

大坝安全监测专家系统的理论及其应用

顾冲时 吴中如

(河海大学水利水电学院 南京 210098)

摘要 简述近年来开发的由推理机、知识库、方法库、数据库、图表库等组成的大坝安全专家系统的各部分内容和功能。重点阐述了知识库的组成、表示及其应用。对其余各库及推理机作了扼要总结,文末介绍该系统在工程中的应用情况,从反馈信息及结果可知,该系统能较好地实现大坝安全评判这种复杂的工程问题的求解,从本质上区别于信息管理和分析系统。

关键词 大坝安全 大坝监测 专家系统

在大坝安全监测领域内,专家系统的研究尚属起步阶段,如意大利的 Fanali 和俄罗斯的 Radkevich 等,也曾探索了 AI 大坝安全分析系统,但在知识库和推理机方面还不够成熟,并尚未应用于实际工程。

在国内,近几年来,在学习和引进国外先进技术
与经验方面,取得了很大进展,在信息管理和分析系统
以及专家系统方面也发展较快,如西北勘测设计院
结合龙羊峡开发的“龙羊峡大坝安全评价专家系统”
等,但是系统中只是针对龙羊峡的特点而开发,而
尚未结合大坝安全监测领域内的全面知识,缺少判
别异常的普遍准则和推理知识,而将可能发生异常
的事件归纳为几种模式,从而忽略了异常的随机性,
使其无普遍推广应用价值。本文所研究的专家系统,
提出了“一机四库”的总体结构。在知识库和综合推
理机方面,既包括大坝综合安全分析、综合评价和预
测的评判与推理等普遍规律和准则的知识,又包含
了针对每座坝的特殊性,提出了关键问题的评判准
则。另外,针对目前国内外专家系统在运行时,知识
不足,有时无法推理分析的问题,系统中又设置了多
层次阈值模糊评判,从而使专家系统在综合分析和
评判大坝安全时,总能得到明确的结论。

与此同时,系统中有各类先进分析软件的方法库。因此本系统具有广泛的推广应用价值。

1 总体结构及网络

根据《水电站大坝安全管理暂行办法》,本系统的目标是:根据各监测量(变形、扬压力、渗流量、应力应变、断裂开度等)和日常巡查的结果,依据各类规范和专家的经验,实时分析和评判各测值的性质,

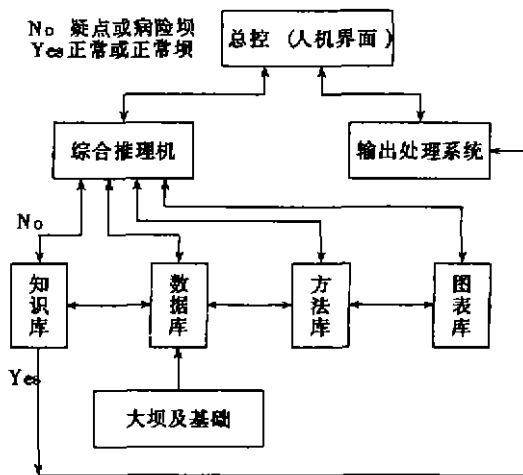
及时发现运行中的疑点,并对此作出物理成因分析和解释。然后,重点结合大坝的关键问题,综合评判大坝的安全状况,对异常或险情作出防患措施。

在实施上述目标时,本系统主要采用以事实(包括实测数据,各类设计、施工和运行等资料)为依据,以各类规范和精确的专家知识为准绳,对大坝的实时安全状况作出综合分析 and 评判。

为了实现上述目标,本系统总体结构由“一机四库”组成(见附图)。各部分的内容和功能简述如下。

1.1 知识库

专家系统的核心是强有力的知识体,即知识工程,它包括领域专家的知识(专业知识)和知识工程师在计算机上实现的专门知识。这也是专家系统与



附图 总体结构

国家自然科学基金委员会和中国长江三峡工程开发总公司联合资助的国家自然科学基金重大项目(59493600-V-2)。

第一作者简介:顾冲时,男,博士,副教授,从事大坝安全监控研究,曾发表《探讨混凝土坝空间位移场的正反分析模型》等论文。

信息分析系统的根本区别。

1.1.1 知识源

本系统的知识主要来源于规范类知识和专家的经验。具体归纳为六大类准则:时空分布评判准则、力学规律评判准则、监控模型评判准则、监控指标评判准则、日常巡查评判准则和关键问题评判准则。

