

引滦水库自动化安全监测系统的研制和开发

(和利时集团)

摘要: 引滦工程尔王庄水库自动化安全监测系统采用可靠的仪器设备, 利用先进的观测手段, 获取有效的观测数据, 为水库监测管理人员提供水库围堤安全管理工作的全面支持和服务, 使围堤运行处于受控状态, 实现安全管理的高质量、高效率、高水平。

关键词: 自动化 实时监测 离线分析

1 前言

尔王庄水库位于天津市宝坻县南部大白庄乡与尔王庄乡境内, 引滦明渠中段右侧, 是引滦入津输水工程距天津市最近的一座中型平原水库, 一方面, 它具有调蓄作用, 通过调节水量的供求关系, 可提高对天津市供水的保证率, 另一方面, 在上游停水时或引滦明渠护砌、渠道清淤、泵站维修及水闸维修时又可作为向下游供水的水源。由于水库长期处于高水位运行状态, 一旦失事, 不但会影响到天津市的供水, 而且会造成重大安全事故和经济损失。

尔王庄水库于 1982 年 8 月兴建, 1983 年 7 月竣工并蓄水。水库集水面积约为 11.03km², 总库容 4530 万 m³, 兴利库容 3868 万 m³, 死库容 662 万 m³。原设计正常蓄水位 5.5m (黄海高程, 下同), 死水位 2.0m, 库底平均高程 1.4m。水库围堤全长 14.297km, 原设计堤顶高程 7.04m, 顶宽 7m, 堤顶设防浪墙, 防浪墙顶部高程为 8.24m。堤身为碾压式均质土堤, 上下游堤坡坡比均为 1:3。上游为浆砌石护坡, 下游为草皮护坡。围堤下游设有戽台, 其后为马道, 最下游为引滦明渠和截渗渠。由于尔王庄水库围堤很长, 靠简单的人工观测方法很难对坝体安全实现全面、准确、细致的监测, 致使在水库运用过程中一旦出现问题不容易及时发现水库的安全隐患和采取措施进行处理。

水库安全监测工作是水库综合运行管理工作的重要内容, 搞好水库安全监测对于水库正常运行和确保水库周围人民生命、财产安全都至关重要, 因此, 国内外多年来始终重视进行这方面的研究¹, 目前在国内外有关水库安全监测自动化系统研究的相关文献报道较多², 但其中针对平原水库利用自动化系统进行安全监测方面所做的研究仍很少见。由于平原水库坝体很长, 因此人们也就很难集中精力对坝体安全实现全面、准确、细致的监测, 致使在水库运用过程中也就不容易及时发现问题, 从某种意义上说, 平原水库比山区水库大坝更不安全, 更容易出现问题, 这一点在近期新疆发生的垮坝事故中就得到了证实。

2 系统开发的目标

在尔王庄水库进行的研究, 着眼于水库渗流和渗流有关的地下水位、浸润线、孔隙水压力、库容、渗流量, 结合围堤沉降观测和水库进出水闸附近的量水堰观测等几部分测量内容, 需建立一个适合尔王庄水库的优化的自动化安全监测系统, 用于监测尔王庄水库的堤坝稳定状态, 指导水库的防渗和防漏工作, 辅助水库的综合管理工作。

水库自动化安全监测系统的开发研究目标是采用可靠的仪器设备, 利用先进的观测手段, 获取有效的观测数据, 系统软件通过对现场采集到的数据进行分析整理, 为水库监测管理人员提供水库围堤安全管理工作的全面支持和服务, 使围堤运行处于受控状态, 实现水库围堤安全管理的高质量、高效率、高水平。

3 系统开发的原则

系统开发应充分考虑系统的开放性、可扩充性、适应性和安全性等各方面的因素, 以满

足水库自动化安全监测系统的需要³。

本系统的设计和开发应遵循以下原则：

1、实用性与可靠性原则

改进和进一步完善用户界面，使用户易于理解、易学、易操作；充分考虑已有资源（软、硬件设备及数据）的合理利用，做好新旧系统平稳过渡；进一步增强系统的容错能力和可靠性。

