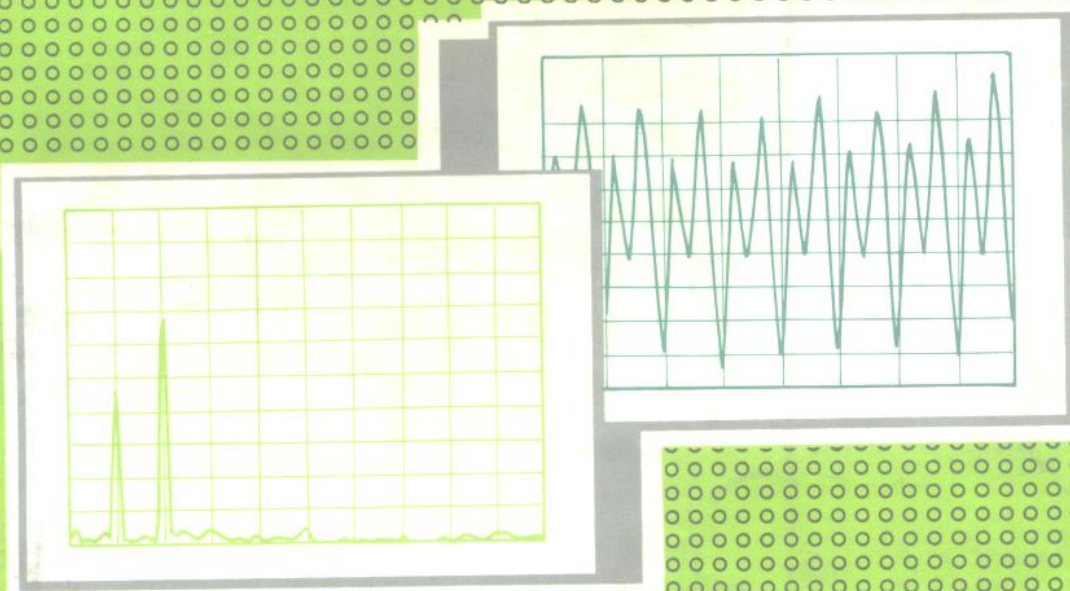


黄文虎 夏松波 刘瑞岩 等 编著

设备故障诊断原理、 技术及应用



科学出版社

设备故障诊断原理、 技术及应用

黄文虎 夏松波 刘瑞岩 等 编著

科学出版社

1996

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书全面、系统论述故障诊断原理和技术的各个方面,全书分四篇,23章。第一篇叙述设备故障诊断的一般技术,第二篇论述设备故障诊断的数学基础与建模方法;第三篇介绍智能诊断专家系统的原理;第四篇叙述设备故障诊断技术的应用。

本书特点是内容完整,原理和应用并重,反映当代故障诊断技术的最新发展。

本书适用于机械、电力、化工、车辆、航运、矿山、油田、冶金、轻工、兵工、航空、航天等方面、有关企业、厂矿、研究机构 and 高等学校从事设备故障诊断的专业人员阅读,也可作为高等学校有关专业研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

设备故障诊断原理、技术及应用/黄文虎等编著. —北京:科学出版社, 1996.8

ISBN 7-03-005046-0

I. 设… I. 黄… II. ①设备-故障诊断②故障诊断-自动化系统
IV. ①TB4②TP277

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 17352 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1996 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1996 年 8 月第一次印刷 印张: 28
印数: 1—2 500 字数: 645 000

定价: 40.00 元

序 言

我怀着十分喜悦的心情,阅读着黄文虎教授等所编著的《设备故障诊断原理、技术及应用》一书的底稿,尽管窗外已是深秋,但是,书中的许多内容却似一朵朵鲜花在开放着,我不禁浮想联翩,欣然命笔了,为本书写一篇小序,并饱含深情,祝贺本书即将出版。

设备诊断技术自 80 年代初在国内开展以来,经过广大科技工作者十多年的不懈努力,在理论研究和工程应用两方面都取得了丰硕的研究与应用成果和宝贵的实践经验,使这一技术在能源、石化、交通、冶金、制造等许多重要领域都得到了比较广泛的应用。与此同时,也形成了从事这一研究和应用工作的庞大队伍,还相继成立了一批全国性的设备诊断技术组织,使这一技术的研究和应用在国内形成了很好的大气候。

近年来,国内陆续出版了一批质量较高的设备诊断方面的著作及译著。这些著作与译著对国内故障诊断技术的发展无疑起到了十分重要的作用,但是,不难看到,尚有许多方面的空白,其中之一,就是国内一直没有出版一本比较系统的、质量较高的、理论性较强的故障诊断技术方面的专著;而国内目前从事故障诊断技术的队伍越来越大,研究工作越来越系统,越来越深入,因而迫切需要一些理论性较强又有一定系统性的专著来满足这一技术进一步发展的需要。值得高兴的是,黄文虎教授等编著的《设备故障诊断原理、技术及应用》一书及时填补了这一空白。这怎不令人喜悦?!“何用别寻方外去,人间亦自有丹邱。”

我粗读此书,深感本书至少有以下三个特色:首先,本书除内容比较完整详实外,特别在理论性和系统性方面很有特色,这是非常不易的;其次,本书诊断原理、方法和工程应用并举,方法中有应用、应用中有方法,适合于各种层次读者的需要,既是一本很好的教学用书,又是一本极好的研究用参考书;第三,书中内容不仅包含了作者及作者所领导的研究集体的研究成果,而且包含了国内外诊断技术的最新研究成果,因而这部著作也基本上反映了国内外这一领域的研究现状。我认为这部著作对于从事故障诊断研究工作与应用工作的广大科技工作者都是一本很好的参考书和工具书,因此我愿意将这本书推荐给广大读者。

值本书出版之际,谨为之序。我深信,这部著作将会对我国设备诊断技术的深入发展起到有力的推动作用。我祝愿本书出版成功!祝愿我国设备诊断领域日益繁荣昌盛!

