

摘 要

实时洪水预报和实时洪水调度,作为一种能有效地减轻洪灾的危害程度和降低洪灾所造成的损失的非工程措施,在近年来的防洪减灾工作中发挥着越来越重要的作用。实时洪水预报调度决策支持系统的研究开发过程中,对实时洪水预报软件的通用化、实时洪水预报精度的提高,实时洪水调度决策等问题进行了相应的研究工作,并提出了解决方法,为实时洪水预报调度决策提供了较为完善的全面解决方案。

实时洪水预报调度决策支持系统具有以下特点:

1. 实现了实时洪水预报软件的通用化,可方便地进行软件的移植移用。
2. 较完善地实现了实时洪水预报校正,能较为有效地对实时洪水预报成果进行校正,并实现了校正程序的通用化。
3. 实时洪水调度决策支持子系统能自动地形成实时洪水调度预案,并人工提出的预案一道进行可行性分析,在此基础上,进行多方案、多目标的优化决策。
4. 实现了基于 GIS 的分布式信息查询功能,更符合人们的使用习惯。
5. 集成了实时洪水调度分析决策时所需的各项功能,软件功能较强大。
6. 友善的用户界面,使用户易于操作,并便于用于回溯。

本文第一章简要介绍了洪灾的危害性和治理洪灾的措施,并分析了作为防洪非工程措施的实时洪水预报和实时洪水调度决策的现实意义。

第二章对实时洪水预报调度决策支持系统进行了系统需求分析,提出了软件系统的各项需求以及系统的结构。

第三章简要介绍了软件研究开了中所使用的工程化开发方法,并进行了数据库选择和开发工具选择。

第四章主要介绍了本软件系统中各主要功能模块的主要数学模型及其算法实现。

第五章主要介绍了应用软件开发中所使用的有关技术,如软

件界面设计技术、面向对象的设计、工程组管理方法、软件运行错误的控制等。

第六章对系统的开发进行总结，并指出了今后的研究发展方向。

ABSTRACT

As a non-project measure that can efficiently lessen the scathe of flood disaster and reduce the damage of flood, real-time flood forecast and real-time flood dispatch is become more and more important and being widely used in the recently flood prevention and flood reduction. In the process of the Real-time Flood Forecast and Dispatch Decision Support Systems, the problem of general-purpose real-time flood forecast, how to improve forecast accuracy, real-time flood dispatch decision, and etc, have been successfully solved. It provides an integrated solution scheme to real-time flood dispatch decision.

This system has following features:

- a) Accomplished the general-purpose real-time research of the real-time flood forecast software, and can be used to different river basin and different river channel easily.
- b) Completed the research of real-time flood forecast amendment's method, and the general-purpose research of software. It can efficiently improve forecast accuracy.
- c) The Real-time Flood Dispatch Decision Support sub-system can automatically form flood dispatch schemes, and work out possibility analysis to this schemes together with artificial schemes, and provide multi-scheme and multi-object analysis and decision.
- d) The system offers scattering information inquiry based on GIS.
- e) The function of the system is advisable, comprehensive and integrated. It can offer all necessary function for user's analysis and decision.
- f) Graphics user interface is very friendly, and very convenient to user's manipulation and backtracking.

The first chapter reviews the scathe of flood disaster and the improvement measure, and also conclude that is very important to develop the Real-time Flood Forecast and Dispatch Decision Support Systems.

The second chapter analyzes the system's demands. It gives out the function demand, the information demand and the structure of the system.

The third chapter introduces the developing method of the system, the selection of databases and the selection of the developing tools.

The fourth chapter introduces the mathematical models and the algorithms in the main models.

The fifth chapter introduces the mainly technology used in the system development.

The last chapter gives out a conclusion and the trend of the future development.

1. 洪灾的危害及其治理措施分析

1.1 洪灾的危害性

1.1.1 中国洪灾概述

我国是世界上洪水灾害频繁发生且危害严重的国家之一。由于特定的自然、地理、气候条件，长期以来，水旱灾害对中华民族的生存和发展构成了严重的威胁。中华人民共和国成立以来，党和政府以及广大人民群众为减轻洪水灾害的严重威胁付出了巨大的努力，防御洪水灾害的能力有了较大的提高。但同时我们也应该看到，历年各次大的洪涝灾害都对国民经济造成了巨大的影响，洪水灾害对社会经济造成的威胁仍然十分严重，并且随着人口的增加和社会经济的发展，洪涝灾害所造成的经济损失有愈来愈大的趋势，对社会、经济发展的阻碍作用也越来越严重。

洪水一般是指由暴雨或急剧融冰化雪、水库垮坝等引起的江河湖泊水量迅速增加，水位急剧上涨的自然现象。影响洪水特性的主要自然因素是流域气候条件，下垫面地形、地质、地貌及植被等。洪水能否造成灾害，与人类社会经济活动有十分密切的关系，在地广人稀、洪水可以到处漫流的远古时代，无所谓洪灾的概念；只有当洪水威胁到人类安全和影响社会经济活动并造成损失时才能成为洪灾，洪水灾害的形成是自然因素和社会因素综合作用的结果。随着人类社会的不断进步，经济得到了很大的发展，加之人类活动对自然和生态环境的破坏，导致洪灾的出现越来越频繁，损失也越来越严重^[1]。

洪水灾害历来是我国最严重的自然灾害之一，历史上有关洪水灾害的记载可以追溯到 4000 年之前，如早在远古时代就有了大禹治水的传说。据邓拓所著《中国救荒史》统计，从汉立国以后计算，即公元前 206 年起计算至 1936 年止，共计 2142 年，这

期间共发生有记载的水灾 1037 次，平均约 2 年一次，且从水灾发生的频次看，有年代愈后，频次愈高之势，详见表 1.1.1——1。

表 1.1.1——1 历代水灾统计表

朝 代	起 止 年 份	年 数	水灾次数	频率%
汉 代	前 206~公元 220	425	76	17.9
魏 晋	220~420	200	56	28.0
南北朝	420~581	161	77	47.8
隋 唐	581~907	326	120	36.8
五 代	907~960	53	11	20.8
宋 代	960~1271	311	193	62.1
元 代	1271~1368	97	92	94.8
明 代	1368~1644	276	196	71.0
清 代	1644~1911	267	192	71.9
民 国	1911~1936	26	24	92.3

近代以来，洪灾有愈演愈烈之势，根据对 1840~1949 年间各年洪水灾害受灾县（市）数的统计，在此期间全国平均每年有 149 个县（市）遭受水灾（台湾省未计入），即使是水灾最轻的年份，也仍然有 43 个县（市）受灾，如果遇到重大水灾，受灾范围就更广，如 1931 年全国受灾县市多达 592 个。70% 的年份，水灾区域均在 100 县（市）以上，可见洪灾范围之广，灾害之大。详见表 1.1.1——2。

中华人民共和国成立以来，经 40 余年水电和水利建设，主要江河一般常遇洪水得到了有效控制。但另一方面由于人口急增，山区毁林垦荒，水土流失面积不断扩大，中下游围滩围湖与水争地，加上江河湖海的自然演变，给防洪减灾带来许多新的问题，遇到特大洪水，灾害仍然十分严重。

根据 1950~1991 年 41 年资料统计，全国平均每年受灾面积 780.4 万 hm^2 ，成灾面积 430.8 万 hm^2 ，平均成灾率 55.2%，平均

每年倒塌房屋 190 万间，可见洪灾影响之巨。受灾面积超过 1000 万 hm^2 的有 4 年，依次为 1954 年、1956 年、1963 年、1964 年，详见表 1.1.1—3。

进入 90 年代以后，受全球气候剧烈变化的影响，洪水灾害变得愈来愈频繁、愈来愈激烈，1996 年的长江大水，1998 年的长江、黑龙江大水，都对人民生命财产安全和国民经济发展造成了巨大的破坏，损失惨重。

表 1.1.1—2 近代各年份受灾情况统计表

年份	受灾县数	年份	受灾县数	年份	受灾县数	年份	受灾县数
1840	143	1868	154	1896	180	1924	124
1841	176	1869	151	1897	165	1925	71
1842	76	1870	189	1898	233	1926	83
1843	97	1871	171	1899	114	1927	43
1844	107	1872	108	1900	81	1928	68
1845	50	1873	148	1901	123	1929	87
1846	126	1874	63	1902	63	1930	180
1847	80	1875	67	1903	101	1931	592
1848	222	1876	84	1904	109	1932	201
1849	258	1877	74	1905	114	1933	244
1850	113	1878	114	1906	210	1934	215
1851	109	1879	111	1907	116	1935	368
1852	128	1880	63	1908	134	1936	147
1853	191	1881	90	1909	226	1937	269
1854	70	1882	200	1910	172	1938	167
1855	106	1883	230	1911	229	1939	225
1856	91	1884	117	1912	97	1940	111
1857	89	1885	176	1913	110	1941	68
1858	62	1886	204	1914	158	1942	109
1859	56	1887	206	1915	302	1943	130
1860	99	1888	206	1916	111	1944	68
1861	63	1889	253	1917	324	1945	113
1862	76	1890	227	1918	146	1946	160
1863	90	1891	68	1919	170	1947	332
1864	103	1892	220	1920	81	1948	335
1865	76	1893	179	1921	155	1949	354
1866	133	1894	198	1922	110		
1867	125	1895	207	1923	111	平均	149

表 1.1.1—3 全国历年水灾灾情统计

年 份	农 田 面 积 (万 hm ²)		成 灾 率 (%)	倒 塌 房 屋 (万间)
	受 灾	成 灾		
1950	655.9	471.0	71.8	130.5
1951	417.3	147.6	35.4	31.8
1952	279.4	154.7	55.4	14.5
1953	718.7	328.5	45.7	322.0
1954	1613.1	1130.5	70.1	900.9
1955	524.7	306.7	58.5	49.2
1956	1437.7	1090.5	75.9	465.9
1957	808.3	603.2	74.6	371.2
1958	427.9	144.1	33.7	77.1
1959	481.3	181.7	37.8	42.1
1960	1015.5	497.5	49.0	74.7
1961	891.0	535.6	60.1	146.3
1962	981.0	631.8	64.4	247.7
1963	1407.1	1047.9	74.5	1435.3
1964	1493.3	1003.8	67.2	246.5
1965	558.7	281.3	50.3	95.6
1966	250.8	95.0	37.9	26.8
1967	259.0	140.7	54.1	10.8
1968	267.0	165.9	62.1	63.0
1969	544.3	326.5	60.0	164.6
1970	312.9	123.4	39.4	25.2
1971	398.9	148.1	37.1	30.2
1972	408.3	125.9	30.8	22.8
1973	623.5	257.7	41.3	72.3
1974	643.1	273.7	42.6	120.0
1975	681.7	346.7	50.9	754.8
1976	419.7	132.9	31.7	81.9
1977	909.5	498.9	54.9	50.6
1978	282.0	92.4	32.8	28.0
1979	677.5	287.0	42.4	48.8
1980	914.6	502.5	54.9	138.3
1981	862.5	397.3	46.1	155.1

年 份	农 田 面 积 (万 hm^2)		成 灾 率 (%)	倒 塌 房 屋 (万间)
	受 灾	成 灾		
1982	836.1	446.3	53.4	341.5
1983	1216.2	574.7	47.3	218.9
1984	1063.2	539.5	50.7	112.1
1985	1419.7	894.9	63.0	142.0
1986	915.5	560.1	61.2	150.9
1987	868.6	410.4	47.2	92.1
1988	1194.9	612.8	51.3	91.0
1989	1132.8	591.7	52.2	100.1
1990	1180.4	560.5	47.5	96.6
平均	780.4	430.8	55.2	190.3

1.1.2 江、淮 1954 年特大洪水

1954 年长江、淮河流域出现百年来罕见的流域性特大洪水。本次洪水的主要特点是汛期雨季到来早，暴雨过程频繁，降雨强度大，持续时间长，笼罩面积大。长江干、支流洪水遭遇，枝城以下 1800 km 河段最高水位全面超过历史最高记录。与此同时淮河流域也发生了特大洪水，淮河干流洪水位普遍高于 1931 年。

长江流域虽然在中华人民共和国成立初期即全面恢复整修江河堤防，修建了荆江分洪工程，加上汛期军民全力抗洪抢险，保住了荆江大堤和武汉市的主要市区，但仍然造成了巨大的经济损失和社会影响。长江干堤和汉江下游堤防溃口 61 处，扒口 13 处，支堤、民堤溃口无数。湖南省洞庭湖区 900 多处圩垸，溃决 70%，淹没耕地 25.7 万 hm^2 ，受灾人口达 165 万，溃口分洪量达 245 亿 m^3 ，其余圩区也都溃灭成灾。江汉平原的洪湖地区、东荆河两岸一直到武汉市周围一片汪洋，荆江分洪区及其备蓄区全部运用淹没，湖北全省溃口、分洪量达 602 亿 m^3 ，淹没耕地 87.5 万 hm^2 ，受灾人口达 538 万。江西省鄱阳湖区五河尾间及湖区圩垸大部分溃决，分洪量达 80 亿 m^3 ，淹没耕地 16.2 万 hm^2 ，受灾人口达 171 万。安徽省华阳河地区分洪，无为大堤溃决，决口分洪量达 87 亿 m^3 ，淹没耕地 34.3 万 hm^2 ，受灾人口达 290 万。

全流域总计堤防圩垸溃决、扒口共分洪达 1023 亿 m^3 ，淹没耕地 166.7 万 hm^2 ，受灾人口达 1800 余万。此外，广大农田积涝成灾，广大山地山洪为害。全流域受洪涝灾害农田面积 317 余万 hm^2 ，受灾人口 1888 余万。京广铁路 100 天不能正常运行，灾后疾病流行，仅洞庭湖区死亡人数就达 3 万余人。由于洪涝淹没地区积水时间长，房屋大量倒塌，庄稼大部分绝收，灾后数年才完全恢复。因长江流域工农业生产和水陆交通运输在全国的重要地位，1954 年大水不仅造成当年重大经济损失，对以后几年经济发展都产生了很大影响。

