

■ 河北省教育厅学术著作出版基金资助项目

低压保护电器 可靠性理论及其应用

■ 河北工业大学 陆俭国 王景芹 编著



河北省教育厅学术著作出版基金资助项目

低压保护电器可靠性 理论及其应用

河北工业大学 陆俭国 王景芹 编著



海關審計處 國 更國 更知育政 井本國用

4E2DCE8D (010) 吉中興發牛頓卦本

机械工业出版社

本书撰写的体系结构分为两个部分：第一部分为第一章至第八章，分别阐述了可靠性基本知识、可靠性统计、可靠性抽样、可靠性试验、可靠性设计、可靠性制造、失效分析等可靠性基础理论与基础知识；第二部分为第九章至第十二章，结合典型保护类电器产品分别讨论了小型断路器、漏电保护器、低压断路器及热过载保护继电器的可靠性。

本书可作为高等工业学校电机与电器专业的大学生、研究生的专业教材，也可供从事电器设计、研究、制造及试验工作的工程技术人员使用，还可供电器产品使用部门的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

低压保护电器可靠性理论及其应用/陆俭国, 王景芹编著.

—北京: 机械工业出版社, 2004.2

ISBN 7-111-13838-4

I. 低… II. ①陆…②王… III. 低压电器—可靠性理论 IV. TM52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 001856 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: 牛新国 责任编辑: 赵玲丽

封面设计: 陈 沛 责任印制: 石 冉

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·16 印张·390 千字

0001—3000 册

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

可靠性技术是一门新技术，它在现代科学技术中占有十分重要的地位。电器产品种类繁多，广泛使用于国民经济的各个部门，而低压电器中的保护类电器，是低压电器中最重要、并有代表性的产品，当用电设备发生故障时，保护类电器能起到及时切除故障源或发出切除信号的作用，进而达到保护用电设备及人身安全的目的。如果保护类电器的可靠性不高，将导致用电设备因过载、短路及漏电等故障不能及时可靠切除而损坏，从而造成重大的经济损失，甚至危及人身安全或发生火灾，所以保护类电器的可靠性研究受到普遍重视。

本书撰写的体系结构分为两个部分：第一部分为第一章至第八章，分别阐述了可靠性基本知识、可靠性统计、可靠性抽样、可靠性试验、可靠性设计、可靠性制造、失效分析等可靠性基础理论与基础知识；第二部分为第九章至第十二章，结合典型保护类电器产品分别讨论了小型断路器、漏电保护器、低压断路器及热过载保护继电器的可靠性。

本书可作为高等工业学校电机与电器专业的大学生、研究生的专业教材，也可供从事电器设计、研究、制造及试验工作的工程技术人员使用，还可供电器产品的使用部门的工程技术人员参考。

由于撰写时间短促，书中不当和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

目 录

前言	
绪论	1
第一章 可靠性基础知识	8
第一节 可靠性数学基础	8
第二节 电器产品可靠性特征量	21
第三节 可靠性特征量间的关系	26
第二章 失效分布类型	30
第一节 常见的失效分布类型	30
第二节 失效分布类型的确定方法	50
第三章 电器产品可靠性特征量的估计	74
第一节 大样本时可靠性特征量的估计	74
第二节 小样本时可靠性特征量的估计	89
第三节 无失效数据时可靠性特征量的估计	92
第四章 电器产品可靠性抽样检查	97
第一节 概述	97
第二节 抽样检查方案的分类	97
第三节 抽样检查的基本理论	99
第四节 指数分布时电器产品的可靠性抽样	104
第五节 威布尔分布时电器产品的可靠性抽样	111
第五章 电器产品可靠性试验	115
第一节 概述	115
第二节 可靠性筛选试验	116
第三节 环境试验	117
第四节 可靠性测定试验与可靠性验证试验	118
第五节 可靠性寿命试验	120
第六节 加速寿命试验	121
第六章 电器产品的可靠性设计	128
第一节 概述	128
第二节 电器产品的可靠性技术设计	128
第三节 机械构件的可靠性设计	133
第四节 可靠性预计	137
第五节 可靠性分配	145
第六节 可靠性分析	147
第七章 电器产品的可靠性制造	154
第一节 概述	154
第二节 电器产品的制造与可靠性	156
第八章 电器的失效分析	166

第一节 概述	166
第二节 电器失效分析的程序	167
第三节 电器失效分析的方法和技术	168
第九章 小型断路器的可靠性	171
第一节 概述	171
第二节 可靠性指标体系	171
第三节 试验要求及试验方法	172
第四节 可靠性测定试验方法	174
第五节 可靠性验证试验方案	177
第六节 试验程序	179
第七节 试验装置	181
第十章 漏电保护器的可靠性	184
第一节 概述	184
第二节 可靠性指标体系	185
第三节 试验要求及试验方法	187
第四节 可靠性验证试验方案	190
第五节 试验程序	190
第六节 试验装置	192
第十一章 低压断路器的可靠性	198
第一节 概述	198
第二节 试验要求及试验方法	198
第三节 可靠性验证试验方案	200
第四节 试验程序	201
第五节 试验装置	202
第十二章 热过载保护继电器的可靠性	203
第一节 概述	203
第二节 试验要求及试验方法	203
第三节 可靠性验证试验方案	205
第四节 试验程序	206
第五节 试验装置	206
附录	210
附录一 行业标准“家用和类似用途的过电流保护断路器的可靠性 试验方法”(报批稿)	211
附录二 行业标准“家用和类似用途的剩余电流动作断路器的可靠性 试验方法”(报批稿)	225
附录三 标准正态分布函数 $\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-v^2/2} dv$ 数值表	241
附录四 χ^2 分布下侧分位数 $\chi_p^2(f)$	243
参考文献	246

