机电与自动化·

数字尾矿库研究*

王山东 赵景程 王昌民 陈佩富
(南京大学) (马钢集团设计研究院)

摘 要 阐述了建立数字尾矿库的必要性,重点研究了数字尾矿库中地形、坝体、气象、水文、工程地质、调洪、稳定分析等模型的有机集成。并根据模型间的数据流程,给出数字尾矿库决策支持系统的结构。建立数字尾矿库系统后,可对尾矿库进行实时监测、动态模拟,以指导生产,提高安全系数。

关键词 尾矿库 数学模型 实时监测 决策支持

Study on Digital Tailings Reservoir

Wang Shandong Zhao Jingcheng Wang Changmin Chen Peifu
(*Nanjing University*) (*Design & Research Institute, Ma Steel Group*)

Abstract The necessity to build digital tailings reservoir is described. Focus is on the study of the organical integration of the mathematical models for its terrain, dams, meterology, hydrology, engineering geology, flood regulation and stability analysis. The structure of the decision support system of digital tailings reservoir is given according to the between-models data flows. The digital system of tailings reservoir, after setting up, can realize the real-time monitoring and dynamic simulation of the tailings reservior so as to guide the production and raise the safety coefficient.

Keywords Tailings reservoir, Mathematical model, Real-time monitoring, Decision support

近年来,随着数字地球理论的提出和实际应用的不断深入,人类对地球环境的了解不仅能达到细致入微,而且可以实现适时准确。数字尾矿库就是根据尾矿库理论,运用数字地球的技术方法,采集、储存、管理和分析尾矿库勘测、设计、生产全过程的信息,精确模拟尾矿库的动态变化趋势,在线分析各种突发事件,为生产管理提供实时可靠的决策支持。当建立数字尾矿库系统后,可以避免因人员变动,时过境迁等造成的多年前原设计与现实的生产管理和后期的尾矿库建设之间出现的信息断流,根据自然条件、生产参数的变化,结合科技进步,适时调整生产、设计参数,达到生产最优化、坝体最安全。

1 数字尾矿库模型

尾矿库是一个动态变化的设施,它的管理涉及到地形、坝体、尾矿、水文、工程地质等多门学科和技术。本文根据尾矿库设计管理理论,采用面向对象技术建立各相关模型,并把各模型全面集成为一个有机的整体,从而构建一个完整的数字尾矿库系统。

1.1 数字地形及工程地质模型

地形是建立尾矿库的首先条件,在坝体设计之前地形是一定的。测量原始地形是进行设计的第一步。地形与坝体结合,构成了库容体。所以建立地形数字模型是所有工作开始的前提。该原始地形模型也是以后复垦、尾矿利用的基础数据。

(1) 建立原始地形模型。

$$P_p = \{ p_1, p_2, \cdots, p_i, \cdots, p_n \}, \quad (1)$$

$$p_i = (x_i, y_i, z_i);$$

$$T = \{ t_1, t_2, \cdots, t_i, \cdots, t_n \} = f_{tin}(P_p); \quad (2)$$

$$DEM = \{ z_{ij} \} = f_{dem}(T), \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \cdots, n-1, n; \ j = 1, 2, \cdots, m-1, m;$$

式中,p_i 为平面坐标与高程构成的矢量点;P_p 为散点集;t_i 为散 *TIN*;T 为 *TIN* 集;f_{tin} 为 *TIN* 建模方程;DEM 为数字地形模型;f_{dem} 为 DEM 建模方程。

(2) 汇水区及坡度分析。

$$P_s = \{ p_1, p_2, \cdots, p_i, \cdots, p_n \}, \quad (4)$$

$$p_i = (x_i, y_i);$$

$$J_s = f_{slope}(DEM, P_s); \quad (5)$$

式中,p_i 为汇水边界平面点,它由分水岭和坝体共

---

* 安徽技术创新项目(皖经技 2003)。

王山东,南京大学 GIS/RS 实验室,博士研究生,210093 江苏省南京市。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

