

可靠性技术丛书— 6

可靠性设计

〔日〕 川崎義人 著

机械工业出版社

本书是日本科技连可靠性技术丛书第6卷的中译本。可靠性设计、制造、管理是保证产品质量和提高产品可靠性的3个基本环节。为了使产品得到所需要的可靠度,首先必须按可靠性设计法进行设计。这对产品的设计来说,是一项新的任务要求,也是设计者应该掌握的技术方法。本书内容包括固有可靠度设计、维修性设计、人机工程设计、冗余法、预测法、使用可靠度设计等可靠性设计法。对这些方法的阐述大多以可靠性理论和实际经验为依据,同时,也包含有对常规设计方法的重新评价。

本书在着重阐述可靠性设计方法的基础上,对产品的可靠性维护和修理作了相应的分析。因此本书可作为各行各业工程技术人员的学习和参考读物。

日科技連信頼性工学 シリーズ 第6巻

信頼性设计

川崎義人 著

日科技連出版社

1985年3月

可靠性技术丛书-6

可靠性设计

[日] 川崎義人 著

王熙年 夏曼辛 译

张英会 校

责任编辑: 夏曼辛 封面设计: 方 芬

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

高等教育出版社照排中心照排

三河燕郊印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 $\frac{1}{32}$ ·印张 8 $\frac{1}{8}$ ·字数 173 千字

1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 0,001-4,370 定价: 4.20 元

ISBN 7-111-01405-7/TB·62

译 序

可靠性是衡量机电产品质量的一项重要标准。随着工业技术的发展,产品性能参数日益提高,结构日趋复杂,产品的使用场所更加广泛,环境更为严酷,因而,产品的可靠性问题越来越突出。从50年代起,国外就兴起了可靠性技术的研究。可靠性技术的观点和方法,目前已经成为产品质量保证、安全性研究和产品责任预防措施不可缺少的依据和手段。

日本开展可靠性技术的研究和应用已有近30年的历史。其可靠性技术着重应用在民用工业产品上,尤其是和TQC(全面质量管理)结合,形成实用化的特点,使产品的可靠性有显著提高。日本专家认为高可靠的优质产品的实现,是长期积累的可靠性技术和严格的生产管理制度相结合的结晶,必须强调从设计、制造、管理到使用、维修的全过程的管理。

这套丛书总结了日本推广可靠性技术的经验,通俗易懂,实用性强。它是为指导日本的技术人员和管理人员应用可靠性技术而编写的一套工具书。全书共分15册,包括可靠性与维修性总论、数理基础、设计、试验、数据采集和处理、故障诊断、维修和管理等诸方面内容。

为了配合国内普及和推广可靠性技术,我们决定翻译出版这套丛书,供从事产品设计、试验、管理、维修以及产品开发研究的各种专业人员和各级管理干部借鉴和应用。这套丛书同时也可作为国内高等院校可靠性课程的教材,并且对

IV

从事可靠性研究的高等院校教师、科研人员和研究生也有参考价值。丛书由国家机械工业委员会机械科学研究院组织翻译、校审。全套丛书将陆续与读者见面，希望能对各单位开展可靠性活动有所裨益。

由于我们水平有限，难免有不足和谬误之处，欢迎批评指正。

在此，对日本科技联盟的慷慨赠书表示感谢。

国家机械工业委员会 科 技 司
机械科学研究院

一九八七年二月

《可靠性技术丛书》出版序言

1958年日本科技联盟内设立了可靠性研究会，至今已经历了近四分之一世纪的岁月。在这个期间，通过各种研究班和专题讨论会等普及活动，以及由于有关协会、学会及企业的努力，已经发表了大量有关可靠性的应用报告和研究成果。可靠性的观点和方法已经成为质量保证、安全性保证、产品责任预防等不可缺少的依据和手段，因此受到各方面的广泛关注。

日本科技联盟过去所进行的卓有成效的可靠性教育和普及活动，不仅有研究班和专题讨论会，还有关于可靠性的出版活动等。但遗憾的是，有些活动不完全是有组织地进行的。在最近的可靠性活动的高潮中，使人不免稍有动手已晚之感。为了扩大活动的领域，日本科技联盟出版社决定出版《日本科技联盟可靠性技术丛书全15卷》。

与所谓的可靠性技术专著相比，这套丛书的特点是具有更广泛的基础知识，尽可能简明易懂，讲述比较详尽，以适应以初学者到技术人员，乃至管理干部等各类人员使用的要求。此外，为了使从事计划、设计、生产、质量管理、维修等各项业务，以及电子、电机、机械、精密仪器等各主要行业的人员喜欢阅读本书，执笔者邀请了各方面经验丰富的专家参与筹划。