a. 时空分布评判准则。包括突变值和趋势性变化两类,主要用来识别本次测值(δ_i)与前一次测值(δ_{i-1})、相同环境量的前一次测值(δ_{j-1})以及历史出现的极值的关系,以判别本次测值有无发生突变和趋势性变化。以识别大坝运行过程中出现不安全因素的时间和部位。

b. 力学规律评判准则。主要用于识别监测量的测值在空间上的分布是否符合力学规律。

c. 监控模型评判准则。依据长期观测资料分析所建立的各类监控模型(包括测点的统计模型、确定性模型和混合模型,梁挠曲线、水平拱、空间位移场的统计模型、混合模型等)的预报值与观测值的差值在置信带($\pm 2s$ 或 $\pm 3s$)内为正常,否则为疑点或异常。

d. 监控指标评判准则。依据观测资料和各类规范,通过力学分析和反分析,以强度和稳定等作为控制条件,而建立的监测量的控制值。或由设计、运行单位根据长期运行经验而确定的控制值。若观测值在监控指标以内,则正常,否则为疑点。

e. 日常巡查评判准则。根据日常巡查发现有再生缝或裂缝失稳、出现渗漏或渗流量加大、析出物增多或异常、局部出现过大大变形等,则为异常,应加强监测和分析。

f. 关键问题评判准则。关键问题是每座大坝的薄弱部位,如龙羊峡大坝左、右岸的主要滑裂面、断裂交会带的过大变形、集中渗漏等。用关键部位的稳定、变形和渗流等作为控制和评判大坝安全状况的主要依据。

以上评判准则中,既有量化数据,也有专家经验。若在评判中产生矛盾时,以监控指标结合日常巡查作为第一依据;时空和力学规律结合日常巡查作为第二依据(当无监控指标时,可作为第一依据);监控模型并结合日常巡查作为第三依据;最后,用第六准则作为评判大坝安全的主要依据。

1.1.2 知识及表示的基本理论

本系统主要采用模式识别的映射理论和模糊识别理论。

a. 模式识别理论。根据上面的知识源,对大坝安全监测专家系统主要可利用模式识别理论来应用知识。

在自然界中处理时,设被识别目标事件为 X ,它可以有很多表现形式的样本 x 。这就存在某种不透明映射 $R_p(x)$,它将所有这些模式映射到 $C(x)$ 中($C(x)$ 是 Z 设定的类别)。这样,任一或所有模式均被识别并分类到目标事件的类别中,人类专家用感知和认知器官来处理并实现这一不透明映射。

在计算机模式识别中,用清晰的描述方式——透明映射方式来替代自然界中的不透明映射,即 $R_p(f(x)) \rightarrow C(x) = X$ 。为此,首先建立描述被识别目标事件 X 的特殊表现形式,即从 X 到 $f(x)$ 。然后,由计算机进行显式处理,以得到透明的映射, $R_p(f(x))$,实现从 $f(x)$ 到 $C(x) = X$ 的分类。

上述的抽象概念,我们用一个实例加以说明:人们想认识“大坝目前的安全状况”这个目标事件(X),通过各监测量的分析、日常巡查等一系列的信息(x_i),由模式即特征例示的表述(即各评判准则和推理准则)($f(x_i)$),实现从 $f(x)$ 到 $C(x) = X$ 的识别,即大坝的安全评价。

b. 模式识别模型。模式识别模型有三种:分类模型、估计模型、属性值估计模型。这种模型有三个要点:①特征提取,即决定如何对目标事件 X 的表现形式(样本) x 在 $f(x)$ 的形式中符号化描述;②透明映射 $R_p(x)$ 的学习,即用一组标识模式训练集来推断出判决准则;③实现映射 $R_p(f(x))$,完成识别事件 X 。