绪 论

一、可靠性技术的发展历史

在近代科学技术突飞猛进的发展过程中,可靠性技术随着生产和科学技术的发展而产生,同时在不断地应用可靠性技术解决实际问题的过程中,也促进了生产和科学技术的发展。产品可靠性是指产品在规定的条件下及规定的时间内完成规定功能的能力。而可靠性技术就是指与产品可靠性有关的工程方法。可靠性技术已有几十年的历史。第二次世界大战中,电子设备大量用于军用装置,经常发现各类电子设备不能有效地投入使用。在 20 世纪 50 年代初期的一次战争中,这个问题暴露得更为明显,美国的雷达设备经常不能正常工作而处于待修状态。由于电子设备可靠性不高而使维修费用很高,这就促使美国开始重视可靠性问题,并着手进行调查、研究及试验工作,从而开始进行电子设备领域内的可靠性研究工作。早期的研究重点是在电子管方面,在确定电子管的性能时,不仅重视其电性能,而且也重视其耐振及耐冲击等环境适应性。20 世纪 50~60 年代是可靠性技术飞速发展的 10 年。美国国防部成立了各种可靠性研究组织。例如,1950 年成立了 AdHoC 可靠性小组,1952 年成立了 AGREE (电子设备可靠性顾问组),1957 年成立了 ACGMR (AdHoC 导弹可靠性委员会)等。在这些组织领导下,大规模地开展了可靠性管理、可靠性分析及可靠性试验等方面的工作。同时美国各有关技术协会及一些公司、制造厂也大量开展了可靠性研究工作。20 世纪 60 年代后期,发布了不少有关可靠性管理、可靠性设计及可靠性试验鉴定等方面的标准,电子元器件及电子设备方面的可靠性技术渐趋成熟。20 世纪 70 年代,美国在可靠性研究方面逐渐深入到机械、电工、电力、化工等领域。综上所述,在从事可靠性研究方面,美国是开展得最早、范围最广、也最有成效的国家。此外,日、英、法、德、原苏联等国家也积极开展了可靠性研究工作,至今已取得很大的成效。原苏联不仅制订了不少可靠性基础标准,而且对不少电器产品已制订了可靠性标准或在产品标准中规定了可靠性要求及可靠性试验方法,同时还出版了不少可靠性方面的书籍及手册,如 1985 年出版了由乌沙柯夫(И.А.Ушаков)编写的《系统可靠性技术手册》等。

二、国外电器可靠性工作概况

电器可靠性研究与应用工作已成为国外电器工厂及研究部门的一项重要工作。目前国外有些电器产品已规定了可靠性指标,有些电器产品虽还未明确规定可靠性指标,但在工厂内部大多已在开展产品的可靠性工作,并把产品可靠性的作为企业间竞争的重要手段。当前,国外电器产品可靠性研究与应用工作的重点主要为下列几方面。

(一) 可靠性标准的制订

国外可靠性标准的制订工作进展很快,特别是可靠性基础标准的制订进展更快。IEC TC56 “可靠性”技术委员会从 1965 年成立以来,已发布了不少有关可靠性与维修性的标准。1988 年 IEC TC56 在东京召开年会,会议决定采用“工具箱原理”构成 TC56 的标准体系。所谓“工具箱原理”是指把标准及文件分成 4 类,即顶端文件(IEC300)、应用指南、工具类、支持文件。其中顶端文件 IEC300《可靠性与维修性管理》是一个可靠性管理方面的基础标准。应用

指南类标准主要包括可靠性要求规范、可靠性设计分析、元(部)件可靠性预计、可靠性试验、可靠性增长、可靠性筛选、软件可靠性、维修性技术和现场评估。工具类标准主要包括 IEC605《设备可靠性试验》和 IEC706《维修性导则》两个系列标准。

