中国长江三峡集团公司科技图书出版基金资助

INTEGRATED DISPATCH AND OPERATION
TECHNIQUES OF CASCADE HYDROPOWER STATIONS

梯级水电站
联合调度运行技术

肖舸　马光文　李晖◎主编

中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

梯级水电站联合调度运行技术
肖舸　马光文　李晖◎主编
中国三峡出版传媒

梯级水电站联合调度运行技术

肖　舸　马光文　李　晖　主编

（节选版）

中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

图书在版编目（CIP）数据

梯级水电站联合调度运行技术/肖舸，马光文，李晖主编．—北京：中国三峡出版社，2017.6

ISBN 978-7-80223-997-5

Ⅰ.①梯… Ⅱ.①肖… Ⅲ.①梯级水电站-水库调度-研究 Ⅳ.①TV74

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 140828 号

责任编辑：赵静蕊

中国三峡出版社出版发行

（北京市西城区车公庄大街 12 号　100037）

电话：（010）57082645　57082655

http：//www.zgsxcbs.cn

E-mail：sanxiaz@sina.com

北京市画中画印刷有限公司印刷　新华书店经销

2017 年 6 月第 1 版　2017 年 6 月第 1 次印刷

开本：787×1092 毫米　1/16　印张：7.25

字数：123 千字

ISBN 978-7-80223-997-5　定价：118.00 元

前　言

水能是一种可再生能源，是一种经济、清洁的能源。由于自然条件和技术的原因，须对河流进行分段开发，由上而下地拟定一个河段接一个河段的、呈阶梯状分布形势的梯级水电站。

随着河流水电资源的开发，世界上许多流域已经或即将形成由一连串水库水电站组成的流域梯级水电站群，这些梯级水电站不但有水力、电力联系，有些流域梯级电站还由多个开发主体建设，实现梯级水电联合调度运行更为重要和复杂。

实施流域梯级电站联合调度运行，可充分利用水能水资源。流域梯级电站间具有紧密的水力联系和电力联系，各电站发电效益受上下游电站的影响较大。下游电站的调度用水及发电水头直接受上游电站的制约，同时下游电站的回水又直接影响上游电站的发电水头。

本书根据流域梯级水电站联合调度运行的特点，就梯级水电站联合调度运行的理论、技术、方法、案例等进行探讨。全书由 8 章组成：

第 1 章，简要介绍了世界上水电及梯级水电开发的发展沿革，分析了梯级水电站的工作状况不同于独立运行电站的工况，主要包括梯级水电站对河流的水能利用特征明显、厂区比较分散导致生产指挥受到种种限制、梯级电站与电力系统关系更为复杂等。

第 2 章，介绍了流域梯级水库水文气象预报方法，主要包括天气预报、短期水文预报、中长期水文预报等，并介绍了中国三峡 – 葛洲坝梯级电站气象预报和径流预报的实施案例。

第 3 章，重点探讨了流域梯级水电站的联合发电调度问题。主要包括梯级联合发电调度规范、联合发电调度内容、联合发电调度方法，并介绍了日本关西（Kansai）电力木曾川（Kiso River）梯级水电站综合运行调度的案例。

第 4 章，介绍了流域梯级水库防洪调度内容。主要包括梯级水库自身安全的洪水调度、梯级水库防洪优化调度、梯级水库防洪调度的常规方法和系统分析方法等，介绍了中国三峡 – 葛洲坝梯级枢纽防洪调度案例，并进行了实践经验总结及效益分析。

第5 章，介绍了生态调度有关内容。主要包括生态调度的理论基础、生态调度原则、生态需水量调度、模拟自然水文情势调度、水温调度、防治下泄水流气体过饱和调度、泥沙调度、水质调度、恢复增强水系连通性的调度、国际相关法规标准等，并介绍了中国三峡 – 葛洲坝梯级枢纽泥沙调度、以保护四大家鱼为目的的生态调度案例。

第6 章，介绍了多目标综合调度有关内容。主要包括多目标优化模型、多目标协调技术、多目标求解技术、动态控制汛限水位、水库水沙联调、风险分析技术等，并介绍了美国田纳西梯级综合调度、三峡及长江上游水库综合利用调度案例。

第7 章，介绍了安全应急调度有关内容。主要包括水库大坝突发事件、水库大坝安全管理应急预案、突发事件预测和预警技术、水电站运行安全管理等。

第 8 章，介绍了梯级联合调度效益评价有关内容。主要包括经济效益评价、社会效益评价、评价技术等。

其中，祝俊、罗霄凌和徐卫立参与了第 1 章和第 2 章的编写，赵良水参与了第 3 章的编写，徐涛参与了第 4 章的编写，黄炜斌参与了第 5 章和第 6 章的编写，陈仕军参与了第 7 章和第 8 章的编写。

本书在国家重点基础研究发展计划（973 计划）资助项目（2013CB036406-4）、国家重点研发计划（2016YFC0402205）、国家重点研发计划（2016YFC0402208）等项目的支持下完成。在编写过程中，得到了中国长江三峡集团公司、中国长江电力股份有限公司和四川大学等单位以及有关专家、同仁的大力支持，在此一并表示诚挚的感谢。同时，本书也吸收了国内外专家学者在这一领域的最新研究成果，并在书中标明了相应的参考文献。在此，对相关作者表示衷心的感谢。

目 录

第 1 章 引言和背景 …… 1
1.1 引言 …… 1
1.2 发展沿革 …… 2
1.3 工况特征 …… 4
第 2 章 水文气象预报 …… 6
2.1 概述 …… 6
2.2 内容和方法 …… 7
2.2.1 天气预报 …… 7
2.2.2 水文预报 …… 8
2.3 中国三峡—葛洲坝梯级电站径流预报 …… 12
2.3.1 简介 …… 12
2.3.2 气象预报实施 …… 14
2.3.3 径流预报实施 …… 14
第 3 章 梯级水电站联合发电调度 …… 16
3.1 梯级联合发电调度规范 …… 16
3.2 联合发电调度内容和方法 …… 17
3.2.1 调度内容 …… 17
3.2.2 调度方法 …… 18
3.3 日本关西（Kansai）电力木曾川（Kiso River）梯级水电站 …… 20
3.3.1 日本关西电力和木曾川梯级水电站简介 …… 20
3.3.2 木曾川河系的综合运行调度 …… 21

