

电子可靠性工程技术实践丛书

电子产品可靠性预计

张增照 潘 勇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从工程实用的角度介绍电子产品可靠性预计的必要性和基本概念,详细论述电子系统可靠性预计建模、可靠性预计的方法和程序,重点介绍元器件应力分析法和计数法,给出大量的应用实例,并结合典型的可靠性预计软件工具,说明如何实现电子产品的可靠性预计。

本书共分 12 章,内容包括可靠性预计的作用和意义;可靠性预计的常用方法、程序和一般要求;常用的产品寿命分布类型和可靠性模型的建立方法;元器件失效率预计所涉及的参数定义及其选取方法;用计数法和应力分析法进行可靠性预计的步骤和实例;电子产品非工作状态的可靠性预计;可靠性预计的准确性和局限性,分析影响可靠性预计准确性的因素;可靠性预计与其他可靠性工作的关系;可靠性预计软件工具的应用方法。

本书可供从事质量与可靠性工作的技术和管理人员参考,亦可作为电子产品可靠性预计技术培训教材,同时也可作为高等院校相关专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子产品可靠性预计/张增照,潘勇著.—北京:科学出版社,2007

(电子可靠性工程技术实践丛书)

ISBN 978-7-03-019466-4

I.电… II.①张…②潘… III.电子产品可靠性-研究 IV.F407.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 113609 号

责任编辑:杨凯 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 8 月第一次印刷 印张: 10 1/4

印数: 1—4 000 字数: 194 000

定 价: 25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序 言

可靠性是评价产品质量的重要指标之一,它是保证产品性能在实际使用中得到充分发挥的关键。产品的可靠性是设计、生产和管理出来的,可靠性预计是产品可靠性工作的重要环节,它为电子产品开展可靠性设计提供了一个卓有成效的定量分析手段,是“设计未来”的先导,是优选方案、改进设计,确保产品满足可靠性指标要求的有效途径。

可靠性预计是提高装备可靠性的重要手段,通过可靠性预计、分配、设计、分析等工作,促进了装备可靠性工程的实施。另一方面,出于市场竞争的需要,先进国家的电子产品大多都标有可靠性指标,此指标很多是可靠性预计结果或现场统计结果,因此,国外公司十分注重可靠性预计工作,例如美国贝尔公司还专门积累经验数据,研发了适用于该公司及通信行业的系列手册。

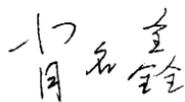
从我国航天工程实践来看,可靠性预计可以使设计方案得到优选,对预计中可靠性较差的设备或单板,采取加强可靠性的设计措施,以保证可靠性达到要求值。载人飞船是子样少、可靠性要求高的航天器,靠现场数据来评估其可靠性是难以达到要求值的。为了使工程总体有一个量化的概念,我们就利用可靠性预计技术,从单板到仪器设备,再到分系统,最后对整船进行可靠性预计,从中发现薄弱环节,加强可靠性设计并落实到图纸文件中,再经过试验验证措施的有效性,从而保证整船的可靠性。

本书从工程实用的角度介绍电子产品可靠性预计的必要性和基本概念,详细论述电子产品可靠性建模、可靠性预计的方法和程序,重点介绍元器件应力分析法和计数法,给出大量的应用实例,并结合典型的可靠性预计软件工具,说明如何实现电子产品的可靠性预计和可靠性改进。

本书内容充实、系统,理论与工程实践并重,注重预计过程的实际

操作,为从事质量与可靠性工作的技术和管理人员提供实践指导,是产品设计、品质管理等技术人员必备的参考书。我相信,本书的出版,必将推动我国可靠性预计工作,也将对可靠性系统工程的发展起到推动和促进作用。

中国空间技术研究院可靠性专家组副组长
研究员

Handwritten signature in black ink, consisting of the characters '肖明琴' (Xiao Mingqin) in a cursive style.

目 录

第1章 概 论	1
1.1 可靠性预计的意义	1
1.2 可靠性预计的作用	3
第2章 可靠性预计的方法及程序	6
2.1 可靠性预计的主要方法	6
2.2 基于数理统计的可靠性预计的现实意义	8
2.3 可靠性预计标准的发展及其主要分类	9
2.4 元器件计数法和应力分析法可靠性预计程序	13
2.5 相似预计法的程序	15
2.5.1 相似产品法	15
2.5.2 相似电路法	17
2.6 上下限法预计程序	17
2.6.1 上限值的计算	18
2.6.2 下限值的计算	19
2.6.3 上下限值的综合计算	19
2.7 可靠性预计的一般要求	20
2.7.1 正确选用合适的标准	20
2.7.2 可靠性预计的反复迭代	20
2.7.3 可靠性预计报告	21
第3章 产品可靠性表征与寿命分布	23
3.1 产品的可靠性指标	23
3.1.1 常用的可靠性指标	23
3.1.2 产品的寿命特征量	24
3.2 可靠性指标间的相互关系	26
3.3 产品的寿命分布	27

3.3.1	指数分布	29
3.3.2	正态分布	29
3.3.3	对数正态分布	30
3.3.4	威布尔分布	31
3.4	浴盆曲线与失效率等级	32
3.4.1	失效率的单位	33
3.4.2	失效率的等级	33
3.5	维修度与有效度	34
第4章	电子设备及系统可靠性模型的建立	37
4.1	可靠性模型的组成	37
4.2	基本可靠性和任务可靠性	37
4.2.1	基本可靠性	37
4.2.2	任务可靠性	39
4.2.3	基本可靠性和任务可靠性预计结果的权衡	40
4.3	系统可靠性模型	41
4.3.1	串联系统	41
4.3.2	并联系统	41
4.3.3	循环工作的可靠性模型	42
4.3.4	表决系统(n 中取 r 系统)	43
4.3.5	温储备系统	43
4.3.6	串联、并联系统可靠性的计算	44
4.3.7	冷储备系统	46
4.3.8	网络系统	48
4.3.9	共因故障模型	49
4.4	建立可靠性模型的程序和原则	52
4.4.1	建立系统可靠性模型的程序	52
4.4.2	确定产品定义	52
4.4.3	建立任务可靠性框图	53
4.4.4	建立相应的数学模型	54
4.4.5	可靠性预计时建模工作的注意事项	54

第5章 元器件失效率预计	56
5.1 国军标《电子设备可靠性预计手册》内容简介	56
5.1.1 GJB 299C《电子设备可靠性预计手册》的新增内容	56
5.2 元器件失效率预计模型	60
5.3 元器件的质量等级与质量系数	64
5.3.1 元器件的质量等级	64
5.3.2 质量标记的正确采用与识别	69
5.4 应用环境分类与环境系数 π_E	71
5.5 微处理器失效率预计示例	73
5.5.1 计算示例	77
5.6 普通双极型晶体管失效率预计示例	78
5.6.1 半导体分立器件的额定值	78
5.6.2 电应力调整系数(C)和温度(T)的校正	81
5.6.3 电应力比的计算	82
5.6.4 计算示例	82
第6章 元器件计数法可靠性预计	84
6.1 所需信息及方法	84
6.2 计数法用的数据表	85
6.3 预计示例	91
第7章 元器件应力分析法的可靠性预计	93
7.1 应力分析法的应用范围	93
7.2 电子设备可靠性预计示例	93
第8章 电子产品非工作状态的可靠性预计	104
8.1 概 述	104
8.2 术语和定义	105
8.3 一般程序	105
8.4 元器件非工作可靠性详细预计法	106
8.4.1 元器件非工作可靠性详细预计法的符号及数据表	107
8.4.2 预计示例	111
8.5 元器件非工作可靠性计数预计法	116
8.5.1 预计举例	116

