

陈国华 冯毅 编

过程装备可靠性技术



化学工业出版社

过程装备可靠性技术

陈国华 冯 毅 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书系统地介绍了过程装备可靠性与维修管理的主要内容, 共分为 8 章: 第 1 章介绍过程装备可靠性与维修管理的内涵及发展概况, 第 2、第 3 章从可靠性基础出发, 讲述可靠性的基本理论和计算方法; 第 4、第 5 章结合工程实际, 分别讲述过程装备的故障特征, 以及环境与过程装备可靠性的相互关系; 第 6 章详细讲述了过程装备可靠性分析的常用方法, 如蒙特卡罗方法、故障树分析、Petri 网等; 第 7 章介绍过程装备的维修管理, 第 8 章介绍工厂的可靠性工作。书中阐述了可靠性的基本理论, 同时列举过程装备应用可靠性工程的分析实例, 最后给出了提高过程装备可靠性的相应措施。

本书适于从事化工、炼油、轻工、核电与火电、冶金、环境工程、食品与制药的研究、设计、制造和管理的工程技术人员阅读, 也可供高等院校相关专业教师、研究生及本科生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程装备可靠性技术/陈国华, 冯毅编. —北京: 化学工业出版社, 2011. 4
ISBN 978-7-122-10394-9

I. 过… II. ①陈…②冯… III. 化工过程-化工设备-研究 IV. TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 006466 号

责任编辑: 程树珍 金玉连
责任校对: 洪雅姝

文字编辑: 闫 敏
装帧设计: 杨 北

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 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 11 1/2 字数 285 千字 2011 年 6 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: 30.00 元

版权所有 违者必究

前言

过程装备是石油化工、轻工、食品及制药等过程工业的必需设备，它的安全状况直接影响过程工业的安全生产及经济效益。可靠性工程是为保证产品在设计、制造、使用和维护过程中达到预定的可靠性指标，提供应该采取的技术及组织管理措施。随着近代过程工业向高温、高压、大型化方向发展，必然对过程装备的可靠性提出了更高的要求。将可靠性工程应用于过程工业，是提高过程装备安全性的重要途径之一。

可靠性工程是介于技术和管理科学之间的一门边缘性学科，其作为一门工程应用学科，有着自己独特的体系、方法和技术。由于各行业产品性质各不相同，因此对于不同行业可靠性的工程应用也各具特点。

过程装备是化工、石油、能源、轻工、环保、医药、食品等过程工业中，处理气、液和粉体等流程性材料必须的设备与技术。过程装备的工作介质多具有高温、高压、有毒、腐蚀、易燃、易爆等特征，其主要失效途径与常见机械构件不同，具有自己独特的特点。一旦发生事故，会造成重大经济损失和人员伤亡，同时也会导致环境的严重污染，因此，过程装备的安全状况直接影响着过程工业的安全生产及经济效益，影响着从事过程工业工人的生命安全。

本书从可靠性工程基础理论出发，同时结合工程实际问题，列举应用实例，便于读者对基础知识的理解，同时又培养读者“学以致用”的能力。通过结合现场实际问题来讲述理论知识，引导学生“在学习中研究、在研究中应用、在应用中学习”，着力于培养学生的科研创新能力。教材后半部分关于过程装备维修管理相关内容，描述了现代企业如何进行装备的维修和可靠性管理，联系生产实际，使读者了解到更多专业知识，增强了本书的系统性和完整性。前半部分讲述如何分析、计算装备的可靠性，后半部分则侧重于描述如何提高装备的安全性和可靠性，全书体现了“发现问题，分析问题，解决问题”的基本思想。

本书系统讲述过程装备可靠性分析的工作目标、基础理论、可靠性分析方法；阐明过程装备故障的种类与本质；指出提高过程装备可靠性的方法与途径；介绍过程装备可靠性、安全性与工作环境之间的相互关系；介绍维修技术与维修管理及其对装备可靠性的作用；提出企业根据实际条件开展装备可靠性工作的实用方法。全书共分8章，其中第1、2、3、4、6章由华南理工大学陈国华教授主持编写；第5、7、8章由华南理工大学冯毅副教授主持编写。

本书在编写过程中，得到了华南理工大学研究生院教材建设基金资助，研究生李鹏程、李明阳、梁峻等同学在资料收集和文献整理过程中付出了辛勤的劳动。本书是在编者近年来讲授该课程的讲义并参考国内外文献资料基础上编写而成的。在此，一并表达对相关文献作者的诚挚谢意。

