

FPTC 先进液压气动技术丛书

液压气动系统可靠性 与维修性工程

陈东宁 姚成玉 赵静一 郭锐 编著

Hydraulic & Pneumatic System Reliability
and Maintainability Engineering



化学工业出版社

FPTC 先进液压气动技术丛书

液压气动系统可靠性 与维修性工程

陈东宁 姚成玉 赵静一 郭锐 编著

Hydraulic & Pneumatic System Reliability
and Maintainability Engineering

H P S R



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

液压气动系统可靠性与维修性工程/陈东宁等编著. —北京: 化学工业出版社, 2014. 7

(先进液压气动技术丛书)

ISBN 978-7-122-20437-0

I. ①液… II. ①陈… III. ①液压系统-可靠性工程
②气压系统-可靠性工程 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 077355 号

责任编辑: 黄 滢

责任校对: 吴 静

文字编辑: 张绪瑞

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 26½ 字数 712 千字 2014 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

《先进液压气动技术丛书》编委会

主任：孔祥东

副主任：赵静一 姜万录

委员：（按姓名汉语拼音排序）

陈东宁	高殿荣	高英杰	郭 锐	姜万录	孔祥东
刘思远	刘 涛	吕世君	王益群	吴晓明	姚 静
张立杰	张齐生	张 伟	赵静一		

前 言 FOREWORD

液压气动技术已经成为国防和民用工业等诸多领域的关键技术，液压气动系统的可靠性与维修性也成为保障成套设备品质的核心因素。液压气动系统不但要性能优越，而且还要寿命长、故障少、易维修，可见，可靠性维修性是液压气动系统质量的重要内涵，而且，改善可靠性维修性意味着大幅度降低使用维修费用并有效地提高系统的效能。

液压气动系统可靠性维修性既有可靠性与维修性问题的共性，也有液压气动系统的特殊性。首先，在成套设备中，与其他各系统相比，液压气动系统的故障率较高；其次，液压气动系统构成相对复杂，并存在动力传递封闭、故障机理多样等问题；再者，比例伺服阀、高性能泵和马达等液压气动元件的技术仍有很大的发展空间，这既需要液压气动技术的原始创新，又需要液压气动可靠性维修性技术的不断研究与发展。液压气动系统可靠性维修性的研究探索、工程应用、普及推广，有助于促进液压气动产品的可靠性维修性水平、提高我国液压气动行业的核心竞争力。

本书兼顾可靠性维修性理论的系统性、液压气动系统工程应用的针对性以及理论研究的延伸性，加入了作者近年来的科研项目与基金研究成果（国家自然科学基金〈50905154、51175448〉、河北省自然科学基金〈E2012203015、E2012203071〉、教育部博士点基金〈20091333120005〉、河北省教育厅资助科研项目〈ZH2012062〉、秦皇岛市科技支撑计划项目〈2012021A078〉、河北省择优资助博士后科研项目）。

全书共分9章。第1章简要介绍了可靠性维修性工程的地位、作用、发展以及基本概念、术语和定义；第2章介绍了可靠性维修性的概率论、数理统计基础和 Monte Carlo 方法及应用；第3章介绍了液压气动系统可靠性维修性建模、分配及预计；第4章介绍了液压气动系统可靠性维修性设计；第5章介绍了液压气动系统可靠性维修性分析；第6章介绍了液压气动产品可靠性维修性试验与评定方法；第7章介绍了液压气动系统可靠性维修性管理；第8章介绍了液压气动系统可靠性维修性工程实例；第9章介绍了液压气动系统可靠性维修性新近研究专题，包括模糊可靠性维修性、T-S故障树及重要度分析、贝叶斯网络分析、可靠性维修性微粒群优化等。

