

TM621
3747

177338

高 等 学 校 教 材

发电厂运行可靠性分析

重庆大学 阎超 编

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

内 容 提 要

本书着重对发电厂电气部分的运行可靠性进行分析,全书共分六章。第一、二章介绍电厂运行可靠性的研究任务和讨论性质;第三、四章介绍电厂运行可靠性分析的原理和计算机算法;第五、六章介绍了电厂运行可靠性评价和分析。本书为电力系统自动化及继电保护专业学生学习参考教材,也可供电厂工程技术人员参考。

高等学校教材

发电厂运行可靠性分析

重庆大学 阎超 编

水利电力出版社出版

(北京三里河路 6 号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 8.75 印张 192 千字

1995 年 11 月第一版 1995 年 11 月北京第一次印刷

印数 0001—2270 册

ISBN7-120-02349-7/TM·619

定价 6.90 元

前 言

随着国家经济建设的迅速发展,大容量机组和大型发电厂不断投运,电厂运行可靠性受到重视。本教材就是为适应这一形势需要而编写的。目的是,期望本教材能对学生提供必要的电厂可靠运行理论和分析概念,为参加电厂生产活动奠定基础。当然,也衷心希望能为有关技术人员提供参考。

由于 $(0, 1)$ 两状态模型难于解释电厂运行问题,本教材采用的是多状态模型。

全书共分六章。第一、二章介绍电厂运行可靠性的研究任务和讨论性质;第三、四章介绍电厂运行可靠性分析的原理和方法;第五、六章介绍了示例计算和指标分析。为了便于学生掌握,附录对有关数学方法的典型程序进行了必要的介绍。

本教材是供大学高年级学生使用的选修课程教材。对概率及数理统计有关基本内容,只进行了必要的介绍;有关网络分析的图论知识,则在安排了补充性讲述。

教材的讲述重点是放在发电厂电气部分,对于电厂动力部分是按运行相关性质处理的。因为无论是水力发电厂,还是火力发电厂,其动力部分也都是一个复杂的运行系统,在本教材中是无法展开详细分析的。

本教材是原能源部全国高校电力工程类教学委员会教材出版计划确定的。编写过程中得到教学委员会电厂组的关心和帮助,西安交通大学杨时百教授对本书进行了细致的审定,在此衷心感谢。

由于目前尚未寻得类似教材作为编写参考,本教材取材多半来自已有成效的国内外资料。限于作者水平,在编写上难免有所不足,恳请批评指正。

编 者

1993.7

目 录

前 言

第一章 概论	(1)
一、电力生产的特殊性质和要求	(1)
二、电厂运行可靠性讨论的特点	(1)
三、设备的运行可靠性概念	(2)
四、电厂故障概念	(3)
五、电厂运行可靠性与电厂规划可靠性的区别	(4)
复习思考题	(5)
第二章 可靠性分析的数学基础	(6)
第一节 设备可靠性的数学描述	(6)
一、设备运行的工况状态及状态转移特征量	(6)
二、设备的可靠性参数	(6)
第二节 设备故障类型	(10)
一、设备停运的状态类型	(10)
二、设备可靠性参数的要求	(13)
第三节 设备可靠性模型简介	(13)
一、模型的常用类型	(14)
二、设备的降额模型	(17)
第四节 继电保护模型	(20)
复习思考题	(21)
第三章 电厂运行可靠性分析原理	(23)
第一节 电厂的故障状态空间	(23)
一、电厂运行的多维故障状态	(23)
二、电厂故障状态空间	(23)
第二节 电厂故障的矩阵描述	(26)
一、运行工况的特征矩阵	(27)
二、电厂故障矩阵	(32)
三、复合停运模式	(34)
第三节 供电连续性故障诊断	(35)
一、故障诊断原理	(36)
二、故障诊断方法	(36)
第四节 供电充裕性故障诊断	(39)
一、故障诊断原理	(39)

