

上海海运学院

硕士学位论文

船舶螺旋桨轴状态监测技术研究

专业：轮机工程

研究方向：现代船舶管理

研究生：孟昭玉

导师：郑士君

2005年6月

摘 要

近年来,随着船舶维修制度的变革,油液监控技术逐渐应用于船舶设备管理领域。船舶螺旋桨轴系统是船舶动力装置的重要组成部分,螺旋桨轴及其衬套、轴承、轴瓦的磨损程度和损坏情况直接关系到船舶安全航行。本论文根据船舶螺旋桨轴系统自身的特性以及外部环境等影响因素,利用领域专家经验和相关的知识,对螺旋桨轴油液的常规理化性能检验、油液光谱分析和铁谱分析等油液检测技术进行了分别研究,并建立了数据处理模型,介绍了磨粒识别技术;在此基础上,初步应用了信息的综合和融合方法对数据结果进行了船舶螺旋桨轴滑油检测的实例处理;并开发了一套润滑油状态监控应用软件,用于螺旋桨轴油液分析数据的存储、分析、趋势分析、处理过程跟踪,以进行故障分析与经验积累。

本课题船舶螺旋桨轴状态监测技术其主要功能是:通过分析螺旋桨轴系统油样的性能指标变化监控其劣化状况;通过对油样中的磨损元素、污染元素和添加剂元素的含量分析以及油样中磨粒的形貌及浓度定量分析,推断设备磨损状态、磨损部位和严重程度,以及污染物对设备性能、技术状态的影响;为系统滑油的使用和管理,以及螺旋桨轴系统的维修保养等工作提供科学的指导意见。

本论文主要采用文献资料研究法、实践研究法、案例调查分析法、归纳总结法等研究方法,其主要工作是研究设备磨损理论以及油品的性能分析的重要作用;根据各种检测方式及数据特征,建立了各自合适的数学模型;根据油液检测多技术之特点,从理论上探讨了检测信息综合和融合技术并将该技术进行了初步的实际应用;开发了船舶螺旋桨轴润滑油状态监控应用程序。

本研究项目最终要达到降低船舶螺旋桨轴系统的故障率、维修费用与工作量,延长船检周期从而提高船舶营运率的目标;为船舶管理公司增强对船舶螺旋桨轴系统的安全、船舶经济运行与航行安全的控制力度,为船舶符合各船级社关于螺旋桨轴状态监控系统的要求,为船舶管理公司的管理技术创新提供技术保障。

经调研、深入分析,本论文得出如下结论:对油液检测得出的参数数据综合应用趋势分析、模糊数学、时间序列分析等数学方法,可提高状态识别和预测的准确度及可靠度;对螺旋桨轴系统实施状态监测,可提高尾轴系统的可靠性、提高船舶的营运率;螺旋桨轴状态监测亦可延长机械设备检修和检验间隔,实现避免不必要的拆检造成的机器故障从而达到节省费用的目标。

关键词: 油液监测, 螺旋桨轴系统, 数据模型, 软件开发

Abstract

In the last few years, with the development of ship maintenance system, oil monitoring technology is applied to ship field gradually. Ship's stern shaft system is an important part of the ship power system, so the wearing degree and defective instance of the stern shaft and it's bush, shaft bearing and bearing shell come down to the ship's voyage safety directly. In this paper, according to the character of the ship stern system and the factors that effect it's capability, such as environment, utilizing the experience of the field expert, and combined with the practice of ship manufacturing and maintenance, namely oil quality testing, spectrometric oil analysis, and Ferrography analysis etc, is studied respectively, and then models for data processing are established and identifying technology of Abrasive particles is introduced. On the basis of this, it has been preliminary used the synthesis and infusion methods of information to process the result of the data, using the lubricating oil measuring of several typical ship stern shaft as examples. At last, A Ship Stern Shaft Lubricant State Monitoring System is programmed. The monitoring system to ship stern shaft is used to store analyzed data, to analyze data, to do trend analysis and to scout disposed course, in order to analyze the malfunction and accumulate experience.

The paper mainly adopts following research methods: the method of the documents and materials, the method of practice research, the method of investigation and analysis to the case , and also, the method of induction and deduction etc. The main function of the ship stern shaft state monitoring technology is: Analyzing the change of the parameters and the quality of stern shaft system oil, monitoring the inferior change of the oil quality; Analyzing the wearing elements, contamination elements and additive elements and the debris in the oil sample, search after the affiliation between the character and the wear condition and the failure of the part of the device. Study the affection of the contamination in the oil to the performance and condition of the device. Colligating the primitive data, such as the type, running environment, running condition, maintenance activity etc, of the ship stern shaft system and device and the experiment data, realizing the condition monitoring and fault diagnosing technology, directing the management and using of the oil, providing advice to the maintenance and inspection of the ship stern shaft system and

device.

The main tasks of the paper are: Studying the wearing theory of equipment and the importance of lubricant's capability analysis; Establishing different but appropriate mathematics model according to different detection mode and data character; According to the characteristic of multi-technology, the paper has discussed information colligation and amalgamation technology in theory, and has put the technology into practice primarily; programming A Ship Stern Shaft Lubricant State Monitoring application.

The final aim of the study item is to reduce the failure rate, repair & maintenance expense and workload of ship stern shaft system, to prolong the cycle of ship inspection and to enhance ship working rate. It can also help ship management department to strengthen the safety of ship stern shaft system, the economical working and the safety of sail. It helps ship management to accord with the criterion about ship screw shaft state monitoring system of Classification Societies. It provides technology protection to the technology innovation of the ship management department.

On the basis of many kinds of investigation and in-depth analysis, this thesis draws the following conclusions: synthetically using the mathematics method such as trend analysis, fuzzy mathematics and time series analysis to analyze the parameter data drawn from the fluid measure, we can improve the accuracy and reliability of state recognition and prediction; implementing the state monitoring to propeller shaft system, we can raise the dependability of the stern and axle system, and also raise the operation rate of boat; The state monitoring of the propeller shaft can also lengthen the overhaul and checkout interval of the mechanical equipments, thus prevent mechanical disordering caused by unnecessary dismantling and save expenses.

Meng Zhaoyu(Marine Engineering)

Directed by Zheng Shijun

Key Words: oil monitoring, stern shaft system, data mode, software programmed

目录

第一章 绪论	1
1.1 船舶尾轴状态监测的意义与途径	1
1.2 当前船舶尾轴管理、维修与检验概况	2
1.3 课题背景	4
1.4 本论文的主要任务和内容	4
第二章 磨损故障机理及状况监测的研究	7
2.1 机械设备磨损故障及有关概念	7
2.2 机械设备磨损机理及磨损过程监测	9
2.3 状态监测技术在船舶维修中的应用	12
第三章 尾轴状态监测技术	13
3.1 油液监测技术	13
3.2 尾轴润滑油液取送样	16
3.3 油液分析技术	18
3.4 油液检测数据处理方式	19
第四章 油液检测数据处理技术	22
4.1 数据处理方式	22
4.2 常规理化性能分析	23
4.3 元素含量分析(光谱分析)	24
4.4 磨粒形貌及浓度分析(铁谱分析)	28
第五章 尾轴油液监测信息综合与融合	35
5.1 油液监测信息源特征	35
5.2 油液监测综合应用技术	36
5.3 信息综合与信息融合	39
5.4 信息融合方法在船舶尾轴油液监测上的应用	41
5.5 油液监测信息融合模型	41
第六章 油液检测技术在船舶尾轴状态监测中应用	43
6.1 油液常用检测方式及船级社要求	43
6.2 监测应用实例	46
6.3 设备状态综合评定	51
第七章 船舶油液检测数据应用软件开发	52

7.1 软件系统开发原则·····	52
7.2 软件开发工具介绍·····	52
7.3 系统实现·····	54
7.4 系统主要内容·····	58
第八章 结论与展望·····	61
8.1 本论文的工作要点·····	61
8.2 今后研究工作之展望·····	61
致谢 ·····	63
附录 ·····	64
参考文献 ·····	72

第一章 绪论

本世纪六十年代以来，随着科学技术的飞速发展，工业生产迅速向大型化、高速化、自动化方向迈进；机器设备的性能越来越高，功能越来越完善，结构越来越复杂。这样以来，对生产设备的可靠性提出了更高的要求。一旦发生故障，不仅会造成经济上的巨大损失，还可能会产生各种社会问题。

人们对许多机械设备事故的调查结果标明，如果能够对设备的工作状态做出正确的判断，及时进行调整与维修，绝大多数事故都可以防患于未然。于是设备状态监测与故障诊断这一随着现代化工业发展而产生的技术逐渐引起了重视。

设备状态监测与诊断技术是一种了解和掌握设备在使用过程中的状态，确定其整体或局部是否正常，早期发现故障及其产生的原因，并能预报事故演变趋势的技术^[1]。目前，设备的状态监测对象形成了不同的监测诊断方法和技术，其中主要的监测技术有无损检测、评价技术、声发射技术、噪声监测技术、振动监测技术和油液分析技术等。

本论文所讨论的船舶螺旋桨轴（尾轴）状态监测技术就是针对船舶螺旋桨轴系统的油液分析技术。该项技术对于保证船舶动力装置与推进装置的正常运行、降低故障率、提高船舶螺旋桨轴系统的工作可靠性具有重要意义。

1.1 船舶螺旋桨轴状态监测的意义与途径

为了减少船舶危险情况或灾难性事故的发生，降低停航时间，延长润滑油寿命，对船舶机械运行状态进行监测是很有必要的。通过状态监测，为船舶故障早期判定提供信息，满足船舶管理和维修的需要，增加安全性；并可合理安排维修，最大限度地延长维修周期，节约维修费用；避免设备二次损坏，降低运行成本。按我国船级社与世界上主要船级社的检验标准与指导性文件的有关规定，使用润滑油油液分析诊断技术最能体现现代船舶机械设备状态监测的发展趋势。

船舶螺旋桨轴是船舶推进装置的重要组成部分。螺旋桨轴及其衬套、轴瓦的磨损程度和损坏情况直接关系到船舶安全航行。所以需要定期抽轴检验以及时发现缺陷、防止故障。中国船级社 CCS 规定有 3 种方式可替代定期的螺旋桨抽轴检验，分别为变通检验、部分检验和螺旋桨轴状态监控系统的检验。但只有状态监控可在不抽轴的情况下进行检验，延长抽轴检验间隔期，避免过度维修和不足维修。英国劳埃德船级社 LR 也对此做了要求：对作为直接主推进装置使用的螺旋桨轴，存在基于工况监测的特定程序，其可作为替代的检验方法；根据 SCM（螺

旋桨轴状态监控)程序,如果工况监测参数处于允许的范围内,则在正常的检验间隔内无须将螺旋桨轴从螺旋桨轴承中抽出检验。

船舶螺旋桨轴是船舶最易发生磨损性故障的部位之一。对该设备实施油液监测,是船舶实现现代化科学管理和采用以预防为主的视情维修体制的可靠技术保证。通过油液监测可对设备的磨损状况以及对设备故障进行早期故障预报、预防,确保设备技术状况完好。

船舶螺旋桨轴油液监测技术是当前国际船舶动力装置状态监测、故障诊断、失效分析,实现以可靠性为中心的预防维修管理的发展大趋势,也是贯彻落实国际海事组织(IMO)和国际船级社协会(IACS)加强船舶安全管理基础性的关键技术工作。

润滑油油液分析诊断技术是近几年迅速发展起来的用于船舶机械设备状态监测与故障诊断的新技术,它能够在设备不停机、不解体的情况下监测设备工作状态,诊断设备的异常部位、异常程度及原因,从而预报设备可能发生的故障,有针对性地进行维护与修理,是现代轮机管理维修制度由定期维修过渡到预测维修的技术保障。

对船舶螺旋桨轴采用油液监测诊断技术,不仅能保证机械设备正常运行、降低故障率,而且还能极大地提高船舶机械设备的工作可靠性和利用率、提高船舶营运率,并可最大限度地延长维修周期(CCS规定可延长螺旋桨轴坞内抽出检验的间隔期为10年或15年)。对此,劳氏船级社也做出了明确阐述:监测程序定义了测得的参数、测量的频率、记录和评估数据的方法以确定螺旋桨轴轴承的物理状态及运转工况,如果所有的工况监测数据都处于正常的允许范围内,并且在所有其他方面劳氏验船师对程序的正确执行感到满意,则在正常的5年期检查中不必抽出螺旋桨轴进行检验。

因此,润滑油油液监测诊断技术具有十分重要的经济性和技术意义。

1.2 当前船舶螺旋桨轴管理、维修与检验概况

1.2.1 船舶螺旋桨轴系统的管理

螺旋桨轴的工作条件很差,因此故障也较多,需要加强管理。螺旋桨轴的支持轴颈和密封轴颈可能因间隙不合适、轴线不正和润滑不良而发生擦伤、过度磨损、烧伤和锈蚀。红套的铜套和接缝可能因过盈不足或过大而发生松动和裂纹。锥形轴段的过度处和键槽处,可能因疲劳、振动和撞击而出现裂纹。轴和轴颈也可能因密封不良而锈蚀。

船舶航行时,螺旋桨轴管中的螺旋桨轴承及密封装置是最容易发热的部件,

必须进行润滑和冷却。油润滑螺旋桨轴管上要装设润滑系统。在大型船舶上,该润滑系统较为复杂,如图 1-1 所示为 5400 箱船舶螺旋桨轴润滑系统。

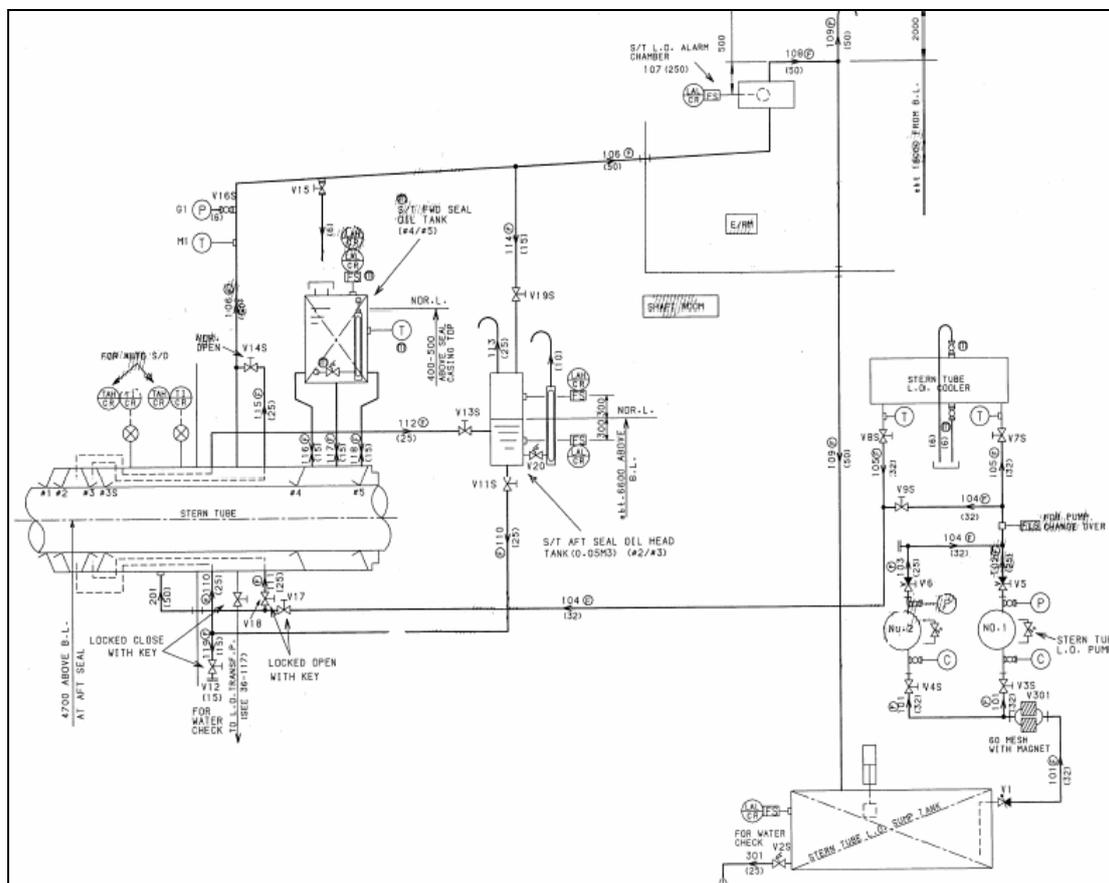


图 1-1 螺旋桨轴管润滑系统

对于巴氏合金螺旋桨轴,要确保其润滑油系统正常工作。注意观察重力油箱油位,要注意油质和油温,注意螺旋桨轴密封是否漏油。特别是尾密封装置更为重要,它若漏油不仅浪费滑油,还要污染海水。因此,很有必要通过状态监测确保尾轴运转情况及密封情况,确定抽验螺旋桨轴时间或及时更换密封装置。

1.2.2 船舶螺旋桨轴检修概况

船舶轴系要定期进坞检查;安装时注意不要让污物落入螺旋桨轴管及油封;螺旋桨毂内孔要和螺旋桨轴锥部很好贴合,接触面不少于 75%。固紧螺帽固紧力要符合规定。

螺旋桨轴、尾轴管及其衬套、轴瓦的磨损程度和损坏情况直接关系到船舶安全航行。所以,定期抽轴检验及时发现缺陷、防止故障是十分必要的。

对螺旋桨采用定期(5 年或 5 年内)进行抽轴检验,是当前船级检验的一项

重要内容。但其弊端显而易见：针对性和准确性不高，有时不仅无效，甚至会造成设备精度和可靠性降低；维修费用较高、工作量大；降低船舶的营运率。因此，在保证船级要求的前提下，可采用一定条件下检验一定的项目来替代抽轴检验，即采用螺旋桨轴状况监控系统的检验。设有状态监控系统的螺旋桨轴，如其监控记录参数都在正常范围内，则螺旋桨轴抽出检验的间隔期可为 10 年或 15 年，年度检验时只进行确认性检查即可。附录 1 为中国船级社于 2004 年 4 月 12 日对船舶 SEA GLORIA 进行螺旋桨抽轴检验后下次抽轴期展为 2014 年的实例，期间只需对该船舶尾轴进行符合要求的状态监测即可。

1.3 课题背景

油液监测技术在船舶机械设备预知维修中的应用，1987 年由美孚石油（Mobil oil）公司与与劳氏（Lloyd's Register）船级社联合组成的研究项目组，以《作为机器状况监测工具的润滑油分析》（LUBRICATING OIL ANALYSIS AS A MACHINERY HEALTH MONITORING TOOL）为课题的研究计划做得较为成功。经过三年多时间，对 35 家航运公司的 130 艘船舶的跟踪、实践与研究，得到以下两个结论：

(1) 润滑油寿命的延长可以减少运行费用和由于变质润滑油的排放造成的环境污染；定期润滑油检测给船舶管理人员提供了信息，以便能采取措施延长润滑油寿命。

(2) 延长机械设备检修和检验间隔，结果额外节省了很多费用。通过分析油液的磨损物种类与含量，在必要时进行维修，若油液分析结果良好，就不需要对机器进行拆检，这样就可节省维修费用与工作量，而且可避免不必要的拆检造成的机器故障。

1997 年中远集运的“鲁河”与“粤河”两艘船舶进入美孚石油公司的用户跟踪服务船舶，正常跟踪了约二年不到时间，后由于油公司的退出等原因而没有很好进行，但也取得了一条经验。1995 年中散公司（富源山轮）参加美孚石油的“海运工程服务计划”对气缸刮下油进行过一段时间的跟踪，但时间也不长。目前，国内虽有少数航运公司的船舶采用螺旋桨轴状态监测，但由于各种原因，仍未能获得普遍认可的效益及扩大应用范围的积极性。

国内有关的院校和科研单位在油液监测技术研究方面做过研究工作的有原武汉水运科技大学，西安交大、哈工大等，但均以理论研究为主，真正实船应用的很少，尤其是长时间跟踪的基本上没有。本课题通过与油液检测研究单位、船舶管理公司合作，立足于做好该技术在船舶机械设备状态监测中

应用的基础性工作，经过若干年的技术跟踪与数据积累，再作为船舶机械设备的一种技术管理方法加以推广应用，以利船舶取得更好的经济效益和安全效益。

1.4 本论文的主要任务和内容

本论文首先阐述机械设备磨损故障、磨损机理和磨损过程有关概念以及磨损理论在船舶机械预知维修中的应用，为油液监测技术提供理论基础。并遵照我国与世界上主要船级社对船舶螺旋桨轴和螺旋桨轴润滑油状态监控技术要求与标准做好基础工作。主要研究内容有：

(1)制定出尾轴系统润滑油油液分析诊断技术操作规程，并探索出油液分析诊断技术各阶段工作，包括取样、油液分析技术（油品理化分析、光谱分析、铁谱分析）、油液检测数据处理以及油液综合诊断技术（如图 1-2 所示）；

(2)开发一套船舶螺旋桨轴润滑油状态监控计算机管理系统，用于螺旋桨轴和尾轴管油液分析数据的存储、分析、趋势分析、处理过程跟踪，以进行故障分析与经验积累，最终为研发智能化专家系统打下基础；

(3)联合油液检测中心，参照相关船级社的指导性文件，确定科学实用的油液检测方法与项目，为制定出油液质量指标与油液中污染物、磨损物的允许使用范围与参考标准做好前期工作，用于设备早期故障的预测与改进、油液的日常维护管理工作；

(4)以螺旋桨轴润滑油油液监测数据为依据，探索适用于现代船舶螺旋桨轴日常维护有效方法与维修周期，建立与完善一套适应现代船舶轮机管理的螺旋桨轴维修管理体系。

本研究项目最终要达到降低船舶螺旋桨轴故障率、维修费用与工作量，延长尾轴抽检周期、提高机械设备的利用率与船舶营运率的目标。并为船舶管理公司增强对船舶动力装置的安全、经济运行与船舶航行安全的控制力度，为船舶管理公司的管理技术创新提供技术保障。