中国科学院院士 杨叔子
华中理工大学校长
1994 年 10 月下旬于瑜伽山下

前 言

设备故障诊断技术是七八十年代得到迅速发展的一项新技术。随着现代大生产的发展和科技的进步,设备的复杂程度日益提高,如何保证设备的安全运行,已成为一个十分迫切的问题。设备故障诊断技术是保障设备安全运行的基本措施之一,它能对设备故障的发展作出早期预报,对出现故障的原因作出判断,提出对策建议,避免或减少事故的发生。故障诊断技术的普遍应用将能改变设备的维修体制,从现行的“定期维修”向更合理的“视情维修”转变。因此设备故障诊断技术的应用会带来巨大的经济效益,日益受到国内外的广泛重视。

设备故障诊断技术广泛吸取现代科学技术的最新成就。它不但与诊断对象的性能和运行规律密切相关,而且广泛采用了现代数学、力学、物理、电子技术、信息技术、计算机技术等多方面的成果,是一门多学科交叉和融合的新型学科,特别是人工智能的应用,智能化故障诊断技术的发展,更使故障诊断技术面貌一新。智能化故障诊断技术的深入研究,也反过来向人工智能学科提出了许多复杂、困难的理论问题,需要科技人员广泛深入地研究并加以发展。

当前我国从事故障诊断技术的队伍越来越大,关心这一领域的人员越来越多,迫切需要各种有关设备故障诊断的书籍和专著,来满足广大读者的需要。

近年来国内陆续出版了一批质量较高的设备故障诊断方面的著作及译著,有的是以故障诊断丛书的形式,分列专题,分别以独立的小册子出版;有的是故障诊断的专著,对故障诊断各方面的内容作了系统的论述。这些著作及译著所论述的侧面和角度各有侧重,总的来说内容都比较丰富,并各有自己的特色,对读者了解这一领域各方面的问题很有帮助。同时,人们也希望有一些理论性较强又有一定系统性的专著问世。

哈尔滨工业大学振动工程研究中心从1983年以来,与其他兄弟单位一起,连续承担了国家“六五”、“七五”、“八五”重点科技攻关项目中有关大型旋转机械故障诊断技术和装置的研究课题,在诊断技术的应用基础研究方面还曾得到国家自然科学基金重点项目的资助,在此基础上开发了近二十套多种类型的故障诊断装置,用于各电厂大型汽轮发电机组和石化企业压缩机组的状态监测和故障诊断。所研制、开发的“20万千瓦汽轮发电机组振动监测与故障诊断系统”已由国家科委列入《1995年国家科技成果重点推广计划指南项目》(编号I3-4-1-7);此外,课题组还参加了我国空间飞行器故障诊断技术的研究,参与了往复机械故障诊断的论证。国防科技大学一系在结构故障诊断技术方面也开展了较多的研究。在以上各项工作中,两单位课题组分析了国内外故障诊断技术的发展趋势,通过对课题的研究和对系统的开发,积累了一定的经验和资料、数据,在总结这些工作的基础上,共同编写这本书。我们希望,本书是一部关于设备故障诊断技术方面较全面和系统的,既能反映最新科技成就又能反映我国工业生产实际的专著,体现出以下特点:

1. 内容比较完整,诊断对象包括机械设备为主的各种设备;内容包括必要的理论基础,故障诊断的原理、技术及其应用。

2. 原理和应用并重,既重视阐明诊断的原理和方法,也重视介绍故障诊断系统的实际组成和各种诊断方法的具体实现及其诊断实例。

3. 反映当代故障诊断技术的最新发展,特别是智能化诊断技术的最新成果,如人工智能领域中不精确知识的表示与推理,知识自动获取的机器学习理论和方法,知识相容性检查及知识库的管理维护,还包括一些新的有发展前景的诊断方法,如神经网络模型,灰色系统模型,故障模式及影响分析(FMEA)和故障模式、影响和致命度分析(FMECA)在故障诊断中的应用,以及分形几何、小波变换的应用等。

4. 反映作者及课题组多年实践的经验和见解,有些章节是课题组所取得科研成果的总结。同时也反映国内兄弟单位近几年来在故障诊断技术方面的科研成果。

为了能体现以上特色,又不使篇幅过于庞大,在编写中,本书采用了如下写法:

1. 考虑到读者对象是具有大专以上基础或从事故障诊断技术工作的专业人员,已具有必要的数学基础和诸如振动理论、信号处理等的初步知识,因此一些最基本的概念和公式不做很详细的叙述。