二、故障诊断方法	(46)
复习思考题	(51)
第四章 计算机算法	(53)
第一节 对可靠性计算方法的要求	(53)
第二节 计算条件的考虑	(54)
一、电厂故障的定义	(54)
二、系统对电厂运行的约束	(54)
三、设备的运行约束	(54)
四、对设备可靠性参数的要求	(54)
五、评价指标	(55)
第三节 基本矩阵的计算机建阵方法	(55)
一、深度优先搜索法	(55)
二、基本矩阵的存贮方式	(58)
第四节 主接线网络的连通性与可分性	(60)
一、有关定义及概念	(60)
二、网络连通性的判定	(61)
三、网络可分性的判定	(63)
第五节 电厂运行可靠性算法	(67)
一、算法的一般要求	(67)
二、电厂故障的搜寻算法	(67)
三、电厂供电不足指标的算法	(70)
复习思考题	(72)
第五章 电厂运行可靠性评价	(73)
第一节 评价的性质与任务	(73)
第二节 设备的可靠性参数	(73)
一、设备运行可靠性参数	(74)
二、设备可靠性参数的运行条件处理	(74)
三、复合停运时间的确定	(78)
第三节 复合故障的概率计算	(79)
一、复合故障的状态组合条件及有效复合判别	(79)
二、设备复合停运事件的概率计算	(80)
三、考虑设备检修工况时的电厂故障概率	(80)
四、考虑设备故障工况时的电厂故障概率	(81)
五、全工况情况下的电厂故障概率	(82)
第四节 全运行方式的可靠性指标计算	(82)
一、构成电厂故障的各类设备故障状态组合搜寻	(82)
二、可靠性指标分析	(85)
第五节 非全运行方式的可靠性指标计算	(88)

一、块计算模式及应用	(88)
二、故障状态组合的修改	(90)
三、可靠性指标计算及分析	(93)
第六章 电厂运行可靠性分析	(96)
第一节 机组停运对电厂运行可靠性的影响	(96)
一、G2 停用对电厂运行可靠性的影响	(96)
二、G3 停用对电厂运行可靠性的影响	(100)
三、三种发电机停用方式的可靠性分析	(104)
第二节 母线停用的可靠性影响	(106)
一、母线 16 停用的影响	(106)
二、母线 17 停用的影响	(109)
第三节 断路器停用对电厂运行的影响	(111)
一、同串断路器停用对 W1 供电的影响	(111)
二、同母线侧断路器停用对 W1 供电的影响	(115)
三、不同串中间断路器停用时对 W1 供电的影响	(116)
第四节 设备维修水平对电厂可靠运行的影响	(117)
一、 $\Delta\lambda$ 及 Δt 变化对一阶故障的影响	(119)
二、 $\Delta\lambda$ 及 Δt 变化对二阶故障的影响	(121)
第五节 断路器拒分概率对电厂运行的影响	(123)
附录一 计划检修与故障重叠停运的指标计算	(125)
附录二 DFS 算法程序	(126)
附录三 连通片的搜索程序	(127)
附录四 PATON 算法程序	(129)
附录五 TARJAN 算法的 CUTND 程序	(130)
参考文献	(132)

第一章 概 论

一、电力生产的特殊性质和要求

与其它各类工业产品相比较，电能是一种特殊产品。这一商品的特殊生产性质，确定了电力生产与其它工业生产的差异。可归纳如下：

(1) 战略性需要。电力生产的电能是国家经济生活的基本能源，所以搞好电力生产是事关国家建设发展速度的战略性需要。在现代社会里，电能的应用已遍及每个社会活动方面，成为社会发展的能源基础，年人均耗电量已是衡量一个国家国力、技术发展水平和国家经济发达水平的重要尺度。

(2) 协调运行性能。电力生产系统是一个特别庞大、特别复杂的高科技系统，必须具有良好的协调运行性能。由于电能是一种不可储存的特殊产品，其生产、输送和使用都是同时完成的，所以电力生产系统的运行具有特别复杂的性质。容易理解，为数众多的发电、变电、送电设备必须在准确配合下运转，所以其运行技术的复杂性是一般工业生产所不可比拟的。试设想，在全国统一电网建成后，将由数以万计的各类发电机组和为数更多的各种电压等级的输电、供电线路组成一个联合运行整体。对于这样一个全国统一电网可靠运行是何其复杂和困难，其运行技术无疑是高水平的。

(3) 电力生产要求具有很高的可靠性水平。在电能作为国民经济基础的当今社会里，已难于确切断言一旦电力供给中断所造成的严重损失和危害，甚至在某些场合即使供电不足也是不容许的。停电或供电不足都会程度不同地阻滞经济发展进程或给社会活动带来损失和不便，对国家建设和发展产生干扰和破坏。因此，对用电必须保证足够的供电可靠性已提上日程，并且形势越来越严峻。对于供电可靠性问题，在技术发达国家已毫无例外地受到特别重视并作为重要技术要求认真对待。我国自70年代起就已着手开展了供电可靠性工作，80年代起就从设计、规划到运行进行了贯彻，对电力生产的运行水平提高取得了良好的推动作用。

