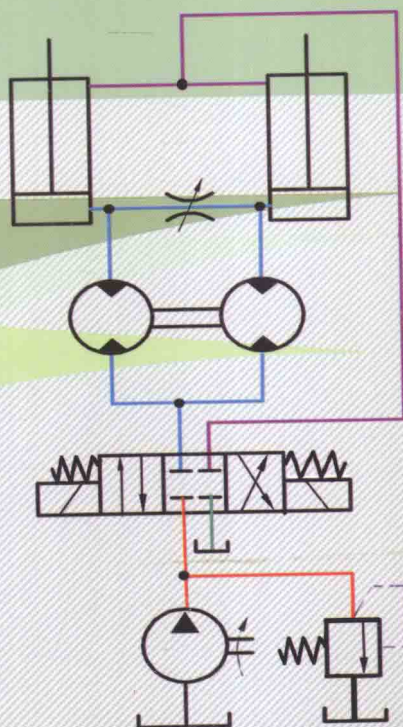




21 世纪液压气动系统经典图书系列

液压系统 可靠性工程

机械工程学会流体传动与控制分会 组编
燕山大学 赵静一 姚成玉 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





21 世纪液压气动系统经典图书系列

液压系统可靠性工程

机械工程学会流体传动与控制分会 组编

燕山大学 赵静一 姚成玉 编著



机械工业出版社

本书是作者在总结多年教学和科研经验的基础上撰写而成的。本书共分 10 章, 内容包括液压系统可靠性工程概述、可靠性的理论基础、液压系统的可靠性分析、液压系统的可靠性设计及预测、故障树分析和故障模式影响分析、液压产品可靠性试验、可靠性计划与管理、液压系统可靠性工程实例、液压系统的模糊可靠性以及 T-S 模糊故障树。

本书的特色是, 可靠性理论系统简明、紧密结合液压行业, 实例大多取自于作者的工程设计项目, 实用性强。

本书可作为机械类本科生或研究生的教学用书, 也可供工矿企业、科研院所从事液压设备设计、运行、管理、维修的工作人员及有关科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

液压系统可靠性工程 / 赵静一, 姚成玉编著.

—北京: 机械工业出版社, 2011.6

(21 世纪液压气动系统经典图书系列)

ISBN 978-7-111-34152-9

I. ①液… II. ①赵… ②姚 III. ①液压系统—可靠性工程 IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 066417 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张秀恩 责任编辑: 舒雯 张秀恩

责任校对: 刘志文 封面设计: 陈沛

责任印制: 乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·24.75 印张·480 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-34152-9

定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

策划编辑 (010) 88379770

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

封面无防伪标均为盗版

读者购书热线: (010) 88379203

前 言

液压系统在各种设备和系统中往往处于控制和动力传输的重要核心地位，广泛地应用于国民经济的各个领域。随着科学技术的日新月异，产品的功能越来越先进，结构越来越复杂，使用环境要求越来越严格，人们对液压系统的可靠性要求也越来越高。大量实践经验和理论分析均清楚地表明，改善液压系统可靠性意味着大幅度降低液压系统的使用和维修费用及有效地提高设备的效能。因此，要求相关行业的科技人员掌握可靠性分析、设计、试验和管理等理论，并与液压元件及产品的特点结合起来，这对提高液压产品的可靠性水平，具有重要的现实意义。

可靠性工程是以概率论与数理统计为基础，具有一定深度的综合学科，可靠性与液压系统的结合也是近几十年的事情，目前正处于蓬勃发展的阶段。液压可靠性工程的普及，有利于提高国内液压元件及产品的市场竞争力。

液压设备可靠性的高低，取决于它的设计研究、元件选取、生产制造、检验及使用全过程。要提高液压设备可靠性，对于从事这方面工作的技术人员来说，除了要具备产品本身的设计、制造等专业知识外，还要具备数学、物理、环境技术、试验分析等相关可靠性方面的知识。

本书注重液压系统工程实际应用，取材广泛，实用价值高；同时，保留了可靠性的基础理论，基本概念清楚；特别将笔者科研团队的科研项目（水压机、压块机、压装机、压滤机、液压试验台、工程机械和特种车辆等）与基金研究成果（国家自然科学基金<50905154>、河北省自然科学基金<503293、E200700387>、高等学校博士学科点专项科研基金<20091333120005、20050216004>、河北省博士资助基金<02547020D>、河北省择优资助博士后科研项目等）编入到本书相关章节中，从深度和前沿性上提高了内容的层次。