淮河流域虽然当年淮河干流、支流已经得到初步整治，洪水得到一定程度的控制，但该次洪水仍然造成干流五河以上洪水位均超过 1931 年。淮北大堤禹山坝、毛滩决口，淮北平原颍河、涡河之间形成大片洪泛区。受灾最重的安徽省农田成灾面积 174.7 万 hm^2 ，河南、江苏两省农田成灾面积 102.7 万 hm^2 ，山东省灾情稍轻。全流域农田成灾面积 408.2 万 hm^2 ，工农业生产仍然遭到了较严重的破坏。

1.1.3 1975 年 8 月淮河上游特大洪灾

1975 年 8 月上旬，淮河上游地区发生了大陆上罕见的特大暴雨（简称“75.8”暴雨），暴雨中心河南省泌阳县林庄最大 6h 雨量达 830.1 mm，成为世界相同历时最大雨量记录。淮河流域汝河、沙河、颍河下游出现了极为严重洪灾。

这次特大暴雨洪水，虽然是局部性的，但受灾区内灾情仍然异常严重。

a) 河南省有 29 个县市受灾，受灾人口 1100 万人，560 万间房屋被冲毁，死亡 26000 余人。

b) 农田受灾面积 113 万余 hm^2 ，其中 73 万余 hm^2 农田灾情极为严重，有的失去耕种条件。

c) 水利工程遭到极为严重的破坏，2 座大型水库、2 座中型水库、2 个滞洪区和 58 座小型水库被冲毁，堤防决口 2180 处，漫决总长度 810 km。

d) 京广铁路冲毁 102 km, 中断行车 18 天, 影响运输 48 天。
这场水灾直接经济损失在 100 亿元以上。

1.2 治理洪灾的措施

治理洪灾的措施主要分为工程措施和非工程措施两大类^[1]。其中工程措施是最直接、起决定性作用的措施, 需要庞大的人力、物力、财力支持, 在现阶段我国经济尚不十分发达、财力仍很有限的条件下, 尚难进行大规模的防洪工程措施建设, 只能分阶段、有计划、保重点地逐步加以实施。非工程措施作为一种辅助性的防洪手段, 不需要很大的人力、物力、财力支持, 但对于防洪工程措施的正确运用, 最大限度地发挥防洪工程措施的防洪减灾作用, 却具有极为重要的意义, 近 10 余年亦已引起了各级决策层的高度重视, 得到了较大的发展。

1.2.1 工程措施

我国的防洪工程建设是根据流域和地区防洪规划要求进行的, 一般是在上游山区进行植树固坡、兴建控制性的水库, 以拦蓄洪水, 削减洪峰; 在中下游平原地区进行河道整治、加固堤防、开辟蓄滞洪区, 调整和扩大洪水出路, 使其形成一个完整的防洪工程体系。

(a) 水利水电工程建设

至 1993 年, 全国已建成大、中、小型水库 84614 座, 总库容达 4717 亿 m^3 。其中大型 374 座, 总库容 3425 亿 m^3 , 中型 2562 座, 总库容 709 亿 m^3 , 在防洪兴利中发挥了重要的作用。如黄河干流的三门峡、刘家峡、龙羊峡、青铜峡等梯级水电工程, 对黄河中下游地区防洪减灾具有极为重要的作用; 我省境内的五强溪、凤滩、柘溪、东江、欧阳海等水利水电工程, 亦在我省的防洪减灾工作中发挥了重要的作用。

(b) 河道整治与堤防建设

至 1993 年, 我国已拥有各类堤防 24.5 万 km, 其中主要堤防 6.1 万 km。这些堤防保护着近 3300 万 hm^2 耕地和 4 亿人口,

是我国精华地带防洪安全的屏障。黄河下游的黄河大堤，长江的荆江大堤和无为大堤，淮河的淮北大堤和洪泽湖、里运河大堤，珠江的北江大堤，海河的永定河大堤，以及钱塘江海堤等全国著名的堤防工程，都是经过数百年或数千年形成的，更是全国防洪工程的重点。

(c) 蓄滞洪区建设

建设蓄滞洪区是一种被动性的防洪工程措施，是以牺牲局部利益为代价来换取重要防洪地段的防洪安全，一般仅在迫不得已的非常情况下方才使用。如黄河的北金堤滞洪区、长江的荆江分洪区、淮河的蒙洼滞洪区、永定河的小清河分洪区等，都是我国大型的蓄滞洪区。

(d) 城市防洪建设

城市，特别是大城市，是政治、经济和文化生活十分发达的地区，确保重要城市的防洪安全，对维护我国的政治稳定、文化繁荣和经济发展具有十分重要的意义。通过几十年的艰苦努力，我国许多城市的防洪能力有了很大的提高，其中北京、天津、沈阳等城市的防洪能力均在 300 年一遇以上，上海、广州、吉林、哈尔滨等城市的防洪能力在 100 年一遇以上，其他省会城市及地位较重要的城市也均能抵御 20~50 年一遇的洪水，城市的防洪能力有了较大的提高。

(e) 水土流失治理

水土流失造成大量的泥沙淤积在河道、湖泊、水库、滞洪区和灌区内，给河道行洪和防洪工程的运用带来了一系列的问题，只有不断地减少水土流失，才能做到有效地降低洪水的频度和烈度，大大减轻洪灾造成的损失。有效地减少水土流失已成为我国防洪工作中一个十分重要的课题，截止到 1993 年，我国已初步治理水土流失面积 31 万 hm^2 ，占水土流失面积的 38%，并大力推行了小流域综合治理工作，取得了一定的成绩。1998 年特大洪灾过后，我国政府对流域水土保持工作更加重视，在长江、黄河、黑龙江上游建立水源保护区，并制定了全面禁伐、植树造林等措施。

1.2.2 非工程措施

就我国目前的财力状况而言，尚只能担负起少量防洪工程措施的建设费用，因此，必须充分发挥防洪非工程措施的预警、预报、调度、指挥、决策功能，以最大限度地发挥有限的防洪工程措施的作用，使洪灾损失降低到最小程度。

(a) 防汛抢险组织建设

中华人民共和国成立以来，从中央到地方县级以上各级人民政府，凡有防汛抢险任务的，都已逐步建立起防汛抢险指挥机构，由主要行政官员负责，当地驻军以及计委、经委、铁路、邮电、交通、电力、卫生、气象等有关部门参加。40余年来，在抗御历年特大洪水如1954年长江、淮河洪水，1958年黄河洪水，1963年海河南系洪水、1991年淮河、太湖、滁河洪水、1994年珠江流域西江洪水、1996年长江洪水、1998年长江流域特大洪水等多次大洪水中，较充分地体现了防汛指挥机构的组织保证作用和指挥调度作用。

(b) 防汛指挥调度通信系统建设

防汛指挥调度通信系统是工情、灾情和水文情报、预报信息传输的重要手段，要求做到准确、及时、可靠。80年代以来，防汛指挥调度通信系统的建设得到了很大的发展，已基本上组成了连接全国各大流域机构、各省市防汛指挥部门和各大水力发电厂的防汛指挥调度通信网络，形成了融防汛信息收集传输、水情预报、调度决策于一体的指挥调度通信系统，在防汛抢险决策和指挥调度中发挥了重要的作用。

(c) 水情测报系统建设和实时洪水调度

水文情报、预报，是防汛指挥调度的重要依据。经过近50年的建设，已初步建成了覆盖全国、比较完整的水文测报站网，基本控制了主要河段、重要地区的水情、雨情，及时、准确地为防汛决策部门提供雨情、水情和洪水预报，为防汛抢险作出了较大的贡献。

由于人工测报系统技术装备和技术手段较落后，水情、雨情、工情和灾情的测报主要依靠人工观测、手工计算、人工传输，反

应速度较慢、可靠性不高、预报精度也难以得到有效的保证，很难满足实时洪水调度的要求。为了提高实时洪水预报精度，增长洪水预报的预见期，近 10 余年来，我国进行了水情自动测报系统的推广应用工作，在许多大中型水利水电工程和重点防洪河段上建设了水情自动测报系统，并以其快速的反应、准确的预报，为防洪决策调度提供了可靠的依据，发挥了重要的作用。

1.2.3 实时洪水预报调度

为了充分发挥防洪工程措施的调洪蓄洪和错峰降峰能力，并确保水利工程的自身安全，必须充分运用防洪非工程措施。实时洪水预报调度作为非工程措施中的一个重要方面，在防洪抢险、减灾兴利中发挥着愈来愈重要的作用。随着计算机技术和通信技术的飞速发展，实时洪水预报调度技术在近几年中也得到了较快的发展，并已得到了广泛的应用。

实时洪水预报是防汛工作的耳目，是防洪调度决策的基本依据，无论是水库的预泄、蓄滞、错峰调度，还是防洪堤防是否加高、蓄滞洪区是否破堤分洪，危险地段、圩垸内的人民是否撤离等重大防汛问题的决策，都必须依靠实时洪水预报所提供的未来洪水情况，作出恰当的防汛抢险方案。实时洪水调度是依据实时洪水预报成果，对各种洪水调度预案进行可行性分析，从多个可行的洪水调度预案中，优化出最佳的洪水调度方案，从而使有限的工程措施发挥出最大的防洪减灾效益，尽可能地降低洪灾的危害。

1954 年长江特大洪水中，依据所作出的洪水预报成果，荆江分洪区 3 次适时开闸分洪，使沙市水位降低 1m，对于确保荆江大堤安全、减轻洪水对武汉市的压力起了关键作用。1958 年黄河大水，根据洪水预报成果和当时的堤防工情分析，国务院决定坚守大堤，不启用北金堤滞洪区，使滞洪区内 125 万居民免受洪水灾害，夺取了抗洪全面胜利。河南省“75.8”特大洪水，如果电信不中断，有洪水情报和水情预报成果，板桥和石漫滩水库垮坝将不致造成如此大量的人员伤亡；与此相反，位于同一暴雨

中心附近的薄山水库（总库容 6.2 亿 m^3 ，平库容 6.9 亿 m^3 ），根据洪水预报及时转移溢洪道下游的驻军和居民，避免了人员伤亡，减少了洪灾损失；更主要的是适时加高加固了大坝防浪墙，战胜了水位超过坝顶的险情，保住了水库大坝，拦蓄了 7 亿 m^3 洪水，减轻了下流宿鸭湖水库（当时已满库蓄水约 10 亿 m^3 ）的防洪负担，特别是避免了两库连锁垮坝的毁灭性水灾发生。在抗击 1998 年长江流域特大洪水的斗争中，正是通过准确的水情测报及科学的洪水调度，五强溪、柘溪、凤滩、隔河岩、葛洲坝等大型水利工程为取得抗洪斗争的最后胜利作出了重大贡献。

以上的论证充分表明，应用现代计算机技术和现代软件研究技术，进行实时洪水预报调度研究，开发出能为实时洪水预报调度提供高效服务的大型软件系统，以提高实时洪水预报的反应速度和实时洪水预报成果的精度，为实时洪水调度决策提供更为优化、更为有效的实时洪水调度方案，对我国现阶段的防洪减灾工作具有十分重要的现实意义。

1.3 实时洪水预报调度软件系统现状分析

目前国内所使用的各式各样的实时洪水预报调度软件，有国内水电院校、科研院所自行研制的，也有从国外引进并加以改造的。这些软件各自有各自的长处、各自有各自的应用条件，在抗洪抢险的指挥决策中发挥了重要的作用。但这些软件也在一定程度上存在一定的缺陷和不足，导致软件难以进行大规模的推广应用。

1.3.1 国外实时洪水预报调度软件现状分析

从国外引进并加以改造的实时洪水预报调度软件虽然所包括的实时洪水预报模型较多、软件功能较为强大，但在我国的应用结果却并不理想，主要基于以下原因：

- a) 不太适应我国各流域的水文气象特性，使用效果并不太好，至少不比国内自行研制的应用软件好多少。
- b) 约束条件较多，用户应用和使用时颇为不便。

- c) 未经汉化, 也难以汉化, 不便于用户操作和使用。
- e) 价格过于昂贵。
- f) 维护和更新换代困难。

1.3.2 国内实时洪水预报调度软件现状分析

国内自行研制的应用软件, 虽然适用性较好, 也符合我国国情和用户的使用习惯, 便于维护和升级换代, 但由于各种各样的原因, 也还存在不少需要更进一步解决的问题, 主要可归纳为以下几个方面:

(a) 降雨径流预报模型一般由流域产流和河道汇流两部分组成, 较为常见的是, 流域产流部分常采用概念性降雨产流模型, 这一部分可以较容易地编制出通用函数(或子程序), 并可方便地对这些函数(或子程序)进行程序调用, 较易实现通用性; 而河道汇流部分受河网组成、河网形状、河网走势和断面入出流情况千变万化的影响, 很难实现通用, 导致通用实时洪水预报软件编制异常困难。而对于线性预报模型来说, 虽然其算法比较简单, 但对于不同的流域来说, 因其所采用的线性变量不同, 线性变量的时程不一, 其通用性也具有较大的难度。国内目前的做法往往是针对一个特定的流域编制一个特定的实时洪水预报软件, 软件的通用性很差, 只能在一个特定的流域内使用, 无法进行软件的直接移用和移植。其直接的后果是软件的编码、测试和维护工作量很大, 导致软件研制周期较长, 费用较高。另一方面, 由于软件难以实现通用, 故每编制一个软件都须进行大量的编码、测试和维护工作, 如果测试工作做得不仔细, 一般都会会在软件中遗留下一定的问题和错误, 轻则导致软件运行不稳定, 使用时常常出现一定的问题, 给用户带来较大的不便; 重则导致在发生特大洪水时, 软件出现错误运行或难以正常运行, 给实时洪水调度带来很大的困难, 一旦洪水调度失误, 后果将不堪设想。因此, 进行实时洪水预报软件的通用性研究, 研制出一个能适应不同的流域特性和不同的河网组成的通用实时洪水预报软件, 具有较为重大的意义。