在电器产品可靠性标准制订方面,国外第一个有可靠性要求的电器产品标准是 1964 年发布的美国军用标准 MIL-R-39016《有可靠性指标的电磁继电器总规范》;日本于 1980 年发布了日本工业标准 JIS C 5440《有可靠性要求的控制用小型继电器通则》,并在 1981 年发布的 JIS C 4530《拍合式电磁继电器》与 1982 年发布的 JIS C 4531《接触器式继电器》中都规定了失效率试验的方法。IEC 原 TC41 在所制订的 IEC255-0-20《电气继电器的触点性能》、IEC255-10《电子元件质量评价系统在有或无继电器上的应用》及 IEC255-19《机电式有或无继电器的质量评价》等标准中也有关于可靠性的内容。此外,IEC 原 SC 41A 于 1988 年 6 月发出 41A(秘书处)46 号文件,提出在现有 IEC 标准基础上补充“应用于小电流的有或无继电器的可靠性试验”的报告。2002 年 IEC 60050-444《电工术语 基础继电器》中规定了 10 条关于可靠性的术语。原苏联在不少电器产品标准中都列入了可靠性要求与可靠性试验方面的内容,例如,1983 年发布的 ГОСТ 12434-1983《低压开关电器通用技术条件》就规定了产品的可靠性要求。德国在 VDE0660《低压开关电器规范》中规定了产品机械寿命和电寿命的额定值取占全部接触器 90%的接触器所能达到的极限通断次数,这实际上是用可靠度等于 0.9 时的可靠寿命的概念来考核接触器的机械寿命和电寿命。法国在工业用低压控制设备——接触器标准 NFC 63-100 中规定了对成批生产的电器,特别是约定发热电流小于或等于 40A 的电器,机械寿命是在有代表性的样机上以重复方式进行试验的,制造厂在统计了试验结果后给出产品的机械寿命值。这实际上也是用可靠性的概念来确定接触器的机械寿命。

(二) 可靠性试验与可靠性试验装置的研制

美国、日本在电器的可靠性寿命试验中已普遍采用电子计算机进行控制与检测,如日本安川公司在继电器的接触可靠性试验中采用了电子计算机进行控制与检测的自动试验装置;日本松下电器公司在继电器可靠性寿命试验中采用了微型计算机控制的全自动试验装置;日本富士通公司在舌簧继电器的可靠性试验中也采用了计算机控制的试验装置,该装置可同时进行 200 个舌簧管的寿命试验;美国用微处理器控制的 RT160 型继电器可靠性寿命试验装置具有能自动测量触点的接触压降等多项参数、试验结果的显示及打印等功能。在接触器的寿命试验方面,德国的电器公司一般都是经常做的。例如,西门子公司生产的接触器,每周抽一次样品,两个月共抽 20~30 台 ($I_N \leq 32A$) 或 10~15 台 ($I_N > 32A$) 为一组进行机械寿命试验,试到每台样品都坏了为止。根据试验结果用威布尔概率纸定出可靠度 $R=0.9$ 时的可靠寿命,此值不应低于产品样本上规定的机械寿命值。西门子公司接触器的电寿命试验的每组台数与机械寿命试验时相同,但每月抽一次样品进行试验,一年所抽的样品为一组。法国的特力遥控机械公司的接触器每月抽 10 台样品进行机械寿命试验;日本的 S 型接触器也是每月抽 2~20 台进行机械寿命试验。在试验装置方面,日本安川公司采用的电子计算机进行控制与检测的自动试验装置,可同时进行接触器的接触可靠性试验与机械寿命试验,自动进行参数测量,能进行数据处理与打印。

(三) 加速寿命试验的研究

美国、日本等国都在对电器加速寿命试验的模式、方法及数据分析方法进行研究。例如,日本以负载电压及负载电流为加速变量进行了开关的加速寿命试验,根据试验结果算出了不

同负载电压和负载电流值时的加速系数。

(四) 可靠性设计方面

美国、日本等国都十分重视产品的可靠性设计。例如,美国、日本、德国等国的各大电器公司都设计并开发了智能型断路器,大大提高了供电可靠性。高级的智能化断路器不仅可以远距离地把信号传输给控制室的计算机,还可以接收来自计算机的指令,实现系统的自动化与双向通信。

(五) 可靠性物理的研究

国外是从 20 世纪 60 年代才开始研究可靠性物理的。美国空军 ROME 航空发展中心在 20 世纪 60 年代初首先开始对现场失效的元器件进行失效分析。J.Vaccro 首先提出用“失效物理学”这一概念来研究元器件的可靠性。从 1962 年起,美国每年召开一次“失效物理”会议,从 1967 年起改称“可靠性物理”会议。所谓“可靠性物理”就是专门研究产品失效机理的科学。它对产品怎样失效和为什么失效的具体物理、化学过程进行研究。可以看出,可靠性物理学的研究是提高产品可靠性的基础。

美国、日本等国对可靠性物理的研究都很重视。在电磁继电器方面,对继电器触点的接触性能及电磁系统等部分的可靠性进行了深入的研究,通过大量的试验和对实际使用的调查,掌握了继电器在工作中的各种故障形式以及产生故障的各种原因。其中,对触点接触可靠性的研究尤为重视,他们研究了各种使用环境条件对接触可靠性的影响,对触点的材料、形状、接触方式、接触压力等进行了全面的分析,并对产品的设计和使用提出了要求。在电磁接触器方面,日本对接触器使用中发生的故障进行了大量调查,调查结果表明,接触器的可靠性除了取决于设计和制造外,正确使用与否对其可靠性影响也很大。

(六) 提高对电器可靠性的研究

美国、日本等国都很重视提高电器产品可靠性的研究工作。例如,德国 R 型继电器在触点附近装设能吸收有机气体的材料后,就能减少触点的污染,从而减小了触点接触电阻,并提高了继电器的可靠性。匈牙利 Istvan Neveri 指出,动、静触头采用不同材料适当配对时能提高接触器的寿命及工作可靠性。原苏联舍甫钦柯在《自动控制电器的运动与冲击》一书中指出“在接触器桥式触头与触头支架之间装泡沫塑料衬垫作为缓冲器,并在接触器的每一极上装两个或两个以上在闭合次序上有先后的并联触头,虽然每个触头在闭合时可能产生振动,但并联触头中总有一对或一对以上的触头把电路保持在闭合状态,这样可达到消除触头振动的目的,从而提高了接触器的可靠性。”

