

目 录

引言	(1)
第一章 系统可靠性的一些基本概念	(8)
§1.1 什么叫系统?	(8)
§1.2 失效率或故障率	(9)
§1.3 串联结构的可靠度计算	(12)
§1.4 并联结构的可靠度计算——冗余贮备和降级使用	(15)
§1.5 串并联结构和一些更复杂的情况	(21)
§1.6 可修复系统的可靠性评价	(29)
§1.7 一些补充说明	(36)
习题	(38)
第二章 简单典型系统的可靠性分析	(45)
§2.1 最简单的典型问题	(45)
§2.2 系统连续运转时间的一般公式	(51)
§2.3 系统利用率的计算	(57)
§2.4 瞬时可靠度的计算	(59)
§2.5 几个子系统处于串联结构的分析	(61)
§2.6 维修站承担任务能力的估计	(64)
习题	(66)
第三章 简单典型系统备件设置量的确定	(70)
§3.1 已知缺备件间隔时间确定备件设置量	(70)
§3.2 已知首次缺备件时间确定备件设置量	(71)
§3.3 已知系统利用率确定备件设置量	(76)
§3.4 由几个子系统组成的系统之备件设置问题	(78)
习题	(90)
第四章 调节检修速率提高系统可靠性	(92)
§4.1 基本计算方法	(92)
§4.2 C台设备并行检修的缺备件平均间隔时间的计算公式	(101)
§4.3 C台设备并行检修首次缺备件时间的计算公式	(107)
§4.4 系统连续运转时间计算公式的一般推导方法	(113)

§4.5	混合检修制度	(120)
§4.6	混合检修制度的分割处理法	(125)
习题		(141)
第五章	系统故障速率随状态而异的一些情况	(144)
§5.1	一般计算方法	(144)
§5.2	典型系统计算公式	(148)
§5.3	分段计算法	(154)
§5.4	混合检修制度	(163)
§5.5	混合检修制度的分割处理法	(166)
§5.6	备件在冷贮备时也具有一定故障率的情况	(181)
习题		(184)
第六章	不同型号同类设备组成的系统	(187)
§6.1	一般典型计算方法	(187)
§6.2	简化了的方案	(193)
§6.3	结合系统功能的分析	(197)
§6.4	具有多种检修制度的情况	(205)
习题		(209)
第七章	系统之间相互支援问题	(215)
§7.1	在支援和被支援的概率已知时的最简单物力支援方式	(215)
§7.2	不同支援方式的效果比较	(220)
§7.3	支援不及时的效果分析	(224)
§7.4	相互支援的潜力和效果的分析	(230)
习题		(242)
第八章	集中检修和分级管理	(244)
§8.1	引言	(244)
§8.2	集中检修优点的分析	(247)
§8.3	分级管理的具体计算	(251)
§8.4	相对集中检修	(254)
习题		(257)
第九章	配套设备的维修问题	(260)
§9.1	最佳检修方案及其解法	(260)
§9.2	一个简单的计算例	(265)

§9.3 按绝对优先检修顺序来分析	(270)
§9.4 分割成几个子系统的处理法	(276)
§9.5 系统中断但可修复再运行的一些情况	(280)
习题	(284)
第十章 备件不可修复系统的可靠性分析	(286)
§10.1 引言	(286)
§10.2 备件不可添置的情况	(287)
§10.3 备件可以添置的情况 (一)	(292)
§10.4 备件可以添置的情况 (二)	(300)
§10.5 备件添置度不遵循负指数分布的修订办法	(312)
习题	(316)
参考文献	(317)
后记	(318)

引 言

随着科学技术的发展,技术装备愈来愈复杂。可靠性,特别是系统可靠性日益受到人们的重视。其原因一方面是系统愈复杂,可靠性愈难达到较高的指标;另一方面系统愈复杂,往往因故障造成的损失也愈大。这损失不仅是经济上的、信誉上的,甚至还会造成生命损失以至更严重的灾难性后果。譬如气象预报不能及时准确地发送出去从而引起灾难,导航系统工作失误从而导致飞机出现飞行事故等等,这种灾难往往是触目惊心的。至于人造卫星的发射、宇航飞行的实验更要具有极高的可靠性,这里由于可靠性没有得到足够的保证而失败的事例也是常有的。实际上,即使是日常生活中的问题,如车辆过于拥挤,电信不畅通以及一些供应不能及时得到可靠保证而造成的后果往往也是不容忽视的。

