

工程设计学丛书

第 三 册

# 可靠性设计

〔日〕坪内和夫 编

机 械 工 业 出 版 社

本书共四章，主要内容分三部分：第一部分阐述可靠性基础与可靠性设计问题；第二部分阐述人机结合的机械系统设计中的因素问题；第三部分阐述维修性问题。

《设计工程丛书》共有七册：设计工程基础、机械系统设计、可靠性设计、生产性设计、设计信息处理、自动设计和创造性设计。

### 設計工学シリーズ 3

#### 信頼性設計

坪内和夫 編

丸善株式会社

1971

\* \* \*

#### 工程设计学丛书 第三册

#### 可靠性设计

〔日〕坪内和夫 編

汪一麟 徐祺祥 吴天顺 译

何国伟 校

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092^{1/32}$  · 印张  $15 \frac{5}{8}$  · 字数 341 千字

1983 年 4 月北京第一版 · 1983 年 4 月北京第一次印刷

印数 00,001—12,600 · 定价 2.40 元

\*

统一书号：15033·5488

## 工程设计学丛书<sup>①</sup>出版序言

“设计工程”这个词，现在是不是已经被普遍承认为一个正式的工程术语了呢？关于这个问题说法不一。但是，设计工程(Design Engineering)这个词实际上在国内外工程界人士之间已经常常提到，在一些书刊上也已经出现。因此我想不久的将来它一定会成为普遍承认的通用术语，它的内容也会愈来愈明确。

什么是工程设计学呢？用一句话来说，我想下面的说法可能大体不错，即“为了找出高效率完成高质量设计的方法而对工程设计的本质进行研究的学问就是工程设计学”。

人们一向认为，好的设计人员是靠以经验为基础的技能训练培养出来的。其实不但设计，其他学问，体育运动等，凡造诣精深的，也都是如此。但必须承认，这一点对设计来说尤其突出。然而，由于有经验的设计人员过分固执曰“难言也”<sup>②</sup>的态度，致使许多年轻的设计人员屡屡重犯前人的错误。教育期间所花费的时间精力也容易造成很大浪费。为了减少这种浪费，建立起工程设计学，把对于设计来说至少无大错的思路记述下来，这样的努力恐怕不会是无用的。

这种广义的工程设计学对于一切工程领域都是适用的。而且不只是工程领域，对于自然科学研究、商业等，至少是

① 原文书名为“設計工学”，可译为设计工程。考虑到这套丛书的内容为各类工程均适用的设计方法学，故又译为“工程设计学”。全书正文中按照概念的不同而分别采用上述两种不同译法——编者注。

② 见于《孟子·公孙丑上》：“敢问何谓浩然之气，曰难言也”——译注。

其中的一部分，凡人们为达到某种目的而制定计划的场合都是可用的。但是，这样广义的工程设计学，不但要包罗整个工程界的，而且要包罗工程界以外的共性内容。单只包罗太广这一点就已经是个难题，再加上这样做就会过分抽象化，最后会变得难于理解和枯燥无味。基于这样的考虑，本丛书的主要范围确定为机械工程领域。这样做的原因之一是，编辑者和执笔者大部分是机械工程界人士；还有一个原因则是机械工程设计可以作为工程设计的一种典型。一切工业产品最终都要具体化为“硬件”，而实现“硬件化”就要靠机械工程。因此，即使从这个意义上讲，也可以把机械工程看作是一切工程的雏型。在机械工程学中一直有一门称为“机械设计”的学科，在这门学科里总是在“机械设计指针”、“机械设计守则”之类的名目之下多少谈到有关设计全局的一些问题。在这类“机械设计”教程内，学习的主要目的是掌握机械零件方面的知识。要求机械设计人员完成的设计必须是能够给出所有设计的具体的空间形状尺寸和材料的东西，一般表现为“设计图纸”的形式。在这种机械设计的最后阶段，对于机械零件的知识是不可缺少的，因此以机械零件为学习目标的“机械设计”的重要性是不言自明的。但是，不能否认，以往的“机械设计”对于设计的全局性问题的研究很不够，虽然可能培养出能从事细节设计的设计人员，但对于培养具有更广阔视野的设计人员来说就显得非常不够。在“工程设计学”中也有在这方面加以充实，对以往的“机械设计”加以增强的意思。

