控制系统可靠性分析与综合

疏松桂 编著

科学出版社

控制系统可靠性分析与综合

疏松桂 编著

科 学 出 版 社

1 9 9 2

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系控制系统可靠性专著．全书共十八章．第一至四章概述可靠性基础知识；第五至十二章论述各种控制系统可靠性分析方法，包括建模、求解及应用；第十三至十八章着重讨论控制系统可靠性的综合及应用，包括系统可靠性优化设计算法、人机界面、软件可靠性、计算机控制系统和故障诊断．每章后面有习题，书末附有答案．

本书可供从事控制系统设计、操作和理论研究等的科技工作者使用，也可供高等院校有关专业的师生参考．

控制系统可靠性分析与综合

疏松桂 编著

责任编辑 张英娥

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992 年 4 月第 一 版 开本：850×1168 1/32

1992 年 4 月第一次印刷 印张：11 3/4

印数：1—2 300 字数：307 000

ISBN 7-03-002090-1/TP · 157

定价：13.60 元

前　言

随着科学技术的迅速发展，各类自动化系统为了获得愈来愈强的功能，不断趋于大型化和复杂化，因而更加容易发生故障或失效．控制系统是自动化系统的重要组成部分，它对全系统的可靠性起着举足轻重的作用．据统计，控制系统故障占整个系统故障的一半以上．不解决控制系统的可靠性问题，自动化系统就无法发挥其重要作用．

可靠性理论是产品特性随时间变化规律的一门综合性和边缘性学科，是从研究产品质量的基础上发展起来的．可靠性是产品寿命指标的总称，它反映了一个产品在规定时间内和规定条件下完成规定功能的能力．系统可靠性理论研究系统与其元部件之间的可靠性关系以及由此而构成的系统可靠度．

近年来，国内外在系统可靠性研究方面做了大量的工作，每年都有数以百计的文章发表，也陆续出版了不少专著．然而，从控制系统角度出发研究系统可靠性的著作却不多见．作者长期从事自动控制系统分析和设计以及系统可靠性理论的研究工作，深感提高可靠性对自动控制系统的应用是十分重要的．

本书是作者多年来科研实践经验的总结，其中一些章节是作者工作中新的成果和体会，是第一次公开发表．本书的主要特点是，以提高自动控制系统可靠性为目的，论述自动控制系统可靠性的分析、设计、优化、维修、软-硬件及人-机的可靠性关系，探讨自动控制系统可靠性的特点和规律，特别注意基本理论和工程应用两方面的结合．

本书将有助于广大科学技术人员进行控制系统可靠性研究、设计、使用和维护等工作，也可作为高等院校有关专业的教材或参考书．每章后面有习题供读者加深对所述问题的理解和巩固所学

知识，书末附有答案和参考文献。

本书在撰写后期，得到了课题组的一些同志和作者的博士、硕士研究生的大力协助，他们提出了许多补充和修改意见，在此表示衷心的感谢！

本书的写作得到了国家自然科学基金会的支持。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，希望读者指正。

疏松桂

1986 年 8 月于中国科学院自动化研究所

目　　录

第一章　控制系统可靠性概述

1.1　控制系统可靠性的含义

控制系统是自动化设备的重要组成部分。控制系统可靠性是其质量好坏的主要技术指标。通常，控制系统可靠性可定义为在规定的工作条件下和规定的时间内，控制系统成功地完成规定功能的能力，它是对控制系统可靠程度的定性评价。控制系统可靠度定义为在规定的工作条件下和规定的时间内，控制系统成功地完成规定功能的概率，它是对控制系统可靠程度的定量评价。这里的"工作条件"包括外界环境条件(如温度、压力、振动等)和内部使用条件(如元件的筛选情况、老化时间等)。这里的"时间"是一种广义的时间，它可以是小时、天、月、年之类的单位，也可因对象不同而指一些相当于时间的量，如次数、周期、距离等。

在系统执行任务期间，发生局部故障是可以容许的。不管这种故障是否已在执行任务过程中被消除，只要系统能够按预定的计划完成规定的功能，我们就认为系统是可靠的。

在本书各章节中，"设备"这一名词将表示系统、分系统或部件。设备的可靠性可按生产、使用和运转的过程分为以下三种：

(1) 固有可靠性。在设备生产过程中需要进行材料和元器件的选择、设计、制造、整装、环境试验等。由这一过程所决定的可靠性是设备的内在可靠性，称为设备的固有可靠性。设备的固有可靠性决定于生产厂家。

