

● 罗高荣 著

水电工程规划设计中的 可靠性计算

RELIABILITY
CALCULATION FOR
HYDRO POWER
ENGINEERING
PLANNING
AND DESIGNING

● ● ● 河海大学出版社

前 言

随着我国经济发展和投资体制改革的不断深入，水利水电作为国民经济基础产业以及在国民经济发展中所占有的重要地位已愈来愈被人们所认识。水电建设项目事关农业和能源两个战略重点，担负着强化农业基础，满足国民经济发展用水用电需求的双重任务，在今后相当长的一段历史阶段中将是国民经济建设的重点。包括三峡工程在内的一大批水利水电工程将投入建设，使得研究水利水电工程规划的合理性将具有十分重大的意义。

现代的大型甚至巨型水利水电工程的建设往往涉及国民经济发展的很多领域，工程应用目标之多，投资筹集渠道之多样化，水量平衡和电力电量平衡的地域范围之广，工程建设技术之复杂、投资数额之大，使得研究工程包括工程结构可靠性、经济评价风险性、电力系统供电可靠性以及防洪、供水，灌溉等应用目标的可靠性问题具有十分明显的理论与现实意义。包括三峡工程在内的一大批大型水利水电工程，在其规划、设计、可行性研究中就已十分注重工程各个方面的不确定因素分析和可靠性论证。在一些工程技术规程规范中也已明确包含了可靠性分析方面的内容，并将其分析结果作为决策的重要依据。

就水利水电工程可靠性分析而言，工程结构可靠度分析方面相对起步较早，并且已有许多研究成果付诸应用，从风险因素分析、计算模型、计算技术、参数选择等方面已系统化、实用化，但经济评价风险分析、电力系统供电保证率计算，水资源可靠性分析以及防洪工程风险分析方面则相对起步较晚，笔者多年来从事后几方面的研究，并取得了一定的成果。本书在笔者部分科研成果的基础上进一步总结国内外这些方面的最新成就，力

求使电力系统供电可靠性计算、经济评价风险分析，水资源可靠性分析方面的计算分析理论、方法以及参数选择论证系统化、实用化，并提出来供全国从事这些方面工作的同行们参考。由于笔者水平有限，资料收集不一定很全面，成书又很仓促，希望广大同行和专家能就本书提供的议题展开讨论，以丰富水电工程规划设计中可靠性计算的思想，吸引更多的研究力量，完善这一新生的学科，为我国的水利水电事业做出贡献。笔者谨以此微不足道的劳动，献给我国方兴未艾的水利水电事业。

感谢荣丰涛高级工程师、童建栋高级工程师为本书编写所提供的有益意见和多年来在这一领域研究中的精诚合作。

罗高荣

一九九三年五月一日

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 水电工程规划设计中可靠性	
计算的目的与意义	(1)
第二节 水电工程规划设计中可靠性	
计算的研究进展	(7)
第二章 数学基础	(10)
第一节 可靠性数学基础	(10)
第二节 解析计算变换	(18)
第三节 马尔柯夫过程	(23)
第四节 蒙特卡罗模拟	(30)
第三章 发电系统可靠性分析	(47)
第一节 概述	(47)
第二节 一台机组发电的可靠性分析	(50)
第三节 发电系统可靠性分析状态空间法	(56)
第四节 孤立发电系统可靠性分析	(74)
第四章 电力系统供电保证率计算	(87)
第一节 概述	(87)
第二节 电力系统电力电量平衡与供电保证率计算	(90)
第三节 电力系统电源与负荷的随机特征	(97)
第四节 水电为主的系统中综合供电保证率计算	(108)
第五节 水、火电混合系统综合供电保证率计算	(115)
第六节 保证率约束下系统必须供电出力计算	(130)
第七节 多目标水电工程机电设备出力保证率计算	(138)
第五章 水电工程经济评价风险分析	(150)

