



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书  
船舶与海洋出版工程·航母与潜艇系列

# 舰船动力装置故障 诊断与可靠性

张维竞 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书

船舶与海洋出版工程·航母与潜艇系列

总主编 潘镜芙

# 舰船动力装置故障 诊断与可靠性

张维竞 编著

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书共分八章,从讲解舰船动力装置故障诊断与可靠性的基本概念入手,通过分析柴油机动力装置常见故障发生的机理和原因,介绍舰船动力装置故障诊断的主要技术和现代舰船动力装置的监控与运行趋势监测及故障诊断技术的进展,并介绍了系统可靠性分析和故障树分析方法,以及舰船动力装置可靠性。

### 图书在版编目(CIP)数据

舰船动力装置故障诊断与可靠性/张维竞编著. —  
上海:上海交通大学出版社,2012  
(船舶与海洋出版工程·航母与潜艇系列)  
ISBN 978-7-313-09156-7

I. ①舰… II. ①张… III. ①船舶机械-动力装置-  
故障诊断②船舶机械-动力装置-可靠性-研究  
IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 251330 号

### 舰船动力装置故障诊断与可靠性

张维竞 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

浙江云广印业有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 11.25 字数: 216 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-09156-7/U 定价: 35.00 元

---

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系  
联系电话: 0573-86577317

# 前 言

随着世界造船业、航运业的竞争和发展,其动力机械设备和系统越来越复杂,舰船动力装置的技术性能也越来越完善,自动化程度也越来越高,而船上的作业人员却越来越少。所以,舰船动力装置的故障诊断和可靠性问题受到造船界和航运界的日益重视。编者在多年轮机工程教学和科研工作积累的基础上,编写了《舰船动力装置故障诊断与可靠性》这本书。

本书从讲解舰船动力装置故障诊断与可靠性的基本概念和知识入手,再通过分析舰船柴油机及动力机械常见故障发生的机理和典型案例,结合舰船动力装置故障诊断的主要技术和现代舰船动力装置的监控与运行趋势监测及故障诊断技术的进展,使读者掌握舰船动力装置故障诊断的基本概念和知识。最后介绍了系统可靠性分析和故障树分析方法,舰船动力装置运行特点及主要故障,以及提高舰船动力装置可靠性的途径。在编写中力求深入浅出、通俗易懂、理论联系实际,使读者易于了解掌握舰船动力装置故障诊断和可靠性的相关技术知识。

本书可供从事舰船以及海洋工程动力装置设计、制造、试验及管理的人员学习和参考,也可作为轮机工程或热能与动力工程专业相关课程的教学参考书,也可作为有关院校培训轮机工程技术人员的教材。

本书的编写引用了国内外一些技术资料 and 文献的研发或研究结果,在此向有关的公司、作者表示感谢。由于编写时间仓促,理论水平和实践经验有限,书中难免存在缺点和错误,还望读者批评指正。

编 者

2012年8月于上海交通大学

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	001
1.1 舰船动力装置故障诊断的基本概念 .....	001
1.1.1 舰船动力装置故障的定义和分类 .....	001
1.1.2 动力机械设备维护和故障诊断技术的发展 .....	004
1.2 舰船动力装置故障诊断的意义和发展 .....	005
1.2.1 舰船航行的特点 .....	006
1.2.2 舰船动力装置故障诊断技术应用的意义 .....	007
1.2.3 舰船动力装置故障诊断技术的发展及应用概况 .....	009
<b>第 2 章 舰船柴油机动力装置常见故障原因分析</b> .....	011
2.1 柴油机温度异常原因分析 .....	011
2.1.1 排气温度异常分析 .....	011
2.1.2 冷却水温度异常分析 .....	013
2.1.3 滑油温度异常分析 .....	014
2.2 柴油机压力异常原因分析 .....	014
2.2.1 最大爆发压力异常分析 .....	014
2.2.2 压缩压力异常分析 .....	015
2.2.3 滑油压力异常分析 .....	015
2.2.4 冷却水压力异常分析 .....	016
2.3 废气涡轮增压器常见故障分析 .....	016
2.3.1 增压压力不够 .....	017
2.3.2 增压器涡轮进口温度过高 .....	018
2.3.3 增压器喘振 .....	019
2.3.4 异响与振动 .....	021

