

国家自然科学基金
教育部跨世纪人才基金 资助项目



SHUI KU DIAO DU
ZONG HE
ZI DONG HUA XI TONG

水库调度 综合自动化系统

郭生练 编著

武汉水利电力大学出版社

国家自然科学基金
教育部跨世纪人才基金资助项目

水库调度综合自动化系统

郭生练 编著

武汉水利电力大学出版社

武 汉

(鄂) 新登字 15 号

图书在版编目 (CIP) 数据

水库调度综合自动化系统/郭生练编著. —武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000
ISBN 7-81063-068-7

I. 水… II. 郭… III. 水库调度—自动化系统 IV. TV697.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 16400 号

责任编辑: 何玉冰

责任校对: 徐虹 封面设计: 涂驰

武汉水利电力大学出版社出版发行

(武汉市武昌东湖南路 8 号, 邮编 430072)

核工业中南 309 印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印数: 13.375 字数: 327.6 千字

2000 年 4 月第 1 版 2000 年 4 月第 1 次印刷 印数: 0 001—1 000 册

ISBN 7-81063-068-7/TV. 9 定价: 35.00 元

序

我国地处亚洲季风气候区，暴雨洪水灾害发生十分频繁。特别是 1998 年长江和嫩江的特大洪水，我国受灾人口 2.3 亿，受淹面积 6 610 km²，直接经济损失达 2 600 多亿元。严重的洪涝灾害再次唤起了全国人民的水患意识。

我国已建成近 9 万座水库，这些水库在防洪、发电、灌溉、供水等方面发挥着重大作用。但大部分水库存在着设备老化，通信、预报、调度、管理技术落后等问题，无法满足人们日益增长的要求。随着社会经济的高速发展，水库在防洪中的地位 and 作用越来越突出。水库不仅要确保自身的安全，还要担负下游防洪和发电等其他综合利用任务，洪水预报和水库调度任务艰巨而复杂。随着现代科学技术突飞猛进的发展，通过把计算机技术、通讯技术、遥测技术与水文气象科学技术的紧密结合，建立水库洪水预报和调度综合自动化系统，达到提高水库的现代化管理水平，发挥水库防洪和兴利效益的作用，是今后水库控制运用的发展趋势。

本书是一部系统论述水库防洪发电调度综合自动化系统的专业技术参考书，内容包括水雨情和气象信息采集处理、洪水预报、水库调度以及自动化系统等方面的专业知识和应用技术，内容丰富，概念明确，条理清楚，反映了本学科领域 90 年代的水平。本书是作者们探索理论与实践相结合的优秀作品，具有重要的理论意义和实践价值，可供从事洪水预报、水库调度的专业技术人员和大学本科、研究生及教师阅读参考。

叶守泽
1999 年 10 月

前 言

我国地域辽阔，河流水系复杂，地处亚洲季风区，气候变化异常，河流来水变化剧烈，水、旱灾害发生频繁。随着社会经济的高速发展，水库在防洪中的地位和作用越来越突出。水库不仅要确保自身的安全，还要担负发电等其他综合利用任务，洪水预报和水库调度任务艰巨而复杂。实现水库洪水预报和调度综合自动化，提高水库的综合利用水平和现代化管理水平，最大限度地发挥水库的防洪和兴利效益。

90年代以来，武汉水利电力大学《洪水预报和水库调度》课题组已承接完成了丰满、白山、柘溪、马迹塘、王家厂、漳河等20多座水库的洪水预报调度综合自动化系统的建设和软件开发任务，取得了一些成功和宝贵的经验，也吸取了不少教训。许多系统运行正常可靠，创造了可观的经济和社会效益，有多项成果获得省部级以上科技进步奖。

本书总结了作者多年的研究和应用成果以及工作经验。内容主要包括水库防洪发电调度综合自动化系统的规划设计，水雨情及气象信息采集分析处理，计算机网络与通讯技术，防洪发电调度多媒体会商显示系统，产汇流理论和模拟技术，洪水预报模型及比较，参数优化和实时校正技术，交互式洪水预报系统，水库防洪发电实时优化调度，水电厂群经济运行，水文历史数据库，水库调度业务管理软件，水库调度专家辅助决策支持系统，用户界面设计开发等。

