

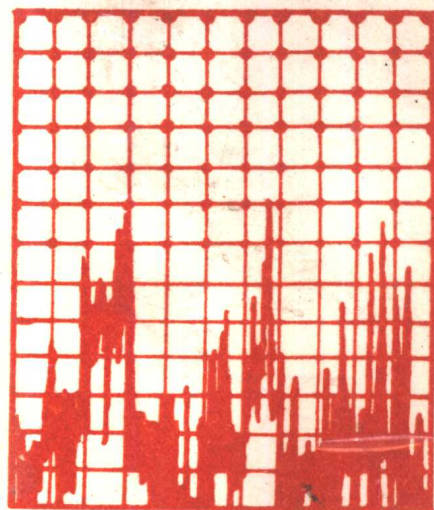
机器实用

预测性维修

APPLIED PREDICTIVE
MAINTENANCE FOR
MACHINERY

〔德〕 卡尔·申克公司

〔美〕 申克·特利贝尔公司



四川化工总厂译

• 1990 •

前 言

机器与设备的维修对于任何一家公司的经济都是至关重要的。在长时期内,生产的连续性、投资的保护、环境安全及经济效益只能由维修方法来保证,这个方法就是预测损坏从而作出修理的安排。

维修工艺正日新月异。新的策略、先进工艺和电子计算机辅助测量技术都正被引进这一领域。企业若的保障并增强其竞争能力,则势必尽快采用这些崭新的成果。

在某些特定场合下,必须首先学会并采用新技术,尔后再普及到日常的使用。

本专题研究力图在这方面提供帮助。研究工作是在工厂经理人员、维修管理人员和技术人员的指导下进行的,它提供关于机器的预测维修的信息资料。其内容包括维修的基本定义及对策、机器状态的测定及评价、机器状态监测、故障分析、早期故障探测和机器损坏的预报。尤其着重介绍了“预测性维修”,因为这是最先进的维修方法。

本研究报告也简要述及机器的预防性修理和改善性修理,相应地,也谈到了转子的现场平衡和联接轴的对中。

机器发生故障后的修理不属本专题研究的范围。但文中提出了判别故障原因及预测早期故障的手段与方法。本文不涉及机器维修、备件库存及人员素质等组织方面的问题。

作者谨希望,本文能对机器维修的合理对策提供一些方案建议,起一点有益的促进作用。

卡尔·申克公司
申克·特利贝尔

序

随着科学技术的迅猛发展，在现代工业中，人们对机器维修的观念正在发生深刻变化，从早期的损坏修理、实施多年的计划预修进入了现代的预测性维修。“工欲善其事，必先利其器”。现代化工业装置的运行周期，与其说取决于运行时间，毋宁说取决于它的运行状态。

我国工业部门机器预测性维修工作，约始于八十年代初，正处于从兴起到普及的时期，并即将迎来机器维修工作的根本变革。人们在生产实践中认识到，要提高工业装置的经济效益，必须保持装置的良好状态，提高装置的可靠性，实现安全、稳定、长周期、满负荷运行，为此，就得采用现代技术手段和管理方法，通过对装置的状态监测、故障诊断和机器评价，达到预知故障，预知寿命，从而作出预测性维修的科学决策。

这本《机器实用预测性维修》，是〔德〕卡尔·申克公司和〔美〕申克·特利贝尔公司截至1989年的最新专题研究报告。通观全篇，叙述深入浅出，内容新颖，适用面广，从基础理论到运用实践，擘肌分理，作了比较系统的介绍，对于人们转变观念，提高认识，开物成务，或许有所裨益。本书由四川化工总厂从事设备预测性维修工作的同志翻译，并得到申克公司Guehrig先生和马健生先生的支持和帮助。

