

全国高等农业院校教材

机器维修工程学

东北农学院 主编

农业出版社

主 编 东 北 农 学 院 辜宣鸿
副主编 河 北 农 业 大 学 邱朴生
华 南 农 业 大 学 何国洪
主 审 北 京 农 业 工 程 大 学 陈光中

全国高等农业院校教材
机 器 维 修 工 程 学
东北农学院 主编

责任编辑 何致莹

农业出版社出版(北京市朝阳区农展馆北路2号)
新华书店北京发行所发行 通县向阳印刷厂印刷

787×1092mm16开本 24印张 1插图 516千字

1990年10月第1版 1990年10月北京第1次印刷

印数 1—2,460册 定价4.80元

ISBN 7-109-01572-6/TH·80

前 言

随着世界科技的飞速发展, 机器维修这门学科正在逐渐成熟和不断完善, 一些新理论和新技术, 如可靠性理论、运筹学及技术诊断等已经开始进入到机器的使用和维修领域。作为高等学校的机器维修教材, 不言而喻应该反映出这些新的趋势, 不断进行内容的更新。

《机器维修工程学》就是基于上述指导思想, 在原《拖拉机修理学》的基础上产生的。它已在国家教委新审定的普通高等学校农科专业项目中, 被列为农业机械化专业的主要课程。它根据既保持农业机械维修的特点又兼顾适应其他机械维修的要求, 在强干去枝、精简补充的基础上, 保留了零件修复工艺、拖拉机修理工艺及修理生产工艺组织方面的主要内容, 并根据国内外维修理论和技术的发展, 着重补充了以下方面的内容。在机器故障原理一篇中, 引入了可靠性理论对故障形成的分析。第二篇增添了机器故障诊断的内容。第四篇增加了现代维修管理及经济分析的内容。

为了避免教材成为各有关领域内容的机械组合, 编写中着重于各领域知识在维修中的应用分析。尽管如此, 由于经验不足, 不当之处在所难免。如果能在机器维修教材的改革中, 起到抛砖引玉的作用, 也就达到了编者的目的。我们热诚地希望得到批评指正。

书中第一、三、七章由东北农学院辜宣鸿编写; 第二章由北京农业工程大学陈光中编写; 第四章由河北农业大学卞朴生编写; 第五、六、八、九章由东北农学院许洪吉编写; 第十章由河北农业大学张建华编写; 第十一、十三章由华南农业大学萧萧编写; 第十二章由华南农业大学何国洪、萧萧, 广西农学院李桓及河北农业大学张建华共同编写; 第十四、十五章由沈阳农业大学曾彬编写; 第十六、十七章由北京农业工程大学仪洁、程小桐编写。

本教材在编写及修改过程中得到原《拖拉机修理学》主编蔡心怡的支持和帮助。并在全国高等农业院校农机化专业《农机修理学》教学研讨会上得到各兄弟院校的积极支持。书中插图由河北农业大学籍从智绘制。全书由北京农业工程大学陈光中负责主审。

编 者

1988年12月26日于北京

目 录

第一篇 机器故障原理

第一章 机器的故障	1
第一节 机器故障与可靠性	1
第二节 机器故障的物理成因	7
第三节 机器故障的形成	9
第二章 零件的缺陷	27
第一节 零件缺陷的分类	27
第二节 零件的磨损	28
第三节 腐蚀	43
第四节 疲劳	46
第五节 零件的变形	48
第三章 产品的极限状态	50
第一节 零件配合件的老化规律及产品输出参数的变化规律	50
第二节 产品极限状态的确定依据	62
第三节 产品极限状态的确定方法	66

第二篇 机器维修工艺

第四章 机器故障诊断	74
第一节 概述	74
第二节 诊断参数与诊断周期	76
第三节 故障分析原理概要	80
第四节 常用诊断技术	90
第五节 柴油机诊断技术	107
第五章 清洗、鉴定与补整	112
第一节 清洗	112
第二节 零件的鉴定与补整	118
第六章 发动机压缩系统的修理	122
第一节 气缸体的修理	122
第二节 气缸套的修理	124
第三节 曲轴和轴承的修理	132
第七章 柴油机燃油喷射系统的修理	143
第一节 燃油喷射系统的故障原因	143

第二节 喷油泵调速器总成的调试	149
第三节 标准油量传递的原理及其在修理中的应用	157
第八章 底盘主要零件的修理	161
第一节 梁架的修理	161
第二节 壳体的修理	163
第三节 齿轮的修理	168
第四节 液压系统主要元件的修理	169
第五节 制动系统主要零件的修理	171
第九章 机器的装配、磨合与试验	172
第一节 机器的装配	172
第二节 磨合与试验	178
第三节 机器的总装	187

