

电力工业可靠性管理培训教材

电力工业可靠性概论

中国电机工程学会可靠性专委会 出版
浙江省电力工业局 印刷

1984年3月第一稿

1984年9月第二稿

第一次参订说明

按原定计划，本教材经各地试用一段时间后，我们于84年9月组织人力在济南进行参订。

对“概论”中的于备知识、指标统计、机电可靠性等都有较大的增补和改动。各章节都增补了习题，供讲习时选择使用。

限于时间，尚缺乏页荷子测、设备故障子测等内容，留待以后再参订。

希望对参订后的教材内容，继续提出意见。

参加这次参订工作的有王德生、郭永基、陈凯、白同翔、周家敏、刘玉琨、孙益新、胡伟奋、丁雁、林树根、胡多谱等同志。

中国电机工程学会可靠性专业委员会

1984.9.

编写说明

(第一稿)

为了对在职干部进行关于电力工业可信性管理基础知识培训，中国电机工程学会与水电力政策研究室决定组织编写统一培训教材，供各地举办各种学习班之用。

经讨论这套教材包括：讲授教材“电力工业可信性概论”和“电力工业可信性数学基础”，以及参考教材“电力工业可信性管理”译文集等。

这套教材可供 10 天和 30 天左右两种培训时间使用。10 天左右的时间适合对各级领导干部普及电力工业可信性管理的初步知识，要求介绍内容的不要广一些，只要讲授“电力工业可信性概论”即可，约 40 个学时。30 天左右的时间，适合于技术领导和从事此项工作的工程技术人员进行培训，讲授“电力工业可信性概论”（40 学时）和“电力工业可信性数学基础”（60 小时）。此外还有一定数量的习题。

“电力工业可信性管理”译文集，主要搜集国外在电力工业各方面实际施行的一些可信性管理措施，可作为培训的主要参考教材。每篇文章皆有简短提要，以供没有充裕时间的同志浏览。

参加本教材执笔编写的有孙启宏、杨沂百、郭永基、陈凯、白同翔、程侃、袁仲懿、费湖群、胡修潜等同志。参加编写内容讨论整理资料的有于树森、刘玉焜、刘景熙、董琪伟、孙慈轩、陈维栋、梁遗秋、相伟奇、卢莽江、范崇祺、杨维馨、孙溢初、唐耀中、赵明娜、张绪蓉等同志。全书教材由费湖群、胡修潜同志校订，由沈根才、董希文同志最后审定。

随着电力工业可信性管理工作的不断深入，培训教材的内容自应不断修订和补充。限于水平，教材中不妥之处，希各地试讲后提示改进意见，以便补充和修改。

中国电机工程学会可信性专委会
水电力政策研究室

1984.3.

《电力工业可靠性概论》目录

编写说明

第一章 概论

- 第一节 可靠性的基本概念
- 第二节 国外开展电力工业可靠性工作的情况
- 第三节 高压电力工业可靠性管理的现实意义
- 第四节 我国开展电力工业可靠性工作的展望

二

第二章 电力系统可靠性的预备知识

- 第一节 随机事件、概率和集合的概念
- 第二节 概率论的基本知识
- 第三节 随机过程的基本概念
- 第四节 元件可靠性的基本知识
- 第五节 系统的可靠性分析
- 第六节 故障树分析法、故障模式与后果分析法

第三章 电力设备可靠性数据的统计及分析

- 第一节 概述
- 第二节 电力设备的可靠性指标
- 第三节 发电设备可靠性指标的统计与分析
- 第四节 输变电设备可靠性指标的统计与分析方法
- 第五节 数据统计的基本方法

第四章 发电系统可靠性估计

- 第一节 发电系统可靠性估计的意义及基本步骤
- 第二节 发电系统的容量模型
- 第三节 负荷模型
- 第四节 发电系统的可靠性指标估计

编 1

- 第五节 计划检修对发电系统可信性的影响
- 第六节 互联发电系统可信性估计

第五章 配电系统可信性估计

- 第一节 概述
- 第二节 事故后果分析 (FEA)
- 第三节 配电系统可信性指标计算
- 第四节 计算例题

第六章 配电系统的可信性估计

- 第一节 概述
- 第二节 配电系统的可信性指标
- 第三节 放射状配电系统的可信估计
- 第四节 有备用电源、手动分段的配电系统的可信性估计
- 第五节 不同电压等级重合时等效故障率及持续时间估计
- 第六节 双回路配电系统的可信性计算
- 第七节 气象条件对配电系统可信性的影响
- 第八节 我国 A 城市高压用户供电可用度统计实例
- 第九节 加拿大对用户供电连续性的规定

