

大坝安全监测仪器技术发展现状与展望

沈省三, 毛良明

(基康仪器股份有限公司, 北京, 100080)

摘 要: 在回顾和总结大坝安全监测仪器技术发展历程的基础上, 结合物联网、MEMS、无线传感器、云计算、大数据等新兴技术, 对安全监测仪器技术及关联技术的未来发展前景进行了分析和展望。

关键词: 大坝安全监测仪器; 自动化测量系统; 传感器技术; 智能仪器; 物联网

0 引 言

大坝作为一种大型建筑物, 因其所在环境条件的复杂性, 虽然在设计、施工、运行维护的过程中, 工程师们已经花费很大的努力去保障系统的安全性, 但由于大坝失事后造成灾难的严重性, 因此进行可靠、有效、持续的大坝安全监测显得非常有必要。随着科学技术、监测设施技术、设计施工技术 and 信息处理技术的不断提高、经验的逐步积累, 世界上很多国家都发布了相应的大坝安全监测设计、施工和管理规范, 通过在水工建筑物中设计并安装埋设安全监测仪器, 以获得大坝及基础的变形、应力应变、温度、渗压渗流等多种运行参数的实时变化情况, 准确了解大坝及基础的演变趋势, 便于及时采取措施规避可能的风险。

大坝安全监测技术的发展经历了一个比较漫长的发展历程, 自 1891 年德国埃施巴赫重力坝开启了人类历史上首次大坝安全监测活动至今, 时间已经过去 120 多年。大坝安全监测技术经历了从无到有、从单一到全面、从原始到高科技的发展历程^[1-3]。业内根据其发展特点将大坝安全监测技术分成如下三个阶段:

(1) 原型观测阶段(1891 年~1964 年), 此阶段的主要目的是研究大坝的实际变形、温度和应力状态, 重点是检验设计, 改进坝工理论。涉及的监测项目不多, 以目测、人工观测仪表为主, 基本上不涉及安全监测仪器技术, 鲜有涉及自动化安全监测技术。以差动电阻式仪器、应变片式仪器为代表的部分大坝安全监测仪器开始出现, 并投入工程使用。

(2) 原型观测向安全监测过渡阶段(1965 年~1985 年), 此阶段的主要目的是保证大坝安全运行。大坝安全监测项目逐渐完善, 部分安全监测技术相关的法律法规出台, 形成了规范性操作标准。各种类型的大坝安全监测仪器(如钢弦式仪器)得到快速发展, 在电子测量技术的支撑下, 各类电测仪表开始出现, 同时出现了安全监测自动化测量系统雏形(集中式测量系统)。

(3) 安全监测阶段(1985 年至今), 此阶段受益于电子测量技术、通信技术、互联网技术、新材料、新工艺等新兴技术的快速发展, 实现了安全监测项目的全覆盖、绝大多数项目实现了自动化测量, 安全监测技术在快速发展的基础上进入成熟期。

值得一提的是自 20 世纪 90 年代至今的这二十多年, 正好是我国水电大坝的高速发展时期, 我国在坝工方面不断挑战极限、创造世界奇迹, 对大坝安全监测技术特别是安全监测仪器技术提出了各种新的需求, 在不断寻求创新的基础上促进了大坝安全监测仪器技术的快速成长与进步。

