

# 设备机械故障预测技术

唐德修 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

# 前 言

现代工业生产设备和国防装备逐步向自动化、智能化、大型化、连续化、高速化发展，功能越来越多、结构越来越复杂，因此由设备故障造成损失的代价越来越昂贵，直接影响着经济效益和国防安全，所以人们越来越重视对设备机械故障的预测。随着现代科学技术突飞猛进的发展，在技术上已经可以改变对设备故障突发性没有有效手段预测的状态，这就是设备故障预测技术应运而生的背景。

设备故障预测技术的重点不在于研究故障的本身，而在于掌握研究故障先兆状态判别的方法。故障先兆判别就是在还没有形成故障之前，准确判别设备状态，采取最科学、最合理的措施杜绝设备故障的发生与恶化，这对于现代设备管理来说是一次革命性突破。

对设备故障预测技术的基本要求是根据设备运行过程中产生的各种信息，随时全面、准确、自动地判别设备是否正常运行，或设备已经出现了异常的先兆，并准确判定可能产生故障的原因和部位，及时预测、预报，提供设备运行的技术状况和技术参数。

设备的故障是多种多样的，有机械故障和电气故障之分，就目前机电一体化的各种设备而言，往往机械故障和电气故障同时出现在设备使用过程中。但机械故障与电气故障的预测技术还是有区别的，本书主要讨论设备机械故障的预测技术。

设备机械故障预测技术就是在设备没有“病”之前就提前对设备运行现状在“完全正常”或“开始异常”之间进行判别，它是预测设备运行状态未来走向的一项新兴技术，与设备诊断技术有密切的联系，但也有特定的区别。

广义意义上的设备故障诊断是在异常与故障时段进行判断，而故障预测是在正常与异常时段进行判断。由于设备故障预测比设备故障诊断提前了一个时间段，并能够提供可能发生故障的部位、性质、类别、程度、原因等重要信息，为预防、控制、调整、维修、治理、恢复设备技术状态赢得了时间，因此它对提高设备使用的合理性、运行的安全性与经济性都更具积极重要的意义，特别是对于不允许出了故障再来诊断处理的设备而言就更加至关重要了。

设备机械故障预测技术是建立在现代科学技术基础上的一项系统工程，涉及理论力学、材料力学、结构力学、机械动力学、摩擦学、传感技术、数据采集技术、信号处理技术、频谱分析技术、人工智能技术、模式识别技术、专家系统以及计算机应用和网络通信等诸多学科，是机电一体化+计算机智能控制处理系统+通讯技术的综合运用技术。设备机械故障预测技术使设备机械管理走上了电子化、智能化的方向，也使设备管理从传统的使用阶段向前推进到了设备设计阶段、向后延伸到了设备改进阶段，需要设备设计者、设备制造者、设备使用者三者结合才能完成。所以，设备机械故障预测技术是一门建立在实践基础之上，融合多种

学科知识的新兴综合性实用技术，是现代设备管理的发展方向。

本书由唐德修著，李晓可为本书的成书做了大量工作，在此表示衷心的感谢。

作者仅从生产和科研实践的某些方面对设备机械故障预测技术的运用谈点体会，对于这样一门新兴的、牵涉面很广的综合性实用技术而言，实在是管中观豹，希望此书能起到抛砖引玉的作用，以引起有关人员对此问题的关注。

欢迎读者对书中的不足及错误提出批评指正。

作 者

2007年1月于成都

# 目 录

<b>第一章 设备机械故障预测的必要性</b> .....	1
第一节 设备机械故障预测的基本概念 .....	1
第二节 设备机械故障对经济的影响 .....	3
第三节 设备机械故障预测技术的发展过程 .....	4
第四节 设备机械故障预测的依据 .....	5
第五节 从故障诊断到故障预测是设备机械管理的发展方向 .....	6
<b>第二章 设备机械故障的主要形式</b> .....	7
第一节 对设备机械故障的认识 .....	7
第二节 设备机械零件失效的主要形式 .....	9
<b>第三章 设备故障预测的基础</b> .....	14
第一节 设备故障预测的要点——故障先兆参数 .....	14
第二节 设备机械故障先兆的界定 .....	19
<b>第四章 设备故障先兆的判别方法</b> .....	29
第一节 设备机械故障的模糊判别法 .....	29
第二节 设备机械故障的人工神经网络判别方法 .....	39
<b>第五章 摩擦与润滑</b> .....	47
第一节 摩擦基础理论 .....	47
第二节 润滑油油液分析技术 .....	53
第三节 润滑油油液分析技术的内容、方法与步骤 .....	57
<b>第六章 铁谱磨粒分析技术</b> .....	61
第一节 铁谱磨粒分析技术的基本方法 .....	61
第二节 铁谱磨粒分析技术的应用与发展方向 .....	62
第三节 铁谱磨粒分析技术的工艺过程 .....	63
第四节 磨损微粒在润滑系统中的运动 .....	85
<b>第七章 铁谱片的识别</b> .....	88
第一节 铁谱片的显微镜观察 .....	88
第二节 元素光谱分析技术 .....	113
第三节 在用润滑油理化分析技术 .....	16

