

电子产品可靠性技术丛书

# 可靠性设计

中国电子产品可靠性与环境试验研究所

可靠性技术丛书

# 可靠性设计

潘吉安 编著

中国电子产品可靠性与环境试验研究所

存院图书馆  
傅佩琛  
87. 17/11

## 内 容 简 介

这是一本论述整机和系统可靠性设计原理与工程应用的工具书，主要包括下述三方面的内容：

(1) 有关产品的可靠性定义和分析、可靠性分配、可靠性预计、可靠性的评定方法及其数学原理，以及可供工程应用的完整的数据和表格。

(2) 为提高产品的可靠性，在设计上应采取的技术措施以及与可靠性有关的设计技术，如器件的选择和降额运用、贮备设计、各种耐环境设计、人类工程学设计和容差设计，以及抗辐射设计与电磁兼容性设计，论述了各种设计原理和运用原则。

(3) 为推广和应用可靠性设计技术，论述了在管理上应采取的标准化和设计审查等保障措施。

主要读者：产品研究与设计的工程技术人员，从事可靠性工作的人员以及大专院校的教师和研究人員等。

---

**出版发行：**华飞科技出版印刷公司

(广州市1252号信箱9分箱)

**印 刷：**华飞科技出版印刷公司印刷厂

**出版日期：**1986年10月

---

广东省内部刊物登记证第184号

# 出版说明

可靠性工程学是国外五十年代逐渐发展起来的新兴学科，至今已在电子工业、航天与航空工业及自动化工程等领域广泛应用。可以说，现代化技术、现代化工程系统、现代化生产的每一项实际成果都离不开可靠性技术。这就是可靠性工程迅速发展的根本原因。

我国自六十年代初引进了可靠性技术以来，在电子工业和宇航工业领域里已初步形成可靠性技术研究与管理体制，可靠性技术普遍应用于国防现代化、科学技术现代化、工业生产现代化等方面，取得了可喜的成效。

为了较全面系统地把可靠性工程技术知识介绍给广大读者，中国电子产品可靠性与环境试验研究所组织力量集体编写了《电子产品可靠性技术丛书》共九册。即：可靠性概论、可靠性数学、可靠性设计、维修性、环境试验、可靠性试验、可靠性与环境试验设备、可靠性物理、可靠性管理等。

丛书的对象主要是电子工业方面的工程技术人员、科研与教学人员、技术管理人员。而可靠性工程学的基本理论与知识，同样也适用于其它行业。

《电子产品可靠性技术丛书》编委会

1986年6月

## 前 言

本书是为需要掌握可靠性设计技术的工程技术人员而写的。是一本关于整机和系统可靠性设计和工程应用的工具书。

它不是仅仅一般地介绍可靠性设计的概念和方法，而是通过本书学习，不但可以掌握各种可靠性定量化方法的数学原理，而且还能达到实际应用的要求。

本书在内容选取上有下列考虑：对读者应具备的概率论和数理统计以及可靠性的基础知识均未收入，但对产品可靠性设计有用的公式和数表却作了全面的收集和简明的归纳；另外，有关可靠性试验方法、可靠性鉴定和抽样检验方法，因国内已有标准和专著，这里均不予重复，而对整机和系统可靠性设计有关的尚未彻底解决的问题进行深入的讨论和补充。

这里对选定的内容是以产品研制进程的顺序编排的，既照顾到不同设计阶段可靠性定量活动的前后衔接，又能使每一章节的内容自成体系，这样可为单独了解某一内容的读者提供方便。

本书内容共分十个部分，安排如下：

第1章，通过对可靠性范畴和专业划分的讨论，希望读者能掌握可靠性设计技术中的重要概念和树立正确的设计指导思想。

第2章，要求在详细分析设计要求和设计任务书的基础上，给出产品故障和可靠性的确切定义；介绍构造产品可靠性模式和进行故障模式与影响分析方法（FMEA）。

第3章，讨论适用于对系统可靠性预计与评定的计算方法

法。

第1章，讨论进行系统可靠性指标分配的数学原理、采用的方法和应考虑的问题。

第5章，讨论方案阶段可靠性预计的方法、所用数据的收集和处理。

第6章，介绍设计阶段的可靠性预计方法、所需数据和各种因子数表的归纳结果。

第7章，关于各种与可靠性有关的设计技术：器件的选择和降额运用、贮备设计、各种耐环境设计、容差与漂移设计、抗辐射设计、电磁兼容设计及人类工程学设计的原理和运用原则。

