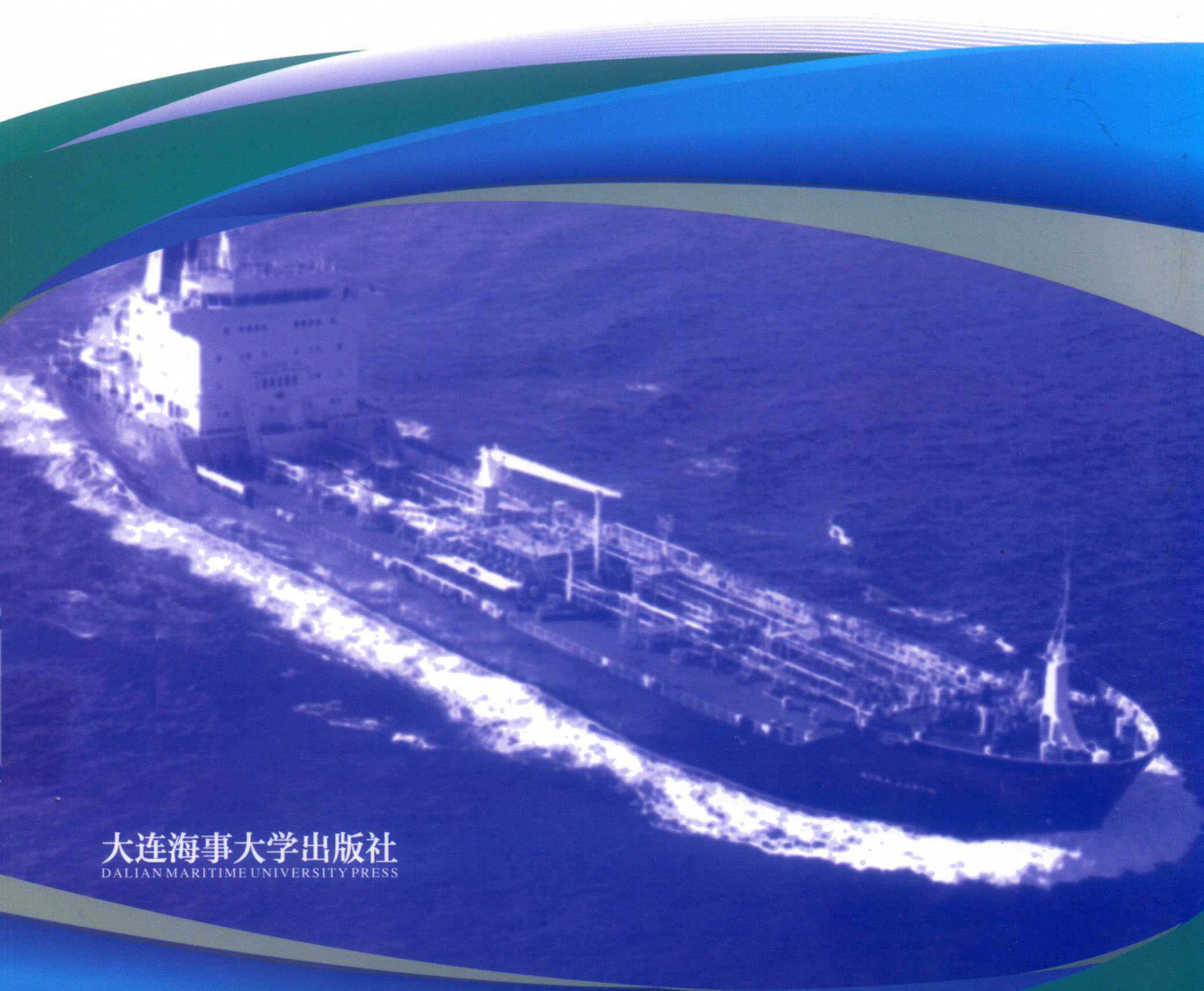


船舶电气系统 可靠性工程及应用

吴志良 ◆ 著



大连海事大学出版社
DALIAN MARITIME UNIVERSITY PRESS

船舶电气系统 可靠性工程及应用

吴志良 著



大连海事大学出版社

© 吴志良 2017

图书在版编目(CIP)数据

船舶电气系统可靠性工程及应用 / 吴志良著. — 大连 : 大连海事大学出版社, 2017. 9
ISBN 978-7-5632-3540-7

I. ①船… II. ①吴… III. ①船舶配电—电力系统—可靠性工程 IV. ①U665.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 225166 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连住友彩色印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2017 年 9 月第 1 版

2017 年 9 月第 1 次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm

印张:11.5

字数:283 千

印数:1 ~ 500 册

出版人:徐华东

责任编辑:张宏声

责任校对:宋彩霞

封面设计:解瑶瑶

版式设计:解瑶瑶

ISBN 978-7-5632-3540-7 定价:30.00 元

内容简介

《船舶电气系统可靠性工程及应用》一书全面、系统地阐述了船舶电气系统可靠性工程的基本理论、工程实践及应用。主要内容包括船舶电气系统可靠性工程研究基础、船舶电气不维修系统可靠性建模、船舶电气可修系统可靠性建模、船舶电气系统可靠性预计、船舶电气系统可靠性分配、船舶电气系统可靠性设计及可靠性保障技术的应用、故障树分析法的研究及其在船舶电气系统中的应用等。