本书由燕山大学陈东宁副教授（第2、6、9章）、姚成玉教授（第1、5章）、赵静一教授（第3、8章）、郭锐博士（第4、7章）编著完成。全书由陈东宁统稿。燕山大学研究生张瑞星、李男、吕军、李硕、茜彦辉、赵哲谕、王可勋、柳婷婷、张程、张浩然、李彩虹等为本书的绘图、排版、文献检索以及内容编写等工作给予了帮助，付出了辛勤的劳动。

书中疏漏或不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

CONTENTS

Chapter 1	第1章 概述	1
	1.1 可靠性维修性的地位和作用	1
	1.1.1 可靠性维修性的地位	1
	1.1.2 可靠性维修性的作用	3
	1.1.3 可靠性与维修性的关系及 RMS	4
	1.2 可靠性维修性工程的发展	6
	1.2.1 可靠性工程的发展	6
	1.2.2 维修性工程的发展	7
	1.3 液压气动系统可靠性维修性工程	8
	1.3.1 液压气动系统可靠性维修性研究内容	8
	1.3.2 液压气动系统可靠性维修性工程体系	13
	1.4 可靠性维修性的概念、术语和定义	15
	1.4.1 可靠性的概念及分类	15
	1.4.2 维修性的概念与含义	16
	1.4.3 不可修系统可靠性的主要度量指标	19
	1.4.4 可修系统可靠性的主要度量指标	27
	1.4.5 有效性的基本概念	38
Chapter 2	第2章 可靠性维修性的数学基础	42
	2.1 概率论基本概念	42
	2.1.1 随机事件	42
	2.1.2 随机事件的频率和概率	44
	2.1.3 随机变量及其概率分布	45
	2.2 数理统计基本概念	55
	2.2.1 总体和样本	56
	2.2.2 分布参数估计	56
	2.3 Monte Carlo 方法及应用	59
	2.3.1 基本概念	60
	2.3.2 随机抽样方法	61
	2.3.3 系统仿真建模	62
	2.3.4 液压系统动态可靠性 Monte Carlo 仿真实例	62

Chapter 3	第 3 章 液压气动系统可靠性维修性建模、分配及预计	68
	3.1 可靠性维修性模型	68
	3.1.1 可靠性模型	68
	3.1.2 维修性模型	70
	3.2 可靠性维修性分配	72
	3.2.1 可靠性分配	72
	3.2.2 维修性分配	82
	3.3 可靠性维修性预计	89
	3.3.1 可靠性预计	89
	3.3.2 维修性预计	100
Chapter 4	第 4 章 液压气动系统可靠性维修性设计	109
	4.1 可靠性维修性设计准则	109
	4.1.1 可靠性设计准则	109
	4.1.2 维修性设计准则	110
	4.2 可靠性维修性设计方法	110
	4.2.1 可靠性设计方法	111
	4.2.2 维修性设计方法	116
	4.3 液压气动系统可靠性维修性设计实例	119
	4.3.1 回转窑液压系统可靠性设计实例	119
	4.3.2 飞机液压系统维修性设计实例	125
	4.3.3 液压设备维修性设计实例	127
	4.3.4 液压设备故障可修性划分	130
Chapter 5	第 5 章 液压气动系统可靠性维修性分析	132
	5.1 可靠性维修性分析概述	132
	5.2 可靠性分析技术及方法	133
	5.2.1 故障的基本概念	133
	5.2.2 不可修系统的可靠性分析	135
	5.2.3 可修系统的可靠性分析	145
	5.2.4 故障模式影响及致命度分析	154
	5.2.5 故障树分析	159
	5.3 维修性分析技术及方法	172
	5.3.1 维修性分析的目的	172
	5.3.2 维修性分析的主要内容	172
	5.3.3 故障模式影响分析	173
	5.3.4 寿命周期费用分析	174
	5.3.5 维修障碍分析	175
	5.3.6 综合权衡分析	179
	5.4 液压气动系统可靠性维修性分析实例	182
	5.4.1 可靠性分析实例	182
	5.4.2 维修性分析实例	190