第8章，讨论关于产品可靠性的评定方法，重点讨论了成败型、指数型和正态型数据可靠性的评估方法，并讨论了工程评定数表的编制原理和应用。

第9章，提出设计阶段的标准化、设计阶段的划分与可靠性活动规程、可靠性设计审查和选用器材等方面的管理技术。

最后一章是附录。列出可靠性设计和工程应用中所需的各种数表，并列有五十道习题和解答，便于可靠性工程设计者应用和掌握设计技术。本书最后列出主要参考文献。

本书可为整机和系统工程技术人員掌握可靠性设计原理及工程应用、制定有关方法标准之用，还可作为举办可靠性设计技术课程与学习班的参考教材。笔者凭借自己专职从事整机可靠性设计的研究和积累的成功经验，特写成这本较为系统、完整的书，能适应当前应用之急需。但由于本书涉及的知识面广和笔者水平所限，虽经多次修改，错误在所难免，恳请各位专家和同志们批评指教。

在写作本书中，曾得到本单位领导和许多部门的指教与支

DA105/52

持，特别是贾温海工程师、王铁铮高级工程师、彭定研究员、俞大光教授对本书进行了审查和审定，或提出增补等建议；附表F的计算得到航天部一院计算站的支援；最后的增删和定稿则得到电子部五所马怀祖总工程师的指导以及五所其他同志的支持。在此一并致谢。

编著者 1986.1

**编委会名单（以姓氏笔划为序）**

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 马怀祖 | 王启裕 | 刘瑞生 | 朱天月 | 江登恕 |
| 何国瑞 | 陈昭宪 | 吕钟瑜 | 陈浩华 | 杨晋泰 |
| 徐福祯 | 盛志森 | 曾纪科 | 蒋明元 |     |

# 目 录

## 第1章 导 论

- 1.1 可靠性范畴..... (1)
- 1.2 可靠性设计的指导思想..... (4)

## 第2章 产品的可靠性定义与分析

- 2.1 产品的可靠性定义..... (10)
- 2.2 产品的可靠性模型..... (15)
- 2.3 故障模式及影响分析..... (20)

## 第3章 系统可靠性计算方法

- 3.1 系统可靠性计算方法概述..... (25)
- 3.2 简单串、并系统及冷贮备系统可靠性的计算  
..... (26)
- 3.3 逻辑代数与真值表法..... (29)
- 3.4 故障树分析法 (FTA) ..... (34)
- 3.5 考虑退化性失效时可靠性的计算..... (40)
- 3.6 贝叶斯方法..... (49)

## 第4章 可靠性分配方法

- 4.1 可靠性分配的基本考虑..... (53)
- 4.2 考虑复杂度和重要度的分配方法..... (55)
- 4.3 按预计失效率等比例分配法..... (59)
- 4.4 按系统可靠性框图进行分配的方法..... (61)
- 4.5 在限制条件下的可靠性分配..... (67)

## 第5章 设计方案阶段的可靠性预计

|     |                |      |
|-----|----------------|------|
| 5.1 | 可靠性预计的目的和方法    | (70) |
| 5.2 | 相似设备法及所需数据     | (72) |
| 5.3 | 相似电路法及其数据      | (75) |
| 5.4 | 失效率累加法及所需数据    | (79) |
| 5.5 | 失效率算法          | (84) |
| 5.6 | 方案阶段可靠性预计的环境因子 | (88) |

## 第6章 设计阶段的可靠性预计

|     |                 |       |
|-----|-----------------|-------|
| 6.1 | 设计阶段可靠性预计方法的特点  | (91)  |
| 6.2 | 元件应用失效率预计法的基本原理 | (92)  |
| 6.3 | 分立半导体器件应用失效率的预计 | (104) |
| 6.4 | 微电子器件应用失效率的预计   | (114) |
| 6.5 | 电容器及其他元件失效率的预计  | (119) |
| 6.6 | 部件可靠性的预计        | (122) |

## 第7章 可靠性的设计技术

|     |               |       |
|-----|---------------|-------|
| 7.1 | 器件的选择和降额设计    | (126) |
| 7.2 | 贮备设计          | (134) |
| 7.3 | 容差与漂移设计       | (141) |
| 7.4 | 耐环境设计         | (159) |
| 7.5 | 抗辐射设计         | (168) |
| 7.6 | 电磁兼容性设计       | (179) |
| 7.7 | 人类工程学设计与维修性设计 | (200) |