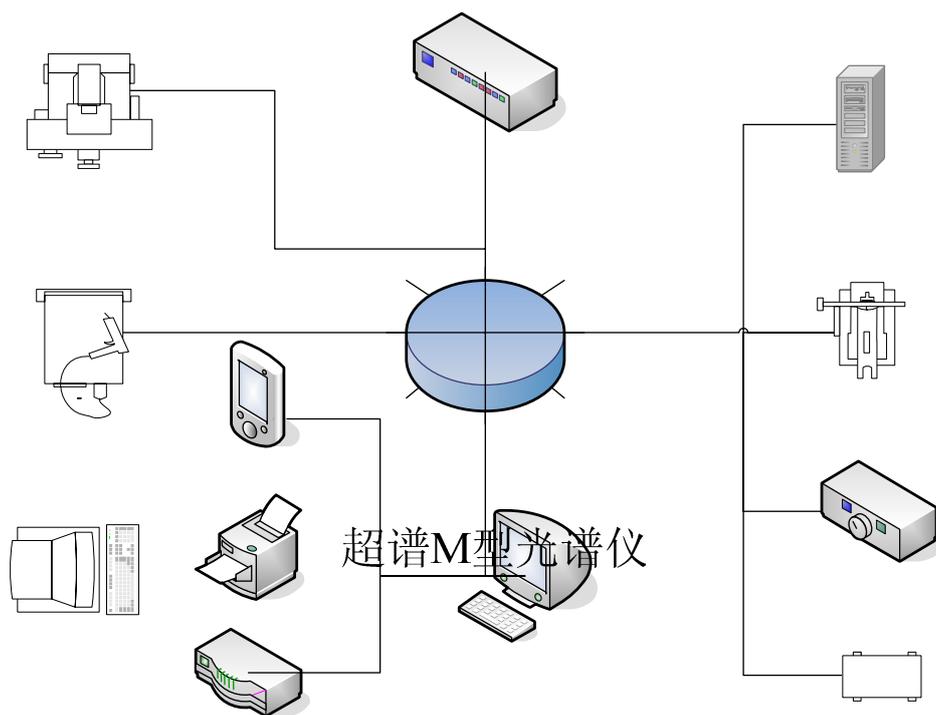


图 1-2 油液分析综合诊断技术^[6]

傅立叶红

直读铁谱仪
(分析铁谱仪)

调制解调器

批量打印机

计算机
状态

后备磁带

第二章 磨损故障机理及状况监测的研究

2.1 机械设备磨损故障及有关概念

机械故障是结构或机械零件在尺寸、形状或材料性质方面的改变，这些变化会使结构或机械零件不能达到原设计所要求的功能或者改变其原有的各种参数。其中，磨损是导致船舶机械失效的主要故障模式，是影响船舶机械正常运转和船舶安全航行的主要因素之一。据统计，一般磨损故障占机械设备故障的 80%，因而对机械设备进行磨损工况监测和故障诊断具有重要意义。

实践证明，应用已有的摩擦学知识来解决摩擦、磨损和润滑问题，其经济效益十分巨大。因此，对于船舶管理者来说，必须了解船机零件的摩擦和磨损机理，掌握磨损规律及提高零件耐磨性的途径和方法，在管理工作中努力防止零件过早和过度磨损，确保船机安全、可靠工作，减少维修和提高机器的使用寿命。

当两个相互接触物体的表面在外力作用下作相对运动（或有运动趋势）时，实际接触表面间产生切向阻力和阻力矩，即产生了摩擦。摩擦是各种机械运动副相对运动时，在相互作用表面间产生的一种不可避免的物理现象。不同的摩擦状态表现出的摩擦系数不同，如图 2-1 所示的 Stribeck 曲线就表现了这些摩擦状态（ u 、 η 、 p 分别是速度、润滑剂粘度和压力）。零件的磨损超过某一限度，就会丧失其规定的功能，这种情况称为磨损失效。例如，柴油机气缸套磨损后，会导致油耗激增，承载能力下降，曲轴箱窜气，冲击振动等。磨损故障则是由于相对运动的两个表面之间的摩擦磨损致使设备的功能低于规定水平的状态。归纳起来，引起磨损故障有两种情况：（1）由设备设计时意料之中的正常磨损引起的故障；（2）设备安装与使用过程中的异常磨损导致的故障。

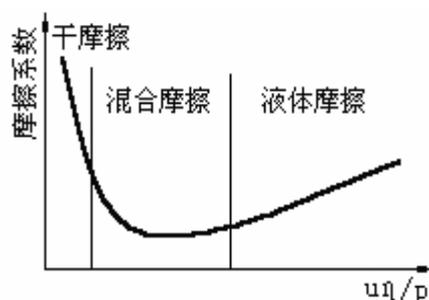


图2-1 Stribeck曲线

机械零件在安装过程中由于安装不良或(和)清理不干净而导致设备在运行过程中异常磨损，或者在使用过程中由于偶然的外来因素(磨料进入、载荷条件变化)和内部因素(润滑不良、摩擦发热等)影响而出现异常磨损。异常磨损引发

的故障具有偶然性和突发性，对此类故障的诊断具有重要意义。

船舶机械管理中，轮机管理人员通常通过定期测量零件，检查其尺寸和几何形状是否在允许值范围内，保证配合件的间隙和工作性能。有关的磨损指标如下：

(1) 磨损量：零件磨损量可用其摩擦表面的尺寸变化量来衡量。直径方向上的磨损量 Δ ：

$$\text{轴}\Delta: d_0 - d \quad \text{孔}\Delta = D - D_0$$

式中： d_0 、 D_0 ——分别为轴、孔的名义直径，mm；

d 、 D ——分别为轴、孔的实测直径，mm。

(2) 磨损率 Φ ：是指单位时间内零件半径方向上的最大磨损量 Δ_{\max} ：

$$\Phi = \Delta_{\max} / t (\text{mm/kh})$$

式中， t ——工作时间，kh。

依测量值计算出的磨损量或磨损率应与机器说明书或有关标准、规范的数值比较，以判断零件磨损程度。

(3) 磨损几何形状指标主要有以下几项：

① 圆度：是指半径差为公差 t 的两个同心圆之间的区域。圆度是用来限制回转零件横截面（垂直零件轴线的截面）的几何形状误差。

② 圆度误差：用圆度仪、千分尺（表）或百分表可以测量零件的实际圆度，即圆度误差 t' 。圆度误差 t' 是用被测零件上指定横截面的两个相互垂直直径差的一半来表示。

$$t' = |D_1 - D_2| / 2$$

式中， t' ——指定横截面的圆度误差，mm；

D_1 D_2 ——指定横截面上两个相互垂直的直径，mm。

在数个指定横截面的圆度误差值中，取最大值 t'_{\max} 与机器说明书、标准或规范给定的允许值 t 比较，以判断零件横截面几何形状的变化情况，要求 $t'_{\max} < t$ 。

③ 圆柱度 u ：是指半径差为公差 u 的两个同心圆柱间的区域。圆柱度是用来限制回转零件纵截面（包含零件轴线的截面）的几何形状误差。

④ 圆柱度误差 u' ：用圆度仪、千分尺（表）和百分表可以测量零件的实际圆柱度，即圆柱度误差 u' 。圆柱度误差 u' 是用被测零件上指定纵截面上数个测量直径中最大与最小直径差的一半表示。

$$u' = (D_{\max} - D_{\min}) / 2 \quad (\text{mm})$$

生产中要求测量被测零件两个相互垂直纵截面的圆柱度误差，其中取最大值 $u'_{\max} < u$ 。

评价磨损的严重程度主要使用磨损量法和磨损率法。前者包括长度磨损量、

体积磨损量和重量磨损量等评价材料磨损的基本磨损量；后者包括磨损速率和磨损强度等指标。

长度磨损量是指磨损过程中沿摩擦表面垂直方向测量的表面尺寸变化量，也称为线磨损量；体积磨损量是指在磨损过程中，摩擦副材料本身体积的变化量；重量磨损量是指在磨损过程中，摩擦副材料本身重量的变化量。显然，磨损量只是表示某一摩擦表面的磨损程度的绝对数量。

由于磨损是在一段时间过程中发生的，是时间的函数，所以可用磨损速率（即磨损量大小与产生该磨损量的时间之比）来反映。磨损强度是指磨损量大小与产生该磨损量的相应摩擦路程之比。显然，磨损速率和磨损强度均可表示各比较摩擦面的磨损程度，其值越大，表示程度越严重。

在利用油液分析设备状态的过程中，作为介质的润滑油中含有大量的摩擦副表面产生的磨削碎屑，运用光谱分析时光谱仪的测量单位标定为重量浓度，即润滑油中所含磨损物的重量与润滑油的总重量之比，单位为ppm。

2.2 机械设备磨损机理及磨损过程监测

2.2.1 设备磨损机理

零部件摩擦表面的磨损量总是随摩擦时间延续而逐渐增加。实践证明，零件的正常磨损过程一般可以分为3个阶段。图2-2是正常工况下测出的磨损量和磨损率与时间的关系曲线，它反映了新造和修理的零件自投入运转到发生故障的3个工作阶段的磨损情况。

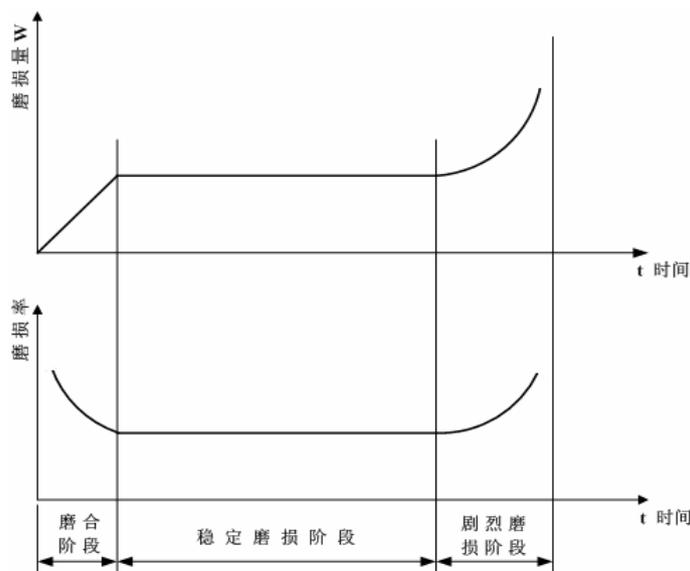


图 2-2 磨损过程一般规律

(1) 磨合期

这是初期磨损阶段，该阶段的特点是短时间内磨损量增长较快，可使粗糙度

减少 65%~75%。磨合可以提高摩擦表面质量,使其承受额定速度和负荷的能力得到提高,并及时发现和排除检修和装配中的缺陷;是机器或摩擦副能否进入正常运转阶段的前提。

(2) 正常磨损期

这一阶段摩擦表面的磨损量随着工作时间的延长而均匀、缓慢地增长;而磨损率则由高过渡到低,并维持在一个比较稳定的水平上。零件摩擦副表面之间已形成较为稳定的油膜,在润滑油充裕的工况下处于一种流体动力润滑状态;该油膜不仅在很大程度上避免了微凸体尖峰的接触,而且极大地改善了表面的受力状况,使微凸体尖峰受力变为大部分表面处于一种比较均匀的受力状态。这对于减小磨损是极为有利的。零件的磨损寿命与磨合阶段的磨合质量有关,更与这一阶段摩擦表面的工作条件、技术维护好坏关系极大,应及时排除那些增大磨损的因素。

(3) 急剧磨损期

经过长时间的正常磨损之后,当磨损达到某一极限值时,摩擦副的精度丧失,配合性质变坏,或由于种种其他原因,如载荷的波动、润滑失效、摩擦副表面材料在长期交变应力作用下发生疲劳损伤等原因,都会导致磨损加剧。进入这一阶段,磨损量曲线和磨损率曲线均呈急剧上升。急剧磨损所造成的后果是严重的,不仅导致机械效率下降,粘度丧失,还可能产生异常的振动、冲击和噪声,摩擦副温度迅速上升,磨损加剧,最终造成零件的破坏和失效,甚至导致机器的损坏。应及时停机检修,否则导致事故发生。

2.2.2 磨损过程与滑油状况监测

机器零部件的失效是影响机器正常运行的主要障碍之一,而零部件的磨损失效又是机械零件失效中最常见、最主要的失效形式。为了减少机器设备中运动部件表面之间的摩擦和磨损,通常是在运动表面之间加润滑剂。由于运动表面之间的相互摩擦和磨损,在机器运转过程中会有大量的磨损颗粒进入润滑系统中,这些磨损颗粒在油液中大多呈悬浮状态。此外,油液中还有空气和其他污染源带来的污染物的颗粒。这些微小颗粒携带有机械设备失效和故障的重要信息。

实践证明,不同的磨损作用过程(跑合期、正常磨损期、严重磨损期)产生的磨粒有不同的特征(形态、尺寸、表面形貌、数量和粒子的分布),它们反映和代表了不同的磨损失效类型(粘着磨损、磨料磨损、表面疲劳磨损、腐蚀磨损等)。因此,对润滑剂进行分析,对于研究机器的磨损状态、磨损失效类型、磨损机理以及油品的性能分析都有重要作用。同时这也是一种在不停机不解体的状

况下对机器设备的状态进行监测和诊断的重要手段。特别对于低速的且以磨损为主要失效形式的回转机械,利用振动和噪声等监测技术提取信号和判断故障往往较为困难,此时油液分析技术则是一种较为有效的方法。尤其在船舱内,不便于使用测振仪和噪声监测法,而采集油样却比较方便,这时对油样进行分析就成为一种主要的监测方法。

油液分析技术的主要监测功能有:

(1) 润滑油性能、品质及污染度的监测。针对润滑油在使用中的变化状况,及时采取净化、补油、换油等措施,从而保持润滑油的良好理化性能,保证机械设备相对运动零件摩擦副表面处于完全液体润滑状态。

(2) 机械设备正常工作状态的监测。监测设备相对运动零件摩擦副的磨损趋势,及时发现设备的早期异常现象,避免设备故障的发生,保证设备运转性能,提高设备的可靠性,延长使用寿命,显著地节约维修费用。

在油液分析中应用最广的是光谱分析和铁谱分析。光谱分析技术可以有效地监测机械设备润滑系统中润滑油所含磨损颗粒的成分及其含量的变化;同时也可以准确地检测润滑油中添加剂的状况,以及润滑油污染度变质的程度。光谱分析的特点是分析速度快,操作简单,能够测定油液中的微量金属元素。例如美国贝尔德(Baird)公司生产的FAS-2C型直读式光谱仪可在1分钟的时间内同时测定20种元素,并以数字方式显示或打印输出。但只能分析油液中小于10微米的粒子,不能对油液中的微粒做形态分析,并且,对补油换油后测定的数据必须加以修正才能使用。而铁谱分析对于数微米级的大磨粒有较高的分析效能。而大磨粒在补油或换油后能在较短的时间内恢复其平衡浓度,不影响测试结果,并可对磨粒进行形态分析。根据磨粒的形状、大小和表面形貌特征,可以了解磨粒产生的原因;通过铁谱分析的一些方法和扫描电镜X射线能谱,可以确定磨粒的成分,从而了解到磨粒的产生来源;通过对磨粒分布情况作定量分析,可以判断机械磨损的程度,预报零件的磨损失效等。因而,必要情况下光谱仪和铁谱仪配合使用,通过铁谱仪作进一步的相近分析。

同时,由于润滑油在工作中受高温、高剪切作用以及空气中氧气、氮气的存在,会发生氧化、硝化、硫化反应以及抗氧化剂、抗磨剂的降解。基于理化性质分析的润滑状态监测主要是通过监测润滑油质量平均参数来决定润滑油本身的有效性^[12]。

油样理化分析、光谱分析、铁谱分析的综合监测是最可取最有效的方法。可以扬长避短、互相补充,从而提高设备状态监测的准确度^[6]。

2.3 状态监测技术在船舶维修中的应用

由于现代化船舶对机器设备、乃至一个零件的工作可靠性，都提出了极高的要求，为了确保各种机械设备的运行安全，提高其可靠性和安全运转率，必须加强设备运行管理，进行工况监测工作，及时发现异常情况，加强对故障的早期诊断和预防。

发展状态监测技术，实施故障诊断工作，有着潜在的巨大经济效益和社会效益，这表现在：

第一，可以减少或避免由于某一零部件的故障导致整个设备的突然停转和已经发生恶性事故而造成重大经济损失和人员伤亡。

第二，能帮助维修人员早期发现异常，迅速查明故障原因，预测故障影响。从而实现有计划有针对性的按状态或视情检修，延长检修周期，缩短检修时间，提高检修质量，制定合适的维修计划，将常规检修次数减少到最小并在最有利的时机进行维修，提高设备的维修管理水平。

采用设备状态监测技术，不仅可以减少维修费用和提高设备利用率，而且可以尽快地改变我国长期以来凭个人局部经验去寻找故障的落后局面，对提高长期以来凭个人局部经验去寻找故障的落后局面，对提高设备维修管理水平至关重要。

状态监测和视情维修可以避免不足维修或过剩维修所致的增加停机时间或增加维修费用所造成的不必要的损失，具有以下优点：

(1)能正确监测设备状态，既可以控制因过剩维修而造成的费用上升，也可防止因不足维修而导致事故于未然。

(2)因不搞定期维修，既可以减少材料消耗和维修工作量，又可避免因修理而出现人为的故障。

第三章 螺旋桨轴状态监测技术

3.1 油液监测技术

状态监测就是指对设备某些参数（如振动、噪声、温度、滑油参数等）进行测取，将测定值与规定的正常值（门限值）进行比较，以判别设备的工作状态正常与否，其大体过程如图 3-1 所示。若对设备进行定期或连续监测便可获得设备状态变化的趋势性规律，进而对设备以及润滑油液的剩余寿命做出估计，从而对设备状态进行预测、预报。

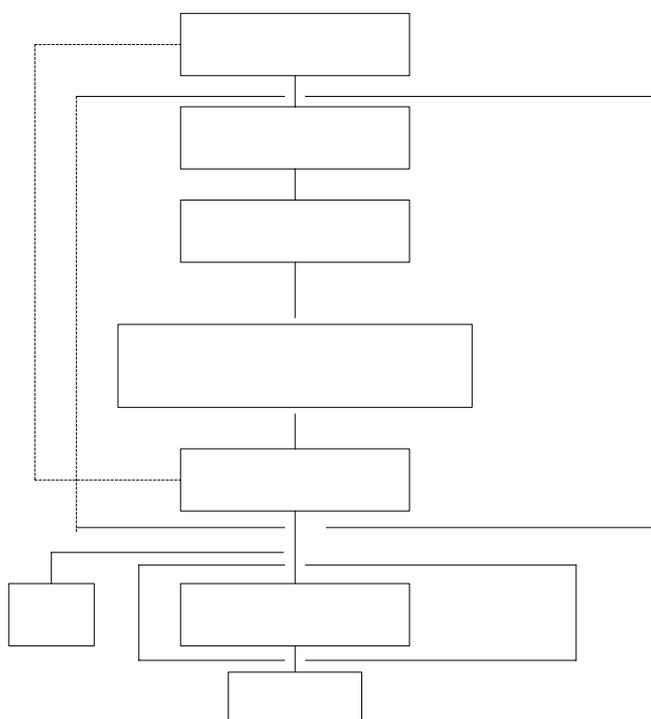


图 3-1 状态检测的步骤及作用

对船舶而言，为了减少船舶停航时间，增加设备使用率，延长润滑油使用寿命，对船舶机械的运行状态进行监测是很有必要的。通过状态监测，为船舶设备故障早期判定提供关键信息，满足船舶管理和维护的需要，使危险情况或灾难性事故的发生减少到最小，提高航行安全；并可合理安排维修项目，最大限度地延长维修周期，节约维修费用，避免设备二次损坏，降低运行成本。

船舶螺旋桨轴是船舶推进装置的重要组成部分，也是最易发生磨损性故障的部位之一。对该设备实施油液监测，是对轴系实现科学管理和采用以预防为主的状态维修的可靠保证。通过油液监测可对设备的磨损状况以及对设备故障进行早期故障预报、预防，确保设备技术状况完好。

劳氏船级社对设备油液监测的作用进行了具体的描述：通过对润滑油的分析

诊断信号的

信号的

信号处

特征向量的提

可以辨别出油液中夹杂的金属磨损颗粒。分析这些金属颗粒的类型可判断机械设备的哪一部分在磨损,通过趋势分析可推断出磨损的状况。这些分析的另一作用就是预警异物的增长率,例如水、灰尘、煤灰及燃油等,这些都可降低油的润滑性能从而导致机械设备过早失效。

3.1.1 船舶油液监测技术的发展

油液监测技术应用在船舶方面,国外已经有很成功的实例。英国石油公司开发了船舶状态监控与故障监测系统;加拿大海军拥有了自己的舰船监测系统以及光谱油料分析系统;目前,DNA、ABS、LR、NK、BV 等国际著名的船级社对油液监控及故障诊断技术十分重视,先后颁布实施了有关基于油液监测的视情检验系统的规范和指导性文件,为船舶油液监控的应用奠定了良好的基础。

对船舶动力装置应用油液监测技术,并以摩擦学、润滑技术、故障诊断技术、可靠性与维修性工程以及计算机信息系统等学科理论为指导,对影响船舶动力装置技术状态的磨损、腐蚀和污染情况进行监测、评价与预测是油液监控技术的关键,它主要是面向营运船舶,并逐渐延伸到新建船舶。完善而系统的船舶油液监控智能诊断网络系统已成为发达国家研究与开发的重点课题之一。

1987年,英国劳氏船级社与 Mobil 石油公司合作对 35 家航运公司的 130 艘船舶的机械进行了为期 3 年的润滑油监测研究,深入探讨了润滑油与机械工况之间的关系,合作开发的 PFA (Progressive Fast Analysis) 系统已开始为船东提供基于 INTERNET 的快速油液分析服务 PFA Inter-Link 和基于卫星通讯的维修综合管理服务系统 (MAMS)。

挪威船级社开发的 DNVPS (DNV Petroleum Services) 全球系统已成为 20 世纪末船舶油料分析技术与商业化服务的典范,并制定了较完善的船舶状态监控规范和指导性文件,船舶螺旋桨轴抽油检验间隔期由 5 年延长至 15 年就是船舶油液监控技术的应用成果之一。

美国船级社在 1987 年制定了“基于预防维修技术的检验指南”,将振动监测、滑油监测及性能参数监测技术用于基于状态维修的船舶机械检验中。

船舶油液监测技术是当前国际船舶动力装置状态监测、故障诊断、失效分析,实现以可靠性为中心的预防维修管理的发展大趋势。

3.1.2 油液状态监测的主要任务

润滑油油液分析诊断技术是近几年迅速发展起来的用于船舶机械设备状态监测与故障诊断的新技术,它能够在设备不停机、不解体的情况下监测设备工作

状况，诊断设备的异常部位、异常程度及原因，从而预报设备可能发生的故障，有针对性地进行维护与修理。这是现代轮机管理维修制度由定期维修过渡到预测维修的技术保障。

船舶机械设备油液监测诊断技术的实施与应用不仅能保证动力装置与机械设备正常运行、降低故障率、防止重大机损事故的发生，而且还能极大地提高船舶机械设备的工作可靠性和利用率、降低维修费用、提高船舶营运率、确保船舶航行安全。因此，润滑油油液监测诊断技术具有十分重要的经济性和技术意义。