同构成; P_s 为汇水边界点集; J_s 为汇水区的平均坡度。f_{slope}为坡度计算方程。

(3) 工程地质建模。原始工程地质条件是坝体稳定的基础,在设计前必须进行地质勘探。通过地质勘探资料,结合地形模型,建立工程地质模型,能分析任一点的工程地质特性。

$$D_{drill} = \{ d_1, d_2, \cdots, d_i, \cdots, d_n \}, \quad (6)$$

$$d_i = \{ x, y, z, 分类, 厚度, 水文, 力学指标 \};$$

$$G_{geo} = f_{geo}(DEM, D_{drill}); \quad (7)$$

式中, d_i 为第 i 个钻孔的工程地质数据; D_{drill}钻孔集; f_{geo}为三维工程地质建模型方程; G_{geo}为工程地质三维模型。

1.2 区域气象水文模型

在区域范围内,依照气象地理分区和一系列历史观测资料,建立年最大 24、12、6、1 h 降水点雨量模型,供区域内的各尾矿库参照使用,本次采用国内通用的 P - III 型频率曲线。由于尾矿库的流域面积一般为特小型(通常 $F < 10\ km^2$),除使用经过审批的各历时点统计参数等值线图查读计算几种标准历时的设计点雨量外,还应对统计参数作大比例尺的补充分析。

$$X_{fl} = \{ x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_a \}; \quad (8)$$

$$C_v = f_v(X_{fl}), C_s = f_s(X_{fl}),$$

$$H_{vh} = f_{vh}(X_{fl}, h); \quad (9)$$

$$K_{ph} = f_{p-III}(P_n, H_{vh}, C_s, C_v), \quad (10)$$

$$h = 1, 3, 24,$$

$$P_n = 0.01, 0.1, 0.2, 0.33, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20;$$

$$H_h = f_h(K_{ph}, P_n, H_{vh}, C_s, C_v); \quad (11)$$

$$p_h = f_p(H_h), R_h = f_r(p_h); \quad (12)$$

$$n = f_n(p_1, p_{24}); \quad (13)$$

$$k = f_k(F, J_s, L, R_h); \quad (14)$$

$$Q_h = f_q(n, k, t), t = 1, 2, \cdots, 24; \quad (15)$$

式中, x_i 为第 i 次特大历史洪水变量; X_{fl}为特大历史洪水集; f_v、f_s、f_{vh}分别为 C_v、C_s、H_{vh}的统计方程; P_n 为统计频率; K_{ph}为某时段的 K_p 值; f_{p-III}为皮尔逊 III型频率统计曲线方程; H_h、p_h、R_h 分别为 h 时段的点、面和净雨量, f_h、f_p 和 f_r 分别为计算公式; n、f_n 分别为暴雨衰减系数与计算公式; k、f_k 分别为流域特征值与计算公式; F、L 分别为流域面积、长度; Q_h、f_q 分别为洪水过程线中某一时段的洪峰量与计算公式。

1.3 尾矿模型

根据设计要求或可参照的尾矿资料,建立尾矿的物理、化学、岩土特性模型,能为坝体的设计、干坡段计算、稳定性分析提供参数。并可随着生产的进行,不断修正模型以符合实际情况。

(1) 尾矿物理性质模型。

$$P_{tin} = \{ D_p, D_{pce}, R_c, I_p, \gamma_g, \Delta, \varepsilon, \phi, t \}, \quad (16)$$

$$P_{tail} = \{ p_{t1}, p_{t2}, \cdots, p_{tn} \};$$

$$T_{dist} = f_{dist}(P_{tail}, Q_h, \gamma_k, P_{\%}, pH); \quad (17)$$

$$i_p = f_i(P_{tail}, Q_h, C, v_b), \quad (18)$$

$$I_p = f_I(P_{tail}, L_k);$$

式中, P_{tail}为尾矿物理特性集合; D_p、D_{pce}、R_c、I_p、γ_g、Δ、ε、ϕ、t 分别为尾矿的粒径、粒级比、岩石性质、塑性指数、干密度、比重、孔隙比、内摩擦角、生产批次等; T_{dist}、f_{dist}分别是尾矿的沉积特征与计算方程; Q_h、γ_k、$P_{\%}$、pH、C、v_b、B 分别为尾矿的流量、矿浆密度、矿浆浓度、pH 值、矿浆稠度、尾矿流速、冲积宽度; i_p、f_i 分别为干坡度与计算公式; I_p、f_I 分别为水下坡度与计算公式; L_k 粒子扩散长度。