<b>第八章 机械润滑状态预测</b> .....	121
第一节 机械设备润滑系统状态监测 .....	121
第二节 润滑预测方法的发展 .....	127
第三节 现代材料分析法简介 .....	136
<b>第九章 设备故障预测应用实例</b> .....	143
第一节 轴承是设备故障预测的重点对象 .....	143
第二节 轴承在汽车上的应用 .....	151
第三节 齿轮在汽车上的应用 .....	154
第四节 密封元件在设备上的应用 .....	158
第五节 汽车常见磨损故障 .....	164
第六节 汽车故障预测的实例 .....	170
<b>后记</b> .....	182
<b>参考文献</b> .....	183

# 第一章 设备机械故障 预测的必要性

设备的故障是多种多样的，有机械故障和电气故障之分，就目前机电一体化的各种设备而言，往往机械故障和电气故障同时出现在设备使用过程中。不同的故障会以自己的特征、特性向外发出设备状态的信号（通常称为故障先兆），收集、分析这些故障先兆，使认识、预测和诊断设备是否处在正常运行状态或可能出现故障状态成为可能。

设备故障预测技术的重点不在于研究故障的本身，而在于掌握研究故障先兆状态判别的方法。故障先兆判别就是在还没有形成故障之前，准确判别设备状态，以便采取最科学、最合理的措施杜绝设备故障的发生与发展，这对于现代设备管理来说是一次革命性突破。特别是对于大型设备、重要生产线、民用船舶、军用舰船、大型装备、航天航空器等，这样一些设备出现故障就可能造成巨大的损失。

本书主要讨论设备机械故障预测技术。

## 第一节 设备机械故障预测的基本概念

对设备故障预测技术的基本要求是根据设备机械运行过程中产生的各种信息，且利用这些信息可随时全面、准确、自动地判别设备机械是否正常运行，或设备机械已经出现了异常的先兆，并准确判定可能产生故障的原因和部位，及时预测、预报，提供设备运行的技术状况和技术参数指标。

### 一、设备机械故障的概念

一台（或一套）设备机械的某项功能的技术指标低于设计技术参数的极限值时，通常就称这项功能技术指标出现了故障。如果故障指标的项数超过设计规定的上限，或规定的某一项或某几项重要指标超标时，就称这台（或这套）设备有了严重的机械故障。

通常概念上的设备（或零件）正常是指它没有任何缺陷，或者虽有缺陷但在设计允许值

范围内；异常则是缺陷已有一定程度的扩展，使设备状态信号发生了变化，设备性能出现劣化现象，但仍能维持工作；故障则是指设备机械性能严重超过设计指标，已不能正常工作的状态。

故障包括：

- (1) 会降低设备性能的使用性故障。
- (2) 使系统立即丧失基本功能的破坏性故障。
- (3) 操作事故造成的人为破坏性恶性故障。

除恶性故障外，其他的设备故障总是由某种微小缺陷引起，到不断积累、扩大，进一步向恶化发展而出现异常的，即要经历正常→异常→故障的发展过程。

## 二、设备机械故障预测的概念

设备机械故障预测技术就是在设备没有“病”之前就提前对设备运行现状在“完全正常”或“开始异常”之间进行判别，以预测设备运行状态未来走向的一项新兴技术。

通常意义上的设备故障诊断是在异常与故障时段进行判断，而故障预测是在正常与异常时段进行判断，辅之以对异常与故障之间的判断如图 1.1 所示。由于设备故障预测比设备故障诊断提前了一个时间段，并能够提供可能发生故障的部位、性质、类别、程度、原因等重要信息，为预防、控制、调整、维修、治理、恢复设备技术状态赢得了时间，因此它对提高设备使用的合理性、运行的安全性与经济性都更具积极重要的意义，特别是对于不允许出了故障再来诊断处理的设备（如船舶、飞机、航天器等）或设备多、流程长、停产影响大的自动生产线而言，设备机械故障预测的意义更加至关重要了。

