

# 大坝安全监测总论



# 简论水工建筑物及其基础 安全监测系统设计

曹乐安

摘要：曹乐安（1915.11—1991.4）国家勘测设计大师，我国著名水利工程专家，水利部长江水利委员会原副总工程师。本文是曹总生前关于水工建筑物安全监测的一篇专论。其中关于安全监测的目的、安全监测系统的结构、量测系统的设计原则、资料管理系统的建立等论述，指导了葛洲坝、三峡等我国大型水工建筑物安全监测系统的设计，为现代安全监测和监控理论的发展做出了贡献。

关键词：水工建筑物；安全监测；量测系统；资料管理系统

## 1 引论

水工建筑物及其基础的设计、施工与运行，已经积累了相当丰富的实践经验，由于目前人们对建坝所需研究的地质条件、水文情况、自然环境因素的影响、水流的耗损作用等，在认识上尚有一定的局限性。因此，在大坝建设中还难免潜在万一的风险，再加上大坝下游，常有人烟稠密、经济发达的地区，一旦不测，损失惨重。所以，有关大坝及基础的安全问题，已引起普遍的关注与重视，对大坝及基础运行性状的监测，就成为保证其安全运行所必备的措施。

监测是指直接或藉专设的仪器，对基础岩体及建筑在其上的水工建筑物，从施工开始前及在施工过程中，水库第一次蓄水过程中以及随后的运行期间所进行的量测与分析，达到下面三个目的：

(1) 为了短期（水库第一次蓄水）和长期大坝及基础统一体的安全，对运行性状进行监测。

(2) 为了提高将来设计水平，将实际状况与设计预测的进行对比。

(3) 掌握施工过程中坝与基础的实际性状，据以修改、补充设计或施工技术方案。

要达到第一个目的，首先要能准确、及时地提出监测资料；特别要能及时检测出反常性状。完成第二、三个目的所要求的任务，必须要由有经验的工程技术人员掌握一个比较符合实际的设计模型或预报模型，通过预测与实测值的对比，来检验和判断设计所采用的参数和假设与实际相差的程度，做出相应的修改、补充，达到提高设计和施工水平的目的。

例如，葛洲坝工程的建设，虽有细致周到的勘探、测验工作，全面深入的科学研究，先进审慎的设计作为依据，但由于工程本身的重要性，对主要水工建筑物及其基础的实际性状，从施工开始到正常运行的漫长过程中的可能变化进行监测，仍属十分必要。为此，

在工程设计的初始阶段，就将观测设计列入设计整体计划。随着修改初步设计工作的展开，逐步明确必须针对葛洲坝工程本身在基础上和建筑物上的特殊问题与关键技术问题组织监测方案，而且要以建筑物与基础作为整体来衡量夹有多层剪切带的软弱岩体性能，以及在长期运行中的变化趋势，乃是整个工程的安危所系。因此，对基础的监测，应该列为监测的重点，从沿坝轴线的地质条件比较可知，二江泄水闸的一、二闸段六个闸孔的基础为薄层岩体，抗剪强度低的剪切带就处在建基面下，其下游部位又为一条倾向上游的小断层所切割，形成临界的浅层滑动格局，是影响整个枢纽安全的关键部位，而二江泄水闸在主要建筑物中，又担负着控制运行安全的重大任务，据以上两方面的情况，二江泄水闸也应是监测的重点。从而在葛洲坝工程的监测设计中，演变出既包括一般的监测内容，更着重工程本身的特殊与关键项目的监测方案。要把上述监测方案付诸实施，实践使我们认识到在安全监测系统的设计与管理方面必须正确处理以下几个问题。

(1) 安全监测系统的结构要完整。要形成比较完整、可行的安全监测系统，首先要转变设计方面的两种积习：一种是只重视布置为量测环境原因量（水位、气温、水温）和结构效应量（变形、应力、应变、坝体内温度、基础渗压、渗流、渗水水质等）的量测系统，而对从量测系统收集到的实测资料数据，至多在运行初期检验其变化趋势，或满足于查看大坝管理单位发送的定期表报，至于如何判别实测资料的可靠程度，如何及时处理分析实测资料，如何及时地根据对实测资料的处理分析结果来解释建筑物及其基础的实际运行性状与安全程度，则比较放任；有的则在布置观测仪器时倾向贪多，而对浩繁的观测资料堆积不问，对这种现象必须提醒。另一种是只尊重专业分工的规定，划分为“外部”和“内部”观测，既不顾对本结构整体反应的效应量，分裂地进行观测，也不顾综合“外部”和“内部”观测资料，对建筑物的整体性状进行评价。这两种积习是和当前国内外先进的大坝安全监测系统设计的发展趋势背道而驰的。回顾我国在 50 年代，基本上和某些外国同时开展对大坝的安全监测工作，时至今日，已经过去 30 余年，我们的水平不但提高不多，而且与那些国家的差距却拉大了，究其原因，与这两种积习是有千丝万缕的联系。从 80 年代初开始，我们紧密结合葛洲坝工程安全监测的实际需要，特别是要求从整体上，及时判明以二江泄水闸及其基础为代表的枢纽建筑物的实际性状，促使我们逐渐和这两种积习脱离，协调地开展探索工作，已经获得虽是初步的但是实用的成果。

据近几年的探索，我们认为安全监测系统的结构，应该包括两个子系统：第一个子系统为由量测或观测环境原因量与结构效应量的仪器设备以及人工测读所组成的量测系统；第二个子系统为对实测的原因量及效应量进行处理、解释、储存的资料管理系统。研制第二个子系统的目的，首先解决资料处理、解释和建立数据库的方法问题，其次则在运用近代计算技术和计算机技术的基础上，选用适合现场使用的硬件，并建立软件与之相适应，使其能自动进行资料处理、解释，以利及时掌握建筑物及其基础的运行性状，及时评价其安全程度。目前，葛洲坝工程安全监测系统的第一个子系统——量测系统已基本建成，第二个子系统已经初具规模，尚等在实践中进一步完善，其中，特别是实测值与预报模型理论值两者间偏差的容差限值评价安全程度的一个重要标准，还须根据对正常运行后一定期间内统计值的分析，才能抉择。因此，在今后完善资料管理系统的一段过渡时期内，可采取以下两个步骤

