

过程系统工程理论与实践丛书



过程系统的可靠性

邓正龙 著

中国石化出版社

51.94
141

过程系统工程理论与实践丛书

过程系统的可靠性

邓正龙 著

zk59/107

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是《过程系统工程理论与实践丛书》之一。该丛书是普及型高科技系列读物, 主要介绍过程系统工程这门新型学科, 其应用领域包括化工、石油化工、冶金、轻工、建材等物流型工业。

本书介绍了过程系统可靠性的基本概念、一般原理及方法。以合成氨、磷酸等系统的大量实例介绍了各类过程系统的可靠性评价, 从可靠性角度提供了实际产品的能耗数学模型、经济效益模型、多产品系统的最优化决策模型和可靠性管理的结构模型等。介绍了过程系统可靠性节能的策略、可靠性设计原则和可靠性管理的若干技术, 对改善系统的可靠性状态、节能降耗、提高管理水平具有指导意义。

本丛书各分册都具有普及性、实用性和可操作性的特点。适用于过程工业的技术人员、管理人员以及大、中专学校师生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程系统的可靠性/邓正龙著. —北京: 中国石化出版社,

1996

(过程系统工程理论与实践丛书

ISBN 7-80034-600-4

I. 过… II. 邓… III. 过程系统—系统可靠性 IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 15432 号

*

中国石化出版社出版发行

(北京朝阳区太阳宫路甲 1 号 邮政编码: 100029)

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 32 开本 8.25 印张 169 千字印 1—2000

1996 年 3 月北京第 1 版 1996 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-80043-600-4/TK·008 定价: 11.00 元

主 编 成思危

编委会 (按姓氏笔划为序)

申同贺	许锡恩	成思危
陈丙珍	周瑞康	俞金寿
顾 炎	麻德贤	韩方煜
谭昌元	魏寿彭	

43629

序

过程系统工程是在系统工程、化学工程、过程控制、计算数学、信息技术、计算机技术等学科的边缘上产生的一门综合性学科。它以处理物料—能量—信息流的过程系统为研究对象，其核心功能是过程系统的组织、计划、协调、控制和管理。它广泛地用于化学、冶金、建材、食品等过程工业中，目的是在总体上达到技术上及经济上的最优化。

过程系统工程大约是在 60 年代开始形成一门独立学科的，此后得到了迅速的发展，在各种期刊杂志上及三年一度的过程系统工程国际会议上发表了大量的文章，其中一些关键技术，如过程模拟、过程分析、过程综合、过程预测、过程评价、过程可靠性分析等日益成熟，应用领域也不断扩展，已经成为过程工业发展中不可缺少的一门高新技术。

二十多年来，我国学者及工程技术人员在努力学习国外先进技术的基础上，在实践中积累了不少经验，在技术上也有一些进展。但由于彼此之间缺乏联系及交流，在过程系统工程方面尚未能形成一支强大的人才队伍，有不少好的成果得不到应有的推广。有鉴于此，我国著名的系统工程专家钱学森教授在 1988 年 12 月 23 日给我的来信中，倡议成立一个全国性的学术团体。他在信中指出：“我想中国系统工程学会似尚缺少一个专门搞生产流程的委员会，而生产流程的系统工程对化学工业特别重要。您如同意，您可作为发起人向学会的秘书长或副秘书长建议成立这个委员会。”

在钱老的大力推动下，中国系统工程学会过程系统工程

专业委员会于 1991 年宣告成立。在成立大会上，不少代表建议要大力普及过程系统工程的基本知识。因此在第一次理事会上便决定要编辑出版一套《过程系统工程理论与实践丛书》，并为此组成了编辑委员会，确定了丛书的选题及作者。在中国石化出版社的大力支持下，这套丛书得以顺利地出版。在此我仅代表中国系统工程学会过程工程专业委员会向各位编委、各位作者、以及中国石化出版社的有关人员表示深切的感谢。

这套丛书共分 10 册，基本上覆盖了过程系统工程的主要领域。出版这套丛书的目的是宣传并普及过程系统工程的基本知识，以引起读者进一步学习的兴趣。其读者对象是过程工业领域内大专以上文化程度的中青年工程技术人员。我们希望这套丛书能达到以下三点基本要求：