2. 内容完整,详略结合。诊断对象上,兼顾各种设备,而以有代表性的旋转机械、空间飞行器和核电站为代表,又以最常见的旋转机械故障诊断为主作详细的论述,其它对象,包括往复机械等则只作一般介绍。在诊断方法上,以振动诊断方法和智能诊断专家系统为主作详细的论述,其他物理方法,如声、热、无损检测以及其它各种诊断原理和建模方法则只作一般介绍,这些方法有关书籍较多,本书对这些内容作简略介绍的同时均指出有关参考文献,有兴趣进一步深入了解的读者可参看有关文献。

3. 本书最后部分以有代表性的旋转机械故障诊断专家系统作为实例,详细介绍了状态监测和故障诊断系统的硬件和软件的组成和实施方案,并简略介绍了空间飞行器和核电站安全监测诊断系统的实例,以便读者能通过这些实例获得关于故障诊断系统的组成以及各种诊断原理和技术是如何具体实现的形象概念。

本书共分4篇,23章。第一篇讨论设备故障诊断的一般技术,即传统的当前行之有效的常规诊断方法。其中第一章介绍故障诊断的基本原理和方法,第二章介绍故障诊断的技术基础,第三章介绍故障诊断中的信号处理,第四章介绍振动诊断方法,第五章简略介绍几种其他物理诊断方法。第六章、第七章分别介绍几种诊断对象的故障诊断技术,其中第六章介绍旋转机械各类故障的机理及其与相应征兆之间的关系,这是旋转机械故障诊断的基础。第七章则分别简略介绍滚动轴承、齿轮和往复机械等设备的故障诊断技术的特点。

第二篇讨论故障诊断的数学基础与建模方法,包括各种具有发展前景的故障诊断方法,有的已在诊断系统中实际应用,有的正在研究和发展中。第八章介绍基于模式识别的诊断方法,第九章介绍基于概率统计的诊断方法,第十章介绍模糊诊断方法,第十一章介绍故障树的概念和方法,第十二章介绍利用“故障模式及影响分析方法(FMEA)”及“故障模式、影响和致命度分析方法(FMECA)”在故障诊断中的应用。第十三章介绍一些新技术在故障诊断中的应用探索,包括神经网络、小波变换及分形几何的应用。

第三篇介绍智能诊断专家系统的原理,这也是本书的重点章节。第十四章介绍专家系统与知识工程的原理,其中包括已广为采用的产生式系统和框架系统,以及新近发展的面向对象的知识表示方法和不精确知识的表示和应用。第十五章介绍推理机制和控制

策略. 第十六章介绍知识获取, 特别是知识自动获取的问题. 第十七章介绍分布式诊断专家系统. 第十八章介绍诊断专家系统的开发与管理.

第四篇是设备故障诊断技术的应用. 第十九章介绍状态监测的具体方法和监测仪表, 第二十章介绍信息采集和数据处理方法, 第二十一章以旋转机械故障诊断系统为重点, 介绍几个故障诊断系统的实例, 并介绍其信息采集与状态监测系统的硬件组成与实施, 介绍信息采集与分析的软件组成与实施, 包括采集、监视与诊断各个软件模块的功能与流程图. 第二十二章简略介绍核电站故障诊断系统的实例, 第二十三章简略介绍空间飞行器的故障诊断技术与系统.

本书由黄文虎主持编写, 由黄文虎, 夏松波, 刘瑞岩负责统稿. 刘瑞岩负责第一、第二篇, 黄文虎负责第三篇, 夏松波负责第四篇的成书. 本书各章由下列同志分工编写: 前言、绪论、第一章(黄文虎), 第二章(夏松波), 第三、四章(刘瑞岩), 第五章(张嘉钟, 刘瑞岩, 夏松波), 第六章(徐世昌, 武新华, 阮跃, 刘荣强), 第七章(徐世昌, 夏松波), 第八、十二章(姜兴渭, 刘瑞岩, 韩小云), 第九、十一章(刘瑞岩, 姜兴渭, 韩小云), 第十章(张跃), 第十三章(刘占生, 杜元虎, 蒋东翔), 第十四、十五章(王日新), 第十六章(刘占生), 第十七、十八章(蒋东翔), 第十九章(董彩凤, 夏松波), 第二十章(徐敏强, 徐世昌, 阮跃), 第二十一章(冯永新, 夏松波, 王飞, 张金祥, 张国斌), 第二十二章(冯永新), 第二十三章(荣吉利, 纪常伟), 汪光明, 刘喜庆, 崔升为第六、七和二十一章编写了部分内容. 阮跃负责全书的组织及打印、校订工作, 武新华负责全书附图的整理与校订工作.

本书承华中理工大学校长杨叔子院士主审, 并为写序, 史铁林副教授提出许多宝贵意见, 特此致谢.

辽阳石油化纤公司副总工程师高金吉博士为本书提供了宝贵的资料, 中国设备管理协会左一序高工对本书提供资料和很好的建议, 一并致谢.

本书的部分研究内容得到国家自然科学基金的资助和国家“八五”重点科技攻关项目的支持, 并得到中央统战部王兆国部长和各位领导的关怀和资助出版, 特此致谢.

由于时间仓促及水平所限, 本书可能有许多不当之处和不尽之处, 请广大读者批评指正.