第七章 发电厂和变电所的电气主接线可信性计算

- 第一节 表格法
- 附录一 断路器故障率的校正与计划检修后复役状态的估计
- 附录二 电力系统元件串联的计算公式
- 第二节 框图法

第八章 可信性经济学及其应用简介

- 第一节 概述
- 第二节 经济分析中常用的若干概念和计算货币时值的公式

编 2

- 第三章 缺电停电损失
- 第四章 电力部门的可信性费用
- 第五章 “R”费用指标的应用举例
- 第六章 配电系统可信性经济分析
- 第七章 电力系统可信性的经济分析与优化
- 第八章 结语

第九章 电力系统可信性准则

附录一

戴月恩问题和计算机

附录二

美国、苏联的电力供应可信性指标

第一章 概论

第一节 可靠性的基本概念

可信性的概念是很早很早就存在的，人们总是希望所使用的设备能经久耐用，而建立的系统不至故障，因此可信性是衡量系统或产品质量的一个重要方面。但由于各种条件的限制，长久以来，人们对可信性的认识还只是停留在模糊的空想阶段，而缺乏科学的分析方法和严格的空想标准。

随着科学技术的发展，设备和系统的结构越来越复杂，重要性越来越大，如航天、导弹、核电站的控制系统，对可信性的要求也越来越高，一次事故的发生都将带来巨大的经济损失和难以估量的社会影响，因此空性的可信性概念已远远不能满足要求，必须有严格的空想标准，同时影响可信性的因素也十分复杂，对一种设备或系统来说，从设计、制造、装配（施工）到运行都直接影响到可信性，如何使这些环节协调一致，达到最佳经济效果是各项生产活动的重要目标之一，为了研究解决这个问题，可信性工程就逐步发展成为一门独立的学科，并应用于各个技术领域。可信性工程涉及元件失效故障的统计和处理、系统可信性的空想评价、运行维护、可信性和经济性的协调以及管理措施等各方面，它又是一门边缘学科。它具有实用性、科学性和时间性三大特点。实用性是指可信性工程从论证开始，就和工程实践紧密结合和结合，具有强大的生命力。科学性是指可信性工程有一套独特的科学理论和方法。时间性是指可信性存在于产品或系统的整个开发过程，不仅在规划阶段、研制阶段、制造阶段、运行阶段都在起作用。如果规划设计阶段不重视可信性，到制造运行阶段再考虑，那就会云现事倍功半的情况。

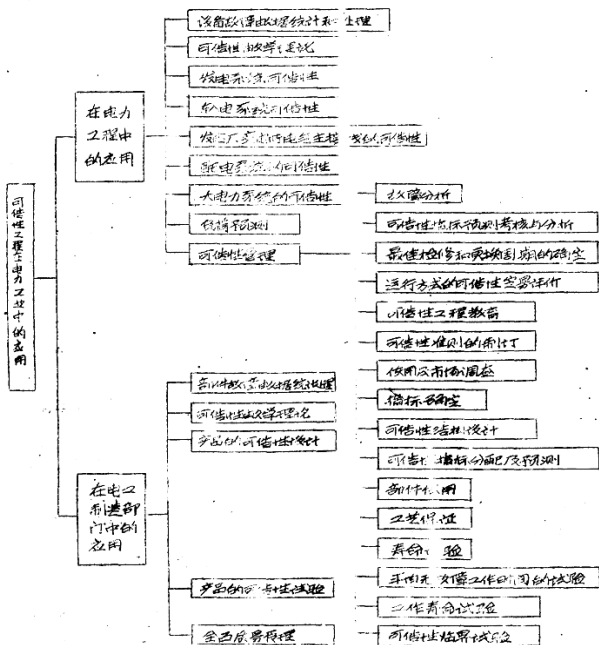
把可信性工程的一般原理和方法应用于电力系统中的工程问题，便形成了电力系统可信性，这是六十年代中期以后才发展起来的一门新兴应用科学，它渗透到电力系统的规划、设计、