全书共分10章。第1章为液压系统可靠性工程概述；第2章“可靠性的理论基础”详细地介绍了液压系统可靠性工程的基本概念、基本特征量和常用的概率分布；第3章“液压系统的可靠性分析”讨论了液压系统的可靠性分析和可靠性分配，介绍了典型不可修系统的可靠性计算方法和可修系统使用马尔柯夫过程计算可靠性的方法，并介绍了简单的可靠性分配方法；第4章为液压系统的可靠性设计及预测；第5章为故障树分析和故障模式影响分析；第6章为液压产品可靠性试验；第7章为可靠性计划与管理；第8章为液压系统可靠性工程实例；第9章为液压系统的模糊可靠性，介绍了液压系统的模糊可靠性设计与预测，模糊故

障树分析和模糊综合评价评价方法,丰富和完善了液压系统可靠性理论;第10章介绍了 T-S 模糊故障树分析方法,提出了 T-S 重要度的概念及其计算方法,同时与传统故障树分析方法和部件重要度分析方法进行对比验证,并给出融合 T-S 模糊故障树和灰色模糊多属性决策的故障搜索方法。

本书由燕山大学赵静一教授(第1、4、6、7、8章)、姚成玉副教授(第2、3、5、9、10章)编著完成。研究生党振、张荧驿、刘文静和王旭峰硕士参加了本书的编写,为本书的文字、绘图、排版及内容编写等工作,付出了辛勤的劳动。

由于编者水平有限,本书难免存在疏漏或不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 液压系统可靠性工程概述	1
1.1 可靠性工程概述	1
1.1.1 可靠性工程的基本任务和目的	1
1.1.2 可靠性工程的发展	2
1.1.3 可靠性工程的重要意义	5
1.2 液压可靠性工程的发展	7
1.3 液压系统可靠性的研究内容	9
1.3.1 液压可靠性研究的现状	9
1.3.2 液压系统可靠性研究的展望	12
1.4 液压系统可靠性工程体系	13
第 2 章 可靠性的理论基础	15
2.1 可靠性的基本概念	15
2.1.1 可靠性的定义及分类	15
2.1.2 产品寿命	17
2.2 可靠性的主要度量指标	18
2.3 常用的概率分布	26
第 3 章 液压系统的可靠性分析	35
3.1 可靠性模型	35
3.1.1 可靠性模型的概念	35
3.1.2 可靠性模型的用途	37
3.2 不可修系统的可靠性分析	37
3.2.1 串联系统	38
3.2.2 并联系统	40
3.2.3 串-并联系统与并-串联系统	43
3.2.4 表决系统	44
3.2.5 贮备系统	46
3.3 可修系统的可靠性分析	50
3.3.1 可修系统的基本概念	51
3.3.2 可修系统的主要度量指标	51

3.3.3	可修系统可靠性分析的理论基础	54
3.3.4	典型可修系统模型	58
3.4	可靠性分配	65
3.4.1	可靠性分配原则	65
3.4.2	可靠性分配方法	66
第4章	液压系统的可靠性设计及预测	78
4.1	液压系统可靠性设计概述	78
4.1.1	可靠性设计的重要性	78
4.1.2	可靠性设计的目的、任务和要求	79
4.1.3	可靠性设计方法和内容	81
4.2	液压系统可靠性设计方法	82
4.2.1	可靠性设计准则	83
4.2.2	液压系统降额设计方法	84
4.2.3	液压系统余度设计方法	84
4.2.4	机械设计中的干涉理论	93
4.3	液压系统可靠性设计实例	106
4.3.1	10MN 水压机系统改造可靠性设计	106
4.3.2	液压机新型液压系统设计	116
4.3.3	电控系统的可靠性设计	120
4.4	液压系统可靠性预测	122
4.4.1	概述	123
4.4.2	可靠性预测方法	124
4.5	液压系统可靠性预测实例	131
4.5.1	压装机液压系统可靠性预测	132
4.5.2	可靠度预测结果分析	135
第5章	故障树分析和故障模式影响分析	137
5.1	故障和故障树	137
5.1.1	故障的基本概念	137
5.1.2	故障树概述	141
5.2	故障树分析法	143
5.2.1	定性分析	143
5.2.2	定量分析	148
5.2.3	液压系统的故障树分析	158
5.3	故障模式影响及致命度分析	161
5.3.1	故障模式影响与致命度分析概述	161