作者

目 录

序言

前言

绪论	(1)
0.1 设备故障诊断的意义、目的和任务	(1)
0.2 设备故障诊断技术的发展概况	(5)

第一篇 设备故障诊断的一般技术

第一章 设备故障诊断的基本原理和方法	(8)
1.1 设备故障诊断问题的基本概念和特点	(8)
1.2 设备故障诊断的基本方法及其发展	(12)
1.3 设备故障诊断的知识构成和求解策略	(13)
第二章 设备故障诊断的技术基础	(16)
2.1 设备故障的定义和分类	(16)
2.2 设备故障诊断技术的内容和类型	(18)
2.3 设备故障的信息获取和检测方法	(21)
2.4 设备故障的评定标准	(23)
第三章 故障诊断中的信号处理	(30)
3.1 信号处理的基础知识	(30)
3.2 各态历经数据	(36)
3.3 平稳过程的功率谱密度函数	(37)
3.4 随机数据统计参量的数值分析	(39)
3.5 离散傅里叶变换(DFT)	(40)
第四章 振动诊断方法	(47)
4.1 振动诊断方法概述	(47)
4.2 振动诊断的时域分析方法	(48)
4.3 振动诊断的频域分析方法	(53)
4.4 倒频谱诊断法	(55)
4.5 振动诊断的其他方法	(57)
第五章 其它物理诊断方法	(63)
5.1 声学监测方法	(63)
5.2 温度监测方法	(69)
5.3 无损检测技术	(71)
5.4 油样分析技术	(74)
第六章 旋转机械故障诊断技术	(77)

6.1	旋转机械典型故障的机理和特征	(77)
6.2	利用征兆的故障诊断方法	(91)
6.3	旋转机械振动故障诊断示例	(101)
6.4	水轮发电机组振动故障诊断	(104)
第七章	滚动轴承与齿轮及其它设备故障诊断技术	(106)
7.1	滚动轴承故障及其诊断技术	(106)
7.2	齿轮故障及其诊断技术	(111)
7.3	往复机械的监测与诊断	(118)

第二篇 设备故障诊断的数学方法

第八章	模式识别诊断方法	(125)
8.1	概述	(125)
8.2	贝叶斯决策判据	(127)
8.3	线性判别函数法	(132)
8.4	非线性判别函数	(136)
8.5	特征量的提取	(137)
第九章	基于概率统计的诊断方法	(142)
9.1	时序模型诊断法	(142)
9.2	距离判别函数故障诊断法	(149)
9.3	灰色系统诊断法	(155)
9.4	序贯模式分类故障诊断法	(161)
9.5	蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟法	(162)
第十章	模糊诊断原理及其应用	(165)
10.1	模糊诊断的信息处理	(165)
10.2	故障诊断的模糊模式识别方法	(171)
10.3	故障诊断的模糊综合评判方法	(174)
10.4	故障诊断的模糊聚类分析方法	(183)
第十一章	故障树分析与诊断	(186)
11.1	故障树分析的基本概念	(186)
11.2	故障树的建造和表述	(189)
11.3	故障树的定性分析	(193)
11.4	故障树的定量分析	(196)
11.5	面向对象基于故障树模型的故障诊断	(198)
第十二章	故障模式、影响和致命度分析	(203)
12.1	故障模式及影响分析	(203)
12.2	致命度分析	(206)
12.3	FMEA 和 FMECA 应用实例	(207)
第十三章	神经网络、小波变换及分形几何在故障诊断中的应用	(211)
13.1	神经网络及其在故障诊断中的应用	(211)

13.2	小波变换及其在故障诊断中的应用	(219)
13.3	分形几何及其在故障诊断中的应用	(227)

第三篇 设备故障诊断专家系统原理

第十四章	专家系统与知识工程	(232)
14.1	专家系统概述	(232)
14.2	专家系统的知识表示	(237)
14.3	知识的产生式表示	(240)
14.4	知识的框架表示	(243)
14.5	知识的其他表示方法	(246)
14.6	面向对象的知识表示	(250)
14.7	不精确知识的表示	(254)
第十五章	诊断推理机制	(256)
15.1	诊断推理概述	(256)
15.2	诊断过程的推理策略	(257)
15.3	诊断过程的控制策略	(260)
15.4	不精确推理	(265)
第十六章	知识获取	(274)
16.1	知识获取的任务和方法	(274)
16.2	故障诊断专家系统中常用的几种机器学习方法	(277)
第十七章	分布式诊断专家系统	(284)
17.1	分布式诊断专家系统的基本概念和关键技术	(284)
17.2	分布式诊断专家系统的基本结构	(287)
17.3	分布式诊断专家系统的任务分解、协调与通信	(289)
17.4	诊断结果的综合	(293)
第十八章	诊断专家系统的开发	(296)
18.1	专家系统的开发过程	(296)
18.2	面向数据流的诊断专家系统设计方法	(300)
18.3	诊断专家系统的结构和功能设计	(303)
18.4	诊断专家系统知识库的维护	(305)
18.5	诊断专家系统开发环境与工具的选择	(308)
18.6	专家系统工具 CLIPS 简介	(309)
18.7	诊断专家系统的测试与评价	(312)

第四篇 设备故障诊断技术的应用

第十九章	状态监测与监测仪表	(314)
19.1	状态监测的基本参数	(314)
19.2	监测用传感器	(316)
19.3	振动参数的测量	(331)