1 监测仪器技术现状

大坝安全监测仪器是安全监测技术的感知单元，是保证大坝安全监测系统高精度、高准确度、稳定可靠、长期连续运行的基石。形象地说，大坝安全监测仪器就譬如安全监测系统的“感官”^[4]，如果“感官”出了毛病，给出的信息失真，那么后续的数据采集单元、数据分析软件即便功能再强大，其结果也不可能符合大坝的实际运行性态。正是因为安全监测仪器的重要性，随着电子测量技术、新材料、新工艺等新兴技术的快速发展，安全监测仪器一直在与时俱进地持续发展与完善中。同时由于安全监测仪器应用环境的特殊性，特别强调可靠性和长期稳定性，所以相对于民用消费类产品而言，安全监测仪器升级换代速度相对“保守”。即便如此，在过去的一个多世纪里，特别是20世纪90年代以来，中国水电建设进入大发展时期，巨型的高坝大库相继开工建设，在坝工建设领域创造了一项又一项的世界奇迹，与此同时给大坝安全监测仪器技术提出了许多新的课题。通过众多从业人员的不懈努力，安全监测仪器技术的发展步伐始终没有停滞，在传感器原理的先进性与多样性、生产工艺的先进性、传感材料的性能优异性、施工的高效方便性、测量技术先进性等多方面都取得了长足进步。在此期间，钢弦式仪器得到广泛应用，高耐水压仪器、超大量程仪器应运而生，光纤传感器和卫星定位测量等技术得到初步应用，分布式大坝自动化测量系统逐步进入成熟期，为实现大坝安全监测项目的全覆盖提供了准确可靠的技术手段。

1.1 埋入式监测仪器

埋入式监测仪器一般埋入水工建筑物内部，用于监测水工建筑物结构安全相关的各种物理量变化规律，是大坝安全监测专业技术领域中测点分布最广泛、涉及被测物理量最多、使用数量最庞大的仪器类型。主要承担大坝内部应力应变、渗流渗压、裂缝、位移、倾斜、温度场等重要项目的监测任务。埋入式监测仪器一旦被埋设安装并投入使用之后就不再具有取出、更换的条件，因此可靠性、长期稳定性是其最重要的性能之一。

在全球数以万计的大坝安全监测工程中，经过长达一个世纪的实践检验，能长期胜任坝工工况，特别是高耐水压、高温施工条件（如高温沥青）、高碾压施工条件（碾压混凝土）等特殊工况的埋入式仪器种类已经屈指可数，当前应用最为广泛的埋入式监测仪器类型主要有钢弦式仪器和差动电阻式仪器。上述两类仪器几乎涵盖了绝大部分内观监测项目，除此之外还有一些其他类型的埋入式仪器，如在土石坝内部变形监测中普遍使用的水管式沉降仪和引张线式水平位移计，用来实现沉降和水平位移的监测。

近年来，随着材料科学、制造工艺等技术领域不断取得突破性进步，埋入式监测仪器的系列型谱有一些新成员产生，如光纤光栅仪器、MEMS传感器、磁致伸缩传感器、电磁式大量程位移传感器、陶瓷电容式仪器、电位计式仪器、压阻式微压传感器等。

1.2 外部安装型监测仪器

外部安装型监测仪器一般安装在水工建筑物表面、廊道或边坡表面用来测量结构物水平位移、沉降、三维位移、挠度、倾斜、渗流、环境等物理量。外部安装型监测仪器的主要特征是可以维修和更换，所以最新的科学技术较容易移植到这些监测仪器之中。外部安装型监测仪器以量水堰计、垂线坐标仪、静力水准仪、激光准直系统、GPS表面位移测量系统为典型代表，由它们可以充分反映此类仪器目前的最高技术水平。

垂线坐标仪、引张线仪和静力水准仪是大坝变形监测的重要仪器,经历了从人工观测到自动遥测,由接触式发展到非接触式的发展历程,特别是最近十几年,CCD 测量技术和成像灰度分析技术在大坝变形监测仪器中的成功应用,使 CCD 光电式仪器得到广泛应用,大坝变形实现了高精度非接触式自动化测量。目前使用较多的这类仪器主要有 CCD 光电式、钢弦式、电容感应式(与测量模块一体化)、差动电感式(与测量模块一体化)、光电步进式等。

真空激光准直测量系统是在激光准直测量装置基础上,通过管路抽真空的方式以降低大气对激光光线传播的影响,进化形成的一种实现大坝位移高精度监测的新型位移测量系统,目前主要引入了 CCD、激光成像、图像处理等新兴技术借此实现大尺度、高精度自动化位移测量功能。

近十年来,全球卫星定位系统民用技术应用领域的开放为大坝表面位移监测提供了一种新的测量系统。接收机的基本类型分导航型和测地型,工程测量中一般采用双频多站差分接收方式提高测量精度,目前一般测地型接收机的标称精度已经可以达到二等水准测量精度。