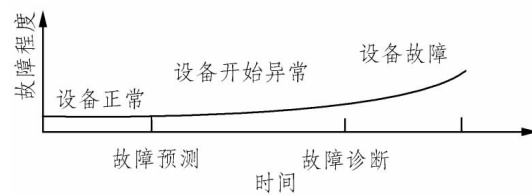


图 1.1 故障预测与故障诊断

设备机械故障预测最重要的工作首先是界定“完全正常”或“开始异常”，然后才是对“开始异常”的状态进行分析和预测。如果说“完全正常”是“0”，“开始异常”是“1”，对“0”或“1”的判断正是计算机最容易完成的任务，故设备故障预测技术是依靠计算机网络来完成的一项系统工程技术。

设备机械故障预测包含两方面的内容：一是对设备的运行状态进行监测，判断是“0”或是“1”，二是对设备的运行状态进行判断，如果是“0”则应报平安；发现为“1”，则对设备的故障先兆进行分析、诊断，并提出处理建议，供专家决策参考，因此设备故障预测系统必须是一个智能化的控制系统。

设备机械故障预测的任务有四个：

- (1) 从设备机械故障预测的思路出发设计设备机械，给设备布置神经网络和判断大脑。
- (2) 对设备进行正常与异常的判断。
- (3) 对强制操作有病设备的蛮干行为进行干涉直至制止。
- (4) 为设计下一代更新型的设备积累数据和经验。

## 第二节 设备机械故障对经济的影响

保证生产正常进行的关键是使生产线所有设备都正常运行。现代工业生产设备和国防装备逐步向自动化、智能化、大型化、连续化、高速化发展，功能越来越多、结构越来越复杂，因此由设备故障造成损失的代价越来越昂贵。设备机械只要运转迟早都会出现故障，如果在设备出了问题后才被迫进行非计划停产维修，会带来经济上的巨大损失，不停产带病工作又有可能引起设备机械严重损害，甚至造成重大安全事故。消除设备隐患与坚持生产是一对在时间、空间、人员、资金等全方位相互联系又相互排斥的矛盾。

目前工业企业对设备机械的维护普遍采用视时维护（time-based maintenance）制度，即无论设备是否发生故障，都对其进行定期检修。这样的检修制度优点是计划性强，缺点是时间占用多、空间需要大、备品备件储备量大、人员结构及储备多、资金占有和消耗大。如果检修周期间隔时间短，会减少生产时间，降低利润，出现设备过维护现象，造成资源浪费；如果检修周期间隔时间长，又可能在两次检修之间发生设备机械故障，形成设备欠维护，没有达到定期检修之目的。比较利润与安全，要么是牺牲利润保安全，要么是牺牲安全保利润。为了减少设备故障，国内外工业企业投入了大量人力、物力和资金用于设备的系统维护，并期望能尽量延长正常运行的周期，但由于没有可靠的技术措施和有效的技术手段对设备系统运行状态进行精确的判断和准确的分析，出于安全的考虑，只好对系统设备大面积地定期检查和维护保养，自然会产生大量的不必要的过维修。这种缺乏科学依据的维护，带有一定的盲目性，大大增加了运行成本和生产成本，同时很多人为了的因素还会造成设备精度下降，造成时间、空间、人员、资金和资源的浪费，降低了经济效益。

国防装备如果采用过维修的办法势必降低在役装备的使用率，从而降低战斗力，从理论上讲国防装备的重要性是不允许采用欠维修的办法维持的，为保障在役装备的可靠性势必增加装备配备、维护保养设备配备，增加人员配置，因而大大增加了国防开支，为此准确确定恰当、适时的维护保养措施就更为重要了。

显然传统的设备维护保养措施已经不能适应现代工业生产发展需求，而随着现代科学技术突飞猛进的发展，在技术上已经可以使“没有有效手段”的状态得到彻底改变，这就是设备故障预测技术应运而生的背景。

设备故障预测可以在设备运行全过程中对设备进行实时状态监控，当设备有一点“不对劲”（或称为开始出现异常的前期）时发出预报，一旦这种“不对劲”达到故障先兆的水平时，就自动发出警报，敦促操作人员和相关技术人员及时采取有的放矢的措施，从容不迫地防止先兆继续恶化形成故障。这样，就可以合理地、经济地解决利润和安全之间的矛盾，在保证安全基础上，大幅度提高设备机械利用率，降低设备维护保养及更换费用。所以设备故障预测技术是一门新兴的产业技术，设备故障预测技术的应用是大规模生产的又一次革命，设备故障预测技术的推广具有重大的环境效益、社会效益和经济效益，为各行业工业设备安全运行，管理规范化提供了必要的条件，它是一门有生命力的现代设备管理技术。

## 第三节 设备机械故障预测技术的发展过程

正因为设备机械的故障直接影响着经济效益，所以人们十分重视对设备机械故障的预测。自从人类制造并使用设备机械后，设备机械在为人类创造财富的同时，机毁人亡的恶性事故屡见不鲜，为了避免生命和财产的损失，人们与设备机械故障一直进行着不懈的斗争，尽一切可能减少故障造成的危害。防止设备故障的历史大致可以分为以下四个阶段：