二、电厂运行可靠性讨论的特点

众所周知，对电厂运行的功能要求是：经济可靠地按给定计划发出并送出所需电能。但由于各电厂的设备状况、运行的功能要求以及生产环境条件都有所差异，且运行的管理水平和技术水平也参差不齐，所以采用简单的定性办法是难于对各电厂的运行质量作出如实评价的。更重要的是，原则性的定性评价难于揭示在电厂运行中各种隐含的有利或不利因素，从而难于从纷乱的运行现象中发现和掌握可靠运行规律，阻滞了电厂运行水平的提高。对电厂运行进行定量的可靠性分析和评价，可以从运行现象中取得指导运行的信息，这是电力生产现代化十分重要的内容，它标志电厂运行水平提高的一个阶跃。

由于电厂运行和电网运行的讨论条件和功能要求上存在差异，它们的可靠性讨论是有区别的。电厂运行可靠性讨论具有以下特点：

(1) 电源是具体的发电机。与电厂运行可靠性讨论不同, 电网运行可靠性讨论是以电厂作为电源来进行讨论的。这是因为电网运行可靠性讨论是以电能传送能力为目标的, 而电厂运行可靠性讨论则是以发电送电能力为目标进行的。正由于此, 电网运行可靠性讨论中把电厂视为电源点, 而电厂运行可靠性讨论则必须把每个发电机均视为电源。

(2) 以发电送电功能为依据评价。在电厂运行可靠性讨论中, 作为电源的发电机组既是可靠性元件, 也是有容量约束的元件。而在电网运行可靠性讨论中却往往采用电源绝对可靠、系统电源容量足够大等假定。对电源的定义及其假定采取不同处理观点的原因在于两者的可靠性讨论目的不同、所依据的判据和准则存在差异。虽然电厂运行和电网运行的可靠性讨论都应包含供电连续性能和供电充裕性能两方面的评价内容, 但是, 在电厂运行可靠性的讨论中, 由于发电机组就是主接线网络中的一个结构元件, 所以其功能可靠性讨论必须在主接线网络送电能力分析的同时, 还须对各台发电机组实际发电功能进行考察。在电网运行可靠性讨论中, 情况并不是这样, 由于其讨论的功能目标是供电网络的连续供电能力和电源可靠供电容量对负荷需求容量的保证能力, 所以在其可靠性讨论中并不需要把每个发电机作为有容量约束条件的可靠性元件处理。

(3) 电厂运行可靠性模型比较复杂。电厂设备在运行中是相互关联的, 而且运行工况条件复杂, 所以设备的故障性质需要分类处理。从而, 反映电厂运行可靠性性能的设备故障模型和电厂运行可靠性模型不再可能建立在 $(0, 1)$ 两状态分析基础上, 必须考虑多状态模型。

此外, 由于电厂设备在主接线网络的运行中具有不可忽略的相关性质, 因此不能允许采用元件是独立的这一假定, 否则将使可靠性评价发生严重偏差甚至谬误。

(4) 电厂运行可靠性计算应具有动态分析的能力。电厂的运行条件是多变的, 设备的运行工况也因此而多变。然而, 设备在某一选定运行工况条件下所具有的可靠性能并不能说明在其它工况条件下也是相同的。因此不可能设想, 根据某一给定运行工况条件所进行的运行可靠性计算就能对电厂运行作出公正的评价。这样往往会导致掩盖其它工况间电厂故障后果的差异, 导致评价失真, 显然是不妥当的。虽然, 在每种设备或工况改变时都可以反复进行可靠性计算, 但是这将带来计算上的灾难, 所以这种定态计算办法是不可行的。对电厂运行可靠性分析来说, 有实用价值的可靠性计算方法应该能实现动态计算, 即能够根据设备工况变化通过适当的修正处理, 就能取得电厂运行功能的评价结果。动态计算方法并不需要针对每种电厂运行工况进行反复计算, 所以不存在计算灾难问题。

电厂运行可靠性分析需要采用动态计算方法的另一个原因是为了能实现电厂运行方式变化的计算要求, 并提供电厂工况状态变化分析所需的定量数据。

动态计算是通过两个步骤完成的。第一步, 按给定判据截取电厂故障各阶设备故障状态组合, 并分别计算出它们的可靠性指标; 第二步, 进行运行方式变化的修改计算。

三、设备的运行可靠性概念

除个别辅助设备外, 电厂的主要电力设备都是可维修的。每台设备在持续的运行过程中总会磨损老化, 所以都有其自然寿命。在设备投运初期, 可能因制造、安装、调试等原因, 在短时期内出现某些设备故障。在此期间所出现的设备故障, 由于并非出自随机因