2、先进性与可行性原则

系统构造采用以 Intranet/Internet 构架为主，结合客户机/服务器模式为辅的先进实用的体系结构；系统实现采用先进的数据库技术、网络技术、Internet/Intranet 技术；对设计的方案、采用的技术和产品进行严格的可行性论证，把风险降至最低限度。确保设计的方案科学、正确、严谨、可行；采用的先进技术是成熟的、经过实践证明是成功的技术。

3、开放性与可扩充性原则

系统设计采用面向对象的分析与设计方法 (OOA&D)，使系统逻辑结构清晰、易读，在功能的划分和设计时，合理划分各模块的颗粒度，使系统易于扩充、维护和修改；采用开放的技术和开放的体系结构，为系统提供良好的可扩展性。

4、安全性与保密性原则

建立完善的授权机制，为不同的用户提供合适的访问权限；采用软件加密技术，对关键信息进行加密处理，保证数据在使用和传输过程中不会被非法查看、篡改、窃取等。

4 系统的组成与布置

自动化安全监测系统主要由传感器、电缆、监测分站、光纤、监测总站、网络通讯连接和安全监测系统软、硬件组成。传感器（即压阻式高精度扬压力计）通过信号电缆与扬压力数据采集单元（监测分站）相连，光纤将数据采集单元所采集的信号传输到监控管理中心（监测总站），从而实现渗流自动化监测。

自动化监测分站主要设有数据采集单元（DAU），每一个数据采集单元的布置是根据其监控渗流测点数量的多少和距离确定的。根据测压管的布置要求及考虑经济实用性，22个监测断面93个测点共布设12个监测分站。每一个数据采集单元对所辖监测仪器按工控机的命令或设定的时间自动进行监测，并转化为数字量，暂存在数据采集单元中。各个数据采集单元中的数字量由光端机通过光纤并根据工控机的命令向主机传送所测数据。

自动化监测总站主要包括服务器、微机工作站、工控机、不间断电源、防雷净化电源、调制解调器（MODEM）和安全监测管理系统等。监测总站负责同现场数据采集单元和远端上级主管部门进行数据通讯，并负责数据处理及系统的安全管理工作。