(b) 因前述原因的影响，软件研制人员往往将大量的精力投入到软件的编码、调试和测试工作中，从而忽视了对软件的文件系统进行精细设计，导致文件系统组织混乱，难以进行有效的文件存取管理，软件运行时常存在一定的问题。此外，由于文件系统设计较为粗糙，故往往保存的有用信息较少，用户难以进行有效的综合分析和预报回溯工作，既不便于提高实时预报成果精度，也难以发挥用户的主观能动性和提高用户的应用水平，使用户既深感不便而又无可奈何。

(c) 实时洪水预报调度软件系统是一个较庞大的应用软件系统，须要有水文专业知识和计算机软件知识的紧密结合和支撑。因国内实时洪水预报调度软件系统的编制者一般均为水文专业人员，故在软件的设计时往往难以按软件工程的方法进行周密的系统分析和系统设计，在软件的编码过程中也往往未能做到针对各种异常的情况进行有效的处理，故软件运行时必须按照设计者的思路亦步亦趋地进行操作，否则就有可能出现问题，更不用说对软件的运行进行有效的人工干预。操作较难的应用软件是不符合当今软件发展方向的。

(d) 受各种因素的影响，现行国内所使用的实时洪水预报调度软件往往功能较为简单，一些较为先进的计算机软件技术，如基于 DSS 的软件技术，基于 GIS 的分布式查询技术，各种成果的专家分析决策技术，各种信息的在线查询技术等，在这些软件中很少采用，难以为实时洪水调度和防洪指挥决策提供尽可能多的信息支持，难以进行洪水优化调度和优化决策。

1.4 软件系统的研究开发过程

为了能更好地为实时洪水预报调度服务并提高实时洪水预报调度的应用水平，国家电力公司中南勘测设计研究院水情测报工程公司结合五强溪水电站实时洪水预报调度软件系统项目合同的执行，进行了实时洪水预报调度软件系统的研究开发工作。

该项目于 1994 年初立项，并于同年 5 月完成了通用汇流系统、文件系统、软件整体结构和各功能模块等的设计，同年 6 月

正式进行软件的编码和调试工作，1995年6月开始在五强溪水电站进行软件的试运行，与此同时，针对试运行中暴露出来的问题及用户提出的修改意见进行了相应的修改和完善工作，1996年8月在五强溪水电站正式投入运行。软件正常运行至今，用户反映良好。

该软件系统于1997年初移用于牛路岭水电站的实时洪水预报调度中，从实时洪水预报方案参数的调试、各种文件的组织至最终完成软件的调试并投入现场应用，前后只用了约5人月的时间，如此高的效率在国内同类软件的编制中是不多见的，说明该软件系统的通用性实现得较好，软件系统的研制是成功的。

由于该软件系统的研制年代较早，随着计算机技术及计算机软件技术的飞速发展，该软件系统的功能、界面、实用性、文件系统、操作的简便性等有关方面都需要作进一步的加强和完善，以更好地为实时洪水预报、实时洪水调度和防洪指挥决策提供全面的系统解决方案。为此，我公司继续投入大量的人力、物力，进行进一步的研究开发，并将在凌津滩水电站和大源渡枢纽工程的实时洪水预报和调度中投入使用。

2. 系统需求分析

2.1 系统功能需求

通过总结实时洪水预报调度软件系统（RTFDs for Windows 1.0）的开发和在五强溪水电站、牛路岭水电站的应用经验，并走访了有关的已有用户和潜在用户，进行了较广泛的市场调研，我们认为，除了保留实时洪水预报调度软件系统（RTFDs for Windows 1.0）的所有功能外，实时洪水预报调度决策支持系统还应增加下列功能：

2.1.1 通用实时洪水预报

在 RTFDs for Windows 1.0 的开发中，已成功地实施了降雨径流预报模型的汇流通用性研究工作，实现了降雨径流预报软件的通用化。但多元回归相关预报模型和线性预报模型的通用化研究因受变量的多样性和变量的时程变化的多样性的影响而尚未实现通用化，给实时预报软件的无修改移植带来了一定的困难。在实时洪水预报调度决策支持系统的开发中，应争取进一步实现相关预报模型和线性预报模型及软件的通用化。

2.1.2 实时洪水预报校正

受多种因素的影响，洪水预报成果的预报值与实测值之间往往存在一定的误差，因此须对实时洪水预报结果进行实时校正。在 RTFDs for Windows 1.0 的开发研究中，曾对实时洪水预报校正技术进行了较深入的研究，实时洪水预报成果也取得了较大的改进。但是，对于个别较特殊场次的洪水，该实时洪水预报校正模型在流量过程的急剧转折处尚存在一定的跳动现象；此外，当实时洪水预报校正模型的某一个或某几个参变量的实时值因某些因素的影响而无法及时得到时，该校正模型将无法使用。为此，

尚须进行进一步的研究，使实时洪水预报校正模型的适用性和稳定性得到进一步的改善。

2.1.3 更强的人工干预能力

在软件的实际运行过程中，软件的实际运行条件有可能跟软件编制时所设想的运行条件之间有一定的出入。如当所需要的雨量资料中，因某些原因的影响，其中的某个或某几个雨量站的资料无法获得时，虽然程序能正常运行，但实时洪水预报成果精度却会受到一定的影响，为此，应为用户提供有关设置替代站点或对缺测数据进行人工插补的人工干预功能，以使用户进行适当的人工干预。系统还要为用户提供预报成果的综合分析手段，使用户从系统提供的若干种方案的预报结果中选择他认为最佳的，或综合出最佳。

2.1.4 实时洪水调度决策支持功能

实时洪水预报的目的是为实时洪水调度决策提供尽可能的信息和决策支持，为此，在此次开发过程中，将重点进行实时洪水调度决策支持研究，为用户提供多种方案、多种选择的实时洪水调度方案，并进行有效的优化和优选，使实时洪水调度更可靠、更有效，尽最大的可能保护人民的生命财产安全。

2.1.5 基于 GIS 的信息查询功能

在 RTFDs for Windows 1.0 中，各种信息的查询只能通过对话框、表格、菜单等形式进行，不但操作上不是太方便，同时也不直观明了，不能使人一目了然，不能使人一眼就能看出流域的整体防洪形势，为此，须在实时洪水预报调度决策支持系统中加入基于 GIS 的信息查询功能。

2.1.6 结合将来的网络软件开发要求

从长远来看，基于计算机网络、分布式数据库、分布式计算

的网络版实时洪水预报调度决策支持系统的研究开发将势在必行。在 RTFDs for Windows 1.0 的研究开发时，因面向对象的 ODBC, JDBC 等有关的接口方法尚未定义或尚未投入应用，故在 RTFDs for Windows 1.0 中，底层文件的接口方法比较原始，数据的存取和传输很难在网络环境中运行，不利于向网络环境移植。为此，在此次的实时洪水预报调度决策支持系统的研究开发中，必须充分运用面向对象的 ODBC、JDBC 等编程接口方法，为将来的网络环境的软件开发打下较为坚实的基础。

2.2 系统信息需求

对于实时洪水调度决策来说，所掌握的信息越多、信息量越大，所能获得的信息越准确、越可靠，实时洪水调度决策的依据就越充分，在全面地综合考虑各方面的影响因素下所作出的洪水调度决策就越能照顾到流域上游和下游、局部和整体等各个方面的利益关系，使实时洪水调度决策更有效、更合理、更科学^[4]。因此实时洪水预报调度决策支持系统应为实时洪水调度决策提供尽可能多的有用信息，以更好地为实时洪水调度决策服务。

通过对实时洪水调度决策中所需要的信息的分析和归类，本系统需要为用户提供以下几类信息：

a) 实时信息

实时信息包括系统所获得的各类水雨情信息（如各遥测站的雨量、水位、流量等）、各类气象信息（如卫星云图、气象预报成果等）、各水利水电工程的运行信息（如各机组的发电出力、各泄洪闸门的开度信息等）等。

b) 成果信息

成果信息包括根据所获得的流域水雨情信息以及预估雨量所作出的各种预报模型的实时洪水预报成果、实时洪水预报校正成果以及经专家分析决策后采用的最终预报成果，各种可行的洪水调度方案集以及经决策分析后所选定的最优实时洪水调度方案等。

c) 统计信息

统计信息包括系统所获得的各类水雨情信息的时段统计信息和日统计信息、各水利水电工程的运行情况的统计信息、所作出的实时洪水预报成果和实时洪水调度成果的评价和统计信息以及有关的防洪区的各种统计信息等等。

d) 历史信息

历史信息包括历史上已出现过的大洪水所对应的天气形势和天气状况、雨洪分布状况、险情发生状况、洪水淹没状况以及历史洪水预报和历史洪水调度情况等，各频率洪水的峰、量特征值，有关的水利水电工程的分布情况和工程的各项设计指标，重要防洪地段的分布情况和防洪能力的大小等。

e) 运行工况信息

运行工况信息包括各防护堤段的运行工况（如堤顶高程、警戒水位、危险水位、险工险段分布、历史出事地点等）、各水利水电工程的运行工况等。

2.3 经济及基础约束

2.3.1 基础约束

实时洪水预报调度决策支持系统可分为如下两种应用范畴：一是应用于国家和各省、市、自治区等各级政府防汛指挥部门的实时洪水预报调度决策支持系统；二是应用于各大中型水利水电工程和重点防洪河段的实时洪水预报调度决策支持系统。一般来说，各级政府防汛指挥部门因自身所肩负的防汛责任十分重大，关系到所管辖的地区的人民生命财产安全，因此，对实时洪水预报调度决策支持系统的要求较高，相应地，一般均要求实时洪水预报调度决策支持系统能提供一个地区的所有大中型水利水电工程和所有重点防洪河段的实时洪水预报和实时洪水调度决策方案，因此，所要求的软件系统一般均很庞大，须在网络环境运行。但从目前的国内实际情况看，因各大中型水利水电工程和各防洪河段的报讯手段、所使用的实时洪水预报调度方案及相应的应用

软件等方面存在较大的差别，运行大型的实时洪水预报调度决策支持系统的基础条件尚不成熟^[36]：

a) 所使用的实时洪水预报模型五花八门，给系统集成带来较大的困难。

b) 所使用的软件其运行平台差别较大，也给系统集成带来较大的困难。

c) 所使用的文件存储系统很不统一，数据格式和数据传递格式差异很大，很难进行网络数据传递。

d) 大多数测站的数据采集和传输仍靠人工实现，如果将这些数据集中到一处处理，其数据的收集必将耗费大量的时间，反而会降低实时洪水预报调度的反应速度，其效果将适得其反。

综上所述，在现有条件下，各级政府防汛指挥部门的实时洪水预报调度决策采用现行的基层进行实时洪水预报，并将洪水预报成果上报防汛指挥部门，由上级决策部门作出实时洪水调度的方法较为适宜，进行大型的实时洪水预报调度决策支持系统开发的条件尚不成熟，可选择适当的时机再行切入。

2.3.2 经济约束

从宏观上说，虽然各级政府防汛指挥部门对于能覆盖其所管辖地区的大型实时洪水预报调度决策支持系统的应用较为支持，但如果要充分发挥实时洪水预报调度决策支持系统的预警、预报和洪水调度决策功能，一般均需具备较好的报汛和防汛基础设施，要建设较为完善的水雨情自动遥测、遥报体系和较完善的通讯保障体系，其费用投入很大，短时间内尚难以实现，难以具备研究开发大型实时洪水预报调度决策支持系统的条件。

从微观上说，虽然我公司的技术力量较强，但目前人力资源非常紧张，难以抽出大量的人员来进行大型网络版应用软件的开发，且现阶段亦不具备开发大型网络版应用软件的财力。

应用于单个大中型水利水电工程和重点防洪河段的实时洪水预报调度决策支持系统规模较适中，运行环境较为独立，应用范围较广，市场潜力亦较大，所需投入的开发费用也较适宜，且我

公司已具备成熟的开发经验和开发基础，为此次开发的研究方向。

2.4 系统构成

实时洪水预报调度决策支持软件系统主要由以下 7 个子系统组成。

a) 实时信息查询

实时信息查询可分为基于 GIS 的分布式实时信息查询和分类实时信息查询两大功能：

1) **基于 GIS 的分布式实时信息查询**：用户通过在电子地图上选取所需查询的信息点，便可弹出关于该信息点的信息窗口，据此即可查询该信息点的常规信息（类型、位置、观测项目等常规信息），也可查询实时雨量、水位、流量信息。电子地图作为底图可进行放大、缩小和漫游操作，电子地图的各种显示属性可由用户有选择的设置。

2) **分类实时信息查询**：该模块以表格或图形的形式为用户提供分类的查询信息。分类形式有：按数据类型分类可选择雨量、水位、流量、工程运行信息等；按时段长度分类可选择 1h、3h、6h、12h、1 日等；按显示形式可选择表格或图形显示。所查询的信息可打印输出。图表有多种形式便于用户选择、游览、比较。

b) 实时信息输入

实时信息输入可分为数据自动采集和数据人工编辑两大功能：

1) **数据自动采集**：该模块自动采集水情自动测报系统所传输来的无线数据，并进行检错、纠错、分类、存储等处理。同时还可以通过局域网实现前置机和主机之间的数据通信，主机可从前置机数据库中取得实时遥测数据，并经统计和转换后存入主机的数据库中。