19.4 振动监测常用仪表	(335)
第二十章 信号采集与数据预处理方法	(347)
20.1 动态数据的采集	(347)
20.2 数据预处理方法	(350)
第二十一章 旋转机械状态监测与故障诊断系统	(354)
21.1 旋转机械监测与诊断系统的组成、功能及发展概况	(354)
21.2 监测与诊断系统的硬件	(365)
21.3 监测与诊断系统的软件	(373)
21.4 一个实用的状态监测与故障诊断系统	(379)
第二十二章 核电站故障诊断专家系统	(402)
22.1 核电站的工作原理	(402)
22.2 核电站常见的故障模式	(404)
22.3 核电站故障诊断专家系统	(405)
第二十三章 空间飞行器故障诊断技术及其系统	(410)
23.1 空间飞行器故障诊断技术的应用和发展	(410)
23.2 空间飞行器故障诊断专家系统的主要知识表示方法	(414)
23.3 “旅行者”号探测器通讯系统故障诊断专家系统(SHARP)	(415)
23.4 自由号空间站故障管理原型系统	(417)
名词索引	(422)
参考文献	(429)

绪 论

0.1 设备故障诊断的意义、目的和任务

0.1.1 设备故障诊断的意义

随着现代大生产的发展和科学技术的进步,现代设备的结构越来越复杂,功能越来越完善,自动化程度也越来越高.由于许许多多无法避免的因素的影响,有时设备会出现各种故障,以致降低或失去其预定的功能,甚至造成严重的以至灾难性的事故,国内外曾经发生的各种空难、海难、爆炸、断裂、倒塌、毁坏、泄漏等恶性事故,造成了人员伤亡,产生了严重的社会影响;即使是经常生产中的事故,也因生产过程不能正常运行或机器设备损坏而造成巨大的经济损失.

表 0.1 1977—1989 年间世界上一些重大事故及其后果

国 别	年 代	起 因	后 果
西班牙	1977	KLM 和 PAN AM 两架飞机在跑道上相撞	死 582 人
美 国	1979	DC-10 飞机起飞时发动机失控坠毁	死 271 人
美 国	1979	三里岛核电站泄漏事故	损失几十亿美元
印 度	1979	水坝毁坏	死 1 万多人
沙特阿拉伯	1980	沙特三星机着火	死 301 人
英 国	1980	钻油塔倒塌	死 123 人
印 度	1982	农业毒剂泄漏	死 2700 人, 几万人中毒害
美 国	1984	波音 737 机翼积冰起飞时坠入河中	死 70 人
日 本	1985	JAL 747 坠毁	死 520 人
前苏联	1986	切尔诺贝利核反应堆泄漏	死 32 人, 13.5 万居民被疏散
美 国	1986	“挑战者”航天飞机失事	死 7 人, 航天飞机爆炸, 损失 12 亿美元
英 国	1986	直升机坠毁 * 据报道世界上有 300 多架直升机坠毁	死 45 人
英 国	1987	地下交叉管道着火	死 31 人
比利时	1987	汽车轮渡时沉没	死 193 人
英 国	1988	放射性管道爆炸	死 167 人
英 国	1988	北海油田帕尔波·阿尔法号大型采油平台爆炸失火	平台爆毁
英 国	1989	波音 737 双发动机着火坠毁	死 44 人, 更多人受伤
英 国	1989	人群拥挤失控	死 96 人, 伤多人
前苏联	1989	气体管道爆炸	死 500 人

表 0.1 列出了 1977—1989 年间世界上一些重大事故及其后果. 这些严重的灾难性事故触目惊心, 不但造成巨大的经济损失, 而且造成很大的人员伤亡和环境污染, 在社会上引起了强烈的反响, 例如美国三里岛核电站和前苏联切尔诺贝利核反应堆的泄漏曾引起对核电站安全性的争议, 对核能的发展产生了影响; 美国挑战者号航天飞机失事使美

国航天事业的发展一度陷于停顿,都是对整整一个产业的打击.还有其他许多事故也是严重的,如1972年日本关西电力公司南海电厂3号机组——600MW汽轮发电机组因振动引起严重的断轴毁机事件,1985年我国大同电厂和1988年我国秦岭电厂的200MW汽轮发电机组的严重断轴毁机事件,都造成了巨大的经济损失.因此保证设备的安全运行,消除事故,是十分迫切的问题.

现代设备运行的安全性与可靠性取决于两个方面,一是设备设计与制造的各项技术指标的实现,为此设计中要采用可靠性设计方法,要有提高安全性的措施;二是设备安装、运行、管理、维修和诊断措施的实施.现在,设备诊断技术、修复技术和润滑技术已列为我国设备管理和维修工作的三项基础技术,成为推进设备管理现代化,保证设备安全可靠运行的重要手段.

0.1.2 设备故障诊断的目的

设备故障诊断的目的是:

(1)能及时地、正确地对各种异常状态或故障状态作出诊断,预防或消除故障,对设备的运行进行必要的指导,提高设备运行的可靠性、安全性和有效性,以期把故障损失降低到最低水平.

(2)保证设备发挥最大的设计能力,制定合理的检测维修制度,以便在允许的条件下充分挖掘设备潜力,延长服役期限和使用寿命,降低设备全寿命周期费用.