现代化管理可以大大提高工作效率和质量,当然也包括着可靠性。但是如果处理不当,系统可靠性没有得到足够保证,那么它也会带来严重的影响。据说在一次国际博览会上,曾用电子计算机来安排人员吃饭,结果由于计算机出故障而使五千人没饭吃。又据说有一次重要会议,采用电子计算机统计投票结果,也由于计算机失灵而打乱了进程。所以愈是走向现代化,愈要注意可靠性。否则我们只会被所谓的现代化所嘲弄,到头来造成被动和损失。

因此,从各个方面提高和改善系统可靠性是人们走向现代化的紧迫任务。没有可靠性基础,理论上再好的系统也只能是空谈。

提高系统可靠性,一方面要从各种元件、设备着手,各种元件、设备本身的可靠性是系统可靠性的基础。大力提高各种元件和设备本身的可靠性一直是一些元器件工作者、设备研制和生产者的努力方向。应当说,在这方面这些年来确实取得很大进展。在四十年代的一架歼击机上的电子设备还只有 600 个元器件,而

在七十年代则有 10^5 个元器件，阿波罗飞船更高，达 7×10^7 个元器件。如果元器件的可靠性不随着做相应的大幅度提高，这些进展是不可能的。另一方面则要从系统的设计着手。譬如其中所有元器件和材料所处的工作状态，不仅没有过压、过载、温升过高等现象，并且还要具有一定的裕度，以延长元器件和设备的寿命；又如采用冗余贮备，使系统即使有个别甚至部分元器件或者设备出现故障仍能正常工作等等。甚至在更换这些故障器件或者设备时也不影响其正常运转，譬如目前有些计算机就是这样设计的。当然，这将有可能会增加系统和设备的复杂性以及成本，但是如果设计得合理，增加的也就不多，而可靠性的收益则很大。对于一些可维修的系统来讲，系统和设备的设计也要从便于维修着手，模块结构和高度的标准化就是大家所关心的问题。但是另一方面也要从管理方面来考虑，分析和提高系统的可靠性。所有这些都是本书所讨论的内容。当然，它与设备的配置、维修队伍的配备以及如何组织、如何管理等等系统设计方面的问题更是不可分割的。可以说，它也是系统工程的一个分支，是从事管理的工作者所应关心的问题。

随着科学技术的发展，各种设备的可靠性不断提高，也给备件设置和维修管理工作带来不少变化，甚至是性质上的变化。譬如在五十年代计算机的平均故障间隔时间只有几十小时，甚至更低，并且应用也不普及。这时每台计算机都要配备一定的专业维修人员随时进行检修。所考虑的问题主要是计算站的维修队伍和备份设备以及零件应如何配置、如何管理的问题。而在今天计算机的可靠性已提高一两个数量级以上，并且普及面很广。这样一方面一般已无必要每台计算机配备专业维修人员，并且即使配备了也由于故障很少，无法从实践中得到有效锻炼而难于取得实效。另一方面则需要而且也有可能，由计算机公司或者其他有关单位建立维修中心来负责一个地区的所有计算机的维修。所以，这时所考虑的应当主要是维修站和服务网如何组织的问题。本书从备件设置与维修管理这一角度针对上述各种维修方式也进行了一些

讨论。可靠性的进一步研究目标，对于某些设备来讲，则还应要求其可靠性提高到在其使用寿命期内无需维修的程度，但这已是下一步的事，也不属本书所讨论的内容。实际上，既不可能也无必要要求所有设备的可靠性都达到这一境界。

