DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.01.022

水信息获取与处理技术及发展

肖贤建[1],樊棠怀[1,2],严锡君[1],王慧斌[1],徐立中[1]

(1.河海大学计算机及信息工程学院,江苏 南京 210098;2.南昌工程学院计算机科学与技术系,江西 南昌 330099)

摘要 在对水信息系统模型内涵与外延分析的基础上,综述了水信息获取与处理技术的研究与应用的内容:①水信息获取的基本理论框架;②水信息获取技术及发展;③多源信息融合处理技术。探讨了水信息系统的信息获取技术互补、信息融合算法选择和系统评估 3 个关键问题。

关键词 水信息学;水信息系统;信息获取;信息处理

中图分类号:TP391 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-7647(2008)01-0086-05

Acquisition and processing techniques of hydroinformation and its development//XIAO Xian-jian[1], FAN Tang-huai[1,2], YAN Xi-jun[1], WANG Hui-bin[1], XU Li-zhong[1] (1. *College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*; 2. *Department of Computer Science and Technology, Nanchang Institute of Technology, Nanchang* 330099, *China*)

Abstract: Based on an analysis of the connotation and the extension of the hydroinformation system model, the research and application of the hydroinformation acquisition and processing technique was summarized, including the basic theoretic framework for hydroinformation acquisition, the hydroinformation acquisition technique and its development, and multi-source information fusion and processing technique. Then, three key problems about the hydroinformation system, such as the technique complement for hydroinformation acquisition, the selection of information fusion algorithm, and system evaluation, were discussed.

Key words: hydroinformatics; hydroinformation system; information acquisition; information processing

当前,学科和学科领域之间的交叉在不断扩展和深化,许多具有很强生命力的新兴边缘学科在不断涌现,知识已经突破了传统的学科界线[1]。水科学亦是如此,其子学科不断糅合其他学科的新技术、新成果。以水文学为例,传统水文学通常只能通过对现象的直接观测,然后借助物理模型试验或数学模拟揭示水文规律或机制。事实证明,用这些传统的研究方法来揭示十分复杂的水文现象的规律或机理一般具有较大的局限性。但如果在数字化平台上进行水文研究,则可以在一定程度上克服其中某些局限性,得到用传统研究方法几乎无法得到的结论。当然,这种新的水文学研究方法需要巨量的水文信息数据作为支撑,而且这些巨量的水文数据与传统水文数据相比存在许多质的变化。

另外,信息获取和处理技术自身飞速发展则为水利科学的发展提供了加速引擎。信息获取技术已经由原来传统的目测、常规器测转向智能化、多维化的遥测遥感,从点测发展到面测,从静态监测发展到动态监测,以满足水利科学中不同子学科的信息需求。信息处理的信息数据性状由点数据到面数据,一维数据到多维数据,单尺度数据到多尺度数据。信息处理的理论也由传统的线性理论向非线性理论方向发展,如统计推断方法、信息论方法、决策论方法、人工智能方法等。

正是由于水利科学对信息的这种多视角、立体需求,加之信息获取与处理自身快速发展的推动,使水信息获取与处理技术获得了空前的发展,以满足水利应用的迫切需求。

1 水信息学简介

水信息学[2-6]是信息科学在水科学中的应用,是信息学的一个分支。水信息学是传统水科学与信息技术相结合的产物。水信息学出现之初是研究与水环境相关的数据收集、处理、存储、传播、分析和图形显示等的一门学科,它通过综合数学、计算机科学、传统水环境科学和工程学的方法来揭示大量复杂的水环境变化规律,解决水环境问题。然而,随着问题的深入研究,水信息学的学科范畴进一步拓展。水

基金项目:国家自然科学基金(60374033);教育部科学技术研究重点项目(107057);江苏省高技术研究重大项目(BG2006003);江西省教育厅科技项目(赣教技字[2007]338 号)

作者简介:肖贤建(1974—),男,江西宜丰人,博士研究生,从事水信息获取与处理研究。E-mail:xxj0520701206@hhu.edu.cn

信息学的研究对象已不仅仅局限于水环境问题,还包括了所有水科学问题,且面向水利工程应用,即水信息学主要研究的是如何实现水科学的信息化、智能化、自动化和实用化,并通过信息科学解决传统水科学研究手段的局限性。水信息系统[7]是在水信息学的基础上建立起来的。

如图 1 所示,水信息数据是水信息系统中重要的信息资源[8-9]。为了获得这些信息资源,水信息系统必须利用各种各样的监测平台,如地面观测、空中观测和航天观测等多维立体监测平台,充分采用雷达、光学 、微波、红外、敏感等技术,超越时空和单一手段的局限,构成一张多层次、全方位、全天候、全时段、立体化的信息获取的‘ 天罗地网 ”。