第一步，在人工采得效应量的资料数据后，可利用资料管理系统的数据库的功能，画出变形、渗水量、渗压力、局部或个别重要部位的结构应力等效应量的变化趋势，据以衡量建筑物及其基础的安全状况。

第二步，与第一步基本同时，反复检验作为解释模型的统计学、决定论和混合模型<sup>①</sup>，并积累上述实测值与理论值之间偏差的容差限值的统计资料，从而达到据预报（解释）模型及相应容差限值来衡量安全状况。

(2) 参考国内外大坝安全监测的经验教训，有不少的坝出现险情的部位并不发生在装设仪器监测的断面上；也有监测仪器装设齐备的大坝然而却失事了。因此，安全监测系统并不能包揽大坝的安全，这是必须正确认识的，因为不论安全监测部位如何周到，监测项目如何齐全，但就枢纽整体而言，仍属局部；而且人们对事故类型、可能发生的部位和时间，尚不可能预料。为了确保枢纽整体的安全，纵使有了符合枢纽建筑物及其基础实际、具体条件比较周全的量测系统，也还必须要有掌握和熟悉建筑物及其基础全面情况的监测人员或设计人员，进行经常的或定期的全面、深入、认真的现场目视检查，与之紧密结合，庶几可以对整个枢纽的安全状况以及在后续运行中应该注意的事项或需采取的措施，作出可靠的评价。

(3) 衡量效应量的变化，是以原始状态为依据的，所以量测系统中基点、工作点、测点、仪器设备等埋设装置的时间，都必须妥善地做出安排，以取得描述原始状态的初始值。为此，一方面要在设计中予以周到的考虑；另一方面要在施工中作为一道必不可少的工序，按规定要求进行，并在安装完成检查合格后，测量初始值，这里特别要提出：作为变形量测系统的控制网，必须在破土动工前建立好，也应测量得初始值。

(4) 效应量的实测值，是我们据以判断建筑物及其基础运行性状和安全程度的根据。因此，它的首要的条件必须可靠，道理是很显然的，但在诸多的实测值中，由于种种原因，误差却是不可避免的。因此，首先对采集到的实测资料进行可靠性检查，然后才对可靠的实测资料进行其他处理、解释、归档，这是保证对实际性状和安全程度作出可靠评价，即是关系到整个监测系统有效性的重大问题，强调指出资料可靠性检查的意义，是不为过的！

由于坝与基础统一体是一个比较复杂的实体，因此，要求有一个周全而又适用的监测系统来进行监测。下面结合葛洲坝工程的具体实际，就监测系统的必备条件、监测内容以及量测、处理、解释、储存等子系统的主要设计进行阐述。

## 2 监测系统的必备条件

水工建筑物及基础受周围环境因素变化的作用，按各自的物理力学性能对那些作用作出不同的反应。于是，就监测建筑物及基础的性状而论，将视原因或环境量（由于其变化导致建筑物及基础内部的变化）与效应量（构成建筑物及基础对原因量的变化产生的反应）两类不同的物理量而定。

一般说，作用于建筑物及基础的主要原因量有：库水位、气温、水温及建筑物与基础

① 决定论模型（英文为 deterministic model）现翻译为确定性模型。

材料温度、降水（降雨和降雪）、大气状态（湿度、气压及风情），冰厚，地震，洪水，基础及库岸岩体的失稳。就葛洲坝工程的具体情况来看，可能的影响因素有：降水而导致基础渗流的变化；大气状态导致建筑物体积与受力的变化；库水深度使库底倾斜导致位移的变化；超出设计的洪水导致漫溃；由于未能察觉整个坝基是古滑坡体的一部分导致整体滑走，或由于库岸坍塌导致巨大涌浪；坚厚冰体的推力；地震的破坏等。有的影响极微，有的可根据将来运行情况酌予考虑，有的影响根本不存在。因此，可以认为水位（包括上、下游的水位）及温度是起决定作用的原因量。

建筑物及基础一般产生下面一些效应量：内部应变及应力；局部应力集中；绝对的和相对的水平与垂直位移、偏转；接缝及裂缝的张合；渗流流量、渗水水化学及其浑浊度；扬压力及孔隙压力；以及坝与基础材料物理力学性能的改变等。例如，在葛洲坝枢纽建筑物及基础岩体特定条件下，有必要对上述效应量进行全面监测，但影响枢纽整体安全的关键效应量，则依次为：基础岩层的绝对水平位移（是否会沿抗剪能力弱的剪切带产生意料所不及的向下游大量滑动），基础岩体渗流变化（是否会削弱建筑物及基础的整体抗滑能力，是否会沿剪切带或断层产生意外的管涌现象变化），基础岩体不均匀垂直位移（是否会产生过大的不均匀沉陷，导致建于其上的水工建筑物产生过分的变形，不但其本身发生影响安全的裂缝，而且波及装设在建筑物上的控制闸门，使之运转不灵），某些接缝的压缩变化（指监测岩体位移的某些接缝，如若压缩量比预期的大或压缩过程比预期的长，都将改变所在建筑物的受力条件，甚至影响安全），以及岩体中剪切带岩石物理、力学、化学性能的演变（是否会削弱强度和因软化而变形增加）。以上只是从两类物理量的静止状态来谈的，事实上，随着时间的推移，不论原因量或效应量都在不断地变化着，为了评价与建筑物及基础反应模式有关的相应相关程度，有必要测出两类物理量随时间的变化程度，从相应相关关系就可评价变化着的原因量与效应量对整体安全的影响。