随着电子技术、自动化测控技术的快速发展,外部安装型监测仪器产品型谱中产生了一些新成员,以激光、红外光等光源为载波的光波测距仪(全站仪、三维激光扫描仪等为主要代表)和以微波为载波的微波测距仪(INSAR 为主要代表)开始在工程中投入使用,为广域覆盖范围(平方千米数量级)的高精度位移测量提供了崭新的产品技术手段。

1.3 智能仪器

智能仪器是自带微型计算机或者微型处理器的测量仪器,具有数据存储、逻辑运算判断及自动化操作等高级功能^[5-6]。智能仪器的这些技术特点对大坝安全监测仪器技术的发展与进步而言非常有价值,随着人工智能技术的出现和不断发展,部分大坝安全监测仪器已经开始朝着小型化、智能化与多功能方向发展,并逐步具备了自诊断、自校准、直接物理量输出展示、数字化结果输出、人机交互等初级智能仪器功能特点。

近年来,外部安装型监测仪器朝着智能仪器方向的发展趋势正在加快,如 CCD 垂线坐标仪、测量模块一体化设计的电容感应式垂线坐标仪、新一代可自动寻找目标的智能型全站仪(俗称测量机器人)、三维激光扫描仪等。这些智能仪器的问世并在工程中投入使用,可真正做到无人值守、操作简便、自动化程度高。

1.4 安全监测自动化测量系统

1.4.1 自动化数据采集系统

大坝安全监测技术由信息感知、数据采集和数据分析三个密不可分的环节组成。其中,信息感知功能由安全监测仪器实现,数据采集功能则由自动化数据采集系统实现,数据分析功能由安全监测软件实现。安全监测仪器技术的发展与进步因此必然伴随着数据采集、数据分析等关联技术的发展。

自动化数据采集系统最早在 20 世纪 60 年代由国外率先研制并投入使用,我国的研制工作稍晚于国外同行,但进步很快。进入 90 年代中期,随着现代科技的进步,特别是计算机和微电子技术、通讯技术的快速发展,自动化数据采集系统取得了巨大发展成就,大部分大坝安全监测项目都实现了自动化监测,各类性能优良的国产自动化数据采集系统产品纷纷面市,并大量安装使用在全国各地的大坝工程项目中,经实践验证已经取得了良好的实际应用效果。

当前情况下自动化数据采集系统的技术现状主要如下:

(1) 网络架构：目前情况下，自动化数据采集系统均采用分布式测量网络架构，与早期的集中式测量网络架构相比较是一次跨越式的技术进步。

(2) 系统性能：随着电子测量技术、微电子技术、计算机技术等关联技术的不断发展与进步，自动化数据采集系统的性能也日臻完善，主要表现在：1) 环境适应性强，能胜任全天候、无人值守运行环境下的长期连续、稳定可靠的运行。2) 兼容各种仪器类型的数据采集。3) 测量精度达到了当前科学技术条件下的较高水平。4) 模块化设计，运维效率高。

(3) 技术特征：基本上采用高性能、低功耗单片机为典型代表的微处理器作为 MCU 的 CPU，一般无操作系统、无文件系统，以低功耗和可靠性为主要技术指标，任务处理能力和实时响应能力较弱；采用小容量的数据存贮芯片，数据存贮能力有一定的局限性。

(4) 通信方式：介质灵活多样（无线、电传有线、光导纤维有线等多种介质）；以半双工、中低速现场总线（如 RS485、Canbus 等）为主要通信方式，通信速度、通信效率较低，但可以基本满足当前自动化数据采集系统在数据传输方面的技术需求。

1.4.2 安全监测软件

由安全监测仪器提供的原始测量数据中包含了大量与大坝结构安全、性态相关的信息，但需要通过数据分析才能科学准确地被获取，最终为大坝的建设和运行管理提供有价值的科学依据。数据分析成果直接关系到安全监测仪器的实际使用效果，因此数据分析手段对安全监测仪器技术而言也是息息相关、至关重要。而安全监测软件是实现大坝安全监测数据分析功能的主要技术手段。