本书可作为高等院校电类及相关学科研究生、本科生的教材,也可以作为港航企业从事电气系统可靠性研究、开发、设计和生产的工程技术人员的参考书。

前 言

可靠性工程现在已成为一门涉及面十分广泛的综合性新兴边缘学科。尽管我国可靠性工程起步较晚,但近十几年来,我国在可靠性理论的研究方面取得了长足的进步,已达到一定水平。然而可靠性技术在工业企业中的应用尚不广泛,特别在国内船舶电气系统上的应用还是一个空白,与国外发达国家差距较大。

船舶电气系统是多学科的交叉综合,随着科学技术的发展,它的复杂程度越来越高,培养既懂专业又掌握可靠性知识的复合型人才,加强船舶电气系统可靠性应用的研究已成为当务之急。为此,应加强可靠性的管理,同时,还必须重视专业人才的培养,普及可靠性工程技术知识。这也是本书写作的主要目的。

针对船舶电气系统的特点,作者在介绍有关可靠性理论的基础上,吸收国内外的有关先进技术,并结合自己多年从事船舶电气系统可靠性工程的教学、科研实践,使本书内容和体系更加适合于船舶电气工程类专业的教学需要。

全书共分七章,将可靠性理论、数学和工程实践及应用融为一体。主要内容包括船舶电气系统可靠性工程研究基础、船舶电气不维修系统可靠性建模、船舶电气可修系统可靠性建模、船舶电气系统可靠性预计、船舶电气系统可靠性分配、船舶电气系统可靠性设计及可靠性保障技术的应用、故障树分析法的研究及其在船舶电气系统中的应用等。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

吴志良

2016 年 12 月于大连海事大学

目 录

第1章 船舶电气系统可靠性工程研究基础	(1)
1.1 可靠性工程	(1)
1.2 可靠性工程研究现状	(2)
1.3 船舶电气系统可靠性工程基本概念	(7)
1.4 船舶电气系统可靠性工程基础数学	(13)
第2章 船舶电气不维修系统可靠性建模	(26)
2.1 可靠性模型的组成	(26)
2.2 可靠性模型的建立	(27)
2.3 串联系统的可靠性框图与数学模型	(30)
2.4 并联系统的可靠性框图与数学模型	(31)
2.5 表决系统	(32)
2.6 储备系统	(33)
2.7 混联系统	(34)
2.8 复杂系统	(36)
2.9 船舶电站不维修系统可靠性预计与建模	(39)
第3章 船舶电气可修系统可靠性建模	(51)
3.1 马尔可夫过程分析法	(51)
3.2 可修系统可靠性与维修性模型	(52)
3.3 船舶电站可修系统可靠性建模应用实例	(58)
第4章 船舶电气系统可靠性预计	(64)
4.1 可靠性预计问题的提出及其意义	(64)
4.2 可靠性预计的作用	(65)
4.3 可靠性预计的局限性	(65)
4.4 可靠性预计方法	(66)
4.5 单片机失效率预计	(73)
4.6 上下限法预计系统的可靠性	(74)
4.7 船舶电气系统保护单元在可靠性建模及预计中的处理	(76)
第5章 船舶电气系统可靠性分配	(81)
5.1 可靠性分配的目的	(81)
5.2 可靠性分配依据原则	(81)
5.3 可靠性分配方法	(82)
第6章 船舶电气系统可靠性设计及可靠性保障技术的应用	(90)
6.1 简化设计方案	(90)

6.2	元器件的选用	(91)
6.3	元器件的筛选	(99)
6.4	降额设计	(102)
6.5	电磁兼容设计	(104)
6.6	气候环境“三防”设计	(114)
6.7	“三性”设计	(116)
6.8	热设计	(117)
6.9	可靠性冗余设计	(117)
6.10	可靠性容错技术设计	(119)
6.11	容错及冗余技术设计在船舶电站自动化系统中的应用	(122)
第7章	故障树分析法的研究及其在船舶电气系统中的应用	(129)
7.1	故障树分析法的特点及步骤	(129)
7.2	部件故障类型	(130)
7.3	故障树常用符号说明	(130)
7.4	确定顶事件与边界条件	(133)
7.5	建树基本规则与原则	(135)
7.6	故障树简化	(139)
7.7	故障树分析	(140)
7.8	故障查找流程图及符号说明	(144)
7.9	船舶电站故障树的建立及应用	(146)
附录A	子树A部分人工故障树	(154)
附录B	发电机控制系统SGA-23故障树分析结果	(169)
参考文献		(175)

第1章 船舶电气系统可靠性工程研究基础

1.1 可靠性工程

可靠性工程是指为了达到产品可靠性要求而进行的有关设计、试验和生产等一系列工作。它包括对零件、部件和系统等产品的可靠性数据的收集、分析,可靠性设计、预测、试验、管理、控制和评价,是系统工程的重要分支。可靠性工程起源于军事领域,经过半个多世纪的发展,现在已成为一门涉及面十分广泛的综合性新兴边缘学科。它涉及数学、物理、化学、电子、机械、环境、管理以及人机工程等各个领域。它致力于研究提高各种产品的可靠性、维修性与安全性,研究产品或系统发生故障的原因,以及消除和预防故障的措施。它的主要任务是研究系统或产品在设计、生产和使用的各个阶段,定性与定量分析、控制、评估和改善系统或产品的可靠性,并在设计中达到可靠性与经济性的综合平衡。