要使监测系统能够完满地完成监测建筑物及其基础对水位、温度这两项主要原因量的反应任务，并且及时地评价各个效应量所表示的安全程度，一个有效的安全监测系统必须具备以下三个条件：

第一个必备条件是：量测的速度与频度需与量测物理量的演变速度相一致；量测的精度需与被量测物理量量级与变化幅度相适应。

第二个必备条件是：要有可能同时和全面地处理务实测量的分析与比较。事实上，对建筑物及其基础安全状态的检验，必须以所有实测量为根据，而不能视单个变量或单组变量为转移，当然，所有实测量的相容性，是要事先予以检查的。

第三个必备条件是：要能在量测完成之后，立即完成处理、分析工作。

在精密电子仪器技术、电子计算机技术、电信传输技术、数值计算技术发达的今日，完全可以制成联机实时的自动监测系统来满足上述三个必备条件的要求，当然，量测的精度、速度与全面及时的安全评价是必不可缺的，但是精度与速度都具有相对的概念，并且应该根据葛洲坝工程的具体条件来定量测快慢、评价时距短长的要求，更重要的是不能脱离当时的技术水平和当前国情来规定建筑物及其基础安全监测的人工与自动化所占的轻重。从葛洲坝工程的实践，比重是变化的，可分三个阶段：

第一阶段：量测系统的所有测点与埋设仪器都是由人工使用常规设备测读，并将读数

按规定格式记录。资料处理、解释、编制表报并最后归档，概由人工承担：资料处理开始，先检验原始读数（原始资料）的可靠性，再将经检验的读数转换成工程数值，然后结合过去实测资料进行统计学处理，得出相应的效应量实测值，于是将此实测值点绘于有关的曲线上，视其是否与总的变化趋势一致，或将此实测值与相应的设计预期值比较，并结合其他效应量和现场目视检查资料，判断是否运行正常。这种资料处理、解释的过程，是比较费力的，需要的时间比较长。所以，安全评价从完成原始资料采集记录到提出评价报告，历时就比较长。因此，全靠人工操作的这一阶段，其存在的致命问题，就在不能“及时”。如何使这些工作更快地完成，就是第二阶段的紧迫任务。

第二阶段：量测系统和第一阶段一样，使用常规仪器，靠人工采集资料，但资料的处理、解释、归档等工作则完全依靠微型电子计算机辅助自动地进行资料（数据）处理、资料解释、资料编辑、建立资料（数据）库，为此，要编制配套的软件包（称为资料管理系统），它有进行资料处理，编辑图表、报告的功能，还有建立容纳全部与监测有关资料的数据库（资料库）的功能，在资料解释软件中，有各种解释模型，评价安全度的容差带、超出容差带的技术报警。自动资料管理系统大大缩短了从资料处理到提出安全评价所需时间，完全可以满足及时的要求，也为监测系统提供同时全面处理所有实测量的分析、比较及在取得量测的原始读数后立即处理、分析的两个必备条件。必须在此着重指出的是：本阶段由人工采集资料的量测系统与自动资料管理系统组成的建筑物及基础安全监测系统（见图 1）只有经常的或定期的目视检查紧密结合，才有可能及时地、可靠地、全面地对整个枢纽的整体安全程度作出正确评价。

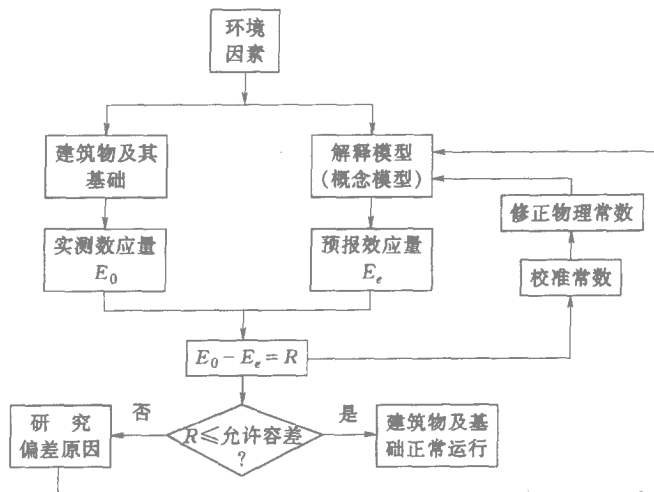


图 1 建筑物及基础安全监测系统流程示意图

第三阶段：为了对枢纽的某些关键部位的某些重要效应量，实行联机实时的安全监测，要建立一个自动安全监测系统，即将第二阶段的第一部分，用能适应资料自动采集装置的量测系统取代人工采集资料的量测系统，与第二阶段的自动数据资料管理系统，通过专用电缆联接起来，就建成了自动监测系统，便可完满地提供全部三个必备条件。

### 3 量测系统

水工建筑物及其基础的安全监测系统里的量测系统，是由量测物理量及其必要转换的若干仪器设备组成的协调统一体。由于建筑物及基础的安全监测是具有时间和空间概念的，所以量测系统的组成，应该视坝的类型、规模及坝在施工过程与运行寿命中的各个不同阶段（第一次蓄水、投入试运行、正常运行以及超过正常寿命后等）而有所变化。

(1) 就某一个坝及基础统一体的量测系统设计而论，一般包括对下列各点的分析研究：

第一点：制约坝与基础统一体的安全度的因素。

第二点：就每个因素来考虑，从安全角度出发，选出能显示坝及基础性状的物理量。

第三点：为量测所选定的物理量所采用的方法、仪器、安装方式、量测精确度及可靠性。

第四点：在坝与基础统一体的内部与外部，仪器装设的疏密与分布。

第五点：量测或观测的频度（次数）。

葛洲坝枢纽的主要水工建筑物为建在夹有多层剪切带的基础岩体上、但高度低的混凝土建筑物。制约安全度的主要因素为沿剪切带的浅层滑动面；夹有多层剪切带的基础岩体渗流与变形；砾岩层中断层及其强透水带，采用新技术的结构部位及部件，以及某些与岩体位移有关的接缝。

