



石油高等院校特色规划教材

机械设备故障诊断技术及应用

王江萍 主编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色规划教材

机械设备故障诊断技术及应用

王江萍 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面、系统地论述了机械设备故障诊断原理和技术。本书共十章,第一章至第六章主要叙述了机械设备故障诊断技术的基本概念、机械故障诊断中信号分析与处理、机械物理信号建模方法及时序模型在机械设备故障诊断中的应用、设备状态识别原理和常用方法,以及智能故障诊断技术等;第七章至第十章讨论各类机械设备故障分析与诊断方法,包括机械设备的油样分析技术,旋转机械、往复机械、滚动轴承和滑动轴承、齿轮等传动零部件等的故障机理分析与诊断技术。

本书可作为高等院校机械工程及相关专业的本科、研究生教学用书,也可供机械工程及设备维护管理方面工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械设备故障诊断技术及应用/王江萍主编. —北京:石油工业出版社,2017.6

石油高等院校特色规划教材

ISBN 978—7—5183—1859—9

I. ①机… II. ①王… III. ①石油机械—故障诊断—高等学校—教材 IV. ①TE9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 070692 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523693

图书营销中心:(010)64523633 (010)64523731

经 销:全国新华书店

排 版:北京市密东科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:19.25

字数:490 千字

定价:39.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

机械设备故障诊断技术是一门多学科相互渗透、相互交叉、生命力旺盛的综合学科,它已经成为保证生产系统安全稳定运行、提高产品质量的重要手段和关键技术。近年来,现代检测技术、信息技术、计算机技术等快速发展,为机械设备故障诊断技术提供了先进的、多样化的技术手段,使之不断地完善和充实。

本教材是编者根据多年科研、教学实践和故障诊断技术的发展情况,参考大量相关资料,取长补短、优化组合,编著的一本适用于机械类专业教学用书。

本书具有如下特点:

(1)本书的内容比较完整,着重阐明故障诊断的原理和方法,反映故障诊断技术的最新发展,如机械设备故障诊断中的信号分析与处理、机械设备故障诊断的时序模型分析方法、状态识别与判决方法原理和智能故障诊断技术等。

(2)注重各种诊断方法的具体实现及其应用。不管是基本诊断方法还是智能诊断技术,均给出了大量的诊断实例,并详细介绍了主要机械设备的故障机理与诊断技术。本书具有较高的实用价值。

(3)适应范围广。本书根据需求,既可用于机械类专业本科生、研究生教学,也可作为工程技术相关人员的参考书。

(4)本书所提供的数据和图表,部分是编者在实验室及工程实践中的研究成果,有些采用参考文献中的结果,主要是为了说明方法原理和基本规律。

本书由王江萍、薛继军、邵军、曹银萍共同完成,王江萍任主编。其中第一章、第二章及第六章第一、二、四、五节由王江萍执笔,第三、八、九、十章由薛继军执笔,第四章及第六章第三节由曹银萍执笔,第五、七章由邵军执笔。全书由王江萍整理定稿。

本书的编写得到了石油工业出版社“石油教材出版基金”的立项资助,在编写过程中得到了西安石油大学教务处和机械工程学院有关老师及研究生的支持和帮助;同时,本书参考或引用了许多学者的资料,在此一并致以诚恳的感谢。

本书错误与不妥之处在所难免,编者恳请读者批评指正,以利于编者的提高。

编 者

2016 年 11 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 机械设备故障诊断的意义	1
第二节 机械设备故障诊断的内容	3
第三节 机械设备运行状态监测与诊断信息获取	5
第四节 机械设备故障诊断的主要理论和方法	7
第五节 机械设备故障诊断技术的发展概况	13
习题与思考题	16
第二章 机械设备故障诊断中的信号分析与处理	17
第一节 信号的分类与定义	17
第二节 检测信号的时域特征分析	23
第三节 检测信号的频域特征分析	36
第四节 倒频谱分析	48
第五节 全息谱理论与技术	54
习题与思考题	58
第三章 机械设备故障诊断的时序模型分析方法	60
第一节 时间序列模型结构特征	60
第二节 自回归模型参数及阶次的确定	62
第三节 自回归谱的概念和应用	68
第四节 设备状态变化趋势性及预测	72
习题与思考题	79
第四章 小波分析及其应用	80
第一节 从傅里叶变换到小波变换	80
第二节 小波变换及连续小波变换	81
第三节 离散小波变换	86
第四节 小波包分解	94
习题与思考题	97
第五章 机械设备故障的模式识别诊断方法	98
第一节 主成分分析	99
第二节 贝叶斯决策理论方法	103
第三节 距离函数分类法	109
第四节 基于故障树的故障诊断方法	113
第五节 盲源分离技术与故障诊断	119
习题与思考题	127