这套丛书的另一个特点是，为了便于用作现场常备的参考书，并且携带方便，故采用32开本。读者可以分册阅读，容易安排时间，并掌握其最基础的知识。

前 言

可靠性设计是与产品设计同时进行的。它的任务是排除一切不可靠性主要因素和危险事故发生的可能性，并拟定为了必要的事故预防而采取的事前措施。产品的固有可靠度，可通过实行这一事前措施来达到所期望的目标——使用可靠度。

本书认为，“可靠性设计”的范围不能局限于传统的设计概念和“设计部门业务”这样的管理分类范围，而应包含为实现可靠性所必要的设计和全部计划项目。以前认为是属于设计以外的各领域的事前可靠性计划和政策规划等，也应包括在重要的可靠性设计项目之中。但是，在一本书中不能包揽所有的必要项目，而只能阐明其部分内容。由此，本书仅限于在传统的产品设计和生产设计的意义上阐述其具体的设计要点，主要是根据系统设计的观点，把着眼点放在使用可靠度设计上。因此，这就意味着舍弃属于固有可靠度范围内的大部分主要设计内容。这是为了弄清可靠性设计全貌，不得已而进行的处理。

第一章绪论是阐明在可靠性设计中必要项目的梗概。

第二章主要阐述概率论的基本定理，是以后各章所用数学的基础。这里难免有点过于深入到基础内容。但是，对于可靠性问题的实质仍有了解得不够详尽的部分，这些部分可以说是重要研究内容之一。分布函数的内容仅限于阐述与各章基本内容有关的部分，而略去统计方面的推导和验证。

第三章阐述不可修复系统组成的基本模型，即最低单元

的贮备系统。重点试图放在某些典型的内容上。其目的是将其扩大到更复杂系统的有关问题上去。如本章所述,在模型扩大或复合系统等的要求方面,往往会感到棘手。对于这种情况,由于目前计算机的发展,再不需要为繁杂的计算担忧了。但为了尽快掌握模型的动态情况,可用第四章的近似计算方法。

第五章记述对于第三章可修复系统模型的静可靠度以及考虑修理因素后的动可靠度模型。由于修理或维修的介入,使冗余产品的可靠度急剧增高,这是在设计上是值得注意的。本章还阐述了概率论中的再生理论,以及按此理论所表示的修理系统的一般性质。

第六章介绍广泛应用的马尔可夫模型,它是可靠度模型的分析方法之一。用这种方法使可靠性理论的作用进一步扩大,从而使一般概率论中极为复杂的问题变得容易解决了。

第七章主要讲述系统结构中最基本的双部件系统模型。显然,在实际中,由于各种环境条件的不同,可以得到一些各具差异的模型。在本章中,为了与马尔可夫模型的简易性进行比较,附有所用分布函数的一般解法。

第八章阐述有关维修和维修性的论点,把修理系统扩展为维修系统来处理。由于能进行事后(可修复系统)、预防、监视等各种各样的维修,所以,实际的系统可靠性问题,通常是极为复杂而难解的问题。本章所述主要是完善和阐明这个问题的论点和设计程序。

第九章是有关可靠性预测的概述。预测值不能说是设计的整个可靠性活动的目标值。目前,预测精度的高低,与其说是取决于预测方法的好坏,不如说是取决于合适的资料。附带说明一下,汇集供预测用的合适资料是整个可靠性技

术的大问题。

由上可知，本书由于总体编写上侧重于论点的解说，因而从实际的观点看略偏重于理论。作者敢于断然作此编排的理由在于：这些理论是许多先辈们以解决繁杂的实际问题为目的，经过尽心竭力的研究和开发而取得的结果。因此，这些成果不仅用于设计方面，而且可解决所面临的一些问题。不利用这些成果确实可惜。若能汲取潜藏在成果深处的前人智能，我们将在知识领域的方法方面获得重要财富。

川崎義人

1985年1月15日

缩 写 词 表

AEG	主动元件组
AGREE	电子设备可靠性咨询小组
cdf	累积分布函数
CFR	恒定故障率
DFR	递减故障率
FMEA	故障模式影响分析
FTA	故障树分析
IFR	递增故障率
MDT	平均休止时间
MPM	监视维修
MTBF	平均无故障工作时间
MTTF	平均寿命
MTTR	平均修复时间
pdf	概率密度函数
SPM	统计预防维修

