

数字流域理论方法与实践

——雅砻江流域数字化平台建设及示范应用

吴世勇 申满斌 熊开智 著



SHUZI LIUYU LILUN FAN
YALONGJIANG LIUYU SI

JIAN SHE JI SHIFAN YINGYONG



黄河水利出版社

数字流域理论方法与实践

——雅砻江流域数字化平台建设及示范应用

吴世勇 申满斌 熊开智 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书研究并构建起基于流域水电全生命周期管理的流域数字化平台总体架构,提出了平台建设实施规划;重点研究了流域径流信息的数字化监测、预报以及优化调度,工程安全信息的数字化监测、分析、预警和管理,基于物联网技术的水电工程全生命周期信息采集和融合集成等数字化管理关键技术并在雅砻江流域实践应用;建设了相关信息管理系统,丰富和完善了流域信息采集和管理利用功能,并以雅砻江流域全生命周期管理数据中心和三维可视化信息集成展示与会商平台为核心,进行了雅砻江流域数字化平台集成和示范应用。

图书在版编目(CIP)数据

数字流域理论方法与实践/吴世勇,申满斌,熊开智
著. —郑州:黄河水利出版社,2016. 8
ISBN 978 - 7 - 5509 - 1346 - 2

I. ①数… II. ①吴… ②申… ③熊… III. ①数字
技术 - 应用 - 流域 - 综合管理 - 中国 IV. ①P344. 2 -
39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 154503 号

组稿编辑:贾会珍 电话:0371 - 66028027 E-mail:110885539@qq.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1092 mm 1/16

印张:27

字数:682 千字

版次:2016 年 8 月第 1 版

印数:1—2 000

印次:2016 年 8 月第 1 次印刷

定价:56.00 元

序一

“峰如斧劈江边立,路似绳盘洞里行”,潘家铮院士的这两句诗生动地描述了雅砻江上锦屏水电站的艰险环境,也深刻反映了水利水电行业的艰辛。

近半个多世纪以来,随着物联网、3S、数据库等信息技术的发展,水利水电行业大部分人工量测和读数工作逐步由自动化量测和读数所替代,一些繁重复杂的人力施工工作逐步由大型自动化机械设备所替代。水情水调自动化监测系统、大坝碾压实时监控系統、机组在线监测系统以及视频监控系统等一系列在线监控系统的出现,使建设者不必每次奔波到现场就能看到他所关心的信息。信息技术的发展,既降低了水利水电行业的工作强度,又有效地提高了工作效率,可以说是解放了生产力,发展了生产力。

信息技术对水利水电行业的推动还不止于此。进入 21 世纪以来,三维可视化技术迅速在各行各业中传播与应用,各领域对信息的可视化需求也越来越高,水利水电行业也不例外。近些年来,我们国家在“数字地球”建设的引领下,逐步建立了主要大江大河的数字流域系统,这些系统已经在水量调度、水资源保护等方面起到了显著的作用。现在我们又研究流域梯级水电工程的数字化综合管理,与之前研究的大江大河数字流域系统不同,当前研究的流域水电数字化平台更为复杂:从数据类型层面上来说,其涵盖了地上、地下的复杂精细的水工建筑物、厂房机电设备等 BIM 模型,比以往数字流域系统精度更高、数据量更大的空间地理数据,以及来自不同实时监控系统的结构化数据和视频影像数据;从数据时间维度来说,由于研究对象既包含了投产运行的电站,又包含了处于建设期的水电项目,故囊括了水电工程设计期、施工期以及运行维护期等全生命周期的数据;从可视化角度来说,一方面涵盖了宏观三维地形地貌的展现以及精细化场景下 BIM 模型的展现,另一方面又涵盖了工程动态施工过程的仿真模拟。

由此可以看出,建设一个流域水电数字化平台有许多亟待解决的技术难题:如何将来自异构系统、不同类型的海量数据进行汇总、组织和关联?如何实现水电工程设计期、施工期、运行期等全生命期的信息传递?如何构建一个数字化平台环境来实现三维地形地貌和工程 BIM 模型的三维展现,宏观场景与精细化场景之间的无缝切换,以及流域自然和人工过程的动态演示?