5.3.2	表格分析	163
5.4	FTA 和 FMECA 的综合分析法	165
5.4.1	FTF 方法的基本原理	165
5.4.2	FTF 方法的实施步骤	166
5.5	基于故障树分析的故障搜索策略	167
5.5.1	问题的提出	167
5.5.2	最优搜索策略的求解算法	168
5.5.3	液压系统故障诊断搜索实例	173
第 6 章	液压产品可靠性试验	176
6.1	液压可靠性试验的分类与故障判据	176
6.1.1	液压可靠性试验的分类	176
6.1.2	液压可靠性试验的要素	178
6.2	液压产品环境应力筛选试验	180
6.2.1	基本概念	180
6.2.2	环境应力筛选的作用及应用	180
6.2.3	环境应力筛选的基本特征	181
6.2.4	环境应力筛选与有关工作的关系	182
6.2.5	环境应力的筛选效果比较	183
6.2.6	环境应力的筛选的几种典型筛选应力	184
6.3	可靠性加速寿命试验	187
6.3.1	可靠性寿命加速寿命试验的目的和用途	187
6.3.2	可靠性寿命加速寿命试验的类型	187
6.3.3	液压元件的磨损强化寿命试验	189
6.4	可靠性增长试验与评定	192
6.4.1	可靠性增长试验	192
6.4.2	可靠性评定	197
第 7 章	可靠性计划与管理	205
7.1	可靠性计划与管理概述	205
7.1.1	可靠性计划	206
7.1.2	可靠性管理	208
7.1.3	可靠性活动的组织	210
7.2	液压系统的使用可靠性分析	211
7.2.1	液压系统的使用可靠性分析	212
7.2.2	人机系统的可靠性分析	212
7.3	液压系统可靠性管理	215

7.3.1	液压系统的管理体系	216
7.3.2	液压系统可靠性管理流程	217
7.3.3	液压可靠性管理与液压系统保养	219
7.3.4	液压系统可靠性管理的维修性设计	220
7.3.5	液压系统可靠性管理与维修团队	225
第8章	液压系统可靠性工程实例	232
8.1	10MN 水压机	232
8.1.1	水压机可靠性模型及可靠性分配	232
8.1.2	液压系统的故障模式效应及致命度分析	236
8.1.3	液压系统的故障树分析	242
8.1.4	主缸的可靠度预计	253
8.1.5	系统的可靠度预计程序开发及仿真结果	259
8.1.6	可靠性增长试验	266
8.2	合成橡胶压块机	271
8.2.1	压块机液压系统可靠性设计	271
8.2.2	压块机液压系统可靠性预测	272
8.2.3	压块机“泵电动机停车”故障诊断搜索	278
8.2.4	压块机可靠性增长分析	280
8.3	大型液压载重车	285
8.3.1	自行式液压载重车可靠性要求	285
8.3.2	液压载重车液压系统的失效模式和可靠性分析	285
8.3.3	900t 提梁机液压系统的可靠性研究	291
第9章	液压系统的模糊可靠性	293
9.1	液压系统模糊可靠性研究进展	293
9.1.1	模糊可靠性工程	294
9.1.2	液压系统模糊可靠性研究进展	295
9.2	模糊数学基础	297
9.2.1	模糊集合	298
9.2.2	常见隶属函数	302
9.2.3	模糊数	304
9.2.4	模糊语言变量	307
9.2.5	模糊关系	309
9.3	液压系统模糊可靠性设计及预测	310
9.3.1	模糊可靠性设计研究	310
9.3.2	模糊可靠性预测	312