(3)通过检测监视、故障分析、性能评估等,为设备结构修改、优化设计、合理制造及生产过程提供数据和信息.

总起来说,设备故障诊断既要保证设备的安全可靠运行,又要获取更大的经济效益和社会效益.

事实上,如果加强状态监测与故障诊断工作,有许多事故是可以防患于未然的.下面是一些事故增加的原因,也正是设备故障诊断所要解决的问题:

(1)现代生产设备向大型化、连续化、快速化、自动化方向发展,一方面在提高生产率、降低成本、节约能源和人力等方面带来很大好处;但另一方面,由于设备故障率增加和因设备故障停工而造成的损失却成十倍,甚至成百倍地增长,维修费用也大幅度增加.

(2)高新技术的采用对现代化设备,特别是航天、航空、航海、核工业等部门对安全性、可靠性提出越来越高的要求,多年来航天、航空、核电站的多次事故更说明了其故障诊断的迫切性.

(3)现有大量生产设备的老化要求加强安全监测和故障诊断.许多老设备、老机组,服役已接近其寿命期,进入“损耗故障期”,故障率增多,有的甚至超期服役,全部更新经济负担很重,此时如有完善的故障诊断系统,将能延长设备的使用期.

(4)维修人员的高龄化和经验丰富的年轻设备维护人员的培养也是许多工业化国家所关心的问题.故障诊断专家系统将能部分地解决这一困难.利用人工智能理论和方法,将有经验的维护人员关于故障诊断的经验和知识加以系统化,形成故障诊断专家系统的知识库,将有利于故障诊断知识的积累和扩大.

上面分析了现代生产中事故增加的原因及加强故障诊断以保证设备安全可靠运行和

消除故障的要求. 下面分析故障诊断将带来重大的经济效益, 这方面国内外都有许多报道^[6], 部分例子如下:

(1) 对生产单位, 配置故障诊断系统能减少事故停机率, 具有很高的收益/投资比.

IMEKO 第三届国际会议上曾报道美国 Pekrul 发电厂实施故障诊断的经济效益情况分析, 如表 0.2 所示. 从表中可见, 故障诊断系统的收益甚至可达到投入的 36 倍.

表 0.2 美国 Pekrul 电厂故障诊断效益分析

电厂情况	装机容量: 1000MW, 电费: \$ 0.015 元/千瓦时, 产值约: \$ 1 亿元/年
事故损失	按可靠性分析, 事故停机 14 次/年, 停产损失 \$ 15 万元/天
诊断效果	能查出 50% 事故, 其中 50% 由诊断系统查出, 内含虚警 20%, 修复时间: 3 天/每次事故
诊断效益 (节约费用)	$B = 14 \times 0.5 \times 0.5 \times 3 \times 15 \times (1 - 0.2) = \$ 126 \text{ 万元/年}$
投入经费	投资: \$ 20 万元; 年监测费: \$ 1.5 万元/年
诊断成本	$A = (20 \text{ 万}/10 \text{ 年折旧}) + 1.5 \text{ 万/年} = \$ 3.5 \text{ 万元/年}$
诊断经济效益系数	$C = B/A = 36$

日本资料报道, 实施故障诊断后, 事故率可减少 75%, 维修费用可降低 25—50%. 英国报道, 对 2000 个大型工厂调查表明, 采用诊断技术后每年节省维修费用 3 亿英镑, 而用于故障诊断系统的成本为 0.5 亿英镑, 收益为投入的 6 倍, 净获益达 2.5 亿英镑/年.

(2) 对生产单位, 配置故障诊断系统将能延长设备检修周期, 缩短维修时间, 为制定合理的检测维修制度提供基础, 极大地提高经济效益.

例如石化系统的 30 万吨合成氨厂, 过去每年需大修一次, 需时 45 天, 检修费用占年产值 15%. 采用故障诊断后改为三年内修二次, 一次不到 30 天, 检修费用降为年产值的 10%, 经济效益十分巨大. 又如一个装机容量 100 万千瓦的电厂, 每天发电 2400 万千瓦时, 产值几百万元, 如对各台机组都能延长维修周期, 每年缩短检修时间以 10 天计, 则带来的经济效益可达几千万元之巨. 许多实例都说明实施故障诊断的经济效益是显著的^[14, 1].

(3) 宏观上从全社会生产的角度看, 花费的设备维修费用是一笔巨大的数目, 而实施故障诊断带来的经济效益是巨大的.

例如美国 1980 年税收总额为 7500 亿美元, 而花费在工业设备维修上的费用达到 2460 亿美元. 根据专家分析, 在这 2460 亿美元中, 有将近三分之一, 即 750 亿美元是浪费掉的, 是由于不恰当的维修方法, 包括缺乏正确的状态监测和故障诊断所造成的.

我国的情况是, 1987 年我国国营工交企业有 40 万个以上, 总固定资产约 7000 亿元, 每年用于设备大修、小修及处理故障的费用一般占固定资产原值的 3—5%. 采用诊断技术改善设备维修方式和方法后, 一年取得的经济效益可达数百亿元.

从上面的分析可以看出, 设备故障诊断技术在保证设备的安全可靠运行, 以及获取很大的经济效益和社会效益上, 其意义是十分明显的.