“十二五”期间,一大批专家、学者、工程师投身于国家科技支撑计划“数字流域关键技术”项目“雅砻江流域数字化平台建设及示范应用”课题的研究和实践中,针对上面的问题进行了探索性的研究,初步取得了一些成果。特别是雅砻江流域水电工程的建设者们在流域和工程管理全面信息化的方向上进行了积极的探索,结合有关研究成果初步建成了雅砻江流域数字化平台。在建成的雅砻江流域数字化平台中,你能看到潘家铮院士诗中描述的锦屏水电站的自然风光,也能看到建成投产后的锦屏大坝、地下厂房、水轮发电机组以及机组的实时状态,能看到如火如荼的两河口工地现场,也能看到边坡和建筑物的历史动态施工面貌。无论你实际身在何处,都能有一种来到了雅砻江上的感觉,都能对

雅砻江流域和各个电站的现实状态和历史过程了如指掌,这对于水电行业而言是具有重要意义的进步。

我衷心祝愿本书的出版能够为水利水电行业数字化、信息化的发展起到一定的推动作用,也衷心希望更多的人能够加入到数字流域的建设和推广应用中来。

A handwritten signature in black ink, reading '王光敏' (Wang Guangmin).

序二

我国水能资源理论蕴藏量近 7 亿 kW,是世界上水能资源总量最多的国家。水电是清洁的可再生能源,在我国能源结构中具有重要的地位,对于实现我国政府提出的到 2020 年非化石能源在一次能源消费中所占比重达到 15%、单位 GDP 温室气体排放比 2005 年降低 40%~45% 的节能减排和能源结构调整的战略目标,应对环境污染和雾霾等挑战,都有至关重要的作用。目前,我国水电开发正在快速有序地推进,重点集中于我国西部地区的大型流域梯级开发。

雅砻江是我国规划的十三大水电能源基地之一,装机规模排名第三,在干流上规划有 22 级梯级水电站,总装机约 3 000 万 kW。目前,雅砻江下游梯级电站已全部建成,中游梯级电站相继开工建设,形成了运行一批、建设一批、规划一批大型水电站的开发格局。根据国家授权,雅砻江流域水电开发有限公司(简称雅砻江公司)负责建设和运行管理雅砻江干流梯级电站,雅砻江也成为国内唯一一个由一家大型企业完整开发的大型流域,可以实现全流域开发的统筹协调。

流域水能资源开发是一项复杂的系统工程,涉及的管理面广,内容繁多,难度非常大。作为传统产业的水电行业,数字化水平还很低,传统管理手段已经很难适应流域开发的需要。利用数字化手段从流域水电工程规划设计、施工建设到运行维护进行全生命周期管理,改变传统的生产和管理方式,科学统筹管理水电工程建设运行各阶段,充分发挥流域水电开发的社会、经济效益,将极大地提高管理水平和生产效率,保证工程的科学规划、有序建设和安全运行。

雅砻江公司在实施流域水电开发过程中,积极探索实现流域水电开发全生命周期的数字化管理,致力于建设流域数字化平台,为雅砻江流域梯级电站科学规划设计、建设实施和运行管理提供技术支撑。“十二五”期间,雅砻江公司承担了国家科技支撑计划“数字流域关键技术”项目“雅砻江流域数字化平台建设及示范应用”课题,研究了数字流域关键技术在雅砻江流域的示范应用,为雅砻江流域中下游水电站的顺利开发提供了有力的技术支持。课题研究和应用成果凝聚成书,对雅砻公司而言,形成了比较系统地针对雅砻江流域梯级电站的规划设计、建设实施和运行管理等全生命周期管理的组织过程资产,是一项具有理论与实践意义的项目建设管理现代化创新成果;同时,实现流域水电工程全生命周期数字化管理,关系到我国水电开发战略目标的实现,对于提升我国水资源利用效率和流域综合管理水平、保障工程和区域安全都具有十分重要的意义。

目前,雅砻江流域下游电站已经投入运行,中上游电站也陆续开始建设实施,国内其他水电基地开发也在不断进行中,我国水电开发事业正在蓬勃发展。全面数字化管理作为流域水电开发建设管理的新兴技术和管理手段,也在不断地应用和完善,希望本书展现

的雅砻江流域数字化管理研究成果和应用实践能为广大读者提供帮助。

最后,衷心希望中国水电事业蒸蒸日上,祝中国水电建设管理水平更上新台阶!

