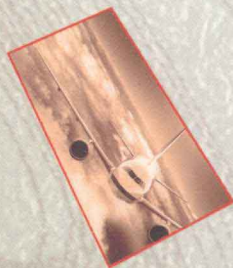
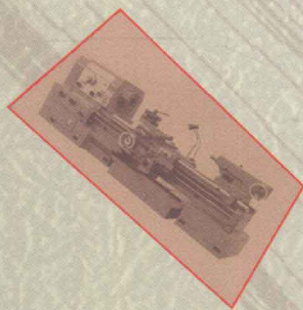


# 机械可靠性漫谈

张义民  
编著

*Introduction of  
Mechanical Reliability*



科学出版社

# 机械可靠性漫谈

张义民 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书深入浅出地介绍了机械可靠性的总体框架、基本知识、物理机理及应用实践。本书内容丰富,概念清晰,阐述详尽,系统性强,为读者展现了一个绚丽多彩的机械可靠性世界,有助于开阅读者的视野、提升读者的思维能力、培养读者的探索精神,使读者从中体会到机械可靠性的奇妙性和实用性。

本书可作为高等院校机械设计等相关专业的本科生和研究生的阅读参考书,也可供从事机械可靠性研究的相关科学技术和工程技术人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械可靠性漫谈/张义民编著. —北京:科学出版社, 2012. 10

ISBN 978-7-03-035718-2

I. ①机… II. ①张… III. ①机械设计-可靠性设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 236755 号

责任编辑:陈 婕 / 责任校对:朱光兰

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2012年10月第一次印刷 印张:14 3/4

字数:238 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者简介



张义民，生于 1958 年 9 月，工学博士，东北大学机械工程与自动化学院院长，教授，博士生导师，“长江学者”特聘教授，国务院学位委员会学科评议组（机械工程学科）成员，国家自然科学基金委员会机械学科评审组专家，“长江学者和创新团队发展计划”创新团队带头人，享受国务院政府特殊津贴人员，中国机械工业青年科技专家，国家安全重大基础研究项目专家组专家，《机械设计与制

造》主编，《振动、测试与诊断》副主编，《机械工程学报》、《振动工程学报》、《中国机械工程》等期刊编委。

主持国家自然科学基金项目、国家自然科学基金重点项目、“863”目标导向类项目、国家科技支撑计划项目、“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项、“长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目等省部级以上科研项目 30 多项。获国家科技进步奖二等奖 1 项，教育部自然科学奖一等奖 1 项，教育部科学技术进步奖一等奖 2 项，通用汽车中国高校汽车领域创新人才奖一等奖 1 项、省级科技进步奖励 11 项，国家自然科学基金优秀（十佳）项目 2 项，吉林省第三届青年科技奖 1 项。

截至 2011 年，在国内外著名期刊《中国科学》(E 辑)、《科学通报》、*Mech Res Commun*、*Comput Struct*、*Math Mech Solids*、*AIAA J*、*Nonlinear Dynam*、*Comput Method Applm*、*J Vib Acoust-T ASME*、*J Mech Design-T ASME*、*P IMechE C-J Mec*、*P IMechE D-J Aut*、*J Sound Vib*、*J Vib & Control* 等上发表论文 200 余篇，其中有 203 篇（次）论文被 SCI (51 篇)、EI (176 篇)、ISTP (21 篇) 等检索系统收录，被 SCI 和国内核心期刊等引用约

1000 余次；独立撰写专著和教材 7 部，主编论文集 1 部，合作撰写专著 2 部。

出访过美国、德国、法国、比利时、荷兰、奥地利、澳大利亚、马来西亚、新西兰等国家和地区进行学术交流和参加国际会议，并作学术报告。

# 前言

人类已经步入信息时代，人们不可能完全掌握浩如烟海的知识，因此如何培养获取知识的能力，以便在知识的天空里自由地翱翔；如何提高自身的素质，以便在社会的海洋里乘风破浪；如何培养发现并提炼问题的能力，以便在芸芸众生中出类拔萃，应该说是现今时代培养创造性思维的重要因素。然而创造性思维的出现，首先应是对所思考的问题有着十分浓厚的兴趣和非常广泛的知识基础。可见在求知成才的道路上，应该培养和激发对学术的兴趣。兴趣不仅是求知的先导，也是锲而不舍的动力，更是激发灵感的要素。作为教师不仅要传授知识，更要培养学生的兴趣、激发学生的创新意识、提高学生的素质、培养学生的能力。本书从推广与普及机械可靠性知识的需要出发，根据作者多年从事机械可靠性研究和实践工作取得的经验和成果，阐述了机械可靠性的基本思路和应用概况。本书力求概念清晰，通俗易懂，力图激发学生的兴趣，增强学生的各种能力，教导学生观察世界和认识世界，拓宽学生的思路，挖掘学生的潜能，激发学生想象力，为培养各类高级人才打下坚实的基础。