三、国内电器可靠性工作概况

原机械工业部对电器的可靠性工作十分重视。早在 20 世纪 70 年代末,原机械工业部电工局委托河北工业大学办了两期电器新技术学习班,可靠性技术是其中主要内容之一。1981 年在原机械工业部领导下成立了中国电工技术学会,并于 1983 年 10 月成立了该学会的电工产品可靠性研究会,在该学术组织的领导下开展了电工产品可靠性研究工作与学术交流活动,并多次举办了电器可靠性学习班及电工行业领导干部可靠性学习班。原机械工业部在 1986 年以(86)机技函字 1701 号文发布了《关于加强机电产品可靠性工作的通知》,以后又曾多次正式发文并召开可靠性工作会议部署在机械行业中开展“限期考核机电产品可靠性指标”的工作。从 1986 年至 1991 年 5 月先后共发布了七批(共 1189 种规格)限期考核可靠性指标的机电产品清单,其中包括几十种规格的电器产品。1994 年 8 月原机械工业部再次召开了机械

工业可靠性工作会议，会上提出可靠性必须从产品设计开发抓起，凡是列入部或省市机械厅局开发计划和重大技术装备攻关的项目，应加强可靠性设计和试验研究工作，要求立项时提出可靠性设计目标，产品鉴定和项目验收时应可靠性目标进行审核评定。会上还决定在机电产品中进一步开展可靠性认定工作。

在上海电器科学研究所、许昌继电器研究所、成都机床电器研究所等原归口研究所的组织下，从 20 世纪 80 年代中期开始，在电器行业中开展了可靠性研究工作。电磁式中间继电器可靠性研究、小容量交流接触器可靠性研究等项目被列为原机械工业部“七五”重点项目。由研究所、高等学校及有关企业合作开展了上述项目的研究工作，通过理论分析和大量试验研究，分析了这些电器产品的失效机理，研制了可靠性试验装置，提出了这些产品的可靠性指标及考核方法，指导工厂改进产品设计和制造工艺，提高了产品的可靠性。

从 20 世纪 80 年代中期至今，电器行业在可靠性工作方面共进行了下列工作：

（一）制订了可靠性试验与考核标准

制订了国家标准 GB/T15510《控制用电磁继电器可靠性试验通则》及 GB10962《机床电器可靠性通则》，还制订了 JB/DQ4580《小容量交流接触器可靠性指标及考核方法》、ZBnK30001《机床电器运行可靠性要求和试验方法》等行业标准。《家用和类似用途的过电流保护断路器可靠性试验方法》及《家用和类似用途的剩余电流动作断路器可靠性试验方法》两个行业标准正在报批中。

（二）可靠性试验装置的研制

研制出了贯彻国家标准 GB/T15510 的继电器可靠性试验装置，贯彻有关行业标准的接触器可靠性试验装置、小型断路器可靠性试验装置及漏电保护器可靠性试验装置。

（三）限期考核可靠性指标

完成了几十种规格的控制继电器、交流接触器、熔断器等电器产品的可靠性指标的限期考核工作。

（四）对电器可靠性设计进行了初步探索

在电器可靠性研究方面，虽然做了上述几方面的工作，取得了一定进展，但由于我国电器产品的可靠性研究工作起步较晚，至今仅对继电器、接触器、小型断路器、漏电保护器等部分电器产品进行了可靠性试验与考核工作，不少主要电器产品还未开展可靠性研究与考核，在电器新产品开发时还未开展可靠性设计与可靠性制造，特别是我国电器制造企业中，对电器产品可靠性工作还重视不够，一般还未设置专门的可靠性管理机构，可靠性工作还未认真开展。我国电器产品的可靠性水平普遍低于国外发达国家电器产品的可靠性水平。

四、可靠性的定义

上面已指出，产品的可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间（或操作次数）内完成规定功能的能力。

首先，产品的可靠性与规定的功能有密切关系。所谓规定的功能是指产品标准或产品技术条件中所规定的各项技术性能。上述定义中的“完成规定功能”是指完成全部规定的技术性能。

其次，产品的可靠性是与规定的条件分不开的。所谓规定的条件是指产品使用时的负载条件、环境条件以及贮存条件。显然，负载条件不同时产品的可靠性也不同。例如，电器触头接通并断开电流的大小、触头回路电源电压的高低都会影响到电器产品的可靠性，环境条

件(如温度、湿度、海拔、盐雾、冲击、振动等)对电器产品可靠性的影响也很大。显然,在恶劣的环境条件下,电器产品的可靠性就低些。贮存条件对电器产品的可靠性也有影响。例如,因贮存条件不良而使电器产品受潮时,其可靠性就会降低。

最后,也是最重要的是产品的可靠性与规定的时间密切相关。产品在一天内完成规定的功能当然比在一年内完成同样的规定功能要容易得多,所以规定的时间越长,产品的可靠性就越低,亦即产品的可靠性随着其使用时间的增加而降低。