近二三十年来，系统可靠性的理论得到很大发展，有关的刊物和书籍出版了不少。但是一般所讨论的都没有考虑可修复的情况，因此比较简单。对可修复的系统也有涉及的，但多半是用马尔柯夫过程的理论列出微分方程组来求解。这种方法要具有高等数学知识才能理解，理论比较深奥，计算尤为复杂，并且是用系统在某一瞬间正常工作的概率来表示其可靠性，很难普及推广。本书则用一些浅易概念和比较简单的计算方法，以系统的平均连续运转时间来表示系统可靠性。一般只用到代数方面的知识，其内容对于一些没有具备高等数学知识的同志也有可能理解，这些方法有较大的实用性和推广应用价值。

本书所讨论的可靠性分析的基本方法在一般可靠性书籍中也有所提及，但是在这些书籍中都只是利用微分方程组推导出一些稳定状态下的解，不是一些非常简单的情况，就是讨论得非常表面，而没有把问题深入下去，读者难以体会这种方法的实用价值。本书则是利用平均值，直接求出稳定状态下的解，而就系统中常遇到的一些有关典型问题进行较深入的讨论，以利读者学习和运用。

在可修复的系统中，系统可靠性除了与系统结构有关外，还与备件设置数量和维修队伍的配备密切相关。显然，备件少、维修队伍弱将不能保证系统具有较高的可靠性；相反则可提高系统可靠性。但是备件过多，维修队伍过大也属浪费，还会造成管理上的困难。一般讲来，维修队伍以精干为宜。

本书是从备件设置和维修管理的角度讨论可修复系统的可靠性之实用计算方法，具体问题是：备件如何设置、维修队伍如何配备、如何管理方能使系统既达到所要求的可靠性，又收到最大效益，人员、设备等能较好地发挥作用。反过来说，在系统的备

件设置、维修管理方案已经确定的情况下，如何预计其可靠性。

需要说明的是，系统可靠性的计算要在设备的故障速率和故障修复速率这些参数已知的情况下方能进行，而目前往往缺少比较精确的数据。对此只好参考他人的工作或者自己在这方面的类似工作来加以估计，在实际工作中，备件设置数量和维修队伍的配备总归要决定的，所以总归要有一个估计数据，即使这个数据不很准确，总比没有数据好。我们应当先利用这些数据，根据自己的情况进行加权处理，而后再通过实践不断予以修正，以积累经验，并逐渐趋向准确。

在这些数据的估计中，如果系统运转中断会出现灾难性后果，则故障速率应取大些，修复速率应取小些，反之则相反。另外，如果系统连续运转时间很长，而有充裕时间可增置备件和加强维修队伍时，在系统投入运行初期，可先按故障速率偏小、修复速率偏大来估计数据，以确定备件数量并配备维修队伍，而后再通过一段运转过程，根据实际情况所统计的数据来加以调整。

本书所讨论的内容可以广泛地应用到各行各业中去。只是由于作者多年来从事计算机工作，所以与计算机有关的问题讨论得多一些。虽然作者也在其他方面进行了一些努力，除了有运输系统、电信系统以及一些技术兵种等方面的备件设置和维修管理方面的问题外，还提到一些象工厂生产线和医院病床的设置数量以及仓库的贮存和商店的进货等方面的特殊问题，但毕竟是偏重于个人的主观设想，而且内容也有限。不过，读者只要将这里所讨论的对象，结合各自工作适当地加以更换，就可使之得到推广和发展，其计算方法是一样的。

本书共分十章。每章都有一明确的重点，并通过一些典型例子说明其计算方法。每章后附有一些练习和部分答案，读者可通过练习巩固学习的内容。另外，在实际遇到的一些系统中，往往根据系统本身的特殊性，制定了一些制度，如定期预检，强迫停机等等。具有这些特殊情况的问题需要进一步深入到各个专业领域中。才能解决，但由于它的范围很广，这里对之进行讨论

