

水资源系统运行 与 优化调度

邹进 刘可真 编著

SHUIZIZYUAN XITONG
YUNXING YU YOUHUA DIAODU



冶金工业出版社

<http://www.cnmip.com.cn>

水资源系统运行与 优化调度

邹 进 刘可真 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2006

内 容 提 要

本书总体上按水资源系统运行调度的时间尺度,从水库的长期调度、水电站厂内经济运行到水、火电站短期经济运行,系统介绍了水资源系统运行调度中的各种调度模型及常用调度方法。

全书分为八章,主要介绍了水资源系统运行调度的思想及调度的主要内容;水库调度的常规方法;优化调度方法及相应的数学模型;水电站厂内经济运行及优化调度方法;电力系统中水电站的短期经济运行;水库调度的不确定型模型及其运行调度的实施;水资源可持续利用研究。每章均配有思考题,有助于读者对该章内容的理解和运用。

本书既可作为大学本科、专科水文与水资源、水利水电工程、农田水利、环境工程、给水排水工程等专业教学用书,亦可供从事水资源规划和管理、水利规划、环境保护等相关部门的广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水资源系统运行与优化调度/邹进等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2006. 10

ISBN 7-5024-4092-5

I. 水… II. 邹… III. 水资源管理—系统工程
IV. TV213. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 117010 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 李 心

责任校对 朱 翔 李文彦 责任印制 牛晓波

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2006 年 10 月第 1 版, 2006 年 10 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 4.25 印张; 132 千字; 127 页; 1-2000 册

10.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

随着人口的增加和社会经济的发展，水量短缺、水质污染等水资源问题日益突出，如何对水资源进行有效规划和管理是当代人面临的重大问题。

水资源系统是一个复杂巨系统，为了进行有效分析，常将其分为若干子问题。按调度目的，可分为发电调度、防洪调度、兴利调度；按调度周期，则可分为长期调度、短期调度、实时调度；按调度方法，又可分为常规调度、优化调度及模糊调度。本书总体上按水资源系统运行调度的时间尺度，从水资源系统的水库调度（长期）、水电站厂内经济运行，到水、火电站短期联合经济运行，系统介绍水资源系统运行调度中的各种调度模型及常用调度方法，并对水资源系统运行调度的研究进展及可持续研究进行了简要介绍。

本书是作者在多年教学及自编讲义的基础上，并参考了其他有关资料、讲义和文献编写而成的。书中部分内容引用的有关文献及研究成果，均已在参考文献中列出，在此谨向文献的作者们致以深切的谢意。

感谢昆明理工大学电力工程学院领导和同仁对本书出版的大力支持和帮助，特别是张友权教授为本书提出了许多宝贵的修改意义，在此深表感谢，同时感谢冶金工业出版社为本书出

版付出的辛勤劳动。

由于时间仓促和作者水平所限，书中的缺点和错误在所难免，诚恳地希望广大读者批评指正。

作 者
2006 年 7 月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
建筑施工技术	王士川 主编	34.00
钢铁工业给水排水设计手册	王笏曹 主编	248.00
焦化废水无害化处理与回用技术	王绍文 等编著	28.00
环境保护及其法规	任效乾 等主编	45.00
环境污染控制工程	王守信 等编著	49.00
冶金建设工程技术	李慧民 主编	30.00
建筑施工组织	赵仲琪 主编	25.00
土木工程概论	白茂瑞 等主编	26.00
水污染控制工程	张希衡 主编	32.80
环保知识400问(第3版)	张殿印 主编	26.00
现代建筑设备工程	郑庆红 等主编	45.00
可持续发展的环境压力指标及其应用	顾晓薇 等著	18.00
湿法冶金污染控制技术	赵由才 等主编	38.00
环境噪声控制	李家华 主编	19.80
城市地下管线探测与测漏	雷林源 著	20.00
工程流体力学(第2版)	周亨达 主编	23.00