近年来，随着计算机技术、软件信息化技术的快速发展，安全监测软件的技术水平相应获得了大幅提升，逐步实现了分析理论、分析模型的软件化操作。其中安全监测资料分析理论的进步特别显著，涌现出诸多卓有成效的新理论，如模糊数学“灰色系统”、神经网络“遗传算法”、时间序列分析、“小波分析”、卡尔曼滤波法、“突变模型”支持向量机、“因果理论”、混沌分形理论、粗集理论等模型分析理论、“一机四库”理论等等，这些新理论的产生使安全监测软件的分析处理能力和分析结论准确性有了很大的提高并切实有效地为大坝的安全运行管理发挥了重要作用。

当前情况下安全监测软件的技术现状主要如下：

(1) 软件组成：针对《DLT 5178-2003 混凝土坝安全监测技术规范》等行业标准为安全监测软件功能设定的具体要求，一般界线分明地形成了数据采集软件、信息管理软件和数据分析软件三个软件分支。

(2) 软件环境：基于互联网的软件架构（如 C/S、B/S）；基于 Windows 系列操作系统；基于 Oracle、Microsoft SQL Server 等大型网络数据库等。

(3) 作用范围：管理、控制对象一般限于单一水工建筑物，实现对单座大坝管控范围内安全监测仪器的数据采集、信息管理和数据分析功能。

2 监测仪器技术展望

毫无疑问，监测仪器技术不是一门孤立技术，其未来发展必然会受到当今主流技术发展的影响。MEMS 是集微型传感器、微型处理器、信号处理和控制电路、接口电路、通信系统以及电源于一体的微型机电系统，为安全监测仪器实现小型化、智能化、高集成化、高可靠性提供了技术基础并指明了发展方向。微电子技术为测量终端实现绿色化（超低功耗）、小型化、智能化提供了强有力的技术保障。物联网技术是全球范围最有影响力的战略性新兴产业，监测仪器技术与物联网技术在全

面感知、可靠传递、信息汇聚、行业智慧应用等方面的未来发展目标高度一致。无线传感器技术是与物联网相辅相成的紧密关联技术，物联网技术的发展必然带动无线传感器技术的迅猛发展，同时为监测仪器实现智慧感知、无线自组织上线运行提供了技术支持。云计算、大数据技术是有效推动物联网技术发展的重要信息处理技术，将极大促进监测仪器测量数据的信息化进程，在更为广阔的范围内实现不同领域的信息共享、数据关联，赋予监测仪器技术真正的“智慧”内涵。

2.1 MEMS 技术

由一系列 MEMS 高精度倾角传感器组成线阵式 MEMS 传感器阵列，可能为分层位移监测提供新的技术解决方案^[8]，不仅在测量范围、测量精度、实时响应能力、可靠性等关键性能方面远远超过传统 IPI 仪器，更重要的是它可以安装在已建成的测斜管内或几何尺度更小的钻孔内实现分层位移的自动化监测。

2.2 电磁敏感元件阵列技术

电磁敏感元件阵列技术^[9]通过感知其与外部磁体（一般为磁环）之间的相对位置关系实现位移测量。由于采用非接触式识别技术，又由于分布式阵列结构之间存在定位互补校核关系所以长期稳定性、可靠性、测量精度等关键性能将明显优于传统仪器，很容易实现毫米级的测量精度。同时，由电磁敏感元件阵列技术制造的传感器可以直接安装在已建成的沉降管内，并实现土体沉降位移的自动化监测。

2.3 北斗卫星表面位移测量技术

近年来，以北斗全球定位系统为典型代表的表面位移测量技术日趋成熟。随着 CORS 系统在全国范围内快速组建并递增式地上线运行，将极大推动大坝表面位移监测产品技术的快速进步。由密集遍布全国各地的 CORS 站点直接承担基准测站职能，由于 CORS 站点布设密度大，北斗卫星表面位移测量系统测点的布置不再受原系统测点与基准点距离极限的束缚。随着 CORS 系统与云计算、云存储技术的进一步结合，测量站点本身就可完成坐标数据实时解算功能，这一方面避免了原系统测点与中心站之间海量数据交互带来的弊端，同时解算速度和测量精度都将得到大幅度提高。