通过葛洲坝工程的实践，使我们认识到，在大坝及基础安全监测系统的设计中，就要预见到从施工过程到运行寿命中各个不同阶段，如何利用量测系统，使之发挥更大的效益，也要从监测的不同目的（当然，首要是监测建筑物及其基础的安全状态，但也可结合探明某些科学技术问题）来布置量测系统。

如在施工过程中以及第一次蓄水过程和运行初期，量测系统量测出坝与基础统一体的整体实际性状，可据以判明、检验其直接的安全度，因为整体实际性状由许多复杂因素所决定，而在设计阶段常不可能掌握，量测系统所测出的实际性状，就是对设计的初始检验，而且更为有益的是可根据实际性状，进行反馈分析，据以在施工过程中，对设计与施工技术做必要的修改补充。

又如在运行的长过程中，量测系统提供建筑物整体性状的信息，也指明某些特殊点的运行状态，还可探测出随时间推移的演变趋势。

(2) 据葛洲坝枢纽监测的经验，我们认为：要建立一个能承担上述任务的量测系统，有必要提出下面几点要求：

第一，要由熟悉本枢纽建筑物及其基础具体结构与地质条件，又掌握量测系统技术的专业人员设计和安装量测系统。

第二，仪器系统种类、数量及量测（观测）频度的抉择，要考虑气候、地质等环境恶劣条件。

第三，坝及基础统一体是个复杂的实体，在设计阶段一般是不可能完全了解其复杂程度的，因而我们主张在全面监测各种效应量的同时，必须突出重点，当然主张仪器系统要少而精，不宜数量繁多。主客观的矛盾如何解决？就建在复杂自然环境中的重要枢纽而

论，我们建议对初期装设的测点与仪器数量及其观测频度，不要限制过严，但明确主要监测物理量之后，可以再行缩减。

第四，为了确定与检验某些涉及枢纽整体安全的重要物理量，当有可能时，要在量测系统中为量测同一物理量装设几种或同种几支仪器。

第五，鉴于当前在有些建坝较多、又比较重视安全监测的国家，利用迅猛发展的电子仪器技术与精密造孔技术，出现了两种倾向：一是自动采集数据资料的量测系统；二是为了要求快速取得量测资料，对常规系统采用的大地测量方法这一套量测手段，限制在个别情况下使用；我们从中国的实际条件考虑，认为重要枢纽的少数关键部位中的某些主要物理量实施联机实时监测是有必要的，但在靠自动采集的量测系统的同时，必须装备整套人工采集系统备用，至于常规习用的大地测量方法这一套量测手段，在检验枢纽建筑物及基础的绝对位移与枢纽上、下游地带的地形变化，仍然是整个量测系统中不可缺少的也不可取代的组成部分，为了更好地发挥大地测量手段的作用，建议今后参照葛洲坝枢纽现有监测网分基点检验网、直伸边角网、连续引张线三个层次的概念（不同级别的概念并未降低量测物理量的精度，但减少了工作量），将大地控制（水平向及垂直向）网分成全网、简网、最简网，即从全网中取一定数量的控制点组成简网，再从简网中取最关键的点组成最简网，于是，最简网可以勤测、简网可以少测、全网可以稀测，既保持量测精度与速度的要求，也减少了测全网所需的时间、人力与费用。

第六，必须强调量测系统与现场目视检查紧密结合，综合从局部与全面两个互相补充的途径所得资料，才有可能对枢纽的整体安全度，作出符合实际的正确评价。

(3) 量测系统中，埋设仪器布置要求，主要根据从监测安全角度考虑，当然在必要时，也可按对某些特殊的研究要求来进行布置，一般划分重点、次要和一般三级。

第一级重点断面，选在枢纽建筑物最重要或基础地质条件最复杂，或两者兼而有之的部位。装设的量测仪器系统最为齐全，以期取得大量最能表明坝及基础运行性状的资料，为解释和掌握运行性状，提供可靠的依据；特别是可为校准评价坝及基础安全程度的解释模型提供所需资料（第一级量测仪器系统）。

第二级次要断面，选在枢纽建筑物较重要或最重要但基础地质条件相对简单的部位。装设能全面检测所在断面的坝及基础性状的仪器设备的，以便与重点断面相同仪器设备量测的资料进行对比，从而据以解释建筑物及基础统一体的整体运行性状（第二级量测仪器系统）。

第三级一般断面，重点和次要断面以外的所有其余断面，都装设能显示可能是异常性状的量测仪器。对这类量测仪器的要求，一是要准确可靠地显示出作为安全指标的效应量；二是要结构简单，量测容易（第三级量测仪器系统）。

根据前述葛洲坝枢纽具体技术条件，二江泄水闸是最为关键的建筑物，左侧第一闸段（一个闸段由三个闸孔组成）的地质条件最复杂而基础的边界独特，选定为重点断面，中部第六闸段基础地质条件相对较为简明，采用常规的基础处理措施，选为次要断面，其余闸段定为一般断面。通过贯穿上游基础廊道的引张线，量测出最能表示整个建筑物及基础安全状态的水平位移。引张线是具有准确、简易、快速量测整个泄水闸水平位移的可靠量测手段。

(4) 量测频度(一定时间内的量测次数)。一个有效的量测系统,不单与量测手段及其布置有关,而且和及时量测资料,即合宜的量测频度相联。所谓合宜的量测频度,就是在一定时段内对某个物理量的观测或量测次数,具体地说,量测频度应该和所量测的物理量在紧接的前后两次量测相隔的时段内可能发生明显变化的时间相一致。可见量测频度要视:要量测的量,对要量测量有影响的参数(即静水荷载与温度)的变化速度,建筑物所处运行寿命中阶段、量测仪器的灵敏度,以及其他特殊要求而定。频度的确定,一般应考虑以下准则:

第一,所有量测应该以一个与施工开始前环境条件相联系的明确的原始基准值为依据。

第二,在第一次蓄水过程中,量测频度应与水库蓄水计划紧密联系,按通常规定,第一次蓄水是分阶段进行的,紧接的两个阶段之间留有一段时间,于是,必须在所留时段内,至少进行一次全面量测工作,并将通过可靠性检查和处理的实测资料与相应时段的设计模型预测值相比较。为了能准确跟踪关键性效应量的变化,建议按逐日频度进行坝面及大坝邻近地带的现场目视检查、垂线量测、渗流量与渗压力量测,此外,须逐日记录环境原因量。

第三,在正常运行期间,必须逐日量测环境原因量及渗流;其他物理量的量测频度,可根据上述原则结合建筑物及基础的具体条件确定,但对关键性的效应量,其量测频度,在紧接的前、后两次时距,不宜超过 30 天。

第四,特别要指出的是:整体控制网必须在施工开始前建完并开始量测原始基准值。在第一次蓄水过程中,争取在中期的末尾各测一次全网;正常运行的初期,每半年或至少一年测一次全网;以后酌情而定。

## 4 资料管理系统

资料管理系统由资料处理、资料解释、资料储存(数据库)三部分组成。

### 4.1 资料处理系统

目前,一般要求在用人工从量测系统采集资料数据之前,先对量测仪器和量测工具设备予以检查,验明处于正常工作状态,才可进行量测。

每个测次采集到的原始资料,都必须按规定记录在卷。实践表明:由于种种主客观原因:量测仪器本身的缺陷、量测中产生的误差、记录或传输错误等,原始资料是难免存在误差的,所以,必须首先对原始资料做可靠性检验,只有在验证原始数据可靠之后,才可继续以下各步处理工作。

前面提到葛洲坝枢纽安全监测系统的技术水平,从全局来看,当前(1987年)还处在第一阶段,正向第二阶段过渡,即仍主要由人工工作资料处理工作,将转到由微机辅助自动处理的第二阶段。

目前,资料处理的步骤大致是:验证可靠的原始资料,在必要时,须转换成工程数值;按时序制表或点绘成过程线,凭对过程线的观察(或凭对原因量与效应量的相关分析,完全依靠监测人员的经验与直觉)来作判断。然后整理归档。即使上述处理工作内容不多,但由于数量大,还是费时费力的。

在不久的将来，资料处理工作可完全通过相应软件由微机辅助进行，除上述内容（原始资料记录、可靠性检查、转换工程数值、按时序制表、点绘曲线、存储资料）之外还可进行初步的统计学处理，如为检验演变趋势进行算术平均、动平均、傅里叶分析；为检验某一物理量而进行该量的冗余实测值的一致性分析，以及各量间的交叉相关分析等，最后还可建立合适的数据库（资料）。

关于原始资料的可靠性检查，从我们近年来在这方面的经验，有以下途径可循：先就某一效应量看，可按某测点本身在时间上一致性及与相邻点在空间上相关性作逻辑分析，即定性又定量地对所测某测点的原始数据资料做出检查，再者，大家都知道一个现象可由几个量来描述，而每一个实测量也能说明几种现象，这就产生了冗余信息，利用对冗余信息的分析来检验某一实测值的可靠性，以排除错误的测值，再是采用统计学方法，如剔除粗差或其他方法。总之，检查原始资料数据可靠性的途径不止一条，我们认为，首先要认识可靠性检查的必要性，其次引用实测资料来作对比检查，进行比较简易，理解相对直接，可作为常用方法之一。

在可靠性检查中，必须特别注意的是：对任一偏大或偏小的实测原始资料数据，都要经过审查研究、分析原因之后，才能放弃，因为原始测值与正常值偏离，有可能是险情的信号，如何发现大坝及基础潜伏的险情于其萌芽阶段以确保枢纽整体安全，是安全监测系统的首要任务，为此，要留心每个测点实测原始资料偏离的发展趋势，也就是不仅要对本测次做检查，同时要结合分析从前几次的结果，如果发现不安全的趋势在发展，必须就产生这种不良趋势的原因立即进行调查并逐级上报，这是很重要的一点。再一点，可靠性检查的目的当然是为安全监测提供可靠资料，但必须记取的是，在分析误差存在的原因后，要不止于探明原因，而是要针对探明的原因，采取防止再度发生的措施，为可靠性检查带来更为积极的效果！

#### 4.2 资料储存系统（数据库）

资料处理完成后，在第一阶段用人工方式的情况下，要按规定格式分建筑物部位、监测的物理量等登载记录，逐次归档。每次测得的原始资料，必须归档，以便将来有更合适或更完善的方法时，再行处理。当然，转换了的与经过处理了的资料数据也应归档，以便将来进一步分析建筑物及基础性状的演变趋势。

在自动进行资料处理的第二阶段，在微机辅助自动处理的程序中，自动储存原始资料数据及转换了的与经过处理的资料成果，是一个不可分割的组成部分，自动储存系统（数据库）必须据此要求设计。

#### 4.3 资料解释系统

资料解释，就是根据可靠的实测资料，并经过检查处理得出的实测效应量来分析大坝及其基础的性状，从而判明其安全程度，即是安全评价。

在阐明我们近年来就葛洲坝工程安全监测所摸索出来关于判明安全的准则和采用的手段之前，再一次强调认真、全面、系统的现场目视检查，对评价整个枢纽安全的必要性与重要性，感到仍不为过，一定要牢牢记住凭据安全监测系统所取得的资料，虽然对安全评价是不可缺少的，而且还可能是反应关键部位的关键性物理量，但毕竟代表的只是局部，