“工程设计学”的出现，不言而喻，是近年整个工业的迅速发展促成的。也就是说，工业大发展——包括好坏两方面的意思——的结果，社会对工业和工程学的要求愈来愈严

苛，工业和工程学对社会的责任愈来愈重大，因此，从事工业和工程学的人们，一方面要考虑远比过去错综复杂得多的许多条件，同时又必须尽心竭力追求“更好的设计”。

尤其不能忽视的是电子计算机的进展。过去是“人干的事情”，现在成了计算机的工作，这类事例很多。在“设计”工作中如有适于由电子计算机进行的部分，把这部分工作找出来。最大限度地利用电子计算机，而把人力集中于更适于由人进行的部分，这样做当然更合理。为此，我们必须对一向所说的“设计”工作进行一番彻底的分析，用新的观点加以评价。

考虑到“工程设计学”的这种重要性，我们筹划了这套工程设计学丛书的出版。由于“工程设计学”的体系还不十分确定，在这套丛书的筹划过程中，对于应当包括哪些内容，曾经颇费苦心，经过多次会谈商讨，最后决定其组成如下：

**一、工程设计学基础** 第一册《工程设计学基础》是为读者学习第二册到第七册作准备而编的。首先，在第一章“工程设计学绪论”中概述了人类社会与工业技术的关系、工程学和工程设计学的概略；在第二章“创造”中论述了工程设计中创造能力的重要性和创造能力的培养方法；在第三章“工程分析”中概述工程设计中的分析方法；在第四章“决策论”中概述工程设计判断的重要性和决策方法；在第五章“设计业务管理”中概述工厂中设计业务的分析及其管理；在第六章“自动设计”中概述了用电子计算机实现部分设计工作自动化的问题；在最后一章第七章“未来”中论述了未来的工程学和工程设计学在未来人类社会中应当完成的使命。

**二、机械系统设计** 这一册说明，把机械视为系统时会产生什么样的新问题，其设计如何进行。所选择的对象是系统

的效果表现得最明显的自动化装置。即具体地叙述从机械运动机构和流体机械等的基础系统起，到伺服机构、自动化工厂、自动化仓库、化工成套设备等复杂系统的综合设计。

**三、可靠性设计** 提出可靠性要求的背景是机器产品的复杂化和对机器功能要求的提高。本册对什么是可靠性进行了广泛的探讨，提出了消除产品故障的问题（狭义可靠性）、在考虑人的特点和局限性的前提之下如何使人对机器的运转和操纵更方便的问题（人机工程学）、机器工作不正常时容易修理的问题（维修性），并说明了在设计阶段如何考虑这些问题，考虑的思路和处理的方法。

**四、生产性设计** 机械产品的整个研制过程包括开发性研究、规划、试制品设计、产品设计、制造、试验、运转使用等，可以把整个过程看作生产系统。生产系统中有关生产率、可靠性的技术情报，经过再循环、集约化，在机械产品的设计阶段才算有了归宿。本篇特别注意于将生产系统中有关生产率的技术情报有效地集中于设计之中，包括了从系统工程学出发的基础篇以及以提高生产率为目的的多篇机械设计技术各论。

**五、设计信息处理** 第五册《设计信息处理》一书首先说明设计信息的特点及其流通和处理；其次详细介绍了作为设计输出信息的图纸，图纸管理以及图纸处理所用的各种器材；最后具体地介绍了设计技术情报的加工，存贮和检索的方法。可见，本册以工程数据处理（Engineering Data Processing）为主题，是一本说明设计技术人员对此应有的认识以及介绍具体运用设计情报的途径的启蒙书。

**六、自动设计** 所谓自动设计可以说是这样一种系统，在这里，设计过程中能用计算机做的事情尽可能用计算机，

省去人的日常事务，使技术人员尽可能从事创造性活动。自动设计的范围极广，本书以设计图形处理、设计计算、与生产的结合等三个问题为主要线索来说明自动设计的方法，同时还举出锅炉、核反应堆、飞机等具体设计实例作详细的解释，并试图对将来做一番展望。

