

〔苏〕Л. П. 格拉祖诺夫等著

郭永基 王春暖 译

自动控制系统 可靠性理论基础



水利电力出版社

自动控制系统 可靠性理论基础

[苏]Л.П.格拉祖诺夫等著

郭永基 王春暖 译

水利电力出版社

ЛЕОНИД ПАВЛОВИЧ ГЛАЗУНОВ
ВИТАЛИЙ ПРОКОФЬЕВИЧ ГРАБОВЕЦКИЙ
ОЛЕГ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ ШЕРБАКОВ
ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ
АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Энергоатомиздат 1984

自动控制系统可靠性理论基础

[苏]Л.П.格拉祖诺夫等著

郭永基 王春暖 译

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 8.5印张 184千字
1989年10月第一版 1989年10月北京第一次印刷

印数0001—3810册

ISBN 7-120-00779-3/TP·29

定价5.50元

内 容 简 介

本书译自[苏]格拉祖诺夫等著《Основы теории надежности автоматических систем управления》一书。全书对自动控制系统可靠性的理论和计算方法进行了全面论述，内容新颖，结构严谨。本书理论体系完整，又注意工程实际应用，对于从事自动控制的工程技术人员、管理干部及科研工作者是一本很好的参考书，也适用于大专院校作研究生、高年级学生的参考教材。

译 者 前 言

本书根据苏联能源和原子能出版社列宁格勒分社出版的《Основы теории надежности автоматических систем управления》1984年版译出。本书系统地介绍了自动控制系统可靠性的基本理论，自动控制系统的技术诊断，自动控制系统可靠性参数的统计处理，计算机及自动控制系统中的计算技术装置的诊断及其有效性的评估方法。本书前言及第一章至第四章由王春暖翻译，第五章至第八章由郭永基翻译，并互相进行了校阅，最后由郭永基对全书进行了统稿。

译 者

一九八八年九月

序 言

加快科学技术进步是提高生产效益的方向之一，因此，苏联共产党和政府提出了一个十分重要的任务——把科学技术革命的成就同社会主义经济制度的优越性结合起来。

由于在过去的五年计划中进行了大量的工作，使生产有了相当大的增长，并且提高了产品的质量，同提高生产效益有关的问题，得到成功地解决，首先由于提高了运行的可靠性技术。因此，保证国民经济中广泛运用的各种系统、装置和机械的高可靠性的问题就出现了。应该指出，当设备的设计和投入运行时，对保证其高可靠性的问题，总是予以极大地关心，但是这些问题尚未作为独立的研究领域划分出来。

在20世纪50年代，出现了复杂的控制系统，致使设备的可靠性成为保证这些系统有效运行的决定因素，可靠性的问题被作为独立的工作，因而形成可靠性理论。

在苏联，论述可靠性问题的第一批著作是由苏联科学院院士А.И.别尔格、Н.Г.布鲁叶维奇和苏联科学院通讯院士В.И.西富罗夫等在50年代完成的，可靠性领域的主导专家А.М.波罗夫科、Г.В.德鲁日尼娜、Н.А.希桑卡的论文，也在这个时期问世了。