机械可靠性是机械产品使用过程中质量指标的重要反映，其显著特点与产品的设计、制造和使用全寿命周期的各个阶段均密切相关，所以每个阶段都应该为创造最经济且又具有要求的可靠性水平的产品而努力。机械可靠性研究的主要内容为机械产品的可靠性数据采集和统计、可靠性设计和分析、可靠性试验和验证、可靠性预计和分配、可靠性管理和质量体系等。机械产品的可靠性是用户最为关心的质量问题之一。随着世界科学技术的发展和应用，机械产品的结构系统日趋复杂、性能要求日趋优良、使用条件日趋严酷，这使得机械可靠性的研究越加重要。与先进国家相比，我国机械产品的可靠性水平相对较低，故障给用户带来了损失。我国机械可靠性的研究与应用起步较晚、推广与普及相对困难，因此改善与提高我国机械可靠性研究和应用的状况与水平乃是当务之急。为此，要求机械设计人员在掌握常规

机械设计方法的基础上,进一步了解和熟悉机械可靠性设计的基本思路、方法和技术。这样,不仅可以拓宽和补充常规的设计理论,加深对常规设计的全面认识,而且对推广与普及可靠性知识、提高产品质量是十分必要的。

由于可靠性是考虑了时间因素的质量,且越来越多的机械产品要求必须具备可靠性指标,因而应该加深对常规设计的全面认识并推广可靠性技术。目前,我国机械可靠性的应用和推广仍存在很大的困难,原因是多方面的,但是主要与传统机械设计方法、可靠性积累、可靠性机制、可靠性试验、可靠性方法、可靠性人才培养等方面密切相关:①传统的机械设计方法使用了相当大的安全系数,掩盖了可靠性与经济性、可靠性与轻量化、可靠性与资源利用等方面的关系。②可靠性设计需要足够的呈分布状态的设计数据,而获得这些数据并非一日之功,不仅需要进行可靠性统计与试验,同样需要建立起一整套自上而下的可靠性管理制度和机构,促进必要的设计评审、可靠性标准制定、可靠性数据库建立等方面工作的开展。③可靠性试验是一种既费时又费钱,且需要大量人力投入的工作,由少数人和单位完成这样的试验有相当大的难度,而机械产品的可靠性试验比电子、电气元件和设备的可靠性试验要困难得多。④定量的可靠性研究需要系统深入的专业理论知识,这在某种程度上限制了可靠性技术的推广与普及;定性的故障分析发现产品的薄弱环节以后,通常采取更换高质量的零部件的办法来提高产品的可靠性,但是就我国科学技术整体水平与世界先进国家的差距来看,这必然是导致重要机械产品关键件大量进口的原因之一,而且不利于民族工业的发展,因此从本质上讲要大力加强关键基础件的定量可靠性技术的研发。⑤目前我国机械领域内无论在数量方面还是在质量方面,无疑都要加强培养从事可靠性工作的人才,拓宽和补充常规的设计理论方法,开展可靠性的科学研究工作。因此,作者撰写本书的目的就是为提高我国机械可靠性研究与应用的水平、提升我国机械产品的质量与可靠性尽微薄之力。

在本书撰写过程中,作者参考了一些国内外的资料,限于篇幅,在参考文献目录中只列出了其中的一部分。在此,谨向所有原作者表示衷心的感谢。同时,本书也得到了多方人士及团队成员的热情鼓励 and 大力支持,在此也一并深表谢意。