5 软件系统的组成与功能

引滦工程尔王庄水库自动化安全监测系统软件主要由七个子系统组成：实时监测、离线分析、图形制作、报表制作、沉降位移、数据管理和系统维护。系统结构如图1所示：

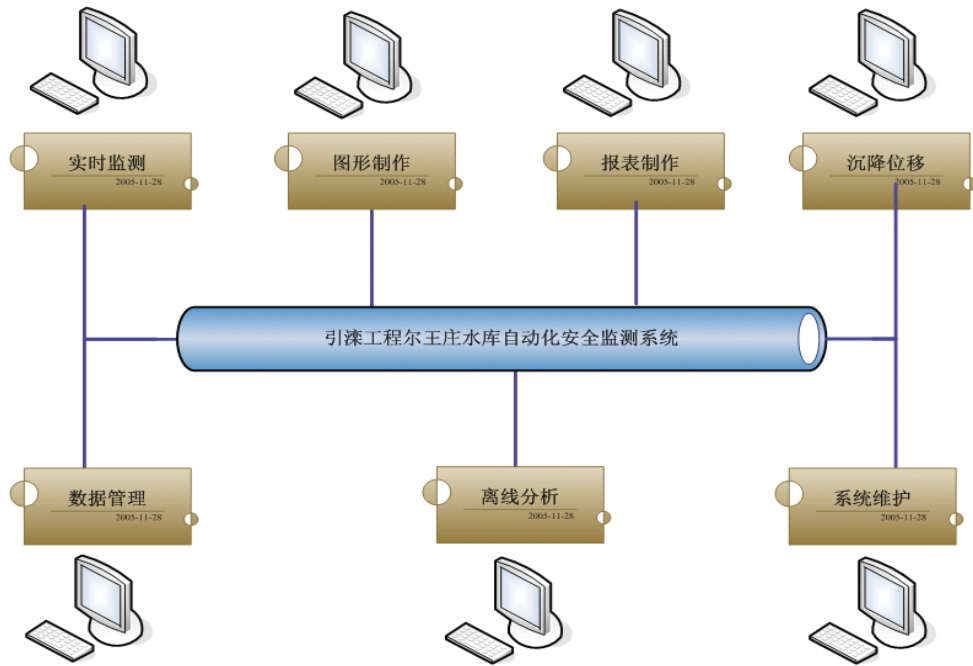


图 1 系统结构图
Fig.1 system structure

系统的后台基于关系型数据库来存储信息数据，通过各个子系统将数据提取并加以分析，辅助监测人员更好的对围堤实行安全监控，通过系统反映的数据和图表，来分析评价围堤的工作状态。

5.1 实时监测子系统

该子系统对图 2 所示布设的监测断面和测点，进行实时监测，并以图形方式直观的将采集到的数据提供给用户，当用鼠标移到某个测点将显示该测点最后时刻测得的物理值。当测值出现异常时，系统将自动对测值进行故障判别，并对校验结果给出报警标志，并在图形上为用户直观做出标记，使用户能通过图形快速准确的定位到异常测点。

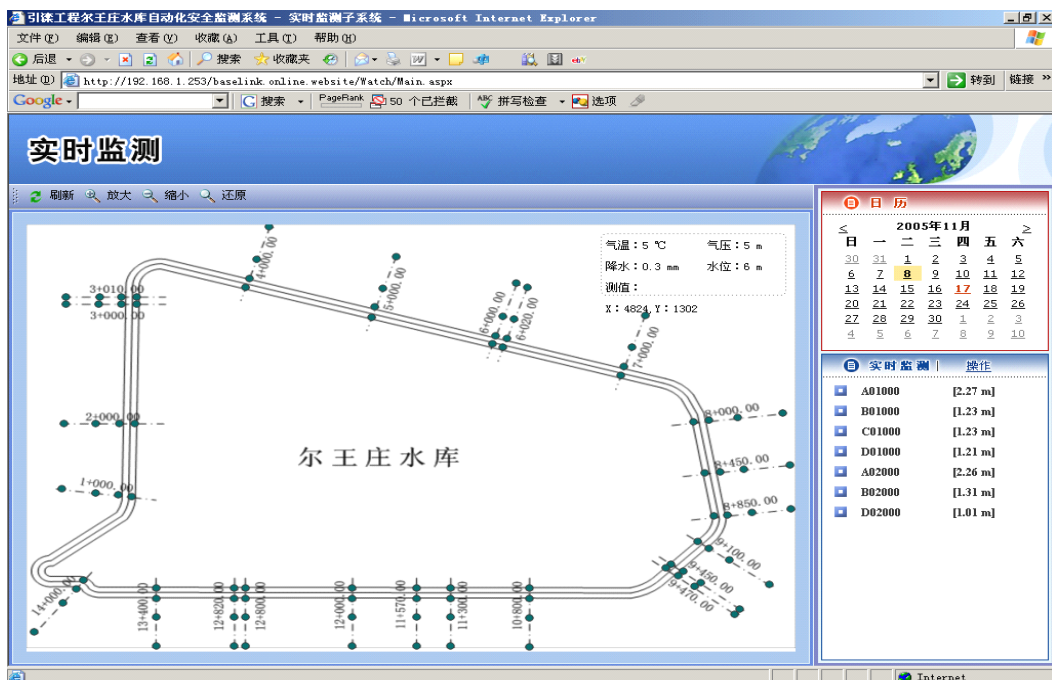


图 2 实时监测图
Fig.2 real-time monitoring

5.2 离线分析子系统

该子系统利用统计学方法根据测压管实测资料建立数学模型,用以对水库围堤实行安全监控,并通过对模型各分量的合理的物理解释,来分析评价围堤工作状态。

土石坝的浸润线高低直接影响边坡稳定,是安全监测中的必测项目。为了监测浸润线,通常在土石坝的典型横断面上,从上游向下游布置若干测压管,以下为浸润线测压管水位的统计模型及其因子选择。