由于编者水平有限，加之时间仓促，虽经努力，但不足之处在所难免，敬请各位专家学者和广大读者批评指正。

编者

2010年12月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.1.1 装备可靠性的重要意义	2
1.1.2 装备维修管理的重要意义	2
1.2 过程装备可靠性与维修管理的概念	3
1.3 国内外可靠性和维修管理工程发展概况	3
1.3.1 可靠性工程发展概况	3
1.3.2 维修管理工程发展概况	4
1.4 过程装备可靠性与维修管理的关系	6
第 2 章 可靠性分析的基础理论	8
2.1 可靠性分析的基本概念	8
2.1.1 可靠性	8
2.1.2 故障率函数	8
2.1.3 平均无故障工作时间	9
2.1.4 故障前平均工作时间	9
2.1.5 维修度和修复率	10
2.1.6 有效度(或可用度)	10
2.1.7 故障率曲线(浴盆曲线)	10
2.2 可靠性数学基础	11
2.2.1 概率论基础	11
2.2.2 随机变量及其分布	14
2.2.3 随机变量的数字特征	16
2.2.4 矩发生函数	17
2.3 可靠性工程中常用的分布	18
2.3.1 二项分布	18
2.3.2 泊松分布	18
2.3.3 指数分布	19
2.3.4 威布尔分布	20
2.3.5 正态分布	21
2.3.6 对数正态分布	22
2.3.7 伽马分布	24
2.3.8 极值分布	24
2.4 可靠性统计推断方法	26
2.4.1 基本概念	27
2.4.2 参数估计量的评选标准	27
2.4.3 参数估计	28
2.4.4 假设检验	38

第3章 过程装备可靠性分析的基本原理	43
3.1 应力-强度干涉模型	43
3.1.1 应力和强度均服从正态分布的可靠度计算	44
3.1.2 应力和强度均服从对数正态分布的可靠度计算	46
3.1.3 应力和强度均为威布尔分布的可靠度计算	47
3.1.4 应力和强度均为指数分布的可靠度计算	48
3.2 一次二阶矩法	48
3.2.1 一维随机变量的分布参数	49
3.2.2 多维随机变量的分布参数	49
3.3 设计验算点法	50
3.3.1 可靠度系数的几何意义	50
3.3.2 可靠度系数的计算步骤	52
3.4 当量正态分析法	53
3.4.1 拉克维兹-斯考夫 (Rackwitz-Skov) 法	53
3.4.2 派罗黑摩 (Paloheimo) 法	55
3.5 可靠性安全系数	57
3.5.1 平均安全系数	57
3.5.2 概率安全系数	58
3.5.3 随机安全系数	59
3.6 过程装备可靠性分析实例	61
第4章 过程装备故障的特征	70
4.1 概述	70
4.2 构成过程装备故障的要素	70
4.2.1 故障机理的内在因素	70
4.2.2 故障机理的外在因素	71
4.3 过程装备故障的分类	72
4.3.1 按故障发生的速度分类	72
4.3.2 按故障发生的后果分类	72
4.3.3 按故障的损伤程度分类	72
4.3.4 按故障的易见性分类	72
4.4 腐蚀引起的故障	73
4.4.1 腐蚀的分类	73
4.4.2 腐蚀机理	73
4.4.3 均匀腐蚀	74
4.4.4 点蚀	74
4.4.5 晶间腐蚀	75
4.4.6 应力腐蚀	75
4.5 疲劳破坏	76
4.5.1 疲劳破坏的概念	76
4.5.2 疲劳的分类	76
4.5.3 疲劳的特点	77

4.5.4	疲劳破坏机理	79
4.5.5	疲劳破坏断口特征	80
4.6	振动引起的故障	81
4.6.1	不平衡	81
4.6.2	不对中	81
4.6.3	机械松动	82
4.6.4	轴承问题	82
4.7	磨损造成的故障	83
4.7.1	磨损概述	83
4.7.2	磨料磨损	84
4.7.3	粘着磨损	84
4.7.4	疲劳磨损	85
4.7.5	微动磨损	86
4.8	过程装备常见故障	86
4.8.1	换热设备	86
4.8.2	废热锅炉	87
4.8.3	反应釜	89
4.8.4	转化设备	90
第 5 章	环境与过程装备可靠性的相互关系	91
5.1	环境的分类	91
5.2	环境状态对过程装备可靠性的影响	91
5.2.1	流通环境	91
5.2.2	运行环境	92
5.2.3	维修环境	94
5.3	过程装备可靠性工作对环境问题的处理	95
5.3.1	粉尘问题	95
5.3.2	盐害	95
5.3.3	低温与高温	95
5.3.4	腐蚀	96
5.3.5	超温超压超载	98
5.4	过程装备对环境的影响	98
第 6 章	过程装备可靠性分析方法	100
6.1	装备零件可靠性分析	100
6.1.1	蒙特卡罗方法	100
6.1.2	疲劳强度可靠性计算方法	106
6.2	系统可靠性分析	108
6.2.1	故障树分析	108
6.2.2	Petri 网	114
6.2.3	不可修复系统的可靠性分析	117
6.2.4	可修复系统的可靠性分析	128