鉴于作者并非专业的科普作家,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者不吝批评、指正。

# 目 录

## 前言

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....         | 1  |
| 1.1 可靠性研究的重要性 .....           | 2  |
| 1.2 机械可靠性的内涵 .....            | 5  |
| 1.3 可靠性与质量的关联.....            | 11 |
| 1.4 可靠性技术的发展简史.....           | 12 |
| 1.5 机械可靠性研究的现实问题.....         | 17 |
| 1.6 机械可靠性的发展趋势.....           | 19 |
| <b>第 2 章 可靠性的基本概念</b> .....   | 22 |
| 2.1 可靠性定义 .....               | 22 |
| 2.2 失效的概念 .....               | 24 |
| 2.3 可靠性尺度 .....               | 29 |
| 2.4 可靠性的分类.....               | 39 |
| 2.5 可靠性的基本假设.....             | 41 |
| 2.6 可靠性分析和计算方法 .....          | 43 |
| <b>第 3 章 可靠性数据采集与分析</b> ..... | 46 |
| 3.1 可靠性数据采集.....              | 46 |
| 3.2 可靠性数据分析的基本方法.....         | 53 |
| <b>第 4 章 可靠性设计</b> .....      | 58 |
| 4.1 常规的机械强度设计.....            | 58 |
| 4.2 机械可靠性设计.....              | 62 |
| 4.3 动态与渐变可靠性设计.....           | 76 |
| 4.4 可靠性优化设计.....              | 82 |
| 4.5 可靠性灵敏度设计.....             | 88 |
| 4.6 可靠性稳健设计.....              | 92 |
| 4.7 随机相关性分析与相关系数量值选取.....     | 94 |



|                    |     |
|--------------------|-----|
| <b>第 5 章 可靠性试验</b> | 99  |
| 5.1 可靠性试验的目的       | 99  |
| 5.2 可靠性试验的分类       | 100 |
| 5.3 可靠性试验的综合安排     | 106 |
| 5.4 可靠性试验的要素       | 107 |
| 5.5 可靠性试验计划        | 112 |
| 5.6 载荷谱的确定         | 113 |
| <b>第 6 章 可靠性增长</b> | 116 |
| 6.1 可靠性增长的目的与作用    | 116 |
| 6.2 可靠性增长的工程原理     | 118 |
| 6.3 可靠性增长试验        | 129 |
| <b>第 7 章 系统可靠性</b> | 136 |
| 7.1 系统可靠度          | 136 |
| 7.2 故障模式、影响及危害性分析  | 140 |
| 7.3 可靠性预计与可靠性分配    | 152 |
| 7.4 故障树分析          | 169 |
| 7.5 随机有限元分析        | 180 |
| <b>第 8 章 可靠性管理</b> | 192 |
| 8.1 ISO9000 质量体系   | 192 |
| 8.2 可靠性管理的内容       | 195 |
| 8.3 可靠性大纲          | 200 |
| 8.4 设计审查           | 204 |
| 8.5 生产及使用阶段的可靠性管理  | 211 |
| <b>参考文献</b>        | 214 |
| <b>后记</b>          | 224 |

你思考过可靠性问题吗？你可能回答：可靠性是专家学者研究的乏善可陈和枯燥无味的学术与技术问题。其实可靠性与我们的生活息息相关，紧密围绕在我们的身边，如桥梁的断裂、楼房的倒塌、汽车的故障、飞机的坠毁、船舰的沉没、火车的脱轨、家用产品的损坏、甚至食品的污染与人诚信的缺失等，因可靠性差而引起的事件几乎每天都在发生，可见可靠性问题涉及百姓生活的方方面面。

这里有一个降落伞公司为空军供给可靠降落伞的故事，它讲述了企业生产者要像重视自己生命一样重视产品的可靠性。空军司令问公司总经理：你们的产品是不是百分之百可靠？是不是全部经过实践检验？公司总经理回答：我们不可能做到百分之百经过实践检验，我们只是抽查检验。空军司令生气了，命令公司总经理必须百分之百检验全部降落伞，而且必须经过总经理本人和公司员工亲自跳伞以验证其可靠性。可以想象，如果按照空军司令的命令执行，公司的降落伞想不可靠都难！这个故事说明了企业生产者在专注于获取利润、占有市场和节约成本的同时，必须重视产品的安全性、可靠性方面的提升，这样才能迅速赢得消费者的青睐。