它山之石，可以攻玉。

谨以此奉献给国内同行。尺有所短，寸有所长。祈望通过交流切磋，在消化吸收国外先进技术的基础上，有所创新。

是为序。

蒋岳安

谨识

一九九〇年十一月

目 录

1. 机器维修的目标、对策与经济性	(7)
1.1 目标与费用.....	(7)
1.2 对策.....	(8)
1.2.1 故障维修.....	(8)
1.2.2 预防性维修.....	(8)
1.2.3 基于状态监测的预测维修.....	(9)
1.3 经济性.....	(9)
1.3.1 维修费用.....	(9)
1.3.2 节约潜力及实例.....	(10)
2. 损坏—维修的原因	(12)
2.1 损坏的起因.....	(12)
2.1.1 维修的目的.....	(12)
2.1.2 检查.....	(13)
2.2 磨损与磨损裕量.....	(13)
2.2.1 磨损.....	(14)
2.2.1.1 磨损损坏实例.....	(14)
2.2.2 腐蚀.....	(15)
2.2.2.1 腐蚀损坏实例.....	(15)
2.2.3 疲劳.....	(16)
2.2.3.1 疲劳损坏实例.....	(16)
2.2.4 老化.....	(18)
2.2.5 磨损过程的频度分布.....	(18)
3. 评价机器状态的参数及其测量方法	(19)
3.1 机械振动.....	(20)
3.1.1 基本概念.....	(21)
3.1.1.1 周期振动.....	(21)
3.1.1.2 简谐振动.....	(21)
3.1.1.3 复合振动.....	(21)
3.1.1.4 周期振动的表达.....	(21)
3.1.1.5 机械振动的测量参数.....	(22)
3.1.1.6 简谐振动的特性.....	(23)
3.1.1.7 复合振动的特性.....	(23)
3.1.1.8 描述振动大小常用术语.....	(24)

3.1.1.9 机器振动的类型	(25)
3.1.2 轴承绝对振动	(26)
3.1.2.1 传感器	(27)
3.1.2.2 振动测量及评价规范	(29)
3.1.3 滚动轴承状况参数	(30)
3.1.4 轴的相对振动	(33)
3.1.4.1 测量参数	(35)
3.1.4.2 传感器	(36)
3.1.4.3 测量与评价规范	(40)
3.2 轴的相对轴向位置	(43)
3.3 轴的相对膨胀	(45)
3.4 机壳的绝对膨胀	(46)
3.5 其他测量参数	(47)
3.5.1 温度	(47)
3.5.1.1 传感器	(48)
3.5.2 转速与停机	(49)
3.5.3 转子偏心度	(49)
4. 检查方法	(50)
4.1 检查的时间表	(50)
4.1.1 不定期与定期检查	(51)
4.1.2 连续检查	(52)
4.2 方法解说	(52)
4.2.1 机器评价	(53)
4.2.2 机器诊断	(53)
4.2.3 机器监控	(54)
4.2.4 作定期数据采集的预测性(状态监测)维修	(55)
4.2.5 作连续数据采集的预测性维修	(55)
4.3 费用/效益分析	(55)
4.3.1 投资费用	(55)
4.3.2 效益	(56)
5. 机器评价	(57)
5.1 基本理论	(57)
5.2 机器评价实践	(58)
5.2.1 选定信息量大的测量参数	(58)
5.2.2 评价标准	(59)
5.2.2.1 与极限值比较	(60)
5.2.2.2 根据测量数据评估变化趋势	(63)
5.2.3 实例	(53)

5.3 结论	(65)
6. 机器诊断	(66)
6.1 基本原则	(66)
6.1.1 故障分析	(67)
6.1.2 滤波方法	(67)
6.1.2.1 可调制滤波器	(67)
6.1.2.2 FFT分析仪	(68)
6.1.2.3 基本原则	(70)
6.2 频率分析	(71)
6.2.1 任务与应用	(71)
6.2.2 测量过程	(71)
6.2.3 频率分析的解释	(74)
6.2.4 实例	(76)
6.2.4.1 某电机—发电机组对中误差	(76)
6.2.4.2 挖土机滚动轴承损坏	(78)
6.2.4.3 冷凝液泵驱动机电源电缆一股折断	(79)
6.3 谐波(或阶振)分析	(81)
6.3.1 任务与应用	(81)
6.3.2 测量操作	(83)
6.3.3 测量结果的解释	(83)
6.3.4 实例	(84)
6.3.4.1 由非线性行为引起的较高次谐波	(84)
6.4 谐波跟踪分析	(86)
6.4.1 任务与应用	(86)
6.4.2 传递函数	(87)
6.4.2.1 借助外力激发来测量传递函数	(87)
6.4.2.2 在升/降速过程中测定传递函数	(99)
6.4.3 实例	(91)
6.4.3.1 燃气轮机组机座变形	(92)
6.4.3.2 变速风机的共振	(93)
7. 机器监控	(94)
7.1 基本理论	(94)
7.2 机器监控实践	(94)
7.2.1 传感器	(94)
7.2.2 测量参数及测量部位	(94)
7.2.3 探头的装配与安装	(95)
7.2.4 监控回路	(96)
7.2.4.1 信号处理	(97)