**七、创造性的设计** 工程技术是创造性设计活动的产物。然而创造性地生活、创造性地工作并不是容易的事。

关于创造性，创造开发之类的书刊出版了不少，它们的内容尽是生吞活剥，已经说不上什么创造性。本书则是作者通过教育、研究的实践，记录了所遇到的多种多样的问题和情况，以及人们如何抓住问题加以变通和解决，从而展示了创造性设计的一个侧面。

工程设计学丛书的出版发行在日本乃是初次尝试。关于丛书的内容读者肯定会有各种宝贵意见，编者和作者恳切希望听到读者的意见和批评。

本丛书如能对日本的“设计工程”，并进面对日本的工业和工程学的发展发挥一点作用，编者将感到十二分欣幸。

编辑委员代表

北郷 薰

一九七一年四月

李永新译

## 前 言

本书阐述设计工程边缘领域内所发生的各种问题。本书的内容可分三部分。

第一部分阐述可靠性基础与可靠性设计问题。在任何机械设计中，可靠性问题均占重要地位。例如发射阿波罗宇宙飞船，其中就有高可靠性技术。这就是说，目前已在系统工程中建立了可靠性工程。

在美国，可靠性问题涉及的范围极广，甚至连基层中小企业的产品也具有高可靠性，所以对每个小零件均可放心使用。可是，日本中小企业的水平却很低，所以现在必须彻底解决可靠性问题。可以认为，这是今后机械设计中的重大问题。

第二部分阐述人机结合的机械设计中人的因素问题。过去一提到设计，就着眼于硬件方面。例如，即使在设计汽车时，也只重视功率和强度方面的问题。但是，不管工业上出现了性能如何良好的汽车，还是要由人来驱动的，所以，如果这辆汽车人们难以掌握，就会出现意想不到的差错，甚至会发生重大事故。因此，设计时必须考虑人的特性和能力范围等方面的因素。一般认为，今后要重视按照上述人类工程学作人-机系统设计。

第三部分阐述维修性问题。无论何种机械，在使用过程中总会逐渐发生故障。这时，能否高效能地修复这些机械是个重要问题。象阿波罗宇宙飞船、喷气式飞机和电子计算机这类贵重机械，如果要花一、二个月才能排除故障，那就要



损失大量的收益，而且修理费用也极昂贵。因此，为了避免发生这种情况，在设计初期，就要预先考虑哪些地方容易发生故障，并且要考虑应该采取怎样的故障排除方法。在美国称之为故障分析，应该考虑采用容易发现故障的设计。这种方法称为维修性工程，它表示在机械设计中进行维修性设计的方法。