第六章 智能故障诊断技术	128
第一节 机械设备故障诊断专家系统原理	128
第二节 基于模糊集理论的智能故障诊断技术	137
第三节 人工神经网络及其在故障诊断中的应用	153
第四节 集成智能故障诊断技术	168
第五节 信息融合智能故障诊断策略	174
习题与思考题	193
第七章 油样分析技术	195
第一节 概述	195
第二节 油样光谱分析法	196
第三节 油样铁谱分析法	200
第四节 磁塞分析法与理化分析技术	205
第五节 油样分析技术应用	207
习题与思考题	209
第八章 旋转机械振动监测与故障诊断	210
第一节 概述	210
第二节 旋转机械振动评定标准	212
第三节 旋转机械振动监测参数与分析	217
第四节 旋转机械典型故障机理和特征	224
第五节 旋转机械振动故障诊断示例	236
习题与思考题	240
第九章 往复机械的监测与故障诊断	241
第一节 概述	241
第二节 往复机械的动力性能监测	242
第三节 往复机械故障诊断的油样分析法	244
第四节 瞬时转速检测法	248
第五节 往复机械故障的振动诊断法	250
第六节 柴油机供油系统故障诊断压力波形分析法	255
习题与思考题	256
第十章 典型传动部件的故障及其诊断方法	258
第一节 滚动轴承的故障及其诊断方法	258
第二节 滑动轴承的故障及其诊断方法	271
第三节 齿轮的故障及其诊断方法	279
习题与思考题	296
参考文献	297

第一章

绪 论

第一节 机械设备故障诊断的意义

随着科学技术与生产的高度发展,各学科相互渗透、相互交叉、相互促进,形成了机械设备故障诊断技术这一生命力旺盛的新兴学科。它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,早期发现故障及其原因,并能预报故障发展趋势的技术,它已经成为保证生产系统安全稳定运行和提高产品质量的重要手段和关键技术。

在连续生产系统中,设备和系统一旦发生故障,就会影响到整个生产系统安全稳定的运行,轻则降低系统的生产效率,重则导致系统停机、生产停顿,造成重大经济损失,甚至出现设备损坏、危及人员生命财产安全的恶性事故,造成灾难性后果。1984 年印度博帕尔农药厂的异氰酸甲酯毒气泄漏,造成 2000 多人死亡、20 多万人受害的空前大事故;1985 年美国航天飞机“挑战者号”坠毁、1986 年苏联切尔诺贝利核电站事故逸出的放射性物质污染了西欧上空、1986 年欧洲莱茵河瑞士化学工业污染事故,以及 1998 年德国高速列车轮箍踏面断裂导致翻车事故,都是设备故障造成的震惊世界的恶性事故,人们尚记忆犹新。进入 21 世纪,2002 年我国三峡工地塔带机断裂事故、2003 年美国哥伦比亚载人航天飞机失事、2005 年我国吉林化工厂设备恶性爆炸、2007 年美国空军 F15 战机空中解体事件、2008 年我国华能伊敏煤电公司 600MW 机组发生转子裂纹事故、2009 年波音 737 及空客 330 先后失事等事故令人触目惊心。准确及时识别运行过程中萌生和演变的故障,对机械系统安全运行、避免重大和灾难性事故意义重大。

重要设备因事故停机造成的经济损失极为严重。据国内石化行业统计,1976 年至 1985 年 10 年间,化肥五大机组由事故停机造成的直接经济损失达 4.5 亿多元,如 1982 年江苏某化肥厂合成氨压缩机组发生强烈振动,三次停机,损失达 1000 万元以上;一个乙烯球罐停产一天,损失产值 500 万元、利润 200 万元;一台大型化纤设备停产一小时,损失产值 80 万元。英国有人在 1984 年发表论文认为,对大型汽轮发电机组进行振动监视,获利与投资之比为 17 : 1,在英国西南地区,每台发电机组如减少 2.5% 的事故与检修损失,每年获利可达 5.5 亿英镑。这表明,采用设备诊断技术、保证设备可靠而有效地运行是极为重要的。

机械设备故障诊断技术日益获得重视与发展的另一个重要原因是能改革维修体制,大量节省维修费用。当前,国内外对机械设备主要采用计划维修或定期检修。在许多场合下,这种缺乏科学依据的维护是非常不合理的,带有一定的盲目性:不该修的修了,不仅费时花钱,甚至人为的因素造成设备工作性能降低;该修的又没修,不仅降低设备寿命,而且导致事故。据美