0.1.3 设备故障诊断的任务

设备故障诊断的任务是监视设备的状态,判断其是否正常;预测和诊断设备的故障并消除故障;指导设备的管理和维修。

1. 状态监测

状态监测的任务是了解和掌握设备的运行状态,包括采用各种检测、测量、监视、分析和判别方法,结合系统的历史和现状,考虑环境因素,对设备运行状态进行评估,判断其处于正常或非正常状态,并对状态进行显示和记录,对异常状态作出报警,以便运行人员及时加以处理,并为设备的故障分析、性能评估、合理使用和安全生产工作提供信息和准备基础数据。

通常设备的状态可分为正常状态,异常状态和故障状态几种情况。正常状态指设备的整体或其局部没有缺陷,或虽有缺陷但其性能仍在允许的限度以内。异常状态指缺陷已有一定程度的扩展,使设备状态信号发生一定程度的变化,设备性能已劣化,但仍能维持工作,此时应注意设备性能的发展趋势,即设备应在监护下运行。故障状态则是指设备性能指标已有大的下降,设备已不能维持正常工作。设备的故障状态尚有严重程度之分,包括已有故障萌生并有进一步发展趋势的早期故障;程度尚不很重,设备尚可勉强“带病”运行的一般功能性故障;已发展到设备不能运行必须停机的严重故障;已导致灾难性事故的破坏性故障,以及由于某种原因瞬间发生的突发性紧急故障等。对应不同的故障,应有相应的报警信号,一般用指示灯光的颜色示性,绿灯表示正常,黄灯表示预警,红灯表示报警。对设备状态演变的过程均应有记录,包括对灾难性破坏事故的状态信号的存储、记忆功能,俗称“黑匣子”记录,以利事后分析事故原因。

2. 故障诊断

故障诊断的任务是根据状态监测所获得的信息,结合已知的结构特性和参数以及环境条件,结合该设备的运行历史(包括运行记录和曾发生过的故障及维修记录等),对设备可能要发生的或已经发生的故障进行预报和分析、判断,确定故障的性质、类别、程度、原因、部位,指出故障发生和发展的趋势及其后果,提出控制故障继续发展和消除故障的调整、维修、治理的对策措施,并加以实施,最终使设备复原到正常状态。

设备上不同部位、不同类型的故障,引起设备功能的不同变化,导致设备整体及各部位状态和运行参数的不同变化。故障诊断的任务,就是当设备上某一部位出现某种故障时,要从这些状态及其参数的变化推断出导致这些变化的故障及其所在部位。由于状态参数的数量浩大,必须找出其中的特征信息,提取特征量,才便于对故障进行诊断。由某一故障引起的设备状态的变化称为故障的征兆(Sympton)。故障诊断的过程就是从已知征兆判定设备上存在的故障的类型及其所在部位的过程。因此故障诊断的方法实质上是一种状态识别方法。

故障诊断的困难在于:一般来说,故障和征兆之间不存在简单的一一对应的关系:一种故障可能对应多种征兆,而一种征兆也可能对应着多种故障。例如旋转机械转子的不平衡故障引起振动增大,其中相应于转速的工频分量占主要成分,是其主要征兆,同时还存在一系列其他征兆。反过来工频分量占主要成分这一征兆不只是不平衡的独特征兆,还有许多其他故障也都对应这一征兆。这就为故障诊断增加了难度。因此通常故障诊断有

一个反复试验的过程:先按已知信息提取征兆,进行诊断,得出初步结论,提出处理对策,对设备进行调整和试验,甚至停机维修,再启机进行验证,检查设备是否已恢复正常.如尚未恢复,则需补充新的信息,进行新一轮的诊断和提出处理对策,直至状态恢复正常.

3. 指导设备的管理维修:

第二章将要讲到,设备的管理和维修方式的发展经历了三个阶段,即早期的事后维修方式(Run-to-Breakdown Maintenance),发展到定期预防维修方式(Time-based Preventive Maintenance),现在正向视情维修(Condition-based Maintenance)发展.定期维修制度可以预防事故的发生,但可能出现过剩维修或不足维修的弊病.视情维修是一种更科学、更合理的维修方式.但要能做到视情维修,其条件是有赖于完善的状态监测和故障诊断技术的发展和实施.这也是国内外近年来对故障诊断技术如此重视的一个原因.随着我国故障诊断技术的进一步发展和实施,我国的设备管理、维修工作将上到一个新的水平,我国工业生产的设备完好率将会进一步提高,恶性事故将会进一步得到控制,我国的经济建设将会得到更健康的发展.

0.2 设备故障诊断技术的发展概况

对设备的故障诊断,实际上自有工业生产以来就已存在.早期人们依据对设备的触摸,对声音、振动等状态特征的感受,凭借工匠的经验,可以判断某些故障的存在,并提出修复的措施.例如有经验的工人常利用听棒来判断旋转机械轴承及转子的状态.但是故障诊断技术作为一门学科,则是本世纪 60 年代以后才发展起来的.