第 6 章 可靠性维修性试验与评定	193
6.1 可靠性试验的分类与故障判据	193
6.1.1 可靠性试验的分类	193
6.1.2 可靠性试验应注意的问题	194
6.1.3 可靠性试验的要素	195
6.2 产品环境应力筛选试验	197
6.2.1 基本概念	197
6.2.2 环境应力筛选的作用及应用	197
6.2.3 环境应力筛选的基本特征	198
6.2.4 环境应力筛选与有关工作的关系	199
6.2.5 环境应力筛选效果的比较	199
6.2.6 环境应力的筛选的几种典型筛选应力	200
6.3 可靠性加速寿命试验	202
6.3.1 可靠性寿命加速寿命试验的目的和用途	203
6.3.2 可靠性寿命加速寿命试验的类型	203
6.3.3 液压元件的磨损强化寿命试验	204
6.4 可靠性增长试验与评定	207
6.4.1 可靠性增长试验	207
6.4.2 可靠性评定方法	210
6.4.3 液压软管总成可靠性试验及评定	212
6.5 维修性试验与评定概述	225
6.5.1 维修性试验与评定的目的与作用	225
6.5.2 维修性试验与评定的时机和种类	226
6.6 维修性试验与评定的一般程序	227
6.6.1 维修性试验与验证的一般程序	227
6.6.2 维修性演示验证	228
6.6.3 预防性维修试验	232
6.6.4 维修性数据的收集、分析与处理	232
6.6.5 维修性试验的评定	234
6.6.6 保证试验与评定正确的要素	236
6.7 基于试验的维修性验证技术	237
6.7.1 维修性作业样本分配方法	237
6.7.2 维修性指标的验证方法	240
6.7.3 维修性参数值的估计	245
6.7.4 维修性验证工程实例	248
6.8 使用阶段维修性评定	251
6.8.1 维修性数据的收集与处理技术	252
6.8.2 维修性数据的分析与评定技术	255
6.8.3 维修性改进技术	258

第 7 章 液压气动系统可靠性维修性管理	261
7.1 可靠性维修性管理概述	261
7.1.1 可靠性维修性全系统全特性全过程管理	261
7.1.2 可靠性维修性的综合管理	262

7.2 可靠性维修性工作计划	265
7.2.1 可靠性维修性工作策划	265
7.2.2 可靠性维修性工作分解	266
7.2.3 可靠性维修性工作说明	267
7.2.4 可靠性维修性工作进度	267
7.2.5 可靠性维修性工作费用	268
7.3 液压气动系统可靠性维修性管理	268
7.3.1 可靠性维修性管理的基本要素	269
7.3.2 液压气动系统的管理体系	273
7.3.3 液压气动系统可靠性管理流程	273
7.3.4 液压气动可靠性管理与保养	275
7.3.5 液压气动系统可靠性管理与维修团队	277

Chapter 8

第 8 章 液压气动系统可靠性维修性工程实例

8.1 液压机可靠性工程实践	282
8.1.1 液压机可靠性设计	282
8.1.2 液压机可靠性模型及可靠性分配	290
8.1.3 液压系统的故障模式影响及致命度分析	293
8.1.4 液压系统的故障树分析	298
8.1.5 液压机主缸可靠性预计	306
8.1.6 液压系统的可靠性预计	310
8.1.7 可靠性增长试验	315
8.2 连铸结晶器液压振动系统可靠性分析及管理	319
8.2.1 液压振动系统简介	319
8.2.2 液压振动控制系统可靠性设计方案	320
8.2.3 液压振动系统可靠性管理	324
8.3 制氧站气动设备可靠性管理及故障树分析	326
8.3.1 制氧站可靠性管理	326
8.3.2 氮压机组振动异常故障树分析	331
8.3.3 ERP 实施给备件可靠性管理带来的影响	335
8.4 乳化液系统可维修性、维修维护与人员管理	335
8.4.1 乳化液系统可维修性	335
8.4.2 乳化液维修维护程序	339
8.4.3 乳化液系统的设备维修维护	340
8.4.4 乳化液系统维修维护人员管理	343