### 一、经验判断阶段

这个阶段的特点是当故障发生后才知道故障部位，往往要等设备解体后才知道发生故障的原因，事前对故障的预测和分析只能借助以往的经验以及一些简单的仪器，故现场经验对设备维护人员是十分重要的。这一阶段，设备故障的漏判、错判经常发生，不能保证设备机械的安全经济运行。20世纪40年代以前的设备管理处于初级阶段时，大多采用这种方法维持设备的运转。

### 二、故障预防阶段

这个阶段的特点是以合理的周期维护保养措施（大修、中修、小修和班前巡回检查制度）与突发性故障抢修相结合的制度来保证设备安全正常运行。这一阶段的诊断手段主要是一些简单的状态检测仪，设定有运行参数（如温度表、压力表、电流表等）的报警值，操作维护人员对设备运行状态的定期维护保养措施和巡回检查制度，是防止故障发生的主要保障措施。在第二次世界大战以后，经济发展走上了正规化、科学化的道路，设备管理也开始探索计划性和科学性的成功经验。当时，人们把设备周期维护保养制度和突发性故障抢修制度相结合，由被动地承受设备机械故障到主动预防设备机械故障作为最有效的技术手段，这个过程一直持续到20世纪的70年代初。

### 三、故障诊断阶段

这个阶段的特点是依靠有经验的技术人员和专用诊断仪器，对重点部位进行故障判断，重点在于有了故障能及时判断并找到故障的部位以及产生原因，处理方法则以人的经验为主。从20世纪70年代开始，周期维护保养在资金占有、备品备件储备、仓库配置、人员配备上的臃肿和零、部件浪费性替换是造成利润低下的重要原因被人们逐渐意识到，于是企图通过“点检”的手段在事前发现故障的思路在设备管理中得到认可，经过大约10年的摸索，孤立地以熟练的技术工人和工程技术人员为主的事前发现事故隐患的情况，远远不能保障大规模生产对设备运行状况的要求，但这个阶段的实践启发人们要用高科技的手段开展设备故障的预防工作，为故障预测技术打下了基础。

## 四、故障预测阶段

从 20 世纪 80 年代开始了故障预测阶段的尝试，这个阶段的特点是以大规模人工神经网络为依托，以信号采集与处理为中心，多层次、多角度地利用各种信息，对设备机械的运行状态进行全面的自动监控。监控的方法首先是判断正常“0”或是异常“1”，再对异常先兆进行判断，显示出异常的部位、“病症”，以及异常的程度等，根据信息处理中心（即电脑智能控制处理系统）分析判别发出“继续运行”、“处理后才能运行”、“立即停机”的处理意见及强制停机的处理措施。

### 第四节 设备机械故障预测的依据

设备机械的故障有多种，不同种类的故障将会在相应的状态信号中反映出一系列特征信息（通常称为故障先兆），这些特征信息是设备状态或故障能被认识、预测和诊断的客观基础。

设备故障预测技术的重点不在于研究故障的本身，而在于研究故障先兆信号的采集和识别方法。

设备机械故障预测的实质就是故障先兆的判别，这个过程主要有四个步骤：

第一步，检测设备机械运行的状态信号（如振动、噪声、温度、形变、位移、磨损等）；

第二步，从所检测到的信号中提取特征信息（故障先兆）；

第三步，故障的模式识别；

第四步，提出处理意见。

对设备故障预测技术的基本要求就是能根据设备机械运行过程中产生的各种信息，随时全面、准确、自动地判别设备机械是否正常运行，或设备机械已经出现了异常的先兆，并准确判定可能产生故障的原因和部位，及时预测、预报提供设备运行的技术状况和技术参数指标。