在60年代初，可靠性理论中的数学研究有了迅猛地发展。Б.В.格涅坚科、А.Д.索洛维也夫、Ю.К.别辽也夫，在该领域作出了卓越的贡献。

可靠性问题在理论方面和应用方面的发展，首先是由于

无线电电子器件和复杂的控制系统的发展才得以实现。

因为控制系统的高度可靠性不仅由设备的设计和制造所决定，而且取决于合理的运行，因此，对控制系统的高度可靠性问题，给予了极大的注意。

进行试验和有关设备运行的信息的加工问题也受到了很大重视。

技术诊断学是一个独立的研究领域，它研究设备的监测、修理和修复问题。

大批专家参与其它方面的可靠性问题的研究，比如仪器制造、机械制造、动力工程学等。

目前在苏联的莫斯科、列宁格勒、基辅、明斯克、新西伯利亚及其它一些城市，已形成了研究可靠性理论和实践的不同方向的学派。

应该指出，国外也在加强可靠性问题的研究，例如像Д. 聂曼、A. 皮尔斯、K. 巴尔洛伊、C. 普罗善等，就是这样一些专家。

可靠性所研究的问题，可分为三个方向。首先是所有可靠性理论的一般问题——它是研究技术装置的故障和修复的普遍规律和保证可靠性的一般方法的科学课题。因为可靠性的一般理论是建立在概率论基础上的，所以应在概率论和数理统计课程之后来学习该理论。虽然可靠性的一般理论对于任何技术装置都是正确的，但是为了学好它，最好以自动调节和自动控制装置为实例实施教学，为此，大学生们应具有关于自动装置（例如，在“专业概论”课程范围）的一定知识，熟悉可靠性的一般理论，能够使在学习各种不同自动调节与自动控制课程时，以一般理论为基础研究保证可靠性的方法，但是对于自动装置的设备与系统来说，要付诸实施还有

其特殊性。

第二个方向是有关单个元件和设备的可靠性，这些在专门课程中研究，例如，当研究电真空和半导体器件以及集成电路时，应研究这些器件的可靠性问题，确定外部条件对其可靠性的影响等。以后在研究放大电路（低频的、高频的、脉冲的放大器等）时，可以研究这些电路在单个元件参数变化的情况下，其可靠性的计算方法。

第三个方向是研究自动调节和自动控制系统可靠性的专门理论问题以及提高其可靠性的方法。大学生们应在学完如自动调节与控制理论、自动装置的元件和设备、自动调节与自动控制系统，数字计算机等这些课程之后，进行这方面的学习。

本书基本上叙述了适用于自动调节与自动控制系统中可靠性的一般理论问题，但是在许多章节中也叙述了属于第二和第三方向的知识。

作者深切地感谢本书的审阅者技术科学博士、教授Б.Е.别尔迪切夫斯基，技术科学博士、教授А.И.古宾斯基和技术科学博士、教授Б.Я索维多夫，他们在提高这本教学参考书质量方面给予了巨大补助。

对本书的意见和要求请寄：191041，列宁格勒，Марсово поле, 1，能源与原子能出版社列宁格勒分社。

作者

目 录

译者前言

序 言

第一章	基本概念, 定义和可靠性准则	1
1-1	基本概念和定义	1
1-2	可靠性的数量特征	6
1-3	可靠性理论中所运用的基本规律	19
1-4	自动控制系统中出现故障和失灵的规律	26
第二章	自动控制系统中无备用的设备可靠性的 计算方法	31
2-1	元件和系统可靠性计算的主要步骤	31
2-2	出现突发性故障时自动控制系统设备可靠性的估 计方法	36
2-3	出现渐变性故障时自动控制系统设备可靠性的估 计方法	45
2-4	估计自动控制系统设备不间断性的顺序	49
2-5	自动控制系统设备的可修复特征量的估计方法	52
2-6	监测系统特性对自动控制系统可修复设备可靠性 指标的影响的估计方法	62
第三章	自动控制系统中有备用的设备可靠性的 计算方法	66
3-1	基本概念和定义	66
3-2	不可修复的结构备用	71
3-3	可修复的结构备用	89
3-4	具有信息冗余的设备的可靠性计算	102
3-5	具有时间备用的设备的可靠性计算	104