7.2.4.2	与极限值比较	(97)
7.2.4.3	保护回路	(98)
7.3	机器监控系统的类型	(99)
7.3.1	单通道振动开关	(99)
7.3.2	单通道监控仪器	(100)
7.3.3	积木式多通道监控系统	(103)
7.4	机器监控的经济分析	(108)
7.4.1	系统的概况	(108)
7.4.1.1	装设监控系统前的损坏情况	(109)
7.4.1.2	获得的认识	(110)
7.4.1.3	建议的处理措施	(110)
7.4.1.4	振动监控系统的安装与结果	(110)
8.	以状态监测为依据的预测性维修	(111)
8.1	基本理论	(112)
8.1.1	预测维修的评价方法	(112)
8.1.1.1	机器评价	(113)
8.1.1.2	与极限值比较	(113)
8.1.1.3	预测剩余工作寿命	(114)
8.1.1.4	故障分析	(114)
8.1.1.5	早期故障探测	(115)
8.1.2	检查方法	(116)
8.2	运行中的预测维修	(116)
8.2.1	测量系统	(116)
8.2.2	测量准备	(117)
8.2.2.1	选择测量部位	(117)
8.2.2.2	测量部位说明	(120)
8.2.2.3	探头的附着	(121)
8.2.2.4	测量间隔期	(124)
8.2.2.5	数据采集路线	(124)
8.2.3	个人计算机	(127)
8.2.4	数据库	(127)
8.2.4.1	典型的数据库体系	(128)
8.2.4.2	输入装置说明数据	(128)
8.2.4.3	输入测量点数据	(129)
8.2.4.4	输入补充的机组数据	(130)
8.2.4.5	输入补充的机器数据	(130)
8.2.4.6	输入评语	(130)
8.2.4.7	建立路线	(131)

8.2.5	数据采集器	(132)
8.2.5.1	将路线输入数据采集器	(132)
8.2.5.2	采集数据	(132)
8.2.5.3	从数据采集器取出路线	(135)
8.2.6	数据评价	(135)
8.2.6.1	报告	(136)
8.2.6.2	趋势图	(137)
8.2.6.3	带报警极限线的趋势图	(139)
8.2.6.4	带报警线及外推线的趋势图	(139)
8.2.6.5	频谱	(140)
8.2.6.6	带包络报警线的频谱	(141)
8.2.6.7	瀑布图	(142)
8.2.6.8	选择性频率趋势图	(143)
8.2.6.9	损坏零件的自动认定	(143)
8.3	预测维修计划的执行	(144)
9.	预防性及改善性修理手段	(145)
9.1	基本理论	(145)
9.1.1	恢复性修理	(145)
9.1.2	预防性修理	(146)
9.1.2.1	预防性修理方法	(146)
9.2	现场平衡	(146)
9.2.1	不平衡是损坏的起因	(146)
9.2.2	不平衡的原因	(146)
9.2.3	基本理论及术语定义	(147)
9.2.3.1	不平衡的类型	(147)
9.2.3.2	静平衡和动平衡	(149)
9.2.4	在检查时探测不平衡	(150)
9.2.5	平衡	(112)
9.2.5.1	单面现场平衡	(152)
9.2.5.2	现场双面平衡	(156)
9.2.5.3	挠性转子的平衡方法	(157)
9.3	对中	(158)
9.3.1	对中与联轴器误差对损坏的影响	(158)
9.3.2	对中与联轴器误差的原因	(159)
9.3.3	基本理论及术语定义	(159)
9.3.3.1	联轴器误差	(159)
9.3.3.2	对中误差	(161)
9.3.4	在检查中认定联轴器与对中误差	(163)