2) **人工编辑**：可编辑主机的数据库表，包括实时水雨情数据库和工程运行管理数据库，具有自动内插数据、水位自动转化为流量、编辑时段表时自动更新日表、数据超限提示等功能，并

自动更新其他的相关联的数据库表。

c) 实时洪水预报和校正

该子系统由实时洪水预报、实时预报校正、预报结果专家分析决策和预报结果输出四大功能模块组成：

1) **实时洪水预报**：可完成各预报方案的预报计算，并将各方案的预报结果存入预报结果数据表中。此外还可完成预估雨量预报，可对缺测的雨量站点指定替代站点。

2) **实时预报校正**：该模块主要完成对预报模型所得到的预报结果的实时校正，并将校正结果存入数据表中。

3) **预报结果专家分析决策**：该模块可通过把不同预报方法所得的预报结果汇总或将本次洪水与历史库中相近洪水对比分析等方法，由预报专家根据自己的预报经验对实时洪水预报成果进行进一步的人工修正和人工调整。同时，该模块既可为专家自动提供历史上的相近洪水过程，也可由专家人工手选历史相近过程，为专家分析决策提供有力的手段。

4) **实时洪水预报结果输出**：对各预报断面可按不同的预见期、不同的预报方法输出预报结果，预报结果可按洪号输出，并按表格和图形的形式显示和打印。

d) 实时洪水调度决策支持

该子系统可根据当前的上下游水雨情情况、工程运行情况和运行要求以及各防洪控制点的约束条件，自动选择可行的洪水调度方案，也可由人工加入可行的洪水调度方案，在此基础上，进行洪水演进计算和调洪演算，并根据决策目标权重对洪水调度方案进行优选，从中选择出最优防洪调度方案，此外，可以通过改变决策目标权重，对洪水调度方案进行不同决策目标下的优选。

e) 图表集成

该子系统可自动生成和输出工程运行管理所需要的各种表格和图形，为用户的日常管理和数据分析提供尽可能的方便。

1) **实时图形输出**：可自动生成用户所需的各种实时数据和各种统计数据的过程线及其他实时图形，以及工程、流域的水情实况图、雨量分布图、雨量等值线图。并可进行图形的显示和

打印。

2) **实时表格输出**: 可自动生成用户所需的实时水雨情数据、实时工程运行管理数据以及上述各类数据的统计成果等的输出表格, 并可进行表格的显示和打印。

f) 辅助决策信息

可进行工程、各防洪控制点及各个水雨情测站等的各种参量和有关设计数据的显示和查询, 及各种有关本工程的图片的显示等。

g) 系统概览

对系统的组成、系统各部分的功能及其他有关情况进行简要的介绍和浏览。

系统各子系统功能组成如图 3—1 所示。

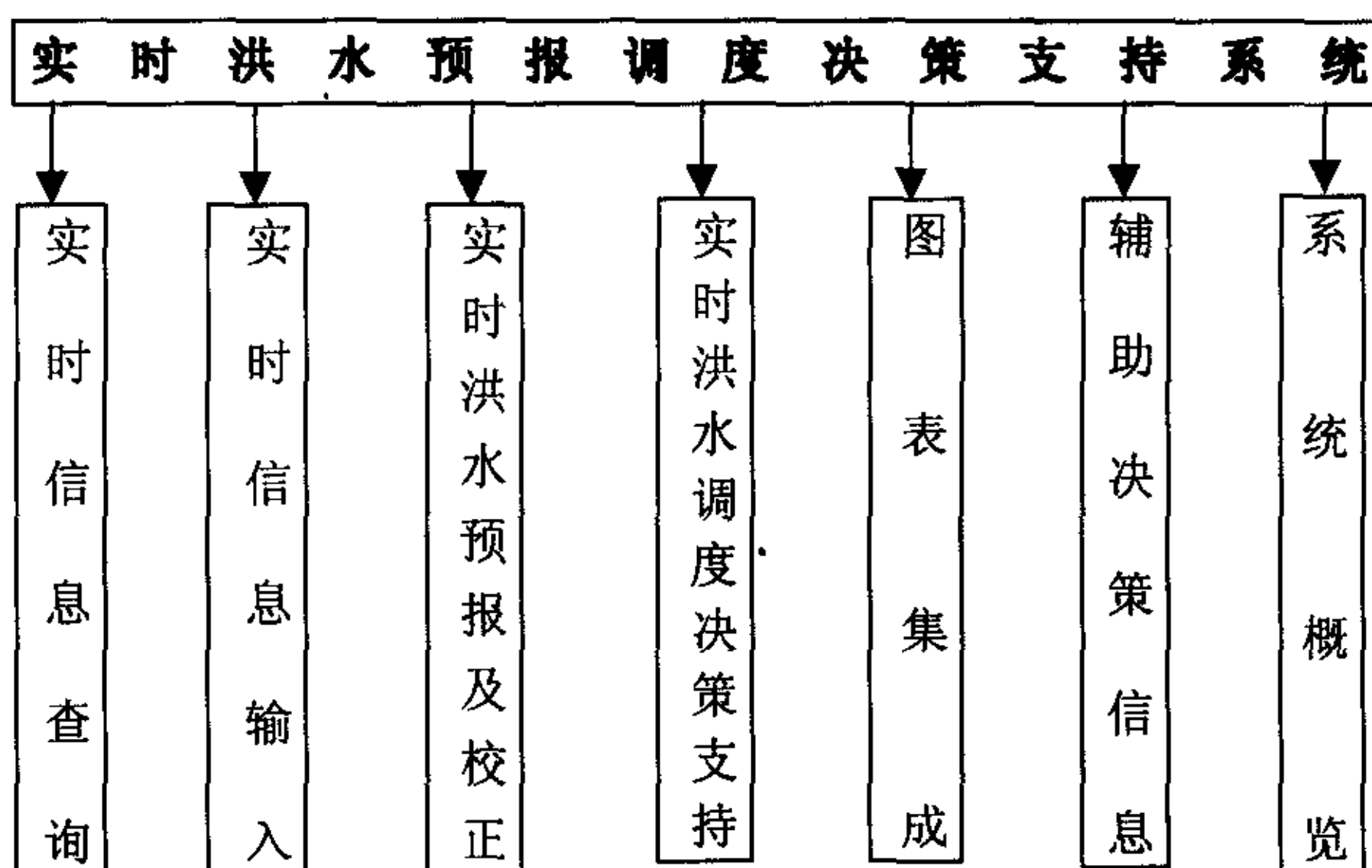


图 3—1 实时洪水预报调度决策支持系统模块功能图

3. 软件研究开发方法

3.1 工程化的开发方法

软件系统从出现一个构思之日起，并通过从系统规划到软件开发、使用、维护、直至软件的停止使用，一般来说均具有一定的生命周期。软件的生命周期一般来说主要经历如下几个阶段，即软件可行性研究与计划、软件需求分析、软件设计、软件实现、软件测试、软件运行与维护等 6 个主要阶段，并应按照如下的有关要求进行管理。

a) 软件可行性研究与计划阶段

在软件研究开发的构思基本形成以后，必须紧接着进行软件研究开发的可行性分析论证工作。可行性分析论证工作要求明确软件研究开发的开发目标和总的要求，并应该进行经济技术论证，确定软件研究开发的投资和收益，以确定该项目是否可以立项开发。在可行性研究工作完成以后，应制订软件开发计划，并完成有关文件的编制。

b) 软件需求分析阶段

在软件需求分析阶段，应由系统分析人员对被设计的系统进行系统分析，确定对该软件的各项功能、性能的需求和设计约束，并确定对文件编制的要求。作为本阶段工作的结果，一般来说，应完成软件需求说明书和初步的用户手册的编写工作。

c) 软件设计阶段

在软件设计阶段内，系统设计人员和程序设计人员应该在反复理解软件需求的基础上，提出多个设计，分析每个设计能履行的功能并进行相互比较，最后确定一个设计。软件设计应完成软件结构的确定、功能模块的划分、功能的分配以及软件的处理流程等有关设计工作，在被设计的软件系统比较复杂的情况下，软件设计阶段应分解成概要设计阶段和详细设计阶段两个步骤。一般情况下，本阶段应该完成概要设计说明书、详细设计说明书和软件测试计划初稿的编制工作。

d) 软件实现阶段

在软件实现阶段内，应完成软件的源程序编码、编译、和排错调试工作、得到无语法错误的源程序清单，在这一阶段内，特别应加强软件编程人员的相互交流和信息传递交换工作。在软件实现阶段，应开始模块开发卷宗的编写工作，并应完成用户手册、操作手册等面向用户的文件的编写工作，同时还要完成测试计划的编写工作。

e) 软件测试阶段

在软件测试阶段，应对该软件进行全面的、严格的测试，以全面地排除软件的运行错误，并对已编制的文件进行全面的检查审阅。软件测试工作应按照软件测试计划的要求，准备好能对软件进行全面测试的测试数据，特别是应准备较多的能引起软件运行错误的测试数据，在此基础上，对软件大量的、严格的测试，在条件允许的情况下，应尽可能多地将软件分发给开发小组以外的有关人员，以使软件测试工作更充分、更彻底。在本阶段，一般要完成模块开发卷宗和软件测试分析报告的编制工作，同时，作为开发工作的结束，所产生的程序、文件以及开发工作本身将逐项被评价，并完成项目开发总结报告的编写工作。

f) 软件运行和维护阶段

在软件运行和维护阶段，应在软件的运行和使用过程中不断地被维护，并根据新提出的需求进行必要而且可能的扩充和删改。

实时洪水预报调度决策支持系统的研究开发基本上是按照上述模式进行的。

3.2 数据库选择

从我国的应用情况看，以前的微机版应用软件一般采用 FoxPro 数据库管理系统进行应用软件的数据管理。虽然 FoxPro 在我国应用较为广泛，较适宜于在单机环境运行，但 FoxPro 数据库也存在着数据表分散管理的问题。一个表以一个文件的形式存储，既不便于统一管理，也不便于数据保密。由 Microsoft 公

司研制的 Access 数据库管理软件，主要适应于中小型数据库的管理，近年来在我国应用也逐渐广泛；Access 对数据表采用集中管理的形式，数据管理功能较强，也便于进行数据保密。Visual Basic 5.0 和 Access 均由 Microsoft 公司提供，Visual Basic 5.0 内含 Access 数据库的 ODBC 接口，既便于软件编程，也有利于软件的对外发行，运行效率也较高；此外，使用 ODBC 数据库接口进行软件开发，也便于以后使用其他网络数据库时，能方便地进行软件移植，不需要对软件代码进行大的修改^[8]。故选择 Access 数据库来进行该软件系统的数据管理。

3.2.1 数据库结构

根据实时洪水预报调度决策支持系统的信息需求分析，将该系统的各类数据信息采用不同的文件存储结构。前置机所接收到的各类原始信息由前置机原始信息数据库进行存储管理。前置机的各类原始信息经主机处理后所形成的各类水雨情信息、工程运行信息和实时洪水预报调度信息在主机中以数据库的形式存储，其中，因实时洪水预报调度信息一般不需要进行文件的复制保存，另行建立一个实时洪水预报调度成果数据库进行存储管理；而各类水雨情、工程运行信息常常需要进行文件的备份和复制保存工作，由水雨情工情数据库负责管理。地理信息采用 ARCInfo 的 .bna 文件形式进行文件存储管理。同时，为了方便用户修改，对于一些极为重要但又需要经常修改的参数数据采用 .TXT 文本文件的形式存储，而不采用 Access 数据表的形式存储，以便于在由于各种原因的影响而无法对参数数据进行修改时，用户可以使用任意一种文本编辑器对参数文件进行修改。

a) 水雨情工情数据库

1) **时段信息**：主要包括逐年的时段雨量表、时段水位表、时段流量表及工程运行信息表等。

2) **统计信息**：主要包括逐年的日雨量统计表、日水位统计表、日流量统计表及工程运行信息统计表等。

3) **总括信息**：主要包括雨量站表、水位站表、流量站表、洪

号表、资料系列表及雨量插补索引表等，用于对有关的信息进行描述。

b) 实时洪水预报调度成果数据库

该数据库主要用于对不同预报模型所计算出的实时洪水预报成果、专家分析决策后所采用的最终预报成果以及实时洪水调度成果进行存储管理。

c) 原始信息数据库

该数据库主要用于存储前置机所接收的各遥测站发送的各类水雨情原始信息和遥测站的运行工况信息，由工情传感器所发送来的工程运行原始信息以及对各遥测站、各传感器的描述信息。

3.2.2 数据库存取控制

实时洪水预报调度决策支持系统的各类信息主要是为防洪调度决策服务，是用于社会公益事业，故对各类防洪决策支持信息的查询不加任何限制；为了防止用户对数据信息进行误操作和误删改，对上述信息的编辑和修改设定了不同的权限。对于各类参数信息，总括信息，因对系统的正常运行极其重要，故只允许系统管理员进行编辑和修改^[16]。

实时洪水预报调度决策支持系统进行了仔细的、周详的文件系统设计，使其文件系统既能存储尽可能多的有用信息，同时又要做到文件系统直观、明了、简洁，既便于进行文件操作又便于进行文件管理。