第一节	概述	(150)
第二节	风险率主观概率分析法	(152)
第三节	风险率近似计算法	(156)
第四节	风险率解析计算法	(167)
第五节	风险率随机模拟分析法	(190)
第六节	多重决策标准时经济评价风险分析	(198)
第七节	风险变量相关分析及参数估计	(217)
第八节	盈亏平衡及敏感性分析	(228)
第六章	水资源规划可靠性计算	(235)
第一节	灌区灌溉保证率计算	(235)
第二节	区域水资源系统综合供水保证率计算	(244)
第三节	防洪效益风险分析	(255)
第四节	工程综合风险分析	(278)
第七章	风险决策方法概述	(292)
第一节	几种简单的决策方法	(292)
第二节	无信息的贝叶斯决策方法	(297)
第三节	有信息的贝叶斯决策方法	(299)
附录	正态概率积分表	(303)
	参考文献	(307)

第一章 概 论

第一节 水电工程规划设计中可靠性

计算的目的是与意义

众所周知，水利水电工程的兴建涉及众多领域，现代的大型乃至巨型水利水电工程涉及的部门和因素将更多，关系更为复杂、决策更为困难。著名的三峡水利枢纽的决策就动员了众多部门的力量，持续了几十年的时间，至今仍在做前期工作。因为工程的复杂性、涉及因素的多样性、跨行业、跨部门、跨大区的水量平衡和电力电量平衡问题的艰巨性，使得研究工作本身及其各种影响因素和决策指标的可靠性问题或风险问题变得非常重要和非常实际。风险或可靠性问题不仅是工程可行性研究、规划设计中的重要内容，而且也是决定工程开发规模乃至决定能否兴建的重要依据。因此，在水利水电工程的规划设计中就应对工程的特征指标、影响因素进行详细的分析论证，广泛收集政治、经济、社会以及工程规划设计的技术经济指标，并从社会、经济、生态环境等角度对工程兴建与否所引起的有利的、不利的影响做出客观的评价，以及对各种影响因素和决策指标和行为的风险程度进行科学的估计，以使决策更为合理。

一、可靠性与风险问题

可靠性与风险性是一个问题的两个侧面，都是研究不确定因素发生的机率及其所造成的后果问题。前者表示获得预期效果的可靠程度，后果则为不能获得预期效果的机率以及背离预期效果的程度。可靠性与风险性的确切理解和确切定义至今尚未有统一

的定论，但随着该问题研究的不断深入，人们对其理解和认识也逐步深入，意义得到不断的补充是拓展，现就人们对“风险”的认识深化过程和定义的不断完善情况说明如下。

1. 最早的风险定义是“风险是产生损失的可能性”。这种定义只注重了某种风险的存在，但并不能说明风险可能性的大小以及造成损失的程度，所以只有定性的概念而没有定量的概念，在实践中很难具体应用。

2. 关于风险定义的另一说法是“风险是产生某种损失的机会”。这种定义虽然已经有了关于风险出现的可能性大小、即出现概率的描述，但也不能反映该风险事件出现后所造成的损失程度。

3. “风险是指产生某种程度损失的机会”是近年来人们认识比较一致的定义。这种定义实际上包含了风险事件造成损失的程度和相应发生的概率，即实际上将风险表示为事件发生的概率和损失的函数，

4. 近来基于“风险是指产生某种程度损失的机会”的进一步理解和拓展，将“损失”考虑为更广泛意义上的损失，将“风险事件发生的后果与预期后果有某种程度背离的机会”作为对风险定义的进一步拓展，将“损失”拓展为既可能是损失，也可能是收益。即认为许多风险事件不只会带来意外损失，也可能带来额外收益。

风险是由不确定性因素产生的。由于自然界和人类的社会活动中存在着大量不确定性因素，包括客观存在的不确定性因素与由于人们认识水平的限制而引起的不确定性因素，使人们不能准确预测未来事件发生的情况、时间及后果，因而产生了与人们预期后果相背离的后果。所以，可以说不确定性是风险存在的原因，风险事件本身也是一种不确定事件，但是在具体分析过程中，人们只把与人们的未来利益有关的不确定性事件作为风险

事件。

二、风险问题的分类

风险问题的分类一般按如下几种情况划分：

1. 按风险本身的性质划分。事实上按照风险问题的性质，可将其划分为静态风险和动态风险两类。静态风险是指自然灾害、意外事故、意外情况下所带来或引起的风险。例如水利水电工程洪水灾害造成的损失，由于来水变化引起水电站发电量减少从而导致工程效益下降，工程投资不能按时回收，以及电力系统供电不能保证等都属于静态风险。它主要由自然界的不确定因素影响和人们对自然变化的规律缺乏充分的认识造成的。动态风险则主要是人们在改造客观世界过程中，人们的行为和社会经济系统中各种不确定因素的影响，例如市场情况变化、政策、体制变化等引起的风险。动态风险随社会、政治、经济等各种因素的不确定性变化而变化。