Chapter 9

第 9 章 液压气动系统可靠性维修性的新近研究专题

9.1 液压气动系统模糊可靠性维修性	344
9.1.1 模糊可靠性维修性的研究内容与主要指标	344
9.1.2 模糊可靠性设计与预计	349
9.1.3 模糊可靠性分析	353
9.1.4 模糊综合评判	356
9.2 液压气动系统 T-S 故障树及重要度分析	365
9.2.1 T-S 故障树分析法	365

9.2.2	T-S故障树重要度分析方法	374
9.2.3	T-S故障树及重要度分析工程实例	382
9.3	液压气动系统贝叶斯网络分析方法	386
9.3.1	基于贝叶斯网络的可靠性分析	387
9.3.2	基于贝叶斯网络的维修决策	392
9.4	液压气动系统可靠性维修性微粒群优化	394
9.4.1	可靠性优化设计概述	395
9.4.2	基于微粒群算法及其改进算法的可靠性优化方法	400
9.4.3	基于微粒群算法的维修计划优化	408
参考文献		411

第1章

概述

产品的可靠性 (Reliability) 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。产品的维修性 (Maintainability) 是指产品在规定的条件下和规定的时间内, 按规定的程序和方法进行维修 (Maintenance) 时, 保持或恢复执行规定状态的能力。维修性是产品质量的一种特性, 即由产品设计赋予的使其维修简便、迅速和经济的固有特性。由于产品的可靠性与维修性 (Reliability and Maintainability, 简称 R&M) 密切相关, 都是产品的重要设计特性, 因此产品可靠性维修性工作应从产品论证时开始, 提出可靠性维修性的要求, 并在开发中开展可靠性维修性设计、分析、试验、评定等活动, 把可靠性维修性要求落实到产品的设计中。

本章首先简要介绍可靠性维修性的地位和作用及发展概况, 然后介绍液压气动系统可靠性维修性工程, 最后介绍可靠性维修性的概念、术语和定义。

1.1 可靠性维修性的地位和作用

一个产品^①或系统^②, 不管其原理如何先进、功能如何全面、精度如何高级, 若故障频繁、可靠程度很差, 不能在规定时间内可靠地工作, 那么它的使用价值就低、经济效果就差。从设计规划、制造安装、使用维护到修理报废, 可靠性和维修性始终是系统和设备的灵魂。其中设计制造决定固有可靠性, 而使用维护保持使用可靠性。可靠性是评价系统和设备好坏的主要指标之一, 它是研究系统和设备的质量指标随时间变化的一门科学。维修性贯穿于设备的整个寿命周期, 涉及规划、设计、试制、生产、销售、安装、使用、改造直至报废的全过程。随着科学技术的发展, 设备的功能由单一转向多能, 结构日趋复杂; 采用新材料、新工艺、新技术后使不可靠的因素增多, 可靠性水平降低; 新设备又要考虑更恶劣的使用条件, 增加了保证其使用可靠性的难度; 而且设备一旦发生故障所带来的危害往往很严重, 维修费用很高。因此, 对可靠性和维修性进行深入研究显得十分重要和迫切。