国家统计局统计,1980年美国在设备维修上花费了2460亿美元,而同年全国税收只有7500亿美元,据美国专家分析,在这2460亿美元中有750亿是浪费的,是不恰当的维修方法造成的。英国曾对2000家工厂调查,结果表明采用诊断技术后,每年设备维修费可节约3亿英镑。日本有资料指出,采用诊断技术后,每年设备维修费减少20%~50%,故障停机减少75%。我国的大型钢厂,每年设备维修费达2亿元至3亿元人民币。某港口有5台15吨带斗机,原规定每台每年小修停机45天,实行状态监测与维护后5台每年共停机45天,多获产值160万元人民币。某机械施工单位拥有工程机械232台,采用状态维修后,维修材料费降低30%,维修工作量降低47%。有资料表明,大量生产的发动机,其修理劳动量是制造劳动量的5~10倍。日本航空公司很早就对JT3D喷气发动机采用监控技术,使大修寿命从1200小时提高到12000小时以上,直至取消大修。大量正反事例都表明及时而正确地对各类运行中的机械设备的异常或故障作出诊断以便确定最佳维修决策、提高运营经济效益的必要性与迫切性。

机械设备故障诊断不仅对于机械设备安全运行意义重大,而且机械设备故障诊断技术的开展有助于检验相关理论的发展完善程度,寻找最佳故障诊断方法,完善机械设备故障诊断理论与技术;通过实施机械设备故障诊断,带动与故障诊断有关的一系列相关理论,如信号采集、信号分析、模式识别等相关学科的发展;同时还可为下一代机械设备的优化设计、正确制造提供反馈信息及理论依据,以保证设计出更完善更符合要求的新产品。正因为如此,机械设备故障诊断理论与技术已成为国内外的研究热点。近年来,机械设备故障诊断技术在国内外受到高度重视,许多著名研究机构分别就故障诊断前沿问题召开国际会议。设备状态监测与故障诊断国际学术会议(International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD)两年一届,由IEEE等国际性学术组织技术支持,主要针对电力系统的设备状态监测与故障诊断。世界维修大会由巴西维修协会和欧盟国家维修联合会共同倡议,并得到许多国家积极响应,每两年召开一届,由各国申请轮流主办。国际结构、材料和环境健康监测大会(HMSME)每两年在世界不同国家举办一次,是国际结构健康监测和结构控制研究领域的盛会。状态监测与诊断工程管理国际会议(Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM)是每年举行一次的国际会议,至2016年已举办29届,交流和讨论工业系统性能检测、失效模式分析、故障诊断与故障预示和主动维护等技术在近期的发展、创新、应用情况。在国内,中国振动工程学会、中国机械工程学会、中国设备管理协会等均每年召开一次故障诊断会议,中国振动工程学会故障诊断专业委员会每两年召开学术会议,旨在加强学术交流和推广成果应用。国家中长期规划(2006—2020年)和国家自然科学基金委学科发展战略研究报告(2006—2010年),均将与机械设备故障诊断相关的重大产品和重大设施运行可靠性、安全性、可维护性关键技术列为重要的研究方向。

随着基础学科和前沿学科的不断发展和交叉渗透,机械设备故障诊断学在基础理论和技术上不断创新,取得了令人瞩目的成就,已初步形成比较完备的科学体系。研究开发有效的早期故障诊断技术、定量故障诊断程度并预测其扩展趋势和剩余寿命,保证各类机械设备无故障、安全可靠地运行,以便发挥其最大的设计能力和使用有效性,具有重要的科学理论意义和工程应用价值。

因此,机械设备故障诊断技术是大型机械设备稳定可靠运行的关键技术之一,也是各种自动化系统及机械系统提高运行效率及可靠性、进行预知维修及科学管理的重要基础。

第二节 机械设备故障诊断的内容

“诊断”包括两方面内容:“诊”是对设备客观状态作检测;“断”则是确定故障的性质、故障的程度、故障的部位,说明故障产生的原因,提出对策等。所谓故障,是指设备丧失其规定的功能。显然,故障不等于失效,更不等于损坏。失效与损坏是严重的故障。

从机械设备故障诊断技术的起源与发展来看,状态监测和故障诊断的目的应是“保证可靠地、高效地发挥设备应有的功能”。这包含了三点:一是保证设备无故障,工作可靠,这需要及时、正确地对机械各种异常状态或故障状态作出诊断,预防或消除故障,提高机械运行的可靠性、安全性和有效性,将机械设备故障的损失降低到最低水平;二是保证物尽其用,设备要发挥其最大的效益,制定合理的检测维修制度,充分挖掘机械潜力,延长机械服役期和使用寿命,降低其全寿命周期费用;三是保证设备在将有故障或已有故障能及时诊断出来,正确地加以维修,以减少维修时间、提高维修质量、节约维修费用,应使重要的设备能按其状态进行维修(即视情维修或预知维修),改革目前按时维修的体制。应指出,机械设备故障诊断技术应为设备维修服务,视为设备维修技术的内容,但它决不仅限于为设备维修服务,正如前两点所示,它还应保证设备能处于最佳的运行状态,这意味着通过检测监视、故障分析、性能评估等,为机械结构修改、优化设计、合理制造及生产过程提供有效的数据和信息。例如,它应能保证动力设备具有良好的抗振、消振、减振能力,具有良好的出力能力等。