1. **系统性：**框架完整，逻辑清晰，每部书相对独立，深度相近，彼此之间有联系而不重复。

2. **科普性：**深入浅出，定性叙述与定量分析相结合，尽量避免复杂的数学推导。

3. **实用性：**理论与实践相结合，有一定数量的实例及应用软件介绍。

由于这套丛书是我们在过程系统工程领域内编写高级科普读物的第一次尝试，是否真正达到了上述要求，还有待读者的检验。我们热诚地希望读者能将对本书的宝贵意见通过中国石化出版社告诉我们，以便再版时加以改进。

中国系统工程学会过程系统工程

专业委员会主任委员

成思危

前 言

过程系统的可靠性，是 70 年代后期提出的一个重大课题，国外经过长时间的大规模跟踪调查确认：过程系统的可靠性是过程系统继安全性之后，所面临的又一个重大的技术性挑战。从某种意义讲，它比安全性的影响更深刻、更广泛、也更难处理。这是由于过程系统的可靠性不仅涉及现有系统的机器设备、电器仪表、原燃料供应，分析测试、人员、维修和管理等，而且涉及系统原有的规划、设计、选址、制作、安装和试运行等。其中任何一个环节，任何一个部门或任何时间在可靠性问题上的失误或差错，都可能导致系统的不可靠。因此，过程系统无论生产何种产品，无论何种规模，也无论技术的先进程度，都难于保证系统运行中不出任何故障。相反，不可靠的现象和状况，毫无例外地、程度不同地存在于每个系统之中。系统的故障和失效所产生的消极后果是十分严重的，它常常导致系统的产量下降，原燃料动力的消耗额外增大，经济效益大减甚至亏损。它使系统技术上、规模上、原燃料供应上的优势不能有效发挥，使系统的预定任务和主要目标成为缺乏基础条件的空中楼阁。正是由于这个重要原因，造成不少企业经济效益不高、亏损、甚至失去竞争能力而倒闭。我国的过程系统（尤其中小型系统）长期普遍存在事故多、消耗大、成本高、效益差的状况，可靠性问题是其重要且十分突出的原因。要根本改变这种落后状况，单纯进行技术改造是不够的。因为任何先进的

技术和装备仍然不能回避其可靠性问题，相反，花了不少投资得到的技术先进性，由于可靠性问题未解决好而被断送掉的事例，在我国并不少见。因此，如何从理论到实践研究出一套先进的实用的科学和技术，有效地把故障和失效降低到最小程度，使系统长时间保持尽可能好的可靠性状态，进而实现系统的节能降耗，提高经济效益等预定目标，使系统的规划、设计、建造、运行和管理有一套系统的理论和技术予以指导，这就是研究过程系统可靠性的目的，也是过程系统可靠性技术——一门新的综合性技术的主要任务。

可靠性技术的研究和应用起源于第二次世界大战。由于其重要性，四十多年来得到了迅速发展，已广泛应用于电子、军工、机械、宇航、核工业等领域，已逐渐成为研究任何实体系统所不可缺少的最重要的基础性技术之一。然而，由于过程系统是一个由人员—机器—物料高度综合的系统（简称人—机—物系统），使得电子工业等领域的许多可靠性理论，难于在过程系统中直接应用。因此，研究过程系统可靠性技术的主要内容，就是要针对过程系统的特点，用系统工程和一般可靠性技术的原理和方法，从普遍的现象中，研究总结出过程系统在可靠性方面的若干内在规律和特征，并提高到理论上予以定量化的分析和处理，再用这些理论和技术，指导新系统的规划、设计和建造，对现有系统进行有效的可靠性分析、评价、监测和管理。由于过程系统自身的复杂性，加上提出此问题的时间较短，尤其过程系统工程学尚处于不断完善之中，因而国内外至今尚无此方面的专著。作者从 80 年代初开始，持续此领域的研究。从 1984 年起，每年为化工类高年级学生讲授“化工可靠性技术基础”课程，编写了专门的教材（讲义），组织了几届研究生进行调查和

研究，完成了此领域的国家自然科学基金项目的研究。本书正是在多年的科学研究和教学实践基础上撰写而成。按照系统、严密、实用、通俗的原则、介绍了过程系统可靠性的基本概念、一般原理和方法。同时也介绍了作者和国内外在此领域的若干最新研究成果。