素影响所造成，所以不应列为电厂正常运行状态进行讨论。与之相反，当设备长期使用以后，由于磨损老化已达到无法恢复的地步，这时设备已进入老化期，其故障频繁发生是在所必然。由于在老化期中的设备故障也并非因随机因数引起，故也不应列为电厂正常运行情况进行讨论。排除投运初期和老化期后，设备性能稳定的可用时间称为有效寿命期。在有效寿命期中，由于已排除了设备缺陷导致不能可靠运行的种种可能，因此设备故障可以归结为设备运行中的随机故障，所以又称这一时期为随机故障期。设备运行可靠性讨论的就是，在随机故障期内，完好设备发生随机故障的机理和故障对电厂可靠运行的影响。

电厂电力设备都是可维修的，一旦发生可靠性性能下降或故障都可以得到恢复。所以设备在整个有效寿命期内总是处于“正常-故障-修复-正常”的循环中。

设备运行状态的改变是有规律可寻的随机过程。我们把状态改变称为状态转移。研究状态转移的随机过程是期望揭示其状态转移机理、用以解释或改善设备运行可靠性。设备运行状态转移具有下列特征：①设备在同一时刻只能处于某一运行状态，从而同一设备的各运行状态间是互斥的，不同设备间是相容的；②设备的运行状态在其运行期间里会发生状态转移，对于机电设备，在其有效寿命期内的状态转移过程服从指数规律；③设备的运行状态可以用随机事件的发生概率和频率定量描述，状态转移过程可以由其特征量定量的转移函数描述。

在以上设备运行特征条件下，进行电厂运行可靠性讨论，还需考虑以下运行条件约束：①设备运行是合乎各项技术规范的，不包含人为影响因素，就是说，设备所处的运行状态和状态转移都仅由其自身可靠性演变规律所确定；②设备的运行是在各项技术条件容许范围内进行的，各项技术条件就是设备运行的规定条件；③设备正常运行所需的规定条件一旦发生改变，对设备的可靠运行都是一种影响，必须做出相应修正。

四、电厂故障概念

正由于电厂是电力系统运行整体中的一环，所以发电厂的运行不是孤立进行的，与电网运行及负荷用电都有密切的关联性质。把电厂运行可靠性作为独立于电网运行和负荷用电状况的讨论是无意义的。

电厂运行的功能表现受到上联系统、下联能源的制约，而且相互影响。电厂故障对系统运行的可靠性影响关系示意图 1-1。

至于电厂运行受能源方面的制约影响，对有储煤场的火力发电方式而言是不会存在燃

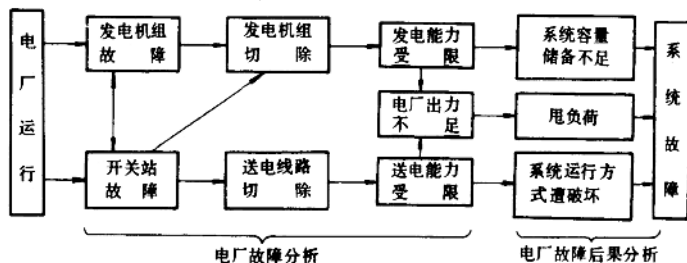


图 1-1 电厂运行对系统运行的可靠性影响

料受限的问题；对于水力发电厂可能会有水能利用方面的问题，在这方面已有许多文献论述，本书不再写入。有关电厂动力设备对发电机运行的可靠性影响，将在第二章中进行讨论。

在电厂电气方面，电厂故障包含发电机组故障和开关站故障两部分内容，两部分的故障形成和故障后果都存在相互交织的影响关系。

所谓电厂故障，是这样一类运行故障：电厂在规定运行条件下，规定时间里不能保证判据规定的发电送电功能的一切故障。电厂故障有三种表现形式：①发电能力不满足正常运行判据要求；②送电能力不满足正常运行判据要求；③电厂运行的稳定性遭到破坏。

无论发电能力或送电能力不满足供电要求都会使电厂产生供电不足，但是是否构成电厂故障，还需由规定的故障判据判定，并非所有供电不足的情况都是电厂故障。

所谓电厂运行稳定性破坏，是严重的电厂故障。指的是：能使系统正常运行遭到破坏的那类电厂故障。即故障影响并不仅限于电厂自身范围，会干扰系统运行的电厂故障。大致可分为三类：①对系统运行虽有干扰，但未构成系统故障，仅产生电力电量损失的电厂故障；②对系统运行的干扰造成系统正常运行状态的破坏，使系统发生故障，但尚未构成系统稳定问题的电厂故障；③具有使系统稳定性破坏的电厂故障。