上述可靠性的定义只能定性地描述产品可靠性的高低。为了能定量地描述产品可靠性的高低,下面引入可靠度的概念。电器产品的可靠度是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率,一般用 R 表示。例如,某种规格的接触器操作至 10^6 次时的可靠度为 90%,就是指若多次抽取 n 个该规格的接触器在规定的条件下操作至 10^6 次时,平均有 90% 的接触器能按规定的条件完成规定的功能。

五、产品可靠性与质量的关系

产品的可靠性是产品质量的一个重要方面。电器产品的质量应包括其技术性能指标和可靠性指标两个方面。这两者之间既有联系又有差别,假如产品的可靠性不高,即使其技术性能指标很先进,也不能认为产品质量好。例如,一台低压断路器的通断能力指标虽很先进,但其动作不可靠,当电路发生短路等故障时,它不能可靠地动作,就可能扩大事故,这台低压断路器当然不能认为是质量好的产品。反之,一台低压断路器的通断能力很低时,即使其可靠性较高,电路发生短路故障时,它能可靠地动作,但它只能用于短路电流较小的场合,亦即其应用条件受到限制,这台低压断路器当然也不能算是质量很好的产品。因此,对于一个高质量的产品来说,高可靠性与先进的技术性能指标是缺一不可的。

六、固有可靠性与使用可靠性

IEC 300 中指出:“产品在用户手中显示出的可靠性是对用户最有意义的可靠性”。产品在用户实际使用时显示出的可靠性称为工作可靠性 (Operational Reliability), 它由固有可靠性 (Inherent Reliability) 和使用可靠性 (Use Reliability) 构成。固有可靠性是制造厂在产品生产过程中所确定的产品可靠性,它和原材料、零部件的选择、设计、制造、试验等方面的因素都有密切关系,它是制造厂在模拟实际工作条件的标准环境下进行测定并必须予以保证的可靠性。使用可靠性是与产品使用有关的一些因素所确定的可靠性。产品在制造厂生产出来后,要经运输、贮存及安装等过程才能投入实际使用,产品在实际使用过程中要受到周围环境、操作情况、维修方式及维修技术等因素的影响,在实际使用中人为因素对产品可靠性的影响也很大。上述这些因素确定了使用可靠性。

一个固有可靠性很高的产品,如使用不当,其使用可靠性不高,则该产品的工作可靠性也就不理想。相反,一个固有可靠性虽不很高的产品,假如使用得当,其使用可靠性很高,则该产品的工作可靠性虽不是很理想,但也能满足一定要求。

七、失效规律

产品的失效率 $\lambda(t)$, 是指已工作到时刻 t 的产品在 t 时刻后的单位时间内发生失效的概率。人们对大量的试验数据和使用中所得到的数据进行统计分析,发现很多产品的失效率 $\lambda(t)$ 与时间 t 的关系曲线如图 0-1 所示。图 0-1 中曲线的形状像浴盆,故通常称为“浴盆曲线”。从曲线上可看出,产品失效率随时间的变化大致可划分为三个阶段,即早期失效期、偶然失效期与耗损失效期。

1. 早期失效期 它发生在产品工作早期。其特点是产品失效率较高,但随工作时间的增加而降低。此时期内产品失效的原因是由于在设计及制造工艺上存在缺陷,例如,原材料有缺陷、生产工艺欠佳、生产环境卫生不良、生产设备发生故障、操作人员疏忽及质量检验不严格等。

2. 偶然失效期 此时期内产品的失效是随机性的。其特点是产品失效率低且稳定,并接近于常数,此时期是产品的最佳工作时期。

3. 耗损失效期 此时期出现在产品工作后期。其特点是产品失效率随工作时间的增加而明显增高。此时期内产品的失效主要是由于老化、磨损、疲劳等原因造成。

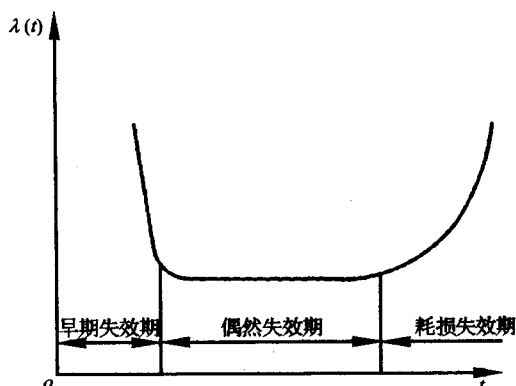


图 0-1 产品典型失效率曲线

八、提高电器产品可靠性的重要意义

提高电器产品可靠性是提高电器产品质量的一个重要方面。电器产品的种类很多,它们广泛用于国民经济的各个部门,起着很重要的作用。但目前各种电器产品的质量不很理想,常因电器产品发生故障而使各种系统不能正常工作,从而造成很大的经济损失。特别是随着科学技术和工业生产的发展,自动控制系统的规模越来越大,一个大型的自动控制系统通常使用几万甚至几十万个元器件,而系统的可靠性与它所用元器件的数量有密切关系。假设系统为一个可靠性串联系统(即整个系统中只要有一个元器件失效,就会使系统发生故障),则系统的可靠度 R_s 就等于它所用各元器件的可靠度的乘积,即