陆云华

前 言

数字流域是数字地球概念在水利水电领域的具体化应用,随着 3S 技术、物联网技术、云计算、建筑信息模型、三维可视化和虚拟现实技术等现代技术的发展,数字流域的内涵和应用也不断发展和深化,已成为提升水利水电行业信息化管理水平的重要手段,受到了越来越多的关注。

自 2013 年来,雅砻江流域水电开发有限公司(简称雅砻江公司)参与“十二五”国家科技支撑计划“数字流域关键技术”项目研究工作,并牵头负责“雅砻江流域数字化平台建设及示范应用”课题,以雅砻江流域水电工程管理为依托承担数字流域关键技术的应用示范任务。课题以雅砻江流域水电工程全生命周期数字化管理需求为依托,研究了基于流域水电全生命周期管理的流域数字化平台总体架构,提出了平台建设实施规划;结合雅砻江流域及示范工程特点和管理需求,重点研究了流域径流信息的数字化监测、预报以及优化调度,工程安全信息的数字化监测、分析、预警和管理,基于物联网技术的水电工程全生命周期信息采集和融合集成等数字化管理关键技术,并在雅砻江流域实践应用;建设了相关信息管理系统,丰富和完善了流域信息采集和管理利用功能,并以雅砻江流域全生命周期管理数据中心和三维可视化信息集成展示与会商平台为核心,进行了雅砻江流域数字化平台集成和示范应用。目前,在雅砻江公司前期信息化建设基础上,雅砻江流域数字化平台已初步建成,并进行了水电工程全生命周期管理的示范应用。

雅砻江流域数字化平台是数字流域关键技术 in 雅砻江的落地应用,同时也是数字流域向数字工程的进一步延伸发展,代表了水电行业数字流域应用的需求和发展的方向。为了更好地总结雅砻江流域数字化平台建设有关理论、方法和实践成果,供水电行业相关单位和其他大型流域数字化管理参考,雅砻江公司在国家科技支撑计划课题研究成果基础上,组织进一步补充雅砻江流域信息化建设最新实践,完成了本书的撰写工作。在本书撰写过程中,还得到了雅砻江公司杜成波博士、缪益平博士和张晓松等的大力协助,他们对书中有关章节内容进行了补充和修改。

本书对我国大型流域水电基地信息化建设和数字化管理及信息化建设有参考价值,可为有关业主、设计和软件开发单位实施类似数字化建设项目提供借鉴,也可为我国高等院校水利水电专业学生学习了解水电工程和流域管理实际需求、行业信息化现状、数字流域平台设计和开发等提供较为全面的知识参考。愿本书的读者们都能够有所收获!

由于水电工程数字化管理实践还处于探索阶段,且作者水平有限,错误之处在所难免,敬请读者见谅并不吝赐教。

编 者

2016 年 5 月

目 录

序 一	王光谦
序 二	陈云华
前 言	
1 概 论	(1)
1.1 数字流域的概念与发展	(1)
1.2 流域水电全生命周期数字化管理的需求	(2)
1.3 流域水电全生命周期数字化管理相关技术	(3)
2 雅砻江流域数字化平台建设需求	(17)
2.1 雅砻江公司信息化建设基本情况	(17)
2.2 雅砻江流域数字化平台需求分析	(18)
3 雅砻江流域数字化平台系统框架及集成共享体系	(20)
3.1 流域数字化平台总体架构	(20)
3.2 流域数字化平台基础设施集成体系	(24)
3.3 流域数字化平台数据资源集成体系	(32)
3.4 流域数字化平台技术标准体系	(37)
4 雅砻江流域径流过程和梯级调度数字化管理	(40)
4.1 雅砻江流域水情测报系统建设情况	(40)
4.2 流域径流预报及误差分析技术	(42)
4.3 流域水电站群水电生态联合优化调度技术	(65)
5 流域安全监测及预警管理数字化技术	(91)
5.1 安全监测及预警基本情况	(91)
5.2 锦屏一级水电站监测自动化系统	(92)
5.3 雅砻江流域大坝安全信息管理系统	(107)
5.4 流域大型滑坡体失稳特性分析及预警指标体系	(126)
5.5 流域水电工程主要建筑物安全耦合动态监测方法	(155)
6 基于物联网的水电站全生命周期信息采集和融合技术	(200)
6.1 基于物联网的水电站全生命周期信息采集技术	(200)
6.2 基于 BIM 的水电站全生命周期信息融合技术	(213)
7 雅砻江流域数字化平台相关系统规划设计	(276)
7.1 雅砻江流域水电全生命周期管理数据中心	(276)
7.2 雅砻江流域水电工程数字化设计系统	(287)