由于分类模型限制太多、也太严格,很难用来解决变化多端的问题。

估计模型将目标事件 X 的表现形式(样本) x 用 $f(x)$ 来描述。 $R_p(f(x))$ 把每一模式的 $f(x)$ 映射为一个适当的 $A(x)$ 。此种模型的特点是用有限个样本来进行学习映射,每个标识样本有一个相应的属性值,当多于一个属性时,则有若干个相应的属性值,这不仅要能正确地按模式属性把所有的训练集模式分类组合,而且也必须处理新的模式。从而可通过映射 $R_p(\cdot)$ 来估计正确的属性值。当类别标号是主要的,且仅关心属性,那末就蜕变为上述的分类模型。

不确定性的属性值估计模型。设 X 事件的不同样本 $x_1, x_2, \dots, x_k, f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_k)$ 是这些样本相应的符号化模式的表达,经映射 $R_{px}(\cdot)$ 将 $f(x_i)$ 映射为 $A(x_i)(i=1, 2, \dots, k)$ 。同理将事件 Y 的不同样本 $y_1, y_2, \dots, y_m, f(y_1), f(y_2), \dots, f(y_m)$ 经 $R_{py}(\cdot)$ 映射为 $A(y_i)(i=1, 2, \dots, m)$ 。所感兴趣的属性在每一场合都相同(即属性的名称相同),但估计值分别为 $A(x_1), \dots, A(x_k)$ 和 $A(y_1), \dots, A(y_m)$ 。这种模型在多于一个类别,并且在特征空间类别交叠时,解决估计属性的估计值问题。

本专家系统的评判准则类知识(即知识库)主要采用分类模型;推理类知识(即推理机)主要采用估计模型。

c. 模糊识别的基本理论。大坝安全监测专家系统对疑点进行成因分析时,若采用上述模式识别模型,而知识中又无 $A(x_i)$,使成因分析无法进行下去,而进入“黑箱”。此时,需要综合专家的经验,应用模糊识别理论,对问题作出综合评价。其隶属度函数的定义如下。

①模糊集 A 。若集合 X 包含了所有的事件 x ,那末 X 中的模糊集 $\bar{A}$ 是一个有序的对集,即

$$\bar{A} = \{(x, \mu_{\bar{A}}(x)) | x \in X\} \quad (1)$$

式中的 $\mu_{\bar{A}}(x)$ 称为隶属度函数,其值表示 x 对模糊集 $\bar{A}$ 的隶属程度,也是确定性质量 x 与模糊概念 $\bar{A}$ 的相容程度。如大坝安全评价(X)中,包含有设计标准、强度、稳定、施工质量、运行、原型工作性质和库区滑坡等(x')各子项,各子项中又有 x^2 事件。这样构成多层次的模糊集 $\bar{A}^{(1)}$ 。

②模糊子集 $S(\bar{A})$ 。分下面三种情况。

定义1 模糊集 $\bar{A}$ 的子集 $S(\bar{A})$ 是隶属度函数 $\mu_{\bar{A}}(x) > 0$ 时的所有 $x \in Z$ 构成的非模糊子集。在综合评判给出各子项目综合指标(r, R)时,采用非模糊子集的原理。

定义2 在模糊集 $\bar{A}$ 中,由隶属度不小于 α 的元素所构成的集合,称为 α 水平集。即

$$A_{\alpha} = \{x \in X | \mu_{\bar{A}}(x) \geq \alpha\} \quad (2)$$

而 $A'_{\alpha} = \{x \in X | \mu_{\bar{A}}(x) > \alpha\}$ 称为强水平集。在综合评判中,各专家对子项目的评判权和评分采用此原理。

定义3 模糊集 $\bar{A}$ 是凸集,如果

$$\mu_{\bar{A}}(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) > \min(\mu_{\bar{A}}(x_1), \mu_{\bar{A}}(x_2)) \quad (3)$$

$$x_1, x_2 \in x, \lambda \in [0, 1]$$

若一个模糊集的所有 α 水平集都是凸集,则该模糊集为凸性集。在综合评判中,用关键因素的安全指标控制安全评价的级别,即阈值模糊评判原理。在安全监测专家系统中,采用了多层次阈值模糊评判原理。

基本原理是将大坝安全评判分若干层次(一般为2~3个层次),先从最低层次开始,进行单项模糊评判然后,将其结果逐级向上层次递推,最后,对第一层次进行评判。若主要观测量(如变形和渗流)的安全指标达不到标准时,则认为是异常或险情。