将电厂故障划分为以上三种形式，目的是确定电厂故障后果。因为，仅就电厂范围讨论电厂故障的电力电量损失，并不能揭示电厂故障对系统运行的影响程度和影响性质，从而对电厂运行的可靠性分析是不完善的。通常所作的电厂故障电力电量损失仅仅是电厂少发少供的损失。倘若仅就电厂设备故障所造成的主接线网络的联通性计算电力电量损失是不恰当的。因为某些故障状态所造成的供电连续性破坏，并不满足电厂故障判据，并不需要计及其供电损失；而另一些电厂设备故障虽未破坏供电连续性，但已经具有必须计及的电力电量损失。

需要说明的是，在电厂故障的电力电量损失计算中，应该考虑以下电厂运行条件：①电厂故障时应该考虑线路实行强送；②发电机组故障停运时，应考虑电厂未故障机组可以按最大技术出力进行发电；③必须考虑电厂故障对主接线供电通道的影响，即必须考虑电厂故障使主接线网络结构产生的变化。因为这一网络结构变化将使潮流分布改变并且可能产生无效通道。潮流分布应受设备允许出力约束，无效通道应删除。

五、电厂运行可靠性与电厂规划可靠性的区别

电厂运行可靠性是着眼于电厂运行水平评价的讨论，而电厂规划可靠性讨论的则是电厂生产流程的合理布置。虽然两者都从各自的分析需要进行了各自的可靠性讨论和计算，但是有区别的。

电厂规划可靠性研究电厂主接线是从方案结构角度进行的，用于结构方案优选。因此，这一可靠性讨论允许在相同给定条件下，采取适当的简化手段进行宏观分析，以便进行相对比较。由于这种可靠性讨论抹去了一些电厂或设备的运行条件，所以并不能说明电厂运行的可靠性能，所以其可靠性计算只是一个评估。

电厂运行可靠性也研究电厂主接线，但这种研究是从设备运行状态分析进行的，用于电厂运行的功能分析。在这一可靠性讨论中应该尽可能地考虑影响电厂功能发挥的各种环

境条件，因此与电厂规划可靠性讨论有所区别，其可靠性分析称为评价。

复 习 思 考 题

1. 电厂运行可靠性与主接线结构可靠性有何差异？
2. 为什么电厂运行可靠性讨论必须考虑与系统运行的相关性质？
3. 什么叫电厂故障？电厂故障与设备故障有什么区别？
4. 为什么把电厂故障按其影响性质进行分类？怎样分类？
5. 为什么在可靠性讨论中，认为故障是随机发生的？
6. 在电厂运行可靠性讨论中，供电连续性和供电充裕性有什么相关关系？怎样处理？

第二章 可靠性分析的数学基础

第一节 设备可靠性的数学描述

一、设备运行的工况状态及状态转移特征量

设备运行的工况状态可用图 2-1 描述。



图 2-1 设备运行工况流程图

1—运行；0—故障修复

根据极大似然估计，设备可靠运行时间 t_i 和故障修复时间 τ_j 的数学期望值应为

$$\hat{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \text{MTTF} \quad (2-1)$$

$$\hat{\tau} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \tau_j = \text{MTTR} \quad (2-2)$$

MTTF, MTTR 分别是长期统计的无故障运行时间和平均故障修复时间。两个指标分别说明设备在长期运行中，可以期望的可靠运行时间和故障停运时间，是设备运行的可靠性能宏观描述。

由此，可以导出设备的平均运行周期，为

$$\text{MTBF} = \text{MTTF} + \text{MTTR} \quad (2-3)$$

二、设备的可靠性参数

设备自身所具有的可靠性能称为固有可靠性。固有可靠性并不是设备的运行可靠性，只是设备运行可靠性的内涵和基础。设备运行可靠性是其固有可靠性在给定运行条件下的性能表现。

