区域内温度越高，尤其是在重载高速下工作，接触部位的温度就会更高，以致使表面的吸附边界膜破裂，金属表面遭到损坏。

实用中常在润滑剂中添加适量的极压添加剂，如硫氯化石蜡、磷酸酯等。这些物质在高温、高压和摩擦条件下会在摩擦表面上形成一层磷化物、氯化物或硫化物的化学反应膜，可有效地把表面隔开，使在高温高压下保持边界润滑状态，从而起到减磨的作用。

四、混合摩擦

在摩擦表面同时存在着边界摩擦和干摩擦的情况称作半干摩擦；同时存在着液体摩擦和边界摩擦，并偶有干摩擦的情况称为半液体摩擦。半干摩擦和半液体摩擦统称为混合摩擦。

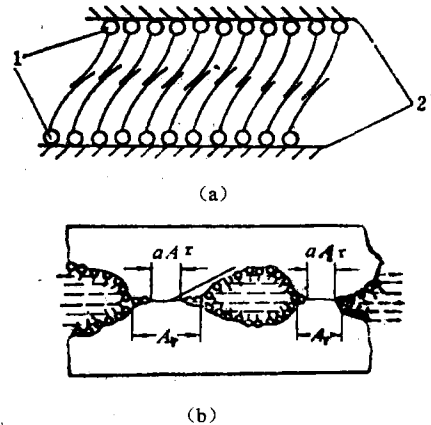


图 2-1-3 边界摩擦模型

第二节 磨损

在摩擦过程中，运动副由于摩擦表面的物质逐渐损失，使其尺寸、形状、位置精度和表面质量发生变化，此种现象称为磨损。

摩擦的后果是造成摩擦表面的磨损，但它不是产生磨损的惟一原因。在摩擦过程中摩擦时的环境因素，如温度、介质、应力等也是导致摩擦表面磨损的重要因素。根据摩擦时环境因素的不同，主要有以下四种磨损：粘着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损和疲劳磨损。在很多情况下，可能有一种以上的机理同时在起作用，但其中某一种机理起主导作用。

一、粘着磨损

粘着磨损是在润滑条件下的一种常见的磨损。它是摩擦副在相对运动时，在法向载荷的作用下摩擦表面上某些微小凸峰接触点的金属发生干摩擦时出现的粘着（冷焊）现象。当摩擦副的相对运动速度不大（0.5 ~ 0.6 m/s）而法向载荷较大时，摩擦表面的温度在 100 ~ 150 °C 之间，接触点将产生冷焊的粘结点。粘结点处的金属因塑性变形而产生明显的硬化，以致粘结点处的强度大于摩擦副中较软金属的强度。在相对运动时，粘着处被剪切，软金属可能被从基体上撕掉。这种粘着磨损，由于表面的温度不高，摩擦表面层和基体的金相组织和化学成分均无明显变化，称为低温粘着磨损。

在摩擦副相对运动速度很大和表面法向载荷较高的情况下，表面接触点上的瞬时温度很高，表面上有很薄的一层金属发生软化，并且软化的金属粘结在另一金属表面上。这样，在磨损的表面上，沿着运动方向就形成了裂口和凹穴，而且表层的金相组织和化学成分均有明显变化。这种磨损称为高温粘着磨损。高温粘着磨损的磨屑呈薄带状，厚度较低温粘着磨损的磨屑厚度小。

根据磨损时发生剪切部位的不同和摩擦表面破坏程度的不同，粘着磨损可分为：轻微磨损、涂抹、擦伤、划伤、撕裂和咬死。

轻微磨损是剪切发生在粘着面上，摩擦表面金属有极轻微的转移；涂抹是剪切发生在

距粘着面不远的较软的金属浅层内，较软的金属涂抹在较硬的金属表面上；擦伤是剪切发生在较软金属的表层内，在较软金属表面上产生沿运动方向的细小拉痕（拉毛）；划伤是在较软金属表面上产生沿运动方向的严重拉痕；撕裂是剪切发生在较软金属表面较深处，用肉眼可以观察到摩擦面上有金属转移，表面被严重撕裂而显得很粗糙和有明显的塑性变形；咬死是当粘着强度比基体金属剪切强度高，而且粘着面积大，相对运动时剪切应力又小于基体金属的剪切强度，以致由于粘接点的焊合而使摩擦表面间的相对运动受阻，摩擦副咬死。

除了载荷、润滑条件及相对运动速度对粘着磨损有影响外，摩擦副的材料对粘着磨损也有很大影响。

两种金属材料在固态能相互溶解的性能称为金属的冶金相溶性。摩擦副的金属相溶性好，摩擦时容易发生粘着，则抵抗粘着的性能就差。金属的组织结构对粘着磨损亦有影响，如多相金属比单相金属、金属间化合物比单相固溶体的抗粘着性能好。此外脆性材料比塑性材料抗粘着性能好。