第9章 特殊的可靠性预计	119
9.1 工作与非工作故障率的综合预计	119
9.2 对非指数分布的修正	120
9.3 有寿命件的可靠性预计	121
第10章 可靠性预计的准确性和局限性	122
10.1 可靠性预计手册的数据内涵	122
10.2 影响可靠性预计准确的因素	123
10.3 可靠性预计的局限性	125
第11章 可靠性预计与其他可靠性工作项目的关系	128
11.1 可靠性预计与可靠性分配	128
11.2 可靠性预计与可靠性分析	130
11.3 可靠性预计与试验设计	130
11.4 可靠性预计与测试性预计	132
11.5 可靠性预计与保障性分析	133
第12章 可靠性预计软件工具的应用	135
12.1 概 述	135
12.2 基本可靠性预计	136
12.3 可靠性框图分析	143
12.3.1 功能概述	143
12.3.2 RBD 图建立	143
12.3.3 RBD 分析与计算	149
12.4 网络系统可靠性分析	151
12.4.1 功能简介	151
12.4.2 网络图的建立及相关操作	151
12.4.3 网络图分析、计算	153

第 1 章 概 论

1.1 可靠性预计的意义

电子产品可靠性预计是根据组成系统的元器件、组件、部件、设备的可靠性经验数据及可靠性模型,对电子部件、整机及其构成的电子系统可靠性水平进行估计,这是一个由局部到整体、由小到大的综合过程。

事实上,日常生活离不开预计,比如天气预报,我们需要知道明天是什么天气,是晴还是阴,是刮风还是下雨,是大雨还是小雨等等,这比雨后再精确地测量降雨量更为重要。

对电子产品也一样,及时地预计其可靠性往往比事后精确地获得其可靠性水平的作用更大,因为设计缺陷在投入现场使用后往往是不可弥补的,在设计阶段采取提高可靠性的措施比日后补救更容易、更经济、更有效。

若在产品阶段对产品可靠性可能达到的指标进行定量预计,就可以在方案论证、产品竞标、可靠性指标确定、可靠性分配、制订可靠性试验计划、制订维修保障方案时做到有的放矢,并能改进产品设计,从根本上提高其可靠性和保障性。

因此,可靠性预计是电子产品可靠性从定性考虑转入定量分析的关键,是“设计未来”的先导,是决策设计、改进设计,确保产品满足可靠性指标要求的不可缺少的技术手段。

开展可靠性预计工作是提高产品固有可靠性的重要措施,这是因为它为电子产品开展可靠性设计提供了一个卓有成效的定量分析手段,它能定量地预测高失效率单元、发现设计上的潜在问题,为改进设计指明方向,并为优选设计方案提供依据,从而使产品在研制伊始就有一个高的起点而获得“优生”。例如某机载导航设备,初次可靠性预计 MTBF(平均无故障工作时间)值与指标要求相差甚远,通过预计分析,发现部分金属膜电阻使用温度超过其正常工作温度,部分晶体管结温高于降额准则的要求,部分钽电容的回路串联阻值偏小及采用电位器过多等设计缺陷或故障隐患,经改进设计,其 MTBF 达到了指标要求。

开展可靠性预计工作能缩短研制周期并降低寿命周期费用,这是因为此时研制进程有定量分析结果作为依据,按可靠性预计结果有针对性地进行可靠性设计,制定实现可靠性、维修性指标的技术措施,避免因采取带有盲目性的措施,而造成经济上和时间进度上的重大损失。

另一方面,可靠性预计也是提高电子产品质量与可靠性水平,增强国际竞争力的需要。不言而喻,用户不仅需要物美价廉的产品,而且更要求产品安全、可靠、好用,在使用期内不出或少出故障,因此,产品标明可靠性指标可让用户选购放心、使用安心。

20世纪80年代,我国在电视机行业规定了创优的可靠性指标,它对促进电视机质量的提高和市场开拓成效显著。然而,对于贵重而复杂的设备或有很高可靠性指标要求的产品,由于技术、费用成本及时间方面的限制,则不可能像电视机那样通过统计试验来验证其可靠性指标。对此,必须尽早借助可靠性预计和分配技术,在产品的设计阶段“设计进”规定的可靠性指标。即通过开展可靠性预计和分配工作,尽早落实产品的可靠性指标,而不是仅靠产品既成之后的抽样统计试验结果。

出于市场竞争的需要,先进国家的产品大多标有可靠性指标,如美国的通信类设备都标明其可靠性指标,但此指标绝大多数不是试验结果,而是可靠性预计结果或现场统计结果,而更新换代快的产品又不能指望现场统计结果。为此,美国贝尔公司还专门积累经验数据,研发了比 MIL-HDBK-217 系列手册更切合本公司实际的可靠性预计方法和数据。

再者,可靠性预计是军事大国提高武器装备可靠性的成功经验。20世纪80年代以来,美国在发展策略上把可靠性、维修性作为提高武器装备战斗力的重要手段,将可靠性置于武器装备性能、费用和进度同等重要的地位。为此,美国国防部于1980年首次颁发了可靠性及维修性指令5000.40《可靠性及维修性》。1985年,美国空军推行《可靠性及维修性2000年行动计划(R&M2000)》,明确提出了“可靠性增倍、维修时间减半”的要求。他们依靠政策和指令来促进空军领导机关对可靠性工作的重视,加速观念转变,使可靠性工作在空军部门形成制度化,最终实现提高武器装备作战能力、改善生存性、减少空军部队部署的运输量、降低维修保障人力需求和使用保障费用等5项目标。经过6年的努力,在1991年海湾战争中,R&M2000行动计划见到了成效,F-16C/D及F-15E战斗机的战备完好性都超过了95%,平均每架飞机每天能起飞执行7次任务。

美国R&M2000行动计划之所以能取得如此显著的效果,除了它采取一系

列管理和技术上的措施外,还与它科学而明确地提出可靠性指标及其相应的可靠性预计和分配工作密切相关。可靠性指标在很大程度上带动了武器装备可靠性工程的实施,武器装备都必须开展可靠性预计、分配及设计评审等工作,经审核的可靠性预计报告是装备鉴定、交付使用时必须提交的技术资料,如我国从某国引进的军用雷达等设备就有完整的可靠性预计报告。

我国的工业生产和国防建设在 21 世纪初进入一个新的发展时期,航天事业取得辉煌成就,到目前为止,长征火箭共进行了 69 次发射,成功 63 次,成功率已达到发达国家的运载火箭水平,可靠性预计技术在各型号工程中得到普遍应用,使可靠性指标大幅度提高,但同发达国家相比,差距还很大。

发达国家具有雄厚的财力,大力发展其高技术装备,不但在设计阶段就进行详细的可靠性预计和设计,还在世界不同地区进行实战的试验和考核,从海湾风暴、阿富汗战争、伊拉克战争不难看出,每一次战争,美军的装备就有一次革命性的进步,其可靠性和战备完好性就提高一次。例如,海湾战争中,在第 1 轮 38 天的空中打击中,多国部队共出动飞机 11.2 万架次,投弹量达 20 万吨以上,发射 288 枚“战斧”式巡航导弹和 35 枚空射巡航导弹,并使用一系列最新式飞机和各种精确制导武器;美国在伊拉克战争中集结各类舰只 100 余艘,动用各类卫星近 90 颗,出动作战飞机 500 余架,动用 AH-1 眼镜蛇等直升机 1 000 余架、M1-A1 等各类坦克装甲车 2 000 余辆,联军每天出动空袭飞机平均在 2 000 架次左右。这些实战中的数据,为装备的可靠性改进、可靠性和战备完好性指标的确定提供了直接的依据,所以,有人说美军武器的可靠性是打出来的,一点也不假。