本书共分16章。其中第三章和第四章由李池清编著；第五章由戴自速编著；第六章和第八章由宋星原编著；第十三章和第十四章由马绍忠编著；第十六章由彭辉编著；其余各章由郭生练编著。全书由郭生练统稿，叶守泽教授审核，并作序。

本书的撰写得到国家防汛抗旱总指挥部办公室水库处领导的鼓励和支持，出版过程得到武汉水利电力大学出版社的配合和协助，并得到学校“211工程建设”办公室和国家自然科学基金及教育部跨世纪人才基金项目的经费资助，在此深表谢意。

在编著本书过程中，作者参阅并引用了大量文献与研究成果，在此谨向有关作者和专家学者表示衷心的感谢。限于作者水平，错误和不当之处在所难免，竭诚欢迎批评指正。

编著者

1999年10月

目 录

序	
前 言	
第一章 概 述	1
第一节 我国水库防洪发电调度现状	1
第二节 建立水库调度自动化系统的必要性	2
第三节 系统规划设计的基本原则	4
第四节 水库入库洪水推求和预报误差分析	5
第二章 水库洪水预报调度系统规划设计	9
第一节 王家厂水库流域概况	9
第二节 洪水预报调度系统设计开发	10
第三节 计算机网络和投影会商显示系统设计	16
第三章 水雨情信息自动采集系统	20
第一节 水情自动测报系统发展概况和运行情况	20
第二节 遥测雨量站站网的合理性论证	22
第三节 雨量水位自动采集装置和传输	24
第四节 水雨情信息传输和分析处理	28
第五节 Inmarsat—C 水情遥测系统简介	31
第四章 气象信息采集分析系统	34
第一节 气象信息采集分析系统的组成	34
第二节 气象卫星云图和雷达资料的接收处理	35
第三节 气象信息综合处理和预报方法	41
第五章 水调自动化计算机网络系统	43
第一节 计算机网络及其发展阶段	44
第二节 计算机局域网络的特点和结构	47
第三节 水调自动化计算机局域网络	52
第六章 流域产汇流理论与模拟技术	57
第一节 流域产汇流理论发展概况	57

第二节	流域降雨径流形成过程	58
第三节	流域产流理论与计算原理	59
第四节	流域汇流理论与计算原理	62
第五节	河道洪水演进与预报	66
第七章	洪水预报模型	72
第一节	概念性洪水预报模型	72
第二节	系统(黑箱子)模型	78
第三节	其他洪水预报模型	81
第八章	实时洪水预报和校正技术	85
第一节	水文实时预报校正方法	85
第二节	实时校正预报的最小二乘法	87
第三节	洪水实时预报的卡尔曼滤波方法	97
第九章	参数优化技术和模型比较	100
第一节	模型率定的目标函数准则	100
第二节	概念性模型的参数优化技术	101
第三节	模型检验比较结论和不确定性	106
第十章	交互式洪水预报系统	110
第一节	交互式洪水预报系统的特点	110
第二节	交互式洪水预报系统设计开发原则	111
第三节	白山水库交互式洪水预报系统	113
第四节	综合预报结果的分析检验	117
第十一章	水库洪水实时优化调度	119
第一节	水库调洪计算原理和方法	119
第二节	水库洪水优化调度模型及方法	121
第三节	国内外水库群优化调度应用实例	122
第四节	水库洪水实时调度模型和方法	124
第十二章	水电系统水库经济运行调度	132
第一节	我国电网水库经济调度历史回顾	132
第二节	水库经济调度软件开发的基本原则和要求	133
第三节	水电系统水库经济运行调度模型	135
第十三章	水库调度数据库管理系统	140
第一节	水库调度数据库的特点和选型	140
第二节	数据库设计原理与技术	145
第三节	水库调度数据库管理系统需求分析	151

第四节	水库调度数据库管理系统概念设计	153
第五节	水库调度数据库管理系统物理设计	162
第六节	水库调度数据库管理系统的结构	165
第十四章	水库调度日常业务管理自动化	169
第一节	水库调度主要业务工作内容和特点	169
第二节	水库调度业务管理自动化系统总体设计	170
第三节	水库调度业务管理主要功能模块	172
第十五章	水库调度自动化专家辅助决策支持系统	176
第一节	水调自动化专家辅助决策支持系统开发的目标和功能	176
第二节	水调自动化专家辅助决策支持系统开发的原则和方法	178
第三节	黄河防洪防凌决策支持系统	180
第十六章	用户界面设计与开发	183
第一节	用户界面的设计方法与原则	183
第二节	水库调度综合自动化系统界面设计与开发	187
参考文献		200