目 录

第一章 绪论	1
第一节 水资源开发利用及水资源系统分析	1
第二节 水资源系统运行调度	7
第三节 本课程的任务和主要内容	12
思考题	12
第二章 水资源系统水库调度的常规方法	13
第一节 水资源系统水库调度概述	13
第二节 水库发电兴利调度	15
第三节 水库防洪调度	24
第四节 水库综合利用调度	34
第五节 水库调度图的应用	35
思考题	37
第三章 水资源系统的优化调度	38
第一节 水库优化调度基本概念	38
第二节 单一水库优化调度	40
第三节 库群发电优化调度	47
第四节 水资源防洪系统最优调度	52
第五节 水资源合理配置	55
思考题	58
第四章 水电站厂内经济运行	60
第一节 水轮发电机组的动力特性	60
第二节 等微增率法求解运行机组的最优组合和负荷分配	62

第三节 动态规划法求解运行机组的最优组合和负荷分配	66
第四节 电厂开停机计划的制定	70
思考题	74
第五章 水资源系统与电力系统中水电站的短期经济运行	75
第一节 水电站短期经济运行概述	75
第二节 火电站厂内经济运行	77
第三节 水火电力系统中水电站的短期经济运行	83
第四节 短期经济运行实时控制简介	91
思考题	92
第六章 水资源系统水库调度的不确定型模型	93
第一节 随机性数学模型	93
第二节 模糊决策数学模型	97
第三节 水库模糊优化调度方法研究	100
思考题	105
第七章 水资源系统水库运行调度的实施^[3]	106
第一节 水库调度方案的编制	106
第二节 水电站及水库年度运行调度计划的制定	108
第三节 调度方案及年度计划的实施与水库预报调度	110
思考题	114
第八章 水资源可持续利用研究	115
第一节 水资源可持续规划	115
第二节 水资源可持续管理	118
参考文献	126

第一章 绪 论

第一节 水资源开发利用及水资源系统分析

一、水资源开发利用的思想发展

水，是生命之源，是自然万物赖以生存的基本物质之一，它与人的生产生活息息相关；但人类对于水的认识却经历了由萌芽到成熟，由经验到理论，由局部到整体的漫长过程。

人类很早就意识到“水能载舟，亦能覆舟”：一方面，水为人类的生存提供了源泉；另一方面，山洪海啸也给人的生命财产造成巨大损失，于是积极开展观测研究，开渠筑堤，对其进行利用和控制。早在公元前 3000 年古埃及人就因灌溉引水开始观测尼罗河水位的涨落，至今还保存有公元前 2200 年所刻的水尺崖壁。中国《吕氏春秋》（公元前 239 年）则最先完整地提出了水循环的概念——“云气西行云云然，冬夏不辍；水泉东流，日夜不休；上不竭，下不满，小为大，重为轻，圜道也”——至今尚为世界学术界所称道。而中国古代的一些水利工程，如都江堰、灵渠等，特别是公元前 256 年李冰父子修建的都江堰水利工程，使川西平原成为“水旱从人”的“天府之国”，至今仍发挥巨大的效益。人们在早期与水打交道的过程中，对水有了定性的认识，并已具备灌溉、防洪等方面的初步经验。

直到十八九世纪，工业革命对自然科学的发展产生了巨大影响。水利工程学（包括水文学、水力学、水利事业和水工建筑学等）在科学理论、方法、技术、工艺等方面兴起并逐渐发展起来，至 20 世纪二三十年代，可以说已经完成了该学科理论体系、工程实践技术等多方面发展的基础；在 19 世纪末 20 世纪初，近代意义的大坝水库也开始在世界许多河流上纷纷筑造，使人类对水资源的利用进入了一个新的阶段。在这一时期，水资源的开发利用大多限于单一水库的规划设计和运行，并

以实现单一功能的水利枢纽工程为主，如单纯的防洪水库、灌溉引水或以发电为目的的水库、堰坝等，同时水能的开发利用引起人们越来越多的重视。

自 20 世纪中期以来，随着人口增长、工农业高速发展和人类物质文明的不断提高，由用水短缺、水污染等现象引起的水资源问题日益突出，人们逐渐认识到自然界的水并不是取之不尽、用之不竭的无限资源，需要认真研究，采取合理步骤进行开发，并在使用中实施资源保护，才能达到对自然界水资源长远开发利用的目的。因此，必然要用整体的、综合的方法来研究水资源的开发利用。这个时期，系统分析的方法被引入到水资源的综合利用中，而电子计算机的出现又使水资源的整体研究成为可能。“水资源学”也逐渐从原有的相关学科（如水文学、水利学）中脱离开来，形成一门新的学科。

