



二〇〇〇年的中国研究资料

第六十一集

国内外水力发电科学技术水平与差距和
二〇〇〇年前我国水电发展的设想

中国科协二〇〇〇年的中国研究办公室

第 61 集

国内外水力发电科学技术水平与差距 和2000年前我国水电发展的设想

中国水力发电工程学会

中国科协2000年的中国研究办公室

1985·6·

2000 年的中国研究资料”全套: 120 元
1——29 集(共 30 册): 60 元
30——第 59 集: 60 元
本 册 每 本 收 费: 1.70 元
(内 部 发 行)

编 写 说 明

按照国务院技术经济研究中心和中国科学技术协会的统一部署,中国水力发电工程学会组织开展了有关“2000年中国水力发电”的研究,主旨是:从现代水电科学技术的特点出发,对比国内外发展现状,考虑到世界新的技术革命浪潮动向,就我国水电科学技术进行评价,找出差距,面对着党的十二大所制订的工农业年总产值翻两番的总任务、总目标对电力提出的要求,针对党所明确的优先开发水电,振兴电力工业的新形势、新任务、新前提下,对2000年前我国水力发电的发展作了宏观性、综合性预测;并结合我国国情,立足于现在,放眼世界,面向未来,提出了具有现实可行的建设性建议。本件就是该项研究的初步成果。

由于水力发电系多学科、带综合性、属多层次性的科学技术领域,这份研究成果中仅侧重于对水力发电科学技术中主要带关键性专业作了专题性介绍。

本件在学会常务理事梁益华、陆钦侃同志主持下编写,由陆钦侃、邹范湘等高级工程师执笔,参加编写工作的还有:邵凤山、叶丽秋等同志。编写工作是在广泛搜集资料和调查研究前提下进行的。其中关于国内外水电科学技术发展情况部分,是在原来由水电部水电科技长远规划组所编写的水力发电科技规划资料的基础上,经邹范湘、叶丽秋同志作了删改调整。有关2000年我国水电发展的预测和建议,由陆钦侃同志执笔撰写,并在征求了学会理事和各地方学会意见后,修改定稿。

中国水力发电工程学会

1985.5.

目 录

国内外水力发电科学技术水平与差距

前 言	(1)
第一部分 水能利用规划和动能技术经济	(3)
第二部分 勘测和工程地质	(13)
第三部分 大坝与水电站水工建筑物设计	(21)
第四部分 施工技术和施工科学管理	(32)
第五部分 水轮发电机组和水工金属结构	(43)
第六部分 水电站经济运行和技术改造	(56)
第七部分 基础理论研究	(58)

公元2000年前我国水电发展设想

一. 优先开发水电的必要性和有利条件	(71)
二. 公元 2000 年前水电发展目标	(72)
三. 实现水电发展目标的关键	(74)

国内外水力发电科学技术水平与差距*

前言

据世界能源会议统计, 世界理论水能资源为 44.28 万亿度/年, 相当于平均出力 50.5 亿千瓦, 其中可能开发的水能资源, 装机容量 22.6 亿千瓦, 年电量为 9.8 万亿度。

世界各工业发达国家在其发展过程中, 不论其拥有水能资源多少, 大都尽先开发水电, 把水能资源作为能源供应的重要支柱之一。因而, 在这些国家中, 水能资源开发利用程度都较高, 一般达 40% 以上, 最高的达 98%。水电在各国电力生产中, 所占比重也较大, 最高达 99.8%。

自从七十年代以来, 由于西方世界爆发能源危机, 燃料价格上涨, 各工业发达国家都重新普查和评价其本国的水能资源蕴藏情况, 十分重视对原有水电站的革新挖潜, 扩建增容或新建抽水蓄能电站, 同时注意开发一些“造价较高”的水电站, 用以节省煤、油、气等矿物能源。

许多发展中国家, 从世界能源危机中也觉察到如何利用水能资源节省煤、油、气等矿物能源的问题, 近十余年来, 均优先开发水电。其中有的国家尽先兴建大型水电站, 开发利用程度已达 20% 以上。

由表 1 可见一些国家水能资源开发情况。

我国水能资源蕴藏量居世界第一位, 理论蕴藏量为 6.76 亿千瓦, 可开发的容量为 3.78 亿千瓦, 年发电量 1.91 万亿度, 远超过欧洲加上大洋洲 (两个洲可开发的水电装机 3 亿千瓦, 年电能 1.12 万亿度) 可开发的水能资源总蕴藏量, 比整个拉丁美洲的蕴藏量 (可能开发的水电装机 3.29 亿千瓦, 年电能 1.85 万亿度) 还要多, 这是我国能源的一大优势。表 2 可供比较。

建国三十多年来, 我国水能资源的开发利用有较大的进展, 水电装机已由 1949 年解放初期的 16 万千瓦发展到 1982 年底的 2257 万千瓦, 年发电量由原有的 7 亿度上升到 743 亿度, 增长 100 多倍, 但占我国可开发的水能资源仅为 3.8%, 加上当前在建的水电站装机 1000 余万千瓦只达到 8% 左右。这不仅落后于工业发达国家, 而且也落后于不少发展中国家, 开发利用程度甚至于还远低于印度。

