

Title: The seepage computer monitoring and the monitoring data analyzing of Lian Hua Dam

Major: Electrical Power System and Automation

Name: Renliang LIU

Signature: Renliang Liu

Supervisor: Associate prof. Xiaoping YANG

Signature: Xiaoping Yang

Prof. Chunxiang ZHU

Signature: _____

Abstract

This paper discusses the way to design the seepage monitoring system of the dam, and simulates the seepage of dam on the platform of the Ansys program.

The seepage monitoring system can ensure the dam work properly. At first, this paper discusses the main content and ways of the seepage monitoring system. On the light of the theory and combined with the Lianhua Power station reservoir, Mudanjiang city Heilongjiang Province in this paper the seepage monitoring system is explicated, at the same time this paper introduces the hydraulic automation of Lianhua Power station Reservoir in brief. Lianhua Power station reservoir is composed of a main dam, an auxiliary dam, flood discharge gates, a water transport hole and a power station. Using the distributed dam safety monitoring system, the dam seepage pressure and water level are realtime collected by sensors. PLC technology is employed to control the gates automatically. The reservoir important facilities are monitored through the images monitoring system. The monitoring data from all subsystems are sent to the center station by cables and then analyzed in computers, which realizes the automatic management of this reservoir. The application of this automation system will enhance the reservoir information automation system.

Secondly, the paper explains the soft programs of the seepage monitoring system. We give the principles and flow charts of the soft programs. The functions of the programs are introduced in this paper.

At last, according to comparison of the fundamental equations and boundary conditions, the Ansys function of temperature field analysis is applied to that of seepage flow field, the element birth or death technique with overlap method is adopted to calculate the free water surface site-saturation line, in order to solve the problem of Earth dam seepage flow

stability. This method can solve the seepage flow problem of complex boundaries and mediums.

Key Words: seepage; the finite element; dam monitoring; hydraulic automation, data, birth or death element

独创性声明

秉承祖国优良道德传统和学校的严谨学风郑重声明：本人所提交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人的研究成果。与我一同工作的同志对本文所论述的工作和成果的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并已致谢。

本论文及其相关资料若有不实之处，由本人承担一切相关责任

论文作者签名：刘仁亮 年 月 日

学位论文使用授权声明

本人_____在导师的指导下创作完成毕业论文。本人已通过论文的答辩，并已经在西安理工大学申请博士/硕士学位。本人作为学位论文著作权拥有者，同意授权西安理工大学拥有学位论文的部分使用权，即：1) 已获学位的研究生按学校规定提交印刷版和电子版学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，可以将学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索；2) 为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文或解密后的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所或在校园网上供校内师生阅读、浏览。

本人学位论文全部或部分内容的公布（包括刊登）授权西安理工大学研究生部办理。

（保密的学位论文在解密后，适用本授权说明）

论文作者签名：刘仁亮 导师签名：杨晓洋 年 月 日

1 绪论

1.1 大坝安全监测的重要意义及主要内容

在人类发展的过程中,水利资源的开发和利用越加被人们所重视,合理开发水力资源、充分利用水资源已成为加快生产力发展、提高人民生活水平、节约自然能源、维持生态平衡的有效途径。因此,自19世纪末世界各国不同程度的开发本国的水利资源,兴建水库、水利枢纽等,通过大坝蓄水,修建电站、航道、渠道等不断创造经济效益和社会效益。

尽管大坝在设计时采用了一定的安全系数,使坝能安全承担所考虑的各种荷载组合,但是

由于设计中不可能对坝的工作条件及承载能力做出完全准确的估计,施工质量也不可能完美无缺,坝在运用过程中还可能发生某些不利的变化,因此国内外仍有一些坝曾出现失事。如美国63m高的圣佛朗西斯(St. Francis)重力坝1928年破坏;93m高的提堂(Teton)土坝1976年溃决;法国67m高的马尔巴塞(Malpasset)拱坝1959年垮坝;意大利262m高的瓦依昂(Vajont)拱坝1963年因库岸大滑坡导致涌浪翻坝且水库淤满失效;我国板桥和石漫滩两座土坝1975年洪水漫坝失事等,都是一些典型的事例。根据国际大坝委员会(ICOLD)对33个国家的统计,1.47万座大坝中有1105座有恶化现象,有105座坝发生了破坏。由此可见,保证大坝安全是一个十分重要的实际的问题,有效的监测水库大坝的运行,及时发现坝体的漏洞和破坏,能够保证水库下游人民的生命财产和社会的利益^[1]。

1.1.1 大坝安全监测的含义

大坝安全监测(Safety Monitoring of Dams)是通过仪器观测和巡视检查对大坝坝体、坝基、坝肩、近坝区岸坡及坝周围环境所作的测量及观察。这里“大坝”可以泛指与大坝有关的各种水工建筑物。“监测”既包括对坝固定测点一定频次的仪器观测,也包括对大坝外表及内部大范围对象的定期或不定期的直观检查和仪器探查。

1.1.2 大坝安全监测的目的及意义

大坝安全监测的首要目的是掌握坝的实际性状,为判断大坝安全提供必要信息。大坝安全监测可以及时获取第一手的资料来了解坝的工作性态,为评价大坝状况和发现异常迹象提供依据,从而可以制订适当的水库控制运用计划及坝的维护修理措施来保障大坝安全,在发生险情时还可发布警报减免事故损失。因此大坝安全监测是保证大坝安全的重要措施,是坝工建设和运行管理中非常必要、不可或缺的一项工作。

大坝监测除了作为判断安全的耳目以外,还是检验设计和施工的重要手段。由于实际情况的复杂性和坝工科技水平的限制,至今大坝设计理论还不够成熟和完善,一些设计前提带有某种程度的假定性,若干因素只能简化地加以考虑,作用于结构上的某些荷载还不

能准确算出,对结构破坏机理、发展过程、安全界限等的认识都不够清楚和准确,坝体和坝基各部位的物理力学参数更难以精确给定。而大坝监测项目全、测点多,观测频次密、跨越时期长,能体现现场复杂的实际条件及反映出坝的真实状态,因此可以作为检验设计方法、计算理论、施工措施、工程质量、材料性能等的有效手段^[2]。它可以改变和加深人们对坝工有关问题的认识,开发更合理的设计准则,改善设计和施工,从而促进坝工学科的发展。

1.1.3 大坝安全监测的主要内容

a. 主要监测项目

不同级别的大坝要求监测的项目有所不同。对于一级和二级大坝,仪器监测主要有下列项目:

- ①工作条件监测:包括坝上、下游水位,库水温,气温,坝前淤积,下游冲淤等监测。
- ②渗流监测:包括渗流量,绕坝渗流,渗水透明度及化学分析,混凝土坝的扬压力,土石坝的浸润线、坝基渗水压力、导渗降压等监测。
- ③变形监测:包括水平位移和垂直位移,接缝和裂缝,混凝土坝的挠度和倾斜,土石坝的固结等监测。
- ④应力应变及温度监测:包括混凝土坝的混凝土应力、应变,钢筋应力,钢管、蜗壳的钢板应力,混凝土温度、坝基温度,土石坝的孔隙水压力、土压(应)力等监测。
- ⑤其他监测:包括近坝区岸坡稳定,局部结构的应力、应变,坝体地震反应,水力学项目等监测。

以上列出的监测项目可根据具体的坝型、坝体的工作条件等需要分别选设。

b. 主要检查项目

施工期及运行期,各级大坝均需进行巡视检查。

混凝土坝有下列主要检查项目^[3]:

- ①坝体:相邻坝段间的错动情况,伸缩缝开合及止水情况,坝面、廊道壁、宽缝内表面的裂缝及漏水情况,混凝土有无破损、溶蚀及侵蚀现象,排水孔工作状态,渗水量和水质有无显著变化等。
 - ②坝基和坝肩:基础岩体有无挤压、错动、松动、鼓出,坝体与基岩结合处有无错动、开裂、脱开、漏水,坝肩有无裂缝、滑坡、溶蚀、绕渗,坝基排水设施工作是否正常,渗水水量及浑浊度有无显著变化等。
 - ③引水和泄水建筑物:进水设施有无淤堵、损坏,泄水建筑物有无裂缝及损伤,消能设施有无磨损、冲蚀,下游河床及岸坡冲淤情况等。
 - ④其他:近坝区岸坡地下水露头变化情况,岸坡裂缝变化情况,闸门及门槽、支座、止水情况,启闭设施能否应急启动工作,电气控制系统及备用电源能否正常工作等。
- 土石坝主要检查项目有:

- ①坝体有无裂缝、滑坡、塌陷、坍坑、表面冲蚀、坡脚凸起
- ②背水坡及坝脚有无散浸、漏水、管涌、流土、沼泽化现象
- ③泉眼、减压井、反滤排水沟等的渗水有无异常变化,渗水是否浑浊或带色
- ④块石护坡有无松动、翻起、塌陷、垫层流失、架空
- ⑤表面排水有无损坏或淤积
- ⑥有无害虫(白蚁)、害兽(鼠、獾等)活动痕迹等。

c. 监测和检查次数

仪器观测的测次因项目和阶段而异。第一次蓄水前及第一次蓄水后头五年运行中,一般每旬一次至每月一次;第一次蓄水期一般每天一次至每旬一次;经过第一次蓄水且运行超过五年以后,一般每月一次至每季一次。各时期上下游水位及气温每日均需观测。内部观测的传感器在埋设后头一个月内要加密测次,间隔从4h, 8h, 24h到5d,以后逐渐转入常规频次。如遇地震、大洪水及其它异常情况,应适当增加测次。自动化监测项目测次可适当加密。经过长期运行后,可通过鉴定对测次作适当调整。

巡视检查分为日常巡查、年度巡查及特殊巡查三类。日常巡查在施工期宜每周一次;水库第一次蓄水或提高水位期间每1-2天一次,正常运行期间每月不少于一次,汛期特别是高水位期应加密检查次数;年度巡查应每年2-3次,在汛前、汛后及高水位、低气温时进行;特殊巡查在发生有感地震或大洪水以及其他特殊情况下立即进行。

1.2 大坝安全监测的现状

1.2.1 大坝安全监测发展历史

大坝监测是顺应大坝安全的需要并随着坝工建设的进展而发展起来的,可划分为三个阶段。第一阶段是从远古到19世纪末,是早期阶段。筑坝材料是土石,对坝的监测、了解只是外表观察、感性认识。第二阶段是本世纪初到50年代末,是发展阶段。坝工理论逐渐形成体系,混凝土坝大量建成,当地材料坝也有很大发展。为监测混凝土坝的扬压力普遍安设了测压管;为测定水平位移和垂直位移出现了三角测量法、视准线法和精密水准法;以后又出现了观测大坝挠曲的垂线法和观测倾斜的静力水准法;1919年谢弗(Schaefer Oto)首创了弦式仪器;1932年卡尔逊(R. W. Carlson)发明了差动电阻式仪器。此后许多坝埋设了上述电测仪器,开展了坝内温度、应变、应力、接(裂)缝张合和孔隙压力等观测项目。到50年代,大坝观测已形成较齐全的体系,坝的各主要观测项目都有了成型的观测仪器,光学的、机械的和电测的方法得到了普遍应用。这一阶段取得了大量监测资料,对实测值与设计值及实测值与模型试验值之间作了许多比较。一些设计计算方法如拱坝试载法、重力坝坝基扬压力计算法等被观测资料所验证而得到肯定和推广。第三阶段是60年代以来的成熟阶段^[4]。新建的高坝、大库迅速增加,许多坝建筑在复杂地形、地质条件下,涌现了一些新的结构形式和新的施工方法,坝工建设对大坝监测提出了更高的要求。这一

阶段大坝监测的对象从坝体及坝基浅部扩展到坝基深处及近坝区更大范围,对地基、坝肩及岸坡的观测给予了更多的重视,出现了观测深部岩体变形的多点位移计、滑动测斜仪等新仪器。观测技术向更高水平发展,自动化和半自动化仪器逐渐取代了手工观测仪器。大坝监测从逐个单点就地观测发展为遥测、遥控、自动成批地观测,采用了与计算机网络相联结的自动化监测系统。在监测资料分析上普遍应用了数学模型技术,正分析和反分析方法都有不少进展,监控指标的建立被深入研究,不少坝建立了监测数据库或监测信息系统,基于监测资料的大坝实际性态研究取得了丰富成果,有的坝已实现了远距离在线实时监控^[6]。

1.2.2 国内、外大坝安全监测现状

长期以来,世界各国科学家对大坝安全监测事业的发展作出了不懈的努力,为坝工事业积累了宝贵的经验。美国的大坝安全协会一直强调,为了尽早预知和防止发生事故,对大坝进行监测是绝对必要的。只有通过每一结构的仔细检测,才能察觉到事故的苗头。意大利的报告认为,对大坝作安全评估,主要在于把监测数据与数学模型预测的数据作比较,这样得出的评估才是客观、合理和迅速的。澳大利亚报告强调了监测对大坝安全的重要性,尤其是对较老的大坝,监测资料可说明坝的实况与最新的安全准则相符合的程度。法国的报告将大坝监测的首要目标列为检验坝的安全,以对坝不失时机地进行妥善维护,防止发生损坏和事故。奥地利的报告认为,坝的安全不仅取决于设计和施工质量,还取决于在整个运行期间的维护和监测,为了评价一座坝的状况,需要合理地设计和运用监测系统,以获取有关坝性态的精确资料。日本的报告指出,对于确保大坝及其地基的安全而言,最有效的是监测大坝初次蓄水时的渗漏和变形,对大坝安全性的评价应根据常规连续实测资料的精确记录得出。葡萄牙报告认为,安全监测始于设计阶段,并应贯穿于坝的施工、运行的整个寿命期。加拿大报告认为,监测的目的是取得坝在施工期、初次蓄水期和运行期的资料,以评价坝的特性,发现异常趋势,采取合适的补救措施。总之,各国都将监测列为大坝建设和运行管理中一项必不可少的工作,并把它放在一个十分重要的地位^[6]。

我国的大坝监测起步于50年代,建国初期,我国开始在永定河上官厅水库和淮河上南湾、薄山等大型水库土石坝上进行水平位移、垂直沉降、分层固结和浸润线等项目的观测;与此同时,在第二松花江上丰满和位于淮河上的佛子岭、梅山以及上犹江、流溪河水库等混凝土坝设了温度计、应变计等仪器。60年代初期,我国已在大型土石坝中设置了孔隙水压力、减压井水位、渗流量、绕坝渗流量、基础渗透压力、渗水浑浊度和波浪等观测项目,并在混凝土坝中设置了倾斜、挠度、扬压力、渗流量、渗透压力、钢筋应力、接缝开度和钢管应力等项目^[7]。

40年来特别是近十余年来安全监测有了很大发展。大中型混凝土坝及大型土坝一般都设置了监测系统,配备了专职人员进行常年观测,先后成立了电力工业部大坝安全监察中心、水利部大坝安全监测中心、中国水力发电学会大坝安全监测专业委员会、全国大坝安

全监测信息网等全国性归口管理机构或学术组织。同时,一些科研单位、工厂和大坝管理单位进行观测仪器的研制和生产,使观测仪器从依靠进口达到自给。随着观测工作的发展,也编制了《观测技术手册》、《观测资料分析和整编办法》,出版了《混凝土坝内部观测》《土石坝安全监测技术规范》和《水工建筑物观测工作手册》等书。80年代末和90年代初,为适应观测工作的需要,先后又编制了《混凝土大坝安全监测技术规范》(试行)、《土石坝安全监测技术规范》以及《土石坝安全监测资料整编规程》,进一步加强了大坝观测工作,并取得显著成绩。

经过不断改进,我国已能生产各种大坝观测仪器及自动化监测系统,其中有的已达到国际领先或先进水平。我国一些高等学校和科研、设计单位致力于大坝安全监测技术及分析理论、方法的研究,取得了不少新成果。目前正在建设的长江三峡水利枢纽工程,其大坝安全监测的规模和先进性是国际国内前所未有的。我国大坝监测正和坝工建设同步迅速发展,并逐渐步入这一领域的世界前列。

1.3 监测资料分析的目的和意义

采用一定的观测仪器对大坝进行监测,得到的原始数据往往只能展示直观想象,必须从繁多的观测数据中找出问题的关键,必须对观测的原始数据进行分辨、解析、提炼和概括,从中揭示事物内在的规律,能够为坝工的管理给出准确的判断,这就是监测资料的分析。

观测分析的意义重大,首先,原始观测数据本身及隐含着大坝实际状态的信息,又带有观测误差及外界偶然因素随机作用所造成的干扰,必须经过分析识别干扰,才能显示出真正的信息;其次,影响坝状态的多种内外因素是交织在一起的,观测值是其综合效应,为了将影响因素加以分析,找出主要因素及各个因素的影响程度,也必须对测值作出分解和剖析;再次,只有将多种观测量的多个点、多次测值放在一起综合考虑,相互补充、印证,才能了解测值在空间上和时间发展上的联系,找出变动特殊的部位和薄弱环节,了解变化过程和发展趋势^[6]。此外,为了对大坝测值作出物理解释,为了预测未来测值出现范围及可能的数值等,也都离不开分析工作。因此,观测数据分析是实现原体观测根本目的的最重要的一个环节。

1.4 本文研究的主要内容

本课题研究的主要内容为以下几个方面:

1. 结合国内外大坝渗流监测的应用,讨论了大坝渗流监测的内容与方法。大坝渗流监测常见的监测项目有绕坝渗流、浸润线、孔隙水压力、扬压力及渗水压力监测等。讨论了各种仪器设备在各种大坝中的使用方法与监测原理,设计中应注意的事项及监测数据的整理,须绘制曲线的说明。

2. 以黑龙江省牡丹江莲花电站水库为背景,借鉴国内外其它水库水利自动化系统的实现,介绍莲花电站水库大坝渗流自动监测系统、闸门自动监控系统、图像视频监控系统和中心站建设的设计方法,为莲花电站水库水利信息自动化的实现做了初步设计。本文主要完成了大坝渗流监测自动化的设计,包括设计的原则、实现的功能、设备的选型和网络的搭建。

3. 针对大坝渗流监测系统的设计,介绍了渗流监测系统中所需要使用的软件。给出了振弦式仪器率定程序的功能和开发流程。对系统中所选用的测控单元所配套的软件也给了介绍。最后结合水库的实际情况,开发了一套水库的渗流监测管理系统软件。

4. 根据渗流基本方程及温度场的分析控制方程及定解条件的分析,利用大型通用有限元计算软件Ansys开发平台,将Ansys软件的温度场分析功能应用于渗流场的分析,并采用死活单元技术,通过迭代算法计算自由水面位置(浸润线),解决了土坝渗流稳定问题的求解。该方法可以解决复杂边界、多种介质的渗流问题,为工程应用提供极大的便利。

5. 通过对莲花电站渗流观测数据分析,包括大坝坝基渗透压力、总渗流量、绕坝渗流(地下水位)以及二坝渗流量和浸润线(测压管)和绕坝渗流监测,分析大坝、二坝的安全运行情况。

2 渗流监测的内容与方法

渗流安全在水利水电工程的整体安全中有着十分重要的地位,据国内外大量统计资料表明:由于渗流问题直接造成土石坝失事的比例约占30%-40%。土石坝是挡水建筑物,它和渗流同时并存,有土石坝就有渗流,土石坝的发展史也就是渗流理论和渗流控制理论的发展史^[9]。现代土工结构及渗流分析较为合理的研究途径应是:有限元模型数值计算-土工(含模型)试验-原型观测检验分析三位一体的综合研究方法。因为有限元分析固然可以考虑许多实际条件,对各种影响因素进行研究,但土是一种非常复杂的介质,其力学性能、渗流特性受各种因素的影响,不易掌握,而且其本身也随时间和空间而变,所以它的计算模型、材料参数只能在一定程度上反映出土的实际性状;再之,点式测压管测头的进、出水过程有其特殊性,计算模型是建立在假定的基础上^[10]。因此,数值计算的成果有待于实践的检验。模型试验能在一定的程度上揭示事物的本质,但它毕竟是原型的模拟,具有一定的局限性;土工试验由于受勘探取样范围及密度的限制,只能反映局部填土的性质以及填土的大致空间分布情况,原型观测则是对客观事物的直接反映。本文将对原型观测中需要考虑的问题给予如下说明。

2.1 监测项目

在水库水头作用下,渗流绕过两岸坝肩从下游岸坡流出,称为绕坝渗流。如果坝与岸坡连接不好,岸坡过陡,产生裂缝,或岸坡中有强透水层,就可能发生集中渗流,造成变形或漏水,威胁大坝的安全和水库的蓄水效益。

在渗流处于稳定状态时,其流量与水头保持稳定的相应变化。若渗流量显著增加,有可能发生管涌或集中渗流通道,反之可能是排水体堵塞的反映。在正常情况下,随着坝前漏水淤积,渗流量会逐年减小。

渗流水浑浊不清,可能在水中带有泥沙颗粒或可溶盐成分,反应出坝基或两岸接头岩土受到溶滤或被渗流水带出。这些现象往往是管涌、内部冲刷或化学侵蚀的先兆。当地下水含有高浓度硫酸盐成分时,可能会对混凝土产生侵蚀作用,甚至使之成为酥松状态。

在土坝坝体内,渗流水将形成一个逐渐降落的渗流水面即浸润面,在土坝横断面上显示为一条曲线,称为浸润线。如果实测的浸润线高于设计线,就降低了坝坡稳定性,甚至可能造成滑坡事故。此外,地下水也可能影响库边稳定。