第一章 概 述

据不完全统计,到1997年我国已建成库容在10万 m^3 以上的水库8.4万座,其中库容在1000万 m^3 以上的中型水库有2634座,库容在1亿 m^3 以上的大型水库有412座,总库容4600多亿 m^3 ,占年总径流量的17.5%,农田灌溉面积0.52亿 hm^2 ,农业用水量3920亿 m^3 ,工业与城市生活用水1370亿 m^3 。截止到1996年底,全国水力发电总共装机容量已达5557.79万 kW 。1996年全国水力发电量为1869.18亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。尽管水电装机容量仅占整个电网的23.5%,发电量仅占整个电网的17.32%,但所创造的经济效益超过整个电力系统的一半(1996年统计),同时水电站还担负着调峰、调频、防洪、灌溉、航运以及工业和城镇居民用水等多种特殊功能和任务,在电力系统以及当地的国民经济和社会发展中起重要作用。

第一节 我国水库防洪发电调度现状

我国水利系统大部分水库目前还不能对实时水雨情作出迅速的反应以及早提出调度方案和意见,因而有可能错过调度决策的有利时机。为改变目前水库防洪调度手段落后、设施差的局面,做到适时自动采集水雨情信息,及时准确作出洪水预报,迅速提出防洪调度方案,为各级防洪指挥决策部门提供支持,减轻水库下游洪水灾害,在国家防汛抗旱总指挥部(简称防总)办公室的领导和支持下,国家防办水库处从1998年开始,组织负责全国43座水库洪水调度系统的试点工作。

电力部门在水库调度自动化方面做了不少的工作,取得了一些较高水平的研究和应用成果,但与国际先进水平相比还有相当大的差距。根据国家电力公司有关文件要求,电力工业技术政策要求提高整体效益和效率,水电厂(含水库调度)必须加快自动化进程,实现科技进步,达到减人增效和一流的现代化管理水平。下面简略地综述我国水库调度的现状。

一、水情自动测报系统

80年代我国选择长江陆水水库流域,东北第二松花江流域为试点,首次从国外引进和建立了水情自动测报系统。我国自行开发研制的汉江黄龙滩水情自动测报系统于1986年投入试运行,1989年通过能源部组织的技术鉴定,并获部科技进步一等奖。到目前为止,全国已有400多个流域建立了水情自动测报系统,其中大部分为国产设备。经过多年的运行实践,效果普遍较好。水情自动测报系统的建设,改变了原有水雨情资料的收集的落后手段。

二、气象信息采集现状

各省市防汛部门和电力系统中的一些大型水电厂,均已安装了卫星云图接收处理系统,有的调度通信中心还与当地中心气象台一起建立了短期天气预报工作站和气象通信通道,

可随时接收气象数值预报信息和传真图,在水库洪水预报和调度中起到了较好的参考作用。但现有的气象预报产品还远远满足不了水库调度的实际需要。

三、通讯现状

水利电力系统汛期防洪调度和水电厂运行有关的一些信息,一般可通过卫星通讯、微波和电力载波由各个水库传到总调度中心和防汛部门。我国大部分水库的通讯现状急需改善,汛期与水库的联系一般采用邮电部门的直拨电话。许多部门和单位每到汛期,还一直沿用多年来打电话询问雨情水情的老办法。这种传递手段时效差,难以及时掌握流域的全面情况,给洪水预报和水库调度工作带来许多不利因素。遇有较大的降雨过程,专业人员要花费很大的精力和时间去收集各方面的情况,根本没有时间去进行分析计算,也就无法为调度决策提供科学的依据。

四、洪水预报调度现状

除了部分水库已经研制和建立了洪水预报模型,具有较高的预报精度外,大部分水库所采用的预报方案还是六七十年代的经验关系,如产流仍采用降雨~前期影响雨量~径流量相关图,流域汇流采用经验单位线,河道洪水演算采用相应水位法或马斯京根法,没有采用任何实时校正方法与技术,洪水预报精度有待提高,无法满足水库防洪兴利调度自动化的要求。

