

声 明

本电子书由中国农业出版社数字出版，相关权利归中国农业出版社拥有。读者、著作权人和（或）依法可以行使著作权的权利人如有疑问，请与中国农业出版社联系：

地址：北京市朝阳区麦子店街 18 号楼

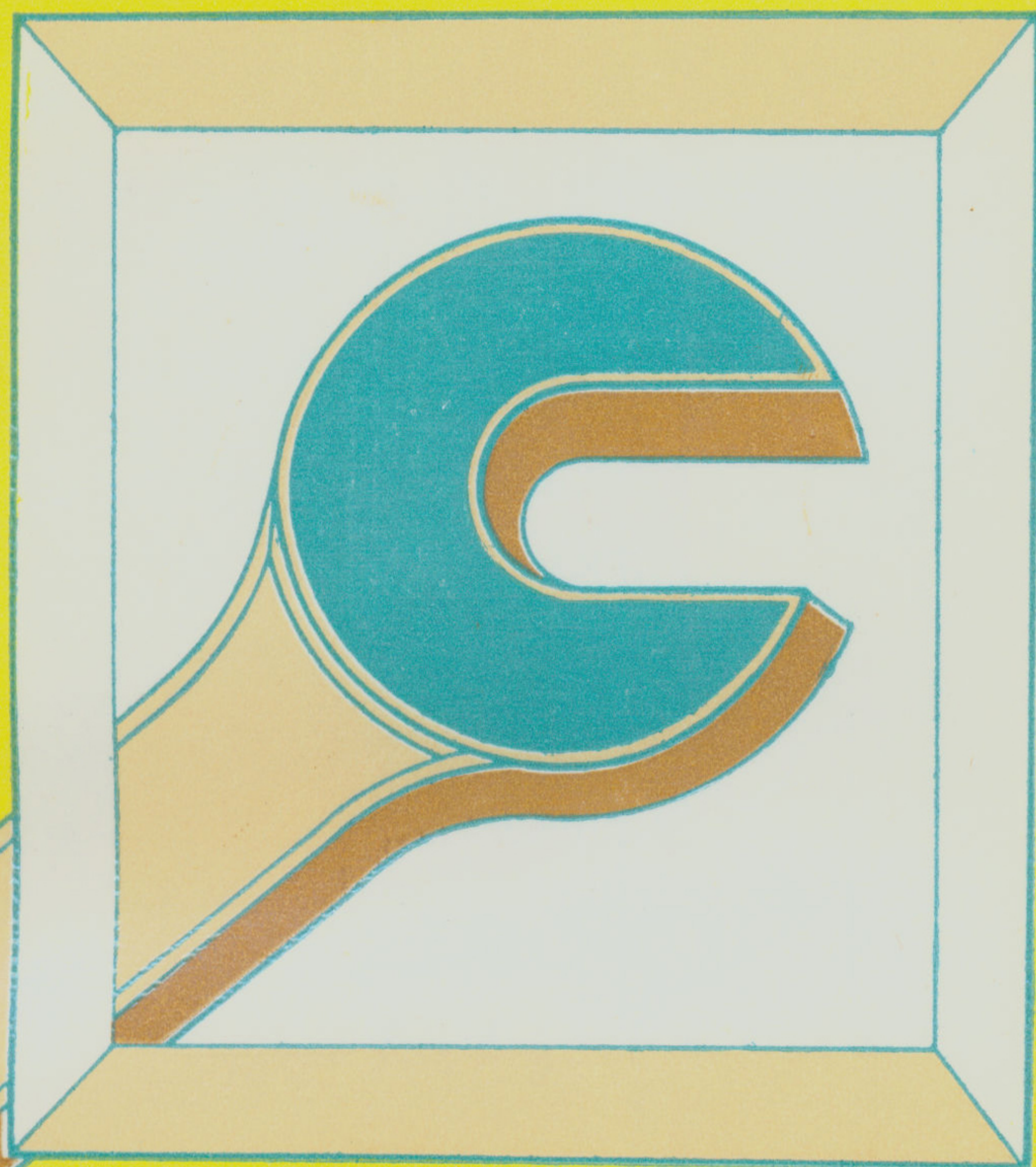
邮编：100026

电话：010-64194921 010-65005894

E-mail:lishanzhao@sina.com

中国农业出版社

邝朴生 徐福章 刘玉琴 编著



现代机器故障诊断学

农业出版社

现代机器故障诊断学

邝朴生 徐福章 刘玉琴 编著

农业出版社

(京)新登字060号

现代机器故障诊断学

邝朴生 徐福章 刘玉琴 编著

* * *

责任编辑 施文达 段丽君

农业出版社出版 (北京市朝阳区农展馆北路2号)
新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

850×1168mm32开本 15.75印张 400千字

1991年7月第1版 1991年7月北京第1次印刷

印数 1—2,490册 定价 12.00元

ISBN 7-109-01889-X/TH·87

前 言

诊断学 (Diagnostics) 一词来源于希腊, 意指鉴别、确定。最早的诊断学莫过于医疗诊断学。随着人类文明和技术的不断发展, 人们在越来越多的领域里开展了诊断活动。例如经济领域中的企业诊断, 科教领域中的院校评估, 以及对生态环境的分析评价等。在工程技术领域中, 近二十余年兴起的技术诊断学科, 则以工程技术系统的状态诊断为研究范畴。

自18世纪产业革命以来, 现代机器生产逐步取代了手工劳动方式。机器设备是企业生产的主要物质条件, 它密切关系着产品的质量、数量和成本, 在现代化大生产中, 面临剧烈的商品市场竞争, 设备的地位就更为突出。

起初, 机器设备较为简单, 维修人员主要靠感觉器官、简单量具、仪器和个人经验, 就能胜任故障的诊断和排除工作。然而, 现代设备日趋高效、复杂、昂贵, 特别是机电一体化、智能化的出现, 使旧有的故障排除经验迅速老化失效, 现代设备投资高, 一般没有备份, 一旦因故障停机, 损失巨大。崭新的现代机器故障诊断学就应运而生。它以现代可靠性理论、失效理论、信息论、系统论和控制论为理论基础, 以现代诊断仪器设备和计算机为技术手段, 结合各诊断对象的特殊规律性, 逐步形成新兴学科。不过, 目前尚处于发展阶段。现就国内外近年来发表的有关理论和方法, 结合作者有关的科研和教学工作实践写成此书, 以期引起读者的兴趣和讨论。