因此，还需现场目视检查来补充其不足，两者相辅相成，才有可能对整体安全度作出正确评价。

如何鉴定大坝及其基础安全控制准则？从原则上和实践上看，要设计出一个监测或控制系统，能在施工阶段和运行阶段，具有确证大坝性状与设计预期的一致性的能力。只要这种一致性存在，大坝就具有与设计者所提出的安全程度。若在施工或运行的任一时刻，出现与设计预期性状明显偏离的现象，则要求这个监测或控制系统能显示出这种现象，并将其与影响大坝性状的所有物理量联系起来，以便重新全面分析大坝的安全状态。为了避免分析中的主观成分，在大坝及其基础的设计阶段，就必须规定其安全状态的限值，为此，就必须确定设计模型（基准模型），确定监测最能表征建筑物及基础性状的效应量（物理量）及其在外界条件作用下的变化幅度。于是，安全的控制准则，可根据实测与预测效应量间差值是否在允许的容差范围内来确定。

在这里必须强调的是：由于人们对基础岩体这个实体的复杂性，在认识上还存在很大差距；对建筑物实体中材料实际性能也并没有完全掌握；对建筑物与基础两者的整体作用，也不十分明了，所以，在目前水平上设计模型模拟的逼真程度是值得探讨且肯定有待改进的。因此，在设计阶段按采用的设计模型完全有必要在开始用于预报效应量后，就紧接着根据可靠的相应实测值予以校准，就施工期间几个阶段的检验校准，一般逐步可得出比较符合实际的预报模型（决定论模型），在随后的应用中，当预报值与实测值间差值的变化有增长趋势时，首先要检验用于预报的设计模型（决定论模型），使之更接近实际，更为合理，这就是运用近年来在美国、加拿大、西欧和苏联等国所推行的“观察法”或“反馈分析技术”。我们如能熟练地运用反馈分析技术，对建筑物及其基础安全状态的判断是大有益的。

当建筑物已经运行正常了相当长的一段时间，对建筑物及其基础运行性状积累了相当丰富的统计资料；于是就有条件按统计学概念来定安全控制准则。方法是就一组重要效应量的当前实测值与相应的过去正常运行期间变化范围相比较，如当前值在过去值范围内，而且在某些相关关系上又彼此一致，则建筑物及其基础的运行性状，仍处于安全状态；并可建立起建筑物及其基础性状的统计模型即统计学模型。一旦建立起统计学模型，于是就可和前面的决定论模型一样，采取相同的安全控制准则，不独如此，还可用根据长期运行资料建立的统计学模型来检验决定论模型并校准其所采用的参数。资料解释系统的功能如图2所示。

上述安全控制准则，是评价大坝安全度的一项合理的客观工具，然而安全控制准则的允许容差范围又如何确定呢？

从理论上讲，允许容差范围应根据对万一失事所导致的灾害与损失作合理分析来定。问题是灾害的轻重、损失的大小是不独不易准确计算，而且又随时间推移而变化，更难估计，下面建议两种方法：

第一种方法：用归纳法，即根据适当长期（2~3年）正常运行过程中实测与预报效应量间差值的统计，算出差值的标准差 $\sigma$ ，于是可初步据某些国家所定的下面三个容差带来作判断：

第一带，带宽 $\pm 2\sigma$ ：当差值落在第一带之内，表明大坝及基础的运行性状正常。

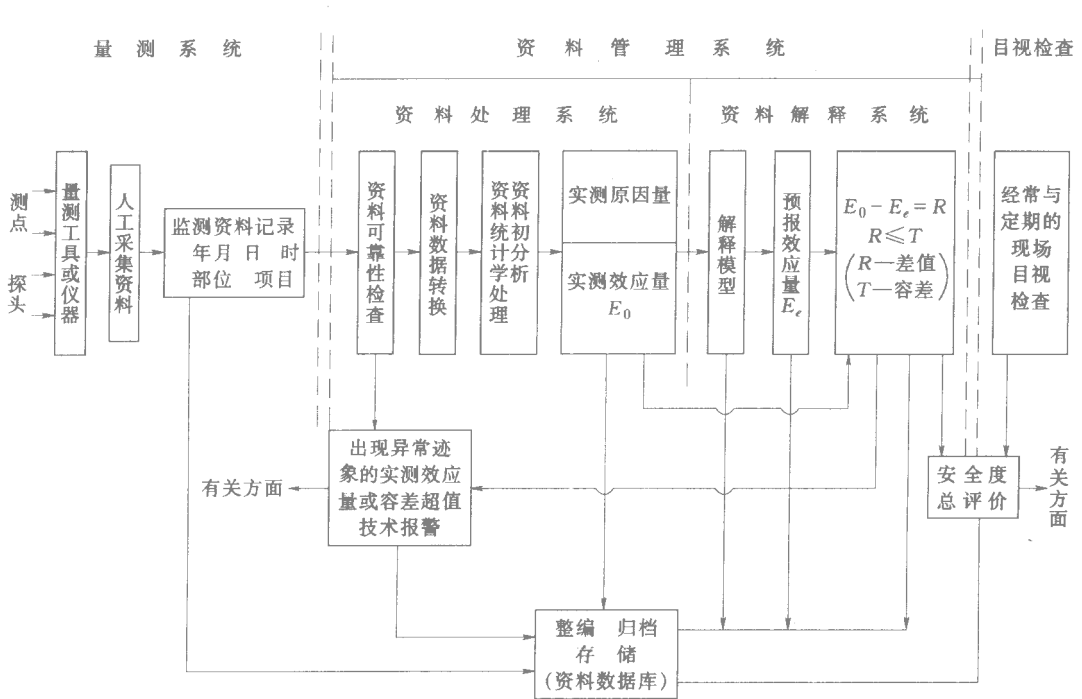


图 2 资料解释系统流程示意图

第二带，带宽  $\pm 3\sigma$ ：当差值落在第一带之外，而在第二带之中，运行性状出现轻微异常，在此情况下，一要注意其演变趋势；二要统计有多少部位和多少效应量发生轻微异常现象；三要加强监测与目视检查工作。