对设备故障诊断技术的发展情况,已有不少文献进行了回顾和综述^[14,1].最早开展故障诊断技术研究的大概是美国.美国 1961 年开始执行阿波罗计划后出现了一系列设备故障,促使 1967 年在美国宇航局(NASA)倡导下,由美国海军研究室(ONR)主持美国机械故障预防小组(MFPG),积极从事故障诊断技术的研究和开发.1971 年 MFPG 划归美国国家标准局(NSB)领导,成为一个官方领导的组织,下设故障机理研究、检测、诊断和预测技术、可靠性设计和材料耐久性评价四个小组,平均每年召开两次会议,至今已召开 40 次会议.美国机械工程师学会(ASME)领导下的锅炉压力容器监测中心(NBBI)对锅炉压力容器和管道等设备的诊断技术作了大量的研究,制订了一系列有关静态设备设计、制造、试验和故障诊断及预防的标准规程,目前正在研究推行设备的声发射(Acoustic Emission)诊断技术.其他如 Johns Mitchel 公司的超低温水泵和空压机监测技术, SPIRE 公司的用于军用机械的轴与轴承诊断技术, TEDECO 公司的润滑油分析诊断技术等都在国际上具有特色.在航空运输方面,美国在可靠性维修管理的基础上,大规模地对飞机进行状态监测,发展了应用计算机的飞行器数据综合系统(AIDS),利用大量飞行中的信息来分析飞机各部位的故障原因并能发出消除故障的命令.这些技术已普遍用于波音 747 和 DC9 这一类巨型客机,大大提高了飞行的安全性.据统计,世界班机的每亿旅客公里的死亡率已从 60 年代的 0.6 左右下降到 70 年代的 0.2 左右.在旋转机械故障诊断方面,首推美国西屋公司,从 1976 年开始研制,到 1990 年已发展成网络化的汽轮发电机组智能化故障诊断专家系统,其三套人工智能诊断软件(汽轮机 TurbinAID,发电机

GenAID,水化学 ChemAID)共有诊断规则近一万条,已对西屋公司所产机组的安全运行发挥了巨大的作用,取得了很大的经济效益^[66-71].还有以 Bentley Nevada 公司的 DDM 系统和 ADRE 系统为代表的多种机组在线监测诊断系统等.

英国在 60 年代末 70 年代初,以 R.A.Collacott 为首的英国机械保健中心(U. K. Mechanical Health Monitoring Center)开始诊断技术的开发研究^[1].1982 年曼彻斯特大学成立了沃福森工业维修公司(WIMU),还有 Michael Neale and Associte 公司等几家公司,担任政府的顾问、协调和教育工作,开展了咨询、制定规划、合同研究、业务诊断、研制诊断仪器、研制监测装置、开发信号处理技术、教育培训、故障分析、应力分析等业务活动.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,包括利用噪声分析对炉体进行监测,以及对锅炉、压力容器、管道的无损检测等,起到了英国故障数据中心的作用.在钢铁和电力工业方面英国也有相应机构提供诊断技术服务.

设备诊断技术在欧洲其他一些国家也有很大进展,它们在广度上虽不大,但都在某一方面具有特色或占领先地位,如瑞典的 SPM 轴承监测技术,挪威的船舶诊断技术,丹麦的振动和声发射技术,等等.

日本的情况:如果说美国在航空、核工业以及军事部门中诊断技术占有领先地位,那么日本在某些民用工业,如钢铁、化工、铁路等部门发展得很快,占有某种优势.他们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,研制自己的诊断仪器.例如 1970 年英国提出了设备综合工程学后,日本设备工程师协会紧接着在 1971 年开始发展自己的 TPM(全员生产维修),并每年向欧美派遣“设备综合工程学调查团”,了解诊断技术的开发研究工作,经过 6 年于 1976 年基本达到实用阶段.日本机械维修学会、计测自动控制学会、电气学会、机械学会也相继设立了自己的专门研究机构.国立研究机构中,机械技术研究所和船舶技术研究所重点研究机械基础件的诊断技术.东京大学、东京工业大学、京都大学、早稻田大学等高等学校着重基础性理论研究.其他民办企业,如三菱重工、川崎重工、日立制作所、东京芝浦电气等以企业内部工作为中心开展应用水平较高的实用项目.例如三菱重工的白木万博在旋转机械故障诊断方面开展了系统的工作,他所研制的“机械保健系统”在汽轮发电机组故障监测和诊断方面已起到了有效的作用^[3].

我国于 1983 年由原国家经委发布了《国营工业交通设备管理试行条例》,1987 年国务院正式颁布了《全民所有制工业交通企业设备管理条例》,规定:“企业应当积极采用先进的设备管理方法和维修技术,采用以设备状态监测为基础的设备维修方法”,其后冶金、机械、核工业等部门还分别提出了具体实施要求,使我国故障诊断技术的研究和应用在全国普遍展开.自 1985 年以来,由中国设备管理协会设备诊断技术委员会、中国振动工程学会机械故障诊断分会和中国机械工程学会设备维修分会分别组织的全国性故障诊断学术会议已先后召开十余次,极大地推动了我国故障诊断技术的发展.现在全国已有数十个单位开展设备故障诊断技术的研究工作.全国各行业都很重视在关键设备上装备故障诊断系统,特别是智能化的故障诊断专家系统,其中突出的有电力系统,石化系统,冶金系统,以及高科技产业中的核动力电站,航空部门和载人航天工程等.工作比较集中的是大型旋转机械故障诊断系统,已经开发了 20 种以上的机组故障诊断系统和十余