2.3.5	增压器滑油回油温度过高 .....	022
2.3.6	增压器的冷却水温度过高 .....	022
2.3.7	增压器轴承烧损 .....	022
2.3.8	废气倒流 .....	023
2.3.9	增压器中间壳油室气窗冒油 .....	023
2.4	柴油机动力装置典型故障案例分析 .....	024
<b>第3章 舰船动力装置故障诊断的主要方法与技术 .....</b>		<b>032</b>
3.1	人工故障诊断 .....	032
3.2	油样分析法 .....	033
3.2.1	现场油样快速分析 .....	035
3.2.2	光谱分析法 .....	036
3.2.3	铁谱油样分析技术 .....	038
3.3	振动监测故障诊断法 .....	043
3.3.1	机械振动的定义及分类 .....	043
3.3.2	简谐振动 .....	044
3.3.3	频谱分析 .....	047
3.3.4	动力机械典型故障分析 .....	049
3.4	模糊故障诊断法 .....	057
3.4.1	模糊数学的基本知识 .....	058
3.4.2	模糊故障诊断 .....	062
3.5	瞬时转速故障分析法 .....	064
3.5.1	气缸动力性能的诊断 .....	064
3.5.2	汽缸气密性的诊断 .....	065
3.6	舰船动力机械常用故障诊断方法及技术特点 .....	066
<b>第4章 舰船动力装置故障诊断与运行趋势监测 .....</b>		<b>069</b>
4.1	舰船柴油机动力装置故障诊断技术概述 .....	069
4.1.1	舰船柴油机动力装置监测和故障诊断技术发展的意义 .....	070
4.1.2	舰船柴油机动力装置故障诊断的发展概况 .....	071
4.2	CAPA 人工判断专家系统 .....	074
4.3	New Sulzer 智能发动机管理系统 .....	081

4.3.1	最优控制装置 .....	082
4.3.2	工况监测系统 .....	083
4.4	CoCoS 柴油机计算机控制监测系统 .....	093
4.4.1	CoCoS-EDS 系统的基本结构 .....	093
4.4.2	CoCoS-EDS 系统的数据采集功能 .....	095
4.4.3	CoCoS-EDS 系统的监测功能 .....	096
4.4.4	CoCoS-EDS 系统的故障诊断功能 .....	101
4.4.5	CoCoS-EDS 系统的趋势分析功能 .....	102
4.5	Wärtsilä FASK2i 基于知识的故障诊断系统 .....	105
4.5.1	FASK2i 的特点 .....	105
4.5.2	FASK2i 系统的结构 .....	106
4.5.3	FASK2i 软件的结构与功能 .....	107
<b>第 5 章</b>	<b>舰船动力装置可靠性工程基础 .....</b>	<b>113</b>
5.1	可靠性工程发展史 .....	113
5.1.1	国外可靠性工程发展概况 .....	113
5.1.2	我国可靠性工程发展概况 .....	115
5.2	可靠性的基本概念 .....	116
5.2.1	可靠性的定义 .....	116
5.2.2	可靠度 不可靠度 平均无故障工作时间 .....	120
5.2.3	故障、失效和故障率 $\lambda(t)$ .....	122
5.2.4	可靠性特性曲线(浴盆曲线) .....	123
5.3	可靠性工程中常用的概率分布 .....	124
5.3.1	指数分布 .....	124
5.3.2	正态分布 .....	126
5.3.3	伽玛分布( $\Gamma$ 分布) .....	127
5.3.4	威布尔分布 .....	129
<b>第 6 章</b>	<b>典型系统的可靠性分析 .....</b>	<b>131</b>
6.1	系统概述 .....	131
6.1.1	系统的定义和类型 .....	131
6.1.2	系统可靠性逻辑框图 .....	132