## 第8章 可靠性评定方法

|     |           |       |
|-----|-----------|-------|
| 8.1 | 可靠性评定和置信度 | (203) |
|-----|-----------|-------|

|     |             |       |
|-----|-------------|-------|
| 8.2 | 评定方法与分布类型   | (205) |
| 8.3 | 成败型数据可靠性的评定 | (214) |
| 8.4 | 指数型产品可靠性的评定 | (217) |
| 8.5 | 正态型数据可靠性的评定 | (223) |
| 8.6 | 系统可靠度综合方法   | (233) |

## 第9章 设计阶段的可靠性管理

|     |                  |       |
|-----|------------------|-------|
| 9.1 | 可靠性的标准化管理        | (239) |
| 9.2 | 各设计阶段的可靠性活动      | (244) |
| 9.3 | 可靠性设计审查          | (246) |
| 9.4 | 设计中选用元器件的规定和注意事项 | (249) |

## 附录 附表、习题与解答

|     |                  |       |
|-----|------------------|-------|
| 附录A | 各类分立元器件通用失效率等数据表 | (256) |
| 附录B | 成败型数据可靠性的置信下限    | (269) |
| 附录C | $\chi^2$ 分布分位点数表 | (281) |
| 附录D | 指数型可靠度置信下限       | (283) |
| 附录E | t(学生氏)分布分位点数表    | (289) |
| 附录F | 正态型数据可靠度置信下限     | (291) |
| 附录G | 习题与解答            | (300) |

## 参考资料

# 第1章 导 论

工程设计者必须掌握可靠性设计技术的基本概念，并树立正确的的设计指导思想，这对于提高设计的可靠性水平关系极大；同时也可使读者明确本书大体内容及其与其他著述的关系。因此，在本章中首先讨论一下可靠性范畴和可靠性设计指导思想这两个问题。

## 1.1 可靠性范畴

为使产品在使用中不发生或少发生故障，能完成其规定的任务，人们进行了种种的努力，比如采取一切科学、工程技术和管理的办法及措施等。可靠性就是关于这方面的经验总结。可靠性属于应用科学技术的范畴，涉及到各个领域。

众所周知，所谓产品的可靠性，就是在规定的条件下、在规定的时间内、产品完成规定功能的概率。可靠度是可靠性的一个定量指标。

研究电子产品可靠性的具体对象，包括元器件、整机和系统三大类，这三者之间是既有联系又相区别的。元器件的可靠性是整机和系统可靠性的基础，就研究内容和方法上来说，整机和系统可靠性与元器件可靠性区别较大。这里讨论的是有关整机和系统可靠性的设计技术。本书内所提及的“产品”就是指整机或系统，或是无线电电子设备。

作为一个产品，它总是在一定的条件下，经历了设计研究、生产制造、维护使用等各个阶段。在每一阶段中都有造成产品故障的可能和原因，以及可进行改善的办法，因而每一阶

段都有相应的可靠性内容。即有可靠性设计技术，生产制造中的可靠性和质量控制，维护使用的可靠性等。

可靠性设计技术是研究产品在设计过程中，应采取那些措施使产品可靠性提高，并达到可靠性指标要求。

生产制造的可靠性问题，主要是质量管理和质量控制问题。

在充分考虑到现有的生产制造条件下，一项设计所赋予产品预期的可靠性，称为“潜在可靠性”。它究竟能否实现，则有待于生产制造阶段中，通过质量控制对逐项设计要求给予保障。例如，装机的元器件（包括材料），其规格、性能、有效期、质量水平等是否符合设计要求，有否严格的鉴定和检验；生产制造的工艺、设备和操作方法，以及环境等是否能够保障产品达到规定的要求；产品在装配、调试、老化筛选、检验试验以及产品包装等环节中，对影响可靠性的因素是否都得到了控制，等等。

产品所具有的可靠性，即在生产制造中实际形成的产品可靠性，是一个客观存在的本身的可靠性，称其为产品的固有可靠性。

产品在规定环境条件、维护使用条件下，产品实际使用的可靠性称为现场使用可靠性。对于一个确定的产品，其现场使用可靠性是与维护使用方法及使用环境条件密切相关的。如果产品的维护、使用方法规定得合理，产品的现场使用可靠性可以高于产品的固有可靠性。因此控制产品的使用环境条件，制定严格而合理的维修、操作和检测程序、使用方法，研究部件的更新，提高产品的使用效率，都是提高产品使用可靠性的重要内容。自然它应是产品维护使用人员的主要研究课题，同时也是产品设计人员在产品设计中必须考虑的重要课题。