9.4 液压系统模糊综合评价	315
9.4.1 液压系统模糊综合评价方法	315
9.4.2 现场数据的模糊描述与处理	318
9.4.3 使用工况的模糊综合评判	318
9.4.4 修正系数集的建立	320
9.4.5 液压系统模糊综合评价实例	321
9.5 模糊故障树分析	322
9.5.1 模糊故障树的提出	322
9.5.2 基于梯形模糊数的故障树分析方法	323
9.5.3 液压机“主缸快进无法实现”梯形模糊数故障树分析	326
9.5.4 液压载重车电液悬挂系统的模糊可靠性分析	332
第 10 章 T-S 模糊故障树	339
10.1 T-S 模糊故障树分析法	339
10.1.1 T-S 模型的引入	339
10.1.2 基于 T-S 模型的模糊故障树分析方法	340
10.1.3 T-S 故障树分析对比与算例	348
10.2 T-S 重要度定义及算例对比	355
10.2.1 多态故障树重要度分析方法基本原理	355
10.2.2 T-S 重要度定义	356
10.2.3 重要度算例对比与分析	358
10.3 融合 T-S 模糊故障树和灰色模糊多属性决策的故障搜索方法	364
10.3.1 灰色模糊多属性决策的引入	364
10.3.2 灰色关联分析的决策模型	364
10.4 液压系统实例分析	373
10.4.1 液压载重车简介	373
10.4.2 液压转向系统的 T-S 模糊故障树分析	374
10.4.3 液压转向系统的 T-S 模糊故障树重要度分析	378
10.4.4 液压转向系统的故障搜索决策	380
10.4.5 结果分析	381
参考文献	383

第1章 液压系统可靠性工程概述

产品的可靠性是指产品在规定的使用条件下，在规定的时间内，完成规定功能的能力。换言之，可靠性就是产品性能的稳定性，这种稳定性保证产品的正常工作。众所周知，随着科学技术的飞速发展，产品的功能越来越先进，产品的控制越来越复杂，这就决定了产品的高可靠性成为其基本要求之一。因此，可靠性理论在许多领域都越来越受到人们的重视。

1.1 可靠性工程概述

可靠性工程已成为一门综合性学科。它与故障分类学、系统工程、运筹学、生产组织学和经营管理学等学科有着密切的联系。它致力于研究提高各种产品的可靠性、维修性与安全性；研究产品或系统故障发生的原因以及消除和预防故障的措施。可靠性工程的主要任务是保证产品的可用性、延长使用寿命、降低维修费用、提高产品的使用效益，包括从原材料、元器件、零部件到设备、系统的各个环节；从研究、设计、制造到储运、使用、维修的全寿命周期，是一个十分复杂的系统工程。

1.1.1 可靠性工程的基本任务和目的

可靠性工程是研究为提高产品的可靠性，在设计、研制、生产、使用以及维修中所进行的各项工程和管理活动的学科。可靠性工程是指从产品设计、研制、生产的实际需要出发，按照可靠性理论和方法，开展工程管理、工程设计、阶段评审、试验鉴定和综合评价等可靠性活动，从而利用最少的资源使产品达到要求的性能指标，实现降低产品成本、减少维修费用、提高产品竞争力的目标。产品的可靠性主要是通过防止或降低故障发生的可能性；或一旦发生，消除或降低其不良影响（即所谓容错技术）的设计技术。确定和达到产品的可靠性要求而进行的一套设计、研制、生产、试验及管理活动是可靠性工程的基本任务。

可靠性工程的理论基础是概率统计，其方法是工程化的可靠性技术，其作用是产品从论证开始到使用的整个寿命期，包括产品设计、研制、生产、使用等过程，其目标是综合平衡产品可靠性水平和投入资源，以达到最佳的经济效益。可靠性工程的主要目的有：

- 1) 应用工程知识和专业技术，来防止或降低发生故障的可能性或频率。

- 2) 确认并纠正出现故障的原因, 而不管为防止这些故障所需的工作量。
- 3) 如果故障的原因没有得到纠正, 则确定排除故障的方法。
- 4) 应用各种方法估计新设计可能具有的可靠性, 并分析可靠性数据。

可靠性工程的技术内涵很丰富, 从可靠性技术在生产过程各阶段应用的目的和任务划分, 大致分为:

(1) 可靠性设计 通过设计确保产品可靠性的基础, 在对产品提出技术指标要求后, 生产部门根据技术指标进行研究开发, 提出若干个可行方案, 通过以产品效能为主要因素的优选, 定下最佳方案, 付诸实施。

(2) 可靠性试验 通过试验测定和验证产品的可靠性。根据选定的可行方案, 在有限的样本、时间和试验费用下, 对样机进行各种试验, 验证它的功能是否达到技术指标的要求, 发现产品的薄弱环节并加以改进。

(3) 制造阶段可靠性 通过制造实现产品的可靠性, 将设计定型图样交付生产部门进行生产定型, 研究制造偏差的控制、缺陷的处理和早期故障的排除, 保证设计目标的实现。