与机械设备故障诊断技术的目的相对应,它最根本的任务是通过测取设备的信息来识别设备的状态,因为只有识别了设备的有关状态,才有可能达到设备诊断的目的。概括起来,正如对人体进行诊断一样,一是预防与保健,二是看病与处置。对于设备的诊断,一是防患于未然,早期诊断;二是诊断故障,采取措施。具体讲,机械设备故障诊断应包括以下五方面内容。

一、正确选择与测取设备有关状态的特征信号

显然,所测取的信号应该包含设备有关状态的信息。例如,诊断起重机桁架有无裂纹决不能靠测取桁架各点温度来判定,因温度信号中不包含裂纹有无的信息,而测取桁架的振动信号则可达到目的,因为振动信号中包含了结构有无裂纹的信息。这种信号可称为特征信号。

二、正确地从特征信号中提取设备有关状态的有用信息

一般来讲,从特征信号来直接判明设备状态的有关情况,查明故障的有无,是比较难的。一般难于从结构的振动信号直接判明结构有无裂纹,还需要根据振动理论、信号分析理论、控制理论等提供的理论与方法,加上试验研究,对特征信号加以处理,提取有用的信息(称为征兆),才有可能判明设备的有关状态。例如,理论分析与试验研究表明,从振动信号中计算出的固有频率这一征兆固然可用,但对结构有无裂纹产生并不敏感,而计算出的频率特性(或称频响函数)却存在着十分敏感的频带,因此,以频率特性作为征兆则更为合适。

征兆,可以是结构的物理参数(如质量、刚度等)、结构的模态参数(如固有频率、模态阻尼、模型等),可以是设备的工作特征(如耗油率、工作转速、功率等),可以是信号的统计特性(如均值、方差、自功率谱等),也可以是由信号中得出的其他特征量(如自回归模型参数等)。

三、根据征兆正确地进行设备的状态诊断

一般来讲,还不能直接采用征兆来进行设备的故障诊断、识别设备的状态。这时,可以采用多种模式识别理论与方法,对征兆加以处理,构成判别准则,进行状态的识别与分类。例如,对发动机的正常状态、阀撞击状态与连杆撞击状态,在测取振动信号、采用时序方法加以处理、建立自回归模型、将自回归参数与残差方差作为征兆后,可用此征兆构成 Kullback-Lieber 信息距离这一判别准则,来识别发动机所处的状态。显然,状态诊断这一步是设备诊断重点之所在。当然,这决不表明设备诊断的成败只取决于状态诊断这一步,特征信号与征兆的获取正确与否,应该是能否进行正确的状态诊断的前提。

四、根据征兆与状态正确地进行设备的状态分析

当状态为有故障时,则应采用有关方法进一步分析故障位置、类型、性质、原因与趋势等。例如,故障树分析是分析故障原因的一种有效方法,当然,故障的原因往往是次一级的故障;如轴承烧坏是故障,其原因是输油管不输油,不输油是因油管堵塞,后者是因滤油器失效,等等,这些原因就可称为第二、三、四级故障。正因为故障的原因可能是次级故障,从而有关的状态诊断方法也可用于状态分析。当状态为无故障时,则可用 kalman 滤波、时序模型等方法进一步分析状态趋势,预计未来情况。

五、根据状态分析正确地作出决策

干预设备及其工作进程,以保证设备可靠、高效地发挥其应有功能,达到设备诊断的目的。所谓干预,包括人为干预和自动干预,即包括调整、修理、控制、自诊断等等。

应当指出,实际上往往不能直接识别设备的状态,因此事先要建立同状态一一对应的基准模式,由征兆所做出的判别准则,此时是同基准模式相联系来对状态进行识别与分类的。将上述设备诊断内容加以概括,可得到如图 1-1 所示的机械设备故障诊断过程框图。

