

机 器 可 靠 性

四川省机械工程学会设备维修专业委员会 编译

四川人民出版社

一九八三年·成都

责任编辑：罗 幸 易
崔 泽 海

机器可靠性

四川人民出版社出版 重庆印制一厂印刷
四川省新华书店重庆发行所发行

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 18.25 插页 2 字数 418 千
1983 年 12 月第一版 1983 年 12 月第一次印刷
印数：1—7,800 册

书号：15118·72

定价：3.05 元

内 容 简 介

本书主要依据苏联技术科学博士 A. C. 普罗尼科夫教授所著《机器的可靠性》(1978年出版),并结合我国情况编写而成。

第一篇分析机器工作能力同可靠性的关系,研究故障物理、故障模型和复杂系统的可靠性。

第二篇研究材料、连接副、机构和机器的磨损,以及磨损同可靠性的关系。

第三篇研究如何通过质量和可靠性管理、工艺、试验和使用与维修以保证机械产品的可靠性。

本书可供有关大专院校、科研单位、机械制造和使用单位中的教学、科研、工程技术、管理和维修人员参考。

编译者的话

国内外有关可靠性的著述虽然很多，但是，从理论到实际系统地阐述机械产品可靠性的专门著作尚属少见。苏联技术科学博士A. C. 普罗尼科夫教授自五十年代以来，即从研究金属切削机床的设计入手，探讨机器可靠性的理论和实际问题，在苏联国内外发表了不少著作。

本书即是以普氏1978年出版的《机器的可靠性》一书为主，补充其它材料，并结合我国情况编译的。原书主要是抓住了机器工作能力耗损过程中的可靠性和故障这一对矛盾，运用现代数学、物理学和其它工程科学的成就，系统地研究了故障的理论问题。然后，依照可靠性观点转入对机器工作能力耗损的主要原因——磨损的研究。最后，对影响机器可靠性的整个过程：设计、计算、制造、试验、质量管理，直至使用与维修的主要问题，作了详尽的论述。重点放在研究机器工作能力耗损的一般规律上，探讨了可靠性的计算和预测方法、故障模型、可靠性试验、磨损量计算和设备的诊断。

原书约四十万字，系统性很强，逻辑严密，论证详备，是机械产品可靠性方面带总结性的重要著作，反映了当前机械制造可靠性理论的水平。但有些方面叙述重复，未免有繁琐之感。

本书由四川省机械工程学学会设备维修专业委员会组织编译，参加人员有：

第一篇编译高钊、谢锦章、王治靖。其中第三章原译稿由罗俊芝提供。高钊校对。

第二篇编译罗俊芝（第五、六、七章）、曹德绵（第八章）。其中第五章由唐少龙、第六章由李季端、第七章由张国治、第八章由东霁提供原译稿。第五章经旦启勋审阅。罗俊芝校对。

第三篇第九、十章由余克怀、第十一章由曹德绵、第十二章由高钊、张鹏程编译。第九章原译稿由赖启源提供。余克怀校对。

绪言和结束语的编译，及全书统一编校为余克怀。最后，本书由葛永康、王世民审阅。

四川人民出版社科技编辑室对本书的编译给了不少帮助，在此谨致谢意。

由于参与编译的人员多，水平所限，缺点错误一定不少，恳望读者批评指正。

编译者 谨识

1982年4月

绪 言

随着现代生产和科学技术的发展，可靠性问题越来越受到重视，各国都制订了有关产品可靠性的标准，就是明证。建立在近代数学、物理学、化学等科学基础上的可靠性理论，三十多年来得到了很大的发展。由于可靠性理论的应用，使各种设备的故障停机损失大大下降。并且，可靠性理论的应用范围也从最初的电子设备扩展到各种类型的设备和系统。

机械产品种类繁多，工作条件千变万化，但其可靠性指标的形成规律有着共通性，是服从客观事物发展的逻辑的。本书主要是研讨机械制造中提高产品可靠性的带共性的问题。

首先是建立可靠性概念的完整体系，即把可靠性理论与其它有关学科的研究课题和相互关系统一起来，明确其各自的作用、意义、性质和相互的数量关系。

其次是研究可靠性与故障的关系，着重讨论故障理论问题。在从前，统计产品故障是掌握产品可靠性的基本情况的主要手段。现在，故障统计只不过是产品的技术反馈信息的处理手段之一，通过统计数据可以了解产品设计、制造和使用中的可靠性指标究竟如何。但是，信息反馈时间很长，单纯靠故障统计资料来提高可靠性，要满足现代技术要求已不再可能。因此，应该从理论上研究在规定的使用条件下，如何运用近代数学和物理学的成就来预测和计算产品可能发生的故障。