(4) 使用阶段可靠性 通过使用维持产品的可靠性。使用方根据规定的使用、维修规程使用产品, 到达产品的使用寿命后, 退出服务, 予以处理。在这期间研究产品运行中的可靠性监视、诊断预测, 采用售后服务和维修策略等措施防止可靠性劣化。

(5) 可靠性管理 组织实施以较少的费用及时间来实现产品的可靠性目标, 对各个阶段的所有可靠性工程技术活动进行规划、组织、协调、控制与监督。

1.1.2 可靠性工程的发展

可靠性课题的研究始于第二次世界大战。20 世纪 30 年代以后, 随着科学技术的高速发展, 电气设备、自动控制设备、工程装备等越来越复杂, 所包含的元件越来越多, 人们发现, 要保证这些装备的正常使用也越来越困难。这就促使科学家们去研究如何保持设备功能而不致失效, 由此逐渐形成了可靠性研究体系。

作为一个单独的工程学科, 可靠性工程的诞生可追溯到 20 世纪 30 年代至 40 年代。早期人们对“可靠性”的理解仅仅是定性的, 而没有数值度量。二战后期, 德国火箭专家 R. Lusser 首先提出用概率乘积法则, 将一个系统的可靠度看成其子系统可靠度的乘积, 从而计算出 V-II 火箭引信装置的可靠度为 0.75, 首次定量地表达了产品的可靠度, 这被称为 Lusser 定律。从 20 世纪 50 年代初期开始, 在可靠性测定中更多地引用了统计方法和概率概念之后, 可靠性才作为一门新学科被系统加以研究。

在第二次世界大战期间, 雷达等各种复杂的电子设备相继出现, 电子设备的可靠性严重影响着武器的使用效果。美国 60% 的机载电子设备运到远东后不能使

用, 50%的电子设备在储存期出现故障。电子设备故障的主要问题是电子管可靠性太差, 于是1943年美国成立了电子管研究委员会, 专门研究电子管可靠性问题, 研究指出影响电子管可靠性的主要因素是电气及环境因素, 提高电子管可靠性的途径, 主要是通过采用新材料、新工艺的工程方法和发展质量控制及检验的统计技术。为推动可靠性研究及学术交流, 1949年美国无线电工程师协会成立了可靠性技术组, 这是第一个可靠性专业学术组织。1957年, 美国国防部电子设备可靠性咨询小组(AGREE)发表了著名的《军用电子设备的可靠性报告》, 在这次报告中首次提出了在研制与生产过程中, 对电子设备可靠性指标进行试验和鉴定的方法, 以及电子设备产品在生产、包装、储存和运输等方面要注意的问题和要求等内容。这项报告被公认为可靠性理论和方法的奠基性文件。1958年, 美国成立了可靠性管理研究委员会, 制订了可靠性管理计划, 颁布可靠性方面的军用标准及手册, 并建立了全国性的可靠性数据交换中心。

20世纪五六十年代是美国航空航天事业迅速发展的时期。这一发展阶段的主要特点是: 改善可靠性管理, 建立可靠性研究中心; 制定了可靠性试验标准, 发展了新的可靠性试验方法(例如, 加速寿命试验法和快速筛选试验法); 发展了新的可靠性预测技术, 颁布了可靠性预测手册及标准; 开辟了可靠性物理研究的新领域, 发展了新的故障模式分析技术; 建立了更有效的可靠性数据采集系统, 形成了美国全国性的数据交换网; 在电子设备可靠性研究的基础上, 又扩充到机械部件的可靠性研究, 提出了机械概率设计的新方法; 注意人为可靠性及安全性的研究; 重视维修性的研究; 创建可靠性教育课程。

美国国家航空航天管理局(NASA)和国防部接受并发展了20世纪50年代由AGREE发展起来的可靠性设计及实验方案。与此同时, 电子技术、计算机技术等其他工业技术的飞速发展都推动了可靠性技术的深入研究。当时, 计算机的进步主要源于硬件的进步, 而软件的重要性还不显著。软件可靠性问题获得重视是在20世纪60年代末。此时, 前苏联、法国、日本、英国和德国等国家也相继开展了可靠性工程的研究。1965年, 国际电子技术委员会(IEC)设立了可靠性技术委员会(TC-56), 在东京召开了第一次会议, 协调各国间可靠性的术语和定义、可靠性的测定方法、数据表示方法和标准规范的书写法等。从此, 可靠性理论研究和工程应用进入了一个全新的时期。