7.3	雅砻江流域水电工程建设信息管理与决策支持系统	(291)
7.4	雅砻江流域水电站运行信息管理与决策支持系统	(294)
7.5	雅砻江流域水电站主设备状态评估与决策支持系统	(298)
7.6	雅砻江流域梯级水库风险调度与决策支持系统	(303)
7.7	雅砻江流域征地移民信息管理与决策支持系统	(310)
7.8	雅砻江流域环保水保信息管理与决策支持系统	(315)
7.9	雅砻江流域公共安全信息管理与决策支持系统	(323)
7.10	雅砻江流域三维可视化信息集成展示与会商平台	(327)
8	雅砻江流域数字化平台示范应用	(345)
8.1	两河口数字化设计示范应用	(345)
8.2	两河口水电工程数字化建设管理示范应用	(349)
8.3	锦屏一级数字化水电站管理示范应用	(361)
8.4	雅砻江下游梯级风险调度示范应用	(375)
8.5	两河口水电站征地移民管理示范应用	(381)
8.6	雅砻江中下游环境保护与水土保持管理示范应用	(386)
8.7	锦屏大河湾公共安全管理示范应用	(395)
9	总结与展望	(401)
	附录 SSC 类别说明表	(402)
	参考文献	(404)

1 概 论

1.1 数字流域的概念与发展

数字流域是随着数字地球的概念发展起来的。1998年1月31日,时任美国副总统的 AL Gore 在加利福尼亚科学中心发表题为“数字地球:了解我们 21 世纪的星球(The Digital Earth: Understanding our planet in the 21st Century)”的报告中指出:我们需要一个数字地球,一个可以嵌入海量地理数据的、多分辨率的、真实地球的三维表示。“数字地球”的概念提出后,水利界和相关领域的专家们结合水利信息发展的需求,提出了数字流域的概念。

数字流域是一个以流域空间信息为基础,以流域水循环机制为纽带,以流域水事务管理为驱动,融合流域内各种数字信息的系统平台,是对真实流域及其相关现象的统一数字化重现。基于数字流域,可以根据不同的需求,完成对不同时间和空间的数据进行检索和分析,透视流域各水文环境要素的变化规律,实现全流域数字仿真预演,对防洪防凌、水量调度、水土保持、水资源开发和保护等提供服务,为流域的人口、资源、生态环境和社会经济的可持续发展提供决策支持。

数字流域的核心思想是用数字化手段研究、模拟、再现和处理流域水问题。数字流域建设作为一项战略工程,是实现流域综合治理、开发与管理从传统水利向现代水利转变的一个重要举措,将全面提升流域水事活动的效率和效能。

我们认为,数字流域是物理实体流域在数字环境下的表达与再现,是以空间地理坐标为框架,以空间信息技术为手段,实现流域各类信息资源采集整合、管理更新、共享服务和开发利用的支撑平台,广义上包括流域区域范围内所有自然和人类活动信息的数字化采集、传输和存储管理、分析利用,包括空间信息、水循环等自然环境变化过程信息、工程构筑物和设备的状态信息、人类管理活动记录信息等。

美国、欧洲和日本等是较早开展流域信息化建设的国家和地区,在数字流域方面的研究和应用起步较早,美国田纳西河、欧洲多瑙河、埃及尼罗河等河流都建立了数字流域系统,实现了数字化管理,并在实际流域管理中发挥了重要作用。将流域信息化建设与流域现代化管理紧密结合,随着计算机等现代科学技术的发展,从数字化、建模、系统仿真到虚拟现实,历经 30 多年时间,在这个不长的历史阶段,现代科学技术在传统水利上的应用得到了充分体现。流域管理的观念发生了根本的改变,尽管世界各国河流的自然条件千差万别,但实现流域的现代化管理,是世界各国发展和追求的共同目标。流域现代化的管理,从某种意义上讲是“数字化管理”,是应用遥感(RS)、数据收集系统(DCS)、全球导航定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、计算机网络和多媒体技术、现代通信等高科技手段,对河流(流域)资源、环境、社会、经济等各个复杂系统进行数字化、数字整合、仿真等

组成集成的应用系统,并在可视化的条件下提供决策支持和服务。

数字流域概念引入我国后,在系统框架和建设实践方面都取得了很大的进展。在系统架构方面,王光谦等提出数字流域的整体框架可分为数据层、模型层和应用层三层,其中模型层是核心。王兴奎等建议数字流域研究平台的建设,应是在三维虚拟仿真场景的支撑下,以原型观测的历史数据和实时信息为基础,以实体模型试验为纽带,以数学模型计算为工具,实现复演流域的历史进程,研究流域的现状和预报流域未来发展的目标,已经包含了全生命周期管理的理念。在数字流域系统建设方面,我国水利等相关部门已初步建立了我国主要大江大河的数字流域系统。国家防汛抗旱总指挥部组织开发的“全国三维电子江河”为长江、黄河、海河、淮河、太湖流域、松辽流域、珠江流域七大流域建立了三维电子江河系统,黄河水利委员会组织开发了包括水量调度系统、防汛防凌减灾系统、水资源保护系统、水土保持系统等“数字黄河”系统,清江水电开发有限责任公司组织建设了“数字清江”系统,南水北调工程建设委员会办公室组织建设了南水北调中线工程三维虚拟仿真系统等。这些数字流域的建设,极大地提高了我国流域管理信息化水平,为流域综合效益的发挥起到了重要作用。