再例如，重达数吨的庞然大物——火箭由成千上万个元器件和零部件组合而成，其元器件和零部件的可靠性必须达到 0.99999999999999，也就是说多次随机抽检 100 亿个元器件和零部件，平均不可靠的元器件和零部件不得超过一个。诚然，这种火箭的可靠性应该值得信赖。然而，世界范围内许多国家和地区（如美国、俄罗斯、欧洲、韩国、日本、中国等）均有火箭发射失败的案例。可见，随着越来越复杂的元器件、零部件、子系统等相互联系在一起，很难完全了解这样的系统可能出现故障的众多相关模式。虽然工程师尽最大努力设法使这样复杂的系统不发生故障或一旦发生故障不至于出现安全问题，并且期望排除故障以后，故障就绝不会再次发生，但是不论我们愿意与否，故障总是一而再地发生。因此，我们必须同未知的和无法辨明其可靠性的人和系统共存，这样我们就应该对可靠性有所了解。

## 1.1 可靠性研究的重要性

自从 Robert Lusser 于 1952 年在美国 San Diego 提出了可靠性的科学定义以来,可靠性工程作为一门工程学科受到重视已经有 60 余年。在此期间,可靠性工程广泛地应用于航空航天、机械工程、交通运输、材料冶金、石油化工、医疗设备、食品加工等各个工业部门之中,其发展之迅速、应用之广泛,远非一般应用科学可以比拟。1981 年,美国的 Henley 和日本的 Kumamoto 都曾指出:在过去的 10 年内,除环境科学和计算机技术以外,没有其他应用科学像安全、风险和可靠性分析那样得到惊人的发展和推广。1984 年, Coppola 甚至认为:可靠性已经更强烈地反映出了历史发展的趋势。

对于机械产品来说,可靠性问题和人身安全与经济效益及社会效益密切相关。因此,研究机械产品的可靠性问题就显得十分重要、非常迫切。

(1) 提高产品的可靠性,可以防止故障和事故的发生,尤其是避免灾难性的事故发生。诸如:

① 在第二次世界大战期间,美国空军的飞机(如图 1.1 所示)由于飞行故障而损失的达 21000 架,比被击落的多 1.5 倍。



图 1.1 第二次世界大战期间的战机

② 1986 年 1 月,美国“挑战者”号航天飞机的火箭助推器内的橡胶密封圈因温度低而失效,结果引起航天飞机爆炸,造成 7 名宇航员遇难和重大(12 亿美元)的经济损失(如图 1.2 所示);其后,美国的“大力神”火箭、“德尔塔”火箭和法国的“阿里安”火箭相继失事,使得 1986 年成为国际航天界的“黑色灾难年”。

③ 1992 年 3 月,我国发射“澳星号”(如图 1.3 所示)时,由于一个小小零件的故障(程序变电器,点火的一个触点,进去了

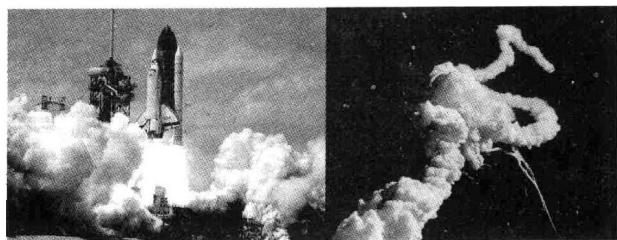


图 1.2 “挑战者”号航天飞机发射状况

0.2mg 的东西,造成短路),发射没有成功,造成了巨大的经济损失和政治影响。

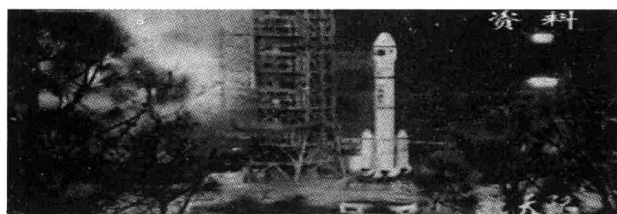


图 1.3 卫星发射现场

④ 各种故障和失效不仅威胁着航空工业,也给机械装备、交通运输、动力机械、化工机械、工程机械等造成威胁。就电站设备来说,德意志联邦共和国的蒸汽轮机设备在 1971~1974 年共发生过 1393 起事故,法国核电站的压力容器和英国核电站的大型锅炉也都发生过爆炸事故。至于高压储罐、氧气顶吹转炉主轴、输送石油的各种管道、阀门,机械中的曲轴、连杆、齿轮、轴承及焊铆接件等的损坏事故就更无法统计。核电站等设备见图 1.4。