第三篇 零件修复工艺

第十章 铸铁零件焊接工艺	192
第一节 铸铁的焊接特点	193
第二节 铸铁常用焊接方法	196
第十一章 粘接工艺	207
第一节 粘接基本原理	208
第二节 常用胶粘剂性能及应用	209
第三节 影响粘接质量的因素	213
第四节 粘接接头的老化	217
第十二章 零件磨损表面尺寸恢复工艺	219
第一节 堆焊	219
第二节 喷涂与喷焊	238
第三节 电镀	250
第十三章 零件修复工艺方案的制定	278
第一节 失效零件对修复的要求	278
第二节 各种修复层的性能	279
第三节 零件修复工艺方案的制定	284

第四篇 机器维修管理

第十四章 机器的维修制度	288
第一节 机器维修制度的发展	288
第二节 机器的维修制度	289
第十五章 维修企业及其工艺设计	295
第一节 维修基地的规划与类型	295
第二节 维修基地的规模与厂址选择	298

第三节	汽车、拖拉机修理作业的组织	302
第四节	工艺设计参数的选定	303
第五节	平面布置	314
第六节	设计方案的技术经济评价	320
第十六章	维修管理	321
第一节	维修信息管理	321
第二节	维修计划管理	326
第三节	维修备件库存管理	337
第四节	维修质量管理	343
第十七章	维修技术经济	350
第一节	机械设备的寿命周期费用分析	350
第二节	修理措施的技术经济分析	355
第三节	维修企业的盈亏平衡分析	362
第四节	机器大修的技术经济分析	366
第五节	机器的改造性维修及综合决策	371
主要参考书目		376

第一篇 机器故障原理

第一章 机器的故障

第一节 机器故障与可靠性

无论任何机器设备，在使用过程中，由于零件的老化、磨损、变形等原因，各部分的技术状态将逐渐发生变化。例如：拖拉机牵引力下降；发动机燃油、机油消耗量增多，主油道压力下降，起动困难，排气烟色变浓；传动部分噪声加剧，变速机构跳档，离合器分离不清；转向、刹车失灵，行走部分跑偏、打滑、脱轨等。

在哲学概念中，自然界不存在不发生变化的事物。人们可以使不希望发生的变化减慢，可以使机器技术状态的偏差在规定的时间内，保持在允许的范围内，但是绝对不可能完全消除技术状态的偏差。由此可见技术状态的变化是绝对的，而且对我们有实际意义的是机器技术状态变化的允许范围，即无故障状态，和在规定时间内将它保持在允许范围内的能力，以及恢复这种能力的方法。正因为这样，机器在使用中的维修便成为机器整个寿命周期中的一个不可缺少的重要组成部分。而且要求在设计产品时就予以考虑。

一、故障的概念

(一)故障的定义 对于机器的故障，每一个人都有其直观的印象。我们都会同意，一台汽车的发动机，一台燃料泵或一只轮胎，如果它们不能完成设计时所规定的功能，便是出现故障。但是常常有这种情况，尽管产品的实际性能低于期望的水平，但机件却还能继续发挥其功能。如一台汽车发动机尽管还能有力并平稳地运转，但其燃料消耗超高了；一台燃料泵还可以泵油，但是供油量和压力降低了；一只轮胎还能保持气压并支持车体，但其胎面胶表明很快就不能用了。究竟它们的技术状态要坏到什么程度才算是出现故障呢？这就需要对故障进行准确的定义。

故障是一种不合格的状态，是对其原始状态的任何一种可识别的偏离，而这种偏离对特定的使用者来说是不合格的。或者说机器在使用过程中失去规定的正常工作能力称之为故障。

从上述定义可以看出，尽管措词不同，但都是指机器的某些技术指标变化超出了允许限度的不合格状态。

(二)故障的相对性 故障的识别关键在于合格与不合格的分界线，它不仅取决于所研

究的机构功能，而且还取决于设备的性质和使用范畴。例如，航空发动机滑油消耗量的增大，对于短程或中程飞行也许不会成为问题，而在远程飞行时，同样的滑油消耗率就会把滑油耗光。因此，不同的使用部门有不同的规定。但是在一个使用部门之内，则应把每个机构的合格状态与不合格状态以明确无误的术语及数量标准定义清楚。

二、故障与可靠性

(一)故障和可靠性的关系 故障是机器、部件技术状态超出允许限度的一种具体现象。

可靠性则是机器或产品随着时间的变化，保持自身工作能力不出故障的性能，这里的工作能力概念不但包含完成必要功能的能力，而且还包括将机器产品各项功能的输出参数保持在允许范围内的能力。例如，发动机的工作能力不但指它能运转作功，而且还要求一定的功率。因此机器的可靠性是一种综合性能，从概念上说，它包括了机器的无故障性（可靠度）和耐久性（有效度）。

产品的无故障性是指机器在某一时期内（或某一段实际工作时间内）连续不断地保持其工作能力的性能。产品的耐久性是指产品在达到报废之前，保持其工作能力的性能，即在整个使用期内并在规定的维护保养修理制度条件下保持工作能力的性能。

从另一角度看，产品的无故障性属狭义的可靠性，主要研究机器产品在没有任何维修措施干预的条件下，如何保持其工作能力，独立而连续不断地正常工作。而产品的耐久性属广义的可靠性，它研究的是产品在整个使用期内的工作情况。并且认为，如果不采取修理和预防措施去恢复在使用过程中丧失的工作能力，产品是不能长期工作的。故障与可靠性是同一事物中的二个矛盾面。