可靠性工程是一项十分复杂的系统工程,它与传统技术的概念有很大的不同,为提高产品的可靠性,必须加强可靠性基础理论及工程技术的研究和应用,同时还必须通过可靠性管理,将研究、设计、生产和使用各个阶段有机地结合起来,才能保证将可靠性“制作到”产品中去。可靠性工程就是可靠性技术和可靠性管理的有机结合。

可靠性技术在产品全寿命周期的各个阶段的应用目的和任务是:

- (1) 设计阶段的可靠性:通过设计奠定产品的可靠性基础。研究在设计阶段如何预测和预防各种可能发生的故障和隐患,以及确保产品的维修性。
- (2) 试验阶段的可靠性:通过试验测定和验证产品的可靠性。研究在有限的样本、时间和使用费用下,如何获得合理的评定结果,找出薄弱环节,提出改进措施,以提高产品的可靠性。
- (3) 制造阶段的可靠性:通过制造实现产品的可靠性。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) 使用阶段的可靠性:通过使用维持产品的可靠性。研究产品运行中的可靠性监视、诊断、预测,以及售后服务与维修策略,防止可靠性的降低。

产品全寿命周期中的可靠性管理的目的是以较少的费用、较短的时间实现产品计划所要求的定量可靠性。其任务是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。

综上所述,可靠性工程是介于工程技术和管理科学之间的一门边缘学科,它具有技术与管理的双重性。可靠性技术综合应用有关领域的技术成果,以解决产品的可靠性问题,通过对故障物理和试验技术的研究,提供有关产品故障的机制分析、检测、诊断和设计预防技术,应用数理统计评定技术和现场使用信息反馈等手段,使设计、试验、制造和使用过程形成一个可靠性保证的循环技术管理体系,通过管理指导技术的合理使用,最终实现可靠性目标。

1.2 可靠性工程研究现状

1.2.1 国外可靠性工程的发展概况

可靠性工程作为一门工程学,大致经历了萌芽、创建、发展和成熟四个阶段。

(1) 萌芽阶段。可靠性问题萌芽于 20 世纪 20 年代,20 世纪 30 年代人们对这个问题有了进一步的认识,可靠性作为一门工程学孕育、诞生于 20 世纪 40 年代,即第二次世界大战中。

德国是世界上最先提出可靠性基本理论的国家。在 V-1 火箭的制造中,德国在世界上首次提出了 V-1 火箭系统的可靠度等于组成该系统的所有元器件可靠度的乘积。根据这一可靠性基本理论研制的 V-1 火箭,在其任务期间内,系统的可靠度为 0.75, V-1 火箭成为世界上第一个在研制后期运用可靠性基本理论建造的航空飞行器。

1943 年,德国科学家拉瑟(R. Lusser)开发研究 V-1、V-2 火箭时,首先提出用定量、统计方法处理 V-1、V-2 火箭的可靠性问题。

1944 年纳粹德国用 V-2 火箭袭击伦敦,有 80 枚火箭没有起飞就在发射台上爆炸,还有不少火箭尚未到达伦敦就掉进了英吉利海峡。美国运往远东的航空无线电设备有 60% 不能工作;由于飞行事故损失飞机有 21000 架,是被击落飞机的 1.5 倍;海军的 16 万~17 万台电子设备中,每年需要更换 100 万个左右的电子元器件;每年军用电子设备的维修费为其成本的两倍,巨额的维修费已成为其不堪忍受的负担。所有的这一切引起了各国政府对可靠性问题的高度关注。

(2) 创建阶段。20 世纪 50 年代后,可靠性技术理论广泛应用于航空航天工程、电子工程、电气工程、机械工程等不同领域,可靠性技术理论不断进步,不断完善。

为可靠性的发展首先奠定基础的美国。20 世纪 50 年代初期,为解决可靠性所面临的问题,美国军方、学术研究部门及设备制造公司全面投入了可靠性的研究,开展长达数年的可靠性问题调查、试验、分析、研究,1957 年 6 月 4 日,美国电子设备可靠性专门委员会正式发布了《军用电子设备可靠性报告》,简称《AGREE 报告》,该报告被世界上公认为可靠性工程技术的理论与实践的基础和指南。《AGREE 报告》指出系统可靠性是可以建立,可以分配,可以验证的,并建立了可靠性工程学的框架。《AGREE 报告》是美国可靠性工程发展的奠基性文件,是美国可靠性军用标准的基础。而美国军用标准又成为世界各国制定可靠性国家标准、开展可靠性工作的蓝本和依据。

(3) 发展阶段。到了 20 世纪 60 年代,可靠性工程进入到全面发展阶段。这 10 年是美国经济发展较快的时期,也是航空及航天工业迅速发展的年代,美国先后开发了一大批先进的、高可靠性的航空航天产品。

与此同时,苏联、法国、日本、英国也相继全面开展了可靠性工程的研究,在可靠性工程发展的过程中,各国都有自己的一些特点。比如,苏联从组织上,特别是从技术上采取了一系列措施促进可靠性工程的发展、壮大,高度重视可靠性理论的研究,注意吸收美国的现成经验等。