已有数字流域系统多数是行政主管部门为进行水资源管理而开发建设的,以流域水电工程建设运行管理为主要目标的数字流域较少,早期开发成形的只有“数字清江”,且仅有梯级优化调度应用系统,还没有全面涉及水电全生命周期管理的各个方面。

1.2 流域水电全生命周期数字化管理的需求

我国水能资源理论蕴藏量近7亿kW,是世界上水能资源总量最多的国家。水电是清洁的可再生能源,在我国能源结构中具有重要的地位,对于实现我国政府提出的节能减排和能源结构调整的战略目标,应对环境污染和雾霾等挑战,都有至关重要的作用。目前,我国水电开发正在快速有序地推进,重点集中于我国西部地区的大型流域梯级开发。流域水电开发社会、经济效益的充分发挥,要求水电工程建设运行各阶段都不断加强精细化、科学化统筹管理,实现流域水电全生命周期数字化管理。在此情况下,以全面数字化为特征的数字流域或流域数字化平台正日益成为提升水利水电开发管理水平的重要手段。流域水电全生命周期数字化管理,实际上是把流域开发管理涉及的水循环过程、工程、设备、人员、环境、移民等管理要素信息进行全面数字化,并实现集成管理,是数字流域进一步向数字工程和管理信息化的延伸。

流域水电全生命周期管理,重点要实现流域径流过程等自然环境信息、工程构筑物和设备的状态信息、人类建设和生产管理活动等信息的数字化管理和应用,关系到我国水电开发战略目标的实现,对于提升水资源利用效率和流域综合管理水平、保障工程和区域安全都具有十分重要的意义。

(1)实现水电工程数字化管理,是提升流域开发管理水平、保证国家能源战略目标的需要。

流域水能资源开发是一项复杂的系统工程,涉及的管理面广,内容繁多,难度非常大。作为传统产业的水电行业数字化水平还很低,传统管理手段已经很难适应流域开发的需

要。利用数字化手段从流域水电工程规划设计、施工建设到运行管理全生命周期进行管理,改变传统的生产和管理方式,将极大地提高管理水平和生产效率,保证工程的科学规划、有序建设和安全运行,将有力地促进流域水能资源开发,为实现我国提出的到 2020 年非化石能源在一次能源消费中所占比重达到 15%,单位 GDP 温室气体排放比 2005 年降低 40%~45% 的节能减排目标发挥重要作用。

(2) 强化对流域水资源的监测、预报和调度,是提升水资源利用效率的现实要求。

我国水能资源丰富的西部地区主要流域的水文预报和优化调度技术水平还比较落后,对于流域自然条件、水文情势、产汇流特征等掌握得还不够,流域的水文预报和调度管理水平还有很大的改善空间。实现流域水电全生命周期数字化管理,同时强化对流域水资源的数字化监测、实时分析预测和调度应用,是提升水能资源利用效率的现实要求。

(3) 强化流域工程和设备的实时监测、预测和安全管理,是保证工程和区域公共安全的现实要求。

水电工程的安全不仅是水能资源利用的基础,更关系到上下游人民群众生命财产安全。我国已成为世界水利水电工程建设的中心,在建或拟建重大水利水电工程的复杂性、规模和难度已全面超过世界现有最高水平,建设和长期运行安全的问题十分突出。强化流域工程和设备的实时监测、预测和安全管理,为流域水电站群安全管理提供决策依据和管理手段,将有利于提高流域安全管理水平,保证工程和区域公共安全。

(4) 实现流域综合管理数字化是提升水电企业现代化管理水平的需要。

大型水电能源基地的开发管理涉及发电、防洪、环境保护、水土保持、移民安置等多重目标,各目标之间相互交织、影响,具有复杂的关联性。在推进流域开发过程中,实现对有关信息的数字化管理、分析,提升科学管理和决策水平,将有助于流域管理各项目标的实现,也是提升流域综合管理水平和水电企业现代化管理水平的客观需要。