要实现到本世纪末把我国工农业年总产值翻两番的宏伟目标, 确保电力获得相应的增长是关键。而电力的增长, 应该在尽量节省宝贵的、数量有限的煤、油、气资源的前提下实现。因此多利用可再生、无污染、成本低的水能资源, 以水代煤, 以水代油, 以水代气应是我国能源建设的长远战略方针。可见, 优先开发水电, 加快水电建设, 是

* 本件系在原由水电部水电科技长远规划组所编写的水力发电科技规划有关材料基础上由邹范湘、叶丽秋同志作了删改调整。原有材料还有水电部水力发电科技规划组其它成员及水电部西北勘测设计院有关专业人员参加编撰工作。

表 1 一些国家水能资源开发情况

国 别	装 机 容 量			年 发 电 量			水能资源开 发利用程度 (%)
	水电装机 (万千瓦)	电力总装机 (万千瓦)	水电比重 (%)	水电发电量 (亿度)	总发电量 (亿度)	水电比重 (%)	
挪威	1753	1769	99.1	810	811	99.8	67
巴西	2153	2523	85.6	1031	1139	90.6	11
瑞士	1090	1254	86.9	325	423	76.9	93
新西兰	382	540	70.7	166	216	76.9	30
葡萄牙	284	430	60	96	182	72.7	54
加拿大	4233	7402	57.2	2340	3357	69.7	44
埃及	244	294	83	92	135	68.1	61
哥伦比亚	244	378	64.6	105	155	67.7	4
奥地利	782	1231	63.5	249	381	65.4	49
瑞典	1360	2600	52.3	578	929	62.3	57
委内瑞拉	242	550	44	128	242	52.9	13
南斯拉夫	554	1208	45.9	252	512	49.2	40
土耳其	200	500	40	92	212	43.4	14
西班牙	1353	2828	47.9	415	995	41.7	59
墨西哥	560	1570	35.7	216	536	40.3	22
芬兰	239	930	25.7	134	334	40.1	74
印度	945	2680	35.3	390	1071	36.4	14 (至1972年)
法国	1858	5457	34	734	2182	33.6	95
意大利	1716	4483	38.3	527	1734	30.4	90 (1976年资料)
苏联	4755	24544	19.4	1697	12019	14.1	15
日本	2625	11765	22.3	758	5651	13.4	61
美国	7164	59906	12	2840	22942	12.4	40

(上表多属 1978 年统计资料)

客观的需要。1981年11月赵总理在五届人大四次会议《政府工作报告》中强调指出：“电的生产和建设，要因地制宜地发展火电和水电，逐步把重点放在水电上”是具有远见卓识的正确方针。

加快水电建设，国外有许多先进经验可资借鉴。

例如美国现有水电装机7800万千瓦，占世界首位。值得一提的是，美国西北部哥伦比亚河流域的开发，从1933年起，用了30年时间就基本完成，其中大中型水电站达38座，总装机2560万千瓦，对整个美国西部的发展起了重要的作用，对于水电建设，美国制订了长期建设规划，具体落实开发项目、技术和资金。迄今，世界上最大的大古力水电站（原装机228万千瓦，现扩建到648万千瓦），世界上已投入运行的最大水轮发电机组（七十万千瓦）、抽水蓄能机组（38.25万千瓦）、低水头电站灯泡式机组（5.13万千瓦）都在美国。可见，其水电科学技术水平仍处于世界前列。

苏联的水电资源开发，远比欧美各工业发达国家为晚，1957年，其水能资源利用率3.6%，与我国目前开发水平接近，但是到1975年就达到14.8%，十八年内翻了两番。

日本的国土面积为37万平方公里，比我国闽、浙、三省面积总和（38万平方公里）还小，气候、地形条件大致相似。然而，日本已开发的水电总装机容量达2625万千瓦

表 2 世界各国可能开发的水能资源

国 别	国 土 面 积 (万平方公里)	可 能 开 发 的 水 电 装 机 容 量 (万千瓦)	可 能 开 发 的 水 能 资 源 (亿度/年)
中 国	960	87800	19200
苏 联	2240	26900	10950
巴 西	851	20900	9680
美 国	936	17860	7015
加 拿 大	998	1529	5352
扎 伊 尔	235	13200	6600
印 度	328	7000	2800
哥 伦 比 亚	114	5000	3000
日 本	37.2	4960	1300
阿 根 廷	278	4810	1910
印 尼 尼 威	190	3000	1500
挪 威	82.4	2960	1210
西 班 牙	50.5	2932	675
法 国	54.7	2100	630
墨 西 哥	202	2030	994
瑞 典	45	2010	1003
意 大 利	30.1	1920	506
奥 地 利	8.4	1852	492
南 斯 拉 夫	25.6	1696	636
瑞 士	4.1	1100	320
罗 马 尼 亚	23.8	80.3	241
西 德	24.7	441	218
英 国	24.4	246	42

瓦, 年发电量758亿度, 相当于我国现有水电总装机和年发电量的规模。

在巴西, 缺煤少油, 而水电资源丰富, 近20年来水电发展很快。1950年巴西只有装机容量154万千瓦的水电, 1960年到了480万千瓦; 1970年又翻了一番, 达880万千瓦; 1982年又有了更大的发展, 到3890万千瓦, 年平均增长百分之九以上, 十年增加两倍。近几年几乎每年新增加水电装机300万千瓦。这些国家能做到的, 我国也应该可以做到, 我国具备了许多比这些国家优越的条件。