安全监测的评判模型见附表。

评判方法中,第 i 层次 j 项的评判矩阵为

$$r_{ij} = |r_{jm}| = |l_{jm}| [p_{jm} b_{jm}] \quad (4)$$

式中 r_{ij} 为第 i 层次的 j 项的评分(或安全指标); $|l_{jm}|$ 为主要因素集; p_{jm} 为专家评语集; b_{jm} 为专家评判权集。

总评判矩阵

$$R = |R_j| = |L_j| [P_j B_j] \quad (5)$$

式中 R 为评分(或安全指标); $|L_j|$ 为主要因素集; $|P_j|$ 为专家评语集; $|B_j|$ 为专家评判权集。

附表 评判模型

一层	大坝安全监测										滑坡稳定			
二层	变形性态		应力性态		裂缝开裂状态		渗流		日常巡视		变形性态		渗流	
三层	顺河向水平位移	垂直河向水平位移	铅直位移	垂直位移	最大主应力	最小主应力	X向开度	Y向开度	Z向开度	扬压力	X向位移	Y向位移	Z向位移	地下水位
专家打分	1													
	2													
	...													
	n													

1.2 推理机

推理机是对大坝运行状态作出综合推理求解。首先根据知识库的上述准则,识别测值的性质。若为疑点,应用推理链进行成因分析,识别疑点的性质。若识别为异常,对其进行物理成因分析,若还需定量分析时,应用结构或渗流反分析程序进行反分析。当推理无解,找不出疑点的成因时,进入专家综合评判。

1.2.1 识别

识别每次测值是正常,还是疑点。若为正常,将其成果输出。若为疑点,则进入下步分析。

1.2.2 疑点成因分析

经上述识别,若测值为疑点,首先检查观测原因,包括下列内容。

a. 观测记录、计算有无错误。若是此原因,修正测值,排除疑点,成果输出。否则,进入下面检查。

b. 检查监测系统,包括基点、测点、测线、观测仪器等问题。若是此原因,排除疑点,成果输出。若非此原因,则为异常,进入物理成因分析。

1.2.3 异常的物理成因分析

a. 首先进行环境量分析,即外因分析。包括水位、温度等有否特殊变化,有否发生强烈地震和采用重大工程措施等。对变形和应力还要分析扬压力和地下水位有否特殊变化。

b. 基础分析。在上述环境量作用下,分析基础

尤其是主要滑裂面和地质结构面有否产生过大变形或滑动,帷幕或排水是否受损。

c. 坝体分析。在上述环境量的作用下,或者基础产生过大变形(或滑动),或帷幕、排水等受损等情况。分析坝体有否产生过大变形或裂缝。

d. 成因反分析。当坝基和坝体在环境量产生特殊变化时,若需定量分析物理成因,调方法库的有关程序进行结构或渗流反分析,给出产生异常的定量成果;应用推理链,若找出疑点或异常的成因,则将其成因输出,否则进入下一步评判。

1.2.4 综合分析和评判

a. 首先输出上述疑点的时间和部位及其上述推理分析过程。

b. 邀请有关专家对上述疑点分析可能产生的原因。然后,进行综合评判,确定或初步确定疑点的成因。

c. 若判断为异常或险情时,可以应用有关程序进行结构和渗流反分析,提出运行控制水位的建议。

1.3 工程数据库

工程数据库提供识别大坝运行状态的推理求解过程的定量分析数据。根据数据的性质,工程数据库分为原始数据库和生成数据库。

1.3.1 原始数据库

原始数据库存储直接采集的数据、资料 and 知识,或尚未作进一步整理和分析的数据、资料 and 知识。主要包括:工程和安全概况,监测系统采集和整编的数据和资料,结构和渗流分析的计算简图或有限元网格的单元和结点编号、坐标,物理力学参数的试验值等。

1.3.2 生成数据库

生成数据库存储经整理和分析的数据、资料 and 知识。主要包括:①观测资料分析,即监测量的特性值、模型因子的回归系数、预报模型和监控指标等;②结构分析,即强度和稳定分析的计算工况以及计算成果等;③反分析成果,即参数反演值,强度和稳定的敏感性反分析成果等。