油液监测中心提供的油液监测技术服务及作用如图 3-2 所示：

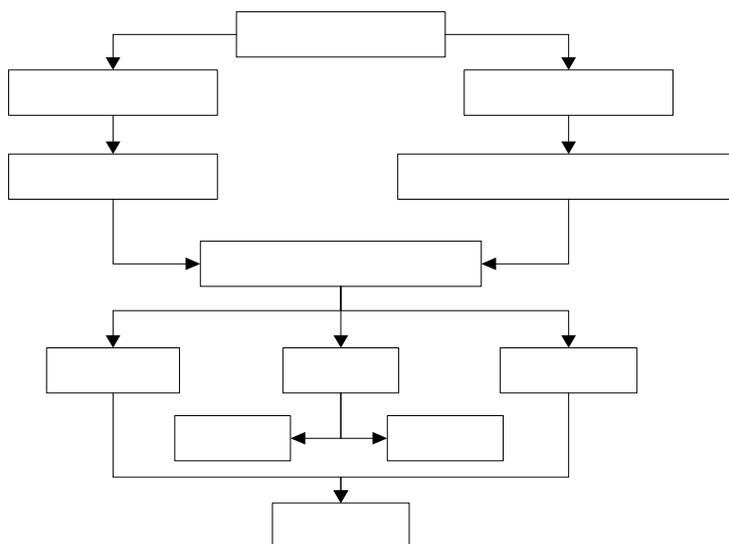


图 3-2 油液监测技术服务及作用

设备的良好润滑状态可大大减少磨损失效，有效的延长设备使用寿命，最大限度降低停机损失。润滑油好比设备的血液，定期抽检有代表性的在用油进行化验如同医生通过抽血化验为病人病情进行诊断一样，只有准确找出生病部位，查明病因，对症下药，才能使病人及早恢复健康。油液监测通过油品分析检验手段，最终目的是保证设备长期稳定处于最佳运行状态，避免产生事故，特别是机损人亡的重大事故。

润滑油分析

3.1.3 油液状态监测的实施程序

(1) 在深入了解所实施油液监测对象有关情况（功能、结构、运转现状、润滑材料及润滑系统现状等）的基础上，选择并制定合理的油液监测方案及技术。对于关键设备，在实际工作中为了避免问题的复杂性，可抓住关心的问题快速分析，只监测其中的部分参数。

(2) 选取油样，这是实施监测技术的重要环节。原始油样是测定磨损微粒、进行数据处理和分析、最后判断故障的基础，取样的正确性和代表性将直接影响

油液监

设备润滑状态

设备运转的真

正常

异常

到故障判断的正确与否。应严格按照规定的技术规范取原始油样。

(3) 制备检测油样，按照所选用的油液监测技术及仪器所规定的制备方法和步骤，认真制备，否则会直接影响结果的可靠性。

(4) 将检测油样送入监测仪器，定性定量测定有关参数。

(5) 进行检测数据处理与分析，视所选用监测技术的不同，可以采用趋势法、类比法等处理数据和结果分析，进一步可应用数理统计、模糊数学等知识建立相应的计算机处理系统。

(6) 根据数据处理的结果，判断设备的异常，包括异常部位、异常程度及原因，并预报可能出现的问题以及发生异常的时间、范围和后果。

(7) 提出改进设备异常状况的措施（包括处理异常的时间、内容、费用、具体修改方案和实施）。

3.2 螺旋桨轴润滑油液取送样

3.2.1 油液取样的基本原则

在对船舶设备采用滑油状态监测过程中，需要从润滑系统中取一定容积的油样进行分析，该过程称为取样。设备实施状态监测，润滑油应定期抽样送检。油液的取样须满足两个基本原则：一是油样能够代表整个系统油液的品质与污染状况，即确保分析结果具有代表性；二是在整个取样过程中确保油样不被污染。

3.2.2 油液的取样方法

取样应由专人负责，取样人员应有强烈的事业心和对取样工作高度认真、负责的工作态度和工作作风^[10]。油液的取样方法有在线串联取样、在线并联取样和容器取样 3 种方法。由于各种原因，目前在现场普遍采用在系统中设置专用取样阀进行容器取样。

用容器取样可以从系统管道或油箱中直接取样。从油箱内取样，由于油液基本上处于静止状态，油液中固体颗粒的浓度和尺寸分布与在系统各部分有较大的差异，因此样液的代表性较差。从管路中取样所得的样液为动态样液，具有较好的代表性，在条件许可的情况下应尽量采用。

取样应采用不易破碎的、清洁的、干燥的专用油样瓶，瓶盖必须严密、防泄漏。取样后，应立即贴好统一规格的标签，并认真填好标签上的有关内容，如船名和船舶登记号等^[10]。

3.2.3 取样点的确定

确定取样点时,既要考虑到所取样液具有代表性,又要考虑到取样操作时的可靠性。一般原则是将最有可能造成系统产生故障的部位确定为取样点。

美孚石油公司与劳氏船级社推荐的螺旋桨轴油样取样点为:从由滑油泵打回到重力柜之间的管路中取样。

值得一提的是在系统不同的位置所取的同样油样的分析结果会有所不同,为了得到正确的可预测的结果,在同样的位置取样,是建立润滑油趋势分析监测机械设备运行状态的必要条件。因此,取样部位一经确定,每次取样应在同一部位进行。

3.2.4 取样频率的确定

在进行油液分析与机械设备的状态监测时,一般采用以一定时间间隔的取样方式取样。时间间隔要根据机械设备的工作性质来确定,并根据设备运行时间的长短以及工作的实际状态随时调整。在机械设备处于磨合状态时,取样间隔要短;在正常工作期间,取样周期可适当延长;接近维修期或监测结果出现异常时要缩短取样周期。

对螺旋桨轴而言,美孚石油公司与劳氏船级社推荐的油液取样频率一般定为4个月。CCS则建议取样周期一般按螺旋桨轴每3~6个月取样一次,最长不应超过6个月;新船或刚开始进行状态监测的船舶,应每3个月送检一次。若发现运行状态异常时,应随时取样、及时送检,并保留存样。根据油样监测情况,必要时应增加取样密度,以防止发生意外机损事故。

3.2.5 取送油样注意事项

(1)每次取样都应在机械设备运行一定时间,待系统中油液的工作参数达到额定值后进行。一般情况下,取样应在设备运行状态下进行;特殊情况必须停机取样时,应在停机后立即取样,最长不应超过8个小时^[10]。

(2)每次取样前先要清洁取样阀的外部,防止污染物落入样液中;同时,必须保证取样口周围清洁,无污染杂质。

(3)每次取样前先打开取样阀放出1升左右的油液冲洗取样阀,然后再将油液放入油样瓶中,以保证送检油样的均匀性与代表性。

(4)取样时要防止取样管下端接触油样与油样瓶的内部;取样后应立即将样品瓶外表擦干净,贴牢标签,防止脱落,并保持标签清洁、字迹清楚,尽量避免油渍污染^[10]。

(5) 专用油样瓶与标签纸由油液检测实验室统一提供。油样瓶内部的清洁度应高于油液的清洁度，以防影响油液分析结果的正确性。

(6) 取油样的数量应满足油液分析所需。对螺旋桨轴油样而言，每次取样 250~300ml，对有特殊要求的或异样的样品可增加至 500ml。对新油进行检测时，油样量需根据检测项目另定^[10]。

(7) 取油样的同时应记录下机械设备当时的各种参数，以便日后对其进行综合分析。

(8) 对于船舶机械设备的取样为避免油样在船存放时间过长影响分析结果，在正常情况下应选择在到港前一天进行。

(9) 若首次对设备进行油液监测取样送检时，还应提供一个与该设备所取油品牌号完全相同的新油作比较用。当该设备更换不同牌号的油品时，应重新送一该牌号新油油样，以确保监测结果的连续性与准确性^[10]。

3.3 油液分析技术

3.3.1 分析内容

(1) 油品的劣化变质程度：氧化程度、硫化程度、硝化程度、聚合化程度、被污染程度，被燃料和水的稀释程度，以及添加剂成分的损耗程度等。

(2) 油样中所含磨粒的数量、大小、形态、成分及其变化；

3.3.2 分析功能

(1) 监测设备、故障诊断、失效分析、预测预防。

(2) 设备现代管理。推行状态视情维修，降低维修费用，最能合理地利用设备的效益；

(3) 提高设备的随时可用性；

(4) 延长润滑油的使用期限；

(5) 保证油品的质量，判断油品的污染变质程度；

(6) 制定合理的设备磨合规范。

3.3.3 分析仪器

(1) 油品理化性能分析仪器：如粘度计、测定仪等；

(2) 铁谱仪：如分析式、直读式、旋转式等；

(3) 光谱仪。如直读发射光谱仪、红外光谱仪等。

油液分析技术涉及的机理、分析内容及使用的仪器见表 3-1。

表 3-1 油液分析及仪器^[6]

油液分析技术	机 理	分析内容	仪 器
油品理化指标及污染度监测	油品物理、化学性能指标的变化,反映油品的劣化变质程度,表明润滑油的润滑性能下降,超过一定数值,润滑油成为废油。 燃油稀释、水分污染、杂质污染	粘度、酸值、碱值、闪点、水分、机械杂质、颗粒数、积炭、硝化、硫化、氧化、乙二醇	振荡式粘度计、滴定仪、闪点计、T-IR 红外光谱仪 (美国 BioRad 公司, PE 公司)、粒计数器、d ₅ A 便携式数显污染监测仪、ITS 润滑测试工具箱
油液光谱分析	通过测量物质燃烧发出的特定波长、一定光强度的光,从而检测磨粒的元素成分及含量浓度、监测设备运转状态、磨损趋势、判断磨损部位	金属磨粒元素成分及含量浓度值 添加剂元素成分浓度 杂质污染元素成分及浓度	直读式发射光谱仪,超谱 M 型、Jr 型、Jr+型光谱仪,超谱 ICP 型光谱仪 (美国 SPEC-TRO 公司), FAS-2C 型 MOA 型光谱仪 (美国 Baird 公司), 帕尔金 ICP 光谱仪 (美国 PE 公司)
油液铁谱分析	借助高梯度、强磁场的铁谱仪将油液中的金属磨粒有序分离出来进行分析,从而监测设备运转状态、磨损趋势、判断磨损机理	磨粒尺寸 磨粒数量 磨粒形貌 磨粒成分	分析式铁谱仪 直读式铁谱仪 旋转式铁谱仪

3.4 油液检测数据处理方式

趋势分析是状态监测和故障诊断中普遍采用的方法,将其与各类诊断参考标准相结合,可以做出多种状态趋势分析图。它既可以用于评判设备运行状态的优劣,也可以用于各类故障的早期预报。概括地说,趋势分析技术所要完成的任务就是要根据设备征兆信息去识别状态和预测未来。

除了趋势分析这一常规的分析方法,还可针对不同的检测手段和数据特征采用不同的数据处理方法。通过对这些方法进行程序处理,即可用于故障信息的分析、模式识别和综合评价。

3.4.1 设备状态趋势分析

趋势分析目前主要还处于实验室研究阶段,研究手段可以采用最小二乘拟合、时序模型、卡尔曼滤波等方法,并不断探索新的理论和方法,如利用人工神经网络来分析设备的各种被监测量,以形成对设备状态的全面描述。趋势分析主要涉及以下两个方面的内容:

(1) 参量的选择

由于征兆信息的种类较多（如粘度、水分、各种磨屑等），因此进行趋势分析时可资分析的具体内容是多方面的。可以采用典型信号的比较判别法，可以实现设备状态监测和简易诊断。

(2) 分析方法的选择

不论何种分析方法都要做出设备状态的趋势曲线和预报曲线。趋势曲线是以时间（取样日期）为横坐标，以测试参数值（如粘度值、水分含量、各种磨屑浓度等）为纵坐标，画一条通过各点的折线，该线就是趋势曲线。通过对现有机械设备的某一反映设备状态的指标进行拟合来进行外推以确定机械设备的状态是有充分的理论依据也是可行的。因此，预报曲线就是在趋势曲线上对离散点进行曲线拟合。

3.4.2 常规理化性能检验

常规理化性能检验是油液监控技术的基础，主要检验指标有粘度、酸值、碱值、闪点、水分、机械杂质、颗粒数、积炭、硝化、硫化、氧化、乙二醇等性能参数。为保证系统的预期性能及可靠性，需要了解系统中油液的性能劣化状况。

对油液常规理化性能分析得出的数据进行数学评判，实际上也无法建立精确数学模型，属于“依赖经验或其他随意性”问题，因此，采用模糊数学能够取得更为完善的结果，也比较适宜。

3.4.3 油料光谱分析

一组典型的船舶螺旋桨轴系统滑油光谱分析样本如表 3-2 所示：

表 3-2 螺旋桨轴系统滑油光谱分析样本

	040809572	030127078	020812430	020501611
Iron	9	11	14	16
Copper	1	3	6	9
Chromium	1	1	0	1
Aluminum	5	1	2	3
Silicon	13	9	7	11
Sodium	2	6	3	10
Magnesium	35	29	37	45
Vanadium	2	0	3	14
Nickel	1	2	3	4
Evaluation				

该表横向为观测的要素含量（ppm），纵向为观测时间的分栏，最后一行为对该次检测值的评估结论。这种类型的光谱分析数据大量存在。

从横向对该表进行分析,每个要素可视为一维,该维的观测数据严格按照时间序列,如果对于观测时间间隔加以限制,那么就构成了时间序列。该序列中动态地隐含了系统的规律性。根据时间序列的相关理论,就可以对数据进行相应的预处理,并且进一步建立模型,预测系统的未来行为。

对油液光谱数据有时间序列特征的特点,本文将使用时间序列分析的方法对数据进行预处理,解决噪音和空缺数据;进一步,对监测数据进行时间序列建模,完成模型识别、参数估计,并将所见的模型用于预测。

3.4.4 铁谱分析

铁谱分析是油液监控技术中比较复杂的一种,它的优势是:监测范围大并能够确定磨粒的形貌特征。油液中磨粒的尺寸在 $5\sim 15\mu\text{m}$ 向几十甚至上百 μm 的过渡期,一般正是设备从稳定磨损向严重磨损转化的标志。铁谱技术可以发挥该长处,通过对磨粒的形貌分析,确定设备的主要磨损类型、故障原因等,同时象腐蚀磨损这种磨粒细化的磨损形式,在直读铁谱中也有特殊的表现形式^[13]。

油液检测技术中,铁谱分析技术获得的信息量最大,但技术性要求也最高。在分析过程中需要技术人员具有机械学、摩擦学、材料学、金属热处理等多门学科的综合知识,技术要求较高。

根据机械学和摩擦学原理,处于相似工作环境下的机械设备一般具有相似的磨损机制;同时,磨粒记录着脱落瞬间设备的状态信息。因此,可根据磨粒的成分判断磨损部件或部位,可根据磨粒的形状及其分布、尺寸及其分布等特征信息推测磨损机理^[14]。

第四章 油液检测数据处理技术

对设备进行状态监测和故障诊断，趋势分析是普遍采用的方法，将其与各类诊断参考标准相结合，可以评判设备运行状态的优劣，也可用于故障的早期预报。除了趋势分析这一常规的分析方法，还可针对不同的检测手段和数据特征采用不同的数据处理方法。除了趋势分析法外，本论文还对常规理化分析采用模糊数学进行处理；对光谱分析，根据时间序列的相关理论进行处理；对于铁谱分析技术，利用油液中的磨粒浓度（WPC）建立正常磨损的定量基准线和控制线。

4.1 数据处理方式

如果一个现象的物理结构是完全清楚的，那么写出数学表达式来准确地描述它，从理论上是可能的。但在多数情形，完全的信息或为产生结构模型所需的大量试验手段是不可能得到的，我们只能求助于经验模型。我们实际中使用的模型常常介于严格的结构模型和单纯的经验模型之间。具体地说，我们可以利用不完整的理论信息去指定一族合适的数学函数，并用来作为经验拟合；也就是说，模型中所需的项数和参数的数值由试验数据来估计。当所描述的随机和动态模型具有正确的一般特征时，便可以对理论基础进行修正，至少可以部分地这样做。

在拟合动态模型时，有时理论分析不仅会告诉我们模型的恰当形式，而且会为我们提供其参数值的很好估计。随后，通过对数据的分析可以对这些值进行检验。

图 4.1 概括了本论文所使用的为了进行预报和控制建模的反复处理方法。

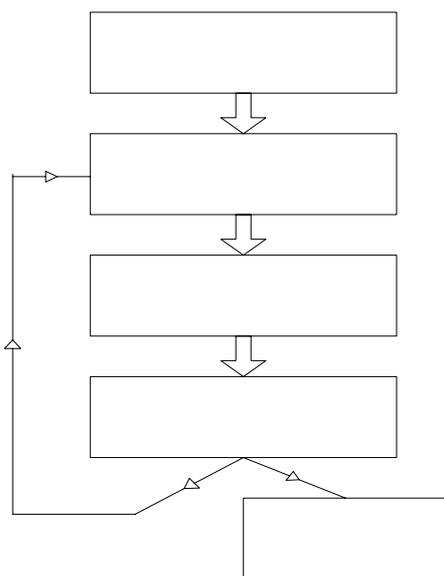


图 4-1 建模方法步骤

4.2 常规理化性能分析

实践证明，用传统的方法评价油液性能劣化状况，存在以下问题^[16]：

(1) 实际工作过程中，出现一项或几项指标超出允许范围，理论上应该换油，但此时系统仍能继续工作很长时间不出现异常磨损或故障。因此，依据现有方法要求立即换油，将造成不必要的浪费。由于油液各项性能指标变化对系统性能的影响程度差异很大，且各项指标之间有一定的交互影响，因此仅凭一项或几项指标超出允许范围便简单地要求换油是不全面、不科学、不合适的。

(2) 现有方法仅能对油液的各项理化性能指标进行定性的对比评定，不能对油液性能劣化程度进行综合定量评价。而要合理控制换油期，后者才是关键。因此，油液性能劣化程度的综合评价及预测用现有方法是难以解决的，寻求一种新的评价方法是非常必要的。

根据数据性能指标进行综合评价以评定油液性能劣化程度是比较困难的一件事情，因为，油液性能劣化程度不是由单一的指标决定的，而是受到多项指标的综合影响，而每项指标对系统的影响又是不尽相同的。因此，对油液常规理化性能分析得出的数据进行数学评判，实际上也无法建立精确数学模型，因此，采用模糊数学处理比较适宜。

通过建立反映在不同时刻润滑油性能和设备运行状态特征的模糊等价矩阵，可以评定润滑油和设备的状态变化情况。模糊等价矩阵具有自反性，对称性和传递性，其建立过程如下：

设有 n 个数据指标 X_i ，则被分析对象（油样）的集合为

$$x = \{x_1, x_2, \Lambda, x_n\} \quad (4.1)$$

每一个指标 x_i 即为每一样本的特征向量，令 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \Lambda, x_{im}\}$ ，这里 x_{ij} 称为特征值，则 n 个特征值指标的特征值矩阵为：

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \Lambda & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \Lambda & x_{2m} \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ x_{n1} & x_{n2} & \Lambda & x_{n3} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

首先将数据规格化，按极大值规格化方法将上述特征值矩阵数据规格化，即

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{j\max}} \quad (4.3)$$

式中， $x_{j\max} = \max(x_{1j}, x_{2j}, \Lambda, x_{nj})$ ，

按上式将特征值矩阵中的 x_{ij} 用 x'_{ij} 来代替。然后，建立模糊关系矩阵，设样

本空间 $x = [x_{ij}]_{n \times m}$ 已进行数据规格化，用多元分析的方法来建立样本与样本之间的相似关系（亲疏）即计算出衡量被分析样本的理化性能指标。

$x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \Lambda, x_{im}\}$ 和 $x_j = \{x_{j1}, x_{j2}, \Lambda, x_{jm}\}$ 之间的相似程度 r_{ij} ，使得当 $r_{ij} = 0$ 时，则表示样本 x_i 与样本 x_j 毫不相似；当 $r_{ij} = 1$ 时，则表示样本 x_i 与样本 x_j 完全相似或相同；当 $i = j$ 时， r_{ij} 就是自己与自己的相似程度，恒取为 1，即 $r_{ij} = 1$ 。

于是得到一个样本与另一样本之间的模糊相似关系矩阵 R:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \Lambda & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \Lambda & r_{2n} \\ M & M & M & M \\ r_{n1} & r_{n2} & \Lambda & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

确定 r_{ij} 的工作叫标定，本文选择贴进度中的最大最小法来进行标定，即

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{ik} \wedge x_{jk})}{\sum_{k=1}^m (x_{ik} \vee x_{jk})} \quad (4.5)$$

式中 \wedge, \vee 分别是极小，极大算子。

模糊相似矩阵 R 是一个实对阵矩阵，满足自反性和对称性。一般 R 不具有传递性，故 R 一般不是等价矩阵。

最后，将模糊相似关系矩阵转化为模糊等价矩阵。由于模糊等价矩阵比模糊相似矩阵更能正确地反映样本间的相似程度，在转化为模糊等价矩阵后，从矩阵中可以观察出设备在不同时刻，运行状态间的相似程度。在模糊等价矩阵中，不同样本间的相似程度为 1 或接近于 1，则表示不同样本所对应的不同时刻的运行状态无变化或变化很小；反之，相似度与 1 相差甚远，则表示设备在不同时刻运行状态相差很大或变化很大。

若将部分已知状态的样本和需判别状态的样本（现时或历史的）建立起模糊等价矩阵，则可根据矩阵各元素值的大小，可以评价未知状态的样本。

4.3 元素含量分析(光谱分析)

润滑油液的原子光谱分析，就是通过测定润滑油中金属及非金属元素的种类、浓度及变化趋势，从而判断机械摩擦副的磨损状况及润滑油的状态。通过光谱分析测得的数据，符合时间序列的特征；如果对于观测时间间隔加以限制，那么就构成了时间序列。因此根据时间序列的相关理论对数据进行相应的预处理，

并且进一步建立模型，以此预测系统的未来行为。

4.3.1 时序基本概念

所谓时间序列就是按时间次序排列的观测值集合。在实际中获得的时间序列大致有两种类型，一是依连续时间进行观测或记录，一是依离散时间进行观测或记录。本论文主要涉及离散情况。

把依时间变化的观测值记为时间 t 的函数 x ，时间的变化范围可以是有限集 $T=\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ，也可以是可列集 $T=\{t_1, t_2, \dots, t_n, \dots\}$ 。通常按某种原则在有限个时刻 t_1, t_2, \dots, t_n 处取得相应的时间序列 $x_{t_1}, x_{t_2}, \dots, x_{t_n}$ 。最简单的采样方法是等时间间隔采样，称为等距采样，即令 $t_i=ih, h>0, i=1, 2, \dots, n$ ，在时刻 t_i 处取观测值 x_{t_i} ， $i=1, 2, \dots, n$ 。