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (0-1)$$

式中 n ——系统所用元器件的数量;

R_i ——各元器件的可靠度 ($i=1, 2, \dots, n$)。

假定一个可靠性串联系统中所用元器件的可靠度均等于 0.99999,则当 n 等于不同数值时,按式 (0-1) 可算得系统可靠度 R_s 的数值,如表 0-1 所示。

表 0-1 系统可靠度 R_s 与所用元器件数量 n 的关系

n	100	1000	10000	100000
R_s	0.999	0.99	0.905	0.368

由表 0-1 可看出,随着系统中所用元器件数量的增加,系统可靠度迅速下降。假如要求在 $n=10^4$ 时保证系统可靠度为 0.95,则要求每个元器件的可靠度应达到 0.9999949。由此可见,系统越大,对其所用元器件的可靠性的要求越高。

综上所述,提高电器产品的可靠性是国民经济发展的需要,它具有十分重要的意义。

九、可靠性技术的基本内容

前已指出,可靠性技术就是与可靠性有关的工程方法。影响产品可靠性的因素很多,从

确定产品可靠性指标、研究、试制、设计、制造、试验、鉴定直到投入使用为止的各个阶段，都与可靠性密切相关，而且产品失效后对产品进行的失效分析也与产品可靠性密切相关。这是因为通过失效分析可以找出产品的失效模式与失效机理，把这些信息反馈给产品的设计、制造人员以及从事可靠性筛选试验的人员，便可找到相应的改进措施来提高产品的可靠性。对于可靠性试验工作量较大或产品生产批量较小、价格较高的电器产品来说，对失效产品进行失效分析就更为重要。

图 0-2 为产品可靠性技术基本内容的框图。图中表示了从产品可靠性设计、可靠性制造、可靠性筛选、可靠性试验、产品现场使用以及对失效产品进行失效分析，并将所得到的信息反馈到可靠性设计、可靠性制造及可靠性筛选中去，以找到相应改进措施的整个过程。

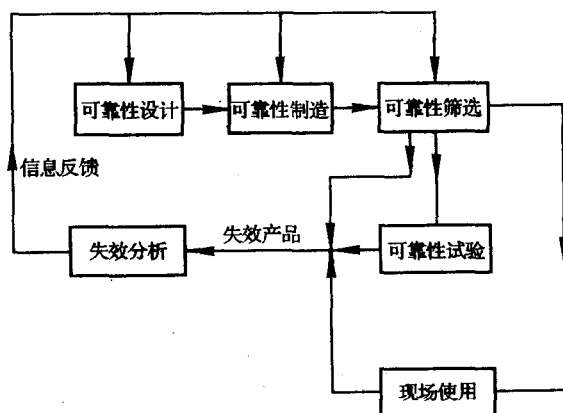


图 0-2 可靠性技术基本内容的框图

应该指出，产品的可靠性还与可靠性管理密切相关。要提高产品的可靠性，必须有良好的可靠性组织及认真进行可靠性管理。

最后还应指出，产品的可靠性设计、可靠性试验时抽样方案的确定及试验结果的评估要用到排列组合、集合、布尔代数，特别是概率论等数学工具，即所谓可靠性数学。所以可靠性技术还与可靠性数学密切相关。

本书在阐述可靠性基础知识的基础上，分别阐述了电器产品的可靠性统计、可靠性抽样、可靠性试验、可靠性设计、可靠性制造以及失效分析，最后讨论了小型断路器、漏电保护器、低压断路器以及热过载保护继电器等保护类电器的可靠性。

第一章 可靠性基础知识

第一节 可靠性数学基础

一、集合

(一) 集合的定义

集合是由一些数、一些点、一些图形或一些表达式组成。每一组对象的全体形成一个集合(简称集),集合中的各个对象称为该集合的元素。例如,1, 2, 3, 4 这四个数可组成一个集合,其中每个数都是此集合的一个元素,又如,2, 4, 6, 8 这四个数也可组成一个集合。

(二) 集合的表示方法

(1) 列举法:把集合中的元素一一列举出来,写在花括号内。例如,{1, 2, 3, 4}及{2, 4, 6, 8}。

(2) 描述法:把集合中的元素的公共属性描述出来,写在花括号内。例如,{小于5的正整数}及{大于零小于9的偶数}。

(三) 集合中元素的特征

(1) 确定性:对于给定的一个集合,其中的元素都是确定的。例如,对于集合{1, 2, 3, 4}来说,1或2或3或4都是它的元素,而5与6等等都不是它的元素。

(2) 无序性:集合与元素的排列次序无关。例如,{1, 2, 3}与{3, 2, 1}表示同一集合。

(3) 互异性:集合中的元素不能重复出现,即集合中各元素互异。

(四) 集合的符号

集合常用大写的拉丁文表示,如 A 、 B 等。集合中元素通常用小写拉丁文表示,如 a 、 b 等。

假如 a 是集合 A 的元素,可称作 a 属于集合 A ,记作 $a \in A$ 。

(五) 子集

(1) 子集的定义:对于两个集合 A 和 B ,如 A 的任一个元素都是 B 的元素,则称 A 为 B 的子集,记作 $A \subseteq B$ 或 $B \supseteq A$ 。读作 A 包含于 B 或 B 包含 A 。例如, $A = \{1, 2, 3\}$, $B = \{1, 2, 3, 4\}$,则 A 就是 B 的子集。