第 4 章　防洪调度 …… 23
4.1　原则 …… 24
4.2　水库防洪调度的内容 …… 25
4.2.1　水库防洪调度的分类 …… 26
4.2.2　梯级水库防洪调度方式 …… 27
4.2.3　梯级水库防洪库容分配 …… 28
4.2.4　梯级水库自身安全的洪水调度 …… 29
4.2.5　梯级水库防洪优化调度 …… 30
4.3　梯级水库防洪调度的主要方法 …… 31
4.3.1　常规方法 …… 32
4.3.2　系统分析方法 …… 32
4.4　中国三峡—葛洲坝梯级枢纽防洪调度案例 …… 34
4.4.1　案例背景 …… 34
4.4.2　实施水库中小洪水调度的必备条件 …… 35
4.4.3　实施中小洪水调度的步骤 …… 35
4.4.4　三峡水库中小洪水调度实践及效益分析 …… 35
第 5 章　生态调度 …… 39
5.1　水库生态调度的理论基础及调度原则 …… 40
5.1.1　生态调度的理论基础 …… 40
5.1.2　生态调度原则 …… 41
5.2　生态调度的内容及方法 …… 42
5.2.1　生态需水量调度 …… 42
5.2.2　模拟自然水文情势调度 …… 44
5.2.3　水温调度 …… 45
5.2.4　防治下泄水流气体过饱和调度 …… 47
5.2.5　泥沙调度 …… 48
5.2.6　水质调度 …… 49
5.2.7　恢复增强水系连通性的调度 …… 50
5.3　国际相关法规标准 …… 51

5.3.1 美国 …… 52
5.3.2 澳大利亚首都地区 …… 52
5.3.3 中国 …… 53
5.3.4 英国 …… 53
5.3.5 法国 …… 54
5.3.6 德国 …… 54
5.3.7 挪威 …… 54
5.3.8 瑞士 …… 55
5.3.9 捷克 …… 55
5.3.10 其他 …… 55
5.4 中国三峡—葛洲坝梯级枢纽生态调度案例 …… 56
5.4.1 生态调度的原则 …… 56
5.4.2 水库泥沙调度 …… 56
5.4.3 以保护“四大家鱼”为目的的生态调度 …… 61
第6章 多目标综合利用调度 …… 65
6.1 概述 …… 65
6.2 多目标综合利用调度方法 …… 67
6.2.1 多目标优化模型 …… 67
6.2.2 多目标协调技术 …… 69
6.2.3 多目标求解技术 …… 72
6.3 多目标综合利用调度重点领域 …… 74
6.3.1 动态控制汛限水位 …… 74
6.3.2 水库水沙联调 …… 76
6.3.3 风险分析技术 …… 77
6.4 案例 …… 78
6.4.1 美国田纳西梯级综合调度 …… 78
6.4.2 三峡及长江上游水库综合利用调度 …… 81
第7章 安全应急调度 …… 83
7.1 水库大坝应急调度 …… 83

7.1.1 水库大坝突发事件 …… 83
7.1.2 水库大坝安全管理应急预案 …… 83
7.1.3 突发事件预测和预警技术 …… 87
7.2 水电站运行安全管理 …… 90
第8章 梯级联合调度效益评价 …… 91
8.1 评价内容 …… 91
8.1.1 经济效益评价 …… 91
8.1.2 社会效益评价 …… 94
8.2 评价技术 …… 95
8.3 最新进展 …… 97
参考文献 …… 99
结语 …… 107

第 1 章　引言和背景

1.1　引言

水能是一种可再生能源，是一种经济、清洁的能源。由于自然条件和技术的原因，须对河流进行分段开发。即自河流的上游起，由上而下地拟定一个河段接一个河段的、呈阶梯状分布形式的水利枢纽系列，这样的开发方式称为梯级开发。通过梯级开发方式所建成的一连串的水电站，称为梯级水电站。

实施流域梯级电站联合调度，可充分利用水资源。流域梯级电站间具有紧密的水力联系和电力联系，各电站发电效益受上下游电站的影响较大。下游电站的调度用水及发电水头直接受上游电站的制约，同时下游电站的回水又直接影响上游电站的发电水头。若各梯级电站单独运行，不从全流域整体考虑，容易造成顾此失彼，使梯级整体水能利用率较低，易导致水库无益弃水，造成大量弃水电量。联合调度从流域整体水能利用率最大化角度出发，不仅龙头水库的调节作用可得到充分的发挥，而且梯级水库之间可通过径流电力补偿调节，合理确定梯级水库蓄放水次序，使流域水量、水头得到充分利用，提高河流水资源的利用效率。实施流域梯级联合调度，是流域和梯级电站安全防洪度汛的需要。流域降雨在时间和地区分布上存在差异，利用流域各梯级水库调节性能的不同，充分发挥大型水库的调节优势，通过水库之间的削峰、错峰，可以提

高流域梯级整体的防洪能力。另外，梯级联合调度使用全流域洪水预报成果，不仅可为各梯级水电站的防洪度汛提供可靠的信息，而且使梯级调度机构成为全流域的水情信息中心，有利于防洪调度方案的快速决策。

本书根据流域梯级水电站的特点，就梯级水电站联合调度的理论、方法、应用等进行探讨。全书由 8 章组成：首先介绍了水文气象短期及中长期预报的基本模型和方法，主要对流域径流进行预测，为梯级水电站联合调度提供有力的科学依据；其次，分别从发电调度、防洪调度、生态调度、多目标综合利用调度、安全应急调度 5 个方面详细阐述了梯级水电站及水库联合调度的理论方法及某些国家应用实例；最后从梯级水电站运行管理方面，介绍了梯级水电站的效益评价方法。

1.2 发展沿革

水力发电的出现，始于 1880 年前后。当时法国的塞尔美兹制糖工厂、英国的下屋化学工厂、美国的可拉矿山等都建立了小规模水电厂，主要用于自备的动力驱动。1882 年前后，在美、英、法等国出现了专门供电的水电厂，其中以大发明家爱迪生在美国威斯康星州创建的亚伯尔水电站较为著名（水头 3m 装机 10.5kw），故常把它作为水电站诞生的正式代表。在水电站创建的第 1 个 10 年，容量一般都很小。如瑞典 1882 年建立的该国第 1 座水电站，只有 3hp① 的容量；日本在 1889 年建立的该国第 1 座水电站也只有 65hp 的容量。在水电站发展的第 2 个 10 年，装机容量开始有较大增长。1892 年，最早利用尼亚加拉瀑布水力资源的水电站建成，安装了 3 台 1000hp 的水轮发电机；1895 年，美国尼加拉水电站发电，装机达14.7×10^4kw。1895 年，位于法国罗纳河的圣克来水电站，装机10.7×10^4kw。在之后的两个 10 年中，水电站规模迅速扩大，装机容量发展很快，美国的密西西比河从 1913 年至 1930 年的 17 年中，水电站装机从14.7×10^4kw 增加到965×10^4kw，增加了 65 倍。苏联在此期间也修建了装机容量达55.8×10^4kw 的第聂伯水电站。但是，在水电站发展的前 40 年中，多数国家都处于单目标、单个