第四章	具有冗余的自动控制系统的可靠性计算方法	107
4-1	具有不可修复的结构冗余的自动控制系统的可靠性计算方法	107
4-2	具有可修复的结构冗余的自动控制系统的可靠性计算方法	128
第五章	自动控制系统的技术诊断方法	134
5-1	技术诊断方法的原理	134
5-2	线性连续系统数学模型的特性	139
5-3	离散系统的数学模型	149
5-4	在随机作用下诊断系统的数学模型	153
5-5	在元件为基本连接的情况下寻找故障元件的组织方法	156
5-6	组织寻找缺陷时的确定性原则	161
5-7	利用折算概率准则对寻找缺陷程序进行最优化	168
5-8	诊断循环的周期性对可修复系统可靠性指标的影响	170
5-9	考虑诊断系统特性对自动控制系统可靠性指标的影响的方法原理	173
第六章	可靠性试验的计划及成果整理	177
6-1	可靠性试验的任务	177
6-2	可靠性的测定性试验	179
6-3	可靠性的检验性试验	190
第七章	自动控制系统的运行可靠性	197
7-1	自动控制系统可靠性的运行数据和收集数据的组织	197
7-2	试验性运行和监督性运行时收集信息的组织	199
7-3	收集原始信息的文件	203
7-4	试验数据的处理	204
7-5	可靠性指标的区间估计	207

7-6	指数分布规律时可靠性指标的区间估计·····	209
7-7	正态分布规律时可靠性指标的区间估计·····	212
7-8	定期检查和预防性工作计划的编制方法·····	216
7-9	预防性工作和按章定期检查的有效性的数量指标·····	219
7-10	进行预防性工作所需时间的统计估计·····	221
7-11	备用器材和仪表需要量的计算方法·····	224
第八章	电子计算机及自动控制系统中的计算技术装置的诊 断系统的构成特点及其有效性的估计方法···	226
8-1	自动装置和计算技术装置的可靠性保证·····	226
8-2	电子计算机和自动控制系统中的计算技术装置的 诊断·····	229
8-3	电子计算机和自动控制系统中计算技术装置的诊 断系统有效性的估计·····	244
参考文献	·····	256

第一章 基本概念, 定义和可靠性准则

1-1 基本概念和定义

自动控制系统 (CAY) 功能的有效性在很大程度上不只决定于接入系统的各单个设备, 而且决定于保证这些设备之间相互作用的装置。

应该指出, 近20年期间, 在提高自动控制系统可靠性方面已付出相当大的努力, 但其可靠性水平仍然不够高, 且不能满足日益增长的需要。设备的可靠性低, 不仅会使自动控制系统停运时间显著拉长, 而且使其运行费用增加。此外, 技术设备的故障, 会陷入事故的境地, 其后果难以想像。

提高对可靠性问题的注意力, 是由下述几个原因所决定的: 1) 设备复杂性的增加以及复杂的自动控制系统 的出现; 2) 和设备的元件数量增加比较起来, 配套元件可靠性水平的提高较为缓慢; 3) 完成某些功能的设备的重要性增大, 因而对设备的可靠性要求提高; 4) 运行条件复杂化。

可靠性理论是研究设备发生故障和修复的规律性以及研究提高技术设施可靠性方面的各种措施的有效性的一门学科。

可靠性理论要研究的内容是: 可靠性的准则和数量特征; 元件和系统可靠性的分析方法; 具有给定可靠性的条件下元件和系统的综合方法; 在设计和运行阶段提高设备可靠性的方法; 设备可靠性的试验方法。

本书将叙述所有估计和保证可靠性的方法, 这些方法根

据试验和运行过程中所取得的统计数据，适用于工程计算。

“系统”的概念是可靠性理论中的基本概念，它可理解为：许多为完成给定功能而协同工作的设施的总体。“系统”的概念，在一定的程度上是有条件的，与研究的设施及向专家们提出的任务有关。在“系统”的概念中可包括各种不同的设施的总体，例如，船舶运动的自动控制系统、电子计算机、发动机等，均可作为“系统”来研究。在可靠性理论中所有要研究的系统可划分为：可修复系统——出现故障之后，可以更换故障的设施；不可修复系统——不能进行更换。