近代意义的水资源开发利用则与可持续利用紧密相连。1987 年世界环境与发展委员会给出了公认的可持续发展的定义为：“既满足当代人的需要，又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展”，它包含三层意思，即代际平等、区域间平等、人类社会与自然的和谐发展。可持续利用则是可持续发展的另一含义，是对再生资源使用的专门术语，对非再生资源的利用是无“持续”可言的。水资源可持续利用的目标是：根据可持续发展理论、依托于生态、经济系统之中，支持和维护自然——社会的持续发展，其中心任务是开发利用水资源、保护环境、发展经济，永续地满足当代人和后代人发展用水的需要。水资源可持续利用是通过水资源的可持续规划和管理来实现的。可见，近代水资源开发利用已涉及到社会和环境问题，其内容、意义、目标都比以往水利水电工程研究的范围要更为广泛。

由此可见，水资源开发利用的思想经历了一个从单目标利用到多目标利用，从局部到整体，从一般利用到综合利用，再到可持续利用的发展过程，水资源的研究对象变得更加复杂，系统分析的方法在水资源研究中起到了越来越重要的作用。

二、 水资源系统分析问题的提出

（一）系统与系统分析

系统分析是 20 世纪 40 年代发展起来的以“系统”为研究对象的一

门边缘学科。在第二次世界大战中,为了解决军备物资运输与武器生产等问题,运筹学得到了广泛的发展,系统分析这门学科在此基础上也逐渐兴起。接着,近代科学的一些新成就,如控制论、信息论的出现,管理学的发展,以及电子计算机的问世,都为系统分析的发展创造了条件。到目前,系统分析已广泛地应用在国防、航天、区域经济规划、交通管理、资源利用、生态保护、人口预测、工农业生产等领域。

1. 系统

所谓系统,是指由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的,具有特定功能的有机整体。其特征是:(1) 集合性;(2) 相关性;(3) 目的性;(4) 适应性;(5) 整体性。

以水资源水库系统为例:集合性——水库是由坝、水轮机组、发电机组、变电站、输电网络等部分构成的整体;相关性——以上五个元素相互联系、相互作用、相互依赖,共同为电网供电;目的性——将水能转变为电能;适应性——满足负荷需求,并使系统处于最优状态;整体性——以发电量多或耗水量少为准则,形成一个发电单元,并构成整个电力系统的一部分。

一个系统由输入、转换和输出三部分构成,其结构功能如图 1-1 所示。环境形成系统的输入变量及外部约束,系统输出则会对环境形成反馈从而影响对系统的控制。值得注意的是,系统边界并非一成不变,它会随着时间、研究目的及系统功能的不同而改变。

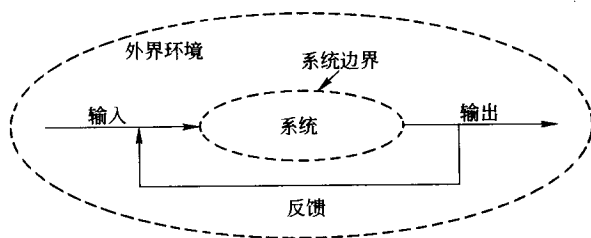


图 1-1 系统结构图

系统一般可分为自然系统(如太阳系)和人工系统(如水库系统),其中人工系统是指为某一特定目的而由人工构建的、且能保持一定机能的系统。系统分析研究的是人工系统,故系统目的性的实现是系

统分析的主要内容。

2. 系统分析

所谓系统分析，是指对研究系统进行效果分析，作出定量评价。系统分析的基本要素有：目的、方案、模型、费用、效果和评价标准。

系统分析是一种有目的、有步骤的探索和分析问题的方法，它以系统为研究对象，收集、分析和处理有关的数据、资料，运用科学的分析工具和方法，建立若干比较方案或必要的模型，进行模拟试验、测算费用和效益，把试验、分析、计算的各种结果与早先制定的目标进行比较和评价，据此整理成完整、正确、可行的报告，从而为决策者选择最优系统设计（运行）方案提供依据。