由此可见, 在水力发电科学技术领域与国外先进水平相比, 我国尚存在一定的差距。现分七个部分综述于后。

第一部分 水能利用规划和动能技术经济

一. 国内外水能利用规划概况

国外工业发达国家, 在水电建设中都十分重视水能利用规划和动能技术经济分析工作。这些国家的水电规划, 都建立在科学的规划理论和先进的实施手段的基础上。以综

合利用为基本原则，以满足最大经济效益为目标，建立了一整套经济分析和财务分析的理论和方法。并且应用系统工程的思想，以系统（包括水资源系统和电力系统）最优化为出发点，用系统分析中最优化的方法选择河流梯级开发方案、开发程序、水电站主要参数及水库和水电站的最优运行方式。为了应用计算机实现上述目标，建立了各种应用软件包和数据库。这些国家还广泛采用航测、遥感、遥测、物探、计算机数据处理等手段，获得大量的合乎质量要求的地形、地质等第一性资料，使规划工作在短期内就能很好地完成。例如巴西的巴拉那河，在六十年代只用了四年时间就完成了普查到规划的工作，从几百个可能开发的水力坝址中，选出了几个近期开发的工程，促进了巴西水电建设的加速发展。其它如美国的哥伦比亚河的规划、加拿大魁北克地区的水电规划和北安大略地区的电力系统规划、阿根廷的科罗拉多河多目标开发规划等都是在很短时间内完成的。

发达国家的水电规划不是孤立进行的，它常常是和地区能源规划（地区能源构成，水、火电比重等）、工业配置（如大耗电工业的配置）及联网规划等结合进行的。

（一）水能资源开发利用程度

世界各国1950年共有水电装机7120万千瓦，年发电量3324亿度，占可能开发年电量的3.9%。至1980年水电总装机达4.6亿千瓦，为1950年的6.48倍，平均增长率6.4%。1980年水电总发电量1.75万亿度，开发利用程度达18%。目前水能资源开发利用程度较高的国家有：瑞士、法国、英国、意大利等已达90%以上；西德、挪威、日本、西班牙、澳大利亚、瑞典、葡萄牙等已达50%以上；奥地利、加拿大、南斯拉夫、美国等已达40%以上；苏联虽然只达17%，但其欧洲部分的南部已开发50%以上。

美国的水电开发，在三十年代和四十年代进展比较快，1926年的水能资源利用程度只有3.7%，至1950年增加到14.4%，即24年内翻了两番，现在美国水能资源利用程度已达40%。

苏联的水电开发比欧、美、日等资本主义国家为迟，1957年时其水能资源利用程度才3.6%，只相当于美、加二、三十年代水平，但至1975年时已达到14.8%，即在18年内翻了两番。

加拿大的水能资源开发利用程度1933年时仅为3.2%，至1955年增至14.2%，即22年内翻了两番。现在的利用程度已达47%，即25年内又将近翻了两番，预计到2000年其水能资源利用程度将达到91%。

在我国截至1982年底，水电总装机容量为2257万千瓦，年发电量为743亿度，水能资源开发利用程度为3.8%，这与我国国民经济的发展很不相适应，与世界各国水能资源开发利用程度相比，差距很大。我国不仅赶不上发达的国家，就是一些发展中国家也比我国的水能资源开发利用程度高。因此为实现党的十二大所提出的到本世纪末工农业年总产值翻两番的宏伟目标，在水能资源的开发利用上，有必要加强水能利用规划工作，统一安排，切实贯彻中央关于优先开发水电的方针政策。这样20年内水能利用程度翻两番才可能实现。

(二) 水能资源开发利用规划的理论方法

水能资源开发利用规划的理论和方法,是一项带战略性的科学技术研究课题。国外从五十年代开始对水能规划就给予高度重视,在规划理论研究方面做了大量工作,并已逐渐应用于工程实践。美国发展较早,英国等欧洲国家次之,苏联和日本起步较晚,但近十余年来发展较快。

美国1958年对密苏里河水资源系统的研究,1962年在哥伦比亚河流域系统规划及著名的哈佛规划,是最早将数学模型、最优化技术及模拟技术等系统方法应用于水能资源开发利用的规划。西德采用线性规划和模拟技术,对以水电站为主的电力系统进行了区域规划和电站装机容量的经济选择。

近年来,新的水能规划理论发展较快。河流的水文资料分析整理、负荷预测、经济计算等方面都有了完整的资料和科学的计算方法,形成了一整套多河流、多工程、多目标、多约束的水能资源开发利用最优化理论,并成功地应用于河流规划。例如美国的哥伦比亚河的规划、阿根廷的科罗拉多河的规划以及希腊的纳斯托斯河的规划等都是根据多目标开发准则,应用模型化和最优化理论来确定河流最优梯级开发方式和各梯级工程的最优化设计参数。大部分先进国家都作出了完整程序的规则。美国用系统工程理论与方法,针对阿根廷的科罗拉多河流域进行规划和研究,阐明了有关系统目标、模型化和最优化理论。这个理论可以认为是国外八十年代初先进国家在水能利用规划方面的科学技术水平。