由于国力的限制,我们不可能像美国一样进行很多的试验验证,更谈不上实战考核了。因此,可靠性指标的合理性和高低就显得十分重要,此时,必须加强和重视可靠性设计和可靠性预计工作,加强对可靠性预计的指导和引导,使其真正成为产品可靠性设计的有效工具,使我国产品的可靠性水平尽快提高,实现可靠性的阶段性跨越。

1.2 可靠性预计的作用

如前所述,可靠性预计是电子产品可靠性从定性分析转入定量分析的关键,是确保产品满足可靠性指标要求不可缺少的技术手段。可靠性预计不去追求绝对准确,而是采用统一尺度预计,为可靠性的定量分析提供可比的相对度量。其作用主要体现在:

(1) 在设备、系统的设计阶段,定量地预测其可靠性水平,以判断设计方案能否满足可靠性指标的要求。例如某电能表的招标书中规定:产品的设计寿命为15年,要求15年内其累计的故障率不超过10%。按指数分布推算,MTBF要大于140年方能满足要求,此时,只有对设计阶段的产品进行可靠性预计,才能判断其是否满足招标要求,才能为中标提供技术保证。

(2) 为设计方案的综合评价提供依据。对产品几种相似的设计方案进行比较,以便选择在可靠性、性能、重量、费用等方面最佳的综合设计方案,在使用大量低失效率元器件与使用较少的高失效率元器件之间进行选择。

(3) 与可靠性分配技术相结合,把规定的可靠性指标合理地分配给各个组成部分,为实施可靠性分配提供依据。开展可靠性预计和分配工作,是确保设计、生产具有规定可靠性指标产品的指导性和基础性工作。将产品可靠性指标自上而下逐级分配到产品的各个层次,借此落实相应层次的可靠性要求,并使整体与各部分之间的可靠性相互协调,尽量做到既避免出现薄弱环节又避免局部“质量过剩”而带来浪费。而可靠性预计结果为实施可靠性分配提供了直接定量的依据。

(4) 为优选元器件及合理使用元器件提供指南。可靠性预计手册给出了各质量等级的质量系数 π_0 ,明确了高故障率的元器件,也给出了执行不同生产标准的产品失效率之间的差别。例如,军标品比普通国、部标品失效率预计值可降低一个数量级,这为设计中合理选择元器件提供了依据。另一方面,为满足工程对可靠性的高要求,设备制造单位要求使用高质量的元器件,这促进了元器件生产厂技术改造、新品开发、军标实施等工作,促使元器件的可靠性水平向新的台阶迈进。

(5) 通过应力分析法预计,可以检查产品研制方案和电路设计的合理性,鉴别设计上潜在的问题,发现薄弱环节,对高故障率和承受过高应力部分引起注意,以便于及时采取措施来改进设计。

(6) 为产品可靠性试验方案设计提供定量依据。在开展可靠性鉴定实验、可靠性验收实验、可靠性增长实验和可靠性测定实验之前,必须进行可靠性预计,为可靠性实验提供指标的定量预计结果,以保证试验有计划、有步骤地推进。

(7) 可靠性预计为其他可靠性工作项目提供数据基础。例如,可靠性预计为故障模式、效应及危害性分析(FMECA)提供失效率和故障模式频数比等数据;在故障树分析(FTA)中,需要计算概率重要度和故障树顶事件发生的概率,这就必须知道底事件发生的概率,当分析底层为电子设备或电子元器件时,可以

通过可靠性预计获得其概率;在可靠性评估时,若试验或现场数据有限,可将可靠性预计结果作为产品的验前信息,与试验或现场信息综合,得到可靠性综合评估结果;在产品的测试性、保障性设计中,可靠性预计为其提供定量的产品失效率数据。

(8) 为产品的使用和维护提供有益的信息,例如:

- 确定适当的保修期。过高估计保修期会增加寿命周期费用,过低估计则会使产品的竞争力低于类似产品。
- 估计保修期间的维修费用。这是产品总费用的一部分,需要在产品定价时确定。
- 估计产品维护费用。它是指与产品预防性维护有关的费用评估,高失效率产品需要更经常地更换,以尽量减少系统停机时间。
- 备用件分析。确定用户或分销商备用部件数量和种类,高失效率产品需要存储的数量更多。

参 考 文 献

- [1] 杨家铨,等.GJB 299,电子设备可靠性预计手册应用指南.机械电子工业部第五研究所数据中心
- [2] 可靠性预计和分配的作用原理及预期效益.中国管理资源中心
- [3] GJB/Z 299B-1998,电子设备可靠性预计手册[S]
- [4] GJB/Z 299C-2006,电子设备可靠性预计手册[S]
- [5] 周源泉.可靠性评定.北京:科学出版社,1990
- [6] Patrick o' Connor Practical Reliability Engineering Fourth Edition
- [7] 卢昆详.电子产品可靠性管理.天津科学技术出版社,1987
- [8] H. Al-Asaad. A Novel Markov Model for the Reliability Prediction of Fault Tolerant Non-Homogeneous Multipipelines. Proc. IEEE Systems Readiness Technology Conference, AUTOTESTCON, 2003,(9):664—669
- [9] W. J. Kerscher III. Failure-Time Distribution of Electronic Components. Proc. Ann. Reliability & Maintainability Symp., 1988: 373—378
- [10] L. Rimestad. Field Failures of Electronic Systems. Proc. Ann. Reliability & Maintainability Symp., 1990:528—534

第 2 章 可靠性预计的方法及程序

2.1 可靠性预计的主要方法

可靠性预计的方法很多,有基于数理统计的传统可靠性预计法、失效物理分析法、相似预计法、相似复杂性法、功能预计法、上下限法等。其中,以基于数理统计的传统方法应用最为广泛,是当前可靠性预计的主流方法。

1 基于数理统计的可靠性预计法

该方法的主要前提是:各个元器件的可靠性决定了系统或设备的可靠性。在串联可靠性模型的前提下,通过各个元器件失效率的简单相加来得出总的产品失效率。这一方法的主要假设是:元器件的失效率是恒定不变的,或失效是指数分布的。该方法又分为元器件计数法和应力分析法。该方法最早见于美国军用标准 MIL-HDBK-217。其后,各行业根据各自的特点和产品的使用环境,制订了与 MIL-HDBK-217 手册十分相似的可靠性预计手册,比如 Bellcore、CNET、HRD 和西门子手册。

可靠性工程是建立在概率模型的基础上的,为了提出精确的确定性失效模型而鉴别和量化影响电子元器件失效的所有变量是困难的。该方法在统计的基础上,基于指数分布的假设,通过大量样品的统计分析,将影响产品可靠性的多个因素独立化、量化,方便了应用,能反应失效率的统计平均值,具有很强的工程实用性。