库水在混凝土坝体内的渗流将形成孔隙水压力,也即是坝体内的一种扬压力,对坝体应力、变形及稳定都有一定影响。

混凝土坝和砌石坝基础与地基结合面上的扬压力是大坝重要的外荷载。目前设计都是假定为二维问题并按直线分布的图形计算,有必要通过观测作进一步校核。

观测土坝坝基中渗流沿程压力分布,可以了解土坝防渗和排水设施的作用,估算实际

水力坡降,推算潜水是否可能形成管涌、流土和接触冲刷等破坏。

综上所述,可将渗流监测项目概括为:

- ① 绕坝渗流及地下水位监测。
- ② 浸润线及孔隙压力监测。
- ③ 扬压力及渗水压力监测。
- ④ 渗流量及渗流水质监测。

2.2 监测设计

2.2.1 绕坝渗流监测

主要在大坝与两岸连接部分进行,一般根据交界面的轮廓线、地质情况、防渗措施、排水型式而定,以争取给出等水位线为原则。

(1) 沿绕流线布置测点。一般每一岸布置1-3个基面,每个基面布置2-4个测点。

(2) 在河槽两侧地中的绕流区,每侧在垂直坝轴方向布置1-3个基面,每个基面布置1-3个测点。测点的进水位置应设在强透水层中或深入到筑坝前地下水位以下。

(3) 沿可能绕流集中的渗水层布置测点。对于观测不同透水层渗水的测点应深入到各层的中间,此时可设双管式测点或孔隙水压计观测。

2.2.2 地下水位监测

主要在近坝区的滑坡体和高边坡进行,以了解地下水位变化对岩土力学性质和边坡稳定的影响。

(1) 已查明的滑坡体可沿滑动面的倾向或地下水的流向布置观测基面,测点应贯穿滑动面钻孔。

(2) 未查明滑动面的高边坡或岸坡,观测基面可垂直临空面布置。钻孔深度应深入到可能的滑动面以下。

(3) 对高边坡附近的地表水,宜布置适量观测孔,量测入渗和排泄途径及岩土稳定性的影响。当可能的滑动面距地表很深时,可利用已有的勘探平面或专设平面布置观测基面。

(4) 对坝肩或坝基稳定有重大影响的地质构造带,应设地下水位测点,量测渗流坡降、机械及化学管涌等的可能性。

2.2.3 浸润线监测

(1) 横基面的布置主要对土坝进行观测,选择最大坝高、原河床段、合笼段及地质条件复杂处作观测基面,对大中型土坝不少于3个。

(2) 观测点的布置测点位置和数量应根据断面大小、坝型结构、坝体与地基接触轮廓

线、地质条件、设计浸润线位置等决定,使观测成果能反映出铺盖、斜墙、心墙、截水墙、反滤层和各部位的工作情况,并能掌握实际浸润线的形状及变化为原则,每个基面的测点数不少于5个。对于均质土坝,在正常库水位与死水位之间的上游楔体区宜适当增加测点。

2.2.4 孔隙水压力监测

(1) 主要对混凝土坝进行。施工时浇注分层缝被认为是可能渗水的薄弱环节。因此在工作缝上应布置测点,同时也要观测完整的未分缝混凝土块体内孔隙压力情况,以资比较。

(2) 一般布置1-2个观测基面及观测截面。考虑到由于坝体构造的影响(设置有横缝及排水管等),为了观测最大值,通常将测点布置在观测截面中心部位,且处在两排水管之间。

(3) 测点距表面的深度可取此截面最大静水压力的1/10,或到达上游廊道的中心线附近,靠上游面水力坡度较陡,应布置密些。最上游的测点与坝面距离应大于20cm。为了观测排水效果,可在排水管的上下游部位布置测点。

(4) 对于土石坝,每个观测基面上应布置3-5个截面,在靠近坝基和坝轴线附近应布设测点。

2.2.5 扬压力监测

主要对混凝土坝或砌石坝进行。

a. 横基面布置

横基面的位置和数量取决于坝的地质条件、重要性和规模大小及结构型式等,一般布置2-7个。要选择最高断面,有断层、夹层及破碎带的部位进行观测。

b. 纵基面布置

沿坝轴线的纵向观测基面,一般可布置1-2个,每个坝段1-2个测点。测点轴线位于灌浆帷幕和排水孔轴线之间。横基面靠上游的测点最好包括在纵基面中。

c. 观测点布置

测点扬压力与地质特性、灌浆及排水等因素有关。扬压力强度的变化并不是一条直线,应考虑这些因素布置测点。

(1) 每个横基面上的测点数量一般是3~8个。从上游起,第一个测点布置在帷幕与排水孔之间(如果为了观测泥沙淤积及人工铺盖的影响,也可布置在帷幕之前,但以采用孔隙水压力计测量为宜)。第2个测点常布置在第一排排水孔下游。

(2) 在坝基开挖后应对设计的测点位置作适当调整,使其处在有可能产生最大扬压力的岩石裂隙上。此外,在透水性较大的岩层或断层、夹层中可适当增设测点。

(3) 对重力拱坝的观测基面按径向辐射线方式布置,即观测点轴线垂直于拱坝坝轴线。测点之间距离可适当减小。薄拱坝一般不进行扬压力观测,支墩坝测点主要布置在靠

上游的部位。

2.2.6 渗水压力监测

主要对土坝的坝基进行。观测点的位置和深度可根据坝地质情况、防渗设施结构、排水设备的型式及可能产生的渗透变形情况而定。

(1) 对于比较均匀的砂砾石层，一般布置2~3个基面，每个基面3~5个测点。

(2) 对于双透水层坝基，一般布置2~3个观测基面，每个基面2~4个测点。各测点均应设在强透水层中，但在下游坝脚处和出水口附近的的不同土层中可各布设一个测点，以观测各层中渗水压力的变化。

(3) 对于多透水层坝基，为观测各层中的渗水压力，可布置1~3个观测基面，每个基面每层中布置1~3个测点。最好采用孔隙水压力计观测，并在施工期进行埋设。

2.2.7 渗流量监测

此项观测包括坝肩、坝体及坝基各部位，应根据渗水部位、汇集条件、渗流量大小并结合所采用的观测方法进行布置。现按土坝和混凝土坝分别叙述。

a. 土坝

(1) 一般在坝趾下游能汇集渗水的地点设置集水沟，在沟的出口处布设置水设备进行观测。如集水沟后接有排水沟，则量测设备应布设在排水沟内。当渗水可以分区拦截时，可在坝趾下游分区设集水沟，末端归入总排水沟。在集水沟和总排水沟上同时进行量测。对设有减压井的土石坝，尚应量测单井的渗流量。

(2) 集水沟、排水沟和量测设备应布置在不受泄水建筑物泄水影响、不受坝面及两岸排泄雨水影响的地方，并结合地形尽量使其平直整齐，便于观测。

b. 混凝土坝

(1) 坝基和两岸的渗水必须分开观测，并力求按不同部位进行分区量测，有条件时可选择部分排水孔进行单独观测。

(2) 坝体靠上游面排水管的渗水流入排水沟后可分段集中观测。混凝土裂缝、伸缩缝或岩石裂隙的渗水，应选择有代表性的固定缝口进行观测，一般可采用容积法。

2.2.8 渗流水质监测

(1) 在渗流量观测及现场检查时，同时在各部位目视观测渗水是否透明清澈，发现渗水浑浊或可疑时，应立即进行透明度检定，并及时掌握透明度的变化。

(2) 渗水透明度一般1~3个月检定一次，可在河床、两岸、廊道、重要构造带等有代表性的部位取渗流水样。

(3) 对有析出物或有侵蚀性的重要部位，应定期取水样进行水质分析。可根据要求及

变化情况, 分别选用简易分析或全面分析。必要时应与水库水质进行比较。

2.3 仪器设备

由于渗流监测的项目较多, 所以仪器设备的种类也较多, 下面介绍几种比较常用, 并且在工程应用中效果较好的观测仪器。

2.3.1 测压管

可用来观测扬压力、浸润线、渗水压力、地下水位及绕坝渗流等。按其用途不同构造也不完全相同, 但基本上可分为土坝和混凝土坝两类。

a. 土坝测压管

可分金属管和塑料管两种, 根据工程等级、水头大小及材料条件加以选择, 但必须保证安装后不易变形、漏水或损坏。以往管径多采用38~50mm, 近年来为了减少滞后的影响, 有向细管径发展的趋向。例如浙江和湖南的一些土坝采用了 $\Phi 15\text{mm}$ 的镀锌钢管, 其进水段为透水砂轮($K=10^{-3}\text{cm/s}$), 管外滤砂为中砂, 高约1.5m。测压管的构造可分为进水段、导管段和管口段三部分。

(1) 进水段 一般在进水段管壁上钻有足够数量的进水孔, 其外壁应包扎土工织物过滤层或铜丝网, 并填反滤料。该层材料必须能顺利渗水, 经久耐用, 不使土壤颗粒透过网眼。

(2) 导管段 其材料和直径与进水段相同, 要求管壁不透水, 内壁光滑, 接头一般采用螺丝扣, 塑料导管也可采用加箍焊接的办法。在土坝中导管一般是铅直的, 只有在观测斜墙坝的浸润线时, 才采用水平管段的L型导管。建议导管直径20~30mm。

(3) 管口段 为了防止雨水、地表水流入管内或沿管外壁渗入坝体, 避免石块或杂物落入管内, 必须安装专门的保护设备, 其构造应力求简单牢固, 防止人为破坏。

b. 混凝土坝测压管

此种测压管多设置在岩基上, 且可能为有压渗流, 与土坝不尽相同, 但仍可分为进水段、导管段和管口段三部分, 典型的有以下几种:

(1) 单管式 管径一般为50mm, 进水段长1m, 交错的排列着 $\Phi 5\text{mm}$ 钻孔, 俗称花管。当基岩灌浆后, 在已浇混凝土上钻孔, 然后将测压管插入经冲洗后的钻孔中, 深入基岩0.75m, 管子末端离开孔底0.25m。

在花管周围填充经过筛分冲洗干净的粒径6~8mm的卵石。填充高度为1.25m, 捣实后再将小块软粘土填入深约0.5m, 捣实压紧形成止水塞, 上面再用水泥浆填充使之与混凝土紧密结合。

(2) 多管式 在地质条件较复杂的部位, 如需分层观测不同高程的渗流状态时, 可在一个钻孔中安装两个以上测压管。进水段分别安装在不同的岩层内, 再用导管引到管口,

中间用粘土及水泥浆隔开。

(3) U型管式 适用于岩石破碎渗出物较多的部位。因为有两个引出管，在灌浆的同时可用低压水冲洗，故不易被堵塞，用于需在灌浆前埋管的情况，用管材料较多。

(4) 支撑式 此种构造比较简单，进水段没有花管，仅将直径50~75mm的镀锌管先固定在离基岩面0.15m的测点上，待浇注混凝土并灌浆后再从钢管口钻孔至基岩内1m。这种方法被广泛采用，效果较好。

2.3.2 孔隙压力计

可用来观测扬压力、浸润线、渗水压力、地下水位、绕坝渗流及孔隙水压力等。根据其原理不同有多种型式，现介绍以下几种：

a. 差动电阻式

水压力自进水口经透水石作用在感应板上，引起仪器内部两电阻 R_1 和 R_2 的比值差动变化。但当温度变化，例如升高 ΔT 时，电气转换部件内的油和空气因温升而膨胀，给感应板施加一个渗压力相反方向的压力。因此，在仪器受水压和温度双重作用下，其计算公式应为：

$$P=f \cdot \Delta Z - b \Delta T \quad (2.1)$$

式中： P —渗水压力；

f —仪器修正压力最小读数(对于采用5芯电缆的仪器可不作修正)；

b —仪器温度补偿系数；

ΔZ —仪器电阻比变化量；

ΔT —仪器温度变化量。

b. 钢弦式

此种仪器感应板上安装有钢弦，当渗水压力使感应板受压挠曲后，利用钢弦长度的改变而产生不同的自振频率来测定挠曲的大小，进而换算成渗水压力。计算公式如下：

$$P=f \cdot \Delta F^2 + b \Delta T \quad (2.2)$$

式中： ΔF^2 —仪器频率平方的变化量；

其余符号同式(2-1)。

c. 电阻片式

此种仪器是将电阻丝应变片粘贴在感应板上，渗水压力引起电阻丝片变形，从而使其电阻发生变化并按线性关系转换成电压。由于仪器温度能够自动补偿，所以不需作温度修正。计算公式为：

$$P=f \cdot \Delta S \quad (2.3)$$

式中： ΔS —仪器输出与输入电压比变化量。

2.3.3 量水堰

量水堰是用来观测渗流量的设备,适用于1-300L/s的范围内。一般设在集水沟的直线段上,沟底及边坡需加护砌。要求堰下水深低于堰口,形成堰口自由溢流,且不受泄水及雨水的影响。有以下几种型式:

a. 三角堰 适用于流量1~70L/s,三角堰的堰口为底角成直角的等腰三角形。美国垦务局采用装卸式的堰板,可根据流量大小改换型号。流量Q的计算公式如下:

$$Q=1.4H^{5/2} \quad (2.4)$$

式中: H—堰上水头

b. 梯形堰 适用于流量为10~300L/s。过水断面为梯形,边坡为1:0.25,堰口应严格保持水平,底宽不宜大于3倍堰上水头。算式如下:

$$Q=1.86 H^{5/2}b \quad (2.5)$$

式中: b—堰坎宽。

c. 矩形堰 适用于流量大于50L/s的情况。分为有侧向收缩和无侧向收缩两种。算式如下:

(1) 有侧向收缩

$$Q = \left(0.405 + \frac{0.0027}{H} - 0.03 \frac{B-b}{B} \right) \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \right] b \sqrt{2g} H^{3/2} \\ = A_1 A_2 b \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (2.6)$$

式中: B—堰墙宽;

b—堰口宽;

h—堰高;

A_1, A_2 — 系数, 均可查表。

(2) 无侧向收缩

$$Q = (0.402 + 0.054 \frac{H}{h} b \sqrt{2g}) H^{3/2} = mb \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (2.7)$$

上述式(2.4) ~ (2.7)均可查表计算。

2.3.4 容积法

适用于渗流量小于1L/s的量测,分为两种:

(1) 棉絮吸水法 流量小于0.2mL/s时用;

(2) 容器截水法 流量大于0.2mL/s时用,根据渗水条件又可分为固定引槽集水、临时引槽集水和导管集水三种。

2.3.5 透明度管

观测渗水透明度用。该管为高35cm、直径3cm的平底玻璃管。管壁刻有厘米刻度，零点在管底处并设有一个控制阀门。

2.4 观测方法

2.4.1 测压管

虽然测压管是观测渗流的传统方法，但实践证明，由于滞后时间较长，只有在渗透系数 $K > 10^{-3}$ cm/s的岩石或土壤中才能获得较好的效果。在 $K = 10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/s的粘性土中，若库水位的持续稳定时间超过测压管滞后时间并形成稳定渗流，可选用(Φ15mm)的测压管。但在下列情况下，不宜采用测压管，而采用孔隙压力计。

- ① 不稳定渗流条件下的浸润线和渗压变化过程的观测；
- ② 在岩石或土壤的渗透系数 $K < 10^{-6}$ cm/s的渗压浸润线观测；
- ③ 混凝土和土壤孔隙压力的大小和消散过程观测。

观测测压管中水位或水压力的方法有：

① 电测水位器适用于管中水位低于管口的情况，是根据水导电的原理制成，使用较多。

② 测响锤为上端封闭下端开敞的一段金属管，长度为30~50mm，观测时听接触水面声音。

③ 示数水位器用于管中水位低于管口较深、管中水位变幅较小的情况。利用水位升降带动传动系统拨动示数器，可直接读水面高程。

④ 压气U形管适用于管中水位低于管口5m以内的情况，并可用作遥测。

⑤ 遥测水位仪一般由传感器、中转站和主机三部分组成。传感器为水位讯号变送器。中转站设在测压管比较集中的地方，安装有多点切换开关，由观测室主机发出脉冲来进行控制。测值可自动打印在记录纸上，也可由数码管显示。

⑥ 压力表用于管中水位高出管口3m以上。采用水管或蒸汽所用的压力表，规格为0.51.5级，一般在量测范围的1/3~2/3以内使用。

⑦ 压差计用于管水位高出管口5m以内。一般用外径为10mm、高度大于400mm并带有三通的U形玻璃管做压差计，安装在木板上，中间装有带毫米刻度的标尺，零点设在中部。

2.4.2 孔隙压力计

适用于各种渗流水位、水压力以及孔隙水压力的观测。一般没有滞后现象，能反映测

点的实际情况，土坝或混凝土坝采用都很适宜。为了保证观测值的精度，提出以下要求：

a. 差动电阻式

每次应观测电阻比的正测值 Z 、反测值 Z' 、电阻值 R_T 及总电阻 R_S 四个数，则对电阻比限差为：

$$Z' + Z = 2M + A^2\% \quad (2.8)$$

式中： $Z=100 \pm A$ ； $M=100 \pm B$ 。M值为接收仪表的固定电阻。

按式(2.8)计算误差应在 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 以内才能符合要求。

对电阻值的限差按下式控制：

$$2\gamma = R_S - R^T \quad (2.9)$$

b. 钢弦式

观测的频率波形可分为垂直和水平两种。已知指示频率与被测频率的数值不同则呈现的频率比值也不同，如1:1, 1:2, 1:3等。其中1:1图形为正常被测频率，与其它比值应满足下列关系：

$$F_y = F_x \cdot x/y \quad (2.10)$$

式中： F_y —仪器换算被测频率；

F_x —接收仪表指示频率；

Y —观测图像垂直方向与垂线切点数；

x —观测像水平方向与水平线切点数。

按上式计算结果与正常被测频率之差应在 $\pm 3H_2$ 以内。

c. 充气式

充气式多点渗压计的突出优点是可沿钻孔重复测量多点渗水压力。它适用于孔径100mm，孔深可达100m以上。测量方法一般分为四个阶段：

(1) 将多点渗压计下放到孔内要求观测的部位。

(2) 将充气袋充气压出观测段(一般长为0.55m)内的水。

(3) 将上、塞充气隔断观测段，使该段内的压力低于渗水压力。

(4) 由于地下渗水压力压向孔壁及充气袋薄膜，使充气袋放气，袋内压力逐渐下降到内外二者压力平衡，即可求出渗水压力。

2.4.3 量水堰

由(2.4)—(2.7)可知，一般是观测堰上水头然后换算成渗流量。观测方式有：

a. 水尺法

在堰身上游水流平衡处设水尺读数到毫米。为提高精度应尽量采用水位测针，读数至0.1mm。测针应垂直水面，倾斜度不得大于1/500，并在测针上游设置稳流设备。

b. 遥测法

可利用遥测渗流流量仪的传感器测定水位升降，显示器指示水位值，可由电缆传送到

观测室的微型电子计算机并把水位变换为流量，以L/s显示打印。

2.4.4 容积法

- ①利用干、湿棉絮的重量差和浸湿时间可求出渗流量。
- ②容器截水法利用容器集水并记录时间求算流量，要求集水时间不得小于10秒。

2.4.5 透明度法

- (1) 先制作一块5号汉语拼音铅字底板，置于透明度管底下4cm处，将水样摇匀后注入管内。
 - (2) 从管口通过水样观看铅印字体，如看不清即打开阀门放水，直至看清字样为止。
 - (3) 从管壁刻度读出水柱高度，即为渗水透明度，大于30cm为清水，愈小说明愈浑浊。
 - (4) 应固定专人操作。每次观测要在同等光亮下进行，但应避免阳光照射字板。
- 上述观测应重复两次，差值不应大于±1cm。

2.5 资料整理

进行资料整理时，一般要绘制以下几种曲线。

2.5.1 过程线

一般以时间为横坐标，测值为纵坐标绘制。除测点的水位或流量外，同时绘入上下游水位(或水头)及透明度，对于土坝还需绘入降雨量。为了便于比较，可将同一断面的测点绘在同一张图上。土坝测压管的水位常滞后于库水位，为了合理取用观测资料，应注意的是：

- (1) 当过程线上有受降雨影响的突变时，此段资料应舍去不用。
- (2) 如果测压管局部腐蚀成新的进水口，而原导管和进水段被堵塞，则管水位会突然上升，此时应停用此管另设新管。
- (3) 上游水位变化，管水位过程线不变化或没有明显的峰、谷，则表示滞后时间很长或进水段被淤堵。此时的观测资料不能用。
- (4) 管水位过程线出现峰、谷的时间比库水位晚一些，这种时差常作为管滞后时间考虑。

2.5.2 相关线

这是表示测点水位或流量与其影响因素之间关系的一种图形。有时把几组数据绘在同一张图上互相比，叫综合相关线。绘图时应注意：

(1) 测点水位 h 和渗流量 Q 一般只与上、下游水位(H_1, H_2)相关。目前习惯作 $h-H_1$ 和 $Q-H_1$ 相关线,这只有在 H_2 稳定时才适用。若 H_2 变化较大,则就应作 $(h-H_2)-(H_1-H_2)$ 及 $Q-(H_1-H_2)$ 的相关线,此线应为直线或曲线,不然就说明受降雨或滞后时间等因素的影响。

(2) 测点水头 $h-H_2=\Delta h$ 与水库水头 $\Delta H=H_1-H_2$ 的相关线,应通过坐标原点。但 $Q-\Delta H$ 线有三种情况:

① 通过坐标原点,说明全部渗流量被测出。

② 在纵坐标上有正截距,表明有部分流量未测出。该值等于该线延长后交于负 Q 轴的绝对值或等于该线平移通过原点时移动的横坐标值。

③ 综合相关线的比较对象可以是横断面上的几个测点,一个纵断面上几个不同坝段的测点及同一测点几个不同年份的测值等。例如,若历年测值的相关线不随时间变化,说明渗流场稳定;若逐年向左移动,说明逐年减小,渗流条件可能改善;若逐年向右移动则意味着渗流恶化。