(2) 工作前可靠性。设备在投入使用前需经过包装、运输、保管、安装等环节。在这一过程中，人为的和环境的因素会对设备可靠性造成影响。由这一过程所决定的可靠性称为工作前可靠性。工作前可靠性决定于运输、施工和使用单位。

(3) 工作可靠性。这是指设备在实际运转或执行任务时的可靠性。通常所谓的控制系统可靠性就是指它的工作可靠性。一般情况下，系统在运转前都要经过检查调试，以排除产品内在的、人为的和环境的因素所造成的故障，所以一般假定系统在初始工作时是完全可靠的。

自动控制系统的可靠度可用组成系统的元、部件的可靠度表示。通常，元、部件的可靠度是工作环境及运行时间的函数。为了简化问题，假定工作环境是已知的(即在一定范围内按照某一规律变化)。这样，可靠度只是运行时间的函数。当给定运行时间后即可由元、部件可靠度与系统可靠度之间的关系计算系统可靠度。

1.2 关于系统可靠性的分析方法

分析系统可靠性的目的，就是要根据大量的可靠性数据，运用定性和定量的方法，揭示系统与元、部件之间的功能和可靠性关系，掌握系统发生故障的规律，找出系统的薄弱环节，辨识元器件的失效模式，进而为系统可靠性设计和维修提出相应的措施。

经常使用的系统可靠性分析方法有以下八种：

1. 二项式展开法

二项式展开法的基本原理是，求出系统可能出现的所有状态，然后区分出使系统可靠的状态和使系统不可靠的状态，所有使系统可靠的状态的概率之和为系统可靠概率(可靠度)，而所有使系统不可靠的状态的概率之和为系统的不可靠概率(不可靠度)。可靠概率与不可靠概率之和应等于1。这种方法也称为排列组合法或枚举法，比较适用于系统元、部件较少的情形(见第九章)。

2. 可靠性逻辑框图法

这种方法的一般过程是，按照元、部件与系统之间的可靠性相互关系，将系统功能结构图转化为可靠性逻辑框图，再从逻辑框图推导出系统可靠度。此法适用于分析串、并联系统的可靠性(见第

五至八章)。

3. 可靠性网络分解法

控制系统的可靠性逻辑框图是一种网络，当它不能简化为串、并联形式时（此时称它为复杂系统），则引用全概率分解定理来求解。这种方法对供电网络和供水管道这样的复杂系统比较有用(见第九章)。

4. 布尔代数简化法

根据布尔代数原理可以简化可靠性数学模型和系统结构函数。布尔代数可以大大简化对复杂系统的分析(见第九至十一章)。

5. 马尔可夫过程法(马氏方法)

马氏法使用概率流的方法来确定系统各种状态之间的关系。这种方法用来对可修系统进行可靠性分析(见第十二章)。

6. 故障树分析法[1,2]

该方法将系统的某一个故障作为可靠性分析的出发点，应用演绎的方法不断追踪故障发生的原因，将各个元部件的故障状态作为基本事件，用逻辑门将它们联结起来，构成一棵倒立的树。通过求最小割集找出系统的各种故障模式，在此基础上进行定性定量分析(见第十章)。

7. 模拟法(或称蒙特卡罗法)[3]

对于不能用数学模型解决问题的复杂系统，可采用模拟的方法。简单的模拟法是用物理模型进行实验，求得解答。对大型复杂系统的可靠性问题求解，需用电子计算机进行模拟。

8. 边值法(上下限法)[3]

根据系统可靠性框图，逐次算出可靠性的上限值和下限值，取

其算术平均值作为预测值．用几何平均值作为预测值结果更为精确。

1.3 关于系统可靠性的综合问题

系统可靠性的综合主要研究系统的可靠性设计问题．一般在控制系统性能的设计中，应同时进行系统可靠性设计．

系统可靠性设计的内容及步骤大致有：（1）系统性能设计．这是指在给定的任务要求下进行系统性能设计；（2）可靠度指标分配．一个大型系统是按系统(含分系统)、部件(含整机)和元器件分层设计的．可靠度指标的分配就是将对系统的可靠性要求落实到对它的部件和元器件的可靠性要求上来；（3）系统可靠性的优化设计．关于系统可靠性的优化设计有两种提法：一是以系统可靠度为目标函数，而以某些资源(如体积、重量、投资等)为约束条件；二是以某种资源为目标函数，而以可靠度及其它资源为约束条件．

采用贮备方式是提高系统可靠性最有效的办法．决定贮备数量的问题实际上是一个整数规划的问题，在具体计算时，特别是在约束条件较多的条件下，解决这个问题是比较复杂的(见第十三、十四章)．