① 1hp≈0.746kw。

电站孤立开发、独立管理的状态。唯有日本在20 世纪的前30 年中出现了按河流水系进行梯级开发的趋势，并取得了较好的成效。但是，当时也没有明确提出对河流进行梯级开发的概念。

1933 年，美国在田纳西河流域的开发方案中首次提出多目标梯级开发的主张，并加以实施。此后，康伯兰河、密苏里河、哥伦比亚河、科罗拉多河、阿肯色河等相继按照田纳西河的开发方式进行多目标梯级开发。

与此同时，苏联在 1931 年到 1934 年间完成了伏尔加河的梯级开发规划，并付诸实施。

水力发电发展的第 2 个 40 年，是梯级开发迅猛发展的时代。大多数发达国家在这一时期都以开发水能作为自己国家能源建设的重点，优越的水电电源点大都获得了开发。

发达国家水电建设从 20 世纪 70 年代以后开始走向平稳发展时代。而拉美一些发展中国家则从 60 年代开始了水电建设的高潮，梯级开发进展很快。巴西在 1958 年到 1986 年的 28 年中，对巴拉那河及其支流进行了一连串梯级开发，共建成梯级电站 17 座，总库容为 $179.22\times10^8m^3$，总装机达 3958×10^4kw。这使它从 1950 年的水电装机 154×10^4kw 居世界第 12 位跃居为世界第 5 位。

目前，世界上梯级水电站开发建设最完善的河流是美国和加拿大境内的哥伦比亚河，干支流共建 42 座梯级、总装机达 3335×10^4kw，是世界上梯级数最多的河流。

巴西和阿根廷、巴拉圭等国境内的巴拉那河，干支流共建 30 座梯级，总装机达 4854×10^4kw，是世界上装机容量最大的河流。

苏联的叶尼塞河，干支流共建梯级 9 座，总库容达 $4679\times10^8m^3$，是世界上水库库容最大的河流；还有苏联的伏尔加河，法国的罗纳河，加拿大的拉格朗德河，美国的密西西比河，欧洲的莱茵河、多瑙河等梯级水电站的开发建设都很有特点，不仅获得了巨大的水电能源，而且获得了综合的社会经济效益。

中国水力发电起步虽然较晚，但梯级开发的尝试却并不比国外落后多久。1912 年，在云南昆明滇池的出口上建造了中国第一座水电站——石龙坝水电站，安装了两台 240kw 的水轮发电机。1936 年，开始对四川长寿境内的龙溪河进行梯级开发的规划设计。但因处于战争动乱中，到解放时仅完成了很少一部分工

程。新中国建立后，河流水能资源的梯级开发迅速发展。1959 年建成了龙溪河梯级水电站，1973 年建成了古田溪梯级水电站，1972 年建成了以礼河梯级水电站，1980 年建成了猫跳河梯级水电站，1986 年建成了田洱河梯级水电站。但是，由于经济和技术条件的限制以及体制、政策方面的原因，新中国建立后的前 30 年，水力发电事业的发展规模并不大。已开发建成的梯级电站都位于中小型河流。迄今为止尚无一条大型河流完全实现了梯级开发。改革开放以来，特别是最近 10 年，水电开发引起各方面重视，梯级电站建设出现新的势头。黄河上游梯级经过 50 年的开发建设，已建成 5 座大中型电站，形成 $312\times10^8 m^3$ 的库容和 $300\times10^4 kw$ 的装机。红水河梯级、大渡河梯级、岷江梯级正在开发建设之中。金沙江主要支流，雅砻江梯级开发和南向水系澜沧江梯级开发也拉开了序幕，金沙江干流、乌江干流的开发也在计划之中。随着水电开发的政策和体制能够不断完善，中国水能资源的梯级开发将会以前所未有的速度发展，国民经济将会得到充足、廉价、卫生、可靠的能源供应。

1.3 工况特征

河流实行梯级开发，梯级水电站的工作状况同非梯级开发的个别独立运行电站有很大的差别，具有独立运行电站所没有的一些工况特征，主要表现在：

梯级水电站对河流的水能利用特征非常明显：在水头利用上，是分级开发、分段利用；在水量利用上是多次开发、重复利用，因此，在上下梯级之间表现出明显的相互影响的制约。由于整个梯级都受到上游来水的影响、下游梯级都受到上游水库调节能力的制约、下一梯级受到上一梯级运行工况的制约，因此梯级电站的调度不仅有各个电站的合理运行调度问题，而且有整个梯级的优化调度问题。所以，梯级电站必须实行整个梯级的统一调度，在满足系统所给定的负荷曲线前提下，实行各个梯级站的经济运行，以便合理利用水力资源，提高水能利用率。

一个河流梯级往往有多个电站，电站之间都相隔一定距离，厂区比较分散，这就使生产指挥受到种种限制。如果各个电站的开发方式、布置形式、机组型号和容量不一样，又使得生产技术管理复杂化。由于电站、生产和生活设施也

相对分散，使得后勤管理比较复杂。为了适应对梯级电站统一管理的要求，对梯级电站厂区内的道路交通、通信设施和其他管理技术手段也有很多特殊的要求。总之，梯级电站的生产管理必须有效解决好电站分散与管理集中之间的矛盾。

上述矛盾主要指梯级电站与系统的关系问题，同时也涉及与所在地之间的联系。如果整个梯级同属于一个电网，这种联系相对单纯一些。如果一个梯级分属于不同的电网，那么梯级管理中的利益冲突与调节将是十分重要的问题。即便是属于同一个电网，如果构成梯级的电站所有权不一致，那么，也应十分慎重地处理好电站——梯级——系统三者之间的利益关系。由于梯级电站跨越好几个市县甚至好几个省区，这又涉及不同地方之间的利益关系。这种关系不仅是电量分配问题，而且涉及利税分配、水量分配、防洪安全、环境影响等多方面问题。在梯级运行过程中，应十分注意和妥善解决这些关系。