既不可能，也不合适。读者可根据本书所介绍的基本分析方法自己去开发。

值得指出的是，本书的一些讨论也不应单纯地看作是计算方法的介绍，它同时也提出一些维修管理中值得考虑的问题，所以它也是管理方法的介绍。譬如，维修队伍和备件设置是否合理，集中检修和分级管理的优越性如何，系统间的相互支援之效益如何以及人员或物资是否调动过于频繁等等，通过这些计算方法的介绍，特别是一些例子的说明，在管理方法上也会给我们一些启发。它实际上涉及了一系列管理方面的重要问题。

下面对各章讨论的主要问题作一简介。

第一章主要介绍系统可靠性的一些基本概念，并就一般不考虑备件修复和添置的系统之可靠性进行简单描述。另外，针对备件只有一个或两个的简单的备件可修复之系统的可靠性计算方法也进行了介绍。所有这些内容在一般可靠性书籍中^[1-3]都已有讨论，这里只是扼要地加以说明，其目的既考虑本书的完整性，又为以下各章提供一些基础知识。

第二章介绍简单的典型系统连续运转时间的计算。求出在系统的故障速率和修复速率为已经给定值时，当系统启动于不同状态的情况下，系统的平均连续运转时间以及其他有关可靠性的数据，如设备的利用率、维修站的服务能力等等。

第三章是简单的典型系统的备件数的计算。它是在前一章的基础上，反过来在给定系统可靠性要求时，计算各种备件配置的最经济方案，或者在配置备件的费用已经给定的情况下，计算各种备件应配置的数量，以求得系统具有最大的可靠性。

第四章讨论系统的检修速率如何调节的问题。根据系统修复速率与可靠性的关系，将第二章所讨论的内容进一步深化，把加班加点、人力调动以及在必要时提高系统的检修速率等检修制度考虑进去，从而引出这些措施的有效性，以及组织安排是否合理等等问题。并提出当常规检修、突击检修、紧急抢修等多种检修制度采用于同一系统中时应如何计算这些问题。

第五章研究系统的故障速率随状态而异的一些情况。常见的情况是冗余系统和降级使用，系统的故障速率随参与运转的设备数量而异。其次是贮备的不工作的备件也有一定的失效率。本章主要是针对这两者对以上各章讨论的内容进行深化和补充，但主要是针对前一种情况进行讨论。

第六章分析由不同型号的同类设备组成的系统之可靠性。如发电厂的电力是由几种不同型号的发电机组来提供，对于这类系统，上述各章所讨论的问题依然存在，只是更复杂而已。另外，还讨论当几种不同型号的设备都有故障时，应当优先检修哪种型号的设备。这里通过一些例子加以说明，使读者建立一个较完整的概念。

当系统中的设备的故障具有几种不同性质时，其分析方法与不同型号的问题有些类似，关于这方面的讨论则纳入习题中，并加以提示，由读者自己去发展。

第七章介绍系统有可能得到支援的情况下之可靠性分析。支援的方式多种多样，可以是人力支援，也可以是物力支援，或者两者兼有之。这里将对支援效果、平均每次支援所需的持续时间加以计算，并对不同方式的支援效果进行比较。另外，系统之间的支援往往是相互的，对这种相互支援的系统间的支援能力和效果就要进行综合分析，还要研究相互之间有多大支援潜力以及支援是否过于频繁。

第八章讨论集中检修和分级管理制度。先分析集中检修的优越性，后就分级管理如何考虑，以举例的方式加以说明。此外，也指出在某些场合下集中检修并不一定优越，以备件相对集中的方式进行检修比较合适，这就牵涉到维修站人力、备件的配置是否合适，以及上下级之间的人力、物力应如何分配等等问题。所有这些均在这一章中讨论。

第九章是配套设备的维修问题。许多系统往往由多种设备配套组成，而维修队伍则合在一起。这样就出现当几种设备都有故障时应优先检修哪种设备以及其系统可靠性如何计算等新问题。