目 录

译序

《可靠性技术丛书》出版序言

前言

缩写词表

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 可靠性设计的目标确定	2
1.3 可靠性设计法的内容	3
1.3.1 固有可靠度设计	4
1.3.2 人机工程设计和维修性设计	7
1.3.3 冗余法	8
1.3.4 预测法	9
1.3.5 使用可靠度设计	9
第二章 可靠性的数理基础	11
2.1 概述	11
2.2 概率论的基本定理	11
2.3 随机变量和分布函数	15
2.3.1 随机变量的定义	15
2.3.2 随机变量的独立性	17
2.3.3 特征值	18
2.4 可靠度函数的数学定义	21
2.4.1 分布函数和可靠度函数	21
2.4.2 各种分布函数的特征	26
第三章 可靠度模型	30
3.1 概述	30
3.2 串联系统	31

3.3 并联系统	38
3.4 n 中取 k 系统 (表决系统)	41
3.5 $m \times n$ 并串联系统和 $n \times m$ 串并联系统	43
3.6 简单模型一览表	46
3.7 系统可靠度的一般算法	48
3.7.1 组合事件计数法	49
3.7.2 通路追踪法	51
3.7.3 分解法	53
3.7.4 桥式系统	59
3.7.5 梯式系统	64
3.8 待命冗余系统	69
3.8.1 待命冗余系统概述	71
3.8.2 双部件待命冗余系统	76
第四章 系统可靠度特征值的近似计算	90
4.1 概述	90
4.2 串联和并联系统的组合系统	90
4.3 k/n : G 系统、串联系统和并联系统	93
4.4 指数函数的近似	99
第五章 可修复系统	103
5.1 概述	103
5.2 更新过程	104
5.3 寿命和剩余寿命	109
5.4 可修复系统的性质	110
5.5 更新函数的计算例	115
5.5.1 指数分布的情况	115
5.5.2 Γ 分布的情况	115
5.5.3 正态分布的情况	117
5.5.4 多部件系统的情况	118
第六章 马尔可夫过程	122

6.1 概述	122
6.2 不可修复系统	126
6.2.1 串联系统	126
6.2.2 双部件系统	127
6.2.3 3 部件系统	132
6.2.4 $2/3:G$ 系统	135
6.3 在可修复系统的应用	137
6.3.1 修复概率的引入	138
6.3.2 单部件可修复系统	139
6.3.3 串联系统	141
6.3.4 n 部件系统	143
第七章 双部件可修复系统	148
7.1 概述	148
7.2 双部件可修复系统可靠度的一般表达式	148
7.2.1 双部件特征值相等的情况 (情况 I)	150
7.2.2 待命部件不进行中间修理的情况 (情况 II)	155
7.2.3 双部件具有优先顺序使用的情况 (情况 III)	156
7.3 双部件系统的可用度	158
7.4 双部件系统的分布函数解析法	163
第八章 维修系统	174
8.1 概述	174
8.2 维修概要	174
8.3 维修系统的设计要点	175
8.3.1 维修性	176
8.3.2 维修策略	178
8.3.3 维修管理	178
8.4 时间计划维修系统	179
8.4.1 定期维修 (日历定期维修)	179
8.4.2 计时维修 (寿命定期维修)	181

8.5 随机时间间隔系统	183
8.5.1 IFR 特性	190
8.5.2 随机时间间隔维修系统的一般性质	195
8.6 最佳预防维修	198
8.6.1 计时预防维修 (寿命定期维修)	198
8.6.2 定期预防维修 (日历定期维修)	203
8.7 状态监视维修	207
第九章 可靠性预测法	213
9.1 概述	213
9.2 预测法的种类	215
9.3 简略预测法	216
9.3.1 产品类比法	217
9.3.2 阿莱斯法	219
9.3.3 可靠度比较指数法	221
9.4 MIL-HDBK-217B 法	221
9.4.1 217B 详细应力法	223
9.4.2 AEG 法	224
9.5 维修时间的预测	227
参考文献	229
汉英名词对照	233
附录	
附录 1 多部件系统 (6.3.4 项)	234
附录 2 随机时间间隔维修系统的一般性质 (8.5.2 项)	239
索引	243

第一章 绪 论

1.1 概 述

产品设计者的任务就是，通过对各种产品功能要求的轻重缓急作出判断，通过相互协调和对销售行情的了解，设计出经济的产品。

自从可靠性作为与产品性能同等对待，或是优先考虑的项目受到重视以来，为了在产品中得到所需要的可靠性而进行的**可靠性设计**，就成了一项新的任务要求。常规的设计业务范围，通常是根据产品设计说明书，完成制造、施工或试验、检查所必需的图纸和指导书等。在设计过程中可靠性即使受到重视，也是作为次要内容，而且只在有限的范围之内加以考虑，其效果很难预料。

产品的可靠度，是随着**使用条件**，即工作特性、操作、维护、运行和政策等的影响而变化的值。另一方面，各相关学科的发展，有可能使可靠度得到明显的提高。设计者对**产品性能所应负的责任**，就是对**产品性能能正常地发挥负责**。然而，若只是固守上述原来的业务划分范围，就不可能对产品可靠度的实际效应尽责。