1.3 流域水电全生命周期数字化管理相关技术

流域水电全生命周期数字化管理是数字流域向数字工程和管理信息化的发展和延伸,要将流域水电开发涉及的自然环境、径流过程、工程、设备、移民、人员等管理要素信息进行全面数字化,并实现集成管理。以下从流域信息的采集、集成管理、分析应用和直观展现四个方面对涉及的相关技术分别进行简单阐述。

1.3.1 流域基础信息获取技术

1.3.1.1 流域环境信息采集

流域环境信息的采集主要包括空间地理、流域自然环境、气象径流过程等信息的采集。

1. 空间地理信息采集技术

空间地理信息是流域内一切自然、人工过程发生的空间基础,包括以描述地形地貌的 DEM、DOM 的坐标影像数据为主的基础地理信息数据,可以通过地面测绘、航测、无人机、遥感等多种测绘手段获取,随着激光雷达、高分辨率卫星等各种新技术的出现和发展,能

够获取的空间地理信息数据精度越来越高,获取成本也在不断降低,基于空天地一体化网络技术、遥感与地面控制相结合的空间信息获取方式已成为重要选择。

1) 图形数据采集技术

(1) GPS 数据采集技术。

在国家和省级 GPS 控制网的基础上,建立适用于数字流域的高等级 GPS 基准站,用于大比例尺航空摄影测量的空间定位数据或航天遥感图像校正所需要的地面控制点数据,还可以应用于大坝等水电工程的变形观测、流域地质灾害的野外测量、水土保持项目的野外测量等多方面的数据获取工作。

(2) 图形数字化技术。

将传统的普通地形图、专题地图要素转化为数字地图的数字化工作,是建立图形数据库必不可少的重要工作,在流域图形数据库的建立过程中,采用先进的数字化技术,主要是扫描自动识别矢量化技术,完成图形的编辑转化,并按照统一的地理编码进行建库管理。其中,涉及栅格图形要素的自动识别技术比较关键,是需要进行研究和解决的重要技术。

2) 图像数据采集技术

(1) 卫星遥感数据采集技术。

航天遥感技术目前正在向高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率、多传感器类型、微波主动遥感等趋势发展,为数字雅砻江遥感图像数据的采集提供了广泛的选择机会。

一是建立遥感数据地面接收站:针对免费接收的卫星数据,建立气象卫星地面接收站(接收美国 NOAA 气象卫星、日本 GMS 气象卫星、中国 FY 气象卫星等气象卫星图像)、EOS/MODIS 地面接收站,此类数据虽然空间分辨率比较低,但具有宏观性强、时间分辨率高的特点,可以满足整个流域宏观问题的研究。此外,还可以在远期考虑与国内外相关机构探讨合作建立高分辨率卫星遥感数据地面接收系统。

二是购置资源卫星遥感数据:美国 Landsat ETM、法国 SPOT、中国 CBERS 等陆地资源卫星图像数据可以通过国家卫星遥感地面站、中国资源卫星应用中心获取;美国 IKONOS 1m 等高分辨率卫星图像信息也可通过预先订购来获取;如果天气状况不好,或者需要夜间图像数据,可以获取加拿大雷达卫星图像、日本雷达卫星图像或欧洲空间局雷达卫星图像等图像数据。

(2) 航空遥感数据采集技术。

航空遥感具有图像分辨率高、实时性强的特点,获取比较主动,在常规情况下,获取可见光或多光谱图像都是比较容易的。在无地形资料地区和需要高精度地形数据的干流河道、坝址区,可以采用集激光、全球定位系统(GPS)和惯性导航系统(INS)三种技术于一体的机载激光雷达系统(LIDAR),这种主动方式的机载雷达可以获取高分辨率的航空遥感数据、数字高程模型(DEM)和相关地图产品。目前,中国电力建设集团成都勘测设计研究院有限公司已经完成雅砻江中下游高精度数据的采集及处理工作。一般情况下,在重点关注区按照一定的时间间隔进行整个流域(5年1次)或重点区域(2~3年1次)航空摄影飞行,获取航空遥感图像数据,在进行摄影测量、提取数字高程模型(DEM)的同

时,开展航空遥感监测与航空遥感资源调查。

(3)地面遥感数据采集技术。

地面遥感图像信息的获取包括普通的光谱图像数据、近景摄影(测量)图像数据、录像数据、监测图像数据等,主要用于弥补航天遥感与航空遥感信息的不足,特别关注一些重点地段和重点问题,如工程选址区、重点河段、重点灾害地点等。