第 2 章　水文气象预报

2.1　概述

水文气象预报是根据前期或现时的水文气象资料，对某一水体、某一地区或某一水文站在未来一定时间内的天气、水文情况做出定性或定量的预测。准确及时的水文预报是防洪决策、水资源优化调度、水利工程运行管理的科学依据，对保护人民生命财产安全，充分发挥水利工程效益，保障社会稳定和国民经济可持续发展起着极其重要的作用。20 世纪 30 年代以来，水文预报技术发展迅速，从经验公式、集总模型到分布式模型，取得了丰硕成果。特别是随着计算机技术、通信技术、信息处理技术的发展，水文预报进入了一个新阶段。但是，随着社会经济的发展，水能资源开发程度的增加，流域内已建或在建水库电站数目越来越多，使得河流的连续性发生了变化，特别是具有季及其以上调节能力的水库，在较大程度上改变了流域水系的天然径流特性。另外，全球气候变暖，改变了降水的时空分布及强度，蒸发、径流及土壤水等水文要素特性发生变化，干旱、洪水的频次及强度增加。因此，全球气候变化、梯级水库群建设、社会经济快速发展给流域水资源开发利用带来了巨大压力，产生了一系列新的学科命题，也给水文预报工作带来了新的问题和挑战。

2.2　内容和方法

2.2.1　天气预报

目前天气预报包括天气形势预报和气象要素预报两部分，前者是对天气系统（高压、低压、槽脊、峰面等）的移动、强度变化和生成、消亡的预报；后者是对气温、气压、湿度、能见度、风、云、降水等气象要素和天气现象的预报。两者紧密相关，天气形势是预报气象要素变化的基本依据。气象预报按时效分为短期预报、中期预报和长期预报。通常称时效在几小时内的预报为短时预报，时效 1 ~ 3 天的预报为短期预报，时效 3 ~ 10 天的预报为中期预报，时效 10 天以上的月、季、年预报为长期预报。

目前气象台使用的天气预报方法大体分为 3 类，即天气图法、数值预报法和数理统计法。天气图法和数值预报法主要用于短期预报，数理统计法主要用于长期预报。在实际预报工作中 3 种方法是相互结合、相互补充使用的。

天气预报应用于梯级水电站的调度主要是进行降水预报，为水文预报提供基础的降雨资料，以便进行入库流量及区间流量的预报。目前一般气象台用来作降水预报的方法还是基于天气图法、数值预报和统计学方法。

（1）天气图法

直接在天气图上根据天气形势，分析降水条件做出定性的降水预报。当天气形势符合某一天气——气候模型时，就按这个模型的降水分布来做预报。

例如中国科学院大气物理研究所概括了江淮地区出现暴雨时的一些模型，比如切变线型、北槽南涡型、高空旋涡型等，能够有效地对降水区域做出预报。

（2）统计预报方法

这种方法的基本思想是根据本地区降水或暴雨发生前的天气形势和各种气象要素的变化特征，寻找预报指标作为预报因子。然后根据因子出现的情况，做出是否有降水或暴雨的定性预报，或采用多元回归等方法建立预报方程进行定性或定量预报。

（3）模式输出统计预报方法

这种方法简称 MOS（Model Output Statistics）方法。MOS 方法先分析降水与同一时刻能反映天气形势特点的各因子之间的统计关系，建立预报方程。预报

时，把各个因子的数据输入预报方程内，从而做出定量的预报。

2.2.2 水文预报

水文预报按照预报内容主要有以下分类：（1）水位预报；（2）径流预报，包括洪水预报和枯水预报；（3）冰情预报；（4）沙情预报；（5）水质预报。水文预报按照预见期长短主要有以下分类：（1）短期预报，预见期为 3 天以内；（2）中期预报，预见期为 3 ~ 14 天；（3）长期预报，预见期为 15 天以上。

水文预报的作业过程中，根据不同的边界条件，在不同的阶段会运用到不同的方法。在产流过程中，经常用到的方法有蓄满产流、超渗产流和混合产流等方法；在汇流过程中，有单位线法、等流时线法等；在河道演算过程中，有特征河长法、马斯京根法、河道相应水位（流量）法、水力学的河道洪水演算法等。水文模型是对水文预报工作强有力的技术支持。总的来说，对于反映水流运动物理规律的科学性和复杂程度而言，这些已有的流域水文模型通常被分为经验模型、概念性模型和物理模型三大类；对于反映水流运动空间变化的能力而言，流域水文模型又可以分为集总式水文模型和分布式水文模型两类。另外，介于集总式模型和分布式模型之间还有一种半分布式水文模型。目前主要的概念性水文模型有新安江模型、TANK 模型、Sacramento 模型、HBV 模型等，主要的半分布式和分布式水文模型有 SWAT 模型、TOPMODEL 模型、SHE 模型、VIC 模型等。

下文从预见期的长短分类来阐述具体的预报方法。

2.2.2.1 短期水文预报

（一）短期水文预报作业现状

目前，用于短期水文作业预报的方法基本上可以分为基于相关图法的实用水文预报方案和基于物理概念的水文预报模型两种。

（1）基于相关图法的实用水文预报方案

基于相关图法的实用水文预报方案是经过长期实践工作经验的总结和凝练，是行之有效的作业预报方法。其实质是把水文现象的原因与结果看作自变量与因变量，对实测数值用统计相关或其他相关拟合技术，求出它们之间的定量关系或者直接用图解法求相关关系。这种方法既具有一定的理论依据，又有大量实测资料为基础，能充分结合流域的特征，一般具有较高的预报精度，特别是在水位流

量关系复杂、水利工程影响较大的流域和河段，它仍然能发挥重要的作用。常见的基于相关图法的实用水文预报方案包括考虑前期降雨量的降雨径流经验相关法（API 模型）、上下游相应水位（流量）法、合成流量法、多要素合轴相关法和降雨径流法等。其中，考虑前期降雨的降雨径流经验相关法（API 模型）以流域降雨产流的物理机理为基础，以主要影响因素作参变量，建立降雨量与产流量之间定量的相关关系；上下游相应水位（流量）法根据河段上游站某一时刻的水位（流量）经过传播来预报下游站相应水位（流量）的一种方法。