根据可靠性定义，一个设备若在规定运行条件下，在规定时间 $(0, t)$ 里，能无故障地发挥其应有功能时，就应该认为该设备的运行是可靠的。其物理意义可写为

$$R(t) = P \quad [\text{设备在 } (0, t) \text{ 时间里均符合功能要求}]$$

就设备固有的可靠性表现而言（即不计及各种人为停运），只有可靠运行和不可靠停运两种互斥运行状态。这里的不可靠停运即故障停运。因此设备的不可靠度应为

$$F(t) = 1 - R(t)$$

式中: $R(t)$ 及 $F(t)$ 都是统计概率, 因此有 $0 \leq R(t) \leq 1$ 及 $0 \leq F(t) \leq 1$ 。

从而, 可进一步推导出以下设备可靠性参数。

(1) 故障概率密度。一个能可靠完成规定功能的设备, 在运行过程中会因种种环境影响因素或各种运行条件因素的作用, 而使完成规定功能的能力受到削弱, 设备运行的可靠程度降低。设备运行可靠程度的降低是随设备运行时间的持续而逐渐积累的, 也就是说设备的可靠度在持续运行过程中是个衰变过程, 用公式表示为

$$-\frac{d}{dt}R(t) = f(t) \quad (2-4)$$

式中: $f(t)$ 定义为故障概率密度。

从而, 推导得到

$$f(t) = -\frac{d}{dt}[1 - F(t)] = \frac{d}{dt}F(t) \quad (2-5)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (2-6)$$

这就说明了一个重要概念: 一个功能可靠的设备, 在其运行过程中会因不可靠因素的积累而使其可靠程度衰减。不可靠因素累积到某种不允许程度就突发性地表现为设备故障, 使设备由可靠状态转变为不可靠状态。在工程应用上, 根据故障判据判定的不可靠状态就称为故障。正由于此, $f(t)$ 就称为故障密度函数。

(2) 故障率。由于设备在运行中的各种环境条件是随机的, 所以设备的故障因素累积过程也是随机的, 造成设备运行至 t 时刻发生故障的事件也是随机的。因此, 在 t 时刻发生故障的概率 (是个瞬时概率) 应由以下条件概率关系式确定

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P \left[\frac{\text{设备在}(0, t) \text{时间里可靠, 在}(t + \Delta t) \text{时刻故障}}{\text{设备在}(0, t) \text{时间里可靠}} \right]$$

上式中的 $\lambda(t)$ 即为故障率, 用以确定设备在 t 时刻发生故障的概率。 $\lambda(t)$ 描述了设备在运行中由于 $f(t)$ 引起可靠度衰变的规律, 从而说明设备在 $(t + \Delta t)$ 时刻由可靠转变为故障的演变特性, 所以其定量表示即设备由可靠状态向故障状态转移的转移过程特征量。因此有

$$f(t) = \lambda(t)R(t) \quad (2-7)$$

进一步可导出

$$\lambda(t) = \frac{-\frac{d}{dt}R(t)}{R(t)} \quad (2-8)$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (2-9)$$

至此, 可以看到, $\lambda(t)$ 作为一个特征量, 说明了设备运行的可靠度时间特性。设备可靠度随时间衰变的特性, 服从指数规律。

对于机电设备, 在有效寿命期间的 $\lambda(t)$ 可以认为是常数, 即 $\lambda(t) = \lambda$, 因此式(2-9)可改写为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2-10)$$

(3) 平均无故障运行时间。前面式(2-1)已写出了平均无故障运行时间 MTTF 就是设

备可能的可靠运行时间期望值 $\bar{t}$ ，图 2-1 进一步说明了它的统计意义。在此再对它与其它可靠性参数的函数关系进一步确定。

MTTF 作为长期统计的平均无故障运行时间，并且故障的发生是由于设备在运行时间里 $f(t)$ 累积结果的概念，那么 MTTF 就应理解为：设备在连续运行中，形成故障前 $f(t)$ 所需的平均累积时间。其数学表达式应为

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \left(-\frac{dR}{dt} \right) dt = - \int_0^{\infty} t dR \quad (2-11)$$

经分部积分即可写出

$$\text{MTTF} = - [tR]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R dt = \int_0^{\infty} R dt \quad (2-12)$$

式 (2-12) 明确说明：MTTF 就是可靠度为 R 的设备，在长期连续运行情况下可能的平均无故障工作时间。

进一步研究式 (2-12)，还可以查明 MTTF 与 λ 的关系

$$\begin{aligned} \text{MTTF} &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = - \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \left(-\frac{\lambda}{\lambda} \right) dt \\ &= - \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} d(-\lambda t) = \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \quad (2-13)$$

这是一个重要的结论。其重要性在于：它明白地揭示了设备故障率就是设备由可靠状态转变为不可靠状态经历过程的单位时间变化率，是个瞬时概率。提供了：欲使设备平均无故障工作时间增大，必须降低故障率，即提高设备的可靠性水平，这一运行可靠性信息。