五、计算机利用的现状

水文预报和水库调度中要完成大量的数据采集、处理、存贮、计算、图表输出、决策等操作,这些都需要应用计算机技术,以便实现水文预报和水库调度自动化。目前水利系统水库的计算机应用和管理水平还很低。电力系统所属水库的条件要好些,但水库调度系统(硬软件),大多数都是采用各自独立开发或引进模式进行的,这些系统和数据信息往往只能由这些系统自己所拥有,各系统间不能互通信息,更不能相互共享信息。它们缺乏统一的规划和统一的技术标准,严重地制约了计算机性能的发挥,浪费了大量的人力物力和信息资源。

六、水文历史数据库现状

从水库调度(以下简称水调)自动化的角度出发,数据库起着关键性的作用。它能全面、准确和及时地从大量数据中获取所需要的信息,最大限度地减少数据的冗余,使数据保持唯一性和相容性。另外数据库能有效地调整对数据的调用关系,保证数据对程序的独立性,最大限度地减少应用程序的编制和维护工作量。这对保护数据的完整性和安全性,推进数据的标准化进程都有十分重大的意义。因此,数据库设计的好坏,将直接关系到水库调度自动化系统的成败。目前除少部分水库外,大部分水库尚没有水文数据库,或已建但功能不完善。

第二节 建立水库调度自动化系统的必要性

国家防办正在组织建设的全国防汛指挥系统,就是要把重点防洪水库和江河控制断面

的水情信息尽快收集到国家防汛决策部门。因此在一些大型水库和重要的中型水库，建立洪水预报调度自动化系统，意义十分重大。对于电力系统而言，建立水库调度自动化系统不仅是防汛的需要，也是电力调度和发展的需要。这里主要论述电力系统实现水库调度自动化的必要性和紧迫性。

一、实施水调自动化是电力系统发展的需要

当前我国各大电网均已完成电力调度自动化工程并完成了实用化验收。为使电网的现代化和科学管理水平迈上一个新的台阶，必须实现水调自动化。为此，各电网已先后开始进行水库调度自动化的规划、设计和建设工作。

为了搞好水电站水库调度工作，不但要及时收集流域的天气形势和掌握水库入流的变化，还要实时收集水电站水库的一些运行参数，如闸门状态、来水和发电用水情况、流域降雨及其他有关信息。这些是开展水库调度工作的基础。它们是水电站水库调度日常工作和重要阶段调度决策是否成功的关键环节。1994年汛期，东北电网的水库调度就是很成功的一例。在汛期来水为平水、全年来水偏少的情况下，五大水库年末比前一年多蓄水 59.5 亿 m^3 ；多蓄能 7.4 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，全年水电合计为 81.539 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，比上年多发 12.7 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。由此可见对水库运行情况的及时分析、对短期计划的合理调整、对水库未来形势的准确预测是何等重要。1995年东北电网战胜百年一遇的大洪水，准确预报和科学的调度决策起到了关键的作用。正因为决策正确，才实现了水库发电、防洪、蓄水等综合利用，取得了重大的经济效益和社会效益。实施水库调度自动化、为电网运行决策提供一系列科学手段，这是现代化电网不可缺少的重要组成部分。

二、实施水调自动化是电网生产运行管理的需要

现代化的电网对各方面的综合管理提出很高的要求，随着大量新设备不断投入和先进的科学技术的发展，人们对电网的安全、可靠、稳定、经济运行水平的要求越来越高，迫切要求电网水库调度和水电厂的管理水平迈上新的台阶。电力系统目前的水情收集信息输送和水调决策等工作同国际上发达的国家相比，还有较大的差距。那种停留在几十年前的靠人工凭经验的管理方式，已远远不能适应现代化生产的需要。例如：在水电厂实施水情自动测报之前，要想了解流域的降雨情况，一要汛期派人到报汛站长期工作，二要委托水文气象部门通过邮电路线传送水情电报。这样不仅时间滞后，可靠性差，而且还浪费大量的人力和财力。在大洪水期间，许多乡村邮电路线中断，无法报汛。有了水情自动测报，电网就能及时地了解雨情水情，通过开发先进的运行管理软件，建立起整套的水库调度决策支持系统。这对指导水库运行，进行发电防洪及其他水库综合利用的合理调度必将带来根本的变化，使电网的管理水平不断提高。

三、实施水调自动化是搞好经济运行，节能增效的需要

如前所述，正是由于有了先进的信息收集、处理、分析的手段，通过开发各类水调应用软件，使水电站之间、梯级电站上下游之间、各流域之间的运行决策更加科学化合理化。有了这些分析和计算的手段，我们才能在较短的时间内，进行多种运行方案的计算和比较，才能实施优化调度管理，为电网创造更大的经济效益。根据国际上的一些成功经验，跨流域系统的水库优化调度管理，可增加发电效益 4%~14%左右。电力系统实现水调自动化以

后，将给电网带来巨大的经济效益和社会效益。

四、实施水调自动化是电网调度自动化的需要

水库调度自动化是电网调度自动化的一部分。没有水调自动化，电网的调度自动化是不全面的。这一点人们已渐渐认识到了。目前电力系统在气象信息的收集方面已达到了一定水平，但在水情收集上进展十分缓慢，主要还是靠人工收集各流域的降雨来水情况，特别是在汛期，水库调度单凭经验和靠人工完成是远远不够的。现在每年汛期工作都十分紧张，完成各种信息的收集已占据了大量的时间，来不及进行详细的分析和处理，也就无法迅速拿出一个较高水平的运行调度方案。这种现状越来越不能适应现代电网生产运行的需要。随着电网的不断发展壮大，水电在电网中的作用将会日益增强。如果水库调度手段落后，就无法提高水电生产的现代化水平，整个电网也就不可能达到真正的调度自动化。今后要搞水火电联合调度，搞好流域间补偿调节，最大限度地发挥水库发电、防洪等综合效益，水调自动化将是必不可少的前提。水电在整个电网中的地位和作用日益增强，为了实现整个电网的经济优化运行、节能增效和电网调度管理自动化，必须实施水库调度自动化。若没有水库调度自动化，也就不可能达到整个电网调度的自动化。

第三节 系统规划设计的基本原则

根据《中华人民共和国防洪法》，《水情自动测报规范（SL61—94）》，《水情测报预报规范（SDJ—85—1）》，《综合利用水库调度通则》，《国家防汛抗旱总指挥部办公室水库洪水调度系统设计与开发规则》等法律、规范和条例，设计时充分考虑防汛信息管理系统的特性，特别强调水情自动测报系统的实效性，洪水预报实时性和准确性以及水库调度决策的合理性。

一、系统的先进性和可靠性

系统的规划设计要立足于高起点、高要求，借鉴和引用发达国家的一些成功和先进的管理经验。当今世界的科学技术发展突飞猛进，在作规划时要充分考虑未来的发展趋势和要求以及整个国家水利电力行业发展的远景目标，保证总体设计的先进性和系统运行的可靠性。

二、经济实用，充分利用现有的软硬件设备

有些单位开展水库调度自动化的工作起步较早，已经开发和购置了一些应用软件和硬件设备，并经多年的应用检验，有些是可行的，需要保留下来。因此在作规划设计时，应在充分利用现有的软硬件设备的基础上，补充完善整个水库调度自动化系统，达到节省投资、经济实用的目标。

三、保证系统的规范化、通用化

根据国家水利电力部门的有关规范，统一水库电站各种水情和通讯软件中的变量名、标识符、数据格式以及接口，保证系统能实现统一通讯和调度，以及各水库之间的相互交流和软件集成开发。此外，还应考虑本部门或同其他部门网络的联接和交流，如“全国防

洪指挥系统”，“全国水文分布式数据库系统”，“全国短期天气数值预报系统”，“全国科学教育网”以及“邮电通讯网”等，保证所建立的系统能同这些有关系统联接和相互调用。

四、采用统一管理，分步实施的方针

为节省投资，避免各水库在低层次上的重复开发，应充分发挥国家防办和电力系统统一调度和统一管理的优势，集中人力和物力，开发较高水平的应用软件，然后在各个水库电站中，结合当地实际进行推广应用。考虑到各水库电站的基础工作和任务要求的不同，可以采用分步分批实施水库调度自动化的方针。

第四节 水库入库洪水推求和预报误差分析

入库洪水预报是水库流域洪水预报调度系统建立的主要目标和任务之一。然而由于河道中水坝的建设导致天然水文特性的改变，给入库洪水的预报和检验带来了很大的难度，水库形成后对库区水文要素的影响因素主要有：