3.3 开发工具选择

RTFDs for Windows 1.0 是用 Borland C++ 4.0 并结合 FoxPro 2.5b、Visual Basic 3.0 开发的，在软件的研究开发过程中，虽然我们感到 C++ 语言的移植性、程序的运行效率均较高，但我们也感到了诸多的不便，影响了软件的开发效率，大大增加了软件的开发难度。

a) C 及 C++ 语言均较为复杂，不具备一定的计算机专业知识的人一般难以短时间内弄懂学会，对软件开发人员的素质要求较

高，基于我单位具体情况，如采用 C 或 C++ 语言编程，则难以组成较大的软件开发小组，不便于进行软件的群体开发。

b) 用 C 及 C++ 语言编制 Windows 软件，必须对 Windows 的消息传递机制和 Windows 的内部数据结构极为熟悉，而 Windows 存在大量的消息传递和许多复杂的内部数据结构，掌握起来十分不易，给软件编程带来了较大的困难。

c) C 及 C++ 语言的编程效率较低，要实现一个简单的功能往往需要编写大量的程序代码，不但大大增加了程序编码的复杂度，同时也大大增加了代码的排错、纠错工作量。

d) C 及 C++ 语言的多媒体功能较弱，多媒体方法实现起来较难，给软件界面的编制带来较大的困难。

e) 早期的 C 或 C++ 无数据库接口能力，需自行编制接口子程序；高版本的 C 及 C++ 语言虽然已经加入了数据库编程接口，但其功能较弱，软件编程亦较困难。

而 Visual Basic 的可视性编程环境和 Basic 编程语言，给程序的编制带来了极大的便利，不但编程效率较高，且曾使用过 Basic 编程的一般人员，只要稍加培训并对 Windows 的消息传递机制稍加熟悉，就能使用该语言进行软件编程，编程效率大大提高，且可以组成较大的软件开发小组。对于一些很复杂的、Visual Basic 5.0 难以或无法实现的功能，也可以通过直接调用 C 类型的 Windows API 函数，或用 C 及 C++ 语言编制 DLL 可重用函数库，经编译后也可方便地调用，可以得到较好的解决。此外，用 Visual Basic 5.0 编制的软件，经编译后其运行效率跟 C 语言相近；其多媒体支持能力、数据库支持能力、Java 支持能力、Internet 支持能力，都给软件编程带来了极大的方便^{[8][9][30]}。

在 Visual Basic 5.0 的企业版中，新增了如下新的功能：

a) 可编译生成本机代码：为了更快地执行，可将 Visual Basic 工程编译成本机代码，使用新的本机代码选项配置本机代码的编译，并可使用 Visual C++ 环境调试本机代码。

b) 可创建自己的 ActiveX 控件：组合现有的控件，或从中创建自己的控件。用 Visual Basic 创建的 ActiveX 控件可以有事件、数据绑定支持、许可证支持、属性页、Internet 特征等多

种功能。

c) 可同时使用多工程项目：在 Visual Basic 的同一个实例中打开多个工程。这对调试 ActiveX 控件很有用。

d) 可用于创建 ActiveX 文档：就象设计传统的 Visual Basic 应用程序那样既简单又直观。ActiveX 文档将 Visual Basic 应用程序推进到 Internet 和 Intranet 浏览器窗口中。

e) MDI/SDI/资源管理器样式的界面选项：能够创建单文档界面、多文档界面或 Microsoft 资源管理器样式的文档界面应用程序。

f) 向导(Wizard)功能：具有 ActiveX 控件接口向导、ActiveX 文档移植向导、数据窗体向导和属性页向导都是新的。安装向导已经增强，它能支持通过 Internet 发行；支持使用分布式 COM (DCOM) 和远程自动化安装远程服务器部件；并能为 Visual Basic 创建的工程和部件建立从属文件。此外，还包括了向导工具栏和向导管理器。

g) 扩展部分模型：新模型允许以编程方式扩展开发环境并控制工程、事件、代码和可视元素。

h) 声明、引发和处理自己的事件：部件提供的对象可以引发由其它应用程序送来处理的事件。使用 WithEvents 变量，也可以处理由其它应用程序或自己的对象引发的事件。事件提供了一种对异步回调的简单变通处理。

i) 代码编辑器的增强功能：“块注释和解除块注释”对文本选择块的每一行添加和删除注释字符。“属性/方法列表”为控件显示一个可用属性的下拉列表。“自动快速信息”为语句和函数显示语法。“边距”指示器标记断点和当前语句，并且“下一个语句”指示器是可拖动的。“过程查看”和“全模块查看”按钮使显示模块中选定的过程或全体代码变得更加容易。可以从“代码”窗口拖放到“监视”窗口。“调试”方式的“立即监视”允许得到作为工具提示的当前值。

j) 多线程和线程安全 ActiveX 部件：两个新功能支持建立可缩放的使用多线程技术的 ActiveX 部件。在分布式应用程序中对未想到的执行过程（非用户界面的元素）建立 ActiveX 部件，

这将允许在多线程环境中使用该部件。对未想到的执行过程所标记的 ActiveX DLL 部件支持 ActiveX/COMApartment 线程模式。在创建对象实例时为获得更好的可缩放性，对未想到的执行过程所标记的 ActiveX EXE 部件将通过多线程分配对象实例。

k) Internet 部件下载：可以利用安装向导特别为 Web 上部署的部件打包。

l) 全局对象：为了简化重用代码库的创建过程，Visual Basic 允许把代码部件中的对象标记为全局的，不用显式地创建全局对象的实例就可以调用它们的方法。

m) 枚举：现在可以把相关的命名常数组成枚举型进行定义。枚举可以包含在 ActiveX 部件的类型库中，被使用该部件的开发者使用。

n) OLE 拖放：多数控件现在都支持 OLE 应用程序之间的拖放操作；例如，把 Word 文档中的内容拖到 TextBox 控件。

o) 多态性：Implements 特征允许类支持多个接口。部件的用户可以事前绑定到这些接口，而不必关心那些实现它们的对象。

p) 移植到分布式环境中的 COM：通过 COM 全面支持分布式部件：现在，通过 Windows 95 和 NT 4.0 上的 COM，所有远程自动化工具直接支持远程操作。

q) RDO/RDC 的增强功能：远程数据对象库和远程数据控件版本 2.0 的特征增强了本地游标支持、开放式批量更新、独立连接和查询对象。

r) 连接设计器：内置式 ActiveX 设计器允许创建独立连接对象，其中包括作为方法的用户自定义查询或存储过程。

s) SQL 调试：交互式调试工具允许调试 VB 设计环境中的 Transact-SQL 代码。

t) Repository：内置的 Repository 对象，它可以对 Visual Basic 工程进行保存、组织、查找和检索数据。可扩展的对象模型和 API 允许对 Repository 进行完全的编程访问。可以创建新对象模型帮助管理软件工具。

为此，在实时洪水预报调度决策支持系统的研究开发中，决

定全面放弃 RTFDs for Windows 1.0 的全部 C++和 FoxPro 代码，采用 Visual Basic 5.0 作为本系统的开发环境，并重新编写所有的源代码。相应地，软件运行环境也从 16 位的 Windows 3.1 升级至 32 位的 Windows 95 或 Windows NT，亦是為了便于向网络环境的应用软件转化。

4. 数学模型及算法分析

4.1 实时洪水预报模型

实时洪水预报是实时洪水调度的最重要依据，只有在准确、快捷的实时洪水预报的基础上，方能进行有效的实时洪水调度。目前所使用的实时洪水预报种类较多，各个模型有各个模型的使用条件和不同的侧重点，大致可分为如下几类^[7]：

- a) **确定性模型和随机模型**：其中确定性模型又可分为概念性模型和黑箱子模型。
- b) **线性模型和非线性模型**。
- c) **参数随时间变化的时变模型和时不变模型**。
- d) **集总模型和分散模型**。

国内目前所使用的实时洪水预报模型较多，有自行研制的也有从国外引进的，其中使用较多的是如下几种模型：

- a) **P+Pa 模型**：该模型应用年代较早，主要特点是模型十分简单，参数较少，便于手工计算。
- b) **相关预报模型**：该模型主要适合于区间面积较小的河道洪水预报。
- c) **新安江模型和陕北模型**：两模型为降雨径流模型，前者适用于南方湿润地区，后者适用于北方干旱半干旱地区。
- d) **萨克拉门托模型和 Tank 模型**：系从国外引进，为降雨径流模型，前者适用于北方干旱半干旱地区，后者适用于南方湿润地区。
- e) **CLS 模型、SCLS 模型和 ARMA 模型**：均为线形模型，主要用于非线性影响不太严重的流域。

根据多年的实时预报经验，降雨径流实时预报模型和多元回归相关预报模型在不同的情况下具有较好的适应性和较高的预报精度，可以满足大部分湿润、半湿润地区实时洪水预报的需要。

降雨径流预报模型中因新安江降雨径流预报模型在我国具有广泛的应用，是本次降雨径流实时预报模型研究的重点；此外，根据流域的实际情况和实时洪水预报的需要，也可以采用其他的降雨径流预报模型取代新安江模型，但程序中应该保留取代的接口。多元回归相关预报模型对于预报区上游来水较大的情况，比一般的线性模型具有更好的预报精度和更强的适应性，是此次线性模型研究的重点。

4.1.1 新安江降雨径流模型

新安江（三水源）降雨径流模型^[23]在我国应用范围较广泛，主要应用于南方湿润和半湿润地区。该模型属于分散型降雨径流模型，它把区间流域分为不同的单元块流域，并分别对每个单元流域进行流域产流计算，得出各单元流域不同时间段的流域产流量，据此可求出各单元流域的出口流量过程。在此基础上，再进行各单元流域出口断面以下的河道洪水演算，求得该单元流域在预报流域出口的流量过程，把每个单元流域在预报流域出口的流量过程相加，便得到了预报流域的实时预报流量过程。

新安江降雨径流模型的蒸散发计算考虑得比较细致，对土壤的蒸散发计算分上层、下层和深层分别进行考虑，比较切合湿润、半湿润地区的土壤蒸散发实际情况，因此，对于久旱之后的流域洪水预报，其预报精度得以提高。此外，该模型根据湿润、半湿润地区的流域实际产流情况，设置了自由水蓄水库，将径流划分为地面径流、壤中流和地下径流3种情况，也是比较精细的。

新安江降雨径流模型的产流基本计算公式如下：

当 $P - E + A < WM(1 + B)$ 时：

$$R = P - E - WM + W + WM \left[1 - \frac{P - E + A}{WM(1 + B)} \right]^{1+B}$$

否则：

$$R = P - E - WM + W$$

式中：

$$A = WM(1 + B) \left[1 - \left(1 - \frac{W}{WM} \right)^{\frac{1}{1+B}} \right]$$

P、E、R 分别为时段降水量、时段蒸发量、时段产流总量，均以 mm 计；

W、WM 分别为土壤含水量、最大土壤含水量，均以 mm 计；

B 为蓄水容量曲线指数。

上述公式中 W、E 取自三层蒸发模型的计算结果，其计算公式如下：

当 $P+WU \geq EP$ 时：

$$EU=EP, EL=0, ED=0;$$

当 $P+WU < EP$ 且 $(EM-EU) \times (WL/WLM) \geq C \times (EP-EU)$ 时：

$$EU=WU+P, EL=(EM-EU) \times (WL/WLM), ED=0;$$

当 $P+WU < EP$ 且 $(EM-EU) \times (WL/WLM) < C \times (EP-EU)$ 且 $WL < C \times EM$ 时：

$$EU=0, EL=WL, ED=C \times (EM-EU) - EL;$$

否则：

$$EU=0, EL=C \times EM, ED=0。$$

子河段流域蒸散发量、土壤含水量为：

$$E=EU+EL+ED, W=WU+WL+WD$$

式中：

EU、EL、ED 分别为：上层、下层、深层蒸发量，以 mm 计；

WU、WL、WD 分别为：上层、下层、深层土壤含水量，以 mm 计；

EP 为蒸发能力，以 mm 计；

WLM 为下层最大土壤含水量，以 mm 计；

C 为深层蒸发系数。

时段产流总量 R 求得后，通过自由水蓄水库结构进行分水源计算，最终求得地面径流，壤中流和地下径流。分水源计算时，R 进入自由水蓄水库成为产流面积上的产流深 PE。分水源计算公式如下：

当 $PE+AU < SSM$ 时：

$$RS = \{PE - SM + S + SM[1 - (\frac{PE + AU}{SSM})]^{1+EX}\} \cdot FR$$

否则:

$$RS = (PE + S - SM) \times FR$$

$$RI = KI \times S \times FR$$

$$RG = KG \times S \times FR$$

式中:

$$AU = SSM[1 - (1 - \frac{S}{SM})^{\frac{1}{1+EX}}]$$

$$SSM = (1+EX) \times SM$$

S 为自由水蓄水库深, 以 mm 计;

KI、KG 分别为壤中流、地下径流的出流系数;

FR 为产流面积。

通过产流模型计算出流域的产流量后, 可通过各种河道汇流模型进行河道汇流计算, 得到预报流域的出口断面的预报流量过程。河道汇流计算方法很多, 常用的汇流方法有马斯京根法、汇流单位线法、非恒定流演算法等等, 受河道组成形状千变万化、河道入出流情况变化的影响, 河道汇流非常难以实现通用化。

4.1.2 通用降雨径流汇流模型

此次研究中, 采用马斯京根矩阵演算法来解决河道汇流的通用化问题。该方法的基本思想是: 将预报区间按预报时段长度进行子河段划分, 子河段流域所产生的壤中流和地下径流经线性水库调蓄后与地面径流一道形成该子河段流域的河网总入流, 并经单位线汇流计算后形成子河段流域出口断面流量。