运行和管理各个环节方面，对大电网、大机组、高电压的现代电力系统的安全运行连续可靠的供电所起的重要作用将日益显著。

(一) 可信性工程在电力工业中的应用情况

可信性是电力工业重要的贸易指标，也是取得重大经济效益的重要手段。

电力工业涉及到规划设计、设备制造、基建施工、运行检修、科研培训、管理决策等各个领域，参考国外资料，将电力工业可信性的具体内容列于下表：



(二) 可信性的定义及指标:

我们对一个设备或系统作出可信或不可信的评价时,总是从这个设备或系统在一空工作条件下,一空工作时间内能完成任务的情况来判断的,通常,我们把能完成规定任务的设备或系统认为是可信的,否则就认为不可信的。

当然,在实际情况中往往并不那么简单,可信或不可信不仅和设备(或系统)的工作条件有关,而且和所规定的指标有关,因此必须明确加以定义。

可信性可以广义地定为:“元件、设备和系统在规定的条件下和预期的时间内完成其预定功能的概率。”

引用“概率”这一数学概念来定义可信性,具有十分重要的意义。这是因为可信的及否是失效和故障,研究可信性就要研究故障发生的规律,而故障总是随机发生的,它属于随机事件,不仅故障本身是随机发生的,影响故障发生的外界条件也往往带有随机的性质,故障后的修复时间也是随机的。因此,只能应用概率论及其他处理随机事件的数学方法和有关理论来定量地处理可信性问题。从而依: (1) 可信性的变化规律得以用数学形式来表达,这称和算量。(2) 在相同条件下不同设备或系统具有共同的一致的评价标准,应用这一定义时必须明确以下问题:

1. 讨论的对象和所讨论问题的范围。
2. 功能的正常(可信工作状态)和故障(丧失功能状态)的标度。
3. 关于工作条件的规定。
4. 关于持续工作时间的规定。

只有这些问题都已明确的情况下,讨论可信性才有实际意义。例如,在讨论断路器(对象)的可信性时,要明确是否包括与该断路器有关的继电保护系统(范围),由于继电保护系统故障引起的断路器拒动或误动是否作为断路器的故障来考虑。

上述可信性的定义,余然指示了问题的实质,仍嫌过于笼统,不便具体应用。这是由于,不同的场合,设备或系统的“预定功能”可能很不相同。例如,对一般系统而言,其组成

元件设备)即可分为可修复元件和不可修复元件两大类。对于不可修复元件,通常采用元件在预定的时间(寿命)内,没有发生故障这一事件的概率作为可信性指标,称为可信度。而对于可修复元件,由于它故障后还可通过修理,重新投入工作。所以除计算故障的概率外,还应计算故障后修复的概率和修复后继续工作的概率。在这种情况下,依可用度这一指标就更合适。它的定义是:可修复设备在长期运行中,处于或准备处于工作中的时间所占的比例。实际上这仍是一概率(时间概率)。

为满足各种不同应用场合对可信性进行估计的需要,具体规定的指标可能不相同。归纳起来最通用的有如下几类:

- (1) 概率指标 如上述可信度、可用度等;
- (2) 频率指标 如可修复元件或系统在研究周期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,即平均工作时间,以及故障的平均持续时间(即修复时间)等。

(4) 期望值 如在研究周期内,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。

必须指出,可信性是对未来事件进行的预测,不可能用确切事实来表明。事实上,上述三类指标都是建立在统计分析基础上的概率量。

通常,一个指标往往不能反映系统可信性的完整特性,因此,实用中一般总是选几个指标来对研究的对象进行分析评定。

可信性指标一经确定并规定适当的标准值(如有可能时),即可用计算值比较对设备或系统的可信性作出评定。这样的处理方法要求原始数据和计算方法都充分准确,称为绝对可信性评定。但是,由于受到取得有效原始统计数据的限制和为简化复杂计算而不得不作出某些简化假定的影响,在当前技术条件下,可信性评定更适用于相对分析。此时,将不同设计方案的可信性指标计算值进行比较即可决定方案优劣,而可信性的绝