2.5.3 分布图

分布图上的一条分布线表示一次观测成果。常把多次测值画在一起对比,如把一年内最高、最低两次测值对比,可看出各处年变幅的大小。

(1) 纵向分布图横坐标为纵向(坝轴线方向)距离,其上标出观测点号、桩号或坝段号。纵坐标为观测值。有时还画出坝底开挖线。

(2) 横向分布图横坐标为横向(顺河流方向)距离,其上标出测点号、桩号。纵坐标为观测值。图上常画出帷幕、排水孔位置。

(3) 等值线分布图将同测次结果点绘在大坝平、剖面图上,然后用勾绘等高线的方法画出等值线,如等水位线、等势线(或流网)等。也可作出各观测断面的流网和浸润线,了解空间渗流情况,评价防渗排水效果和渗透稳定性。

2.6 本章小结

本章主要讨论了渗流监测的内容与方法。大坝渗流监测常见的监测项目有绕坝渗流、浸润线、孔隙水压力、扬压力及渗水压力监测等。监测系统的设计中应结合工程的实际情况,合理安排测点的布置,选择适合工程应用的仪器设备。监测系统实现后,应及时对监测数据进行存储整理,并绘制相应的曲线,提交成果。

对工程运用和观测实践表明,原型观测成果比之理论研究和模型试验更符合实际情况,特别是渗流观测更加起着关键作用。但是,原型观测方法必须运用得当,才能取得理想的效果,为此应满足以下基本条件:

① 合理地布置观测断面和各项测点;

- ② 认真选择仪器设备并取得可靠成果;
- ③ 正确地进行观测资料的分析和计算。

3 渗流监测系统的设计及硬件选型

近十年,国内新建了许多大型水利工程。同时,旧的水利工程由于时间及其它原因也在逐渐老化。如何确保大坝运行的安全,预测大坝是否在正常运行的问题也显得十分突出。由于大坝事故的发生是一个由量变到质变的过程。所以,建立一套可靠先进的大坝安全监测系统是必要的。它可以实时监控大坝的安全运行,及时掌握和预报大坝的运行情况,及时发现问题、分析问题和处理问题。对于大坝安全运行,无疑具有重大意义。此外,软件工程、网络工程以及人工智能技术的发展,也为实现大坝安全自动监测提供了必要的条件。

莲花水电站水库位于黑龙江省海林市三道河乡,是一个运行多年的大型水库。根据国家防总与黑龙江省水利厅的要求,为了充分发挥莲花水电站水库的作用,挖掘现有工程的潜力,提高防洪、调度、灌溉、供水等能力与标准,为了提高黑龙江省水利现代化的建设进程,准备在莲花水电站水库建设一套水库信息自动化系统,进一步提高莲花水电站水库的现代化管理水平,使工程发挥更大的作用。本文以莲花水电站水库为背景,对其信息自动化系统的设计做以介绍,并对渗流监测系统的设计给出详细的说明。

3.1 工程简介

莲花水电站位于黑龙江省海林市三道河乡木兰集下游二公里处,距牡丹江市160公里,是牡丹江下游第一座梯级大型水电站,是以发电为主兼有防洪、灌溉等综合效益的水电站。电站总装机容量550MW。坝址以上控制流域面积3.02万 km^2 ,水库总库容41.8亿 m^3 ,为不完全多年调节水库。工程枢纽由拦河大坝、二坝、溢洪道、引水系统、地面厂房、开关站等建筑物组成。

拦河大坝主要为钢筋混凝土面板堆石坝,坝顶高程225.8m,最大坝高为71.8m,坝顶长902m。坝顶宽8m,上游坝坡1:1.4,下游坝坡略大于1:1.4。混凝土面板厚度按 $t=0.3+0.003H$ 变化:底部0.5m、顶部0.3m,总面积7.54万 m^2 ,混凝土方量2.93万 m^3 。坝体主要划分为垫层料、过渡料区、主堆石区和下游堆石区,总填筑方量590万 m^3 。

二坝布置在左岸垭口,为粘土心墙堆石坝,最大坝高为47.2m,坝顶长332m。

溢洪道布置于右岸,全长990m,底宽130~90m,溢流前缘长130m,布置7个孔口,弧门尺寸为16m \times 13.4m,可渲泄校核洪水流量18570 m^3/s 。

引水发电系统位于右岸,包括进水口、两条直径13.7m引水隧洞、调压井、压力管道等。调压井采用闸井结合,双圆弧型阻抗式调压井。

坝址原河床地形为不对称的U型河谷,宽高比12.5。右岸为冲刷岸,临江基岩陡壁约70°。左岸为堆积岸,坡度30°~40°,分布有漫滩和I、II级侵蚀堆积阶地,II级阶地后缘为近东西向的条形山脊,顶部高程约245m。大坝基础主要为闪长花岗岩,岩性坚硬、均匀、整体性好,强度高。河床右侧和左岸坝肩都有贯穿坝基断层,但规模较小,对大坝的安全

影响不大。坝区基岩为下元古界混合花岗岩，后期穿插有闪长岩、正长斑岩、花岗斑岩和花岗细晶岩等酸性岩脉。松散层为第四系冲洪积沙卵石和砂壤土、粘壤土，阶地部位厚6 m~17m，河床砂卵石厚0.5 m~3m。局部岩脉和断裂发育部位岩石破碎，成为强透水带。

坝址区属中温带大陆性湿润季风气候，平均气温为3.2℃，极端最高气温37℃，极端最低气温-45.2℃，结冰期5个月。降雨量主要集中在5月~9月，多年平均降雨量为598.8mm。水库正常蓄水位218.0m，设计洪水位220.58m，校核洪水位225.41m。^[11]

本工程于1992年11月13日正式开工，1993年6月1号导流洞贯通，7月开始浇筑大坝坝趾，1994年10月25日大江截流。1996年8月22日正式下闸蓄水，同年底首台机组并网发电，1998年完成电站土建工程。

大坝自首次蓄水运行以来，水库最高水位为218.5m。由于冬季气候寒冷，水位变化区面板止水遭受冰冻破坏，于2001年采用环氧粘剂橡胶等材料对207m~215m高程的水位变化区进行了补强。2000年10月完成开关站后山坡危石清理并喷锚加固和加高山坡脚护坡墙。

3.2 水利信息自动化系统设计

3.2.1 系统整体结构的建设

莲花电站水库是阶梯水库，为了充分利用已有的设施，本次系统设计主要由大坝渗流监测、溢洪道闸门监测、水库主要建筑物的图像远程监视及中心站的建设组成。中心站采用交换机将各工作站与网络服务器连接起来，各监控工作站定时将现场的实时信息写入网络数据库。网络中心站建有WWW查询系统，为各工作站提供查询服务，以便能够及时了解水库重要设备及设施的运行状态。同时利用水库信息网络接入水利专网或公网，实现在Internet网上的数据共享。通过一定的权限，不管在何时何地都可以通过Internet网查询到水库的运行数据，方便了领导和专家及时做出决策^[12]。水库水利信息自动化系统建设整体框架如图3-1所示。

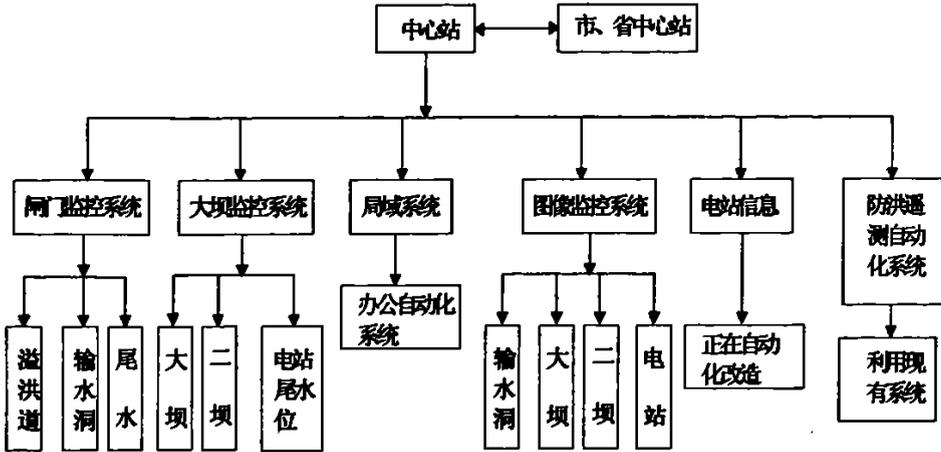


图3-1 莲花电站水库水利信息自动化系统框架

Fig.3-1 Lianhua station Reservoir Water Information System Automation Framework

3.2.2 中心站的建设

中心站主要功能有以下几点。

- ① 接收监控、监测、监视子系统的实时数据与图像，
- ② 建立实时数据库与历史数据库，
- ③ 通过水利专网实现省市间的数据共享，
- ④ 通过编制相应的软件提供Web查询。

设备主要由计算机、交换机、打印机、投影仪等组成。

中心站是系统的中枢部分，所有的数据收集处理、预报、通讯和成果输出都在这里进行。中心站设备的好坏，可靠性的高低及软件处理功能的强弱，很大程度上决定了系统的先进水平。各个系统采用光缆与中心站相连，这样可以保证数据快速稳定地传输。为了提高中心站计算机的可靠性，中心站采用工业级计算机，拟采用美国惠普公司生产的高端工业计算机作为数据库服务器，美国戴尔公司生产的P4计算机作为各中心站主机。交换机采用加拿大Nortel公司生产的24口交换机。中心站网络结构如图3-2所示。

3.2.3 闸门自动监控系统

根据水库实际情况，需对溢洪道泄洪闸、输水洞进出口闸门实施闸门自动化监控。溢洪道泄洪闸有矩形闸门7扇，采用液压启闭机启闭，配一套电动机容量为2x15 KW的液压启闭机液压装置。

闸门测控数据通过光缆与中心站进行传输。监控系统主要由PLC(可编程控制)、闸门开度显示控制仪、闸门开度传感器、综合测量控制柜等组成，负责对闸门的升、降、停进行控制，检测闸门开度。闸门的控制方式有手动控制、本地自动控制和远程自动控制，控

制方式之间设有优先原则^[13]。控制参数可以选用闸门的开度或泄洪流量。

3.2.4 图像监视系统

图像监视系统可及时、准确、直观地对水库大坝、闸门、输水洞出口、水库防汛调度中心等防汛重要场所和各设备运行状况进行实时监控，掌握水库汛情的实时变化情况，及时发现可能出现的各种隐患，使防汛指挥部门能主动、全面、及时掌握水库的汛情以及汛情的演变过程，为及时准确地做出调度方案、下达调度命令提供重要的参考依据^[14]。

图像监视系统主要由远端设备、传输线缆和中心设备三部分组成。远端监控点分定点和三可变量。定点监控点包括摄像机、镜头、云台、防护罩和支架，三可变量监控点包括摄像机、镜头、云台、解码器、支架和防护罩等。传输设备包括通信光缆和光端机等。中心设备部分由主控机(监控工作站)、屏幕墙和监控视频服务器等组成。主控机通过传输设备将控制信号传至摄像机及云台，控制变矩、变焦和方位，同时接收摄像机图像，对各类画面进行控制操作。

本次系统主要对大坝、溢洪道、电站及中心站进行图像监视。图像采集设备将采集到的图像通过光缆传送到中心站。中心站再通过视频服务器，对图像进行存储压缩等操作后，可在电视中显示远端实时的图像，或供网上远程查询^[15]。

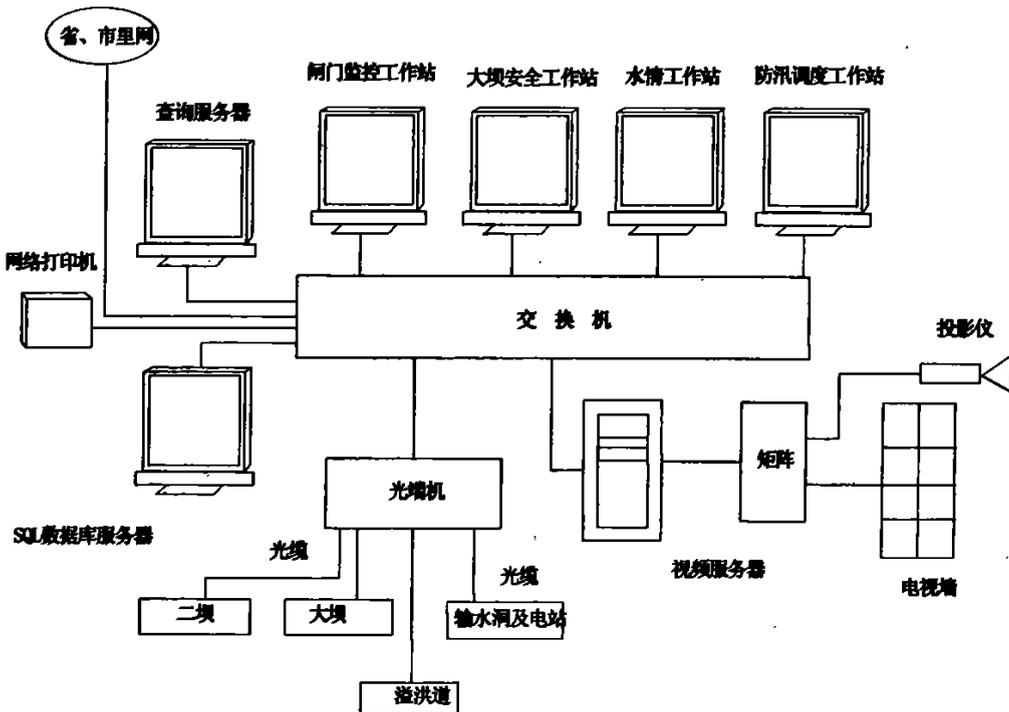


图 3-2 中心站网络结构图

Fig.3-2 Central Station network structure

3.3 渗流监测系统设计

3.3.1 大坝主要设施介绍

本次监测内容以及设计方案主要是在莲花电站水库除险加固工程的要求下进行的。大坝原有的设施及本次大坝除险加固的情况如下。

该水库的安全监测设施，自水库建成以来经过多次补充和改造，现状如下：

a. 边角网和精密水准网

坝区内建立了由13个点组成的边角网作为水平位移观测的基点网，其中大坝右岸布置6个点，编号为L1、L3、L5、L7、L9、L11；在二坝左岸布置3个点，编号为L2、L6和L8；在大坝与二坝中间山体上布置1个点，编号为L10；在大坝下游右岸平地距坝480m处布置1个点，编号为L4；溢洪道布置2个，编号为J1和J2。测点布置图见附图3-4。采用T2002+DI2002按国家一等三角测量精度要求施测。

坝下游区建立了由26个水准点组成的精密水准网作为垂直位移观测的基点网，其中基点网中设置1个原点组（4点）位于坝下游1.8km处，编号分别为IS1-1、IS1-2、IS1-3和IS1-4。在左岸沿上坝公路布置3组工作基点，编号分别为IS2-1、IS2-2、IS4-1、IS4-2、IS6-1和IS6-2。在二坝左坝头布置1组工作基点，编号为IS8-1、IS8-2。在溢洪道左岸出口处布置1组工作基点，编号为IS3-1、IS3-2。在大坝右坝脚、马道端点及交通洞口处分别布置1组工作基点，编号分别为IS5-1、IS5-2、IS7-1、IS7-2、IS9-1和IS9-2。在大坝、二坝中间山体 ∇ 200m马道端点处布置1组工作基点，编号为IS10-1、IS10-2。在进水口 ∇ 320m公路上布置1组工作基点，编号为IS11-1、IS11-2。在溢洪道堰体左岸布置1组工作基点，编号为IS12-1、IS12-2。详见图3-3。

上述水准网各点在近坝区组成4个水准环线和2条水准支线。原点组以其4个点构成大地四边形环线。

b. 大坝监测

(1) 表面变形监测

在坝体表面共布置79个水平位移测点，其中21个测点布置在正常蓄水位以下作为临时测点，其余58个测点为永久性测点，分布于面板（12个）、坝顶防浪墙上（12个）、坝顶下游侧（12个）、坝后坡马道上（10个）、坝后坡观测室旁（6个）、坝后坡进厂公路边（6个）。坝体表面水平位移利用边角网点作为工作基点，采用边角交会或边长交会或小角度法进行观测。

除上游面板、防浪墙外，在其余水平位移测点旁都布置了垂直位移测点。坝体表面垂直位移利用精密水准网点作为工作基点，按二等水准测量精度进行观测。

(2) 内部变形监测

在垂直于坝轴线方向取二个观测断面，一个为最大坝高断面（桩号0+170m），另一个

为地质条件较复杂的断面(桩号0+496m),布置引张线式水平位移计和水管式沉降仪分别用来观测坝体内部水平位移和垂直位移。在每个断面的180m、192m、205m三个高程各布置一条测线,每一测线分别布置5、4、3个测点,水平位移和垂直位移测点同组布置;共有24个测点。通过下游坝坡观测房旁的表面测点变形,换算出坝体内部各测点的绝对位移。

(3)周边缝、垂直缝变形监测

面板与趾板结合部位的周边缝是混凝土面板堆石坝防渗的关键部位之一。为观测周边缝在水库蓄水后的三向位移变化规律,在河床及两岸的周边缝上共布置了9组三向测缝计,观测垂直于周边缝的开合向位移(张开)、平行于周边缝的滑移(剪切)以及垂直于面板的挠曲(沉陷)。

在靠近两岸坝肩部位的张性缝区域,各布置了2支测缝计,观测面板张性缝的开度大小;在河床部位的压性缝区,布置了1支测缝计,观测面板压性缝的闭合度大小。

(4)应力应变监测

在面板上选择有代表性的部位布置了应变计、钢筋计和无应力计;在靠近周边缝的部位布置三向应变计组,用于观测面板的平面应力状态。各测点仪器都布置在相应板块的中心线上,在厚度方向上处于面板的中间。

在大坝左坝头建有一座观测房,面板内部埋设的仪器电缆沿面板引至坝顶,再集中引至观测房采用自动化监测系统进行了观测。

(5) 渗流监测

渗流监测包括渗透压力、渗流量、绕坝渗流观测。

在河床最大坝高断面(桩号0+170m)的建基面,靠近上游趾板的帷幕后布置了4支渗压计,用来观测坝基渗透压力。

利用坝下游原有施工围堰,用高压定喷灌方法形成一道地下防渗板墙,并在桩号0+265m处设置一个三角形量水堰,用来观测大坝的总渗流量。

为监测大坝蓄水后两岸岩体的绕渗情况,在左右岸山体中分别布置了2个和7个绕坝渗流观测孔。

c. 二坝监测

(1) 表面变形观测

在二坝坝体表面共布置17个水平位移测点,其中4个测点布置在正常蓄水位以下作为临时测点,其余13个永久测点分布于上游坝坡(3个)、坝顶防浪墙上(4个)、坝顶下游侧(4个)、坝后坡马道(2个)。坝体表面水平位移利用边角网点作为工作基点,采用边角交会或边长交会或小角度法进行观测。

除上游坝坡、防浪墙外,在其余水平位移测点旁都布置了垂直位移测点。坝体表面垂直位移利用精密水准网点作为工作基点,按二等水准测量精度进行观测。

(2) 渗流监测

渗流监测包括坝体浸润线(渗流压力)、渗流量、绕坝渗流观测。

选取桩号为1+072m的剖面作为坝体浸润线观测断面,共布置12支渗压计。其中,在心墙内的193m和208m二个高程上分别布置3支和2支,在心墙底部与混凝土底板接触处布置3支,在心墙反滤层底部布置1支,在下游堆石体的建基面上布置3支,用来观测不同水位情况下坝体浸润线的变化。

二坝坝体渗流量利用下游坝脚处的滤水坝趾作为排水沟,在坝下游设置一个三角形量水堰进行观测。

二坝坝基的渗流量通过在下游河床中埋设测压管来测定。测压管顺水流方向布置两根,间距为20m,垂直水流方向布置六排,间距为40m。

为监测水库蓄水后坝体两岸岩体的绕渗情况,在二坝左岸山体布置9个绕坝渗流观测孔,右岸山体的绕坝渗流观测孔与大坝共用。

d. 引水系统监测

引水系统由引水道进口、隧洞、调压井和压力钢管组成。由于在设计上进行了优化,为了监测新型结构的工作性态,验证设计的合理性,在2号引水道的进口、隧洞、调压井以及1号压力管道布置了压力计、测缝计、应变计、钢筋计和渗压计。

在2号进口中墩(桩号0+001m,高程165.50m),边墩(桩号0+029.5m、0+350m、

0+060.5m, 高程165.50m), 分别布置1支压阻式压力传感器, 观测进口压力分布。在隧洞沿程方向选取6个剖面, 桩号分别为0+043m、0+048m、0+050m、0+060m、0+100m、0+320m, 在结构应力最大部位, 布置钢筋计、应变计和无应力计, 用以监测钢筋混凝土的受力情况。在桩号0+048m、0+060m、0+320m, 布置差阻式渗压计, 观测作用于衬砌的外水压力大小。此外, 在0+048m剖面, 布置了3支测缝计, 观测项拱部位混凝土与围岩的接缝变化, 检验其回填灌浆效果。

在调压井井筒选取3个剖面, 高程分别为170.5m、175m、230m, 布置了钢筋计、应变计, 观测调压井结构的实际工作应力, 以便与设计计算结果进行对比, 并验证设计的合理性。

在1号压力管道选取了3个剖面, 对高压钢管的环向应力, 混凝土及围岩的应力进行监测。此外, 在1号压力管道设了渗压计, 对压力管直承受的外水压力进行监测。

e. 溢洪道监测

溢洪道观测项目有外部变形、闸墩钢筋混凝土应力、溢洪道底板与边墙渗透压力。

水平位移观测点共有16个, 其中闸墩8个, 每个闸墩1个; 溢洪道两侧高边墙8个, 目前在正常观测的是闸墩上的8个点。垂直位移观测点共有8个, 布置在闸墩水平位移测点旁。