相关图法的优点是以图表形式汇编，计算简单，操作方便，运用灵活，能够随时根据实际发生的情况进行修订，并且对实测范围内的统计关系不会出现异常或悖论；缺点是没有考虑各影响因子的内部关系，也无法考虑下垫面等条件变化，且不能保证相关关系延长区段的可靠性。

（2）水文预报模型

水文预报模型方法的特点是模拟水文系统的内在关系，是试图从根本上解决水文现象的作用机理与规律的一门科学，比基于相关图法的实用水文预报方案有了很大的进步。水文预报模型包括流域水文模型（如新安江模型）、河道演算水文学和水力学模型（如马斯京根河道演算法、动力波洪水演进模型）和根据流域特点研制的模型。在水文作业预报中，常采用的水文预报模型主要有水箱、Sacramento（萨克拉门托）、NAM（降雨径流）和 SMAR（土壤蓄水计算及演进）等模型，以及改进的连续 API 模型（前期雨量指数模型）等。在长期的应用中，湿润地区的模型应用精度较高，干旱地区精度较差。最主要的原因是干旱地区监测资料少，率定的模型参数代表性差，水文站点少，监测的雨量很难反映其时空分布的实际情况。

例如，中国在短期水文预报过程中，常使用的是新安江模型。在新安江模型中，流域蒸散发计算采用三层蒸散发模型；产流计算中采用蓄满产流模型，采用蓄水容量—面积分配曲线来考虑土壤缺水量的不均匀性，从而确定降雨空间分布均匀情况下蓄满产流的总径流量。然后对总径流量进行水源划分，常使用的有二水源划分结构和三水源划分结构，其中二水源划分结构把总径流量划分为地表径流和地下径流，三水源划分结构把总径流量划分为地表径流、壤中流和地下径流。最后进行汇流计算，坡面汇流采用单位线法，壤中流和地下径流采用线型水库法或滞后演算算法，单元面积河网汇流采用线型水库或滞后演算法计算，从单元面

积的河道汇流阶段采用马斯京根分段连续演算法，最终算出流域出口的断面流量。

值得注意的是，单元面积河网汇流计算在很多情况下可以简化，这是由于单元面积一般不大且河道较短，对水流作用的调蓄作用一般较小。只有在单元流域面积较大或流域坡面汇流极其复杂的情况下，才考虑单元面积内的河网汇流。

（二）短期水文预报技术研究的最新进展

随着计算机、网络等现代信息技术在水文预报中的推广应用以及水文预报理论和方法的不断发展，短期水文预报技术有了新的进展。

（1）水情自动测报系统

近些年，现代信息技术在水文预报工作中得到了广泛的应用，具体表现在水文信息的自动采集与处理、数据库管理、信息共享、3S 技术的应用、成果的图形表现与多维动态演示等多个方面。水、雨情的自动化快速采集、传输、处理使预见预报期的损失几乎为零。

例如，中国依托国家防汛抗旱指挥系统工程的网络系统，结合七大流域和 31 个省（市、区）的水情自动测报系统和水情信息计算机网络传输系统的建设，大大提高了雨水情信息传递的实时性。目前，中央报汛站在 30 分钟内将水情信息传到中央的比例由 1998 年的 30% 提高到现在的 95% 以上，1 小时内将水情信息传到中央的比例目前达到了 90% 以上，基本满足中国防汛抗旱指挥部防汛抗旱调度决策对实时水情信息的需要。

（2）水文模拟技术

在产汇流规律方面，通过利用卫星遥感、雷达测雨和水文气象观测站点等多源信息和 GIS（地理信息系统）技术，研究了变化环境下的产汇流规律和水循环机理，描述了土壤蒸发、植物散发、产流、坡面汇流、河道汇流、土壤水运动、地下水补给等水文过程，揭示了土壤水在垂向和侧向的再分布以及对产流的影响规律。如基于 DEM（数字高程模型）的流域分布式水文模型的发展，凭借其物理基础、能够与 GCM（大气环流模式）、RS（遥感）以及 GIS（地理信息系统）相结合等特点，能够及时模拟出人类活动或下垫面因素的变化对流域水循环过程的影响，典型的有 MIKE SHE 模型、TOPMODEL 模型等。总体上看，集成不同的水循环模型，基于模块化结构，构建面向多目标的水文模拟系统是现在水文模拟技术的重要方向。

在美国，USGS（美国地质调查局）在 MMS（Modular Modeling System）的基础上联合欧洲等国开发了 OMS（Objective Modeling System），USGS 与 BOR（垦务局）合作开展了流域与河流系统管理计划等，都是基于模块式的水文模拟系统的新发展。

2.2.2.2　中长期水文预报

（一）中长期水文预报现状

由于预见期的增长，中长期水文预报在方法上显然无法利用实测降水资料通过产汇流计算或应用上下游关系来获得预报结果，必须考虑影响水文过程的各种因素或分析水文要素自身的演变规律来进行预报。传统的中长期预报方法主要是根据河川径流的变化具有连续性、周期性、地区性和随机性等特点来开展研究，主要有成因分析和水文统计方法。近些年来，计算机技术的发展和新的数学方法的不断涌现，为中长期水文预报拓展了很多新的途径，如模糊数学、人工神经网络、灰色系统分析、小波分析等以及这些方法的相互耦合，每种方法都有各自的适用条件，或存在有待深入研究的问题。

（1）传统方法

① 水文统计法

水文统计方法是应用数理统计理论和方法，从大量历史水文资料中寻找预报对象和预报因子之间的统计关系或水文要素自身历史变化的统计规律，建立预报模型进行预报。主要分为单因素预报和多因素综合预报两大类。单因素预报是利用水文要素历史演变规律来预报该要素未来可能出现的数值，常用的有历史演变法、周期分析法和平稳时间序列法等。多因素综合预报方法主要有逐步回归、聚类分析、主成分分析等。这种方法的主要问题是如何合理选择因子个数，解决拟合效果与预报效果不一致的矛盾。同时，由于预报值是取各个因子数据的均值，因此难以预报出极大值或极小值。水文统计方法由于模型简单、实现方便，因此获得了广泛的应用。