1.4 坝体模型

根据库容要求及地形、工程地质、水文、尾矿等模型,建立初期坝、各期子坝的动态模型,同时建立泄洪构筑物、防洪抢险等模型,在我国,绝大多数是上游法筑坝。对上游法筑坝可根据生产实际情况对坝体及其它模型作出修正。

(1) 初期坝模型。

$$D_f = \{ w_t, h_t, w_b, h_b, L, S \}, \quad (19)$$

式中, D_f 为初期坝模型参数; w_t、h_t、w_b、h_b、L、S 分别为坝体的顶宽、顶高、底宽、底高、坝长、坝体的水文、工程地质特性。

(2) 后期坝模型。

$$d_{si} = \{ w_t, h_t, i_i, i_o, L, S \}, \quad (20)$$

$$D_s = \{ d_{s1}, d_{s2}, \cdots, d_{si}, \cdots, m \};$$

$$a = f_a(D_f, D_s, P_{tail}, H, l), \quad (21)$$

$$y = f_y(a, x);$$

式中, d_{si}为某一期子坝; w_t、h_t、i_i、i_o、L、S 分别为子坝的坝顶宽、坝顶高、内坡角、外坡角、子坝长、子坝的水文、工程地质特性; D_s 后期子坝集合; m 为后期总坡度; a、f_a 分别为浸润线截距、计算方程; H、l 分别为上游水位高程、化引渗透长度; f_y、y、x 分别为浸润线平面方程、垂直值、水平值。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(3) 排水构筑物模型。

$$w_i = \{ m, n, h, r, \omega_t, \omega_s, S, \cdots \}, \quad (22)$$

$$W = \{ w_1, w_2, \cdots, w_n \};$$

$$G_j = \{ L_g, S_g, F_x, h_c \cdots \}; \quad (23)$$

$$Q_d = f_{qd}(W, h, G_j); \quad (24)$$

式中，w_i 为第 i 个排水井；m 、n、h、r、ω_t、ω_s、S、$\cdots$ 分别为排水井单层排水孔数、总层数、层高、孔径、过水面积、收缩面积、结构、其它属性；W 排水井集合；G_j 为排水管，L_g、S_g、F_x、h_c $\cdots$分别为排水管长度、各结构参数、出口断面，出口高程等；Q_d、f_{qd}分别为排水能力与计算方程；h 为尾矿库上游水位。

1.5　分析模型

根据以上模型，可建立调洪模型和稳定分析模型。这能满足常规分析的需要。再结合实时监测数据能对在线分析结果作出决策提示，为防洪抢险赢得时间。结合专家知识和经验，能处理复杂的计算分析，基本杜绝重大事故的发生。

(1) 库容模型。

$$V_r = f_r(\mathrm{DEM}, D_s, h); \quad (25)$$

$$V_t = f_t(\mathrm{DEM}, D_s, h); \quad (26)$$

式中，V_r、f_r 分别为库容与库容方程；V_t、f_t 分别为调洪库容与其库容方程；h 为计算高程。

(2) 综合分析模型。

$$H_k = f_{hk}(D_f, Q, H_d, e, h_t, h_j); \quad (27)$$

$$Q = f_Q(V_t, Q_h, Q_d, t); \quad (28)$$

$$k_s = f_{ks}(P_{tail}, T_{dist}, D_f, D_s, i_p, I_p, a, y_a, Q); \quad (29)$$

式中，H_k、f_{hk}分别为控制水位与计算公式；H_d、e、h_t、h_j 分别为坝顶高程、安全超高、调洪高度、回水调节高度；Q、f_Q 为调洪能力与计算方程；t 为计算时段；K_s、f_{ks}为稳定系数与计算方程；y_a 为浸润线实际值。