选取闸墩左岸第一孔边墩及中墩, 在闸墩斜拉筋、混凝土最大受拉部位及牛腿上, 布置了钢筋计、应变计与无应力计, 测点对称布置, 以监测钢筋混凝土的受力情况。^[16]

f. 厂房内部监测

厂房观测项目主要为混凝土应变及钢筋应力观测。选取1号机蜗壳上的3个剖面 and 尾水管的2个剖面布置钢筋计、应变计及无应力计, 以观测这些部位的钢筋混凝土受力情况。

位移测点旁都布置了垂直位移测点。坝体表面垂直位移利用精密水准网点作为工作基点, 按二等水准测量精度进行观测。

3.3.2 系统主要监测的内容

大坝的检测项目和测点数通常很多。为了及时有效地进行监控, 应选择一些有控制作用和代表性的项目及测点建立监控指标。坝基扬压力既是施加于坝基的一种荷载, 影响坝的应力和稳定, 是反映坝基渗透性态的效应量。大的坝基扬压力常与坝体失稳、帷幕衰减相关, 因此, 坝基扬压力是监控大坝安全的主要监测量。渗流量是反映坝体和坝基物理力学性态的一种效应量, 它与坝的稳定、耐久性密切相关, 因此, 它也是监控大坝安全的主要监测量^[17]。

根据莲花电站水库大坝、二坝的实际情况以及水库管理局的要求, 拟对水库以下方面进行监测。

- ①莲花电站水库大坝、二坝坝基扬压力、量水堰渗流量等,
- ②大坝库水位及下游水位,
- ③电站尾水位。

需要完成的工作内容为监测系统设计、监测仪器和设备采购、运输、率定、安装、调试、观测、技术培训和相应的土建。

3.3.3 系统的设计原则

大坝安全自动监测系统的设计原则如下：

a. 要求符合规范，满足大坝安全运行管理需要。

本系统是为大坝安全运行管理而建立的，系统的监测项目和测点布置，系统的功能和性能均应符合本部门现行有关规范要求及大坝安全管理的实际需要。

本次设计主要遵循下列规范^{[18]-[26]}：

《土石坝安全监测技术规范》SL60-94

《土石坝安全监测资料整编规程》SL169-96

《水工建筑物侧流规范》SL20-92

《水位观测标准》GBJ138-90

《大坝安全自动监测设备基本技术》SL268-2001

《水文自动测报系统规范》SL61-94

《电气设备安装工程电缆线路施工及验收规范》GB50168-92

传感器和数据采集系统的技术标准依据：

美国Geokon（基康）公司设备技术手册

美国基美星公司2380MCU系统技术手册

b. 要求技术先进，满足现代化管理需要。

在大坝安全监测仪器和自动化监测系统的选型和设计工作中优先考虑国内外技术先进的产品，要求系统在实施时总体上达到当代国际先进水平，在国内处于领先地位，在运行期内也能保持一定的先进性。

c. 要求系统使用可靠，能够长期稳定运行。

自动监测仪器和系统必须正确反映水库大坝的工作性态和不同时期的变化情况，仪器及系统要求低故障、高可靠性，监测系统采用的仪器应具有人工观测和自动观测双重功能。系统建成后，必须是能够长期稳定运行的实用性系统。

(1) 应采用低故障率、高可靠性并经过长期现场考验的监测系统和仪器设备。

(2) 采用分布式数据采集系统，降低故障率，提高准确性和采集速度，扩展性强。

(3) 所有监测参量均能实现人工比例。

(4) 充分考虑防潮、防雷、抗干扰等因素。把由于自然、人为因素造成的系统损坏降至最低。

(5) 采集软件要简单实用，功能强，容易操作。数据库为开放的数据库，能与第三方数据处理软件兼容。

(6) 在高可靠性的基础上选用先进的系统和仪器，是建成后的系统达到国内或国际先

进水平。

d. 系统要优化，能扩展，可分期实施，力求工程费用和维修费用最低。

在系统选型、设计时不仅要考虑系统的优化，降低工程费用，而且要保证系统可扩展，在资金不足的情况下可分期实施，另外降低系统的后期维修费用也是设计应考虑的因素。

3.3.4 仪器的选型

a. 测压管水位监测仪器选型

莲花电站水库大坝渗流监测均采用侧压管，因此需要对监测测压管水位的渗压计仪器进行选型。市场上监测仪器的类型较多，主要有差动电感式、卡尔逊式、振弦式、光纤式、压阻式等传感器。几种类型的监测仪器各有优缺点，例如用硅应变片制成的压阻式水位传感器不稳定，其时飘和温飘都较大，仅能用于短期水位测量。对大坝安全监测而言，需要长期稳定的监测仪器，并且要求监测仪器安装简单、维护不便，不需要经常率定，因此不能选用压阻式渗压计。差动电感式高精度扬压力计损坏率很高，国内外尚未有令人满意的监测结果发表，因此也不能选用。卡尔逊式由于是通过测量仪器的电阻和电压比来计算建筑物的变化情况的，而电缆本身又有电阻，所以对电缆要求较为苛刻，一般不能远距离引设，最长引设的距离不能超过500米（有的不能超过200米），并且如果电缆经水浸泡或绝缘度降低，仪器的测值精度就达不到要求，目前国内外观测设计时均尽量避免选用该类仪器，因此，卡尔逊式仪器也不适用于该工程的应用。目前在国内外各大工程中应用比较多、技术比较成熟的是振弦式传感器，振弦式仪器由于是通过测量仪器钢弦的振动频率来计算建筑物的变化情况的，所以对仪器电缆的要求较低，甚至能在裸露电缆的情况下能准确地测量，并且电缆引设距离一般能达到2~3km，因此此类仪器为国内外所首选。光纤传感器技术先进，精度也非常高，但造价太高。结合当今趋势及莲花电站水库的实际情况，渗流监测系统拟采选用振弦式传感器。常见的几种传感器优缺点对比如表3-1。

表3-1常见的几种传感器优缺点对比

Table3-1 several common sensor comparative advantages

传感器种类	优点	缺点
压阻式	适于短期测量	安装维护不便，需经常率定，不适于长期测量
差动电感式	精度高	易损坏
卡尔逊式	适于短距离测量	误差大，对电缆要求高
振弦式	成熟产品，使用广泛	各公司产品质量有差别
光纤式	先进，新趋势发展	价格昂贵

由于振弦式仪器的关键部件钢弦以及钢弦的焊接技术不过关，国内厂家生产出的弦式仪器稳定性差、零飘较大。相比之下，国外厂商生产的弦式仪器质量稳定、零飘小，如美国的GEOKON公司、SINCO公司以及加拿大的ROCTEST公司。从国内外工程运用实践情况看，美国GEOKON公司的产品又明显优于其他两家产品^[27]，并且长期稳定性非常好。

全世界数以千计的大坝广泛使用了基康仪器，这些国家包括：美国、中国、西班牙、南非、巴西、瑞典、哥伦比亚、新西兰、肯尼亚、巴基斯坦、阿尔及利亚、印度尼西亚、泰国、澳大利亚等，涉及的大坝工程包括堆石坝、土坝、混凝土重力坝、拱坝、碾压混凝土坝等各种坝型。

b. 测压管仪器的性能指标

(1) 测压管内渗压计的选型

渗压计主要用于监测大坝、基础、暗渠、地下厂房和边坡等处的渗压及孔隙水压力。振弦式渗压计不仅具有安装方便简单、长期可靠性好、测量精度高等优点，还具有优秀的耐恶劣环境性，耐水压力可达1000m水头^[28]。此外，即便在电缆破损芯情况下，也不会影响数值测读。本系统渗压计拟采用基康公司的4500S型标准压力计（渗压计），量程选100Psi(1 Psi≈0.07kg/cm²)。

4500S型压力计不仅用以测量流体压力，例如地下水位，坝体、土体的空隙水压力等，也可用来装在孔内，监测井和测压管的压力或水位。压力计自带热敏电阻测温以及雷击保护器。

4500S型渗压计技术指标如表3-2所示。

(2) 水位计的选型

基康公司生产的传感器中用于测量水位的有4500AL和4500ALV两种。对测量范围在低压区的情况，可采用通气（AL）和不通气（ALV）传感器。在长期（超过十二个月）室外监测的情况，建议采用不透气型，并用第二个不通气的传感器作为补偿大气压力变化的大气压力计。低压型的适合于测量小的水位变化，可测出0.5 mm的水位波动。压力计自带热敏电阻测温以及雷击保护器。

表3-2 4500S型渗压计技术指标

Table3-2 Technical indicators of 4500S Seepage pressure meter

项目	仪器性能	备注
标准量程	0.35、0.175Mpa、0.035 Mpa	根据不同的测压管水位选用不同量程的渗压计
过载能力	2×额定压力	
精度	±0.1%F.S	
分辨率	0.025%F.S	
温度零飘	<0.02%F.S	
温度范围	-29~65℃	
电缆	双绞，22GA，6.4mm直径	
长度×直径	133×19mm	
重量	0.12Kg	

水位计拟采用基康公司的4500S型标准压力计（渗压计），用于测量大坝下游水位、

电站的尾水位及库水位。

(3)量水堰计的选型

量水堰计主要部件是悬挂在力传感器下的圆柱形重力浮子，重力浮子的一部分浸在水里，由于水面的变化，改变了圆柱形浮子的浮力，而直接作用在振弦传感器上，改变了它的张力，从而改变了它的谐振频率。我们在这里不选用超声波量水堰计，是为了便于和数据采集系统的连接。量水堰计采用GEOKON公司的4675LV产品。

(5)便携式振弦读数仪的选型

为了自动化系统监测的方便，需要选用便携式振弦读数仪一台。GK-403可在各种气候条件下测读所有的基康振弦传感器，可通过简单的操作储存读数，每一个储存读数均带序列号、时间、日期和温度，所有的读数可传输到计算机电子表格和数据库（如Lotous1.2.3,Micsoft Excel等）。该仪器可通过仪器接线终端箱在一个方便的位置测读所有仪器。

表3-3 水位计主要技术指标

Table 3-3 Main technical indicators of Gauge

项 目	仪器性能	备 注
量程	35, 70, 175Kpa	
超范围	2×额定压力	
分辨率	0.025%F.S	
温度零飘	<0.02%F.S	
温度范围	-29~65℃	
电缆	双绞, 22GA, 6.4mm直径	
长度×直径	133×25mm	
重量	0.12Kg	

基康4675LV量水堰计技术指标如表3-4所示。

表3-4 量水堰计技术指标

Table3-4 Technical indicators of Weir dollars

项 目	仪器性能	备 注
量程	300, 600, 1500 mm	
灵敏度	0.02%F.S. (最小)	
精度	±0.1%F.S	
温度范围	-20~80℃	
长度×直径	133×25mm	

仪器随机配有电池充电器、测读电缆、RS-232接口电缆、通讯软件和说明书。

GK-403型振弦读数仪的技术指标如表3-5所示。

c. 自动化采集设备选型

按照自动化系统设计原则,系统的目标是快速、方便、准确地采集大坝安全的各种数据,对采集的数据进行存储、统计、分析和告警,为

表3-5 GK-403型振弦读数仪的技术指标

Table3-5 Technical indicators of GK-403 Vibrating Wire Instrument readings

项 目	仪器性能	备 注
激励范围	400Hz~6000Hz,5V矩形波	
分辨率	0.25us/255	
测量精度	0.01%F.S	
工作温度	-10~+50℃	
长×宽×高	191×133×235mm	

大坝安全分析提供数据支持。

系统主要功能如下:

- (1)系统定时或人为确定采集全部或某一参量数据,
- (2)当某一参量超过越警值时向中心发出告警信息,
- (3)全部电缆端口进入设备前提供避雷保护,
- (4)中心可随时远程设定各参数采集周期中心站提供的长期存储、统计结果输出及WEB发布功能。

测量与控制单元(MCU, Measure and Control Unit)及其软件构成数据采集系统。根据系统的目标及实现的功能并结合莲花电站水库的实际情况,本渗流监测系统拟采用分布式采集系统。借鉴国内外其他水库大坝安全监测系统成功运行的案例,拟采用美国基美星公司生产的2380系列数据采集系统(MCU)。

新一代的2380MCU系统继承了基美星公司在大坝自动化领域独创的分散布置,智能型节点驱动网络结构,但最先进的原理和卓越的技术使得2380与传统的主从系统结构截然不同,使得2380MCU在技术上更加先进,结构上更加合理,性能上更加可靠,使用上更加方便,价格上更具有竞争力。

2380测量与控制单元(MCU)是2300系统的核心部件,布设在靠近传感器的附近,主要功能是与传感器进行数据量测与处理、报警条件检测、数据寄存、数据传输、反馈控制、网络路由等。

2380MCU由主板通讯接口模块和传感器接口模块等组成。2380MCU主板包括微处理器、存储器、时钟、电源管理器、Geobus内部总线和多路I/O接口等组成。高度集成的通讯接口模块可直接提供电缆、无线电、光纤、微波、电话系统或通讯卫星等多种通讯方式的联结。系统网络支持各种广域网/局域网/INTERNET网络方式。仪器接口模块可直接提供与各个仪器厂家生产的各种类型传感器连接,如:卡尔逊式、振弦式、脉冲式、电容式、电感式、步进式、差动变压器以及各种输出信号为电流、电压、电阻的仪器。

通过以上分析比较,拟采用2380系列的MCU作为大坝渗流自动监测的数据采集装置。

3.3.5 渗流监测系统的实现

a. 仪器及传感器布置

选取桩号 1+072m 的剖面作为坝体浸润线观测断面,共布置 12 支渗压计。其中,在心墙内的 $\nabla 193\text{ m}$ 和 $\nabla 208\text{ m}$ 二个高程上分别布置 3 支和 2 支,在心墙底部与混凝土底板接触处布置 3 支,在心墙反滤层底部布置 1 支,在下游堆石体的建基面上布置 3 支,用来观测不同水位情况下坝体浸润线的变化。

二坝坝体渗流量利用下游坝脚处的滤水坝趾作为排水沟,在坝下游 1+052 m 处设置一个三角形量水堰进行观测,该水堰与坝脚的距离大于坝基透水层的深度,满足量测坝体的地表渗流量。

二坝坝基的渗流量通过在下游河床中埋设测压管来测定。测压管顺水流方向布置 2 根,间距为 20 m,垂直水流方向布置 6 排,间距为 40m。

为监测水库蓄水后坝体两岸岩体的绕渗情况,在二坝左岸山体布置 9 个绕坝渗流观测孔,右岸山体的绕坝渗流观测孔与大坝共用。

鉴于二坝坝基地质条件复杂,二坝内部原有一个监测断面 1+072m 埋设的渗压计已经基本失效。根据竣工鉴定提出的建议,由东北勘测设计研究院负责设计和实施,在二坝桩号 1+065m 剖面增加设置了坝体浸润线观测断面。在该剖面处,钻两个孔埋设 6 支渗压计。第一个孔在坝轴线上垂直钻进,第二个孔在第一个孔上游 1m 处并向上游倾斜 4° 。两个孔的终孔位置都在二坝心墙基础混凝土盖板处,在两孔底部各布置 1 支渗压计,在高程 $\nabla 194\text{ m}$ 、高程 $\nabla 204\text{ m}$ 处,两孔各布置 1 支渗压计。渗压计电缆沿坝顶电缆沟引至大坝、二坝中间的监测房,增设一台 MCU,实现数据自动采集。上述工作于 2000 年 6 月完成。该断面观测不久就损坏,目前已无法有效监测坝体的浸润线。但从以前所观测到的资料,可以了解到二坝渗流的状况,埋设在心墙内的 8 个测点渗压与库水位有较好的相关性,位于低部上游面 P1 测点最明显,随库水位的变化而变化,到 1997 年 12 月后库水位变幅减少,其渗压也趋于稳定,在 1997 年底库水位最高达到 $\nabla 212.6\text{ m}$,对应的上游面 P1 最大压力为 0.28Mpa, P2~P6 等几个测点在 0.20Mpa 左右, P7、P8 在 0.07Mpa 左右。位于心墙下游反滤层内的测点 P9 及下游建基面的 P10、P11、P12 的压力与库水没有明显相关性,并且压力值很小。在 1997 年底,各测点压力在 0.02~0.07MPa 之间。说明前期坝体心墙和坝基防渗帷幕效果较好。建议恢复两断面的浸润线观测。

b. 数据采集站

数据采集站内布置 MCU。MCU 向下与传感器相连,向上通过光纤和中心站连接。光纤的采用可以保证数据高速可靠的传输^[29]。

MCU 设备房面积应不小于 6 m^2 ,量水堰设备房面积不小于 8 m^2 。

传感器接续电缆镀锌钢管埋设。

现场外部电源为 MCU 提供 220V、0.2A 的交流电源,本系统配置电源系统,用具备

电源隔离、抑制共模干扰、释放大电流和瞬间过电压、宽限稳压、电源指示和熔断功能。

MCU需要9V~16VDC、30mA~200mADC的工作电源。MCU机箱内应配备免维护蓄电池，为MCU提供备用电源，当电源遇到破坏时，MCU可连续3天至少20次继续采集并存储采集的数据。

电源配电箱为MCU站的设备提供电源，同时提供电源指示和熔断功能。

在各MCU站交流电入口处配置电源避雷保护器，采用并联安装方式，在最短时间内将因雷电和电器开关动作产生的大电流和瞬间电流过压释放或箝位在设备的安全范围内。

MCU数据采集设备安装在大坝监测设备间，每个传感器的线缆都引入设备间，接续电缆分布在大坝的各个断面。同时，采集设备使用AC220V外部引入电源，这些因素导致采集系统易受到雷电的干扰和破坏。所以必须考虑信号线、电源线的防雷问题。从系统的屏蔽、接地保护和选用避雷器两方面采取措施。

传感器电缆、通讯电缆、电源电缆穿镀锌钢管埋设，镀锌钢管每隔100m做一接地，并和测压管、接地体焊接在一起形成接地网，接地电阻不大于 3Ω 。

各MCU站和中心站都主要采用交流电，在交流电入户处安装并联式电源防雷器，避免由架空线引入的浪涌电压和浪涌电流，电源避雷器应保证良好接地（接地电阻不大于 4Ω ）。

在MCU和通讯设备之间加装通讯口避雷器进行过压保护。

在MCU和传感器之间加装信号避雷器进行过压保护，使测量回路的直流电压、直流电流、电阻及低频率信号免受雷电或过电压干扰。

4. 监测中心站

监测中心管理站应具备完善的系统功能，如系统设置、系统诊断、数据采集和传感器设置等。

系统设置功能：设置系统网络拓扑结构，配置MCU通讯接口参数；设置报警状态，当系统或测量值越线时报警。

系统诊断功能：异常情况下检测和报告远端的工作站状况。具有自诊断功能，自动监测自身的工作状态，包括单元温度、充电电压、电池电压等。

系统采集功能：可对输出为频率、电压、电流、脉冲及数字编码等信号的传感器进行常规巡测，定时巡测，常规选测和人工测量。

传感器设置功能：可分别对各类型传感器进行编程、设置，根据传感器的类型将频率信号转换为压力，或兼电阻信号转换为温度等。

人机界面功能：可按日常要求提供简要的报告，包括仪器的布置情况报告，网络拓扑结构的报告，测量和控制程序报告，数据报告，报警报告和系统运行维护报告等^[30]。

除上述功能外，监测中心站应提供自动监测数据和人工观测数据的管理，提供监测数据与计算机网络Intranet数据库接口，提供数据备份。

3.3.6 系统主要功能实现

a. 数据采集功能

系统能采用应答式/自报式/特殊自动控制三种运行方式采集数据,同时具有巡测、定时巡测、选测和人工测量功能。

b. 数据通讯功能

系统内部通讯:大坝安全工作站与各台测控装置之间采用光纤实现双向通讯。

系统外部通讯:大坝安全工作站与网络服务器采用网络与市、省局通讯。

c. 数据管理功能

大坝安全工作站具有数据管理功能,通过设置各种数据库实现对工程文档、巡查信息、原始测值、转换成果、监控指标和数学模型等进行管理。

d. 系统自检功能

系统具有自检能力,每次数据采集过程均先进行系统自检,当系统硬件设备或通讯线路发生故障时,在计算机上能显示相关信息,以便及时维修。

e. 异常值诊断及报警功能

系统通过测值处理、时空分析,结合巡查信息和工程运行情况,对测值异常进行分级报警,以方便防汛决策^[31]。

3.4 本章小结

应用计算机综合监控网络配合数据采集系统实现了水库信息采集自动化,有利于及时准确地做出水库防洪调度决策,为水库的办公自动化提供了一个稳定可靠的平台。该系统在水利自动化系统设计方面做了有益的尝试。

4 监测软件分析研究

莲花电站水库渗流监测系统的数据采集设备、测量仪器的选择及整个系统网络的搭建,给整个系统提供了一个可靠的平台,而人机交互最直接的是软件系统。2380系列测量与控制单元与GEONET for Windows PC软件一起,构成了野外数据采集和控制系统,为了保证仪器每次测量的数据的可靠性,我们需要开发一套弦式仪器率定软件,同时为了更好的让用户能够对水库监测的数据进行分析整理,需要开发一套适合莲花电站水库的大坝渗流监测信息系统。下面对这几套软件做一下简单的介绍。

