

第一章 概述

第一节 机械故障诊断技术的发展历程

一、机械故障诊断技术的起源

一般而言，我们所提及的机械设备是源于蒸汽为动力的机器。人类的工业革命发端于蒸汽机的发明，从此以后，大量以蒸汽机为动力的机械设备不断涌现；随着工业革命的进一步发展，人类又发明了电力，继而诞生了新的动力机械——电动机；另外还有以燃油为能源的动力机械——燃油发动机，简称发动机；当然最“可怕”的是人类还发明了核动力机械。有了这些非自然的动力，人类“征服”自然的能力得到了巨大的提升，并且创造出了种类繁多的机械设备。

由于技术手段的限制以及对经济利益的考虑，几乎所有的机械设备都需要进行维修。开始时工业生产规模比较小，机械设备的技术水平和复杂程度都很低，设备的利用率和维修费用问题并没有引起人们的注意，对设备故障也缺乏正确的认识，那时的机械设备主要以分散的、独立的、小功率的为主，出现故障时只需停机、拆卸、检查、判断（诊断）、维修、再投入运行即可，这样就诞生了第一种维修方式——事后维修。目前，针对这类小型、非关键的机械设备，仍然采用事后维修的方式。

随着机械设备功率的不断提升，逐渐诞生了技术水平和复杂程度都比较高的机械设备，这些设备如果因故障意外停机将会对生产造成非常大的损失，同时还有可能造成较大的人员伤亡，因此，人们根据机械寿命理论，利用统计学原理，创造了一种新的维修模式——定期维修（计划维修），即根据某类机械设备的平均寿命，制定一个维修周期，按计划对这类机械设备进行维修。这种维修方式的确避免了大部分故障停机事故，较大幅度地提高了经济效益，减少了人员的伤亡，但是因为使用的是平均寿命方式进行定期维修，就不免还有一小部分设备事故会发生，产生了维修不足的现象。另外，维修时还会对一小部分性能良好、不需要维修的设备进行了过剩（多余的）维修。可见这种维修方式仍然只能是一种过渡型维修方式，这期间开始孕育了机械设备状态监测与故障诊断技术，各国企业的管理者和科研人员开始在技术层面关注如何掌握设备的真实运行状态，如何判断机械设备的故障，为新一代维修方式的诞生奠定了基础。目前，在工业生产中仍有部分机械设备采用定期维修方式，其中的关键

设备是采用冗余技术来减少因意外停机造成的损失。

随后而来的工业化特点是生产设备的大型化、连续化、高速化和自动化。它在提高生产效率、降低成本、节约能源和人力、减少废品率、保证产品质量等方面有很大优势。然而，在这一阶段由于机械设备故障停机所造成的损失也在急剧地增加，例如，在一条自动化的连续生产线上，因为其中某一台设备上一个机械零件的失效而造成整个生产线停产，损失巨大。所以，自然地催生了新一代维修方式——状态维修。状态维修方式的诞生得益于计算机技术的发展，人们将所采集到的大量数据通过计算机进行快速处理、分析、判断，准确地掌握某一个机械零件乃至整个生产系统的运行状态，确定最佳维修时间和维修部位。目前，这种维修方式已经成为工业生产中的主流维修模式，其理论基础就是机械故障诊断技术。

可以说，机械故障诊断技术源于机械故障所带来的重大经济损失和人员伤亡，受益于科学技术的整体进步，尤其是计算机技术的飞速发展。目前，全球仍然在这一技术领域投入大量的人力、物力，以期使这一技术更趋完善。

二、机械故障诊断技术的发展进程

自 20 世纪 60 年代开始，随着科学技术的不断进步和发展，尤其是计算机技术、网络技术和信息技术的迅速发展和普及，机械设备运行状态监测与故障诊断技术逐步形成了一门较为完善的、新兴的综合性工程学科。该学科以设备管理、状态监测和故障诊断为内容，以建立新的维修体制为目标，在全球范围内以不同形式得到了推广，逐步成为国际上一大热门学科。

最早开发设备故障诊断技术的国家是美国。1967 年 4 月在美国宇航局的倡导下，美国海军主持召开了美国机械故障预防小组成立大会。除了一名瑞典滚珠轴承公司的代表外，几乎全部是来自于军界的代表，以海军和空军居多。这个小组的成立有两个主要原因：一个是技术进步和工业发展（如阿波罗计划这类尖端技术和系统）在保证机械设备的安全性、可靠性方面，面临着巨大的压力和挑战，机械设备的故障问题日益突出；二是在军事部门已经开发的一部分初级的监测和诊断技术，在可靠性工程等方面为发展和完善机械设备故障诊断技术打下了基础。

从此开始，美国投入了大量的人力、物力来开发和完善这项技术。例如，美国国家标准局的机械故障预防小组，研究了机械故障的机理以及检测、诊断和预测技术；俄亥俄州立大学的齿轮动力学及噪声实验室，研究了齿轮噪声机理与振动传递的监测技术和故障诊断技术；机械工艺技术公司的赛格研究所，研究了回转机械故障的诊断以及停机时间控制系统；本特利内华达公司的转子动力学研究所，研究了转子动力学性能、轴承稳定性、油膜振荡以及转子裂纹故障的监测与诊断；西屋电气公司的技术研究部，开发了电站数据中心、诊断运行中心，并且在人工智能诊断和热参数诊断技术方面有所突破。

在随后的几十年，机械故障诊断技术在美国的航空航天、军事、核能等尖端领域得到了广泛的应用，目前仍处在领先地位。例如，美国麻省理工学院综合利用混合智能系统实现核

电站大型复杂机电系统的在线监测、故障诊断和状态维修；美国机械故障预防小组深入研究各类机械故障的机理、可靠性设计和材料耐久性评估；美国密歇根大学、辛辛那提大学和密苏里罗拉大学在美国自然科学基金的资助下，联合工业界共同成立了“智能维护系统中心”，旨在研究机械系统性能衰退分析和预测性维护方法；美国斯坦福大学在复合材料结构健康监测方面也取得了显著的研究成果。

在英国，20世纪70年代初就成立了机械健康监测组织与状态监测协会，该协会对故障诊断技术的发展起到了很大的作用。曼彻斯特大学、南安普敦大学、剑桥大学等长期致力于基于先进检测方法的设备在线监测与损伤识别、可靠性、可维护性的研究工作及其应用和推广。另外，德国的柏林科技大学、法国的贡皮埃涅技术大学、加拿大的阿尔伯塔大学、澳大利亚的悉尼大学、日本的九州工业大学、印度的印度理工学院等，以及各国的其他科研机构都在机械设备状态监测与故障诊断技术领域做出了重要贡献。

我国高等学校和科研机构对故障诊断技术的研究起源于20世纪80年代初。1983年，中国机械工程学会设备维修学会，在南京召开了首届设备诊断技术专题座谈会，交流了国内外的情况，分析了国内设备维修现状以及开展设备诊断技术的必要性，向全国提出了“积极开发和应用设备诊断技术为四化建设服务”的十条建议，强调了加速开展有关设备诊断技术工作的必要性和紧迫性。1985年，在郑州聚集了国内有关机械设备状态监测与故障诊断技术方面的众多专家教授，正式成立了以“机械设备故障诊断”命名的研究会，并于次年加入到中国振动工程学会，更名为“故障诊断学会”，并在沈阳召开了“第一届全国机械设备故障诊断学术年会”。

随后这一技术在我国冶金、石化、铁路、电力等行业逐步得到了推广和应用。技术研究的不断深入，我国生产的信号采集和分析仪器已经接近国际水平，各类国产的状态监测与故障诊断系统得到了广泛的应用。这些都得益于国内各大高校和科研机构对机械故障诊断技术持续不断的研究，以及国家层面对这一技术研究的大力支持和不断的资金投入。这一领域研究较为有代表性的高校有清华大学、北京化工大学、天津大学、哈尔滨工业大学、东北大学、西安交通大学、上海交通大学、华中科技大学、中南大学、重庆大学、华南理工大学等。目前，国内各高校科研人员正寻求在故障诊断技术理论研究上有所突破和创新。

第二节 开展机械故障诊断的意义

在各国工业生产中重点、关键性机械设备的数量越来越多，其中大多数为大型、自动、连续生产的设备，其在生产中的重要性是不言而喻的，对这些机械设备实施状态监测与故障诊断技术所带来的经济效益和社会效益是巨大的，具体包括以下几点。

一、预防事故，保障人身和设备的安全

在许多重要行业，如航天、航空、航海、核工业以及其他大型电力企业等部门中，许多设备故障的发生不仅会造成巨大的经济损失，而且还会带来严重的社会危害。比如日本的福岛核电站事故，其危害是长远的。为了避免这类恶性事故的发生，仅靠提高设计的可靠性是不够的，必须利用设备运行状态监测与故障诊断技术来进行管理，才能够防患于未然。

二、推动设备维修制度的全面改革

定期维修存在着明显的不足，即维修不足和维修过剩。据 20 世纪后期的统计数据，美国每年的工业维修费用接近全年税收的 1/3，其中因为维修不足和过剩维修而浪费的资金约为总维修费用的 1/3，这一浪费是巨大的，它促使人们考虑使用新的维修制度来避免这种损失。

状态维修是一种动态维修管理制度，它是通过现代技术手段，持续采集设备的各类数据并加以处理、分析、判断，然后根据设备运行的实际状况，统筹安排维修时机和部位，最大限度地减少维修量和维修时间，在保证设备能够正常运行的前提下，寻找到一条最优的维修方式。

维修制度由定期维修向状态维修的转化是必然的。要真正实现状态维修就必须使状态监测与故障诊断技术成熟和完善。机械故障诊断技术是一种不分解和破坏设备，对作用于设备的应力、故障趋势、强度和性能进行定量描述，预测寿命和可靠性，同时决定其恢复方法的技术。因此，这一技术的发展与完善决定着状态维修制度的实现，它的推广和应用改变了原有的设备管理体制，成为企业提高设备综合管理水平的重要标志。

三、提高经济效益

采用设备状态监测与故障诊断技术的最终目的是最大限度地减少和避免设备事故（尤其是重大的设备事故）的发生，并且减少维修次数和延长维修周期，以使每个零部件的工作寿命都能得到充分发挥，极大地降低维修费用，获取最大的经济利益。因此，机械故障诊断的应用可以带来巨大的经济效益。20 世纪后期的统计数据表明，英国 2 000 家工业企业在这一技术调整了维修管理制度后，每年节约维修费用达 3 亿英镑（1 英镑=8.762 元人民币），去除使用这一技术的投入，净节约了 2.5 亿英镑。

第三节 机械故障诊断技术的基本内容和基础理论

一、基本概念与诊断过程

(一) 基本概念

“故障诊断”的概念来源于仿生学。机械“故障”是指该机械装置丧失了其应该具有的能力，即机械设备运行功能的“失常”，其功能是可以恢复的，而并非纯粹的失效或者损坏。机械设备一旦发生故障，往往会给生产和产品质量乃至人的生命安全造成严重的影响。为了使设备保持正常的运行状态，一般情况下必须采用合适的方法进行维修。所谓“诊断”原本是医学术语，其主要包含两个方面的内容：“诊”是对机械设备的客观状态作监测，即采集和处理信息等；“断”则是确定故障的性质、程度、部位以及原因，并且提出对策等。机械故障诊断与医学诊断的对比见表 1-1。

机械设备从系统论的角度来看也是一个系统，与其他系统一样也是元素按一定的规律聚合而成的，也是具有层次性的。机械系统的基本状态取决于其构成零部件的状态，而机械系统的输出则取决于其基本状态以及与外界的关系（输入、客观环境的作用）。按照“构造”与“功能”，可以将机械系统分为三个类型：

(1) 简单系统：在构造上，系统由一个或多个物理元件组成，元件之间的联系是确定的，系统的输出-输入之间存在着构造所决定的定量或逻辑上的因果关系。

(2) 复合系统：在构造上，此系统由多个简单系统作为元素组合而成，这种组合是多层次的，层次之间的联系也是确定的，因而在功能上，其特点与简单系统相同。

表 1-1 机械故障诊断与医学诊断的对比

医学诊断方法	设备诊断方法	原理及特征信息
中医：望、闻、问、切； 西医：望、触、叩、听、嗅	听、摸、看、闻	通过形貌、声音、颜色、气味来诊断
听心音、做心电图	振动与噪声监测	通过振动大小及变化来诊断
测量体温	温度监测	观察温度变化
验血、验尿	油液分析	观察物理、化学成分及细胞（磨粒） 形态变化
测量血压	应力应变测量	观察压力或应力变化
X 射线、超声检查	无损检测（裂纹）	观察内部机体缺陷
问病史	查阅技术档案资料	找规律、查原因、做判断

(3) 复杂系统：在构造上，该系统由多个子系统作为元素组合而成，这种组合也是多层

次的，在子系统内，层次之间的联系至少是不完全确定的。在功能上，系统的输出与输入之间存在着由构造所决定的一般并非严格的定量或逻辑上的因果关系。

显然，机械设备是复杂系统，因为这类系统的输出一般表现为模拟量。对于相同的机械设备而言，它们相同的机械元件本身的几何特性（尺寸、形状、表面形貌等）也不可能完全一致，相同的联系（压力、间隙、介质状况等）也不可能完全一致，因此，即使在完全相同的输入（工作环境）下，相同机械设备的状态与行为（输出）也就难于一致，并非确定。

判断机械设备发生故障的一般准则是：在给定的工作条件下，机械设备的功能与约束的条件若不能满足正常运行或原设计期望的要求，就可以判断该设备发生了故障。而机械设备的故障诊断，是指查明导致该复杂系统发生故障的指定层次子系统联系的劣化状态。很显然，故障诊断的实质就是状态识别。

机械设备的故障，从其产生的因果关系上可以分为两类：一类是原发性故障，即故障源；另一类是继发性故障，即由其他故障所引发的，当故障源消失时，这类故障一般也会消失，当然它也可能成为一个新的故障源。

（二）基本内容

（1）信号检测：就是正确选择测试仪器和测试方法，准确地测量出反映设备实际状态的各种信号（应力参数、设备劣化的征兆参数、运行性能参数等），由此建立起来的状态信号属于初始模式。

（2）特征提取：将初始模式的状态信号通过放大或压缩、形式变换、去除噪声干扰等处理，提取故障特征，形成待检模式。

（3）状态识别：根据理论分析结合故障案例，并采用数据库技术所建立起来的故障档案库为基准模式，把待检模式与基准模式进行比较和分类，即可区别设备的正常与异常。

（4）预报决策：经过判别，对属于正常状态的设备可以继续监测，重复以上程序；对属于异常状态的设备则要查明故障情况，做出趋势分析，预测其发展和可以继续运行的时间以及根据问题所在提出控制措施和维修决策。

（三）诊断过程

依据诊断内容，机械设备的诊断过程可以表述为图 1-1。

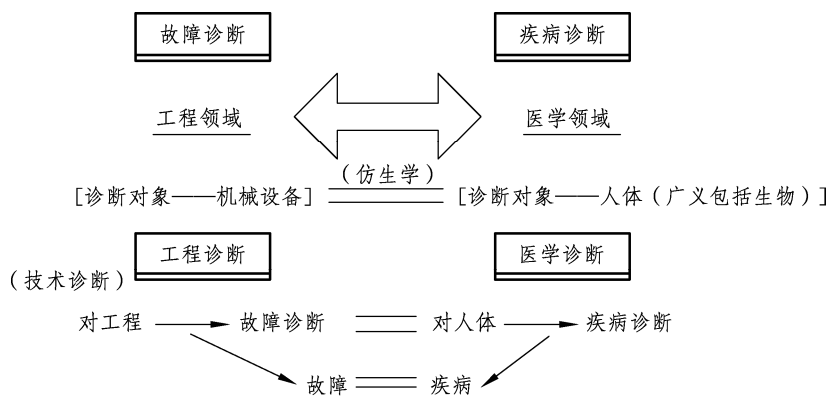


图 1-1 机械设备的诊断过程

二、机械故障诊断技术的分类

(一) 按诊断对象分类

(1) 旋转机械诊断技术：对象为转子、轴系、叶轮、泵、转风机、离心机、蒸汽涡轮机、燃气涡轮机、电动机及汽轮发电机组、水轮发电机组等。

(2) 往复机械诊断技术：对象为内燃机、压气机、活塞曲柄和连杆机构、柱塞转盘机等。

(3) 工程结构诊断技术：对象为金属结构、框架、桥梁、容器、建筑物、地桩等。

(4) 机械零件诊断技术：对象为转轴、轴承、齿轮、连接件等。

(5) 液压设备诊断技术：对象为液压泵、液压缸、液压阀、液压管路、液压系统等。

(6) 电气设备诊断技术：对象为发电机、电动机、变压器、开关电器等。

(7) 生产过程综合诊断技术：对象为机床加工过程、轧制生产过程、纺织生产过程、船舶运输过程、核电生产过程、石化生产过程等。

(二) 按诊断方法(或技术)分类

(1) 振动诊断法：以平衡振动、瞬态振动、机械导纳及模态参数为检测目标，进行特征分析、谱分析和时频域分析，也包含有相位信息的全息谱诊断方法和其他方法。

(2) 声学诊断法：以噪声、声阻、超声、声发射为检测目标，进行声级、声强、声源、声场、声谱分析。

(3) 温度诊断法：以温度、温差、温度场、热像为检测目标，进行温变量、温度场、红外热像识别与分析。

(4) 污染物诊断法：以泄漏物，残留物，气、液、固体的成分为检测目标，进行液气成分变化、油质磨损分析。

(5) 诊断法：以强度、压力、电参数等为检测目标，进行结构损伤分析、流体压力和变化分析以及系统性能分析。

(6) 形貌诊断法：以裂纹、变形、斑点、凹坑、色泽等为检测目标，进行结构强度、应力集中、裂纹破损、摩擦磨损等现象分析。

(三) 按目的、要求和条件分类

1. 性能诊断和运行诊断

性能诊断是针对新安装或新维修的设备及其组件，需要诊断这些设备的性能是否正常，并且按诊断结果对它们进行调整。而运行诊断是针对正在工作中的设备或组件，进行运行状态监测，以便对其故障的发生和发展进行早期诊断。

2. 在线诊断和离线诊断

在线诊断一般是指对现场正在运行的设备进行自动实时诊断。这类被诊断设备都是重要的关键设备。而离线诊断是通过记录仪将现场设备的状态信号记录下来，带回实验室结合机组状态的历史档案资料作出综合分析。

3. 直接诊断和间接诊断

直接诊断是根据关键零部件的信息直接确定其状态，如轴承间隙、齿面磨损、叶片的裂纹以及在腐蚀环境下管道的壁厚等。直接诊断有时受到设备结构和工作条件的限制而无法实现，这时就需要采用间接诊断。间接诊断是通过二次诊断信息来间接判断设备中关键零部件的状态变化。多数二次诊断信息属于综合信息，因此，容易发生误诊断或出现伪报警和漏检的可能。

4. 简易诊断和精密诊断

简易诊断：使用便携式监测和诊断仪器，一般由现场作业人员实施，能对机械设备的运行状态迅速有效地作出概括评价。它具有下列功能：

- (1) 机械设备的应力状态和趋向控制、超差报警、异常应力的检测；
- (2) 机械设备的劣化和故障的趋向控制、超差报警及早期发现（功能方面）；
- (3) 机械设备的监测与保护，及早发现有问题的设备。

精密诊断：使用多种高端仪器设备，一般由故障诊断专家来实施。它具有下列功能：

- (1) 确定故障的部位和模式，了解故障产生的原因；
- (2) 估算故障的危险程度，预测其发展趋势，考量剩余寿命；
- (3) 确定消除故障、改善机械设备状态的方法。

三、机械故障诊断技术和方法简述

故障诊断技术和方法很多，必须结合设备故障的特点来获取故障征兆的有效信号，并且相应地采用不同的诊断技术和方法。常用的典型诊断技术和方法简述如下：

(一) 诊断技术

对比正常机器或结构的动态性(如固有频率、振型、传递函数等)与异常机器或结构的动态特性的不同,来判断机器或结构是否存在故障的技术被称为振动诊断技术。对于在生产中连续运行的机械设备,根据它在运行中的代表其动态特性的振动信号,采用振动诊断技术可以在不停机的条件下实现在线监测和故障诊断。对于静态设备或工程结构,可以对它施加人工激励,然后根据反映其动态特性的响应,采用振动诊断技术可以判断出是否存在损伤或裂纹。振动诊断技术所采用的方法可以有很多,如振动特征分析、振动频谱分析、振动倒谱分析、振动包络分析、振动全息谱分析、振动三维图分析、振动超工频或亚工频频谱波分析、振动时域分析、振动模态分析等。振动诊断技术在机械设备故障诊断中应用得十分广泛,且方便、可靠。

另外,在产品的无损检验中,振动诊断也有它的特殊地位,例如,焊接和胶接的质量用超声波或X射线透视无法准确判别的情况下,用振动诊断可以清晰地区别缺陷及部位。又如,铝合金自行车车架是用高强度航空胶黏结的,往往由于黏结表面清理不干净,产生假黏结现象,胶充满了黏结空间,而实际上是虚黏,若用X射线和超声波探测并无异常现象,而用振动诊断却可以很准确地区别胶接质量的好坏。

(二) 声学诊断技术

声学诊断技术一般包括噪声诊断技术、超声诊断技术和声发射诊断技术。

噪声诊断技术是采集机械设备运行时所发出的噪声,并进行相应的信号处理、分析和诊断,来判断机器运行的状态是否正常,以及异常时的部位、大小、严重程度。对于工程结构和机械零件的损伤常采用敲击声诊断法。

超声波诊断技术是对被检测设备发射出超声波,根据接收的回波来判断被检设备的正常与否。它常用于现场监测管道腐蚀、铸锻件缺陷、柴油机活塞裂纹等。

声发射诊断技术是根据金属材料发生故障时,通过晶界位移所释放出来的弹性应力波的大小、形态、频率等来判断金属结构的故障部位、大小及严重程度。声发射诊断技术主要用于检测、诊断金属构件的裂纹发生和发展、应变老化、周期性超载焊接质量等方面。

(三) 温度诊断技术

大多数机械设备的运行状态都与温度相关。例如,传热率与温度梯度和原动机与加工设备的性能密切相关,因此,根据系统及其周围环境温度的变化,可以识别系统运行状态的变化。温度监测技术在机械设备诊断中是最早采用的一种技术,随着现代热力学传感器和检测技术的发展,温度诊断技术已经成为故障诊断技术的重要方向。常用的方法有:

(1) 一般温度监测诊断技术:以温度、温差、温度场的变化为检测目标,采用各种类型的温度传感器,进行不同状态量的比较和分析。

(2) 红外监测诊断技术：采用红外测温或红外热成像技术，进行各种不同状态的识别、分析和诊断。

(四) 油液分析诊断技术

油液分析诊断技术主要有铁谱技术、光谱技术和磁塞技术。较为普及的是磁塞技术和铁谱技术。

磁塞技术即利用安装在机器循环润滑油箱底部的磁性塞子，吸附润滑油中的铁磁性磨粒，并依此判断机器运行状态的一项技术。磁塞技术对于机器故障中后期或者突发故障的判断较为准确。

铁谱技术是以机器润滑油中的金属磨粒为标本，检测时使其梯度沉积在观察玻璃片上，通过显微镜进行观察、分析和诊断，是一种不解体的检验方法。因为可以观察较为细小的磨粒沉积，所以可以判断早期的机械故障。

四、机械故障诊断技术的应用现状

机械故障诊断技术非常适合于下列几种设备：

- (1) 生产中的重大关键设备，包括生产流水线上的设备和没有备用机组的大型机器；
- (2) 不能接近检查、不能解体检查的重要设备；
- (3) 维修困难、维修成本高的设备；
- (4) 没有备品备件，或备品备件昂贵的设备；
- (5) 从人身安全、环境保护等方面考虑，必须采用故障诊断技术的设备；
- (6) 需要使用故障诊断技术的一般设备。

目前，设备故障诊断技术已经普及应用到各种行业的各类机械设备以及重要零部件的故障监测、分析、识别和诊断。

机械故障诊断技术已经发展成为一门独立的、跨学科的综合信息处理与分析技术。它基于可靠性理论、信息论、控制论和系统论，以现代测试仪器、计算机和网络技术为技术手段，结合各种诊断对象（系统、设备、机器、装置、工程结构、工艺过程等）的特殊规律而逐步形成的一门新兴学科。它大体上分为三个部分：第一部分为机械故障诊断物理、化学过程的研究，如对机械零部件失效的腐蚀、蠕变、疲劳、氧化、断裂、磨损等机理的研究；第二部分为机械故障诊断信息学的研究，它主要研究故障信号的采集、选择、处理与分析过程，如通过传感器采集设备运行中的信号（振动、转速等），再经过时域与频域上的分析处理来识别和评价所处的状态或故障发生部位产生故障的原因；第三部分为故障诊断逻辑与数学原理方面的研究，主要是通过逻辑方法、模型方法、推论方法及人工智能方法，根据可观测的设备故障表征来确定进一步的检测分析，最终判断机械故障发生的部位和产生故障的原因。

机械故障诊断技术还可以划分为传统的故障诊断方法、数学诊断方法和智能诊断方法。