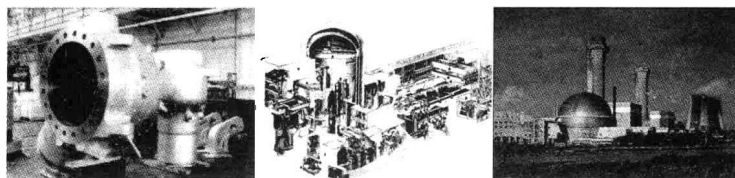


图 1.4 核电站等设备

⑤ 在世界各国,大型旋转机械屡屡发生毁机事故,一台 30 万千瓦以上的汽轮机组因故障停机 1 天,造成的经济损失可达数百万元。

我国 20 万千瓦机组曾发生 3 次毁机事故，每次毁机损失达数亿元。20 世纪 70~90 年代，世界各国的若干大型旋转机械都因为转子激烈振动而发生过机毁人亡的惨剧。旋转机械故障示例见图 1.5。

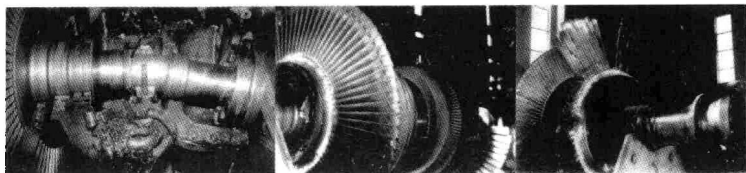


图 1.5 旋转机械故障示例

⑥ 国产的高档数控机床的功能部件和整机等多种产品的可靠性低，使得我国数控机床功能与性能质量很难达到满意的程度，必然导致依赖进口、受制于人，并且削弱成本竞争力，这是摆在机床行业面前的现实困难。机床与功能部件的可靠性状况见图 1.6。

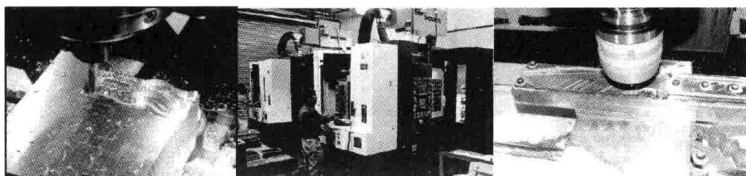


图 1.6 机床与功能部件的可靠性状况

⑦ 同世界汽车的可靠性先进水平相比，我国汽车可靠性仍处于初期阶段（如图 1.7 所示），可靠性管理体系尚未在汽车行业和大中型企业中建立起来，可靠性设计技术基本上没有在设计部门推广，还没有形成全行业重视可靠性工作的局面。



图 1.7 汽车的失效示例

(2) 提高产品的可靠性，能够使产品的总费用降低。

提高产品的可靠性，首先要增加费用，如选用高质量的零部件，或者进行可靠性设计、分析、试验等，这些都需要经费。然而，产品可靠性的提高使得维修费及停机检查损失费大大减小，使总计费用与长期费用降低。

(3) 提高产品的可靠性, 可以提高产品可用率。

一台高可靠性的设备可以顶多台设备用, 可以发挥几倍的效益。美国 GE 公司经过分析认为, 对于发电、冶金、矿山、运输等连续作业的设备, 即使可靠性提高 1%, 成本提高 10% 也是合算的。

(4) 提高产品的可靠性, 能够改善企业的信誉与形象, 增强企业竞争力和影响力, 从而提高经济效益和社会效益。

据报道, 美国 1969 年 7 月登月成功的 Apollo 飞船有 720 万个零(元、器)件, 共有 120 所大学、15000 个单位的 42 万人参加研制。其零(元、器)件具有高可靠性(上面标有可靠度为 0.999999999), 因为如果有一个零件失效, 将会导致整个系统发生故障, 造成灾难性的后果。在登月成功之后, 美国国家航空航天局(NASA)将可靠性工程技术列为三大技术成就之一, 并认为可靠性技术是主要的, 将 Apollo 计划称为可靠性的充分体现。Apollo 飞船登月状况见图 1.8。