5.2.1 统计模型

土石坝浸润线的测压管水位的实测资料分析表明,其主要受上下游水位、降雨以及筑坝材料的渗透时变特性等影响,即:

$$h = h_u + h_d + h_p + h_\theta \quad (1)$$

式中: h —— 测压管水位;

h_u —— 上游水位分量;

h_d —— 下游水位分量;

h_p —— 降雨分量;

h_θ —— 时效分量。

5.2.2 因子选择

(1) 上游水位分量

根据土石坝渗流分析,在不透水地基上矩形土体的浸润线方程为

$$h_i = \sqrt{h_u^2 - \frac{2q}{k} x_i} \quad (2)$$

式中: h_i —— 离上游面 x_i 距离的浸润线高程 (即测压管水位);

h_u —— 上游水位分量;

k 、 q —— 分别为渗透系数和单宽流量。

对某一测压管, x_i 、 k 为定值,所以测压管水位与库水位的一次方成正比。然而上游库水位在变动,有一个渗流过程,使测压管水位滞后于库水位。因此,用前期库水位 \bar{h}_{ui} 表示。即

$$h_u = \sum_{i=1}^{m_1} a_{ui} \bar{h}_{ui} \quad (3)$$

式中: a_{ui} —— 上游水位分量的回归系数;

\bar{h}_{ui} —— 观测日前第 i 天的库水位

(2) 下游水位分量

一般下游水位变化较小,用观测日当天的下游水位作为因子,即

$$h_d = a_d h_d \quad (4)$$

式中: a_d —— 下游水位分量的回归系数;

h_d —— 观测日的下游水位。

(3) 降雨分量

土石坝在降雨过程中,一部分入渗坝体,这取决于降雨强度、雨型及土石坝的材料。与

此同时，由入渗引起测压管水位的变化（即浸润线）也有一个滞后过程。因此，用前期降雨量 \bar{p}_i 作为因子。即

$$h_p = \sum_{m_2} d_i \bar{p}_i \quad (5)$$

式中： d_i ——降雨分量的回归系数；
 \bar{p}_i ——前期降雨量。

(4) 时效分量

土石坝竣工蓄水后，引起土体结构颗粒的变化；与此同时，坝前逐渐淤积形成自然铺盖等。这些因素对测压管水位的影响有一个时效过程，可用下式模拟：

$$h_\theta = c_1 \theta + c_2 \ln \theta \quad (6)$$

式中： c_1 、 c_2 ——时效分量的回归系数；
 θ ——蓄水初期开始的天数除以 100。

综上所述，土石坝浸润线测压管水位的统计模型为

$$h = a_0 + \sum_{m_1} a_{ui} \bar{h}_{ui} + a_d h_d + \sum_{m_2} d_i \bar{p}_i + c_1 \theta + c_2 \ln \theta \quad (7)$$

式中： a_0 ——常数项。

根据测压管水位与库水位过程分析，测压管水位受库水位影响显著，库水位升高，浸润线测压管中的水位升高，反之下降。但是测压管水位的变化一般要滞后 7 天左右。一般下游无水，即 $h_{di} \approx 0$ 。

5.2.3 渗流统计模型的回归分析

土石坝浸润线的测压管水位统计模型为多元线形回归模型，模型中的各系数与常数项利用最小二乘法来求得，并对回归系数进行检验，估计回归系数的置信区间。本系统的回归分析是在对原始数据中存在的明显错误进行甄别剔除的基础上，应用统计学方法进行的。

(1) 回归分析中模型和参数确定

① 自变量：自变量为观测日前第 i 天的库水位 ($i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$)。