设备故障预测的方法很多，常用的有以下几种：

（1）统计预测法。根据模式判别理论，对故障先兆与正常状态进行统计，根据统计结果做出故障先兆预测。

（2）智能预测法。采用人工神经网络加电脑智能控制处理系统对故障先兆进行人工智能分析，并进行推理、理解、学习、抽象、决策等处理，直至提出专家处理意见。

（3）模糊预测法。模仿人，用模糊逻辑判别事物的方法，利用模糊数学的方法，根据计算出向量元素的特点确定故障的先兆因素。

（4）逻辑预测法。通过对故障先兆与故障之间，故障先兆与正常之间逻辑关系的推理，分析判别设备状态。

（5）对比预测法。这是一种较容易推广的方法，事先通过各种方法确定正常的状态，然后采集故障先兆与之对比，来判别设备的状态。

（6）函数预测法。在故障先兆与正常之间存在函数关系时，就可以用此法进行数学函数关系计算，得出设备运转情况。

各种预测方法不是孤立的，相互之间有很多相似的、共性的东西，在实际故障预测中经常融会贯通地使用，取长补短，共同实现设备机械故障的预测。

还要指出，设备机械故障预测技术毕竟还不是很成熟的技术，还在不断的完善之中。

## 第五节 从故障诊断到故障预测 是设备机械管理的发展方向

设备机械故障预测技术是建立在现代科学技术基础上的一项系统工程，涉及理论力学、材料力学、结构力学、机械动力学、摩擦学、传感技术、数据采集技术、信号处理技术、频谱分析技术、人工智能技术、模式识别技术、专家系统，以及计算机应用和网络通信等诸多学科，是机电一体化+计算机智能控制处理系统+通讯技术的综合运用技术。设备机械故障预测技术使设备机械管理走上了电子化、智能化的方向，也使设备管理从传统的使用阶段向前推进到了设备设计阶段，向后延伸到了设备改进阶段，需要设备设计者、设备制造者、设备使用者三者结合才能完成。

设备机械故障预测技术的目的是保证设计、制造出符合用户使用要求的智能设备，保证设备可靠地、有效地运行，确保生产节奏不因设备突发性机械故障而打乱。这套技术使设备管理真正从被动应付故障变成了主动预测并控制故障，因而使设备管理进入了现代化的阶段。它使设备管理涵盖了四个方面的内容：

- (1) 通过性能评价为优化设计、正确制造设备提供数据和信息。
- (2) 保证设备无故障、安全可靠运行。
- (3) 能及时准确、正确地对各种异常先兆进行诊断，并指导、提供必要的干预措施（包括控制、调整、维修、治理及继续监控等）。
- (4) 保证设备维护费用最低，以取得最佳经济效益。

所以，设备机械故障预测技术是一门建立在实践基础之上，从设计、制造、使用、维护保养等统一的，通盘联系的，并融合多种学科知识的新兴综合性实用技术，是现代设备管理的发展方向。

## 第二章 设备机械故障的主要形式

引起设备机械故障的性质不同，故障预测与诊断的方法也不同，故对设备机械故障必须加以分类，以利于针对不同的故障，设计出不同的预测方法。

### 第一节 对设备机械故障的认识

#### 一、设备机械故障理论

设备在投入使用后，不管使用与否都会发生有形磨损和无形磨损，它使设备产生暂时性故障（不经换件就可以恢复的故障）或永久性故障（必须要更换损坏零件才能恢复的故障）。设备在使用过程中故障是必然要发生的现象，故障使设备丧失功能，这有可能带来灾难性的后果，预防故障的发生是设备管理最关注的问题。

设备故障理论是近年来形成的一个新理论，包括故障统计分析理论和故障物理分析理论两部分内容。故障统计分析是用可靠性理论从宏观现象上定性和定量地分析故障，从故障发生、发展的过程中找出故障的特点和规律，抽象出特征模型；故障物理分析是用先进的测试方法，从宏观或微观角度测试设备物理参数和化学参数的变化，根据测试结果来分析设备的劣化、损坏过程，从中找出故障的特点和规律，建立故障先兆模型。设备故障理论与数学理论，自动控制理论，计算机网络理论共同构成设备故障预测的基础理论。

#### 二、设备机械故障分类

设备机械故障分类的形式很多，不同分类的形式会有不同的分类方法，按故障形式可分为结构型故障（如裂纹、磨损、腐蚀、疲劳、点蚀、不平衡、不对称等）与参数型故障（如流体涡动、共振、配合间隙、过热等）；按危险的程度可分为危险性故障与非危险性故障；按发生的快慢可分为突发性故障与渐发性故障；按影响程度可分为整体性故障与局部性故障；按持续的时间可分为持续性故障与临时性故障；按产生的原因可分为先天性故障、劣化性故障与错用性故障，等等。显然，设备机械故障预测系统对那些会造成灾难性的损失、比较难于防范的故障要优先预测，设计者在设计过程中要针对设备故障预测系统的危

险性、突发性、整体性、局部性、持续性故障进行早期预测设计。本书从以下几个方面认识设备故障分类：

### 1. 按学科归属分类

按学科归属将设备故障分为机械故障与电气故障。

(1) 机械故障。由于机械零件失效引发的故障，造成运动与动力传递中断。

(2) 电气故障。由于电气元件失效引发的故障，造成控制指令传递中断或指令不协调。

### 2. 按影响范围分类

有些故障影响范围是整体性的，有些故障影响范围是局部性的。前者称为整体性故障，后者称为局部性故障。

(1) 整体性故障。影响范围大或者影响程度深，使设备整体工作全面受到干扰。

(2) 局部性故障。影响范围小，失去某一项或几项使用功能，但对整体主要功能影响不大。

### 3. 按设备故障性质分类

引起设备故障的原因可能是因为零件功能丧失，也可能是因为某项精度下降，前者引起的故障称为结构型故障，后者引起的故障称为精度型故障，结构型故障使设备不能工作，精度型故障使设备的工作能力下降。