1965 年,国际电工委员会成立了可靠性技术委员会,负责制定一些国际性的可靠性基础标准。

(4) 成熟阶段。20 世纪 70 年代,尽管美国出现了严重的经济萧条,但人们早已认识到可

可靠性工程是减少系统和设备寿命周期费用的重要工具。可靠性工程仍然得到了深入的发展,并日趋完善;可靠性设计、制造、试验、维修的新技术进一步得到发展;计算机在辅助设计、测试、数据处理以及管理方面得到广泛应用;产品可靠性、维修性、安全性达到了相当高的水平;随着计算机技术的发展,计算机系统的软件可靠性已成为可靠性工程学科的新分支,并得到迅速的发展。

20世纪80年代以后,可靠性工程中心内容已转移到实现可靠性保证方面,可靠性工程在广度和深度方面得到迅速发展。

1985年,美国军方提出要在2000年可靠性工程实现“可靠性加倍,维修时间减半”这一全新的战略目标。实践表明,该目标已取得了理想的效果。

进入21世纪以来,世界各国的军事行动再次表明,现代战争是高科技的战争。现代化的军事装备,由于大量采用了高新技术,极大地增加了系统的复杂性,对系统高可靠性的要求更加迫切。为了确保设备的可靠性、提高设备的可维修性以及减少设备的维修费用,可靠性工程范围将大幅度扩展,需要更多的可靠性技术做保证,需要更加严密的可靠性管理系统,可靠性工作需要上一个更高的台阶。

由此可见,可靠性工程虽然诞生于军事领域,但是,可靠性工程的发展与现代科学技术的发展,尤其是与航空航天技术、控制技术以及电子技术的发展进步密不可分。然而,电子设备的复杂性、使用环境的严酷性、应用范围的广泛性,既推动了可靠性工程的迅速发展和电子产品可靠性水平的大幅度提高,又使得进一步增加电子产品可靠性的工作越来越难以完成。由于电子设备的可靠性问题愈来愈严重,人们不得不将可靠性问题作为一门工程学进行专门的研究。

1.2.2 我国可靠性工程的发展概况

与国外一样,我国可靠性工作的开端与发展也起源于电子设备。

1956年,电信电讯器材环境适应性试验研究基地在广州建立,即中国亚热带电信器材研究所,又称电子五所。该所主要负责对各国各类电信电讯器材进行各种环境条件下的天然和人工模拟试验、研究与分析。

1961年,中国亚热带电信器材研究所首先翻译、出版了美国《AGREE 报告》以及苏联有关无线电器材环境适应性、可靠性方面的文献、书籍,并出版了《国外无线电器材可靠性与环境适应性》期刊,该期刊以后改名《电子产品可靠性与环境试验》期刊。

20世纪60年代,我国已在多个领域提出了可靠性问题,尤其是在电子计算机、通信设备以及雷达等方面。

20世纪70年代,由于国家重点工程对电子元器件可靠性问题的要求,以及广大消费者对于提高电视机质量问题的强烈需要,促使各行业全面开展了可靠性设计、可靠性试验、可靠性预计、可靠性评估、可靠性维修以及可靠性管理等工作,效果显著。由于高度重视国家重点工程和电视机的可靠性,因而推动了整机和元器件的可靠性研究。

1973年,原国防科工委、原四机部等多部委连续召开了有关提高可靠性的工作会议,提出并着重研究解决国家重点工程元器件的可靠性问题。

1978年,我国提出“电子产品可靠性“七专”质量控制与反馈科学实验”计划,并组织实施。经过十几年的努力,使得我国军用元器件可靠性水平提高了两个数量级,保证了我国运载

火箭、通信卫星等航空、航天设备连续发射成功以及海底通信电缆的长期正常运行。

20 世纪 80 年代,我国电子行业掀起了狠抓可靠性工程和管理的高潮。在原电子工业部内部普遍开展可靠性宣传教育,形成了一批从事可靠性研发的科技骨干队伍,组织编写可靠性普及教材,并相继成立了全国电工电子产品可靠性与维修性标准化技术委员会、中国电子学会可靠性分会等全国性可靠性技术组织。每年召开一次可靠性经验交流会和技术讨论会,制订了可靠性管理文件及设计规范,一些厂、所建立了可靠性管理机构,对产品研制的全过程进行可靠性监控,这一切标志着我国已进入了可靠性工程应用阶段。

1982 年,在国防科工委和电子工业部的大力支持下,电子工业部五所引进、消化法国可靠性技术和先进经验,成立了“可靠性与环境试验中心”“可靠性数据分析研究中心”“可靠性物理分析研究中心”。三大中心的成立标志着我国可靠性技术研究与世界可靠性技术研究的发展步伐趋于同步。

我国的《电子设备可靠性预计手册》GJB 299(继美、法后世界第三个)、《电子设备非工作状态可靠性预计手册》GJB/Z 108(世界第一个)等国家级科研成果的诞生,可靠性物理国家重点实验室的建成,大型综合环境应力(高温、低温、湿度、振动等)试验室等先进的实体综合试验测试能力的实现,也标志着我国可靠性科研水平进入了世界前列。

1984 年,我国统一的电子产品可靠性信息交换网组建成功,并公开发布了《电子设备可靠性预计手册》GJB 299—87,有力地推动了我国电子产品可靠性研发工作的广泛开展。同时,我国相关部委还组织制定了一系列有关可靠性的国家标准、国家军用标准以及各行业专业标准,使可靠性管理工作纳入标准化、正规化的管理轨道。

1986 年,杨为民教授率先在北京航空航天大学设立可靠性专业,成立了北京航空航天大学可靠性专业研究所。

20 世纪 90 年代,北京航空航天大学 and 西安电子科技大学分别编写出版中国第二套、第三套《可靠性技术丛书》。这期间,由于国家高度重视可靠性问题,我国航空、航天事业取得了辉煌成就。