对值（真值），则非关键问题。通过相对可信性分析还可以发现系统设计中的薄弱环节，确定改善可信性的措施等。

三、可信性的分析方法

可信性分析的方法可分为解析法和模拟法（即蒙特卡洛法）两大类。解析法的特特点是，首先建立电力系统可信性故障模型，并可通过取值计算方法求解。这类方法描述了存在于实际系统中的因果关系，易于理解。在给定的简化假设条件下，一般可求得准确的结果。因此得到了广泛的应用。但是，对于某些问题（例如包含非指数分布的问题），用这种方法求解过于复杂，从而可采用模拟法。模拟法的特特点是，将系统分成许多元素，这些元素的特性可通过概率分布（不限于指数分布）加以预测，然后将这些元素特性组合起来确定系统可信性。因此，模拟法虽也依用数学模型，但是通过在此模型上进行采样实验求得结果，象通常的统计实验一样，模拟法是一种非常灵活的方法，且对于处理某些问题可能是唯一可行的方法。它的缺点是，由于具有明显的统计性质，故计算结果的精度与模拟的时间有密切关系，要得到较精确的结果往往很费时间。

（目前，电力工业可信性评估技术在国外主要用于电力系统的规划设计中对不同设计方案进行比较决定合理的备用容量；改进现有机组的可用率以提高电厂的生产能力，探讨投资和效益之间的最佳平衡，也可用于电力系统调度中根据短期预测，估计运行系统的旋转备用量；还可按一合适的风险度指标来安排机组的检修计划，此外在设备的购买决策和性能检验也得到广泛应用。总之，可信性评估技术在现代化的电力系统中的应用正日益发展）

第二节 国外开展电力工业可信性工作的情况

国外可信性技术是五十年代首先在军用电子工业中形成的，用定勇方法评价可信性。早在二次大战末期，英国在计算德国V-1飞弹的动作概率上就采用过。1949~1953年，美国

先后研究了飞机用真空管和与其联接的其它元件的可信性，侵朝战争后，为解决军用雷达群问题，定势的可信性才广泛应用。1950年，美国国防部成立可信性首席委员会，1956年，Moore Shannon 阐述了高可信性系统及冗余理论，可信性理论于是成立，1957年发行《AGREE 军用电子设备可信性标准》，开始可信性设计。随着计算机及情报处理技术的迅速发展，半导开发综合化，可信性的重要性被普遍认识。民用工业的可信性技术在六十年代才广泛推开。目前，可信性已经成为系统工程的一个重要方面，成为评价整个系统的全生命周期的经济效益的一个最基本的判断依据。可信性的理论和方法也有很大发展。

国外电力工业应用可信性技术也是六十年代陆续开展的。当时，所以要应用可信性技术，有两个原因，一是国民经济越现代化，人们对电的依赖越深，对供电质量要求也越高，六十年代，正是电视、计算机、空调普及时期，军工工业也日益发展，这些都需要供电高度安全可靠，电压波动合格，二是电网越来越大，机组容量从十万千瓦左右发展到二十至三十万千瓦及六十万千瓦，广泛采用中间再热系统，控制复杂了，一台机组发生事故，经常影响很大。电网扩大后，超高压远距离输电多，电网稳定问题突出起来。如何合理地保证供电可信性就成为迫切问题。1965年以前，几个主要发达国家的电力部门都拟订了一些供电可信性指标，进行了一些理论研究。例如，在美国，有些电力公司都各自采用不同的指标，如“电力不足概率”（LOLP）、“电量不足概率”（LOEP）、“停电频率—时间持续曲线”、“供电愉快度”等。1965年11月9日，美国东北电力系统（包括纽约）发生大停电事故，引起了很大震动，大大推动了可信性工作。1968年，成立了美国全国电力可信性协会（NERC），全国分九个安全协调区，各电力公司共同参加，拟定各自的可信性准则，规定在种公事故情况下，电力系统不得产生连续反应，扩大事故。他们把“电力不足概率”做为规划电网的基本指标，即必须达这个指标后，再考虑最佳费用方案。他们与美国电力研究协会合作，拟订了从联

合系统到发、送、配电及至用户用电的可靠性准则。有些电力公司内也制订了可靠性准则，对系统、设备、运行、维护以至用户服务都提出了要求。有的顾问公司建议电厂推行 R-A-R 制度，即以三个指标：P (Performance, 运行性能), A (Availability 可用率), R (Reliability 可靠性), 来改进电厂工作，台供电公司普遍有用户行电记录，计算供电可靠性，设计制造部门经常按电业部门提供的事故反馈改进自己的工作，并经常回访。