日本在二战初期已经初步涉及可靠性问题研究, 不过真正对可靠性展开研究是在战后产业复兴时期。当时, 日本一些有远见的人士很快注意到和平时产业可靠性问题的重要性。1956年, 日本从美国引进了可靠性技术及经济管理技术; 1960年, 日本成立了质量管理委员会, 同年, 日本科技联合会召开了第一次全国可靠性讨论会; 20世纪60年代中期, 日本成立了电子元件可靠性中心, 将美国在航空、航天及军事工业中所取得的可靠性研究成果成功地应用于民用工业, 尤其

是和全面质量管理(TQC)相结合,形成了实用化的特点,使产品质量显著提高,产品在世界各国广为销售,赢得了良好的质量信誉,不到十年,它的工业年增长速度就达到年均15%。日本专家认为“高可靠性的优质产品是长期积累的可靠性技术和严格的生产管理制度相结合的结晶,必须强调从设计、制造、管理、使用、维修的全过程统筹管理”。

20世纪70年代以后是可靠性工程深入发展的阶段。随着多种电子设备和系统广泛应用于各技术领域、工业部门及日常生活中,电子设备的可靠性直接影响着生产的效率,系统、设备以及人的生命安全,带来了更多的可靠性问题。人们还开始了对非电子设备(如机械设备、大型结构等)的可靠性研究,以解决非电子设备可靠性设计及试验技术等问题。对于现代化技术装备,由于采用大量的高技术,增加了系统的复杂性,为了保证设备的完好性、任务的成功性以及减少维修人员和费用,可靠性的工程范围将进一步扩展,需要更多的可靠性技术作为保证,需要更加严密的可靠性管理系统及可靠性评估技术;另外,机器人系统、大型结构与动力系统以及商用卫星等复杂系统的出现,都对可靠性的研究提出了更高的要求,越来越体现出可靠性问题研究的重要性及其价值。

20世纪60年代末,我国在雷达、通信机、电子计算机等方面也提出了可靠性问题。我国的可靠性工程在20世纪70年代初开始发展起来,首先是电子工业部门开展了电子产品的可靠性研究,如电子元件的加速寿命试验及试验数据处理等。国家重点工程的需要(元器件的可靠性问题)及消费者的强烈要求,对各行各业开展可靠性的研究起了巨大的推动作用。到了20世纪70年代中期,可靠性工程相继在航空、航天、核能及通信领域得到应用,但与发达国家相比,还有很大差距。为尽快改变我国可靠性工作落后的局面,国家各相关部门和科研院所的研究人员从认识上转变观念,树立“以质量求生存、求发展”的当代质量观,把产品性能和可靠性同等看待,推动了可靠性的发展。

20世纪80年代,可靠性研究继续朝广度和深度发展,中心内容是实现可靠性保证。1985年,美国军方提出在2000年实现“可靠性加倍,维修时间减半”这一新的目标。20世纪80年代初,我国掀起了电子行业可靠性工程和管理的第一高潮。1984年组建了全国统一的电子产品可靠性信息交换网,并颁布了GJB 299—1987《电子设备可靠性预测手册》,有力地推动了我国电子产品可靠性工作。同时还组织制定了一系列有关可靠性的国家标准、国家军用标准和专业标准,使可靠性管理工作纳入标准化轨道。而同一时期,软件可靠性理论研究停滞不前,没有质的飞跃,但软件可靠性的工程实践经验不断的积累,不少软件可靠性技术在软件工程实践中得以应用。某些技术达到实用化程序,如软件可靠性建模技术、管理技术等。可以说这一时期,软件可靠性从研究阶段逐渐迈向工程化阶段。

20世纪90年代初,原机械电子工业部提出了“以科技为先导,以质量为主线”,

沿着“管起来—控制好—上水平”的发展模式开展可靠性工作，兴起了我国第二次可靠性工作的高潮，取得了较大的成绩，机械可靠性包括液压技术可靠性的研究工作得到了重视和发展。进入 20 世纪 90 年代后期，由于软件可靠性的重要性更加突出和软件可靠性工程实践范畴的不断拓展，软件可靠性逐渐成为软件开发中需要考虑的重要因素，软件可靠性工程在软件工程领域逐渐取得相对独立的地位，并成为生机勃勃的分支。