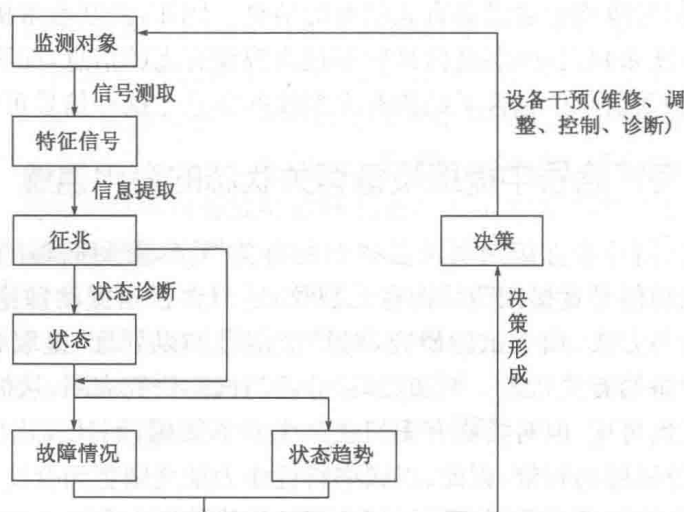


图 1-1 机械设备故障诊断过程框图

从系统分析观点出发,工况监测与故障诊断可以理解为识别机械设备运行状态的科学,即利用检测方法和监视诊断手段,从所检测的信息特征判别系统的工况状态,分析故障形成原因和发展趋势,以防患于未然。工况监测与故障诊断的最终目的是保证机械系统运行的可靠性,提高设备使用效率和产品质量。一般所谓工况监测实际上是状态监视,故障是设备的异常状态;因此,工况监测是故障诊断(亦即设备诊断)的基础。设备诊断过程可以说是设备的工况监控、分析与干预过程。

第三节 机械设备运行状态监测与诊断信息获取

机械设备故障一般发生在机械设备系统的内部,而诊断是在机械设备系统不拆卸的情况下进行的,所以机械设备系统的内部故障反映到机械设备外部的信息,为人们提供了判断或识别机械设备运行状态的重要依据。机械设备状态信号是机械设备异常或故障信息的载体,也就是说,系统故障信息通常来自于设备运行中的各种参数变化。可作为设备监测与诊断的信息参数多种多样,如振动、声音、变形、位移、应力、磨损、温度、压力、流量、转矩、功率等,充分地检测足够量的、能反映设备状态的信号参数对诊断来说至关重要。设备状态监测与诊断信息获取方法很多,常见的方法主要有以下几种。

一、振动信号监测技术

振动信号中包含有丰富的机械运行状态信息。机器设计是否合理、零部件是否存在缺陷、制造和安装质量是否符合要求等诸多原因产生的故障,均可在振动信号中反映出来。据统计,由各种原因引起的机械振动故障率达60%以上,利用振动信号诊断故障已成为当前各种监测技术中的主要方法。根据检测的振动信号,可采用以下方法对机器状态进行诊断:

(1)振动法:对机器主要部位的振动值如位移、速度、加速度、转速及相位值等进行测定,与标准值进行比较,据此可以宏观地对机器的运行状况进行评定,这是最常用的方法。

(2)特征分析法:对测得的上述振动量在时域、频域、时—频域进行特征分析,用以确定机器各种故障的内容和性质。

(3)模态分析与参数识别法:利用测得的振动参数对机器零部件的模态参数进行识别,以确定故障的原因和部位。

(4)冲击能量与冲击脉冲测定法:利用共振解调技术以测定滚动轴承的故障。

二、噪声信号监测技术

噪声监测与分析通常有两个目的:一是寻找机器发出噪声的主要声源,以便采取相应措施降低噪声;二是利用噪声信号可以了解机器运行情况并判断故障。

(1)声音监听法:利用听棒或设备听诊器监听机器内部的振动噪声,判断机器运转是否正常,内部零件有否损坏,设备和管道内有无流体冲击、脉动和泄漏。

(2)频谱分析法:与振动诊断相类似,可以从噪声的频谱中找出与机械系统工作特性有关的频率分量。

(3)声强法:声强是单位时间内声波通过垂直与传播方向单位面积上的声能,根据各点所

测声强值的大小和正负值,可判断机器各部分发射噪声的大小和方向。

三、无损检测技术

无损检测技术是在不破坏材料表面和内部结构的情况下检测机械结构缺陷。材料裂纹及缺陷损伤一般可采用下述方法进行检测:

(1)超声波探伤法:成本低,可测厚度大,速度快,对人体无害,主要用来检测平面型缺陷。

(2)射线探伤法:主要采用 X 射线和 γ 射线,主要用于展示体积型缺陷,适用于一切材料,测量成本较高,对人体有一定损害,使用时应注意。

(3)渗透探伤法:主要有荧光渗透与着色渗透两种,操作简单,成本低,应用范围广,可直观显示,但仅适用于有表面缺陷的损伤类型。

(4)磁粉探伤法:使用简便,较渗透探伤法更灵敏,能探测近表面的缺陷,但仅适用于铁磁性材料。

(5)涡流探伤法:对封闭在材料表面下的缺陷有较高的检测灵敏度,属于电学测量方法,容易实现自动化和计算机处理。

(6)激光全息检测法:它是 20 世纪 60 年代发展起来的一种技术,可检测各种蜂窝结构、叠层结构、高压容器等。

(7)微波检测技术:它也是近几十年来发展起来的一种新技术,对非金属的贯穿能力远大于超声波方法,其特点是快速、简便,是一种非接触式的无损检测。

(8)声发射技术:主要对大型构件结构的完整性进行监测和评价,对缺陷的增长可实行动态、实时监测,且检测灵敏度高,目前在压力容器、核电站重点设备及放射性物质泄漏、输送管道焊接部位缺陷等方面的检测获得了广泛的应用。

四、设备零部件材料的磨损及腐蚀检测

这类故障除采用上述无损检测中的超声探伤法外尚可用下列方法:

(1)光纤内窥技术:利用特制的光纤内窥探测器直接观测材料表面磨损及腐蚀情况。

(2)油液分析技术:可分为两大类,一类是油液本身的物理、化学性能分析,另一类是对油液污染程度的分析,根据磨损残渣在润滑油中含量及颗粒分布可以判断机器的磨损部位、程度和性质,并可预防机器故障的发生,具体的方法有光谱分析法与铁谱分析法。

五、温度、压力、流量变化引起的故障检测

机器设备系统的有些故障往往反映在一些工艺参数如温度、压力、流量的变化中,在温度测量中常使用装在机器上的热电阻、热电偶等接触式测温仪,监测机体、管道、轴承、润滑油和工作介质的温度变化,用于了解设备或零部件摩擦面是否磨损,轴承与轴颈的装配间隙是否过小,轴承润滑是否正常,高温设备和管道保温隔热是否良好,以及流体介质的热交换情况和物料反应是否正常等。目前在一些特殊场合使用的非接触式测温方法有红外测温仪和辐射温度计等,它们都是依靠物体的热辐射进行测量,主要用于高温物料或金属的非接触温度测量。例如,测量加热炉和蒸汽管道及周围的温度,可以了解保温情况的好坏,检查是否发生泄漏或堵塞;测量高压输电线路和变电站接头、开关、变压器及大型发电机铁芯的温度和温度分布,可预知潜在故障和缺陷位置;对旋转机器和铁路车辆轴承进行温度检测,可以及早排除其中的隐

患;尤其是化工装置,工艺流程复杂、设备众多、温度高低相差很大,需大面积测量多种设备的表面温度,红外测温技术提供了非常理想的无损检测手段。

以机械系统中的气体、液体的压力、流量作为信息源,在机器运行过程中通过压力与流量参数的变化特征来监测机器的运行状态。例如,可根据轴瓦下部油压变化了解转子对中情况。

六、设备性能指标的测定

机械设备的性能指标反映了机械设备的工作状态和工作性能,可用来判断机械设备的故障。设备性能包括整机性能及零部件性能。通过测量机器性能及输入与输出之间的关系的变化信息来判断机器的工作状态也是一种重要方法。例如,柴油机耗油量与功率的变化、泵的扬程的变化、机床加工零件精度的变化,风机效率、压缩机的压力与流量的变化等,均包含着故障信息。

对机器零部件性能的测定,主要是测量关键零部件的性能,如应力、应变等。这对预测机器设备的可靠性、预报设备破坏性故障具有重要意义。

第四节 机械设备故障诊断的主要理论和方法

一、机械设备故障诊断的基本类型

(一)功能诊断和运行诊断

功能诊断是针对新安装或刚维修后的机械设备,检查它们的运行工况和功能是否正常,并根据监测和判断的结果对其进行调整,如发动机安装或修理好后的检查。功能诊断的主要目的是观察机械设备能否达到规定的功能。

运行诊断是针对正常运行中的机械设备,监测其故障的发生和发展而进行的诊断。运行诊断的目的是发现正常工作中的机械设备是否发生异常现象,以便及早发现、及时排除故障。

(二)定期诊断和连续诊断

定期诊断不同于定期维修。定期维修是每隔一定的时间间隔,不管机械的状态如何,都对机械进行维修护理,更换关键零部件。而定期诊断则是每隔一定的时间间隔对工作状态下的机械设备进行测量和诊断,诊断中发现机械设备有故障时才进行修理。

连续诊断是采用仪器及计算机信号处理系统对机械设备的运行状态进行连续的监视或检测,因此,连续诊断又称连续监测、实时监测或实时诊断。

对于一台机械设备,究竟采用哪种诊断方法主要取决于机械设备的关键程度、机械设备产生故障后对整个机械设备系统影响的严重程度、运行中机械设备性能下降的快慢、机械设备故障发生和发展的可预测性。表 1-1 列出了采用定期诊断或者连续监测的条件。

表 1-1 采用定期诊断或连续监测的条件

性能下降快慢	故障不可预测	故障可预测
快	连续监测	定期更换
慢	定期诊断	定期诊断

(三) 常规工况下诊断和特殊工况下诊断

多数诊断在机器正常工作条件下采集信号进行的,只有在个别情况下才需要创造特殊的工作条件来拾取信息。例如,动力机组的启动和停车过程,需要跨过转子扭转、弯曲的几个临界转速,利用启动和停车过程的振动信号作出的瀑布图,常包含着许多在常规诊断中所得不到的诊断信息。