本书共分六章。第一章概论；第二章过程系统的可靠性评价；第三章系统功能可靠度与产品能耗及经济效益；第四章过程系统的可靠性设计基础；第五章过程系统的可靠性管理；第六章过程系统可靠性与人类工程学。本书可供化工、轻化工、日用化工、精细化工、化工冶金，制药等领域，从事设计、研究、生产、教学的工程技术人员、管理干部和高校师生等阅读。

十分感谢化工部副部长成思危教授对本书作了精心的审定和指导。在作者近些年从事过程系统可靠性研究中，受到张洪沅（已故），曾宏（已故），汪家鼎、王建华、杨友麒、陈丙珍、沈忠耀，石炎福、周桂芳等许多化工老前辈、专家教授们的热情支持和帮助。我的已毕业研究生陈仕刚、罗涛、吴素娟、贾敏等协助作了大量艰苦的研究工作。中国系统工程学会过程系统工程专业委员会的领导和中国石化出版社为本书的出版提供了良好的基础。在此深表感谢。

由于过程系统可靠性是一门综合性很强的具有相当难度的新技术，目前尚处于完善过程中，加之本人的学术水平所限，本书的错误和不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

目 录

前 言

第一章 概论	1
第一节 可靠性技术的由来和发展.....	1
第二节 过程系统的可靠性研究状况.....	5
第三节 过程系统可靠性的基本概念	11
一、过程系统可靠性技术的实质	11
二、基本术语和概念	12
三、过程设备和系统的一般故障规律	16
四、过程系统可靠性工作的总体程序	17
第四节 过程系统的可靠性与安全性	20
第五节 开展过程系统可靠性研究的意义和内容	21
第六节 概率统计基础知识	23
一、可靠性的数量特征和特点	23
二、概率及其基本概念	26
三、分散度与分布	29
四、总体与样本, 推断与置信水平	33
五、分布函数与常见的分布	35
六、检验、相关和回归	41
第二章 过程系统的可靠性评价	45
第一节 可靠性评价的作用和类型	45
第二节 系统功能可靠度及评价模式	46

一、现有评价模式及其缺陷	46
二、功能可靠度及评价模式	51
第三节 间歇过程系统的可靠性评价	61
第四节 化学反应器的可靠性评价及催化剂 寿命预测	64
一、气固催化反应器的可靠性评价	65
二、催化剂的可靠性和寿命分析	67
三、催化剂寿命预测与更换周期	73
第五节 多产品系统的可靠性评价	75
一、不同过程的多产品系统评价	76
二、同一过程的多产品系统评价	78
第三章 系统功能可靠度、产品能耗及经济效益	80
第一节 过程系统的能耗数学模型	80
一、过程系统产品能耗与功能可靠度关系的计算	80
二、系统实际运行能耗与功能可靠度	84
三、能耗增加率与降低率的计算	86
四、过程系统实际运行的能耗数学模型	89
五、磷铵过程系统的模型验证	94
第二节 过程系统的可靠性节能策略	100
一、可靠性节能策略	100
二、系统的节能层次和决策	103
第三节 过程系统的可靠性与经济效益模型	108
一、过程系统的盈亏平衡图和最小功能可靠度	109
二、系统最小功能可靠度的影响因素	111
三、系统可靠度与企业盈利的方向和决策	115
四、多产品系统的经济效益最优化决策模型	119
第四章 过程系统的可靠性设计基础	123

第一节 过程系统可靠性的总体特征·····	123
第二节 过程系统可靠性的结构特征及分类·····	126
一、系统可靠性的结构特征·····	126
二、系统结构的分类·····	130
第三节 简单结构系统的可靠度计算·····	136
一、串联结构系统的可靠度计算和设计·····	136
二、并联冷贮备结构的系统可靠度计算·····	
三、串并联结构系统的可靠度计算·····	141
第四节 单元功能系数及复杂系统的可靠度计算·····	144
一、过程系统的单元功能系数·····	145
二、单元功能系数在可靠性设计中的应用·····	145
第五节 装备和零部件的平均寿命·····	151
一、概率函数与故障率·····	151
二、国内外大型合成氨系统的故障统计与比较·····	160
第六节 过程装备的可靠性设计法·····	166
一、概述·····	166
二、安全系数设计法·····	170
三、可靠性设计法·····	171
第五章 过程系统的可靠性管理·····	174
第一节 概述·····	174
第二节 磷铵过程系统的可靠性状况及分析·····	175
第三节 过程系统的可靠性工艺管理·····	180
一、可靠性工艺管理的结构模型·····	180
二、工艺过程的可靠性管理·····	182
第四节 可靠性设备管理和维修·····	188
一、设备的可靠性管理·····	189
二、可靠性维修管理·····	192