用这种方法所获得的随机序列就是一种时间序列。

时间序列分析的研究对象是一串随时间变化而又相互关联的动态数据。处理该数据的方式就是根据数据的特征用相应的数学模型去做近似的描述。在时序统计分析中，着重研究具有绝对连续谱分布的平稳过程，即线性过程。而最常用的一种处理手段就是用有限阶的线性模型去拟合这种数据，确切的说，就是寻找具有适当阶数的 ARMA（自回归滑动平均）模型去近似地描述这种数据。这主要因为，一方面这种模型在实际应用中有很多方便之处，比如它是线性的，便于处理；另一方面，ARMA 序列具有有理谱密度，它能逼近任何连续谱。

在时间序列分析中，如何根据一段平稳序列的样本所提供的信息，选择适当的模型里拟合这段数据，是时域分析的关键步骤，这在很大程度上取决于模型本身所具有的特征性质。

平稳时间序列 $\dots, Z_{-2}, Z_{-1}, Z_0, Z_1, Z_2, \dots$ ，一般地说， $EZ_t=\mu \neq 0$ 。为方便起见，令 $W_t=Z_t-\mu$ ，显然 $Ew_t=0$ ，于是得序列

$$\dots, W_{-2}, W_{-1}, W_0, W_1, W_2, \dots$$

容易验证它仍然是平稳随机序列。

4.3.2 时序线性模型

作为光谱分析，可视为均值为零具有有理谱密度的平稳时间序列，可表示为自回归滑动平均模型（混和模型）。

该模型可表示为线性差分方程形式

$$W_t - \Phi_1 W_{t-1} - \Phi_2 W_{t-2} - \dots - \Phi_p W_{t-p} = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \\ t=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4.6)$$

（其中 $p>0, q>0, \Phi_p \neq 0, \theta_q \neq 0$ ）的平稳时间序列 $\{W_t, t=0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ 称为具有

自回归滑动平均模型或混和模型, 简记为ARMA(p,q)。p与q叫做混和模型的阶数。 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 称为混和模型的参数。

4.3.3 自相关函数和偏相关函数

线性模型的性质是对自相关函数和偏相关函数而言。由于 $EW_t=0$, 故自协方差函数为

$$\gamma_k = E(W_t W_{t+k}), k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4.7)$$

而自相关函数定义为

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0}, \quad k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4.8)$$

偏相关函数尤尔-沃克 (Yule-Walker) 方程定义。

$$\begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \Lambda & \rho_{k-1} \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 & \Lambda & \Lambda \\ \rho_2 & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \rho_2 \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \rho_1 \\ \rho_{k-1} & \Lambda & \rho_2 & \rho_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{k1} \\ \phi_{k2} \\ \Lambda \\ \Lambda \\ \phi_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \Lambda \\ \Lambda \\ \rho_k \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

解方程得 $\Phi_{k1}, \Phi_{k2}, \dots, \Phi_{kk}$ 。规定 $\Phi_{00}=1$ 。 $\Phi_{kk} (k \geq 0)$ 称为偏相关函数。

偏相关函数 Φ_{kk} 具有概率意义。它刻画了平稳序列任意一个长为k+1 的片断 $W_t, W_{t+1}, \dots, W_{t+k-1}, W_{t+k}$ 在中间量 $W_{t+1}, \dots, W_{t+k-1}$ 固定的条件下, 两端 W_t 和 W_{t+k} 的线性联系密切程度。

4.3.4 模型识别

(1) 样本自相关函数

样本自协方差函数为

$$\hat{\gamma} = \frac{W_1 W_{1+k} + W_2 W_{2+k} + \Lambda + W_{n-k} W_n}{n}$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-k} W_j W_{j+k}, \quad k=0, 1, 2, \dots, K (K < n) \quad (4.10)$$

样本自相关函数为

$$\hat{\rho}_k = \frac{\hat{\gamma}_k}{\hat{\gamma}_0}, \quad k=0, 1, 2, \dots, K (K < n) \quad (4.12)$$

当 n-k 充分大时,

$$\hat{\gamma}_k \approx \gamma_k, \hat{\rho}_k \approx \rho_k \quad k=0, 1, 2, \dots, K。$$

为了保证 $\hat{\gamma}_k$ 充分接近 γ_k , $\hat{\rho}_k$ 充分接近 ρ_k ($k=0,1,2,\dots,K$), n 需取得很大, 但 K 相对于 n 不能取得太大, 否则就不能保证 $n-k$ 相当大。一般取 $n>50, K<n/4$, 常用 $K\approx n/10$ 。

(2) 样本偏相关函数

样本偏相关函数通常用下面的递推公式计算。

$$\begin{cases} \hat{\phi}_{11} = \hat{\rho}_1 \\ \hat{\phi}_{k+1k+1} = \left[\hat{\rho}_{k+1} - \sum_{j=1}^k \hat{\rho}_{k+1-j} \hat{\phi}_{kj} \right] \left[1 - \sum_{j=1}^k \hat{\rho}_j - j \hat{\phi}_{kj} \right]^{-1} \\ \hat{\phi}_{k+1j} = \hat{\phi}_{kj} - \hat{\phi}_{k+1k+1} \hat{\phi}_{kk-(j-1)}, j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (4.13)$$

4.3.5 模型参数估计

对于(4.6)式, $W_t - \Phi_1 W_{t-1} - \Phi_2 W_{t-2} - \dots - \Phi_p W_{t-p} = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q}$, 采用先算 $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_p$, 再算 $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_q, \hat{\sigma}_a^2$ 的方法。

a. 先算 $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_p$ 。

$$\begin{bmatrix} \hat{\phi}_1 \\ \hat{\phi}_2 \\ \Lambda \\ \Lambda \\ \hat{\phi}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_q & \hat{\rho}_{q-1} & \hat{\rho}_{q-2} & \Lambda & \hat{\rho}_{q-p+1} \\ \hat{\rho}_{q+1} & \hat{\rho}_q & \hat{\rho}_{q-1} & \Lambda & \Lambda \\ \hat{\rho}_{q+2} & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \hat{\rho}_{q-p+3} \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \hat{\rho}_1 \\ \hat{\rho}_{q+p-1} & \Lambda & \hat{\rho}_{q+3} & \Lambda & \hat{\rho}_q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{\rho}_{q+1} \\ \hat{\rho}_{q+2} \\ \Lambda \\ \Lambda \\ \hat{\rho}_{q+p} \end{bmatrix}$$

b. 再算 $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_q, \hat{\sigma}_a^2$ 。

令 $W_t^i = W_t - \Phi_1 W_{t-1} - \Phi_2 W_{t-2} - \dots - \Phi_p W_{t-p}$, 则(4.11)式变成

$$W_t^i = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (4.14)$$

W_t^i 的自协方差函数

$$\gamma_k^w = \hat{\gamma}_k + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \hat{\phi}_i \hat{\phi}_j \hat{\gamma}_{|k-j+i|} - \sum_{j=1}^p \hat{\phi}_j \hat{\gamma}_{|k-j|} - \sum_{i=1}^p \hat{\phi}_i \hat{\gamma}_{k+i} \quad (4.15)$$

将 $\gamma_0^w, \gamma_1^w, \dots, \gamma_q^w$ 带入(4.13)式, 解非线性方程组可得 $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_q, \hat{\sigma}_a^2$ 。

4.3.6 预报

所谓预报是指已经知道一个时间序列现在与过去的数值, 对将来的数值进行估计。用记号表示, 时间序列

$$\Lambda, Z_{-2}, Z_{-1}, Z_0, Z_1, Z_2, \dots, Z_k, \Lambda, Z_{k+l} \quad \Lambda \quad \text{其中, } k \geq 1, l \geq 1。$$

若已经观测到 Z_1, Z_2, \dots, Z_k 的数值, 要估计 Z_{k+l} 的数值, 称为在 k 时刻做 l

步预报。 Z_{k+l} 的估计值记为 \hat{Z}_{k+l} 或 $\hat{Z}_k(l)$, 称为 1 步预报值。这里采用最小方差线性估计的原则, 使用递推预报法。

当 $l \leq q$ 时,

$$\begin{aligned} \hat{Z}_k(l) = & \theta_0 + \phi_1 \hat{Z}_{k+l-1} + \Lambda + \phi_{l-1} \hat{Z}_{k+1} + \phi_l Z_k + \Lambda + \phi_p Z_{k+l-p} \\ & - \theta_l \hat{a}_k - \theta_{l+1} \hat{a}_{k-1} - \Lambda - \theta_q \hat{a}_{k-q+l} \end{aligned} \quad (4.16)$$

当 $l > q$ 时,

$$\hat{Z}_k(l) = \theta_0 + \phi_1 \hat{Z}_{k+l-1} + \Lambda + \phi_p \hat{Z}_{k+l-p} \quad (4.17)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{a}_k = & -\theta_0 + Z_k - \phi_1 Z_{k-1} - \phi_2 Z_{k-2} - \Lambda - \phi_p Z_{k-p} \\ & + \theta_1 \hat{a}_{k-1} + \theta_2 \hat{a}_{k-2} + \Lambda + \theta_q \hat{a}_{k-q} \end{aligned} \quad (4.18)$$

置信概率为 0.95 的一步预报绝对误差的范围为 $2\sqrt{\hat{\sigma}_a^2}$ 。

4.4 磨粒形貌及浓度分析(铁谱分析)

铁谱分析通过对润滑油中磨损颗粒的形貌分析(形状、表面纹理、边缘、颜色等)及浓度分析, 进一步判断机械摩擦副的磨损形态, 确定磨损机理及磨损部位, 从而为早期预报故障及保养、维修决策提供依据^[10]。

根据铁谱分析技术原理制成的铁谱分析仪器大体可以分为三类: 分析式铁谱仪、直读式铁谱仪和在线铁谱仪。

分析式铁谱仪可以检测出磨屑的形状、大小、表面形态, 从而可以了解磨屑产生的原因, 推断出机械摩擦表面的磨损状态。通过一些手段, 可以确定谱片上的磨粒成分, 从而推断出磨屑产生的部位。利用光密度计对谱片上磨屑的分布情况进行定量的测量, 可以判断机器磨损的程度和趋势, 从而预报零部件的磨损失效。

在铁谱片上, 油液入口区沉积的主要是大于 $5\mu\text{m}$ 的铁磁性磨粒, 在 50mm 处沉积的主要是 $1\sim 2\mu\text{m}$ 的铁磁性磨粒。这是检查磨损状态的两个最敏感的位置。直读式铁谱仪的工作原理就是测试这两个位置处磨粒的覆盖率, 从而得出油液中磨粒和小磨粒的相对浓度。与分析式铁谱仪不同的是, 直读式铁谱仪并没有使用谱片, 而是使磨粒沉积在通过高梯度磁场的玻璃沉积管内。因而, 直读式铁谱仪只能作相对定量分析而不能作形貌分析。

4.4.1 磨粒的主要识别特征

磨粒识别是铁谱分析的重要内容。磨粒识别的特征可分为数值性特征(尺寸、

长厚比等)两个方面,领域专家在磨粒识别过程中主要采用的是以非数值性特征为主的模糊推理过程。

一般来讲,磨粒种类的划分应当是以磨粒的材料及磨粒产生的机理为基础的。对通常的铁谱分析来讲应考虑各种情况。由于磨粒的划分与磨粒的识别密切相关,因此应合理划分磨粒种类。多年来人们在这方面已做了大量的工作,总结出了各种划分方式中几种磨粒的识别特征和磨粒的形成机理,如表 4-2 所示。

表 4-2 几种磨粒种类的划分及主要识别特征和形成机理^[26]

磨粒种类	识别特征	形成机理
正常滑动 磨损磨粒	形貌:薄片状,光滑表面,沿磁力线呈链状分布。 尺寸:长度 $l < 15\mu\text{m}$, 厚度 $s = 0.15 \sim 1\mu\text{m}$, 厚比 $l/s \approx 10$ 。	$< 1\mu\text{m}$ 厚的切混层疲劳剥落形成。在正常磨损期内,切混层边剥落边形成,达到平衡状态,稳定地不断的产生正常滑动磨损磨粒。
严重滑动 磨损磨粒	形貌:磨粒较大,表面有明显的划痕和开裂迹象。棱边平直。 尺寸:长度 $l > 20\mu\text{m}$, 长厚比 $l/s \approx 10$ 。	相对滑动的表面由于载荷和速度过大而产生过高的剪切应力。切混层变得不稳定,出现局部的粘着和严重的表面塑性流动,产生大的游离磨粒。大磨粒又造成表面深达 $25\mu\text{m}$ 的犁沟,接触表面的粗化进一步加速了磨损,高速滑动常伴有热效应。
疲劳剥离 磨粒	形貌:扁平片(或稍厚块状)磨粒,具有光滑的表面和不规则的轮廓。 尺寸:数微米至上百微米,片状 $l/s \approx 10$;块状 $l/s < 5$ 。	由表面疲劳裂纹扩展引起剥落形成或由粘着磨损产生。
球状磨粒	形貌:暗环包围下的亮斑,呈近似球形。 尺寸:长度 $l = 1 \sim 5\mu\text{m}$, 长厚比 $l/s = 1 \sim 1.5$ 。	产生于滚动疲劳磨损内部。裂纹内表面的切混层剥落及随油进入的片状磨粒,经内表面相对运动的反复揉搓而成为球状磨粒。
层状磨粒	形貌:极薄的游离金属磨粒表面有孔穴、空洞等缺陷。 尺寸:长度 $l = 20 \sim 50\mu\text{m}$, 长厚比 $l/s \approx 30$ 。	剥落的磨粒粘附在滚动件表面,在滚动摩擦副中进一步受碾压而成。
红色氧化物 磨粒	在白色反射下呈灰色,在白色投射光下呈无光的红棕色。有较高的反光效应。	锈蚀颗粒或因润滑不良发生氧化磨损产生。
黑色氧化物 磨粒	表面粗糙不平的堆聚物,有极细小的蓝色或橙黄色斑点,边缘略透光,有磁性沉积特征。	为严重润滑不良伴随高温形成的各种铁的氧化物的混合物。
切削磨粒	形貌:切削状(可呈螺旋形,圆圈形,曲线形等)。 尺寸:大磨粒 $l = 25 \sim 100\mu\text{m}$,	大磨粒:硬表面的锐边、凸起、裂纹嵌入软表面,从而切削软表面形成。 小磨粒:润滑系统中的磨料微粒嵌入

	宽度 $b=2\sim 5\mu\text{m}$ 小磨粒 $l < 10\mu\text{m}$, 宽度 $b < 1\mu\text{m}$ 长厚比 $l/s = 21\sim 30$	较软的表面, 切削硬表面形成, 其尺寸正比于磨料微粒的尺寸。
腐蚀磨损微粒	微粒极细, 亚微米级, 高倍率下亦难分辨, 常造成 10mm 出读数高于 50mm 处读数。	油中的碱性添加剂耗竭, 酸性产物使易腐蚀的 Fe, Pb 等金属腐蚀而成。
污染物微粒	视摩擦副的具体情况、机器的运转环境进行分析判断。	通过滑油滤清器或空气滤清器进入润滑系统。

对于磨粒种类的划分本身具有一定的主观性, 最终检验磨粒分类效果的检验标准仍然以人 (铁谱工作者或领域专家) 的识别结果为准。因此, 即便采用的完全是磨粒图像的数值特征进行识别, 在进行分类器的识别训练中仍不可避免的要引入人的主观因素。而磨粒的非数值特征是人们对磨粒整体或局部的概括性描述, 是人们在长期的磨粒识别过程中形成的, 因而更符合人的视知觉过程。

4.4.2 磨粒识别的分类决策

基于模糊推理的分类决策可以描述如下:

设对象 O 由 K 个子对象 $[O_k]$ 组成, O 的属性 A_{ij} 的输入值为二元组

$$\langle G_{ij}^1 c_{ij}^1 \rangle, \langle G_{ij}^2 c_{ij}^2 \rangle, \Lambda, \langle G_{ij}^n c_{ij}^n \rangle \text{ 且 } F_{ij}^k = G_{ij}^{n(k)}, 1 \leq k \leq K, 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J_i$$

如果子对象 O_k 与实际输入的相似度为:

$$S(O_k) = \bigwedge_{1 \leq i \leq I} \bigvee_{1 \leq j \leq J_i} c_{ij}^{n(k)}, 1 \leq k \leq K$$

$$\text{且存在 } S(O_p) = \bigvee_{1 \leq k \leq K} S(O_k)$$

则取子对象 O_p 为分类结果, 由此建立的磨粒识别的推理网络如图 4-2 所示。

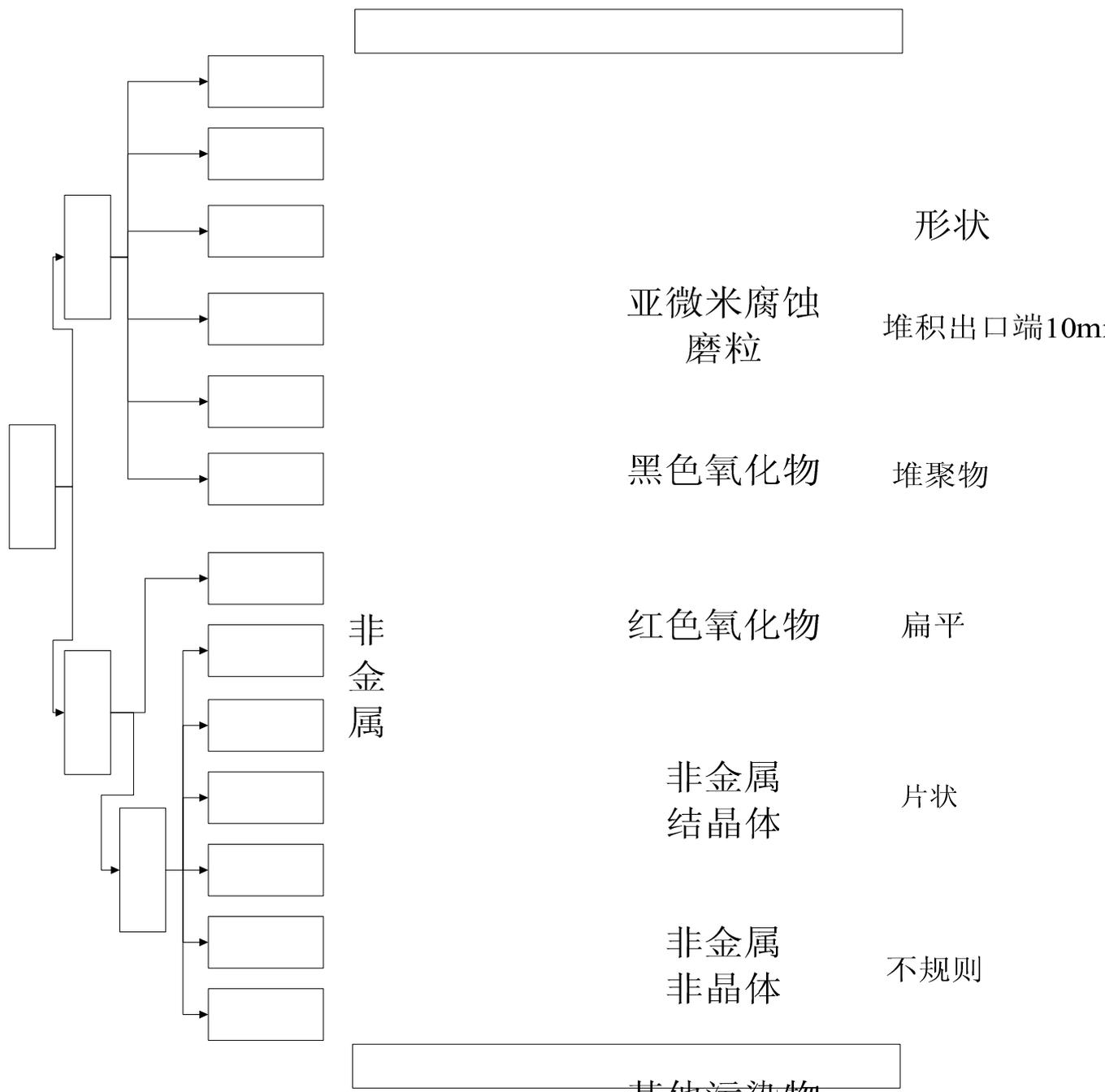


图 4-2 磨粒识别的推理网络

位于网络结点上的每一种磨粒均可作为一个对象描述。每一个对象的基本属性示于图 4-2 中。磨粒识别的过程即为待识磨粒的属性与这些对象属性的匹配过程。其中，“黑色金属”有六个子对象，每一个子对象又有五个属性值（各属性的取值见表 4-3），各个属性对磨粒识别都有贡献，但贡献大小有所不同，对这样的情况，正好适宜采用模糊加权推理来进行判断识别。同时“非金属”也有六个子对象，但各个子对象对应的属性不一样，因此不宜采用模糊推理，可以根据各自的属性特点按照一定的规则进行匹配识别。对于按上述属性不能识别的颗粒，薄片状正常滑动磨损磨粒、白色（Al,Ag,Cr）有色金属磨粒、严重滑动磨损磨粒、不规则

暂且归为“其他污染物颗粒”，有待进一步确定其类属。

表 4-3 黑色金属各对象的属性值

形状	薄片状	细长	圆球形	不规则/块状		
边缘	光滑	弯曲/锯齿	粗糙	直/棱边		
表面	光滑	划痕	开裂	孔洞	凸圆	
尺寸范围	1~5	<5	>20	25~100	50~100	>100
长厚比	1~1.5	2~5	3~10	10	11~20	21~30

4.4.3 铁谱浓度定量分析(直读式)

直读式铁谱定量分析原理为：油样中不同大小的磨粒沉积在磁场中不同的位置上。油液通过毛细管流入一个沉积管，在磁场的作用下磨粒按粒度大小沉积在沉积管的不同位置上，通过测量相应部位光密度的衰减值就可以表示出每个部位所沉积的磨粒数量。

由于铁谱定量测量手段的局限性，铁谱分析所采用的数值方法非常有限。主要有三个基本分析参量：大磨粒读数、小磨粒读数及油样体积。

对于直读式铁谱，用 A_L 表示大磨粒读数， A_S 表示小磨粒读数。下面为铁谱读数的计算方法。

(1)磨粒浓度 (WPC)

磨粒浓度 (Wear Particle Concentration) WPC的定义为 A_L+A_S 与油样体积 V 之比，即 $WPC = \frac{A_L + A_S}{V}$ 。(4.19)

在绝大多数情况下，制片时取样量为 1ml，这时

$$WPC = A_L + A_S \quad (4.20)$$

(2)大磨粒百分比 (PLP)

大磨粒百分比 (Percent Large Particle) PLP 的定义为：

$$PLP = \frac{A_L - A_S}{A_L + A_S} \quad (4.21)$$

由于 WPC 和 PLP 直接反映了油样中磨粒浓度和粒度分布情况，因此，常用来作磨损状况趋势分析及建立定量基线 (Quantitative Base-line)。图 4-3 给出了磨损状况与 WPC 的变化关系示意图。