静态风险一般可通过历史资料的统计分析，求得其发生的概率及其损失程度，而动态风险则由于社会、经济条件的不断变化，不确定因素的影响也在随时变化，所以很难用历史资料进行风险参数估计。静态风险一般属于客观存在的、难以完全回避的风险，承担风险者总处于被动地位。承担风险者在动态风险中则处于主动地位，对于是否承担风险，有自主选择的余地。例如洪水损失是一种静态风险，而水库的汛限水位选择则是一动态风险。因为前者的风险不以人们的主观意志为转移，而后者则可有选择的余地。静态风险只有损失的机会，而动态风险则既有损失的机会，也有取得额外收益的机会，比如洪水风险总是损失的机会，而水库汛限水位选择则除了损失的机会外尚有获得额外收益的机会。

以上是按风险的性质划分，除了按风险的性质划分类别外，还有按风险的强度划分即划分为高度风险、中度风险和低度风险

等。以及按生产过程阶段划分，即划分为投资风险、生产风险、市场风险；按风险产生的原因划分，划分为自然风险、社会风险、经营风险等等划分办法。

三、水电工程规划设计中可靠性计算内容

本书所述的水利水电工程规划设计中可靠性计算的内容包括有如下几个方面。

1. 发电系统可靠性计算，这部分内容是传统的可靠性计算内容，主要从发电系统的角度出发，在研究设备的故障特性和修复特性的基础上，得出系统的可靠性模型。

关于可靠性问题，系统工程中关于可靠性的经典定义是：

“元件、设备和系统在规定条件下和预定时间内完成预定功能的概率”。这种可靠性的定义，虽然指出了问题的实质，但不便具体应用，这是因为在不同场合下，设备或系统的“预定功能”可能很不相同。所以在计及可能存在可修复元件和不可修复元件等各种情况后，为满足各种不同场合下对可靠性进行估算的需要，通常用如下一些指标：

(1) 概率指标，包括可靠度（不可修复元件）、可用度（可修复元件）等；

(2) 频率指标，如可修复元件或系统在所研究的期间内的平均故障次数等；

(3) 时间指标，如不可修复元件的平均寿命，即首次发生故障的平均时间，可修复元件两次故障间的平均时间以及故障的平均持续时间等；

(4) 期望值，如在所研究期间内，设备或系统发生故障的天数期望值，电力系统中由于故障少供电量的期望值等；

一般情况下，很难用一个指标来判断系统的可靠性，实际应用中一般是选定几个指标来对研究的对象进行分析论证，且由于可靠性是对未来事件进行预测和估计，所以上述四类指标都是建

立在统计分析的基础之上的,

发电系统的可靠性计算可在分析上述几种指标的基础上,先从分析单台机组的可靠性模型入手,应用马尔柯夫过程理论,求得可靠性状态空间模型,并归纳为系统可靠性指标。由于本书所述的系统主要针对中小水电系统,所以以分析孤立运行发电系统可靠性模型为主,至于互联系统的发电系统可靠性模型,读者可参阅其它资料和书籍。

2. 电力系统供电可靠性计算

发电系统可靠性计算主要从机组故障和修复特性的角度研究系统供电可靠性问题,这是一种常用的系统供电可靠性计算方法。这种方法的应用前提是资源是一定能够保证供应的,即系统中各水电站水能参数和火电厂煤炭的供应是能够保证的,而不考虑由于水电站来水量和水头变化、火电站煤炭供应等环节对供电可靠性的影响。就我国的实际情况而言,由于电力工业发展一直难以满足国民经济对电力的需求,缺电现象在全国各地普遍存在。另一方面对于水电系统而言,由于水量年际年内的分配不均,系统内又往往很难具备很高的调节能力,所以由于水能参数的变化而引起的供电可靠性降低远较设备故障引起的供电可靠性降低重要。所以,对于我国的中小水电系统而言,通过研究水能参数变化的随机特性对供电保证率的影响将更加实际和更加重要。