这些问题将比以上几章所讨论的一些系统复杂得多。本书只作了一些简单的介绍。

第十章是备件不可修复但可补充的系统之可靠性分析。不可修复的备件是指一般系统在运行中所消耗的零件、材料和设备。这里将这些消耗器材的添置当作备件的修复来处理。研究在什么情况下应当进行购置，购置数量应是多少以及它与系统可靠性的关系如何等等。这就涉及到商业系统、物资供应系统中的一些问题，如商店商品销售速率、工厂的物资消耗速率与库存量的关系等等。实际上，它也属于库存论的范畴。

练习题分为两类。一类是将正文中的内容加以复习，以使读者能够掌握和运用。另一类则是将正文的内容进一步加以引伸和开发，有的并在文中加上提示，这类习题读者可根据具体情况选做。

不管怎样，本书所讨论的还只是一些比较基本的可靠性分析方法。进一步要考虑的问题将还有不少，特别是涉及到维护费用以及种种投资这些经济方面的问题，并且它随着情况而异。对于这些问题只有根据本书所介绍的有关可靠性基本分析方法，结合具体情况进行深入研究。

为了更好地理解本书的内容，最好请读者能在阅读本书之前学习一点概率论基础以及可靠性数学基础。

本书的部分内容曾在有关杂志和学术交流会上发表过，并有一些工厂、研究所的读者和专家们前来探询，使作者感到有必要将过去在这这方面的工作进行整理和补充，以期能为我国的现代化建设中做点贡献。在编写本书过程中，曾得到虞承宜同志的帮助，进行了审阅，并提出不少宝贵意见，此外，还得到不少同志的热情鼓励，在此谨致谢意。只是作者学识有限，难免有错误和不妥之处，希望读者和专家们多提意见，以便改进。

第 一 章

系统可靠性的一些基本概念

§1.1 什么叫系统?

粗略地讲, 由一些基本部件(也可以包括人、土地以及一些基础设施)组成具有一定特定功能以完成某项任务的整体, 可以称做一个系统。

系统有大有小。譬如我们可把计算机网看成一个系统, 而其中的各个计算机和管理机构等这些分系统(或称子系统)看成其基本单元。我们也可把一台计算机看成一个系统, 而将各个部件和设备看作其基本单元, 或者将计算机的某一部件或者设备看成系统, 而将其中的插板或者零件作为系统的基本单元。

又如我们把民航事业看作一个系统, 那么它就包括一系列机组、航空港以及工厂和服务设施。至于导航设施、通信设施则更是其下面的子系统。

因此, 系统的概念是相对的。有些系统可以分为多级的分系统。但不管怎样, 系统不论大小, 不论是一个部件, 还是一个很大的多级系统, 它本身应当是一个独立的完整的整体, 或者可与其他系统割裂开来以进行独立分析的整体。譬如有一系统由 A 、 B 两种设备组成, A 、 B 两种设备都有其独自的功能, 但由一个维修班负责维修, 或者它们共用一套维修设施。这样, A 、 B 两种设备就通过维修班或者维修设施而连在一起, 当我们讨论其可靠性时, 一般就不能将 A 、 B 两种设备分开来各自进行分析。这里就不能称 A 、 B 为两个分系统。如果 A 、 B 两者之间在维修方面有某些约定, 如每日上午维修 A 设备, 下午维修 B 设备, 从而使它们又可各自独立地进行分析, 则仍可将 A 、 B 看成两个分系统。另外, 还有一些约定, 如当 A 、 B 设备的备件中 A 的故障备

• • •

件多于某值时，优先检修 A 的故障备件，不然就优先检修 B 的备件。对于这种情况，如果我们已知 A 的故障多于某值的概率，或者可以求出这一概率，从而使 A 、 B 两设备可独立分析，则仍可将二者看作两个分系统。但是这种分系统有一定的虚伪性，分析起来也有一定局限性，因为当两个分系统中有一个备件设置有所增减或者其他变化时，就将影响到另一分系统的维护情况，所以它们能分割开来独自考虑是有一定限制的。我们可称它为亚分系统。另外，还有一些约定，如当 A 、 B 两者都有故障时，按系统可获得最高可靠性来考虑其维修工作，则无法将 A 、 B 二者分开来进行分析。又如当 A 、 B 两者都有故障时，优先检修故障较多者也难以将它们分割开来加以讨论，所有这些都不能将它们各自看成分系统。