1.1.1 可靠性维修性的地位

现代质量观念认为, 质量包含了产品的性能特性、专门特性、经济性、时间性、适应性等方面, 是产品满足使用要求的特性总和, 如图 1-1 所示。

① 产品 (Item) 是指作为单独研究或单独试验对象的任何元器件、零件、甚至一台完整的设备或系统。

② 系统是指是由一些相互作用和相互依赖的基本单元, 按一定结构组成的能完成既定功能的有机整体。

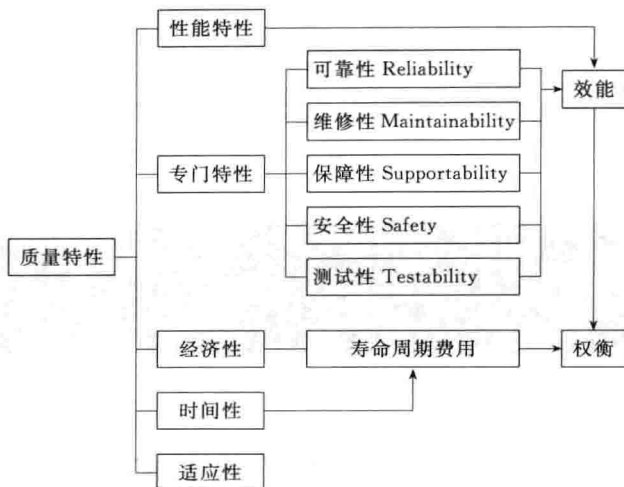


图 1-1 性能特性、专门特性及其权衡

产品的性能特性，可以用性能指标来描述，例如发动机的输出功率；产品的专门特性，描述了产品保持规定性能指标的能力，包括产品的可靠性、维修性、保障性（Supportability）、安全性（Safety）、测试性（Testability）等，如发动机能连续工作若干小时并保证在此期间输出功率不低于规定的值；经济性即产品的寿命周期费用，指在产品的整个寿命周期内，维持产品运行所花费的总费用；时间性是产品的按期交付，它也影响了产品的寿命周期费用（费用的时间性）；适应性反映了产品满足用户需求、符合市场需要的能力。

随着科学技术的发展和生产规模的扩大，对产品质量的要求也日益提高，产品的专门特性显得更加重要。例如：

① 工程系统日益庞大和复杂，带来了可靠性和安全性的下降，投资增大，研发周期加长，风险增加。

② 工程系统的应用环境不断地扩展和更加严酷，对可靠性、维修性、安全性等综合特性提出了挑战。

③ 系统要求的持续无故障任务时间加长，迫使系统必须具有良好的可靠性、维修性等专门特性。

④ 系统的专门特性与使用者的生命安全直接相关，如核能系统、载人航空航天器、高速列车等系统的可靠与安全是生命安全的基本保证，受到了强烈的关注。

⑤ 市场竞争的影响，产品是否可靠、是否好修、使用维护保养费用多少、寿命多长都对用户的选择产生重要影响。

20 世纪 50~70 年代，在产品装备研制过程中，可靠性是设计者们追求的主要目标，维修性则一直于次要地位或被认为是可靠性的分支。70 年代后期，随着产品装备复杂程度的进一步提高，且绝大多数产品装备都面临重复使用，这时，维修性的地位发生了变化。人们已认识到，片面追求高可靠性指标会导致巨额的费用投入，维修性的引入则可降低可靠性指标而改变这种状况，无论是以可靠性为中心的维修（Reliability Centered Maintenance，简称 RCM）、全员生产维修、设备综合工程学，均把提高装备的可靠性、降低由故障引起的维修成本，确保安全可靠并获得最佳效益作为目的。可靠性维修性不仅是工程设计过程的重要组成部分，也是费效分析、使用能力研究的必要基础。不论是从载人航天、探月工程、新型航母以及多种型号导弹的研制，到民用产品的生产，加强对可靠性维修性技术的研究越来越受到人们的重视。

1.1.2 可靠性维修性的作用

1.1.2.1 可靠性的重要意义

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，因而，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起系统故障甚至是人员伤亡，造成极大的损失。由此可见，提高产品可靠性具有重要的现实意义。

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，从而保证人民生命财产安全。例如，1986年美国“挑战者号”航天飞船由于燃料系统密封圈失效，起飞72s后爆炸；1992年我国发射“澳星”时由于配电器上多了一块0.15mm的铝物质，导致澳星发射失败；2009年重庆一运载货车因液压杆故障使得车身失衡导致侧翻事故。