壤中流, 地下水线性水库调蓄计算公式为:

$$QI(I) = QI(I-1) \cdot CI + RI(I) \cdot (1 - CI)$$

$$QG(I) = QG(I-1) \cdot CG + RG(I) \cdot (1 - CG)$$

单位线汇流计算公式为:

$$Q(I) = \sum_{J=1}^M R(I-J+1)UH(J)$$

上三式中:

$$R(I) = RS(I) + QI(I) + QG(I),$$

其中：CI、CG 分别为壤中流、地下径流的消退系数，
UH 为单位线，M 为单位线长。

在计算出各单元流域降雨所形成的流量过程后，采用马斯京根法矩阵解法进行河道汇流计算：

$$Q_{t+1} = \Phi Q_t + BU_{t+1}$$

式中：Q 为状态向量，即各子河段出流。

Φ 、B 分别为状态转移矩阵和输入分配矩阵。

U 为输入矩阵。与各子河段的区间入流有关。

Φ 和 B 与各子河段马斯京根法参数 k、x 有关。考虑到流域汇流的非线性作用，马斯京根法参数采用其非线性解，其基本计算公式为：

$$l = AO' + B$$

$$x = l/2 - l/2L$$

$$k = f(O')$$

$$O' = [2LO + (I - O)(L - B)] / [2L + A(I - O)]$$

式中：

I、O 分别为子河段的入流、出流，以 m^3/s 计，

l、L 分别为特性河长、河长，以 km 计，

O' 为示储流量，以 m^3/s 计，

k、x 为马斯京根法参数，k 是稳定流传播时间，以 h 计，

x 为流量比重因子。

A、B 为马斯京根法非线性解待定系数。

从马斯京根法汇流矩阵算法可以看出，利用上述矩阵解法，可以较方便地实现汇流计算的通用化，其中输入矩阵 U 可较方便地处理流域的入出流问题。同时，通过精心设计的带存储指针和有关特性指示的参数文件，彻底的实现了降雨径流模型的通用化。

4.1.3 通用线性预报模型

通过近几年的研究我们发现，一些相关预报模型如 ARMA

模型本身就是用线性模型的形式表达，另一些图表形式的相关预报模型和公式表达的相关预报模型，虽然是非线性模型，但通过一定的转换，在允许的精度范围内，也可以表示为线性预报模型的形式，因此，可将相关预报模型和线性预报模型归结在一起考虑，即重点考虑研究线性预报模型。这样就可以解决大部分的相关预报模型的通用化问题。

为了实现线性预报模型的通用化，必须找到一种通用的线性预报模型表达形式。通过仔细的研究和分析，设计了一种适应性较好的线性预报模型表达形式^[24]：

$$Y_t = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + \dots + A_n X_n + e$$

其中：

A_i 为参数矩阵， $A_i = [a_{i,0}, a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,k}]$

X_i 为输入矩阵， $X_i = [x_{i,t}, x_{i,t-1}, x_{i,t-2}, \dots, x_{i,t-k}]$

e 为模型噪声

上述表达形式，可以很方便地由计算机实现，同时，也可以较方便地用于进行实时洪水预报校正。

此外，还精心地设计了线性预报模型的参数文件，该参数文件为带数据指针的文本文件，不但存储了计算所需的各项参数数据，同时还可方便地进行输入变量意义指示和输入变量数据存储位置指示，较好地实现了该项通用化工作。

4.2 实时洪水预报校正

4.2.1 常用的实时洪水预报校正方法

实时洪水预报校正是指在作出并发布实时洪水预报之前，根据最新的实测信息，对预报模型的结构、参数、状态变量、输入向量或实时预报值进行某种校正，使其更符合流域的客观实际情况，以提高实时洪水预报精度。

实时洪水预报校正能力的强弱，对实时洪水预报模型的精度有较大的影响，也有利于提高实时洪水预报的预见期，研究实时

洪水预报校正方法及其软件实现是本次的一个研究重点。

实时洪水预报校正方法较多，不同的校正方法有不同的适用范围，校正能力也有较大的差异，算法的繁简程度也相差较大，现简述如下：

a) 时变参数法

由于水文系统并非严格的线性系统，预报模型的某些参数会随流域的产汇流条件的改变而改变，如不同的降雨强度、降雨分布和不同的河道水位会使流域的产汇流参数有所不同，因此，采用时变的产汇流参数可提高实时洪水预报的精度。

b) 实测流量代入法

若能将预报方程写成包含本预报断面和/或上游入流断面流量的形式

$$Q_{t+k} = f(Q_t, q_t, U_t, \theta)$$

式中： Q_{t+k} ， Q_t 为预报断面预报流量和实测流量；

q_t 为上游入流断面实测流量向量；

U_t 为输入向量；

θ 为参数向量。

在实时洪水预报时，将 Q_t ， q_t 作为变量代入预报方程中，即可达到提高预报精度的目的，该方法的优点是算法非常简单，容易实现，也能在一定的程度上提高预报精度。

c) 误差预测法

任何一个预报模型其预报误差序列均呈现一定的特性，其中一类是偶然误差，误差序列正负相间、有大有小，不存在规律；另一类是连续性误差，误差序列存在一定的规律，可对此误差序列建立适当的误差随机模型进行误差预测和误差校正^[17]。

误差预测法较好的方法为自回归模型方法，即将误差序列表示为 n 阶自回归模型，即

$$\eta_t = \phi_1 \eta_{t-1} + \phi_2 \eta_{t-2} + \dots + \phi_p \eta_{t-p} + \zeta_t$$

式中 η 为预报误差， ζ 为随机噪声， ϕ 为模型参数，可通过在线动态识别法进行模型参数识别。

d) 在线递推最小二乘法

最小二乘法是人们所熟悉的，在线递推的概念则是基于希望

利用最新的观测信息来不断改进参数估计，在实时洪水预报校正中，一般采用带遗忘因子的在线递推最小二乘法，以人为地加强当前数据的作用，并同时削弱过去的数据的作用，便于计算机进行矩阵计算，也更符合实时洪水预报校正的实际情况^{[5][6]}。

e) 卡尔曼滤波法^[6]

卡尔曼滤波于 1960 年提出，当时主要用于通信与自动控制，并已被实践证实是较为有效的方法，随后在许多其他领域得到了广泛的应用。卡尔曼滤波法对参数的估计是一个链式过程，即每个时段上分别由预测和滤波两个环节组成，它是在做到前一个时段参数尽可能准确的基础上，进行下一个时段的预报和滤波。在计算形式上，卡尔曼滤波法和在线递推最小二乘法十分相象。

f) 模型参数动态识别法

模型参数动态识别法自动跟踪模型的参数变化以达到实时校正的目的^[22]。由于水文预报模型一般来说均较为复杂，需要动态辨识的参数较多，实现起来尚较为困难，一般很少使用。

4.2.2 实时洪水预报校正

除模型参数动态识别法因实现困难而较少采用外，上述其他几种方法可根据流域的实际情况和所选用的预报模型的要求而加以采用。因时变参数法和实测流量代入法实现起来比较简单，在此不加描述。其他三种方法基本原理均为最小二乘法，其基本计算和递推公式如下：

a) 模型的建立

误差预测法和在线递推最小二乘法均采用在线递推最小二乘法进行递推演算，不同的是输入和输出变量有不同的意义，其中误差法输入变量为误差，输出量亦是误差。故采用线性系统数学模型，简记为：

$$Z_k = \Phi_k \times \theta_k + e_k$$

其中 Z_k 为系统输出向量， Φ_k 为系统输入矩阵，即 k 时刻以前系统的已知数据， θ_k 为系统模型参数向量， e_k 为系统噪声。

为了满足卡尔曼滤波法的有关要求，系统描述选用状态方程

描述方法，其一般形式为

$$X(k+1) = \Phi(k+1)X(k) + B \times U(k+1) + \Gamma(k+1)\zeta(k+1)$$

$$Y(k) = h(k)X(k) + e(k)$$

b) 求解方法

在线递推最小二乘法的基本求解思路是，当系统从 k 时刻运行到 $k+1$ 时刻后，依据 $k+1$ 时刻的新输入和输出的观测资料，对参数 θ 作在线实时校正，其计算式为：

$$P_{k+1} = (P_k - K_{k+1} \phi_{k+1}^T P_k) / \lambda$$

$$K_{k+1} = P_k \phi_{k+1} (\lambda + \phi_{k+1}^T P_k \phi_{k+1})^{-1}$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + K_{k+1} (Z_{k+1} - \phi_{k+1}^T \theta_k)$$

其中 λ 为衰减记忆因子 ($0 < \lambda \leq 1$)，用以克服在线识别中由于无限记忆而导致的“数据饱和”问题。

卡尔曼滤波以系统状态空间模型为研究对象，以承认存在系统模型噪声和观测噪声干扰实时洪水预报为研究前提，采用现代随机估计理论递推地给出系统状态变量的无偏最小方差估计。

$$\bar{X}_{k/k-1} = \phi_{k/k-1} X_{k-1} + B \times U_k$$

$$P_{k/k-1} = \phi_{k/k-1} P_{k-1/k-1} \phi_{k/k-1}^T - \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T$$

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$\bar{X}_{k/k} = \bar{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \bar{X}_{k/k-1})$$

$$P_{k/k} = (I - K_k H_k) P_{k/k-1}$$

其中 Q 为噪声矩阵 ζ 的误差协方差矩阵， R 为系统观测噪声矩阵 e 的误差协方差矩阵。

4.3 实时洪水调度决策支持

4.3.1 决策支持的主要任务

DSS 是以管理科学、运筹学、控制论和行为科学为基础，以计算机技术、仿真技术和信息技术为手段，面对半结构化的决策问题，支持决策活动的具有智能作用的人—机计算机系统^[2]。其主要任务为：

a) 分析和识别问题；

- b) 描述和表达决策问题和决策知识;
- c) 形成候选的决策方案 (目标、规划、方法和途径等);
- d) 构造决策问题的求解模型 (如数学模型、运筹学模型、程序模型、经验模型等);
- e) 建立评价决策问题的各种准则 (如价值准则、科学准则、效益准则等);
- f) 多方案、多目标、多准则情况下的比较和优化;
- g) 综合分析, 包括把决策结果或方案分到特定的环境中所作的情景分析, 决策结果或方案对实际问题可能产生的作用和影响分析, 以及各种环境因素、变量对决策方案或结果的影响程度的分析等。

4.3.2 选择实时洪水调度决策支持的原因

通过实时洪水预报、实时洪水预报校正及专家分析论证得到最优的实时洪水预报过程后, 其唯一的目的是为了进行实时洪水调度。根据实时洪水预报过程, 在洪水调度规程规定的范围内, 可以得到许多个正确的洪水调动预案, 在这些洪水调度预案中, 有些预案可能较优, 有些预案可能不太优, 还有些预案或许还会造成不良的调度后果。如何能从众多的洪水调度预案中, 挑选出较优 (或最优) 的洪水调度方案, 以使洪灾的损失降到最小, 是一个值得高度重视和重点研究的问题; 此外, 针对不同的调度决策目标, 也会得到不同的最优洪水调度决策方案。因此, 根据不同的来水情况和不同的调度决策目标, 选择出不同的较优洪水调度方案, 为实时洪水调度决策提供尽可能多的决策依据和尽可能多的支持, 以使实时洪水调度结果最优, 以取得最大的社会效益 (如防洪效益) 和经济效益 (如发电效益)。综上所述, 实时洪水调度决策支持的研究和应用是具有较大的现实意义的。

4.3.3 实时洪水调度决策支持的方法和步骤

- a) 选定优选目标函数
- b) 确定洪水调度的约束条件

c) 确定状态转移方程，即调洪演算基本方程或数值解法的调洪函数方程

d) 确定优化算法。本次选定为模糊优化算法。

e) 确定可行调度方案集（即决策向量集），可行调度方案集既可由计算机选定，也可由人工加入

f) 根据所预报的工程上、下游的洪水流量过程，用各种可行的调度方案（即决策向量）进行调洪计算和发电量、供水量等各项有关的计算，求满足各种约束条件的可行调度方案，即称可行决策向量，组成满足约束条件的决策向量目标值矩阵 $(G_{kj})_{m \times p}$ ，式中：

$k = 1, 2, 3 \dots m$ m 为目标数

$j = 1, 2, 3 \dots p$ p 为调度方案数

g) 计算目标优属度矩阵

对于目标值属于越小越好的类型，其目标优属度计算公式为：

$$r_{kj} = \frac{\bigcup_{n=1}^p G_{kn} - G_{kj}}{\bigcup_{n=1}^p G_{kn} - \bigcap_{n=1}^p G_{kn}}$$

对于目标值属于越大越好的类型，其目标优属度计算公式为：

$$r_{kj} = \frac{G_{kj} - \bigcap_{n=1}^p G_{kn}}{\bigcup_{n=1}^p G_{kn} - \bigcap_{n=1}^p G_{kn}}$$

以上 2 式中，

$$\bigcap_{n=1}^p G_{kn} \text{ 为 } n = 1, 2, \dots, p \text{ 个目标值中最小者}$$

$\bigcup_{n=1}^p G_{k_n}$ 为 $n=1, 2, \dots, p$ 为目标值中最大者

h) 由调度人员及有关的领导、专家对不同的调度目标设置不同的目标权重 W_k , $k=1, 2, 3, \dots, p$

i) 对各调度方案计算最优模糊分划矩阵方案优属度行向量各元素 U_j ;

$$U_j = \frac{\sum_{k=1}^m (w_k \times r_{kj})^2}{\sum_{k=1}^m (w_k \times r_{kj})^2 + \sum_{k=1}^m [w_k \times (r_{kj} - 1)]^2}$$

j) 按决策向量优属度最大原则确定最优调度方案

$$U_{\text{best}} = \max(U_j) \quad j=1, 2, \dots, p$$

k) 如降雨仍在继续, 则继续进行预报, 继续进行上述的重复计算, 即重复进行 e — j 的决策支持计算, 得到新的最优调度方案, 如后续无降雨, 则可根据上述最优调度方案进行调度。