故障本身是一种随机事件，因此故障前的使用期或实际工作时间应用随机量来描述，而导致工作能力损耗的过程（如磨损）则用随机函数来描述，因此评价产品可靠性的各种指标都具有概率性质。如何运用近代数学和物理学的成就来预测和计算产品的故障是维修工程学的一个重要课题。

(二)评价机器无故障性的指标 评价机器产品无故障性的主要指标就是产品的无故障概率 $P(t)$ ，亦称可靠度（ $R(t)$ ），即在规定的時間间隔 $t = T$ （或实际工作时间）内，机器不发生故障的概率。它是描述机器故障的定量指标， $P(t)$ 值的变化范围是 $0 \leq P(t) \leq 1$ 。例如，若机器在 $T = 1000$ 小时内的无故障概率等于0.95，它说明一大批该型机器中，平均约有5%的机器在工作达到1000小时之前，将出现故障。无故障概率 $P(t)$ 和故障概率 $F(t)$ 构成了一个完整的事件组，所以：

$$P(t) + F(t) = 1 \quad (1-1)$$

$P(t)$ 的允许值应根据故障的危险程度（故障后果）来选取。航空技术中重要产品的无故障概率 $P(t)$ 达到0.9999，甚至更高，实际上等于1。如果故障所造成的安全及经济损失不大，则 $P(t)$ 的允许值可以低些。

一般来说，对有可能出现故障的产品，对应于时间 $t = T$ 内的 $P(t)$ 值是无故障性的主要

指标,但是在某些情况下采用 $P(t)$ 值却不够直观,所以还需要如表 1—1 所示的补充指标。

表 1—1 产品工作无故障性指标

在规定时间间隔 $t = T$ 内的故障情况	$P(t)$ 值	无故障性主要指标
一般都有故障	$P(t) \rightarrow 0$	ω ——故障流参数
可能有或没有故障 (发生故障为稀有事件)	$0 < P(t) < 1$	$P(t)$ ——工作无故障概率
不允许有故障	$P(t) \rightarrow 1$	$K_{\text{可靠}}$ ——可靠性储备

表 1—1 中第一种情况是在 $t = T$ 时间内,产品一般都要发生故障,即 $P(t) \rightarrow 0$ 。这些故障的特点是:容易排除,不会引起严重后果。例如,机床工作中需更换磨损的切削刀具,传送带上零件被卡滞等,一旦进行修理更换排除故障后,仍可正常继续工作。对这样的故障不宜采用 $P(t)$ 这个指标来估计其可靠度,其工作无故障的特征指标可采用主导函数 $\Omega(t)$,即在 t 时间内的平均故障次数(故障次数的数学期望值),或采用故障流 ω :

$$\omega(t) = \frac{d\Omega(t)}{dt} = \frac{1}{T_{\text{平均}}} \quad (1-2)$$

式中, $T_{\text{平均}}$ 为故障平均间隔时间,即产品机器的总工作时间 t 与在此期间所发生的故障次数之比。也即机器平均无故障工作时间。因此故障流参数 ω 即机器在工作 t 时间之后,单位时间内故障发生的平均次数。它是一个一般都应达到的可靠性指标,并用来估计可修复产品的故障率。

另一种极端情况,即当产品可靠性要求很高, $P(t)$ 值接近于 1 或等于 1 时,也不能直接采用 $P(t)$ 值这个指标。因对于可靠性很高 $P(t) = 1$ 的产品,要求有可靠性储备,而不允许有故障出现。即保证产品或机器的技术参数,那怕在最恶劣的使用条件(最大负荷、缺乏润滑等)下也不会出现故障。如果发生故障时的参数值为 X_{max} ,而在最恶劣极限条件下的参数值为 $X_{\text{极限}}$,则可靠性储备系数 $K_{\text{可靠}}$ 可按式计算:

$$K_{\text{可靠}} = \frac{X_{\text{max}}}{X_{\text{极限}}} > 1 \quad (1-3)$$

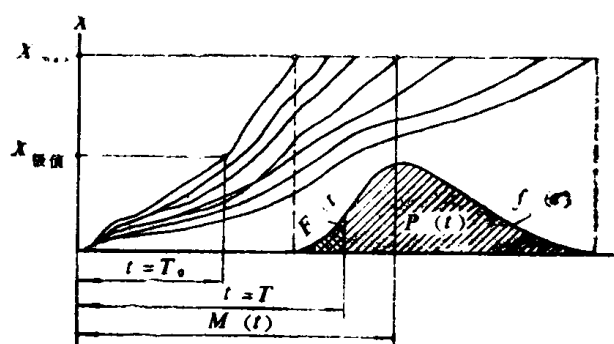


图 1—1 产品的可靠性(无故障性)