9.3.4.1	联轴器误差.....	(163)
9.3.4.2	对中误差.....	(164)
9.3.5	对中步骤.....	(167)
9.3.5.1	准备工作和实践提示.....	(167)
9.3.5.2	平尺与塞尺法.....	(168)
9.3.5.3	轮缘与端面读表法.....	(169)
9.3.5.4	逆向读表法.....	(170)
9.3.5.5	按给定平行及倾斜偏移量对中.....	(173)
9.3.5.6	对中要求的实例.....	(174)
9.4	预防性修理的经济效益.....	(175)
10.	结语.....	(176)
11.	索引.....	(177)
12.	参考文献.....	(186)
附	申克公司简介.....	(189)

1. 机器维修的目标、对策与经济性

1.1 目标与费用

以最小的工作量、最低的投资及最少的原材料制造机器，并在最长的使用期内利用这些机器获得最高的经济效益，达到最优的质量与安全，乃是工程技术人员使命。

机器只有通过系统化的维修，方能实现下述目标：

- 保护投资；
- ① 避免不可预见的停产及生产损失（即藉以维持生产计划）；
- ② 改进安全、环境保护和质量。

正因为此，维修在工业和现代工业国家起着重要的经济作用。这可以由维修经费投资清楚地反映出来。

例如，1982年日本的维修经费占国民生产总值的4.2%，而用于科学研究的经费只占国民生产总值的2.4%，见表1.1^[1]。

表1.1 1982年日本用于机器维修的总经费

经费类型	金额 (亿日元)	%
国民生产总值	(A) 267,400	(=100)
维修费用	(B) 11,200	(B)/(A) 4.2
科研投资	(C) 6,500	(C)/(A) 2.4

受雇的维修人员的百分比之高也表明了维修的重要性。目前在联邦德国，与维修有关的人员占有所有雇员的9.4%。

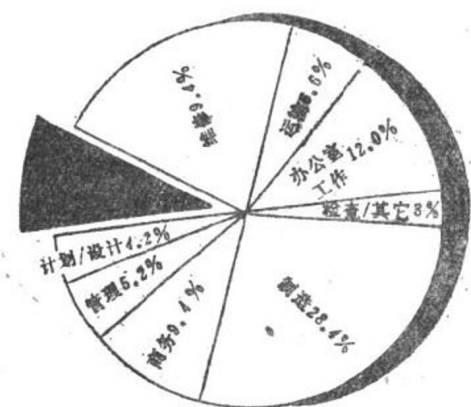


图1.1 德意志联邦共和国各工种雇工情况 (以百分比计)

日本的用工分布情形与此相仿，1982年日本的维修工人数约为60万^[1]。

对任何一家公司来说，维修经费都是成本中一个可观的因素。以价值的比例折算，年维修费用约为：

对普通机器而言，2~6%^[3]；

对复杂的生产线而言，3~14%^[2]。

一般来说，工业装置的维修费用为年销售金额的6~10%。

尚需加上与备件库存有关的成本（包括其资金费用）。

这样，总维修费用可达年销售金额的25%^[2]。

在美国，多年的研究表明，维修费用随技术和自动化程度的提高而增加，其增长速率比生产成本增长的速率还大^[2]。

然而，采用新的维修方法可以制止——或起码可以缓解维修费用的增长。实施先进的维修对策，采用现代化计算机技术及“正确的”测量技巧，可使维修费用显著降低。与此同时，这些措施将增加机器的可运转率，延长机器寿命，提高生产的产品质量。