第三带，带宽的下限  $\pm 3\sigma$ ，上限按建筑物及其基础的极限强度用经过检验校准的预报或解释模型算得。当差值超过第二带的上限时，表明运行性状出现严重异常，除继续加强上述三项工作外，要发出“技术报警”，并在主管上级的指导下，研究是否采取干预措施。

当无适当长期的实测差值资料时，则采用第二种方法：用演绎法，即用设计采用的经过施工过程实践检验校准的决定论类型模型，按建筑物及其基础的屈服强度、屈服强度与极限强度的中间强度值及极限强度三种材料弹性、塑性、破坏强度的各种关键效应量，视作预报效应量而与实测效应量对比，视实测值接近何种强度状态下的预报值，判明其所处的安全状态。

这两种方法都有待于今后实践的检验。

上面阐明的资料解释程序，主要依靠从设计模型到在施工实践中检验、校准的决定论类型的解释模型来逐步进行的，由于计算工作量十分繁复，只有藉电子计算机的辅助才能实现。固然可以对某些实测资料自动作定量解释，但必须明确的是：这些解释不应该超出包括人工观测在内的所有过去知识和经验的范围，由于这个原因，若在对某些量的解释时，因差值超过允许容差范围而自动“报警”的问题（由于差值超过允许容差范围，要对量测仪器或解释模型的缺陷所带来的影响进行检验，即要对差值先作检验），就只有极其

有限的意义了，只是简单地引起负责安全人员注意某些效应量，显示有超出正常运行性状趋势的问题。即使负责人员对自动报警，也要凭经验和知识，要依靠目视检查，对警报产生的根源作调查，就是要靠人的智慧和实践作分析，这是一个方面。另一个方面，有可能利用“自动报警”作好监测工作，例如在监测物理量十分繁多的情况下，“自动报警”表明某些监测物理量有超出正常运行性状的趋势，负责监测安全人员应该对这些监测物理量予以注视，这类类似“过滤器功能”的自动报警就有十分必要了，不过，像在上面指出的一样，通过“过滤器”被疑为反常的性状，仍然有待专家的判断，专家们要就显示出的疑点，结合他们所掌握的其他定量及定性的资料，作出判断。

从以上探讨可以认为：纵使是一个完善的监测系统，在现场要靠人的双目作补充检查，在解释方面，也要靠人的智慧和经验作全面分析，总之是离不开有经验善实践的人的！在安全监测系统的设计方面，这是必须记取的。

（该文写于 1987 年，原载 1991 年 6 月《长江科学院大坝安全监测科研成果汇编》，王德厚整理。）

# 大坝安全监测技术的发展趋势与三峡工程安全监测系统设计

王德厚

摘要：本文从大坝安全监测系统设计、监测选择和仪器埋设、自动化监测及遥测技术，资料的采集、处理、解释和安全监控等方面分析了当前安全监测技术发展的趋势和特点，并对三峡工程安全监测系统设计提出了若干建议。

关键词：安全监测技术；三峡工程

## 1 大坝安全监测技术的发展趋势

随着世界各国水力资源的不断开发和利用，大坝及其他类型的水工建筑物，数量在不断增加。因而，水库大坝及其他水工建筑物的安全问题也越来越引起社会公众的关心。国际大坝委员会（ICOLD）在第 8、13、34、15、17 届大会上都讨论了大坝及基础安全监测问题，并先后发表了第 21、23、41、60、68 号公报，对大坝及基础的监测提出了一系列的要求。一些发达国家如美、意、法、日等国都设立了专门负责大坝安全的管理机构，建立了法规、法令和制度。我国政府对大坝安全问题也非常重视，60 年代水电部主管部门编制出版了《水工建筑物观测技术手册》，80 年代颁发了《水库工程管理通则》，近几年能源部、水利部先后成立了大坝安全监察中心和三峡工程安全监测中心，各流域机构、各大网局、各大水利水电设计院和各省市的水利水电部门都有专门从事大坝安全管理和监测的机构和专业技术人员。我国继人大常委会颁布《中华人民共和国水法》之后，水利部、能源部在 1989 年制定颁发了《混凝土坝安全监测技术规范 试行》，1990 年水利部还编写印发了《土石坝安全监测技术要点》。这些工作使我国的大坝安全监测工作逐步走上了正规的道路，也将进一步促进我国大坝安全监测技术的发展。

大坝监测最初是为验证设计，由设计部门提出的，然而，一系列重大水工事故使人们认识到，大坝监测工作对于监视大坝安全来说是必不可少的。这是因为人类对客观规律的认识有局限性，水工建设中的地质勘探、设计施工难以做到完美无缺、万无一失。况且近几年在地质条件复杂的条件下兴建的大库高坝越来越多，使水工建设中的各个环节包含着一定的风险因素，虽然人们可以精心设计、精心施工，提高大坝的安全度，把失事的概率减低到最小程度，但监视大坝性状变化仍是不可缺少的。因此，对任何施工、蓄水和运行中的水库大坝及其他水工建筑物都应布设监测系统，量测坝体及基础的变形（位移）、渗压渗流、应力应变状态等，以了解大坝和基础性状的演变趋势，发现危及安全的异常因素。事实上很多失事的坝在事前的监测资料中都可找到前兆反映，但是，监测仪器的布设和量测频度，很难做到空间时间的连续性。从目前的监测水平来看，监测系统反映出来的各效应量的变化，只是一些分散的不连续的现象。一些重要的异常迹象可能被遗漏，在某

些出事的部位又恰好没有布置监测仪器，或者虽然布置了仪器，但因仪器本身有缺陷或老化，输出的是错误的信息，这些都影响了监测系统的可信赖性。

鉴于以上情况，大坝及基础的监测应该从系统设计、仪器选型、仪器埋设、资料采集、处理解释和管理各方面而综合考虑，精心安排；尽量利用当今一切先进可靠的技术手段，加速专用硬件和软件的开发，逐步实现联机实时的自动化监测和及时定量的安全监控。从近几年一些国家大坝监测技术发展来看，有下面一些动态和特点。