(四) 在线诊断和离线诊断

在线诊断是为了保证大型、重要的设备安全和可靠运行,需要对所监测的信号自动、连续、定时的进行采集与分析,对出现的故障及时作出诊断;离线诊断是通过记录仪或数据采集器将现场的检测信号记录并储存起来,带回实验室再进行回放分析,结合诊断对象的历史档案作进一步分析和诊断。一般中小型设备往往采用离线诊断方式。

二、基于故障机理的诊断方法

故障机理是指故障发生与发展的过程和原理。在多数情况下,故障机理的外在表现形式是机器的磨损、疲劳、断裂、腐蚀以及老化等。基于故障机理的诊断方法注重从动力学的角度出发去研究故障的发生、发展机理及其出现故障之后对应的状态,它是其他各种诊断方法的基础。

故障机理研究的主要手段是实验研究、仿真模拟及理论研究。它是根据研究对象的物理特点建立相应的力学模型,通过仿真研究获得其响应特征,再结合实验修正模型,准确获得某一故障的表征,即通过理论或大量的实验分析建立反映设备故障状态信号与设备系统参数之间联系的数学模型,按该模型改变系统的参数可改变设备的系统信号。这一反复过程是故障机理及故障征兆研究的有效手段。由于通常获得某一系统较全面的故障数据样本是不现实的,故障机理研究可以揭示故障萌生和演化的一般机理,建立故障与征兆间的内在联系和映射关系,才能对系统的未知故障、弱故障具有较强的预知和识别能力,才能避免漏诊、误诊。所以,故障机理研究是机械设备故障诊断技术的重要基础和依据,对准确识别故障特征、确诊故障类型和分析故障原因都具有重要意义。

例如分析由油膜轴承支承的转子系统在转子与定子碰摩时的振动特征,模型考虑了碰撞时定子的线性变形以及摩擦时的库仑摩擦。分析表明,系统除具有各种形式的周期和准周期振动以外,还具有丰富的混沌运动、倍周期分岔和 Hopf 分岔现象。碰摩转子系统所展示的混沌运动以及所具有的各种现象,作为这类系统的显著特征,可以用于诊断汽轮发电机组中经常发生的碰摩故障和早期预测。

三、基于信号分析与处理的故障诊断方法

机械设备动态信号中,蕴含着设备状态变化和故障特征的丰富信息,信号处理则是提取故障特征信息的主要手段,而故障特征信息则是进一步诊断设备故障原因并采取防治对策的依

据。机械系统结构复杂,部件繁多,采集到的动态信号是机械各零部件的综合反映,且传递途经、环境噪声的影响增加了信号的复杂程度。如果单从时域波形上直接观察,往往很难看出设备究竟是正常还是异常,有无故障及故障的性质和部位等。为此,必须对监测到的信号进行加工处理,以便更全面、更深刻地揭示出动态信号中所包含的多种信息。在诊断过程中,首先分析设备运转中所获取的各种信号,提取信号中的各种特征信息,从中获取与故障相关的征兆,利用征兆进行故障诊断。

工程领域中的各种物理信号随时间的变化过程表现为多种形式,如简谐的、周期的、瞬态的、随机的等等。实践表明,不同类型的机械设备故障在动态信号中会表现出不同的特征波形,如旋转机械失衡振动的波形与正弦波相似;内燃机燃爆振动波形具有高斯函数包络的高频信号;齿轮、轴承等机械零部件出现剥落、裂纹等故障,往复机械的气缸、活塞、气阀磨损缺陷,它们在运行中产生冲击振动呈现接近单边振荡衰减的响应波形,而且随着损伤程度的发展,其特征波形也会发生改变。

动态信号的分析处理方法有多种,诸如时域处理、频域处理、幅值域处理、时差域处理以及传递特性分析等。近年来,广泛应用的傅里叶变换、短时傅里叶变换等可以实现频域和时域的相互转换,从而揭示出信号中某些实质性的问题。时域或频域分析只适用基于平稳或准平稳过程振动信号,而对于非平稳信号而言用时域或频域分析法则存在分辨率不足的问题,小波变换、第二代小波变换和多小波变换等时-频分析方法弥补了仅用时域或频域分析分辨率不足的问题。

四、基于模式识别的诊断理论

基于模式识别的诊断理论是在模式识别基本内容的基础上发展起来的诊断学理论。模式识别概念可以用特征空间来表示,或者用从特征空间到决策空间的匹配来表示,其主要内容包括模式向量的形成、信号的特征提取和分类器设计。特征提取就是从众多的故障征兆中选择能明确反映故障状态变化的特征,作为分类器的输入特征向量。分类的任务就是将输入的特征与分类状态相匹配。也就是说,在给定输入特征的情况下,分类器必须决定哪一种故障模式与输入模式最相匹配,这相当于将特征空间分成几个彼此相互联系的独立的区域或类别。