1. 磨粒磨损

摩擦副在相对运动时，在摩擦表面间存在固体磨粒或硬的凸起物，它对摩擦表面产生微切削和刮擦作用引起的机械磨损称为磨粒磨损。

磨粒磨损有两种情况：一种是一个粗糙的硬表面相对于一个软表面滑动，犁出细的沟槽，相当于一把锉刀或金刚砂相对于软金属作用。第二种情况是两摩擦表面间存在游离颗粒引起的磨损。游离颗粒可以是磨损产物，也可以是空气或润滑油中的杂质。

摩擦副的材料硬度和磨粒的大小、硬度对磨粒磨损有影响：材料硬度愈高其抗磨粒磨损性能愈好，磨粒平均尺寸愈大磨粒磨损愈严重，磨粒硬度越高磨损越严重。但磨粒硬度低于材料硬度时也会产生磨损。

2. 腐蚀磨损

摩擦副相对运动时，由于摩擦表面与周围环境中的介质发生化学反应或电化学反应，以及同时存在的机械摩擦作用引起的磨损称为腐蚀磨损。

腐蚀磨损通常是一种轻微的磨损，但在高温或潮湿的环境中它也可以变为严重的磨损。最常见的是氧化腐蚀磨损，它是金属摩擦表面与空气中的氧发生化学反应的结果。大多数金属（除金、铂等少数金属以外）都被氧化膜覆盖着。纯金属表面，在瞬间立即与空气中的氧起反应，生成单分子层的氧化膜。膜的厚度逐渐增大，增大的速度随时间的指数规律而减小。若形成的氧化膜是脆性的，它与基体金属结合的抗剪切性能差，或是氧化速度小于磨损速度，则氧化膜极易被磨损；反之，若形成的氧化膜韧性好，它与基体金属结合处的抗剪切性能强，或是氧化速度大于磨损速度，则氧化膜起着保护摩擦表面的作用，因此磨损率是相当小的。

此外，还有特殊介质腐蚀磨损。它是摩擦副与酸、碱、盐等特殊介质发生化学腐蚀作用而形成的。其磨损机理与氧化磨损相似，但磨损速度较大，其破坏特征是摩擦表面遍布点状或丝状磨损痕迹，一般比氧化磨损痕迹深，磨损产物为酸、碱、盐的金属化合物。

3. 疲劳磨损

当摩擦副作滚动或兼有滚动与滑动的复合运动时，在交变的接触应力作用下，摩擦表面疲劳产生裂纹并产生片状或颗粒状的磨屑使摩擦表面出现凹坑的现象称为表面疲劳磨损，简称疲劳磨损。

产生表面疲劳磨损的内因是由于摩擦表面层内存在着物理的和化学的缺陷，如晶格缺陷、空位、位错等物理缺陷和金属夹杂物、杂质等化学缺陷。在外力作用下有缺陷的部位会产生应力集中而萌生裂纹。所以，减少零件材料内部缺陷将会显著减少疲劳磨损。

疲劳磨损可分为两种类型：

(1) 收敛性的表面疲劳磨损 新的摩擦表面上开始时接触点较少，实际比压较大，易产生小凹痕。随着接触面积扩大，实际比压减小，凹坑停止扩大，机件可继续工作。

(2) 扩展性的表面疲劳磨损 当作用在两接触面上的交变应力较大时，由于材料塑性较差或润滑剂选择不当，在跑合阶段就产生小凹痕，产生小凹痕后就不不断发展形成痘斑凹坑，最后导致机件失效。

二、磨损规律

船机零件在运转过程中产生的磨损是有一定规律的。任何一对配合零件，在正常使用条件下，其工作时间和所产生的磨损量的关系都如图 2-2-1 磨损曲线所示。

在图 2-2-1 中，横坐标表示配合件运转的时间，纵坐标表示零件的磨损量。磨损曲线反映了零件的三个不同工作阶段的磨损情况。曲线 OA 所对应的工作时间为第一阶段，称为磨合期（或跑合期）； AB 所对应的工作时间为第二阶段，称为正常磨损期（正常使用期）； BC 所对应的工作时间为第三阶段，称为急剧磨损期。

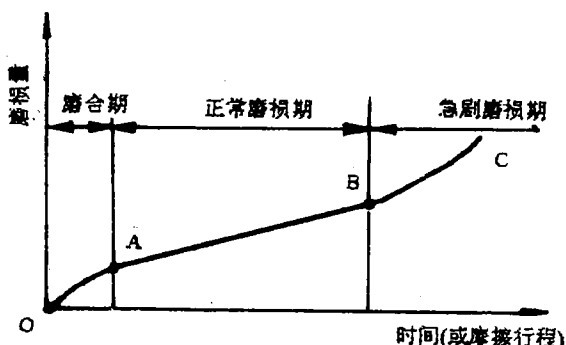


图 2-2-1 磨损曲线

1. 磨合期

磨合期是机器或配合件初次投入运转时，最初改变摩擦表面几何形状和表面层物理化学特性的阶段。由于新造零件工作表面高低不平，实际接触面积小，接触点的压应力大，磨损较大。另外，摩擦表面间的润滑油膜在开始运转阶段因转速低而难于建立；即使形成油膜，往往也会由于摩擦表面上的尖峰和摩擦产生大量的热使润滑油粘度降低而使之遭到破坏，引起粘着磨损。