(1) 结构型故障。设备不能继续完成预定功能的故障。

(2) 精度型故障。设备实际参数超出设计允许的极限值造成工作精度下降的故障。

### 4. 按故障存在形式分类

故障存在的形式多种多样，按统计的时刻为界来区分可以归纳已经发生了的故障和将要发生的故障，前者称为存在性故障，后者称为潜在性故障。谁的危害性更大要根据具体情况分析，不能片面地、机械地认为存在性故障一定比潜在性故障危害大。在生产实际中，严格执行机械设备的操作规程和维护保养规程是非常重要的，这样可以减少潜在性故障可能发生的条件，避免存在性故障产生的可能。

(1) 存在性故障。在设备上已经存在并表现出来的故障。

(2) 潜在性故障。由于各种原因在设备上虽然已存在，但还没有表现出来的故障苗头，如果条件一旦具备，就容易产生的故障。

### 5. 按设备故障危害性分类

尽管设备故障都是不好的，但在实际生产中有些故障一旦发生就会产生严重的后果，轻者设备损坏，重者造成人员伤亡等事故；而有一些故障即使发生了，也没什么损失，前者称为灾害性故障，后者称为一般性故障，灾害性故障应当完全避免。

(1) 灾害性故障。一旦发生会导致严重后果的故障，这类故障必须立即停机处理。

(2) 一般性故障。不会造成明显损失的故障，但可能降低设备性能、影响使用、影响生产效率等后果，这类故障应当尽快处理，以防故障进一步恶化。

### 6. 按设备故障产生的原因分类

设备故障产生的原因总是与时间有关系的，这称为时间相关故障，时间相关故障又分为积累性劣化故障与错用故障，前者有积累性，后者有突发性。

(1) 积累性劣化故障。机械设备投入使用后，在载荷作用下，随着时间的延长，零件将发生磨损、腐蚀、疲劳、蠕变、金属材料组织改变、非金属材料老化等变化，这些变化将使机械设备的功能随时间增长而逐渐降低，这样的故障称为积累性劣化故障。

(2) 错用故障。因超载、超速、违反操作规程、违反维护保养规程造成的故障，是操作者人为的错误造成的故障，简称错用故障。

#### 7. 按设备故障发生的速度分类

设备故障发生的速度有快有慢，有些故障可以预测到，而有些故障产生速度极快，不易预测到，速度快慢造成的损失也是不一样的，因此分为不易监测故障和易监测故障。

(1) 不易监测故障。当设备因不能承受各种超出了自身所能承受的极限载荷，而迅速发生的故障称为不易监测故障。这类故障的特征是发生时与设备的当时状态变化有关，与设备已使用周期无关，具有一定的偶然性和突发性。

(2) 易监测故障。设备老化过程而造成的故障，这类故障的特征是发生时既与设备已工作过的时间有关，也与发生时的使用状态有关。设备使用周期越长、设备利用率越高，发生故障的概率就越高。这类故障大多是可以监测的。

#### 8. 按设备故障存在的时间分类

设备故障产生以后，存在的时间长短不一样，造成的影响也不一样，称为存在性故障，分为临时性故障和持续性故障。

(1) 临时性故障。短时间发生的丧失某些局部功能的故障。这种故障发生后不需要修复或更换零、部件，只要对故障部位进行调整即可恢复丧失的功能。

(2) 持续性故障。造成设备某些功能丧失，一直持续到更换或修复故障零、部件后，才能恢复工作能力的故障。

设备故障分类的角度不一样，就会产生不同的分类结论，给故障分类的目的是为更准确地预测故障、判断故障、处理故障打下基础，随着现代科学技术的发展，将会有新的故障分类法产生，故应当动态地、灵活地看待故障的分类，更好地为设备故障管理服务。

## 第二节 设备机械零件失效的主要形式

### 一、设备故障的基点是零件的失效

设备是由多个部件组成的，部件又是由许多零件构成的，零件是设备的制造单元，许多设备出现故障都是由于零件失效造成的，失效原因分为先天性原因、后天性原因、综合性原因和操作性原因。