6.2	串联系统 .....	133
6.3	并联系统 .....	134
6.4	混联系统 .....	137
6.4.1	一般混联系统 .....	137
6.4.2	串-并联系统 .....	138
6.4.3	并-串联系统 .....	138
6.5	表决系统 .....	139
<b>第7章</b>	<b>故障树分析法 .....</b>	<b>142</b>
7.1	故障树分析法概述 .....	142
7.2	故障树分析法中的基本术语和符号 .....	143
7.3	建立故障树 .....	146
7.3.1	确定顶事件 .....	146
7.3.2	确定主流程 .....	146
7.3.3	建立边界条件和建树 .....	147
7.4	故障树的简化 .....	148
7.5	故障树的定性分析 .....	149
<b>第8章</b>	<b>舰船动力装置可靠性 .....</b>	<b>155</b>
8.1	动力装置可靠性的基本概念 .....	155
8.2	柴油机动力装置运行特点及主要故障 .....	158
8.3	蒸汽轮机动力装置运转特点及主要故障 .....	159
8.4	燃气轮机动力装置特点及主要故障 .....	161
8.5	提高舰船动力装置可靠性的途径 .....	162
8.5.1	提高舰船动力装置可靠性的主要途径 .....	163
8.5.2	设计时合理选用系统的组成方式 .....	165
<b>附录</b>	<b>.....</b>	<b>167</b>
<b>索引</b>	<b>.....</b>	<b>169</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>171</b>



# 第 1 章 概 述



## 1.1 舰船动力装置故障诊断的基本概念

所谓舰船动力装置故障诊断技术就是利用现代科学技术和仪器,根据舰船动力机械设备热力参数的变化来判别机械设备的工作状况或机械结构的损伤状态,确定故障的性质、程度、类别和部位,并研究分析故障产生的机理。

近年来,由于科学技术进步和海运业不断进行结构调整,舰船运营周转越来越快,靠港时间越来越短,对海上航运安全、环保的要求也越来越高。所以,舰船动力装置故障诊断技术成为国内外舰船和航运界比较关注并发展较快的一门学科,它所包含的内容比较广泛,诸如舰船动力装置热力参数的监测,状态特征参数变化的辨识,动力机械设备产生振动的原因分析、振源判断,以及船用动力机械故障防治、预报,动力机械零部件使用期间的可靠性分析和剩余寿命的估计等,都属于舰船动力装置故障诊断研究的范畴。

### 1.1.1 舰船动力装置故障的定义和分类

工程机械设备都具有一定的设计性能,符合一定的技术要求,能满足特定工程领域的使用需要。当它投入使用后,由于各部件受到不同因素的影响,会使工程机械设备的设计性能和技术状况不断下降,逐步偏离其设计指标或应用要求。当偏离达到一定程度后,它就不再能满足使用要求了,具体表现就是发生了故障。舰船动力装置故障是指舰船动力机械设备在使用功能上,降低或丧失了它所应达到的工作效能的现象,即在功能上达不到使用的技术要求,丧失或部分丧失了要求它所应达到的性能或指标。一般而言,故障可以分为以下几种。

**局部故障 (partial failure)** 系统、设备或部件没有完全丧失规定功能的故障。

**完全故障 (complete failure)** 系统、设备或部件完全丧失规定功能的故障。

**误用故障 (misuse failure)** 不按规定条件使用设备而引起的故障。

**本质故障(inherent weakness failure)** 设备或部件在规定条件下使用,由于设备或部件本身固有的弱点而引起的故障。

**独立故障(primary failure)** 不是由于其他设备或部件故障而引起的故障。

**从属故障(secondary failure)** 由于其他设备或部件故障而引起的故障。

**渐变故障(gradual failure)** 通过事前的测试或监控可以预测到的故障。这类故障可以采取预防的办法,防止故障的发生。

**突发故障(sudden failure)** 通过事前的测试或监控不能预测到的故障。

**退化故障(degradation failure)** 性能逐步变差而引起的局部故障,例如,轴承由于磨损,性能逐渐变差而不能胜任原定工作的规定范围。

**系统性故障(systematic failure)** 由某一固有因素引起,以特定形式出现的故障。它只能通过修改设计、制造工艺、操作程序或其他关联因素来消除。

**偶然故障(random failure)** 设备或部件由于偶然因素引起的故障。它只能通过概率或统计方法来预测,主要是采取“控制”的措施,将其控制在容许范围之内。

**单点故障(single point failure)** 能导致整个设备或部件故障的(没有冗余或替代的工作程序作为补救)局部故障,即一处故障就会导致全局故障。在系统设计中,应尽可能避免单点故障。

**轻度的故障(minor failure)** 不致引起复杂设备或部件完成规定功能能力降低的故障。

**严重故障(major failure)** 可能导致复杂设备或部件完成规定功能能力降低的故障。

**致命故障(critical failure)** 使设备或部件不能完成规定任务或可能导致人或物重大损失的故障。

**灾难性故障(catastrophic failure)** 导致人员伤亡或整个系统破坏的故障。

**间歇故障(intermittent failure)** 设备或部件故障后,不经修复而在限定时间内能自行恢复功能的故障。

**关联故障(relevant failure)** 由设备或部件本身引起的,在解释试验结果或计算可靠性特征数值时必须计入的故障。一般包括下列故障:设计不当的故障、制造不当的故障、间歇故障、随机的软件错误故障、故障机理未找准纠正措施无效的的所有反复故障以及未证实的故障。