本书分为诊断原理 (一至九章) 和诊断技术 (十至十八章) 两大部分, 分别阐述了诊断物理、诊断数学, 监测手段、寿命预

测和诊断系统的设计，供从事机械、电器、设备管理等专业人员和有关院校的师生参考。

编者

1988年7月

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 技术诊断的发展	1
第二节 机器故障诊断学的含义和地位	10
第三节 机器故障诊断学的内容和体系	12
第二章 可靠性、维修性、有效性与诊断性	16
第一节 衡量产品质量的主要指标	16
第二节 可靠性与故障	17
第三节 维修性与有效性	20
第四节 诊断性	23
第三章 失效模式与机理	24
第一节 磨损	24
第二节 塑性变形	40
第三节 断裂	42
第四节 腐蚀	56
第五节 聚合物的老化	57
第六节 油液污染	59
第四章 故障数学	65
第一节 概述	65
第二节 正向运算	69
第三节 反向运算	75
第五章 故障诊断的传统方法	88
第一节 感官检查	88
第二节 形式逻辑推理	99
第六章 统计诊断	105

第一节	Bayes公式和Bayes决策理论	105
第二节	最大似然法	114
第七章	模糊诊断	116
第一节	模糊数学的基本知识	116
第二节	模糊关系矩阵用于故障诊断	126
第三节	从属度与从属函数的确定	133
第四节	模糊聚类诊断	146
第八章	故障树分析法	155
第一节	概述	155
第二节	故障树的编绘	158
第三节	故障树的结构函数	166
第四节	故障树定性分析	169
第五节	故障树定量分析	174
第九章	故障诊断专家系统	187
第一节	概述	187
第二节	专家系统的构成及其功能	188
第三节	实例——汽车电路故障诊断专家系统	191
第四节	不精确推理概说	197
第十章	无损探伤与探漏	203
第一节	光学探伤	206
第二节	渗透探伤	209
第三节	磁粉探伤	213
第四节	涡流探伤	222
第五节	射线探伤	230
第六节	超声探伤	235
第七节	声发射探伤	250
第八节	探漏	253
第十一章	振动检测与信号分析	260
第一节	概述	260
第二节	确定性振动	262
第三节	随机振动	270