简言之，现代化的机器维修能够显著地提高公司的经济效益，从而增强其竞争能力。

1.2 对策

可以给维修下这样一个定义：

维修是判定和评价机器的实际状态以及保护和恢复其原始状态的全部必要步骤。

所有的维修都包括三方面的工作：

● 保养； ● 检查； ● 修理。

保养

保养是保护机器或设备原始状态所需的一切措施，包括诸如清洁、润滑、补给、交换和调整等工作。

检查

检查是判定和评价机器、组件或零件的实际状态所需的一切手段。检查纯粹是一种获取信息的方法，其中包括测量、试验、收集数据和外观观察等工作。

修理

修理是恢复原始状态所需的一切手段，包括更换、重制和调整等。

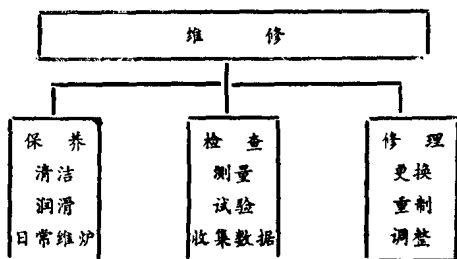


图1.2 维修手段

预防性维修（或称计划维修）通常定义为预防损坏、间接毁坏与生产损失所采取的维修方法。若再进一步，即预测何时需要维修，则通常称为预测维修，或状态监测维修。

与此相反，故障维修（或“事后维修”、非计划维修）只是在机器局部或整机发生故障之后才去恢复其原始状态。

1.2.1 故障维修

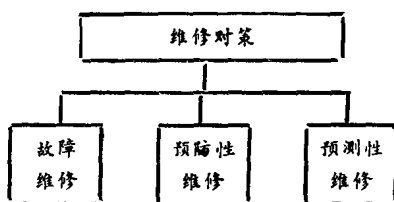


图1.3 维修对策

这些维修对策彼此间是根本不同的。

在故障维修的情况下，机器一直运行到出现故障，而不在保养或检查方面投入资金。在现代工业装置中，这种概念只有在例外情况（即：对于冗余的或在生产流程中不重要的机器来说）才有意义。

操作人员对机器故障停车的情况完全失控。停车时间也无可预料。因而很难或甚至不可能作出运行或生产计划。

故障维修在消费市场特别流行。如吸尘器、电吹风、厨房电器和电动剃须刀等家用物品都是坏了才修的。

1.2.2 预防性维修

基于规定时间间隔进行的预防性维修是当今常规的维修方法。根据生产计划和经

验，在机器运行某一段时间后将其停下，进行检查，解体，更换零件或整个部件。

这种方法很不经济且不是最佳的，因为往往尚可使用的零件被更换了，而已损坏的零件又更换得太迟。

这方面典型的例子是滚动轴承。假如滚动轴承更换太频繁，费用就会增加。而若更换得太迟，转动不灵的滚动轴承就可能招致轴弯曲、联轴器毁坏及绕组损坏等代价昂贵的经济损失。

预防性维修可以对机器的停车时间作出计划，这是其优点，但这一优点被一系列经济上的缺点和风险所抵消。通过两项附加措施，可以将这些不利因素降低到可接受的程度：

● 机器诊断

运行中进行机器诊断，来评价机器的状态，并认定故障和/或损坏。这种分析是定期或不定期进行的。

■ 机器监控

连续测定机器的状态，将其与给定的极限值进行比较，并将机器任何失常情况指示出来。

1.2.3 基于状态监测的预测性维修

理想的维修对策是与机器的状态关联起来的。在这一概念下：

- ① 仅当机器的状态需要停车时才停车；
- ② 仅当零部件已开始损坏时才更换；
- ③ 仅当转子超过其允许残余不平衡量时，才重作平衡；
- ④ 仅当相连接机器的对中已超差时，才重新找正。

这一概念需要连续测知机器的状态。一些重要的运行参数必须频繁地、最好是连续地测量，并作出评价和解释。不仅考虑机器的现状，而且要从测得数据的趋势推得预见性的认识。这样，才有可能计算出维修的最佳时机，并将其与生产计划结合起来考虑。

预测性维修是最先进的维修方法，费用最省。

1.3 经济性

1.3.1 维修费用

图1.4所示为机器使用寿命期内维修费用的变化情况。若在最佳机会点，即损坏刚刚开始时进行修理，则费用比正常运转期内采用的任何维修对策都要低。一般来讲，这一要求不是单纯的预防性维修（即定期维修）所能够达到的。