在国防科工委的正确领导下,各行业、各部门狠抓产品质量,广泛开展可靠性研究,制定了多部零缺陷可靠性控制标准,航空航天工程上百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一个新的台阶。“神舟”、“嫦娥”及“天宫”的成功发射,是全国各行业先进科技、先进可靠性技术合作的完美结晶。

近几十年来,我国的可靠性基础研究及学术活动十分活跃,我国在可靠性数学和可靠性理论上取得了长足的进步,已达到一定水平,为推动我国的可靠性理论发展做出了贡献。

在我国,虽然可靠性已被更多的人所了解,其重要性也被愈来愈多的人所认识,可靠性工作也从无到有地开展起来,产品的可靠性水平也在不断提高,但应该看到,我国可靠性工程起步较晚,基础薄弱,在意识和管理上差异较大,还受到人力及费用等条件的限制。目前,可靠性技术整体的发展水平与世界先进水平相比仍有较大的差距,可靠性技术在工业生产中的应用远未达到普及,特别在国内船舶电气系统上的应用还是一项空白。为赶超世界先进水平,迅速提高我国的可靠性和维修性技术和管理水平,还需要广大科技工作者不懈的努力。

1.2.3 可靠性工程技术理论研究现状

可靠性工程技术理论包括静态可靠性工程技术理论和动态可靠性工程技术理论。

1.2.3.1 静态可靠性工程技术理论研究现状

静态可靠性工程技术理论的方法主要有可靠性框图法、故障树分析法、事件树分析法、二元决策图法等。

(1) 可靠性框图法

可靠性框图法是最早的也是最基础的可靠性理论分析方法,它从成功的角度来详细描述系统的逻辑结构,最后用概率统计方法进行定量分析。可靠性框图法的优点是理论较为简单,比较容易掌握,但是,在模型描述能力方面,可靠性框图法客观地描述大型复杂系统的可靠性逻辑结构比较困难,所以,可靠性框图法在实际工程应用中受到一定限制。

(2) 故障树分析法

故障树分析法,简称 FTA(Fault Tree Analysis),是一种基于静态逻辑和静态故障机理的系统可靠性分析方法,特别适合于大型复杂系统的分析。

故障树分析法于 1961 年由美国贝尔实验室提出。1962 年,贝尔实验室 H. Watson 和 A. Mearns 将故障树分析技术用于“民兵”导弹发射控制系统的可靠性分析,取得了巨大成功。1963 年,波音公司将故障树分析法确定为意义重大的系统安全分析工具。

故障树分析法以严谨的逻辑结构、形象的树状图形、灵活的定性分析和定量计算的功能,深受可靠性工程界广大科技工作者的欢迎。自提出至今,众多的科技人员投身于这项研究,逐渐形成了一套完整的理论、分析程序和方法,成为系统可靠性及安全性分析的重要工具。

一般传统的故障树均假设各个元件、单元及系统只有正常和失效两种状态,但在实际工程中,许多元件、单元及系统并不局限于这两种状态,可能有三种甚至多种状态,而故障树并不能很好地描述这种多状态系统。

为此,多位学者在对多态系统进行深入研究的基础上,提出了多态系统可靠性框图和故障树模型。

近年来,多位学者对基于二元决策图(Binary decision diagrams, BDD)和多元决策图(Multiple decision diagrams, MDD)的故障树分析方法也开展了一些研究。

(3) 事件树分析法

事件树分析法最早由 Papazoglou 提出,是一种逻辑的归纳法。1985 年,德国标准化学会建立了事件树分析法、图形符号和评定标准。后来事件树作为一种标准工具在系统的安全分析中得到了广泛的应用。

事件树分析法在给定一个初因事件的情况下,分析它可能导致的各种事件序列的结果,从而可定性与定量地评价系统的特性,并帮助分析人员做出正确的决策。

(4) 二元决策图法

二元决策图法是一种简化布尔表达式的有效方法,它的理论基础是香农分解法。二元决策图法具有功能强大和高效的特点。二元决策图法最早被应用于数字电路测试方面,20 世纪 90 年代,为了提高故障树的计算效率以及计算精度,二元决策图法作为一种工具被引入到故障树分析方法中。

1.2.3.2 动态可靠性工程技术理论研究现状

上述静态可靠性工程技术理论一般仅适用于静态系统的可靠性分析。在对大型复杂系统进行可靠性分析时,由于大型复杂系统具有非单调性、失效相关性、可维修性等特点,采用静态

可靠性技术在模型构建和分析计算方面都有很大困难。为了解决这个问题,广大科技工作者对动态可靠性理论进行了大量的研究。

目前,动态可靠性工程技术理论主要包括:马尔可夫(Markov)分析法、动态故障树(DFT)法、GO方法、Petri网和贝叶斯网络法等。

(1) 马尔可夫分析法

马尔可夫(Markov)分析法是一种经典的动态随机系统建模方法,是一种很具代表性的可靠性分析方法,广泛用于动态系统、可维修系统的可靠性分析。

马尔可夫分析法就是用马尔可夫过程来对系统建模,用拉氏变换的方法来求解系统的可靠度、可用度。

马尔可夫过程的特点是,在某一时刻,系统由一种状态转移到另一种状态的转移概率与这个时刻之前系统的状态无关,只与系统现在的状态有关。

用马尔可夫分析法进行系统可靠性分析时,系统各个状态之间的转移情况可以采用状态转移图来表示,通过系统的初始状态和转移状态可以求解系统在任一时刻处于各种状态的概率,从而计算系统的可靠性。