6.2.5 故障模式、影响和危害性分析	131
第7章 过程装备的维修管理	136
7.1 维修的概念	136
7.2 维修的必要性及维修工作的特性	137
7.3 维修作业内容	138
7.4 维修方法	139
7.5 维修作业进度计划	139
7.5.1 用横道图表示维修作业进度计划	140
7.5.2 用网络图表示维修作业进度计划	140
7.6 维修信息管理系统	144
7.7 降低过程设备维修费用的措施	145
第8章 工厂的可靠性工作	148
8.1 可靠性工作的出发点	148
8.2 可靠性工作制度的建立	148
8.3 产品可靠性信息收集与管理系统	149
8.3.1 可靠性信息收集	150
8.3.2 计算机信息管理系统	152
8.4 可靠性试验	153
8.4.1 环境试验	154
8.4.2 寿命试验	155
8.4.3 筛选试验	157
8.4.4 现场使用试验	157
8.4.5 可靠性鉴定试验	157
8.5 故障原因分析	157
8.6 可靠性设计	160
8.7 可靠性增长	164
8.7.1 可靠性增长试验数据的处理	165
8.7.2 AMSAA 可靠性增长模型	167
8.7.3 Duane 可靠性增长模型	170
8.7.4 AMSAA 模型与 Duane 模型的关系	170
8.7.5 可靠性增长试验的跟踪与评价方法	170
参考文献	174

第1章 概论

1.1 引言

1.1.1 装备可靠性的重要意义

按照国际标准化组织（ISO）的认定，社会经济过程中的全部产品通常分为四类，即硬件产品、软件产品、流程性材料产品以及服务产品。从原材料到产品，要经过一系列物理的、化学或者生物的加工处理步骤，这一系列加工处理步骤称为过程。单元过程设备（如塔、换热器、反应器与储罐等）与单元过程机器（如压缩机、泵与分离机等）二者统称为过程装备。通常人们所说的“可靠性”指的是“可以信赖的”或“可以信任的”。对于一个过程装备或系统，当人们要求它运行或工作时，它就应该正常运行和工作，这种产品、装备或系统就被称为是可靠的。所谓可靠性是指系统、设备或零部件在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。产品需要过程来完成，过程需要由设备来完成物料的粉碎、混合、储存、分离、传热、反应、运输等操作。例如，流体输送过程需要有泵、压缩机、管道、储罐等设备。过程工业主要以流程性材料为处理对象，是国民经济的重要支柱产业之一。过程工业遍及几乎所有现代工业生产领域，如化学工业、化肥、石油化工、生物化工、制药、农药、染料、食品、炼油、轻工、热电、核工业、公用工程 and 环境保护等各个领域。

从20世纪60年代开始，过程工业特别是以核工业、化学工业、石油化学工业为代表的高能化、自动化大型生产装置在世界范围内迅速发展。这些复杂的系统都有若干分系统，而各个分系统又由多台整机组成，每台整机又由许多零部件组成，各个零部件又由许多元器件与管道、导线等相连，只要其中有一件失效，就可能造成整个机组和系统发生故障，甚至酿成灾难性事故。如1986年美国“挑战者”号航天飞船的机毁人亡事故，就是因为燃料系统密封系统的密封圈失效所引起的。它在起飞后76s时爆炸，造成7名宇航员丧生和12亿美元的直接经济损失。2003年美国“哥伦比亚”号航天飞机返航时解体坠毁，航天飞机上的7名宇航员全部遇难，事故原因是航天飞机发射升空时外部燃料箱上的一块泡沫绝缘材料脱落在“哥伦比亚”号左翼的隔热板上砸了一个洞，给返航埋下隐患。这些灾难所造成的严重后果和社会问题远远超过事故本身。

对于过程装备及其控制系统而言，可靠性有其特殊的意义。因为过程装备所处理的物料大多是易燃、易爆、有毒、有害的危险化学品，一旦发生事故，其后果都将十分严重。我国石油化工行业安全形势比较严重，各类事故总数居高不下，并呈现不断上升的趋势。据统计，2000年发生化学事故416起，2001年发生化学事故564起，2002年发生化学事故592起，2003年发生化学事故649起，2004年发生化学事故176起，2005年发生化学事故147起，2006年发生化学事故154起，2007年发生化学事故97起，2008年1月至10月发生化学事故85起。2000年因化学事故伤亡2156人，2001年伤亡1421人，2002年伤亡1551人，2003年伤亡1197人，2004年伤亡252人，2005年伤亡229人，2006年伤亡266人，2007年伤亡161人，2008年1月至10月伤亡141人。为了提高安全性，降低风险值，因此，近年来对于过程装备及其控制系统都提出了严格的可靠性要求。如核电设备，故障率都应控制在 $10^{-7}/(\text{台} \cdot \text{年})$ 以下，石油化工设备也一样。而对于过程工业中的控制系统，