如读者读完本书后，能在设计工程的各个方面考虑可靠性、人的因素与维修性的问题，那就算达到了作者的目的。

坪内和夫

1971年4月

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 可靠性基础(塩見 弘).....    | 1  |
| 1.1 产品的质量设计与可靠性 .....   | 1  |
| 1.2 可靠性的定义与故障 .....     | 2  |
| 1.3 可靠度、维修度与有效度 .....   | 3  |
| 1.4 可靠性的尺度 .....        | 5  |
| 1.5 可靠度函数与故障率 .....     | 8  |
| 1.6 故障率曲线 .....         | 13 |
| 1.7 关于可靠性的概率分布 .....    | 16 |
| 1.7.1 关于故障数的离散分布 .....  | 16 |
| 1.7.2 正态分布 .....        | 18 |
| 1.7.3 指数分布 .....        | 19 |
| 1.7.4 其他分布 .....        | 21 |
| 1.8 可靠度的测定 .....        | 26 |
| 1.8.1 分布形式的信息 .....     | 26 |
| 1.8.2 不按分布形式估计可靠度 ..... | 26 |
| 1.8.3 故障率的测定 .....      | 32 |
| 1.8.4 寿命分布参数的估计 .....   | 33 |
| 1.9 统计方法 .....          | 49 |
| 1.9.1 回归与相关 .....       | 49 |
| 1.9.2 符合度检验 .....       | 50 |
| 1.9.3 方差分析 .....        | 51 |
| 1.9.4 判别函数 .....        | 54 |
| 1.9.5 应力-强度模型 .....     | 55 |
| 1.9.6 概率与贝叶斯定理 .....    | 57 |
| 1.9.7 马尔柯夫过程 .....      | 64 |
| 1.9.8 变量的变换 .....       | 67 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 1.10 系统可靠度的计算 .....          | 72  |
| 1.10.1 串联系统 .....            | 72  |
| 1.10.2 并联系统 .....            | 73  |
| 1.10.3 并联系统以外的冗余系统 .....     | 74  |
| 1.10.4 非串并联系统结构的一般情况 .....   | 78  |
| 1.10.5 有维修时的可靠度 .....        | 82  |
| 参考文献 .....                   | 87  |
| 第二章 可靠性设计(塩見 弘) .....        | 90  |
| 2.1 可靠性设计与质量保证 .....         | 90  |
| 2.2 可靠性设计的基本原理 .....         | 91  |
| 2.3 可靠性设计的方法 .....           | 97  |
| 2.4 可靠度的分配 .....             | 105 |
| 2.4.1 分配的原则 .....            | 105 |
| 2.4.2 按相对故障率和重要度分配 .....     | 107 |
| 2.4.3 按重要度分配 .....           | 113 |
| 2.4.4 按综合指标分配 .....          | 114 |
| 2.4.5 按复杂性(故障率)和重要系数分配 ..... | 115 |
| 2.4.6 有约束条件时冗余系统的分配 .....    | 121 |
| 2.4.7 费用有效性 .....            | 123 |
| 2.5 零组部件的选择与使用 .....         | 124 |
| 2.6 设计的简单化与冗余性 .....         | 132 |
| 2.7 可靠性预测 .....              | 134 |
| 2.7.1 可靠性预测的目的 .....         | 134 |
| 2.7.2 可靠性预测的方法 .....         | 136 |
| 2.7.3 按串联模型预测故障率 .....       | 139 |
| 2.7.4 其它的预测方法 .....          | 161 |
| 2.7.5 预测的有效性 .....           | 165 |
| 2.8 统计设计法 .....              | 172 |
| 2.8.1 退化故障的评价 .....          | 172 |

## Ⅱ

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 2.8.2 退化故障分析的基础 .....       | 173 |
| 2.8.3 决定论方法 .....           | 174 |
| 2.8.4 概率论方法 .....           | 177 |
| 2.9 故障模式效应与安全性分析 .....      | 185 |
| 2.10 可靠性试验与设计 .....         | 189 |
| 2.10.1 可靠性试验的目的与方法 .....    | 189 |
| 2.10.2 关于可靠性的抽样试验 .....     | 193 |
| 2.11 可靠性的数据 .....           | 206 |
| 2.12 设计审查 .....             | 208 |
| 2.13 可靠性检验表 .....           | 211 |
| 参考文献 .....                  | 214 |
| 第三章 人-机系统设计(坪内和夫) .....     | 218 |
| 3.1 人-机系统的设计 .....          | 218 |
| 3.1.1 人-机系统 .....           | 218 |
| 3.1.2 人体测量与操作范围 .....       | 223 |
| 3.1.3 视野与视界 .....           | 232 |
| 3.1.4 信息显示设计 .....          | 242 |
| 3.1.5 控制设备设计 .....          | 258 |
| 3.1.6 环境条件设计 .....          | 283 |
| 3.2 人-机系统的分析与评价 .....       | 302 |
| 3.2.1 人的能力与机械的功率 .....      | 302 |
| 3.2.2 按连接分析法进行分析与评价 .....   | 311 |
| 3.2.3 按人为差错进行可靠性分析与评价 ..... | 321 |
| 3.2.4 按人的传递函数进行分析与评价 .....  | 327 |
| 3.2.5 按人体负担进行分析与评价 .....    | 338 |
| 参考文献 .....                  | 345 |
| 第四章 维修性设计(市田 嵩) .....       | 348 |
| 4.1 系统与维修性 .....            | 348 |
| 4.1.1 系统的时间因素与维修作业时间 .....  | 348 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 4.1.2 维修性尺度 .....        | 353 |
| 4.2 可靠性与维修性的平衡 .....     | 356 |
| 4.2.1 寿命周期费用 .....       | 356 |
| 4.2.2 有效度 .....          | 357 |
| 4.2.3 维修性的决定因素 .....     | 358 |
| 4.3 机器的维修性设计 .....       | 358 |
| 4.3.1 可达性 .....          | 359 |
| 4.3.2 安装方法 .....         | 377 |
| 4.3.3 元部件的模件化与微型化 .....  | 386 |
| 4.3.4 测试 .....           | 392 |
| 4.4 维修性的测定与预测 .....      | 405 |
| 4.4.1 关于维修的时间分布 .....    | 405 |
| 4.4.2 维修性测定 .....        | 408 |
| 4.4.3 维修性验证 .....        | 412 |
| 4.4.4 对维修时间的估计 .....     | 414 |
| 4.4.5 维修性验证合格与否的判据 ..... | 419 |
| 4.4.6 维修度预测概要 .....      | 429 |
| 4.4.7 内插法 .....          | 430 |
| 4.4.8 检验表法 .....         | 432 |
| 4.4.9 时间合成法 .....        | 437 |
| 4.4.10 模拟法 .....         | 448 |
| 4.5 系统的维修性设计 .....       | 459 |
| 4.5.1 维修方针 .....         | 460 |
| 4.5.2 后勤 .....           | 466 |
| 参考文献 .....               | 485 |