可靠性与故障的关系是非常复杂的。这是由于：这些关系都

包含时间因素；产品特性改变的物理过程千变万化；产品各参数的变化过程都是随机过程；对产品可靠性指标的影响来源于设计、制造、使用和维修的全过程。

本书试图运用定量分析与概率计算相结合的办法，通过对使用初期产品工作能力变化的研究，建立各种故障模型，研究各种因素对产品可靠性的影响，从而实现对产品可靠性的计算、预测和评价，把产品的设计、制造、试验、使用和维修置于合理的基础之上。

本书概括了近年来在可靠性理论方面的各种成果，但认为机械产品的可靠性问题有其特殊性，不能机械地照搬电子学方面的可靠性研究成果。因此，对影响机器工作能力最大的磨损过程，着重进行了探讨，并提出了一些新的概念，如机器输出参数的可靠性储备量、机器的损伤程度、潜在故障、工艺过程可靠性，以及产品抗故障的稳定性等。

目 录

绪言	1
第一篇 机器工作能力分析	1
第一章 机器的工作能力和可靠性	2
一 可靠性对现代机器的作用	2
二 基本概念和指标	11
三 机器丧失工作能力的原因	25
四 故障的分类	31
五 产品可靠性的数学模型	37
第二章 故障物理学	50
一 材料内部变化规律的分析	50
二 表面层及其参数	58
三 老化过程的分类	68
四 零件材料损伤程度的估计	79
五 老化过程的典型规律	87
第三章 故障模型	104
一 输出参数变化规律形成过程的分析	104
二 渐发性故障的形成模型	113
三 突发性故障模型	127
四 机器工作能力耗损过程总图	141
五 产品极限状态的确定	158
第四章 复杂系统的可靠性	165

一	复杂系统及其特征·····	165
二	复杂系统可靠度的图算法·····	173
三	复杂系统参数可靠度的计算·····	183
四	可靠性的预测·····	198
五	机器可靠性信息的来源·····	207

第二篇 机器磨损的研究····· 217

第五章 材料的磨损····· 219

一	磨损过程的性质和分类·····	219
二	磨损的基本规律·····	229
三	摩擦形式和润滑对磨损的影响·····	238
四	磨损的测量方法·····	247
五	耐磨材料的选择·····	262

第六章 连接副的磨损····· 271

一	连接副按磨损条件的分类·····	271
二	按接触条件计算连接副的磨损·····	279
三	往复运动导轨磨损的计算·····	293
四	在可变接触条件下连接副的磨损·····	310
五	机器零件结合面的接触问题·····	324

第七章 机构的磨损····· 334

一	刚性连接机构的磨损·····	334
二	多环节机构的磨损·····	342
三	机构的极限磨损·····	350
四	机构从动环节位置在磨损中的变化·····	358
五	机构从动环节轨迹在磨损中的变化·····	365

第八章 机器的磨损····· 377

一	机器磨损的研究·····	377
二	机器磨损时运动参数变化的计算和预测·····	379

三	宏观跑合期机器磨损的预测及计算.....	388
四	机器磨损时动态参数的变化.....	396
五	提高机器耐磨性的基本方法.....	405
第三篇 可靠性的保证		411
第九章 质量和可靠性的管理		413
一	质量和可靠性的管理体系	413
二	企业中的质量和可靠性管理.....	418
三	质量和可靠性的鉴定.....	424
四	标准化对保证质量和可靠性的作用.....	428
五	产品质量的综合管理制度.....	433
第十章 在制造过程中保证机器的可靠性		439
一	制造工艺对可靠性的作用.....	439
二	工艺过程的可靠性.....	445
三	制造质量和可靠性管理.....	454
四	设备的工艺可靠性.....	460
五	工艺过程的后遗问题.....	469
第十一章 可靠性试验		479
一	试验方法和类型.....	479
二	材料性能试验.....	485
三	在试验台上试验可靠性.....	489
四	可靠性的加速试验.....	496
五	复杂系统可靠性试验.....	503
第十二章 机器的使用与维修.....		514
一	机器的使用和可靠性.....	514
二	恢复机器丧失的工作能力.....	525
三	机器的维修性.....	541
四	机器的诊断学.....	548