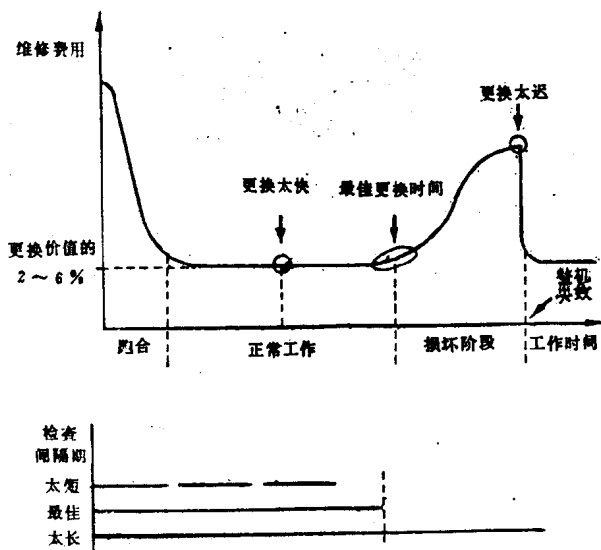


图1.4 机器使用期内维修费用的变化情况^[3]

若保养间隔期太短，则尚能使用的机器零件更换得太快；将间隔拉长些，又要承担损坏发现过迟的风险。这一风险可以通过周期性的机器状态分析或连续的状态监测来降低，以及时确认损坏并作出经济的处理。

图1.5 示出检查频度与生产损失和维修费用的变化情况。在达到最佳检查频度点前，随检查频度的增加，生产损失费用和维修费用减少；此后则随着“不必要的”检查次数增加而增高。

检查费用随检查频度线性增加。

图1.4与1.5表明，预防性维修只能碰机会达到最佳化，即找到最为经济的检修间隔期。

而预测性维修通过对重要的运行参数进行评估，是唯一能实现最佳维修时机的维修方法。

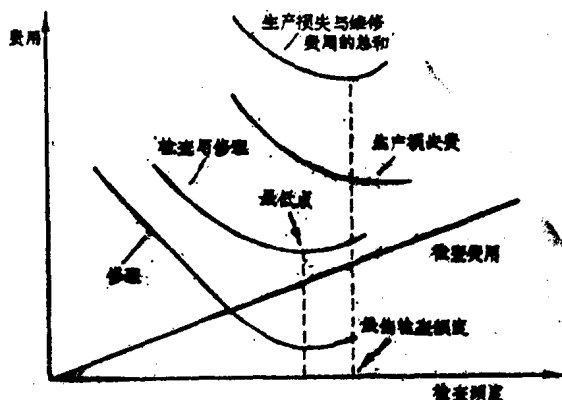


图1.5 维修费用与检查频度的关系^[3]