2003 年国际电子工程委员会 (IEC) 专门对过程工业中的安全连锁系统制订了国际标准 IEC 61511, 其中详细规定了软件和硬件的可靠性要求。

随着科学技术的发展和生产规模的扩大, 我国化工行业的企业规模和数量也有了较大的增长, 截止 2007 年 12 月底, 全国共有危险化学品从业单位 337170 家。其中: 生产单位 23882 家; 经营单位 259236 家, 包括剧毒化学品经营单位 3655 家, 加油站 95286 家 (其中中石化加油站约 3 万家, 中石油约 1.8 万家); 储存单位 3482 家; 运输单位 6800 家, 危险货物运输车辆约 10 万辆; 使用单位 43382 家; 废弃处置单位 388 家。从全国范围看, 危险化学品生产单位主要分布在东南沿海一带, 超过 1000 家的省市有江苏 (4032 家)、山东 (2936 家)、浙江 (1599 家)、广东 (1560 家)、河北 (1430 家)、辽宁 (1231 家)、河南 (1111 家), 这 7 个省市的危险化学品生产企业数量占全国总数的 58.2%。诸多企业的产品销往海外, 因此, 对产品的质量提出了更高的要求, 保证产品质量必须满足产品的功能性、可靠性、经济性和安全性, 而产品的可靠性占主导地位。特别是现在, 中国已加入 WTO, 中国经济要与国际接轨, 中国的企业要参与国际市场的竞争, 中国要成为世界制造业的一个中心, 只有不断提高产品的可靠性水平才能在国际市场站稳脚跟。当今国际贸易中所实施的产品责任法也促使工业界提高产品的可靠性。产品责任法中规定: 只要产品缺陷、故障对用户造成损失, 制造者必须承担法律和经济责任。美国人预言: 今后只有那些具有高可靠性指标的产品和企业, 才能在日益激烈的国际贸易竞争中幸存下来。日本人则断言: 今后产品竞争的焦点是可靠性。因此, 深入研究可靠性, 不断提高装备的可靠性, 对于提升企业竞争力, 预防灾难性事故, 减少人员、财产、装备损失, 意义十分重大。

1.1.2 装备维修管理的重要意义

国内外的装备发展和应用的实践证明, 开展装备维修管理工作, 对于提高设备和系统的可靠性、确保生产设备的安全运行、节省寿命周期费用等方面具有重要的意义。

(1) 装备维修管理是提高系统和设备可靠性的重要补充

产品可靠性的意义已被人们所共识。但是, 产品不可能永远百分之百可靠, 而且许多产品随着使用、储存时间的延长, 总会出现故障或失效。特别对于过程工业来说, 其生产设备一般处于高温、高压、易燃、易爆的复杂条件下进行生产, 相当多的原料及产品具有强烈的腐蚀性, 导致这些设备更容易出现故障或失效, 同时, 由于生产具有很强的系统性和连续性, 装备规模庞大, 价格昂贵, 置换困难。因此, 通过维修管理可及时提高系统和设备的性能, 修复系统或设备故障, 提高设备的可靠性以及延长系统和设备的寿命。

(2) 装备维修管理是确保设备运行安全、系统生产稳定的重要手段

由于过程工业生产一般具有高温、高压、易燃、易爆、有毒、有害的特点, 一旦发生严重事故, 不但造成经济损失, 威胁作业人员的人身安全, 而且会造成后果难以估量的环境污染。过程工业生产是连续进行的, 稳定的生产将会给企业带来较大的经济效益。对于这些企业来说, 任何一个环节, 特别是一个单机或单元发生故障, 都将造成整个生产系统停产, 其损失是巨大的。例如, 1988 年 7 月 6 日, 英国北海的 Piper Alpha 石油钻井平台发生了重大的事故, 167 人失去了生命。其中一个重要的原因是维修人员没有将盲法兰正确安装在压力调节阀上。乌鲁木齐石化“2001.8.28”中毒事故, 就是因为事前维修人员只是对防止阀芯下落采取了防范措施, 没有意识到阀杆承压下可能会飞出, 而且事发时作业人员不在现场, 监护人没有履行监护职责, 结果造成 2 人死亡, 3 人轻微氨中毒。因此, 必须通过先进、有效、可靠的维修管理工作来确保设备和系统的安全运行、系统的稳定生产。

(3) 装备维修管理是节省寿命周期费用、提高企业经济效益的重要途径

现代过程工业生产中的设备趋于大型化和自动化, 结构复杂且技术日益先进, 其价格也直线上升, 装备的使用维修费用也随之增加。据统计, 美军近 40 年来装备维修费约占美国国防费的 14.2%, 使用维修费约占装备寿命周期费用 (Life Cycle Cost, LCC) 的 2/3。在我国和其他国家也大体如此。因此, 通过合理的装备维修管理工作, 可节省维修费用, 提高企业经济效益。

1.2 过程装备可靠性与维修管理的概念

过程装备可靠性是指过程装备在规定条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。

过程装备维修管理是设备 (装备) 在一定的时间内, 以一定的运转率在连续运转条件下, 对它进行维修保养和零部件的更换、修理 (或修整)、改造等工作的总和。设备投入运行后的管理, 实际上就是维修管理工程。它的管理效果则是通过设备运转率 (设备输出) 和维修费用反映在企业的利润上。