由于在工作过程中, 产品工作能力是变化的。所以, 可靠性储备系数就成为时间的函数 $K_{\text{可靠}}(t)$ 。随着机器的使用, $K_{\text{可靠}}(t)$ 会逐渐减小, 所以, 可靠性储备系数的变化速度实际上也是一种可靠性指标。

(三) 评价产品耐久性的指标 耐久性指标是用来评价产品或机器在整个使用期间, 工作能力耗损情况的指标。

机器及零件、部件的耐久性指标是有区别的。零部件的耐久性指标是这些零部件故障前的使用期限 T (或实际工作时间) 它可由输出参数的极限值 $X = X_{\text{max}}$ 和影响工作能力耗损的某一随机过程 (如零件的磨损、腐蚀等) $X(t)$ 的规律所确定。 T 是个随机量, 可用某种分布规律, 如图 1—1 中的概率密度 $f(t)$ 以及数学期望值 $M(t)$ 和离散度 $D = \sigma^2$ 等来描述。

如果零部件无故障概率 (可靠度) $P(t)$ 值或其使用期限根据修理和维护保养制度已经给定, 则 T 就成为非随机的确定量。

对于由成百上千个零件组成的复杂产品或机器, 情况则复杂得多。因为每个零件都有各自的使用期限, 而且根据故障的原因不同或评价零件质量的标准不同, 一个零件可能会有几个使用期限, 例如, 轴的损坏原因可能由于轴颈磨损, 花键扭曲, 变形和疲劳裂纹, 其所决定的使用期限也各不相同。因此复杂产品的耐久性必须确定哪些是对产品极限状态和使用持续时间起决定作用的因素。

可以采用两种方法来评价复杂产品的工作耐久性。第一种方法是采用产品技术特征 (输出参数如精度、功率、效率等) 达到允许极限时的寿命或使用期限作为主要指标。

第二种方法是以技术利用系数 $K_{\text{利用}}$ (有效度) 作为机器工作耐久性的指标。

$$K_{\text{利用}} = \frac{T_{\text{工作}}}{T_{\text{工作}} + \sum_{i=1}^n T_{\text{修理}i}} \quad (1-4)$$

式中 $T_{\text{工作}}$ —— 机器某使用期内的工作时间

$\sum T_{\text{修理}i}$ —— 机器在同一使用期内各次修理所用时间的总和

技术利用系数 (有效度) 在数值上等于, 任意时刻机器在工作 (而不是在修理) 的概率。显然如果只观察有限的一段时间, 是没有什么价值的, 因为即使在这段时间内的修理时间及费用少, 并不足以说明整个使用期内总修理费的多少。因此必须考虑机器的整个使用期或至少考虑大修前这一段使用期才比较合理。

综上所述, 可见, 复杂产品的寿命或使用期限不但要根据无故障性要求, 而且还要根据恢复工作能力所需的时间和费用来决定。例如, 汽车大修前的寿命, 就是根据技术要求所规定的最低无故障概率, 运行安全条件及恢复工作能力所需的总费用这三个因素来决定的。

这充分说明了故障，可靠性及维修之间的有机联系和系统概念。

三、故障的分类

故障分类是为了便于从不同目的要求对故障进行深入研究，因而研究目的不同则故障的分类也有所不同。

(一)按故障形成的时间规律分类 为了区分不同故障的形成过程，一般将故障分为渐发性故障和突发性故障。

1. 渐发性故障(gradual failure) 渐发性故障是由于某些损伤过程的发展，导致产品初始参数的劣化而造成(图1—2a)。故亦称磨损故障。其主要特征是，在给定的 t_1-t_2 时间段内，发生故障的概率 $F(t)$ 与产品已经工作过的时间 t_1 有关， t_1 越长，发生故障的概率越高。大部分机器的故障都属于这类故障，它与零件材料的磨损、腐蚀、疲劳及蠕变等过程有密切关系。它是计划预防维修的主要根据。

2. 突发性故障(sudden failure) 突发性故障的产生是各种不利因素和偶然的外界影响共同作用的结果，这种作用已超出了产品所能承受的限度(图1—2b)。故障往往经过某一时间 $T_{\text{间隔}}$ 后才发生，而 $T_{\text{间隔}}$ 是个随机变量。

突发性故障的主要特征是：在给定的时间 t_1-t_2 内，故障率与产品已使用的时间 t_1 无关。这类故障的例子如：因润滑油受阻中断而使轴瓦烧损；因机器使用不当或出现超负荷现象而引起的零件折断。这种故障往往是突然发生的，事先并无任何征兆。

汽车轮胎发生故障失去承载能力的原因，有可能是由于长期使用磨损，也可能是由于突然被刺破穿孔。前者属于渐发性故障，已经磨损的旧轮胎发生故障的概率要比新轮胎大得多。而轮胎被刺破穿孔属于突发性故障，它与轮胎的以往使用经历完全无关。在相同时间段内考察刺破穿孔这一突发性故障的发生概率仅仅与道路的状态(外界条件)有关，对于新旧轮胎都一样，可见区分渐发与突发这两类故障的依据是：故障的发生概率是否与产品的使用时间有关。