4.1 软件开发目标

大坝安全自动化监测系统能够起到监视大坝结构实时性态、保障大坝在安全运行期内,在它本身和环境中不存在任何使其恶化或破坏的条件时,实现其本身特定的职能的作用。衡量大坝实现自身职能的能力是通过一系列指标和特征来完成的,所谓指标就是描述大坝运行性态的监测量(变形、渗流、应力等)随着时间的变化呈现特征性的数值;特征指的是有关表达大坝发生变化的特征。实现安全监测的首要问题就是及时、准确地根据这些指标和特征发现大坝运行中的异常现象,从而对其表现、发生原因和发展规律等进行认识,以进行更有效的控制。

水库大坝发生安全不正常的原因有很多,某种原因造成的后果可能在多个监测量上反映出来,或者某个监测量出现异常受到几种因素的影响。对各个监测量作多方面的综合分析才能正确判断大坝是否出现异常。

本文讨论的莲花电站水库大坝安全监测自动化系统软件,针对上述的特征及指标,力图做到有效控制前端智能测控单元采集分类监测点的实时数据,对数据进行入库保存,及时整理分析这些数据,建立模型,并且通过计算形成监控信息,帮助用户综合分析和判断大坝的运行性态,进而找出大坝运行不利的原因。

4.2 软件功能需求分析

从莲花电站水库大坝安全监测系统实际出发,顾及安全监测自动化的目标的实现,自动化系统软件应包括以下几个基本功能:

a. 数据采集控制功能

作为自动化监测系统,必须具有能够接收和控制智能测控单元(MCU)的功能。此功能应对MCU进行状态查询,对测量起始时间、测量周期,采集方式进行设置,为用户提供一个与前端监测仪器进行对话的界面环境。

b. 测值换算功能

如前所述,莲花电站水库大坝监测项目有多种,安全监测自动化系统接入的仪器有振

弦式仪器、TC-401水位传感器和差动电阻式应力应变仪。TC-401水位传感器传递的是数字信号，在传回上位机后不需要进行测值换算。而振弦式和差动电阻式仪器则不同，前者传回的是频率和温度信号，后者传回的是电阻和温度信号，尚需进行测值换算，以期获得反映水工结构性态的直观测值。

c. 在线异常值诊断处理功能

在线实时提示预警是大坝安全监测自动化系统一个很重要的功能。根据监控模型提供的监控信息，对一些变化异常的数值做出判别，是外界干扰引起的，还是大坝安全出现了异常？进行相应的处理后，必要时做出提示报替，以引起管理人员的注意。这种功能也称为在线快速校核与预警功能。

d. 数据预处理功能

经过在线异常值的诊断处理入库后的监测数据，仍有可能含有粗差，必须经过可靠性检验和统计学处理，使其成为反映水工结构性态的可靠信息。只有根据可靠的观测数据和资料，才能正确地对大坝性态做出解释和进行安全评价。也可能出现缺值或为了数据分析需要进行修匀处理操作。这些数据处理工作统称为数据预处理。

e. 模型的生成与应用

监测效应量的变化并不是独立的，与环境量的变化有一定的关系。分析其数据得出反映环境量和效应量之间最佳关系的回归函数式，作为该测点单点的监控或预报模型。本系统软件要能够生成监控或预报模型，并且随着时间的积累，能重新建立模型。用户还可以凭借自己的经验从所建立的模型中选择一个合适的监控模型，根据测得的水位等环境数据得出监测信息或对监测效应量做出趋势预报。

f. 图表分析功能

按照《土石坝安全监测资料整编规程SL 169-96》对监测数据整编的要求，本系统软件应提供绘图分析和制表功能，以辅助水库管理人员进行监测数据的直观分析。

g. 数据输入和管理功能

除了能进行自动化采集入库的观测量，还有人工观测量，为实现对所有观测项目进行统一的资料管理，系统软件应具有人工录入的接口，即数据输入功能。数据管理还包括数据浏览，数据查询等。

h. 数据输出功能

大坝安全监测信息，不论是原始资料还是计算分析成果，均可按规范格式输出到不同的外部设备上，即图形和表格信息既可输出到屏幕，也可由打印获得，以满足资料整编以及上级主管部门的各种要求。

i. 其它功能

考虑功能完整性和安全性，系统中还应包含工程信息介绍、数据远程传输、数据库备份恢复和用户管理功能等。

4.3 数据采集系统软件

2380系列测量与控制单元与GEONET for Windows PC软件一起，构成了野外数据采集和控制系统，原有的2300系统网络监控软件是基于MS-DOS操作系统的16位Geonet软件，虽然这个全菜单化的软件很方便用户使用，但是，由于MS-DOS操作系统的局限性，比如动态数据交换、与数据库软件的无缝接口、多任务、实时动态数据图形显示等高级功能还无法实现。

在Win95/NT时代，绝大多数的应用软件都是32位版本，目的就是为了发挥Win95/NT多任务操作系统的优势。目前的Geonet Suite就是一个全新的32位套件，可以最大限度地发挥2380系统的潜能。

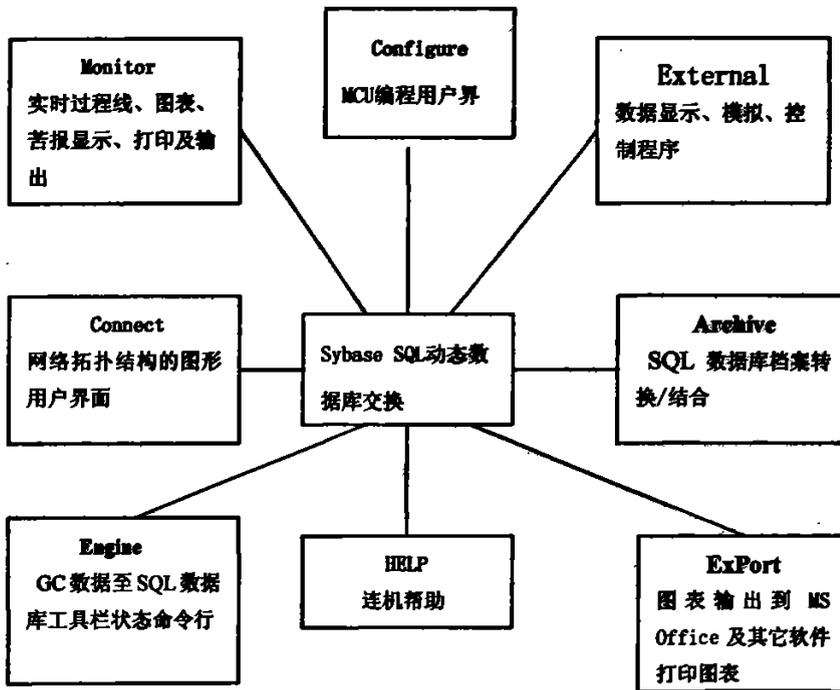


图4-1 Geonet Suit各模块及主要实现功能

Fig 4-1 Geonet Suit each module and main Achieve functional

4.4 弦式仪器率定软件

本软件系统是根据仪器率定的要求(力学性能指标, 率定原理)而开发。系统主要功能结构如图4-2。

主程序是本系统的开始点, 每次在运行时间环境下被启动。主程序文件可以包含建立项目时所必须的任何程序、窗体或查询。通常, 通过主程序文件, 可以调用程序的其它关键元素。主程序流程如图4-3所示。

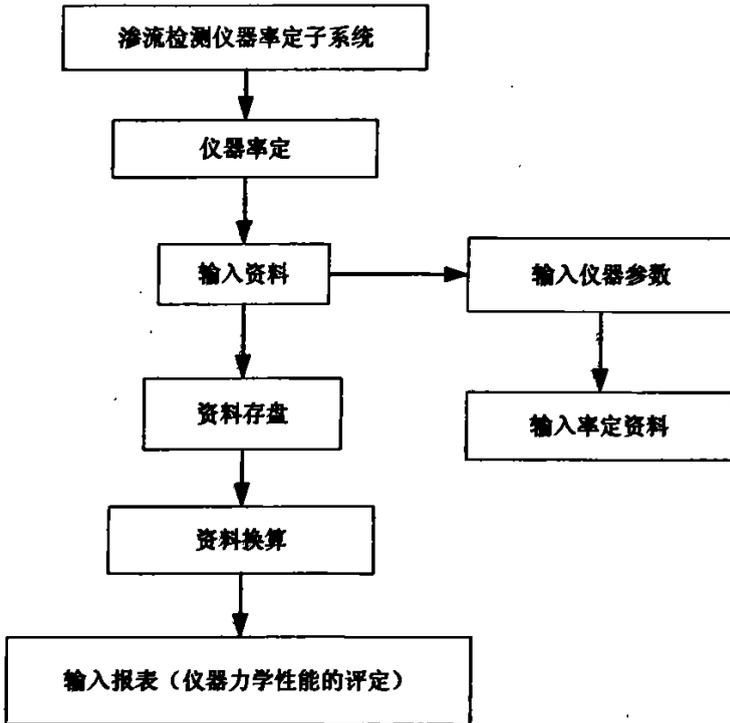


图4-2 软件系统功能结构示意图

Fig. 4-2 Software system function Structure Map

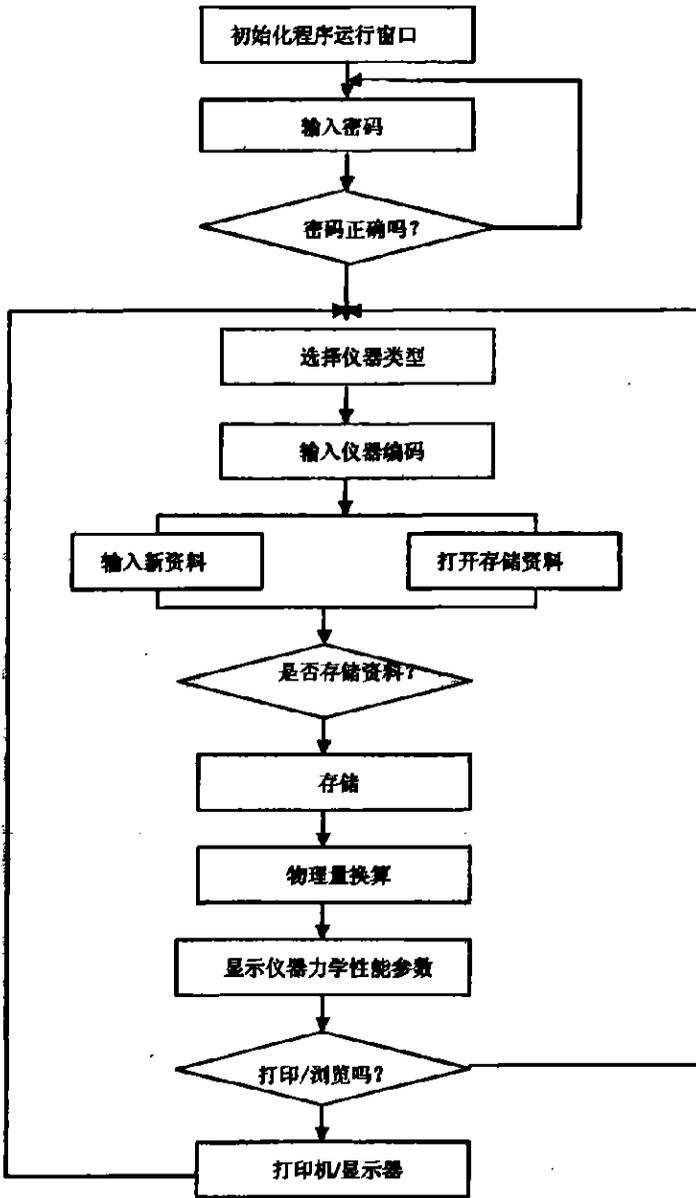


图4-3 仪器率定主程序流程图

Fig. 4-3 Main program flowchart of equipment rate

4.5 渗流监测管理系统

观测仪器埋设以后要进行资料收集, 计算和分析工作, 这一阶段的工作对于整个安全监测工程是非常重要的, 观测工作能否发挥显著效果, 关键取决于这一阶段^[22]。

根据观测要求及观测系统维护的特点需要进行以下的工作:

- ① 按照设计要求的测次对埋设仪器进行观测。

- ② 对观测成果进行计算,对观测系统进行鉴定与维护。
- ③ 对观测资料进行处理分析。
- ④ 每月月底向监测中心上交观测成果(月报及资料软盘)。

该系统主要提供给用户查询的功能。查询的实质是用户提出关于资料的问题,例如:本月都有哪些资料,哪些测量值在指定范围之内等等,然后由程序来回答这些问题,也就是检索出用户所需要的资料以供解决问题之用。

对于一个资料量相当大的信息管理系统,有一个好的查询功能是进行高效的数据管理和维护的前提。安全监测信息管理系统所要处理的资料量很大、数据项多,而且监测时期长、资料长期积累。

本系统的开发要求查询操作方便、功能强大、资料检索速度快,它可对使用的多种仪器的资料进行查询,程序通用性强,当仪器种类增加或改变时,无须修改程序即可完成查询功能。用户通过查询条件指定窗口,只需进行简单的操作即可实现时段查询、单值查询、模糊查询、组合查询等功能;通过查询结果浏览窗口,用户可以浏览检索出的资料,并对其进行修改和批量删除,还可由检索出的资料生成温度时程曲线,并可根据需要更改曲线类型(折线图、直方图、拟合曲线等),曲线和查询结果都可进行打印预览和打印。

打印是资料输出的主要方式之一,因此要设计了专门的打印模块来完成这项工作^[34]。

① 打印月报

打印月报实际是指定日期范围后检索出资料进行打印,因此也可打印年报表、日报表和时段报表。

② 打印时程曲线

此处打印的时程曲线是采用某一支仪器的测量资料,因为分析时要求采用一支仪器的资料(一支仪器对应一个观测部位),曲线类型采用折线图。

系统主要功能结构示意图如图4-4。

4.6 开发主要特点

安全监测管理系统基于Client/Server的数据库服务器—Web服务器—客户端的模式进行开发,具有以下主要特点^[34]:

①资料共享。新的系统基于Web开发,SQL Server支持数据库信息自动发布到HTML文档,同时结合US和SQL Server Internet Connector两项技术,有利于资料的网上发布和远程管理。

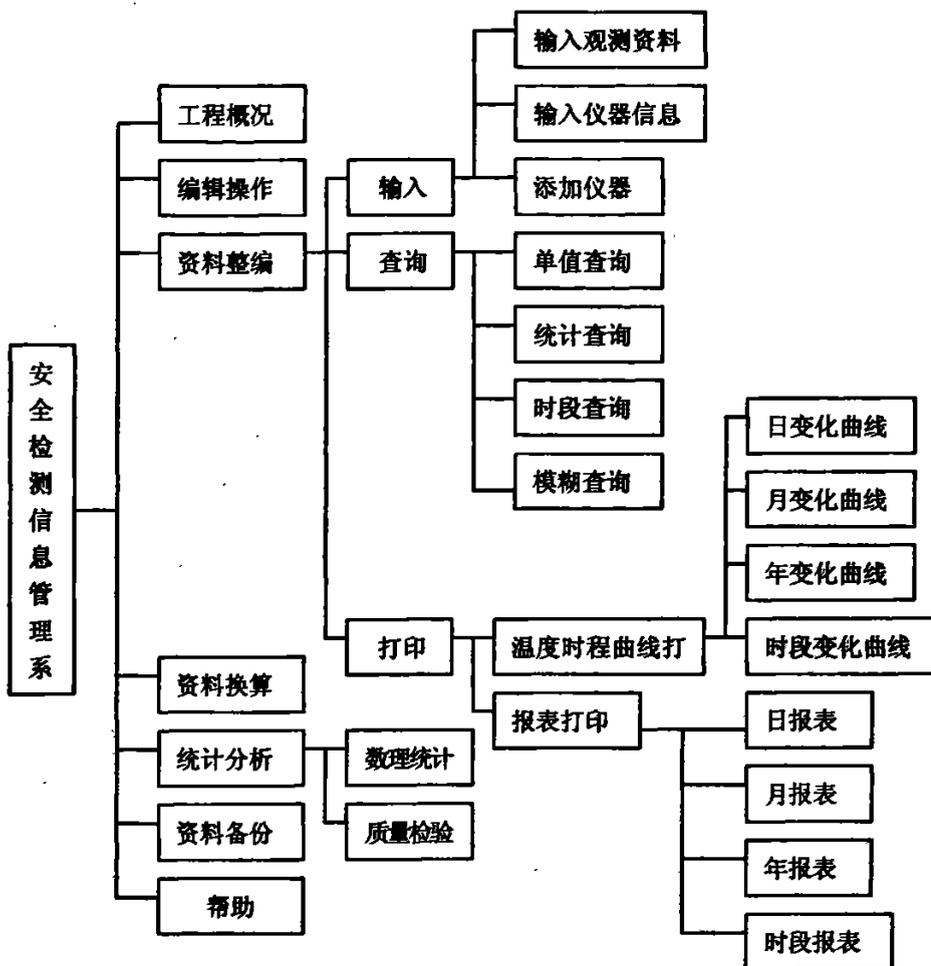


图4-4 系统主要功能结构示意图

Fig. 4-4 system main functional structure maps

②安全性高。对于任何数据库系统来说，安全性至关重要。这一系统对于不同的用户授予不同的安全级别，设置不同权限和访问页面，保证了资料不会被删除、修改、添加。

③稳定性好。采用Microsoft的SQL Server作为数据库后台，对用户对资料的访问控制性更强，自动处理错误信息，有利于系统的稳定。

④扩展性强。ASP具有无限可扩展性。可以使用Visual C++、Delphi等多种语言来编写所需要的ActiveX服务器组件。使用ActiveX控件使得开发更简单，更具有可扩充性。

5 渗流的计算机监控模拟

5.1 土坝渗流计算的任务与方法

坝身浸润线位置是校核坝体稳定的必须资料。如果坝身浸润线过高,以及在下游坝坡出渗或与坝坡间的距离小于冰冻层厚度,都会危害下游坝坡的稳定安全。承压地基坝下游剩余压力水头的大小,可用来校核覆盖层有无被顶托破坏的危险,分析坝下游浸没破坏的程度以及对工农业生产可能带来的影响。对正在运行的坝,浸润线的计算值常常可以用来与观测数据比较,分析渗流条件的变化和防渗体的运用情况。

坝体和地基各个部位的渗流坡降,应小于相应部位土体的允许值。否则将发生渗透变形破坏。需要特别注意渗流进入下游排水设施的出口部位,以及在坝体和地基内部渗流绕过或穿过弱透水体进入强透水体的所谓内部出口部位,渗流破坏常常是在出口处率先发生而向土体的深层发展。此外还需注意不同土层的接触面,天然地基中强、弱透水层的接触面等,在不同土体接触面上的允许坡降值往往比土体本身更小而起控制作用。

土坝渗流计算方法可分为流体力学解法和水力学解法两类,但广义的概念还包括图解法、数值算法以及各种试验的方法等。均质坝的稳定渗流问题,在已知边界条件的情况下,可以通过解拉普拉斯方程式求解;在非稳定渗流情况下,可近似解扩散方程式。但理论的流体力学解法仅对少数简单的情况有效,在实际工程中存在的大量具有复杂边界条件的土坝渗流问题,要用水力学解法、图解法、数值计算或试验的方法来求解^[35]。

5.2 有限单元法的渗流计算

渗流计算是在已知定解条件下解渗流基本方程,以求得渗流场水头分布和渗流量等渗流量要素,所以它是工程设计的重要内容。由于无压渗流有渗流自由面(浸润线),且非稳定渗流自由面随库水位升降而变动,加之一般渗流场有不同程度的非均质和各向异性,几何形状和边界条件较复杂,解析求解在数学上带来了不少困难,仅能对一些简单流动情况获得解析解。因此前人提出许多近似公式,但应用上仍受一定条件的制约,实际工程往往借助模拟试验求解。本世纪60年代,电子计算机的普及和数值计算方法的发展,特别是有限单元法提出后,推进了渗流数学模型的发展,为渗流计算提供了有效的方法。

有限单元法是在大型数字电子计算机的广泛应用和数值分析方法的发展基础上发展起来的。开始在结构分析中采用,随后于60年代逐渐被引用到流体力学的领域,其中最早就是引用到稳定渗流场问题,70年代初再被引用到非稳定渗流场问题。由于它对边界适应性好,精度高,能够使计算法则和程序标准化等优点,现在已日益被广泛采用,是一种求解复杂渗流问题的较好方法。

5.2.1 渗流基本方程和定解条件

有限单元法是把连续或研究区域离散化为有限个单元体的集合来进行研究的。引用变分原理或伽勒金法，对研究问题建立模型，推导近似解产生一组方程，最后归结为求解大量联立方程式的计算。因此，可以把有限单元法概括为划分单元体来模拟实物进行物理量分布上的近似，以电子计算机为工具在矩阵分析和近似计算的基础上进行所需精度的数值计算。

一般以测压管水头 h 的分布为研究对象时，作为二向渗流问题考虑(x - z 垂直剖面或 x - y 水平面)，渗流的基本微分方程式及其边界条件如下^{[36]、[41]}(见图5-1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial x} \right) - S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.1)$$

初始条件: $h(x, z, 0) = h_0(x, z)$

边界条件: 水头边界 $h|_{\Gamma_1} = h(x, z, t)$

流量边界 $K \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = -q(h, x, z, t)$

上式为考虑土体压缩的非稳定渗流运动方程，式中的 $S_s = \rho g(\alpha + n\beta)$ ，称为单位贮水量(尺度 $1/d$)，即单位体积的饱和土体，在下降1个单位水头时，由于土体压缩($g\alpha$)和水的膨胀($\rho g\beta$)所释放出来的贮存水量。这里的 α 和 β 分别为土和水的压缩系数; $\rho g = \gamma_w$ 为水的容重。

当不考虑土体的压缩性时， $S_s = 0$ ，则式(5-1)变为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (5.2)$$