1.3 国内外可靠性和维修管理工程发展概况

1.3.1 可靠性工程发展概况

作为独立的工程学科, 可靠性工程于 20 世纪 50 年代起源于美国。主要是因为用传统的产品质量分析方法常常不能圆满解释一个产品在使用中所出现的故障和失效的情况。军事电子系统的日趋复杂化导致了失效率的攀升, 造成可用性大幅度下降而费用增加。早在第二次世界大战期间, 许多机械电子产品常常在战争的使用过程中出现故障, 导致丧失使用能力, 如美国空军由于飞行故障而损失的飞机达 2 万多架, 是在战争中被击落飞机的 1.5 倍; 而在许多舰艇和飞机上的电子仪器设备有将近一半在运输与储存过程中出现了故障而失效。这种不经使用就遭到重大损失的情况促使美国投入了许多力量进行产品可靠性研究。美国国防部 (DOD) 和电子工业部门在 1952 年联合设立了电子设备可靠性咨询组 (AGREE)。电子设备可靠性咨询组的研究报告表明, 要摆脱由于低可靠性所造成的开发和所有权费用的上升, 必须在电子设备的研制周期内制订严格的规定等来实现。电子设备可靠性咨询组的报告被美国国防部采纳, 并发布了电子设备可靠性咨询组有关其试验的报告, 将之作为美国军用标准 MIL-STD-781, 即“可靠性鉴定和生产核准试验”。与此同时, 以集成微电子技术为先导的电子器件技术革命也在继续, 强调提高安装在生产设备上的器件的质量。基于美国军用标准的电子元器件规范和试验系统在英国和欧洲大陆得以制订, 并通过国际电工委员会 (IEC) 成为国际性的规范。美国的工程可靠性工作发展很快, 而且电子设备可靠性咨询组和可靠性工作的各种概念被美国国家航空航天局 (NASA) 以及许多其他高技术设备的主要供应商和购置者所采纳。1965 年, 美国国防部发布了 MIL-STD-785, 即系统和设备的可靠性大纲, 成为指导性文件。

在第二次世界大战期间, 德国在 V-I 火箭的研制过程中也开始应用可靠性数理统计方法, 把小样本问题转化为大样本问题进行研究。德国的 V-II 型火箭的诱导装置开始应用可靠性分析方法, 第一次定量地表达了产品的可靠性。在 20 世纪 50 年代, 前苏联为了保证人造地球卫星发射和飞行的安全, 也开展了可靠性研究工作, 1961 年在发射第一艘载人宇宙飞船时, 提出了可靠度达到 0.999 的定量要求。日本企业家为了保证产品的质量要求, 以便在日益激烈的国际市场竞争中取胜, 也开展了可靠性的研究工作, 日本科学技术联盟专门成

立了“可靠性研究委员会”。从20世纪80年代初开始,日本工业和民用新产品的高可靠性突然间击败了西方竞争对手,占了上风。诸如汽车、电子元器件、系统以及机床等产品的可靠性远远超过了先前的水平。

我国的可靠性工程起步于20世纪60年代,经历了曲折、反复,进入80年代以后,得到了迅速发展。我国从20世纪70年代后期解决国家重点工程元器件的可靠性问题开始,在军工和民用产品方面的可靠性研究有了迅速的发展,当时明确提出了国防军工重点产品的可靠度在10年内要提高两个数量级。像电视机这类产品也明确提出了可靠性、安全性的定量指标。到20世纪80年代,可靠性研究更为深入,特别是武器装备可靠性工作成效显著。为了适应我国武器装备可靠性维修性工程发展需要,1986年成立了全国军事技术装备可靠性标准化技术委员会。GJB 368《装备维修性通用规范》、GJB 450《装备研制与生产的可靠性通用大纲》等一系列国家军用标准相继发布,对推动可靠性、维修性及保障性活动的法制化、规范化发挥了重要作用。同时,在电子、机械、航空、核工业等部门先后发布了关于加强可靠性的法规性文件,并开始形成一批可靠性研究和管理队伍,制订了GJB 299—87“电子设备可靠性设计手册”等一系列标准,有力地推动了可靠性的规范化工作。1996年,中国航天事业多次发生重大事故,造成严重后果和影响。在原国防科工委领导下,各行业各部门狠抓质量与可靠性,制订了数以百计的零缺陷控制标准。以后数十次的发射过程都取得了成功,使我国的可靠性工程技术水平上了新的台阶。神舟系列和嫦娥一号的成功发射,是全国各行业先进科技(包括可靠性)融合的结晶。

软件产业是当今世界高速增长的信息技术产业,是21世纪推动世界经济增长和社会发展的力量。软件的质量和可靠性是实现社会发展的关键,同时也是工业安全的保障。1996年欧洲航天局首次发射阿丽亚纳5号火箭失败,直接损失5亿美元,还使耗资已达80亿美元的开发计划推迟了近三年,事故的原因是火箭控制系统的软件故障。美国的Therac-25放射性治疗仪曾以其安全性著称于世,直到有一天由于软件出错而使其控制系统失灵,导致多名病人失去生命。

为解决软件危机,人们提出了结构化程序设计、面向对象的设计、软件工程、软件复用、面向构件的设计等。这些方法对于改善软件的可靠性起到了重要的作用,有些方面还在发展。然而,时至今日人们远未摆脱软件危机的困扰。软件危机及软件易受攻击的脆弱特性使得软件可靠性的探讨比起硬件来说更为重要,只有提高软件的可靠性才能提高整个系统的可靠性。