**非关联故障(non-relevant failure)** 不是设备或部件本身引起的,在解释试验结果或计算可靠性特征数值时不应计入的故障。一般包括下列故障:安装损坏、意外事故或使用不当、试验设备或试验专用仪器引起的故障、外加应力超过试验规定引起的故障、超过预定更换期仍未更换的部件的故障以及按使用说明书规定的正常调整能够消除的故障。

**责任故障(chargeable failure)** 关联故障或由关联的独立故障引起的从属故障或由承制方提供的使用、维修程序引起的故障。

**非责任故障(non-chargeable failure)** 非关联故障或事先已规定不属某组织机构责任范围内的关联故障。

舰船动力机械设备的故障是复杂多样的,人们从不同的分析和研究角度,根据故障的性质、发生原因或后果等因素,将其归类如下。

### 1. 按故障危害的程度分类

这种故障分类主要依据故障危害造成的经济损失、停工时间作为评价标准;有的依据故障危害的程度分为局部、重大、严重、致命性等故障。在舰船动力装置中常见的有以下几类。

(1) 局部故障。如舰船动力装置中部分设备或部件功能丧失,但系统或设备还可使用。

(2) 严重故障。如舰船推进系统有严重故障造成舰船短时间停航。但一般可通过轮机员自行维修消除的故障。

(3) 致命故障。如舰船动力装置系统或主要设备不能完成规定任务或可能导致人员或设备重大损失,造成不得不进厂修理而引起长时间停航的故障。如作为舰船推进主机的柴油机在运行中发生连杆大端击穿机体且连杆伸出机体以外,在行业内俗称的“伸腿事故”。

### 2. 按故障发生的速度分类

(1) 渐发型故障。其特征是故障发生的概率与使用时间成正比关系。设备使用的时间越长,其故障发生的概率也越大。这类故障与零件的材料、磨损、疲劳、腐蚀等过程有密切关系。舰船动力机械中许多机械故障都属于这种类型。这类故障往往可以通过监测技术发现,故可以通过连续的状态监测有效地防止故障发生。比如舰船柴油机活塞环的磨损,曲轴和轴承的磨损,供油、供水或供气系统中过滤设备或管道的堵塞等故障均属此类故障。

(2) 突发型故障。其特征是故障发生具有偶然性,与设备使用时间长短无关,因而这类故障是难以预测的。例如:舰船推进装置在正常运行中主机遥控装置突然失灵,或主机突然无法启动,螺旋桨桨叶折断等。

### 3. 按故障产生的后果分类

(1) 功能故障。因舰船动力机械设备个别零件损坏,致使机械设备不能继续完成设定的功能。如离合器故障不能传递动力;柴油机因活塞环拉伤缸套不能工作等。

(2) 参数故障。此类故障表现为舰船动力机械设备的输出参数(特性)超出了允许极限值,它并不妨碍机器继续运转,但按技术要求标准衡量时,这些机械设备工作能力不佳或丧失了工作能力。如由于舰船动力装置管路系统的泄漏或堵塞造

成某些机械设备工作参数降低;柴油机因活塞环间隙大而使功率降低等。

#### 4. 按故障发生的原因分类

(1) 结构性故障。主要是由设备或部件设计不当引起,如柴油机活塞设计的结构不合理,造成活塞的热应力过大,使活塞发生开裂的故障。

(2) 工艺性故障。主要是设备制造、安装工艺问题所造成的故障。例如轴系校中、安装质量不良引起的轴系振动、轴承发热或过度磨损等。

(3) 磨损性故障。正常磨损下导致工作间隙过大,如由于过度磨损使活塞与气缸间隙过大而产生的敲缸、窜气等故障。

(4) 管理性故障。具有人为故障的特征。舰船动力机械设备的正常使用不仅与机械设备的设计和材料、制造和安装及使用时间的长短有关,还与正常的操作和维护有关,在舰船动力装置的故障中有不少故障是由于管理、操作人员的行为过失或误操作引起的故障。这是不容忽视的故障,已成为舰船动力装置故障的主要原因之一。