1.4 方法库

方法库是用于观测资料处理、分析和反分析,结构和渗流分析以及综合评判等各类程序。

1.4.1 结构和渗流分析软件包

结构和渗流分析软件包包括:①规范类应力和稳定分析程序;②线弹性动静力、粘弹性、粘弹塑性、渗流等有限元分析程序。

1.4.2 观测资料类分析软件包

观测资料类分析软件包包括观测资料预处理程

序、回归分析类程序、建立各类监控模型程序、参数反分析程序、监控指标反分析程序。

1.4.3 综合评判程序

采用多层次多目标的专家综合评判程序作为综合评判程序。

1.5 图表库

图表库主要用于贮存和处理工程和安全概况,观测资料整编、预处理、分析和反分析,结构和渗流分析以及综合推理分析和评判的各类图表需求。

1.6 总 控

总控主要控制“一机四库”的综合调用,完成输入—综合推理分析—输出的程序。

2 开发工具

在软件开发工具方面,系统采用开放式平台网络原理管理知识库、推理机、数据库、方法库、图表库管理系统。其中:知识库和推理机用 C 语言,推理结论用汉化显示;数据库用 Oracle 关系数据库;方法库用 FORTRAN 或 C 语言;图形库用 AutoCAD。

在硬件方面,系统采用工作站或微机网络,对于后者,配置一个文件服务器,2~3 台微机。其中:服务器用来储存各类资料、数据,进行大型结构和渗流分析及反分析;一台微机作为主控机,调用服务器中的资料和分析成果,进行评判和推理分析;其它微机作为部门机,可作为观测数据的暂时储存,也可以进行分析评判等。

3 系统功能及工程应用实例

在上述硬件配置条件下,并经观测资料、结构和渗流全面分析和反分析,已建立了各类评判准则和推理网络,并弄清工程的关键问题后,在这样的条件下,在紧急防范时,系统处理时间约 1h,一般情况为 3h。

系统已应用于丹江口、古田溪三级和龙羊峡大坝的安全分析。其中:丹江口、古田溪三级大坝已经一年多的考验,丹江口使用本系统后,水位提高 2m 运行,增加水量 14 亿 m^3 ,增发电量 2.33 亿 $kW \cdot h$;古田溪三级大坝实时分析了运行中存在的问题,为管理部门提供了决策建议。下面重点介绍系统在龙羊峡工程中的应用情况。

3.1 系统的开发和调试

应用本系统的“一机四库”的管理系统,根据龙羊峡大坝的设计、施工运行和监测资料、数据和知识以及分析和反分析成果,组装在“一机四库”内,形成龙羊峡大坝安全监测的“一机四库”专家系统。并将成果于 1994 年 5 月在青海省电力局的计算机内组装,根据运行情况进行了完善。

(下转第 55 页)

横断面尺寸设计的直接求解的显式函数关系式。式中, Q, n, i, α, m 均为已知量, ξ 则可根据设计者的意图选择确定。于是, 其右端均为已知量, 故 h_1 可直接一次成功地解得, b 及其它尺寸由前述关系式依次求得。至此, 横断面尺寸一次准确设计完成。

2 公式的应用与算例

圆弧底渠道设计的步骤为: ①根据边坡系数 m , 由式(1)求得 α 值, 单位为弧度; ②选定 ξ 值, 以确定断面形状: ξ 值大, 为宽浅形状, 反之则为窄深形状; ③将 ξ, α, m, Q, n, i 代入式(14)或(16), 则解得相应的 h_1 ; ④由 h_1 及式(15), (2), (3), (5), (6)依次求得 b, t, r, h, A , 渠道正常水深 $h_0 = h + h_1$, 如有必要, 其它参数亦可相应求出。

算例: 某工程输水渠道拟采用圆弧底梯形断面, $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$, $m = 1.25$, $n = 0.03$, $i = 0.00625$, 试进行其横断面尺寸设计。

解: 取 $\xi = 0.5$, 则 $\alpha = 2\arctan(1/m) = 1.3495 \text{ rad}$ 。将 Q, m, n, i, ξ, α 数据代入式(14), 求得 $h_1 = 1.6104 \text{ m}$, $b = 0.8052 \text{ m}$, $t = 1.0065 \text{ m}$, $r = 1.2889 \text{ m}$, $h = 0.2825 \text{ m}$, $A = 6.1457 \text{ m}^2$, $h_0 = 0.2825 + 1.6104 = 1.8929 \text{ m}$, $v = 15/6.1457 = 2.4407 \text{ m/s}$ 。