### 1.1 监测系统设计方面

(1) 普遍认为监测的主要目的是监视大坝安全，发现异常迹象。因此，监测系统的设计更加强调整体安全这一条，其次是验证设计和指导施工。

(2) 监测布置应该把大坝及基础作为一个单元来考虑。要加强对基础和坝肩岩体的变形观测和渗流观测。

(3) 监测工作包括资料的量测采集、资料的处理、解释和管理，以及现场目视巡查。因此，监测系统的设计应包括资料量测系统和资料管理系统的设计，还要对现场目视巡查所需的条件作出设计和安排。

(4) 监测系统必须有快速反应能力和应变能力，能适应不同阶段不同条件下监测工作的需要。

(5) 坝体及基础的位移监测，倾向于以正倒垂线与引张线相结合组成整体观测系统，辅以静力水准仪、滑动测微计、钻孔倾斜仪、多点位移计等仪器量测坝体转动和基础变形。同时，在大坝外围布设多级控制网，以观测和控制坝体及两岸的整体位移。

(6) 对于混凝土坝，应变计只用在一些部位；关于渗漏量测，重要的是将一个有效的排水系统与这些仪表相结合。

### 1.2 仪器选择和仪器埋设方面

(1) 仪器的量程和精度必须满足监测要求。

(2) 仪器的元器件应长期耐用，运行可靠，能适应恶劣环境。

(3) 更多地选用在空间上和时间上能连续量测的仪器，如可沿深度连续测量位移的滑动测微仪（瑞士）、测渗压的钻孔滑动测渗仪（法国）、坝体和基岩的声波层析造影（意大利）以及能在时间上跟踪量测的自动化仪器（日本）。

(4) 注意发展垂线技术，包括垂线的安装和自动量测技术（加拿大、瑞士、意大利）。

(5) 注意研制能沿钻孔直接连续量测基岩应力和残余应力的仪器（西班牙）。

(6) 强调仪器的安装或埋设必须严格按照正确的方法进行，以保证运行可靠（日本）。

### 1.3 自动化监测及遥测遥传技术方面

(1) 为了提高资料采集的效率和可靠性，使监测系统能及时起到监视安全的作用，应该发展自动化技术，尽量采用可靠的自动化仪器和计算机技术。发展自动化量测技术是一种趋势，很多国家都在加速开发（美国、意大利、日本）。

(2) 目前发展的自动化监测技术有三种形式：一是偏重数据量测记录自动化（日本、美国）；二是只有资料分析解释自动化（葡萄牙）；三是联机实时综合性的自动化系统（意大利）。

(3) 对边远偏僻、自然环境恶劣的坝址，注意发展无线遥测技术（意大利）或利用通讯卫星遥测遥传监测信息（美国、加拿大）。

(4) 资料的远距离传输多借用电话线或布设专用电缆（意大利）。

#### 1.4 资料的采集、处理、解释和安全监控方面

(1) 强调对大坝在整个施工期、水库第一次蓄水和运行初期（3~5年）全过程的监测（西班牙、葡萄牙、日本）并分别对各个阶段提出监测要求和安全监控指标，以指导工程施工和管理（葡萄牙）。

(2) 以及时定量为目标，使资料处理及时迅速，资料解释定量化（意大利）。

(3) 认为对资料进行定量分析，关键是建立数据解释模型，如意大利、西班牙特别重视建立决定论类型的数值模型。法国对建立和使用统计学模型有深一步的研究。

(4) 西班牙采用渗流量、渗压力和位移三项指标，与库水位、温度和渗流量三项基本参数结合形成决定论模型，对监控资料进行解释。

(5) 发展反馈分析技术，利用实测资料，通过计算模型对设计参数进行反演和检验（意大利、日本）。

总的来看国外大坝监测技术的发展，以意大利取得的成就最大，水平最高，反映了大坝安全监测技术的当今发展趋势，主要表现在以下几个方面。

(1) 提出了对大坝进行实时定量安全监控的概念和方法，促使安全监测的各个环节，包括系统的设计、仪器布设，资料采集，处理、解释及预报等必须进行全面的变革。

(2) 对实际建筑物提出了比较确切的安全度概念。也就是说，大坝及基础是否安全？要看其在外荷载（即原因量）作用下所产生的反映（效应量）变化幅度是否在其材料弹性性能变化幅度所允许的范围之内。

(3) 强调安全监测的成果并不意味着收集多少数据，关键是如何及时地解释这些数据。这种解释并不纯粹是根据经验，而是依据理论模型对大坝及基础的性状作出定量的评价，进而对其安全状态作出正常或非正常的判断。基本方法是对大坝及基础关键部位关键监测项目的监测数据建立理论模型，然后使用这一模型预测此后某一时刻在某一环境条件（如水位、温度）下该效应量的值。当在同样条件下取得的该效应量实测值与模型预报值之差（离差）处于一个弹性允许范围之内时，认为大坝处于正常范围之内，否则认为不正常。

(4) 认为决定论模型能从本质上反映大坝及基础在正常运行状态下效应量的变化规律，可对大坝及基础效应量产生的机理作出定量的分析和解释，因此，对大坝进行安全监控将主要使用决定论模型（或称确定性模型）。意大利国家电力局 ENEL 下属结构及模型试验所 ISMES 和水力及结构研究中心 CRIS，对建立决定论模型的理论和方法做了很多研究工作，有一套独创的方法和计算机程序，并在若干混凝土坝上成功地建立和应用了位移量的决定论模型，如 PONTE COLA 坝、TALVACCHIA 坝、RIDRACLI 坝、BABELINA 坝等。

(5) 研制并在工程上实现了联机实时的全自动化安全监控系统，其功能包括坝及基础主要原因量和效应量数据的自动巡检、量测、采集、存储、制表、随机检索，使用数值模型作安全监控等。