系统不仅包括物，而且还包括着人，此外也可包括土地、房屋以及基建设施。即使是人还可以包括维修人员、采购人员、服务人员和管理人员等等。当然，这里不可能讨论得这样仔细、深入。在以下各章中主要是讨论备件设置和维修管理与系统可靠性的关系，它与人密切联系着，但主要是指维修人员。对某些系统如维修服务中心等，甚至以他们作为主要讨论对象。

§1.2 失效率或故障率

失效率或故障率有时又叫失效速率或故障速率，乃是在单位时间内出现失效或者故障的次数。

一般元器件在其寿命期中要经过早期失效期、随机失效期和耗损失效期三个阶段。其失效率 $\lambda(t)$ 如图1.1所示的浴盆曲线。早期失效乃是在生产过程中，由于原材料的缺陷、生产工艺控制不严以及受了环境条件不稳定的影响等等造成的加工质量不符合要求所导致的产品潜在缺陷，也就是疵品所引起的。这些元器件使一些新生产的产品（设备）在早期具有较高的失效率，但经过一段时间运行后，这些潜在的疵品通过故障的发生而逐一暴露并

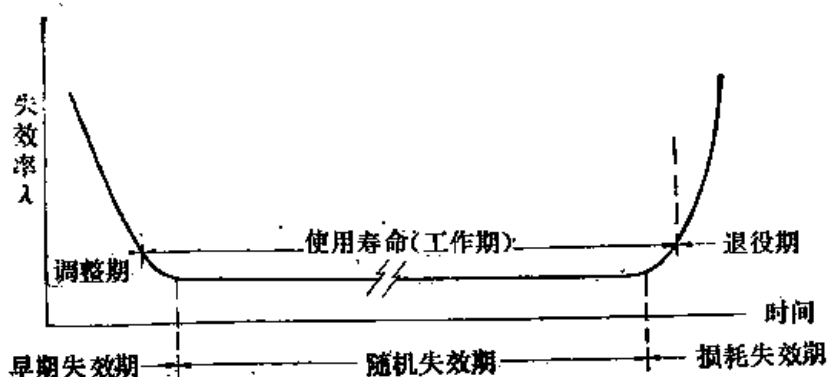


图 1.1

被更换掉。这样乃进入一比较稳定失效期。

降低早期失效率的办法是：加强原材料、生产工艺的质量管理，同时让元器件在出生产厂前或者在安装到设备中之前，在规定的条件下加以老炼（老化），进行严格筛选。另外，在设备出厂前也可先运转一段时期，以剔除早期失效元件。在设备安装后，也可以通过一个试运转过程用以排除安装不当所造成的早期故障。也就是说，在系统或者设备正式投入使用之前，它已经过一段调整期，使之基本上已经脱离早期失效期。

随机失效期又叫偶然失效期，它的失效率乃是设备在长期运转过程中，一些特定元器件所积累的应力超过了其本身固有缺陷的强度而引起的报废。偶然失效期的特点是失效率高而且稳定，但其失效是随机性的，不能预计什么时候发生。随机失效期乃是设备在其寿命中的主要工作期。

在随机失效期，其失效率近似地为一常数。这时它能连续工作到时间 t 的概率，也就是可靠度 $R(t)$ ，一般是按负指数律分布的。即

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\lambda t} \\ &= e^{-t/D} \end{aligned} \quad (1.1)$$

其中 λ 是其失效率，也就是在单位时间内失效的瞬时概率。其倒

数 $1/\lambda$ ，即 D 则为其平均失效间隔时间 (MTBF)。在这情况下，在时间 Δt 内出现失效的概率将为 $\lambda\Delta t$ 或 $\Delta t/D$ 。我们以后的分析都是基于这一假设的。

至于其不能连续运转到时间 t 的概率，我们叫它失效度，而以 $\bar{R}(t)$ 表之，则有

$$\begin{aligned}\bar{R}(t) &= 1 - e^{-\lambda t} \\ &= 1 - e^{-t/D}\end{aligned}\quad (1.2)$$