总之，产品的可靠性与产品所经历的设计、生产制造和维护使用各个阶段密切相关，每一阶段都很重要，但能够统贯全局、起关键作用的却是产品设计阶段，这也是本书所讨论的主要内容。

关于可靠性范畴的划分，可以从产品的类别及产品所经历的不同阶段来考虑；也可以从学科的、工程技术和管理的角度来分析。

在确定产品可靠性的定义和进行可靠性指标分配、可靠性预计、可靠性评定、可靠性试验和鉴定方案时，会遇到一类专门的数学内容——可靠性数学。它固然是概率论、数理统计、最优化方法等数学知识在可靠性方面的应用；而同时又因对可靠性问题的深入研究开拓了数学范畴的新领域，由于它溶合了大量的工程技术方面的知识和处理方法，因而有其新的特点。可靠性数学和理论的发展，固然需数学界的努力，但重要的还需工程技术人员掌握必要的数学工具，对工程技术问题进行必要的数学处理和研究。本书将对整机和系统的各种可靠性数学方法和原理进行讨论。

可靠性技术中另一个重要领域是可靠性试验和故障分析技术。故障分析技术从学科的范畴来讲也称为故障物理。

可靠性试验是为了评估和分析产品的可靠性而设置的试验。通常包括：产品对环境的适应性试验——环境试验；产品的工作及贮存寿命试验；以及在不同的研制阶段进行的研究试验、筛选与老化试验、可靠性鉴定或验收试验。另外，从试验对产品性能的影响程度来看，其又可分为破坏性试验和非破坏性试验。

产品的设计是否能适应预定的环境和满足可靠性指标，必须通过各种可靠性试验进行鉴定或考核；有时还需通过试验来

暴露产品在设计和工艺中存在的问题，通过故障分析确定主要的故障模式和发生的原因，进而采取改进措施。可靠性试验不仅是可靠性活动的重要环节，也是进一步提高产品可靠性的有效措施。可靠性试验和故障分析技术在广泛的应用中才能不断发展。

可靠性所包括的范畴是极其广泛的，除了学科和工程技术之外，还包括管理方面的内容，即可靠性管理。在产品的可靠性活动中，需要制定和遵循可靠性技术标准、可靠性实施规划、可靠性设计审查和其他一些管理措施。同样，可靠性管理对不同类型的产品和产品的不同阶段，也有不同的内容，本书重点讨论设计阶段的可靠性管理。

## 1.2 可靠性设计的指导思想

可靠性设计技术是在产品的研究和设计中采取相应的措施，使产品的可靠性提高并达到可靠性指标的一门技术。在研究和设计中，提高产品可靠性而采取什么措施，并不是设计者完全不了解的，但在总结产品可靠性不高的原因时，往往会因设计的指导思想不够正确，或是不能合理的处理诸项技术指标间的关系而产生疑难。为完成设计任务，设计者很重视定量的性能指标（称硬指标），但容易忽视作为一般要求的软指标。因此，提出或确定先进而又能够达到可靠性定量指标，是提高设计可靠性的最重要措施。作为一项具体的设计，它总是在现有技术水平、研制周期、经费、体积重量以及环境条件等限制下，既满足性能指标又满足可靠性指标而实现的，也就是说，它是对各项设计要求或技术指标的一种综合与平衡。因此，在设计之初，必须全面对诸项设计要求和指标进行充分的分析和论证，以求树立正确的设计指导思想，而且不可顾此失彼。下

面就谈谈建立正确的可靠性设计指导思想的主要方面。

(1) 要充分估计现有的技术水平

这个问题应与研制周期一并考虑。在限定的时间内，在现有的器材、线路和工艺水平下，研究出超现代水平的全新技术是困难的。新技术的采用可能有利于满足性能指标和其他设计要求，但不可过于追求，必须充分估计在限定的研制周期内可能达到的实际水平。从可靠性、生产和使用的角度出发，应该尽量采用成熟的、定型的、标准的原材料、元器件、电路和工艺来完成设计。