② 应变量：应变量为观测日的测压管水位。

③ 回归模型： $h = a_0 + \sum_{i=1}^m a_{ui} \bar{h}_{ui}$

采用最小二乘法来确定上面两个待定参数，即要求观测值与利用上面回归模型得到的拟合值之间的差值的平方和最小。

(2) 回归系数的显著性检验

① F 检验法：

将观测值和拟合值差值的平方和 (SS) 分解为回归平方和 (SS_R) 和残差平方和 (SS_E)，用以下统计量进行检验

$$F = \frac{SS_R}{SS_E / (n - 2)} \quad (8)$$

式中， n 为数据组数。当 F 值大于一定的临界值时，拒绝原假设，认为因变量与自变量之间是相关的。

② 相关系数 R 检验法：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (9)$$

当该统计量大于一定的临界值时，拒绝原假设，认为因变量与自变量之间是相关的。

5.3 图形制作子系统

该子系统根据各测点的监测数据，通过描绘测点过程图和测点分布图来直观反映水库围堤的安全监测情况。包括通过时间上的过程曲线图来反映各测点测值情况和通过断面上的过程曲线图来反映各测点测值情况等。

5.4 报表制作子系统

该子系统为用户提供基本的报表生成和打印功能，使得用户对各测点监测数据有一个全面的了解。

5.5 沉降位移子系统

该子系统用来记录各监测点历次观测的沉降高程，为用户提供对比分析。包括增加观测点的观测记录、按某时间段绘出测点的过程曲线图和按某时间段列出测点及测值的报表并计算沉降最大、最小和平均值等功能。

5.6 数据管理子系统：

该子系统用于人工监测数据的输入及进行环境变量的维护，并为用户提供修改已入库测点数据的入口。

5.7 系统维护子系统：

该子系统提供用户及访问权限的管理和一些参数配置。包括设置允许访问系统的登录用户、为系统内用户设置各子系统的访问权限和设定系统内相关参数等功能。

6 结论

总结尔王庄水库自动化安全监测系统研究项目，系统的技术关键点与创新点如下：

1、采用自动监测技术测量尔王庄堤坝沉降和渗流。测量数据稳定性高、可靠性强、误差小。

2、采用光纤通信方式，使安全监测中心的监测设备和监测点之间能够保持高速稳定的连接。

3、系统布置多个沉降观测点，以便分析堤坝的沉降、变形情况，为分析堤坝裂缝影响渗流情况提供依据。

4、数据采集点布局合理，每个断面多点布置，能全面反映渗流浸润。多断面全方位布置，形成分布全方位的渗流观测网，反映了整个堤坝的渗流情况。为防止渗流破坏，进行防渗加固提供了可靠的依据。

5、配合渗流观测，合理布置环境观测点，观测上下游水位、降雨量、温度、气压等，使分析考虑的因素更全面。

6、建立有平原水库特色的渗流监测模型，充分考虑了水位频繁涨幅，环境条件变化（如气温、降雨等），使得与监测数据充分拟合。

7、建立了预警预测模型。可根据水位预测渗流情况，反映值精度高，发现异常及时报警以便处理。对一些特殊的演变现象和迅速变化的现象进行及时的跟踪分析，实现从静态到动态的仿真模拟和预测报警。

8、本系统采用先进的.net 框架平台，B/S 机制开发。充分利用先进平台在数据访问、

通信、分层等方面的技术优势，使其成为可伸缩、可扩展、功能齐全、界面简洁美观、升级维护方便、自动化程度高的强大网络系统。

9、本系统提供多窗口应用界面，窗口间互通，便于用户从不同的侧面观察和分析监测信息，从不同的角度控制监测系统，以便及时处理异情。

尔王庄水库自动化安全监测系统的研究工作已经完成，投入了实际的使用，取得了良好的结果，在保证水库安全方面发挥着重要作用。本系统实现了安全监测设备运行的自动化，能及时准确地了解水库围堤和水工建筑物的运行状态，能及时分析整理监测资料，自动化安全监测系统的性能、功能达到“无人值班、少人值守”的管理水平，真正提高了水库安全管理水平。研究成果对于为数众多的中小型平原水库具有重要的指导和推广价值，其社会效益不可估量。

参考文献

- [1] 孟凡义, 阎肃. 新立城水库大坝渗流安全监测系统的安装及防雷保护措施. 吉林水利, 2005(4): 18-20
- [2] 赵朝云, 李恳亮. 水府庙水库大坝安全监测系统的更新改造. 湖南水利水电, 2005(2): 14-15
- [3] 赵琳, 宓永宁, 冯琳. 土石坝渗流分析与自动化观测软件研究. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5): 528-530