五 提高机器可靠性的主要方法	560
结束语	566
主要参考资料	570

第 一 篇

机器工作能力分析

第一章 机器的工作能力和可靠性

一、可靠性对现代机器的作用

1. 机器可靠性所研究的内容：现代科学技术能够完成数十年前还只是幻想的事。超音速飞机能够在几小时内飞越数千公里，电子计算机能够在几秒钟内完成过去需要学者花费一生时间才能完成的计算工作量。现代技术装备了现代化的工业，各种机器设备能够完成使人非常疲劳甚至力不能及的工作，生产出复杂的产品。人们用现代技术不断地改造大自然，使它更有利于人类。

我们的时代是科学技术革命的时代，而技术进步往往是与制造复杂的、更加完善的机器和仪器紧密相连的。机器和仪器都在不断地提高技术性能，并且将各种不同的技术装置组合成一个统一的系统。这就必然地会提出许多新的科学技术课题，而解决这些课题，对于进一步发展社会生产力是十分重要的。机器制造的主要课题之一就是机器的可靠性。

现代化机器的发展方向是：提高自动化程度和工作参数（载荷、速度、温度），缩小外形尺寸和减轻重量；提高工作精度和工作效能（生产率、功率、效率），以及将机器纳入集中控制系统。由于机器愈来愈复杂，对机器的要求越来越高，因而，势必提高对机器的可靠性和寿命的要求。可靠性标志着机器在其整个

使用周期内保持所需质量指标的性能。不可靠的机器显然不能有效地工作，因为，无论是由于个别零部件的损伤，或者技术性能降到允许水平以下而造成停机，都会带来巨大的损失，甚至灾难性的后果。即使是发达国家的工业，也都因机器的可靠性和寿命不够理想而经常蒙受重大的损失。在机器的整个使用期内，由于机器零件的磨损而消耗在修理和维护保养上的费用往往是新机器原值的数倍（例如，汽车为6倍，飞机为5倍，机床为8倍，无线电电子设备为12倍）。而由于腐蚀，每年所损失的金属量竟达到其生产量的10%。对无故障性要求高的机器和部件，普遍存在着未能充分使用其潜在能力的问题。这些机器和部件往往提前许多时间从生产中退役，而按其潜在可能性而言，本来在这段时间内还可以制造出大量的产品。

可靠性问题的特点是它和机器的设计、制造和使用各个阶段都有密切的联系。每个阶段都为创造在消耗最少的工时和费用的条件下，达到所要求的可靠性水平的机器而作出贡献。在设计阶段和使用阶段所采取的提高机器可靠性的措施，都将在机器的各项使用指标和经济指标中直接表现出来，而这两类指标却往往是相互矛盾的。因此，有必要弄清可靠性与机器设计、制造和使用各阶段的关系。这些关系可简述如下：

（1） 在设计和计算过程中奠定机器可靠性的基础。机器的可靠性取决于机器和部件的结构，所采用的材料，以及各种防范有害作用的措施，润滑系统，修理和维护的适应性等等结构因素。

（2） 在制造（生产）过程中保证机器的可靠性。这时，可靠性取决于零件的加工质量，检验方法，工艺保证的水平，整机及其部件的装配质量，成品的试验方法等等工艺因素。

(3) 机器在使用过程中表现可靠性。机器的无故障性和耐久性指标，只可能在机器的使用过程中表现出来，这时，可靠性取决于使用方法和使用条件以及所采用的修理制度，维护保养方法，工作规范等等使用因素。

可见，可靠性是一个综合性的问题，它涉及到生产和使用的各个方面。解决可靠性问题，需要各方面的知识，要采用各种新的技术-组织措施。

机器的设计、制造和使用实践中所遇到的各种问题，向可靠性科学提出了许多任务。主要的有：寻找合理的机器结构、预测机器的状态、故障诊断，以及如何在恶劣的使用条件下和发生意外的情况下保证机器的工作能力等。