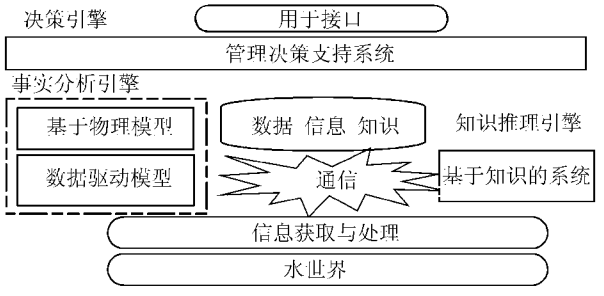

图 1　水信息系统

2　水信息获取与处理

信息学是研究以信息流为中心的信息链的学科。信息获取、信息处理、信息传输和信息应用构成了完整的信息链。信息获取是信息链的源头,是信息流的源泉。信息处理则是信息获取的延续。信息获取与处理技术的发展需要信息链中各类技术的集成发展。信息获取和信息处理技术是信息学中的关键点[10-11]。水信息获取与处理是水利学科的一个重要研究方向,同样也是水利学科的一个关键点。

2.1　水信息获取

信息获取科学是对客观存在的自然信息进行转换、融合和提炼从而得到对物质世界的主观感受的一门自然科学[11]。信息获取技术是实现自然信息从客观存在到主观感受的方法和手段。信息获取的基本过程是一个多层信息的转换、融合和提炼过程,它包括了物质层、数据层和特征层 3 个层次(图 2)。

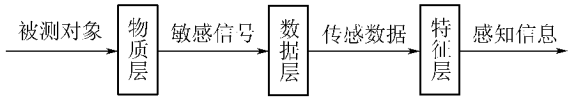

图 2　信息获取的基本过程

信息获取的物质基础是物理、化学、生物敏感现象和材料,物质层的作用就是利用这些敏感现象和材料获得包含被测对象信息的敏感信号。在信息获取的数据层中,多个敏感信号被融合在一起,实现对被测对象的全面数据表达。这些传感数据在特征层中进行处理、特征提取和匹配,提炼出所需的感知信息,实现信息获取的最终目标。信息论和仿生学是信息获取的理论基础(图 3)。

仿生学	信息论	模式识别理论	生物物理学	神经物理学	特征层
		数据融合理论			数据层
		物理学	化　学	生物学	物质层

图 3　信息获取的理论框架

水信息获取技术则是信息获取技术在传统水利行业的应用。在传统水利中,水信息资源是国家水治理开发和管理现代化的关键资源。在信息获取方面,水信息获取系统是一个复杂的巨系统,是一个综合性系统,甚至还要引入其他系统获取的信息,如气象信息系统的气象信息,国家对地观测系统的地球信息等。

在水信息获取过程中,不同水信息获取手段的信息获取能力有一定的区别。有一些获取技术不具备数据融合,更没有感知信息的能力,如传统手段只能靠人工判别,常规感测只能是被测对象到敏感信号转化的数据 ;而有些获取技术则具备数据融合甚至是感知信息的能力,具备跨越物质层、经数据层到达特征层的能力 ;另外有些获取技术获得的数据是图片等大数据。各种获取技术的差异性导致获取信息不完整、多维度、异构以及动态等特性。

在水信息获取技术中,传统的人工观测以及常规的感测技术被广泛应用。例如,在水利科学中水文信息[12]涉及的水位、水温、流量、水质等多种水文要素的测量技术,就采用定位观测、巡回测验、自动送测、水文调查等常规方法进行定量观测和分析并发布。同时,随着敏感技术的发展,先进的信息获取技术的出现极大地提高了水信息系统的获取能力,并丰富了水信息获取的内容[13],如遥感系统(RS)、远程遥测系统(DCS)、全球卫星定位系统(GPS)和地理信息系统(GIS)。

这里需要说明的是,在实际运用中,遥测技术和遥感技术各有优缺点。遥测技术提供了各监测点实时的水信息数据,但只能提供水文或其他监测体(流域、湖体等)的不同时段、各监测点的点状数据,而不能真实地反映出被监测体的面状信息。而遥感技术可以提供面状信息,可直接或间接测量常规手段无法测量到的水文变量和参数,并提供长期、动态和连续的大范围资料值。也就是说,遥感信息模型中计算出的数据需要用遥测数据验证,遥感信息模型中的地理参数同样需要对遥测数据运用概率统计最终

确定。随着卫星技术和成像技术的不断发展,遥感技术也得到了迅猛的发展和应用。而遥测技术和遥感技术的结合充分发挥了它们各自的优势,即通过点和面的结合来获取多元、多源和多尺度的水信息数据。另外,在实际运用中,GPS 定位的精度保证了遥感、遥测的定量精度。

当前,空间、地面信息获取关键技术的研究方向为机载对地观测系统和星载观测系统。在机载对地观测系统中,成像光谱仪、CCD 相机、三维成像仪和成像雷达是目前获取遥感数据的关键技术之一。星载合成孔径雷达(SAR)技术、小卫星传感器、MODIS 数据是星载对地观测系统的关键技术。