(2) 空集:不含任何元素的集合称为空集,记作 ϕ ,在集合论中规定,空集 ϕ 是任何集合的子集,即对任一集合 A ,存在 $\phi \subseteq A$ 的关系。

(3) 真子集:如 A 是 B 的子集,且 B 中至少有一个元素不属于 A ,则称 A 是 B 的真子集,记作 $A \subset B$ 或 $B \supset A$ 。例如,{1, 2, 3}是{1, 2, 3, 4}的真子集。

(六) 交集

由所有属于 A 且属于 B 的元素组成的集合称为 A 与 B 的交集,记作 $A \cap B$ 。交集也可用图形表示,如图1-1所示。

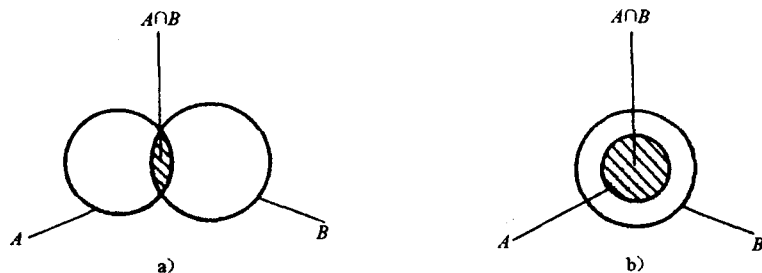


图 1-1 交集的图形表示

a) A 不是 B 的子集 b) A 是 B 的子集

图 1-1a 中, A 不是 B 的子集, B 也不是 A 的子集; 阴影部分表示 A 与 B 的交集。例如, $A = \{1, 2, 3, 4\}$ 、 $B = \{3, 4, 5\}$ 时, $A \cap B = \{3, 4\}$ 。图 1-1b 中, A 是 B 的子集; 阴影部分表示集合 A , 也表示 A 与 B 的交集。

交集有下列性质:

$$A \cap A = A \quad (1-1)$$

$$A \cap \phi = \phi \quad (1-2)$$

$$A \cap B = B \cap A \quad (1-3)$$

(七) 并集

由所有属于集合 A 或属于集合 B 的元素所组成的集合称为 A 与 B 的并集, 记作 $A \cup B$ 。

例如, $A = \{1, 2, 3, 4\}$ 、 $B = \{3, 4, 5\}$ 时, $A \cup B = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。并集也可用图形表示, 如图 1-2 所示。

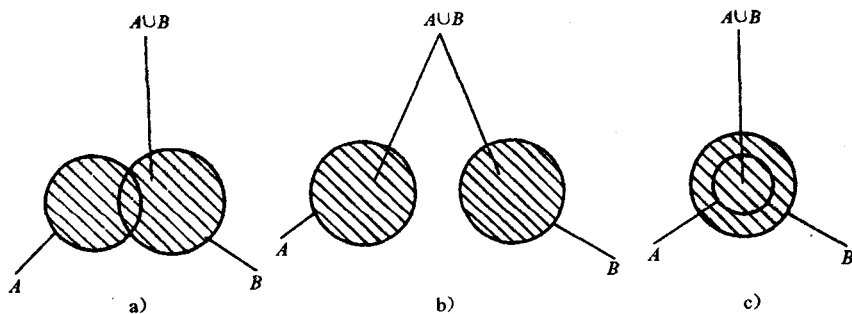


图 1-2 并集的图形表示

a) A 与 B 有共同元素 b) A 与 B 无共同元素 c) A 是 B 的子集

图 1-2 中阴影部分表示 A 与 B 的并集。

并集存在以下性质:

$$A \cup A = A \quad (1-4)$$

$$A \cup \phi = A \quad (1-5)$$

$$A \cup B = B \cup A \quad (1-6)$$

(八) 集合的差

一切属于 A 但不属于 B 的元素所组成的集合称为集合 A 与 B 之差, 记作 $A - B$ 。例如, $A = \{1, 2, 3, 4\}$ 、 $B = \{3, 4, 5\}$ 时, $A - B = \{1, 2\}$ 。

集合之差也可用图 1-3 中的阴影表示。

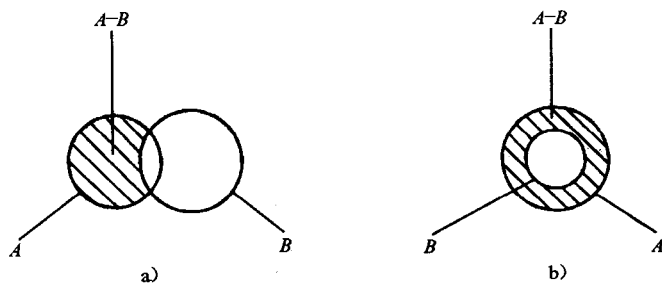


图 1-3 集合之差的图形表示
a) B 不是 A 的子集 b) B 是 A 的子集

(九) 全集

在研究集合与集合间的关系时，一般这些集合都是一个给定集合的子集，此给定集合称为全集，用符号 S 表示。全集 S 含有所研究的各个集合的所有元素。

(十) 补集

若已知集合 A 及全集 S ，则由 S 中所有不属于 A 的元素所组成的集合称为集合 A 在全集 S 中的补集，用符号 $\bar{A}$ 表示。例如 $A = \{1, 2, 3\}$ ， $S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，则 $\bar{A} = \{4, 5, 6\}$ 。