可靠性是一门研究技术装备和系统质量指标变化规律的科学，并在研究的基础上制定能以最少的时间和费用，保证所需的工作寿命和工作无故障率的方法。可靠性科学在预测系统的状态和行为的基础上建立选取最佳方案的理论，保证所要求的可靠性水平。

可靠性问题有下列特点：

(1) 要考虑时间因素，即研究机器的初始参数在使用过程中的变化；

(2) 要求预测机器的行为和工作状态，判断机器的输出参数（质量指标）能否保持在规定极限范围内。

机器质量指标随时间的变化可分为绝对的和相对的两种。质量的绝对变化是因作用于机器的各种过程所引起的，这些过程不断地改变机器材料的性能和状态，使机器的性能指标下降，并且引起机器的老化。机器质量的相对变化则与出现技术特性更先进的新机器有关。由于旧机器的质量指标已经低于当前平均水平。

所以尽管从绝对意义上讲，质量指标并未发生变化，但在客观上已经发生了机器的无形磨损。可靠性科学所研究的是：机器各种质量指标在各种原因影响下所产生的绝对变化。

可靠性问题的主要内容是预测。在机器的早期研制阶段，即在机器的设计或样机试制阶段，需要预测和估计机器在规定使用条件下的可靠性。但是，可靠性科学并不研究如何达到机器的各项质量指标（如精度、功率、生产率等），而只研究这些指标随时间的变化过程。

关于可靠性问题的研究，迄今为止可以认为有以下两个主要方向。第一个方向，是随着无线电电子技术而发展的，主要内容是研究可靠性的数学估计法（主要适用于复杂系统），和使用信息的统计处理法，以及研究能够保证高度可靠性的复杂系统的结构等。第二个方向，主要适用于机械制造业，包括故障物理学（磨损、疲劳强度、腐蚀）的研究，机械零件的强度、磨损、耐热性等计算方法的研究以及各种保证机器可靠性的工艺方法的研究等。现在，这两个方向正在汇合，形成统一的可靠性科学。

2. 可靠性科学的理论基础：与其它各门应用科学一样，可靠性科学也是以基础数学、基础自然科学以及有助于解决本课题有关问题的学科与理论研究为基础的。

可靠性理论的数学方法已经有了充分的发展，已经提供了广泛的解决实践中各种问题的可能性。在概率论和数理统计理论等基础上，已经建立或正在研究专门的与可靠性课题有密切关系的计算方法。但是，在机械制造中应用可靠性数学计算方法的实践表明，这些计算方法，还远远不能准确地反映所发生的现象本质。在可靠性计算时，还经常出现不加分析地把无线电电子学中的那些数学方法应用于机器制造和仪器制造，忽略了那些可靠性

计算方法只反映了无线电电子技术这个特定对象的特性，诸如：更换失效元件比较方便，在各种不同的设备中，元件大多相同，能够大量储备备用元件，工作无故障概率要求很高等等。因此，在计算基础上得到的结果，常常与经验数据发生矛盾，或者根本没有使用价值。结果造成了一种印象，似乎用数学方法来解决机器可靠性问题是不切合实际的。

数学是一种工具，其使用效果取决于它对所提出任务的适用程度。对于机器制造来说，数学方法必须考虑机器故障的产生和排除的特点。对于机器来说，解决可靠性问题的主要线索不能只是故障统计。关键是必须研究那些引起机器及其零件的初始质量指标发生变化的物理过程。这些物理过程服从某种物理规律，具有随机性质，存在着相互之间的作用，并且与产品输出参数的变化有极其复杂的关系。以函数关系为基础，结合概率论和随机过程理论、优选法、信息理论和数学逻辑理论等的应用，可以揭示这种复杂关系。

可靠性科学的第二个理论基础是研究材料破坏，老化和性能变化的物理过程的各种自然科学研究成果。这里所说的材料包括用于制造机器本身的材料和机器运行所必不可少的材料（燃料、润滑剂等等）。属于这一方面的有：材料的机械破坏形式（材料强度不足、蠕变）、材料内部和表面层的变化（物理-化学力学、摩擦学）、材料破坏的化学过程（金属腐蚀、聚合材料的老化）等等。从可靠性的角度将这些科学成果集中起来，即称为“故障物理学”。“故障物理学”主要研究产品使用过程中的材料性能变化。

最后，可靠性理论还要用到机器的所有计算、设计和制造工艺成果，包括描述质量指标与某些因素（在机器的使用和制造过