4.3.4 实时洪水调度决策支持算法

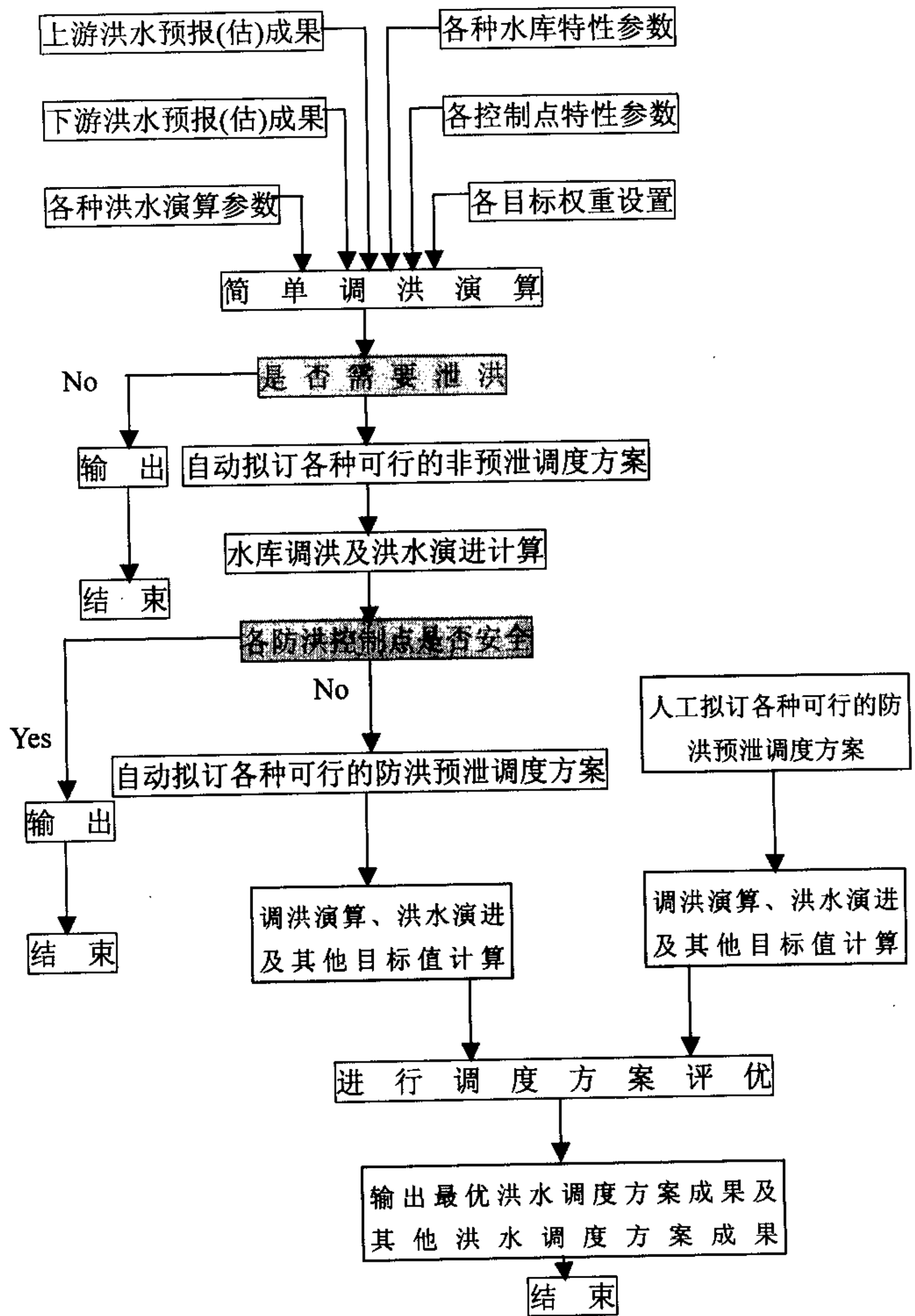


图 4.3.4—1 实时洪水调度决策支持系统算法框图

4.4 基于 GIS 的分布式实时信息查询

地理信息系统(GIS)正被广泛应用于各种与地理有关的科学领域中,如农业产量估算、工业布局、洪灾分析等等。对于实时洪水预报调度决策支持系统,直接用 GIS 进行分析目前还不现实,但利用其分层叠加信息的思想实现地理分布式查询,可使信息一目了然,查询方便快捷。本系统采用分层存储电子地图的形式,电子地图处理软件选用 ARCInfo。即将所需要处理的地图按其特点划分为不同的层次,并将所需要的有关层次的地理信息用数字化仪输入到 ARCInfo 中,在通过有关的处理后,将各层次的电子地图数据存入数据文件中,供分布式查询使用。此外,将所需要查询的各信息点的有关信息存入 Access 的数据表中,以供需要时对其之进行查询。

a) 电子地图的分层处理

按照有关的理论和分析,地形图最终可以分解为三个基本要素,即点、线和多边形(面),在进行分层处理时,要求每一层由相同的要素组成,每一层内仅只包含若干个点,或仅只包含若干个线,或仅只包含若干个面。电子地图以矢量的方式存储(.BNA 文件),其数据文件一经生成后即不作改变。在显示时,电子地图(包括地形)是按不同的层次叠放的,可根据需要让某一层或某几层显示,而让另外的层隐藏,以达到按需要显示的目的。这样的分层处理既有利于进行图形显示和图形处理,也便于进行信息查询和信息点的查找。

b) 电子地图的缩放和漫游

电子地图的缩放与漫游是由一个给定的放大系数 K 和一对给定的中心点坐标 X_0 、 Y_0 通过坐标变换来实现的,基本变换公式为:

$$X = K \times X_s - X_0$$

$$Y = K \times Y_s - Y_0$$

其中 X_s 、 Y_s 为从坐标中读出的坐标值,即地图坐标。这样变换以后的坐标值可通过绘图设备的指针($hDC = GetDC(hWND)$) 在绘图设备上直接画出,所显示的地形图即为以(X_0 ,

Y_0)为中心的经过 K 倍放大(或缩小)的地图。其中有些坐标点的坐标值经坐标变换后可能为负,或可能很大,超出了设备的可视范围,则为不可视的,其余的则为可视的。坐标变换的 K 值不能取得太大,否则有些坐标值会超过设备的最大绘图坐标范围,导致出现设备输出错误,为此必须设定 K 值的有效范围。

c) 基于 GIS 的分布式查询

查询的关键问题是要找到鼠标所指定的信息点、线或面,为此须通过一个逆变换将鼠标所指定点的坐标变换为地图坐标,然后计算由该指定点到数据表中所存储的每一个信息点或线的距离 d ,或计算该点是否位于某个多边形之内。若 d 在一个给定的范围 ϵ 之内或该点位于某个信息面之内,即认为鼠标所指定的点(或线、面)即是该信息点(或线、面)。

在找到该信息点(或线、面)后,常规信息可通过存储该信息点(或线、面)的数据表中获得;如该信息点(或线、面)存在实时信息,可通过该信息点(或线、面)所对应的数据表的相应字段获得该信息点(或线、面)的实时信息,由此完成分布式实时信息查询。

5. 应用软件开发技术

5.1 软件界面设计技术

在 RTFDs for Windows 1.0 的研制开发的过程中，受当时的开发工具的局限、对软件界面的认识性的局限、过于注重软件实用功能、开发时间的限制等多种因素的影响，RTFDs for Windows 1.0 对于软件的功能考虑较周到，而对软件的界面考虑得较少，导致用户使用不太方便，操作上尚有一定的烦琐，切换尚较频繁，可追溯性尚待不够等，给用户造成了一定的困难，不便于软件功能的充分发挥。按照软件工程的观点，在软件的编码过程中，功能模块的编码仅占软件编码的 1/3，而软件界面的编码却占到了 2/3，可见，随着软件技术的不断发展，软件界面的好坏已是衡量软件质量好坏的一个重要因素。

a) MDI 窗口

RTFDs for Windows 1.0 中，由于 C++ 语言编制和管理 MDI 窗口界面较困难，且受多语言共同编程，系统较难集成在一起的影响，因此采用的是 SDI 窗口界面的形式，软件显得较分散凌乱，不利于软件的集成和软件产品的商品化，也不利于软件整体功能的充分发挥。

此次实时洪水预报调度决策支持系统的研究开发过程中，由于 Visual Basic 5.0 对 MDI 窗口界面的管理功能较强，且采用一种语言编码（个别情况下，采用 C 及 C++ 语言编制 DLL 动态库，由 VB 进行动态库调用），给 MDI 窗口界面的开发带来了较大的便利，故此次窗口界面改用 MDI 窗口界面。

b) 在每一个子窗口内实现多种功能

在实时洪水预报调度决策支持系统中，每一个 MDI 子窗口内都集成了多种相互关联的功能，用户不再需要在多个窗口或子窗口之间切来切出，大大增加了用户操作的简便性，用户的

操作效率也会有较大的提高。

c) 一个功能可通过多种途径实现

为了给用户提供更多的操作灵活性和方便性，许多常用功能都提供了多种操作方式。如各种关系线数据的查询，用户既可以通过鼠标在关系线上移动得到，也可以通过在文本框中通过键入数据查询。另如用户在进行数据编辑时，起始编辑时段的数据既可以通过按动垂直滚动条查找得到，也可以通过起始时间输入组合框中数据的改变来实现。通过这些措施，大大增加了用户操作的灵活性和便利性。

d) 界面的一致性和界面的美观

为了使软件界面美观、大方、富有吸引力，且使用户易于学习和操作，实时洪水预报调度决策支持系统的研究开发过程中注重了软件界面的一致性和美观性。软件界面的一致性注重了各子窗口界面在字体、字型、界面颜色、界面控件选择等各个方面高度一致，此外，在各子窗口的操作方式和方法上也做到了高度的一致，界面既美观大方，也便于用户学习和操作。为了使界面更美观、更赏心悦目，各子窗口界面均与 Windows 95 界面所使用的颜色、控件形状、窗口布设等相同，并在各子窗口界面中使用了一定的动画、图片，界面较有吸引力。

e) 软件界面的宽容性

实时洪水预报调度决策支持系统的一个最基本的要求就是其反应速度要快，以让用户留有足够的时间用于思考和研究决策。但用户在进行系统操作时，往往会发生一定的操作错误，软件界面应能容忍这样的操作错误，允许用户无痛苦的、不加惩罚的回退到用户操作的前一状态，不能因为用户一次偶尔的操作错误而不得不从头执行，贻误了用户的宝贵的调度决策时间；相反地，程序应该客观地描述问题，并提示和告诉用户正确的操作信息。

f) 适当的多媒体支持

为了给用户提供一个稍微轻松的软件操作和运行环境，以适当减轻用户进行实时洪水调度决策时的心理压力，软件中使用了一定的视频、音频、声频等多媒体支持功能，软件操作和

洪水调度人员可在连续多天的软件操作和洪水调度决策时，借助于多媒体视频、音频、声频播放，稍微舒缓一下绷紧的神经。此外，多媒体功能是可选的，用户可自行选择打开和关闭。

5.2 面向对象的程序设计

面向对象的程序设计方法在近年得到了广泛的应用，也给软件的研究开发带来了极大的便利。面向对象的编程方法着重于对象之间的关系，而不重其完成的细节。关系是连接对象的纽带，通常会发展成为一棵关系树，其中一些对象类型由其它对象类型发展而来。隐藏对象的实现使用户更注重对象之间的关系而非单个对象的内容。实际上，用户在使用类时，只须了解类的某些信息，知道可以调用哪些函数，可以存取哪些数据，即只须了解类的用户界面。类的用户界面告诉程序编码人员类的功能是什么，如何使用，而不是类是如何做的。在软件编码时编程人员不必了解类的细节，这样就能减少应该记忆的信息量，一旦类被完成并调试通过，它就完成了封装并能被反复重用，其技术特点为：

- a) **类的封装性；**
- b) **类的继承性；**
- c) **类的重载性；**
- d) **类的多态性。**

在实时洪水预报调度决策支持系统的开发研究中，从窗体、控件到通用类，广泛使用了面向对象的程序设计方法，软件编码人员集中精力于通用类的研究和类的调用，既大大减少了软件开发人员的重复编码，减低了编码工作量，同时也大大减少了软件代码，降低了软件调试难度，为减少软件代码和运行错误创造了条件，有利于软件开发工作的顺利进行。

5.3 工程组管理方法

对于一个大型的应用软件，依靠单独一个人来进行程序开发工作，无论是从时间、进度要求，还是从一个人的能力、精力、创造力方面分析，现在已经变得越来越不可能。必须组成软件开

发群组，集中多个人的智慧和力量，协调合作，才能完成软件研究开发目标。由于软件开发人员较多，如果管理不力，软件开发人员相互之间协调合作不好，轻则导致重复编码，大大增加软件编码和调试工作量，也增大了软件代码和运行错误的发生机率；重则可能导致软件代码无法集成或软件无法运行，给软件开发带来十分不利的影响。为此，必须进行软件开发工程组的管理方法，加强软件开发人员之间的交流、沟通和合作，以提高软件开发效率，减少软件错误。在软件开发工程组管理中，采取了如下管理方法。

a) 设计变更管理

对于软件开发中的任何设计变更，如数据库中表结构的变更、通用函数的变更、通用类的变更、通用模块的变更、以及模块功能的变更等等，均以文件的形式分发到每一个软件开发人员，以便进行相应的更改，避免造成不该发生的不利影响。

b) 通用部件的管理和分发

对于一个大型的应用软件，如果不先编制好所需的通用部件，在这些通用部件的基础上进行软件编码，就会大大降低软件开发效率。为此，在研制开发过程中，进行了周密的通用部件的分析和设计，并进行了大量的完善性、正确性测试，然后分发给各软件开发人员。在软件编码和调试过程中，对于所发现的通用部件错误，及时以文件的形式通知各有关人员。

c) 检查和会商制度

在软件开发研制过程中，建立了定期检查和定期会商制度，及时发现软件开发过程中所存在的各种问题，如功能是否符合要求、算法是否完备、实现方法是否得当、还存在什么困难等等，并针对所存在的问题一一加以解决，以保证软件开发工作的高效、正确进行。