(4) 修复度。我们把设备故障损坏需要修复的程度称为修复度，记为 M 。随着修复时间的增加，需要修复的程度就愈小，所以修复度是时间 t 的函数，写为 $M(t)$ 。设备由故障状态经过整旧如新地修复转变为可靠状态的状态转移过程，是以修复率 μ 为特征值的时间函数，服从指数规律。

$$M(t) = e^{-\mu t} \quad (2-14)$$

函数 $M(t)$ 具有以下性质：

1) 不同类设备有不同的修复度函数 $M(t)$ ，它们分别描述了各类设备的修复时间规律和修复进程规律。

2) 设备故障后、尚未着手修复前，因 $t=0$ ，有

$$M(0) = 1$$

设备经长时间 ($t=\infty$) 修复，则有

$$M(\infty) = 0$$

从而，在修复过程中，任意时刻 t 的修复度将有

$$0 \leq M(t) \leq 1$$

3) 记 $1 - M(t)$ 为 $\bar{M}(t)$ 。 $\bar{M}(t)$ 即为 t 时刻前已得到修复的程度。由于

$$\bar{M}(t) = 1 - M(t)$$

故

$$M(t) + \bar{M}(t) = 1$$

(5) 修复概率密度。修复概率密度 [记为 $g(u)$] 是描述修复过程中任意时刻 t 时尚需

修复程度的瞬时概率，数学表达式为

$$g(u) = \frac{d}{du} M(u)$$

即

$$M(t) = \int_0^t g(u) du \quad (2-15)$$

修复工作从时刻 t 到 $t + \Delta t$ 的进展程度可用上式说明

$$\Delta M(t) = \int_t^{t+\Delta t} g(u) du = M(t + \Delta t) - M(t)$$

(6) 修复率。是个表征故障设备功能修复过程的特征量，它通过修复概率密度 $g(u)$ 描述修复进程各时刻的概率演变状况。

$$\begin{aligned} \mu(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P \left[\frac{\text{在}(t + \Delta t)\text{时间里得到修复}}{t\text{时刻尚未修复}} \right] \\ &= \frac{1}{1 - M(t)} \frac{d}{dt} M(t) = \frac{1}{1 - M(t)} g(t) \end{aligned} \quad (2-16)$$

对于机电设备， $\mu(t)$ 为常量，即 $\mu(t) = \mu$ ， μ 为修复率。

(7) 平均故障修复时间。平均故障修复时间是个由修复概率密度确定的参数，描述了设备由故障状态转变为可靠状态所需的长期平均估计值，其可靠性函数为

$$MTTR = \int_0^\infty t g(u) du \quad (2-17)$$

引入式 (2-15) 后，则

$$MTTR = \int_0^\infty t \left(\frac{d}{dt} M(t) \right) \cdot dt = \int_1^0 t \cdot dM$$

参考式 (2-12) 演算方法，同理可得

$$MTTR = \int_0^\infty M dt \quad (2-18)$$

引入式 (2-14)，即可得到

$$MTTR = \int_0^\infty e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu} \quad (2-19)$$

式 (2-19) 说明了修复率 μ 与平均故障修复时间的定量关系。由于以下关系式成立，所以利用

$$MTTR \times \mu = 1$$

可以描述由设备故障修复率 μ 所表征的故障修复能力，与由平均修复时间 MTTR 所表征的电厂运行水平间的相应关系，从而把故障修复能力纳入了电厂运行可靠性讨论。

(8) 平均故障周期及平均故障频次。平均故障周期和平均故障频次是两个重要的设备运行可靠性指标。平均故障周期指的是设备在可修复条件下，长期运行中，两次故障间的平均间隔时间及故障频次期望值。当然，也可从设备运行上称平均故障周期为平均运行周期。

$$T = MTTF + MTTR = MTBF \quad (2-20)$$

由于平均故障周期 T 是 MTTF 与 MTTR 之和，所以这一指标就其本身而言，并不是

以说明设备的运行可靠性能。但是从这一指标可以派生下述两个设备运行指标，所以仍必须十分重视。

1) 在一个单位统计时间(例如一年)里，平均故障周期确定了设备可能发生故障的频次 f 。 f 称为平均故障频次，与 T 有以下关系

$$T \times f = 1$$

$$\text{即 } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} \quad (2-21)$$

2) 由于存在以下可靠性函数关系：

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda}; \text{MTTR} = \frac{1}{\mu}$$