# 第一章 可靠性基础

## 1.1 产品的质量设计与可靠性

近年来，系统或产品向大型化和复杂化方向发展，而且其功能也日益提高。同时，技术发展速度很快，必须在限定的时间内实现产品具体化。

由于日益复杂化，如果使用同样的零件，经过同样的设计和制造过程，并采用同样的使用方法，那么产品或系统发生故障的机会将随着其零件数的增多而成比例增多。另一方面，如果功能上的要求大大提高，而既要满足功能上的要求又要具有高可靠性，那么采用以往的设计方法就满足不了这种要求，这时不可忽视故障造成的经济上损失。因此，势必不得不发展新技术或进行系统设计来解决这个问题。例如在超音速喷气式飞机(SST)中，如过多地考虑安全性和可靠性而作太保守的设计，将会造成过重而不能飞行，无论如何也突破不了音障或热障。同时，从可靠性来看，还带来了复杂化。为了确保飞行员航行安全，必须添置自动检测设备来检查和判断故障或异常情况。

何况由于受日程限制或技术发展速度很快，难于有效地利用原有的信息自由自在地实现高可靠性。这种复杂性（即零件数增多）与受时间上约束而造成的困难性是数量和时间上的障碍，它将阻止可靠性的进一步提高<sup>[1~3]</sup>。

现在的设计不同于过去那样，到发生问题后再慢慢研究解决措施，这样到发生故障后就来不及了。根据上述原因，

在赋予产品或系统所需的各种功能时，可靠性应作为一个不可忽视的因素。表 1.1 是表示飞机复杂性和维修费增加的一

表 1.1 飞机的复杂性与维修费

|                              | 1959 | 1967   |
|------------------------------|------|--------|
| 飞机复杂性的比率                     | 100  | 700    |
| 维修人员                         | 4200 | 7700   |
| 全年支出的维修费(10 <sup>6</sup> 美元) | 80   | 135    |
| 每英里维修费(10 <sup>6</sup> 美元)   | 0.07 | 0.0348 |

注：根据 G.W.Gilmer 和 B.D.Dison 的数据；American Airline Inc. Astronautics & Aeronautics, July 1968.