1.6　模型集成

从以上各模型的表述可知，尾矿库的地形、尾矿、坝体、气象、水文、工程地质等各个模型相互关联(如图 1)。各模型的最终目标是增加有效库容、提高安全系数。在各模型中，地形、原地基工程地质特性、尾矿、生产规模、气象、水文等属性是设计尾矿库的依据和前提条件，输入的尾矿性质、坝体形态、尾矿堆积过程是尾矿生产的参数，渗流场、浸润线、坝体变形、降水过程是动态监测的对象。

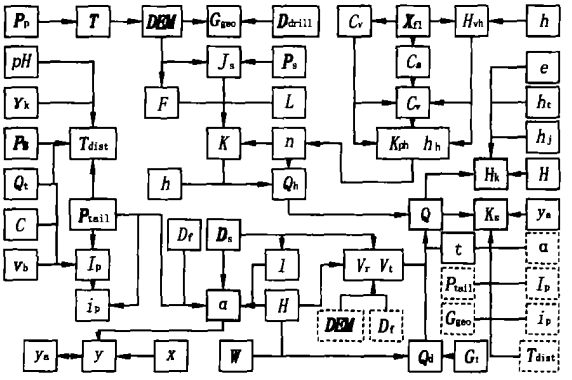


图 1　数字尾矿库模型数据流程

2　监测系统的建立

由上述各模型可以看出，系统中大部分参数(如尾矿性质、工程地质特性、坝体属性与模型)在尾矿库建立以后，一般在一定时间内是保持不变的，但与尾矿库安全密切相关的调洪能力、坝体安全与降水量、水位、浸润线、坝体变形等可实测参数密切相关。所以为了使尾矿生产基于安全监督之下，系统提供的模型必须有实时监测系统与之相配合，这样才能对尾矿库进行实时的监控和在线分析，使尾矿库的危险降到最低程度。当各独立数字尾矿库监测系统联网后，安全生产监督部门也可对各生产单位进行及时监督和指导(如图 2)。在建立监控系统时，应根据实际情况，由大型到中小型、由重要到次要、分级分批建立。

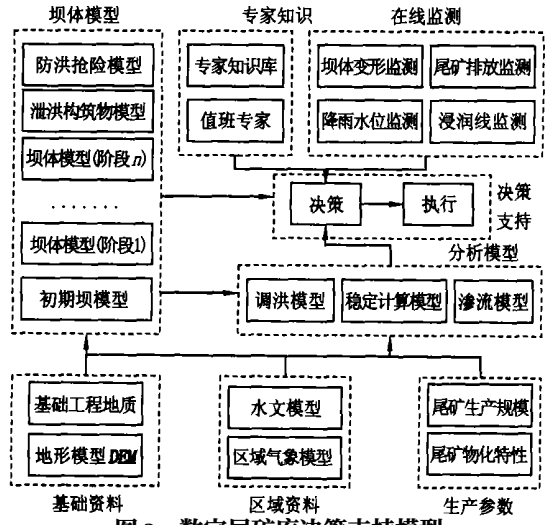


图 2　数字尾矿库决策支持模型

2.1　监测站

监测站是采集数据的源头，是系统运行的基础。对于测点的设置可以根据实际需要设立。对于特别重要的尾矿库应设立浸润线、水位、降雨、坝体变形等各种自动观测点。对于一般的尾矿库均应设立浸

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

润线、水位自动观测点。监测站的数据在有条件的情况下应通过有线方式传输,否则以无线电台、GSM、GPRS 等方式传输。

2.2　系统架构

当在区域范围内建立监控系统时,系统可由监测中心、专家咨询组、监测分中心、尾矿监测站等机构组成。信息传输采用无线、有线、专用网、公共数据网等方式。在监测站设计数据终端,数据服务器设在市、省信息中心,对于特别重要的尾矿库也可设立数据库服务器。