#### 1. 先天性原因是指设备运转之前就存在的引发失效的原因

(1) 设计缺陷（强度不够、刚度不够、精度不够、表面粗糙度不够、结构有缺陷、应力集中、对称性差、选材不当、热处理不当等）。

- (2) 加工缺陷（加工误差超标，加工损伤、脱碳、晶粒粗大，加工变形等）。
- (3) 组装缺陷（间隙过大过小、组装误差超标、组装过程损伤等）。
- (4) 材料内部缺陷（缩孔、疏松、裂纹、不均、杂质超标、合金元素配置不当等），运输损伤（吊装不当、运输碰撞、保管不当等）。
- (5) 安装误差（基础设计不当、与别的设备配置不当、周围环境不适等）。

**2. 后天性原因是指设备在运转过程中产生的引发失效的原因**

- (1) 超载（过载损伤）。
- (2) 超时（疲劳损伤）。
- (3) 水电气油不符合要求（运行材料）。
- (4) 运行温度不当等（运行环境）。

**3. 综合原因是指先天就存在隐患问题，但还不足以形成缺陷，在后天因素的激发下形成的引发失效的原因**

**4. 操作性原因是指操作人员操作方法不当引发失效的原因**

以上四个原因对设备的运行状况和寿命都有重要的影响，也是提高设备管理质量要抓好的工作，世界上创造出知名品牌的企业正是从这四个方面下手抓好全面质量管理工作，加强操作培训工作，以及加强售后服务工作，才能创造出用户信得过的产品，逐步形成知名品牌。

本书重点讨论设备在运行过程中零件失效引起的设备故障问题。

## 二、机械零件的主要失效形式

按照失效机理，机械零件主要失效形式有磨损、形变、断裂、裂纹、腐蚀等，如表 2.1 所示。

表 2.1 机械零件主要失效形式

失效名称	失效机理	失效原因
磨损	磨粒磨损、胶合磨损、腐蚀磨损、表面疲劳磨损	机械摩擦、瞬时局部高温、表面局部应力
形变	弹性变形、塑性变形	机械载荷
断裂	静载断裂 冲击断裂 疲劳断裂	过载静力 冲击载荷 疲劳过载
裂纹	使用裂纹、工艺裂纹	应力集中
腐蚀	化学腐蚀、电化学腐蚀	化学反应、电化学作用

**1. 磨损失效**

机械零件间相互接触，又有相对运动的零、部件，由于摩擦力的作用摩擦副表面不断有物质脱落、损失的现象称为机械磨损，引起机械磨损的原因是接触表面的应力超过了接触物

体材料表面的强度极限，造成材料局部断裂、脱落。引起应力超标的原因不同，机械磨损也表现出不同的形态。

(1) 微粒磨损。摩擦副表面有微粒存在且因润滑不好，不能及时把这些微粒冲走，是产生微粒磨损的主要原因之一，微粒磨损主要发生在开式传动的摩擦副间。

(2) 胶合磨损。在负荷作用下，快速运动引起摩擦副局部高温、高压，造成部分硬接触点间熔融而粘连、撕裂再被碾压的循环过程所形成的破坏称为胶合磨损。

(3) 腐蚀磨损。两种不同电离度的金属接触表面在电解液作用下，形成原电池，产生电离作用引起物质脱落，形成的破坏称为腐蚀磨损。

(4) 表面疲劳磨损。摩擦副间在表面接触应力的反复作用下，局部接触部位因冷作硬化作用逐渐脆化，材料弹性逐渐降低，反复变形部位应力逐渐集中，逐渐超过材料的许用应力，逐渐形成微小裂纹，在应力的继续反复作用下，微小裂纹逐渐扩展，润滑油侵入裂纹之中后因碾压形成的高压加速了微小裂纹向表面的扩展，最终产生片状脱落，在表面引发小坑状的细小麻点，改变零件表面形状、尺寸和粗糙度，这种失效称为表面疲劳磨损。表面疲劳磨损又称疲劳点蚀，主要发生在有交变载荷作用、重载、高速、润滑良好的摩擦副间。

## 2. 形变失效

零件在外力作用下总是要发生变形的，但变形的范围必须在允许范围内才能保证零件正常工作，如果超过允许值则称为零件发生了形变失效。

(1) 弹性变形失效。零件受到应力作用，在屈服极限以内的变形称为弹性变形，当引起变形的载荷解除以后，弹性变形能够完全消除。弹性变形分比例弹性变形和非比例弹性变形，前者的变形量与载荷成正比，后者尽管仍然是弹性变形，但没有比例关系。零件发生超过允许值的弹性变形后造成的失效使设备精度降低，配合关系改变，引发设备故障，这种失效称为弹性变形失效。