系统分析常用的方法如图 1-2 所示。由于水资源系统是一个复杂巨系统，一般使用模拟和数学模型的方法来进行分析研究。

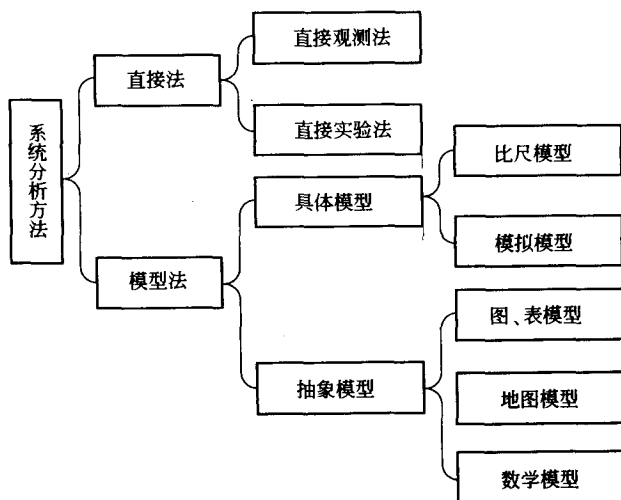


图 1-2 系统分析方法分类

（二）水资源系统分析

当一个广大流域范围内出现一群水利设施和梯级水库群后，它们在水文、水利、电力上相互联系的复杂性导致了运筹学等近代最优化技术

在水资源系统分析中的应用。随后大型水利系统的形成,以及水质、环境质量、供水等方面的问题愈来愈严重,使水利系统的规划不仅要着眼于工程和水利经济效益,还要考虑对社会和环境的影响,并在决策时充分顾及或协调各方面的合理要求和意见,因而出现了应用系统分析的方法来研究水资源问题的新方向。

水资源系统分析大多采用数学模型的方法,考虑优化准则、目标函数及约束条件等模型要素。

1. 优化准则

优化准则,又称最优准则、经济准则,是衡量方案优劣的标准。在水资源系统运行调度中存在着各种准则,它们体现不同的指标、效益程度及适用情况等,如水库发电调度中的“国民经济效益最大或费用最小”、防洪调度中的“洪水成灾历时最短”、水电站经济运行中的“电力系统燃料费用或燃料耗量最小”、“水电站发电量最大或耗水量最小”等等。

2. 目标函数、约束条件及优化模型

目标函数,是指反映准则的指标与系统状态变量、决策变量及其他变量和参数之间关系的数学表达式。

约束条件,是指系统优化时所必须满足的各种限制条件。

优化模型,是指优化问题的数学模型,它是由反映优化准则的目标函数与约束方程共同组成的,是真实系统优化调度问题完整的数学描述。其一般形式为:

目标函数

$$\text{opt. } f(x) \quad (1-1)$$

约束条件

$$C_j(x) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1-2)$$

式中, x 为向量变量,定义在 m 维域 R^m 上; $f(x)$ 为目标函数,用以表达系统性能指标的函数; opt 为优化目标,可以取最大 max 或最小 min; $C_j(x) \leq 0$ 为约束条件,是系统的描述方程或用以表达系统的约束。

优化之目的就是研究上述优化模型中的一切可能方案(即满足约束条件的 x),并找出使目标函数 $f(x)$ 达到最优的方案。

水资源系统运行调度的优化模型有多种类型:不明显包含时间变量

的模型称为静态模型, 含有时间变量的模型称为动态模型; 含有确定性变量的模型称为确定性模型, 含有随机变量的模型称为随机性模型; 全部由线性目标函数和约束方程组成的模型称为线性模型, 目标函数和约束方程中只要有一个是非线性的, 则组成非线性模型; 具有单一防洪、发电、灌溉、航运或供水等目的的模型称为单目标模型, 同时承担两种以上任务的模型, 构成多目标模型。