如果把可靠性设计作为一项新的内容加给常规的设计部门，则对超出这个业务划分范围以外发生的问题，如何能明确其责任呢？考虑到必要的工作内容和责任的重要性，解决的方针就是一个，即从产品设计开始，企业的内外，包括QC、IE、可靠性管理、操作人员、维护人员、技术服务和销售管理

等各方面的专家,以及用户方面技术负责人等共同结合起来参与设计活动。然而,上述参与人员不仅仅是交换意见和提供信息,而且要根据设计的要求,参与筹划为促使各责任部门达到可靠度目标值的准备、计划和实施。这意味着贯穿企业内外的可靠性活动,应该从产品设计开始之时就须同时进行。

这意味着,可靠性设计法是设计者或设计部门奉行的可靠性技术体系,同时也应该是推进设计计划的基本原则。狭义的产品设计只从“考虑”使用条件的立场出发,而可靠性设计则是不仅考虑使用条件,还要考虑到管理和使用政策方面的所谓“设计并制定”的积极立场。

1.2 可靠性设计的目标确定

一般来说,产品设计的目标应该是使用说明书中写明的特性。但是,除特殊用途的产品以外,反应在产品使用说明书中的情况很少。对此,作为变换手段,普遍是制造厂一方面考虑用户的意向和反应、竞争企业的动向、技术水平的现状和将来发展的情况等,同时再充分考虑到本企业的意向和目的等来决定。这种办法对一般性能的产品来说,大概是足够的了。

如前所述,可靠性设计计划活动、从可靠性说明书的制定就开始了。在此说明书中最基本的项目就是规定设计目标值(可测定的可靠度特性值),以及具体阐明与实现此目标值的使用环境有关的条例和措施。

目标值一般是以有关方面同意为前提,采用如后所述的预测值。这个值就是各有关方面所面临的进行工作的数值目标,所以,应该注意此值的高低,以不影响完成可靠度的信

心为原则。

作为“努力目标”公布之后，在一般情况下，过高的目标值应按价值分析方法及早进行分割。作为各有关人员所关心的是，随着计划的实施，参照预测值的修正量，应该具有进行适当修订的灵活性。

在制定可靠性说明书时应避免记述非计量的、定性的可靠性要求[○]。

对于较大系统和多部件组成的产品，作为确定整体目标值的基础，必须对子系统等的次级产品进行各个目标值的分配。这称为可靠度分配。

分配的原则是：对于那些技术方面复杂的部分，尤其是性能要求高的构成部分，允许取低限目标值；而对于原理方面简单、已有充分使用经验的构成部分取高的目标值。整体的目标可靠度是各部分分配目标值的积。因而，随着设计计划的推进，显然，这些值要变化和修正。

1.3 可靠性设计法的内容

为完成符合于前述内容的可靠性说明书和目标值的设计图，以及设计指导书等的纯技术方法和一系列的程序，称为可靠性设计法。

其主要内容表述如下：

- (1) 固有可靠度设计；
- (2) 维修性设计，人机工程设计；
- (3) 冗余法；
- (4) 预测法；
- (5) 使用可靠度设计。

○ 曾经有仅记述“具有最高可靠性”的时代。

本节所述诸方法，大多是以可靠性理论和实际经验为依据的，同时也包含有对常规设计法的重新估价。

1.3.1 固有可靠度设计

固有可靠度是反映产品对周围环境的强度，本应具备的特性值。设计时，它的值是根据所选择的产品构成、部件结构和性能等来确定。

对于不进行维修和修理的组合部件构成的产品，其可靠度可用**乘积法则 (串联系统)**计算。为了表示这个法则在最简单情况下的数学模型，设：

$R, r_i (i=1, 2, \dots, N)$ —— 产品和构成部件的可靠度；

λ, λ_i —— 产品和构成部件的故障率；

n_i —— 构成产品的各个部件的数目。

假设可靠度为指数型，则下式成立：

$$\left. \begin{aligned} R &= \prod_{i=1}^N r_i \\ \lambda &= \sum_{i=1}^N n_i \lambda_i, N = \sum n_i \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

如取 $\lambda_i = \lambda_0$ ，则

$$\lambda = N\lambda_0 \quad (1.2)$$

如这些公式所示，随着部件数 N (称为**组合度**) 的增加，故障率单调增加，可靠度下降。另一方面， N 值大多是由产品所要求的功能而确定的值。所以，设计时使此值缩小的能力是有限度的。

设计结构时，与此原理完全相反的方法是冗余法 (将在以后叙述)。其他的方法主要是有关组成部件和材料的选择，将加以概述。

(1) 简单化和标准化