国外的软件小组早在1973年起,就开始实践软件可靠性工程。美国航天航空协会1993年通过并将软件可靠性工程作为一项标准,这对航空业产生了重大影响。1996年,《软件可靠性工程手册》出版,进一步证实了这个领域的重要性。IEEE计算机协会软件可靠性工程委员会从1990年创建,并举行了一年一度的国际软件可靠性研讨会(ISSRE)。软件可靠性已被列为21世纪软件发展的重要内容之一。1992年以来,我国逐步形成了具有一定规模的软件可靠性研究队伍。到目前为止,我国的基础理论与国外十分接近,而在工程应用方面,仍然有很大差距。

1.3.2 维修管理工程发展概况

20世纪20年代到50年代,前苏联发展了以“计划预修制”为主导的设备管理体制,其全称为“设备的统一计划预修和使用制度”。计划预修制是按照设备磨损规律而制定的,是在研究了设备磨损规律后逐渐形成的。综合起来,有三种不同的计划预防维修制度,即检查后修理制度、标准修理制度和定期修理制度。检查后修理制度是以检查获得的资料或统计

资料为基础的计划维修制,标准修理制度是一种以经验为根据的计划修理制度,定期修理制度是以磨损规律为依据,以时间周期为基础的计划预防维修体制。美国于1925年提出了预防维修,预防维修基本上是以检查为主的维修体制,出发点是改变传统的事故维修做法,防患于未然,减少故障和事故,减少停机损失,提高生产效益。但由于当时的检查手段、诊断仪器设备还比较落后,有些故障,尤其是深层次的故障,不一定能及时发现,因此,也难免故障停机和事后维修。1954年,在原预防维修体制的基础上,出现了新的维修思想,即生产维修体制,它是以生产为中心,为生产服务的一种维修体制,包括维修预防、事后维修、改善维修和预防维修四种具体的维修方式。20世纪60年代,美国航天工业的发展和军事系统庞大的支出,促使其开展寿命周期费用的研究。1966年7月,国际组织后勤学学会(SOLE)成立,并在许多国家设立了后勤学学会支部。后勤工程学是吸取了寿命周期费用和可靠性、维修性等现代理论而形成的。后勤工程学者认为,一个系统应包括基本设备和相应的后勤支援两部分,而后勤支援的主要内容有测试和辅助设备、备件和修理更换件、人员和培训、器材储运管理、辅助设施和技术资料等。后勤工程学可看作是一个系统在规划的寿命周期内得到有效而经济的支援所需要考虑的全部问题的一门综合性学科。英国也相继出现了设备综合工程学,日本出现了全员生产维修等综合维修管理理论。

纵观设备维修管理的发展,1950年以前主要是事后维修阶段,这个阶段由两个“时代”组成,即兼修时代和专修时代。在兼修时代,由于设备比较简单,设备的操作人员也就是维修人员。随着设备技术复杂程度不断提高,开始有了专业分工,进入了专修时代。这时,操作工专门操作,维修工专门维修。事后维修方式是设备或其部分发生故障或遭到损坏后,使其恢复到规定技术状态所进行的维修活动。这个阶段的共同特点是:柔性较差;维修成本及经济损失难以控制;维修质量难以保证;备件库存需求较大;缺少计划性;设备的故障风险很大,停机时间很长,停机费用很高。

1950~1960年之间是预防维修阶段。国际上有两大体系共存,一个是以苏联为首的计划预修体制,另一个是以美国为首的预防维修体制。这两大体制本质相同,都是以摩擦学为理论基础,但在形式上和做法上有所不同,效果上也有所差异。

计划预修体制 旨在通过计划对设备进行周期维修。其中包括按照设备和不同使用周期安排的大修、中修和小修。定期维修则降低了设备发生灾难性故障和非预期故障的概率,便于安排维修工作和组织备件储存与供应;但其缺点是维修的经济性和设备基础保养考虑不够,不能充分利用设备,容易发生维修过剩的情况,且在频繁维修的同时,容易带入其他新的故障。

预防维修体制 是一种通过周期性的检查、分析来制定维修计划的管理方法,属于预防性维修体系,多被西方国家采用。其优点是减少非计划的故障停机,检查后的计划维修可以部分减少维修的盲目性;其缺点是由于当时检查手段、仪器尚比较落后,受检查手段和检查人员检验能力和素质的制约,可能使检查失误,进一步使计划不准确,仍可能造成维修冗余或不足。

1960~1970年间主要是生产维修阶段,生产维修是以预防维修为中心,兼顾生产和设备制造而采取的多样、综合的设备管理方法,以美国为代表的西方国家多采用此维修管理体制。生产维修由四部分内容组成,即:事后维修、预防维修、改善维修、维修预防。这一维修体制突出了维修策略的灵活性,吸收了多种工程学科的内容,提出了维修预防、提高设备可靠性设计水平以及无维修设计思想。