② 提高产品的可靠性，能使产品总费用降低。要提高产品的可靠性，首先要增加费用，以选用较好的零部件，研制包括部分冗余功能部件的容错结构以及进行可靠性设计、分析和试验。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，使总费用降低，例如，美国共和公司在研发F-105战斗轰炸机的过程中，花费了2500万美元，使该机的任务可靠度从0.7263提高到0.8986，这样每年可节省维修费5400万美元。产品的可靠性与费用关系如图1-2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。

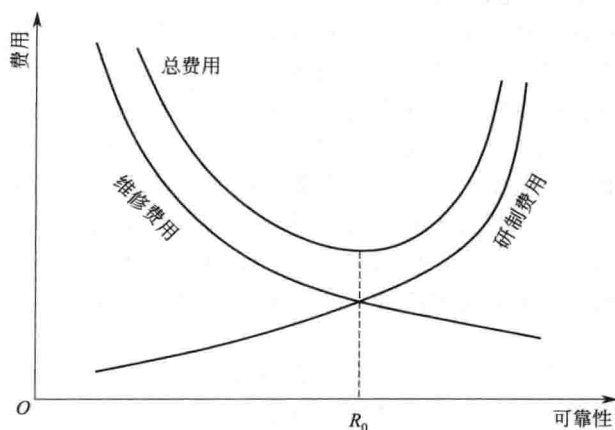


图 1-2 可靠性与费用关系

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，可以改善企业信誉，增强竞争力，减少产品责任赔偿案件的发生，从而提高经济效益。

1.1.2.2 维修性的重要意义

对于一个装备系统，维修性的基本特性之一是在装备的研制和生产过程必须要考虑其重要特性。由于科技工业和军事技术的飞速发展，装备结构也日益复杂，在工作过程不可避免

会出现故障，能否迅速而有效地修复，则取决于我们的维修性水平。所以，维修性是装备可用性的保障，维修性水平的高低直接影响装备的可用程度。对装备液压气动系统的合理操作使用、维护和修理，可使装备处于良好的技、战术状态。同时最佳维修周期的检修保养、故障的诊断判别、零配件的修复再用也能提高装备性能。

对于各种需要维修的产品，特别是军事装备、航空设备、化工设备、核能设备等，维修性在其研制和使用过程中受到广泛重视。20多年来，维修工程理论与应用研究在我国取得了长足的发展，而且国防科技工业部门中维修性工作开展得也较好，维修性的定性定量要求已经全面纳入了装备的技术、战术指标或研制任务书中。

一个装备的维修性如何，能否在规定的条件下，在规定时间内完成维修，影响着装备的完好性或可用性，同时也影响其任务成功性。因此，维修性是系统效能的重要构成因素。维修性的好坏关系着维修所需的时间、工时以及其他资源消耗，影响乃至决定着维修费用，因而，维修性又是影响装备寿命周期费用（Life Cycle Cost，简称 LCC）的重要因素。所以，提高系统效能、减少寿命周期费用是改善装备维修性的主要目标。国外的经验表明，在研制中投入 1 美元改进维修性，可望取得减少 LCC 达 50~100 美元的效益。可见，研究维修性对改善产品维修性是很有意义的。应当把维修性和可靠性同装备的性能、费用、研制周期等要求放在同等重要位置。我国由于科技、工业水平的限制，在一些产品（如电子元器件、精密机械加工件等）可靠性难以达到更高水平的情况下，通过改善维修性来提高战备的完好性就显得尤为重要，也较易奏效。