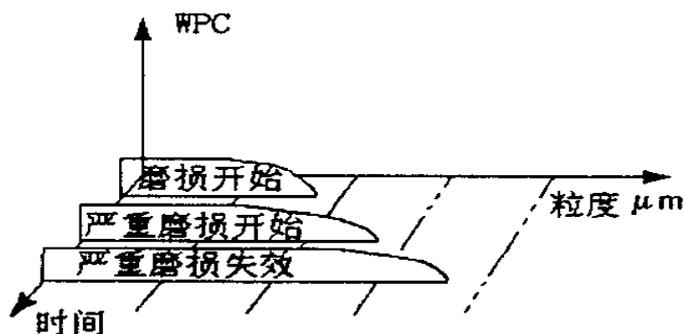


图 4-3 磨损状况与 WPC 的变化关系

(3) 磨损严重度指数

磨损严重度指数 (Severity of Wear Index) 的定义为:

$$I_S = \frac{A_L}{A_L - A_S} \quad (4.22)$$

$$\text{或 } I_S = (A_L + A_S)(A_L - A_S) = A_L^2 - A_S^2 \quad (4.23)$$

引入磨损严重度指数的依据是, 在正常磨损状态 A_L 和 A_S 很接近, 但当机器发生急剧磨损时, A_L 的读数会比 A_S 大很多, 即 $A_L - A_S$ 明显增大。同时, 急剧磨损会造成机器总磨损率的急剧增加, 即 $A_L + A_S$ 比正常磨损情况下显著增大。 $(A_L + A_S)(A_L - A_S)$ 比较敏感地反映了磨粒的变化情况。

(4) 磨损基准线和控制线

正常运行情况, 机器润滑油液中的磨粒浓度 (WPC) 保持在一个动态平衡值附近。当机器磨损加剧时, WPC 的平衡状态将被破坏, 因而, 可以利用 WPC 建立正常磨损的定量基准线和控制线。

a. 磨损基准线

$$WPC_i = \frac{A_{Li} + A_{Si}}{V_i} \quad (4.24)$$

其中 i 为油样数, A_{Li}, A_{Si} 为大小磨粒读数, V_i 为油样体积。

$$\text{将 } \overline{WPC} = \frac{\sum_{i=1}^N WPC_i}{N} \quad (4.25)$$

成为定量基准线 QBL (Quantitative Base-Lines)。

b. 控制线 (报警限)

$$\text{WPC 的标准差为 } S = \sqrt{\frac{\sum WPC_i^2 - \frac{(\sum WPC_i)^2}{n}}{n-1}} \quad (4.26)$$

则按如下方式建立控制线:

$$\text{警告线} = \overline{WPC} + 2S \quad (4.27)$$

$$\text{危险线} = \overline{WPC} + 3S \quad (4.28)$$

亦可利用线性回归的方法建立线性回归方程:

$$y = a + bx \quad (4.29)$$

其中 $a = \bar{y} - b\bar{x}$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

\bar{x}, \bar{y} 为 x, y 的平均值; x_i, y_i 为实测数据; n 为样本数量。

由此可求出相应的回归方程, 并以此作为定量分析的依据来建立定量基线和相应的危险线 (报警限)。

第五章 螺旋桨轴油液监测信息综合与融合

在油液监测技术中，通常采用常规理化分析技术、光谱技术及铁谱技术。多种监测方法的同时使用固然可以增加信息来源，但由于各种监测方法所获取的信息特征和范围不一样，有时甚至会取得相互矛盾的信息，因此如何融合来自不同监测方法的数据、特征将成为船舶螺旋桨轴状态监测与故障诊断的关键。这也是信息综合和融合应用于船舶螺旋桨轴系统油液监测技术的原因所在。

将信息综合和融合方法应用于螺旋桨轴系统油液监测，能最大程度上获得精确的状态估计、增加置信程度、降低模糊度、改善检测性能，充分利用各种监测方法获得信息特征，最大限度地发挥信息的利用率。

5.1 油液监测信息源特征

油液监测系统中主要有光谱信息源、铁谱信息源、理化分析信息源，它们各有不同的特征，具体分析如下：

光谱分析能快速准确提供润滑油中多种元素浓度，对小于 $10\mu\text{m}$ 的磨粒反应灵敏，每种元素都精确到 1ppm；铁谱分析对摩擦学故障机理有较强的解释性，通过对机械设备中磨损磨粒的形状、尺寸、颜色、数量及分布等方面进行定性、定量监测，能够获得大量丰富的故障隐患信息，尤其对异常磨损故障机理分析和早期、突发性故障的预防有较大的优势；理化分析主要通过测量油品的粘度、闪点、总碱值等指标来分析润滑油的状况。各种监测方法测得的螺旋桨轴油液信息特征见表 5-1。

表 5-1 不同监测方法油液检测信息特征

检测方法	信息特征
理化分析	机械杂质增加、酸值增加、碱值降低、粘度下降
光谱分析	黑色金属、有色金属磨损状态异常
铁谱分析	铁磨粒、铝磨粒、黑色氧化物、细小亚微米腐蚀磨粒、切削磨粒、红色氧化物、疲劳剥离磨粒、正常滑动磨粒、疲劳剥落磨粒、严重滑动磨粒

通过以上分析我们可以总结出螺旋桨轴油液监测诊断系统中信息源具有如下特征：

(1) 定量与定性信息共存

螺旋桨轴油液监测的结果数据中既含有定量信息，如铁谱所测得的磨粒的尺

寸、数量,光谱测得的某一元素的浓度等都可以以数字化的形式表现出来;同时,油液监测所涉及的信息中又含有大量的定性性质,需要用描述性语言来表达,如理化分析所得到的粘度下降、机械杂质增加等。应该说,在螺旋桨轴油液监测中定性信息要大于定量信息,这给信息融合带来了一定的难度。

(2)信息源具有连续性

对于螺旋桨轴系统而言,设备的磨损及润滑油的变质与设备的运行同步,即具有较强的时间依赖性,其磨损与油质劣化的信息应是连续的,也就是说设备本身具有连续的信源(时间、空间、状态)。但在目前螺旋桨轴油液监测技术中,取样周期的存在确定了用于分析的传感器所获得的信息源属离散信息源(时间、空间、状态),这并没有失去连续信源的信息。油液作为信息的载体,它不但记录着取样时的信息,同样记录着历史信息(除换油外),这是因为磨损和油质劣化本身就是一个积累过程,所以其信源具有较强的记忆性,也正是螺旋桨轴油液监测中趋势分析的依据。

(3)信息源具有可加性

在螺旋桨轴状态监测过程中,人们已发现不同的监测信息反映同一个现象,如光谱分析中某特定元素浓度增加,与铁谱分析中同种磨粒量大或尺寸大等信息,可能反映出同一种故障现象,单一监测信息能反映多个现象,这些说明了油液监测信息的相关性。即来源于油液不同检测方式测得的信息并不独立,单源信息对同一目标的识别也并非绝对可靠。如果将螺旋桨轴系统中的不同故障作为监测目标,则油液监测技术演变成了多目标识别问题,且各目标之间也存在着直接或间接相关性。尽管一个信息可能反映多个现象,多个信息源之间的信息存在不协调与冗余,但其信息量是具有可加性的。这也说明螺旋桨轴油液分析中亦存在数据量优势现象,同时也说明可以建立信息融合模型。

由于螺旋桨轴油液监测信息具有上述的特征,因此一种技术提供的信息往往只能够得到机器摩擦学状态的几种假设集合,而借助于多技术信息的相互支持就可能缩小假设集合并使之向候选状态逼近。所以,作为多技术系统的船舶螺旋桨轴系统,信息融合只有充分利用多技术带来的这些冗余信息,才能实现信息的互补与竞争,以更好地获得机械摩擦学状态的一致性解释和描述。因此,引入信息融合技术是螺旋桨轴油液分析技术向纵深发展的必然结果。

5.2 油液监测综合应用技术

油液监测不是多种检测方法的简单组合,它是一门涉及到摩擦学领域内多学科的综合应用技术。兼顾到设备的润滑和磨损两个方面构成的一个完整的监测系

统。它的最重要的本质在于：根据监测对象的结构特征与监测目标，恰当的选用不同的监测方法，以最经济的方式（让用户花最少的检测费用）达到最佳的监测效果（用户获取到最大的经济效益）。油液监测的另一特征是十分强调实践和经验的积累，大量的“临床”实践是积累经验、提高诊断准确性的唯一途径，也是保障油液监测取得最佳效果的重要基础。

表 5-2 和表 5-3 分别为常用的几种油液分析方法的性能比较及用不同方法得出结果的可靠性统计。图 5-1 为磨粒光谱分析、铁谱分析以及磁塞检测的效率与磨粒尺寸的关系。显然，光谱分析对于小颗粒比较有效，光谱分析的大颗粒技术（RFS）使光谱分析技术对磨粒尺寸的有效范围得到了扩展。由此可见，油液综合分析方法对机械设备故障诊断的准确度可以大大提高。

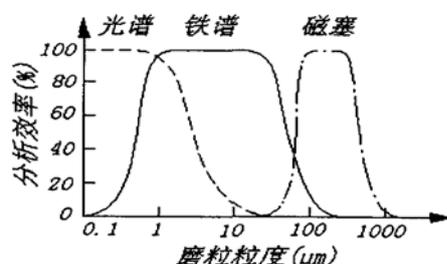


图 5-1 各种磨粒分析方法的粒度敏感范围

表 5-2 油液分析技术的性能比较^[6]

项目	铁谱分析	光谱分析	磨粒计数	滤器检测	磁塞
磨粒浓度	好 (铁磨粒)	很好	好	好	好 (铁磨粒)
磨粒形貌	很好			好	好
尺寸分布	好		很好		
元素成分	好	很好		较好	好
磨粒尺寸范围 (μm)	>1	0.1~10 (RPE) >0.1 (RPS)	1~80	>2	25~400
局限性	局限于铁磨粒及顺磁性磨粒，元素成分的识别有局限性	不能识别磨粒的形貌、尺寸等	不能识别磨粒的元素成分和形貌等	可采集全部微粒，不能识别磨粒的尺寸分布	局限于铁磨粒，不能做磨粒识别
检测用时间	长	极短	短	较长	长
评价	磨损机理分析及早期失效的预报效果很好	磨损趋势监测效果好	用作辅助分析、污染度分析	用作辅助简易分析	可用于监测不正常磨损

分析方式	实验室分析、 现场及在线 分析	实验室分析、 现场分析	实验室分 析、现场分 析	现场分析	在线分析
------	-----------------------	----------------	--------------------	------	------

表 5-3 诊断结果可靠性的统计^[6]

监测方法	统 计 结 果 (%)			
	诊断正确	缺乏经验 诊断偏差	信息不够 诊断偏差	不能诊断
铁 谱	55	20	15	10
光 谱	36	0	43	21
油品性能分析	21	0	16	63
颗 粒 计 数	33	0	0	67
综 合 方 法	70	20	10	0

应该指出,油液分析综合诊断技术体现了现代机械设备状态监测的发展趋势特点,是因为它可以满足机械设备故障诊断的四个基本要求:①指出故障发生的部位;②确定故障的类型;③解释故障的原因;④预告故障的时间。

螺旋桨轴系统油液分析综合技术就是从螺旋桨轴润滑系统的润滑油获取各种信息,从而对螺旋桨轴和轴承的磨损与润滑状态进行监测的技术。主要包括:油品理化性能分析技术、油样所含磨粒铁谱分析技术以及油料及磨粒成分的光谱分析技术。油品理化性能分析、油液铁谱分析、油液光谱分析可以是独立的油品质量分析技术及磨损趋势分析方法,各有其独特的作用,同时他们又是相辅相成,互相补充的综合分析方法。这些方法均以摩擦学理论及设备故障诊断学为基础。

船舶螺旋桨轴系统油液分析综合诊断技术的工作流程图如图 5-2 所示。

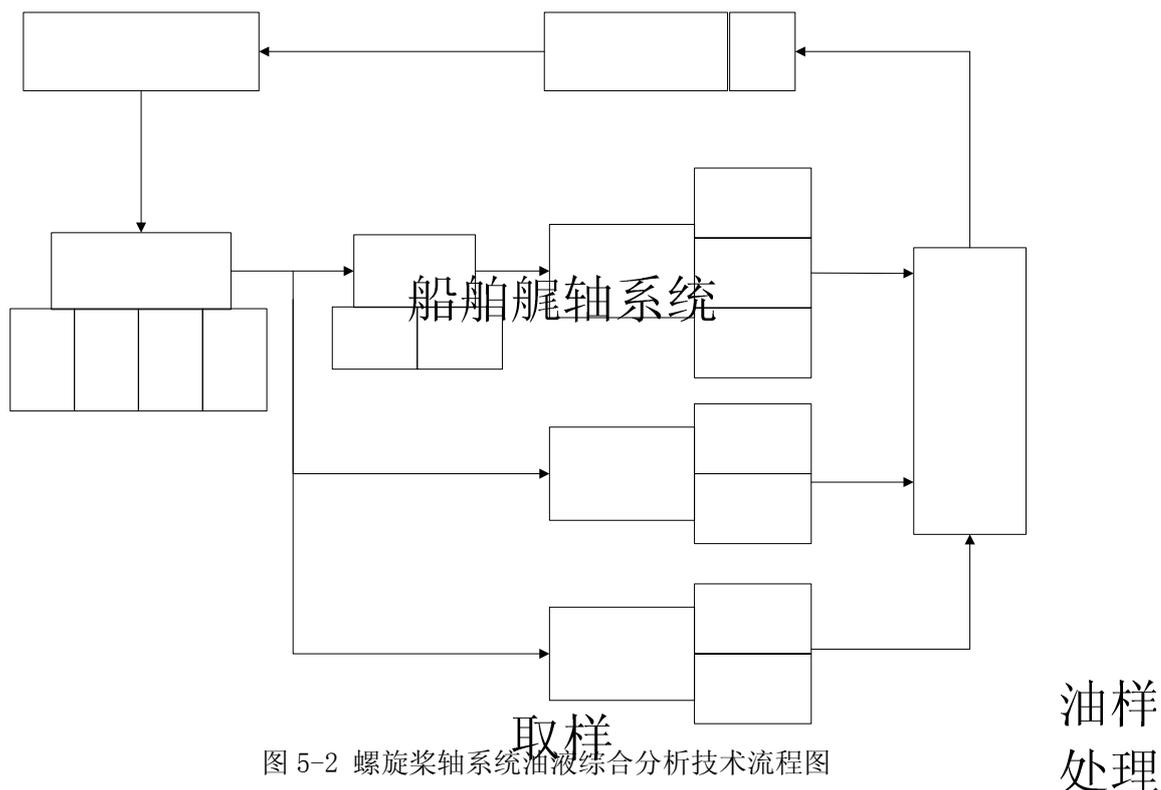


图 5-2 螺旋桨轴系统油液综合分析技术流程图

5.3 信息综合与信息融合

部 时 频 容
位 间 率 器

加热 稀释

5.3.1 信息综合

信息综合是指不同仪器从不同侧面分析去揭示故障的征兆，将这些分析判断结果汇总，利用一定算法和人的经验去综合判断最大可能的故障模式，或称之为“物理组合”。其特点是只应用不同仪器的分析结果和判断来“会诊”，没有利用各种分析的信息相互渗透来联合处理。当彼此判断具有一致性时，可“一锤定音”确诊；不一致或相互矛盾时就难以做出明确结论，这在实际中经常遇到。目前应用中仍局限于以信息综合为主。

5.3.2 信息融合

信息融合是将不同仪器分析的互补信息（还不是结论）相互渗透来处理 and 判断最大可能的故障模式，淘汰无故障征兆和冗余的大量信息，即无征兆集；保留有征兆的互补信息，即有征兆集；使征兆判断在小的信息融合中能水乳交融地处理而不是综合判断。意图使故障判断有明确的一致性，或称为“化学组合”。可能只有一种，可能有几种故障并发。油液分析中的信息融合比信息综合既更深入又更有难度，难在信息淘汰和水乳交融处理及判断，但具有很大的发展前景。

信息融合思想的灵感直接来自于实际的需求，单一的信息源往往不能满足做

出正确决策的需要，因此系统中信息源越来越多，需要一种技术来充分利用多个独立的信息，提高系统的可靠性。由于信息融合是对多源信息进行阶梯状的、多层次的处理过程，应具有如下特点：所实施的每一个融合过程，在其每一个环节上，各种数据所携带的有用信息量都应该得到最大程度的利用，使得融合结果对用户有利；而且每一数据所携带的有用信息量在其所处的局部过程中所起的作用，应该与其他部分的作用有机地结合在一起，以致于当一个局部过程十分紧密地接近于感觉经验的时候，由此产生的有效数据的作用不至于在加入其他过程时被削弱，即要求各个部分达到和谐与统一。

5.3.3 信息综合与融合并用

要实现上述信息融合的效果，目前还没有突破性进展。一般可将某一类信息先局部融合，此时以将该类信息的征兆集提取出，再与信息综合联合使用。

例如，在螺旋桨轴油液分析中，原子发射光谱是定量分析 $\leq 10\mu\text{m}$ 的不同磨损金属含量，铁谱仪是从磨损颗粒形貌和尺寸等半定量表征磨损状态，铁谱仪PQL可定量分析 $1\sim 100\mu\text{g/ml}$ 的Fe含量。这三种仪器都是分析磨损类故障，可归为同一类的互补信息，其信息融合的征兆集示意如图5-3。

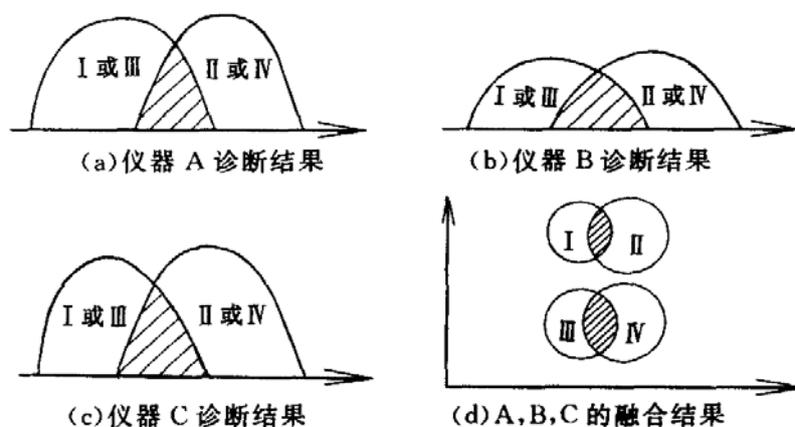


图 5-3 不同仪器对故障诊断的信息融合示意图

设有3种监测仪器A、B和C，据经验有4种螺旋桨轴系统故障I、II、III、IV。单独用仪器A、B、C的诊断结果分别如图5-3之a、b和c，其中阴影线互为征兆集。图a未能将故障I、III和II、IV区分开，图b和图c亦有此类情况，然而不是不同仪器分析的征兆集，彼此信息没有相互渗透，是信息融合的基础。3种仪器融合结果如图d所示，征兆集显著缩小，虽然I与II和III与IV仍未区分开，纵观图1已有较明确的故障范围，再与信息综合一起判断，可以提高诊断准确率。

螺旋桨轴油液分析中，还有傅立叶红外光谱仪、污染分析仪和理化性能分析仪，如何整体融合是今后要研究的。

5.4 信息融合方法在船舶螺旋桨轴油液监测上的应用

信息融合的方法很多,从上面的分析可知,油液监测技术实际上就是一个分类问题,这里将基于模糊理论的信息融合方法进行一下螺旋桨轴润滑系统监测方面的探讨。

模糊数学方法用于描述系统中一些不确定的信息以更接近于专家的真正含义。而螺旋桨轴油液监测系统中获取的信息含有一定模糊性,当传感信息引入到决策判断层时,其模糊信息也随之传播到该层次上,这就需要模糊才能输出决策。在设计中可以首先通过实验或经验数据获得隶属函数(或通过数据曲线拟合),其次给出各种信息的权重,通过模糊聚类方法获得某一信息属于某一模糊集合。螺旋桨轴油液分析各过程中已具备这些条件,如对磨粒量的等级量化可获得磨粒分布隶属函数;油液性能参数测试可获得其劣化趋势图,据此获得其隶属函数等。对于螺旋桨轴油液监测,一般的专家经验可以给出监测项目的权重,该方法引入了人的许多知识,比较适应于油液分析中定性参数的处理。

5.5 油液监测信息融合模型

由于在螺旋桨轴油液监测中采用离线传输信息,在油液监测技术中不存在数据级融合,只有特征级和决策级融合,另外还需要有知识融合过程。结合螺旋桨轴油液监测诊断系统中的信息源特征和状态识别方法,建立了如图 5-4 所示的螺旋桨轴润滑系统信息融合模型结构。该模型可以指导螺旋桨轴油液监测技术信息融合模型的建立与实现。

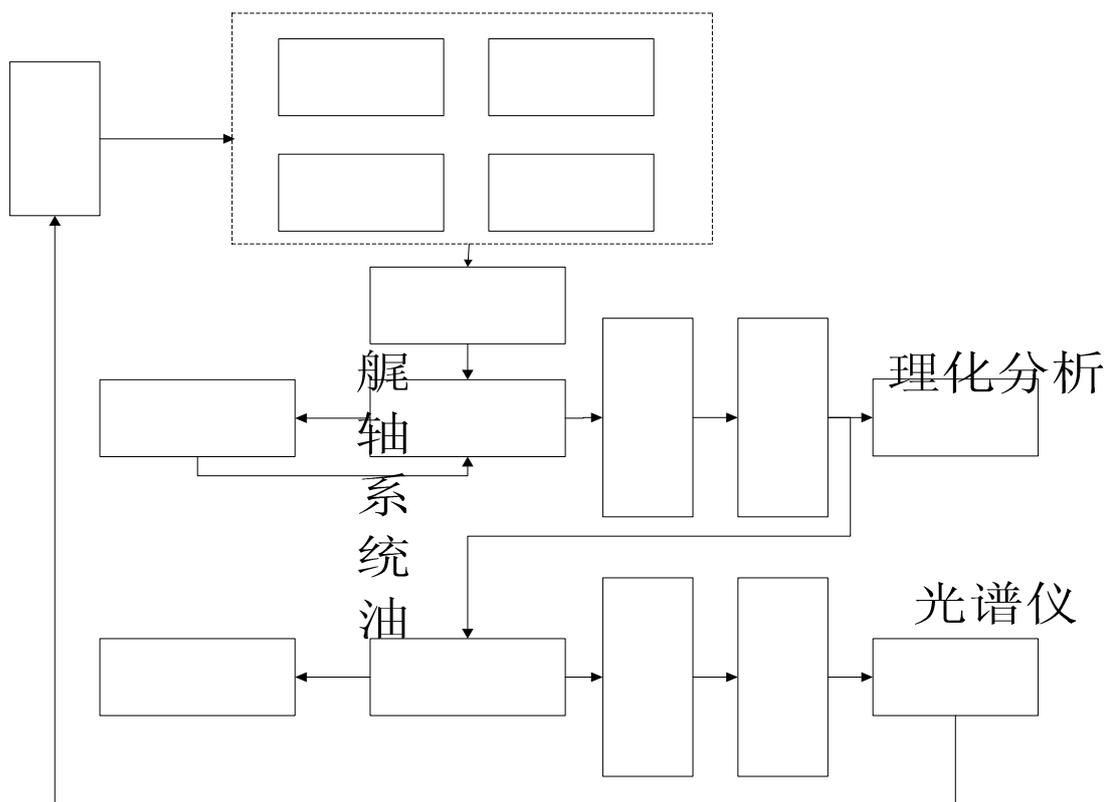


图 5-4 螺旋桨轴油样信息融合模型结构

需要说明的是，在本模型的建立中，利用监控技术人员的专家经验建立诊断知识库是非常关键的一环，但这方面还有许多的工作要做。而更高层的决策知识库往往涉及到多个信息的融合处理，最终做出的螺旋桨轴系统维修决策应该是基于包括润滑油监测信息部门在内的多个信息分析结果。