日本在 1961 年确实采用“出力不足预计天数”或“缺发电量”，并以此计算可靠性。1962 年首次进行了供电可靠性研究，提出计算程序，明确了一些可靠性术语定义。1965~1968 年，又重新拟定了供电可靠性定义和发、送、变、配电设备发生事故时用户可靠性的表示方法和计算方法。到 1972 年，他们的行电次数比 1966 年下降 70%。

英国绝大部门是火电，而且负荷波动很大，发电计划的备用容量裕度是根据尖峰负荷需求和对负荷的脱弃二者的风险表法来确定的。电网设计有四个标准：发电厂接入系统的安全标准，互联电网安全标准，大容量供电安全标准，开关站一次接线标准。在配电方面，连年发表了一些指导性文件，如安全供电规划设计准则，全国设备缺陷表，系统事故和行电统计报表，它的行电报表中，规定用户行电持续时间一分钟及以上而在 24 小时内未通知用户断电的事件，以及停运的电力设备或线路不能担负正常负荷或承受故障电流达一分钟及以上的事件，均需填报。

法国电力公司也将电厂设备可用率和对用户事故行电时间作为工作质量指标进行统计。电厂将可用率作为每天统计工作的主要内容。1981 年，法国常规高压发电设备可用率为 70.3% 电网的设计和运行，普遍遵循“12-1”原则。

在苏联，1968 年颁发了第一个关于可靠性的国家标准技术中的可靠性术语。1970 年，苏联电力和电气化部颁发了《关于进一步加强电站、电力网和热力网的生产工作的措施》的命令，提出提高电力系统的可靠性，提高设备安全性。

保证用户连续供电；提高运行水平和运行人员的业务水平是电力企业的中心任务。1980年底，苏联已将西伯利亚、中亚细亚和欧洲电力系统的88个电力系统联成统一系统，装机2.77亿千瓦，年发电11,000亿度电。1982年，召开了全苏17座电力企业、电力系统、联合电力系统降低运行设备事故，提高“可信性”的会议，通过了“关于进一步在发电厂、电力网和热力网中加强生产工作，提高设备和工艺系统的工作可信性的措施”的命令草案。苏联国家标准有关设备的技术条件中，有的已明确规定了可信性指标的数值。

第三节 建立电力工业可信性管理的现实意义

从本节介绍世界上主要工业发达国家开展电力工业可信性工作的情况来看，电力工业可信性管理不是偶然产生的，而是电力工业现代化发展的客观需要，是必然趋势，它是和现代化生产相适应的在更高水平上的现代化科学管理。所谓电力可信性管理，实际即是电力企业的全面安全管理和全面质量管理，用以取得最大综合经济效益。

近三十年来，我国在电力管理中一贯坚持“安全第一”的方针，逐步建立了一套套关于保证安全的规章制度、管理方法和一系列措施，实践证明，这是一条成功的经验。但是也要清醒地看到，由于电力系统的发电规模越来越大，大机组和高压输电线路的故障越来越多，自动化（包括电子计算机的应用）的程度越来越高，面对这样的生产状况，仅借过去这套管理办法和管理经验已经是不够了，迫切需要建立一套适合于我国的可信性管理办法。这是由于：

第一，过去的安全生产工作不全全，它只着重于生产的运行、检修方面。近十几年来，我们遇到大量设备制造质量不良、设计不合理、厂址选择不当、施工及工艺遗留太多、电网结构薄弱等问题，这都是没有实行全面安全管理造成的，因此要搞好安全，必须从规划、设计、设备制造、施工运行、检修直至人员培训等各个环节，严格执行可信性管理才能解决。

表 1-1 60 年代六行电事故一览表

事故系统	英国南部	纽约市	美国 公立系统	日本中部	美国 CANUSE 系统	美国 PJM 系统
发电时间	1961.5.15 21~26'	1961.6.13. 1705'	1965.1.28 13020'	1965.6.22 8016'	1965.11.4 17016'	1967.8.5
故障持续时间	约150分钟	约400分钟	美国中部的5个 州约200分钟	美国大西部、 北德、中、 九州、中、 四州的一、 分钟约340万 分钟	美国东北11个 州及加拿大一 州约2500分钟	美国东北几个 州约1000万 分钟
停电时间	32分~2小时 55分	2小时30分 ~4小时30分	2小时30分 (最大)	2小时7分 (最大)	13小时32分 (最大)	12小时 (最大)