1.3.2 节约的潜力及实例

节约的潜力表现在：

- 避免生产损失，亦即维持生产计划；
- 降低修理费用；
- 减少正常维修和加班的工时；
- 降低保险金。

下述实例即显示出这些方面的节约：

例1：

在意大利一家大型钢厂，对特别容易损坏的3千伏和10千伏电机采用振动与温度连续监控后，重大的损坏由1980年的54次降为1986年的3次。

例2：

在美国一家钢厂，采用机器诊断和连续状态监测

- 降低维修费用50%，并
- 将严重的故障停车由每年100多次降为零。

例3：

在密西西比一家炼油厂，由于采取了同样措施，降低了年维修费用。

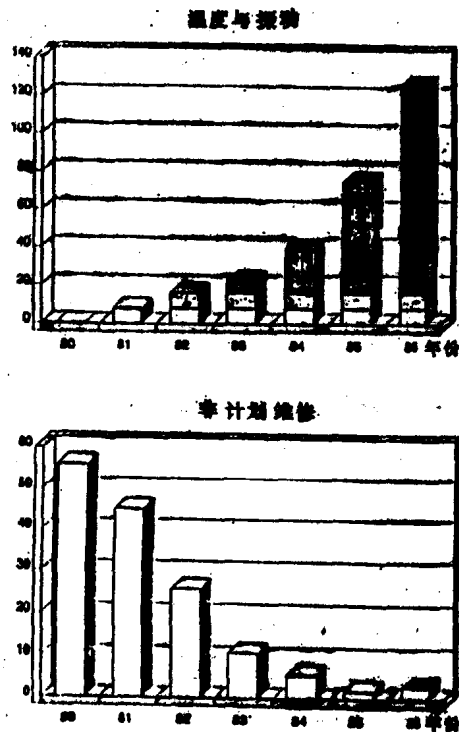


图1.6 钢厂大型电机装备连续监控系统后重大损坏大幅度减少

说明：上图为监控中的3KV和10KV电机
下图为3KV和10KV电机的故障停机情况。

对100台大型机器，降低维修费330,000美元
对3900台小型机器，降低维修费570,000美元
全年共节约维修费900,000美元

●例4:

某氨厂采用计算机辅助机器诊断预测维修后，五年内机器运转率由90.7%增加到98.9%。五年之内仅有三次故障停车。

●例5:

在德国南部某大型化工厂，在一台转速为3000转/分功率为400马力的二级鼓风机上采用预测维修获得显著经济效益。

1984年12月，机器诊断指示出可疑的轴承损坏，但厂方未能引起重视，未进行修理。

结果：轴承毁坏，叶轮所有的铆钉被切断。

修理用了一周时间。

修理费用：6,000美元

生产损坏：400,000美元

1985年1月，机器诊断再次指示出即将发生的损坏。这一次，厂方将鼓风机立即停下。发现：上次修理部位又出了毛病，必须更换叶轮上所有铆钉。

修理费用：6,000美元

生产损失：三天，共150,000美元

1985至1988年间的长时期内，共诊断出12次轴承即将损坏的故障情况，这就可以在不拆走叶轮的情况下在现场更换轴承，从而大大减少了费用。

在大多数情况下，可以做到在计划好的短暂停车机会来进行修理，而不给生产造成损失。

据该厂介绍，每月花费在机器诊断上的费用仅为25美元，且已包括了数百台机器上所需仪表的折旧费在内。

●例6:

法国国家电力公司自1984年至1986年在电厂试行预测性维修，收到显著效益。

在格哈维林电厂，试行预测性维修的机器有：

——195台主要的泵

——175台6000伏电动机

——6台主要的汽轮机

——18台辅助汽轮机

——94台辅助泵

——15台柴油机

——16台变压器

——30台齿轮箱

两年内，这项试验性工作共耗用7730工时，相应的费用为370,000美元。

同期内节约的修理及更换备件费用估计为860,000美元，即

净节约费用490,000美元。

这个数字不包括生产损失费。法国国家电力公司估计,由采用预测性维修获得的实际收益比这个数字要高得多^[6]。

例7:

1986年瑞士伯恩电力公司公布了如下—份关于中型水电透平机组上采用振动监测的费用/效益分析^[7]。

	说 明	费 用 (美元)
工厂	遥控水电厂	
故障	滑动轴承损坏	
更换费用	材料费	75,000
修理时间	14天	
人工费	工资	7,600
生产损失	电能	189,000
故障费用		271,000
预防轴承故障可采用的安全措施	装振动监测系统	
振动监测系统的费用	投资	16,400
振动监测系统的投资回收:		
故障用费 $= \frac{271,000}{16,400} = 16.6$		
监测系统的费用		

2. 损坏—维修的原因

2.1 损坏的起因

机器无论是在运行时抑或停车过程中,都要经受状态变化、实际参数下降的影响,导致其使用性能(例如功能)降低。其结果便是损坏。

损坏改变机器零部件的结构、尺寸和布局。如果损坏使机器丧失了必需的性能,我们就说零件或进而机器出了故障。

如果损坏使机器失去理想的但不是本质的性能,则称之为缺陷。机器损坏可用作缺陷与故障的总称。

按照其表现方式的不同,可将上述各种影响及其结果分为磨损或过载。

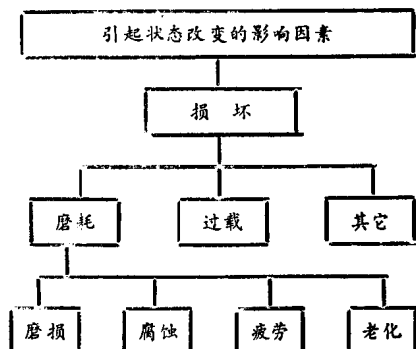


图2.1 机器及其零部件损坏的影响因素^[12]