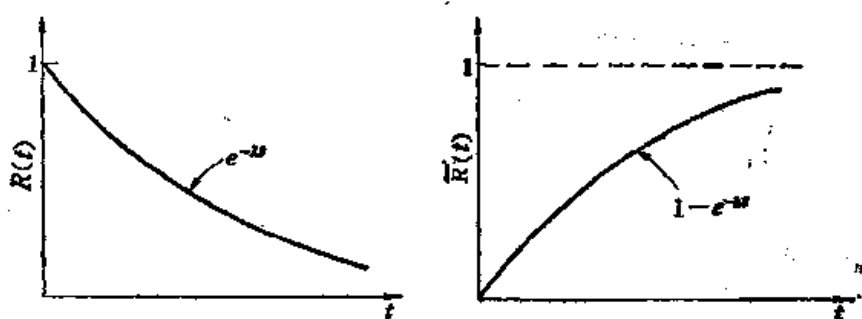


图 1.2

图1.2表示出上述可靠度 $R(t)$ 和失效度 $\bar{R}(t)$ 与时间的关系。它在一般情况下是近似地符合客观实际的，这是本书所讨论的内容之基本前提。

譬如有一设备已知其平均故障间隔时间 D 为5000小时，那么它连续运转到2000小时不出故障的概率，也就是其可靠度则为

$$\begin{aligned}R(2000) &= e^{-2000/5000} \\ &= 67\%\end{aligned}$$

而在这期间出现故障的概率，也就是其失效度则为

$$\begin{aligned}\bar{R}(2000) &= 1 - R(2000) \\ &= 33\%\end{aligned}$$

创造良好的工作环境，如预防温度、湿度、腐蚀性气体以及冲击、振动等等所带来的不良影响，降低元器件所承受的应力，如降低电子器件和机电器件的工作电压、电流、功耗以远小于其额定值，以及提高日常维护工作的质量等等，都可降低其工作期的失效率，甚至可使失效率的降低出现数量级的变化。另外，它

也可以推迟耗损失效期的出现,也就是说可以使设备退役较晚,而具有较长的使用寿命。

应当提出的是,这里所有的讨论都是按设备处于随机失效期,也就是其失效率为一常数来考虑的。当设备通过维修以致使其运转时间超过其使用寿命而进入退役阶段,这里所有的分析就失去其意义。

§1.3 串联结构的可靠度计算^[1-4]

当一个系统由许多设备或者元器件组成时,在这些设备或者元器件中有任何一个失效就将导致整个系统失效的情况下,我们称这种系统为串联结构,系统与这些设备或者元器件的可靠度之间的结构关系如图1.3所示。在A、B两点之间,有*1,*2,*3,...,*N个设备或元器件,它们处于“串联”工作,当其中有一个失效,

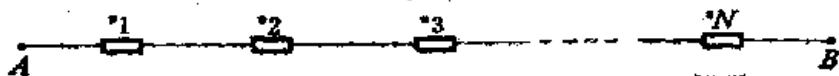


图 1.3

AB间即断开,而使系统失效¹⁾。对于这种情况,其可靠度当为系统中所包含的各种设备或者元器件的可靠度之乘积。譬如一个系统由A、B两个设备串联组成,设备A可靠运行的概率为0.9,设备B可靠运行的概率为0.8,则系统可靠运行的概率为 0.9×0.8 ,即0.72。这就是说系统可靠度为72%。因之,在一般情况下,系统的可靠度 $R(t)$ 有关系式

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdots R_N(t) \quad (1.3)$$

其中 $R_i(t)$ 为系统中基本单元(基本单元可以是元器件、设备,也可以是分系统) i 的可靠度。如果系统中对基本单元 i 来讲有 n_i 个,其故障率为 λ_i ,则基本单元 i 的总可靠度为