若渗透系数 K_x, K_z ，式(5-2)即变为拉普拉斯方程。需要指出式(5-2)也就是稳定渗流的微分方程:当结合变动的自由面边界情况后，就可以求解非稳定渗流问题，与式(5-1)比较仅在于不考虑土体及水的压缩性。

渗流场常遇到两种边界条件。第一类边界 Γ_1 为已知边界水头值，第二类边界 Γ_2 为已知或计算出的边界流量值，结合土坝渗流情况于图5-1所示。

不透水边界属第二类的特例，即为 $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$ 。自由面(浸润线)边界，在稳定渗流时

$\frac{\partial h^*}{\partial n} = 0$ (这里用 h^* 来表示自由面上各点的水头);而在非稳定渗流，由于变化的自由面作为

流量补给边界(图5-2)，应为

$$q = \mu \frac{\partial h^*}{\partial t} \cos \theta \quad (5.3)$$

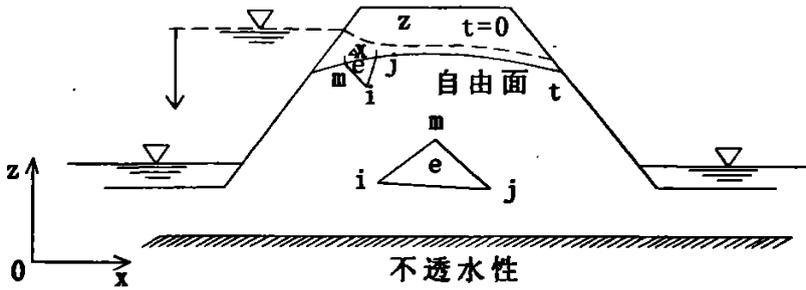


图5-1 计算土坝渗流的边界条件

Fig.5-1 Seepage calculation of the boundary conditions

式中， μ 为土体的给水度。同时，自由面上各点又必须满足水头恒等于垂直坐标高度的第一类边界条件，即

$$H^* = Z$$

5.4

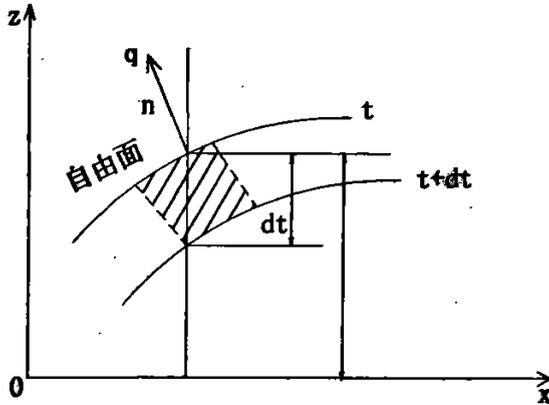


图5-2 非稳定渗流时的自由面边界

Fig.5-2 Non-steady flow of the free surface

对于上述渗流微分方程的解答，根据变分原理为求下面的泛函取极小值

$$x(h) = \iint_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2} K_x \left[\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 \right] + S_s \frac{\partial h}{\partial t} \right\} d_x d_z + \int_{\Gamma_2} q h d\tau \quad 5.5$$

上式右端的末项为第二类边界积分，经过取泛函极小值后在计算中即自动达成第二类边界条件。至于第一类边界条件，则在计算中直接赋给已知的边界水头值^[42]。

5.2.2 有限单元法插值函数

应用有限单元法求解，首先要将研究的渗流场划分成有很多个单元，常用者为三角形单元。如图5-1所示为其中任意一个三角形单元ijm，并设单元内水头函数h的分布为下面最简单的线性变化模式

$$h(x,z) = a_1 + a_2 x + a_3 z \quad 5.6$$

可以写成矩阵形式如下：

$$h = [N_i N_j N_m] \begin{Bmatrix} h_i \\ h_j \\ h_m \end{Bmatrix} = [N] \{h\}^e \quad (5.7)$$

式中: N 只是坐标 x, z 的函数, 称为形状函数, 其值为

$$N_i = (a_i + b_i x + c_i z) / 2\Delta \quad (i, j, m) \quad (5.8)$$

$$a_i = x_j z_m - x_m z_j, b_i = z_j - z_m, c_i = x_m - x_j \quad (5.9)$$

$$\Delta = \frac{1}{2}(b_i c_j - c_i b_j) \quad (5.10)$$

Δ 为三角形的面积, 为了不使面积得出负值, 三个角点 i, j, m 的次序应按逆时针方向填写。式(5-8)所描述的插值函数, 在单元三结点 i, j, m 上的值等于水头函数在三结点上的值 h_i, h_j, h_m 。在单元内部是线性的也是连续的。在单元每条边上插值函数的值等于两端点的作线性插值的结果, 即沿单元边上的水头值只与该边上结点的水头值有关。以上只是对渗流场内任一单元而言, 如果对其它单元也采用(5-8)的线性插值函数, 由此所得的线性插值函数 h 不仅在公共点上的值是相同的, 而且在公共边上也是相同的, 且是连续的, 从而单元公共边上水头函数的连续性得到确实的保证。这样, 由各单元所拼成的渗流场上的分片插值函数, 它在渗流场上就整体而言也是连续函数, 是由各结点的值 h_1, h_2, h_3 所决定^[43]。

5.2.3 有限元单元法计算公式

单元内水头函数的导数为:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_m \\ c_i & c_j & c_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_i \\ h_j \\ h_m \end{Bmatrix} \quad (5.11)$$

由式(5-7), 求其对时间的导数, 得

$$\frac{\partial h}{\partial t} = [N] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e \quad (5.12)$$

将式(5.7)、式(5.11)、式(5.12)以及式(5.3)的各值代入式(5.5)的泛函, 并分别对单元三个结点水头求泛函的微商, 经过推演可得

$$\left\{ \frac{\partial x}{\partial h} \right\}^e = [K]^T \{h\}^e + [S]^T \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e + [P]^T \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e \quad (5.13)$$

如果是流场的内部单元, 则仅有前两项的和; 只有在自由面边界上的单元才有最后一项。式中的系数矩阵为:

$$\begin{aligned}
 [K] &= \frac{K_x}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_m \\ b_i b_j & b_j b_j & b_j b_m \\ b_i b_m & b_j b_m & b_m b_m \end{bmatrix} + \frac{K_y}{4\Delta} \begin{bmatrix} c_i c_i & c_i c_j & c_i c_m \\ c_i c_j & c_j c_j & c_j c_m \\ c_i c_m & c_j c_m & c_m c_m \end{bmatrix} \\
 [S] &= \frac{S_x \Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \\
 [P] &= \frac{\mu(x_j - x_m)}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

把由式(5.13)求得各单元泛函的微商相加, 并使其等于零求极小值, 就得到整个流场的泛函对各点水头导数的方程组, 即

$$\frac{\partial x}{\partial h_i} - \sum \frac{\partial x^e}{\partial h_i} = 0 \quad (i=1,2,3,\dots,n) \tag{5.15}$$

式中, n 为结点的总数; \sum 表示对所有的单元求和。

将上面汇总的方程组写成矩阵形式, 为

$$[K]\{h\} + [S]\left\{\frac{\partial h}{\partial t}\right\} + [P]\left\{\frac{\partial h}{\partial t}\right\} + \{F\} = 0 \tag{5.16}$$

式中 $\{F\}$ 为形成总矩阵时, 由已知结点值所得的常数项的列向量。用差分表示时间项时, 则得

$$\left([K] + \frac{1}{\Delta t}[S]\right)\{h\}_t + \frac{1}{\Delta t}[P]\{h\}' - \frac{1}{\Delta t}[S]\{h\}_{t-\Delta t} - \frac{1}{\Delta t}[P]\{h\}'_{t-\Delta t} + \{F\} = 0 \tag{5.17}$$

上式就是对于一般非稳定渗流问题最后要求解的线性代数方程组。其中总的系数矩阵和常数的列向量中的典型元素, 均为对各单元的求和。对于不可压缩的稳定渗流, 矩阵 $[S]$ 、 $[P]$ 项等于零, 求解方程组变为

$$[K]\{h\} + \{F\} = 0 \tag{5.18}$$

上面均为未知结点数 n 相同数目的线代数方程组, $[K]$ 为 $n \times n$ 的方阵, $\{h\}$ 为未知结点水头列向量, $\{F\}$ 为常数列向量^[44]。

5.3 Ansys 模拟技术及工程应用

5.3.1 有限元及 Ansys 软件简介

有限元方法是用于求解工程各类问题的数值方法。应力分析中稳态的、瞬态的、线性的或非线性的问题以及热传导、流体流动和电磁学中的问题都可以应用有限元方法进行分析解决。现代有限元方法的起源可以追溯到20世纪的早期, 当时一些研究者应用离散的等

价杆拟合模态的弹性体。然而，人们公认Courant(1943)是应用有限元的第一人。Courant使用分段多边形插值法而不是三角剖分法来研究扭转问题^[53]。

在20世纪50年代，Boeing公司采用三角元对机翼进行建模，大大推动了有限元方法的应用。其他不少人接着采用了这一方法。然而，直到20世纪60年代，人们才广为接受“有限元”这一术语，Clough在这方面做了不少工作。在20世纪60年代，研究者，研究者开始将有限元方法应用到解决工程中的其他领域，例如热传导和地下渗流中的问题。

Zienkiewicz和Cheung在1967年撰写了第一本有限元的专著。1971年，首次发布T Ansys。

Ansys软件是集结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件，可广泛用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等一般工业及科学研究。Ansys是这些领域进行国际国内分析设计技术交流的主要分析平台。

自1970年美国匹兹堡大学力学系教授John Swanson博士开发出Ansys以来，在30多年的发展过程中，Ansys不断改进提高，功能不断增强，目前已发展到8.0版本。

Ansys软件主要包括三个部分：前处理模块、分析计算模块和后处理模块。前处理模块为用户提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型，软件提供了100种以上的单元类型，用来模拟工程中的各种结构和材料。分析计算模块包括结构分析(可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析)、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力。后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出^[45]。

5.3.2 Ansys 软件的基本功能

a. 结构静力分析

用来求解稳态外载荷引起的系统或部件的位移、应变、应力和力。

b. 结构动力学分析

结构动力学分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。可以进行瞬态动力学分析、模态分析、谐波响应分析及随机振动响应分析。

c. 结构非线性分析

Ansys可以求解静态和瞬态非线性问题，包括材料非线性、几何非线性和单元非线性三种。几何非线性分析主要包括大变形、大应变、应力强化、旋转软化、非线性屈曲等问题的分析。材料非线性是指结构具有非线性的应力-应变关系。影响材料应力-应变关系的因素很多，如加载历史、加载时间、环境温度等。Ansys可以处理的非线性问题包括弹塑性材料分析、超弹性材料分析、非金属材料分析和蠕变材料分析等。单元非线性主要指钢筋混凝土单元、非线性联接单元、材料高度非线性单元、特殊非线性单元等。

d. 运动学分析

Ansys程序可以分析大型三维柔体运动。当运动的积累影响起主要作用时,可使用这些功能分析复杂结构在空间中的运动特性,并确定结构中由此产生的应力、应变和变形。

e. 热分析

热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其它热物理参数,如热量的获取或损失、热梯度、热流密度(热能量)等。Ansys热分析包括热传导、热对流及热辐射三种热传递方式。此外,还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。

f. 电磁分析

Ansys程序的电磁能力主要用来分析电磁场的多方面的问题,如电感、电容、磁能量密度、涡流、电场分布、磁力线分布、力、运动效应、电路和能量损失等。还可以用于螺线管、调节器、发电机、变换器、磁体、加速器、电解槽及无损检测装置等的设计和分析领域。

g. 流体动力学分析

Ansys流体单元能进行流体动力学分析,分析类型可以为瞬态或稳态。分析结果可以是每个结点的压力和通过每个单元的流率,并且可以利用后处理功能产生压力、流率和温度分布的图形显示。另外,还可以使用三维表面效应单元和热-流管单元模拟结构的流体绕流并包括对流换热效应。

h. 声场分析

Ansys程序的声学功能用来研究含流体的介质中声波的传播,或分析浸在流体中的固体结构的动态特性。这些功能可用来确定音响话筒的频率响应,研究音乐大厅的声场强度分布,或预测对振动船体的阻尼效应。

i. 压电分析

用于分析二维或三维结构对AC(交流)、DC(直流)或任意随时间变化的电流或机械载荷的响应。这种分析类型可用于换热器、振荡器、谐振器、麦克风等部件及其它电子设备的结构动态性能分析。可进行四种类型的分析:静态分析、模态分析、谐波响应分析、瞬态响应分析。

5.3.3 Ansys 参数化设计语言

Ansys参数化设计语言(APDL,Ansys Parametric Design Language)是一种解释性语言,可用来自动完成一些通用性强的任务,也可用于根据参数来建立模型。APDL还包括其它许多特性,诸如重复某条命令,宏,if-then-else分支,do循环,标量、向量及矩阵操作等,用这些特性,用户可以创建一控制方案,使程序在特定的应用范围内发挥最大效率。APDL不仅是设计优化和自适应网格划分等经典特性的实现基础,而且它也为日常分析提供了很多便利。

5.3.4 生死单元技术

单元的生死是指分析过程中模型中的某些单元可以变得存在或消失。如果模型中加入(或删除)材料,模型中相应的单元就“存在”(或消失)。单元生死选项就用于在这种情况下杀死或重新激活选择的单元。利用单元生死选项可以使单元生或死,来模拟实际工程问题,如采矿、开挖隧道、桥梁施工,另外一些用户可以根据单元位置来方便的激活和不激活它们的一些应用中。

单元生死功能只适用于ANSYS Multiphysics, ANSYS Mechanical和ANSYS Structural产品。可用的单元类型在表5-1中列出。

表5-1 可用于单元生死的单元

Table 5-1 element can be used birth or death element

LINK1	SURF19	SHELL41	SOLID64	PLANE83	SHELL143
PLANE2	PIPE20	PLANE42	SOLID65	SOLID87	SURF151
BEAM3	MASS21	SHELL43	PLANE67	SOLID90	SURF152
BEAM4	SURF22	BEAM44	LINK68	SOLID92	SURF153
SOLIDS	BEAM23	SOLID45	SOLID69	SHELL93	SURF154
LINK8	BEAM24	PLANE53	SOLID70	SOLID95	SHELL157
LINK10	PLANE25	BEAM54	MASS71	SOLID96	TARGE169
LINK11	MATRIX27	PLANE55	SOLID72	SOLID97	TARGE170
PLANE13	LINK31	SHELL57	SOLID73	SOLID98	CONTA171
COMBIN14	LINK32	PIPE59	PLANE75	SHELL99	CONTA172
PIPE16	LINK33	PIPE60	PLANE77	PLANE121	CONTA173
PIPE17	LINK34	SOLID62	PLANE78	SOLID122	CONTA174
PIPE18	PLANE35	SHELL63	PLANE82	SOLID123	

在分析过程中,单元的生死状态可以直接指定,也可以根据Ansys的计算结果决定,如温度、应力或应变等。可以用ETABLE命令和ESEL命令来确定选择的单元的相关数据,改变单元的生死状态。这样可以模拟实际工程中的熔化、凝固和断裂等问题。

要激活“单元死”的效果,ANSYS程序并不是将“杀死”的单元从模型中删除,而是将其刚度(或传导,或其他分析特性)矩阵乘以一个很小的因子[ESTIF]。因子缺省值为1.0E-6,可以赋为其它数值。死单元的单元载荷将为0,从而不对载荷向量生效(但仍然在单元载荷的列表中出现)。同样,死单元的质量,阻尼,比热和其他类似效果也设为0值。死单元的质量和能量将不包括在模型求解结果中。单元的应变在“杀死”的同时也将设为0。

与上面的过程相似,如果单元“出生”,并不是将其加到模型中,而是重新激活它们。

用户必须在前处理中生成所有单元,包括后面要被激活的单元。在求解器中不能生成新的单元。要“加入”一个单元,先杀死它,然后在合适的载荷步中重新激活它。

当一个单元被重新激活时,其刚度、质量和单元载荷等将恢复其原始的数值。重新激活的单元没有应变记录(也无热量存储等)。但是,以实常数形式定义的初始应变,则不受单元生死选项的影响。而且,除非是打开了大变形选项[NLGEOM,ON],一些单元类型将以它们以前的几何特性恢复(大变形效果有时用来得到合理的结果)。如果其承受热量体载荷,单元在被激活后第一个求解过程中同样可以有热应变(等于*(T-TREF))。

在大多数静态和非线性瞬态分析中,都可以使用单元死活行为,与其他分析一样,分析过程包括建模、加载并求解和查看结果3个主要步骤。在前处理中创建所有单元,包括那些在开始“死掉”,在以后的荷载步中被激活的单元。不能在求解过程中创建新的单元。在加载和求解过程中首先指定分析类型,定义第一个荷载步,如果在结构分析中应激活大变形效应[NLGEOM,ON],使用单元生死选项时,应设置牛顿-拉夫森选项[NROPT,FULL],因为程序不能预知EKILL命令出现在后面的荷载步中。对包含单元生死的分析进行后处理时,方法基本按标准的后处理方法。需要指出的是,“死”的单元仍保持在模型中,在图形显示和列表输出时仍包括“死”的单元。在使用PLNSOL命令显示结点平均结果时,“死”的单元将会“污染”结果。在后处理时,通过使用ESEL命令移走“死”的单元。

在第一个荷载步中,用户必须选择分析类型和所有的分析选项,可以用ANTYPE命令指定分析类型对于所有单元生死应用,在第一个荷载步中应设置牛顿-拉夫森选项,因为程序不能预知EKILL命令出现在后面的荷载步中。单元在荷载步的第一个子步被杀死(或激活),然后在整个荷载步中保持该状态。要注意保证使用缺省的矩阵缩减因子不会引起一些问题。有些情况下要考虑用严格的缩减因子。用ESTIF指定缩减因子数值。

不与任何激活的单元相连的结点将“漂移”,或具有浮动的自由度数值。在一些情况下,用户可能想约束不被激活的自由度[D,CP等]以减少要求解的方程的数目,并防止出现位置错误。约束非激活自由度,在重新激活的单元要有特定的(或温度等)时很有影响,因为在重新激活单元时要删除这些人造的约束。同时要删除非激活自由度的结点载荷(也就是不与任意激活的单元相连的结点)。同样,用户必须在重新激活在自由度上施加新的结点载荷^[58]。

下面是第一个荷载步中命令输入示例:

!第一个荷载步

TIME ,...	!设定时间值(静力分析选项)
NLGEOM,ON	!打开大位移效果
NROPT,FULL	!设定牛顿-拉夫森选项
ESTIF ,...	!设定非缺省缩减因子(可选)
ESEL ,...	!选择在本荷载步中将不激活的单元

EKILL, ,... !不激活选择的单元
ESEL,S,LIVE !选择所有活动单元
NSLE,S !选择所有活动结点
NSEL,INVE !选择所有非活动结点(不与活动单元相连的结点)
D,ALL ,ALL,0 !约束所有不活动的结点自由度(可选)
NSEL ,ALL ! 选择所有结点
ESEL, ALL ! 选择所有单元
D,... !施加合适的约束
F,... !施加合适的活动结点自由度载荷
SF, ... !施加合适的单元载荷
BF, ... !施加合适的体载荷
SAVE
SOLVE

在后继载荷步中,用户可以随意杀死[EKILL]或重新激活[EALIVE]单元。象上面提到的,要正确的施加和删除约束和结点载荷。

!第二个(或后继)载荷步:

TIME ,...
ESEL ,...
EKILL,... !杀死选择的单元
ESEL ,...
EALIV E,... !重新激活选择的单元
...
FDELE,... !删除不活动自由度的结点载荷
D, ... !约束不活动自由度
...
F, ... !在活动自由度上施加合适的结点载荷
DDELE... !删除重新激活的自由度上的约束
SAVE
SOLVE

可以参阅TIME、NLGEOM、NROPT、ESTIF、ESEL、EKILL、NSLE、NSEL、D、F、SF和BF命令得到更详细的解释。

在许多时候,我们不清楚要杀死或重新激活单元的确切位置。例如,用户要在热分析中“杀死”熔融的单元(在模型中移去溶化的材料),事先不会知道这些单元的位置:用户必须根据ANSYS计算出的温度确定这些单元。当决定杀死或重新激活单元依靠ANSYS计算结果时(如温度,应力,应变等),用户可以使用命令识别并选择关键单元。

可以通过[*GET,Par,ELEM,n,ATTR,LIVE]一个参数值来指示单元生死状态。该参数可以用于APDL逻辑分支(*IF等),或其他要控制单元生死的应用场合中。

用户可能想通过改变材料特性来杀死或重新激活单元[MPCHG]。但是,在这个过程中要特别小心。软件保护系统和限制使得“杀死”的单元在求解器中改变材料特性时将不生效。(单元集中载荷不能自动删除;应变,质量,比热等也不能删除。)不当的使用MPCHG命令将带来许多问题。例如,如果将单元的刚度缩减到近于0,而保留其质量,在有加速度和惯性载荷的问题中将产生奇异性。

一个MPCHG的应用是在建立模型时涉及“出生”单元的应变历程的情况下。使用MPCHG可以得到单元在变形的结点构造中的初始应变。

在单元生死中不能用多载荷步求解[LSWRITE],因为不激活或重新激活的单元状态将不写入载荷步文件中。有多个载荷步的生死单元分析应该用一系列的SOLVE命令来做。

5.4 计算机模拟

5.4.1 计算原理分析

用于ANSYS程序的温度场分析的控制方程可以写成:

$$\rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \bar{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (5.19)$$

定解条件为:

$$\begin{cases} T = T_0, & T \in T_r \\ \{q\}^T \{n\} = -q_0, & T \in T_q \end{cases} \quad (5.20)$$