20世纪60年代末美国航空界开始了以可靠性为中心的维修理论的研究,它属于生产维

修管理的具有代表性的模式。以可靠性为中心的维修管理模式强调以设备的可靠性、设备故障后果作为制定维修策略的主要依据。按照以可靠性为中心的维修管理模式,首先应对设备的故障后果进行评价、分析并综合出一个有关安全、运行经济性和维修费用节省的维修策略。它的基本思路是:对系统进行功能与故障分析,明确系统内各故障的后果;用规范化的逻辑决断方法,确定出各故障后果的预防性对策;通过现场故障数据统计、专家评估、定量化建模等手段在保证安全性和完好性的前提下,以维修停机损失最小为目标优化系统的维修策略。以可靠性为中心的维修(RCM)是目前国际上通用的、用以确定资产预防性维修需求、优化维修制度的一种系统工程方法。

随着检测手段的进步和计算机技术的发展,20世纪80年代形成了更为完善的体制,即以状态为基础的维修体制,又称为状态维修。其定义为:设备出现了明显的劣化后实施的维修策略,而状态的劣化是由被监测的机器状态参数的变化反映出来的。这种方式可有效地减少设备发生重大故障的概率、降低设备维护费用、减少维修时间、提高设备的总体可用性能,把故障消灭在萌芽状态中。基于状态的维修属于预防性维修,它发生在故障之前,是使设备保持在规定状态所进行的各种维修活动,其目的是发现并消除潜在故障,或避免故障的严重后果。它的计划性比传统的维修计划更符合实际、更合理,能有效地减少停机时间和配件的消耗,提高装备和产品的运转率。

20世纪90年代,设备的生产能力出现了新的飞跃,出现了以利用率为中心的维修(ACM),是把设备利用率放到第一位来制定维修策略的设备管理方式。ACM管理方式先按利用率对设备排序,然后结合生产实际、停机损失、维修成本选择适当的维修方式。ACM需要两方面的条件,一方面是由于需要维修数据、故障模式作为支持,这个体制更需要加强对设备的了解,加强设备的维修数据统计记录;另一方面,由于需要选择以检测为主的视情维修、以改进设计为主的改进维修、以充分利用生产空隙为主的机会维修以及传统的定期维修,因此需要更多的技巧和经验。

1.4 过程装备可靠性与维修管理的关系

过程装备由许多零件、部件及组件等组合而成(过程工业装置是由许多设备、管道、阀门等组合而成),它们相互联系以完成一定的功能。过程装备或装置的系统可靠性,是建立在各个设备或各个零件及部件之间的作用关系和这些零部件或设备所具有的可靠性基础之上的。但是,零件、部件及设备的可靠性不是固定不变的,具有以下特点。

1. 设备的可靠性与规定的条件分不开的。可靠性是产品质量管理的一个重要范畴,从广义上讲,它是指精度、准确度的保持性,零件的耐用性、安全可靠性等。在设备技术管理中,可靠性是指设备在运转中准确、安全、可靠。但是由于各种规定条件(如设计、制造、运行、维修等过程)使得产品在运行过程中会出现不可靠现象,影响可靠性设计的因素见表1-1所示。

表 1-1 影响可靠性设计的因素

序号	项目名称	内 容
1	操作条件	操作环境:压力,温度,湿度,外部温度,化学气体,放射能 工作环境:振动,冲击,加速度,电压,电流,频率数,自然摩擦
2	设计余量	对使用的零部件规格尺寸要留有充分的余地
3	减轻负荷	消除多余的载荷,包括各种动、静载荷等
4	余度	要充分备有机器或零件

续表

序号	项目名称	内 容
5	安全性设计	安全系数,安全阀,爆破片
6	辅助系统要求	辅助系统也要保证可靠性
7	装配可靠性要求	连接部分:螺栓紧固,铆接,线接头等
8	事故防范	操作失误的预防;事故保险装置,故障警报信号设计,安全装置,发生误操作立即停车
9	维修性	人机学
10	经济合理性	维修方便 寿命周期费用

ii. 设备的可靠性与规定的时间密切相关。所谓规定时间,根据实际情况可以是长期的,也可以是短期的。通常,设备工作时间越长,可靠性越低。

iii. 设备的可靠性与规定的功能有关。规定的功能是指设备应具有的主要技术性能指标,例如压缩机的排气量、排气压力、排气温度等。设备的可靠性涉及设备的所有技术性能指标。

过程工业由于其生产工艺的连续性、工艺和装置的复杂性,以及出现故障造成损失的严重程度特别高的特征,因此需要通过各种手段提高设备的可靠性,其中维修管理就是提高设备可靠性和安全性的保障之一。通过设备的维修管理,可确保生产设备的可用性和稳定性,减少停机时间,提高生产效率;由于过程装备生产、储运具有高温、高压、易燃和易爆介质,因此,通过维修管理可保证设备安全运行,避免事故的发生,减少财产损失和人员伤害;由于某些过程装备价格昂贵,通过维修管理,对故障设备进行修复,恢复其规定功能,避免更换备件,减少费用支出,体现其经济性,提高企业的经济效益。

过程设备可靠性的提高也促进了维修工程的发展,为维修工程提出了新的要求。如过程设备的日益大型化、复杂化、自动化以及新材料的应用,使以往的维修策略也需要同步发展和更新,才能满足要求。