我国在五十年代学习苏联经验的基础上,摸索了一些理论和方法,但没有形成一套系统的规划理论。五十年代末进行的“长江三峡及其中游梯级水库统一调度方法的研究”曾将三峡以上41个水电站水库进行补偿调节,统一调度,在满足综合利用多目标上,使整个梯级和流域开发和电量上获得较大保证出力,对规划理论的贡献达到了当时的先进水平。六十年代初,提出了水能规划理论的研究课题,但未能深入研究。七十年代水能规划理论的重要性,为人们所重视,随着水电建设和河流规划的进展,我国出现了一些规划理论研究的成果。例如红水河水能开发最优规划数学模型的研究;大渡河梯级水电站群补偿调度最优化;电力系统电源规划数学模型;水利系统(水库)最优化规划;水资源系统工程论著等。在采用近代数学成就方面,包括采用整数规划、混合整数规划、动态规划和线性规划、分解、协调技术、系统组合、优化技术来进行规划数学模型的建模和求解,在模型最优化和最优化技术上迈进了一步。这些技术的应用为我国水能规划理论的研究打下了良好的基础。

我国应用系统理论和系统分析的方法进行规划,尚处于摸索阶段。计算机的应用,目前只限于常规(传统)的计算,无论是数量上或质量上均不能满足规划要求,程序库、软件包和数据库尚待建立。我国规划的勘测手段也相当落后,无论在进度、广度和精度上均不能满足规划的要求。

(三) 水能资源开发利用规划需要注意的几个问题

水能开发利用涉及的问题极为广泛复杂,既要考虑河流的综合利用,又要适应地区

电力发展的需要。由于水力发电在整个国民经济发展中的作用日益显著,对人类的生活、文化、文明和科学技术的进步有一定的影响,因此,国外愈来愈重视水能利用的规划问题。

1. 水能利用规划必须注意综合利用,并求得最大的综合效益。为达到水能综合利用的目的,对河流的自然情况和地区社会经济情况要进行广泛深入的调查研究,要充分考虑社会 and 环境影响,要全面地进行技术经济分析,论证水能规划的合理性,最终形成一套多河流、多工程、多目标、多约束的水能资源开发利用最优化的规划。

美国开发水电比较早,在三十年代就明确河流要进行多目标的梯级开发。在规划中统筹兼顾适当安排,以期取得最大的综合效益。1933年成立了田纳西流域管理局,开始对该流域的航运、防洪和发电进行综合开发。至五十年代,干支流上建成水电站47座,总装机359万千瓦,水能资源开发程度达87%,以后发展火电和核电较多,成为国家管理的最大电网。由于该地区历来电价较低,以及航运的发展和防洪标准的提高,促进了工农业的发展,经济面貌发生了很大的变化,由一个农业人口占62%的落后的农业地区变成为工农业发达的地区,居民每人的平均收入由1933年168美元,增至1980年的787.8美元。实践证明田纳西流域规划设想是成功的。美国其它河流的开发,都是根据综合利用原则进行统一规划,与地区经济发展密切配合,而且随着情况的不断变化,对河流规划随时加以修正和补充。例如哥伦比亚河1931年就编制过规划,以后曾多次进行修正和补充(编制1931、1938、1948、1958、1962、1972年的规划报告,目前还在进行规划),使规划向广度和深度发展,逐步完善。

三十年代美国西北部开始建设邦纳维尔水电站(装机容量51.8万千瓦)时,人们担心所发的电用不了,到四十年代修建大古力水电站(装机容量197万千瓦)时,曾考虑分期开发。然而现在,哥伦比亚河在美国境内已建成110座水电站,装机2600多万千瓦,规划建设的尚有800多万千瓦,其中38座大中型水电站装机容量2500多万千瓦,保证出力约1150万千瓦,年发电量约1240亿度,使美国太平洋西北电网的水电比重至今仍达80%左右。他们采用低廉的电价吸引用户,发展炼铝工业、飞机制造业、原子能工业和重化学工业,带动了该地区经济的发展。随着水电工程的建设,防洪、航运、灌溉、游乐等事业均获得全面发展,使哥伦比亚河成为当今世界上获得充分利用的一条大河。

苏联在水电开发中,二十年代就提出了多目标的河流的开发,不仅考虑河流的综合利用规划,而且还考虑利用廉价的水电去促进地区的经济发展。因此在论证兴建一座大型水电站时,要对其形成地区生产力的作用作出评价。早期第聂泊水电站的修建,促成了乌克兰新工业区的开辟。二次世界大战后集中力量开发伏尔加河及其支流卡马河,修建了11座梯级水电站,总装机1132万千瓦,五十年代为其建设高峰,至六十年代末,该流域水能资源已基本得到开发。尤其是五十年代后期,投产的古比雪夫电站(装机230万千瓦)和斯大林格勒电站(装机253万千瓦),促进了苏联欧洲电网的形成,提供了廉价的水电。古比雪夫水电站在1956—1976年,二十年内共发电1870亿度,相当于节约一亿吨原煤,25年来的电费收入34亿卢布,差不多为该水电站总投资的5倍。伏尔加河的开发,除了发电外,也给航运和灌溉提供了巨大的综合效益。苏联从五十年代开始对亚洲部分的水能资源进行开发,西伯利亚中部的叶尼塞河及其支流,是苏联水能资