(三) 优化方法

优化方法, 也称优化技术, 是指对系统优化问题的数学模型进行求解的方法。几乎所有系统分析中的优化方法都可用于水资源系统运行的优化调度中, 常用的有线性规划法、非线性规划法、动态规划法、网络流法、整数规划法、多目标(向量)优化方法、大系统分解——协调法等等; 对随机性模型, 还可采用随机线性规划、随机动态规划或马尔可夫决策规划等方法求解; 对模糊模型, 则可用模糊优化的方法求解; 此外, 近代出现的神经网络、进化算法(模拟退火、遗传算法等), 也在水资源系统运行调度中取得了一些应用。需要注意的是, 这些方法都有各自适用的条件, 应当根据数学模型的类别, 选用最适合的具体优化方法; 其中, 线性规划法、动态规划法、大系统分解——协调法、多目标(向量)优化方法、模糊数学及模型模拟分析在水资源系统分析中成为最重要的工具。

(四) 系统分析的主要步骤

应用系统分析理论处理一个复杂的系统, 其主要步骤是:

(1) 问题剖析。通常, 委托者、决策者对现状不满, 提出一些希望、设想或要求, 现状与要求之间的差距产生了问题。问题开始时常常不是十分明确的, 这就需要对问题进行剖析。剖析时, 系统分析者需要与任务委托者、决策者一起探讨, 弄清系统分析之目的、要求, 明确有关的环境和社会关系, 研究的历史和背景等。

(2) 目标选定。目标选定即选择系统开发的目标, 以及对系统的参数、变量、约束等进行鉴别。

(3) 建立模型。建立模型就是对系统本质的东西进行概括和抽象, 建立数学模型。建立数学模型是系统分析的重要环节, 模型若过于简单, 不能反映真实系统的性质; 若过分复杂, 则不易求解, 还需将其适当简化。

(4) 模型运算。如果是最优化模型, 用优化方法求解; 如果是模拟模型, 用模拟方法来分析, 最终提出较优的一个或几个方案。

(5) 成果分析与评价。由于分析者主观对问题剖析的深度不同, 还需对运算结果从多方面加以分析, 确定模型建立的正确性、模型简化的合理性, 然后给出综合评价。

决策者根据自己的经验和意愿, 对系统分析的成果从总体上权衡利弊得失, 进行决策。

以上五个逻辑分析的步骤在整个系统分析过程中必须不断重复, 直到取得满意方案为止。

(6) 计划实施。计划实施即实施决策, 建造运行系统。

第二节 水资源系统运行调度

一、水资源系统的结构与管理^[4]

(一) 水资源系统的结构

一般来说, 水资源系统是一个多目标、多层次、不断发展, 由大量相互联系、相互作用的单元及因素构成的开放性复合大系统。

按具体功能目标, 水资源系统可分为防洪系统、排涝系统、灌溉系统、水电系统、城镇供水系统、水运系统、水资源保护(环境水利)系统、综合水利系统、水利水电系统等。

按作用层次及范围, 水资源系统又可分为: (1) 区域(地区)水资源系统, 即为统一治理和利用某一地区的水资源而由几条河流域水资源系统共同组成的大规模水资源系统; (2) 流域水资源系统, 这是为保证国民经济各部门和社会对某一河流域(包括干支河网系统)水资源的联合治理和利用, 由该流域天然水资源系统及各种水利水电工程系统组成的综合系统, 它可作为区域水资源系统的子系统, 也可作为单独的系统; (3) 某一河段的水资源系统, 是指该河段的天然水资源系统与各种水利水电工程技术设施所组成的综合体, 它可作为流域水资源系统的子系统, 也可作为单独的系统。

(二) 水库与水电站在水资源系统运行中的地位和作用

水库是水资源系统的重要组成单元, 是调节径流、实施水资源调度的主要工具和技术设施, 在水资源系统运行调度中占有中心地位。存入

水库的水，经过调节进入取水建筑物，引水、输水和配水渠道，供给各用水部门；或经过调节引入水电站、船闸等过水建筑物，被利用后，通过泄水建筑物和溢洪道，泄至下游河道。通过水库调度，可有效提高水资源的利用率。