1.1.3 可靠性与维修性的关系及 RMS

1.1.3.1 可靠性与维修性的关系

开展可靠性活动的目的就在于使产品在使用中无故障或少故障，其中心任务是围绕产品故障而进行的。从设备完好性及寿命周期费用的观点出发，仅提高可靠性不是最有效的方法，必须综合考虑可靠性和维修性才能获得最佳的效果。维修性与可靠性有着密切的关系，比如工程实践中，在进行故障模式影响分析（Failure Mode and Effect Analysis，简称 FMEA）时就要引入维修性数据，而可靠性专业提供的各种故障率根据又是计算维修性参数所必需的。就可靠性来说，人们所关心的是使设计出来的系统能正常工作，且工作时间越长越好，所以可靠性是从延长正常工作时间来提高产品的可用性；就维修性来说，关心的重点则是使设计出来的系统在发生故障时能使之尽快地加以修复，维修性是从缩短维修停机时间来提高可用性。

可靠性与维修性的重要区别在于对人的因素的依赖程度不同。系统的固有可靠性主要取决于系统各构成成分的物理特性；而系统的固有维修性不可能脱离开人的因素的影响。相同的系统，由于采用了不同的维修概念和不同的后勤保障方式，还由于从事维修工作的人员在技术水平上的差异，会表现出不同的维修特性。

可靠性维修性工程致力于研究、描述、度量以及分析系统的故障和维修，目的是通过增加设计寿命，消除或减少出现故障的可能性和安全风险，减少停机时间，进而增加可用时间。可靠性工程的重点是防止、发现和纠正设计缺陷、薄弱零件或元器件及工艺缺陷；维修性工程的重点则是减少维护和修理时间，减少预防性和修复性维修活动的工作项目以及所需的专用工具和测试设备。可靠性工程与维修性工程有着最为紧密的关系，主要表现在：

① 两者具有共同的目标，即提高装备的完好性、可用性、保证任务成功和减少维修人力与保障费用。因而，它们可能互补。在产品研制中要进行二者的综合权衡。

② 维修性活动常常要以可靠性活动为基础或结合进行。例如，维修性的分配、预计、分析等要以可靠性分配、预计、分析等为基础，借用其输出数据。维修性与可靠性的管理活

动, FMEA、试验等可以而且应当尽量结合进行。

③ 维修性技术与可靠性技术有共同的数学基础和相似的方法, 包括分析手段、抽检、统计方法等。

1.1.3.2 RMS

RMS的一个含义是可靠性维修性保障性 (Reliability & Maintainability & Supportability), 另一个含义是可靠性维修性安全性 (Reliability & Maintainability & Safety)。

保障性是指装备的设计特性和计划的保障资源能够满足平时战备和战时使用要求的能力。有如下内涵:

① 装备保障设计特性, 指的是与保障有关的装备设计特性, 设计特性可分为两类: 一类是与装备故障有关的维修保障特性, 主要受可靠性、维修性、测试性等影响; 另一类是与装备使用(功能)有关的使用保障特性, 用于度量持续维持装备正常使用功能的保障特性, 主要有保障的及时性、装备的可运输性等。维修保障特性和使用保障特性都是设计赋予的, 应在装备设计时考虑。

② 保障资源, 包括保障装备所需的人力人员、备品备件、工具箱设备、训练器材、技术资料、保障设施、装备嵌入式计算机系统所需的专用保障资源(如软、硬件系统)以及包装、装卸、储存和运输装备所需的资源等。但是, 只有保障资源还不能直接形成保障力, 只有将分散的各种资源有机地组合起来, 相互配合形成具有一定功能的保障系统, 才能发挥每种资源的作用。

③ 平时战备和战时使用要求, 前者经常用战备完好性来衡量, 后者常用持续性(亦称任务持续性)来衡量。这两方面的能力要求, 首先要通过与装备保障有关的特性设计得以具备, 同时要通过保障系统有计划地提高保障资源、开展保障活动得以实现。