电力系统供电保证率计算主要从系统规划的角度,在研究电源资源参数随机特性的基础上,研究系统供电保证率的计算问题,例如水电站水头、流量的随机变化情况对供电工作出力的影响,电源出力的随机特性对系统供电保证率的影响,以及在给定保证率情况下系统必须工作出力的计算等问题。从另一方面讲,也可以认为这种供电保证率的计算才是系统可靠性计算的更普遍形式,电站机组设备和输变电设备的故障特性和修复特性也可综合反映在电源出力的随机特性中去。通过分析机组故障特性和修

复特性以及电源参数的随机特性对供电可靠性的影响，确定系统供电可靠性计算模型。

3. 水电工程经济评价风险分析

水电工程的技术经济指标对于项目的决策至关重要，随着我国经济体制的改革不断深入，建设项目的经济评价和决策问题愈来愈受到重视。国家计委《建设项目经济评价方法与参数》的颁布，推动了有关行业经济评价规程规范的编制与实施，促进了项目决策的科学化、民主化。水电工程项目经济评价也已有规程规范颁发实施。这些规程规范的实施对项目决策无疑是有重大意义的。

在水电工程经济评价中涉及到的随机因素比较多，这些随机因素对项目经济评价决策指标影响较大，所以在进行水电工程经济评价决策分析时应进行风险分析，即计算在项目具体条件下，考虑各种因素的随机特性分析计算项目获取规定决策指标的可靠性或风险性指标，并作为项目决策的主要参考依据。考察项目承受的抗风险能力。在研究风险率计算模型的基础上，分析论证有关参数的随机变化规律。

4. 水资源可靠性与防洪效益分析

水资源系统的可靠性主要包括供水可靠性、效益的风险性等方面，本书也将涉及。

防洪工程项目是一种投资风险很大的建设项目，其效益主要体现在当发生对策洪水时的减少洪灾损失。但由于对策洪水是稀遇的，可能工程投运后即遇对策洪水，那么其效益则十分显著，反之如果工程投运后多年未发生对策洪水，则投资的效益则很小，而且由于贴现的影响，越往后年份发生的对策洪水其防洪效益越小。即同样规模的对策洪水出现，其发生年份不同则防洪效益不同，这就需要我们研究考虑防洪区内经济增长因素、贴现影响以及由于出现机率的影响等随机因素和不确定因素综合影响的

防洪效益计算模型，并计算其防洪效益的风险率指标，以满足决策的需要。由于防洪效益包含的不确定因素较多，情况更为复杂，所以解决此问题困难较大，目前已有一些有关防洪效益风险分析的研究成果，但远不够深入和不能满足实际应用的需要。本书就这一研究领域作些简单的介绍，以便收到“抛砖引玉”的效果。

第二节 水电工程规划设计中

可靠性计算的研究进展

有关工程可靠性设计理论与实践是由军工部门首先提出并发展起来的，并逐步扩展到各个领域，随着工程日益复杂化、社会化，涉及的领域和范围日益广泛，以至唯有采用系统分析的思想、用系统理论才能比较全面地研究和概括工程所包含的各个领域和因素，揭示系统内各子系统之间的因果关系。作为一个大的系统，至少应具有如下三个方面的特点，即

1. 有可以判断系统性能好坏的通用标准；
2. 有应用物理模型、数学模型或模拟模型进行分析验证的可能；
3. 为完成同一功能或目标，可有多种不同方案，这多种方案代价各不相同。

对于系统性能的通用标准一般有，性能，即质量指标；时间，指方案实施时间；费用，包括研究、运行、停工损失等；可靠性，即完成既定功能或目标的概率；适应性，指对环境或条件变化的承受能力等。以上分类和说明确定了可靠性分析在系统分析中的地位和作用。系统越大，涉及面越广，人们对于其可靠性的注意力将越高，或者说系统可靠性的意义将越重要。