该方法的不足是:需要做持续的数据更新;设备中那些与元器件失效无关的故障是无法预计的;多变的环境应力使模型在预计现场失效方面还存在不足。

2 失效物理分析法

失效物理分析法是通过了解可能发生的失效及其机理,发现产品或现有技术中潜在的问题,并在问题发生前解决它们。失效物理分析法的焦点是关注主要的失效模式,在对有关物理现象及失效机理深入认识和彻底理解的基础上,利用仿真方法或推导出定量模型进行预计。失效物理分析法能预防、发现和纠正

与产品设计、制造和工作有关的失效,经实践证明这种技术是有效的,具有工程实用性。

但由于失效物理分析法计算量大,投入成本高,普遍适用性差,必须同实际产品所采用的元器件、材料、工艺相结合,所以很难量化整个系统的可靠性,其困难主要体现在系统或设备设计师对所用元器件物理结构的理解和信息了解,对电路板、结构件及电装工艺的失效机理难以深入准确地掌握。

3. 相似预计法

它包括相似产品法和相似电路法,是一种经验预计法,其中包含了传统预计、可靠性试验、故障分析的诸多信息。它适用于初始构思、规划新品方案的总体论证阶段。由于信息少,只能作大体的估计,通过一些简单的预计,如寻求在用途、性能和结构等方面与研制对象相类似的老产品或电路,以其可靠性水平作为所研制产品可靠性的估计值,借此对新品可能达到的可靠性水平做粗略的预测,进而评估新品总体方案的可行性。该方法的适用条件是新设备与老设备是相似的,以及老设备的可靠性水平是已知的。相似法的预计精度取决于现有设备可靠性数据的可信程度及现有设备和新设备的相似程度。

4. 相似复杂性法

相似复杂性法是将故障率与有源器件数和使用环境关联起来的图解法,利用这种方法可以根据已知设备的有源器件数和设备的可靠性等级迅速地计算出设备的可靠性。有源器件规定为电子管、晶体管、继电器和整流二极管等。但是,这种方法目前尚未得到改进,还不能包括广泛应用的微电路等。

5. 功能预计法

功能预计法是一种把设备或系统预期的可靠性与其功能联系起来的预计方法。该方法的适用条件是已知设备的功能与可靠性水平的回归方程及其各个系数的数值。它以统计设备的功能特性和观测到的工作可靠性之间的相关关系为基础,最后得到重要的设备功能(从可靠性的角度而言)与可靠性的回归方程。目前,能建立这种回归方程的设备类别还很有限。

6. 上下限法

上下限法常用于复杂系统的可靠性预计,其基本思想是:由于系统的复杂性,计算其可靠度真值比较困难,于是设法预计2个近似值,一个称为可靠度上限(R_U),一个称为可靠度下限(R_L),然后取上、下限的几何平均值作为系统

的可靠度预计值(R_s)。

2.2 基于数理统计的可靠性预计的现实意义

基于数理统计的可靠性预计方法是以恒定失效率为基础的,这一方法最初由 MIL-HDBK-217 引入,多年来被用于估计产品和系统的失效率与平均无故障工作时间(MTBF)。许多商业或军用标准就是由 MIL-HDBK-217 演变而来的。其主要前提是:电子设备可靠性取决于元器件种类、数量、元器件工作和环境应力,对于串联系统,表现为通过各个元器件失效率的简单相加来得出产品总的失效率。这一方法的主要假设是:元器件的失效率是恒定不变的,或失效是指数分布的,这一假设受到了许多质疑和争议。

虽然从直观来讲恒定失效率的假设似乎不真实,但我们要考虑以下情况:典型电子产品的寿命周期(从投入使用到寿命结束)在 2~5 年之间。在此期间,恒定失效率假设并非没有道理,因为一个产品中的大多数元器件并没有到达磨损期。在实际中产品失效率可能略有下降或上升,当这种微弱的差异可以忽略时,例如威布尔分布的形状参数 m 可近似为 1 时,这种假设是合理的,事实证明,电子产品大多数可以假设为失效率恒定不变。

恒定失效率的假设大大简化了可靠性计算中的数学问题。例如,对于串联模型,底层单元基本满足指数分布假设并为串联模型时,设备失效率可以是底层单元或元器件失效率的和,失效率的倒数就是设备的 MTBF,这就大大简化了计算。

以 MIL-HDBK-217 为代表,以现场和实验数据为基础,以数理统计学为支撑的预计方法在美国军方乃至国际上都有极广泛的应用和影响。几十年来,这一方法不断得到完善,手册所包括的元器件种类随着电子工业的发展而不断扩充。到目前为止,这一方法仍然是使用最多,最为工程设计者及管理部门所接受的方法。

基于统计学的可靠性预计,若没有电子元器件的可靠性数据,则无法进行整机可靠性预计与分配,无法进行可靠性管理。为了获得这种数据,人们花了很大精力进行收集,并在此基础上,编制出数据手册,供整机设计、元器件选用、可靠性预计与分配、可靠性管理等参考使用。

基于数理统计的可靠性预计的价值随时间而变化,这要取决于不同的产品寿命周期阶段。如图 2.1 所示,在概念阶段,其价值是很高的,在开发阶段达到

最大值,因为设计仅仅是在图纸上,没有实际产品可测试。其效益 $B(t)$ 是很高的,因为根据物料清单(BOM)只有黑盒方法可以使用。其费用 $C(t)$ 是较低的,因为根据建立的模型和数据库可以很容易推导出预计值。从概念到开发阶段,价值的上升要归因于设计的成熟和产品定义的细化。

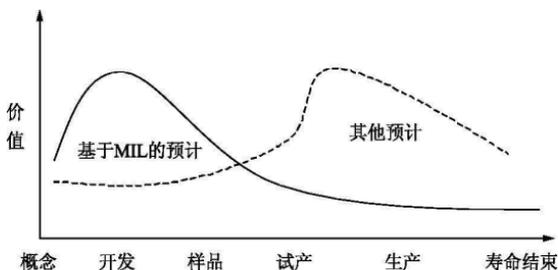


图 2.1 可靠性预计的价值与产品寿命周期

另外,当新产品推出时,保修期、维护和修理、服务支持费用都需要确定,以估计其寿命周期中的总费用。在早期阶段,这些量只能用基于数理统计的预计方法来估计。但从这一时刻之后,基于数理统计的预计方法价值开始下降,因为此时已造出样品,产品可靠性开始通过试验来评价。

2.3 可靠性预计标准的发展及其主要分类

在第二次世界大战中,为了能对系统可靠性进行量化评估,美国政府采购部门着手建立一种标准化的方法来制定需求规格和预测过程。因为如果没有标准化,每个供应商的预测就会基于他们各自的数据。这样,对于一个由不同供应商生产的元器件组成的系统,不仅将难以评估其可靠性,而且对于同样功能的元件或系统的不同设计之间的比较也造成了困难。

可靠性预计标准可以追溯到 1956 年 11 月。那时 RCA 发布了以《电子设备的可靠性应力分析》为题的 TR-1100 标准,该标准介绍了元器件失效的计算值模型。此后,美国军方于 1962 年公布了 MIL-HDBK-217,不管元器件属何类,当时预计手册有关元器件失效率数据都采用统一的 K 系数。事实上不同的环境对于不同元器件的影响并不完全相同。因此,美国于 1965 年对 MIL-HDBK-217 进行了重大的修改,在 MIL-HDBK-217 的基础上改订成 MIL-HDBK-217A。MIL-HDBK-217A 不是给出一个统一的 K 系数,而是对每种元器件分