此外,还可根据故障发生的原因或性质等情况,可将故障分为责任故障、非责任故障;已发生的实际故障和未发生的潜在故障;波及性故障(二次故障)和断续性故障等。

### 1.1.2 动力机械设备维护和故障诊断技术的发展

动力机械设备维护故障诊断技术,实际上自有工业生产以来就已存在,早期人们是通过对机械设备的观察、触摸,感受设备的振动、温度、声音等状态特征,凭借工匠的实际操作经验,来判断设备是否有故障,什么地方有故障,是什么故障,应当采用什么样的检修或维修措施。到了20世纪60年代故障诊断技术才作为一门学科得到长足的发展,设备维护故障诊断技术至今基本可以归纳为以下三种形式。

#### 1. 事后维修(Run-to-breakdown Maintenance)

事后维修就是在动力机械设备发生故障之后才进行检修。这种方式仅适用于造价较低,一旦由于事故造成停机的直接、间接损失不大的机器设备。早期工业设备技术水平和复杂程度低,生产规模小,设备的利用率和维修费用问题没有引起人们重视,对机械设备的故障也缺乏足够的认识,一般都是在设备坏了后再进行修理,因此称为事后维修。

#### 2. 按时预防维修(Time-based Preventive Maintenance)

这种方法一般简称为**按时维修**,或**定时(期)维修**。20世纪初以来,随着大生产的发展,出现了以福特汽车装配线为代表的流水线生产方式。机械设备向着大型化、高速度和自动化程度高的方向发展,机械设备本身的技术水平和复杂程度大为提高,机械设备的事故或故障对生产的影响显著增加,在这种情况下,出现了定期预防性的维修方式,以便在事故发生之前就进行检修或更换零部件。这种方法

是根据机械设备设计性能或运行经验及统计资料,而确定了一定的工作时间,到了相应的间隔时间,就对机械设备进行一定级别的防护和维修措施,以保证机械设备的完好率处于一定水平。但这种维修方法带有很大的盲目性,既不经济也不合理。一个设备或装置即使不出毛病,到大修时也要解体检查,增加了不必要的维修拆装次数,造成经济和时间上的浪费,同时也会废弃许多尚可应用的零件,其缺点十分明显。另外,在某些情况下,对动力机械设备拆换部件非但不能改善设备的性能,反而在动力机械设备维修安装后,会产生较高的故障率,需经过磨合试车才能逐渐下降。所以它存在维修过剩的缺点,带来检修工作量大,耗时耗力。另一方面,机器设备过多拆卸还会造成人为故障,此外还存在需要更换的备品、备件多,维修费用大等缺点。这种过剩维修耗费了比较大的人力、物力和财力。

### 3. 视情维修(On-condition Maintenance)

这种基于状态监测的视情维修起始于20世纪70年代初期,也被称为**按需维修**。这种方法关注机械设备具体运行的性能和技术状态,需要对机械设备运行状况的发展趋势进行密切的追踪监测,而现代化的自动测控技术是根据在线监测和诊断装置所预报的机械设备运行状态,判断机械设备的劣化程度,发现机械设备早期的故障及其发展趋势,从而推算出机械设备何时达到恶化的程度,并确定机械设备的维修时间和内容。借助这种方法,可使企业和机械设备维修人员提前做好修理准备,在合适的时候进行维修,以获得较高的设备利用率和生产率。这种方法对旋转机械的状态监测尤为有效,所以在舰船动力装置上得到应用,它不仅提高了舰船航运的可靠性,而且还大大提高了舰船营运的经济性。

需要指出的是:要求机械设备绝对不出现故障是不现实的,绝对安全可靠的机械设备也是不存在的,最好的机械设备也可能会出现故障,重要的是我们能否及时发现机械设备的异常和故障,掌握机械设备的运行现状,把握它的运行趋势,对已形成的或正在形成的故障进行正确的分析诊断,判断故障的部位和产生的原因,并及早采取有效的预防和维修措施,做到防患于未然。机械故障诊断技术就是为了适应这一需要而发展起来的。

## 1.2 舰船动力装置故障诊断的意义和发展

中国既是造船大国,又是航运大国。2011年,我国造船完工量创历史地达到7 665万载重吨,相比2010年的6 560万载重吨,同比增长16.9%。根据英国克拉克松研究公司提供的统计数据,2011年中国造船完工量占国际市场份额41.2%,新接订单量占国际市场份额46.9%,手持订单量占国际市场份额44.9%,在世界

主要造船大国中,这三大指标都位居第一。我国进入 21 世纪以来,造船完工量不断攀升,其变化过程如图 1-1 所示。

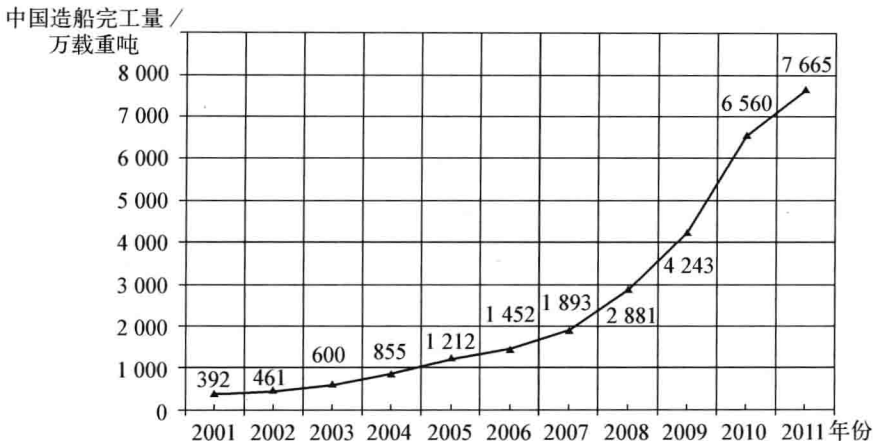


图 1-1 我国近十年造船完工量的攀升变化

注:此表根据中国船舶工业行业协会提供的统计数据绘制

海运业是促进中国国民经济迅速发展的重要因素之一。我国经过几十年的迅速发展,成为世界上拥有较大商船队的国家之一,为世界贸易的顺利开展做出了自己的贡献,也为中国经济持续发展提供了有力保障。2011 年我国水上运输舰船总规模首次突破 2 亿载重吨,其中海运船队达到 1.15 亿载重吨,仅次于希腊、日本和德国,居世界第四位。

在我国舰船制造业和航运业飞速发展的今天,加强对舰船动力装置进行状态监测和故障诊断技术的研究,预报舰船动力装置可能发生的故障,特别是舰船推进系统可能发生的故障和故障的部位,对提高舰船的设计性能和航行安全,提高舰船营运的经济性和可靠性都具有非常重要的意义。

### 1.2.1 舰船航行的特点

舰船是在江河和海洋环境下完成运输或作战任务的大型装备,和其他一般工业设备相比,其工作条件和使用维修方面具有以下几个特点:

(1) 舰船营运和服务是在江河或海上,实际上是一个远离陆地或基地的孤立系统,一旦发生故障,一般情况下只能靠船员自行排除故障或修理,难以得到陆上的支持和及时的修理服务。因此,为使舰船完成规定的任务,应确保它能够在复杂的工作条件下长期安全的运行。

(2) 在舰船动力装置中,包括推进主机在内的各种动力机械设备种类多,功能各异,但台(件)数少,且备件也少。而越是在复杂的航区和严酷的气象条件下,舰船动力装置越会发生意外的故障,有时会导致严重的后果。

(3) 海洋气象环境复杂,舰船动力装置使用的环境苛刻多变,工作条件严酷,舰船动力装置在运行过程中,工作参数变化范围大。

(4) 舰船动力装置发生故障可能危及全船,有时甚至会导致海难事故发生。其后果不仅影响到运输、作战任务的完成,而且有时还对周围海域造成环境污染,给水产、旅游等相关行业造成危害,影响生态环境。因此,近年来国际上对海上航行安全越来越重视,提出了较高的要求。

(5) 面对现代舰船动力装置种类和功能众多的机械设备,不仅需要船员随时了解并掌握各种机电设备的原理和结构,还要船员操纵和管理它们,有时还需要船员对机械设备发生的故障进行维修或采取应急措施,因此对船员的素质、能力和技术要求较高。

随着社会的进步,人们要求舰船技术更先进,航行更安全,承运能力更强,对环境保护的力度更大。近年来,尽管随着安全航运法规的不断健全,舰船航运技术不断进步,海上事故数量呈下降的趋势,但是,海上航行仍是个高风险的行业,每年仍有很多海上事故发生,造成了大量的人员伤亡和财产损失,海洋环境也受到大量的破坏。海上事故造成的生命、财产损失和环境污染,仍受到国际社会的广泛关注。

### 1.2.2 舰船动力装置故障诊断技术应用的意义

现代的舰船是水上浮动的工程装备,在舰船上安装有大功率的推进系统,先进的导航和自动化监测控制设备,现代化的武器装备,凝聚了许多先进科学技术成果。面向 21 世纪的现代化舰船正朝着大型、高速、智能、环保等方向发展,使舰船造价大幅度提高,所以对舰船的设计制造诸方面,特别是舰船动力装置的可靠性问题提出了更新、更高的要求。

近 20 年来,我国舰船运输事业有了很大的发展,据交通运输部统计,2011 年,全国港口完成货物吞吐量首次突破 100 亿吨,外贸货物吞吐量 27.86 亿吨,集装箱吞吐量达 1.64 亿 TEU,货物吞吐量和集装箱吞吐量双双位居世界首位。但水上航行的安全还不容乐观。2011 年,全国共发生运输舰船交通事故 298 件,因运输舰船交通事故死亡 291 人,沉船 175 艘,直接经济损失 3 915.8 万元。据挪威 DNV 船级社估计,世界船队每年的事故损失高达 100 亿美元。据瑞典一家船舶保险公司(The Swedish Club)1998 年统计,在 1988~1997 年的 10 年间由于机械设备引发事故而赔偿的事件占总赔偿事件的 38%,其赔偿费用占总赔偿费用的 22%。有人收集和整理了国内主要航运公司近 30 年来发生的重大机损案例近 400 例,对故障类型和事故原因进行了统计分析,从故障部件来看,主机事故 188 例,占 47.4%,电站事故 79 例,占 19.9%,辅机系统事故 74 例,占 18.6%,其他如轴系、舵机、锅炉、锚机、空调、起货机等各种设备的故障占 14.1%,舰船动力装置故障案例的分布情况见图 1-2。由此可见,在舰船柴油机动力装置中,柴油机的故障率是最高



的。在所有故障类型中,磨损故障 41 例,加上疲劳、老化、变形、剥落、破损、断裂共 106 例。可见,设备金属疲劳引起的故障仍较高,这主要是由于舰船动力机械设备的的工作环境十分恶劣,一直处于高温、高压、高腐蚀、强振动和应力集中的工况中,才会出现频繁的断裂、磨损、烧损和碎裂等故障。特别是活塞、缸套、气阀、喷油器这些承受高温、高压的部件,最易发生故障。而且随着柴油机增压度的提高,发生故障的可能性也随之增大。采用故障诊断技术研制开发柴油机监测与故障诊断设备可以对柴油机进行实时监测,可及早发现故障征兆,及时修理、更换失效零部件,减少和避免恶性事故的发生。这样,就可节省维修时间和费用,保证运行状态良好,提高柴油机的使用率,延长柴油机的使用寿命。

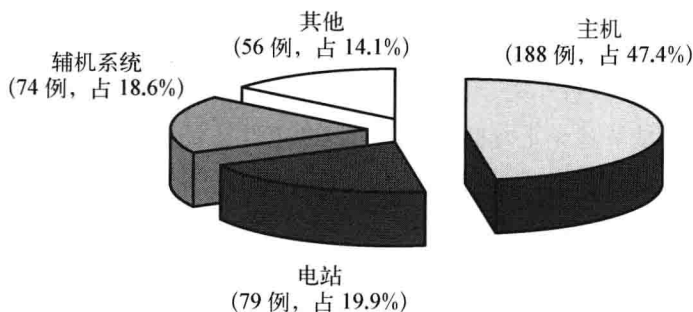


图 1-2 舰船动力装置故障案例的分布情况

过去,舰船动力装置采用按时预防维修的方式,由于按时维修方式缺乏对事故的预见能力,造成过剩维修,导致维修成本很高,费工、费时、费钱。如果采用现代化的监测与故障诊断技术,进行按需维修,不仅可防止突发事故,保障舰船安全,而且可以减少维修费用,提高设备的利用率,从而带来很大的经济效益和社会效益。所以,一方面由于舰船实际的工作条件和使用维修方面具有的特点,以及从舰船营运经济性考虑(每停航一天所产生的巨大经济损失),另一方面,由于现代计算机监测和控制技术的迅猛发展,促进了舰船的故障诊断技术的应用和发展。在现代化的舰船上,柴油机动力装置已弃用按时预防维修的方法而实现了按需维修。舰船动力装置采用按需维修的方式在产生重大经济效益的同时还具有以下重要作用:

(1) 舰船动力装置故障诊断技术提高了航运系统的合理安排和安全营运的能力。

(2) 预防和减少了舰船动力装置恶性故障事故的发生,降低了维修率,提高了在航率。

(3) 利用计算机监测系统对舰船动力装置关键部件的长期监测,对科学分析舰船动力装置各种设备、部件的损伤程度提供了可靠依据,提高了对舰船动力装置故障诊断的准确性,对于防止海上重大恶性事故的发生具有十分重大的意义。



### 1.2.3 舰船动力装置故障诊断技术的发展及应用概况

由于国际贸易的发展,航运竞争的日趋激烈,使得对舰船营运的安全性、经济性和环保性要求不断提高,而计算机、网络、通信等信息技术的飞速发展,以及信息技术在现代舰船上的广泛应用,又对舰船的安全航行、提高航运效率、降低运营成本、促进科学管理起到了前所未有的作用,由此极大地推动了舰船动力装置故障诊断技术的迅速发展。

自20世纪80年代末建造的大型舰船,一般都装有舰船动力装置自动监测系统,近几年,新造舰船还装有主机工况和功率检测装置。这些系统对舰船机舱所有的机电设备做实时检测、记录、报警等信息化处理。经过信息化处理的重要数据,被保存并传送给舰船公司管理部门。这些经过处理后的数字化信息输入故障诊断和分析系统,可对动力装置当前信息进行模糊处理,判断动力装置当前的运行状态,并预见未来的发展趋势和可能发生的故障类别。所以,舰船动力装置故障诊断技术已从早期的状态监测(condition monitoring)发展到20世纪末的状态监测和故障诊断(condition monitoring and fault diagnosis)。比较典型的例子是挪威Autronica公司研制开发的舰船柴油机工况监测与诊断系统。它由两个子系统组成,分别为NK-100系统和PD-100系统。其中NK-100系统用来监测柴油机平均指示压力(Mean Indicated Pressure, MIP)等热力参数,而PD-100系统则对NK-100系统所监测的数据进行分析、计算,从而进行故障诊断,提出柴油机运行的工况报告。可提供:气缸工作曲线、柴油机运行趋势状态、参数条形图、活塞环工作情况、不停机处理,以及数据质量管理等。德国MTU公司研制了柴油机管理系统MDEC(Diesel Engine Control, MTU),对柴油机的功能和参数进行精细的监测、诊断与控制,并将柴油机的控制纳入舰船其他监测系统装置中,形成轮机系统的智能化管理与控制,增强了柴油机运行的可靠性,排放的柔性控制和降低燃油、滑油的消耗。另外,MAN B&W公司开发的CoCoS-EDS(Computer Controlled Surveillance-Engine Diagnostics System)和Wartsila公司的MAPEX(Monitoring and Maintenance Performance Enhancement with Expert Knowledge)都是通过柴油机多种参数的实时测量分析,来综合监测诊断柴油机性能的系统,是智能化柴油机的基础。

国内在舰船动力装置故障诊断及可靠性领域的科学研究始于20世纪80年代初,当时有关的高校结合有关课题开始对舰船动力装置可靠性理论进行研究,通过指导本科和研究生学位论文,将舰船动力装置可靠性理论融入教学中,并于80年代末,将动力装置可靠性分析的内容编入舰船动力装置的专业教材中,在90年代初出版专门的舰船动力装置可靠性教材。此后,国内的有关高校和研究部门相继做了许多的研究课题,发表了相关的论文,也有一些研究成果和开发的设备应用在