第五节 过程工艺系统的故障树分析法·····	202
一、故障树分析法概念·····	203
二、故障树的建造和故障概率计算·····	204
第六节 系统可靠性与系统的效率和费用·····	215
一、一般处理原则·····	215
二、可靠性经济学·····	216
第七节 过程系统可靠性资料数据库·····	219
一、结构模型·····	219
二、基本内容及可靠性主要指标·····	220
三、数据库的建立方法·····	222
第八节 计算机在过程系统可靠性中的应用·····	223
第六章 过程系统可靠性与人类工程学·····	227
第一节 人类工程学简述·····	227
第二节 系统可靠度和人的因素·····	230
第三节 操作可靠度和人-机功能的分配·····	233
一、操作可靠度的一般特性·····	233
二、人的内在因素·····	233
三、人-机能力的比较和功能的分配·····	236
第四节 人为差错的故障分析和模型·····	240
一、差错的类型·····	240
二、差错的主要内容·····	242
三、人为差错的定量化研究·····	243
参考文献·····	245

第一章 概 论

第一节 可靠性技术的由来和发展

可靠性理论与技术的研究和应用，起源于第二次世界大战。由于战争的需要，大量新式军用器械和先进的电子设备纷纷出现，例如雷达，在战争中起了重要作用，但是雷达里的电子设备却经常出故障，为此开始了正规的可靠性研究，研究的内容和范围主要是如何提高电子管的寿命及耐震、耐冲击等性能。

50年代初期，美国国防部对军内某系统经常用的先进电子设备进行了抽查和统计，发现其无线电设备有14%的时间，声纳有45%的时间均处于故障状态。而对另一些设备的抽查发现，设备的维修费用竟高达设备原价的数倍到10倍，还有的机械设备其维修时间竟为使用时间的几十倍。这些严重的情况，促使国防部建立了研究电子设备可靠性的专门机构。这是系统进行可靠性技术研究的开始，到1957年，发表了正式的研究报告，报告中包括了电子设备的设计、试制，元器件可靠性的测定等一整套标准规范，范围极广，其基本思想，现在也还在使用。1971年美国国防部又将1956年至1965年期间，首先由海军部，然后是所有各军兵种颁布的各种有关可靠性规范，进行了统一修订，并重新

颁布为全军系统的可靠性标准和通用规范，简称为 MIL—STD 规范，例如“MIL—STD—785”为可靠性技术要求，“MIL—STD—470”为维修性计划要求。

60~70 年代，世界上几次大的可靠性事故造成的严重后果，促进了对可靠性技术的研究。1963 年美国航空兵飞机每飞行 10000 小时，就有 1.46 次事故，这一年共发生 514 次重大事故，毁机 275 架，驾驶员 222 人死亡，损失 2.8 亿美元。1971 年，前苏联三名字航员在“敬礼”号飞船中，由于一个部件失灵而丧命。1979 年美国军队使用计算机指挥一次军事演习，由于计算机失灵，使进攻与撤退的部队颠倒，造成大混乱。美国航天局 1978~1979 年三次火箭发射失败，损失 1.7 亿美元。1979 年由于反应堆系统增压器减压阀门出故障，造成举世共知的美国三里岛核电站事故，引起世界范围的核恐慌。这些重大事故使得实施重大行动和试验的决策者，在拟定计划时，不得不事先考虑并拟定有关可靠性的规范。60 年代初，美国集中全国航天技术力量，制订实施阿波罗登月计划时，在重达数十吨的全部计划书中，有关可靠性方面的指导书及规范大约占了 20%。