别确定 K 系数。随着可靠性工作的深入发展,人们发现产品的失效率不仅与环境有关,而且与产品的质量及其失效模式有关,因此美国于 1974 年又将 MIL-HDBK-217A 修订为 MIL-HDBK-217B。MIL-HDBK-217B 的显著特点是增补了各种元器件,特别是新型元器件的失效模式,给出了元器件失效率的数学式。MIL-HDBK-217B 中通常用 π 系数来表示各种影响因素。MIL-HDBK-217 的这些改进,为以后各种数据手册的编制奠定了基础。在 MIL-HDBK-217B 的基础上,美国于 1979 年 4 月公布了 MIL-HDBK-217C,于 1982 年 1 月公布了 MIL-HDBK-217D,到现在为止,最新的版本是 MIL-HDBK-217F Notice II。

其后,衍生出许多与 MIL-HDBK-217 手册十分相似的可靠性预计手册,比如 Bellcore 的 TR-332、CNET、HRD、217PLUS 和西门子手册,能比较快捷地估计电信类产品的可靠性,满足了电子产品预计的需求。

1. RDF2000

法国电讯科学研究中心(CNET)在对法国电讯设备失效数据进行大量收集分析的基础上,分别于 1969 年、1972 年、1976 年、1982 年、1984 年、1992 年、1993 年以及 2000 年,历经多次改版,目前推出最新版次 RDF2000,它是在 RDF93 基础上制定更新的。采用了类似于 MIL-HDBK-217 系列的数学模型,但它根据本国的工艺质量、标准规范和环境应用情况对模型参数进行了调整。

2. HRDS

1981 年,由英国系统可靠性中心及电气工程师学会汇编了《英国电子元器件可靠性数据手册》。该手册以数据表格形式给出了 100 多种元器件的失效率数据。该手册所考虑的因素没有美国和法国那样复杂,它没有列出质量系数,其基本失效率 λ 是按照不同环境给出来的,但它却给出了美、法手册所没有的贮存失效率及可靠性增长系数。此外,对失效率如何随时间变化也做了研究,同时还研究了失效率随元器件复杂度及温度而变化的规律,并调整基本数值使其最后失效率与现场数据相符。

3. Telcordia SR-332

Telcordia SR-332 是从贝尔通信研究中心发展起来用于评估电信设备可靠性的预计方法,尽管贝尔预计手册是以 217 为基础的,但是历经几次改版到 BELCORE TR-332 第 6 期,直至 Telcordia 将其发展为 SR-332 第 1 期,均较为准确地反映了电信设备的失效率水平,得到了通信业的广泛应用。SR-332 还给出了 3 种预计方法,即元器件计数法、实验室数据分析法、以及基于现场数据的

预计法。

4. 中国《电子设备可靠性预计手册》

我国自 1980 年成立“电子产品可靠性数据网”以来,开始组织可靠性数据的收集分析工作。在充分分析大量可靠性试验数据和现场使用数据的基础上,于 1987 年 4 月编制了我国第一部《电子设备可靠性预计手册》。1991 年发布 GJB/Z299A, 1998 年发布 GJB/Z299B, 2006 年发布 GJB/Z299C。

我国的《电子设备可靠性预计手册》,在研究了美国、法国、英国等数据手册的基础上,结合国内的具体情况,对 21 类元器件的预计模型、各种 π 系数、基本失效率的图表及公式进行了认真的分析,给出了采取应力分析法及计数法进行电子产品可靠性预计所需要的各种信息及图表。

5. SN29500

这是由西门子 AG 为西门子以及与西门子有关的人员而研制的,作为进行可靠性预计的统一基础。文件中的标准是以规定条件下的失效率为基础的。失效率根据应用与试验的经验而确定,外部来源(如 MIL-HDBK-217)也加以考虑。元器件分成许多组,每一组都有一个稍有不同的可靠性模型, π 因子考虑了器件工作温度和电应力的变化。

6. 美国 RAC 的可靠性预计程序 PRISM 软件

传统的可靠性预计模型的建立包括了对经验失效率数据的统计分析。这种统计方法一般产生的是乘法模型格式,即预计失效率等于基本失效率和几个影响可靠性的应力和元器件特性变量因子之积。乘法模型格式的主要缺点是在极端的条件下(即所有因子都为最低值或最高值时)预计失效率值会变得超常大或小,这是乘法模型固有的局限性,主要是因为没有明确考虑某个失效机理或某类失效机理的影响。

美国 RAC(Reliability Analysis Center, 可靠性分析中心)认为加法模型更好,这种模型可以预计每个失效机理的独立失效率。每个失效率项都用适当的应力或元器件特性来加速。

RAC 开发出一个新的方法用于评价电子系统的失效率,这一方法包括了新的元器件预计模型和评价非元器件变量影响下的系统可靠性的评价方法。该系统评价方法克服了一些 MIL-HDBK-217 的局限性。

系统的失效率模型如下:

$$\lambda_D = \lambda_A (\pi_P \pi_{IM} \pi_E + \pi_D \pi_C + \pi_M \pi_{IM} \pi_E \pi_C + \pi_s \pi_C + \pi_I \pi_E + \pi_N + \pi_W \pi_E) + \lambda_{SW}$$

其中, λ_p 为系统的预计失效率; λ_A 为失效率的初步评估值, 是以 RAC 的新元器件失效率模型为基础的; π_p 为部件过程因数; π_{IM} 为早期失效因数; π_E 为环境因数; π_D 为设计过程因数; π_G 为可靠性增长因数; π_M 为生产过程因数; π_S 为系统管理过程因数; π_I 为诱发过程因数; π_N 为无缺陷过程因数; π_W 为磨损过程因数; λ_{SW} 为软件失效率预计。

失效率的初步评估值 λ_A 是通过元器件可靠性预计模型结合 RAC 数据库中的失效率数据推导出来的种子(实际上为基本)失效率值。对这一失效率要用 π_S 系数来修正, 该系数考虑了系统设计和生产中使用的特殊过程以及系统环境、可靠性增长和早期失效特性。

7.1 美国信息分析中心(RIAC)的 217PLUS

217PLUS 是 RAC(2005 年更名为 RIAC)可靠性评估工具 PRISM 的更新产品。它合并了 12 类元器件的预计模型(是 PRISM 元器件的 2 倍), 不仅可用于评估工作状态, 还可以评估非工作状态的失效率, 并且可用于评估不同阶段的失效率水平, 如设计阶段、生产阶段、系统管理阶段、耗损阶段等等。

各种预计标准手册的情况列于表 2.1, 各预计标准(手册)的应用特点列于表 2.2。

表 2.1 各种可靠性预计标准(手册)

模 型	说 明
MIL-HDBK-217	原商业和军用电子元器件的全球标准(MIL-STD-217)
Telecordia SR-332	原商业级电子元器件的 Bellcore 标准
PRISM	最初由可靠性分析中心(RAC)制定, 结合了工艺等级因素
217PLUS	美国信息分析中心(RIAC)
CNET 93	由法国电信制定
RDF2000	由 UTE 制定的较 CNET 93 新的版本
HRD-5	英国电信制定
SN29500	西门子
GJB/Z 299B(GJB/Z 299C)	中国标准

表 2.2 可靠性预计方法特性

特 性	PRISM	MIL-HK-217	Bellcore	英国电信	日本电报电话	法国(CNET)	GJB/Z299C GJB/Z108A
预计多个元器件的工作失效率	是	是	是	是	是	是	是
预计多个元器件的非工作失效率	是	否	否	否	否	否	是