水电站在水资源系统中具有特殊的地位和作用，它既是水资源系统的重要组成部分，又是电力系统的主要动力单元，其主要作用在于利用水能进行发电。由于现代水电站一般都投入一定的电力系统运行；而电力生产一个明显特点是：电力的生产、输送和使用是同时进行的，这就要求电力系统中的各类电站（包括水、火电站及核电站）的发、供电方式与电力系统中用户的用电方式相适应。因此，水电站的运行方式必然会受到整个电力系统的制约，同时也影响到其他电站的运行方式；另外，由于水电站也是水资源系统的组成单元，它的运行方式会受到整个水资源系统的制约，同时也影响到其他水利单元的运行调度方式。

显然，水库与水电站是联系自然水资源系统与社会经济系统的枢纽，是水资源系统的重要组成部分，在满足国民经济和社会对水资源的治理和开发要求，进行水资源系统运行调度中，发挥着关键性的作用。

（三）水资源系统管理的任务与内容

水资源系统管理，是指对其所辖范围内的水资源、水域和水利工程所进行的运行调度、保护和经营的所有工作。其任务是：保护和合理使用水资源、水域及已投入运行的水利工程，用尽可能少的投入，最大限度地减免水害，增加水利，为国民经济、社会及人民生活提供有效的防洪、防涝、用水和供水等服务。水资源系统管理是整个水利事业的重要环节，必须通过这一环节科学合理地运用各种工程设施，控制调节水资源，以实现水利规划的设想、意图和目的，达到工程设计规定的各项要求、目标和任务。水资源系统管理工作的主要内容包括行政管理、技术管理、经济管理和法律管理。

水资源系统运行调度是水资源系统管理中技术管理的一部分。技术管理的基本任务是：科学经济地治理、调配、利用和保护水资源，调节地表水和地下水的水位、流量、水深，适时适量地输送水量，按标准保护水质，以满足国民经济各部门和社会对水资源系统的要求；保护水利工程建筑物及设备的完好与安全，使之能正常持久地发挥作用，防止发生或减少事故和灾害；保持水域环境蓄水、过水、排水的能力及正常使

用的条件；不断进行技术改造，以适应水利管理事业发展和科学技术进步的要求。

二、水资源系统运行调度

（一）水资源系统运行调度的总任务、基本原则及主要工作内容

水资源系统运行调度的任务是：合理利用现有水域和水资源工程，对天然径流（包括地面径流和地下径流）在时间和空间上进行合理调配，为最大限度地减免水害，综合利用水资源，充分发挥水资源系统的综合效益，满足国民经济各部门和社会对水资源的治理及利用要求而提供各种有效服务。

水资源系统运行调度应遵循的基本原则是：在首先保证工程安全的前提下，根据规划设计的合理开发利用目标及主次关系，考虑各种水利工程措施与非工程措施的最优配合运用，统一调度，充分发挥水资源系统的除害兴利作用，使国民经济效益尽可能最大；当遇到工程设计标准以上的特大或特枯水情时，要本着局部服从全局的原则，兴利服从防洪，经济性服从可靠性，使灾害损失或正常运行的破坏损失尽可能最小。

水资源系统运行调度的主要工作内容包括：制定和编制水资源系统最优的运行调度方案、方式和计划；按照所编制的方案、方式和计划，根据面临的实际情况，进行实时调度和操作控制，尽可能实现水资源共享系统的最优运行调度；做好水资源系统运行调度实绩资料的记录、整理和分析总结；开展与运行调度有关的其他各项工作，如收集和校核工程、设备及水利枢纽上、下游特征等基本资料，组织有关建筑物和设备的运行特性试验，开展水文气象预报，建立和健全本系统及其组成单元的运行调度规程及各项管理工作的规章制度，开展有关的科学试验研究和技术革新等。

（二）水电站水库的运行调度

由于水电站水库在水资源系统运行中占有举足轻重的地位，对其运行方式的研究构成了水资源系统运行调度的主体。一般将水电站水库的运行调度在时空域内划分为三个子问题，即：长期经济运行（或水库调度）、水（火）电站短期经济运行及水电站厂内经济运行。

1. 水电站厂内经济运行

水电站厂内经济运行主要是研究出力、流量和水头平衡，机组的动