构成系统的设施是系统的元件。在可靠性理论中，“元件”可理解为系统的一部分，元件具有独立的在计算时可供利用的可靠性特征量，并根据系统的需要完成某一部分功能。因此，显而易见，决不能以随意的方式将系统划分为若干个元件。例如，舵传动装置的操作机构、电子计算机的存储器、曲柄连杆机构，分别可作为以上列举系统的元件，这些元件中的每一个，又可作为由较小元件组成的系统来研究。

在自动控制系统中，被利用的所有元件可分为一次元件（无线电元件、发动机等类型）和由一次元件组成的元件（电子放大器、电机放大机等类型）。

通常，或用分析物理过程的方法，或用进行试验的方法，或根据运行经验，来确定一次元件的可靠性特征量。对于其余的元件，其中也包括对于系统，要根据一次元件的可靠性特征量，以不同的计算方法，来确定其可靠性特征。

根据在自动控制系统中所利用的一次元件的结构和工作原理，可以分为机械的（减速器、转换器、按钮等），电机

的(电动机、测速发电机等), 电子的(电子管、半导体器件、集成电路等)。

每一类元件具有其一定的可靠性特征量, 因而在进行可靠性指标计算时必需考虑这些特征量。

元件和系统可能处于两种状态: 有工作能力状态和无工作能力状态。“有工作能力”的概念, 是可靠性理论的基本概念之一。“有工作能力”就是系统和元件的这样一种状态: 在保持技术标准文件规定范围的规定参数值的条件下, 它有能力完成规定的功能。

破坏工作能力的事件, 称为故障。按照故障发生的特点, 可分为下列的形式: 1) 突发性故障, 特点是系统或元件的参数的突然变化; 2) 渐变性故障, 特点是系统或元件参数的逐渐变化。

我们要详细地研究自动控制元件故障的概念。例如, 对于像晶体管那样的一次元件, 因为集电极和发射极的击穿, 而导致最经常发生的故障。这时, 电路中的两点形成短接。类似的故障, 称为“短路”型突发性故障。应该指出, 对于像电容器那样的一次元件, 也具有短路型故障的特点。对晶体管来说还存在有另一种类型故障, 例如晶体内部连接烧毁或外部连接破坏。在这种情况下, 电路中两点之间的电阻成为无穷大。这种故障, 称为“开路”型突发性故障。对于像电阻器那样的一次元件, 也具有“开路”型故障的特点。

除晶体三极管的突发性故障外, 还可能引起参数变化的渐变性故障。对于晶体三极管来说, 主要的参数之一是具有发射极接地的电路中电流放大系数 β 和集电极的反向电流 $I_{\kappa o}$ 。通常 β 值逐渐减少, 而 $I_{\kappa o}$ 增大。

当达到某一极限值 $\beta_{\kappa p}$ 和 $I_{\kappa o \kappa p}$ 时, 装有晶体三极管的电

路将停止执行其特定的功能，这也就是晶体三极管故障的征兆。显然，晶体三极管渐变故障的概念，在一定程度上是有条件的，因为在某一条电路上故障的晶体三极管，可以用于对其参数的变化不那么苛求的另一条电路中。因此，按照渐变故障合理地进行可靠性估计，不是对于一次元件，而是对于由一次元件构成的并完成规定功能的元件（放大器、多谐振荡器等类型的功能元件）。

我们研究自动调节与控制系统的故障概念，对于这些系统来说，系统稳定性要求是重要的要求之一。如果系统稳定，那么，在这种情况下，当受到各种外部影响（海浪、风压负荷等）时，可确保维持规定的某一参数值。系统元件之一故障，可以使稳定性破坏，这就是系统故障。应当指出，由于构成系统的单个元件参数的变化，可引起稳定性的破坏，以致发生系统故障。所以，根据系统功能过程的要求，对于各单个元件应确定其参数的容许偏差。