补集 $\bar{A}$ 也可用图形表示，图 1-4 中的阴影部分即表示 $\bar{A}$ 。

补集有以下性质：

$$A \cup \bar{A} = S \quad (1-7)$$

$$A \cap \bar{A} = \phi \quad (1-8)$$

$$\overline{\bar{A}} = A \quad (1-9)$$

式中 $\bar{\bar{A}}$ —— A 的补集 $\bar{A}$ 的补集。

二、概率基础

(一) 随机现象

某一现象如其结果事先不能肯定，亦即在相同的条件下重复进行试验时，其每次结果未必相同，则将这类现象称为随机现象。例如，掷一个骰子时，其出现的点数可能是 1，也可能是 2，……，也可能是 6。

对于随机现象，虽然事先人们不能预言将出现哪种结果，但在大量重复观察时，所得结果会呈现出某种规律，这称为随机现象的统计规律性。

(二) 随机试验

在这里，试验可以是指各种科学实验，也可指对某一事物的某一特征的观察。试验可用符号 E 表示。例如，

E_1 : 抛一枚硬币，观察正面 H 或反面 T 出现的情况。

E_2 : 掷一个骰子，观察出现的点数。

E_3 : 从一批产品中任抽一个产品，观察它是合格品还是不合格品。

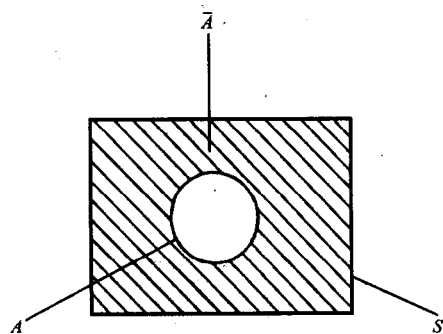


图 1-4 补集 $\bar{A}$ 的图形表示

E_4 : 在一批继电器中任抽一个, 测试其寿命。

上述这些试验都具有以下特征:

- ①可以在相同的条件下重复地进行。
- ②每次试验可能出现的结果不止一个, 并且能事先明确知道试验的所有可能的结果。
- ③进行某一次试验之前, 不能确定会出现哪一个结果。

我们将具有上述三个特征的试验称为随机试验, 简称试验, 并通过随机试验来研究随机现象。

(三) 随机事件

进行一个试验总有一个需要观察的目的, 根据这个目的, 试验被观察到有多种不同的可能结果。例如, 抛一枚硬币时, 如观察的目的是看它哪面向上, 则可能有“正面向上”或是“反面向上”两种结果。

试验的每一个可能出现的结果, 一般称为随机事件, 简称事件。

例 1-1 在 0、1、…、9 这 10 个数字中任意选取一个数字, 有多少种可能的结果?

解 “取出的数字是零”, “取出的数字是 1”, …… , “取出的数字是 9”。共有 10 种可能出现的结果。

我们把不可能再分的事件称为基本事件, 在例 1-1 中, “取出的数字是零”, “取出的数字是 1”, …… , “取出的数字是 9”都是基本事件。

由若干个基本事件组合而成的事件称为复合事件。例如, 在 0、1、…、9 这 10 个数字中任取一个数字为 3 的倍数, 这就是一个复合事件, 它由“取出的数字是 3”, “取出的数字是 6”及“取出的数字是 9”这三个基本事件组成。

(四) 样本空间

为便于研究随机试验 E , 将 E 的所有基本事件所组成的集合称为 E 的样本空间, 用符号 S 表示。例如, 对于上面 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 的样本空间 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别为

$$S_1 = \{\text{正面 } H \text{ 向上, 反面 } T \text{ 向上}\}$$

$$S_2 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$S_3 = \{\text{合格品, 不合格品}\}$$

$$S_4 = \{t | t \geq 0\}$$

引入样本空间后, 随机试验 E 的基本事件即为样本空间 S 的元素, E 的复合事件即为 S 的若干元素组成的集合。

(五) 必然事件与不可能事件

(1) 必然事件: 指在一定条件下必然发生的事件。如用集合表示必然事件, 它即为全集 S 。例如, 掷一个骰子其出现的点数不大于 6 即为一个必然事件。如用集合来表示此必然事件, 当用描述法时为 $\{\text{出现的点数} \leq 6\}$, 当用列举法时为 $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 根据样本空间的定义可知这个集合就是样本空间。

(2) 不可能事件: 在一定条件下不可能发生的事件称为不可能事件, 如用集合表示不可能事件, 它即为空集 ϕ 。例如, 掷一个骰子, 其出现的点数为零, 即为一个不可能事件, 显然, 它不包含任何元素, 因而是一个空集。

(六) 事件间的相互关系

设试验 E 的样本空间为 S , A 、 B 是 E 的事件, 则这些事件间有以下关系: