

冯家山水库洪水预报调度系统的研究与开发

学 科： 水文学及水资源

作 者： 李少华

导 师： 沈冰

答辩日期： 2002 年 3 月

摘 要

本文首先在查阅大量国内外文献资料、全面了解实时洪水预报方法和模型的基础上,针对西北干旱半干旱地区的产汇流特点,以寻求适宜的洪水预报模型和开发具有通用性和实用性的洪水预报调度系统为目标,进行了冯家山水库的实时洪水预报和洪水调度的研究工作,并在此基础上开发了水库洪水预报调度系统。论文的主要内容和成果如下:

(1) 实时洪水预报模型是洪水预报调度系统的核心部分。本文在对千河流域特性进行分析的基础上,建立流域的总径流线性响应模型(TLR),并用误差序列自回归模型(AR)对预报结果进行实时校正。该实时洪水预报方案的总合格率为 82.5%,预报方案等级为乙级。这说明 TLR 模型适应能力比较强,用于冯家山水库的入库洪水预报是可行的。

(2) 在 TLR 模型的基础上,分别建立多输入单输出 TLR 模型和总径流非线性响应模型(TNLR),以考虑降雨空间分布的不均匀性以及降雨强度对产汇流的影响。结果表明,考虑雨强非线性影响的 TNLR 模型更适合西北干旱半干旱地区的特点,预报方案等级为甲级。

(3) 水库防洪调度是洪水预报调度系统的重要组成部分。在预报结果的基础上,初步建立了水库的规则调度以及预泄调度模型。对 2000 年一遇校核洪水进行试调度,结果表明模型算法稳定高效。

(4) 采用先进的开发平台和工具,以及面向对象的可视化编程技术,开发完成了冯家山水库洪水预报调度系统。系统功能完备,界面友好,可操作性强,自动化程度高。另外,系统具有良好的模块化结构、

可重用性和可扩充性，便于实现不同防洪系统的数据共享和集成管理。

(5) 结合洪水预报调度系统的开发，探讨了系统理论、面向对象技术、数据库技术、地理信息系统以及等值线绘制等现代技术在洪水预报中的应用。

关键词：实时洪水预报；总径流线性响应模型；洪水预报调度系统；
现代洪水预报技术；冯家山水库

**STUDY AND DEVELOPMENT ON FENGJIASHAN RESERVOIR
FLOOD FORECASTING AND DISPATCHING SYSTEM**

Subject: Hydrology and Water Resources Author: *Li Shaohua*

Advisor: *Shen Bing* Debate Date: Mar., 2002

ABSTRACT

On the basis of consulting a large number of literatures domestic and aboard, the present situation and latest development of flood real-time forecasting methods and models is reviewed. Study is conducted on flood real-time forecasting and dispatching for Fengjiashan reservoir, aiming at building appropriate flood forecasting model and developing universal and practical computer system. The main contents and results of this paper are listed below:

(1) Flood real-time forecasting model is the core of flood forecasting and dispatching system. Based on the detailed analysis of the basin characteristics of the Qian River, the Total Runoff Linear Response Model (TLR) is built for flood forecasting, and AR model of error sequence is established for flow correction. The precision grade of the flood forecasting scheme is the second, which indicates that the TLR model has a high adaptability, and it is feasible to be used in the flood forecasting of Fengjiashan reservoir.

(2) On the basis of the TLR model, the TLR model with multi-input and single-output is built to take the spatial asymmetry of precipitation into account, and the Total Runoff Nonlinear Response Model (TNLR) is established to take the precipitation intensity into account. Simulating results show that the TNLR model has a higher precision and better adaptability in arid and semi-arid area in the northwest China.

(3) Flood control and dispatching is an important part of the computer system. The models of regular dispatching and beforehand dispatching are preliminarily constructed. Trial dispatching is conducted for the check flood with a recurrent interval of 2000 years, which indicates that the dispatching model is stable and efficient.

(4) Fengjiashan reservoir flood forecasting and dispatching system is developed by using the advanced developing platform and tools, together with the object-oriented and visual programming technique. The finished system has a perfect function, a friendly interface, and a high automation. In addition, the design of the system is modularized and standardized, which is helpful to reuse and expand the software, and is also convenient for the information share and integrated management of variable flood control systems.

(5) Combined with the development of Fengjiashan reservoir flood forecasting and dispatching system, some modern techniques are discussed, such as system theory, object-oriented programming, database management system, and contour drawing, etc.

Key words: real-time flood forecasting; TLR; flood forecasting and dispatching system; modern techniques in flood forecasting; Fengjiashan reservoir

1 概 述

1.1 研究的目的是和意义

我国幅员辽阔，河流水系众多，由于受季风与自然地理条件影响，汛期降雨在年上和年际的变化十分剧烈，历史上洪涝灾害频繁发生。我国的防洪实践证明，工程措施与非工程措施的结合应用是建立和完善江河防洪系统的有效措施。非工程措施通常包括：加强防洪设施管理，保证防洪设施的防洪能力；在工程设施中充分考虑适应洪水短暂淹没的措施，以尽可能减少洪灾损失；建立健全通讯系统和预警系统；改进和发展洪水预报技术，提高防洪调度水平等。其中改进洪水预报方法、提高预报精度、实施洪水预报调度是非工程措施中最行之有效的办法。

水文预报是研究和运用水文变化规律，揭示和预测未来水文要素变化的一门应用学科。洪水预报作为水文预报的一项重要内容，是人类在与洪水灾害长期斗争的客观需求推动下发展起来的；同时，新理论、新技术的发展也极大地推动了水文情报预报技术的发展和应。作为防汛斗争的“耳目”和“参谋”，准确及时的洪水预报和调度，为正确作出防汛决策提供了科学依据，并获得了减免洪灾损失的巨大经济效益和社会效益。

千河系黄河二级支流，渭河较大的一级支流，发源于甘肃省六盘山瘦驴岭南麓，自西北向东南，流经甘肃省和陕西省，于宝鸡县石羊庙乡底店村汇入渭河。冯家山水库枢纽位于千河下游河段上，距渭河入口 27 公里，控制流域面积 3232 平方公里，是以供水为主，兼顾防洪、发电、养殖、旅游等综合利用的大型水利枢纽工程。由于工程所处地理位置重要，社会和自身经济效益显著，因此，工程运行安全与否，不但影响到收益区乃至全省的社会经济发展，而且也直接关系到渭河下游人民生命和财产的安全。

然而，目前冯家山水库的洪水预报工作尚在进行中，水库洪水不能实施预报调度，汛期水库调度原则及方式仍然按照原设计执行，即按照库水位的涨落幅度来推算入库流量及其变化情况，并参照流域及库区天气趋势预报，以汛限水位为控制目标，以不超过相应标准的最高洪水位为控制条件，进行分级洪水调度。另外，目前流域内雨量站和水位站设施简陋、资料观测时段长，信息传递缓慢，无法满足水库防洪调度自动化的需求。因此，冯家山水库的洪水预报调度工作应尽早提上议事日程，建设一套科学的、先进的、便捷的水库洪水预报调度自动化系统，不仅可以为沿河两岸及水库的安全度汛服务，而且可以为下游渭河干流的防汛和调度决策提供快捷可靠的水情信息。

1.2 国内外研究概况与发展趋势

1.2.1 产汇流理论与模型

a. 径流形成过程与机制

从降雨到形成出口断面流量的整个水文过程，称为径流形成过程，它是陆地水文循环的一个重要环节。自然界的径流形成过程是一个在多种因素相互作用下的复杂过程，尽管具有一定的随机性质，但仍然可以从中找出内在规律。从实质上讲，它是水体沿不同方向、通过不同界面和介质的水流运动，是在各种力的作用下寻求平衡的一个物理过程。在这个过程中，水分运动可分为垂向和侧向二类运行机制：垂向运行机制将降水进行再分配，它的直接后果是生成不同的径流成分；侧向运行机制是将不同径流成分在时程上进行再分配，它的最终效应是形成出口断面的流量过程。为了便于降雨径流分析，一般都把径流形成过程相对地分解为产流和汇流两个过程，分别进行研究。

b. 产流概念与产流机制

长期以来，霍顿（R. E. Horton）提出的产流概念，成为人们理解径流形成机理的基本概念和建立一些水文分析、计算方法的基本原则。霍

顿产流概念的基本点是：超渗雨形成地面径流，当土壤田间持水量补足以后，稳定下渗量形成地下径流。霍顿这一论述只能解释均质包气带的产流机制，从 60 年代起这一理论开始受到挑战，并于 70 年代初提出了不同于霍顿产流机制的壤中径流和饱和地面径流的形成机制及回归流概念，出现了所谓的“山坡水文学学派”。

所谓产流机制，定义为：水流沿土层垂向运行中，在供水与下渗矛盾支配下的发展过程和机理。于维忠在文献[1]中总结了界面产流的共同规律“界面产流机制”，它反映了不同径流生成的基本规律以及产流的物理实质，因为界面本身便包含了供水与下渗矛盾的概念，即 $f_{p上} > f_{p下}$ 才能产生径流这一必要条件。产流机制研究的进展，有力地推动了降雨产流量计算方法和流域水文模型的发展。

由此可见，一次降雨产生出口断面的总径流（R）是由地面径流、壤中流、浅层地下径流和深层地下径流所组成。由于降雨产流过程十分复杂，各种概念都可能在相同流域或不同流域、相同时间或不同时间出现，将随流域地形、土壤、植被、土地利用状况以及流域气候和降雨特性等情况而定。因此，必须针对流域特征探求适合该流域的降雨径流预报方法。

c. 产流计算模型

传统的产流理论是霍顿在 1933 年提出的，其对产流的概括比较简单，并不能充分反映客观产流现象的全部内容，在产流条件和产流面积上均需进行必要的补充，更重要的是应对产流过程的物理机制加以分析阐述。近几十年来，水文学家通过对大量水文资料的分析研究，提出了湿润地区以蓄满产流为主和干旱地区以超渗产流为主的重要论点，建立了流域产流计算的实用方法，从而使霍顿产流理论在生产实际中得到了广泛应用。

API（前期雨量指数）用于流域产流预报是一种传统的方法。1949 年，林斯雷（Linsley）在《应用水文学》一书中对该方法作了详细介绍。

最初, 由于这种方法主要针对独立的次洪水产流量计算, 故后被称为次洪 API 模型(配合单位线法预报汇流)。1969 年, 美国天气局西纳(Sittner)等在文献[2]中提出将 API 方法与单位线法相结合, 并发展成为一个完整地模拟降雨径流过程的流域模型, 后称为连续的 API 流域模型。张恭肃等人(1996)指出了 API 模型的局限性, 将分散型结构引入模型, 对其作了进一步的改进, 最终形成了一套适合计算机处理的模型参数离线分析处理系统和实时预报模型系统^[3]。葛守西等(1997)对 API 模型的参数率定技术重新进行了研究, 找到了 API 模型传统研制技术与计算机技术的结合方式, 实现了 API 模型参数率定计算机化的目标^[4]。

60 年代初, 我国著名水文学家赵人俊教授分析了我国湿润地区降雨损失的特性, 提出了蓄满产流的计算方法。以后经过不断改进和完善, 形成了一个完整的产流量计算的数学模型。蓄满产流模型假定, 对流域上的一个点, 土壤缺水量未满足之前不产生径流, 当土壤缺水量满足之后则后续降雨全部产生径流。全流域的土壤蓄水容量的空间分布规律用一条抛物线(流域蓄水容量曲线)来概化。

文康等(1982)将流域平均下渗曲线与下渗率流域分配曲线结合起来, 建立了流域产流计算的一般性产流模型^[5]。不同下渗曲线和不同下渗率流域分配曲线可组合成多种产流模型, 因此此类模型弹性较大, 广泛适用于干旱及湿润地区, 并在理论上和实际资料检验上验证了蓄满产流模型乃其特例。同时, 该模型可作连续计算, 并具有调整计算时段长短以考虑雨强对产流影响的功能。许大同等(1981)通过两次流域分配的办法将流域蓄水曲线与入渗曲线结合起来, 提出了综合产流模型^[6]。综合产流模型的结构介于蓄满产流与全流域分配的超渗产流模型之间, 其产流计算既受控于土壤蓄水能力, 又受控于入渗能力, 既受控于总雨量, 又受控于降雨强度。这样的流域产流模型弹性大, 更能适应不同条件下的产流计算。王芝桂(1983)探讨了实际入渗曲线和入渗能力曲线的区别, 提出双曲入渗模型^[7]并用于产流计算, 通过实例验证了其可行

性。李怀恩等（1996）通过对目前广泛使用的几个主要产流模型的剖析和对比，提出了这几个模型之间的联系和区别以及应用中应注意的问题，并建议应优先选用综合产流模型^[8]。

d. 干旱半干旱地区产流问题及进展

众所周知，干旱半干旱地区流域产流的空间分布、影响因素、模型选用等问题十分突出，近 30 年来，国内外水文学者在这方面作了大量工作。沈晋等（1989）分析了西北干旱半干旱地区的雨洪规律及影响因素，对西北干旱半干旱地区水文模型的研究动态和问题进行了评述，并提出了研究方向^[9]。李长兴等（1989）将标定理论引入流域产流，通过对单元下渗曲线的标定和应用，建立了一个考虑土壤特性空间变异的流域产流模型，该模型具有概念明确、弹性大、适应面广以及能直接模拟产流面积变化等特点^[10]。沈冰等（1995）通过实验研究了短历时降雨对入渗、产流、漫流过程的影响，对黄土地区的雨强影响机理作了探讨，指出提高产流预报精度的关键是处理好局部面积产汇流，而暴雨空间分布是主要因素^[11]。范荣生等（1994）将超渗产流模型与降雨空间变化的频率特性有机结合，能考虑降雨空间变化对产流的影响^[12]。包为民（1997）根据蓄满和超渗两种概化的产流机制，提出了适用于半干旱地区的垂向混合产流模型^[13]。

e. 汇流预报方法

按照爱尔兰水文学家杜格的分类观点，在近代汇流理论中，通常可以采用三种途径来建立流域汇流计算模型，即连续力学、概念性模型和黑箱分析法。用连续力学建立雨洪汇流计算模型，就是把大家通常熟知的圣维南河道不稳定流方程组，经过种种概化与均化，应用到流域汇流计算中去。所谓黑箱分析法，是现代控制论发展和完善起来的一种分析方法，它只是根据系统的输入和输出资料来推求系统的响应，而并不去探讨输入形成输出的物理机制。这种分析方法也叫系统的辨识，谢尔曼经验单位线分析法就是最早的一个应用实例。而概念性模型则介于两者之间，它吸取了两者的优点，模型本身以一定的物理概念作基础，主要

因子间存在有某种特定性关系, 模型参数从实测资料中优选。以纳什模式为基础的变雨强单位线法就属于这一分类范畴。

1921 年郝肯和罗斯 (Hawken, Ross) 首先提出等流时线 (即面积流时曲线) 的概念。等流时线法是成因分析法的一个应用, 它主要研究流域出口断面的流量是如何组成的。应用该方法的关键是正确地确定流域汇流的平均速度和流域汇流时间。等流时线法的突出优点在于反映了流出流量的组成规律, 适用于河网汇流为主的流域和降雨地区分布不均匀的洪水; 其主要缺点是没有考虑洪水波的坦化以及采用了固定的等流时线。1945 年克拉克 (C.O.Clark) 把部分径流量再经过水库型的调蓄来考虑洪水波的坦化。文献[14]提出了流域分块移滞汇流模型, 将等流时线法和单位线法有机结合起来, 考虑了各等流时面积的径流远近不同的调蓄和推移作用, 从而改进了等流时线法。冯焱 (1981) 提出了用变动等流时线来改正非线性影响^[15]。

单位线法是谢尔曼 (L.K.Shermen) 于 1932 年首先提出的。单位线定义为: 在给定的流域上, 单位时段内时空分布均匀的一次降雨产生的单位净雨量, 在流域出口断面所形成的地面 (直接) 径流过程线, 称为单位线, 它建立在倍比和叠加原理的基础上。控制单位线形状的指标有单位线洪峰流量、洪峰滞时及单位线总历时, 常称单位线三要素。从实测水文资料分析单位线, 宜选择一次在时空分布较均匀的短时段降雨所形成的孤独较大洪水来分析。传统的分析方法有: 分析法、图解法、试错法、最小二乘法、迭代法和各种识别方法, 这些都属于“黑箱”方法。

净雨历时趋于无穷小的单位线称瞬时单位线, 其定义和假定等同于时段单位线。这个概念是克拉克于 1945 年提出的, 纳什于 1957、1960 年运用系统分析的方法导出了瞬时单位线的数学表达式:

$$u(t) = \frac{1}{K\Gamma(n)} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} e^{-t/K}, \text{ 并以矩法为基础来推求参数, 进行了时段转换}$$

和参数的地区综合, 使瞬时单位线得以发展。瞬时单位线不仅简化了计

算,更重要的是解决了单位线没有数学线型的问题,建立了流域响应模型。

纳什单位线和谢尔曼单位线一样,把流域概化为线性时不变集总系统,与流域非线性时变分散系统的实质不符,因此需要研究非线性处理方法,以提高其适用精度。国内外在长期的实验研究和生产实践中,都先后发现对各场实测洪水所分析的单位线是不同的,其中主要原因之一是雨强起着重要作用。变雨强单位线法抓住了雨洪计算中降雨强度这个主要影响因子,建立起单位线参数和雨强的关系,从而实现变动单位线的分析。这种线性模式加参数改正的研究途径虽是一种经验性的处理方法,但它却有助于对汇流计算中非线性问题理解和认识的深化^[16]。张恭肃等(1981)在纳什单位线模式基础上,提出了一种由实测资料推求一次洪水中不同时段净雨强度条件下相应不同单位线的分析方法,获得了天然小流域单位线滞时与净雨强度和单位线峰与量非线性关系的初步成果^[17]。杨远东等(1981)从线性系统中参数的非线性化出发,提出一种代数解法,以推求考虑雨强变化的瞬时单位线参数,藉以达到分析单位线的非线性化变化的目的^[18]。单元汇流方法提出将全流域分成若干块单元面积,然后分单元计算产流和汇流。这样,降雨、产流的不均匀性可通过分单元来考虑,不同水源和非线性影响可用不同水源单位线来组合及变动单位线来更正。它吸取了单位线法和等流时线法的部分优点,是一个在实用上较为灵活的方法。华士乾等(1980)对汇流非线性问题的主要解决途径作了评述,对在实际中处理非线性的几个问题提出了初步看法^[19]。

1.2.2 流域水文模型

在流域模型迅速发展以前,在应用水文学方面,常采用数学物理方法、单位线、经验相关及概化推理等方法。50年代后期,随着电子计算机和系统理论应用的迅速发展,水文学中提出了水文模拟的概念和方法。水文模拟方法是对上述各种方法取长补短并结合起来而形成的,它

一方面有别于数学物理方法的严密性，另一方面又有别于概化推理方法的设计性；它吸取了经验相关法中合理的物理概念，并把这些概念系统化成一个推理计算的模式；因此它可以采用比较严密的结构，也可以采用比较粗略的结构或黑箱子模型作为部分结构。对水文现象进行模拟而建立的一种数学结构称为水文数学模型。水文数学模型可分为确定性模型和随机性模型两大类，描述水文现象必然性规律的数学结构称为确定性模型；而描述水文现象随机性规律的数学结构则称为随机性模型。其中确定性模型可分为集总式和分散式模型两种，前者忽略水文现象空间分布的差异，后者则相反。水文数学模型又可分为线性与非线性，时变与时不变。概念性水文模型属于确定性模型的范畴，它以水文现象的物理概念作基础，采用推理和概化的方法对流域水文现象进行水文模拟。概念性模型在一定程度上考虑了系统的物理过程，力图使其数学模型中的参数有明确的物理概念。因此建立概念性流域水文模型，首先要建立模型的结构，并以数学方式表达；其次要用实测降雨径流资料来率定模型的参数。自 60 年代初期，随着计算机的发展，产生了大量的流域水文模型，其中有代表性的、应用较多的有斯坦福（Stanford）模型、萨克拉门托（Sacramento）模型、坦克（Tank）模型和我国的新安江模型^[20]。

斯坦福流域水文模型由 N.H.克劳福特和 R.K.林斯雷从 1959 年开始研制，到 1966 年完成第 IV 号模型，是世界上最著名的流域水文模型之一。该模型的建立是以流域水量平衡为基础，模型中设计了 4 个蓄水层以控制土壤水分剖面和地下水状态，逐时段连续演算。其特点是物理概念明确，模型结构一环扣一环，层次清楚，对小流域采用集总模型方式，对大流域采用分块模型方式。萨克拉门托流域水文模型是美国天气局于 70 年代初期在第 IV 号斯坦福模型基础上改进和发展起来的，是集总参数型的连续运算的确定型流域水文模型，是用一系列具有一定物理概念的数学表达式来描述的概念性模型，是以土壤含水量贮存、渗透、排水和蒸散发特性为基础来模拟水文循环的综的河川径流流域模型。该模

型功能较完善,能适用于大中流域,又能适应湿润地区和干旱地区而收到较好的效果。坦克模型又叫水箱模型,由日本菅原正己在 50 年代提出,后来不断发展成为一种被各国广泛采用的流域水文模型。水箱模型将雨洪转化过程的各个环节用若干个彼此相联系的水箱进行模拟,每一个水箱有边孔与底孔,以水箱中的蓄水深度为控制,计算流域的产流、汇流及下渗过程。水箱模型虽是一种间接的模拟,模型中并无直接的物理量,但此模型的弹性甚好,对各种大小流域、各种气候与地形条件都可以适用。60 年代初,我国水文学者赵人俊教授等开始研究蓄满产流模型,并于 1973 年正式提出一个适用于湿润与半湿润地区的降雨径流流域模型——新安江模型^[21]。最初的新安江模型为两水源——地表径流和地下径流;80 年代初期,模型研制者将萨克模型与水箱模型中的用线性水库函数划分水源的概念引入新安江模型,提出了三水源新安江模型;1984~1986 年期间,又提出了四水源新安江模型——地面径流、壤中流、快速地下径流和慢速地下径流。

在我国水文预报的实践中,不仅广泛使用概念性模型,如新安江模型等,而且也开始应用按系统分析方法求解的黑箱子模型^{[22][23][24]}。文康等(1986)介绍了以多元线性回归方法为基础的总径流线性响应模型(TLR)和线性扰动模型(LPM)的数学结构及其在长江三峡地区的应用^[25]。王真荣(1991)对 TLR 模型作了改进,采用某一标准的暴雨强度为临界值对降雨系列进行分阶计算,可以考虑雨强对径流的影响^[26]。王厥谋等(1987)指出了 TLR 模型和 LPM 模型以及约束线性系统模型(CLS)的缺陷,并将新安江概念模型与 CLS 模型结合起来,提出了综合约束线性系统模型(SCLS),并建立了一个通用计算机程序包,开始在我国实际应用^[27]。张国祥(1994)探讨了常用水文模型中的蒸发、下渗和产汇流机制,并剖析了模型中存在的问题,为实际工作中模型的选择和应用提供了借鉴^[29]。

1967 年,世界气象组织(WMO)就降雨径流模型在世界范围内作

检验对比后得出以下结论^[39]：(1) 如果流域位于湿润地区，就不必过于挑选模型，因为在这样的流域，简单模型与复杂模型可以取得同样好的效果；反之，对于干旱与半干旱流域，就需要慎重选择模型。(2) 一般来说，在久旱之中与久旱之后，计算土壤含水量的模型能较好的模拟河流的径流。(3) 类似 Tank 那种不直接计算土壤含水量的模型，对于流域的大小以及气候和地理特征具有更好的适应能力与弹性。(4) 在建立模型时，如果资料不好，则隐式计算土壤含水量的模型特别是系统途径模型有可能具有更好的处理这种缺陷的能力，因而可能较之计算土壤含水量的模型给出更好的预报结果。1980 年，具体负责模型对比检验工作的 F.Neaf 博士发表了题为《我们今天能够模拟降雨径流过程吗？》的论文。Neaf 认为，没有一个水文模型能应付所有的水文情况，没有一个模型真正反映了降雨径流过程，主要问题在于估算面平均雨量的不确定性以及土壤参数和土壤含水量的变化；而造成模拟误差较大的原因可能是雨量与流量的观测误差以及面雨量观测的误差；此外，径流过程的非线性也可能造成误差。Neaf 博士的论述对于我们认识模型的性质及其功能是很有价值的。

1.2.3 系统理论引入洪水预报

众所周知，相关图、谢尔曼单位线和马斯京根法（预报员趣称为“老三篇”）是传统的洪水预报方法。系统理论向洪水预报技术的渗透是从 50 年代开始的，最初引起水文学者兴趣的是谢尔曼单位线与系统响应函数定义惊人的一致，于是用系统离线识别算法作为推求单位线的工具的研究首先兴起。1949 年，林斯雷（Linsley）等在《应用水文学》一书中提出单位线可以用最小二乘法去推求。1957 年，纳什（Nash）在文献“瞬时单位线的形式”中，首次提出使用系统脉冲响应函数-瞬时单位线的概念，并用统计矩来表达瞬时单位线二参数。1967 年，国际水文科学协会主席杜格教授在美国马里州大学作了“水文系统的线性理论”的专题讲座，并于 1979 年 11 月来我国就此进行了讲学，全面阐述了系统理论

对于水文学的适用性，完整地介绍了系统理论的基本概念，用系统研究的方法将水文学的推理公式、等流时线、S-曲线、马斯京根法、流域水文模型等都用系统理论贯穿起来，总结了响应函数离线识别的 10 余种方法，并对识别中出现的单位线振荡问题作了研究和讨论。由于权威学者的推动，系统理论的应用进入了加速发展时期。

1.2.4 实时洪水预报

“实时”是计算机科学用语。控制理论上实时预报的核心技术是利用“新息”（当前时刻预报值与实测值之差）导向，对于系统模型或者对预报作出现时校正。系统动态识别（亦称参数自适应估计）及卡尔曼滤波就是这类方法的典型代表。最早将卡尔曼滤波应用于水文预报的研究是日本学者 Hino，他明确提出卡尔曼滤波适用于水文预报，并用卡尔曼滤波器递推地估计降雨径流的响应函数。1976 年，莫尔和威斯在论文“使用推广的卡尔曼滤波器于非线性流域模型的实时参数估计”中，提出了将非线性汇流模型进行线性化、然后使用推广的卡尔曼滤波器对模型参数进行在线估计。克鲁凯等在论文“实时降雨—径流预报的三种系统方法”中，应用了三种算法在降雨径流预报中试用比较，比较的结果是：递推最小二乘法最佳，卡尔曼滤波与之相近，自学习法较差。1987 年，张恭肃等在“确定性水文预报模型的实时校正”一文中，针对任何一个确定性水文模型进行预报后将出现一个具有相关性的误差序列这一事实，对此误差系列建立一个状态空间方程，以参数向量作为状态向量，即可用系统识别方法估计其参数，用来估计预见期的可能误差，达到实时校正的目的，并取得了较好的预报效果^[40]。1987 年，葛守西在“产汇流两阶段校正和参数动态预测算法的实时洪水预报模型”一文中，创建了一个新的动态模型，在产流预报中以蓄满产流模型的卡尔曼滤波算法进行实时校正，在汇流预报中采用一般线性汇流模型衰减记忆动态识别方法并配合汇流模型的动态判类、分类对预见期的参数变化进行预测，并于 1993 年对模型进行改进，采用模糊分类和模糊模式识别的算法改

进了分类处理技术，进一步实现了分布式产流的卡尔曼滤波算法，此算法在嘉陵江三流域上建模获得成功^[41]。

1.2.5 洪水预报发展趋势

如同其他现代科学技术一样，洪水预报的现代进展紧密伴随着新技术，如核技术、微电子技术、空间科学技术等，伴随着新理论，如信息论、系统论、控制论等的应用，这些新技术、新理论的发展和应用已大大改变了水文情报预报的技术面貌；同时，暴雨洪水理论的深入开展，计算机硬件、软件的不断进步，雨量、流量测验水平的提高等，推动了洪水预报工作向联机自动测报系统网络方向发展。由此，多学科交叉渗透所形成的现代洪水预报技术是洪水预报发展的总趋势。具体表现在如下几个方面：

（1）系统理论与系统辨识方法应用于洪水预报模型，为洪水预报提供了新的方法和途径。系统模型更适合于联机洪水预报调度的自动化。

（2）水情遥测站网进一步优化，水情信息采集处理逐步实现自动化。快捷准确的水情信息不但可以提高预报精度，同时将会对洪水预报模型结构的改进以及参数的再率定起到重要的作用。

（3）计算机技术、网络技术及通讯技术越来越广泛地应用于洪水预报，将水情信息的采集处理和传送、洪水预报模型的计算分析、预报结果的发布以及调度方案的自动生成等若干过程集成于强大的洪水预报调度系统之中。

（4）采用先进的图形交互、多媒体、地理信息系统、大型数据库管理系统等技术，将专家知识、经验知识和决策知识融于一体的智能型决策支持系统是未来发展的重要方向。

1.3 论文的研究内容及技术路线

1.3.1 研究目标

(1) 本论文将结合西北干旱半干旱地区特点以及冯家山水库的实际情况, 在对千河流域的雨洪特性进行统计和分析的基础上, 尝试将系统模型作为冯家山水库的洪水预报模型, 用误差序列自回归模型对预报结果进行实时校正; 并在预报结果基础上, 对预报洪水过程进行水库防洪调度计算。

(2) 将洪水预报中的各个环节(水文数据预处理、水情实况图形显示、模型计算、实时校正、历史洪水统计等)用面向对象的可视化程序设计技术和直观便利的地理信息系统逐步实现, 最终在计算机上建立具有数据处理、预报计算、实时校正和洪水调度等四位一体功能、完整而实用的洪水预报和调度系统, 为水库的安全度汛服务。

1.3.2 主要研究内容

(1) 对千河流域的历史雨洪资料进行统计分析, 分析干旱半干旱地区的降雨径流特性, 以选用合适的洪水预报模型。

(2) 选择系统模型作为冯家山水库的洪水预报模型, 自回归模型作为实时校正模型, 并进行参数率定、模型评定和检验。

(3) 在上述模型的基础上建立分阶系统模型和多输入单输出系统模型, 并对模型结果进行对比分析。

(4) 对预报洪水过程进行调洪演算, 分别进行规则调度模型和预泄洪模型的建立和求解。

(5) 将面向对象的编程技术、图形交互技术、地理信息系统、大型数据库管理系统等应用于洪水预报调度, 建立一套完整实用的洪水预报调度系统。

1.3.3 总体思路及技术路线

本着在生产上简单可行、安全合理, 在理论上有所创新的原则, 本

研究试图根据千河流域的具体特征，选择适宜的洪水预报调度模型、合理的参数优选方法和实时校正技术，使得洪水预报方案和洪水预报调度系统既简单又实用，并努力使之具有适应半干旱地区的通用性。同时，要求系统的数据传输处理快捷准确，模型结构合理且算法稳定、界面友好易于操作、程序结构清晰便于维护升级等。本研究的技术路线如下：

（1）洪水预报调度系统的所有模块都是以数据库为中心。数据库分为历史库、实时库和预报库三大部分，流域和水库信息、历史雨洪资料、预报调度模型参数、预报和调度结果都存放在数据库中。

（2）对千河流域的历史雨洪资料进行统计分析和时段化处理，录入历史数据库。作出流域退水曲线，求出场次洪水的径流系数，分析干旱半干旱地区的降雨径流特性。

（3）选择系统模型作为冯家山水库的洪水预报模型，自回归模型作为实时校正模型，利用计算机强大的运算能力进行参数率定和多方案对比分析；根据规范要求，用历史资料进行模型评定和检验。

（4）实现洪水的实时预报调度。对预报洪水过程进行调洪演算，分别进行规则调度模型和预泄调度模型的建立和求解。

（5）利用面向对象的编程技术、图形交互拖动技术、地理信息系统、大型数据库管理系统等技术和工具，建立基于窗体、图形、报表的界面友好的人机交互环境，形成一套完整实用的洪水预报调度系统。

2 流域概况及基本资料分析

2.1 流域及水库概况

2.1.1 流域自然概况

千河是渭河左岸较大的支流之一，属黄河二级支流，发源于甘肃省六盘山瘦驴岭南麓，流经甘肃省的清水县和陕西省的陇县、千阳、凤祥和宝鸡五县县境，于宝鸡县石羊庙乡底店村汇入渭河。千河干流总长 152.6 km，流域总面积 3493 km²，河道平均比降 5.8‰。千河上游为土石山区，有草场和森林，植被较好；中游为黄土高原沟壑区，水土流失较为严重；下游为黄土川台区，水土流失不大。

千河流域属于暖温带大陆性半干旱地区，季风盛行，四季分明。流域南有秦岭，北临关山，北方冷空气南下与副热带高压接触，途中受地形影响往往形成降雨。由于上游河槽调蓄能力小，一次暴雨即形成一个洪峰，在多雨季节形成陡涨陡落的连续洪峰。汛期洪水陡涨陡落，历时短、含沙量大。

流域内降水量年际分布和年内分布都极不均匀，流域多年平均降水量为 630 mm，年降雨总量变幅为 339~890 mm；主汛期（7~9 月）降雨量占全年总降雨量的 50% 以上。流域多年平均蒸发量 1259 mm；坝址以上多年平均径流量 4.85 亿 m³，80% 以上径流量由降雨形成；年际径流变化较大，年内径流分配很不均匀，全汛期（6~10 月）径流量约占全年总径流量的 60% 以上。千河多年平均流量为 15.4 m³/s，实测最小流量为 0.18 m³/s，实测最大洪峰流量 1180 m³/s；调查历史最大洪峰流量 3840 m³/s，超过水库按百年一遇设计的洪峰流量 3400 m³/s。河流多年平均悬移质输沙量 496 万吨，多年平均含沙量 8.76 kg/m³。

2.1.2 水库基本情况

冯家山水库是以供水为主（农灌、市区、二电厂），兼作防洪、发电、养殖、旅游等综合利用的大型水利工程。水库枢纽距渭河入口 27 km，控制流域面积 3232 km²，占全流域面积的 92.5%。冯家山水库枢纽工程由拦河大坝、泄洪洞、溢洪洞、非常溢洪道、输水洞和电站等工程组成，其中拦河大坝、泄洪洞、溢洪洞、输水洞为二级建筑物，非常溢洪道和电站为三级建筑物。拦河大坝最大坝高 73 m，坝顶宽 7 m，长 282 m。

冯家山水库按百年设计、千年校核、两千年一遇洪水保坝标准设计，其中百年设计洪峰流量为 3400 m³/s，千年校核洪峰流量为 7200 m³/s，两千年保坝洪峰流量 8260 m³/s，如表 2-1 所示。水库设计汛限水位 707.00 m，近期正常蓄水位 710 m，坝顶高程 714 m。设计总库容 3.89 亿 m³，其中滞洪库容 0.92 亿 m³，有效库容分别为 2.54 亿 m³（相应于近期 710 m 高程）、2.86 亿 m³（相应于远期 712 m 高程），死库容 0.9 亿 m³。

表 2-1 冯家山水库设计洪水要素表

标准	洪水频率 (%)	洪峰流量 (m ³ /s)	洪水总量 (亿 m ³)			
			1 日	2 日	3 日	4 日
设计	1	3400	1.01	1.38	1.73	1.99
校核	0.1	7200	1.90	2.46	3.08	3.56
复核	0.05	8260	2.10	2.74	3.42	4.08

2.2 水情测报站网规划

2.2.1 流域现有测站状况

冯家山水库坝址以上 3232 km²的流域上布设有千阳水文站，千阳、上关、唐家河、固关、新集川、曹家湾、关山、石庄子、火烧寨、清河里、艾家庄、东风、八渡镇、上店镇、草碧等 15 个雨量站，站点分布

如下图 2-1 所示。其中，千阳水文站是水库的入库控制站。该流域的大部分雨量站分布在流域的上游和中游地区，下游测站较少，入库站至坝址区间没有设雨量站。到目前为止，15 个站点的所有水文资料均为人工观测，报讯信息通过电台和电话方式传递。

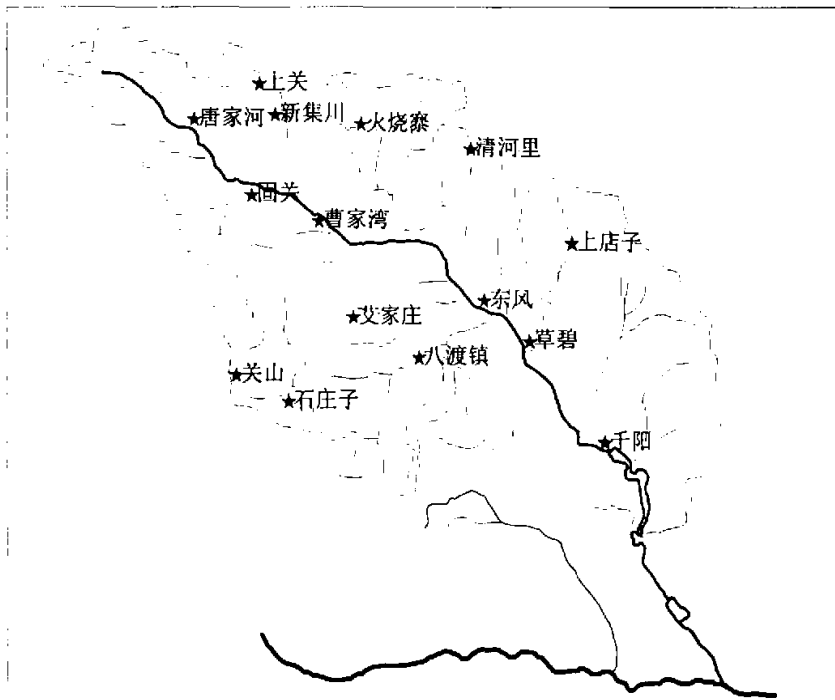


图 2-1 现有测站分布示意图

冯家山水库现有 1976 年至 1986 年的暴雨洪水资料，但是 1980 年以前雨量站点不全，资料缺测严重。上述资料对于开发水库洪水预报调度系统显然是不足的。为使冯家山水库洪水预报调度模型的产汇流参数达到一定的精度，必须扩充暴雨、洪水资料，尤其是最近十几年的具有一定精度的水文资料。

2.2.2 站网规划及站点布设

依据相应规范要求，并结合千河流域的自然地理特征和原有站点情

况,在进行水库洪水预报调度系统遥测站网规划时,认为原有 15 个站点中大部分能满足水库洪水预报调度系统对报讯站点的要求,但需要对个别站点分布作适当调整,即减少上游站点,均化中游站点,增加下游站点,这样在流域上将形成一个能控制流域降雨时空分布特性和水库各种来水情况的新的信息采集网络。在新站网中,设有 15 个遥测雨量站;在中游的段家峡水库坝下、千阳水文站和冯家山水库大坝各建一个水位雨量站;系统中心设在冯家山水库枢纽管理处,另外在冯家山水库管理局和宝鸡市防汛办各设一个分中心。最后本着既要满足防洪报讯的基本要求,又便于建设和运行管理,并且尽量节省投资的精神,经信道测试,本系统的规模确定为 3: 1: 17,即系统由一个中心站,两个分中心站,一个中继站和 17 个遥测站所组成。水情信息遥测站网具体分布如图 2-2 所示。

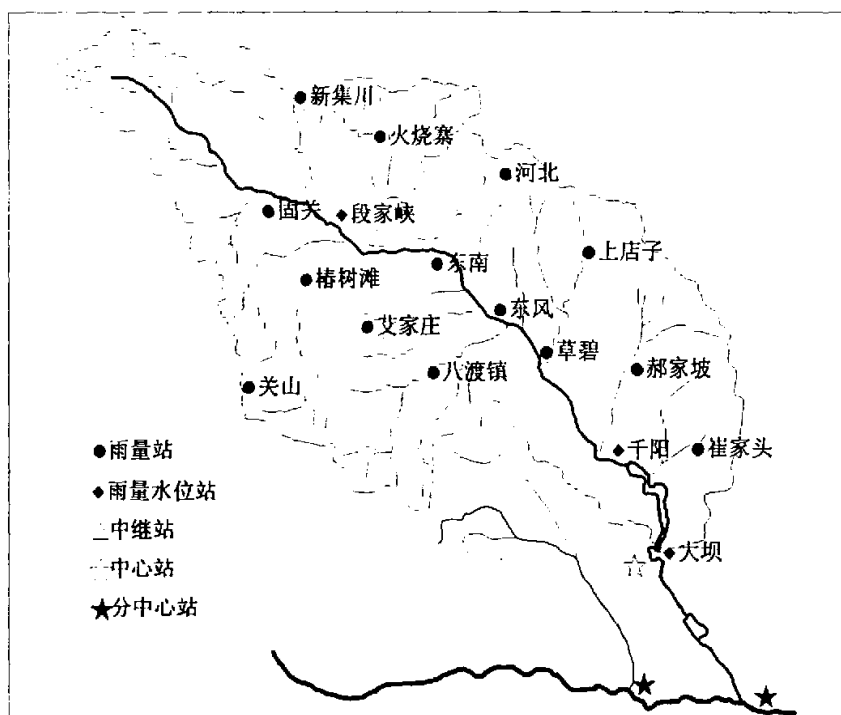


图 2-2 水情测报站网规划示意图

2.3 历史雨洪资料预处理

2.3.1 资料概况与选用

历史降雨径流资料是建立流域水文模型的基础,历史资料的质量直接决定着模型精度的高低,甚至是建模的成败。因此,降雨径流资料分析整理是建立洪水预报模型的一个重要环节。

冯家山水库坝址以上流域面积 3232km^2 。千阳水文站作为水库入库站控制流域面积 2935km^2 ,占全流域面积的 90.8% 。千阳水文站有 1976~1986 共计 11 年的流量观测资料,因此,预报方案拟建立千阳站控制流域的降雨径流关系,同时作为冯家山水库的入库洪水预报方案。

在 1976~1986 年期间,千河流域先后设有 15 个雨量测站,但是 1980 年以前雨量站点不全,同时 1980 年以后少数站点也有缺测现象。考虑到原站网的分布特点,预报方案将采用全部 15 个站点的降雨资料。对部分站点的缺测时段,利用其周围距离最近的三个测站的时段雨量的算术平均值进行插补。

根据《水文情报预报规范》对编制洪水预报方案所使用的资料的要求,并结合千河流域水文资料的实际情况,选定 25 场雨洪资料用于洪水预报方案的评定与检验,其中 1976~1983 年共 20 场资料用于模型精度评定,1984~1986 年共 5 场资料用于模型精度检验。

2.3.2 建模数据查错

编制预报方案或建立数学模型都必须以数据的正确可靠为前提条件。本次建模所用数据都来自国家水文年鉴,一般是人工录入的,这样在整编、刊印和录入过程中难免会有差错。在实现作业计算机化以后,解决好用计算机进行数据查错和改正也是一个不可忽视的重要环节。数据查错可采用以下几种方法:时段一日雨量对照,降雨空间对照,水位流量对照,过程线观察,以及降雨流量对照等。利用数据库技术和图形交互技术编制数据查错程序,将使建模数据和作业预报数据的整理和查

错工作变得快捷有效，而这也正是洪水预报系统不可缺少的一个重要组成部分。

2.3.3 雨洪资料时段化处理

千河流域已有的降雨径流资料均为人工观测，雨量观测时段从 1h 到 6h 不等，流量观测时段也随洪水涨落情况而变化。因此，雨量和流量的原始观测数据都不能被直接利用，而必须经过一定预处理，将已有雨洪资料转化为模型计算所需的等时段格式。

千河流域属于大陆性半干旱气候，汛期洪水陡涨陡落，因此模型计算要求计算时段应尽可能的短。另外，在水情自动测报系统建成后，观测次数将会增加，观测精度将会大大提高，观测结果更能反映雨洪过程的真实变化。为了适应将来联机预报调度的要求，拟将洪水预报和调度模型的时段长度设定为 1 小时。降雨和径流的时段数据均通过线性插值方法获得。整理后的场次洪水时段雨量与时段流量对应关系如图 2-3 所示。

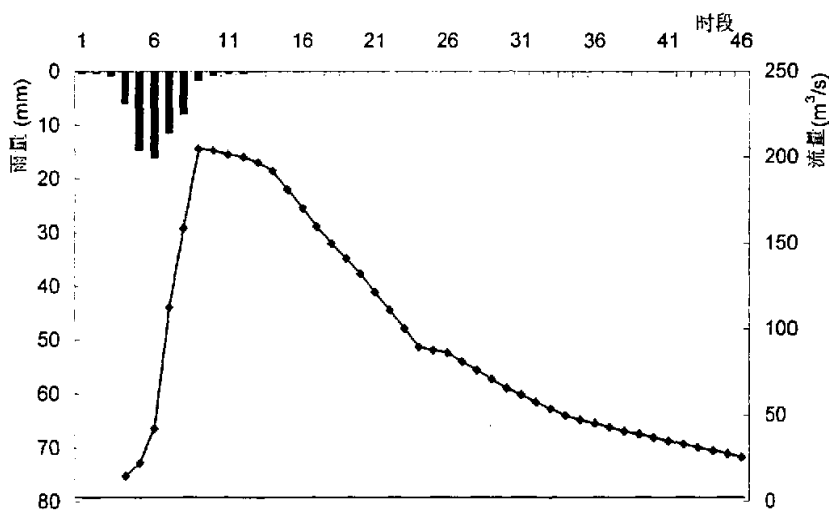


图 2-3 雨洪过程时段雨量与时段流量对照图

2.3.4 流域平均雨量计算

雨量站观测到的降雨量，一般只能代表该站附近较小范围内的降水情况。分析流域上的降雨径流关系时，需知道一个流域或地区一定时段内的平均降雨量。流域平均雨量的常用计算方法有三种：算术平均法，泰森多边形法和等雨量线法。

对于千河流域来说，原有雨量站多分布在流域中上游，求流域平均雨量宜采用泰森多边形法。该方法假定流域各处的雨量可由与其距离最近的雨量站代表，以更好地反映各站在计算流域平均雨量中的作用。千河流域泰森多边形如下图 2-4 所示：

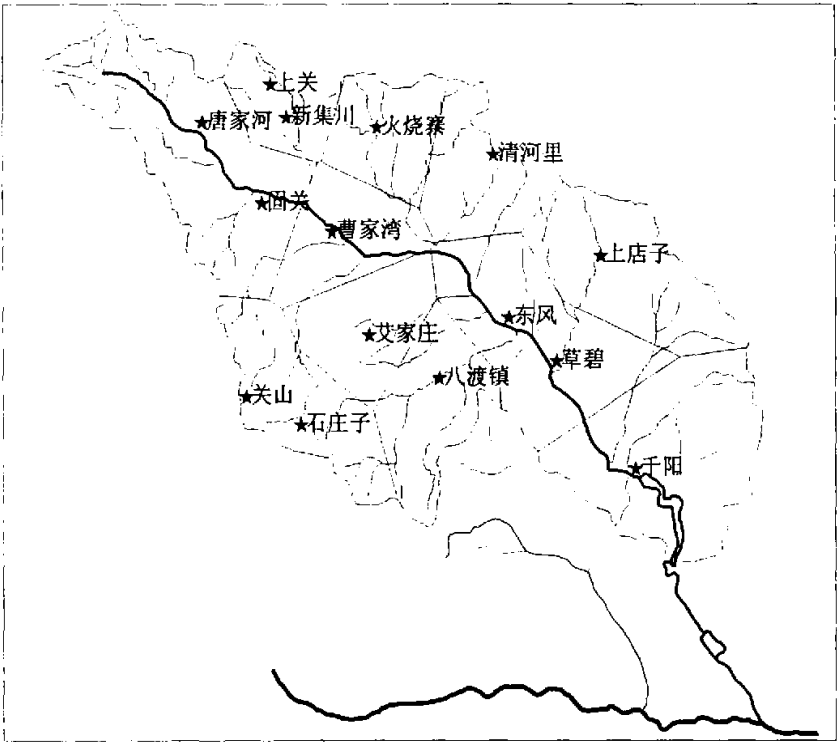


图 2-4 千河流域泰森多边形分区图

利用地理信息系统软件 MapInfo 强大的空间分析和计算功能，可以得出各泰森多边形的面积及权重，见表 2-2 所示。

表 2-2 各雨量站泰森多边形面积及权重

ID	单元 控制站	面积 (km ²)	权重 (%)	ID	单元 控制站	面积 (km ²)	权重 (%)
1	上关	55.145	1.9	9	清河里	220.191	7.5
2	唐家河	311.526	10.6	10	艾家庄	216.485	7.4
3	固关	217.254	7.4	11	东风	187.71	6.4
4	新集川	63.959	2.2	12	八渡镇	237.898	8.1
5	曹家湾	215.209	7.3	13	上店子	333.202	11.4
6	关山	110.091	3.8	14	草碧	227.645	7.8
7	石庄子	164.689	5.6	15	千阳	187.608	6.4
8	火烧寨	186.827	6.4		合计	2935	100

2.4 流域特性分析

2.4.1 流域退水曲线

分析降雨径流关系须取得各次洪水的降雨量和径流量，由于各次洪水首尾连续相接，需要用流域退水曲线进行洪水场次划分。目前已经有多种推求流域退水曲线的方法，其中常用的有指数曲线方程法和退水段重叠作图法。

指数曲线方程法假定流域蓄水量 W 与出口断面流量 Q 之间存在着线性关系： $Q = \beta \cdot W$ ，经变换后退水曲线可用下式表示： $Q_t = Q_0 e^{-\beta t}$ ，式中 β 为反映流域蓄泄关系的参数； Q_0 为选定时间或 $t=0$ 时的流量； Q_t 为 t 时刻的流量。由该式可见，退水流量是随时间呈几何级数而减退的。事实上， W 与 Q 的线性关系只是近似的，所以用实测资料求得的退水曲线并不与该式完全符合，用实测资料推求的 β 值，多不是常数。因此，实用上多用实际的退水曲线，而不用方程式来表示。而且，随着计算机

图形交互技术的发展,用实际的退水曲线分割洪水过程变得非常方便。

从历史洪水中选取 8 场后期无降雨的洪水,将其退水部分绘在同一张透明纸上。然后沿时间轴左右移动,使退水段的尾部重合,最后取下包线即为流域的标准退水曲线。千河流域的退水曲线如图 2-5 所示。

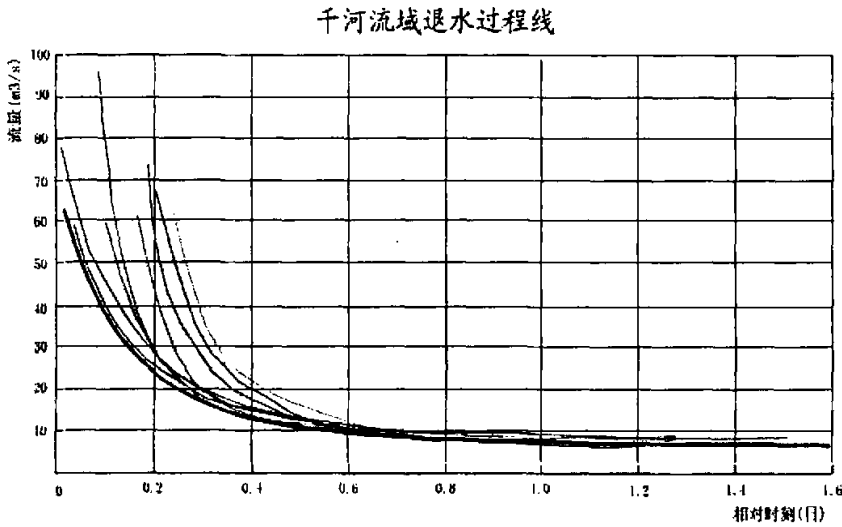


图 2-5 千河流域退水曲线

从上图可以看出,千河流域的洪水过程退水较快,符合干旱半干旱地区河流的洪水特性。河道基流稳定流量约为 $7.0\text{m}^3/\text{s}$ 。

2.4.2 雨洪特征值统计

根据洪水场次划分原则,利用上面的泰森多边形和流域退水过程线成果,可分别计算出各场洪水的面平均雨量、次洪量、径流深和径流系数,如表 2-3 所示:

表 2-3 千阳以上流域次洪水特征值统计表

洪号	次洪量 (m ³)	径流深 (mm)	面雨量 (mm)	径流 系数	洪峰 流量	洪峰出现时刻
760717	2938266.0	1.00	9.90	0.10	104.00	76-07-17 03:00
760828	206908625.2	70.50	219.00	0.32	337.00	76-08-28 18:00
760906	55775084.8	19.00	65.10	0.29	331.00	76-09-06 09:00
770706	51520343.8	17.55	97.70	0.18	295.00	77-07-06 14:00
770729	11674796.8	3.98	36.00	0.11	114.48	77-07-29 11:00
770802	3029088.3	1.03	1.70	0.61	115.00	77-08-02 04:00
780721	10250422.3	3.49	20.20	0.17	256.00	78-07-21 01:00
790721	14654824.0	4.99	20.20	0.25	516.71	79-07-21 23:00
790726	10198211.9	3.47	22.50	0.15	266.00	79-07-26 06:00
790813	4316945.4	1.47	13.20	0.11	178.00	79-08-13 06:00
800703	17913429.9	6.10	51.40	0.12	121.00	80-07-03 04:00
800803	36063168.6	12.29	63.50	0.19	225.00	80-08-03 04:00
800823	27645044.4	9.42	59.90	0.16	279.00	80-08-23 17:00
810724	1834780.8	0.63	10.60	0.06	95.00	81-07-24 23:00
810821	158383097.0	53.96	239.30	0.23	1180.00	81-08-21 20:00
810907	120036115.6	40.90	123.40	0.33	308.00	81-09-07 00:00
830817	61246362.2	20.87	116.60	0.18	251.00	83-08-17 09:00
830831	6145607.0	2.09	16.40	0.13	87.80	83-08-31 21:00
830907	22660414.7	7.72	48.50	0.16	182.42	83-09-07 19:00
830927	86154315.6	29.35	85.10	0.34	196.00	83-09-27 17:00
840623	39444154.2	13.44	82.70	0.16	102.00	84-06-23 16:00
840711	58662520.6	19.99	66.60	0.30	201.00	84-07-11 10:00
840909	55257068.2	18.83	62.80	0.30	207.00	84-09-09 19:00
850816	3760461.5	1.28	14.10	0.09	272.00	85-08-17 00:00
860709	43316479.7	14.76	60.20	0.25	205.00	86-07-09 17:00

2.4.3 洪水预报模型选用

从上表成果可以看出, 千河流域降雨径流关系具有干旱地区降雨径流关系的共性, 即径流系数小, 且不稳定。场次洪水径流系数最小值为 0.06 (洪号 810724), 最大值为 0.61 (洪号 770802), 两者相差达到 10 倍, 这说明千阳流域降雨径流关系不太显著, 非线性因素影响较大, 而这对建立洪水预报模型将会产生十分不利的影响。因此, 冯家山水库的洪水预报模型的选择非常重要, 只有选择适合该流域特征的洪水预报模型, 才有可能作出合格的预报方案。

干旱半干旱地区流域产流的空间分布、影响因素、模型选用等问题十分突出, 近 30 年来, 国内外水文学者在这方面作了大量工作, 并取的了一定成果。然而系统模型在半干旱地区应用很少, 由于系统模型具有结构简单、适应性强、便于实时校正和联机自动测报等优点, 本文将尝试将系统水文模型应用于冯家山水库入库洪水预报, 探索一条洪水预报建模和系统开发的新途径。

3 实时洪水预报模型研究

3.1 系统理论与实时洪水预报

系统理论包括系统论、信息论和控制论，它是从不同侧面揭示对象之间相互联系、相互作用的内在运动规律的综合性科学。

对于客观系统，建立数学模型需依靠对于系统结构、系统行为的物理机制的认识来确定其数学关系。显然这并不完全是系统方法的任务，系统方法的特长在于它能对于系统内部结构、物理机制不太清晰的情况进行处理。系统建模、识别、预测、模拟都有着相当成熟的技术，而这也是当前在洪水预报上应用最为广泛的技术。

实现对自然系统正确建模的前提，是正确地选择模型的形式，它主要地依赖对于客观系统的物理机制的认识。模型形式确定后，选择适合的数学方法（包括最优化准则），实现系统数学模型参数的最优化率定，是系统建模的核心环节。系统理论提供了实现上述分析、率定的理论和方法，这就是“系统识别”。

系统理论向洪水预报学科的渗透是从 50 年代开始的，它经历了一个从个别方法借用逐步到理论体系引入的过程。60 年代出现卡尔曼滤波技术后，系统理论处理动态系统和进行实时校正的技术从理论到方法都趋于成熟。对于水文预报科学来说，借鉴系统理论在动态模型、实时校正领域的新理论、新技术，是迅速提高洪水预报技术水平的一条捷径。随着各种系统科学方法的引入，洪水预报技术迅速地向动态化、实时化方向发展。

实时洪水预报是指在联机水情自动测报系统中使用实时数据进行洪水预报，它应满足洪水预报的实时性、精度和预见期要求，能根据实时信息自动地进行某种合理的校正，以提高预报精度。科学合理的洪水预

报模型和实时校正模型是实现洪水实时预报调度的关键。

3.2 系统水文模型

目前,系统理论与系统识别的研究已经比较成熟,用水文系统分析法建立的系统水文模型为洪水预报提供了一种便捷可行的途径。对于水文系统来说,非线性是客观存在的性质;但是随着流域面积的增大,流域的线性系统特性也越来越明显,这是线性模型得以应用的根本条件。以线性动态模型模拟时变系统,以及将非线性系统作线性处理,都是逼近非线性系统的有效途径。

3.2.1 总径流线性响应模型

总径流线性响应模型 TLR (Total Runoff Linear Response Model) 是近几年发展起来的以多元回归方法为基础的水文系统类模型。该模型结构简单,对资料适应性较强,并具有反映流域特性的参数。

把流域视作线性时不变系统,则 TLR 模型可用下列数学式表达

$$Q(t) = \int_0^t i(t-\tau)c(\tau)d\tau \quad (3-1)$$

将式 (3-1) 写成离散型数学表达式为

$$Q_r = \sum_{j=1}^L i_{r-j+1}c_j = i_r c_1 + i_{r-1}c_2 + \cdots + i_{r-L+1}c_L \quad (3-2)$$

式中: Q_r —第 r 时段流域出流量 ($r=1,2,\dots,n$);

i_r —第 r 时段流域平均毛雨量,系统输入值;

c_j —系统响应函数 ($j=1,2,\dots,L$);

L —系统记忆长度,反映流域调蓄能力。

考虑到系统线性假定的不完善和观测资料的误差,在上式中加入残差(扰动)项,即为

$$Q_r = \sum_{j=1}^L i_{r-j+1}c_j + V_r \quad (3-3)$$

若系统的初始状态未知, 进行计算时流量系列 $Q(t)$ 的最初 $(L-1)$ 个值要忽略。用矩阵表示上式为

$$\begin{bmatrix} Q_L \\ Q_{L+1} \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L & i_{L-1} & \cdot & i_1 \\ i_{L+1} & i_L & \cdot & i_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ i_n & i_{n-1} & \cdot & i_{n-L+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_L \\ V_{L+1} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

式中, n 为系统输出总长度, 其它符号意义同前。令矩阵 Q , I , C 和 V 分别表示系统输出、输入、响应函数和残差项矩阵, 则式 (3-4) 可写成以下形式

$$Q = I \cdot C + V \quad (3-5)$$

式 (3-5) 的响应函数可由最小二乘法求得, 其最小二乘解为

$$\hat{C} = [I^T I]^{-1} I^T Q \quad (3-6)$$

如一次降雨过程的时段雨量为 $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$, 流量过程为 $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$, 则可由式 (3-6) 求得响应函数 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 。同样可以由降雨系列和响应函数来推求流量系列。

3.2.2 多输入单输出 TLR 模型

大中型流域的非线性因素中除了下垫面之外, 当首推流域上降雨时空分布的不均匀性。在以超渗产流为主的干旱半干旱地区, 降雨时空分布的不均匀性对流域产汇流过程的影响尤为显著。尽量减小这些因素的影响是建立洪水预报模型的关键。由上节可知, TLR 模型将整个流域的平均面雨量作为系统输入, 寻求流域平均面雨量与径流的关系。事实上, 洪水过程的峰值和峰现时间与降雨空间分布和暴雨中心位置密切相关。因此, 可根据测站分布情况将流域分成单元或子流域, 将各单元雨量作为输入, 根据历史资料率定流域内各单元的响应函数。在未见同类模型名称的情况下, 笔者将多输入单输出 TLR 模型暂称为总径流多单元线性响应模型 TULR (Total Runoff Units Linear Response Model)。

在多输入单输出的条件下, TULR 模型寻求各输入相应的响应函数的基本思想及数学方法与单输入单输出 TLR 情况相仿, 只是要相对复杂些。假定各输入与输出仍然存在线性关系, 类似式 (3-3) 则有

$$Q_r = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{L(j)} i_{r-k+1}^{(j)} c_k^{(j)} + V_r \quad (3-7)$$

式中: J 为输入系列个数, 即流域内单元的个数; $L(j)$ 为相应于第 j 个单元的系统记忆长度; $C(j)$ 为相应于第 j 个单元的响应函数; V_r 为扰动项。式 (3-7) 的矩阵表达式为

$$Q = I^{(1)}C^{(1)} + I^{(2)}C^{(2)} + \dots + I^{(J)}C^{(J)} + V \quad (3-8)$$

式中: Q 为输出系列的列向量; $I(j)$ 为第 j 个输入系列组成的矩阵; $C(j)$ 为第 j 个输入系列相应的响应函数; V 为随机误差列向量。令 $I = [I^{(1)}, I^{(2)}, \dots, I^{(J)}]$, $C^T = [C^{(1)T}, C^{(2)T}, \dots, C^{(J)T}]$, 则式 (3-8) 变换为

$$Q = I \cdot C + V \quad (3-9)$$

同理可得式 (3-9) 的最小二乘解为

$$\hat{C} = [I^T I]^{-1} I^T Q \quad (3-10)$$

3.2.3 总径流非线性响应模型

为考虑雨强对降雨径流关系的影响, 本模型采用某种标准的暴雨强度 (或时段雨量) 为“门槛值”(临界值), 将降雨系列分阶计算; 再把流域划分成若干子流域, 分别率定响应函数, 然后推求流域出口总流量过程线, 从而建立起高阶非线性响应数学模型, 即总径流非线性响应模型。

多方研究表明, 降雨径流间的非线性关系随降雨强度的增大而愈趋明显。它们之间的关系可用图 3-1 中 $Q=f(i,c)$ 曲线表示。图中直线表示 TLR 模型的降雨径流关系。而非线性响应模型则试图以多段折线逼近 $Q=f(i,c)$ 曲线, 以求用离散型表达式较精确地表示该曲线, 如图 3-2 所示。图中

折点的暴雨强度 i_a 即为降雨系列分阶段的“门槛值”。

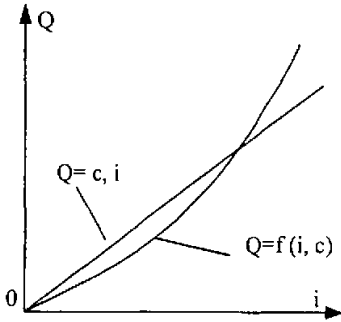


图 3-1 系统输入与输出之间的关系

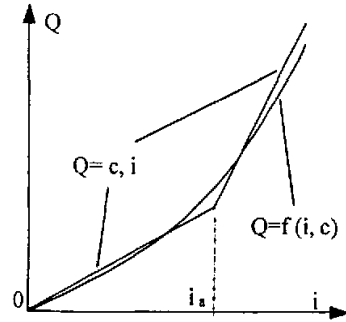


图 3-2 用折线逼近曲线示意图

以二阶模型为例, 假设降雨系列分阶的临界值为 i_a 。若第 r 时段的雨强为 i_r , 当 $i_r \leq i_a$ 时, 则 $i_{1r} = i_r$, $i_{2r} = 0$; 否则 $i_{1r} = 0$, $i_{2r} = i_r$ 。于是第 r 时段系统的输出为

$$Q_r = \sum_{j_0=1}^{L_0} i_{1,(r-j_0+1)} c_{1,j_0} + \sum_{j_1=1}^{L_1} i_{2,(r-j_1+1)} c_{2,j_1} + V_r \quad (3-11)$$

上式便是单输入单输出 TNLR 模型的数学表达式。由此可以看出 TLR 只是 TNLR 的一阶表达式。上式的矩阵表达式为 $Q = I_1 C_1 + I_2 C_2 + V$ 。写成分块矩阵形式为

$$Q = (I_1 : I_2) \cdot (C_1 : C_2)^T + V \quad (3-12)$$

令 $I = [I_1, I_2]$, $C = [C_1, C_2]^T$, 则式 (3-12) 简写为

$$Q = I \cdot C + V \quad (3-13)$$

同理可得式 (3-13) 的最小二乘解为

$$\hat{C} = [I^T I]^{-1} I^T Q \quad (3-14)$$

从理论上讲, 降雨系列划分的子系列越多, 即模型阶数越高, 折线越逼近曲线, 计算成果精度越好。但在实际运算中高阶模型的计算工作量极大, 很不经济。一般采用二阶模型便可达到计算精度要求。本次计算便选用单输入单输出二阶模型。临界值 i_a 是控制模型阶数的数值标准,

反映流域的降雨特性，可根据流域产流特性由人机联合优选确定。

3.3 AR 自回归校正模型

受众多因素的影响，洪水过程的变化带有不确定性，由实测降雨和径流资料反求的模型参数只能反映一个流域径流形成的平均情况。由于模型输入信息的观测误差、模型结构对实际水文现象概括的不完备性等原因，洪水预报方案用于实际作业预报时，往往会出现洪水预报结果偏离实际洪水过程的情况。洪水实时预报就是不断地根据现场观测的水文数据与模型预报产生的预报误差信息，运用现代系统理论知识和技术及时地校正和改善水文预报模型参数或水文预报值，使洪水预报误差尽可能减小，预报结果更接近观测值。

目前用于实时校正的方法有递推最小二乘法、卡尔曼滤波法、误差自回归法和交互式校正技术等。一般既可以通过校正状态变量或输入误差来校正模型输出的误差，也可以在确定性模型的基础上，直接对模型输出误差进行校正。后一种途径概念清晰、符合实际，因为在雨洪对应关系中，确定性部分是主要的，实时校正只能是作为确定性预报模型的补充。因此，本文将误差自回归模型作为冯家山水库洪水预报的实时校正模型。

依时序变化，模型计算值和实测值之差构成一个时间序列，称为误差序列。若序列中的各值都是相关的，即按时间顺序排列的各误差之间具有相关关系，便可以利用这个时间序列进行未来值的预测。进行预测首先要建立自回归模型，误差自回归模型描述的过程为：误差序列的当前值 $Q(t)$ ，可以由这个过程 p 个过去值的线性和再加上一个干扰量 $a(t)$ 来表示

$$Q(t) = \sum_{i=1}^p Q(t-i)\theta_i + a(t) \quad (3-15)$$

上式即为 p 阶自回归模型，记为 $AR(p)$ 。式中： p 为模型阶数； $\theta_i (i=1,2,\dots,p)$

为 p 阶自回归系数。式 (3-15) 用矩阵表示如下

$$\begin{bmatrix} Q(t) \\ Q(t+1) \\ \vdots \\ Q(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q(t-1) & Q(t-2) & \cdots & Q(t-p) \\ Q(t) & Q(t-1) & \cdots & Q(t-p+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q(n-1) & Q(n-2) & \cdots & Q(n-p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

上式记为 $Q_t = Q_{tp} \cdot \theta$ ，其离线识别的最小二乘解为：

$$\hat{\theta} = (Q_{tp}^T Q_{tp})^{-1} Q_{tp}^T Q_t \quad (3-17)$$

如果一次流量过程的计算值与实测值构成的误差序列为 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ ，则可由上式求得自回归系数 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ 。同样可以根据实际发生的流量误差序列和自回归系数来递推计算其后的流量误差序列，将预报误差叠加到预报流量上，从而完成洪水过程的实时预报和校正。

3.4 模型参数率定

确认所估计的参数是“最优”的最小二乘准则是：用估计的参数还原计算系统的输出估计值与实测值的误差平方总和（残差平方和）达到最小。相应的估计参数即为最小二乘估计值，最小二乘参数估计值应满足收敛性和有效性原则。系统水文模型的参数虽然不象概念模型那样具有明确的物理意义，但是在某种程度上它们仍然反映了流域特性及降雨径流特性。因此，模型参数须由人机联合优选确定。

应用 TLR 和 TNLR 模型由降雨推求洪水，所需率定的参数主要有三个：记忆长度 L 、响应函数 C 和非线性雨强临界值 i_s 。记忆长度 L 取决于流域的大小和流域蓄水能力，借助于单位线的概念来理解，一个中等流域的记忆长度大约是十来小时或几天；临界值 i_s 是控制模型分阶的数值，反映降雨强度对流域产汇流的影响；响应函数则反映了流域的降雨径流特性和关系。

3.4.1 TLR 模型参数率定

选定 1976~1983 年共 20 场雨洪资料用于模型参数率定。将所有 20 场雨洪资料组合为一连续系列，分别假定不同的流域记忆长度 $L=20,30\ldots90$ ，根据最小二乘准则得出以上不同记忆长度下的响应函数，如图 3-3 所示。

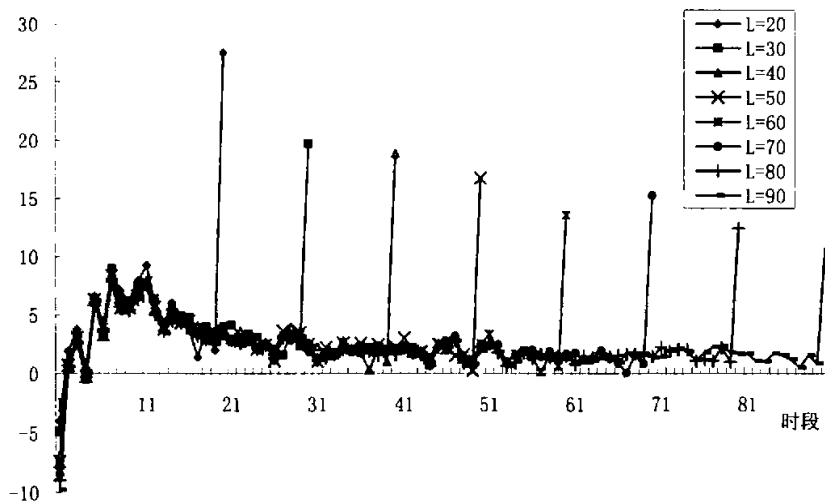


图 3-3 TLR 模型不同记忆长度下的响应函数

从图 3-3 可以看出，不同记忆长度下的响应函数的前端基本吻合，反映了 TLR 模型所描述降雨径流关系的显著性。因为响应函数是按严格的数学优化方法得出，所以系统脉冲响应有一定波动，并出现了“前俯后翘”现象。脉冲响应中的负值均出现在第 1 时段，在某种程度上反映了前期土壤含水量对产汇流的影响；尾部仅有最后 1 个时段翘起，可理解为形成量小而稳定的地下径流量。以上再次表明了系统水文模型可以恰当且合理地描述流域产汇流，系统理论即为洪水预报科学的方法论基础。

系统记忆长度 L 的大小取决于流域的大小和流域的蓄水能力。根据最小预测误差准则，以残差平方和作为评判标准进行模型参数优选，并

结合千河流域的降雨径流特性，将 TLR 模型的记忆长度 L 取为 60。该记忆长度下的响应函数如下表 3-1 所示。

表 3-1 TLR 模型记忆长度为 60 时的响应函数

ID	C_i	ID	C_i	ID	C_i	ID	C_i
1	-7.688	16	3.945	31	1.376	46	2.841
2	0.643	17	3.556	32	1.489	47	2.997
3	2.965	18	2.794	33	1.548	48	1.562
4	-0.150	19	2.837	34	2.010	49	1.236
5	6.184	20	3.209	35	1.948	50	2.571
6	3.308	21	2.918	36	1.793	51	3.352
7	8.076	22	2.896	37	2.258	52	2.139
8	5.724	23	2.880	38	2.032	53	0.983
9	5.630	24	2.209	39	2.042	54	1.680
10	6.732	25	2.318	40	2.119	55	1.903
11	7.615	26	1.743	41	2.001	56	1.423
12	5.317	27	3.220	42	2.245	57	0.149
13	3.937	28	3.158	43	1.927	58	1.602
14	4.836	29	3.309	44	1.296	59	0.615
15	4.519	30	2.311	45	2.588	60	13.596

3.4.2 TULR 模型参数率定

在 TLR 模型基础上，TULR 模型将系统的单输入变为多输入，即将流域划分为若干子流域，分别计算各子流域的面平均雨量，以考虑流域降雨的空间分布。针对千河流域的自然地理特征和降雨特性，将其划分为上游、中游和下游三个子流域，各子流域的具体情况如下表 3-2 所示。

选定 1976~1983 年共 20 场雨洪资料用于模型参数率定。将所有 20 场雨洪资料组合为一连续系列，由表 2-2 和表 3-2 成果分别计算出各子流域的时段雨量，作为系统输入，系统输出为千阳站的观测流量。以残差平方和作为评判标准进行模型参数优选，并结合千河流域特性，将

TULR 模型各子流域的记忆长度 L 分别取为 80、60 和 40。根据式 (3-10) 即可得到上游、中游及下游三个子流域对应记忆长度下的响应函数, 见附表 3-1 所示。

表 3-2 子流域划分状况表

子流域	子流域面积 (km^2)	子流域内各单元的面积比重 (%)
上游	647.884	上关: 8.51; 唐家河: 48.08; 固关: 33.53; 新集川: 9.87
中游	1113.492	曹家湾: 19.33; 关山: 9.89; 石庄子: 14.79; 火烧寨: 16.78; 清河里: 19.77; 艾家庄: 19.44
下游	1174.063	东风: 15.99; 八渡镇: 20.26; 上店子: 28.38; 草碧: 19.39; 千阳: 15.98
合计	2935.44	(上游 4 个, 中游 6 个, 下游 5 个)

3.4.3 TNLR 模型参数率定

在 TLR 模型基础上, TNLR 模型采用某一标准的暴雨强度为“阈值”将系统的降雨输入分阶计算, 分别率定响应函数, 以考虑雨强大小对产汇流的非线性影响。从理论上讲, 降雨系列划分的子系列越多, 即模型阶数越高, 图 3-2 中的折线越逼近曲线, 模型的模拟效果越好, 然而模型计算量也随之剧增。在此将采用二阶模型, 即采用某一降雨强度将降雨过程分为两个系列来计算。

选定 1976~1983 年共 20 场雨洪资料用于模型参数率定。将所有 20 场雨洪资料组合为一连续系列, 作雨强频率分布曲线并分析降雨特性, 确定大小雨强的临界值 i_a 为 3mm。然后以模型的残差平方和为评判标准, 并结合流域具体情况, 大小雨强相应的记忆长度分别取为 80 和 40。在模型结构和参数相近的情况下, TLR 和 TNLR 两种模型的模拟结果具有一定可比性。TNLR 模型的响应函数见附表 2。

3.4.4 AR 模型参数率定

对于以上洪水预报模型, 不难发现预报流量与实测径流所形成的误差序列呈现出一定的自相关特性, 因此可以建立误差序列随机模型并用之进行预测。在模型识别问题中, 我们希望所选定的模型能反映序列的统计变化特性, 即在尽可能好地拟合序列的同时, 又要使模型参数尽可能少。对于 AR 模型来说, 模型阶次越高, 拟合效果越好 (拟合残差越小); 然而, 模型阶次升高意味着参数增多, 在信息量一定的情况下参数的估计误差越大, 获得的模型越不可靠。因此, 在识别模型时就必须兼顾这两方面的要求。基于这一思路, 日本人赤池 (Akaike) 提出了确定 AR(p)模型阶数 p 的 AIC 准则, 准则函数为

$$AIC(p) = n \cdot \ln(\sigma_e^2) + 2p \quad (3-18)$$

式中的 n 为实测序列的长度; σ_e^2 为残差的方差。根据不同的阶数 p , 计算出相应的 AIC(p), 使 AIC 达到最小值的相应阶数便为所求。

将 TLR、TULR 和 TNLR 模型求得的响应函数与降雨矩阵相乘, 得拟合流量值。拟合流量系列和实测流量系列之差构成误差序列, 根据以上参数率定方法, 分别求得 4 阶 AR 模型的参数, 如表 3-3 所示

表 3-3 AR(4)模型自回归系数表

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
TLR 模型	1.12	-0.05	-0.3	0.21
TNLR 模型	1.12	-0.06	-0.3	0.21
TULR 模型	1.02	0.07	-0.35	0.22

3.5 模型评定与检验

3.5.1 评定检验方法及成果

洪水预报方案建立后, 应进行精度评定和检验, 衡量方案的可靠程度, 确定方案等级。区分“率定期”和“检验期”的做法是借鉴系统科

学的经验，特别是采用最优化数学方法率定参数时更为必要。因为数学优化只要求目标函数（即总体误差）最小，但有时也可能出现“虚假拟合”现象。防止出现这种现象的有效措施之一就是在率定参数时，留出部分资料不参加参数率定，只用于模型检验。《水文情报预报规范》规定，精度评定必须用参与洪水预报方案编制的全部资料，精度检验应引用未参加洪水预报方案编制的资料（不少于 2 年）。

模型计算成果的可靠程度采用国际通用的确定性系数 DC 来表示。确定性系数用于综合评判洪水预报过程与实测过程之间的吻合程度，按下式计算：

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_c(i) - Q_o(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - \overline{Q_o}]^2} \quad (3-19)$$

式中：DC 为确定性系数（取 2 位小数）； $Q_o(i)$ 为实测值； $Q_c(i)$ 为预报值； $\overline{Q_o}$ 为实测值的均值；n 为资料序列的长度。

针对以上各模型及参数，利用参与模型参数率定的 20 场雨洪资料（1976～1983 年）和未参与参数率定的 5 场雨洪资料（1984～1986 年），分别进行模型评定和检验，结果如表 3-4 所示。以确定性系数 $DC \geq 80\%$ 作为成果是否合格的评判标准，三种实时洪水预报方案的精度评定和检验结果如表 3-5 所示。

表 3-4 确定性系数—实时洪水预报模型评定与检验成果表

	洪号	TLR+AR	TULR+AR	TNLR+AR
模型评定	760717	70.6	57.0	68.1
	760828	99.6	99.4	99.3
	760906	99.2	98.3	98.5
	770706	97.1	96.4	97.4
	770729	94.0	87.2	90.6
	770802	88.7	85.6	84.7
	780721	68.7	71.6	68.0
	790721	83.6	85.5	83.5
	790726	91.3	87.8	91.0
	790813	83.1	80.9	83.7
	800703	96.2	90.1	92.2
	800803	98.5	97.3	96.6
	800823	97.3	97.4	97.0
	810724	79.5	78.5	81.2
	810821	98.9	98.9	99.0
	810907	99.7	99.2	99.2
	830817	99.1	98.5	98.6
	830831	83.1	85.0	81.0
	830907	99.4	98.8	99.0
	830927	99.5	98.9	98.9
模型检验	840623	97.7	90.5	95.4
	840711	99.2	98.7	99.1
	840909	99.5	98	98.2
	850816	70.8	72.3	68.2
	860709	99.1	97.9	97.4
评定及检验 结果	评定合格率	85%	85%	90%
	检验合格率	80%	80%	80%
	总合格率	82.5%	82.5%	85%

表 3-5 模型评定及检验成果表

	TLR+AR	TULR+AR	TNLR+AR
评定合格率	85%	85%	90%
检验合格率	80%	80%	80%
总合格率	82.5%	82.5%	85%
方案精度等级	乙	乙	甲

从以上结果可以看出, TLR 模型与 TULR 模型的模拟与预报效果基本相同, 预报方案等级均为乙等; 而考虑雨强非线性因素的 TNLR 模型的精度要略高于前两种, 预报方案等级为甲等。以上三种预报方案都可用于实际预报作业。

通过划分子流域的方法将系统的单输入变为多输入, 并没有显著提高模型精度, 这与降雨量的观测精度有一定关系; 另外, 流域自然地理特性和降雨的空间变异性不大, 其中的各子流域对降雨有着相似的脉冲响应, 也会导致这样的结果。而通过引入非线性雨强“临界值”将降雨系列分阶计算, 考虑了雨强的非线性因素, 总径流非线性响应模型因此取得了相对较好的效果, 其精度略高于另外两种模型。

3.5.2 滚动预报与递推校正

模型的率定和检验虽然使用了不同时期的历史水文资料, 但它们都不包含预见期的概念。模型检验时使用了预见期内的全部降水资料, 因而容易获得较好的结果。而将模型用于预报时, 我们并不知道发布预报时刻之后的任何雨量和流量信息, 故在降雨停止之前实时预报的精度将低于模型评定和检验精度。实际预报作业时, 实时洪水预报模型将会根据流域上的降雨情况进行逐时段滚动预报, 并根据当时的实测流量信息对预报结果进行递推校正, 使其后的预报结果更符合客观实际, 以提高预报精度。冯家山水库洪水实时预报模型的工作原理如图 3-4 所示。

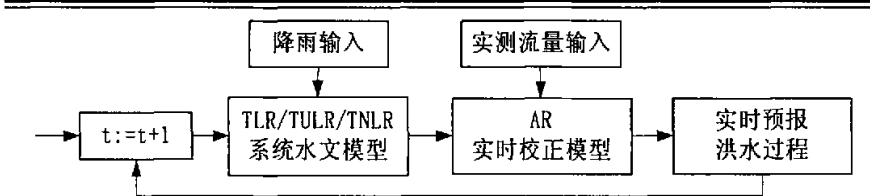


图 3-4 洪水实时预报模型滚动预报示意图

下面以 TLR 模型为例，对 860709 号洪水进行滚动预报和校正，结果列于表 3-6 中，作图如下图 3-5 所示。

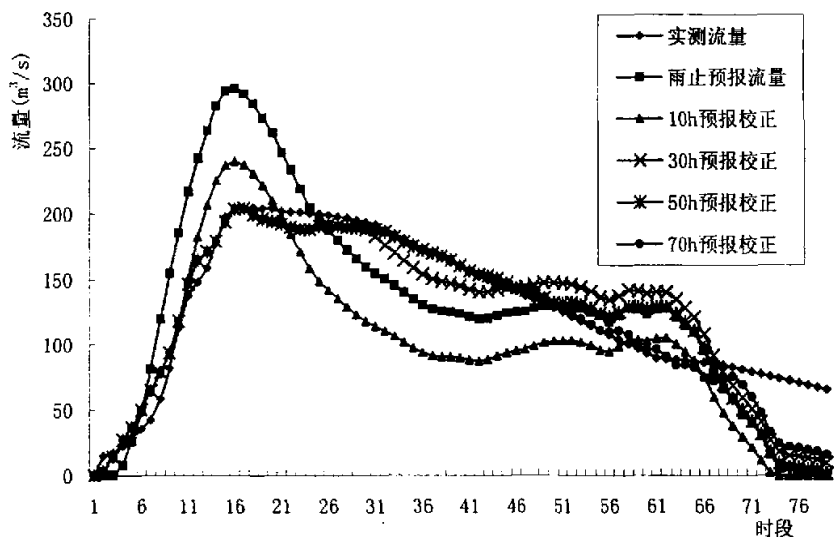


图 3-5 滚动预报校正成果图（洪号 860709）

由上图可以看出，实时预报模型在每一时段都会根据已经发生的降雨作出预报，并根据当前时刻已经观测到的流量对预报结果进行递推校正。另外在降雨停止之前，随着时间的推移不断有新的降雨产生，预报流量过程逐渐逼近实际洪水过程，预报精度逐步提高。因此，将洪水实时预报模型应用于联机自动测报系统中，可有效地保证洪水预报的预报精度和预见期，为水库防洪调度决策提供科学的依据。

表 3-6 实时预报模型滚动预报校正成果表 (洪号 860709)

ID	实测 流量	计算 流量	10h 校正	30h 校正	50h 校正	70h 校正	ID	实测 流量	计算 流量	10h 校正	30h 校正	50h 校正	70h 校正
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41	156.1	121.4	88.2	142.8	156.6	156.6
2	15.0	0.0	3.6	3.6	3.6	3.6	42	152.9	119.7	87.2	140.7	154.0	154.0
3	17.7	0.4	14.3	14.3	14.3	14.3	43	149.9	120.1	88.4	140.8	152.9	152.9
4	22.5	8.0	27.4	27.4	27.4	27.4	44	146.9	122.6	91.1	142.5	151.0	151.0
5	29.1	26.3	36.8	36.8	36.8	36.8	45	143.9	124.5	93.6	143.9	147.6	147.6
6	35.8	48.5	50.0	50.0	50.0	50.0	46	141.0	125.0	95.0	144.2	143.9	143.9
7	42.4	81.0	64.7	64.7	64.7	64.7	47	138.0	125.7	96.5	144.8	141.7	141.7
8	58.5	119.5	78.7	78.7	78.7	78.7	48	135.0	127.9	99.0	146.3	139.8	139.8
9	82.0	154.8	93.3	93.6	93.6	93.6	49	132.0	129.9	101.4	147.7	136.1	136.4
10	112.7	185.7	118.0	118.1	118.1	118.1	50	128.5	130.1	102.5	147.9	132.7	132.1
11	138.0	216.7	151.0	146.9	146.9	146.9	51	125.0	129.8	102.9	147.4	131.9	128.5
12	148.5	242.4	182.5	164.8	164.8	164.8	52	121.5	129.7	102.9	146.5	132.6	124.8
13	159.0	263.6	206.8	171.1	171.1	171.1	53	118.0	127.8	101.6	144.3	131.1	119.9
14	178.5	282.8	225.4	179.3	179.3	179.3	54	114.5	124.4	99.3	141.2	128.2	115.6
15	198.0	294.1	237.1	193.9	193.9	193.9	55	111.0	121.9	95.7	136.7	123.8	110.9
16	205.0	295.9	240.3	203.9	203.9	203.9	56	107.5	117.3	94.5	134.6	121.9	109.8
17	205.0	292.0	237.6	204.3	204.3	204.3	57	103.9	122.0	98.1	137.4	124.9	110.8
18	205.0	284.7	231.0	199.4	199.4	199.4	58	100.4	128.1	103.4	141.9	129.7	107.9
19	204.0	273.5	221.8	196.1	196.1	196.1	59	96.9	126.9	103.7	141.4	129.5	99.3
20	204.0	261.9	210.1	194.1	194.1	194.1	60	93.3	123.8	102.6	139.6	127.9	96.1
21	202.0	247.0	197.6	192.2	192.2	192.2	61	89.8	126.8	104.6	140.9	129.4	96.4
22	201.5	233.8	184.3	189.8	189.8	189.8	62	89.1	128.0	104.9	140.4	129.2	90.8
23	201.0	219.2	171.0	188.2	188.2	188.2	63	88.4	120.5	100.1	134.9	123.9	84.3
24	200.5	205.0	158.2	188.1	188.1	188.1	64	87.7	114.3	94.5	128.6	117.8	84.5
25	200.0	194.5	148.6	190.5	190.5	190.5	65	87.0	109.6	87.7	121.1	110.5	82.5
26	199.0	187.4	141.8	191.7	191.7	191.7	66	86.3	95.3	75.3	108.0	97.6	74.9
27	198.0	179.9	135.6	190.7	190.7	190.7	67	86.2	78.3	59.5	91.6	81.5	71.8
28	197.0	172.4	129.1	189.7	189.7	189.7	68	84.5	66.4	47.8	79.2	69.3	75.5
29	195.3	165.7	123.1	190.0	189.5	189.5	69	82.8	58.2	38.0	68.8	59.0	75.6
30	193.7	159.6	118.0	187.9	188.9	188.9	70	81.1	46.3	29.6	59.7	50.2	69.3
31	192.0	154.8	114.1	182.7	188.2	188.2	71	79.4	40.3	21.5	51.1	41.8	60.0
32	188.4	150.8	110.6	176.2	186.2	186.2	72	77.7	30.6	11.6	41.1	32.0	47.9
33	184.8	145.7	106.5	170.4	182.5	182.5	73	75.9	16.3	2.5	27.4	18.4	33.5
34	181.2	140.3	101.9	164.6	178.3	178.3	74	74.2	5.6	0.0	18.3	9.5	24.7
35	177.6	135.1	97.5	159.1	175.3	175.3	75	72.5	6.3	0.0	15.4	6.8	22.0
36	174.0	130.6	93.7	154.3	172.4	172.4	76	70.8	4.1	0.0	14.8	6.4	21.4
37	170.4	127.4	91.4	150.7	170.0	170.0	77	69.1	2.8	0.0	13.4	5.1	19.8
38	166.9	126.0	90.6	148.7	167.7	167.7	78	67.4	2.8	0.0	12.5	4.4	18.8
39	163.3	125.2	90.5	147.4	164.7	164.7	79	65.7	0.0	0.0	9.8	1.9	16.0
40	159.7	124.0	89.7	145.4	160.5	160.5							

4 水库洪水调度方案研究

4.1 水库防洪调度概况

4.1.1 水库防洪调度的任务

水库是防洪系统的重要组成部分，是调控洪水的重要防洪工程措施；水库防洪调度及其相关的水情自动测报是防洪非工程措施的重要组成部分。只有清楚地了解水库在流域防洪体系中的地位和作用，才能做到着眼于全局，搞好水库的防洪调度工作。水库防洪调度的任务是：

（1）以设计阶段制定的防洪调度方式为依据进行洪水调节，在发生水库安全标准设计洪水时，保障大坝安全；在发生下游防洪标准设计洪水时，保护下游防护对象的安全。

（2）若遭遇超过大坝安全标准的洪水，应力求在保证大坝安全的前提下，尽量减轻下游的洪水灾害。

（3）遇一般洪水，应在执行防洪调度规则的前提下，合理调度，充分发挥水库的综合利用效益。

4.1.2 水库概况及防洪调度现状

冯家山水库是以供水为主，兼作防洪、发电、养殖、旅游等综合利用的大型水利工程。水库枢纽工程由拦河大坝、泄洪洞、溢洪洞、非常溢洪道、输水洞和电站等工程组成，其中拦河大坝、泄洪洞、溢洪洞和输水洞为二级建筑物，非常溢洪道和电站为三级建筑物。水库按百年设计，千年校核，两千年一遇洪水保坝标准设计，其中百年设计洪峰流量 $3400\text{m}^3/\text{s}$ ，千年校核洪峰流量 $7200\text{m}^3/\text{s}$ ，两千年保坝洪峰流量 $8260\text{m}^3/\text{s}$ 。

水库自 1974 年蓄水投运以来，在汛期本着兴利、防洪、排沙三兼顾的原则，按照即定的调度规则实施调度，即按照库水位的涨落幅度来推算入库流量及其变化情况，并参照流域及库区天气预报，以汛限水位

为控制目标，以不超过相应标准的最高洪水位为控制条件，进行分级洪水调度。通常来说，洪水调度规则是以规划、设计为依据而编制的指导水库蓄泄的基本文件，遵守水库调洪规则并按之调度是取得防洪调度成功的保证。

按调度规则实施调度，其方法比较简单、直观，但结果一般只是合理解而不是最优解。因此，有必要在规则调度的基础上，增加常规经验调度及交互式调度方式，为水库管理人员提供决策依据；另外在有短期洪水预报的情况下，若预报来水量在正常调度方式下无法满足下游或水库防洪要求，则实施预泄洪调度。

冯家山水库的水位～库容～面积关系如下表 4-1 所示：

表 4-1 冯家山水库水位～库容～面积关系

库水位(m)	库容(万 m ³)	面积(km ²)	库水位(m)	库容(万 m ³)	面积(km ²)
700	13000	12.55	708	22700	15.75
701	14000	13.1	709	24200	16.2
702	15000	13.55	710	25800	16.65
703	16100	13.95	710.5	26800	16.86
704	17200	14.29	711	27700	17.06
705	18500	14.55	712	29500	17.55
706	19800	14.92	713	31200	18.04
707	21200	15.3	714	32800	18.5

由上可作出冯家山水库的水位~库容~面积曲线，如下图 4-1 所示：

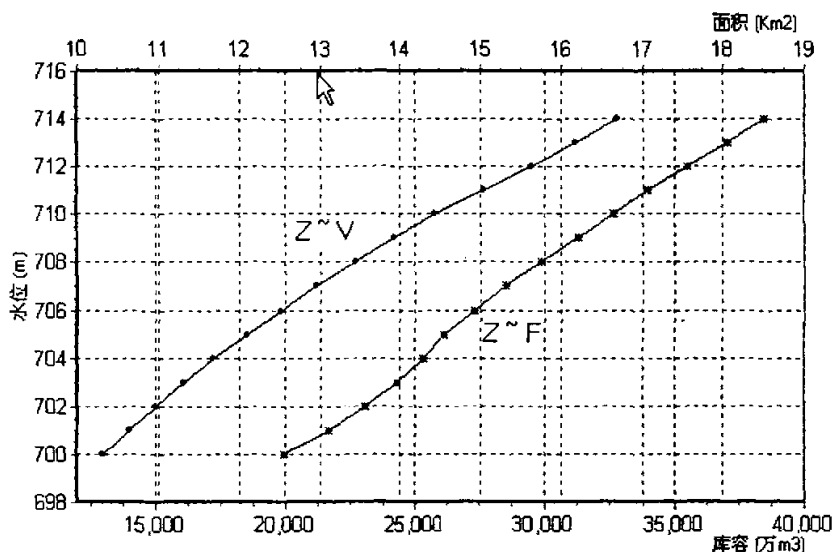


图 4-1 冯家山水库水位~库容~面积关系曲线

冯家山水库最大泄流量与水位关系如下表 4-2 所示：

表 4-2 冯家山水库最大泄流量与水位关系

库水位 (m)	泄洪洞 (m³/s)	溢洪洞 (m³/s)	溢洪道 (m³/s)	总泄量 (m³/s)	库水位 (m)	泄洪洞 (m³/s)	溢洪洞 (m³/s)	溢洪道 (m³/s)	总泄量 (m³/s)
700	513	82	0	595	708	553	655	0	1208
701	518	128	0	646	709	559	755	0	1314
702	524	180	0	704	710	562	850	0	1412
703	529	248	0	777	710.5	565	903	0	1468
704	534	310	0	844	711	567	955	50	1572
705	538	385	0	923	712	572	1063.5	155	1790.5
706	543	475	0	1018	713	576	1172	315	2063
707	548	560	0	1108	714	585	1285	558	2428

由上可作出冯家山水库的水位~泄流量关系曲线，如下图所示：

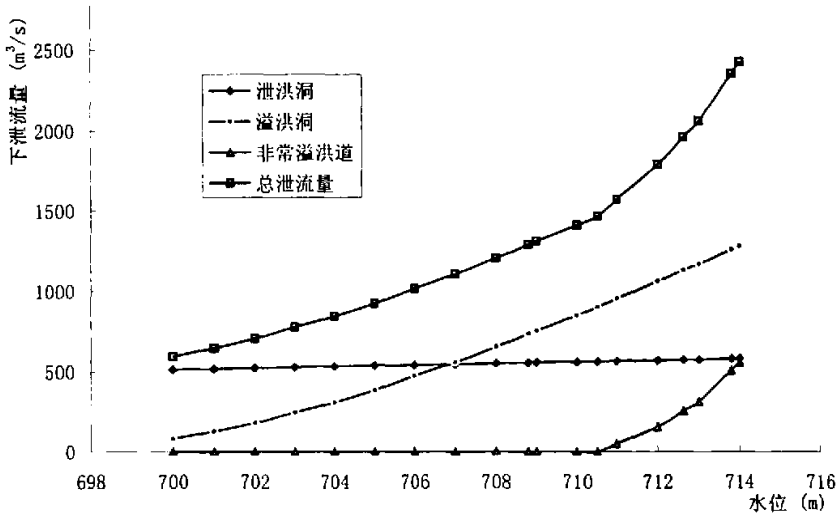


图 4.2 冯家山水库水位~泄流量关系曲线

4.1.3 洪水调度规则

冯家山水库自 1974 年 3 月下闸蓄水以来，在汛期本着兴利、防洪、排沙三兼顾的原则实施调度，调度规则如下：

(1) 在常遇洪水情况下，当库水位超过 707.0m（汛限水位）且继续上涨时，先逐渐开启泄洪洞闸门泄洪，维持汛限水位不变；若泄洪洞闸门全开，库水位继续上涨时，再逐渐开启溢洪洞闸门，维持汛限水位不变；若泄洪洞和溢洪洞闸门全开，且库水位仍在继续上涨，但最高库水位不超过 708.8m（设计洪水位）时，可视本次洪水为百年一遇以下或百年一遇洪水。

(2) 当泄洪洞和溢洪洞闸门已全开泄流，人为不能控制泄洪流量，库水位被迫上升达到 710.5m（非常溢洪道堰顶高程），且仍有上涨趋势时，应炸除非常溢洪道子堰，使非常溢洪道参与泄洪。观察库水位如有降落趋势，可视本次洪水为百年一遇以上或千年一遇洪水标准。

(3) 当泄洪洞和溢洪洞闸门全开，且非常溢洪道子堰被爆破炸除

参与泄流时,库水位仍被迫上升至 713.5m 时,应采取加固防浪墙措施以增加防洪库容和下泄流量,确保大坝安全。

(4) 当洪水落峰时,应将库水位有计划地降至汛限水位 707.0m,使水库备有足够的防洪库容,以备后期可能发生的复峰水及稀遇洪水,以确保大坝安全。

4.2 洪水调度模型

洪水在水库中行进时,其流态属于明渠渐变非恒定流,由于阻力和水库库容的调蓄作用,洪水波形状自入库断面到坝址逐渐坦化。这种变化规律可用如下圣维南偏微分方程组来表示:

$$\begin{aligned} \text{连续性方程} \quad & \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial S} = 0 \\ \text{运动方程} \quad & -\frac{\partial Z}{\partial S} = \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial S} + \frac{1}{g} \frac{Q^2}{K^2} \end{aligned} \quad (4-1)$$

通常,这个偏微分方程组难以得出精确的分析解,通常采用的是其简化了的近似解法。静库容调洪演算法略去了动力平衡方程,假定水库水面是水平的,水库容积与库水位在时段内成直线变化,且出库流量是水库蓄水量的函数。因为其抓住了问题的主要方面,计算比较简单,在调蓄能力大的水库使用比较理想,故静库容调洪算法是目前普遍采用的水库调洪算法。水库洪水调度模型常采用如下两种算法:列表试算法和龙格-库塔数值解法。

4.2.1 列表试算法

结合水库的特有条件,对式(4-1)进行简化,再将连续性方程用有限差分形式的水量平衡方程来表达,得到专用于水库调洪计算的实用公式如下:

$$\frac{1}{2}(Q_1 + Q_2) - \frac{1}{2}(q_1 + q_2) = \frac{V_2 - V_1}{\Delta t} \quad (4-2)$$

$$q = f(V) \quad (4-3)$$

式中 Q_1 、 Q_2 —计算时段初、末的入库流量 (m^3/s);

q_1 、 q_2 —计算时段初、末的下泄流量 (m^3/s);

V_1 、 V_2 —计算时段初、末的水库蓄存水量 (m^3);

Δt —计算时段长度 (s);

q —下泄流量 (m^3/s);

V —水库蓄存水量 (m^3)。

在上述方程组中, 式 (4-2) 实际上表现为一个水量平衡方程式, 即在一个计算时段中, 入库量与下泄量之差即为该时段中水库蓄存水量的变化。式 (4-3) 为下泄流量 q 与库容 V 的关系, 是用关系曲线的形式来表示的。因此须用试算法来求解 q_2 和 V_2 这两个未知数, 试算过程如下图 4-3 所示。计算逐时段进行下去, 便可得到水库的蓄水和放水过程, 进而便可得到库水位的变化过程。

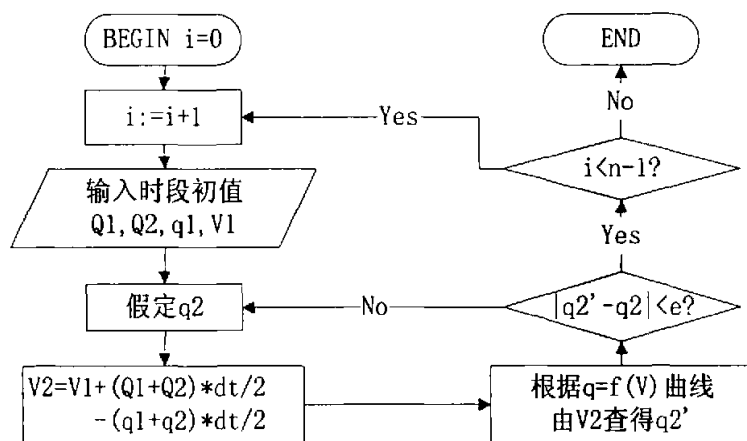


图 4-3 水库调洪计算试算法流程图

4.2.2 龙格—库塔数值解法

假定水库水位为水平起落, 水库下泄流量 q 与库容 V 关系为已知, 则水库调洪计算的实质是对下列微分方程初值问题的求解, 即

$$\frac{dV}{dt} = Q(t) - q(V) \quad (4-4)$$

式中: V —库容 (m^3); Q —入库流量 (m^3/s); q —出库流量 (m^3/s)。

已知时刻 t_{n-1} 的水库库容 V_{n-1} 、入库洪水流量 $Q(t_{n-1})$ 、泄洪流量 $q(V_{n-1})$ 与时刻 t_n 的入库洪水流量 $Q(t_n)$, 则对以上微分方程初值问题, 应用四阶龙格—库塔数值解法, 可求得时刻 t_n 的水库库容 V_n 与泄洪流量 $q(V_n)$ 。求解以上问题的四阶龙格—库塔公式如下所示

$$V_n = V_{n-1} + \frac{1}{6} [K_1 + 2(K_2 + K_3) + K_4] \quad (4-5)$$

$$\text{其中} \begin{cases} K_1 = h_n [Q(t_{n-1}) - q(V_{n-1})] \\ K_2 = h_n [Q(t_{n-1} + h_n/2) - q(V_{n-1} + K_1/2)] \\ K_3 = h_n [Q(t_{n-1} + h_n/2) - q(V_{n-1} + K_2/2)] \\ K_4 = h_n [Q(t_n) - q(V_{n-1} + K_3)] \end{cases} \quad (4-6)$$

式中 h_n 为计算步长, $h_n = t_n - t_{n-1}$ 。

将区间 $[t_i, t_{i+1}]$ 内若干点的斜率的线性组合作为平均斜率近似值, 龙格—库塔数值解法可以得出比试算法更高的计算精度。同时, 龙格—库塔数值解法无需试算, 运算速度要比试算法快得多, 可快速生成调度方案。

4.3 洪水调度方案的生成

水库运用方式变化很多, 不同的水库运用方式, 要求闸门有不同的启闭过程。当下游有防洪要求时, 最大下泄流量不能超过下游允许的安全泄量; 当水库下游有错峰要求时, 要避免水库下泄洪水与下游的区间洪水遭遇, 危及下游安全; 有短期洪水预报时, 可根据预报信息适当预泄洪水, 增强水库的调节能力。在实际调度中, 水库管理人员往往根据一定的洪水预报方案作出预报, 然后辅以对流域自然特性的认识和经验, 选择一种或几种调度方案并对结果进行比较, 最终选择满意的结果作为调度决策。

现分别以规则调度和预泄调度为例, 应用以上试算法对 2000 年一

遇校核洪水进行试调度,以检验该方法在冯家山水库的适应能力,调度成果如图 4-4 和图 4-5 所示。从图中可以看出,下泄流量与水库水位的变化都比较平稳,按规则调度的最高库水位为 713.28m,接近校核洪水位 713.4m;预报预泄调度的最高库水位为 712.64m,起到了比较明显的预泄效果。以上运算结果较为合理;试算速度极快,能满足洪水预报调度系统的实时性要求。

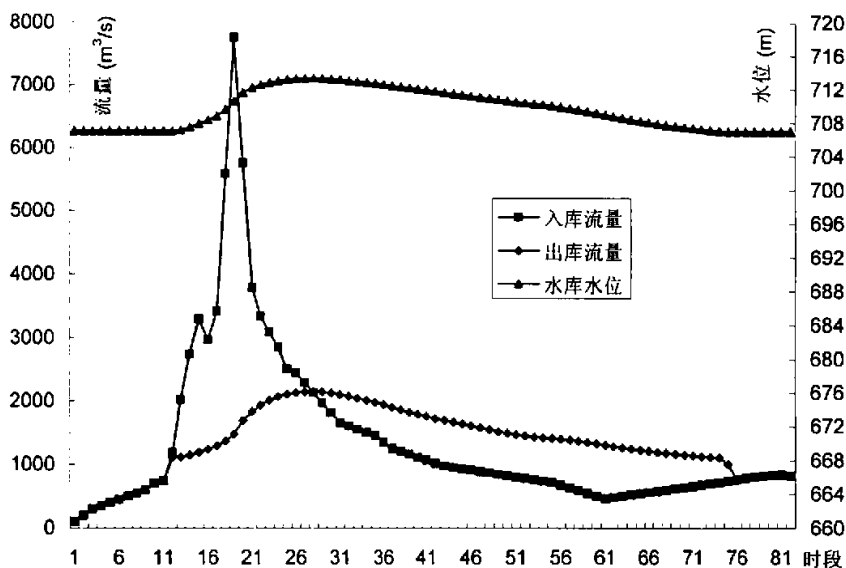


图 4-4 2000 年一遇校核洪水规则调度演算结果

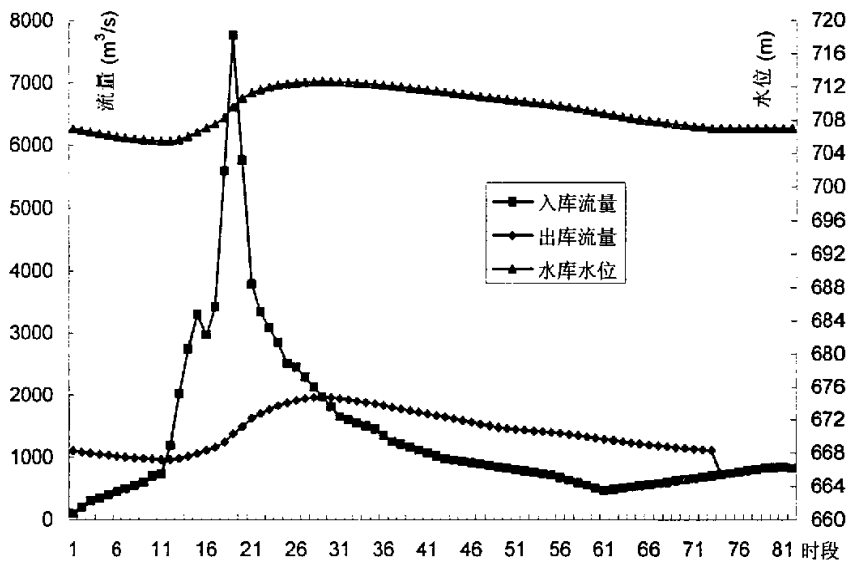


图 4-5 2000 年一遇校核洪水预泄调度演算结果

5 洪水预报调度系统开发

5.1 系统开发目标及原则

在网络环境下实现洪水预报和调度联机作业的运行系统称为洪水预报调度系统。现代计算机、网络通讯和数据库技术的发展,创造了洪水预报调度系统这一形式,使水情信息采集、数据传输处理、洪水预报校正、水库调度以及信息发布等众多环节联为一体。在多学科、高技术的支持下,洪水预报调度系统具备了强大、灵活和稳定的特点,可以保证洪水预报的预见期和精度,并提供科学的调度决策。本系统的开发目标就是在计算机上建立具有数据处理、预报计算、实时校正和洪水调度等功能、完整而实用的洪水预报和调度系统,为水库的安全度汛服务。

按照现代软件工程的思想,计算机软件应当运用系统的、规范的和可定量的方法来开发、运行和维护。一般情况下,将软件开发过程划分为需求分析、总体设计、详细设计、实施、测试和维护等几个阶段,分阶段进行质量控制,以降低软件开发的复杂度和难度。另外,本系统的开发还应遵循以下原则:

(1) 规范和可靠性原则。国家防汛办制定的《水库洪水调度系统设计开发与开发规则》规定,主系统、子系统和功能层之间的层次结构的设计应该统一规划、统一结构、统一接口,使得子系统间容易集成,也容易扩展和升级。因此,系统在框架结构、开发工具、运行环境、数据库结构以及人机交互界面等方面应与《规范》的基本要求相一致。系统开发的每个环节,都应该把可靠性放在首位,因为高可靠性才是保证实用、先进和自动化的基础。

(2) 实用性和可操作性原则。系统应该能够自动地依次完成数据采集传输、数据预处理、洪水实时预报、洪水调度、成果入库、信息发

布等过程，也可以根据操作人员的指令单独执行某项任务。人机交互是系统运行的基本模式，考虑到未来的用户可能是非计算机专业的工程技术人员或行政管理人员，系统应具有良好的人机交互界面和操作导向性。力求交互界面简洁明了，注重提高异常处理和信息反馈能力，以适应不同层次的用户需求

(3) 先进性原则。在开发平台、数据库、用户界面、硬件设备等诸多方面都力求先进性，既要考虑当前开发的实际水平和经济因素，又要为未来的发展和升级留下余地。系统广泛采用应用较为成熟的现代洪水预报技术，如图形交互技术、地理信息系统等，努力使其与技术发展同步。对于系统包含的模型和算法，应力求稳定和高效，能够满足系统的精度和实时性要求。

(4) 通用性和可扩充性原则。系统的通用性主要体现在其结构化和模块化设计上，不仅要求技术设计能够周到地考虑各种复杂的自然地理情况、流域水文特征以及水利工程设施，而且还要考虑到其中可能遇到的各种问题和相应的解决办法，具体的通用化技术的实现方法，主要通过关系型数据库和软件设计来实现。考虑到将来的升级与扩充，系统应为水库闸门自动控制系统和大坝安全监测系统预留接口；应该能够利用邮电公共通讯网络或公共数据交换网络传递其它数据信息，以实现水库防洪调度系统的集成管理。

5.2 系统组成、结构及开发

5.2.1 数据流程与系统框架

洪水预报调度系统基于客户 / 服务器结构体系，以数据库为中心，进行数据接受、数据预处理、洪水预报调度和信息查询等，系统设计与开发的主要技术关键是协调好系统各部分与数据库的相互关系。弄清洪水预报调度系统的数据类别和流向，建立合理高效的库表结构，对系统的开发和维护都有着十分重要的意义。本系统的数据流程关系如下图 5-

1 所示。

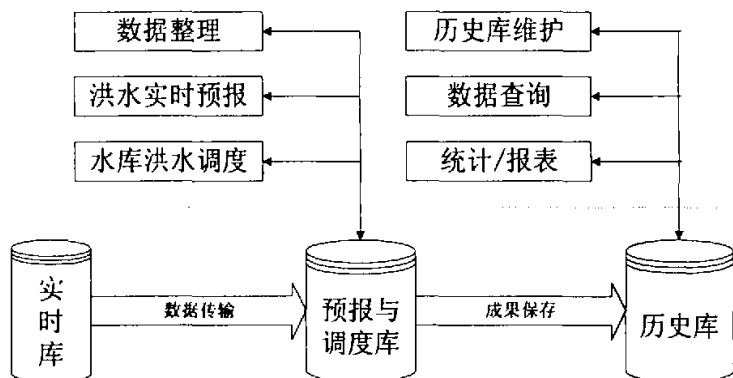


图 5-1 洪水预报调度系统数据流程关系图

一套软件使用起来是否简便、灵活，很大程度上取决于系统的组织设计。设计水库洪水预报调度系统时，在做好细致的需求分析的基础上，根据水库洪水预报调度的作业次序以及数据流程关系，得出系统的结构和框架，即层次化的系统用户界面，如下页图 5-2 所示。

5.2.2 系统模块及其功能

(1) 工程信息查询

对于特定水库的洪水预报调度系统，应该为用户提供本流域和水库的详细信息，如水库工程基本概况、设计运行参数、水位特征值及特征曲线、流域及水系特征信息、水文站网布设、历史雨洪资料统计数据等，并以文字、图片或声像等多种形式表达。考虑系统的灵活性与通用性，所有信息均存放于数据库中，系统以动态加载方式为用户显示流域和水库的相关信息。

(2) 水雨情信息查询

该模块可根据用户指定的测站名称和起止时间，检索出相应的雨量过程、水位过程、时段累积雨量等数据，并以表格、图形或空间分布图等形式直观地表现出来。利用可视化程序设计技术，可在流域站网分布

图上动态显示各雨量站及其对应的时段雨量或累积雨量；可以通过 TDBChart 和 TDBEdit 组件显示雨量和流量过程线以及相应的特征值和统计值。

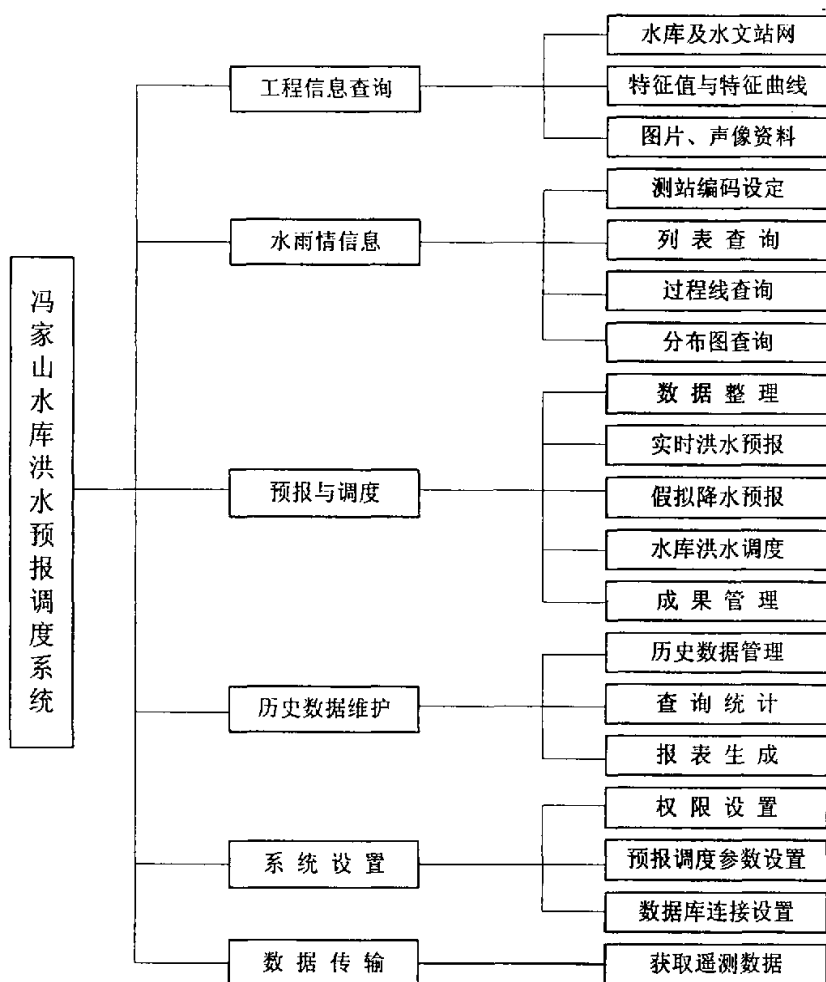


图 5-2 洪水预报调度系统组织结构框图

(3) 洪水预报调度

洪水实时预报和水库洪水调度是系统建设的最终目的，因此本模块是系统的核心部分。对于洪水预报，用户可以选择开始时间和终止时间，

利用系统响应模型对实际降水或假拟降水作出预报，并可以同时以表格和双轴图等形式给出预报结果；如果是实际降水预报，则可以选择实时校正，即利用实测流量信息对当前时刻的预报流量系列进行实时修正。对于水库调度，用户可以选择规则调度、常规经验调度、交互调度、预泄调度等方式对预报流量系列进行调节计算，给出合理的调度决策以及库水位和库容的变化过程。对于合理的预报和调度结果，用户可以选择打印结果，也可以将其编号保存起来，以方便以后管理和维护。

（4）历史数据维护与报表管理

利用数据库自身强大的查询和统计功能，系统可根据预报库中的时段数据快速生成日、月、年统计数据并存入历史数据库，如雨量站的日雨量、水库站的日入库水量，河道站的日平均流量等。利用可视化编程工具提供的报表生成组件 QuickRep 可快速生成十分专业且美观的报表，并有预览和打印功能。

（5）系统设置

该模块是为系统正常稳定地运行、为用户方便使用系统而设计的。与预报和调度模型相关的许多参数均存放于数据库中，为了系统能够安全正常运行，须为不同用户设置不同的操作权限。系统启动时须进行身份认证，一些重要的操作只对具有特定权限的用户有效，如参数设置、测站设置、成果管理等。

（6）数据传输

数据传输模块将实现预报库与实时库的连接与数据传输。通过特定的通讯协议和连接参数，传输模块在将预报库连接到实时库以后，自动检测实时库中最新的遥测数据并将实时数据导入预报库，然后进行数据处理和预报调度。

5.2.3 开发工具

选择开发工具时应力求先进、稳定和高效。冯家山水库洪水预报调度系统选用 Windows2000 Professional 作为开发平台，C++Builder5.5 作

为软件开发工具，数据库则选用大型关系型数据库管理系统 SQL Sever 2000。另外借助于 MapInfo、Photoshop 等应用软件，努力使系统的界面直观友善，便于操作。

C++Builder 是一个面向对象的可视化编程平台，应用于 32 位 Windows 应用程序的快速开发。它同时具备 C++语言面向对象的特征、灵活高效的优点，以及可视化程序设计的直观和便利性，可以实现用最少的代码开销编写出高效率的应用程序。C++Builder 支持关系数据库应用程序的开发，它具有开放的和富有弹性的数据库连接能力，以及丰富的数据库连接组件和数据感知组件，可以出色地进行以数据库为中心的洪水预报调度系统的开发。

5.3 现代洪水预报技术的应用

近二三十年来，电子技术、遥测遥感技术、水文模拟技术以及信息论、系统论、控制论等新技术和新理论的发展已改变了水文情报预报的技术面貌，水文预报工作逐渐向联机自动测报系统网络方向发展。洪水预报调度系统便是计算机在洪水预报调度各环节中广泛应用之后，为了使水情信息的采集处理与完成作业预报更加快捷，将各个单独运用的设备和软件集合起来而形成的。现代洪水预报技术尤其以系统理论和计算机技术为代表，尝试将这些现代技术应用于冯家山水库洪水预报调度系统的开发，有着十分重要的现实意义。

5.3.1 系统理论

系统理论是从不同侧面揭示对象之间相互联系、相互作用的内在运动规律的综合性科学。系统理论的特长在于它能对于系统内部结构、物理机制不太清晰的情况进行处理，同时系统建模、识别、预测、模拟也都有着相当成熟的技术。洪水预报实践的历史已经证明，凡是侧重于研究微观规律的水文学方法，如不解决宏观概括的问题，都不能得到好的预报效果；而着眼于宏观规律的“老三篇”（相关图、谢尔曼单位线和

马斯京根法) 却经久不衰, 始终是洪水预报可靠的途径。这说明洪水预报是特别适用系统理论的领域, 确认洪水预报科学的方法论基础是系统理论, 是数十年实践的结果。随着各种系统科学方法的引入, 洪水预报技术迅速地向动态化、实时化方向发展。

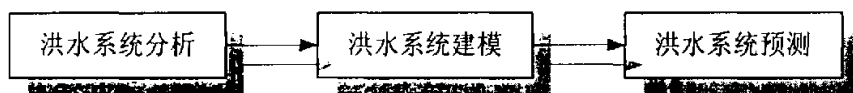


图 5-3 系统预测科学应用于洪水预报

冯家山水库洪水预报方案的建立遵循图 5-3 所示的脉络: 洪水系统分析—洪水系统建模—洪水系统预测, 这与系统预测科学在目的和要求上完全一致。预报方案的评定和检验结果表明, 系统水文模型在干河流域取得了较为理想的效果。另外在方法上, 系统理论上还有许多已经开发和正在开发的技术都可以为洪水预报借鉴, 如处理动态系统的理论和进行实时校正的技术等。

5.3.2 面向对象技术

面向对象 (object oriented) 方法的形成最初是从面向对象程序设计语言开始的, 随后逐渐形成面向对象的分析和设计方法。面向对象分析与设计的实质是一种系统建模的技术, 它从系统的组成上对问题进行自然分割, 利用类及对象作为基本构造单元, 以更接近人类思维的方式建立问题域模型, 从而使设计出的软件尽可能直接地描述现实世界, 构造出模块化的、可重用的、可维护性好的软件, 并能控制软件的复杂性和降低开发维护费用。

水库洪水预报调度系统是一复杂的人机交互系统, 考虑到软件的重用性和可扩充性, 系统程序设计选择了面向对象的开发工具。利用面向对象的思想, 将洪水预报调度系统的各个部分按对象进行划分, 并抽象为具有数据属性和动作的实体, 直接描述于语言, 进行真正意义的面向对象程序设计。“类”和“对象”是面向对象方法中两个最基本的概念。类代表一种抽象, 是用某种机制把一组相关的数据和操作组织并封装而

成的整体；而对象则是类的实例，不同的实例可以由同一个类产生，实例的当前状态由在实例上执行的操作来控制。

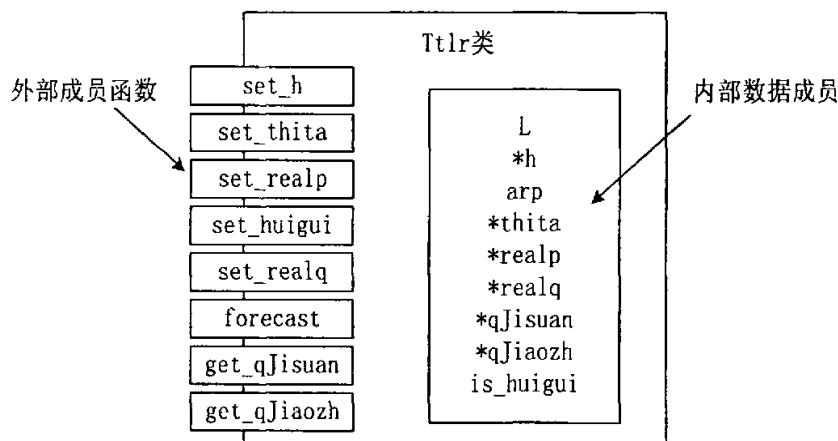


图 5-4 实时洪水预报 Ttlr 类的描述

图 5-4 为洪水预报对象的类定义和描述。类的封装性实现了将洪水预报的数据和算法（操作）结合起来构成一个不可分割的整体（对象）。记忆长度 L 等内部数据成员是受保护的，它们被有效地屏蔽以防外界干扰和误操作；而 set_h 等外部成员函数是公共的，它们作为接口提供给外界使用。如果洪水预报调度系统要采用新的实时校正方法，那么类的继承性和多态性则允许用户声明一个子类作为 Ttlr 类的派生，在继承的基础上专注于为子类编写与新校正方法有关的代码，这时因为类的接口未变而无需对系统作大的改动。

5.3.3 数据库技术

现代数据库技术突破了计算机存储容量的限制，为复杂数据库的管理和使用提供了强大的功能和极大的便利。在大型关系数据库管理系统 SQL Server 2000 中，表格、视图、存储过程和触发器等数据库对象都具有十分强大和丰富的功能，为数据的合理组织、快速查询、数据完整性、分布式应用以及数据库安全等都提供了有力的保障。

洪水预报调度系统以数据库为中心，基于客户 / 服务器结构体系，数据库结构和相互关系是系统设计与系统功能实现的关键。数据库设计应该便于维护及更为灵活地适应当前及未来的用户需要。洪水预报调度系统所涉及到的数据根据用途可分为三种类型：一种是用于系统属性定义的基础数据，如流域的基本特征资料、洪水预报模型参数等；另一种是历史洪水资料；第三种是实时预报调度数据。

在划分好系统数据库以后，对数据库表结构的定义是数据库设计中最重要的工作，好的表结构可以使系统适应复杂的环境变化，使系统易于扩展和移植。对于系统响应函数来说，不同流域具有不同的降雨径流关系；随着历史资料的扩充和精度的提高，模型将可能重新率定出新的记忆长度和响应函数。表 5-1 所示的表结构设计便充分考虑了系统的灵活性以适应当前和未来的用户需要。举例来说，如果要获取冯家山（fjs）水库的洪水预报模型记忆长度为 60、组别为 3 的响应函数值序列，则可用下面一句 SQL 查询语句便可实现：

```
select H from PARAM_H where STCD='fjs' and LVAL=60 and GROUPID=3  
order by H_ID asc
```

表 5-1 系统响应函数表 PARAM_H 的表结构设计

字段名	说明	数据类型	标识	主键
STCD	测站编码	Char(9)		Yes
LVAL	系统记忆长度	Integer		Yes
GROUPID	分组编号	Integer		Yes
H_ID	H 系列编号	Integer		Yes
H	响应函数值	Float		No

5.3.4 地理信息系统

地理信息系统（GIS）是一种采集、存储、管理、分析、显示与应用地理空间信息的计算机系统，是分析和处理海量地理数据的通用技术

^[59]。它在最近的 30 多年内取得了惊人的发展，并广泛地应用于土地利用、资源调查、环境评估、公共设施管理、交通安全等领域，成为一个跨学科多方向的研究领域。

a. GIS 功能与发展趋势

作为地理信息自动处理与分析系统，地理信息系统的功能遍历数据采集—分析—决策应用的全部过程，具体体现在以下几个方面：（1）数据采集、检验与编辑。数据采集的方法和技术有手扶跟踪数字化仪、自动化扫描输入以及遥感数据的集成等，其中扫描数据的自动化编辑和处理是地理信息系统研究的技术关键。（2）数据格式化和数据转换。许多 GIS 软件都对常见的投影进行定义，如 MapInfo 定义了几十种投影方式，但在某些特殊情况下，仍需要对地理坐标进行投影变换。（3）数据的存储与组织。SQL Server 等关系型数据库管理系统可为地理信息系统提供强大的数据存储和组织功能，从而极大地方便了空间数据和属性数据的查询和统计。（4）查询、统计、分析和计算功能。空间检索、空间拓扑叠加和空间模型分析是地理信息系统的高级应用，也是地理信息系统与其它计算机系统的根本区别所在。（5）图表显示和地图输出功能。与传统的手工制图相比，利用 GIS 建立起地图数据库，不仅可以为用户输出全要素地形图，而且可以根据用户需要分层输出各种专题地图。

地理信息系统根据其内容可分为两大基本类型：一是工具型地理信息系统，也就是 GIS 工具软件包，如 MapInfo、ARC/INFO 和 GeoStar 等，具有空间数据输入、存储、处理、分析和输出等 GIS 基本功能；二是应用型地理信息系统，以某一领域、专业或工作为主要内容，包括专题地理信息系统和区域综合地理信息系统。随着计算机技术和信息网络技术的发展，地理信息系统逐渐被越来越多的用户所接受和使用，应用型地理信息系统的开发方式也逐渐从单纯二次开发向集成二次开发转变，组件式 GIS（ComGIS）和万维网 GIS（WebGIS）成为适应软件组件化潮流的新一代地理信息系统。地理信息系统的发展趋势及其用户群

状况如图 5-5 所示。

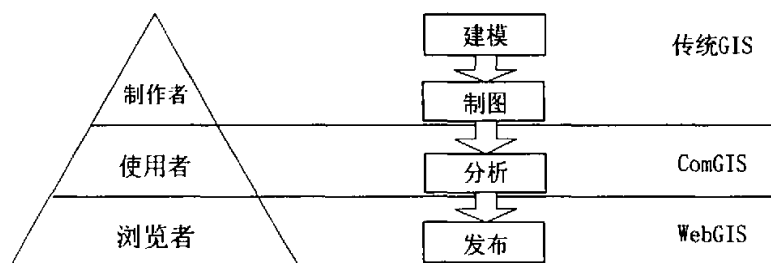


图 5-5 不同层次的 GIS 用户群比较

b. 组件式 GIS

组件式 GIS (ComGIS) 的发展符合当今软件技术的发展潮流，同时也极大地方便了系统集成和应用。目前传统的 GIS 软件虽然在功能上已经比较成熟，但它们大都属于独立和封闭的系统；虽然这些工具软件也提供了进行二次开发的宏语言，但难于掌握且功能有限。因此结合 GIS 工具软件与可视化编程语言的集成二次开发方式就成为 GIS 应用开发的主流。集成二次开发是指利用建立在 COM 和 ActiveX 技术基础上的专业 GIS 功能组件，如 MapX 和 MapObjects 等，在 Delphi 等编程工具编制的应用程序中，将 GIS 功能直接嵌入其中，实现地理信息系统的各种功能。ComGIS 组件与集成开发环境之间的交互方式如图 5-6 所示。

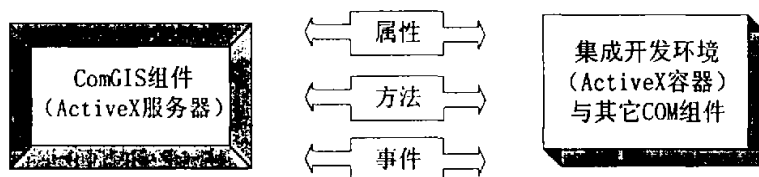


图 5-6 ComGIS 与集成环境及其它组件之间的交互

现今，组件技术已经成为业界标准，用户可以象使用其它 ActiveX 控件一样使用 GIS 组件，这使得非专业的普通用户也能够开发和集成 GIS 应用系统，从而推动了 GIS 大众化的进程。ComGIS 的出现使 GIS 不仅是专家们的专业分析工具，同时也成为普通用户对地理相关数据进行管理的可视化工具。选择集成二次开发方式，GIS 应用开发者不必掌握额

外的 GIS 开发语言, 只需熟悉基于 Windows 平台的通用集成开发环境, 以及 ComGIS 组件的属性、方法和事件, 就可以完成应用系统的快速开发和高效集成。

c. GIS 在洪水预报中的应用

地理信息系统在洪水预报系统中的应用主要包括以下几个方面:

(1) 水文站网规划与管理。水文站网是在一定地区, 按一定原则, 用适当数量的各类水文测站构成的水文资料收集系统。将地理信息系统的空间定位和信息组织功能应用于水文站网的辅助规划与管理, 可以使站网布设既能够减少投资, 又能有效地满足洪水预报和水资源评价利用的要求。由地理信息系统、遥感和全球定位系统结合而成的 3S 技术有着良好的发展前景, 将在站网规划与管理中发挥越来越重要的作用。

(2) 信息查询和空间信息分析。在洪水预报系统中, 一般以数字化电子地图为背景, 应用 GIS 和关系型数据库来实现水情信息的查询、检索、显示和分析计算等; 另外, 新兴的 WebGIS 使得 GIS 技术通过 WWW 功能得以扩展, 可以实现真正的信息共享。应用基于 Web 的分布式体系结构和 GIS 系统集成技术, 可以极大地扩展洪水预报系统的功能, 并有助于实现不同防洪调度系统的集成管理。

(3) 模型参数的确定。流域水文模型的参数如河道长度、单元面积、土壤分布等, 大多可以应用 GIS 直接根据地理信息分析确定。泰森多边形可以被标记以不同的颜色直观地显示, 泰森多边形的中心位置、周长和面积可直接由区域对象的属性获取。

(4) 数字高程模型 (DEM) 与分布式水文模型的开发。GIS 可以提供详细的地理信息空间分析资料, 因此可以根据下垫面条件将流域划分为若干多边形单元, 建立分布式水文模型, 以充分考虑下垫面条件和降雨等要素在空间的不均匀分布。以 GIS 为工具建立数字高程模型 (DEM), 可以自动生成流域水系, 从而为分布式水文模型的开发研制提供了坚实的基础。

d. 应用实例

冯家山水库洪水预报系统的开发目标是建立具有数据处理、查询显示、预报计算、实时校正等功能、完整而实用的洪水预报系统，为水库的安全度汛服务。系统开发采用可视化编程工具 C++Builder，并结合地理信息系统软件 MapInfo 和 GIS 组件 MapX 开发地理信息系统功能。

首先利用 MapInfo 软件制作流域电子地图，分别将测站、河流、以及泰森多边形等不同类型的对象置于不同的图层中。在创建图层的同时，MapInfo 也为其创建了相应的表，并通过这种方式在存储相关数据的表与地图之间建立联系。利用 MapInfo 软件建立的流域电子地图如图 5-7 所示，图中共有测站、河流和流域范围三个图层，相应的数据表则保存着与测站、河流和流域相关的信息。用户只需单击地图上的某个测站，系统内置的信息工具便可以弹出窗口来显示指定测站的详细信息，如测站类型、建站日期、具体位置等。

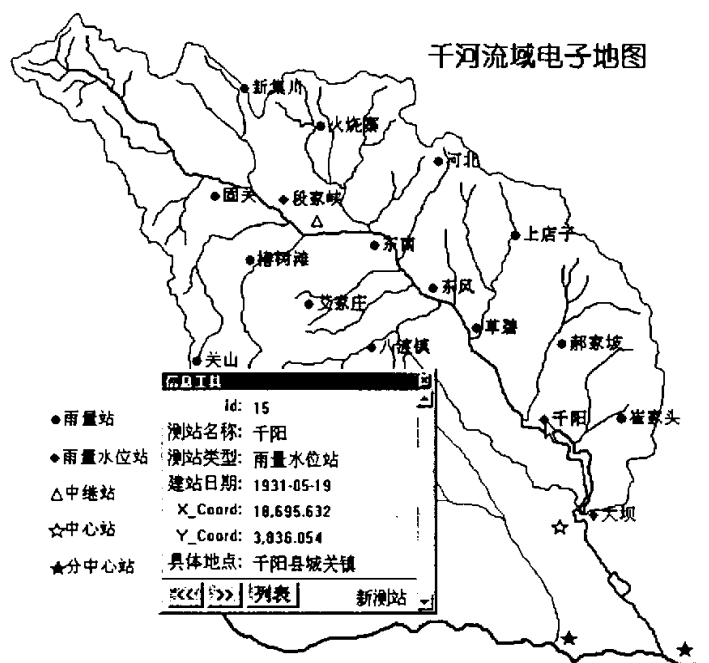


图 5-7 地理信息系统应用于测站信息查询

以上信息查询是在地理信息系统平台上进行的,交互性差且功能有限。若要在洪水预报系统中实现实时水情数据的查询和显示,则需将地理信息系统组件和可视化编程工具结合起来,进行二者的集成开发。在流域电子地图的基础上,可视化编程工具可以利用 MapX 组件的属性、方法和事件与电子地图进行交互,并通过 ODBC 数据库引擎与 SQL Server 数据库连接。利用 SQL 语句查询和数据绑定功能,MapX 组件可以把带有(x,y)坐标的数据库记录动态地显示在地图中,可以按照数据的地理信息进行多种多样的统计与查询。图 5-8 是地理信息系统的集成二次开发技术在冯家山水库洪水预报系统中的应用实例。MapX 组件根据用户指定的时段,以不同的区域颜色来表示时段降雨量的空间分布。对于用户选定的单个测站,可以利用 SQL 语句检索该测站在指定时段内的雨量、水位等,并用弹出式窗口显示具体信息。



图 5-8 ComGIS 组件应用于集成二次开发

5.3.5 图形绘制与交互技术

在实现联机自动测报以后，预报员的预报经验和交互修正仍然十分重要。图形交互技术允许预报员利用鼠标将已经计算出的单位线坐标进行合理修正，或者对不合理的预报过程进行调整，也可以拖动图 2-5 所示的退水曲线对洪水进行分割。另外，在洪水预报作业中，降雨量的时间和空间分布是预报员需要随时掌握的。计算机处理雨量的时序过程可以制成表格或绘为柱状图，很容易实现；唯雨量空间分布无论表达为等值线图或等级雨量分布图的形式，其制作技术有一定难度。等级雨量分布图现在可以利用地理信息系统组件 MapX 等来实现，如上图 5-8 所示；而图形绘制和交互技术也随着计算机软硬件的发展而逐渐成熟起来，并在洪水预报系统中初步显示了良好的应用效果。

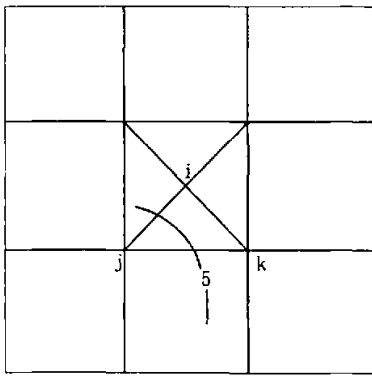


图 5-9 等值线绘制示意图

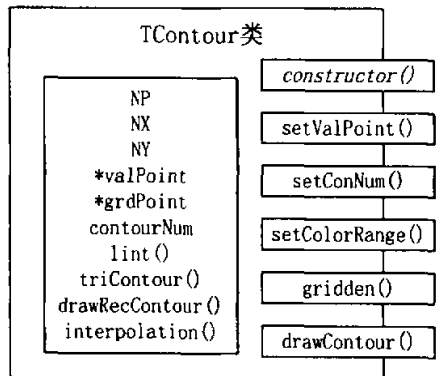


图 5-10 等值线类 TContour 的描述

绘制等值线图是对大量离散的、又具有一定规律的几何量值或物理量值，用数学的方法插值变换成图的过程。等值线绘制常采用网格法，网格法绘制等值线的一般步骤为：区域网格化；网格点数值化；等值线追踪；平滑和标记等值线等。等值线绘制示意图如图 5-9 所示。根据区域内离散点的分布与数量，将区域划分为一定密度的矩形网格，然后再把每个矩形网格根据对角线划分为四个三角形网格；网格点数值化是指用已知离散点的值来对网格结点进行插值（距离加权法，克里格法等），

生成在原始数据分布范围内规则间距的数据点分布；根据等值线的范围和密度，确定各级等值线的数值；对于每一级等值线，遍历各个三角形单元 ijk ，根据单元节点数值和等值线值的对比关系判断单元内的等值线走向，并用线性插值公式得出单元棱边上插值点的坐标，然后将插值点连接。

等值线图形绘制技术可以在流域图上动态地显示指定时段内全流域的雨量分布状况和趋势。在将等值线图的数据和算法封装成图 5-10 所示的 Tcontour 类以后，只需对其接口部分进行操作，如设定原始点数据、横向和纵向网格密度、等值线条数以及颜色范围等，便可得到图 5-11 所示的降雨量等值线图。

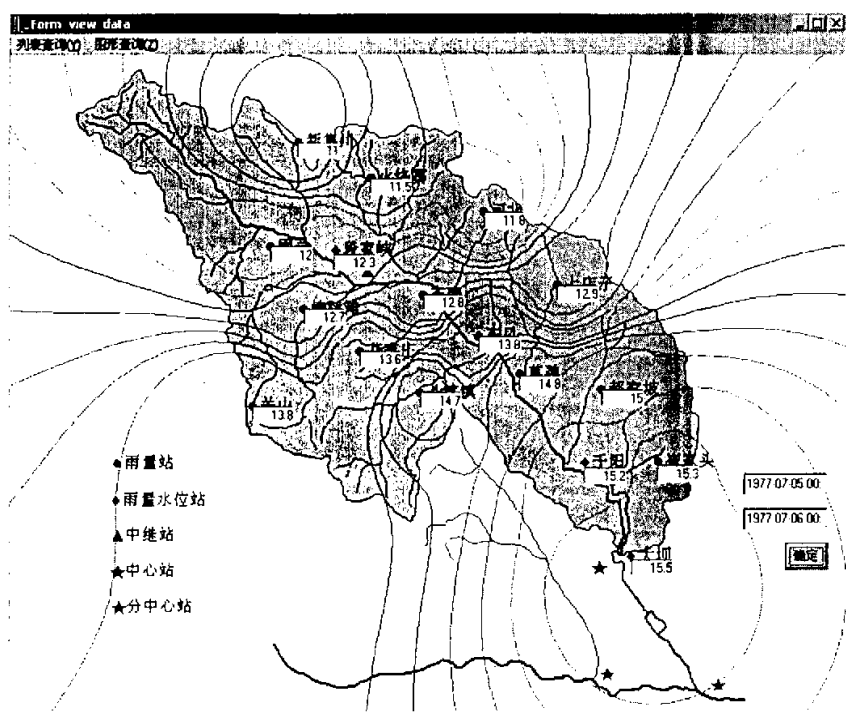


图 5-11 等值线图技术的应用

以上结合冯家山水库洪水预报调度系统的开发，讨论了现代理论和技术如系统理论、面向对象技术、数据库技术、地理信息系统以及图形

绘制和交互技术在洪水预报调度中的应用。新理论、新技术的发展日新月异，在具备坚实的暴雨洪水理论的基础上，不断学习和吸收这些新技术并将之应用于洪水预报调度，将是水文工作者今后努力的方向。

6 结 语

6.1 结论

本研究的目的是建立一套科学、实用的洪水预报调度系统，为冯家山水库的防洪调度服务。因此，系统在预报调度方案建立、结构功能设计、人机交互界面等方面力求先进性、可靠性、通用性和可操作性。研究的结论和成果主要有以下几个方面：

(1) 洪水预报模型是系统的核心部分。在对千河流域特性进行分析的基础上，建立流域的总径流线性响应模型 (TLR)，并结合流域具体特征，由人机联合优选确定模型参数。根据流量误差序列的自相关性，建立误差序列自回归模型 (AR)，并对预报结果进行实时校正。对以上实时洪水预报方案进行精度评定和检验，总合格率为 82.5%，预报方案等级为乙级。这说明 TLR 模型适应能力比较强，以此作为冯家山水库的入库洪水预报方案是可行的。

(2) 在以超渗产流为主的西北干旱半干旱地区，降雨时空分布的不均匀性对流域产汇流过程的影响非常显著。在 TLR 模型的基础上，应用多输入单输出 TULR 模型，将流域划分为上游、中游和下游三个子流域，分别率定响应函数，以考虑降雨空间分布的不均匀性；而总径流非线性响应模型 (TNLR) 则根据雨强对降雨系列进行分阶计算，以考虑降雨强度对产汇流的影响。TULR 模型和 TNLR 模型的预报方案合格率分别为 82.5% 和 85.0%，这表明考虑雨强非线性影响的 TNLR 模型更适合西北干旱半干旱地区的特点。

(3) 水库防洪调度是系统建设的最终目的。在预报结果的基础上，初步建立了水库的规则调度以及预泄调度方案。用试算法对 2000 年一遇校核洪水分别进行规则调度和预泄调度，调度成果合理。结果表明该

算法稳定高效，作为调洪算法用于冯家山水库洪水调度是合适的。

(4) 初步建立了冯家山水库洪水预报调度系统。系统软件选用 Windows 2000 Professional 作为开发平台，SQL Server 2000 为数据库管理系统，C++Builder5.5 作为开发工具。开发完成的洪水预报调度系统功能完备，界面友好，可操作性强，可自动完成遥测数据的采集和预处理、实时洪水预报、水库洪水调度等过程，并具备信息查询和报表生成等功能，具有很强的实用性。

(5) 该洪水预报调度系统具备很强的通用性和可扩充性。采用面向对象的编程技术和关系型数据库管理系统，开发出的软件具有良好的模块化结构、可重用性和可扩充性。系统结构以及数据库表结构设计都遵从规范要求，便于实现不同的防洪管理系统的数据共享和多对象集成。

(6) 根据以上三种洪水预报方案的评定结果，首先采用 TLR 模型作为冯家山水库洪水预报调度系统的实时洪水预报模型。TULR 和 TNLR 模型因为考虑了降雨时空分布的影响，故参数相对较多，参数率定对水文资料的要求也比较高。因此在水情自动测报系统投入运行并获得精度较高的水文资料以后，需对参数重新率定，然后再投入实际预报作业。

(7) 结合洪水预报调度系统的开发，探讨了现代技术在洪水预报中的应用。将系统理论、面向对象技术、数据库技术、地理信息系统以及图形绘制与交互等现代洪水预报技术应用于洪水预报调度系统，不仅可以提高开发效率并降低开发维护成本，而且大大增强了洪水预报调度系统的功能和可操作性，从而使其更好地为水库防洪调度服务。

6.2 建议

洪水预报调度系统以洪水预报模型为核心，它建立在对流域特性和产汇流理论的深刻理解和认识基础上；同时它又是一个计算机软件系统，系统的设计和开发需要现代软件工程、数据库系统以及其它有关的知识。作为一名水文水资源专业的研究生，作者有幸参与了“冯家山水

库洪水预报调度系统”这一具有现实意义和实用价值的生产课题，参加了从资料整理、实时洪水预报方案研究、水库洪水调度、一直到系统软件设计和开发的全过程。在对初步成果感到欣慰的同时，作者也感受到了精力的有限和知识的不足。唯有掌握坚实的暴雨洪水理论，把握现代科技的发展动态，注重多学科交叉渗透，才能不断地推动洪水预报和调度工作向前发展。

在特定的洪水预报和调度水平下，注重加强水文站网的合理规划和建设、广泛应用遥感技术和雷达定量测雨技术、建立水情专用网络以实现水情信息的自动采集和传递、以及建立洪水预警系统等，都将成为水库防洪十分有效的非工程措施。而进一步研究西北干旱半干旱地区的流域产汇流规律，考虑泥沙问题对流域汇流和水库调度的影响，以及将动态系统在线参数识别方法应用于洪水预报等，将是作者今后努力的方向。

致 谢

在三年的研究生学习生活中，我一直得到导师沈冰教授的关心和支持，本文更是在沈老师的悉心指导和严格要求下完成的。沈老师平易近人的性格、严谨求实的工作作风和孜孜不倦的敬业精神都让我领悟到许多道理，并成为我不断前进的动力。论文完成之际，我要把特别的感谢献给我的导师沈冰教授，并祝沈老师永远健康幸福！

感谢兰特公司的李智录副教授和高岩老师给我的论文提供了很大的指导和帮助，公司良好的科研氛围和条件保证了我的论文能够顺利完成。水情小组的余舜京、李亚娇、高见、杨黎浩等朋友也给予了支持和帮助。在兰特公司度过的半年紧张而又充实的时光，将成为永久和美好的回忆。

论文初期，黄河上中游治理局的高健翎高级工程师给予了热情的指导，并提供了部分水文数据，在此表示深深的谢意。

近三年的学习生活期间，水资源所的李怀恩教授、解建仓教授、黄强教授、秦毅副教授和江彩萍老师给予了热情的指导和帮助；水资源所的黄领梅、吴军虎、李发文、李毅、李玉荣、赵勇、张毅等学友们都给予了关心和鼓励。在此一并向他们表示衷心的感谢。

在此，我还要特别地感谢远方的父亲、母亲以及所有亲人这些年来对我的学业的鼓励和支持。

最后，再次对我的导师表示感谢，对三年来关心和帮助过我的所有老师、同学和朋友们表示感谢！

李少华
2002 年 02 月

参 考 文 献

1. 于维忠.论流域产流.水利学报,1985,(2):1-11
2. Sittner W T, Schanss C E and Monro J C. Continuous Hydrograph Synthesis With an API-Type Hydrologic Model. Water Resources Research, Vol.5.No.5, pp.1007~1022, 1969
3. 张恭肃,王成明.对 API 模型的改进.水文,1996,(4):20-25
4. 葛守西.现代洪水预报技术.北京:中国水利水电出版社,1999
5. 文康,李蝶娟,金管生等.流域产流计算的数学模型.水利学报,1982,(8):1-12
6. 许大同,安德顺,何长春.流域综合产流模型的探讨.长江流域规划办公室汇编.水文预报论文选集.北京:水利电力出版社,1985.18-24
7. 王芝桂.双曲入渗模型应用于产流计算的探讨.水利学报,1983,(8):1-9
8. 李怀恩,沈晋.现行几个主要产流模型的剖析.水文,1996,(6):14-23
9. 沈晋,沈冰.西北干旱半干旱地区水文模型研究评述.水文,1989 国庆增刊:116-120
10. 李长兴,沈晋.考虑土壤特性空间变异的流域产流模型.水利学报,1989,(10):1-8
11. 沈冰,王文焰,沈晋.短历时降雨强度对黄土坡地径流形成影响的实验研究.水利学报,1995,(3):21-27
12. 范荣生,李长兴,李占斌.考虑降雨空间变化的流域产流模型.水利学报,1994,(3):33-39
13. 包为民,王从良.垂向混合产流模型及应用.水文,1997,(3):18-21
14. 张文华.流域分块移滞汇流模型.水利学报,1981,(3):49-56
15. 冯焱.论变动等流时线.水利学报,1981,(4):1-7
16. 陈家琦,张恭肃.小流域暴雨洪水计算.北京:水利电力出版社,1985.118-184

17. 张恭肃,黄守信,贺伟程.小流域单位线的非线性分析.水利学报,1981,(3):1-9
18. 杨远东,周朴坚.瞬时单位线参数的非线性化解.水利学报,1981,(1):42-48
19. 华士乾,文康.论流域汇流的数学模型(第二部分 非线性模型).水利学报,1980,(6):2-13
20. 袁作新.流域水文模型.北京:水利电力出版社,1990
21. 赵人俊.流域水文模拟——新安江模型与陕北模型.北京:水利电力出版社,1984
22. Dooge, J.C.I. Linear Theory of Hydrological System. U.S.Dept.of Agriculture Tech Bulletin, No.1468,1973
23. Natale, L.Todini, E. A Constrained Parameter Estimation Technique for Linear Models in Hydrology, 1974 publ.13, Institute of Hydraulics univ. of Pavia
24. Carlos.E.P. and Bras.R.L. Application of Nonlinear Filtering in the Real Time Forecasting of River Flows. Water Resources Research, Vol.23, No.4, pp675-682, 1987
25. 文康,梁庚辰.总径流线性响应模型与线性扰动模型.水利学报,1986,(6):1-10
26. 王真荣.总径流非线性响应模型(TNLR)的研究及应用.武汉水利电力学院学报,1991,24(5):573-577
27. 王厥谋,张瑞芳,徐贯午.综合约束线性系统模型.水利学报,1987,(7):1-9
28. 王厥谋.综合约束线性预报模型.郑州:黄河水利出版社,2001
29. 张国祥.常用流域水文模型若干问题探讨.水科学进展,1994,5(3):248-253
30. AKIN, I.E. 1971. Calculation of the areal depth of precipitation. Journal of Hydrology 12:363-376

31. Thorpe, W.R., C.W.Rose, and R.W.Simpson.1979. Area interpolation of rainfall with a double Flourier series. *Journal of Hydrology* 42:171-177
32. Puente,C.E. and R.L.Bras.1987. Application of nonlinear filtering in the real time forecasting of river flows. *Water Resources Research* 23(4):675-682
33. Porter. J. W. and T.A.Mcmahon.1975. Application of a catchment model in southeastern Australia. *Journal of Hydrology* 24:121-134
34. Ozaki.T.1980. On a model of nonlinear feedback system for river flow prediction. *Water Resources Research* 16(1):223-231
35. Magette, W.L., V.O.Shanholtz and J.C.Carr.1976. Estimating selected parameters for the Kentucky watershed model from watershed characteristics. *Water Resources Research* 12(3):472-476
36. Linsley,R.K. 1967. The relation between rainfall and runoff –review paper. *Journal of Hydrology*,5:297-311
37. Kuczera,G. 1982. On the relationship between the reliability of parameter estimates and hydrologic time series data used in calibration. *Water Resources Research* 18(1):146-154
38. [美]Vijay P. Singh 著,赵卫民,戴东,牛玉国等译.水文系统流域模拟.郑州:黄河水利出版社,2000
39. 冯焱,文康.流域产流汇流计算问题.黑龙江水利学会水文学组编,1984.1828-156
40. 张恭肃,杨小柳,安波.确定性水文预报模型的实时校正.水文,1987,(1)
41. 葛守西.使用产汇流两阶段校正及参数动态预测算法的实时洪水预报模型.水文科技情报,1987,(2)
42. 张恭肃等.洪水预报系统.北京:水利电力出版社,1989
43. 长江水利委员会.水文预报方法:第二版.北京:水利电力出版社,1993
44. 朱华.水情自动测报系统.北京:水利电力出版社,1992

45. 程春田,基于 PowerBuilder 的流域洪水预报系统的应用研究.大连理工大学学报,1999,39(1):99-103
46. 宋星原,郭生练,张国庆等.柘溪水电站入库洪水实时预报模型研究.水文,1999,(6):19-21
47. 芮孝芳.流域水文模型研究中的若干问题.水科学进展,1997,8(3):94-98
48. 陈惠源.水库防洪调度问题探讨.武汉水利电力大学学报,1998,31(1):42-45
49. 陈守煜.水库调洪数值-解析解法.大连理工大学学报,1996,36(6):721-724
50. 周之豪,沈曾源,施熙灿等.水利水能规划.北京:水利电力出版社,1985
51. 程春田,欧春平,王本德.水库洪水调度系统的集成管理.水利学报,2001,(3):77-81
52. 程春田,欧春平.流域防洪决策支持系统集成管理.大连理工大学学报,2001,41(1):108-111
53. 张建云,轩云卿,李健.水文情报预报系统开发中的若干问题探讨.河海大学学报,2000,28(1):86-90
54. 杨正甫.面向对象分析与设计.北京:中国铁道出版社,2001
55. 周之英.现代软件工程.北京:科学出版社,2000
56. Baxter E. Vieux, Nadim S. Farajalla, and Nalneesh Gaur. Integrated GIS and Distributed Storm Water Runoff Modeling. GIS and Environment Modeling. 199-204
57. Bahram Saghafian. Implementation of a Distributed Hydrologic Model within GRASS. GIS and Environment Modeling. 205-208
58. R. Srinivasan, J. Arnold, W. Rosenthal, and R. S. Muttiah, Hydrologic Modeling of Texas Gulf Basin Using GIS. GIS and Environment Modeling. 213-217
59. 陈述彭,鲁学军,周成虎.地理信息系统导论.北京:科学出版社,2000

附表 1 TULR 模型响应函数

	ID	C_i	ID	C_i	ID	C_i	ID	C_i	ID	C_i
上游 L=80	1	-0.670	17	1.416	33	1.624	49	2.154	65	1.552
	2	-1.269	18	1.489	34	1.502	50	2.374	66	1.599
	3	-2.732	19	1.466	35	1.560	51	2.919	67	2.019
	4	-2.005	20	1.922	36	1.559	52	2.037	68	1.614
	5	-3.593	21	1.945	37	2.023	53	2.003	69	1.703
	6	-2.725	22	1.849	38	1.526	54	2.228	70	1.500
	7	-1.945	23	1.826	39	1.596	55	2.601	71	2.110
	8	-0.181	24	2.017	40	1.529	56	2.197	72	2.006
	9	1.173	25	1.696	41	2.027	57	2.318	73	2.395
	10	2.102	26	1.623	42	1.955	58	2.932	74	2.271
	11	2.967	27	1.543	43	1.878	59	2.580	75	0.844
	12	0.675	28	1.394	44	1.639	60	2.623	76	1.338
	13	0.185	29	1.191	45	1.982	61	1.928	77	0.802
	14	1.588	30	0.793	46	2.489	62	1.830	78	2.285
	15	2.217	31	1.158	47	3.173	63	1.710	79	2.574
	16	1.608	32	1.376	48	2.171	64	1.747	80	10.373
中游 L=60	1	-2.821	13	2.676	25	-0.132	37	-0.716	49	-0.892
	2	-3.837	14	2.268	26	-0.507	38	-0.485	50	-0.262
	3	5.631	15	1.946	27	0.018	39	-0.519	51	0.115
	4	0.601	16	1.849	28	0.592	40	-0.743	52	-0.542
	5	8.929	17	1.144	29	0.960	41	-0.351	53	-1.088
	6	3.931	18	0.763	30	0.716	42	-0.122	54	-0.988
	7	4.433	19	0.575	31	-0.347	43	-0.692	55	-0.565
	8	3.227	20	0.039	32	-1.034	44	-0.758	56	-0.858
	9	2.904	21	-0.237	33	-0.906	45	-0.012	57	-0.827
	10	3.556	22	-0.247	34	-0.758	46	-0.055	58	-1.162
	11	3.265	23	-0.398	35	-0.267	47	-0.014	59	-1.102
	12	2.732	24	-0.428	36	-0.191	48	-0.832	60	-2.037
下游 L=40	1	-2.919	9	0.775	17	0.967	25	0.848	33	1.003
	2	4.932	10	0.882	18	0.799	26	0.797	34	0.947
	3	-0.675	11	1.729	19	0.977	27	1.261	35	0.500
	4	1.854	12	0.569	20	1.480	28	1.274	36	0.678
	5	-0.770	13	0.109	21	1.055	29	0.796	37	0.645
	6	3.317	14	0.669	22	1.116	30	0.562	38	0.878
	7	3.554	15	0.754	23	1.102	31	0.926	39	0.864
	8	2.180	16	0.990	24	0.677	32	0.870	40	1.353

附表 2 TNLR 模型响应函数

	ID	C_i	ID	C_i	ID	C_i	ID	C_i
$i \geq i_a$ $L=80$	1	-5.282	21	3.374	41	-0.780	61	1.149
	2	1.188	22	3.610	42	0.166	62	1.089
	3	3.387	23	3.146	43	-0.921	63	1.680
	4	0.349	24	2.361	44	0.906	64	1.717
	5	6.782	25	2.161	45	1.444	65	1.384
	6	4.967	26	1.223	46	1.134	66	1.400
	7	9.513	27	2.908	47	2.060	67	1.862
	8	6.995	28	3.211	48	0.780	68	1.887
	9	7.360	29	2.955	49	1.226	69	1.849
	10	9.000	30	2.068	50	1.885	70	1.306
	11	9.125	31	0.795	51	2.222	71	1.929
	12	6.426	32	1.130	52	1.838	72	2.185
	13	5.661	33	1.288	53	1.249	73	2.468
	14	6.446	34	1.839	54	1.186	74	1.790
	15	5.588	35	1.037	55	1.568	75	0.369
	16	4.448	36	0.608	56	1.620	76	2.008
	17	4.981	37	0.849	57	1.437	77	2.541
	18	4.241	38	1.316	58	1.828	78	2.364
	19	4.287	39	0.169	59	0.930	79	1.903
	20	4.091	40	10.148	60	1.605	80	7.079
$i < i_a$ $L=40$	1	-3.270	11	3.342	21	2.607	31	2.714
	2	1.309	12	1.392	22	3.484	32	4.449
	3	1.679	13	-0.044	23	3.106	33	4.563
	4	-2.380	14	1.203	24	3.547	34	2.948
	5	6.949	15	2.935	25	2.589	35	2.722
	6	4.501	16	2.964	26	1.039	36	4.386
	7	6.466	17	3.454	27	4.839	37	5.287
	8	-0.198	18	2.407	28	5.524	38	2.923
	9	0.374	19	1.644	29	5.613	39	5.851
	10	2.975	20	2.292	30	4.546	40	26.778

附录：攻读硕士学位期间发表的学术论文和参加的科研项目

一、学术论文：

1. 李少华,贾嵘,沈冰等.可视化程序设计的塔里木河流域水盐平衡研究中的应用.陕西水力发电,2000,(1)
2. 李少华,沈冰.西部大开发中的水资源开发利用问题.陕西省减灾协会自然灾害委员会论文集,2001
3. 李少华,沈冰.地理信息系统在洪水预报中的应用.西北水力发电,2002,(1)
(已录用)

二、科研项目：

1. 世界银行项目，和田地区水盐平衡研究，参加人
2. 世界银行项目，和田地区水盐监测设计，参加人
3. 世界银行项目，编号：GIIP-FJS.WI-C₂，陕西省关中灌区改造工程—冯家山水库洪水调度系统〔预警系统〕工程，主要参加人