将模式识别理论运用到设备故障诊断过程中、建立模式向量时,应从设备特点、特征出发,选择能够反映设备状态变化特征的一些参数形成向量;信号特征提取则是从上述特征参数中提取最能反映设备故障发生、发展变化的一些参数;分类器设计是设计分类器直接用于设备的故障识别。

典型的分类方法是根据向量间距离的大小和概率理论来进行分类的。一旦特征获取方法确定下来,就可得到特征向量 $\mathbf{X}$ 。下一步就是如何设计最优化准则,以便分类器能够作出关于特征向量 $\mathbf{X}$ 属于哪个范畴的正确决策。一般通过分析很难得到最优化准则。因此,分类器要能够根据训练样本集进行学习,从而可给出合适的决策。训练集是由已知类别的特征向量组成。训练过程中,逐一向系统输入特征向量,并告知相应向量的所属类别。学习算法使用这些信息,让识别系统学会了所需要的决策准则。

五、基于人工智能的诊断方法

随着计算机技术的发展及人工智能技术的应用,故障诊断技术已进入智能化故障诊断阶段。智能化故障诊断主要体现在诊断过程中领域专家知识和人工智能技术的运用,它是一个

由人(尤其是领域专家)、能模拟脑功能的硬件及其必要的外部设备、支持这些硬件的软件所组成的系统,是人工智能和故障诊断相结合的产物。智能化故障诊断以人类思维信息加工和认识过程为推理基础,通过有效地获取、传递、处理、再生和利用诊断信息及多种诊断方法,能够模拟人类专家,以灵活的诊断策略对监控对象的运行状态和故障作出正确判断和决策。

(一)基于故障树的分析方法

故障树分析法是一种将系统故障形成的原因由整体至局部按树枝状逐渐细化的分析方法,是对机械零部件失效形式进行可靠性分析的工具,可判别系统的基本故障,确定故障的原因、影响和发生概率。故障树分析法可对机械设备(系统)进行预测和诊断,分析系统的薄弱环节和系统的最优化等。

故障树分析法就是把所有研究系统最不希望发生的故障状态作为故障分析的目标,然后寻找直接导致这一故障发生的全部因素,再找出造成下一级事件全部直接因素,一直追查到那些最原始的、其故障机理或概率分布都是已知的而无须再深究的因素为止。通常把最不希望发生的事件称为顶事件,无须再研究的事件称为底事件,介于顶事件与底事件之间的一切事件为中间事件,用相应的符号代表这些事件,再用适当的逻辑门把顶事件、中间事件和底事件连接成树形图。这样的树形图称为故障树,用以表示系统或设备的特定条件(不希望发生的事件)与它的各个子系统或各个部件故障事件之间的逻辑结构关系。以故障树为工具,分析系统发生故障的各种途径,计算各个可靠性特征量,对系统的安全性和可靠性进行评价的方法称为故障树分析法。

(二)基于模糊理论的诊断方法

故障诊断是通过研究故障与征兆之间的关系来判断设备的状态。由于实际因素的复杂性,故障与征兆之间的关系很难用精确数学模型来表示。就像客观世界中一方面存在一些精确的概念和现象,但另一方面也存在许多模糊的概念和现象。因为这些概念的外延没有明显的边界,所以它们难以用经典的二值或多逻辑来描述。在故障诊断中,“故障”状态与“正常”状态之间也没有完全确定的界限,它们之间存在着一些模糊的过渡状态。无论是现象的获取、现象到故障的推理,还是诊断的基本原理,这三个方面都存在着模糊性,因此可以采用模糊理论方法来进行故障诊断。模糊诊断方法利用模糊集合论中的隶属函数和模糊关系矩阵的概念来解决故障与征兆间的不确定关系,进而实现故障的早期预报和精密诊断。这种方法计算简单,应用方便,结论明确直观,但难以进行趋势分析。

应该指出的是,基于模糊理论的模糊逻辑本身并不模糊,而是用来对“模糊”进行处理以达到消除模糊的逻辑。事实上,模糊逻辑本身也是一种精确的方法,只是其处理的对象是一些不精确、不完全的信息。许多故障诊断问题最终都可以归结为模式识别的问题,基于模糊理论的故障诊断方法实质上也是一种模式识别问题,根据所提出的征兆信息来识别系统的状态是诊断过程的核心。

模糊理论提供了一种与人类似的可以用直觉进行表达和推理的方法,用这种方法可以有效地处理故障诊断与预测中遇到的不完整、不精确的信息。实际应用中,基于模糊理论的诊断方法可以和其他智能诊断方法相结合使用,如与规则、模型和案例的方法结合,可以取得更好的效果。