2.4 物联网技术

2.4.1 微型智能无线传感器网络技术

在新兴技术发展潮流的推动下，安全监测仪器最终都会朝着智能仪器方向全面发展，而具备无线自组网功能的智能仪器更是安全监测仪器未来几年内的主要发展方向，由此带来智能仪器在数量上的爆炸性增长。如何对广泛分布在辽阔地域内数目庞大的各类无线物联网数据采集终端进行高效管理成为重要的新课题，由此推动网络组织保障技术手段的快速发展，微型智能无线传感器网络技术应该是最佳选择。在该项新兴技术的有力支持下，不仅可以突破网络终端数规模大小的限制，更重要的是具备了实时动态管理能力。这一点对施工期的安全监测工作而言，具有特别重要的现实意义。在微型智能无线传感器网络技术的动态管理之下，每新安装一支安全监测仪器，就可以通过无

线自组网方式自动添加、自动上线运行，充分实现了“即时施工，即时投运”的理想效果。

2.4.2 自动化测量技术

随着电子测量技术、新能源技术、无线通信技术的快速发展与进步，安全监测仪器的自动化测量技术将发生重大变革。智慧感知将成为未来安全监测仪器自动化测量技术的最基本要求，以 MCU 为主力设备的传统自动化系统模式可能被突破，取而代之的是无线物联网数据采集终端的大规模兴起。

新发展起来的无线物联网数据采集终端将具有小体积、“少电缆甚至是无电缆”数据采集、超低功耗、无线自组网、智慧测量、智能识别、智能决策等。由于从施工期第一支仪器安装开始，微型智能无线传感器终端就得到应用，自动化系统的实现达到了“即时施工，即时投运”的理想效果。

在微型智能无线传感器网络技术得到大规模应用的工程背景下，数据采集终端将彻底摆脱通信线缆的束缚与制约，使每个数据采集终端具备了与 M2M 云平台直接进行实时信息交互的通信功能，在云平台的有力支持下，各种类型的自动化测量系统便可实现真正意义的共平台运行，基于物联网 M2M 技术的自动化系统组成框图如图 1。