注:其它,指例如外界干扰、着火等。

磨损是最重要的损坏形式,可分为:

- 磨损; ● 腐蚀; ● 疲劳;
- 老化。

即使是正常运行,磨损也几乎是不可避免的。而过载则是由于使用不当和/或深度磨损所致。它可直接造成损坏,也可加速磨损。

2.1.1 维修的目的

维修过程的目的是避免损坏及排除损坏的影响^[12]。

通过保养、检查和修理可以达到这一目的。

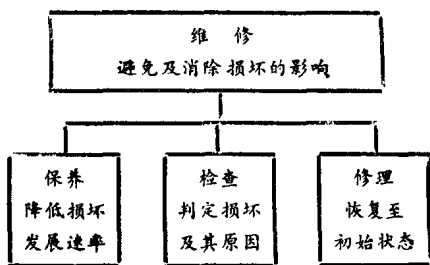


图2.2 维修工作及其目的

保养旨在尽可能降低给定设计条件下及特定使用场合中逐渐发展着的损坏速率。

通过检查可以判定损坏的程度及其起因，即机器的状态。这样便可确定机器的功能并认定已损坏的零部件。因此，检查是维修的中心环节。

修理则要排除损坏并尽可能地将机器的

的内在可靠性能恢复到初始状态。

本文不包括保养和修理方面的内容，而对机器检查的方法、仪器和建议方案，则要作详细的介绍。

2.1.2 检查

检查这一术语包容了判定、评价机器及其零部件实际状态的所有方法^[4]。

检查可以在停机时进行，也可在运行中进行；可以凭听、看、摸，也可以使用测量和监控系统来进行。

2.2 磨损与磨损裕量

每台机器、每个零件都具有一定的磨损裕量（以下称“磨损裕量”）。在机器运行寿命期内磨损裕量逐渐减少。若磨损裕量降到损坏极限以下，就会发生故障。修理应在磨损裕量降到损坏极限之前就行，重新恢复必需的磨损裕量。

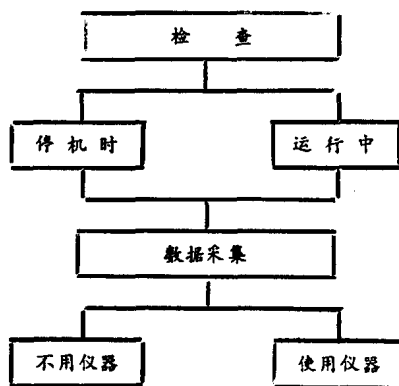


图2.3 检查过程的要素

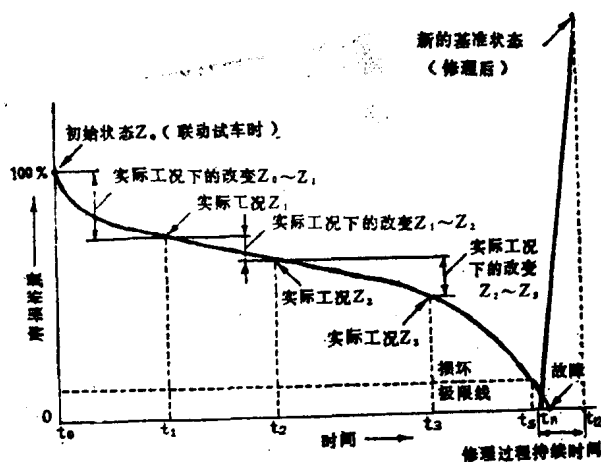


图2.4 工作寿命期内磨损裕量的变化^[4]

注·)：假如修理中采取了切实的改进措施（如改进材质、更改油槽等），并将修后改进了的状态定为新的基本状态，那么，维修后的磨损裕量就会增加并超过原始状态。