源最丰富的河流，占全国水能资源的27%，但距离其欧洲经济中心远达3000公里左右，到现在支流安加拉河上已开发三座各400万千瓦以上的大型水电站（其中布拉茨克和乌斯特伊里姆电站已建成，鲍戈昌电站正在施工），叶尼塞河上游已开发二座各600万千瓦以上的大型水电站（其中克拉斯诺雅尔斯克电站已建成，萨扬舒申斯克电站正在继续装机）。这五座大型水电站共有2520万千瓦，再加上另外两座水电站总计2630万千瓦，占据全国水电容量很大的比重。这些大型水电站工程建成后，其发电成本只有火电厂的五分之一至六分之一。这些大型水电站发的电主要供给当地发展新兴的工业，如炼铝、钢铁、木材加工等耗电量大的工业，在这个地区内，每个工人平均年产值达3500卢布，为全苏每个工人平均年产值1850卢布的2.6倍。

2. 水能利用规划要十分注意因地制宜，发展有水库调节的电站和径流电站。在河流规划中，一般都在河流上游人烟稀少地区兴建大型水库，在下游人烟密的地区兴建中低水头径流电站，以尽量减少淹没损失。上游水库可以起调节径流的作用，可使其下游一系列电站得益。因此国外在水能开发中，都很重视上游水库的修建，利用水库来调节天然径流在季节上的变化，以便更有效地利用水能资源，同时也可解决需电和供电（水电）的矛盾。例如瑞典在水电开发中水库具有重要作用的六条主要大河的情况如表3。

表3 瑞典六条大河水库调节径流量情况

河 名	梯级电站数	装机容量 (万千瓦)	发电量 (亿度/年)	河口年均 流量 (立米/秒)	水库调节库容 与平均年水量之比 (%)
律 勒	15	424	140	515	50
昂 格 曼	37	250	106	500	41
英 达 尔 斯	26	201	96	460	37
乌 默	17	201	74	450	26
达 尔	25	96	41.6	370	22
斯开累夫特	12	82	38.4	165	52

上述河流的梯级水电站，总的调节库容与平均年水量之比，最低的不小于22%，最高的是律勒河其值为70%。律勒河上有15个梯级水电站，共计装机容量424万千瓦，年发电量140亿度，占全国全部水电发电量23%。由于河流具有较大的调节库容，因而径流调节幅度很大。例如有一条河流在六月份天然径流未经水库调蓄的电能，最多时达9.75亿度/周，经水库调节后可控制在2.1亿度/周，而冬季一月份原来天然径流电能只有0.8亿度/周，经水库补充后达3.4亿度/周，使冬季发电量比汛期还多。

全瑞典所有电站天然径流所发“径流电能”各月各周变化很大，1978—1979年汛期达到11亿度/周，冬季最少时仅1.3亿度/周，相差9倍。1979—1980年汛期达7—8亿度/周，枯季仅1亿度/周。所有水库把汛期多余的水量蓄起来，成为“蓄存水库电能”，等到枯水期“水库放水电能”就来填补“径流电能”的不足，使所有水电站各月总的发电能力不仅可以拉平，而且冬季负荷最高时水力发电能力还可多些。不足之数再由火电补充以适应系统内各月负荷的变化。

其他一些先进国家也十分强调利用河流上游高山区水库的调节作用，使其下游各梯级电站都能得益。因为高山区兴建水库，既可取得较多的水库蓄能电量，又可减少水库淹没损失，同时也有利于解决愈来愈困难的移民问题。以挪威为例，在电力工业中水电

比重达 99%，为了调节天然径流的不均匀，利用高山湖泊所建水库的蓄能电量达 590 亿度，与水电总年发电量 830 亿度相比达 71%，因此不仅调节了年内不均，而且可使夏季多蓄水少发电，冬季增加发电，以适应用电需要。

8. 水能利用规划时还要注意电力系统联网与火电相互配合的问题。就当前世界电力发展趋势看，许多国家的全国电站都逐渐联成一个电力系统，就是各国之间也逐步相互联通。因为系统联网对于保证与改善水电站在枯水期的发电具有重要作用：通过电网联结可以把具有水库调节的电站和没有水库的径流电站进行相互的电力补偿，可以实现水文补偿，使丰、枯水相互调剂或者使枯水情况有所缓和；联网后，水火电可以相互配合得更好，系统愈大，水电的作用可以发挥得愈好；利用不同地理位置，电力负荷的高峰出现在时间上的差异的错峰，可以减少电力系统的总装机容量；可以减少系统总的备用容量；由于电力系统的联结可以较充分地利用水能，求得全电力系统的最大经济效益因此在一些水电比重大的国家或地区，通过联网配置一定容量的火电来与水电相互补充，互为调剂。

例如挪威（水电比重几乎达 100%）、瑞典（水电比重占 50—60%）、芬兰（水电比重占 30—40%）以及丹麦（火电为 100%）等国组成北欧电网，这样做，尽管各国水文情况不同，高峰负荷时间不同，但相互间能得到补偿，而且在丰水期，挪威等国有多余水电出力可供给火电多的国家，从而节省燃油，相反在枯水期则由邻国的火电来补给其水电出力的不足。