机器或配合件的磨合运转是在其正式投入使用前必须进行的工作，因为只有获得良好的磨合才能保证正常运转，磨合不良将会引起粘着磨损。为了获得良好的磨合而进行长时间的低负荷运转，虽然可靠，但不经济；然而为了迅速完成磨合运转，在短时间内磨损量很大，则必然影响正常使用，同时零件的使用寿命也不长。所以，理想的磨合应该是满足以下两个要求：

- (1) 在短时间内必须进行有效的初期磨损；
- (2) 在磨合期中的磨损量小。

磨合后，配合件的工作表面彼此适应、服帖，即所谓“走顺”，形成适合其工作条件和保持油膜的形状。

实现理想的磨合，要求在磨合运转时能很好地保证润滑油的品质和润滑油充足连续供给；磨合运转时要有合适的负荷与运转时间分配；摩擦表面的加工粗糙度应适当等。

2. 正常磨损期

机器或配合件磨合后即投入正常运转。这个时期的特点是磨损速度降低，磨损量小。因为磨合以后，磨损表面已较光滑，冷加工硬化层也逐步形成，表面硬度提高，磨损显著减少。这时，机器可以承受较大的载荷和较高的速度。

在此阶段中，应注意对机器的维护保养，及时排除那些增加磨损的不利因素。例如经常检查润滑油的质量及供给是否充足、冷却是否良好等，以延长正常磨损期。

3. 急剧磨损期

机器或配合件经过长期运行以后，不仅使摩擦表面的几何形状和尺寸发生较大变化，而且使零件精度和配合性质变坏，进而产生振动，温度升高，磨损急剧增加。此时机器应停止运行，进行检修，使其技术状态恢复后再投入运行。否则将会导致机损事故。

三、减轻磨损的措施

根据前述有关磨损的机理，我们可以从设计、制造、安装和管理方面采取针对性措施来减小磨损。

(1) 设计方面 在选择配合件的材料时，要注意硬度和相溶性问题。当作用在零件上的载荷比较大时，应选用硬度较高的材料；在高温条件下工作的零件选用红硬性好的材料；尽量避免选用相同金属或互溶性大的材料，而应当选用互溶性小的材料，如一硬一软。由于在实际中磨损是不可避免的，因此在设计时使一个零件有很低的磨损率即使用硬的材料，与之配合的零件则采用可更换的零件，并且使它有比较高的磨损率即为较软的材料。例如，在柴油机中曲轴用硬度较高的钢制成，而轴承用较软的金属（如铅—锡、铜—铅、铝—锡合金）制成。此外，设计时尽量改善摩擦副间的润滑条件，防止高接触应力。

(2) 制造方面 应尽可能减少零件材料的内部缺陷；在零件表面上采用渗碳、渗氮、电镀、喷涂、滚压强化等方法以增强表面强度，提高零件的耐磨性、耐疲劳性和耐腐蚀性能。

(3) 安装方面 摩擦副之间的安装间隙要合适，如柴油机中活塞与气缸套的间隙、十字头滑块与导板的间隙及连杆大、小端轴承的间隙等；摩擦副之间的相对位置要对正，如柴油机活塞运动部件中心线要与固定件的中心线重合或平行，以防止不正常磨损。

(4) 管理方面 要注意载荷、速度、温度、润滑剂性能等因素对磨损的影响。摩擦副所承受的载荷愈大、相对运动的速度愈高、摩擦表面温度愈高，相应的磨损就愈大。因此，在柴油机运行管理中要防止超负荷和超转速运行，同时加强对冷却系统和滑油系统的管理。

四、气缸套的磨损及防护

1. 气缸套磨损的原因

引起气缸套磨损的原因很多，而且随着发动机的设计和实际的工作条件不同而变化。主要原因有：

(1) 正常磨损 这种磨损是在边界摩擦的润滑条件下，由于金属与金属不可避免的直接接触引起，而润滑油的品质不佳、粘度太低或供油不足等会使磨损加剧。

(2) 磨粒磨损 由于新气进入气缸时将灰尘等外界硬的物质带入，同时在活塞环与气缸套相对运动时产生金属碎片与颗粒等磨损产物，还有燃油或滑油燃烧后生成的炭粒或灰分以及滑油中的机械杂质等磨粒引起气缸套磨损。

一般情况下，发生磨粒磨损的气缸套内圆表面上有平行的纵向直线划痕，肉眼可以观