所以，可以确定具有特征值 λ 和 μ 的设备，在运行中能供有效使用的状况，称为可用度或有效度 A 。

$$A = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} = f \cdot \text{MTTF} \quad (2-22)$$

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (2-23)$$

因此，从设备丧失功能的角度，也可写出设备在运行中的不可用度或无效度 $\bar{A}$ 。

$$\bar{A} = 1 - A = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} = f \cdot \text{MTTR} \quad (2-24)$$

$$\bar{A} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2-25)$$

由于 A 或 $\bar{A}$ 是通过无故障工作时间 MTTF 和故障修复时间 MTTR 对设备运行实行综合考查的，所以 A 或 $\bar{A}$ 具有描述设备运行水平的功能。指标 A 说明了设备能够可靠运行的有效程度，因此从设备运行可靠性能上说明了设备运行的可靠性水平。与之相反，指标 $\bar{A}$ 说明了设备不能保证可靠运行的程度，也就是说， $\bar{A}$ 指标描述的是设备运行可能发生故障的水平。

第二节 设备故障类型

在上节中，仅就一个设备运行的可靠性参数或指标进行了基本讨论。而电厂运行则是众多设备在某种组合情况下的联合运行，设备在联合运行中，绝大多数情况下都存在相互影响关系，并不能视为相互独立。那么，怎样根据前面所进行的设备在独立运行条件下的基本讨论，判明设备在联合运行时的总体可靠性呢？无疑，首先必须查明设备在运行中可能有的相互影响因素、影响形式及其后果，并用设备故障模型明确标定。在电厂运行可靠性讨论中应该建立以下两个模型：①设备的多状态运行模型；②电厂的多状态故障模型。本章只对上述第一个模型进行讨论，第二个模型将留在第三章讨论。

一、设备停运的状态类型

对于电厂设备的运行，其停运状态的性质，大体上可分为表 2-1 所示三种类型。

表 2-1 设备停运状态类别

停运分类	停运性质	停运后果
故障停运	R 型故障	故障设备自身退出运行
	S 型故障	迫使其它相关设备一并退出运行
	D 型受累	因其它设备故障而被迫停运
维修停运	计划性检修	计划大修或小修的停运
	随机性检修	非计划性检修的停运
人为停运	调度停运	指令性停运

现对表 2-1 所列各种停运状态的定义及其停运性质作以下明确：

1. R 型故障停运

R 型故障定义：设备故障影响仅限于该故障设备自身停运。

R 型故障特征：故障设备停运后，需经修复过程才能脱离故障状态，转为可靠状态。

R 型故障停运的状态定义：由且仅由 R 型故障所造成的停运状态，称为 R 型故障停运状态。

2. S 型故障停运

由于设备在联合运行中存在互涉。在存在互涉的情况下，各相关设备在运行中的故障停运并不仅限于其自身退出工作。故障设备的停运后果将因与各相关联设备的互涉，而表现出扩大延伸影响，使若干非故障设备受累而随之停运。对这类能使其它非故障设备造成被迫停运的设备故障，即称为 S 型设备故障。需要说明的是，设备的 R 型故障和 S 型故障就该故障设备的丧失运行功能而言并无差异，区分两类故障的目的是出自故障后果分析的需要。这是因为 S 型设备故障后果是一个超越故障设备自身，而形成多个设备组合停运后果的特殊故障形式。例如，在图 2-2 所示桥型接线中，倘若设备故障仅按 R 型考虑，那么任何一台断路器故障都不会造成全厂停运这一严重故障后果。但是在实际运行中果真可以这样乐观地认识么？显而易见，倘若桥联断路器发生 S 型故障，那么将导致两台电源侧断路器被迫停运，从而构成全厂停运。为此，从电厂运行可靠性分析需要上，应该定义一种 S 型设备故障状态。

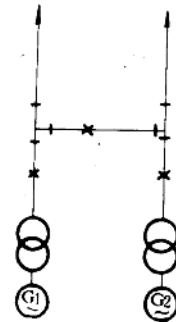


图 2-2 桥型接线

S 型故障定义：设备故障后果并不仅限于自身停运，具有波及影响性质，迫使其它非故障设备发生强迫停运的故障。

S 型故障的特征：设备发生 S 型故障停运后，需经切除，退出与其它关联设备在联合运行中的相关关系后才能转为 R 型故障状态，进行修复。

S 型故障停运的定义：由 S 型故障造成的停运状态就称为 S 型故障停运状态。S 型故障停运状态是一个由设备 S 型故障状态和强迫受累停运状态组成的组合停运状态。