法国是南部多水电，北部多火电，全国联成了统一电网，水火电联合运行。丰水期由南部的水电向北部送电，枯水期由北部的火电向南部送电，互相调剂，发挥了很大的效益。即使碰到了 1971—1972 年连续两年的干旱，水电发电量仅为平均年发电量的 88% 及 87%，但是依靠电网补偿作用，这两年全国总发电量仍有增长。

美国将水电比重较高的西北电力系统与火电比重高的西南电力系统通过长距离超高压输电线联网以后，不仅可以提供调峰容量，还可输送廉价的季节性电能，在 1970 年至 1980 年十年内，西北向西南输送了 1216 亿度电，节省了很多燃料。

4. 水能利用规划要讲究水能资源开发程序。先进国家的水电开发程序，一般都是先修建靠近用电中心的，随后开发较远地区的水电；在河流梯级开发中，一般先修上游，后修下游。例如巴西，它首先开发靠近负荷中心、沿海的一些中小河流，接着开发较远的巴拉那河。在巴拉那河的开发利用中，最初在东源格兰德河上游修建福尔纳斯电站的大水库，随后陆续兴建其它梯级。等到巴拉那河各支流和干流上游各水库基本建成后，才修下游的伊泰普水电站。

苏联，过去主要开发靠近经济中心的欧洲部分的水能资源，从五十年代开始才对亚洲部分的水能资源进行开发。在叶尼塞河及其支流的开发中，先修支流安加拉河上游的伊尔库茨克和布拉茨克等电站，再修下游的乌斯季伊里姆鲍戈昌等电站，以及干流上的克拉斯诺雅尔斯克和萨扬舒申斯克电站。在建设萨扬舒申斯克大电站的后期，同时兴建其下游较小的低水头水电站（马英水电站，装机 34 万千瓦）。这样做可以利用上游水库蓄水，减少下游各梯级的施工临建设施，缩短施工准备时间，降低造价。此外，苏联还在建设一批电站时，修建一个共同使用的施工基地，作为根据地，以利于陆续建设一条

河流上的梯级。如对于叶尼塞河中游总装机达 2600 万千瓦的四个电站的开发就是这样做的，认为集中建设比分散建设好处多，总的工期可由 35 年缩短到 30 年，建筑安装费也可节约 4%。

5. 水电站的建设规模要从水能资源蕴藏条件的实际出发，因时因地制宜予以开发。一般说来，国土面积较大，大河流多的苏联、加拿大、巴西和美国，修建大水电站较多。单站装机 20 万千瓦以上的大水电站占全国水电总装机的 60—80%。三十年来大型水电站发展很快。1950 年全世界 100 万千瓦以上的大水电站只有 2 座，都在美国。目前国外 100 万千瓦以上的大水电站已有 52 座，在建或拟扩建的有 38 座。其中在亚非拉发展中国家有 38 座。在这些大型水电站中，装机在 200 万千瓦以上的有 36 座，400 万千瓦以上的有 12 座，其中最大的是巴西与巴拉圭合建的伊泰普水电站，装机容量 1260 万千瓦。

苏联在 50 年代开始加快大水电站的修建，装机容量大于 100 万千瓦的大水电站：1960 年有 2 座，装机容量共 471.5 万千瓦，在总装机中占 31.9%；1970 年达到 6 座，装机容量 1630 万千瓦，占总装机比重为 52%；至 1980 年，已建成 14 座，装机容量 3377 万千瓦，相当于全苏水电总装机的 64.6%。在建的还有 7 座，可装机 1563 万千瓦，占水电在建规模 2810 万千瓦的 56%。

加拿大已建成 100 万千瓦以上大水电站 11 座，在建的还有 5 座。美国已建成 12 座，在建的 3 座。

发展中国家水电开发比较突出的巴西，从六十年代开始进行大规模建设，至 1980 年已建成装机容量 100 万千瓦以上的大水电站 11 座，共装机 1798 万千瓦，占全国水电总装机容量 2727 万千瓦的 66%，在建的还有 6 座，共可装机 1783 万千瓦（其中伊泰普水电站计算一半容量 630 万千瓦），占在建规模 2700 万千瓦的 66%。

西欧诸国和日本等河流较小，所建中小水电站较多。据统计装机容量 1—20 万千瓦的中小型水电站占全国总装机的比重较大，法国和瑞士均占 66%，日本占 63%，挪威占 62%。瑞士所建 1 万千瓦以下的小水电站有 2136 座，西班牙有 1798 座。近年来因燃料价格上涨，过去认为不经济的小水电又在重新进行评价和加强开发，有些被废弃的小水电站又修复发电。美国对过去为防洪、航运和灌溉所建的坝和渠坝跌水可以装机发电的进行了普查，潜力不小，一般水头较低，从 3 米至 20 米，采用低水头机组。