控制系统的寿命是可靠性设计中要考虑的一个重要指标，特别是对长时间使用的系统，如生产线上的操作系统及宇宙探测器中的姿态控制系统，更是如此．这类系统又可分为可维修和不可维修两种．不可维修的系统一旦失效，将不可能恢复正常，如无人驾驶的飞行器．所以人们对控制系统的寿命要求越来越高，少则几年，多则几十年，这给系统可靠性设计者们带来了新的考验．

在系统可靠性分析和设计中，为了提高系统可靠性及简化设计，还经常采取如下的措施：（1）将元件进行老化，以排除早期故障，待其失效率稳定之后再投入使用．这样，在进行可靠性分析时，元件的寿命对其失效率的影响可以不计，即取失效率为常数；

(2) 将某些非线性特性线性化；(3) 对工作时间特别短的元、部件(如武器引爆控制系统中的某些元、器件)，可以用工作次数代替时间，以统计失效率。

1.4 关于提高系统可靠性的途径[3—5]

研究系统可靠性的目的，就是要在考虑系统的体积、重量、费用等限制因素的同时，最大限度地提高系统可靠性。提高自动控制系统可靠性有以下几条途径：

1. 改进元、部件的可靠性

自动控制系统的可靠性在很大程度上取决于组成系统的各个元、部件的可靠性。所以，改善元、部件的可靠性是提高系统可靠性的根本途径。改善元、部件的可靠性包括改善包装技术、改善屏蔽技术、选择优质材料、改善工艺水平等方面，具体作法如下：

(1) 对元、部件进行大量的可靠性试验，如在不同负荷水平、不同使用环境条件下进行试验；

(2) 运用试验数据进行失效分析，以此作为改进元、部件设计及提高其可靠性的依据；

(3) 根据以上分析，决定选用何种材料，采用何种机械设计和电气设计以及如何改进生产和总装工艺；

(4) 根据试验结果和使用经验，对元、部件重新设计；

(5) 对改进设计后的元、部件重复进行失效试验。若试验结果仍不能满足可靠性要求，则继续进行失效分析，改进设计，直到元、部件达到预期的可靠性水平。

一般情况下，采用上述方法改进元、部件可靠性具有相当大的潜力，可以使失效率降低 1 至 2 个数量级，但所需费用大，时间长，只能适可而止。

2. 降低使用应力水准

这里应力不仅指机械应力与电气负荷，而且也包括物理环境条件．在允许的条件下减小温度变化，加大安全系数都是降低使用应力水准的措施．通常，元、部件在降低使用应力水准的情况下，其可靠性可以提高一个数量级以上。

3. 简化系统结构

系统的结构愈简单，即系统中的元、部件愈少，系统的工作可靠性也就愈高．所以在系统设计时，在不影响系统基本性能（如准确度、稳定性、过渡过程等）的前提下，应尽量简化系统结构。

4. 采用固定结构贮备

采用复式环节或复式系统组成固定贮备（亦称固定备份），是提高系统可靠性最有效的方法（见第五、六章）．适当使用复式方法可以将系统失效率降低 2 至 3 个数量级．对于固定结构贮备，一方面，在给定约束条件（如费用、重量、体积等）的情况下，我们可以设计出可能达到的最可靠的系统；另一方面，在系统可靠度一定时，我们可以给出最经济利用资源的设计方案．这是系统可靠性的优化问题（见第十三、十四章）．采用固定贮备方法的主要缺点是，在部分备份失效时，可能使系统结构参数和工作状态发生变化，进而影响系统正常工作；有时备份系统的故障相互依从，也会影响系统可靠性的提高。

5. 采用带有逻辑装置的待机结构贮备

采用带有逻辑装置的待机结构贮备方法可以克服固定结构贮备方法所带来的缺点，也就是，隔离故障之间的相互影响，避免结构参数的变化．这种方法使备份系统处于等待状态，可以节省能源、延长寿命．它的缺点是需要增加一些装置，如转换器、信息处理线路等，这不但会加大投资，而且这些附加装置的可靠性也需要

考虑，这就增加了可靠性分析的复杂性。

6. 提高维护技术

不管我们采取了什么办法来提高系统可靠性，系统最终还是会发生故障的。所以，故障诊断与维护技术对系统是相当重要的。完善的维修措施可以使系统寿命得到极大的延长(见第十二、十八章)。

总之，提高系统可靠性可以从三方面入手：第一，提高元、部件的可靠性，这是根本的措施；第二，进行系统的高可靠性设计，这是提高系统可靠性最有效的途径；第三，采用维修措施，这是延长系统使用寿命的最后办法。