例。此外，由于发生故障而丧失功能从而造成的损失与维修费之比，对于波音 707 喷气机为 1.9；对于波音 747 宽型喷气机则为 3.2<sup>[4]</sup>。可靠性既与其他各种质量要求保持平衡（称为协调），又能保证产品或系统在规定时间内的质量。于是，为了在预期的使用期内经济而合理地维持其功能，把这种系统化的综合技术称为可靠性工程。因此，不是在发生故障之后，而是在从研制起到使用的整个生存周期内要有计划地贯彻可靠性，特别是在制造前要重视可靠性设计和可靠性评价。

## 1.2 可靠性的定义与故障

**可靠性**的英语是 Reliability，即“表示系统、机器、产品或零件等的工作或性能的时间稳定性的程度或性质”。

另一方面，**可靠度**的英语也是 Reliability，其定义为：“系统、机器、产品或零组部件等在规定的条件下和预期的使用期内完成其功能的概率”。在该定义<sup>[1]</sup>中含有下列几个因素，即

- i) 对象（系统、机器、产品、零组部件、材料等），

- ii) 功能，因而也可以说是有哪些丧失功能的故障；
- iii) 规定的（使用和环境）条件；
- iv) 规定的时间（距离、周期、次数）；
- v) 概率。

这就是说，可靠度在客观上是用概率来度量的，为此必须明确 i) ~ iv)。简言之，在规定了 iii) 和 iv) 之后，可靠度就是其对象不发生故障的概率。即使是同样产品，如果规定的使用条件、环境条件和预期的使用期均不同，则可靠度也就不同。因此，笼统地考虑某种产品的可靠度是没有意义的，必须明确 iii) 和 iv)。不言而喻，还必须明确故障的定义。

故障既有象电灯泡断丝那样突然发生的完全故障（称为**突发故障** Catastrophic Failure），也有象电视机图像模糊那样逐渐发生的不完全型故障（称为**退化故障** Degradation Failure）。对于前者，较易判断何时发生了故障，但对于后者，究竟何时算是发生了故障往往是有不同意见的，在实验室内作试验来查明故障时，可根据判据来进行考虑，但在现场数据中往往有许多不明确的地方。

此外，即使是同样零件发生的故障，在使用这种零件的系统或产品中也可分为与故障无直接联系的情况和与致命性故障有联系的情况。故障还可分为零件或材料等物质发生损坏的情况和不是物质发生损坏而是由于使用不当或人们判断错误或管理不善而造成故障的情况。因而必须明确 ii) 中丧失功能即发生故障的定义。

### 1.3 可靠度、维修度与有效度

上节所介绍的可靠度就是所谓不发生故障的概率。但是，象计算机、汽车或电视机那些较复杂的贵重耐用品，通常不



会在发生故障后抛弃，而是经修复后再使用。这种产品或系统，除了要有不发生故障的可靠度外，还要有易于修理的功能。在发生故障后的某段时间内完成维修的概率，称为维修度 (Maintainability)。由此可见，对于可修复的产品，其广义可靠性包括：

- 1) 不发生故障的狭义可靠度；
- 2) 不合用就进行修复的维修度。

上述的广义可靠性称为有效度 (Availability)。有效度就是在某种使用条件下和规定时间内，系统或产品保持正常使用状态的概率。

再具体一点地说，给定某使用时间  $t$ ，维修所容许的时间  $\tau$ （它远小于  $t$ ，例如在一日内修好的限制时间），设某单件装置（产品）的可靠度、维修度和有效度分别为  $R(t)$ 、 $M(\tau)$  和  $A(t, \tau)$ ，则它们之间的关系为

$$A(t, \tau) = R(t) + (1 - R(t))M(\tau) \quad (1.1)$$

上式中，第一项是在时间  $t$  内不发生故障的可靠度，第二项包括在时间  $t$  内发生故障的概率  $(1 - R(t))$  和在时间  $\tau$  内修好的概率  $M(\tau)$ 。为了满足某种有效度，最好一开始就做到高可靠或提高维修度  $M(\tau)$  (图 1.1)。总之，即使可靠度很低，如提高维修度，也可满足所需的有效度。但是，如可靠度很低，就经常会发生

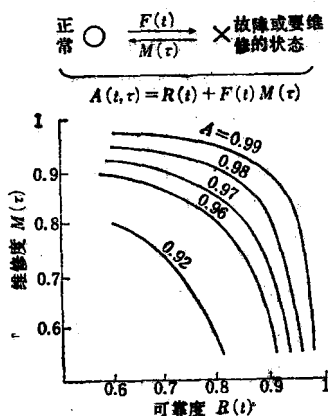


图1.1 可靠度、维修度和有效度