建国初期，我国的水能资源开发利用规划是在学习苏联经验的基础上，进行了一些研究，开始把编制河流规划作为水电建设重要的一环来抓。作过十五年电力发展规划，使水电建设的程序有所遵循，对各大河流做了综合利用规划，根据综合利用的原则进行梯级开发方案和开发程序的研究，取得了一定成绩。例如当时制订的黄河流域规划一直指导着黄河水力资源的开发工作，规划中比较重视防洪、发电、灌溉及城市和工业给水，但对航运和环境影响等注意不够，有些地区缺乏水库调节，丰水季和枯水季发电能力差别很大，效益较差。如长江宜昌站的不均匀系数为 0.39，上游各支流所建水库不多，大渡河上的龚咀和铜街子两座水库的有效库容仅 1.7 亿立米，乌江上已建的乌江渡和拟建的彭水，合计有效库容 20 亿立米，都比较小，对天然径流的调节能力低，影响效益发挥。借鉴国外的经验，应当因地制宜发展有水库调节的电站和径流电站。一方面在河流上游淹没损失较少的山区建水库，扩大河流的有效库容，提高对径流的调节能力，中下游可

兼得防洪、发电和灌溉之利。另一方面，在河流中下游建调节水库。如果是淹没损失严重的地区，可改建径流电站，与上游的调节水库配合运行。这样做可以大大提高经济效益。

为了充分发挥我国水能资源丰富的优势，解决煤炭、水能资源分布不均和地区负荷发展不平衡的问题，应大力开发西南、西北地区的水能资源，及早实现“西电东送”。

“西电东送”，实现西北与华北地区联网，可以互为调剂，综合利用，扬长避短，充分发挥水电调峰作用。三峡水电站建成后，电力往东输送，红水河各梯级电力往东南输送，西南地区各梯级水电站也往东向武汉乃至华东输送，几个大区电网联网，其补偿和联网效益将比新建几个百万千瓦的水电站效益更大。

此外，必须对西北地区的铝电联营、西南地区的钛铁矿工业等耗能大的重工业与开发水电关系作出规划论证，尽力发挥水电优势，争取更多的电能载体出口，换取外汇，经济效益也将十分显著。

我国水能资源开发利用规划与世界先进国家相比，在理论上，方法上和工作上的广度与深度方面，均存在差距，主要表现在：

(1) 没有把水能利用规划工作放在优先地位，规划理论的研究不够，忽视了技术经济分析论证工作，已经进行的一些流域规划，基础资料不够完整系统，可靠性差；

(2) 不重视流域（河流或河段）规划的编制工作，审查很不及时，规划起不到它应有的作用，甚至有的工程已进入了设计阶段，反过来再补做规划；

(3) 不讲求经济效益，缺少适合我国国民经济特点的能源政策及电力工业方针的经济分析方法和评价准则；

(4) 对应用现代计算技术进行水能规划，进行多方案、最优化的研究比较和进行水电站群的最优调度运行，都尚处于摸索起步阶段。

二. 国内外动能技术经济概况

当前，一些国家正根据现代化规划理论建立河流综合开发的数学模型，并利用计算机进行多目标的综合方案比较，使水能资源开发利用规划的工作速度和精度大为提高，而且能随时适应经济等约束条件的变化，计算各种方案的经济效益，为水电开发的决策提供了科学的基础。各个国家都是依据自己的特点，形成了各自的动能技术经济计算的理论和方法。

(一) 技术经济分析的理论方法

国外在水电建设中论证工程项目和方案选择的合理性时，都要进行技术经济分析。由于各国的政治制度、经济体制和科学技术水平不一，各有各的技术经济论证的理论和方法，侧重不一，但就其实质而言不外两类。一类是以美国为代表的考虑资金的时间价值的动态经济分析，一类是以苏联为代表的不考虑资金的时间价值的静态经济分析。

美国早在十九世纪初就开始研究效益和费用的关系，把效益超过费用作为工程项目经济评价的基本准则，即“益本比法”。1930年格兰特编著的“工程经济学原理”一书，

首次系统地阐述了动态经济的计算方法。1950年提出了“河流流域工程经济分析的建议方法”，有关工程方案选择的标准和具体计算方法中有很大部分至今仍有使用价值。比如“净效益最大法”，“效益费用比值法”和“分离费用一剩余效益分摊法”等迄今仍在使用。随着国土资源的开发利用，不断出现一些新问题，如环境问题，地区发展不平衡问题等，1973年又颁布“水土资源规划的原则和标准”，随后又提出了“水资源规划中国家经济发展效益和费用评估程序”，可以认为是目前美国关于技术经济分析的规范性文件。

从西欧北美国家近100多年来进行的研究，逐步制定出了各种水能技术经济分析的理论与方法。现行的有益本比法、现值法、回收率法等。这些理论和方法的基本出发点是根据资本主义制度的利润最大原则。这是同资本主义制度下的市场经济与“自由竞争”相适应的。