- (1) 水库水面的形成导致洪水波传播特性的改变。
- (2) 水库水面的形成导致库区相关区域下垫面条件的改变。
- (3) 水坝建设导致测验方法的改变，坝址处流量的直接测量无法实施。
- (4) 间接法测流中各项错综复杂的误差因素使反推出的坝址流量精度低，形态紊乱。
- (5) 水文资料系列出现不一致，需要进行还原计算等技术处理。

众所周知，预报精度需要实测资料方能进行检验，水库坝址断面属于非标准断面，不同于标准断面的流量测量，它的实测流量仅能通过间接计算的方法取得。

一、入库洪水流量资料的推求

入库洪水包括入库断面洪水和入库区间洪水。入库断面洪水是水库回水末端干支流河道的洪水，入库区间洪水又分为陆面洪水和库面洪水。陆面洪水是入库断面以下至水库周边以上的区间陆面所产生的洪水，库面洪水即为库面降雨直接转化径流所产生的洪水。

水库入库洪水一般采用水量平衡法推算，即根据水库坝前实测水位和出库流量观测资料，反推入库洪水过程。水库水量平衡方程式为

$$\bar{Q}_{\lambda} = \bar{Q}_{\text{出}} + \frac{V_{\text{末}} - V_{\text{初}}}{\Delta t} + \bar{Q}_{\text{损}} \quad (1-1)$$

式中： Δt 为选取的计算时段； $\bar{Q}_{\lambda}$ 为 Δt 内的平均入库流量； $\bar{Q}_{\text{出}}$ 为 Δt 内实测的平均出库流量，包括泄流量及灌溉、发电等用水量； $V_{\text{初}}$ 、 $V_{\text{末}}$ 为时段始、末的水库蓄水量； $\bar{Q}_{\text{损}}$ 为 Δt 内由于蒸发、渗漏而损失的平均流量。

在一般情况下，由于 $\bar{Q}_{\text{损}}$ 所占比重很小，可忽略不计。上式变为

$$\bar{Q}_{\lambda} = \bar{Q}_{\text{出}} + \frac{V_{\text{末}} - V_{\text{初}}}{\Delta t} \quad (1-2)$$

计算时段 Δt 的选择，对求得的入库洪水过程线形状和洪峰均有明显的影响。 Δt 过长会使洪水过程坦化，洪峰变小； Δt 过短则易使过程线出现锯齿状。有时由于 Δt 的确定不合理，使计算的入库流量甚至出现负值。因此，有必要初步拟定几个不同的计算时段进行

分析比较,最后选定较为合理的数值。

例如,丰满水库入库洪水计算时段 Δt 的选取,计算时段曾分别选取3 h和6 h。经过反推入库洪水流量的计算分析,计算时段选取3 h的方案,流量出现负值和过程线出现锯齿状的情况较多,出现明显的不合理现象。计算时段6 h的方案,流量出现负值和过程线出现锯齿状的不合理现象大为减少。随着计算时段的增長,流量出现负值的不合理现象越少。由于丰满水库的库面积很大,反推的日、旬,有时甚至月的入库流量还会出现许多不合理的现象,需要进行一些交互式的人工干预和平滑处理。

二、入库反推误差成因分析

水库坝址非标准断面的流量仅能用间接算法获得,即通过周边有关要素(入流要素:周边控制站的入流;出流要素:库水位、发电流量、泄流设备放水、下游水位或流量等),采用水量平衡方程进行入库水量的还原计算,求得的入库流量一般误差较大、可信度低。

造成入库反推误差的原因主要是入库流量 $Q_{\text{入}}$ 计算中的 $Q_{\text{出}}$ 及 ΔV ,这些数据值均是由其他观测值经有关经验公式或曲线转换而得,而这些方法正是产生误差的根本原因。通常造成入库反推误差的原因主要有:

(1) 库容曲线误差。水库地形测量是一项艰巨而复杂的工作,尤其是水库形成后,水下地形的测量难度更大,地形测量完成后形成的水位~库容关系曲线本身就具有一定的误差,其误差因素主要有:①测量误差。②建库前测得的水位~库容曲线,在水库蓄水后,导致水下地形发生变化,致使库容曲线产生误差。③水库运行后由于水库泥沙的沉积,使库容发生变化。鉴于以上因素,库容曲线为保持其精确性,则应经常复测,但由于施测的工作量及难度,而无法经常施测,许多水库运行数年乃至数十年后仍在使用建库前的水位~库容曲线。