续表 2.2

特性	PRISM	MIL-HK-217	Bellcore	英国电信	日本电报电话	法国(CNET)	GJB/Z299C GJB/Z108A
失效率模型考虑行业发展趋势(增长因素)	是	否	否	否	否	是	否
预计寿命结束	否	否	否	否	否	否	否
假定恒定失效率——部件失效率可相加	是	是	是	是	是	是	是
包括的环境类别	无限。可确定温度极限循环速度和绝对温度	18种	3种	3种	3种	19种	19种
包括的电子部件类别	RAC Rat 有大部分。EPRD 和 NPRD 数据接口则非常全面	全面	大多数	大多数	大多数	全面	全面
模型考虑工作温度	是	是	是	是,限微电路	是	是	是
模型明确考虑温度循环	是	否	否	否	否	否	否
考虑生产控制/筛选级	是,通过系统级的过程分级因子	是	是	是,限微电路和分立器件	是	是	是
提供部件数方法	是	是	是	否	否	是	是
提供部件应力方法	是	是	是	是	是	是	是
考虑系统级设计和生产因素	是	否	否	否	否	否	部分
提供分析现场数据的方法	是	否	是	否	否	否	否
考虑软件	是	否	否	否	否	否	否
考虑机械部件	是	否	否	否	否	否	否

2.4 元器件计数法和应力分析法可靠性预计程序

从可靠性工程角度出发,可靠性预计的主要目的在于检查产品研制方案和电路设计的合理性,比较不同设计方案的可靠性水平,发现薄弱环节,对高故障率和承受过高应力部分进行设计改进,同时与可靠性分配技术相结合,把规定的

可靠性指标合理地分配给各个组成部分,并为制定研制计划、验证试验方案以及维修、后勤保障方案提供依据。

以 MIL-HDBK-217 为代表的可靠性预计法主要有元器件计数法、元器件应力分析法。在设备设计、研制的不同阶段,要求进行不同深度的可靠性预计,其预计类型、适用的预计方法及其作用各不相同。

研制阶段的早期已进行初步的设计,形成了产品功能原理框图和电路草图,每种元器件的数量已基本上确定,但尚缺元器件应力数据。在这阶段,一般采用元器件计数法预计产品的可靠性水平。通过这种比较简便的预计,判断设计方案是否满足可靠性指标,并比较、优选设计方案和开展可靠性分配等。

在研制阶段的中、后期,即在全面开展电路测试和试验之后的样机研制期间,此时已具备详细的电路图、元器件清单及每个元器件所承受的应力数据。在这个阶段,应采用元器件应力分析法对产品作详细的可靠性预计。通过预计,分析样机可靠性的薄弱环节,以便采取相应措施来改进产品设计。

元器件计数法和应力分析法可靠性预计,无论对于系统级别还是设备级别,其预计的步骤和程序是一致的,其差异是考虑元器件信息的多少,即元器件失效率预计方法有差异。元器件计数法和应力分析法可靠性预计程序如下(预计数据及举例见第 6、7、8 章):

(1) 建立可靠性模型。参照设备、系统的功能原理,划分出在电路功能上相对独立、内部仅包含串联结构的可靠性预计单元,然后确定各预计单元间的可靠性逻辑关系和数学关系,即建立产品可靠性模型。对于电子设备,若电路中采用可靠性并联结构或其他储备方式时,其可靠性框图的分解与绘制应表示这种结构,不可简单地以 PCB 板来区分。

在建立可靠性模型时,为了使底层单元满足可靠性预计的条件,应保证可靠性框图中各单元的下层任何单元或元器件是可靠性串联的关系。

(2) 分析设备中各元器件的所属单元、应用方式、工作环境温度及其他环境应力,以及电应力比等工作应力数据。

(3) 汇编设备的元器件详细清单,当用应力分析法进行可靠性预计时,元器件清单内容包括:元器件名称,型号规格,数量,产品标准或技术文件,性能额定值及有关的设计、工艺、结构参数和工作应力数据等;当用元器件计数法进行预计时,只需要设备上所用元器件的种类及每类元器件的数量,各种类元器件的质量等级及其质量系数,设备应用的环境类别等信息即可。

(4) 按各种类元器件工作失效率模型,计算每预计单元内各元器件的工作

失效率。当用元器件应力分析法进行预计时,不同标准和不同类别的元器件的失效率预计模型不同,应查找相应的标准,例如 GJB/Z299C,按标准进行预计;当用元器件计数法进行预计时,所有元器件可按式(2.1)进行预计:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_{Gi} \pi_{Qi}) \quad (2.1)$$

式中, λ_{Gi} 为第 i 种元器件在规定环境下的通用失效率; π_{Qi} 为第 i 种元器件的质量系数; N_i 为第 i 种元器件的数量; n 为系统所用元器件的种类数。

(5) 将(2)~(4)步骤所得到的数据填入规范化的预计表中。

(6) 将预计单元内元器件的工作失效率相加,由此计算本单元的失效率。

(7) 按设备、系统的可靠性模型,逐级预计设备、系统的 MTBF 与可靠度等可靠性指标。

(8) 元器件计数法和应力分析法可靠性预计程序可用图 2.2 表示。

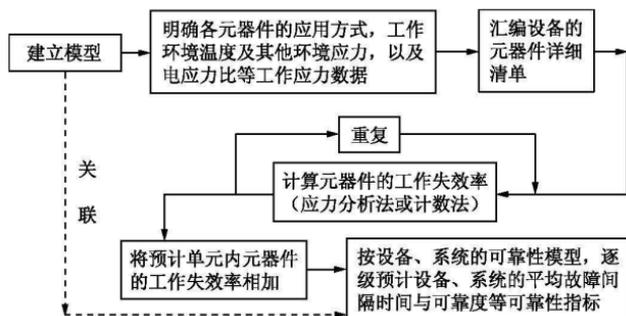


图 2.2 元器件计数法和应力分析法可靠性预计程序

2.5 相似预计法的程序

如前所述,相似预计法包括相似产品法和相似电路法,是一种经验预计法,其中包含了传统预计、可靠性试验、故障分析的诸多信息。它适用于初始构思、规划新品方案的总体论证阶段。

2.5.1 相似产品法

相似产品法预计程序如下:

(1) 确定与新设计产品最相似的现有产品,其相似性比较的要点为:产品的

结构、性能、设计、制造、寿命剖面的工作条件和环境条件,参见表 2.3。

(2) 对相似产品在使用期间所有的数据进行分析,确定其已达到的可靠性水平。

(3) 比较新老产品的差异程度,根据相似产品的可靠性水平,经适量的修正后,作为新产品可靠性水平的预计值。

对按系列开发的产品,这种方法可持续地应用。如果不能进行相似产品之间的对比,就应该考虑相似电路法。

表 2.3 相似产品法比较项目一览表

相似要点	比较项目
系统	①系统的作用和功能;②构成的复杂性;③尺寸和重量;④功能;⑤可靠性特征值数据
设计	①耗电量,输入输出特性,控制特性;②工作环境条件;③部件、回路等使用标准件的情况;④半导体及 IC 的使用情况;⑤模块化的范围;⑥系统、设备等连接关系;⑦干扰和杂音问题的处理;⑧宇宙真空环境或抗辐射措施的特殊要求;⑨有否协作设计者;⑩规范、标准现状、合同条件
制造	①一般的制造方法;②特殊加工要求;③制造年代;④更新设计和制造的工艺;⑤质量和可靠性的控制能力;⑥特殊的质量要求;⑦特殊检查及鉴定
管理	①质量保障系统及运行情况;②原材料、部件合格证明的要求;③用户提供的有关维修的设想;④制造类似产品的经验;⑤质量和可靠性的投资;⑥预算等是否妥当;⑦部件供应情况;⑧企业领导对可靠性的理解和想法

【例 2.1】 某种供氧抗荷系统包括:氧气瓶、氧气开关、减压器、示流器、调节器、面罩、跳伞氧气调节器、氧气余压指示器、抗荷分系统等。试用相似产品法预计该供氧抗荷系统的平均故障间隔时间(MTBF)。

【解】 收集到的同类机件供氧抗荷系统的可靠性数据及预计值见表 2.4。

表 2.4 统计数据及预计值

产品名称	单机配套数	老产品的 MTBF	预计的 MTBF	备注
氧气开关	2	1192.8	3000	选用新型号,可靠性大大提高
氧气减压器	1	6262	6262	选用老品
氧气示流器	1	2087.3	2087.3	选用老品
氧气调节器	2	863.7	863.7	选用老品
氧气面罩	1	6000	6500	在老品基础改进工艺
氧气瓶	4	15530	15530	选用老品
跳伞氧气调节器	4	6520	7000	在老品基础上改进材料

续表 2.4

产品名称	单机配套数	老产品的 MTBF	预计的 MTBF	备注
氧气余压指示器	4	3578.2	4500	选用新型号,可靠性大大提高
抗荷分系统	1	3400	3400	选用老品
整个供氧抗荷系统		141.23	172.80	

2.5.2 相似电路法

这种预计方法是把相似电路(如振荡器、放大器、调制器、脉冲传输网络等)所获得的特定经验,用于正在研制的具有相似功能的电路单元的可靠性预计。预计可靠性的最快方法是将正在研制的电路与一个相似电路进行比较,后者的可靠性以前曾用某种手段确定过,并经过了现场评定。当各个单元电路可靠性可以综合成为整个产品可靠性时,对按系列开发的电路,这种方法有不间断应用的意义。预期的新设计不仅要与老设计相似,而且还要易于确定和评定细致的差别。

其预计程序与相似产品法的类同:

(1) 确定与新设计电路最相似的现有电路,其相似性比较的要点有电路的结构、性能、设计、制造、寿命剖面的工作条件和环境条件等。

(2) 对相似电路在使用期间所有的可靠性数据进行分析,确定其已达到的可靠性水平(对已确定过可靠性的系列电路则可省去这一步骤)。

(3) 比较新、老设计电路之间的差异程度,将相似电路的可靠性水平经一定修正后作为新电路可靠性水平的估计值。

(4) 将单个新设计电路的可靠性估计值综合为新产品可靠性的预计值。

在将单个电路可靠性综合到一起时,应该考虑电路互连可靠性因素。相似电路法的有效性取决于电路之间的等效程度,而不取决于用来描述电路的一般性术语的一致性。

2.6 上下限法预计程序

上下限法又称边值法,其基本思想是将复杂的系统先简单地看成某些单元的串联系统,求出系统可靠度的上限值和下限值,然后逐步考虑系统的复杂情况,逐次求系统可靠度的愈来愈精确的上下限值,达到一定要求后,再将上下限

值进行简单的数学处理,而得到满足实际精度要求的可靠度预计值。

上下限法的优点是对复杂系统特别适用。它不要求单元之间是相互独立的,适用于热储备和冷储备系统,也适用于多种目的和阶段工作的系统。美国已将此方法用在像阿波罗飞船这样复杂系统的可靠性预计上,它的精确度已被实践所证明。下面分别讨论上限值、下限值的计算方法及上、下限值综合处理的方法。

2.6.1 上限值的计算

对于规定的时间 t , 在 t 时刻系统的可靠度可以用下式计算(为书写简单略去 t):

$$R_s = 1 - P_{\text{(恰有1个单元故障,系统故障)}} - P_{\text{(恰有2个单元故障,系统故障)}} \\ - P_{\text{(恰有3个单元故障,系统故障)}} - \dots$$

因此,系统第 i 步上限可记为

$$R_{L_i} = 1 - \sum P_{\text{(恰有 } i \text{ 个单元故障,系统故障)}}, (i=1, 2, 3, \dots)$$

显然 $R_{L_1} \geq R_{L_2} \geq R_{L_3} \geq \dots \geq$ 系统真实的可靠度值。

下面以图 2.3 为例说明计算方法。

用大写字母表示系统的正常状态,“恰有 1 个单元故障,系统故障”可表示为:

$$\overline{A}BCDEFGH + \overline{A}BCDEFG\overline{H}$$

所以

$$R_{L_1} = 1 - F_A R_B R_C R_D R_E R_F R_G R_H - R_A F_B R_C R_D R_E R_F R_G R_H$$

“恰有 2 个单元故障,系统故障”可表示为:

$$ABCDEF\overline{G}\overline{H} + \overline{A}BC\overline{D}EFGH + \overline{A}BCDEF\overline{G}H + \overline{A}BCDEF\overline{G}H \\ + \overline{A}BC\overline{D}E\overline{F}GH$$

由于 A、B 只要有 1 个故障就引起系统故障,因此 A、B 同时故障(与其中单个故障相比)引起系统故障概率是小事件概率,可不予考虑:

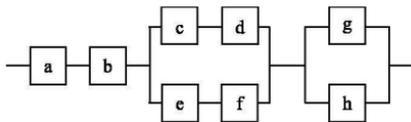


图 2.3 系统可靠性框图

$$R_{L2} = R_{L1} - R_A R_B (R_C R_D R_E R_F F_C F_H + F_C R_D F_E R_F R_C R_H \\ + F_C R_D R_E F_F R_G R_H + R_C F_D F_E R_F R_G R_H + R_C F_D R_E F_F R_C R_H \\ + \dots)$$

2.6.2 下限值的计算

对于规定的时间 t , 在 t 时刻系统的可靠度还可用下式计算(为书写简单略去 t):

$$R_S = P_{(\text{全部单元正常, 系统正常})} + P_{(\text{恰有1个单元故障, 系统正常})} \\ + P_{(\text{恰有2个单元故障, 系统正常})} + \dots$$

因此, 系统第 i 步下限为

$$R_{Fi} = P_{(\text{全部单元正常, 系统正常})} + \sum P_{(\text{恰有}i\text{个单元故障, 系统正常})}, (i=1, 2, 3, \dots)$$

显然 $R_{Fi} \leq R_{Fi} \leq \dots \leq$ 系统真实的可靠度值。

还以图 2.3 为例可得到:

$$P_{(\text{常全部单元正常, 系统正常})} = R_A R_B R_C R_D R_E R_F R_G R_H$$

$$P_{(\text{恰有1个单元故障, 系统正常})} = R_A R_B R_C R_D R_E R_F R_G R_H \left(\frac{F_C}{R_C} + \frac{F_D}{R_D} + \frac{F_E}{R_E} \right. \\ \left. + \frac{F_F}{R_F} + \frac{F_G}{R_G} + \frac{F_H}{R_H} \right)$$

所以

$$R_{F1} = R_A R_B R_C R_D R_E R_F R_G R_H \left(1 + \frac{F_C}{R_C} + \frac{F_D}{R_D} \right. \\ \left. + \frac{F_E}{R_E} + \frac{F_F}{R_F} + \frac{F_G}{R_G} + \frac{F_H}{R_H} \right)$$