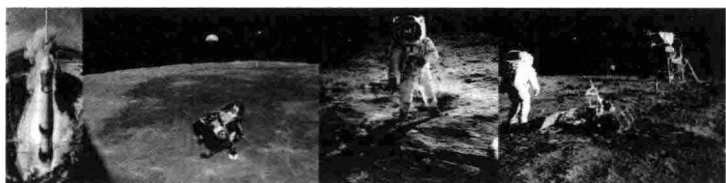


图 1.8 Apollo 飞船登月状况

随着世界科学技术的迅速发展, 机械可靠性工作也出现了崭新的局面。在机械可靠性领域, 新原理、新方法与新技术不断涌现, 大大提高了可靠性水平与研发速度。特别是对于结构复杂、使用条件要求高的产品, 改变了设计难度大而不能设计或设计的质量低、周期长的状况。可靠性技术现在越来越受到各行各业的重视, 因为人们已开始强烈地关心所购买的设备和产品的可靠性。只有高可靠性的产品, 企业才可以在市场竞争中取胜, 使产品畅销全球, 从而获得巨大的经济效益, 可见今后产品竞争的焦点是可靠性。

## 1.2 机械可靠性的内涵

机械产品是指机械企业所提供的成品或附件, 如机床、汽车、发动机、汽轮机、发电机、压缩机等都称为机械产品。任何机械产品都可以看做由许多零件组成可以做功或有特殊作用的装置和设备。各种

机械可靠性是指机械产品在规定的使用条件下、规定的时间内完成规定功能的能力。由于工程材料特性的离散性以及测量、加工、制造和安装误差等因素的影响,机械产品的系统参数具有固有的不确定性,因此考虑这种固有随机性的可靠性设计技术至关重要。据有关方面统计,产品设计对产品质量的贡献率可达70%~80%,可见设计决定了产品的固有质量特性(如功能、性能、寿命、安全性和可靠性等),赋予了产品“先天优劣”的本质特性。相应地,可靠性技术大体上可以分为可靠性数据采集与统计分析、可靠性可靠性设计与分析、制造装配可靠性、使用维护可靠性、可靠性增长、可靠性预计与分配、人机可靠性、可靠性试验和可靠性管理等学科。机械可靠性是机械科学的重要组成部分。图1.9为机械可靠性的体系框图。

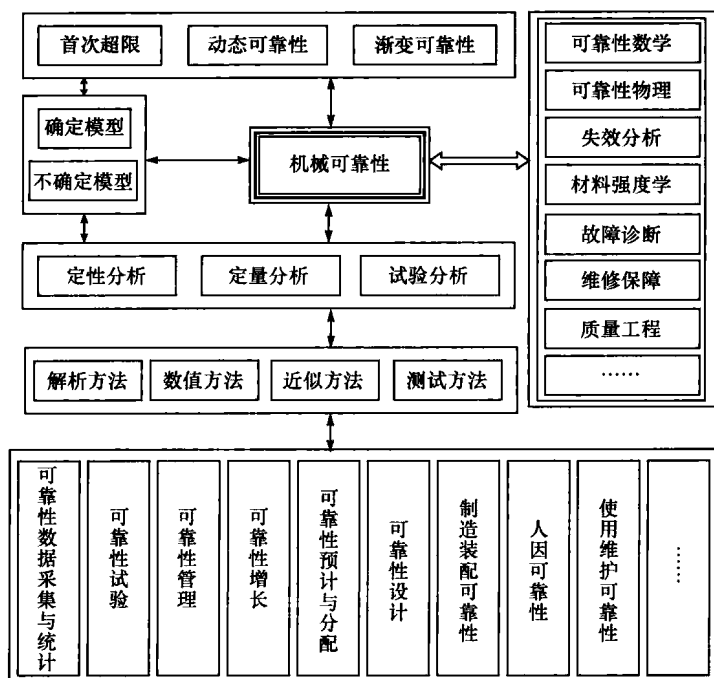


图 1.9 机械可靠性的体系框图

机械产品大多是众多学科交叉的高新技术的载体,其性能要求日趋向高速化、大功率化、精密化、轻量化、智能化、极端化、高可靠性、宜人化、环境友好等方向发展,机械可靠性均与机械产品性能要求密切相关,这些性能的优劣将决定激烈市场竞争的胜负与社会经济效益的多寡。机械产品性能要求和机械可靠性的关系见表 1.1 所示。