第二，防止大停电事故的发生。从可信性观点来说，电力系统的规模越大，结构越复杂，发生事故的可能性就越大，运行人员的误判断和误操作也越多。这样往往由于一处发生事故，产生连锁反应，扩大事故，造成大面积停电。60年代后，许多先进工业国家的电力系统，相继发生大停电事故（见表1-1）。特别是，1965年11月美国东北（CANUSE）系统的大停电事故，共损失功率达2500万千瓦，影响到美国整个东北（巴尔的摩和纽约市）和加拿大的一部分地区，引起了人们对可信性管理的重视，成立美国电力可信性协会（NERC），委托有关学会，科研单位和专业工程公司制订统计和评价发电设备性能资料的标准和规程，规定收集和分析这些性能资料的数据，以及制定防止电网瓦解大停电事故的可信性准则等。70年代在美国纽约和法国以及去年十二月在瑞典仍有大停电事故发生，前车之鉴值得我们注意。

第三，充分发挥现有设备的潜力，提高其可用率，提高生产率。有人说：“实行可信性管理就要大量增加投资。”这是不对的，可信性管理的根本目的就是要以增加生产率，提高经济效益。例如美国田纳西流域管理局所属布尔使火电厂一台75万千瓦火电机组经过调查分析后改造了锅炉水冷壁管（以及其它一些检修），花了200万美元的代价把可用率从1977年的64%提高到1980年的82%，每年收益达1800万美元（投资年收益达到九倍）。

我国目前电力系统的火电厂及水电厂设备的可用率是多少？至今心中无数。如果在今后十年内，全国平均每年提高可用率1%，这是完全可行的，可用率提高后即可少装机组，这对我国的四化建设将是巨大的贡献。

第四，促进规划设计和运行管理的现代化。我国目前的规划设计和运行管理都相当于工业发达国家60年的技术水平，这不能满足我国电力工业发展形势的需要。

在规划设计方面，不论是针对整个系统的长期规划和近期规划，或对厂、站的工程设计，都还是沿用常规的一套办法。这在过去电网小、电厂小的条件下还是行之有效的，但在目前我

国已形成几个近1000万千瓦容量的区域系统，进一步结成联合系统的情况下，电网时空问题突出起来。如深不作时空计算和可信性分析，就不行了。在国外，已将运筹学的理论、可信性理论、电子计算机技术等应用于系统规划设计和电厂设计，并有监测的软件，使规划设计和运行提高不断的现代化水平。

在系统的运行调查方面，我们拥有的现代化调查手段还很少。至今我们在很大程度上仍凭调查人员的经验来判断系统所发生的事故，借电话来进行调查，而不作时空分析，这对一个大电力系统来说，是极不安全经济进行，几乎是不可做的。这主要是缺乏现代化技术和手段，使调查人员不能及时地了解系统运行状态和对下一步的发厂进行可信性预测，这要靠计算机监控系统来解决。

第四节 我国开展电力工业可信性工作的展望

可信性工作的内容很多，有理论方面的（可信性数学），有实践方面的，可信性分析；可信性工程（包括可信性预测、可信性设计与评价、可信性试验），可信性管理等等。要推行可信性工作，首先要抓可信性管理这个环节，以带动其他环节。有关部门已经摸索希望用五年左右的时间，初步建立整个电力工业的可信性管理体系，具体要求为：

(一) 生产局、厂要建立统一的可信性指标的统计、分析，如可回率、强迫停运记录、用户停电记录、电力不足损失等，并建立反馈渠道。

(二) 规划部门编制电力系统规划时，要有可信性计算分析，逐步制定电力系统的可信性准则。

(三) 设计部门在设计时要做可信性计算和分析，逐步建立起各种工程设计的可信性设计准则。

(四) 制造部门对电机和电站产品要进行可信性设计及试验，对产品要提供效率、质量及寿命保证。

(五) 施工部门要实行全面质量管理。

(六) 科研部门及大专院校要开展电力可信性的理论学习和