式中, T 为温度; ρ 为介质密度; \bar{q} 为单位体积热生成率; c 为比热; K_x, K_y, K_z 分别为介质三向热传导率; $\{q\}$ 为热流速度向量; $\{V\}$ 为热质量传输速度向量。若以渗流总水头函数 h 代替上式中 T , 三向渗透系数 K_x, K_y, K_z 代替热传导率, 并令 $\{V\}$ 、 \bar{q} 与 c 为零, 则上式将简化为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] = 0 \quad (5.21)$$

若作为二向热传导问题考虑(x - z 垂直剖面或 x -水平面), 热传导的基本微分方程则为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] = 0 \quad (5.22)$$

与二向渗流的基本方程(5.2)比较, 两方程相同。

由上述分析可见, 土体渗流问题是温度场问题的特殊形式, 只需要将温度场介质换成土体介质、热传导系数换成渗透系数、温度换成渗流水头、热流速度换成渗流速度, 同时取比热、热质量传输速度与内部热生成为零, 边界条件相应地变为已知水头分布及渗流速

度,就可以采用ANSYS软件中温度场分析功能进行渗流场的分析计算了。对于有压渗流场如地基渗流问题的计算,只要进行如上代换并给定相应边界条件即可进行分析。

5.4.2 软件应用方法

土坝渗流有自由水面存在,浸润面以下为饱和土,其渗透系数一般为常数,浸润线边界条件的法向渗流速度为零,而在浸润面以上,渗透系数是含水量的函数,一般可设为0,即浸润线以上部分不应参与计算。由于浸润线的位置是未知的,所以在ANSYS中,仅仅简单的在上下游设置水头,解决不了具有浸润面的渗流问题。要计算土坝的渗流问题,必须首先计算浸润线。为此,采用迭代算法,先任意假设浸润线的位置和渗流出坡点,然后按假设给定边界条件进行渗流计算,根据计算结果调整浸润线的位置,反复试算调整,直到两次计算浸润线差值小于给定的误差限。若按常规有限元计算方法,往往需要反复网格划分;并根据计算结果调整单元死活,相应修正边界条件后重新计算直到达到计算精度。具体步骤如下所示^[46]:

① 首先假设浸润线上线下的土体渗透系数一样,求出各点的总水头。

② 比较各单元节点的Z坐标值与总水头值,如果总水头值小于坐标值,说明该点于浸润线以上,杀死该单元。找出所有浸润线以上的单元,将其杀死。

③ 重新分析渗流。

④ 重复2、3步骤,直至各点的水头变化很小。迭代计算中,有可能需要激活已杀死的单元。

由于这种“死活”单元技术的基本对象是单元,因此,若希望足够精度和足够光滑的浸润线,网格划分必须足够密,或者采用ANSYS的网格自适应功能在浸润线附近以及水头变化较大区域进行局部网格加密。

由计算步骤来看,分析将需要反复进行大量重复操作,包括验证单元是否高于浸润线、激活或杀死单元、施加相应边界条件等,若全部采用人机交互进行,工作量很大。只有采用ANSYS提供的APDL语言将模型参数化,才能使问题得以简化。

下图5-3为一均质矩形土坝,求在上下游固定水位条件下的稳定渗流问题。

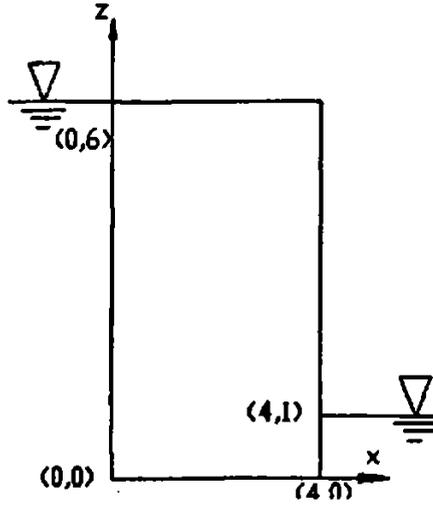


图 5-3 矩形土坝横断面示意图

Fig. 5-3 Earth rectangular cross-sectional maps

下面将用 ANSYS 的温度场来模拟大坝渗流的问题。首先建立模型，并划分网格如下所示。

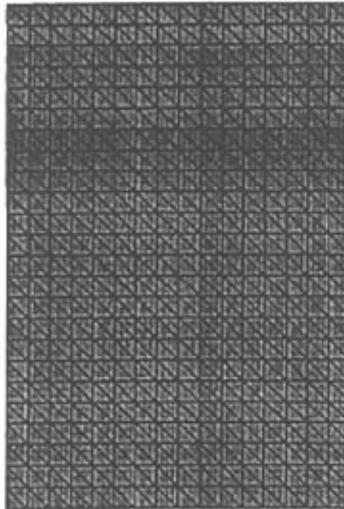


图 5-4 单元网格的划分

Fig. 5-4 Mesh division

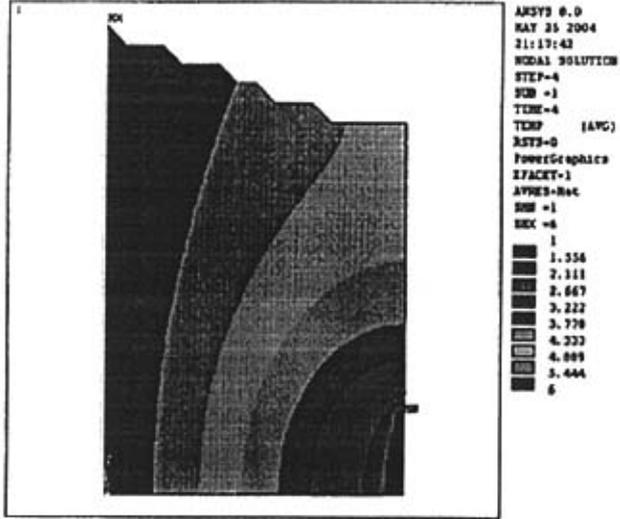


图 5-5 渗流水头分布图
Fig. 5-5 Seepage distribution head

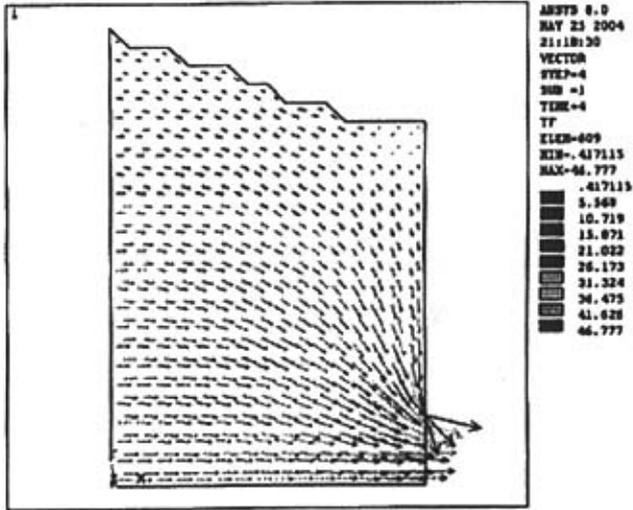


图 5-6 渗流速度分布图
Fig.5-6 Flow velocity distribution

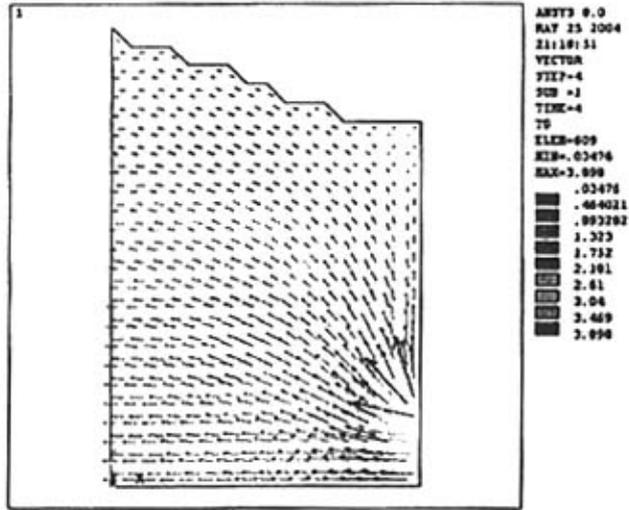


图 5-7 渗流梯度分布图

Fig.5-7 Flow Gradient map distribution

计算矩形土坝横断面的 APDL 程序如下^[47]:

```

Fini
/clear
/prep7
Et,1,plane35 !定义单元类型
Mp,kxx,1,12 !渗透系数
! 定义关键点
K,1,0,0
K,2,4,0
K,3,4,6
K,4,0,6
!由关键点生成线
lstr,1,2
lstr,2,3
lstr,3,4
lstr,4,1
!生成面
al,1,2,3,4
    
```

```
!划分网格
lesize,4,,,24
lesize,1,,,16
mshape,1,2D !采用三角形单元
mshkey,1 !利用 Map 方式划分网格
amesh,all
NROPT,Full !设定牛顿-拉弗森选项
OUTPR,BASIC,All

/solu !求解
Antype,0
Nsel,s,loc,x,0 !选择左边线的所有节点
D,all,Temp,6 !施加水头 6
    nsel,s,loc,x,4 !选择右边线 1m 高内所有节点
nsel,r,loc,y,0,1
D,all,Temp,1

allsel
Solve
!参数赋值
*Get,nnod,NODE,0,count !参数 nnod 为结点总数
*Get,nelm,Elem,0,count !参数 nelm 为结点总数
*Get,nd,NODE,0,Num,Min !参数 nd 为结点最小标号
*Get,el, Elem,0,Num,Min !参数 el 为单元最小标号

*Dim,nody,array,nnod !定义结点 Y 坐标的数组
*Dim,Ntemp,array,nnod !定义结点温度数组

*do,ii,3,1 !ii 为计算循环次数
! 参数数组赋值
! 迭代计算
np=nd
```

```

*Do,i,1,nnod,1
    nody(i)=NY(np)      !给结点坐标组赋值
    Ntemp(i)=Temp(np)  !给结点温度数组赋值
    Np=NDNext(np)
*Enddo

! 判断生死单元
Ep=el
*Do,i,1,nelm,1
Flag='live'
    Do,j,1,6,1
        p=Nelem(ep,j)
        nt=Ntemp(p)
        nn=Nody(p)
        *If,nt,lt,nn,then
            Flag='kill'
        *Endif
    *Enddo
    *If,flag,EQ,'kill'then
        ckill,i
    *Elseif,flag,EQ,'live'
        calive,i
    Endif
    ep=Elnext(ep)
*Enddo

allsel
Solve
iii=ii+1
*Enddo

/post1
esel,s,live
plnsol,temp

```

5.5 本章小结

上述计算结果表明,采用Ansys温度场分析功能进行土坝渗流计算是可行有效的。死活单元技术能够解决浸润线位置计算问题,采用APDL参数化建模能够简化建模与分析,从而为工程应用提供了有效的解决方案。Ansys强大的前后处理功能能够为工程应用提供极大的便利,能够解决复杂边界、多种介质的复杂渗流问题。

6 莲花大坝渗流观测数据分析

渗流观测包括大坝坝基渗透压力、总渗流量、绕坝渗流（地下水位）以及二坝渗流量和浸润线（测压管）和绕坝渗流监测。

6.1 渗透压力

原设计在 0+170m 断面上游坝脚处布置了 4 支钢弦式水压力仪，目前虽已全部损坏，但从以前的监测到的部分资料，可以分析前期大坝帷幕的防渗效果，再结合渗流量变化情况，判断目前的渗流状况。

水库蓄水前，各测点渗透压力变化平缓，蓄水时压力随库水位的上升而升高，当库水位升到一定的高度，其压力变化不再继续增大。实测到 P1 最大渗透压仅为 0.11MPa，相当于 11m 的水柱。由此可见，前期大坝基础防渗效果良好。

6.2 渗流量

6.2.1 大坝渗流量

大坝渗流量设施是利用坝下游原有施工围堰，用高压定喷灌方法形成一道地下防渗墙来拦截大坝坝基的渗水，然后将渗水量汇集在一起，通过桩号 0+265m 处设置的三角形量水堰，量测大坝的总渗流量。

大坝渗流量从 1999 年观测以来至 2003 年，至今有 5 年的资料，极值统计见表 6-1。由表可见：

(1) 大坝最大渗流量为 15.84L/s，出现在 2000 年 12 月 31 日，最小值为 0.004L/s，出现在 1999 年 9 月 19 日，最大年变幅为 13.96L/s。

(2) 对照库水位过程线，可发现大坝渗流量与库水位相关密切，库水位升高，渗流量增大，库水位下降，渗流量减少。

(3) 渗流量不仅与库水位有关，而且与季节温度也有关。一般冬季渗流量比夏季渗流量大，典型的是统计表中最大值几乎都出现在最冷的冬季，并不是库水位最高时期，如 2000 年 12 月 31 日出现的最大值，前几天降雨量也不大，即使在发生较大降雨量的当天或后几天，渗流量增大相当有限，说明降雨量对其影响也不大。温度变化影响表现为面板裂缝与温度有关，在冬季面板裂缝张开，其渗流量就大，随着温度的升高，面板裂缝闭合，渗流量就减小。

(4) 从发展趋势看，与观测初期相比，后期渗流量略有增大，但其总体不大，如从 2000 年 1 月起却略有下降的趋势，目前已呈稳定状态。

表 6-1 大坝、二坝渗流极值统计表

Table 6-1 the dam and the second dam extreme tables seepage

测孔编号	最大值			最小值			最大年变幅	
	库水位 (m)	流量 (L/s)	日期 (年-月-日)	库水位(m)	流量 (L/s)	日期 (年-月-日)	变幅 (m)	年份
大坝渗流量	213.12	15.840	2000-12-31	214.66	0.004	1999-9-19	13.959	2001
二坝渗流量	217.27	1.046	2000-8-16	211.84	0.000	2000-2-27	1.046	2000

6.2.2 二坝渗流量

a. 坝体

二坝利用下游坝脚处的滤水坝趾作为排水沟，在其下游桩号 1+052m 处滤水坝址向下游突出部位设置一个三角形量水堰，来监测坝体的渗流量。

二坝渗流量极值统计见表 6-1。由图表可见：

①二坝渗流量不大，最大仅为 1.046L/s，出现在 2000 年 8 月 16 日，对应库水位 217.27m。

②对照库水位过程线，与库水位变化密切相关。库水位高，渗流量大；库水位低，渗流量小，甚至为零。量水堰顶断流的时间一年中约有半年，最近每年年初就断流，到 6 月~7 月初又出现流量，并随库水位的上升而快速增加，在 9~10 月一般流量达到最大，之后随库水位下降而急剧下降至断流。可见，二坝渗流通道在相对高的部位，估计与绕坝渗流及地下水位（降雨量）有一定的关系。

③渗流量与气温变化相关不显著。从过程线看，没有明显的对应关系。

④从发展趋势看，渗流稳定，并略呈减小的趋势。

b. 坝基

二坝坝基渗流量通过埋设在下游河床中的测压管来测定。测压管顺水流方向布置两根，间距为 20m；垂直水流方向布置六排，间距为 40m。根据测压管测值计算出地下水坡降，然后再根据坝基河床的过水面积及透水层的渗透系数计算出渗流量。由于没有土体的渗透系数，且观测资料的不全面，故仅进行定性分析。二坝测压管水位过程线见图 6-2。

从过程线上可见，各测压管水位稳定，受库水位变化影响很小，与库水位相关不明显。在大降雨的当天或后一两天，部分测孔水位略有抬高，表明在一定程度上受降雨的影响，从趋势看，没有明显的时效量。

表 6-2 二坝坝后测压管水位均值统计表

Table 6-2 the second dam piezometer water tables mean

测点号	A1	A2	A3	A4	A5	A6
桩号(m)	0+968	1+000	1+040	1+080	1+120	1+153
距坝中心 线距离(m)	71	92	100	85	75	64
平均值(m)	197.51	186.40	186.01	187.75	193.78	196.74
测点号	B1	B2	B3	B4	B5	B6
桩号(m)	0+968	1+000	1+041	1+080	1+120	1+151
距坝中心 线距离(m)	103	109	120	105	96	84.6
平均值(m)	191.81	184.10	184.84	187.39	190.18	196.96
(A _i -B _i)平均	5.70	2.30	1.17	0.36	3.60	-0.22

同断面的两个点比较,水头差不大,0+968m断面的水头差最大,平均也仅为5.7m,该两孔位于两坝之间的山包,带有观测地下水性质,不致于水头差太大而使下游土体失稳。其余位于二坝下游的两断面平均水头差也仅有3.6m,远小于下游坝基土体抗剪强度,不致于遭受破坏而失稳^[48]。

6.2.3 回归计算

通过对大坝总渗流量和二坝坝体渗流量建立数学模型逐步回归计算可以扣除降雨影响。其数学模型可利用前章所建立的形式,计算基准时间为1996年1月1日,取显著水平为0.05。

a. 大坝

通过逐步回归计算将成果列于表6-3和表6-4。从表中可见,温度影响最大,其变幅为10.2 L/s,所占总量比例38.5%,其次是库水位的影响,变幅为9.65 L/s,占总量的36.4%。降雨量影响较小,变幅为3.71 L/s,所占比例为14.0%,并滞后天数约为7天。2000年后渗流量呈下降的趋势。

扣除降雨影响后,大坝2000年12月31日实测最大渗流约15.80 L/s,多年平均流量为7.27 L/s。比较国内外部分已建面板堆石坝(见表6-5),其渗流量比国内大坝普遍小,与国外著名大坝相比,也是不大的。

b. 二坝

从表6-3和表6-4可见,温度对二坝影响不显著,以致在回归中温度因子不能入选。

水压分量变幅为 0.82 L/s,占总渗量比例 48.1%, 降雨量分量变幅为 0.27L/s, 占总量的 15.8%, 滞后天数约为 7 天。从趋势看, 渗流量呈下降的趋势。

扣除降雨影响后,二坝最大渗流约 1.0L/s, 多年平均流量为 0.22L/s。与国内外同类坝相比, 其渗流量很小。

表 6-3 大坝、二坝渗流量逐步回归方程一览表

Table 6-3 the dam and the second dam Seepage list stepwise regression equation

测点	回归方程	复相关系数	标准差 (L/s)	F
大坝	$-0.4224329 + 0.82274[Hu7] + 9.899765E-03[t] - 24.62989[Ln(1+t)] - 0.224647[T60] + 0.3744444[P15]$	0.83	1.72	172
二坝	$-13.93474 + 0.0695238[Hu7] - 3.802385E-04[t] + 2.709326E-02[P15]$	0.80	0.16	247

表 6-4 大坝、二坝渗流量统计分析解析成果一览表

Table 6-4 the dam and the second dam Seepage Analytical results from statistical analysis seepage

测孔号	水压分量(L/s)			时效分量(L/s)			降雨分量 (L/s)		
	最大值	最小值	变幅	最大值	最小值	变幅	最大值	最小值	变幅
大坝	2.95	-6.70	9.65	0.00	-2.93	2.93	3.48	-0.23	3.71
二坝	0.42	-0.40	0.82	0	-0.61	0.61	0.19	-0.08	0.27
测孔号	温度分量 (L/s)			各分量所占比例(%)					
	最大值	最小值	变幅	水压	时效	降雨量	温度		
大坝	2.81	-7.39	10.20	36.4	11.1	14.0	38.5		
二坝	0	0	0	48.1	36.1	15.8	0		

表 6-5 国内外部分已建面板坝渗流量统计表

Table 6-5 CFRD seepage has been built at home and abroad part of the TAB

坝名	坝高(m)	(初期)最大漏水量	稳定(或多年平均)
		(L/s)	漏水量(L/s)
莲花大坝	71.8	15.8	7.27
天生桥一级	178	167	88
Aguamipa (阿瓜密尔帕)	180	260	80-50
ARcia (阿里亚)	160	236	60
Salvajina (萨尔瓦欣那)	148	60	23
SegRedo (塞格雷多)	145	400	50-100
Xingo (辛戈)	145	210	80
Anchicaya (安契卡亚)	140	1800	154
Khao Laem (高兰)	130	55	28
Golilas (格里拉斯)	125	1800	650
ShaRoRo (谢罗罗)	130	1800	100
Cethena (塞沙纳)	110	45-35	7
关门山	58.5	16	5
成屏	75	70	10
广蓄上库	68	1.3	0.9
白溪	124.4	6~7	3~4
小山坝	87	230	

6.3 绕坝渗流

地下水位孔的水位过程线见图 6-3。极值统计见表 6-6。计算成果表见表 6-7~表 6-8。

6.3.1 右岸

右坝肩 7 个水位观测孔中 W1 位于坝中心线上游面，孔口高程 282.35m，其测孔水位最高，其最大值为 217.38m，平均 213.86m。由过程线可见，随库水位波动而波动，但比库水位相对稳定，当库水位低时，高于库水位，当库水位高时，低于库水位，说明受库水影响外，还受地下水影响较大。其余测孔均位于坝中心线下游面，W2、W3 在坝中心线下游 60m，它们最高值分别为 184.58m、180.76m，平均水位分别为 182.56m、174.76m，由于 W2 地势比 W3 高，其水位也比 W3 高，从图上可见，W2 主要受地下水作用，在降

雨集中的季节,其水位较高,与库水位相关不显著,W3水位稳定,与库水位和降雨关系均不大。其余的几个测孔,W4、W5、W6、W7与库水位关系均不大,而与测孔所处的地势有关,由地下水位而决定其测孔水位的高低,W4位置相对高,其最高水位为169.95m,平均166.78m;其次W5,最高水位为165.55m,平均164.35m;W6最低,其最高水位仅为163.90m,平均为160.68m。