60 年代中后期，由于系统工程技术的逐渐成熟和发展，可靠性技术的研究很快从单个电子设备发展到整个电子工业系统，其他工业部门和技术领域也纷纷开展本系统的可靠性研究，这是一个质的飞跃，到 70 年代后期，进一步发展到人一机系统的可靠性研究。研究的范围愈来愈大，系统愈来愈复杂。

50 年代中期到 60 年代中期，可靠性技术的研究和应用，从美国逐步扩大到欧洲和日本，他们先后从美国引进可靠性技术并开展了自身领域的研究。1968 年英国工艺技术

部正式出版了系统设备质量管理规范，主要内容是飞机系统的设计、研制、管理计划及可靠性计划。1965年欧洲的国际电工委员会设立了电子设备和元件可靠性技术委员会，专门审议有关可靠性文件、草案，并于1969年统一制订了有关可靠性术语和管理方面的正式文件。

日本早在1956年从美国引进了可靠性技术，首先在电气学会内组成了长寿命电子管专门小组开展可靠性研究，1960年正式成立了“可靠性及质量控制”的全国机构，如“可靠性研究委员会”等，并举办全国性的技术讲座，出版各种刊物和书籍，广泛进行宣传和介绍，推广有关可靠性和质量管理等方面的理论和技术。1968年日本通产省在工业技术院标准部下面设立了可靠性技术研究室，除制订可靠性研究方案和实施计划外，还开展了可靠性数据的收集、分析、交换和建档等工作。1970年前后，日本先后颁布了“电子设备用元器件的失效试验方法通则”（JIS C5003—1969），“可靠性名词术语”（JIS Z8115—1970），和具有一部份可靠性内容的“质量管理手册”（JIS手册—1971）。由于可靠性技术的研究和应用为质量管理提供了重要的理论和技术依据，使得日本的电子产品大规模地打进了国际市场，获得了“质量可靠”的信誉。

西方工业国家在可靠性方面的工作，经历了四十多年的历史，对一个新兴的技术学科来讲，时间并不长，但是，由于它的重要性和普遍性，发展的速度是惊人的。从其发展的过程看，大体可分为纵向和横向两方面的发展，从纵向看，主要是在电子设备及系统中发展得最为成熟，这方面又可分为可靠性硬件和软件两方面的进展，所谓硬件主要是指对零部件、设备、系统等失效、可靠、维修、制作等可靠性的测

试、试验以及规律的收集、总结和管理等的研究。所谓软件主要是指可靠性理论、规范、标准化、预测,分析和最优化方面的工作。硬件和软件之间相互联系,相互促进。横向方面的发展主要是在电子系统以外的领域和系统中,可靠性方面的研究、应用和推广,例如宇航系统,国防军工系统,机械系统等。这种横向的发展,使得可靠性理论和技术从其他学科中得到补充和深化,从而不断地完善和成熟,尤其是系统科学的补充,使它逐步成为研究复杂系统,人-机系统,乃至大系统等一项不可缺少的专门性基础技术,国外不少系统工程学者认为,系统的可靠性是研究、分析、设计任何系统不可缺少的重要组成部分,因此,它应当是系统工程中一个独立的分支学科——可靠性工程。近年来,系统科学的研究进一步深入到“自组织系统”,例如人和其他生物系统,乃至某些自然系统,社会系统等,提出了“协同学”新的系统理论,可以断定,在这些系统功能等的研究中,可靠性问题同样具有重要的地位和作用。

我国可靠性技术的研究和应用,是随着电子工业的发展而逐步发展起来的。早在第一个五年计划期间,我国就建立了可靠性和环境适应性的试验研究基地,调查、搜集电子产品的使用和失效情况,开展部分可靠性和环境适应性的试验工作,对某些电子产品进行一定程度的可靠性预测等。1960年前后,由于国防尖端工程如原子弹、氢弹、人造卫星等的需要,对电子产品和设备进一步开展了失效机理及筛选、设计、工艺、制作等方面的研究。70年代末期,可靠性研究在电子工业部门中普遍开展,以后又建立了全国性学术机构——中国电子学会可靠性专业委员会和中国运筹学会可靠性专业委员会,使可靠性研究扩展到机械、宇航、军工、核