在实际中还可能存在着第三种故障(图1—2c)人们称之为“复合型故障”，它兼有上述二类故障的特性，故障发生时间是个随机变量，与产品的状态无关，而产品工作能力的耗损速度 $v(t)$ 则与产品的抗耗损性能有关。例如，由于在零件内部存在着应力集中(如曲轴圆角不合要求)，当受到外界对机器的冲击作用后，出现疲劳裂纹的根源属于突发特性，随着机器的继续使用，裂纹逐渐发展属于渐发特性，最后导致零件的断裂。

按故障形成的时间规律进行分类，有利于为制定预防维护制度提供依据。根据可靠性原理，对渐发性故障可以通过加强技术维护来减少。而对突发性故障则不能。

(二)按故障的因果关系分类 由于判定故障所处的不合格状态，可以是某一产品完全丧失了其设计功能，也可以是某种显露即将丧失功能的迹象。因此，从防止重大故障及维修角度来看，我们有必要把故障进一步从其因果关系分为功能故障和潜在故障。

1. 功能故障(Functional Failure) 功能故障是指一个产品不能满足规定性能

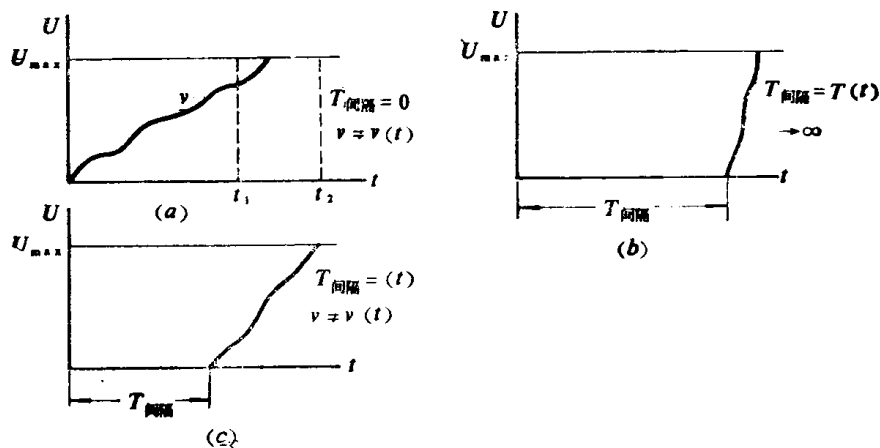


图 1-2 渐发性故障及突发性故障示意图

(a) 渐发性故障 (b) 突发性故障 (c) 复合型故障

标准的现象。完全丧失功能显然是功能故障，如内燃机不能发动，油泵不能供油等。但一个机件工作不能达到规定的性能水平也属于功能故障。例如，飞机刹车系统的功能如果仅仅是使飞机停住，那么它只可能有一种功能故障，即不能使飞机停住。但是刹车系统还有别的功能，例如调节停机的快慢，在飞机进行地面转弯时提供差动刹车，提供防止拖胎等功能。而对这些功能则有不同的性能水平要求，当达不到规定功能水平要求时，也属功能故障。

2. 潜在故障 (Potential Failure) 功能故障一经定义，则某种能指示功能故障即将发生的实际状态往往就能鉴别出来。根据这一状态，就有可能在达到功能故障点之前把有问题的机件换掉。而这种可以被鉴别的状态即为潜在故障。因此，潜在故障是一种指示功能故障即将发生的可以鉴别的实际状态。例如内燃机主油道压力低于某一规定数值时，即说明可能会因缺油而导致烧瓦，使内燃机发生停止运转的功能故障。由于潜在故障与功能故障之间，往往存在着某种因果关系，因此我们便可以利用潜在故障来防止功能故障的发生。可鉴别潜在故障的存在已成为现代维修理论的一个重要方面，它使机件有可能在不发生功能故障的前提下得到最大限度的利用，并成为机器技术诊断和监控的基础。

但是，并不是所有功能故障都存在与之有关的可鉴别的潜在故障，特别是突发性故障，更无法找到可鉴别的潜在故障来事先加以预测。

(三) 按故障的影响后果分类 机器的故障往往是由最重要的零部件和系统的工作情况所决定，有些零部件，即使发生故障，也不至于造成不允许的后果。例如飞机在降落前，起落架发生故障，其后果将是极其严重的；如果发动机功率降低，后果只是经济损失；如果只是乘客座椅损坏，那实际上就没有什么了不起的后果。为了分清主次，为维修工作的组织提供依据，就必须从其影响后果的角度对故障进行分类。如汽车制造部门为了评定汽车产品的可靠性，将故障分为致命故障，严重故障，一般故障和轻微故障四类。表 1-2 所示为客车及轿车故障的分类原则表。