但是,如果系统十分复杂时,系统状态空间规模随着系统单元数量的增加呈指数级增长,导致计算量非常巨大,甚至可能无解。而马尔可夫分析法只能解决一些特殊系统的可靠性问题,例如相同部件并联或串联所构成的系统等。

(2) 动态故障树法

故障树分析法是一种基于静态可靠性技术分析理论的系统可靠性分析方法,其各种逻辑、故障机理以及用底事件的组合来表征的顶事件故障模式均具有静态的特性。但是,在实际电气自动化控制系统中,系统失效往往是具有动态特性的。比如像容错系统、可修复冗余系统等,其故障的发生不仅跟底事件的状态有关,而且与底事件故障发生的顺序有关,是具有动态随机性故障和相关性的系统,这种系统具有动态性,已不再适合采用传统的基于静态故障树的可靠性分析方法。

为了解决动态特性问题,Dugan等多位学者将静态故障树扩展成动态故障树,提出了一些新的动态门,比如顺序执行门、功能相关门和储备门等,用于描述动态系统的可靠性逻辑结构。

动态故障树为动态系统可靠性逻辑结构的描述提供了新的方法。尽管如此,动态故障树法的求解十分困难。为了解决动态故障树求解时遇到的问题,很大程度上仍然要依赖于马尔可夫过程。因为马尔可夫过程理论比较复杂,状态空间难以构建,而且缺乏高效率算法和工具软件支持,所以在实际工程应用中受到了限制。

(3) GO方法

GO方法是一种以成功为导向的系统可靠性分析方法,规定了其建模条件和原则,给出了常用的运算符和运算规则,由Matsuoka等多位学者于1988年提出。

GO方法经过二十多年的发展,在理论上逐渐成熟,形成了相对明确、稳定的知识框架。GO方法具有模型结构紧凑、易于修改、易于核实等优点,能够对多状态、有时序和流程性系统进行可靠性分析。

但是,由于GO方法符号复杂,不易被一般工程技术人员掌握,需要逐一定义和处理系统的各个单元,工作量十分庞大,因此在对复杂系统的可靠性分析时,GO方法存在一定的局限性,GO方法的应用受到一定限制。

(4) Petri 网

Petri 网是由德国学者 Petri 在其博士论文中提出来的,后来 Petri 网被引入到系统可靠性分析中。

应用 Petri 网进行可靠性分析,首先要对系统做详尽的了解,在此基础上,建立 Petri 网模型,然后通过对系统的定性分析获取可达图以及系统从初始状态通过关键状态到达高风险状态的点火路径等,最后采用仿真算法对 Petri 网模型进行定量分析,得到各个终态和各条点火路径出现的概率。

(5) 贝叶斯网络法

贝叶斯网络又称信度网络,1988 年由 Pearl 提出,是目前不确定知识表达和推理领域最有效的理论模型之一,是 Bayes 方法的扩展,贝叶斯网络已经成为近几年来研究的热点。由于贝叶斯网络具有强大的模型描述能力和推理能力,使其在数据挖掘、模式识别、故障诊断、生态评估、医疗诊断以及环境管理等方面获得了较为广泛的应用。目前,贝叶斯网络理论研究以及在可靠性分析中的应用也越来越受到国内外学者的重视。

1.3 船舶电气系统可靠性工程基本概念

1.3.1 可靠性

可靠性是任何产品、设备都具有的客观属性,是指产品投入使用后,随着时间的增加,保持稳定原有功能的能力,即无故障工作能力的度量。事实上,在可靠性还没有作为一门科学进行研究之前,通常不用可靠性这个词,而是用“经久耐用”、“质量可靠”和“寿命长”等概念来表示产品的可靠性。

可靠性国家标准规定的定义是:产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。这里所讲的产品,是指作为单独研究和试验对象的任何元器件、设备和系统。从可靠性定义可知,研究可靠性应掌握以下 4 个方面的内容:

(1) 对象。研究系统可靠性时,一般把研究对象区分为元件和系统。元件(Component)是构成系统的基本单位,在一个具体的系统中,元件不能再分割。系统(System)是由元件组成的,它可看成是元件组成的总体。有时系统包容的范围太大,又可分为若干子系统(Subsystem)。这样划分的结果,若干元件组成一个子系统,若干子系统组成一个系统。例如配电系统可以看成是电力系统的一个子系统,而断路器、电力变压器和电力网则是构成该子系统的一些元件。

应该指出,系统和元件这两个研究对象是相对而言的。在研究配电系统可靠性时,断路器可作为一个元件考虑,但在研究断路器的可靠性时,断路器本身就成为一个系统,而它的触头、导电杆和绝缘套管等部件则成为元件。

(2) 功能。所谓“功能”是指设备的主要性能和技术指标(如调速系统的平滑变速、正反向运行、调速范围、调速精度和稳速精度等性能和技术指标)。

“产品丧失规定功能”就是失效或故障。如船舶电站自动化系统因某一元件失效而使系统停止运行,无法向船舶电网供电,这就是完全丧失了规定的功能,即发生一次故障。又如有一稳速系统,在某工作环境下,在某段规定的运行期间内,由于系统元件的参数偏离了标称值,