水利水电工程规划设计中所涉及到的可靠性计算问题，尤数工程结构可靠性计算研究起步较早，其主要内容是通过工程结构

计算或力学计算，将计算模型中的有关变量作为随机变量，统计分析各变量的随机统计特征值指标，应用某些随机分布的解析变换特性，计算出工程结构可靠性指标。这一套理论与方法的研究最早在五十年代初提出，七十年代和八十年代日趋成熟和完善，现在已经大量在工程实际中应用，一些常用的方法和统计指标也已为工程设计人员所接受。所以本书未涉及这一领域，如有兴趣的读者可参阅有关书籍。有关电力系统（发电系统）可靠性计算的研究，最早于三十年代提出，当时只限于估计发电设备的备用容量，方法简单且发展缓慢。直到1948年AIEE创立了概率方法应用分会才对前一段的工作从理论上进行了总结，其研究成果于六十年代在某些电力公司得到应用。六十年代以后，由于国际上发达国家电网日益扩大，某些大型电网容量高达几百万千瓦，甚至上千万千瓦，供电负荷也日趋重要、对供电可靠性的要求越来越高。由此，一些国家开始建立停电惩罚制度，由于系统突然停电将对用户造成较大的损失，因而需由电力系统赔偿。另一方面，六十年代一些发达国家曾先后发生过几次大停电事故，造成巨大损失，这两方面的因素促进了电力系统供电可靠性研究的进展。目前发电系统的可靠性研究也已自成体系，其计算模型有状态空间模型、LDLP和FD模型等，大部分研究成果已在某些系统付诸应用，其理论与方法不仅在孤立系统，而且在大型互联系统中得以应用。所以这部分内容本书均未过多涉及。

关于电力系统供电保证率计算的内容，更主要的还是结合我国国情，从电源资源供给的角度研究其对供电可靠性的影响。这方面的研究内容起步较晚，八十年代提出，目前也已有部分成果问世，其内容主要包括水电为主的系统综合供电保证率计算，机电设备供电可靠性计算以及保证率约束下电力系统必须供电出力计算等。这部分内容是本书的一部分主要内容。关于经济评价中的风险分析或可靠性计算则是近年来才发展起来的一门学科，鉴

于其内容的新颖性和重要性，本书在这一领域内作了较为详细和系统的介绍。

关于水资源及防洪风险分析方面的内容，由于起步较晚，这里只就这一专题进行了一些一般性的叙述，并给出了部分成果，供参考。

可靠性分析方法无论多么门类繁多，总可以归结为解析法和模拟法两大类。解析法的特点是，首先建立系统可靠性数学模型，并通过数值计算方法求解。这类方法描述了存在于实际系统中的因果关系，易于理解。在给定假设条件下，一般可求得正确的答案，因此应用较为普遍。但对于另外一些问题，由于其分布规律不太明确或较为复杂，很难用确切的数学模型描述问题的本质，在这种情况下可使用模拟法，它将系统分成许多元素，并通过预测确定各元素的概率分布规律，构造模拟模型，通过此模型进行采样实验求得结果。国外称模拟法为解决系统问题的“最后一招”，说明对于一些特殊问题，应用模拟法可能是唯一可行的办法。其缺点是由于具有明显的统计性质，其计算结果不够精确。

需要说明的是，本书所述的可靠性问题主要针对工程或系统规划工作中的系统分析和可靠性评价，所以难免其资料和数据是建立在估计和预测基础之上的，只是通过某些方面的可靠性分析，增加决策比较的信息，以便对方案作出更为切合实际和合理的评价。

第二章 数学基础

第一节 可靠性数学基础

一、概述

就一般而言,可靠性问题是工程评价和决策的主要内容之一。工程可靠性问题就其本质而言,是一个“需求对满足”的问题,换句话说就是工程的容量或者能力满足一定要求的问题。当考虑一个结构的安全性时,我们关心的是保证其有足够的强度,以使在结构的寿命期内当出现最大荷载时不被破坏的问题;在一个洪水控制问题中,我们关心的是如何选择适当的水库容量以控制设计标准下可能出现的最大洪水等等。