2. 流域自然环境信息采集技术

流域自然环境信息的采集,一般指针对流域土壤、植被、水质、水生生态环境和陆生生态环境信息的采集,包括野外调查、取样监测、在线监测、遥感等多种技术手段,其中对基于遥感获取的多光谱卫星影像数据进行解译,可以处理得到流域大范围的水土流失、植被覆盖等信息,大大提高了信息采集的效率。地面环境信息的监测,也逐步向自动化采集方向发展,监测效率和数据可靠性不断提高。

1)调查统计技术

对于一些流域自然环境数据,如水生生态环境和陆生生态环境信息,需要按照行政区划或流域功能区划确定调查统计区划,在统计区划的基础上,进行分区统计或抽样统计,获取各区域的流域自然环境数据。

2)定点监测技术

在各重要河段、主要支流入口等建设由高性能和高智能化在线分析测试设备组成的自动监测系统,满足对水体监控和深入研究流域水体的需要,建立可移动的、灵活的水质分析实验室,配备具有实验环境的车辆,而且在车辆中还配备用于水质监测的各种监测设备。此外,通过地面监测站网获取重点区域与工程实施项目区的中小范围内水土流失和水土保持方面的信息。

3)遥感图像获取技术

对流域重点生态区域、水污染事件发生河段,应用航天遥感或航空遥感技术获取反映客观状况的图像数据,并通过对遥感图像的处理与分析,提取相关的生态环境专题信息、水污染信息,编制遥感影像地图与相关专业地图,根据不同时期的遥感图像,实现对重点生态区域的动态监测。利用航天遥感图像、航空遥感图像获取全区域或较大范围的植被覆盖率、土壤侵蚀状况、侵蚀因子及水土流失防治措施与效益等方面的信息。利用 GPS 技术获取较小范围的精确定位信息。

3. 气象径流过程信息采集技术

气象径流过程的信息采集,主要是通过建立观测站点或断面实现降雨、蒸发等气象信息和水位、流量等水情信息的采集,由于流域空间范围广,部分站点因代表性需要布置在野外人烟稀少地区,不便运行维护,同时也因为人工观测的误差问题,各大流域的气象径流过程观测都已建立了自动化测报系统,一并解决了数据采集和传输问题,提高了效率。随着遥感技术的进步,卫星降雨等气象产品也不断发展进步,对掌握流域气象和径流变化过程起到了很好的数据补充作用。

1.3.1.2 工程基础信息采集

从流域水电全生命周期角度讲,流域工程的信息包括工程的规划设计信息、施工过程监控信息、工程管理信息、建筑物监测信息、运行阶段机电设备运行的监控信息等。

近年来,工程的三维数字化设计已在我国水电行业得到较为广泛的应用,不少大型水电工程设计院都引入了三维设计平台,开展三维数字化协同设计,通过设计模型集成工程材质、几何、技术要求等规划设计信息,并发展了碰撞检测、施工冲突控制等基础功能应用,形成建筑信息模型(BIM)的基础。

在施工过程中,记录设计模型的施工质量、时间进度、投资等信息,发展出更多维度信息的 BIM 模型。如通过物联网技术手段、GPS 和其他传感器实时采集的质量检测数据或质量控制相关的施工设备运行、施工工艺控制参数信息,包括混凝土温度、土石坝的碾压遍数、碾压激振力等。

通过管理信息系统建设,各种管理审批流程在网络和计算机上得以实现,因此各类工程管理信息系统中还记录了大量工程投资结算、质量检验评定、施工计划安排等信息。

在运行时期,大坝、厂房等水工建筑物的变形、内部应力、渗流等反映建筑物工作状态的信息,通过设置的内部和外观监测仪器设备来采集,绝大部分水电工程都实现了安全监测数据的自动化采集;同时配合建立人工巡检制度,人工采集水工建筑物的安全隐患,为建筑物的安全维护提供数据支持。

反映水电站机电设备运行状态的机组出力、振动、摆度、电压、频率等参数,属于工业自动化的范畴,发展起步也较早,同时由于电力系统安全控制的严格要求,数据采集的全面性和实时性都达到了比较高的水平,并实现系统依据实时数据来较大程度上的自动反馈控制。电站计算机监控系统可用于监控包括水轮机发电机组、主变压器、断路器、隔离开关、辅助设备等主要机电设备的运行状态等,传输包括电站水轮发电机组、变压器、母线的电流、电压、功率、频率等电气量及温度、液位、压力等非电气量数据,帮助水电站运行管理人员实时了解机组状态。