对于自动控制系统，除了稳定性要求外，还提出要保证规定的过渡过程的品质，例如，假定调节参数随时间的变化如图1-1所示。过渡过程的参数是： θ_{nep} ——超调量； t_{ycm} ——过渡过程的规定时间。此外，对于多数系统来说尚有 θ_{ycm} ——规定的误差。每一个系统的参数值 θ_{nep} 、 θ_{ad} 、 t_{ycm} 和 θ_{ycm} ，均为已知的，而 θ_{ad} 是规定的调节参数值。

单个元件的故障，以及元件参数的变化，可使上述的参数超过规定值，这也是系统故障。

对于自动调节和自动控制系统来说，失灵(СБОЙ)具有重要意义。失灵，是这样的事件：由于在内因或外因的影响下元件参数的变化，在某些时间内，元件（或系统）终止执行其规定的功能。在这种情况下，不需要外来干预即可恢复

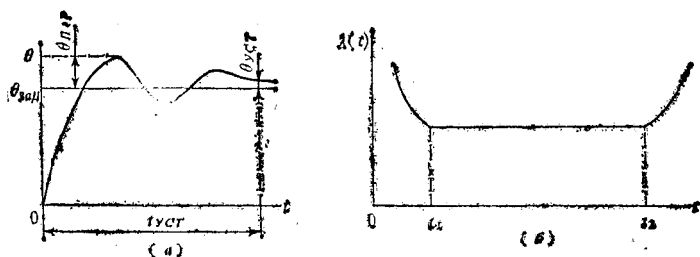


图 1-1

(a) 调节参数随时间的变化; (b) 故障率 $\lambda(t)$

设备的正常工作。因此，失灵——是一种可自动排除导致工作能力短时间破坏的故障。

对于使用计算机的系统来说，失灵特别危险，因为失灵的后果是信息（原始数据，控制作用等）失真，这会造成系统的功能失常。问题的复杂性在于：失灵的延续时间不长，此后系统又重新变得有工作能力，要查明信息失真就变得很困难。考虑到出现失灵的特点，应该单独研究当存在失灵的情况下，可靠性的计算方法和保证可靠性的方法。

在运用“有工作能力”和“故障”概念的基础上，可以叙述一下可靠性理论中也很重要的概念——“不间断性”、“可保存性”、“可维修性”和“可修复性”。

不间断性——在某一时间或某一时间段内，系统或元件不间断地保持有工作能力的特性。可保存性——在整个保存的时间内，系统或元件不间断地保持良好、有工作能力状态的特性。可维修性——元件或系统能够预防和查明其发生故障、损坏的原因，并用检修和技术维护的方法消除后果的特性。可修复性——系统或元件出现故障之后为了恢复工作能

力而进行修复工作的特性。

以下研究“可靠性”和“寿命”的基本概念。可靠性——在随时地保存运行指标在给定的范围之内的情況下，系统或元件完成给定功能的特性，这些运行指标范围与规定的工况、应用条件、技术维护、保存和运输条件相对应。可靠性系由不间断性、可维修性、可保存性所决定。寿命——在规定的技术维护和检修方式的情况下，在极限状态开始之前，系统或元件保持有工作能力的特性。

这样一来，可以看出，可靠性的概念是基本概念，它包含元件和系统运行的所有方面。首先，可靠性是较广义概念——有效性的组成部分。所谓“有效性”可理解为：系统或元件按所要求的质量完成规定功能的特性。除可靠性外，其他一些特性，例如，精确度、抗干扰性等，也影响系统功能的有效性。

为了保证自动控制系统中的可靠性，冗余的引入被广泛运用。冗余——超过为完成自动控制系统规定的功能的最小必需的附加设备和可能性。备用——藉加入冗余而提高可靠性的方法。

在自动控制系统的运行过程中，要进行提高可靠性的一系列工作。预防性工作——设备的计划检查和修理的综合性工作，其目的是保证所要求的可靠性特征量。

1-2 可靠性的数量特征

可靠性的定性定义是不完整的，因为它不容许：1) 当计划把自动控制系统用于不同设施时考虑设备的可靠性；