(2) 塑性变形失效。零件受到的应力超过材料的屈服极限就会引发塑性变形，塑性变形是在弹性变形基础上的进一步变形，当外载荷解除后，弹性变形部分恢复原状，塑性变形部分继续存在，使零件的几何形状和尺寸与原始设计、制造的几何形状和尺寸发生了改变，导致设备精度降低，配合关系改变，引发设备故障，如果失效严重，这将会给设备造成严重的机械故障。这种失效称为塑性变形失效。

## 3. 断裂失效

零件受到的载荷超过许用应力就有断裂的可能，从断裂的程度区分，断裂失效有局部断裂（如一个齿轮的某一轮齿的一部分断裂，齿轮仍能工作），部分断裂（如一个齿轮的一个轮齿整体断裂）和整体断裂（齿轮或轴完全断裂，设备立即不能工作）之分；从引起断裂的原因区分有静载断裂，冲击断裂和疲劳断裂之分。局部疲劳断裂与疲劳点蚀不同之处是断裂的程度不同，第一，局部疲劳断裂与疲劳点蚀有数量级的区别；第二，局部疲劳断裂受到的是对称循环整体载荷的作用，故最初产生的疲劳微小裂纹向机体的纵深发展，最后引发疲劳断裂。疲劳点蚀一般是受脉动循环接触载荷的作用，故最初产生的疲劳微小裂纹只在机体表面发展，最后在零件表面引发小坑状的疲劳点蚀。

(1) 静载断裂失效。静载断裂失效是零件受到不随时间变化或虽有变化但变化不大的重

载荷作用，这种作用产生的应力超过了材料的强度极限，发生断裂，静载断裂往往伴随有弹性和塑性变形。

(2) 冲击断裂失效。冲击断裂是零件受到快速的冲击重载荷作用产生的断裂失效，它发生的时间很短，往往来不及传递受到的冲击载荷，就在受冲击的附近应力相对集中的部位断裂。这种断裂容易发生在材料相对较硬、有冲击重载荷作用的场合。

(3) 疲劳断裂失效。疲劳断裂失效与疲劳点蚀失效之间有相同之处，即都是受到变载荷的反复作用，积累起来的失效，它们都经历微变形，硬化，裂纹发生，裂纹扩展，裂纹积累，承载面积逐渐缩小，应力不断加大，直至突然破坏的过程，但它们也有本质的不同，疲劳断裂是受整体载荷作用，在整体上发生上述变化，初始裂纹向纵深发展，最后造成整体断裂的失效；而疲劳点蚀是受局部表面接触应力反复作用，初始裂纹只在表面发展，形成表面小坑状脱落失效。

#### 4. 裂纹失效

零件在设计或加工时，由于应力集中部位承受不住载荷引起的巨大应力，就会产生裂纹失效。载荷在整体上引起的应力没有超过零件材料的许用应力，但由于某种原因造成应力集中到某一个小的区域，那么在这个区域中应力就会变得很大，甚至远远超过材料的许用应力而引发裂纹。这种裂纹与疲劳的相似之处就是逐渐发生，不同之处是应力集中是产生裂纹的主要矛盾，而引发疲劳裂纹的主要矛盾是变载荷的反复作用，集中后的应力远大于引起疲劳的应力，因而裂纹失效对设备使用寿命的影响远大于疲劳失效。由于加工工艺的需要（如小孔、退刀槽、越程槽、尖角、截面突然改变很大的部位）引起的应力集中可以在设计时加以注意避免或修改，如果由于长期使用会造成裂纹失效，则应选用好的材料来避免。

#### 5. 腐蚀失效

腐蚀失效与腐蚀磨损的相同点是它们都是由于化学反应而产生失效，腐蚀磨损是发生在摩擦副间的化学反应，破坏的是摩擦表面参数；而腐蚀失效是发生在整个零件暴露在酸性或碱性气氛中的表面，金属材料的分子与化学制剂发生了化学反应，引起物质脱落。它引起的故障要在较长的时间才能表现出来，一旦表现出来则是全局性的问题（如船体、箱体和大型建设项目），全世界每年因腐蚀产生的设备报废量是相当惊人的。

电化学腐蚀与化学腐蚀最大的不同点是在电场的推动下发生的化学反应，由于有了电场的作用，使得原来不会发生化学反应的物质也活跃起来而发生了化学反应，长久下去就产生了腐蚀脱落。

有时是多种失效综合作用引起了设备故障，故具体到设备，还要根据具体情况分析是什么原因引起了该设备发生失效。

表 2.2 是常见典型零件各种失效概率的统计数据。

引起零件失效的因素还有很多，失效形式也很多，不可能一一列举，所有失效产生原因的共同点是与载荷大小及形式、作用时间长短、工艺特性、材质好坏、结构、环境、运行材料、使用者的技术水平、职业道德等有关，只有对失效形式有了较深的认识，才能对设备故障的预测与诊断有较好的理解。