

普通高等教育“十五”国家级规划教材

设备故障诊断

沈庆根 郑水英 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

设备故障诊断/沈庆根, 郑水英主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 11
普通高等教育“十五”国家级规划教材
ISBN 7-5025-7878-1

I. 设… II. ①沈…②郑… III. 设备-故障诊断-高等学校-教材 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 133281 号

普通高等教育“十五”国家级规划教材
设备故障诊断

沈庆根 郑水英 主编
责任编辑: 程树珍
责任校对: 宋 玮
封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印刷
三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×960mm 1/16 印张 24 字数 517 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7878-1

定 价: 39.80 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

过程装备与控制工程学科的研究方向、趋势和前沿 代 序

人类的主要特点是能制造工具，富兰克林曾把人定义为制造工具的动物。通过制造和使用工具，人把自然物变成他们的活动器官，从而延伸了他们的肢体和感官。人们制造和使用工具，有目的、有计划地改造自然、变革自然，才有了名副其实的生产劳动。

现代人越来越依赖高度机械化、自动化和智能化的产业来创造财富，因此必然要创造出现代化的工业装备和控制系统来满足生产的需要。流程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济支柱产业之一，必然要求越来越高度机械化、自动化和智能化的过程装备与控制工程。如果说制造工具是原始人与动物区别的最主要标志，那么就可以说，现代过程装备与控制系统是现代人类文明的最主要标志。

工程是人类将现有状态改造成所需状态的实践活动，而工程科学是关于工程实践的科学基础。现代工程科学是自然科学和工程技术的桥梁。工程科学具有宽广的研究领域和学科分支，如机械工程科学、化学工程科学、材料工程科学、信息工程科学、控制工程科学、能源工程科学、冶金工程科学、建筑与土木工程科学、水利工程科学、采矿工程科学和电子/电气工程科学等。

现代过程装备与控制工程是工程科学的一个分支，严格地讲它并不能完全归属于上述任何一个研究领域或学科。它是机械、化学、电、能源、信息、材料工程乃至医学、系统学等学科的交叉学科，是在多个大学科发展的基础上交叉、融合而出现的新兴学科分支，也是生产需求牵引、工程科技发展的必然产物。显而易见，过程装备与控制工程学科具有强大的生命力和广阔的发展前景。

学科交叉、融合和用信息化改造传统的“化工设备与机械”学科产生了过程装备与控制工程学科。化工设备与机械专业是在建国初期向前苏联学习，在我国几所高校首先设立后发展起来的，半个世纪以来，毕业生几乎一直供不应求，为我国社会主义建设输送了大批优秀工程科技人才。1998年3月教育部应上届教学指导委员会建议正式批准建立了“过程装备与控制工程”学科。这一学科在美欧等国家本科和研究生专业目录上是没的，在我国已有60多所高校开设这一专业，是适合我国国情，具有中国特色的一门新兴交叉学科。其主要特点如下。

(1) 过程装备 与生产工艺即加工流程性材料紧密结合，有其独特的过程单元设备和工程技术，如混合工程、反应工程、分离工程及其设备等，与一般机械设备完全不同，有其独特之处。

(2) 控制工程 对过程装备及其系统的状态和工况进行监测、控制，以确保生产工艺有

序稳定运行，提高过程装备的可靠度和功能可利用度。

(3) 过程装备与控制工程 是指机、电、仪一体化连续的复杂系统，它需要长周期稳定运行；并且系统中的各组成部分（机泵、过程单元设备、管道、阀、监测仪表、计算机系统）均互相关联、互相作用和互相制约，任何一点发生故障都会影响整个系统；又由于加工的过程材料有些易燃易爆、有毒或是加工要在高温、高压下进行，系统的安全可靠性十分重要。

过程装备与控制工程的上述特点就决定了其学科研究的领域十分宽广，一是要以机电工程为主并与工艺过程密切结合，创新单元工艺装备；二是与信息技术和知识工程密切结合，实现智能监控和机电一体化；三是不仅研究单一的设备和机器，而且更主要的是要研究与过程生产融为一体的机、电、仪连续复杂系统，在工程上就是要设计建造过程工业大型成套装备。因此，要密切关注其他学科的新的发展动向，博采众长、集成创新，把诸多学科最新研究成果之他山之石为我所用；同时要以现代系统论（Systemics）和耗散结构理论为指导，研究本学科过程装备与控制工程复杂系统独特的工程理论，不断创新和发展过程装备与控制工程学科是我们的重要研究方向。

我国科技部和国家自然科学基金委员会在 21 世纪初发表了《中国基础学科发展报告》，其中分析了世界工程科学研究的发展趋势和前沿，这也为过程装备与控制工程学科的发展指明了方向，值得借鉴和参考。

(1) 全生命周期的设计/制造正成为研究的重要发展趋势。由过去单纯考虑正常使用的设计，前后延伸到考虑建造、生产、使用、维修、废弃、回收和再利用在内的全生命周期的综合决策。

过程装备的监测与诊断工程、绿色再制造工程和装备的全寿命周期费用分析、安全和风险评估等正在流程工业开始得到应用。工程科技界已开始移植和借鉴现代医学与疾病作斗争的理论和方法，去研究过程装备故障自愈调控（Fault Self-recovering Regulation），探讨装备医工程（Plant Medical Engineering）理论。

(2) 工程科学的研究尺度向两极延伸。过程装备的大型化是多年发展方向，近年来又有向小型化集成化的趋势。

(3) 广泛的学科交叉、融合，推动了工程科学不断深入、不断精细化，同时也提出了更高的前沿科学问题，尤其是计算机科学和信息技术的发展冲击着每个工程科学领域，影响着学科的基础格局。过程装备与控制工程学科的发展也必须依靠学科交叉和信息化，改变传统的生产观念和 production 模式，过程装备复杂系统的监控一体化和数字化是发展的必然趋势。

(4) 产品的个性化、多样化和标准化已经成为工程领域竞争力的标志，要求产品更精细、灵巧并满足特殊的功能要求。产品创新和功能扩展/强化是工程科学研究的首要目标，柔性制造和快速重组技术在大流程工业中也得到了重视。

(5) 先进工艺技术得到前所未有的广泛重视，如精密、高效、短流程、敏捷制造、虚拟制造等先进制造技术对机械、冶金、化工、石油等制造工业产生了重要影响。

(6) 可持续发展的战略思想渗透到工程科学的多个方面, 表现了人类社会与自然相协调的发展趋势。制造业和大型工程建设都面临着有限资源和破坏环境等迫切需要解决的难题, 从源头控制污染的绿色设计和制造系统为今后发展的主要趋势之一。

众所周知, 过程工业是国民经济的支柱产业; 是发展经济提高我国国际竞争力的不可缺少的基础; 过程工业是提高人民生活水平的基础; 过程工业是保障国家安全、打赢现代战争的重要支承, 没有过程工业就没有强大的国防; 过程工业是实现经济、社会发展与自然相协调从而实现可持续发展的重要基础和手段。因而, 过程装备与控制工程在发展国民经济的重要地位是显而易见的。

新中国成立以来, 特别是改革开放以来, 中国的制造业得到蓬勃发展。中国的制造业和装备制造业的工业增加值已居世界第四位, 仅次于美国、日本和德国。但中国制造业的劳动生产率远低于发达国家, 约为美国的 5.76%、日本的 5.35%、德国的 7.32%。其中最主要原因是技术创新能力十分薄弱, 基本上停留在仿制, 实现国产化的低层次阶段。从 20 世纪 70 年代末, 中国大规模、全方位地引进国外技术和进口国外设备, 但没做好引进技术装备的消化、吸收和创新, 没有同时加快装备制造业的发展, 因此, 步入引进——落后——再引进的怪圈。以石油化工设备为例, 20 年来, 化肥生产企业先后共引进 31 套合成氨装置、26 套尿素装置、47 套磷复肥装置, 总计耗资 48 亿美元; 乙烯生产企业先后引进 18 套乙烯装置, 总计耗资 200 亿美元。因此, 要振兴我国的装备制造业, 必须变“国际引进型”为“自主集成创新型”, 这是历史赋予我们过程装备与控制工程教育和科技工作者的历史重任。过程装备与控制工程学科的发展不仅仅要发表 EI、SCI 文章, 而且要十分重视发明专利和标准, 也要重视工程实践, 实现产、学、研相结合。这样才能为结束我国过程装备“出不去, 挡不住”的局面做出应有的贡献。

过程装备与控制工程是应用科学和工程技术, 这一学科的发展会立竿见影, 直接促进国民经济的发展。过程装备的现代化也会促进机械工程、材料工程、热能动力工程、化学工程、电子/电气工程、信息工程等工程技术的发展。我们不能只看到过程装备与控制工程是一个新兴的学科, 是博采诸多自然科学学科的成果而综合集成的一项工程科学技术, 而忽略了反过来的一面, 一个反馈作用, 也就是过程装备与控制工程学科也应对自然科学的发展做出应有的贡献。

实际上, 早在 18 世纪末期, 自然科学的研究就超出了自然界, 从而包括了整个世界, 即自然界和人工自然物。过程装备与控制工程属人工自然物, 它也理所当然是自然科学研究的对象之一。工程科学能把过程装备与控制工程在工程实践中的宝贵经验和初步理论精练成具有普遍意义的规律, 这些工程科学的规律就可能含有自然科学里现在没有的东西。所以对工程科学研究的成果即工程理论加以分析, 再加以提高就可能成为自然科学的一部分。钱学森先生曾提出: “工程控制论的内容就是完全从实际自动控制技术总结出来的, 没有设计和运用控制系统的经验, 绝不会有工程控制论。也可以说工程控制论在自然科学中是没有它的祖先的。” 因此对现代过程装备与工程的研究也有可能创造出新的工程理论, 为自然科学的

发展做出贡献。

过程装备与控制工程学科的发展历史地落在我们这一代人的肩上，任重道远。我们深信，经过一代又一代人的努力奋斗，过程装备与控制工程这一新兴学科一定会兴旺发达，不但会为国民经济的发展建功立业，而且会为自然科学的发展做出应有的贡献。

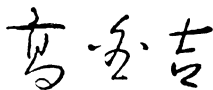
高质量的精品教材是培养高素质人才的重要基础，因此编写面向 21 世纪的迫切需要的过程装备与控制工程“十五”规划教材，是学科建设的重要内容。遵照教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》，以邓小平理论为指导，全面贯彻国家的教育方针和科教兴国战略，面向现代化、面向世界、面向未来，充分发挥高等学校在教材建设中的主体作用，在有关教师和教学指导委员会委员的共同努力下，过程装备与控制工程的“十五”规划教材陆续与广大师生和工程科技界读者见面了。这套教材力求反映近年来教学改革成果，适应多样化的教学需要；在选择教材内容和编写体系时注意体现素质教育和创新能力和实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。在此向所有为这些教材问世付出辛勤劳动的人们表示诚挚的敬意。

教材的建设往往滞后于教学改革的实践，教材的内容很难包含最新的科研成果，这套教材还要在教学和教改实践中不断丰富和完善；由于对教学改革研究深度和认识水平都有限，在这套书中不妥之处在所难免。为此，恳请广大读者予以批评指正。

教育部高等学校机械学科教学指导委员会副主任委员
过程装备与控制工程专业教学指导分委员会主任委员

北京化工大学 教授

中国工程院 院士



2003 年 5 月于北京

前 言

我国自从改革开放以来，各个工业部门先后出现了一大批生产能力大、效率高、技术先进的生产设备，为国民经济的快速发展起到重大作用。这些生产设备，无论是引进的或国产的，一次性投资很大，使用和维护要求较高，在一定程度上体现了当代的先进技术水平。如何加强对这些设备的维护与管理，提高使用的可靠性，减少因故障停机带来的直接和间接经济损失，是保证生产装置长周期稳产、增产的关键。因此，开展设备的状态监测与故障诊断技术的应用和研究工作，已成为企业提高设备管理水平、推动技术进步、确保设备安全稳定运行的主要途径。除此之外，该技术的应用与发展，又推动了维修制度的变革，使维修方式逐步地从定期维修过渡到以状态监测为基础的维修，从而极大地节省维修费用，减少停机损失。其综合效应是帮助企业增产增效，获得最大的经济效益。

我国自 20 世纪 80 年代初开始，在不断学习、吸收发达国家先进经验的基础上，对设备故障诊断技术从理论到应用做了大量的研究和开发工作，取得了巨大的成绩，引起各工业部门的重视，并且迅速在化工、石化、电力、钢铁和航空等部门获得了应用。现在这一技术不仅包含了设备故障监测、分析和防治方面的内容，而且已经成为产品的质量监督、设备的性能判别、维护管理和可靠性分析等方面的重要手段。

设备故障诊断技术是在实际应用需求和多种学科相结合中发展起来的，是一门新兴的边缘学科。它所涉及的知识面广，内容丰富多彩。在过程机械领域内，机械设备的种类繁多，运行参数各异，故障形式多样，尤其是各类高功率、高参数的旋转机械，是大型生产装置中的关键设备，这类机器不仅价格昂贵，而且从设计、制造、安装到维护运行的技术要求高，一旦出了故障，其影响面大，是要重点进行监测与诊断的对象。为此，要求不断拓宽这一领域内的知识面：进行状态监测，需要测试分析技术、信号处理、信息传输等方面的知识；故障诊断，需要对设备的结构特点、力学性能、制造安装条件和运行历史有详情的了解，对产生故障的因素有多层次的分析能力；分析故障机理，需要具有机械振动、流体力学、结构动力学、转子动力学和摩擦、磨损等方面的知识。故障的防治对策需要有丰富的经验、正确的判断力和振动控制方面的理论知识。正在研究与发展中的人工智能故障诊断，更需要有多方面的数学、物理知识。

20 世纪 80 年代，全国高等学校“化工设备与机械”（现改名为“过程装备与控制工程”）专业的教育指导委员会意识到设备故障诊断知识对本专业的重要性，因此在第二次编写的《化工机器》教材中增加了“机器故障诊断技术简介”的内容，作为启蒙式教育。此后，本书主编在多年对中国石化总公司系统、中国石油天然气总公司系统和化工部系统举办的工程师培训班教学基础上，按中国化工学会和化工机械与设备专业教学指导委员会的要

求，在 1994 年编写出版了《化工机器故障诊断技术》一书，由于该书通俗易懂，实用性强，在石化、化工、机械行业的设备工程师继续教育中获得好评，该书也曾作为化工机械专业本科教学的教材，本书是在此基础上作了较大幅度的补充和完善。书中取材是工厂较多遇到的故障类型和典型事例，收集了国内外有关设备故障诊断的理论和实践分析资料，加之编者在这一领域内的研究工作与现场实践经验，重点编写了旋转机械的故障诊断，结合大量典型事例分析，力图给读者提供设备故障诊断方面的基本理论知识和分析能力，也使工程技术人员在现场处理实际故障问题时有参考和借鉴。

本书编写具有以下特点。

(1) 本书重点编写了大型高速旋转机械和往复式压缩机的故障类型、机理、特征、诊断方法和防治措施。旋转机械是设备故障诊断的主要对象，因此本书对旋转机械的故障分析诊断较为详尽，在书中占有最大篇幅，这也符合广大设备故障诊断工作者最基本的知识需求。往复式压缩机是最广泛使用的通用机械。在石化、化工行业中的大型、高压压缩机极需要作状态监测与故障诊断，可惜这方面的现场应用尚不普遍，本书以现有的技术和经验，重点对压缩机故障和管道振动介绍了监测、诊断方法与当前的研究内容，以期读者作进一步的开拓工作。此外，还讲述了齿轮和滚动轴承的检测与诊断方法；当前在设备故障诊断中应用的无损检测技术——油液分析技术和声发射技术。为了使读者了解现代智能技术在设备故障诊断中应用，书中介绍了模糊数学、神经网络和专家系统。本书在编写上既有重点，又照顾到面上知识。

(2) 旋转机械以转子振动为核心，细分了各种故障类型，详述了它们的故障机理和特征。同一故障现象中常常包含了许多不同的故障原因，彼此易于混淆，书中提出了一些特征鉴别方法，有助于读者从多方面分析问题。例如，转子不平衡故障现象中包含了多种故障类型，书中对每一类型故障作了较为详实的分析，这对设备故障的诊断和处理极有启发，在其他书籍中是不多见的。

(3) 在叶片式机器中，流体激振故障和转子亚异步振动故障对生产带来的危害极大，故障诊断的难度也较高，书中对它们的故障机理和特征作了较为深入的分析研究。其中内容，有编者某些方面的研究成果和现场的诊断经历，也有国外的论文报道。作这方面的探讨，既是设备故障诊断的需要，也是转子动力学发展感兴趣的内容。

(4) 本书为适合不同机械专业的学生作为教材和广大在岗工作的设备管理技术人员继续教育或自学参考，编写中注重实用性，避免诸多公式的罗列和推导，使具有大专以上学历的技术人员能够接受的理论水平进行阅读。书中以较多的典型故障实例分析来佐证某种故障所表现的特征，以便读者加深理解，抓住诊断工作的要领。故障实例分析内容一部分取自国内外文献和企业技术人员提供的材料，一部分系编者自身经历。

本教材共 8 章。第 1 章概论，概述了设备故障诊断所包含的基本内容，故障的特性和类型，设备的状态监测技术与故障识别方法。第 2 章介绍了常用的振动信号分析技术，这是机器的振动故障诊断工作所必备的知识。第 3 章较为详细地介绍了旋转机械的不平衡故障、不

对中故障、滑动轴承故障、转子摩擦故障、浮环密封故障、流体激振故障以及高速转子的自激振动故障。这些在大型旋转机械中较为常见的故障振动，在分析问题时常常带有一定的难度，本书重点介绍了它们的故障机理、类型、特征鉴别和防治措施；第4章是对往复式压缩机的故障原因从热力参数变化和动力参数变化两方面进行了分析，对压缩机故障振动和管道振动提出了状态监测与故障诊断方法，并提出了相应的防治措施。第5章、第6章对齿轮和滚动轴承的故障原理进行了分析，讲述了它们的振动信号特征、故障检测、信号分析以及信号识别上的一些特殊方法。第7章为设备故障诊断的无损检测技术，重点介绍了油液分析技术和声发射技术在故障诊断中的应用。第8章介绍了现代智能诊断技术的开发与应用，编写了专家系统在故障诊断中的应用，模糊数学与神经网络在故障诊断中的应用，体现了现代诊断技术的发展方向。

本书第1、第3、第4、第5、第6章由沈庆根编写，第2章由浙江大学郑水英编写，第7章由浙江大学金涛编写，第8章由哈尔滨工业大学王日新、高晶波编写。全书由沈庆根统稿。

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材，在编写过程中得到浙江大学化工机械研究所领导和哈尔滨工业大学夏松波教授的大力支持，也得到石化企业很多设备管理技术人员的热情鼓励，在此表示深切的谢意。

本书内容丰富，实用性强，图文并茂，通俗易懂，较深入地描述了化工机器故障的基本机理、特征和现代的监测诊断技术，主要应用对象是大专院校师生的教学用书，同时对从事设备故障诊断工作的科研人员、工程技术人员、设备管理人员提供较有价值的参考用书。

设备故障诊断是一门正在迅速发展中的学科，本书为读者进入该学科提供了基本的知识和经验。由于我们的水平有限，难免有许多错误和不足，恳请读者批评指正。

编者

2005.8

目 录

1 概论	1
1.1 设备故障诊断的目的和意义	1
1.1.1 设备故障诊断的含义和特性	1
1.1.2 设备故障诊断技术的应用与发展	4
1.1.3 设备故障诊断技术与维修方式的关系	6
1.2 设备故障的类型和状态监测技术	8
1.2.1 设备故障的类型及其可能原因	8
1.2.2 设备故障诊断的功能和环节	12
1.2.3 状态监测的技术和方法	13
1.3 设备故障状态的识别方法	17
1.3.1 信息比较诊断法	17
1.3.2 参数变化诊断法	18
1.3.3 模拟试验诊断法	18
1.3.4 函数诊断法	18
1.3.5 故障树分析诊断法	19
1.3.6 模糊诊断法	21
1.3.7 神经网络诊断法	23
1.3.8 结论	25
参考文献	26
2 故障诊断的信号处理方法	27
2.1 信号处理基础知识	27
2.1.1 信号的定义和分类	27
2.1.2 信号的时域分析	30
2.1.3 信号的频域分析	35
2.2 旋转机械常用的振动信号处理图形	42
2.2.1 振动监测的基本参数	42
2.2.2 轴心轨迹	43
2.2.3 转子振型	45
2.2.4 轴颈涡动中心位置	45

2.2.5	波特图 (Bode plots)	46
2.2.6	极坐标图 (奈奎斯特图)	47
2.2.7	三维坐标图	48
2.2.8	阶比谱分析	49
2.2.9	全息谱技术	50
2.3	信号的时频分析	53
2.3.1	短时傅里叶变换	53
2.3.2	小波分析的基本原理	55
2.3.3	多分辨分析和小波包分析	58
2.3.4	小波分析的应用	59
	参考文献	61
3	旋转机械故障诊断	63
3.1	转子不平衡故障诊断	63
3.1.1	转子不平衡概念	63
3.1.2	临界转速对不平衡振动的影响	64
3.1.3	转子不平衡振动的故障特征	67
3.1.4	不平衡振动的故障原因和防治措施	68
3.1.5	定向振动与不平衡振动故障的鉴别	80
3.2	转子不对中故障诊断	82
3.2.1	转子不对中故障的特征	83
3.2.2	联轴节不对中的振动频率	84
3.2.3	不对中故障的监测方法	90
3.2.4	故障诊断实例	93
3.3	滑动轴承故障诊断	95
3.3.1	滑动轴承工作原理	95
3.3.2	滑动轴承常见故障的原因和防治措施	97
3.3.3	高速滑动轴承不稳定故障的特征和防治措施	99
3.3.4	结构共振产生的轴承工作不稳定	118
3.3.5	转子轴承电流故障诊断	120
3.4	转子摩擦故障诊断	125
3.4.1	干摩擦故障的机理和特征	125
3.4.2	转子内摩擦引起失稳的机理	133
3.5	浮动环密封故障诊断	136
3.5.1	浮动环密封故障的机理和特征	136

3.5.2	故障诊断实例	138
3.6	叶片式机器中流体激振故障诊断	141
3.6.1	非接触式密封中的流体激振故障	141
3.6.2	叶片式机器中的气流不稳定故障	150
3.6.3	流体冲击和声学共振故障	161
3.7	高速旋转机械不稳定自激振动故障的分析方法	169
3.7.1	亚异步不稳定振动的特性	170
3.7.2	诱发亚异步不稳定振动的因素及其分析方法	171
3.7.3	转子稳定性评判	173
3.7.4	故障诊断实例	174
	参考文献	180
4	往复式压缩机的故障分析和管道振动	184
4.1	往复式压缩机的故障类型与故障原因	184
4.1.1	压缩机热力参数异常及其故障原因	184
4.1.2	压缩机主要零部件的机械故障	189
4.1.3	压缩机故障振动	197
4.2	示功图及阀片运动规律的测量与故障分析	205
4.2.1	压缩机示功图显示的故障	205
4.2.2	阀片运动规律曲线图	207
4.3	压缩机的气流压力脉动与管道振动	210
4.3.1	气流压力脉动引起的故障分析	210
4.3.2	管道压力脉动的防治措施	225
4.3.3	管道的机械共振及其防治措施	238
	参考文献	242
5	齿轮故障诊断	243
5.1	齿轮常见故障	243
5.1.1	齿的断裂	243
5.1.2	齿的磨损	244
5.1.3	齿面疲劳(点蚀、剥落)	244
5.1.4	齿面擦伤和划痕	245
5.2	齿轮故障振动的诊断	246
5.2.1	齿轮传动的动态激励	246
5.2.2	齿轮故障的特征信息	249
5.2.3	齿轮故障的诊断方法	257

5.3 齿轮故障噪声的诊断	265
参考文献	267
6 滚动轴承故障诊断	269
6.1 滚动轴承的故障形式与故障原因	269
6.1.1 轴承转速 $n < 1r/min$ 时, 轴承的损坏形式	269
6.1.2 轴承转速 $n > 10r/min$ 时, 轴承损伤的主要形式	269
6.2 滚动轴承故障的检测方法	272
6.3 滚动轴承故障振动的诊断	273
6.3.1 引起滚动轴承振动的原因和特征频率	273
6.3.2 滚动轴承缺陷产生的间隔频率	279
6.3.3 滚动轴承故障振动的诊断方法	282
参考文献	299
7 无损检测技术在设备诊断中的应用	301
7.1 油样分析技术在设备诊断中的应用	301
7.1.1 概述	301
7.1.2 油样的光谱分析技术	301
7.1.3 润滑油的铁谱分析技术	305
7.1.4 应用实例	310
7.1.5 应用光谱、铁谱分析应注意的问题	313
7.2 声发射检测技术在设备诊断中的应用	314
7.2.1 声发射检测的基本原理	315
7.2.2 声发射信号的表征参数	315
7.2.3 声发射检测仪器	318
7.2.4 声发射检测的研究及应用领域	319
7.2.5 声发射检测实例	320
参考文献	326
8 现代智能诊断技术的应用	327
8.1 故障诊断专家系统	327
8.1.1 专家系统概述	327
8.1.2 诊断知识的表示	329
8.1.3 诊断推理与控制策略	332
8.1.4 诊断知识的获取	342
8.1.5 诊断专家系统应用实例	344
8.2 模糊数学在故障诊断中的应用	349

8.2.1	模糊集合的基本概念	349
8.2.2	隶属函数	349
8.2.3	模糊诊断矩阵	353
8.2.4	故障诊断的模糊聚类分析	355
8.2.5	模糊理论在汽轮发电机故障诊断中的应用	358
8.3	神经网络在故障诊断中的应用	362
8.3.1	神经网络的基本组成	362
8.3.2	前馈神经网络	365
8.3.3	BP 神经网络在旋转机械故障诊断中的应用	366
参考文献	368

1 概 论

1.1 设备故障诊断的目的和意义

1.1.1 设备故障诊断的含义和特性

1.1.1.1 设备故障诊断的含义

设备故障诊断是指应用现代测试分析手段和诊断理论方法，对运行中的机械设备出现故障的机理、原因、部位和故障程度进行识别和诊断，并且根据诊断结论，确定设备的维修方案和防范措施。

设备故障诊断与医学诊断类似，人生了病需要求医就诊，同样机械设备在运行中产生故障，也需要“医生”去帮助分析和诊断病因，因此机械设备的故障诊断技术是模拟医学界的疾病诊断思路提出来的。人体疾病是由内因和外因产生，在病理上是经过一系列复杂的物理、生化变化过程形成，通过人的各部位器官和组织反映出一定症状。对病人的医疗过程，首先经过各种理化检验，根据检查结果和病史、症状的表现，利用医生的知识和经验，诊断出病人的疾病类型、性质和程度，然后对症下药，采取有效的治疗措施。对于机械设备的故障诊断也有同样的“疾病诊疗”过程，第一步要根据设备在运行中已暴露的或潜在的故障现象，例如，振动、噪声、磨损、裂纹、断裂、变形或效率低下等，采用相应的信号检测和分析方法，监测到能够反映设备或零部件运行状态的参数（称为特征参数），获取有关设备“健康”状况的信息，了解其工作正常或不正常。第二步是收集与故障分析有关的设备制造、安装和操作运行的状态参数记录数据，利用领域专家或工程技术人员的知识和经验，用一定的诊断方法和手段，诊断出设备故障的性质、类型、部位和程度，分析故障产生的原因，提出相应的治理措施，最终能全部或部分排除故障，保证设备安全、有效地运行。

机械设备的故障，就是反映设备丧失工作效能的程度，或者指设备丧失了它所要求的规定性能或状态。各种设备由于制造精度、性能要求以及设计、操作规范不同，判别设备是否存在故障，故障的程度如何，是有不同标准的。有些把设备运行中的状态异常、缺陷、性能劣化和故障前期作为故障，也有的故障概念是指事故，因此判定设备是否已存在故障，必须明确规定出设备的性能范围。例如，一台运行中的机器振值达到多少，一台压力容器壁面裂纹扩展到多大，一只轴承磨损量为多少，这些设备或零部件性能劣化的速率有多快，才认为是有故障。

如何判别故障发展的程度，按一般意义上理解，是指设备实测性能指标超过规定允许值的大小，但实际上要根据具体情况分析，它与故障性质、发展过程和故障引起的后果等因素

有关。从故障性质上讲，有临时性故障与永久性故障之分，前者通过修复或运行参数的调整，可以恢复到正常功能；后者为全部或部分永久丧失原有功能，除非更换或彻底整修故障零部件，是不能恢复功能的。从故障发展过程上讲，有渐发生故障与突发性故障之分，前者形成过程较长，即使性能指标略有超出允许值，短时期内不会产生严重问题，通过参数的连续监测，可以预测其发展趋势；后者故障发生的时间短暂，一般事先无明显征兆（征兆是指用参数表示的故障现象），一旦发生故障，往往会造成破坏性或灾难性的后果。因此，对于同样是性能参数超标的故障，永久性的、突发性的并带有破坏性的故障严重程度要大得多。

诊断是指采用各种测试、分析手段和故障状态的识别方法来确定故障的性质、程度、类别和故障部位，并研究故障产生机理的一门学科。

设备故障诊断所包含的内容可分为三部分。第一部分是利用各种传感器和监测仪表获取设备运行状态的信息，这就是信号采集。采集到的信号还需要用信号分析系统加以处理，去除无用信息，提取能反映设备状态的有用信息（称为特征信息），从这些信息中发现设备各主要部位和零部件的性能是处于良好状态还是故障状态，这部分内容称为“状态监测”，它包含了信号采集和信号处理。第二部分是如果发现设备工作状态不正常或存在故障，则需要对能够反映故障状态的特征参数和信息进行识别，利用专家的知识 and 经验，像医生诊断疾病那样，诊断出设备存在的故障类型、故障部位、故障程度和产生故障的原因，这部分内容称为“故障诊断”。第三部分称为“诊断决策”。是根据诊断结论，采取控制、治理和预防措施的决策。在故障的预防措施中还包括对设备或关键零部件的可靠性分析和剩余寿命估计。有些机械设备由于结构复杂，影响因素众多或者对故障形成的机理了解不够，也有从治理措施的有效性来证明诊断结论是否正确。由此可见，设备诊断技术所包含的内容比较广泛，诸如设备状态参数（力、位移、振动、噪声、裂纹、磨损、腐蚀、温度、压力和流量等）的监测，状态特征参数变化的辨识，机器发生振动和机械损伤时的原因分析，故障的控制与防治，机械零部件的可靠性分析和剩余寿命估计等，都属于设备故障诊断的范畴。

从广义上讲，故障诊断技术还应包括设备的工作效率诊断。有些设备虽未出现明显的故障，但长期处于低效率下运行，也会造成经济损失。例如，一台水泵的一生寿命费用中，能源消耗占 95%，维修费用占 4%，购置费用仅占 1%。如能将效率提高 1%，就是一台泵的价值。通过监测水泵出口的压力、流量和功率，使其在最高效率下运行，对大多数水泵来说可降低 10% 的能耗，节省的费用是维修费用的 2 倍多，将近 10 倍泵本身的价值。所以通过状态参数的监测和设备性能分析来提高设备效率，也是故障诊断工作中的一项任务。

设备故障诊断所包含的三部分内容和实施过程如图 1-1 所示。

1.1.1.2 设备故障的特性

(1) 多样性

在化工过程装置中，有各类静设备（如换热器、传质容器、反应器、变换器、塔设备等）和动设备（如旋转机器和往复机器等），各种设备不仅结构不同，工艺参数各异，而且制造、安装过程的差异和使用环境不同，在运行期间可能会产生各种各样的故障。例如，离

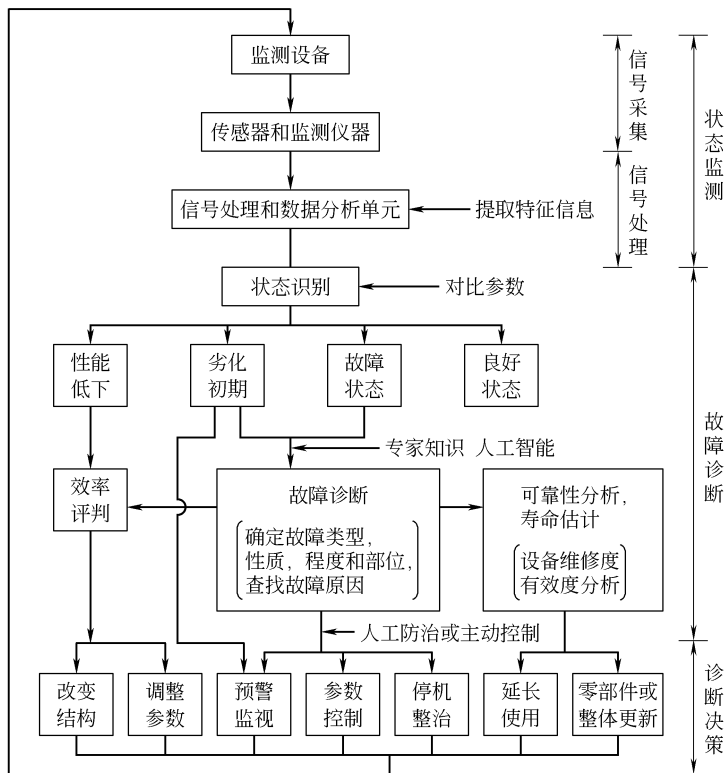


图 1-1 设备故障诊断的三部分内容和实施过程

心式、轴流式压缩机压缩的工艺气体中带有粉料，烟气轮机中通过的烟气带有催化剂，容易引起转子的不平衡振动故障，摩擦、磨损故障。高速旋转机器容易产生轴承油膜不稳定故障，转子不对中故障。高速、高压的旋转机器容易发生流体激振故障，转子自激振动故障。往复式压缩机容易发生管道振动故障，机器主要零部件的磨损、变形、断裂故障。高压容器最担心发生裂纹扩展故障，反应器、塔设备经常会发生内部腐蚀故障，密封泄漏故障等。有些设备因工艺参数变化、制造和安装中带来的问题，更会产生许多意想不到的其他故障。这就是故障的多样性。

(2) 层次性

设备一旦表现出某种故障现象（或称“征兆”），就需要追查引起故障的原因（或称“症候”、“病症”）。但有些故障原因往往是深层次的，即上一层次故障源于下一层次故障，表现为多层次性，如图 1-2 所示。

(3) 多因素和相关性

机械设备的各个元件之间，设备与设备之间是通过机械结构或物料传递来联系的，一个元件或一台设备发生故障，也会引发其他元件或设备故障，这就表现出故障的多因素和相关性。因此在查找故障原因时，就要全面考虑一切与之有关的因素。例如高速、高压的涡轮机、