(2) 各类泄流曲线误差。闸门等泄流设施的 $H\sim q$ 曲线、机组的 $H\sim N\sim q$ 曲线,这些曲线同样存在较大的误差,有些仍然采用工程设计阶段水工模型实验形成的曲线,误差更大。

(3) 水位观测误差。现行水情自动测报系统中水位传感器的采集精度为 $\pm 1\text{ cm}$ 。由于风浪或泄流的影响,水库水面经常出现波动,造成观测水位的误差。对于大型水库,尤其是湖泊型水库,1 cm的误差导致百万立方米水量的误差。

(4) 水库水位站代表性的误差。由于水库水位不可能是一个水平的水面,尤其是洪水期动库容的存在,使单站无法代表库面平均水位,此外,坝前水位由于设站位置不当,则可能受到闸门启闭及开停机的影响而造成很大误差。

(5) 其他实测信息的误差。如机组负荷的采集误差、闸门启闭误差(采集误差、启闭渐变过程中流量计算的误差)、计算方法的简便误差(水位数值摘录疏密)等。

以上误差的存在,严重的影响了入库流量计算的精度,尤其是一些计算曲线的误差是产生“系统误差”的主要来源。

三、入库反推“锯齿”状的形成分析

入库反推中,由于测量误差和所用资料转换关系误差的存在,使所求的入库流量过程呈现“锯齿”状是不可避免的。“锯齿”形态反映了计算中误差的随机性。水库周边

信息所携带的误差是导致入库反推形成“锯齿”的直接原因。由于计算时段越短，以上各类误差所占的比重就越大，所以其“锯齿”状就越明显。此外，计算时段的加长可导致时段内随机误差的相互抵消。在入库流量反推中，时段越短计算出的时段流量其“锯齿”状越剧烈。实时系统中，由于计算时段为数小时，所以推出的流量过程的“锯齿”状就比日流量过程波动要大。

由于入库反推计算中误差的存在，尤其是“系统误差”的存在，将直接影响到入库反推成果的可信度。在实时预报中，预报成果的准确与否需要与入库流量的“真值”进行比较，以考核预报的精度，而入库流量“真值”是不可知的，实际运用中均以入库反推值为“准绳”，故入库反推成果的可信度将至关重要。根据以上分析，在条件许可的情况下，应对以上各项计算依据进行分析，定期复核，确保计算成果的可靠。

此外，采用长系列的流域水量平衡分析，或通过上、下游水文站实测流量系列的平衡分析，可得知水库反推成果的精度状况，以及“系统误差”的量级。但这类分析仅能了解入库反推成果有否“系统误差”存在，而对小尺度的实时预报成果作用不大。

在洪水预报系统中，入库流量的反推计算是其组成部分之一，不管计算方案采用何种方式制作而成，入库流量的预报精度将以此为依据进行考核。所以，在计算方法上要尽可能细致，而不能是以往手工的重复。在实际运用中，这类“系统误差”在一定时期内是无法消除的，实时预报中，预报成果的准确与否还要以它为准则，这就为实时预报带来了很大的难度。

水库流域其他预报断面预报流量的精度评价均较易实施，因为，预报方案制作和实施均采用同一测站断面，两者是一致的。而入库流量预报方案的制作与实施通常不一致，如在建水库，预报方案的制作是在水库未形成时，采用天然河系、测站资料进行预报方案的制作。当水库形成后，用于坝前流量预报时，由于研制与实用不一致，其预报结果必将不尽人意，即使在方案研制中考虑未来水库形成后的有关因素，但毕竟不是通过实际资料或状况分析所得的结果。已建水库，视入库反推流量资料的状况而定。当不具备时段入库资料时，制作的预报方案，其精度也难保证。

由于研制与应用的不一致，所以方案精度的评价其实意义不大，精度的检验应着重在实时系统的运行中进行，在实用中不断分析、总结、修正，以使预报方案适应流域的特性，具有较高的预报精度。

四、实时预报中误差的处理

通过以上分析可见，水库洪水预报中误差的存在是不可避免的，尤其是坝址处的流量过程预报，其误差可能更大，并且误差的存在并非是流域水文气象条件的模拟差异，而可能是坝址处“实测”流量本身的误差。这就对流域洪水预报提出了更高的要求。