② 成因分析法

河川径流主要来源于大气降水，与大气环流有密切关系。近代的研究结果也表明，一些天文地理因素如地球自转速度、海温变化、太阳活动等也与水文过程有一定的影响。分析这些影响因素与水文过程的对应关系后，就可以对后期较长时期内的水文要素可能发生的变化情况做出预测。归纳起来，成因分析法可以利用前期大气环流、前期海温特征、太阳黑子相对周期、地球自转速度

的变化、行星等很多因素对后期的水文情势做出定性估计。总之，联系大气环流、天文地理物理因素的长期演变以及前后承替规律来进行水文要素的中长期预报，是一条具有物理基础的重要途径，也是今后中长期水文预报的发展方向。

（2）现代方法

现代方法主要是运用一些现代数学方法来进行预报，主要的有模糊数学法、人工神经网络法、灰色预测方法、水文随机模拟等。人工神经网络模型是高度非线性模型，能够有效地模拟本质为非线性的实际水文系统；灰色系统理论方法思想新颖、方法简单，较适合于水文资料信息不充分条件下的中长期水文预报；水文随机模拟的技术关键是建立合理可靠地水文随机模型，目前常用的水文随机模型有多维平稳自回归模型和混合回归模型、线性扰动模型、日流量随机模拟模型、SAR 模型、动态解集模型（DDM）、基于马尔科夫链的随机模拟模型和基于小波分析的随机模拟模型等。这些数学方法各有其特点，为中长期水文预报开辟了新方向。

（二）中长期水文预报技术发展的特点及存在的问题

中长期水文预报模型很多，目前还没有一种模型对所有的水文序列来说都是适用的。预报模型的适用性是至今仍然有待深入研究的问题。对一个具体水文序列的中长期预报问题，人们往往是通过分析、尝试、检验等步骤，最终找到合适的预报模型。中长期水文预报研究仍处在发展阶段，相对于短期水文预报来说，滞后于生产实际的要求。在预报理论研究上，更多注重的是水文系列的统计相关特性，而对物理成因关系关注的相对较少；在预报方法上，对各种方法的有效性研究不够，使现有的方法很难在实践中推广应用；在预报结果的实际应用上，中长期水文预报目前主要是对水资源的宏观调控起一些参考性作用。

2.3　中国三峡—葛洲坝梯级电站径流预报

2.3.1　简介

长江是中国第一大河，世界第三大河，全长 6380 余 km，总落差 5400m。三峡工程大坝坝址位于宜昌市，控制流域面积 $100\times10^4 km^2$，宜昌以上流域面积大，各支流处于不同气候区，丰枯水相互补偿，干流年径流总体来说变化不大，1878—2010 年多年平均流量为 $14100m^3/s$，年径流量 $4460\times10^8 m^3$。

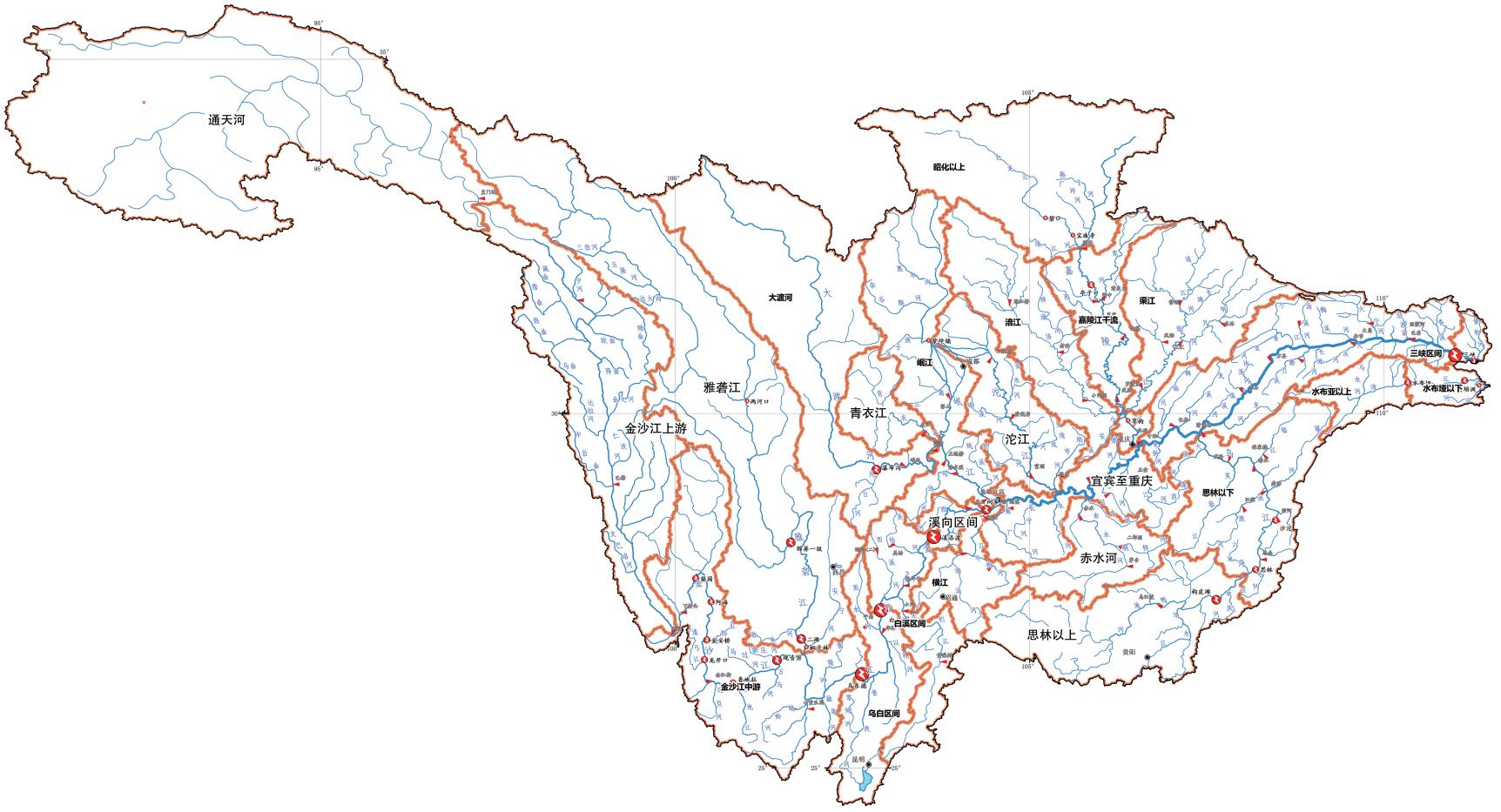

图2.1　长江上游流域水系

三峡电站设计总装机22500MW，共安装32台混流式（法兰西斯式）水轮发电机组，机组单机额定容量700MW。另有电源电站装机2台，机组单机额定容量50MW。葛洲坝水利枢纽位于三峡水电站下游38km处，是世界上最大的低水头大流量、径流式水电站，也是三峡电站的航运反调节电站。