使系统性能发生了变化,其稳速精度由 0.1% 变化到了 0.5%,若系统性能规范要求稳速性能必须小于 0.5%,这表明系统性能已不符合规范要求,那么就认为系统已发生漂移性故障。若系统性能规范要求稳速精度为 1%,则可以认为该系统有较高的可靠性。

设备或系统完成其规定功能的能力,实际上是指它能够正常工作的能力,但应说明正常工作的条件是什么。例如,对于供电系统,供电不中断,可以认为是正常工作,也是规定的功能。但是有时候虽然未中断供电,但电压和频率过低,系统未必能正常工作。因此要规定什么情况算是正常工作,也就是对于系统预定的功能要根据具体情况和要求规定一些判据来衡量。如果对供电的电压和频率有严格要求,那么即使供电不中断,而电压及频率达不到要求,也不能认为是完成了规定的功能。从另一角度讲就是要规定什么情况是丧失功能。

在供电系统中,根据具体情况和要求衡量它完成功能和丧失功能的判据可能是保证某一回路负荷或某几回路负荷供电连续性的能力,也可以是保证母线或某节点电能质量的能力或是其他要求。目前设计供电系统多是以保证负荷的连续供电作为可靠性计算的判据。

(3) 时间。设备或系统工作的可靠性一定要和工作的时间联系起来,这个时间可以是连续的,也可以是断续的。

由于服务对象的不同,使用目的不同,即使同一种设备“规定的时间”也是不相同的。而设备的可靠性本身就具有与时间有密切关系的属性,使用时间越长,就越不可靠,所以在评价一种设备的可靠性时,必须指明是多长时间范围内的可靠性,离开了时间谈可靠性是毫无意义的。

(4) 条件。通常“规定条件”是指包括环境条件(户内外、温度、湿度、气压、振动、冲击和辐射等),工作条件(如功能模式、操作方式、负载条件、工作电源和维修条件等),使用方法以及管理人员的技术水平等。

显然,同一种设备,在不同的工作条件和环境条件下,可靠性是完全不同的。条件恶劣,设备就容易发生故障或失效。在规定条件下、规定时间内,设备的性能指标和技术要求越高,允许变化的范围越小,设备完成“规定功能”的可能性就越小,可靠性水平就越低;反之,在规定条件下、规定时间内,设备的性能指标和技术要求越低,允许变化范围越大,设备完成“规定功能”的可能性就越大,可靠性水平就越高。怎样才算完成规定功能,事先一定要明确,只有对规定功能有了清晰的概念,才能对产品是否发生故障有确切的判断。

应该特别指出,某个产品的固有可靠性是随着设计的修改、使用条件的不同以及工作过程中的性能退化而不断变化的,因此,是无法确知的,只能从确定是否符合使用条件的可靠性预计值或试验验证值中得到估价。所以可靠性是对事物认识的水准而不是事物的本来状态。另外,可靠性不是对一个产品而言,而是对一批或多批相同产品而言的,对于一个产品,谈不上可靠性,因为个别现象不是发生,就是不发生,针对个别现象谈概率是没有任何意义的,所以可靠性不能用来预计单个事件,只能预计概率和平均数。可靠性不能预计一个设备能工作多长时间就失效,但是,可以借助于统计的方法,预计一个设备在规定的时间内工作的概率或在某一时间内将发生故障的平均数或平均无故障工作时间。因此,研究可靠性时,应建立统计概率的观点,充分认识到可靠性所具有的统计特性。

综上所述,在研究产品可靠性问题时,必须注意可靠性的三大要素,即条件、时间和功能,建立一个基本的观点,即概率统计的观点,并充分认识可靠性具有的时间性、统计性和综合性的特点。

还应指出的是,在产品全寿命周期的各个阶段(设计、生产、使用)都有可靠性问题,设计为可靠性奠定基础,生产制造保证可靠性的实现,使用中维持可靠性。通常将设计和生产过程中确立的产品可靠性称之为固有可靠性。固有可靠性是产品的内在可靠性,是生产厂在模拟实际使用条件下经过检测并予以保证的可靠性,但从生产厂制造出来的、具有可靠性的产品,在转给用户的过程中,要经过包装、运输和储存各个环节,在使用过程中还要受环境、操作状况、维修(维修方式和维修技术)以及人为等因素的影响。因此一般情况下,产品在实际使用时,所显示出来的工作可靠性比固有可靠性要低。但是,如果产品在较好的环境中使用,并加强维修保养,又可以显著提高产品的工作可靠性。所以要提高产品的工作可靠性,一方面,生产厂必须保证产品的固有可靠性,将产品的使用方法教给用户;另一方面,用户也应加强对设备的管理和对设备使用人员的技术培训等。

1.3.2 可靠度、不可靠度、平均无故障工作时间

为了使可靠性定义中的“能力”这一抽象的概念不致含糊不清,需要用概率论和数理统计等数学工具对可靠性进行定量研究,定量地表示设备可靠性的数学特征量通常用可靠度或平均无故障工作时间(MTBF)来表示。