实时预报时，要求预报模型不仅能够反映流域的水文气象、产汇流等特性，还要具有一定的容错能力。不论其预报方案自身反映流域水文气象规律多么“真实”、预报多么“精确”，都要以入库反推，或断面实测的“真值”为准绳。按照概念性水文预报模型的理论这是不可能的，而误差的存在是客观的，在实际运用中，通过对误差的客观分析，结合统计模型及经验模型的特点，对预报统计中的“系统误差”进行修正，使预报接近“实测值”，其方法是可行的。

现代实时洪水预报系统已不再是仅由单一化的产汇流预报模型或一种预报方法所组成。

任一预报模型（或方法）均不可能解决所有流域的预报问题。同样，任一流域也不可能适用各种预报模型（或方法）。现代预报模型系统必须结合流域实时预报作业的现状特性，采用多途径、多方式，集概念模型、水力学模型、统计模型及经验模型等诸多方法为一体，形成交互式流域综合水文预报系统，这对于大型或复杂流域，尤为重要。

第二章 水库洪水预报调度系统规划设计

本章以湖南省王家厂水库为例,介绍水库洪水预报调度系统规划设计的主要内容和方法,作为其他水库规划设计的参考。

第一节 王家厂水库流域概况

湖南省王家厂水库是一座大(II)型水库,处于沅水干流中游,地理位置为 $E111^{\circ}32'$, $N29^{\circ}46'$ 。大坝距澧县王家厂镇 0.25 km,距澧县县城 33 km。王家厂水库控制流域面积为 484 km² (其中包括山门水库截流控制面积 35.4 km²),占全流域面积的 41%,坝址以上河长为 48.5 km,河道坡降为 0.35%。

沅水流域属亚热带湿润地区气候,处于副热带北缘。在夏季经常受西太平洋副热带高压边缘影响,南北冷暖气流交汇要道,夏季既受西风带天气系统的控制,又受副热带系统的影响,有时受两类系统的共同作用。气流经过频繁,锋面活动显著,再加上地形因素的影响,形成降雨。暴雨的主要天气系统是梅雨锋系,即高空(700 hPa)为切变线,切变低涡;地面为静止锋,冷锋,气旋波,加上地形对偏东气流的抬升作用,对暴雨形成极其有利。王家厂流域多年平均降雨量 1280 mm,多集中于汛期,其中 4~8 月份的降雨占全年降雨量的 70.8%。

王家厂水库 1958 年开工兴建,1963 年建成蓄水,多年平均入库天然来水量 3.025 亿 m³。水库按百年一遇洪水设计,设计洪水位为 84.10 m;二千年一遇洪水校核,校核洪水位为 85.98 m;五千年一遇洪水保坝,保坝洪水位为 86.65 m。正常蓄水位,汛前为 80 m,汛后为 82.6 m。设计死水位为 70.0 m。水库总库容(校核洪水位以下)为 2.78 亿 m³,调节库容(正常蓄水位至死库容)为 1.22 亿 m³,防洪库容(起调水位至正常蓄水位)为 0.551 亿 m³。水库工程主要由土坝、溢洪道、输水洞及水电站组成。大坝为均质土坝,坝顶高程 88.0 m,坝顶宽度为 7.0 m,坝顶轴线长 450 m。正常溢洪道为驼峰堰型,采用 6 扇宽 8 m 高 6 m 的钢质弧形闸门控制,堰顶高程为 78.0 m。正常溢洪道设计泄洪流量为 1377 m³/s,校核泄洪流量为 1929 m³/s。水库非常溢洪道(即自破式溢洪道)位于正常溢洪道的左侧,为实用堰型,堰顶高程为 78 m,溢洪道长度为 50 m,保坝泄洪流量为 2157 m³/s。水库南干渠发电灌溉最大引水流量为 45 m³/s,北干渠灌溉最大引水流量为 12 m³/s。

王家厂水库是一座以灌溉为主,兼顾防洪、发电、养鱼等综合利用的大型多年调节水库。水库地理位置非常重要,坝址紧邻王家厂镇和 1868 省道,下游 3 km 处有葛(洲坝)、常(德)、株(州)50 万 V 高压输电线路经过,7 km 处有枝柳铁路横贯,11 km 处有当市镇和农用飞机场,30 km 处有 207 国道和石岳 11 万 V 高压输电线路,33 km 和 44 km 处分别有澧县县城和津市市区,还有沅澧万人劳改农场。水库直接担负下游澧阳平原 2.043 万