在实际中,工程的可靠性分析是比较复杂的,其复杂性一方面由于其可靠性分析受众多参数或因素的影响,准确且全面地反映这些影响往往是十分困难的,因而难以将其分析归纳为一个确定性的数学问题和可供分析的精确模型;而另一方面则在于难以获得其可供分析的参数,在很多情况下,需通过估计、预测确定其分析参数。而这些参数的估计误差对工程的可靠性分析有明显的影响。其中某些参数还可能是在不断变化过程中。因此,在进行工程的可靠性分析时,一方面采用一些简化步骤,舍弃次要因素,保留主要因素,确定其满足精度要求的分析模型进行分析;另一方面,将某些变化参数视作随机变量,通过估计、预测,分析其特征指标,应用概率统计理论和某些分布规律及其解析特性,分析得出工程的可靠性指标。如果设

X = 工程的能力或容量

Y — 对工程的能力或容量要求

则其可靠性分析的目标就变为在工程的整个应用寿命期间保证事件 ($X > Y$)。由于 X, Y 可能为随机变量, 所以实际工程中有价值的分析指标只能是概率 $P(X > Y)$, 即实际的工程可靠性量测指标只能是 $X > Y$ 的概率。对应的 $X < Y$ 的概率则为工程的风险率指标。如果随机变量 X 和 Y 的概率密度函数和累积分布函数为已知, 则其概率可计算为

$$P_F = P(X < Y) = \sum_{\text{全部 } y} P(X < Y/Y = y) P(Y = y) \quad (2-1)$$

如果 X, Y 为统计独立随机变量, 则有:

$$P(X < Y/Y = y) = P(X < y) \quad (2-2)$$

如果 X, Y 为连续随机变量, 有

$$P_F = \int_0^{\infty} F_X(y) f_Y(y) dy \quad (2-3)$$

或

$$P_F = \int_0^{\infty} [1 - F_Y(x)] f_X(x) dx \quad (2-4)$$

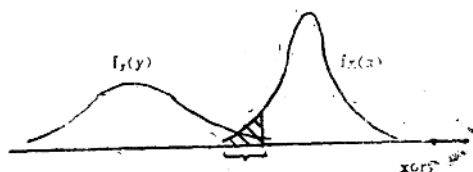


图2-1 X, Y 的概率密度函数

式 (2-3) 是关于变量 y 的积分函数, 其几何意义可用图 2-1 来解释, 如果 $Y = y$, 系统遭到破坏的条件概率为 $F_X(y)$ 。但是, 由于 $Y = y$ (或 $y < Y \leq y + \Delta y$) 正好有概率 $f_Y(y) dy$, 对于所有的 y 值积分, 即得到式 (2-3)。其相应的系统不被破坏的概率为:

$$P_S = 1 - P_F \quad (2-5)$$

图2—1中曲线 $f_X(x)$ 与 $f_Y(y)$ 的重叠部分即为系统遭到破坏的概率。因此，有如下结论：

(1) 曲线 $f_X(x)$ 与 $f_Y(y)$ 的重叠区域取决于两曲线的相对位置，相距越远，其概率 P_F 越小，相距越近，其概率 P_F 越大。两曲线的相对位置可用参数 μ_X/μ_Y 表示， (μ_X/μ_Y) 称为“中心安全因子”，或用距离 $(\mu_X - \mu_Y)$ 来表示，其值的大小称为“安全余量”。

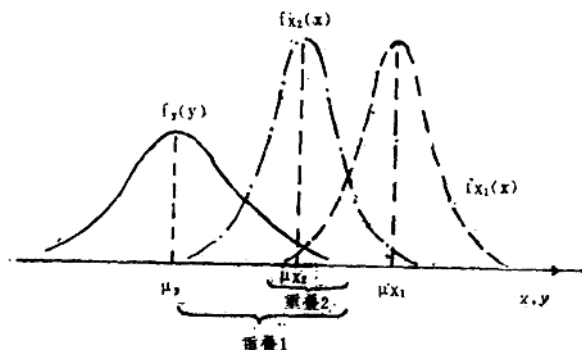


图2-2 两曲线相对位置的影响

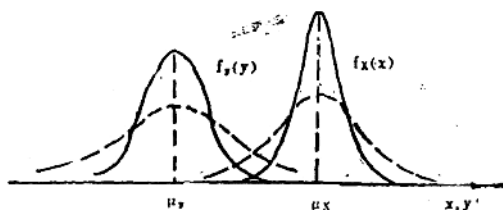


图2-3 两曲线分散度的影响

(2) 两曲线的重叠部分也取决于两曲线分散度，尖瘦的曲线