毋庸置疑,企业是以追求利益最大化为最终目标的,研究、设计和制造费用将随设备可靠性的提高而提高,如在制造时,由于需要较为精密复杂的生产加工设备和较新颖的加工工艺,所以,制造费用将随之增加。而另一方面,由于设备可靠性的提高,维修费用和备件费用会相应地减少。设备的维修管理是一项系统化的管理工程,从设备维修的作业计划的编制到最终的维修成功实施,都涉及各种各样的费用选择,如选择不同的维修策略所需的资金也不一样,从而对设备的可靠性提高也不一样。因此,如何合理决策,既满足安全性要求,又满足经济性要求,是一个综合评价、优化处理的结果,最终使设备总费用达到最低点,使企业实现利益的最大化。

第2章 可靠性分析的基础理论

2.1 可靠性分析的基本概念

2.1.1 可靠性

可靠性是部件、元件、产品或系统的质量属性中最重要的属性，是其完整性的最佳数量的度量。可靠性是指部件、元件、产品或系统在规定的时间内、规定的工作条件下无故障地完成规定功能的能力。

数学上，可靠度是时间 t 的函数，用 $R(t)$ 表示，部件、元件、产品或系统的可靠度可用下式表示：

$$R(t) = P(T > t), t \geq 0 \quad (2-1)$$

表示从时间 $0 \sim t$ ，部件、元件、产品或系统无故障成功完成既定功能的概率， $R(t)|_{t=0} = 1, R(t)|_{t \rightarrow \infty} = 0$ 。其中， T 表示产生故障时间的随机变量。

部件、元件、产品或系统的故障概率或不可靠度为：

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T \leq t) \quad (2-2)$$

$F(t)$ 是随机变量 T 的分布函数，表示部件、元件、产品或系统在时间 t 内发生故障的概率。

如果 $f(t)$ 是故障时间随机变量 T 的概率密度函数，则累积概率分布函数

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (2-3)$$

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad (2-4)$$

假若 $F(t)$ 存在一阶导数，则由式 (2-4) 可知：

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2-5)$$

概率密度函数从数学上可描述为：

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (2-6)$$

$f(t)$ 表示在时间 t 和下一时间 $t + \Delta t$ 的时间间隔中故障时间 T 发生的概率。 $R(t)$ 、 $F(t)$ 和 $f(t)$ 三个函数彼此密切相关，如果已知其中的任何一个，可确定其余两个。

2.1.2 故障率函数

在可靠性分析中，故障率函数是相当重要的，因为它说明了系统的老化率。故障率函数 $\lambda(t)$ 定义为产品工作到 t 时刻后，单位时间内发生故障的概率，可表示为：

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t) \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t) \Delta t} \\ &= \frac{1}{R(t)} \times \frac{dF(t)}{dt} \\ &= \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2-7)$$

故障率函数 $\lambda(t)$ 表示条件概率密度，即假设事件 A 表示在 $[0, t]$ 时间段内没有发生

失效；事件 B 表示在 $[t, t + \Delta t]$ 时间段内发生失效，则事件 A 发生时，事件 B 发生的概率为：

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$$

故得

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \times \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

下面分析可靠度函数 $R(t)$ 与故障率函数 $\lambda(t)$ 的关系：

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-\frac{d}{dt}R(t)}{R(t)} = -\frac{d}{dt}\ln R(t) \quad (2-8)$$

$$\ln R(t) = -\int_0^t \lambda(\xi) d\xi$$

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(\xi) d\xi\right] \quad (2-9)$$

$$f(t) = \lambda(t) \exp\left[-\int_0^t \lambda(\xi) d\xi\right] \quad (2-10)$$

注意， $R(0)=1$ ， $R(\infty)=0$ ， $F(0)=0$ ， $F(\infty)=1$

2.1.3 平均无故障工作时间

平均无故障工作时间 $MTBF$ 表示可修复的部件、元件、产品或系统，在相邻失效间隔的平均工作时间，即平均无故障工作时间，亦称平均寿命。

$$MTBF = \frac{\text{总工作时间}}{\text{该时间的总失效数}}$$

如果对于故障率为常数的情况，即假设故障分布函数服从参数为 λ 的指数分布，即

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2-11)$$

则故障率函数可表示为：

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda \exp(-\lambda t)}{\exp(-\lambda t)} = \lambda \quad (2-12)$$

从而有

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (2-13)$$

式 (2-12) 表示指数分布的故障率函数是一个常量，意味着系统不存在任何老化的现象，这种假设对于软件系统来说，通常是有效的。但是，对于硬件系统，故障率可能还有其他的分布形状。

2.1.4 故障前平均工作时间

故障前平均工作时间 $MTTF$ 是不可修复部件、元件、产品或系统故障前的工作时间的均值，是不可修复产品可靠性的一种基本参数。

假设一个系统的可靠性函数为 $R(t)$ ，则 $MTTF$ 可表示为：

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2-14)$$

假设故障分布函数服从参数为 λ 的指数分布，根据式 (2-11) 有：

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2-15)$$

式 (2-15) 涉及的是单一模型参数，如果知道故障前平均工作时间（或称平均无故障时