(1) 可靠度 $R(t)$

可靠度国家标准规定的定义是:“产品在规定的条件下,在规定的时间内,完成规定功能的概率。”用数学形式表达,它是一个时间的函数,又称可靠度函数,记作 $R(t)$:

$$R(t) = P\{T > t\} \quad (1-1)$$

式中: T 为产品在规定的条件下的寿命,它是一个随机变量,产品在时刻 t 的可靠度,就是产品寿命 $T > t$ 的概率。显然, $R(0) = 1, \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$,且可靠度 $R(t)$ 是随着时间的增长而逐渐下降的,为单调递减函数。可靠度 $R(t)$ 与时间 t 的关系曲线如图1-1所示。

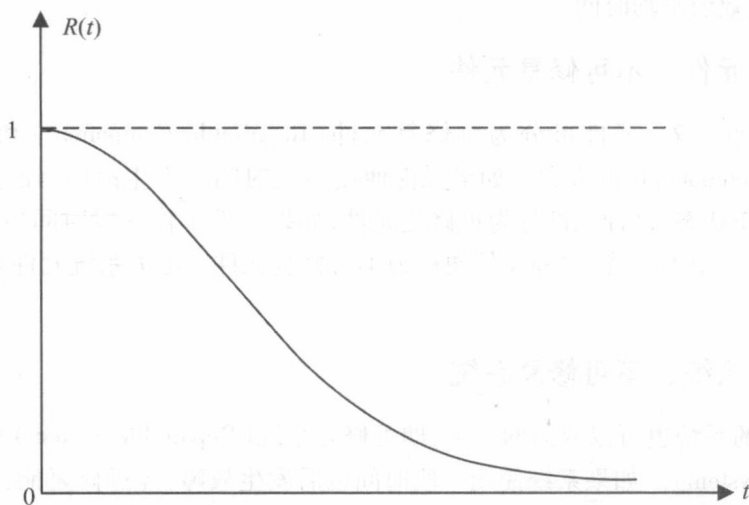


图 1-1 可靠度函数曲线

(2) 不可靠度 $F(t)$

不可靠度定义为:“产品在规定的条件下,在规定的时间内,完不成规定功能的概率。”用 $F(t)$ 表示, $F(t) = P\{0 < T < t\}$,显然, $F(0) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$,且不可靠度 $F(t)$ 是随着时间的增

长而逐渐增大的,为单调递增函数。不可靠度 $F(t)$ 与时间 t 的关系曲线如图 1-2 所示。因为 $R(t) = P\{T > t\} = 1 - P\{T < t\} = 1 - F(t)$, 所以 $R(t) + F(t) = 1$ 。

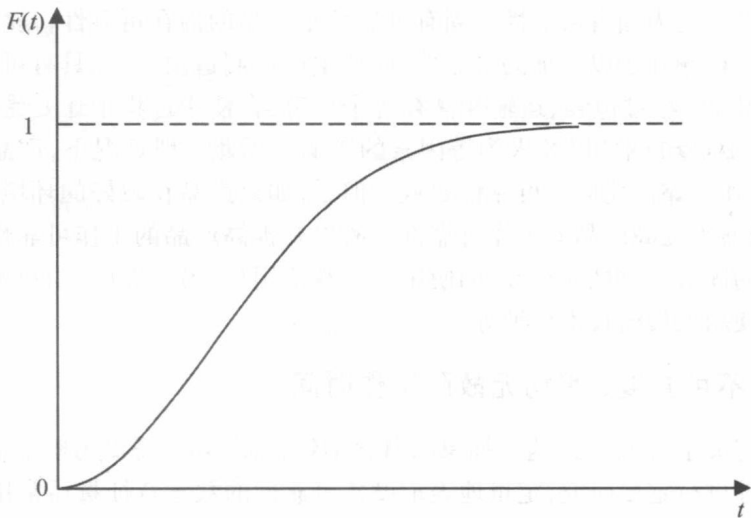


图 1-2 不可靠度函数曲线

(3) 平均无故障工作时间 (MTBF)

按国家标准规定的定义,平均无故障工作时间 (MTBF) 指设备无故障工作的平均值。MTBF 是英文 Mean Time Between Failure 的缩写,其中英文含义是故障间的平均时间或平均故障间隔时间,但我国国家标准《可靠性基本名词及定义》(GB 3187—82) 中规定 MTBF 为平均无故障工作时间。所谓平均无故障工作时间就是对可修复的产品而言,无故障工作时间的平均值;对不可修复的产品而言,它是寿命的平均值,记作 MTTF,是英文 Mean Time To Failure 的缩写,通常称为失效前平均时间。

1.3.3 可修复元件、不可修复元件

从可靠性观点来看,元件可分为可修复元件 (Repairable Component) 和不可修复元件 (Non-repairable Component) 两大类。如果元件使用一段时间后发生故障,经过修理就能再次恢复到原来的工作状态,这种元件称为可修复元件,如果元件工作一段时间后发生故障,不能修复或虽能修复,但很不经济,这种元件便称为不可修复元件。电力系统元件大部分是可修复元件。

1.3.4 可修复系统、不可修复系统

由元件组成的系统也可以分为两大类,即可修复系统 (Repairable System) 和不可修复系统 (Non-repairable System)。如果系统使用一段时间以后发生故障,经过修复能再次恢复到原来的工作状态,这种系统称为可修复系统;如果系统发生故障后,无法修复或无法恢复到原来的工作状态或这种修复很不经济,就称这种系统为不可修复系统。电力系统属于可修复系统。

1.3.5 故障、失效

故障与失效是易于混淆的两个概念,现在让我们严格地区分这两个概念。一般来讲,对于