21 世纪以后，软件 CMM（软件能力成熟度模型）广泛开展，元器件技术升级周期大大缩短，可靠性工作从行政要求转变为厂家自发的市场行为。不仅如此，国外还把对产品可靠性的研究工作提高到节约资源和能源的高度来认识。这不仅是因为高可靠性产品的使用期长，而且通过可靠性设计，可以有效地利用材料，减少加工工时，获得体积小、质量轻的产品。一旦放松对可靠性工程的重视，必然会出现严重的后果，例如，日本汽车工业的各种召回事件，在政治和经济等方面造成严重的不良影响。

综上所述，可靠性工程的诞生、发展是社会的需要，与科学技术的发展是分不开的。对此，各国纷纷投入大量的人力、物力开展研究，并将其应用推广到更广泛的领域里。

1.1.3 可靠性工程的重要意义

可靠性是衡量产品质量的一项重要指标。随着现代科学技术日新月异，产品的结构日益复杂，性能参数越来越高，工作条件更加严酷，产品的可靠性问题越来越突出。若设备设计、制造、安装、调试使用、维护和维修不当，任何细小的差错都有可能引成系统故障，甚至是人员伤亡，造成极大的损失。由此看出，提高产品可靠性具有重要的意义。

1) 现代工程系统大多数是多功能的自动化系统，它们由大量互相联系、互相依存、进行着不同过程（热的、机械的、电的等）的组件构成。由于功能的复杂化，产品所使用的元器件数量急剧增多。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，使总费用降低。例如，美国的民兵导弹机动指挥网络电线设备与数字式处理设备使用了 1017936 个元器件。尽管随着大规模集成技术的发展，元器件数目大大减少，但是工程系统功能的复杂程度却提高了。因此，如果不对系统可靠性的监控，系统的可靠性就会逐渐降低，直至系统无法工作。

2) 大规模工程系统的开发给人类带来巨大经济效益的同时也会带来负面效应。提高产品的可靠性，可以减少产品责任赔偿案件的发生，以及其他处理产品事故费用的支出，避免不必要的经济损失。例如，美国尼亚加拉瀑布附近的达斯培克水力发电站（135 万 kW）向加拿大的多伦多地区供电，由于线路保护装置调整的不恰当，在正常负荷电流情况下，保护装置发生错误动作，突然跳闸造成流

向加拿大的约 176 万 kW 电力倒送回达斯塔克发电厂, 造成大片电力系统瓦解, 停电 13h 22min, 事故涉及 20 万 km², 给 3000 万人口的生活和生产带来诸多不便, 造成重大损失。

3) 提高产品的可靠性, 可以减少停机时间, 提高产品可用率, 一台设备可以顶几台设备的工作效率。这样, 在投资、成本相近的情况下, 可以发挥几倍的效益。美国通用电气公司 (GE) 经过分析认为, 对于发电、冶金、矿山、运输等连续作业的设备, 即使可靠性只提高 1%, 成本提高 10% 也是合算的。

4) 21 世纪是以知识经济和高科技为主的世纪, 竞争将日趋激烈。而其实质上是可靠性技术的竞争, 只有设计和制造出高可靠性的产品, 才具有真正的竞争实力。对于企业来讲, 提高产品的可靠性, 可以改善企业信誉, 增强竞争力, 扩大产品销路, 从而提高经济效益。21 世纪又是空间时代, 有人和无人的空间工程如通信卫星、载人空间轨道实验室、宇宙飞船等投资昂贵的高科技产品, 对可靠性的要求日趋提高。

可以说, 以工厂生产线为主的传统质量管理已经不适应现代复杂工业系统高质量的要求, 取而代之的应是以可靠性为中心的全面质量管理, 最终促进可靠性工程的迅速发展。产品的可靠性是设计出来的、生产出来的、管理出来的。设计决定了产品的固有可靠性, 如果设计不合理, 想通过事后的修理来达到所期望的可靠性, 这几乎是不可能的。所以, 一定要把可靠性设计到产品中去; 生产部门要努力实现设计的意图, 并在生产过程中不引进不可靠因素, 使产品尽可能达到设计的可靠性。

展望可靠性的工程实践应用与研究, 可以预计, 未来它将得到更大的重视和发展, 这是因为:

1) 产品功能增多, 使产品复杂程度不断增加, 产品的零件数目也就不断增加, 而零件数目的增加, 会使产品的可靠性水平降低。例如: 由 200 万个零件组成的航天飞机, 若其零件故障率即使只有 10^{-6} , 系统正常运行的概率也只有 15%, 这表明每发射 100 次, 平均只有 15 次发射成功。

生产自动化水平的提高, 使得工艺过程所用的设备越来越重要, 对设备的可靠性要求也越来越高。比如: 一条生产线, 若其中一台设备发生故障, 则会造成整个生产线停产, 因此, 组成生产线的每一台设备都应保证一定的可靠性水平。又比如, 轧钢机的生产速度由 0.3m/s 提高到 25m/s, 这么高的轧制速度, 一旦设备出现故障, 将会造成巨大的经济和人员财产的损失。

产品的工作环境日益严酷, 要求提高产品的可靠性。由于产品功能的不断提高, 使其承受的应力水平、温度、振动、腐蚀条件日益严酷。例如, 为了提高涡轮喷气发动机的推重比, 通常用增加涡轮进口处气体温度, 来增大推力, 用增加应力水平、降低强度储备的方法来降低质量, 这些因素都使发动机的工作环境变

得恶劣。

2) 提高产品的可靠性, 目的是为了
提高产品经济效益。往往在产品的设计、
制造和试验中增加费用, 但却可以在使
用和维修中减少费用, 产品的可靠性与
费用的关系如图 1-1 所示。为了使产
品的总成本最小, 需要选择合理的可靠性
指标。例如, 日本某公司为提高产品的
可靠性, 对产品作了一次彻底的设计审
查和修改, 在规定的可靠性指标下, 花
在设计和修改上的每 1 美元所得的收益为 23 美元。但不适当地、过分地提高可靠
性指标, 会使产品总成本增加, 这也是不允许的。

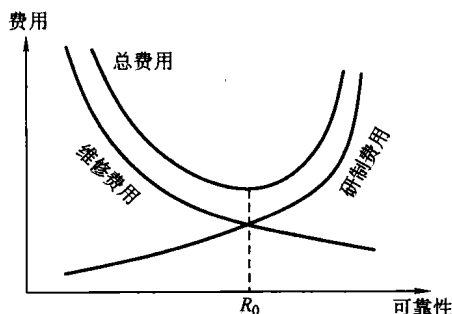


图 1-1 可靠性与费用的关系

3) 适应市场竞争的需要。只有产品的可靠性水平提高了, 才能提高产品的信
誉, 增强市场竞争力。如日本的汽车曾一度因为可靠性差, 在美国造成大量退货,
几乎失去了美国市场。他们总结了经验, 提高了汽车的可靠性水平, 使汽车首次
故障在 1 万公里以上, 现在其汽车产品在国际市场上具有很强的竞争力。

1.2 液压可靠性工程的发展

液压技术和相关流体传动及控制技术现已得到了广泛的应用。液压产品在许
多大型机械设备和系统中往往处于控制和动力传输的重要核心地位, 有广泛的应
用(如航天、军事、冶金等行业), 一旦发生故障将引起重大损失。由于各种原因,
我国液压元件和系统的可靠性普遍较差, 原机械部提出的“三大战役”和《机械
工业振兴纲要》都把可靠性研究列为主要内容。因而, 研究液压元件和系统的可
靠性是一个极具有现实意义的课题。

液压系统可靠性研究基本上属于机械可靠性研究范畴, 机械可靠性研究的时
间较短。液压系统本身还具有自身的许多特点, 如以油液作为传动介质, 规范化
的可靠性数据少以及系统复杂等, 都给液压系统的可靠性研究带来不少困难。目
前液压系统正向高压化、高速化、集成化、机电液一体化和大流量、大功率、高
效率、长寿命方向发展。随着微电子技术的迅猛发展, 电液伺服系统和数字式液
压系统的应用愈来愈广泛, 系统愈加复杂, 对系统的可靠性和无故障率要求更高。

正是因为液压可靠性工程对国民经济和国防建设有如此重大的意义, 所以,
在世界范围内都引起了普遍的重视。

国外针对液压产品的可靠性研究工作始于 20 世纪 70 年代末。1981 年, 前苏
联学者 T. A. 瑟里岑在对传动装置的可靠性计算、预测、储备以及故障诊断方法进