三峡集团负责三峡-葛洲坝梯级电站的水文气象预报调度工作，主要包括三峡大坝以上流域的气象预报（主要是降水预报）和三峡水库入库流量预报工作。

2.3.2 气象预报实施

三峡集团拥有专业气象团队负责制作长江上游流域地区短期降雨落区预报、中期降雨过程预报、长期降雨趋势预测。

目前制作短中期常规降水预报的技术基础是数值预报产品的释用。根据这一特点将灰色预报、最优化预报、配料法等三种方法作为降水预报的主要技术方法，即选用相关的数值预报产品作为初选因子，分别通过灰色预报、最优化预报、配料法三种方法分析、加工，将数值预报产品用图形方式表述。预报员利用数值预报产品图形，根据已具有的天气学方法和预报经验制作长江上游流域地区的短中期降雨预报。

三峡长期降雨趋势预测主要是服务于中长期水库调度，主要分为月、季、年及特殊时段的降水趋势预测。三峡长期降水趋势预测方法主要有最优子集回归预测方法、前期气候特征相似组合法（物理统计方法）和基于模式产品降尺度释用方法。

目前常用于三峡短中期降水预报的软件是流域中短期降水面雨量预报系统、长江上游流域降水预报综合释用系统，常用于三峡长期降水趋势预测的预报软件是长江上游短期气候数据分析与预测系统。

对于长江上游流域致洪暴雨天气，目前1～3天预报准确率较高，可靠性较强，4～7天降水过程预报可用，8～10天预报偏差较大，但仍对未来降水趋势有指导作用。

2.3.3 径流预报实施

改成"三峡集团的专业水文预报团队负责，负责三峡水库入库流量预报工

作。三峡水库入库洪水流量预报分为短期（1～3 日）、中期（4～7 日）及长期（7 天以上）水文预报。

三峡水库短期、中期水文预报方法主要采用流域降雨径流预报和河段流量预报方法。

流域降雨径流预报是研究流域内一次降雨将产生多少径流量，以及这些径流量如何形成出口断面的径流过程，前者称流域降雨产流量预报，后者称流域汇流预报。三峡流域降雨径流预报模型主要有新安江模型、水箱模型、API 模型。

河段流量预报是利用河道中洪水波的运动规律，由上游断面的洪水位和洪水流量，来预报下游的运动规律。三峡河段流量预报模型主要有马斯京根流量演算法、水动力学模型等。

目前常用于生产的三峡短中期入库流量预报软件有：南瑞集团编制的基于新安江模型和马斯京根流量演算的洪水预报软件、中科院山地所编制的考虑上游水库调蓄作用的长江上游实时水文预报系统以及基于 API 模型的三峡区间降雨径流预报软件等。

三峡水库短期入库预报误差率较低，近 5 年预见期 12 小时、24 小时、48 小时流量预报误差率分别为 1.1%、2.0%、4.7%；并将三峡入库流量预报预见期由 2～3 天扩展至 3～5 天。同时，水文预报人员还可提供有一定可靠性的中期来水预报，能对 6～7 天洪水进行预估，8～10 天洪水进行定性分析，为调度提供保障服务。

长期水文预报是一门与水文学、气象学、数学和空间技术等学科技术交叉融合的边缘性学科。到目前为止，长期水文预报技术和方法还处于探索、研究和发展的阶段，尚缺乏普遍适用的、精度稳定可靠的预报方法。

目前，三峡梯调中心长期水文预报主要采用的模型有：自回归模型（AR（P））、多元回归模型、门限自回归模型、季节性自回归模型、最近邻抽样回归模型、门限回归模型、混合门限回归模型、灰色动态模型（GM（1，1））、人工神经网络（ANN）模型、小波—人工神经网络组合模型、投影寻踪法、径流形成原理为基础的径流组成法、谐波分析法、分级退水模型。

第 3 章　梯级水电站联合发电调度

流域梯级水电站群具有多级水电站、装机容量大等特点，实现流域梯级水电站群的联合发电调度，是流域梯级水电站建设发展的必然趋势。流域梯级水电站群的联合运行一方面可以使梯级的发电效益最大化，其充分考虑上下游梯级间具有的紧密的水力、电力联系，以充分发挥流域内调节水库的调节性能，减少弃水，增加发电水头，提高水能利用率，大大提高梯级整体发电效益。另一方面，可以保障电网安全经济的运行。实施流域梯级水电站群的联合运行，将显著提高枯期电量，有利于改善电网季节性缺电现象，优化电源结构，增大系统调峰容量，并减少无益弃水，有利于电网的安全、经济运行。

3.1　梯级联合发电调度规范

（1）联合发电调度的原则

① 保证枢纽工程安全，按规定满足其他兴利目标。

② 坚持计划用水、节约用水、一水多用的原则。

③ 各综合利用部门用水需求有矛盾时，应保证首要兴利目标、兼顾其他、充分协商、顾全整体利益。

④ 水电站在保证各时期控制水位及蓄水的前提下，应充分发挥其在电网中的调峰、调频和事故备用等作用。

（2）以发电为主的水库，应按设计规定首先满足发电任务，同时兼顾其他兴利目标。

（3）有调节能力的水库，应根据发电目标、参数及指标，绘制水库调度图。水库调度图应包括保证出力区、加大出力区、降低出力区等，并标明各区出力值及汛期限制水位线；管理单位应会同设计单位绘制水库调度图，按设计程序报批。

（4）有调节能力的水库，应采用设计水库调度图与水文预报相结合的方式进行调度。

（5）日调节及无调节水库，应特别重视短期水文预报，编制相应日运行计划，库水位尽量维持在较高位置运行。

（6）积极采取措施为节水增发电量创造条件。

（7）电网应根据水电站特性，结合水文预报及负荷预测成果，合理安排运行方式。当水库弃水或有可能弃水时应尽可能安排火电多调峰，增加低谷用电，提高水电负荷率，使水电站（特别是调节能力差的水电站）避免不应有的弃水、多发电，以节约燃料资源。