1) 读者应当注意,这儿所谓的“串联”,不是指物理上的串联,而是指“缺一不可”的联合工作。

$$R_1(t) = (e^{-\lambda_1 t})^{n_1} = e^{-n_1 \lambda_1 t}$$

而对系统来讲，其可靠度 $R(t)$ 为：

$$\begin{aligned} R(t) &= R_1(t) \cdot R_2(t) \cdots R_N(t) \\ &= e^{-n_1 \lambda_1 t} \cdot e^{-n_2 \lambda_2 t} \cdots e^{-n_N \lambda_N t} \\ &= e^{-\left(\sum_{i=1}^N n_i \lambda_i\right) t} \\ &= e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (1.4)$$

这里 λ 是系统的故障率。其中有关系式

$$\lambda = \sum_{i=1}^N n_i \lambda_i \quad (1.5)$$

在实际应用中，常常用失效率或者故障率的倒数，即 $1/\lambda$ ，来表示设备或者元器件的可靠性。一般称它为平均失效（故障）间隔时间（MTBF），还有一些称呼，如平均稳定时间、平均连续运转时间、平均首次失效（故障）时间（MTTFF）等等。这些名称意义虽不尽同，但大体相同。我们有时令 D 和 D_i 来分别表示系统和其基本单元（设备或元器件）的这一数值，则对应式（1.5），有

$$\frac{1}{D} = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{D_i} \quad (1.6)$$

例1.1 有一系统由 A 、 B 两个设备组成。经对 A 、 B 两设备进行试运转， A 的故障间隔时间为 2100、2400、1980、2310、2280 小时， B 的故障间隔时间为 1350、1460、1750、1500、1380、1490 小时。问该系统的平均故障间隔时间是多少？

这里设备 A 出现 5 次故障，其平均故障间隔时间 D_A 为

$$\begin{aligned} D_A &= \frac{1}{5} \times (2100 + 2400 + 1980 + 2310 + 2280) \\ &= 2214 \text{ 小时} \end{aligned}$$

设备 B 出现 6 次故障，其平均故障间隔时间 D_B 为

$$D_B = \frac{1}{6} \times (1350 + 1460 + 1750 + 1500 + 1380 + 1490)$$

$$= 1488 \text{ 小时}$$

系统的平均故障间隔时间 D 当有关系式

$$\begin{aligned}\frac{1}{D} &= \frac{1}{D_A} + \frac{1}{D_B} \\ &= \frac{1}{2214} + \frac{1}{1488} \\ &= 0.001124 \text{ 1/小时}\end{aligned}$$

即 $D = 890 \text{ 小时}$

例1.2 有一数字设备,其所用元器件和焊接点等的数量及其失效率如表1.1中(1)到(4)诸列所示,试求该设备的平均故障间隔时间。

表 1.1

(1) 项目	(2) 器件名称	(3) 个数(n_i)	(4) 失效率(λ_i)	(5) 总失效率($n_i\lambda_i$)
1	集成电路	120	6×10^{-8}	7.2×10^{-6}
2	焊点	6000	1.5×10^{-9}	9×10^{-6}
3	金属化孔	5000	1.5×10^{-9}	7.5×10^{-6}
4	二极管	280	2.5×10^{-8}	7×10^{-6}
5	晶体三极管	80	2.5×10^{-8}	2×10^{-6}
6	电容	100	7×10^{-9}	0.7×10^{-6}

注:表中 λ_i 以1/小时为单位。

我们首先求该设备中各项器件的总失效率 $n_i\lambda_i$,结果如表中第(5)列所示,而后进一步求设备的总失效率 λ

$$\lambda = \sum_{i=1}^6 n_i\lambda_i = 3.34 \times 10^{-5} \text{ 1/小时}$$

根据此,可求出该设备的平均故障间隔时间为

$$D = \frac{1}{\lambda} = 3 \times 10^4 \text{ 小时}$$

例1.3 有一数字计算机系统,它包括的各种部件之数量(N)以及各种部件的平均故障间隔时间(MTBF)如表1.2所示。问该系统的平均故障间隔时间是多少?其连续运行24小时的可靠度是多少?