(2) 准确掌握产品在运输、贮存及使用中所遇到的环境和产品所处的状态

环境条件一般包括下述几个方面：

- ① 气候条件：温度、湿度、气压、盐雾及尘埃。
- ② 机械条件：振动（包括变频振动）、冲击、线加速度、噪声等。
- ③ 生物条件：霉菌、昆虫、鼠类等。
- ④ 电磁条件：电场、磁场及电磁辐射。
- ⑤ 核辐射条件：X射线、 $\gamma$ 射线、中子、质子、电子等辐射。

上述这些条件并不一定为每一产品所经历，重要的是设计者应明确产品实际所经历的是什么环境条件，以及产品的各组件对什么环境最敏感。设计者通过选取合理的设计方案和对各种耐环境设计技术——热设计、密封设计、减振设计、抗干扰设计和抗辐射设计技术的应用，就能使产品增强对环境的适应能力。

环境条件对产品性能和可靠性的影响与其所处的状态有关。一般，在工作状态及综合环境条件作用下，其影响最为严重。

设计上要作环境适应性考虑，同时应对选用的重要元器件或组件进行环境摸底试验。环境试验与性能试验之不同点在于它的随机性和潜在性。为了充分暴露产品存在的问题和了解设计余量，还应对产品进行过应力试验以至破坏性试验。样机是设计第一次在工程上实现，更应进行环境试验，以便尽早地发现设计中的薄弱环节和存在的问题。

### (3) 设计应满足工艺制造和调试检测的相互要求

设计中，对影响产品可靠性的重要工艺，如电气连接（接触、焊点等）、表面处理（金属化孔、电镀等）、灌封和密封以及工艺筛选和高温老化等应有规定。反之，制造工艺对设计也有一定的要求，如工艺过程中的高温环境，设计时是否已作了考虑？这些方面虽然设计者是熟悉的，但是否在设计的前期和方案阶段就进行这种考虑确是容易被忽视的。

另外设计也应满足调试、检测及维护使用中的各种要求。如设计是否提供了方便的测试点，更换和调整的部位是否便于实施，并不致牵动或少牵动其他部件等。设计应综合考虑产品的工艺性、维修性和可靠性，都要考虑调试、检测、维护和使用中涉及的人与产品的关系，有关这方面的内容称为人类工程学设计；如何保证操作人员、设备和场地的安全的有关内容就称为安全性设计。

### (4) 可靠性定量活动应贯彻产品的研究和设计的始终

为保证产品设计时所考虑问题的全面性、诸项设计要求综合的合理性和满足可靠性定量指标，须在产品设计过程中进行一系列的可靠性定量活动；产品设计要求的分析和产品可靠性的具体定义，可靠性指标的确定和分配，方案和设计阶段的可靠性预计及可靠性论证等。

产品的设计要求或设计任务书，固然是设计的依据，但有时它并不能提供设计所需的全部条件，因而有待设计者根据产品的用途、使用场合和要完成的任务等要求的分析，给出产品可靠性、故障或失效的具体定义，确定产品的可靠性指标值，并得到有关部门的认可后，才能进行设计工作。

产品的可靠性指标确定之后，应进行可靠性指标的分配。所谓可靠性分配，就是把产品的可靠性指标按一定的考虑和方法分配给子系统或下属组成单元，从而确定子系统或单元的可靠性指标之值。

设计方案确定之后，设计的可靠性能否达到预定的指标值，有待进行可靠性预计(或可靠性预测)。所谓可靠性预计，就是在产品的方案和设计阶段，根据设计方案和设计选用的组件或元器件的可靠性水平，考虑到设计选取的使用应力和环境条件，而预先估计出产品可能达到的可靠性水平。可靠性预计不仅可预测产品的可靠性数值，还能发现设计的薄弱环节和不合理部分，通过改进设计而使设计更加合理；可靠性预计也可判明可靠性分配的可行性。

可靠性预计是一种综合的方法，而可靠性分配则是一种分解的方法，两者应很好地结合，在设计的不同阶段反复进行。可靠性分配和可靠性预计相结合的反复进行过程，正是产品的可靠性设计的实施过程。设计方案，通过反复的可靠性设计而使其不断地得到完善和改进，可靠性水平随研制时间的延长而不断增长，从而实现了设计阶段的所谓可靠性增长。

对于一项设计的可靠性评价，不仅限于对设计图纸和书面文件的审核和评价，更应该通过试生产和制成品的可靠性试验来评价和验证。与可靠性预计相反，可靠性评定（或称评估）