3 结 语

a. 本文提出的圆弧底渠道横断面尺寸直接求

(上接第 38 页)

3.2 系统的应用

应用本系统对龙羊峡大坝安全分析后, 对该大坝的安全状况得到下列结论。

a. 疑点的识别和成因分析。根据知识库的六大评判准则, 发现了龙羊峡大坝从 1986 年 10 月运行以来, 有三次变形疑点, 经推理分析, 对三次变形疑点作了物理成因分析(详见《龙羊峡水电站大坝安全状况分析专家系统》, 青海省电力局, 河海大学, 1994)。

b. 龙羊峡大坝的关键部位 ($G_4, F_{73}, F_{215}, F_{120}$ 等) 的变形变化规律正常。

c. 龙羊峡大坝在经历 2577.58 m 的水位后, 曾经历过一次变形调整过程, 经调整后, 大坝工作性态正常。

d. 龙羊峡大坝在经历 6.9 级地震时, 前后变形测值变化很小, 说明龙羊峡大坝经受住了强地震的考验。

e. 龙羊峡大坝的强度和稳定满足安全要求。

综上所述, 龙羊峡大坝经蓄水初期的考验, 大坝工作性态正常, 可进一步提高水位运行。

6 结 论

由上述分析得到下列结论。

a. 开发了由“一机四库”组成的大坝安全专家

解公式具有结构简单、求解方便、成果准确的特点; 无须迭代试算、图解, 亦无须插值求解, 可直接求解。从而, 使得这一问题的求解功效得到很大的提高。

b. 式(14)和(16)表明, 圆弧底渠道横断面形状取决于参数 m, ξ 。 m 的取值决定于渠道所处工程地质情况及其工程建筑材料等; 而 ξ 值的确定, 则与宽深比有关, 一般可根据经验或设计要求选定。

c. 在 m, ξ 取值范围内, m 值的任意性表明, 在设计过程中无须查表, 无须作相应的插值计算; ξ 值的任意性表明, 工程设计者可根据设计具体条件选择 ξ 值, 从而获得较为优化的横断面设计。

参考文献

- 1 张喜昌. 圆弧底渠道断面的水力近似计算. 农田水利与小水电, 1987(9): 25~26
- 2 田媛. 圆弧形渠道正常水深和圆弧半径的迭代试算法. 甘肃水利水电技术, 1987(1)
- 3 张生灵, 张步南, 沈军等. 实用明渠水力简捷计算法. 北京: 农业出版社, 1993
- 4 季国文. 方圆形无压隧洞横断面水力计算. 海河水利, 1995(3): 30~32
- 5 季国文. 圆形无压隧洞水力计算的简化公式. 海河水利, 1994(6): 32~33

(收稿日期: 1996-04-01 编辑: 张志琴)

系统。该系统从本质上不同于信息管理和分析系统, 并成功地应用到实际工程。

b. 总结归纳了大坝安全监控领域内的各类规范和专家知识, 有强有力的知识体。

c. 有先进分析方法组成的方法库, 可以建立各类监控模型、监控指标、结构和渗流分析以及综合评判决策等程序, 以提供大坝安全分析和评判的定量依据。

d. 有各类资料和数据等的工程数据库以及分析评判图表需求的图形库, 以支持“以事实为依据, 以各类规范和专家知识为准绳”, 满足大坝安全分析和评判对数据和图形的需求。

参考文献

- 1 Waterman D. A guide to expert system. New York: Addison-Wesley, 1985
- 2 Heyes-Rothetal F. Building expert systems. New York: Addison-Wesley, 1983
- 3 陈世福, 潘金贵等. 知识工程语言与应用. 南京: 南京大学出版社, 1989
- 4 殷勤业等. 模式识别与神经网络. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 5 吴中如等. 水工建筑物安全监控理论及其应用. 南京: 河海大学出版社, 1990

(收稿日期: 1996-04-29 编辑: 马敏峰)