表 1.1 机械产品性能要求和机械可靠性的关系

| 编号 | 产品性能 | 说明                                           | 产品性能与可靠性的关系                              |
|----|------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1  | 高速化  | 涉及机械产品的运行速度,提高生产效率                           | 高速化必然引发产品更多的故障与失效问题,需要进行可靠性分析与动态设计       |
| 2  | 大功率化 | 涉及机械产品的功率,大马力的驱动装置会凸显机械可靠性与振动问题              | 大功率化必然使故障越发增多、失效问题越发突出,需要进行可靠性分析与动态设计    |
| 3  | 精密化  | 精度对机械产品(如机床、电子封装设备和导弹控制系统等)具有特别重要的意义         | 精密化必然根据精度要求,进行与可靠性相关的精密可靠性研究             |
| 4  | 轻量化  | 机械产品的成本中必然包括材料成本,使用成本中也包括耗能状况,性能优良与否也涉及产品的重量 | 轻量化需要对机械产品或零部件进行动态可靠性设计,可靠性技术是有效的轻量化技术之一 |
| 5  | 智能化  | 智能化提升了产品设计制造过程的自动化水平,使生产效率和产品质量极大提高          | 智能化必然涉及动态控制的可靠性问题                        |
| 6  | 极端化  | 极端机械产品涉及高速、高精度、重量轻等特性                        | 极端化必然涉及机械可靠性与动态设计问题                      |
| 7  | 高可靠性 | 不仅涉及机械零件的强度、刚度及耐磨性等,而且还涉及机械运动与控制的可靠性和稳健性     | 机械产品的高可靠性是可靠性研究的本体内容                     |



续表

| 编号 | 产品性能 | 说明                                 | 产品性能与可靠性的关系                                  |
|----|------|------------------------------------|----------------------------------------------|
| 8  | 宜人化  | 操作方便性、自动化、智能化及产品的安全性、舒适性、宜人化要求尤为重要 | 宜人化必然要进行机械产品振动分析与稳定性分析，所涉及的各种问题均需要解决相应的可靠性问题 |
| 9  | 环境友好 | 运载工具的废气排放量、机械产品的振动和噪声等             | 减轻重量是节能减排的手段之一，也是促进环境友好的途径之一，可见其与机械可靠性密切相关   |

能否保证机械产品在运行过程中的安全可靠是机械产品竞争的焦点，这种竞争主要体现在产品可靠性的竞争，可见“物美、价廉”必须以可靠性工程作为后盾。在应用所有的定性与定量的可靠性理论方法之前通常使用一些保证产品“可靠”的实用经验，以保障所研制的机械产品的安全可靠。研发“可靠”的机械产品的基本前提如图 1.10 所示。

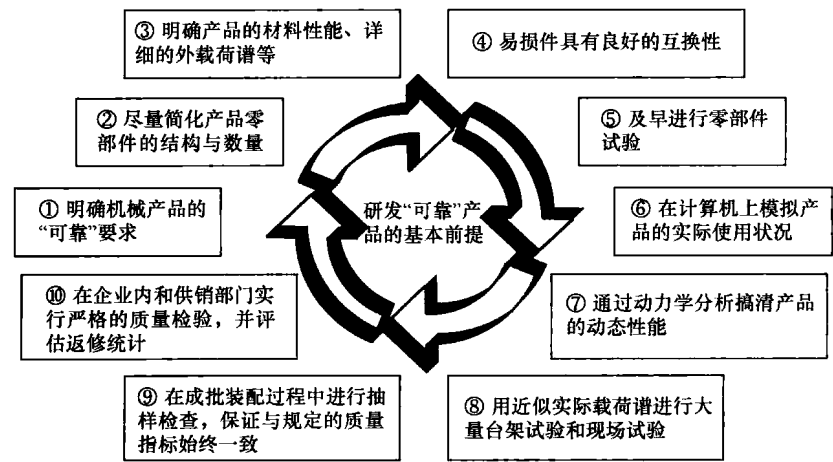


图 1.10 研发可靠机械产品的基本条件

再者，为了达到产品要求的功能与性能，在产品的设计过程中，既要保证设计的可靠性，又要保证根据设计要求组装产品的零部件的预期寿命与可靠性的裕度。表 1.2 给出了产品设计的共性问题。可见