第四节	测振传感器.....	292
第五节	振动检测技术.....	298
第六节	机械振动烈度的标准.....	302
第十二章	滚动轴承诊断	307
第一节	滚动轴承的失效.....	307
第二节	滚动轴承运转噪声与振动的特征.....	307
第三节	滚动轴承的共振解调诊断.....	319
第四节	滚动轴承振动与噪声的直接诊断.....	323
第五节	滚动轴承油膜检测.....	324
第十三章	热象诊断	329
第一节	概述.....	329
第二节	热成象装置.....	331
第三节	热象技术在设备诊断中的应用.....	336
第十四章	油样分析	339
第一节	润滑油理化指标的常规分析.....	339
第二节	润滑油光谱分析法.....	347
第三节	铁谱技术.....	351
第四节	油液清洁度等级.....	355
第五节	颗粒计数技术.....	359
第六节	油液在线监测.....	363
第十五章	齿轮箱的故障诊断	365
第一节	轴系和齿轮的失效类型及其振动特征.....	365
第二节	齿轮箱的振动和噪声.....	377
第三节	齿轮故障的分析方法.....	386
第四节	齿轮箱故障诊断法.....	395
第十六章	内燃机与液压系统故障诊断	405
第一节	内燃机的诊断参数.....	405
第二节	无外载测试.....	406
第三节	压缩系的检测.....	413
第四节	振动与噪声的诊断.....	414
第五节	内燃机测试诊断设备.....	418

第六节	在用润滑油监测	422
第七节	排放监测	424
第八节	柴油机供油系统的故障诊断	426
第九节	液压诊断的特点	430
第十节	液压现场测试方法	433
第十一节	液压测试仪器与设备	436
第十七章	剩余寿命预测	444
第一节	故障演变历程	444
第二节	金属疲劳寿命	445
第三节	金属磨损寿命	456
第四节	金属腐蚀速度	460
第五节	绝缘老化寿命	464
第十八章	诊断系统设计	468
第一节	概述	468
第二节	诊断系统的设计步骤	473
第三节	最佳诊断程序的拟定	478
第四节	硬件组合	488
主要参考文献		491

第一章 概 述

第一节 技术诊断的发展

近二十年来，世界各国在技术诊断理论和实践上有了长足的发展，工业界、学术界对现代机器故障诊断意义的认识不断深化。可以说故障诊断和状态监测是现代设备视情维修（On-condition maintenance）制度的技术基础。

设备管理维修制度发展至今已具备三种类型。首先是事后维修制（Run-to-breakdown maintenance），就是在设备发生故障之后才进行检修，这种制度仅适于造价较低、事故停机造成的直接、间接损失不大的机器设备，或者在关键部位具有备份装置的贵重设备。若对于无备份装置的大型设备也采取直到事故发生后才停机检修的制度，则必须依靠现代诊断技术，随时察明“存在着什么隐患？什么时候会发生故障？”，预先得知将要发生事故的部位和时间，设备管理人员可以从容安排组织维修人力，采购必需备件，以便在短时间内完成更高质量的维修工作。

其次是定期预防维修制（Time-based preventive maintenance），针对某些无备份装置的重要设备或意外停机损失巨大的设备，往往实行这种维修制度。其修理间隔的确定主要根据经验和统计资料，以保证机群的完好率处于一定水平，但是它很难预防由于随机因素引起的偶然（发）事故，同时也会废弃许多尚可应用的零件，而且增加了不必要的拆装次数，造成浪费。实践经验表明，在相当多的情况下，频繁拆卸换件非但不能改善设备的性能，反而在每次装复后故障率都很高，经过磨合试车才逐

渐下降。由于每台设备的具体故障在这种维修制度下并不能预测出来，所以收效不是很显著的。

最后是所谓视情维修制 (On-condition maintenance)，这种制度着眼于每台设备的具体技术状况。一反定期维修的常规而采取定期检测，对设备运转情况的发展密切追踪监测。仅在必要时才进行修理。规范化的测试可以早期发现初期故障及其演变情形，从而推算出来“什么时候达到允许的恶化程度？什么时候必须修理？”，此所谓趋向监测，它可使设备维修人员提前做好修理准备。基于状态监测的视情维修起始于70年代初期，在连续过程企业中取得成功，获得了较高的设备利用率以及生产率。对旋转机械的状态监测尤为有效，不乏实例。某化工厂采用视情修理后，每年维修次数由247次降到14次，而且可以预报故障的发生时间和起因。某炼油厂电机维修费用减少了75%。一家造纸厂在其振动监测系统运行的第一年就节约了至少2.5万美元，等于该监测系统投资的10倍。