2.6.3 上下限值的综合计算

有了系统可靠度的第 i 步上下限值 R_{Li} 和 R_{Fi} , 要综合起来得到系统的 R_S 的单一预计值, 最简单的方法是求 2 个极限值的算术平均, 但这种方法误差较大, 较精确的计算公式是:

$$R_S = 1 - \sqrt{(1 - R_{Li})(1 - R_{Fi})}$$

在使用此公式时, 应注意上下限值必须求到同一步, 即二者都是第 i 步的上限值和下限值。要使 2 个极限值愈加接近, 需要考虑的情况就愈多, 从而使问题

复杂化,失去了这个方法的优点。其实,2个比较粗略的极限值综合起来所得的系统可靠度预计值,与2个精确极限值综合所得的系统可靠度预计值一般相差不会太大,这就是边值法的优点之一。

根据经验,当 $R_{上i} - R_{下i}$ 近似地等于 $1 - R_{上i}$ 时,逐步求上限值、下限值的工作可以结束,即可用 $R_{上i}$ 和 $R_{下i}$ 综合计算 R_s 。

2.7 可靠性预计的一般要求

2.7.1 正确选用合适的标准

电子设备的可靠性预计应按相应的标准进行,一般情况下可以按 GJB/Z 299C《电子设备可靠性预计手册》进行国产元器件工作状态可靠性预计;按 MIL-HDBK-217、Telcordia SR-332 进行进口元器件工作状态可靠性预计;用 GJB/Z 108A《电子设备非工作状态可靠性预计手册》进行非工作状态可靠性预计。

当同一设备中同时采用进口元器件和国产元器件时,需要利用 GJB/Z299C 对国产元器件进行预计,获得其故障率 $\lambda_{国产}$;再利用 GJB/Z299C 附录 A 或国外手册(例如 MIL-HDBK-217F、SR-332)对进口元器件进行预计,获得其故障率 $\lambda_{进口}$ 。若划分模块保证为串联可靠性模型时,则其总故障率可由式(2.2)求得:

$$\lambda_{设备} = \lambda_{国产} + \lambda_{进口} \quad (2.2)$$

当要考虑非工作状态的可靠性时,应用 GJB/Z 108A《电子设备非工作状态可靠性预计手册》进行非工作状态可靠性预计;当要同时考虑工作和非工作状态可靠性预计时,需按 9.1 节进行修正。

可参考 NPRD《非电子零部件可靠性数据》进行非电部件的可靠性预计。

2.7.2 可靠性预计的反复迭代

应尽早进行可靠性预计,以便当任何级别上的可靠性预计值未达到可靠性分配值时,能及早在技术和管理上予以注意,采取必要的措施。

在产品研制的各个阶段,可靠性预计应反复迭代进行。在方案阶段就应进行可靠性预计,以便确定该产品的设计方案是否能满足规定的可靠性要求。在低层次产品研制合同签订后,可靠性预计工作仍要随工程研制的进展,迭代地进行,以便反映产品当前的技术状态,更准确地预计产品可靠性水平,及时发现设

计缺陷,采取改进措施。

可靠性预计结果的相对意义比绝对值更为重要。一般预计值与实际值的误差在1~2倍之内可认为是十分成功的,误差在1个数量级以内(小于10倍)在国际上也认为是正常的。通过可靠性预计,可以找到系统易出故障的薄弱环节,加以改进;在对不同的设计方案进行优选、调整时,可靠性预计结果是重要依据。

2.7.3 可靠性预计报告

根据预计结果,可靠性预计报告应分析设计方案满足规定可靠性要求的程度。可靠性预计值应高于成熟期的规定值(美国海军航空兵规定预计值为规定值的1.25倍,我国一般还要高一些,建议为1.5倍)。

初始预计报告应能适用于论证产品方案的可行性、先进性。中间预计报告应能适用于设计评审,包括比较、选择设计方案,指明设计中的高故障率单元,过应力的元器件和薄弱环节,提出设计改进措施的建议等。最终预计报告应反映最终的设计,并确定设计中不能消除的高故障率单元和潜在的故障等。

可靠性预计应周到、齐全,应附加说明没有纳入可靠性模型部分的理由及其清单。

对于高度复杂的模型,应附有简化的可靠性模型及其说明,无法简化时应分级表示。

可靠性预计工作的成效主要表现在预计的结果应影响产品设计,即通过预计,发现产品中的薄弱环节,为改进设计提供依据。这种改进应在预计报告及其他相关设计文件中加以体现。

参 考 文 献

- [1] MIL-HDBK-217F Notice II [S]
- [2] Italtel. Italtel Reliability Prediction Handbook. 1993
- [3] Telcordia SR332. Reliability Prediction Procedure (RPP) for Electronic Equipment. 2001
- [4] Philips Internal Standard UAT-0387. Reliability Prediction Failure Rates. 1988
- [5] Centre National D'Etudes des Telecommunications. Recueil De Donnes De Fiabilite Du CNET. 2000
- [6] 可靠性预计技术的发展研究. 可靠性与质量信息, 2001, (5)
- [7] 可靠性预计的价值与局限. 国外军用电子元器件, 2005, 28(2)
- [8] GJB/Z 299B-1998, 电子设备可靠性预计手册[S]
- [9] J. L. Spencer. The highs and olws of reliability predictions. Proc. Ann. Reliability & Maintain-ability

- Symp., 1986;156—162
- [10] J. B. Bowles. A survey of reliability-predictions procedures for microelectronic devices. IEEE Trans Reliability, 1992,41(3);2—21
- [11] 可靠性预计模型的比较. 国外电子技术动态, 2000,71(10)
- [12] 传统可靠性预计方法存在的问题与替代方法. 国外电子技术动态, 2002,86(2)
- [13] GJB450A-2004, 装备可靠性工作通用要求[S]
- [14] Michael Pecht, 吴际. 是否存在替代传统可靠性预计的方法. 电子制造 China(网站)
- [15] Michael Pecht. Reliability Prediction of Electronic Parts and Products. CALCE Electronic Products and Systems Center, University of Maryland
- [16] British Telecom. Handbook of Reliability Data for Components Used in Telecommunications Systems. 1993
- [17] Siemens Standard SN 29500. Reliability and Quality Specification Failure Rates of Components. 1999
- [18] Nippon Telegraph and Telephone Corporation. Standard Reliability Table for Semiconductor Devices. 1986
- [19] A. P. Wood, J. G. Elerath. A Comparison of Predicted MTBFs to Field and Test Data. Proc. Ann. Reliability & Maintainability Symposium, 1994;153—156
- [20] C. T. Leonard, M. G. Pecht. Improved Techniques for Cost Effective Electronics. Proc. Ann. Reliability & Maintainability Symp., 1991;174—182
- [21] C. T. Leonard, M. Pecht. Failure Prediction Methodology Calculations Can Mislead; Use Them Wisely, Not Blindly. Proc. Aerospace and Electronics Conference, NAECON, IEEE, 1989;1887—1892
- [22] M. G. Pecht, F. R. Nash. Predicting the Reliability of Electronic Equipment. Proceedings of the IEEE, 1994,82(7); 992—1004
- [23] P. G. Bishop, R. E. Bloomfield. A Conservative Theory for Long Term Reliability Growth Prediction. Proc. Seventh International Symposium on Software Reliability Engineering, 1996;308—317
- [24] William Denson. Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models. Reliability Information Analysis Center