苏联在建国初期，曾引进了西方国家的“资金利率”的概念，在工程项目的方案比较中，也曾考虑投资的时间因素，当时曾规定基本建设投资要考虑报酬，提高了报酬与基建投资的比值称为“经济效率系数法”，并曾规定这个系数等于6%，这一方法一直使用到三十年代中期。此后对原有的“经济分析计算方法”作了修改，把劳动量作为衡量价值的主要尺度。在方案比较时，在同样满足国民经济发展需要的前提下，以节约的劳动消耗量最多为原则。方案的选择，通常采用低偿年限和年折算费用最小法选定。在计算投资时，不考虑利率，不考虑资金的时间价值，不计利息。由于无偿使用生产建设资金，导致了固定资产和流动资金大量积压，资金周转缓慢，施工周期拖长，建设项目长期不能受益，因而1960年又颁布了新的《基本建设投资经济效益计算典型方法》。由于这个方法，考虑了资金利率，改基建投资的银行拨款为银行贷款。经过近十年的试行，收到了较好的经济效果，在此基础上又加以修改补充，颁布了《确定投资经济效果的标准方法》，作为苏联国民经济各部门都必须采用的评价投资经济效果的共同准则。1979年又颁布了《国民经济中采用新技术、创造发明和合理化建议的经济效果计算方法（基本原则）》。

在苏联，有专门机构长期研究水能技术经济问题，经过几十年的实践研究，已经制订出一整套水能技术经济分析的理论和方法。现行的方法是考虑时间因素的折算年计算支出法。其出发点是在满足国民经济对开发利用水资源的一定需要前提下，力求国民经济总的支出费用最小，这是与苏联高度集中的经济 and 建设资金由国家统一拨款的情况相适应的。

我国在五十年代基本上是引用苏联当时未考虑时间因素的抵偿年限法、年计算支出法，也有些工程采用“还本年限法”。目前，还没有一套公认可行的水电工程动能经济比较准则和分析计算方法。党的十一届三中全会之后，逐步开展理论研究，但主要还只限于引进评述、分析国外技术经济理论和方法。因而急待研制出一套统一的适合我国社会主义经济特点的水能技术经济理论和方法。

我国当然能源问题十分突出，已成为影响我国国民经济发展速度的一个重大因素。但水力资源却得不到较快的开发利用，致使每年约有相当10亿吨标准燃料的水力资源白白地流入大海。原因是人们常认为水电投资大、工期长。事实上并非如此。许多水电工

程具有综合利用效益，但在规划设计时并不对各受益部门进行投资分摊，把整个工程的全部投资都算作水电站的投资，就显得不经济。这样常使水电工程不能上马，或者使规模缩小，水能资源不能获得合理的开发和充分的利用。

我国大型水电站的施工工期，一般约需5—10年，中型水电站的施工工期，一般3—5年。虽然大型水电站的单位千瓦投资较少，但由于工期较长，投资积压损失较大，如果考虑投资积压损失，大型水电站单位千瓦的造价未必比中型水电站的单位千瓦造价便宜很多。对此，需作具体论证，因地制宜予以考虑。

水电站系统的年费用，与发电量的多少无关，它主要包括固定资产的折旧费，职工工资及运行管理、维修等费用，其中折旧费约占年费用的 $2/3$ 左右，其余约占 $1/3$ 左右。考虑到水电站固定资产中大部分为土建类建筑物，如不计无形损耗，折旧费仍按有效使用年限计算，则折旧费约为固定产值的 2% 左右，设水电站装机容量年利用小时平均为4000小时，则每度电能的成本约为0.01元（1分/度）。

在一般情况下，水电站系统的单位千瓦投资约1100元左右，如果考虑水电工程的投资分摊及火电的环境保护费用，有可能水电投资与火电相差不多，而水电年费用仅为火电年费用的 $1/8$ 左右，因而水电站建成后，运用时不要燃料，发电成本比火电低得多，能长期取得较多的利润，因此从节能原则及经济观点看，修建水电站仍是十分有利的。

（二）投资分摊的理论和计算方法

水利枢纽的综合利用开发，可以发挥工程投资的最大效益，但是对于综合利用工程要考虑投资的分摊。投资分摊有多种方法。

美、日等国近来采用“可分费用—一剩余效益法”，其原则是“多目标综合开发与单目标各自开发进行比较，所节省的投资费用就是剩余效益，由所有参加开发部门分享”。具体办法是将枢纽工程的总费用，划分为共同费用和可分费用两部分：某个部门的可分费用等于综合枢纽总费用与未包括这个部门的总费用之差；从枢纽总费用减去前述的各个部门的可分费用的总和值就是需要在各部门之间进行分摊的共同费用。根据各个部门可能的替代方案，求出各自的剩余效益及其在全部剩余效益的比例值；用剩余效益比例分摊共同费用；将分摊的费用加上各自的可分费用就是各部门应当分摊的总费用。各部门分摊的总费用既不应大于所取得的效益，也不应超过其单独开发的费用。

根据资料，美国田纳西河的诺里斯、威尔逊和惠勒水电站的发电部门只承担共同投资的50%。哥伦比亚河的大古力水电站发电部门分摊投资占枢纽总投资的63.3%，麦克纳里水电站发电部门分摊总投资的91%。

苏联对于综合利用枢纽根据效益比例分摊的办法，把整个工程共用部分的投资分摊到各个参与部门，一般水电站发电部门承担总投资的75—80%，个别电站承担总投资的50%。

除上述两大类的投资分摊方法外，还有其他许多方法，例如：

（1）在各受益部门之间平均分摊，或者主导部门负担较大的份额，其它部门仅负担专用工程的投资；

（2）按所利用的库容或水量分摊共用工程部分的投资，再加上各自的专用工程投