状态监测的经济效益涉及投入和节约金额两大方面。投入费用项目包括：初始调查，选定监测点，确定判据，选择和购置仪器，培训检测人员，培训判读（决策）工程师。节约项目有：延长了大修间距（提高生产率、减少维修费），有效地消除意外故障停车（提高可靠性、生产率），消除了二次损坏（如：由于轴承的一般故障导致整个齿轮箱的破坏），避免零件的浪费（不废弃可用零件），减少备件库存（运用视情修理技术可提供零件需求预报），减少业务中断和保险费，缩短修理时间（使维修作业早有准备）。

美国帕克鲁 (Perkrul) 发电厂诊断技术经济效益的计算方法可供参考。该厂装机容量为100万千瓦，电费为0.015美元/度，年产值为1亿美元，事故停产损失为15万美元/天，该厂共有50个部位要监测，需投资20万美元。监测费用为1.5万美元/年。根据可靠性计算，整个系统每年可能有14次事故停机。决定采用诊

断技术后有50%的事故能被检查出来，其中的50%是由诊断系统监测出来的，又有20%是假警报，每次事故停车平均要花3天时间检修。则该诊断系统能节约的费用B为：

$$B = 0.5 \times 0.5 \times 14 \times 3 \times 15 \times (1 - 0.2) \\ = 126 \text{ 万美元/年}$$

诊断成本A为：

$$A = (20/10 \text{ 年折旧}) + 1.5 \\ = 3.5 \text{ 万美元/年}$$

则经济效益系数C为：

$$C = \frac{B}{A} = \frac{126}{3.5} = 36$$

由此不难看出，技术诊断经济效益的大小主要取决于诊断对象本身的造价和停机损失，还取决于诊断系统（包括软硬件和工作人员）的工作效率和投资额。随着现代设备的昂贵化以及诊断水平的提高、成本的降低，现代诊断技术已从太空、国防等高精尖领域逐渐推广到国民经济各部门，形成一个由军用到民用，由尖端到普及的浪潮。

60年代以后，涌现的现代化设备与传统设备相比，更迫切地需要现代诊断技术，这是因为：

1. 生产设备大型化、连续化后，虽然可以大幅度提高生产率和正品率，降低成本、节约能源和人力、物力，但同时也大幅度地增加了停工损失和维修费用。例如，钢铁工业带钢生产中的退火工段，由原来的五道工序改造成为一道连续退火线后，生产率和质量成倍提高，但设备故障造成的单位时间损失却增长了6倍。

表1-1列举了日本几个主要工业部门，70年代以来维修成本的比重。

据统计，1980年美国在设备维修方面耗资2460亿美元，将近同年总税收额的三分之一。而在这2460亿美元中，将近三分之一

即750亿美元是浪费掉的，原因是维修方法不当，包括缺乏正确的状态监测和诊断技术。

表 1-1

部 门	设备维修成本占 生产成本百分比	设备维修成本占设 备投资额百分比
钢 铁	12.9	8.6
石 油	3.5	2.6
化 工	5.0	4.7
橡 胶	3.3	6.7
玻 璃	7.3	7.9
汽 车	6.3	12.8

2. 航天、航空、航海、核工业等部门对现代化设备的安全可靠性提出越来越高的要求。对于设备故障若不能事先发现加以制止，就可能酿成严重灾难。

3. 现代化设备大都技术先进、结构复杂，检测工作量大，要求高，而且不允许经常拆卸检查，因此必须采用先进的方法和仪器。

4. 各国工业界维修人员高龄化，知识技能老化，要靠诊断现代化、电算化、自动化来弥补。

下面简要介绍一下主要工业国家设备诊断技术的发展情况。

1967年4月，在美国宇航局（NASA——National Aeronautics and Space Administration）的倡导下，成立了美国机械故障预防小组（MFPG——Mechanical Fault Prevention Group），在头3年间共公开发表论文94篇（表1-2）。到1970年MFPG正式划归美国国家标准局领导（NSB——National Standards Bureau），此后平均每年召开两次会议。

美国几个主要开发研究诊断技术的单位状况列于表1-3。

在英国，是在60年代末70年代初，以R. A. Collacott为首的英国机器保健中心 (U K Mechanical Health Monitor

表 1-2 美国MFPG会议初期活动

会 议	日 期	主 要 议 题 及 目 的	论 文 篇 数
第一届	1967年6月	组织问题，故障预防的定义	6
第二届	1967年9月	计划问题，技术交流	13
第三届	1967年10月	轴承故障，现场监测	14
第四届	1968年2月	现场监测，油液光谱分析技术	14
第五届	1968年5月	故障预报系统，技术交流	13
第六届	1968年12月	机械故障的监测、诊断和预报	6
第七届	1969年3月	直升飞机传动装置的故障机理与识别	7
第八届	1969年6月	飞机燃气轮机中的故障问题	12
第九届	1969年11月	在设计中如何避免重要故障的发生	9