对公众和专业部门的信息发送,可以在省、市信息中心设 WEB 服务器,通过 Internet/ Intranet 发布。系统软件在 GIS 平台上进行开发,通过大型分布式空间数据库管理空间和模型数据,实现数据的同步更新,保持系统数据的一致性。通过模型计算分析,作出实时决策。

3　系统开发与建设

本次系统开发采用面向对象的方法,对地形、尾矿、钻孔、地质体、坝体、泄洪构筑物、水体均建立相应的对象和可视化模型,同时对各计算模型根据计算规范建立计算模型库和知识库,根据面向对象软件工程方法对各子系统进行了封装,使数字尾矿库这一复杂大系统进行降解,简化了计算步骤,从而保证了计算结果的可靠,并可根据规范和输入、输出数据对计算结果进行校核。系统采用 GIS 与虚拟现实技术对计算结果进行可视化表现,并与实时监测系统相结合,使系统能够应用于尾矿库的设计、生产、复垦和矿物再利用等各个阶段。

4　结　论

数字尾矿库是根据尾矿库理论,采用信息技术而构建的虚拟尾矿库管理系统,通过系统的在线监测与分析功能达到优化设计和优化运行参数的目的,最大限度地降低事故的发生。我们有理由相信,通过政府和矿山企业的重视,再辅以建立在高技术基础上的尾矿库监管系统和各管理部门的严格执法,定能保证尾矿库的安全运行,使矿山持续稳定地生产,实现经济与社会的可持续发展。

参　考　文　献

1　编写组. 尾矿设施设计参考资料. 北京:冶金工业出版社,1980

2　李作章,徐日升,等. 尾矿库安全技术. 北京:航空工业出版社,1996

3　郭腾峰,王　蒙. 数字地面模型的核心技术研究. 公路,2001(11):23～24

4　李建华,边馥苓. 工程地质三维空间建模技术及其应用研究. 武汉大学学报(信息科学版),2003(2):25～29

5　中华人民共和国水利部　能源部. 水利水电工程设计洪水计算规范 SL44～93. 1993. 3

6　中华人民共和国水利部. 水利工程水利计算规范　SL44～93. 1993. 3

7　黄杏元,马劲松,汤　勤. 地理信息系统概论. 北京:高等教育出版社. 2003

(收稿日期　2004-06-23)

信息苑·

2005年度部分科技期刊联合征订启事

《矿业工程》(双月刊)　大 16 开,64 页,邮发代号:8 - 38。每期定价 8.00 元,全年 48.00 元,欢迎到邮局或编辑部订阅。地址:辽宁省鞍山市南胜利路 35 号;邮编:114002;电话:(0412) 5537630;传真:(0412) 5538649。开户行:鞍山市工商银行铁东支行,帐号:0704021009221016583,帐户:矿业工程杂志社。

《理化检验 - 物理分册》(月刊)　大 16 开,邮发代号:4 - 183,每册 6.00 元,全年 72.00 元。欢迎广大读者到当地邮局订阅。漏订者请与编辑部联系,地址:上海市邯郸路 99 号;邮编:200437;电话:(021) 65556775 - 361;传真:(021) 65544911。

《黄金》月刊　大 16 开,国内邮发代号 12 - 47,全国各地邮局均可订阅;国外发行代号 M3331,由中国国际图书贸易总公司承办。国内每期定价 10.00 元,全年定价 120.00 元。

需订阅者,可到当地邮局(所)订阅,也可直接通过《黄金》杂志社发行部订阅。我部长理办零订、邮购业务。地址:吉林省长春市南湖大路 6760 号《黄金》杂志社发行部;邮编:130012;电话:0431 - 5529838、0431 - 5514586 转 3066;传真:0431 - 5521861;网址:http://www.ccgri.com/gold;E - mail:journal@ccgri.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net