综观右岸各孔水位情况,右岸坝后测孔水位与库水位相关不显著,地下水位稳定,绕坝渗流不明显。从趋势看,W4测孔水位孔水位略呈上升趋势,目前已基本稳定,其余趋势性不明显或呈下降的趋势。

表 6-6 绕坝渗流孔水位极值统计表
Table 6-6 Extreme water seepage around the hole TAB

测孔号	位置		最大值		最小值		最大年变幅		备注
	管口高程(m)	距坝轴线距离(m)	测值(m)	日期(年-月-日)	测值(m)	日期(年-月-日)	变幅(m)	年份	
W1	282.35	-20	217.38	2001-10-24	210.45	2001-6-27	6.93	2001	大坝右岸
W2	229.62	60	184.58	1999-6-23	179.88	2001-5-16	4.24	2001	
W3	209.76	60	180.76	1999-8-4	173.84	2001-5-16	1.20	2001	
W4	174.69	116	169.95	2001-8-2	162.50	1999-6-23	4.81	2001	
W5	174.21	90	165.55	2001-8-15	163.19	2001-10-14	2.36	2001	
W6	174.46	130	163.90	1999-8-15	159.92	2001-6-27	1.00	1999	
W7	174.54	180	164.38	2001-7-29	162.47	2001-4-18	1.91	2001	
W8	209.40	70	192.07	1998-10-14	180.60	1997-4-18	8.85	1997	两坝之间
W9	222.57	50	199.54	1998-9-28	184.27	1997-4-18	11.62	1997	
W10	208.52	60	202.12	1999-6-23	179.64	1996-11-15	11.44	1997	二坝左岸
W11		100	200.62	1998-9-28	188.96	1997-5-24	7.58	1997	
W12	215.13	40	204.72	1999-6-23	189.25	1996-11-15	10.36	1997	
W13	210.22	74	206.71	1998-11-15	182.97	1996-11-15	8.41	1997	
W14	208.04	120	206.64	2001-11-4	179.18	1996-11-15	9.62	2002	
W15	243.96	-10	209.04	1998-11-15	192.66	2001-6-10	11.72	1997	
W16	227.87	40	205.94	1998-9-28	169.61	1997-8-12	28.95	1997	
W17	221.81	80	202.14	1998-9-7	185.22	1997-6-7	12.87	1998	
W18	222.75	120	194.64	1998-9-7	184.77	1996-11-15	5.82	1998	

注：距坝轴线距离为负，则为在其上游面

6.3.2 两坝之间

在大坝与二坝之间布置两个绕坝渗流孔，W8 位于主坝坝下 70m，桩号 0+852.0m，最高水位为 192.07m，多年平均 188.02m，从过程线上可见，随库水位变化而波动，库水位上升，测孔水位也升高，库水位下降，测孔水位降低。W9 位于两坝之间的下游山包，距主坝中心线下游 50m，桩号 0+908m，最高水位为 199.54m，多年平均为 194.32m，此孔水位与 W8 类似，与库水位相关密切。回归计算成果表明（见表 6-8，这两孔的降雨量分量所占水位总变幅的比例均不超过 5%；而库水位的分量却在 80%以上，W9 最大高达 85.8%，但具有一定的滞后性，约 3 天左右，表明这两孔与库水位显著相关，存在明显的绕坝渗流现象。究其原因，估计与大坝左岸复杂地质条件及帷幕防渗能力较弱有关。左岸有多条断层破碎带交汇通过，帷幕灌浆 0.5~7m 灌浆时发生裂隙串浆现象，压力达不到设计要求，而岸边斜坡长约 200m 段帷幕底线高于蓄水前地下水位以上 12~14m 的弱透水处。

6.3.3 二坝左岸

二坝左坝肩布置 9 个孔，其中 W15 位于坝中心线的上游侧。W15 最高水位为 209.04m，出现在 1998 年 11 月 15 日，多年平均为 199.97m，最大年变幅为 11.72m。从过程线上看，该孔水位与库水位有一定的相关性，一般库水位上升，测孔水位也升高，库水位下降，测孔水位也降低，但始终比库水位低。位于坝中心线下游侧的几个测孔水位，与库水位相关均不是很明显，其中 W12、W13、W17、W18 与库水位呈弱相关性，计算结果表明，W12、W13、W18 库水位分量变幅分别为 4.64m、7.07m、3.90m，占总变幅量的 26.6%、28.4%、45.3%。从附图 6-4 可见，W12、W13、W18 均呈上升的趋势，但目前已走平趋稳。

表 6-7 绕坝孔水位逐步回归方程一览表

Table 6-7 Stepwise regression equation list of dam water hole

位置	测点	管口高程(m)	回归方程	复相关系数	标准差(m)	F
两坝之间	W8	209.4	$170.3124 + .5543865[Hu7] - 1.689341E-03[t] + .8483294[Ln(1+t)] - .0856$	0.990	0.338	2732
	W9	222.6	$173.605 + .7123245[Hu7] - 1.971048E-03[t] + 1.259035[Ln(1+t)] - .1094074[P15]$	0.993	0.336	3815
二坝	W10	208.5	$29.88449 - .7791585[Hu] + .8163224[Hu7] - 1.763931E-02[t] + 27.01629$	0.993	0.813	3572
	W12	215.1	$99.05618 + .2098619[Hu] - 9.482653E-03[t] + 15.53522[Ln(1+t)]$	0.982	0.979	1832

W13	210.2	$53.72002-1.95944[\text{Hu}]+2.159637[\text{Hu}]-1.456074\text{E}-02[\text{t}]+22.74792[\text{L}]$	0.972	1.566	922
W15	244.0	$166.2497+.5810503[\text{Hu}]-7.943567\text{E}-03[\text{t}]+5.369973[\text{Ln}(1+\text{t})]$	0.544	3.727	31
W18	222.6	$143.8445-.6516801[\text{Hu}]+.7917081[\text{Hu}]-5.026348\text{E}-03[\text{t}]+6.87308[\text{L}]$	0.923	0.793	313

综上所述,左岸上游侧测孔水位与库水位有明显的相关性,而下游侧的部分测孔与库水位也存在不同程度相关性,存在一定绕坝渗流现象,但绕渗不严重,目前测孔水位均已稳定。

表 6-8 绕坝孔水位统计分析解析成果一览表

Table 6-8 Analytical results of statistical analysis of pore water around the dam

测孔号	水压分量(m)			时效分量(m)			降雨分量			各分量所占比例(%)		
	最大值	最小值	变幅	最大值	最小值	变幅	最大值	最小值	变幅	水压	时效	降雨量
W8	7.06	-5.07	12.13	0.07	-1.77	1.85	0.03	-0.61	0.64	83.0	12.6	4.4
W9	9.08	-6.51	15.59	0.24	-1.53	1.77	0.04	-0.78	0.82	85.8	9.7	4.5
W10	1.05	-0.85	1.90	20.61	0.00	20.61	0	0	0	8.4	91.6	0.0
W12	2.64	-2.01	4.64	12.79	0.00	12.79	0	0	0	26.6	73.4	0.0
W13	3.93	-3.10	7.04	17.76	0.00	17.76	0	0	0	28.4	71.6	0.0
W18	2.19	-1.70	3.90	4.70	0.00	4.70	0	0	0	45.3	54.7	0.0

6.4 二坝浸润线

二坝原设计在 1+072m 剖面共埋设 12 支渗压计,目前虽然已失效,但从以前所观测到的资料,可以了解到土坝渗流的状况,埋设在心墙内的 8 个测点渗压与库水位有较好的相关性,位于低部上游面 P1 测点最明显,随库水位的变化而变化,到 1997 年 12 月后库水位变幅减少,其渗压也趋于稳定,在 1997 年底库水位最高达到 212.6m,对应的上游面 P1 最大压力为 0.28MPa, P2-P6 等几个测点在 0.20 MPa 左右, P7、P8 在 0.07 MPa 左右。位于心墙下游反滤层内的测点 P9 及下游建基面的 P10、P11、P12 的压力与库水没有明显相关性,并且压力值很小,在 1997 年底,各测点压力在 0.02-0.07 MPa 之间。说明前期坝体心墙和坝基防渗帷幕效果较好。

鉴于二坝坝基复杂的地质条件,只有一个监测断面,且原渗压计已基本失效的情况下,2000 年 6 月增设了一个观测断面 1+065m,钻了 2 孔,埋设 6 支渗压计,但观测不久就损坏。目前,已无法有效监测坝体的浸润线。应设法至少恢复两个断面的坝体浸润线观测^[49]。

6.5 小结

(1) 大坝上游面坝基防渗帷幕后的渗透压力较小,仪器失效前库水位升到接近正常

蓄水位, 实测到最大压力为 0.11MPa, 大坝基础防渗帷幕和面板组成的防渗体系效果良好。

(2) 大坝总渗流量不大, 实测最大渗流量为 15.84 L/s, 与库水位及温度存在密切的相关性, 随库水的升降而增减, 随气温的降低而渗流量增大。库水位对渗流量影响的变幅约 9.65L/s, 占总流量的 36.4%; 温度影响最大, 其分量变幅为 10.20L/s, 占总流量的 38.5%; 降雨对渗流量影响不大, 其变幅约 3.71L/s, 占总渗流量的 14%。渗流量变化趋势不是十分明显, 近期略有下降趋势。扣除降雨影响后, 总渗流量约为 15.80 L/s, 多年平均流量为 7.27L/s, 小于国外部分已建而运行正常的面板堆石坝。

(3) 二坝坝体渗流量不大, 主要受库水位影响, 水库高水位时, 其最大为 1.046 L/s, 水压分量变幅为 0.82 L/s, 占总量的 48%, 在水库低水期, 量水堰顶出现断流, 估计与绕坝渗流和地下水有关, 其渗流通道在相对高的部位。降雨量影响变幅仅为 0.27 L/s, 占总变幅的 15.8%。近年来略呈减小的趋势。

坝基渗流受库水影响很小, 长期保持较稳定状态, 同断面的两根测压管, 水头差较小, 不会因坝基土体抗剪强度不足而遭受破坏。

(4) 大坝右坝肩 7 个绕坝渗流孔中除上游侧孔与库水位有较大相关性外, 其余测孔与库水位均没有明显的相关性, 其大多数主要受地下水位(降雨量)影响, 而且依地势下降较快, 绕坝渗流不明显。从发展趋势看, 除 W4 略有升高外, 其余测孔趋势性不明显或略有下降的趋势。

两坝之间的两个测孔, 与库水位相关密切, 库水位分量占总变幅比例大于 80%, 存在明显的绕坝渗流现象。但近年来, 测孔水位呈一定的下降趋势。

二坝左岸上游侧测孔水位与库水位有明显的相关性, 而下游侧的部分测孔与库水位也存在不同程度相关性, 存在一定绕坝渗流现象, 但绕渗不严重, 目前测孔水位均已稳定。

(5) 原设计埋设的一个监测断面和增设的一个观测断面渗压计, 目前均已失效, 无法有效监测坝体的浸润线。鉴于二坝坝基复杂的地质条件, 应设法恢复两个断面的坝体浸润线观测。

7 结论与展望

7.1 结论

随着电子计算机的发展,数值计算方法在解决实际复杂问题中的地位显得愈来愈重要,土坝渗流问题一直是水利工作者关注的焦点。如何将数值计算方法与土坝的渗流问题更好地结合,得到较准确的结果变得迫切需要。本文以黑龙江省牡丹江莲花电站水库为背景,详细地讨论了水库渗流自动监测的设计,并简要介绍了通过网络实施整个水库水利自动化的方案。并通过有限元软件给出了土石坝的渗流计算机模拟。可得到如下结论:

1 通过对大坝的监测项目、监测方法和仪器设备等的叙述,并由工程运用和观测实践表明,原型观测成果比之理论研究和模型试验更符合实际情况,特别是渗流观测更加起着关键作用。

2 大坝渗流监测自动化系统采用美国基美星MCU和基康的传感器,该产品技术成熟可靠、应用范围广、耐用性强,并具有较强的可扩展性。

3 对渗流自动监测系统的软件编制给出了相应的说明。弦式仪器率定软件可以率定仪器的精确度,使仪器测得指标符合标准。监控单元MCU的控制软件可以进行完成系统设置、系统诊断、数据采集和传感器设置等。渗流监测系统管理软件可以根据水库的需要开发,实现日常大坝的监测,等值线的绘制报表等到各项功能。

4 根据渗流基本方程及定解条件的比较,将Ansys软件的温度场分析功能应用于渗流场的分析,并采用死活单元技术,通过迭代算法计算浸润线,解决了土坝渗流稳定问题的求解。

5 采用Ansys温度场分析功能进行土坝渗流计算是可行有效的。死活单元技术能够解决浸润线位置计算问题,采用APDL参数化建模能够简化建模与分析,从而为工程应用提供了有效的解决方案。Ansys强大的前后处理功能能够为工程应用提供极大的便利,能够解决复杂边界、多种介质的复杂渗流问题。

6 本系统软件实现了对监测数据的初步分析,如绘制过程线、相关线、浸润线的图形分析方法;提供特征值统计的制表分析方法,还有数学模型分析方法。这些方法能大大加快大坝安全分析的速度,但不能给出大坝安全的评价和决策,一方面是因为评价决策不只依据这些定量分析,还依据一些定性分析。另一方面是因为大坝评价决策具有很强的经验性,有丰富经验的专家和专家小组才能胜任这项工作,才能得出合理的评判结果。作为此学科的初探者,在有限的时间内,仅做了以上的工作口即便是数据初步分析,也只提供了有限的分析方法,没有涉及大坝结构方面的计算,如渗流分析、反演分析等。基于长期的工作考虑,这些软件方面的研究工作留在以后进行完善。因此,在软件的完善方面以后应向两方面努力,一是从完整上考虑,进行安全综合评价分析。再就是从功能强大性考虑,增加数据分析和成因分析方法。真正把此系统形成一整套通用软件包,很好地服务于中国

水利水电自动化监测事业。

7.2 展望

本文的工作重点在于采用网络平台实现大坝的渗流自动监测系统,并通过有限元软件实现了大坝渗流的计算机模拟,为实际工程的分析提供了一些参考,但还有很多需要改进的地方。比如网络的安全,在计算机的模拟中,进一步还可以将参数化模型通过Ansys/UIDL语言界面化,从而形成Ansys土坝渗流计算模块,这样只需要通过人机交互输入相关控制指标,就可以直接得到渗流分析结果,大大简化了建模、分析的流程。采用Ansys只能对稳定渗流进行模拟,对于非稳定渗流就无法进行模拟,这时可以借助Adina和Abaqus有限元软件对非稳定渗流进行计算机模拟。此外,监测系统在运行期的管理维护特别重要,尽管设计时在软硬件方面作了诸多考虑来避免误操作带来系统的崩溃,但也不能作到万无一失。管理上,应严格按照软硬件操作注意事项来进行管理和维护工作,注意提高水库大坝管理人员的技术水平和素质,制定一套合理的管理制度,加强管理力度,以确保安全监测系统长期稳定发挥其功效。

致谢

本文是在导师杨晓萍副教授和朱纯祥高工的悉心指导下完成的，论文的全过程倾注了他们大量的心血和汗水。在此过程中，自己开拓了视野，科研能力也得到了很大的提高，在此表示对杨老师和朱纯祥老师的衷心的感谢和深深的敬意！

在硕士学习期间，我还得到了张靠社副教授、张江滨教授等的指导，使我在这段令人难忘的学习生涯中获益颇丰，在此一并表示深切。此外，还要感谢庞善祥总工的专业指导，使我对完成论文充满了信心。

参考文献

- 【1】 曹华.小东江坝渗流浅析 [J].大坝观测与土工测试,2000,24(4): 38-40.
- 【2】 陈振飞,邓昌铁.基于Intranet/Internet的大坝安全监测信息查询系统 [J].水电自动化与大坝监测,2002,26(1):54-56.
- 【3】 邓念武.偏最小二乘回归在大坝位移资料分析中的应用 [J].大坝观测与土工测试,2001,25(6): 16-18.
- 【4】 方卫华,王润英.大坝安全监测自动化的现状与展望 [J].水利技术监督,2000,8(5): 25-27.
- 【5】 何薪基,田斌,周建军.最优权组合模型与参数优化在安全监测分析中的应用 [J].大坝观测与土工测试,2000,24(5): 24-26.
- 【6】 胡群革,徐招才,汪来宝.肖岭土石坝安全分析 [J].大坝与安全,2000,1:30-33.
- 【7】 牛运光.大坝安全监测工作的回顾 [J].人民珠江, 2000,(5):31-35.
- 【8】 彭虹.我国大坝安全监测自动化的演进与拓展 [J].大坝与安全,2003,(6):13-18.
- 【9】 刘杰.土石坝渗流控制理论的发展及实践 [C].第四届全国水利水电工程渗流学术讨论,
- 【10】 谷怀,甘明辉.土石坝安全论证理论与方法 (第一版) [C].北京:科学出版社,2001:21-23.
- 【11】 中国水利水电建设工程咨询公司.莲花水电站竣工安全鉴定报告 [R].1997.3.
- 【12】 董大富,赵建达.Web技术在水库信息化系统建设中的应用 [J].大坝与安全,2003,(1):25-26.
- 【13】 范建书,王丽雅,杨树军.邱庄水库闸门计算机监控系统 [J].河北水利水电技术,1999,(3): 47-48.
- 【14】 张程.察尔森水库视频图像远程监视系统 [J].东北水利水电,2003,21(1): 20-21.
- 【15】 水利部东北勘测设计研究院.莲花水电站观测资料分析报告 [R].1986.6.
- 【16】 中国水利水电建设工程咨询公司.莲花水电站竣工安全鉴定报告 [R].1997.3.
- 【17】 魏德荣.大坝安全监控指标的制定大坝与安全 [J].2003,(6):24-28.
- 【18】 《土石坝安全监测技术规范》SL60-94.
- 【19】 《土石坝安全监测资料整编规程》SL169-96.
- 【20】 《水工建筑物测流规范》SL20-92.
- 【21】 《水位观测标准》GBJ138-90.
- 【22】 《大坝安全自动监测系统设备基本技术》SL268-2001.
- 【23】 《水文自动测报系统规范》SL61-94.
- 【24】 《电气设备安装工程电缆线路施工及验收规范》GB50168-92.
- 【25】 美国Geokon(基康)公司设备技术手册.
- 【26】 美国基美星公司2380MCU系统技术手册.
- 【27】 王跃,李海河,侯新华.数据采集系统在小浪底工程的实践 [J].大坝与安全,2003,(4): 31-33.
- 【28】 张晓元,李长城.黄坡水库大坝渗流安全分析[J].大坝与安全,2003,(4):39-41.
- 【29】 王超,姚付华,张晓林,陈惠敏.丹江口大坝安全监控综合网络系统的设计 [J].水电自动化与

- 大坝监测,2002,26(6):27-28.
- 【30】 戴妙林,郭震,吴宏明等.万安溪面板堆石坝渗流观测资料分析 [J].水电自动化与大坝监测,2002,26(6): 42-44.
- 【31】 章尧爱.大垌水库水情自动测报系统 [J].水电自动化与大坝监测,2002,26(5):61-63.
- 【32】 李崇浩,陈森林.应用ActiveX技术实现水调自动化系统图形功能及水电自动化与大坝监测 [J].2002,26(6):49-51.
- 【33】 李婷婷,郑东健,顾冲时.基于三层结构的大坝安全监控系统开发技术 [J].大坝与安全,2003,(1):22-24.
- 【34】 Paul Whitenead,曹小刚(翻译).Active Server Pages3.0.(第一版) [M].北京:清华大学出版社,2001.
- 【35】 De Wiest(Editor):Flow through porous media Academic Press, Chap.3.Rumer,R.R.Resistance to flow through porous media.
- 【36】 O.C.Zienkiewica. The Finite Element Method in Engineering Science [M]. London: McGraw-Hill, 1971.
- 【37】 H.Brezis, D.Kinderlehrer, G.Stampacchia. Su rone nouvelle formulation du probleme de l'ecoulement a travers une digue, C. R.A.S.,Paris 287(1978),711-714
- 【38】 Shevard. Trends and Debatable Aspects in Embankment Dam Engineering [J]. Water Power and Dam Construction,1984.12.
- 【39】 Zienkiewicz,O .C.and Cheung,Y.K.,Finite. Elemention solution of field problem [J].The Engineering,1965,220:57-10.
- 【40】 Zienkiewicz O.C. and Cheung Y.K..The F.E.M. in structural and continuum mechanics [M]. McGraw-Hill,1967.
- 【41】 Rubin, J..Theoretical Analysis of Two-dimensional Transient Flow of Water in Unsaturated Soils, Soil Sei.Amer.Proc.32, 1968.607-615
- 【42】 Biebia C A ,Telles J C F ,Wrobel L C .Boundary Element Techniques [J]. Theory and Applications in Engineering,Berlin:Springer-Verlag,1984:123-124.
- 【43】 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算(第二版) [M].北京:中国水利水电出版社, 1996:107-155.
- 【44】 Verdugo R, IshiharaK. The steady state of sandy soils [J]. Soils and Foundations,1996,36(2): 81-91.
- 【45】 K.G.Sharma, Desai. Analysis and implementation of thin-layer element for interfaces and joints [J]. Journal of Engineering Mechanics,ASCE,1992,118(12):2442-2462.
- 【46】 Saceed Moaveni有限元分析.Ansys理论与应用(第一版) [M].北京:电子工业出版社, 2003.
- 【47】 ANSYS电磁场分析指南.美国Ansys公司北京办事处.
- 【48】 中水一局莲花水电站施工局.莲花电站土建工程施工质量自检报告 [R].1998.5.
- 【49】 莲花水电站工程建设监理部.莲花水电站枢纽工程安全鉴定监理自检报告 [R].1998.5.