第二节 机器故障的物理成因

表 1—2 客车、轿车故障分类原则

故障等级	故障类别	划分原则
I	致命故障	危及汽车行驶安全, 导致人身伤亡, 引起主要总成报废, 造成重大经济损失, 或对周围环境造成严重危害
II	严重故障	可能导致主要零部件、总成严重损坏, 或影响行车安全, 且不能用易损备件和随车工具在较短时间 (30 分钟) 内排除
III	一般故障	使客车、轿车停驶或性能下降, 但一般不能导致主要零部件、总成严重损坏, 并可用更换易损备件和随车工具在较短时间 (30 分钟) 内排除
IV	轻微故障	一般不会导致汽车停驶或性能下降, 不需要更换零件, 用随车工具能轻易 (5 分钟) 排除

上述不同故障类别也可用故障危害系数 ϵ 来区别。如: 致命故障 $\epsilon_1=1000$; 严重故障 $\epsilon_2=50$; 一般故障 $\epsilon_3=5$; 轻微故障 $\epsilon_4=2$ 。以便于对比和进行可靠性的具体评定。

产品设计中广泛应用的FMEA故障模式效应分析中 (failure mode and effects analysis), 规定将故障按其影响度 E 、发生频率 P 及允许的维修时间 T 分为四个等级 (表 1—3)。以了解影响机械系统功能关键零部件的故障情况, 从而在设计上考虑改进的方法。

表 1—3 $E.P.T$ 故障等级

等级	影响度 (E)	发生频率 (P)	允许的维修时间 (T)
1	9—10分	毁灭性的 (Catastrophic)	极易发生
2	6—8分	大 (major)	容易发生
3	3—5分	小 (minor)	时常发生
4	1—2分	轻微 (insignificant)	几乎不发生

第二节 机器故障的物理成因

机器故障的物理成因, 可以归咎于结构因素的破坏, 进而溯源于作用在这些结构上的能量因素。

一、机械结构因素

机器故障物理成因从结构上可以归纳成下列三个方面。

(一) 连接件配合性质的破坏 这种配合性质的破坏表现在动配合件间隙的增大和静配合件的减弱。

例如, 内燃机曲轴轴承及轴颈配合工作面的磨损, 将使轴承间隙逐渐增大、油膜形成条

件变差,并使载荷带有冲击性质。表现为主油道压力下降,出现敲击和噪音,零件温度升高等。又如气缸与活塞环配合关系的破坏,将降低压缩系的功能。喷油泵柱塞偶件配合间隙的增大,使它失去了应有的供油功能。

连接件配合性质的破坏是机器在使用中出现故障的基本原因之一。

(二) 零件间相互位置关系的破坏 机器在使用中,由于零件的磨损或变形,导致零件本身各工作面之间或不同零件之间相互位置关系的破坏,而出现故障。

例如,拖拉机变速箱及后桥壳体在使用中变形,轴承座孔沿受力方向偏磨,造成各轴之间平行度和垂直度的破坏。从而引起噪音、振动及温度的升高,传动效率急剧下降,并且加速了零件的磨损。又如链轨式拖拉机,由于车架的变形与安装基准面磨损,破坏了发动机曲轴与变速箱第一轴的同轴度,亦将加速零件的磨损和降低传动的效率。内燃机连杆在冲击载荷作用下,发生弯曲变形,使大小端孔的轴心线不平行,将导致气缸等零件出现不正常的偏磨,破坏了应有的压缩功能。

内燃机气缸体各主轴承座孔同轴度的破坏,将使曲轴受到额外的交变负荷,继而导致曲轴的断裂,造成内燃机停止运转丧失功能。

由此可见,机器修理中,对基础件的检查和修理是一项不容忽视的内容。

(三) 机构工作协调性破坏 机器是由若干总成组成,整机的正常运转,需要各总成和总成中的各机构按一定的规律和关系准确无误地协调工作。这种工作协调性的破坏,在机器使用中,其主要原因是机构零件的磨损。但是在机器制造和维修中,即使采用技术条件符合规定要求的全新零件,如果缺乏必要的调整,仍然不能达到应有的工作协调性。

例如,对内燃机气门机构的功能要求是定时开闭气门,它和凸轮轴、传动齿轮、气门间隙调整机构之间的工作协调性有密切关系,这一协调关系的破坏将引起内燃机动力性经济性的恶化,甚至会使内燃机失去运转的功能。

燃油系统的喷油泵,即使装上全新的合格零件,如不经过正确的油量调整、供油时间调整和调速器调整,以及向内燃机上安装的正时调整,以保证各部分工作的协调性,亦同样会使机器处于故障状态。

因此调整工作便成为机器维修工作中的一项必不可少的内容。

二、导致结构因素改变的能量因素

从上述结构因素可以看出,造成它们改变的主要原因是零件出现缺陷。因此可以说零件出现缺陷是机器故障的总根源。而零件缺陷的根本原因则是能量因素的作用。

机器在使用过程中受到各种能量的作用,使零部件、机构和整机的性能发生变化继而出现故障。而这种能量来自以下几个方面:

周围介质能量的作用,包括执行任务的操作工人和维修工人的作用。

与机器运行以及各机构工作有关的内部能量。如工作中出现的热能等。

在制造中或修理中,集聚在机器材料和零部件内的潜伏能量,如铸件内应力和装配、

加工所造成的内应力。

由此可以看出造成机器故障的能量因素贯穿在机器制造、使用、维修的全过程。

第三节 机器故障的形成

上一节内容所讨论的是故障形成的微观物理原因，通过对这些原因的研究，将为故障预防提供具体的技术措施。但是仅仅知道故障的物理成因还是不够的，为了预防故障的发生，还必须知道在不同物理成因的作用下，故障的宏观发展规律。所谓故障的宏观发展规律就是从可靠性的基本原理出发，来研究机器故障的发生和发展规律。它将为机器的预防维修制度提供科学的依据，并且成为维修理论的核心思想。本节内容将从这一角度出发来研究故障的形成规律。

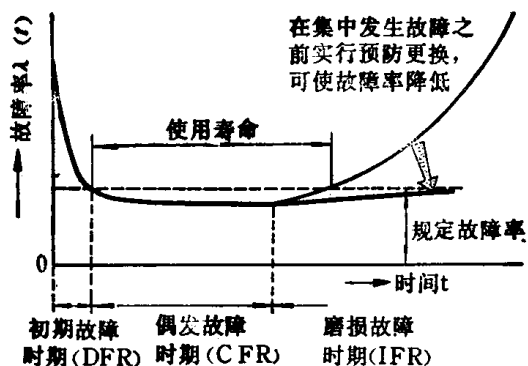


图 1—3 典型机器寿命故障率曲线
(寿命曲线、浴盆曲线)

机器的一生和人一生的情况很相似。图 1—3 所示为典型的机械寿命曲线亦称故障率曲线或浴盆曲线。在机器开始投入使用时由于制造质量的偏差，因此初期的故障率是比较高的，但随着机器的磨合和调整，故障率将逐渐下降 (DFR)。当机器转入正常工作时，故障率呈恒定 (CFR)，这时出现的故障多为偶然事故，属偶发故障期 (突发性)。随着使用时间的增长，零件磨损积累到一定程度，将出现自然故障，从而进入磨损故障期 (渐发性)。

在这一时期机器的故障率将迅速上升 (IFR)。

由此可以看出，在机器使用过程中出现的故障主要是渐发性和突发性二类故障。下面我们将分别讨论它们的形成规律。

一、渐发性故障的形成模型

渐发性故障的形成过程代表着由于损伤或磨损，引起输出参数变化，而导致机器故障的过程。

(一) 渐发性故障的一般形成过程 任何机器及产品经过某一随机的工作时间后，其输出参数 X 随时间变化达到了极限允许值 X_{max} ，便发生了故障 (图 1—4)。

图 1—4 中表示了，故障分布律即故障概率密度函数 $f(t)$ 的形成过程。

1. 机器初始工作参数的随机分布 任何产品在制造中或修理中所赋予的工作参数 $f(a)$ ，如内燃机的功率和燃料消耗率，都不可能是一个定值，它相对其数学期望值 a_0 有一定的离散度，这一离散度除与上述制造、修理中所赋予的初始指标的离散度有关外，还与机器在各种工况下工作的可能性，以及当机器一旦投入工作就立即出现振动、变形等过程

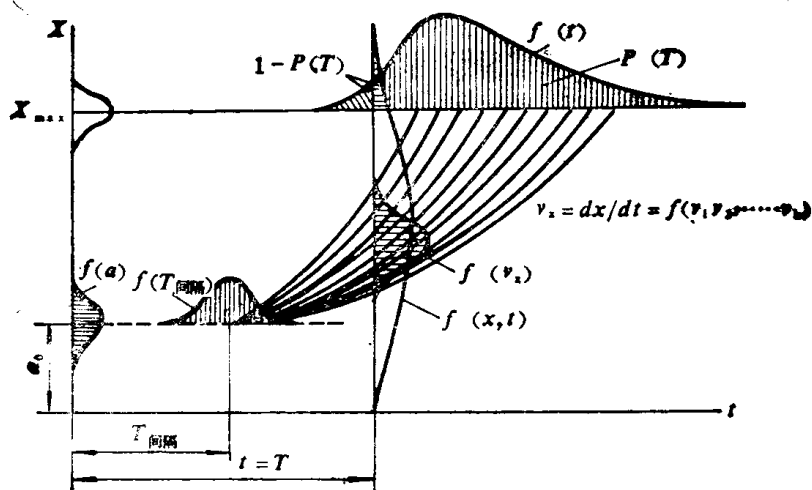


图 1—4 故障形成的一般过程

有关。

2. 初始参数随时间变化的随机分布 随着机器使用时间的增长, 其工作参数的劣化表现为缓慢的进行过程, 这正是零件磨损导致机器性能改变的典型过程。在一般情况下, 可能经过某段时间 $T_{\text{间隔}}$ 后, 工作参数才开始变化。时间 $T_{\text{间隔}}$ 是一个与磨损或损伤的积累(如疲劳)或外因的作用有关的随机量, 它也具有一定的离散度。

3. 参数恶化速度的随机性 机器产品工作参数 X 变化过程的随机性, 它与机器各个零件的磨损或损伤的变化速度有关。即机器产品工作参数的恶化速度 V_x 为各零、部件磨损速度 $V_1, V_2, \dots, V_k$ 的函数。

$$V_x = \frac{dx}{dt} = f(V_1, V_2, \dots, V_k) \quad (1-5)$$

以上这些现象的结果便形成了机器工作至 $t=T$ 时, 输出参数 X 的分布律 $f(x, t)$ (如图 1—4 所示)。它代表着当机器工作至 $t=T$ 时, 工作参数 X 处于不同数值的概率分布。同时也确定了机器工作至 $t=T$ 时工作参数 X (如发动机的燃料消耗及曲轴室的窜气量等)超出极限允许值 X_{max} 的概率, 即机器在 $t=T$ 时的故障概率 $F(T) = 1 - P(T)$, 它相当于图 1—4 中分布律曲线 $f(x, t)$ 超过 X_{max} 部分所包络的概率。该概率正好等于故障概率密度函数 $f(t)$ 曲线在 $t \leq T$ 时, 所包络的概率。

还必须指出, 在一般情况下, 如果用户对机器极限指标的要求有变化时, X_{max} 值同样也是离散的。

图 1—4 一般地描述了故障发生的过程, 并能说明几种特定的情况。如果机器工作参数变化过程在一开始工作就存在(即 $T_{\text{间隔}} = 0$), 则成为渐发性故障的典型情况。当 X 达到 X_{max} 时, 如 $X(t)$ 急剧增大, 便发生了工作故障。

如果在故障的形成过程中, 起主要作用的是过程的发生时间, 即函数 $f(T_{\text{间隔}})$, 然后工作参数恶化过程以较猛烈的速度增长, 使 $X(t) \rightarrow \infty$, 则成为突发性故障。

此外, 如果研究对象是某一具体机器产品, 则工作参数的初始值 a_0 就成为非随机量,

而是某一定值 a 。但如果考虑机器在各种不同工况下工作，造成参数初始值的离散，那么即使研究对象为具体的产品子样，其初始值 a_0 也仍然是一随机变量。

下面分别讨论具体产品及产品总体的渐发性故障模型。

(二) 具体产品渐发性故障的形成过程 首先让我们来研究一种比较普遍的情况，即产品输出参数 x 随工作时间 t 呈线性变化：

$$X = Kt \quad (1-6)$$

式中， $K = V$ 为恶化过程进行速度（磨损速度 V 或参数变化速度 V_x ）。它与许多随机因素，如负载、速度、温度、使用条件等有关。因此一般应看作服从于正态分布规律，即

$$f(V) = \frac{1}{\sigma_V \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V_x - V_{\text{平均}})^2}{2\sigma_V^2}} \quad (1-7)$$

式中 $f(V)$ —— 恶化速度概率密度
 $V_{\text{平均}}$ —— 恶化或磨损过程的平均速度（数学期望值）
 σ_V —— 过程速度的均方差

一般情况下，机器工作参数的极限允许值 $X_{\max}$ 是根据机器在正常工作条件下得出的。当机器工作参数 $X = X_{\max}$ 时，就达到了极限状态，因而也就确定了机器或产品的故障前使用期限（一般指实际工作时间） $t = T$ 。 T 是随机变量磨损或恶化速度 V 的函数。即，

$$t = \varphi(V) = \frac{X_{\max}}{V} \quad (1-8)$$

机器及产品的平均使用寿命，

$$T_{\text{平均}} = \frac{X_{\max}}{V_{\text{平均}}} \quad (1-9)$$

这里 $T_{\text{平均}}$ 为 T 的中位数。

根据已得的函数 $f(V)$ 便可以求得故障概率密度函数 $f(t)$ ，见图1-5得：

$$f(t) = \frac{T_{\text{平均}}}{\delta \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{t^2} e^{-\frac{(T_{\text{平均}} - t)^2}{2\delta^2 t^2}} \quad (1-10)$$

式中 δ 为变异系数。即

$$\delta = \frac{\sigma_V}{V_{\text{平均}}}$$

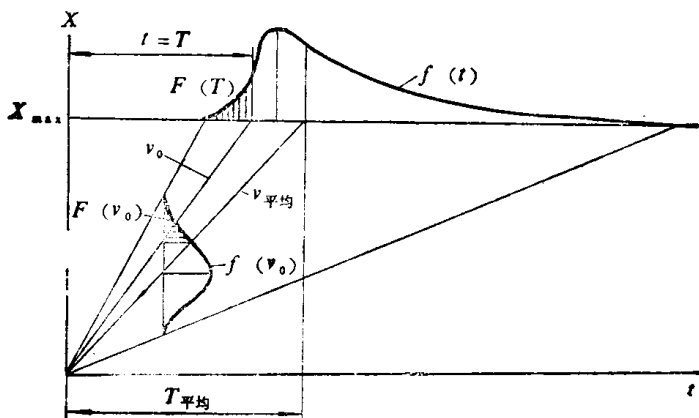


图 1—5 给定具体产品渐发性故障的形成