表 1-3 美国设备诊断技术研究状况

部 门	研 究 单 位	研 究 内 容
国家标准局 (NSB)	机械故障预防小组 (MFPG)	1. 故障的机理 2. 检测、诊断和预测技术 3. 可靠性设计 4. 材料耐久性评价
	齿轮噪声及动力学试验室	1. 监测技术 2. 诊断技术 3. 振动分析 4. 倾向管理
国家锅炉及高压容器监测局		1. ASME—American Society of Mechanical Engineers 规范的推广 2. 检查员的培训 3. 检查员的资格授予
机械工艺技术公司 (MTI)	塞格研究所	1. 回转机械的诊断 2. 齿轮的诊断 3. 轴承的诊断 4. 停机时间控制系统的研究(DIC)

(续)

部 门	研 究 单 位	研 究 内 容
电力研究所 (EPRI)	可靠性研究室	1.热力学 2.诊断监测仪表的研制 3.腐蚀监测 4.透平机断裂监测

Center) 开始的, 在宣传、培训、咨询、资料交流及诊断技术的开发方面取得了很好的成效。到了1982年创立了沃福森工业维修公司 (WIMU), 开展了这方面的研究和咨询活动。此外还有几家公司担任政府的顾问, 协调和教育工作。

在核发电方面, 英国原子能机构 (UKAEA) 下设一个系统——可靠性服务站 (SRS), 从事诊断技术的研究, 并且起到英国故障数据中心的作用。

在钢铁工业和电力工业方面, 英国也有相应机构提供监测诊断服务, 在英国设备诊断技术的引进、开发和推广工作都是在政府的有力指导下进行, 这是它的一个特点。

设备诊断技术在欧洲其它一些国家也有很大进展, 它们各自具有特色或占世界领先地位。如瑞典的SPM轴承监测技术, 挪威的船舶诊断等 (表1-4)。

日本的诊断技术在某些民用工业, 如钢铁、化工、铁路等部门发展很快, 占有某种优势。日本的做法是密切注视世界性动向, 积极引进消化最新技术, 努力发展自己的诊断技术, 特别注意研究本国的诊断仪器。

国立研究机构中机械技术研究所和船舶技术研究所重点对机械基础件的诊断技术进行了研究。

高等学校开展诊断技术的也不少, 发表了不少基础性的研究报告。

一些民办企业的研究工作是在企业内部以营业为中心开展

表 1-4 欧洲一些国家诊断技术研究状况

国 家	研究单位	研究内容
瑞 典	SPM仪器公司	1. 脉冲冲击法 2. 轴承监测装置 3. 电子听诊
丹 麦	BK公司	1. 振动传感器 2. 振动分析仪器 3. 回转机械监测仪 4. 声发射(AE—Acoustic Emission)技术
挪 威	船舶研究所海军技术中心	多种船舶监测程序软件和仪器系统
联邦德国	ALLIANZ-TECHNICAL研究所	1. 振动分析仪 2. 回转机械监测装置 3. 故障原因分析

的，具有较高的应用水平，也发表了不少高水平的论文。

1983年日本钢铁协会对7个钢铁公司（16个企业）和7个重工业公司进行了调查，它们把诊断技术分成简易诊断和精密诊断两类。前者相当于状态监测，弄清设备的状态是正常还是异常。精密诊断则能定量掌握设备的状态，能了解故障的部位和原因，能预测故障对设备未来的影响。通常简易诊断由维修人员进行，精密诊断则由专门小组进行。根据所收集的近百个诊断事例表明，大部分诊断对象设备是回转机械，特别是轴承、齿轮占绝大多数。实用的诊断方法如表1-5所示，诊断方法以振动法较多，其次为油分析法。对于那些低速回转机械来说，诊断比较困难，不能单用振动法，辅以油液分析等技术比较有效。

为了防止突发事故，一些企业还采用在线监测装置，其典型模式如图1-1。其中1—10通道的监测装置居多，检测参数以振动量较多。

1982年对回转机械的诊断调查表明，目前比较普及的还是简