1.3.2 流域信息模拟分析及数据挖掘技术

基于采集获取的流域和工程基础信息,通过时间上历史数据的积累和空间上不同部位同类数据的积累,可以对已有流域和工程基础数据进行数据模拟分析或数据挖掘,对反映未来时间点或者未实际监测的位置和部位的相关物理量发展趋势进行预测,可以更全面方便地掌握物理量时空变化规律,为管理决策提供更有力的支持。

水电行业在流域数字化管理实践中,最为关注的两个要素:一个是自然环境的水循环过程,重点是径流的变化过程;另一个是工程建筑物和设备状态的发展变化过程。研究这两个要素,一方面要根据已采集获取的降雨、水情、监测指标等数据,结合描述径流或工程建筑物等状态发展变化机理的物理模型,比如水文模型,或者相应的数据挖掘方法,对自然条件下径流和工程建筑物状态随时空发展变化规律或者相关性进行描述,预测物理量的时空分布;另一方面要基于预测结果决策如何进行人工干预,比如实施梯级水库调度、建筑物的加固、设备的检修安排等,实现水资源的高效利用和对工程建筑物和设备的科学维护检修。

数据挖掘是从大量的、不完全的、有噪声的、模糊的、随机的实际应用数据中,提取隐含在其中但又潜在有用的信息和知识的过程。数据挖掘与传统的数据分析(如查询、报表、联机应用分析)的本质区别是,数据挖掘是在没有明确假设的前提下去挖掘信息、发

现知识。数据挖掘所得到的信息应具有未知、有效和实用三个特征。数据挖掘的过程大致可以分为四个阶段,即问题定义、数据收集与预处理、数据挖掘实施及数据挖掘结果的解释与评估。常用的数据挖掘模型有聚类模型、决策树模型、BP 网络模型等。水利电力行业,数据挖掘方法主要应用于电力负荷预测、水文预报和水库调度等领域。

1.3.2.1 中长期水文预报技术

中长期水文预报是指通过构建数学模型,挖掘历史水文气象资料规律,并对未来的水文要素做出预测的方法,在现阶段主要以径流预报为主。根据预见期的长短对中长期预报进行划分,一般中期预报预见期为 3~10 d,长期预报预见期为 15 d~1 年。由于中长期径流预报的预见期较长,无法采用基于产汇流机制的流域水文模型进行计算,需要综合考虑影响水文过程的关键因子及水文过程的自身规律来建立数学模型进行预报。目前,中长期水文预报方法可以划分为传统水文预报方法和智能水文预报方法,其中传统水文预报方法包括物理成因分析方法及数理统计预报方法。

1. 物理成因分析方法

物理成因分析方法在充分考虑水文序列演变规律与行星相对位置、地球自转速度、大气环流、太阳黑子、下垫面情况等关系的基础上,通过研究此类宏观因素的运动规律,分析筛选出与目标流域水文序列变化规律相关性较强的影响因子构建预报模型,并采用数学方法分析水文序列的中长期演变规律。

2. 数理统计预报方法

数理统计预报方法是通过分析历史水文序列的内在规律,进而得出水文要素自相关关系,从而实现中长期水文预报。其数据资料获取相对容易,操作简单,是解决中长期水文预报问题的传统重要手段。数理统计预报方法根据预报因子不同,可划分为单因子预报和多因子综合预报两类,主要包括平稳时间序列、趋势分析、多元回归分析、逐步回归分析等。

3. 智能水文预报方法

结合以往的预报成果可知,水文系统作为一个高度复杂的非线性系统,采用传统预测方法进行预报难以得到准确、可靠的预报结果。因此,结合水文系统的非线性特点,通过引入现代最先进的数据挖掘、统计分析、智能优化等新技术,同时耦合传统预报方法的优势,从而构建更加符合水文系统特性、预报精度更高的现代智能水文预报模型。目前,现代智能水文预报方法主要包括模糊数学方法、灰色系统方法、人工神经网络方法、支持向量机方法、小波分析方法、混沌理论方法及相关向量机方法等。

1.3.2.2 短期水文预报技术

1. 流域水文模型

流域水文模型采用数学模型对流域发生的水文过程进行模拟,通过计算机编程求解,受到了水文学家的广泛关注,成为研究水资源等地球环境问题的重要工具。流域水文模型的研究经历了由 20 世纪 50~60 年代的“黑箱”模型、20 世纪 60 年代以来的集总式概念模型即“灰箱”模型,向 20 世纪 80 年代中期以来的具有物理机制的分布式水文模型即“白箱”模型发展的过程。

进入 21 世纪以来,水文模型的发展日趋复杂化、多样化和实用化。一方面与地理信