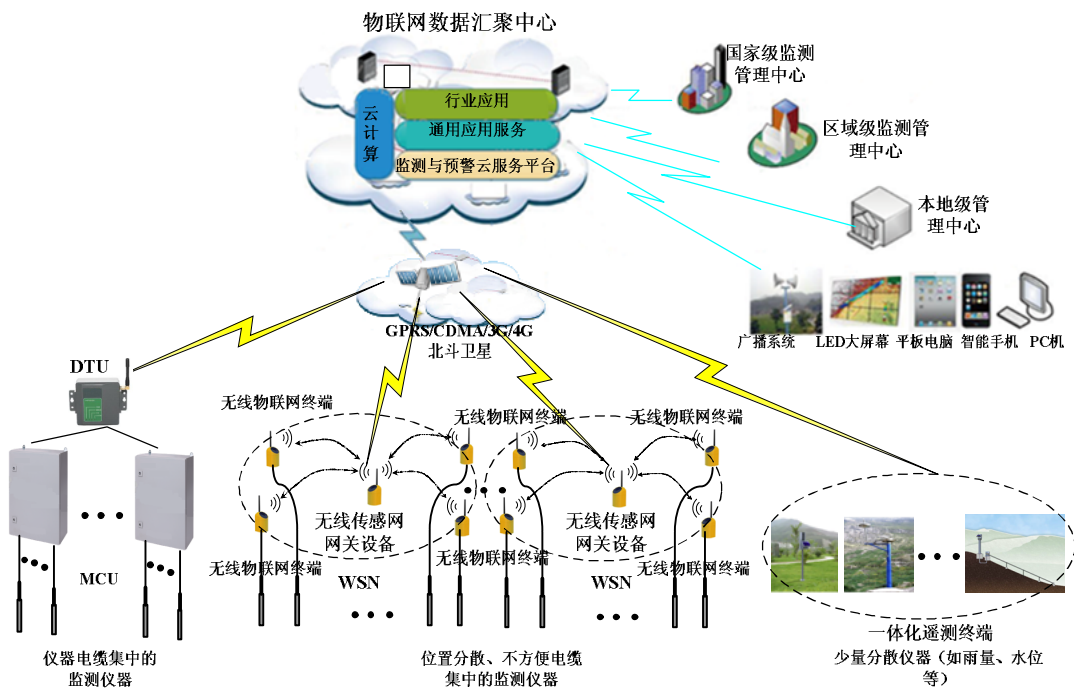


图 1 基于物联网 M2M 技术的自动化系统组成框图

2.4.3 信息融合

当前，我国大坝安全监测的信息化建设工作正在高速推进，尽管项目遍地开花，但大多是以单座大坝为监控对象而有针对性地开展的、小型局域网规模的自动化测量系统的建设项目。由此建成的系统基本上处于“信息孤岛”式的独立运行状态，并不符合信息化的真实要求。如果对这些孤立

系统的平台技术进行适当的升级,使所有系统均建立在 M2M 平台技术基础之上,并因此全面升级为基于 M2M 的新型数据汇聚平台。在 M2M 平台技术强大功能支持下,就可以较方便地把一个又一个的新型数据汇聚平台有机融合起来,建成基于流域的大型数据汇聚平台。在此基础上,进一步实现对跨平台、跨系统、跨流域和跨行业的大型数据汇聚平台的信息融合,就可以最终实现全国所有大坝安全信息汇聚的最高目标。在实现真正意义的大数据和数据挖掘等信息加工处理功能的基础上,为全国所有大坝实现实时、高效的在线监控功能提供强有力的技术支撑,同时可以为流域级防洪调度、洪水预报提供静态和在线辅助数据,最终为大坝安全运行和经济建设发挥积极重要的作用。

3 结 语

在一代又一代从业人员的辛勤努力下,安全监测仪器技术及关联技术见证了一次又一次稳步发展的历程,时至今日已经取得了许多举世瞩目的成就。在传感器原理的先进性与多样性、生产工艺的先进性、传感材料的性能优异性、施工的高效方便性、测量技术先进性等多方面都获得了长足进步,为实现大坝安全监测提供了准确可靠的技术手段。时代前进的步伐在加快,技术进步无止境,以物联网技术、MEMS 技术、无线传感器技术、云计算技术和大数据技术为代表的新兴技术将成为安全监测仪器技术获得突破性发展的重要推动力,在这些新兴技术的影响和推动下,大坝安全监测技术领域的智慧时代一定会很快来到,安全监测仪器技术也将迎来最辉煌的大发展时代。

参 考 文 献

- [1] 赵志仁,徐锐.国内外大坝安全监测技术发展现状与展望[J].水电自动化与大坝监测,2010,10:52-57.
- [2] 张进平,黎利兵,卢正超.大坝安全监测研究的回顾与展望[J].中国水利水电科学研究院学报,2008,12:317-322.
- [3] 谭恺炎,姚红兵.我国大坝安全监测技术的发展与展望[J].水利水电施工,2006,4:115-122.
- [4] 周扬,刘顶明.大坝安全监测仪器应用问题探讨[J].水电自动化与大坝监测,2009,4:41-44.
- [5] 陈剑钊.智能仪器仪表技术前景与应用[J].数字技术与应用,2014,3:234-235
- [6] 张俏薇,黄嘉宇.我国智能化仪器的发展现状及前景分析[J].电子世界,2014,5:7.
- [7] 高品.厚膜电阻应变计的制备与性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013:1-8.
- [8] 毛良明,李涛,赵晓林.一种连续位移变化监测装置和系统[P].中国专利:201420140906.9,2014-08-20.
- [9] 谭斌,沈省三.土体位移测量装置和方法[P].中国专利:201110439195.6,2014-02-12.

作者简介: 沈省三(1962-),男,江苏宜兴人,高级工程师,研究方向为大坝安全监测技术,电子邮箱:
shen@geokon.com.cn。