（8）梯级水库群应按设计要求以全梯级综合利用效益最佳为原则，根据各水库所处位置和特性，制定梯级水库群的调度规则及调度图。实施中应正确掌握各水库蓄放水次序，协调各水库运行。

（9）同一电网的水库群，应充分利用水库特性和水文条件的差异，进行水库群补偿调节，充分发挥水库群的兴利效益。

3.2　联合发电调度内容和方法

3.2.1　调度内容

（1）明确调度规程

水电站调度规程的内容有：水电站水利枢纽工程概况，水电站水库发电调度运行基本原则，发电调度技术管理工作内容，有关编制运行调度方案（调度方法、调度函数或调度图及调度规则的选定）的一般要求和规定，有关发电计划编制与实施的一般文件和可能采取的措施，有关水文、水情测报及水文气象

预报的要求、规定，发电调度的通讯保障等。

（2）编制运行调度方案和运行调度计划

以水电站的规划设计或复核资料、水电站建筑物及机电设备的历年运行情况和现状的有关资料、水电站所处流域的自然地理、水文气象资料及其以往运行调度等相关资料为基本依据编制水电站及其水库运行调度方案和调度计划。

（3）编制水电站发电计划

在明确年内的来水量及其年内分配过程的基础上，编制年度电站计划调度方式和预报调度方式，绘制相应的水库调度线；合理规定全年关键时刻水库蓄水的控制范围；进一步核定全年逐月的预报发电量。汛后应根据水库实际蓄水及供水期预报来水，修订供水期的发电计划及水电站的运行调度方式。当年的水库调度计划制定后，报上级调度部门。调度部门再根据各电站上报的发电计划进行电力系统电力电量平衡计算，进一步落实各电站的发电计划，并下达给各电站。水电站年内的季、月、日发电计划在执行中还应在年初计划的基础上，参照长、中、短期水文预报不断调整修订，使之不断接近实际。

（4）对发电调度进行评价与考核

对电站年度节水增发电量、水能利用提高率、耗水率、水量利用率等指标进行考核，采取必要的奖惩措施，激励有关部门和个人的工作积极性，努力实现运行目标。

3.2.2 调度方法

梯级水库的调度可分为基于优化的水库群调度和基于规则的水库群调度。

3.2.2.1 基于规则的水库（群）调度

（1）单一水电站调度规则

水库调度规则是根据水电站长系列来水、库容及出流过程总结出来的具有规律性的水库特征，用以对水库实时调度进行有效控制，通过长系列的历史资料制定的调度规则可以规避来水不确定性对水库调度的影响，保证水库的有效运行。水库调度规则的特点在于不连续性，从表现形式上主要偏重于调度函数和调度图。

调度函数是将径流序列、确定性优化方法得到的最优运行轨迹以及决策序

列作为水库运行要素数据，通过回归分析等方法，获得调度决策与运用要素之间的回归方程，以指导水库调度运行。此外，调度函数常用另一种调度规则的表现形式——调度图。调度图是将调度函数概化成出库流量、电站出力等跟水位之间的线性阶段函数，并把其绘制成图以指导电站调度。通常有常规调度图和优化调度图两种。

常规的调度图通常是选择某一典型年（或典型系列）通过径流计算得到，由于其简单实用、易操作，成为目前应用最广泛的常规调度方式。然而，采用常规调度图指导水库调度存在未考虑预报来水、出力区范围太大、难以达到全局最优和准全局最优等一些不可避免的缺点，进而提出优化调度图来指导电站运行。

（2）水电站群的调度规则

在研究初期，水库群的调度以联合调度函数的方式为主。例如，采用约束微分动态规划对水库进行确定性优化调度，并在此基础上采用最小二乘回归分析的方法求得梯级水库中各水库各时段的调度函数等。水库群调度图的优化与单一水库调度图优化的思路基本一致，以梯级水库群整体效益最大为目标，对所有水库进行统一优化，从而得到各个水库的优化调度图。

3.2.2.2　基于优化的水库（群）调度

梯级水电站群的优化调度是基于梯级电站间的各种联系，如水力联系、电力联系等，正是这些联系提出了资源优化配置、水能最大化利用等目标，而梯级水电站群联合优化运行恰恰能够协调此水头、流量和出力的关系，提高水能利用率，使得整个梯级水电站的有限水资源发挥最大的综合效益，故梯级优化调度越来越重要。

梯级水电站群的优化调度需要建立数学模型来进行优化，其中首先需要确定的是模型的总目标，其次需要明确梯级水电站群的各项约束条件，最后要选用合适的算法来进行优化。

（1）调度目标

首先，梯级水电站群的联合优化调度需要一个优化目标，此目标决定了优化的方向。目前，在梯级水电站中长期优化调度中，通常以梯级水电站群年内出力最小时段的出力尽可能大，即“最大化最小出力”以及梯级水电站群年发

电收益最大为目标，在短期优化调度中则通常以日发电收入最大为目标。

（2）约束条件

约束条件是优化是否实用有效合理的关键，在梯级水库群长短期优化调度中，针对不同的梯级，处于不同的优化目标，有各种各样的约束条件，常用的有水量平衡约束、水库蓄水量约束、水库下泄流量约束、水电站出力约束等。

（3）数学算法

在确定调度目标和约束条件后，就要选用合适的优化算法来进行优化，通过优化得出近最优的电站水位、出力过程。目前常用的优化算法分为枚举法、启发式算法和搜索算法三类。枚举法通过枚举出可行解空间的所有可行解，以求出精确最优解。在水电站群的优化过程中，通常是离散各电站各时刻的水位值来进行优化，当离散个数较多时，求解效率较差。启发式算法是对每一个需要求解的问题找到其特有的启发式规则来找到一个最优解或近优解，通用性不强。目前较常用的优化算法通常是搜索算法，通过一定的规则来搜寻最优解，比如动态规划算法（DP）、逐步优化算法（POA）、遗传算法（GA）、粒子群优化算法（PSO）、模拟退火算法（SA）、人工神经网络算法（ANN）等，这些优化算法各有其优缺点，在电站的优化调度中各有应用。

未经中国三峡出版传媒有限公司的书面许可，任何媒体及个人不得转载、摘编该节选内容。违者将被依法追究其侵权责任。
如有需要请购买原版书。
三峡小微　中国三峡出版传媒　中国三峡出版社