决策知识融合

决策知识融合

第六章 油液检测技术在船舶螺旋桨轴状态监测中应用

对于船舶螺旋桨轴而言，故障率曲线基本遵循“浴盆曲线”，即机械设备在磨合期后，其磨损是稳定的，但在发生故障前会产生急剧磨损，从而产生大量的磨损产物，这些磨损产物的数量和级别必然会在油液的分析结果中得到反映。

由于机械设备所使用的材料不同，因此具有不同的磨损特征元素；另外，机械设备所使用的润滑油的数量和摩擦副材料中所含有的磨损特征元素含量不同，因此，在油液光谱分析中所得到的磨损特征元素数值也截然不同。我们不能只通过油液光谱分析中的磨损特征元素的数值大小作为机械设备故障诊断的判据，更不能依此来进行机械设备故障诊断。为此，我们必须找出他们的共同特征，将实验室实验研究和机械设备润滑油油样的实际检测分析相结合，从而实现状态监测的目标并达到船级社的要求。

设备管理中，油液监测有两大目的，其一是监测诊断设备各摩擦副的磨损状况，判断是否失效，从而指导维修；其二是分析设备所用润滑油的质量，判断其质量是否劣化，是否能满足设备的润滑要求，从而指导设备的润滑管理。

6.1 油液常用检测方式及船级社要求

6.1.1 螺旋桨轴状态监测常用检测方式

光谱分析通过分析润滑油中金属磨损微粒的材料成分和数量，对比设备使用过程中金属磨损微粒数量的变化速度，了解设备摩擦副的磨损情况，以正确判断设备异常和预测故障，为设备科学检修提供依据。具体地讲，就是根据不同时期各种金属磨损微粒所含金属元素的数量，可以判断摩擦副磨损程度，预报可能发生的故障；根据金属磨损微粒的材料成分及其浓度的变化，判断出现异常现象的部位及原因。

铁谱技术具有很大优点，但其缺点也很突出，主要在于：定量分析结果不准确，数据离散性较大；对润滑油中非铁系微粒的检测能力较低。例如在对含有多种材质摩擦副的机器进行监测诊断时，往往感到不得力；对磨粒识别至今仍较多依赖操作人员的经验；由于铁谱片制备和人工识别磨粒耗时多、速度慢，所以不能理想地适应大规模设备群的故障监测和诊断。因此，铁谱分析当前在正常的油液监测过程中较少采用，多在设备进行故障诊断和验证时采用。

对于螺旋桨轴系统的状态监测所要求的不同监测手段，不同船级社的指导性

文件都各有自己的侧重要求，但基本都规定以理化分析和光谱分析为主。例如，CCS对油样检测具体方法进行了阐述，就明确了理化分析的基础作用和光谱分析的中心作用（“润滑油样品分析结合当前润滑油分析发展趋势，规定了以油品理化分析为基础，光谱分析为中心，辅以铁谱分析作最后验证的分析步骤”）。根据对几家滑油监测机构所做的调查，在正常的船舶设备状态监测中，主要进行光谱分析进行元素的含量分析，对油液中所测元素进行趋势分析实施状态监测。

6.1.2 船级社的要求

对于螺旋桨轴状态监测，不同船级社有着不尽相同的要求，侧重点也各不一样。但各个船级社的检验内容及要求基本都能适应船舶营运界发展要求和减少营运开支节省维修费用的大方向，并能保证螺旋桨轴系统的安全性和适用性。本论文选取几家具有代表意义并与国内船东联系较为密切的船级社关于螺旋桨轴状态监测（SCM）的指导性文件进行分析和综合，从而得出一般性要求和结论，使得本论文既能满足船东的利益和船舶现代化管理的要求，又能符合各船级社的技术要求（几家船级社对螺旋桨轴状态监控系统的要求见附录2）。

(1) 取样程序的要求

英国劳埃德船级社（LR）要求：取样时滑油处在正常的运行温度下并且螺旋桨轴处于运转状态。通常须在相同的位置取样并注意确保油样是系统滑油的典型代表。化验装置须冲刷以确保在取样前清除残油及杂质。LR同时要求每次分析至少应包括如下参数：水分、氯化物成分、轴承材料及金属颗粒、油类的老化（氧化）程度。表6-1为劳氏船级社对螺旋桨轴状况监测技术所做的要求（免拆检最低要求）。

表6-1螺旋桨轴状态监控技术方式及要求（LR）

方式	要求
润滑剂分析	<ul style="list-style-type: none"> • 在不超过6个月的固定间隔期内对润滑剂进行取样并化验分析 • 定期记录滑油耗损量
物理测量	<ul style="list-style-type: none"> • 定期测量螺旋桨轴管轴承磨损下沉量 • 定期记录螺旋桨轴管轴承温度

CCS对螺旋桨轴状态监控程序提出了具体要求，包括取样人员、周期、部位、取样状态和注意事项等。

NK也对油液取样时的注意事项作了要求，包括周期（至少6个月）、尽量在正常航行中取样、取样数量大概200cc并在充分放残后于同一位置取样，并对取样位置做了要求。同时，NK还要求在取样时记录以下参数：循环油液温度、尾

轴管承温度、取样日期、滑油型号、滑油使用时间、总油量和滑油消耗率等。

(2) 滑油理化分析要求

对于润滑油理化性能分析，LR明确阐述了其重要性和基础性作用——非对应的滑油、遭污染的滑油以及失效退化的滑油是引起过早磨损及失效的根本原因。所以定期对滑油进行分析并在必要时采取恰当的补救措施是很有用处的。

CCS则对油品理化分析的作用给出了具体说明：(1)能够测量并评定润滑油品质变化，如氯化物含量、氧化、硫化及添加剂劣化等情况；(2)能够测定润滑油中杂质，如尘垢、燃油稀释及水分稀释等；(3)能够测定润滑油性能的变化，如粘度、总酸值、总碱值等。同时明确规定：油样分析时，一定要进行油品理化分析。

ABS除了对理化分析进行一般性要求外，对海水污染和润滑油氧化变质检测表现出了特别的重视。

(3) 光谱分析要求

光谱分析的作用是：原子光谱分析通过测定润滑油中金属及非金属元素（以金属含量为主）的种类、浓度及变化趋势，判断机械摩擦副的磨损状况及润滑油的状态。CCS对油样光谱分析的要求、分析项目、分析方法以及各种参数基准值的确定方法及标准值也提出了具体要求（暂定标准）；NK也对所需监测元素及参数标准（极限值）做出了具体要求。两家船级社要求的分析项目和参数标准（参考值）如表6-1所示。

表6-1 光谱分析项目及标准值（参考）

分析项目	CCS (金属含量, ppm)	NK (金属含量, ppm)	
铜 (Cu)	50	50	ICP (SOAP)
铁 (Fe)	30	50	ICP (SOAP)
锡 (Sn)	10	20	ICP (SOAP)
镍 (Ni)	10	10	ICP (SOAP)
铬 (Cr)	10	10	ICP (SOAP)
锑 (Sb)	10	-	
硅/矽 (Si)	40	-	
钠 (Na)	50	80	ICP (SOAP)
铅 (Pb)	40	20	ICP (SOAP)
粘度 m^2/s 在40℃时	至少70	-	
水 (Water)	0.5%	1%	Visual (24 settling hrs)
铁谱分析 (WPC/ml)	-	30	Direct Reading

对于螺旋桨轴的状态监测, 劳氏船级社更是给出了极具参考价值的评估分析结果 (如表6-2所示)。此一系列结果对螺旋桨轴系统的趋势分析是很重要的。当该表和最近三次分析结果结合使用时, 对机械设备和滑油工况的合理评估很有帮助。由此表可以看出, LR给出的警戒量是一个变化值 (相对值) 而不是含量的绝对值, 更能符合滑油劣变和设备磨损过程的特点。

表6-2 螺旋桨轴滑油分析化验及警戒量 (LR)

油化验状况	可能的原因	可能产生的问题	警戒量
粘度增加 (CSt)	氧化、不溶解、重油污染	润滑效能下降 沉淀物	大于 25%
粘度下降 (Cst)	轻油污染	润滑低劣 油泄漏	小于 10%
水分增加 (%vol)	艏部密封泄漏	乳化、油沉淀、生锈、微生物侵蚀、滑油低劣	大于 1%
酸性增加 (mgKOH/g)	氧化, 因为: 过度加热 污染 磨屑	粘度增加 润滑低劣 沉淀物 腐蚀	大于 1%
不溶性增加 (%wt)	氧化、磨屑、污物	粘度下降 磨损	大于 0.15%
金属成分增加 (ppm)	污染物及磨屑	可能的来源: 轴承 轴/铁锈 轴承 艏部密封 砂粒/灰尘 盐水 盐水/润滑油添加剂 艏密封/轴承 轴	锡 大于 10 铁 大于 30 铅 大于 10 镍 大于 10 硅 大于 40 钠 大于 80 镁 大于 30 铜 大于 50 铬 大于 10
微观分析	非金属轴承磨损	轴承磨损及过热	*
注释: * 推荐进行颗粒的微观分析以说明失效过程并且若可能, 则使用非金属轴承或密封材料			

6.2 监测应用实例

本论文研究的对象为中远某公司散货船的螺旋桨轴系统, 其滑油检测结果分别是由几家著名的油品检测机构如SIGNUM OIL ANALYSIS、LUBMARINE-HK

等测定的结果，数据具有较高的真实性和可靠度。在此，利用前文所述的理论对这些数据进行分析验证，并进行普遍性理论的归纳和总结。

6.2.1 理化分析

对于设备管理来说，润滑管理是一项最为基础的管理工作，其重要性体现于：一是油品的质量性能直接影响各润滑部件的磨损寿命和设备的工作效率；二是油液的粉尘水分污染和油品质量劣化等现象时常发生，导致设备润滑不良，是设备磨损失效的主要原因。因此，依靠油品的常规理化分析技术对设备的润滑状况实施监测，指导设备的润滑管理，确定在用油品换油的周期和并进行螺旋桨轴日常润滑状态的监测工作。

对所测油品进行理化分析，主要采用前文所述的数据处理方式对该数据进行处理，即采用趋势分析法和模糊矩阵评判法进行理化性能分析。

表 6-3 为某散货船螺旋桨轴系统油样检测理化性能分析记录表。内容主要包括油品理化性能分析的特征元素参数，其中取样间隔期为 6 个月。

表 6-3 某轮螺旋桨轴系统油样理化性能分析记录表

Date of Sampled	03/18/2004	04/13/2003	04/14/2002	06/30/2001
Viscosity at 40°C cSt	102.9	105.0	102.5	103.8
Water Disp.(IR) % V	0.05	0.05	0.05	0.10
Oxidation A/cm	LT 1	LT 1	LT 1	LT 1
Insolubles, 5u % W	LT 0.01	0.02	0.02	0.01
PQ Index	2	0	0	0

首先运用状态监测的普遍性方法——趋势分析，做出状态趋势分析图，用以评判油液性能状态，并根据主要参数进行滑油状态的预测工作。本课题趋势分析采用典型信号的比较判别法，进行滑油的状态分析。提取表 6-3 数据进行理化性能分析：40°C 时粘度测量值和水的百分含量。其典型参量粘度值和水分含量趋势分析如图 6-1 所示。

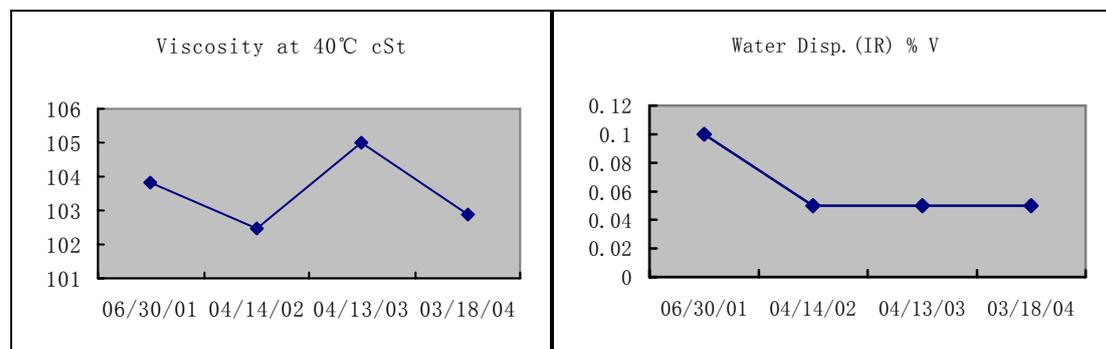


图 6-1 理化典型参量趋势分析

通过典型信号的比较判别法分析并结合图示趋势图可知,该油液典型参量粘度和水含量变化率较小、变化平缓且参数值处于滑油指标的较好状态,从而可以得出结论:该油液处于正常状态。

也可通过建立反映在不同时刻润滑油性能的模糊等价矩阵进行分析与建模,来评定润滑油的状态变化情况。先将数据模糊相似关系矩阵转化为模糊等价矩阵,对矩阵进行计算,可以得出最近两次滑油理化状态间的相似程度为 1.012,性能变化率为仅为 1.2%,由此,也可得到结论:油液处于正常状态。

6.2.2 元素含量分析

对于元素含量分析,我们既可以采用常规的趋势分析法,也可以采用前文论述的算法所进行的编译程序来进行数据处理,同时,我们还可以采用更为简便和直接的特征参数分析法进行元素含量的分析。

表 6-4 为某散货船螺旋桨轴系统油样检测光谱分析记录表,分析内容包括与磨损(轴、轴承和齿轮等部件材料)有关的元素(如铜、铅、锡、铝、铁等)和与污染有关的元素如(镁、镍、钒、硅、钠等)。

表 6-4 某船螺旋桨轴系统油样光谱分析记录表

Date Sampled	03/25/2004	03/13/2003	03/09/2002
Oil Life Hrs	56303	49816	15240
Iron , ppm	9	10	9
Chromium , ppm	0	0	0
Molybdenum , ppm	3	0	1
Copper , ppm	57	69	334
Lead , ppm	30	0	29
Silver , ppm	0	0	0
Tin , ppm	1	0	3
Aluminium , ppm	2	0	0
Nickel , ppm	1	0	0
Vanadium , ppm	0	0	0
Silicon , ppm	5	11	7
Boron , ppm	0	3	2
Sodium , ppm	14	0	32
Magnesium , ppm	19	5	16
Phosphorus , ppm	246	367	205
Zinc , ppm	317	360	315
Barium , ppm	1	0	0
Calcium , ppm	1950	2512	1916

同样地,对所测油品进行光谱分析及数据处理方式,采用趋势分析法和模糊

矩阵评判法进行理化性能分析，同时，还可采用更为简便直接的方法——特征参数分析法对检测结果进行分析。

(1) 趋势分析法

对于通过原子光谱检测进行的元素含量分析，由于其他数据处理方法当前还处于探索和试用阶段，各家滑油检测机构均采用趋势分析法作为主要方法，其他方法作为含量分析的深入或补充。其典型参量值趋势分析如图 6-2 所示。

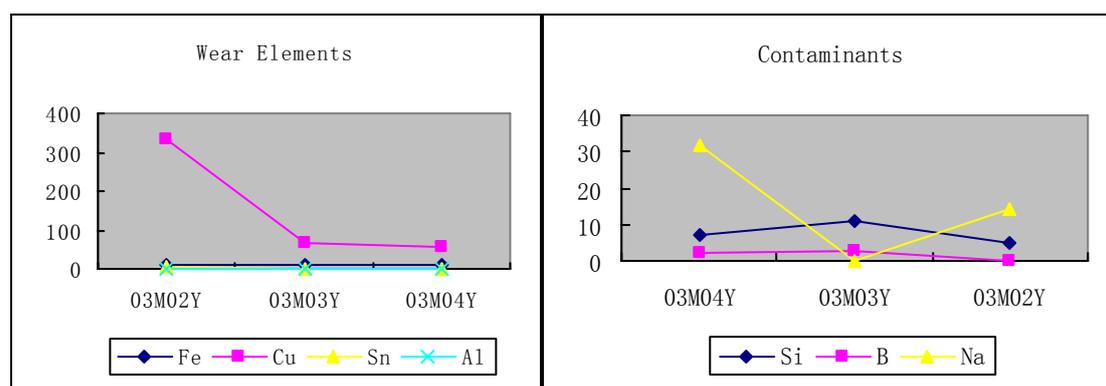


图 6-2 光谱典型参量趋势分析

通过典型参量的比较判别法分析并结合图 6-2 所示趋势分析图可知，该油液磨损颗粒和污染颗粒典型参量变化率较小、变化平缓且参数值处于滑油指标的较好状态，从而可以得出结论：该油液处于正常状态。

(2) 时间序列分析法

使用时间序列分析的方法对数据进行预处理，解决噪音和空缺数据；进一步，对监测数据进行时间序列建模，完成模型识别、参数估计，并将所见的模型用于预测。

通过应用时间序列所编译的程序对该光谱分析结果进行处理，亦可得出同样的结论。

(3) 特征参数分析法

通过确定油样的临界参数，作为进行机械设备故障诊断的有效判据。故障诊断实例证明，此特征参数具有较高的稳定性和准确性，能够有效地应用于机械设备油液检测中^[27]。

建立以下数学模型：

$$R_{c1} = \frac{P_{t1}}{P_{t1+1}}, R_{c2} = \frac{P_{t2}}{P_{t2+1}}, \dots, R_{cn} = \frac{P_{tn}}{P_{tn+1}}$$

式中 R_{c1} 表示光谱分析的特性参数； P_{t1} 表示机械设备第 t 次的光谱分析数值； P_{t1+1} 表示机械设备第 $t+1$ 次的光谱分析数值； n 表示机械设备的磨损特征元素种

类。

研究表明，当光谱特征参数 R_c 超过 3 后，机械设备发生故障的可能性将大大增加。

表 6-5 所示参数为某船舶螺旋桨轴系统连续四次的油液检测光谱分析磨损特征元素值，其润滑油取样间隔期为 7 个月。Fe、Cu、Pb、Sn、Al 等元素均为螺旋桨轴的磨损特征元素。经分析，该系统磨损特征元素在使用期间没有出现数值突变，且每次光谱特征参数 $R_c < 3$ 。故可判断该系统处于正常之中。该结论与 BP MARINE ENERCARE LUBRICANT ANALYSIS 检测结论 “The analysis results, based on the tests performed, indicate that it is suitable for continued use.” 相一致。

表 6-5 某船螺旋桨轴油液检测光谱分析磨损特征元素数值和特征参数

Wear element	4		3		2		1	
	R_c	No.	R_c	No.	R_c	No.	R_c	No.
Fe	0.5	2	1.0	4	1	4	0	4
Cu	0.1	1	0.9	8	1.3	9	0	7
Pb	0	0	0.5	1	0.5	2	0	4
Sn	0	0	0.8	3	1.3	4	0	3
Al	0.5	1	2.0	2	0.2	1	0	5

6.2.3 磨粒形貌及浓度分析

选取某已临近下次检验时间的船舶尾轴系统进行研究，该油样为在工作状态下从螺旋桨轴润滑油系统中取样，用铁谱仪进行分析测试。经铁谱分析，磨粒特征如图 6-3 所示，图 (a) 为放大 500 倍的螺旋桨轴磨粒特征，图 (b) 为球形磨粒。

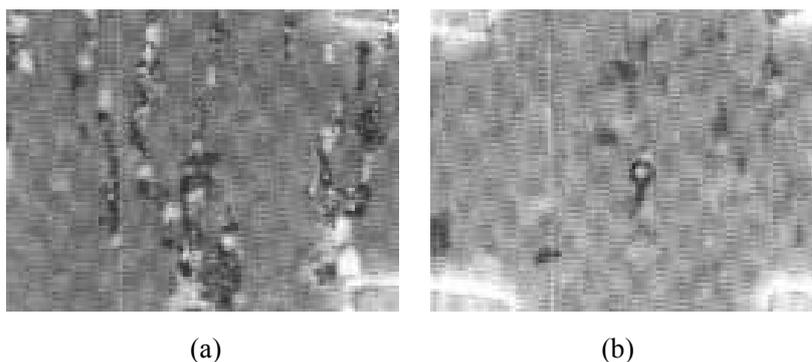


图 6-3 某船螺旋桨轴磨粒特征

从磨粒特征看，油样中除含有少量切削状磨粒外，还含有较多的球状磨粒。推断这种磨粒在螺旋桨轴管中的形成机理大致是：磨粒（来自外界污染物或从摩擦副上脱落）形成后，由于不能顺利地排出，磨粒在螺旋桨轴和轴承间反复受滚压作用，结果被滚压成球形。这种磨粒形式一般多出现在滚动轴承中，在滑动轴承中极少出现，船舶螺旋桨轴及轴承装置（滑动轴承）中存在球形磨粒的原因还

需要进一步研究。

其近几次铁谱分析数据如表 6-6 所示。

表 6-6 某船螺旋桨轴系统油样铁谱分析记录表

	02-6-10	02-8-12	03-1-28	03-8-18
总磨损水平 WPC/ml	0	18.7	6.1	2.0
氧化度	—	3	0	0

通过总磨损水平数值进一步分析可判定,该螺旋桨轴及轴承磨损程度远低于船级社指导标准中规定的要求,可以继续使用。

6.3 设备状态综合评定

设备状态的评定是一个及其复杂的问题,虽然我们采用各种手段,使用各类参数进行定量的分析,但由于系统本身的混沌特征,总存在着不可预见性。只能通过已有的数据估计其状态处于正常的几率。通过对润滑油评定后,可以根据润滑油的消耗量、消耗速率,及其变质的速率、变质的程度等信息,从润滑油的角度来推断设备的状态。在此基础上,综合其他手段得到的信息及推断结论,通过用面向对象技术开发的模糊神经网络诊断系统(该系统不在本论文研究之列),可以进一步获得更为准确的设备状态结论。