5.4 正确的软件编程方法

要有效地减少软件代码和软件运行错误，一个有效的方法就是尽量减少软件代码。用 C 或 C++编程时，由于 C 及 C++对

Windows 传递的消息的缺省处理功能不强，软件编程人员必须十分熟悉 Windows 所使用的消息以及这些消息是如何传递的。用 Visual Basic 编程虽然不需要十分熟悉 Windows 的消息传递机制，但也不能对此毫无了解。否则就会造成许多消息的重复处理，既增加了软件编码量，也给软件调试带来了困难。为此，对软件编程人员进行了 Windows 消息传递机制和 Windows 编程有关注意事项的培训，为软件编程人员编制出简洁、高效的 Windows 应用软件创造了条件。

此外，要编制出简洁、高效的 Windows 应用软件，还要求比较熟悉软件编程的一些经典算法，为此，对于算法较复杂的部件，一般都要进行算法选择会商，选择出简洁、高效的算法。

5.5 完备的测试方法

按照软件工程的观点，首先制订了完善的测试方案，准备了基本能覆盖软件所有代码的测试数据。在此基础上，选择有经验的软件测试人员负责软件的测试工作，并选择完全不熟悉 Windows 操作的人员进行测试操作，以避免按软件编程人员编程时所设想的思路进行软件操作，这样就能更多地发现软件中所存在的问题，达到尽量减少软件错误的目的。

5.6 软件运行错误的控制

从软件工程的观点看，软件的维护工作量占软件开发工作量的 80%，可以说，一个大型软件的研制开发过程中，其检错、排错、纠错工作量异常艰巨，就连 Microsoft 这样的软件业巨头所提供的应用软件，在其面市初期，也常常不可避免地存在软件运行错误。因实时洪水预报调度决策支持系统直接为洪水调度决策服务，软件的运行错误有可能导致灾难性的后果，关系异常重大。如何在时间紧、任务急、要求高的情况下，尽可能地避免软件运行错误，或尽最大可能地降低软件运行错误，或至少保证关键的实时预报调度部分没有软件运行错误，是本次软件研究开发的一个重要环节。

通过以系统工程的观点，从软件设计、软件编码、软件排错到编码排错方法等各个方面进行全面的、周密的设计和综合的、通盘的考虑，不但编制出了简洁、高效的应用软件，实现了软件设计时所要求达到的所有功能，同时，也最大限度地减少了软件编码错误和软件运行错误，即使软件代码中存在少量的显性的和潜在的错误，也可在软件测试中较容易地被发现，并很快得到纠正。

6. 软件评价与发展方向

RTFDs for Windows 1.0 研制完成以后, 通过其在五强溪水电站和牛路岭水电站的实际应用表明, 该软件的研究开发在向实时洪水预报调度软件的通用化方面迈出了坚实的一步, 取得了较为可喜的成绩。实时洪水预报调度决策支持系统在 RTFDs for Windows 1.0 的基础上, 在软件的通用化方面、软件的功能方面有了更进一步的增强, 同时还新增了基于 GIS 的分布式实时信息查询功能和实时洪水调度决策支持等功能, 软件功能更加强大和完善, 软件的通用性更加完备, 必定会在实时洪水调度决策中发挥更加重要的作用, 也必定会有十分广阔的应用前景。

6.1 软件评价

近年来, 我国的洪水灾害越来越频繁, 洪灾损失也越来越大, 给人民的生命财产安全带来了越来越大的威胁。在近年的抗洪救灾斗争中, 实时洪水预报和实时洪水调度已在发挥着越来越重要的作用, 如今年湖南省的抗洪救灾斗争中, 实时洪水预报和实时洪水调度就为我省的抗洪救灾工作作出了重要的贡献, 五强溪、凤滩、东江、柘溪、欧阳海等大型水库共拦蓄了 100 多亿 m^3 的洪水, 为减轻洞庭湖的洪水灾害作出了重要贡献。实时洪水预报调度决策支持系统的研究在我国才刚刚起步, 本次研究开发工作将为我国在这一方面的研究起到先行作用。

a) 基本原理的研究

利用马斯京根的矩阵解法, 较好地处理了河道的入流加入和流量分出问题, 为流域降雨径流模型的通用化打下了很好的基础, 同时, 通过带指针的参数文件存储设计, 较彻底地解决了降雨径流预报模型和多元回归线性预报模型的通用化问题, 具有较为可喜的创造性意义。

b) 实时洪水调度决策支持研究

将 DSS 的概念引入到实时洪水调度决策之中，可更充分地发挥决策者的智慧，使实时洪水调度决策更加科学合理，更能发挥有效的工程措施的作用，有效地减轻洪水的危害，具有较显著的现实意义。

c) 基于 GIS 的分布式实时信息查询研究

利用 ARC/INFO 的地理信息分层存储功能，建立分层存储的地理信息数据库，为地理信息的显示和各种信息的分布式查询创造了条件。

d) Internet 技术的应用

在此次的软件研究开发中，系统概览部分已用 Web 网页的形式实现，现正在研究基于动态 Web 网页的动态查询，该项功能的实现，给本软件系统向网络结构移植打下了较良好的基础。

6.2 发展方向

为了更加完善和拓宽实时洪水预报调度决策支持系统的应用范围，本系统尚需进行如下几个方面的研究开发工作：

a) 网络版应用程序的研究开发

实事求是地说，单个防洪工程措施所发挥的防洪作用毕竟有限，必须同时发挥多个防洪工程措施的作用，须通过多个工程的联合预报和联合防洪调度，以最大限度的发挥各防洪工程的综合作用，将洪灾的损失降低到最小程度。为此，必须通过网络来进行多个防洪工程的数据传递、数据综合、联合预报和联合防洪调度，建立决策会商机制、提供决策会商手段。故须在适当时候进行网络版的实时洪水预报调度决策支持系统的研究开发工作。

b) 基于 Internet 的应用开发

近几年来，Internet 的应用已经得到了飞速的发展，除了给信息的发布和传递带来了很大的便利外，基于 Web 的分布式查询和分布式计算更为实时洪水预报调度决策支持软件系统的应用和查询带来了很大的便利，便于各防洪调度决策部门均能进行各种防洪信息查询，并能进行各种所须的分布式计算，使防洪调度决策最优，进行基于 Internet 的实时洪水预报调度决策支持软件

系统的研究开发具有很大的现实意义^[20]。

c) 增加自动控制功能

在作出最优的实时洪水调度决策后，须根据最优洪水调度方案进行闸门启闭操作，以实现调节洪水流量的目的。从目前的情况看，实时洪水调度决策的作出与闸门的启闭操作是分开实施的，即在作出实时洪水调度决策后，由闸门操作人员人工进行闸门的启闭操作，操作较复杂，反应速度较慢，并容易造成操作事故。如果能将实时洪水调度决策和闸门的自动控制结合起来，在作出最优实时洪水调度决策后，由计算机自动按调度决策进行闸门操作，将为防洪调度提供更进一步的时间保证和安全保证，并将提高水利水电工程自动化程度，可作为下一步的另一个研究开发方向^[40]。

d) 增加经济分析功能

随着电力体制改革的不断深化和电站自动化进程的不断加快，电力企业对电站的运行效益已越来越重视，为此，本系统应具备电站运行调度的决策支持功能，以更好地满足用户对电站运行效益的分析决策要求。

致 谢

在本研究课题的研究开发过程中，得到了导师陈松乔教授的精心指点和大力关怀，陈教授渊博深厚的知识、严谨求实的作风都是我毕生学习的榜样，在此对陈松乔教授表示由衷的感谢和最崇高的敬意。

在本文的写作过程中，还得到了中南工业大学杨路明教授和国家电力公司中南勘测设计研究院陈自然教授级高工的指导和帮助，在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1) 国家防汛抗旱总指挥部办公室、水利部南京水文水资源研究所，“中国水旱灾害”，北京，中国水利水电出版社，1997
- 2) 姜旭平，“信息系统分析”，长沙，湖南科学技术出版社，1993
- 3) 赵珂经等译，“水文实践指南（第二卷）”，北京，水利电力出版社，1988
- 4) 水利电力部水利水电规划设计院、长江流域规划办公室主编，“水利动能设计手册——防洪分册”，北京，水利电力出版社，1988
- 5) 水利水电水文科技情报网、水电部长江流域规划办公室水文局，“水文学——概率论方法及应用”，北京，科技文献出版社，1985
- 6) 华东师范大学数学系控制理论教研室，“现代控制理论引论”，上海，上海科学技术出版社，1984
- 7) 朱华，“水情自动测报系统”，北京，水利电力出版社，1993
- 8) Carl Ganz Jr.，“Visual Basic 5 开发 Web 数据库指南”，北京，机械工业出版社，1998
- 9) Microsoft，“Visual Basic 5.0 程序员指南”，北京，科学出版社，1997
- 10) Robert W. Stewart，“Visual Basic 图形程序设计”，北京，清华大学出版社，1995
- 11) Namir Clement Shamma，“Visual C++使用指南”，北京，清华大学出版社，1995
- 12) Deborah S. Ray、Eric J. Ray，“HTML 4.0 从入门到精通”，北京，电子工业出版社，1998
- 13) 张纪成、刘炜，“客户/服务器模式在海洋地理信息系统中的应用”，微小型计算机开发与应用，1997，第5期
- 14) 吴建华、杨俊，“Windows 动态链接库的建立和应用”，微小型计算机开发与应用，1997，第6期
- 15) 陆强，“利用 VB 实现商品多媒体演示”，微型机与应用，1998，第5期
- 16) 林志斌，“数据库安全性若干问题的探讨”，微型机与应用，1998，第3期
- 17) 张恭肃、杨小柳、安波，“确定性水文预报模型的实时校正”，北京，水文，1987，第1期
- 18) 徐雨明，“POSTSCRIPT 曲线字库的结构和直接显示办法”，电脑编程技巧与维护，1997，第11期
- 19) 吴保平、张波，“制作 Web 页的规则和工具”，电脑编程技巧与

- 维护, 1997, 第 11 期
- 20) 林彤, “INTERNET 和数据库”, 电脑编程技巧与维护, 1997, 第 11 期
 - 21) 肖丹, “利用栈计算屏幕上某一区域面积”, 电脑编程技巧与维护, 1997, 第 5 期
 - 22) 刘志辉、张国威、刘玲瑞, “自适应修正预报模型”, 北京, 水文, 1995, 第 5 期
 - 23) 赵人俊、王佩兰, “新安江模型参数分析”, 北京, 水文, 1988, 第 6 期
 - 24) 王正发, “多维线性水文系统模型在白沟河洪水预报中的应用”, 北京, 水文, 1992, 第 1 期
 - 25) 毛学文, “基因算法及其在水文模型参数优选中的应用”, 水文, 北京, 1993, 第 5 期
 - 26) 叶泽纲, “用水量平衡的微分式反推入库洪水的方法探讨”, 北京, 水文, 1986, 第 1 期
 - 27) 朱教新、宣跃、王德宽等, “黄河上游梯级水库和西北电网水调自动化系统的设计与实施”, 北京, 水力发电, 1997, 第 12 期
 - 28) 李钰心、纪昌明、朱教新等, “黄河上游梯级水电站短期调度软件研究”, 北京, 水力发电, 1997, 第 12 期
 - 29) 孙海健、潘文、钱愈寿, “Visual Basic 4.0 通信程序设计” 微型机与应用, 1998, 第 8 期
 - 30) 鞠阳, “用 Visual Basic 4.0 开发微机与单片机通信程序” 微型机与应用, 1998, 第 8 期
 - 31) 刘冬杰, “面向对象管理信息系统的设计与实现”, 微型机与应用, 1997, 第 8 期
 - 32) 马琳、陈云华, “在 VB 中用动态链接库截取 Windows 消息”, 微型机与应用, 1998, 第 2 期
 - 33) 杨宏军、李可、杨洪海, “用 VB5 的 OLE 技术生成 DSS 组合决策文档”, 微型机与应用, 1998, 第 8 期
 - 34) 戴光明、罗延钟、刘会庭, “专家系统中的解释与知识转换的实现”, 微型机与应用, 1997, 第 9 期
 - 35) 李颀、李密权, “水位推算流量数学模型的研究”, 武汉, 人民长江, 1997, 第 8 期
 - 36) 林钧岫, “关于国家防汛信息系统的现状及想法”, 北京, 水力发电, 1997, 第 7 期
 - 37) 华东师范大学数学系控制理论教研室, “现代控制理论引论”, 上海, 上海科学技术出版社, 1984
 - 38) 赵振宇、徐用懋, “模糊理论和神经网络的基础与引用”, 北京, 清华大学出版社, 1996
 - 39) 水利部长江流域规划办公室、河海大学、丹江口水利枢纽管理局, “综合利用水库调度”, 北京, 水利电力出版社, 1990

- 40) 刘忠源、徐睦书, “水电站自动化”, 北京, 中国水利水电出版社, 1996
- 41) 叶秉如、许静仪、潘慧玲、毛尔源, “优化理论在水库调度中的应用”, 长沙, 湖南科学技术出版社, 1985
- 42) 张勇传, “水电站水库调度最优化”, 武汉, 华中工学院学报, 1981, 第6期