可见, 保障性是装备及其保障资源组合在一起的装备系统(即装备加上保障系统)的属性, 是满足装备系统平时战备完好和战时使用要求的能力体现, 应从装备自身设计特性和保障系统运行特性两个方面进行设计、分析、试验、评价。保障性研究包括保障性分析(以可靠性为中心的维修分析、修理级别分析、使用与维修工作分析)、规划保障资源、保障性试验与评价、保障性管理等。保障性一般用于武器装备、航空航天等国防领域, 对于大型、复杂或关键民用系统, 也会有保障性要求。

安全性是指产品不导致人员伤亡, 不危害健康及环境, 不造成设备损坏和财产损失的能力。安全性是通过设计赋予的一种产品特性, 是武器装备和一些民用设备设计必须满足的首要特性。安全是指不发生可能造成人员伤亡、职业病、设备损坏、财产损失或环境损坏的状态。事故是指造成人员伤亡、职业病、设备损坏、财产损失或环境损坏的一个或一系列意外事件。危险是指可能导致事故的状态, 危险主要来自于使用的材料、设计和制造缺陷、使用和维修人员的人为差错以及有害的环境, 有危险可能性、危险严重性两个指标。风险是指用潜在的(危险(事故)严重性和发生的可能性表示的事故影响和可能性, 在安全性学科中所研究的风险是指危险事件或事故的风险, 称危险风险或事故风险, 简称风险。安全性研究包括安全性分析与设计、危险及其控制、安全性验证与评价。

测试性是指产品能及时准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能下降程度)并隔离其内部故障的一种设计特性。测试性是产品的一种设计特性, 是设计时赋予产品的一种固有属性, 有别于测试这一概念。测试性是产品为故障诊断提供方便的特性, 如机内测试、性能监测或状态监测、与外部测试设备兼容, 便于用自动测试设备进行测试或人工测试等。测试性设计是为了提高产品自诊断和外部诊断能力, 能方便有效地确定产品状态和隔离故障。测试性研究包括测试性设计与分析、测试性验证与评价等。

可信性 (Dependability) 是指产品在任务开始时可用性给定的情况下, 在规定的任务剖

面中的任一随机时刻，能够使用且完成规定功能的能力。可信性是一个非定量的集合性术语，其内容即 RMST，即可靠性、维修性、保障性、测试性。

1.2 可靠性维修性工程的发展

纵观可靠性维修性工程的发展历程，可以看出正是客观现实条件的变化（设备的日趋复杂、使用运行环境的日益严酷、财力与人力资源受到严格限制、可靠性维修性技术的不断发展等）导致人们在观念上产生了变化，从单纯地追求某些技术性能目标，转向主要以寿命周期费用体现出来的综合目标，转向要求在系统的效能和费用间求得合理的平衡。

1.2.1 可靠性工程的发展

可靠性工程是对产品（零、部件，元、器件，总成、设备或系统）的失效及其发生的概率进行统计、分析，对产品进行可靠性设计、可靠性预计（Prediction）或称可靠性预测、可靠性分配（Allocation）、可靠性试验（Test）、可靠性评估（Evaluation 或 Assessment）、可靠性检验、可靠性控制、可靠性维修及失效分析的一门包含了许多工程技术的边缘性工程学科。

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 30~40 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。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，人们随之发现，要保证这些装备的正常使用也越来越困难。这就促使人们去研究如何保持设备功能而不致失效。第二次世界大战后期，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 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地加以研究。

20 世纪 50~60 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（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计技术，颁布了可靠性预计手册及标准；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；注重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。

20 世纪 60 年代末，软件可靠性问题获得重视。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，国际电工委员会（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方法等。从此，可靠性理论研究和工程应用进入了一个全新的时期。

20 世纪 70 年代初我国的可靠性工程开始发展起来，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。由于国家重点工程的需要（元器件的可靠性问题），以及消费者对电视机等设备质量问题的强烈要求，对各行各业开展可靠性的研究起了巨大的推动作用。

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地应用于各技术领域、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。人们也开始了对非电子设备（如机械设