这里,我们对螺旋桨轴系统油液进行综合评定,即初步应用信息综合技术,根据油品的理化分析、光谱分析和铁谱分析等不同的技术获取各种信息,对在用润滑油的性能和螺旋桨轴及轴承的磨损与润滑状态进行评估。由于油品理化性能分析技术、油样所含磨粒铁谱分析技术以及油料及磨粒成分的光谱分析技术在状态评估中相辅相成,互相补充,综合应用这些不同的信息,更能提高监测及评估的准确性。

第七章 船舶油液检测数据应用软件开发

7.1 软件系统开发原则

船舶油液监测数据应用软件系统首先要实现船舶设备状态监测数据库及管理系统与其他管理功能协调一致的功能,方便受监控设备的统一集中管理、数据资源共享、操作人员的使用和系统维护工作。通过综合分析船舶设备状态监测管理相关业务的实际流程和操作要求,以满足船级社和公司体系的要求为先决条件,将各具体业务需求反映到管理系统功能上,从而确定了本次系统开发的原则:

(1)机关和船舶数据做到定期同步。通过使用专用邮件程序传递船岸系统的数据文件,实现信息共享、异地快速管理,方便管理人员对将来工作的安排和对历史记录的查询;

(2)充分满足公司(船舶)管理需求,利于领导监督、方便用户使用操作,提高管理水平,获得管理效益;

(3)满足船级社的要求,适应 PMS 或 CMS 的检验管理;

(4)本系统为船岸信息化管理系统(SMIS)的一个子系统,能够满足 SMIS 共享使用;

(5)能实时跟踪设备运行状态和发展趋势;

(6)保证系统的安全性和稳定性。

7.2 软件开发工具介绍

在对系统进行开发时,数据库工具采用 Microsoft SQL Server 2000,开发工具采用 PowerBuilder 8.0。

Microsoft SQL Server 2000(简称 SQL Server)由一系列相互协作的组件构成,能满足最大的 Web 站点和企业数据处理系统存储和分析数据的需要。SQL Server 提供了在服务器系统上运行的服务器软件和在客户端运行的客户端软件。SQL Server 的客户/服务器提供了许多传统主机数据库所没有的先进功能。数据库的访问并非局限于某些已有的主机数据库应用程序,它能与主流客户/服务器开发工具和桌面应用程序紧密集成,可以使用很多方法访问数据库,如 VB、VC++、PowerBuilder、Delphi、Visual FoxPro、Access 等,且 SQL Server 的客户端的应用程序可以通过 SQL Server 提供的应用程序接口来访问服务器数据。

作为客户/服务器数据库系统,SQL Server 的特性如下:(1)Internet 集成。

(2)可伸缩性和可用性。(3)企业级数据库功能。(4)易于安装、部署和使用。(5)关系数据库功能强大。

PowerBuilder 8.0 主要具有以下功能和特性:

(1)专业的客户/服务器开发工具。客户/服务器是一种将任务进行分解,然后协同解决的计算模式。客户端的应用程序负责提出任务需求,服务器端的应用程序则为客户服务,例如数据查询、打印等。

(2)面向对象的编程。在 PowerBuilder 中创建的窗口、菜单、数据窗口等都是对象。除了使用系统预先定义的对象外,开发人员可以自行构造新的对象(称作用户对象),扩展系统的预定对象,将各种对象有机地组合起来就构成了 PowerBuilder 的应用程序。

(3)支持多种关系数据库管理系统。用 PowerBuilder 开发的应用程序可以同时访问多个数据库系统,也支持多种关系数据库管理系统(RDBMS),既包括 Oracle、Sybase、SQL Server、Informix 等大型数据库,也包括 Xbase、FoxPro、Paradox 等个人数据库。对于大型数据库来说,PowerBuilder 提供了旨在充分发挥其性能的专用接口,而小型数据库则可通过 ODBC 接口灵活地访问。PowerBuilder 的应用程序与数据库管理系统的关系如图 7-1 示。

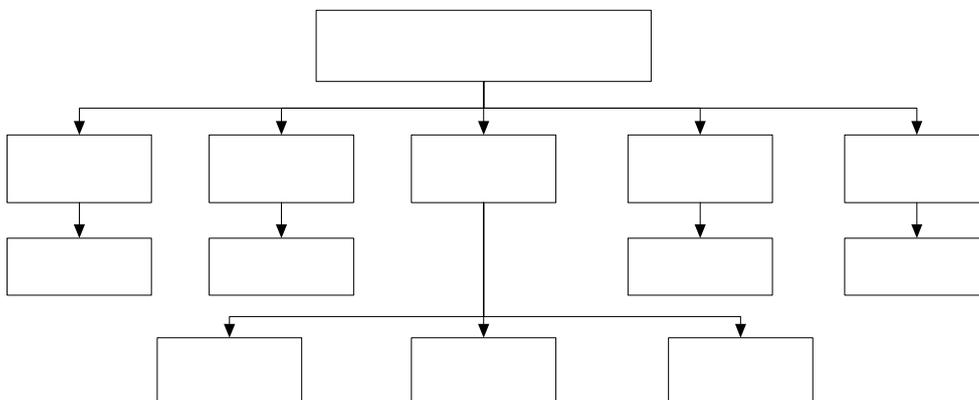


图 7-1 PowerBuilder 应用程序与数据库管理系统的关系

(4)丰富的数据表现风格。PowerBuilder 的数据窗口为展现数据的本质提供了丰富的手段,数据窗口能够从多种数据源提取数据,然后以多种风格展现在用户面前。利用数据窗口,用户可以直观地查询、修改、插入、删除、打印、浏览数据。

(5)灵活快捷的数据转移方法。利用 PowerBuilder 的数据管道,开发人员和应用于能简单、方便、快捷地把数据表从一个表复制到另一个表、从一个数据库复制到另一个数据库、从一个 DBMS 到另一个 DBMS。

(6) 功能强大的调试器和多种调试方式。PowerBuilder 提供了一个全新的内置调试器，利用它开发人员能够单步、断点的跟踪应用程序的执行，并在中断模式下查看或修改变量以及对象属性的取值。

7.3 系统实现

油液监测数据应用软件系统分为公司版和船舶版两个组成部分，两组成部分相辅相成，通过使用专用邮件程序传递岸船系统的数据文件，实现信息共享、异地快速管理。这样进行，既方便船舶设备管理人员对将来工作的安排和对历史记录的查询和趋势预测分析，又方便公司船舶管理人员对船舶的宏观管理和即时监督。系统在对需求进行分析，完成系统建模的基础上，对系统进行开发，完成用户所需的功能。

7.3.1 系统的总体结构

根据对系统进行分析及在建模的基础上，公司版和船舶版管理系统的总体结构如图 7-2 示。

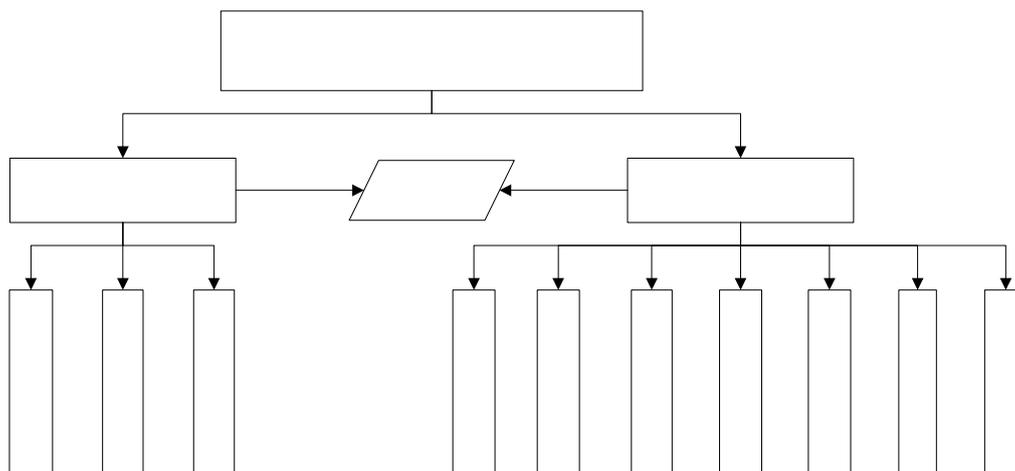


图 7-2 总体结构图

船舶油液监测管理系统包括船用管理系统和公司用管理系统两部分，两系统通过岸船数据交换实现信息共享。船用管理系统包括油液采样时间预警、油品检验录入、油品检验报告和技术分析几个功能模块；公司用管理系统包括检验报告录入、油品检验预警、销帐记录、油品趋势分析、查询、设备油品资料、船舶油品查询等多个组成部分。

该系统大致操作流程为：船舶根据系统的采样时间预警定期定点采集油样，并录入相应的取样部位、日期等必需数据；并将数据通过专用邮件程序发送到船

舶管理公司，同时尽快将油样寄送指定的油液监测公司。待监测公司将检验结果数据及分析报告报送船管公司后，船管公司除了依据监测公司对该油样的结论作出润滑系统及设备管理的指导性建议外，也可以对得到的油样分析数据依据和参照本论文所给出的数据处理模型和应用实例对数据进行处理：对油样理化性能检测的参数进行模糊模型分析；根据时间序列的相关数据模型对光谱分析的结果参数进行处理；铁谱检测参数处理较为复杂，主要通过对润滑油中磨损颗粒的形貌分析及浓度分析，判断机械摩擦副的磨损形态，确定磨损机理及磨损部位。通过以上手段可进行油样的趋势分析和状况预测，并将结果和信息发送到船上，对船舶设备的维护管理工作进行指导。

7.3.2 系统开发特性

该系统开发完成后，具有以下特性：

(1)界面的浏览器风格。在系统开发中，对于系统的整体风格采用的是与浏览器相类似的方式，通过点击，进入相应的功能模块。

(2)强大的查询功能。系统具有强大的模糊查询功能及多条件的查询设置功能。如图 7-3 示，在该窗口过滤器中，可对船管部门、船舶、设备名称、检验日期等进行查询；根据设定所需的查询条件，可进行模糊查询。

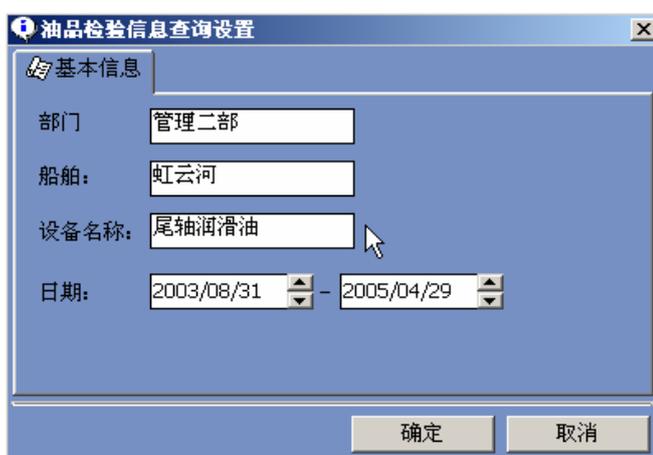


图 7-3 油品检验信息查询设置

(3)强大的报表及输出功能。由于 Power Builder 具有多种多样的数据窗口，能设计出各种不同的报表，因而，在系统中具有强大的报表功能，能满足用户所需的所有报表，如各种机测报表、各种图表等。如图 7-4 所示，该窗口具有两种输出方式，分别为两种不同的化验报表。另外，该窗口还具有结果分析功能，可在此给出油样的化验结论。

油品检验记录										
部门	中远集运	船舶	全部	设备	尾轴润滑油	添加	保存	结果分析	输出	退出
船舶名称	川河	设备	尾轴润滑油	港口		取样部位	标准			
取样日期	2000/11/10	报告日期	2000/11/28	周期	4	下次取样日期	2001/03/10			
化验单位	MOBIL	油品牌号	M-GARD 300	收样日期	0000/00/00	送样日期	2000/11/27			
化验原因	定期	批注日期	2000/12/07	备注						
使用时间h		日平均使用时间h		设备使用时间h						
常规分析										
粘度(40°C) mm ² /s	102.30	粘度(100°C) mm ² /s		闪点(闭口) °C		闪点(开口) °C				
碱值/TBN mgKOH/g		酸值		盐份		水份 %	0.20			
水溶性酸碱		凝点		扩散性		污染指数				
烟灰指数		汽油不溶物		苯不溶物		正庚烷不溶物	0.13			
光谱分析(ppm)										
铁(Fe)	9.00	铜(Cu)	57.00	铅(Pb)	30.00	铬(Cr)	0			
锡(Sn)	1.00	镍(Ni)	1.00	钠(Na)	14.00	硅(Si)	5.00			
镁(Mg)	19.00	钒(Va)		铝(Al)	2.00	硼(Bo)				
银(Ag)	0	钡(Ba)	1950.00	磷(P)	246.00	锌(Zn)	317.00			
钡(Ba)	1.00	钙(Ca)								
铁谱分析										
总磨损水平 WPC/ml		铁谱氧化值 A/cm	4.70							
序号	船舶名称	设备	取样日期	报告日期	周期	下次取样日期	港口	化验单位	取样部位	油
99	川河	尾轴润滑油	2004/05/08	2004/05/25	6	2004/11/06	AA	润凯公司	尾轴	MOBIL G
100	川河	尾轴润滑油	2002/12/14	2002/12/23	4	2003/04/14		MOBIL	标准	M-GARD
101	川河	尾轴润滑油	2000/11/10	2000/11/28	4	2001/03/10		MOBIL	标准	M-GARD
102	商城	尾轴润滑油	2002/09/16	2002/09/27	4	2003/01/14		公司化验		FEODOG
103	商城	尾轴润滑油	2002/03/01	2002/03/12	4	2002/07/01		公司化验		ATLANTA
104	松城	尾轴润滑油	2002/04/27	2002/05/31	4	2002/08/27		公司化验		无
105	高城	尾轴润滑油	2002/07/01	2002/07/10	4	2002/10/29		公司化验		AT MD 30
106	高城	尾轴润滑油	2001/10/05	2001/10/30	4	2002/02/05		ELF		AT3005
107	高城	尾轴润滑油	2001/08/30	2001/09/26	4	2001/12/30		ELF		AT 3005
108	高城	尾轴润滑油	2001/07/20	2001/08/15	4	2001/11/20		ELF		ATLANTA
109	高城	尾轴润滑油	2001/03/22	2001/04/03	4	2001/07/22		ELF		AT 3005

图 7-4 公司版油品检验记录

(4)对于录入数据有统一的录入方式。如所有时间录入都可以用手工录入，也可用弹出的框进行录入（如图 7-5 示）；所有的单位、港口、国家可以进行英文模糊录入并也可在下拉框中进行选择，如在录入上海港时，可录入 CN，系统自动在下拉框中把港口转到中国的所有港口，然后再进行选择。

设备号	设备名称	油品牌号	检验周期	下次取样日期	送样日期	取样原因
P1200	尾轴润滑油	DORO AR 30	6	2004/11/25	2004/06/25	定期
P1200	尾轴润滑油	DORO AR 30	6	2004/05/13	2003/11/13	定期
P1200	尾轴润滑油	DORO AR 30	6	2003/11/02	2003/03/02	定期
P1200	尾轴润滑油	DORO AR 30	6	2003/02/23	2002/08/23	定期

图 7-5 船舶版油品检验录入窗口

(5) 对于所有录入窗口采用相同的风格。在所有的录入窗口中，大部分都有两个数据窗口，上面的数据窗口（Free 风格）用于录入数据，下面的数据窗口（Grid 风格）可进行选择，改变不同的数据行进行录入或修改数据，并可以在下面的数据窗口中点不同的字段名称进行按需排序；如图 7-5 示，上面数据窗口录入数据，选下面数据窗口不同的行，就可在上面窗口中显示不同行，进行录入、修改数据，并点“设备名称”、“取样日期”、“送样日期”等进行排序。

(6) 预警及工作提示功能。在窗口的右上方，有两个图标进行提示，即系统预警功能。如果图标进行闪烁，则说明有到期的工作未做。另外，还有工作提示功能，如进入油品管理模块，若有未处理船舶信息，则有如图 7-6 所示系统提示窗口出现，该窗口提示船舶及航次名称。管理人员可按提示进入系统对提示船舶工作进行处理。



序号	船舶名称	航次
1	艳河	0329E
2	哈尼河	0071W
3	隆河	0369E
4	彩云河	00052
5	普河	00226E
6	子牙河	0371W
7	凌云河	0061E
8	密云河	0039N
9	中远兰花	0149E

图 7-6 系统提示窗口

7.4 系统主要内容

船舶油液监测管理系统包括船用管理系统和公司用管理系统两部分，两系统总体结构如图 7-2 所示。

7.4.1 公司版管理系统

公司用管理系统包括检验报告录入、油品检验预警、销帐记录、油品趋势分析、查询、设备油品资料、船舶油品查询等多个组成部分。其中，较为重要的功能模块为检验报告录入（如图 7-4 所示）、油品检验预警和油品趋势分析。

检验报告录入为该管理系统的基础性工作，即将由滑油检测机构对船舶采集油样进行检测后的参数、数据、结论等内容进行录入（如图 7-4 所示）。该窗口中，首先进行本次油样检测的说明性录入，如港口、取样部位、日期、周期等。其后，滑油检测数据分常规理化性能分析、光谱分析数据和铁谱分析数据三大组成部分分别进行录入。此外，还有结果分析和报表输出功能。

油品检验预警窗口为船舶定期取样的提示窗口。根据船舶上次取样日期和间隔周期，显示本次取样日期。从而为管理人员提供本次取样检测的预警功能。窗口如图 7-7 所示。

序号	船舶代码	船舶中文名	设备	上次取样日期	周期	本次取样日期	化验单位
1	1542	彩云河	尾轴润滑油	2004/04/20	6	2004/10/20	CASTROL
2	0497	山河	尾轴润滑油	2004/04/08	6	2004/10/07	润凯公司
3	1571	泰河	尾轴润滑油	2004/04/20	6	2004/10/19	润凯公司
4	1804	中远新加坡	尾轴润滑油	2004/04/21	6	2004/10/20	FAMM
5	1587	晋河	尾轴润滑油	2004/05/13	6	2004/11/13	0
6	1806	中远汉堡	尾轴润滑油	2004/05/21	6	2004/11/19	润凯公司
7	0492	海后	尾轴润滑油	2003/10/28	6	2004/04/27	公司化验
8	1586	皖河	尾轴润滑油	2004/03/04	6	2004/09/02	润凯公司
9	1578	滕河	尾轴润滑油	2004/05/03	6	2004/11/01	润凯公司
10	1588	川河	尾轴润滑油	2004/05/08	6	2004/11/06	润凯公司
11	1801	中远上海	舵机液压油	2004/04/26	6	2004/10/25	SHELL
12	1575	高河	NO. 3漏机	2004/04/17	6	2004/10/16	SHELL
13	9002	东风	NO. 1主机系统油	2002/11/14	4	2003/03/14	公司化验
14	0479	丽河	NO. 1主机系统油	2003/07/13	4	2003/11/10	FAMM
15	0452	汉中河	NO. 1主机系统油	2004/07/28	3	2004/10/27	青岛燃供
16	0478	莱河	NO. 1主机系统油	2004/03/25	4	2004/07/25	FAMM
17	0496	大河	NO. 1主机系统油	2004/06/09	4	2004/10/09	FAMM
18	0458	盛河	NO. 1主机系统油	2004/07/11	4	2004/11/10	润凯公司
19	0459	隆河	NO. 1主机系统油	2004/05/11	4	2004/09/10	东方石油
20	0495	珍河	NO. 1主机系统油	2004/06/20	4	2004/10/20	润凯公司
21	2324	哈尼河	NO. 1主机系统油	2004/06/07	4	2004/10/07	润凯公司
22	0467	银河	NO. 1主机系统油	2004/03/20	4	2004/07/20	润凯公司
23	1545	中远樱花	NO. 1主机系统油	2004/06/26	4	2004/10/28	0
24	0470	星河	NO. 1主机系统油	2004/04/08	4	2004/08/08	中燃天津
25	1431	商城	NO. 1主机系统油	2004/06/06	4	2004/10/06	天津燃供
26	1435	滨城	NO. 1主机系统油	2004/04/19	4	2004/08/19	润凯公司
27	1436	松城	NO. 1主机系统油	2004/05/08	4	2004/09/07	润凯公司
28	1505	洛河	NO. 1主机系统油	2004/06/09	4	2004/10/09	润凯公司

图 7-7 油品检验预警窗口

油品趋势分析窗口如图 7-8 所示,可在此窗口进行船舶油品检验结果的趋势分析工作。选中设备名称,再选中某一项或几项化验指标,就可以进行该些指标的趋势分析工作。

趋势分析是状态监测与故障诊断中普遍采用的方法,将其与各类诊断参考标准相结合,可以作出状态趋势分析图,它既可以用于评判设备运行状态的优劣,也可以用于各类故障的早期预报。概括地说,趋势分析技术所要完成的任务就是要根据设备征兆信息去“识别状态和预测未来”。



图 7-8 趋势分析窗口

7.4.2 船舶版管理系统

船用管理系统包括油液采样时间预警、油品检验录入、油品检验报告和油品技术分析等几个功能模块。

船舶版油液监测管理系统功能模块功能如下：

(1) 采样时间预警为设备定期采集油样的预警，可以根据上次采样时间及周期提示本次采样时间。

(2) 油品检验录入窗口如图 7-5 所示，主要录入取送样日期、周期、取样部位、油品牌号、滑油使用时间和设备使用时间等基础信息。

(3) 油品检验报告窗口与公司版油品检验记录窗口（图 7-4）类似，只是该系统此窗口无录入功能，数据是由公司版油品检验记录的数据通过专用邮件程序通过数据交换得来，以指导船舶设备维护保养和系统滑油的合理管理之用。

(4) 油品技术分析窗口界面和功能与图 7-8 趋势分析窗口类似，亦为对油品进行趋势分析之用。

第八章 结论与展望

作为整篇论文的最后部分，本章首先逐条总结了全文工作的要点，然后在总结本论文研究工作得失的基础上，展望了既有研究工作的发展方向，为本论文相关领域的深入研究提供了几条自己的建议。

8.1 本论文的工作要点

(1)不同的磨损作用过程产生的磨粒有不同的特征，反映了不同的磨损失效类型。对系统滑油进行分析，对于研究设备的磨损状态以及油品的性能分析有重要作用，从而引出通过滑油进行船舶螺旋桨轴状态监测的意义。

(2)系统介绍了油液监测技术的发展过程和现状，阐述了油液监测用于船舶的主要任务，进而全面介绍了该技术在船舶螺旋桨轴监测的应用，包括油液的取样送样事项，油液的三种分析技术——理化性能分析、光谱分析和铁谱分析，以及设备状态的趋势分析。

(3)不同的分析技术得出不同类型的数据，因此需针对各数据的特点建立不同的数据处理模型。本文对油液理化性能分析数据采用模糊数学进行处理；对光谱分析所得数据根据时间序列的相关理论进行处理；对于铁谱分析，处理核心是磨粒识别和浓度检测。

(4)由于各种监测方法所获取的信息特征和范围不一样，因此需要融合来自不同监测方法的数据和特征。本文从理论上探讨了信息综合和融合技术在油液监测中的应用。

(5)以中远集团几条已采用尾轴状态监测的船舶螺旋桨轴系统为研究和应用对象，利用前述的数学分析理论对检测数据进行分析 and 验证，并进行了普遍性理论的归纳和总结。

(6)以船舶设备状态监测管理相关业务的实际流程和操作要求，并将各具体业务需求反映到管理系统功能上，进行了油液监测数据应用软件的开发工作。

8.2 今后研究工作之展望

(1)从理论和实践两个方面，进一步开展磨损机理研究，以形成丰满而全面的颗粒摩擦学知识体系，更加深入研究磨粒形态学特征与螺旋桨轴磨损失效机理之间的关系，为螺旋桨轴磨损故障诊断的研究与发展打下更为坚实的基础。

(2)本论文提出的油液数据处理模型虽然能合理地处理油液检测所得数据，

但由于润滑系统和摩擦学系统的非线性和时变性,该模型能否达到完全可靠的功效,还有待于更多实例进行考核。应发掘更多更合理的数据处理方式,达到监测结论的可靠性要求。

(3)本文提出的螺旋桨轴润滑油信息综合和融合技术在数据处理上还只处于初步应用阶段。应更加深入地开展信息综合和融合技术在螺旋桨轴状态监测和故障诊断中的应用研究,拓展并充实基于多故障征兆信息的螺旋桨轴多故障征兆综合诊断体系。

致 谢

在导师郑士君副教授的亲切关怀和悉心指导下完成了本学位论文。学习期间，导师在学习、研究、生活等方面给予了无微不至的关怀，从选题、课题研究直至论文撰写、修改和正式论文提交等全部过程都得到了导师的精心指点和教导。在此，对导师的辛勤培养表示衷心的感谢，并致以崇高的敬意！

在课题研究之中，得到中远集团几家分公司专家们的支持和帮助，得到上海润凯油液监测有限公司专家的支持和帮助，并得到课题组全体同仁的鼎力支持和帮助，使论文得以顺利完成，在此深表谢意。此外，对一直以来给予我帮助和关心的老师、同学和朋友们表示感谢！

最后，特别感谢我的父母与家人，谢谢你们一直以来对我的默默支持和关心！

附录 1 CCS 对船舶 SEA GLORIA 进行螺旋桨状态监控系统应用实例

NO.553 P.1



中国船级社
CHINA CLASSIFICATION SOCIETY

COPY

Form GP

SURVEY REPORT ON MAINTENANCE OF CLASS No. QH040011

Name of Ship <input type="checkbox"/> Changed	SEA GLORIA	Flag <input type="checkbox"/> Changed	Panama
Class No. <input type="checkbox"/> Changed	94D2037	Port of Registry	Panama
Gross Tonnage	80203	Date Keel Laid	05.08.1993
Owner <input type="checkbox"/> Changed	Sea Glory Maritime Inc.		
Operator <input type="checkbox"/> Changed	Qingdao Ocean Shipping Co.		
Character(s) of Classification and Class Notation(s): <input type="checkbox"/> Changed			
★ CSA S/5 Bulk Carrier, ESP, Strengthened for Heavy Cargoes, Holds Nos.2, 4, 6, S/may be Empty, Loading Computer S.I.G			
★ CSM AUT-0, CMS(Continuous Machinery Survey), SCM(Screwshaft Condition Monitoring)			
Place of Survey	Qinhuangdao	<input checked="" type="checkbox"/> Floating	<input type="checkbox"/> Drydock
Date of Survey	First Visit: 03.03.2004	Last visit:	21.03.2004

THIS IS TO CERTIFY that the undersigned carried out the following survey(s) in accordance with the Rules and Regulations of this Society and found the ship to be in satisfactory condition subject to outstanding recommendation(s)(if any) to be dealt with.

- Special Survey (Commenced/ Incompleted/ Completed)
- Special Survey for Refrigerated Cargo Installation
- Annual Survey (H/ M R)
- Intermediate Survey (H/M)
- Screwshaft and Tube Shaft Survey (Partial/ Modified)
- PMS Verification Survey (Annual Special)
- Docking Survey/ Inwater Survey
- Continuous Survey (H/ M/ R)
- Boiler Survey
- Repair Survey/ Alteration Survey
- Occasional Survey

The Classification Certificate(s) for Hull/Machinery/Refrigerated Cargo Installation has/have been endorsed as follows:

- H: Commencement of Special Survey, Docking Survey and repair survey carried out and class maintained subject to completion of special survey to be carried out by April 12, 2004. Aft bulkhead plating of cargo holds Nos.1,2,3, 4, 7&8 to be examined and partially renewed by April 12, 2004, refer to the report No.QH040011(Form RO).
- M: Completion of continuous survey,screwshaft and tube shaft survey and boiler survey carried out and class maintained.

R:

The undersigned recommended that full term classification certificates be issued and /or new characters and notations be assigned

Form	CCh	CCM	CCR	PH	PM	PR	PC	PD	PB	PI	PE	PO	PL	PP	PHc	PHb	PMS	ESP	CER
Issued				X	X		X	X	X						X			X	X

ALTERATION(S)/RENEWAL(S)/REPAIR(S)/DAMAGE(S)/OTHERS was(were) reported on Form RA

OUTSTANDING RECOMMENDATION(S)/MEMORANDUM was(were) stated on Form RO

The undersigned declares that the scope of class survey covered the requirements of Reg. 110 and or Reg. 117 (a) (i) of the International Convention for the Safety of Life at Sea 1974 and its Protocol/ Amendments thereto.

Place Qinhuangdao
Date March 21, 2004
(Qiu Zhijian, Li Xiaofei)

DATE OF NEXT SURVEY: Surveyor to CHINA CLASSIFICATION SOCIETY

S.S.	H:	12.04.2004	M:	R:	D.S.	08.10.2006	
I.S.	H:		M:		B.S.	No.1: 20.03.2007	No.2: 20.05.2007
A.S.	H:		M:	R:	P.S.	No.1: 20.03.2014	No.2:

Symbols: X Applicable Not Applicable
Abbreviation: H-Hull, M-Machinery, R-Refrigerated Cargo Installation, A S -Annual Survey, I S -Intermediate Survey, S.S -Special Survey, D S -Docking Survey,
P S -Screwshaft and Tube Shaft Survey, B S -Boiler Survey, PMS Planned Maintenance Scheme

Ver. 2.0 9910

附录 2 几家船级社对螺旋桨轴状态监控系统的要求

1 中国船级社 (CCS)

(一) 规范要求

1 螺旋桨轴状态监控系统要求

《钢质海船入级与建造规范》第 1 篇入级与检验第 4 章 4.9.5 规定, 如由船东申请并经船级社同意, 可采用螺旋桨轴状态监控系统。

2 状态监控系统内容

2.1 螺旋桨轴应采用独立的油润滑系统, 并装有认可的油封装置。

2.2 润滑油分析, 取样间隔期应不超过 6 个月, 分析资料保存在船上。其分析内容如下:

- (1) 水分含量;
- (2) 氯化物含量;
- (3) 轴承材料含量;
- (4) 油寿命 (抗老化能力)。

2.3 油样一般应在轴工作的情况下采集, 以保证能真正代表尾管内的润滑油成分。

2.4 润滑油消耗记录应保存在船上。

2.5 轴承温度应予记录。

2.6 油封装置应能在不抽轴的情况下更换。

3 抽轴检验间隔期

3.1 设有状态监控系统的螺旋桨轴, 如其监控记录参数都在正常范围内, 则螺旋桨轴抽出检验的间隔期可为 10 年。

3.2 对无键安装的螺旋桨轴, 抽轴检验的间隔期还可以延长, 但最长应不超过 15 年。

4 年度检验

年度检验时, 只进行确认性检查。

(二) 螺旋桨轴状态监控系统的作用

1 状态监控系统的作用

1.1 状态监控系统不同于《规范》规定的常规检验。螺旋桨轴状态监控系统是对螺旋桨轴在用润滑油进行各项测试分析, 掌握轴承磨损状态, 确定润滑油的

劣化状态，为维修决策提供依据。因此，授予 SCM 附加标志后，主机仍应在规定的转速范围内使用，以避免轴系在转速禁区或振动应力较大的转速内运转。

1.2 采用螺旋桨轴状态监控系统，在规定的检验期内可取代常规抽轴检验。

1.3 状态监控系统具有一下特点：

- (1) 节省维修费用；
- (2) 减少船舶停航时间；
- (3) 避免设备二次损坏；
- (4) 增加设备使用率，延长润滑油使用寿命。

2 状态监控系统的技术方法

状态监控系统包括油品理化分析、原子光谱分析、铁谱分析 3 类方法，各有特色，互为补充。

3 油品理化分析的作用

3.1 能够测量并评定润滑油品质变化，如润滑油中氯化物含量、润滑油氧化、硫化及添加剂劣化等情况。

3.2 能够测定润滑油中杂质，如尘垢、燃油稀释及水分稀释等。

3.3 能够测定润滑油物理性能的变化，如粘度、总酸值、总碱值等。

3.4 油品理化分析能够评定润滑油的状态，正确掌握润滑油换油期，在保证机械摩擦副良好润滑状态的情况下，尽可能地延长润滑油使用寿命。

4 原子光谱分析的作用

原子光谱分析通过测定润滑油中金属及非金属元素的种类、浓度及变化趋势，判断机械摩擦副的磨损状况及润滑油的状态。

5 铁谱分析的作用

铁谱分析通过对润滑油中磨损颗粒的形貌分析（形状、表明纹理、边缘、颜色等）浓度分析，进一步判断机械摩擦副的磨损状态，确定磨损机理及磨损部位，从而为早期预报故障及保养、维修决策提供依据。

(三) 螺旋桨轴状态监控程序

1 取样程序

1.1 取样人员

所有油样应由船上指定的专门人员或轮机长采集，填写取样记录表并作好取样登记，保留在船上以备查用。取样人员应熟练掌握取样技术。

1.2 取样周期

(1) 对采用润滑油分析监控的螺旋桨, 每隔 6 个月对润滑油进行取样分析。如船方增加取样次数, 则也应进行记录, 以供备查。

(2) 对于到取样时间但船舶仍在外作业而无法按时分析时, 仍应按时取样, 但应在 3 个月时间内完成润滑油分析工作。

(3) 验船师根据润滑油分析结果及实际运行情况(如更换润滑油或磨粒浓度突变等), 可要求缩短取样周期。

1.3 取样部位

(1) 对强制循环润滑系统, 可在回油泵处或安装在滤清器之前可取样的阀处取样。

(2) 对重力式润滑系统, 可在尾管装置底部的放油口处取样。

(3) 对于设置在管路中永久性的取样阀、管等, 取样前应先放掉约两倍于残留于其中的油量, 以保证取样时不残留上次的油样。

(4) 在放油口处取样时, 取样前应先放掉部分油, 以便冲洗掉积留于此的沉积物。

1.4 取样状态

(1) 应在螺旋桨轴处于正常运转稳定状态下进行取样, 或在停机后立即取样。

(2) 每次在运转状态下取样时, 设备应处于相近工作条件之下(如转速、功率等)。

1.5 取样注意事项

(1) 取样器具(包括油样瓶、取样器、取样管等)应清洁干净, 不易损坏, 防止污染。

(2) 油样瓶应为无色透明的塑料瓶或玻璃瓶。

(3) 润滑油样品的取样量应为油样瓶容积的 2/3 左右, 不少于 150ml。

2 润滑油样品分析

2.1 一般要求

(1) 润滑油样品分析, 一般应先进行油品理化分析和光谱分析, 可在此基础上进行直读铁谱分析。认为必要时, 再以分析式铁谱仪进行定性分析。

(2) 如果分析机构仪器设备目前还不齐全, 可先进行光谱分析或铁谱分析, 但一定要进行油品理化分析。若对分析结果不能把握时, 则 3 种分析方法都应进

行。分析机构应在尽可能短的时间内配齐仪器设备。

2.2 螺旋桨轴润滑油分析项目及分析方法

2.2.1 螺旋桨轴润滑油分析项目：

分析项目	分析手段（或工具）
油品理化分析	理化分析仪器（按国标进行）
元素含量（以金属含量为主）分析	光谱分析[原子发射（或吸收）光谱仪]
磨粒形貌及浓度分析	铁谱分析（铁谱仪）

2.2.2 油品理化分析项目：（带“*”号的项目可根据具体需要作选择）

粘度；
水分；
总酸值（TAN）；
总碱值（TBN）；
不溶物含量；
变质*（氧化、硝化等）；
污染*（杂质污染等）。

2.2.3 元素含量分析：

应测定下列元素含量：

与磨损金属（轴、轴承、齿轮等部件材料）有关的元素：铬、铅、铜、镍、铁、硅（矽）、锡、钼等；

与污染有关的元素：镁、钠等；

与添加剂有关的元素：钡、硼、钙、镁、磷、锌、锂等。

应根据摩擦副材料、润滑油添加剂成分、周围工作环境等情况，正确区分各元素的来源。

2.2.4 磨粒形貌及浓度分析：

（1）应用分析式铁谱分析磨粒形貌时，按下列各种磨粒类型进行分类描述：

- a. 摩擦磨损微粒；
- b. 切削磨粒；
- c. 球状磨粒；
- d. 疲劳块状磨粒；

- e. 层状磨粒；
- f. 严重滑动磨粒；
- g. 腐蚀磨损微粒；
- h. 红色氧化物微粒；
- i. 黑色氧化物微粒；
- j. 非金属结晶体；
- k. 污染物颗粒。

(2)应用直读式铁谱仪作浓度定量分析，应测定并记录大颗粒读数 D_l 和 D_s 两个读数值。

2 日本海事协会 (NK)

Table B8.1.3-I Approval procedure of preventive maintenance system for oil lubricated propeller shafts

Item	Procedures
1.General	The Procedures will apply to ships intending to adopt the preventative maintenance system for the propeller shafts as specified in 8.1.3 Part B of the Rules that permits the shipowners to maintain the shafts preventively by carrying out lubricating oil analysis regularly and diagnosing the lubricating condition of the shaft based on the results.
2.Application	-1 A executive management (hereinafter referred to as a “management”) responsible for adopting the preventive maintenance system according to the Procedures to submit to the Society two copies of maintenance manuals specified at least for the following items for the ship to be covered with an application: (1)Management’s policy for implementing the preventive maintenance system (2)Procedures and responsible persons for sampling oil monitoring parameters such as oil analysis results and recording the necessary data (3)Procedures and responsible persons for selecting and controlling the analytical testing machines (or testing laboratory) and the measuring devices for monitoring parameters (4)Procedures and responsible persons for review of each parameter monitored and diagnosing the lubricating condition thereby (5)Procedures and responsible persons for proceeding in case any abnormality is found (including those for reporting to the Society) (6) Procedures and responsible persons for ensuring that proper maintenance is carried out according to the maintenance manual -2 The Society returns one copy of the documents to the applicant after review and approval of them. The management is to keep the approved documents on board the ship.
3.Approval	The Society examines the documents submitted for approval on the

and Notation	management system, the maintenance procedures and the criteria for parameters (including the criteria for alarming and abnormal conditions) such as oil analysis results. The Society gives the notation (PSCM) to the classification character of the approved ship.
4.Approval Conditions	<p>-1 Management system</p> <p>(1)The management is to state clearly that he will take responsibility for implementation of the preventive maintenance for the related parts properly according to the manual and have the crew concerned to be quite familiar with the procedures.</p> <p>(2)The management is to verify that the parameters such as oil analysis results are all within their limits and to make suitable measures, if necessary, and to report the Society immediately in case any abnormality is found.</p> <p>(3)The management is to verify that the suitable maintenance is carried out according to the manual.</p> <p>(4)The items monitored or reviewed according to the manual are to be recorded</p> <p>-2 Maintenance procedures</p> <p>(1)Oil sampling for analytical testing</p> <p>Oil sampling for analytical testing is to be carried out regularly at least 6 months……</p>

3 劳埃德船级社 (LR)

取样时滑油处在正常的运行温度下并且尾轴处于运转工况下。通常须在相同的位置取样并注意确保化验样品是系统内滑油的典型代表。化验装置须冲刷以确保在取样前清除任何残油及屑粒。

表 B4 可用于评估分析结果。所显示的警戒量仅有参考作用，因为一系列的可用结果对保证趋势的分辨是很重要的。当该表和近三次的分析结果结合使用时，对机械设备和滑油工况的合理评估是很有帮助的。

对尾轴瓦和尾轴总体工况的附加说明：

- 尾轴管油耗的记录，用以说明尾轴瓦密封的有效性
- 运行温度的记录，用以确认尾轴的运行参数是否正常
- 磨损下沉量测量用以确认尾轴瓦磨损量是否在可接受的极限内

表 B4 尾轴管润滑油的分析化验及警戒量

油化验状况	可能的原因	可能产生的问题	警戒量
粘度增加 (CSt)	氧化、不溶解、重油污染	润滑效能下降 沉淀物	大于 25%
粘度下降 (Cst)	轻油污染	润滑低劣 油泄漏	小于 10%

水分增加(%vol)	艏部密封泄漏	乳化、油沉淀、生锈、微生物侵蚀、滑油低劣	大于 1%
酸性增加 (mgKOH/g)	氧化, 因为: 过度加热 污染 磨屑	粘度增加 润滑低劣 沉淀物 腐蚀	大于 1%
不溶性增加(%wt)	氧化、磨屑、污物	粘度下降 磨损	大于 0.15%
金属成分增加 (ppm)	污染物及磨屑	可能的来源: 轴承 轴/铁锈 轴承 艏部密封 砂粒/灰尘 盐水 盐水/润滑油添加剂 艏密封/轴承 轴	锡 大于 10 铁 大于 30 铅 大于 10 镍 大于 10 硅 大于 40 钠 大于 80 镁 大于 30 铜 大于 50 铬 大于 10
微观分析	非金属轴承磨损	轴承磨损及过热	*
注释: * 推荐进行颗粒的微观分析以说明失效过程并且若可能, 则使用非金属轴承或密封材料			

参考文献

1. 萧汉梁. 机械工况监测与故障诊断. 北京: 人民交通出版社, 1994
2. 羨永宽. 船舶动力装置可靠性. 北京: 国防工业出版社, 1992
3. Yan Xinping. Introduction to Operational Engineering for the Machinery. Wuhan University of Technology. 2001
4. CCS. 钢质海船入级规范. 人民交通出版社. 2000
5. BV. 钢质海船入级规范. 上海科学普及出版社. 2000
6. 顾卓明. 轮机维护和修理. 北京: 人民交通出版社, 2001
7. 魏海军, 孙建波. 船舶及海上设施检验. 大连: 大连海事大学出版社, 2001
8. 江彦桥. 船舶机械可靠性技术. 交通系统高等院校内部教材, 1993
9. 李柱国. 油液分析诊断技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1997
10. 中远集团. 船用设备油液监测技术研讨会资料. 上海润凯油液监测有限公司, 2002
11. 中远集团. 油液监测技术在船舶机械设备预知维修中的应用科研项目验收资料, 2004
12. 郑士君. 船舶液压系统故障诊断与维修技术. 人民交通出版社 1996
13. 吴恒. 轮机管理. 大连: 大连海运学院出版社, 1993
14. 刘英杰, 成克强. 磨损失效分析. 北京: 机械工业出版社, 1991
15. 中国船级社. 螺旋桨轴状态监控系统指南. 北京: 人民交通出版社, 1996
16. 陈克兴. 设备状态监测与故障诊断技术. 科学技术文献出版社, 1991
17. 王坚, 张英堂. 油液分析技术及其在状态监测中的应用. 润滑与密封, 2002 (4): 77~78
18. Belmondo A, Guiglioli F. Optimization of Ferrographic Oil Analysis for Diesel Engine Wear Monitoring. Wear, 1983, Vol. 90:49~61
19. Westcott V. C. . Survey of Wear Processes and the Particles Resulting from Wear by Means of Ferrograph. No0014-72-c-0278
20. Pccock G, Courtney J. . Some Quantitative Aspects of Ferrography. Wear 1981, 67:287~301
21. 赵大庆, 王振, 周士瑜. 模糊数学在液压油性能劣化评价中的应用.

- 1990, 机械设备维修技术论文集, 人民交通出版社
22. 徐绍磊. 船舶动力装置与设备油液监控应用研究: [学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2001
 23. 李安华, 吴达. 模糊数学基础及其应用. 新疆: 新疆人民出版社, 1986
 24. 刘增良. 模糊技术与应用选编. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998
 25. 汤兵勇. 模糊识别模型的辨识及应用. 北京: 中国环境出版社, 1994
 26. 曹谢东. 模糊信息处理及应用. 北京: 科学出版社, 2003
 27. George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel. TIME SERIES ANALYSIS: FORECASTING AND CONTROL. 北京: 中国统计出版社, 1997
 28. 张伟斌. 针对光谱分析数据的数据挖掘方法: [学位论文]. 西安: 西安交通大学, 2002
 29. 杨位钦, 顾岚. 时间序列分析与动态数据建模. 北京: 北京工业学院出版社, 1986
 30. 安鸿志, 陈兆国, 杜金观等. 时间序列的分析与应用. 北京: 科学出版社, 1983
 31. 柏子游. 铁谱显微图像分析、诊断与信息管理技术: [学位论文]. 西安: 西安交通大学, 1999
 32. 魏海军, 胡庆存, 尹峰. 船舶机械油液检测光谱分析的特征参数. 大连海事大学学报, 2004(2), 29~31
 33. Z. Peng, T. B. Kirk. Wear Partical Classification In A Fuzzy Grey System. Wear, 1999, 225~229: 1238~1247
 34. T. B. Kirk, D. Panzera, R. V. Anamalay, Z. L. Xu. Computer Image Analysis of Wear Debris for Machine Condition Monitoring And Fault Diagnosis. Wear, 1995, 181~183: 712~722
 35. 梁华, 杨明忠. 机械设备磨损故障的分类与铁谱诊断的探讨. 润滑与密封, 1995, (1): 20~24
 36. 边肇祺, 张学工. 模式识别. 北京: 清华大学出版社, 2000
 37. 中国船级社. 螺旋桨轴状态监控系统指南. 北京: 人民交通出版社, 1996
 38. 中国船级社. 海船船级附加标志应用指南. 北京: 人民交通出版社, 2001
 39. 中国船级社. 现有船状态评估程序指南. 北京: 人民交通出版社, 1996
 40. 中国船级社. 船舶机械计划保养检验指南. 北京: 人民交通出版社, 2002