同时,地理信息系统(GIS)在上述水信息获取技术中扮演重要的角色[13]。业界将 GPS,RS,GIS 合称 3S 技术。GIS 是计算机软硬件支持平台支持下的采集、处理、管理、显示、模拟及分析全球地区性立体化数据的信息系统,是计算机图形学、地图制图、航空摄影测量与遥感、数字图像处理和数据库管理技术等多种学科和技术的结合。GIS 不是一个信息获取的技术,但却是一个空间数据管理、分析的工具。在实际应用中,以 GIS 为平台并整合了 RS 和 GPS 的技术成为当今水信息系统中获取水信息和水信息处理的有力工具。

2.2 一种新兴的水信息获取技术

如果在恶劣环境或人类不宜到达的区域,特别是在一些突发事件的区域需获取水信息,上述水信息获取手段则存在一些不足,如设备部署不便捷、维护困难等。而一种新兴的信息获取技术——无线传感器网络(WSN)[14-18]恰能满足对这类环境进行监测和信息获取的要求。

随着现代微电子和微机电系统(MEMS)、嵌入式系统、片上系统(SoC)、无线通信、计算机网络以及互联网技术的飞速发展,传感器信息获取技术从单一化向集成化、微型化进而向智能化、网络化方向发展,成为信息获取最重要、最基本的技术之一,并且发展了一种全新的信息获取方式——无线传感器网络。

如图 4 所示,无线传感器网络是由大量静止或移动的传感器以自组织和多跳的通信方式构成的无线网络,其目的是协作感知、采集处理和传输网络覆盖地理区域内感知对象的监测信息,并把信息报告

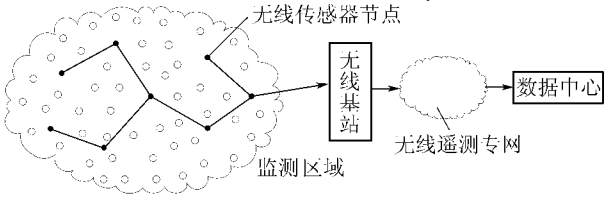

图 4 无线传感器监测网

给用户。无线传感器网络中的传感器节点除了具有采集和处理功能外,还具有路由转发和网内处理功能。无线传感器网络通过汇聚节点(Sink node)收集传感器节点(Sensor node)的数据,实现传感器网络与用户或互联网的连接。

传感器节点有传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块 4 部分组成,如图 5 所示。传感器模块负责监测区域内信息的采集和数据转换;处理器模块负责控制整个传感器节点的操作,存储和处理本身采集的数据以及其他节点发来的数据;无线通信模块负责与其他传感器节点进行无线通信,交换控制信息和收发采集数据;能量供应模块为传感器节点提供运行所需的能量,通常采用微型电池或采集环境能量。汇聚节点类似于传感器节点,但具有较强的处理、存储和通信能力,它与 Internet 等外部网络连接,实现两种网络协议转换,同时发布管理节点的监测任务,并把收集的数据发布到外部网络上。汇聚节点既可以是一个具有增强功能的传感器节点,有足够的能量供给和更多的内存与计算资源,也可以是没有监测功能仅带无线通信接口的特殊网关设备。

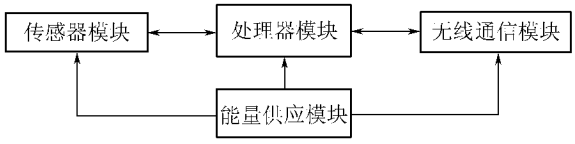

图 5 无线传感器节点

无线传感器网络具有大规模、自组织等特点。上述特点给无线传感器网络在获取信息方面带来一些独特的优势:

a. 在大监测区域部署大量的传感器,或在监测区域部署高密度的传感器节点,节点数量可能达到成千上万,甚至更多。为了协同获取信息,一个节点可以带多种传感器,如温度、湿度、红外等传感器,无线传感网络就可以通过不同空间视角获取信息,获取的信息具有更大的信噪比;通过分布式处理大量的采集信息,能够提高监测的精确度,降低对单个节点传感器的精确度;大量冗余节点的存在,使得系统具有很强的容错性能;大量节点能够增大覆盖的监测区域,减少洞穴或者盲区。

b. 在传感器网络的应用中,通常情况下传感器节点被放置在没有基础设施、环境恶劣的地方,如人不可到达或危险区域。由于具有自组织特性,传感器节点能自动探测邻居节点,并自动进行配置和管理,通过拓扑控制机制和网络协议自动形成转发监测数据的多跳无线网络系统。

无线传感器网络既是多学科高度交叉的具有高

度挑战性的前沿研究领域，也是国内外公认的具有广阔发展前景的高新技术产业。2003 年美国《商业周刊》和《麻省理工学院(MIT)技术评论》在预测未来技术发展的报告中，分别将其列为 21 世纪最具影响的 21 项技术和改变世界的 10 大新技术之一。美国和欧洲等对无线传感器网络非常重视，投入巨大人力和物力广泛开展理论和应用平台的研究开发。无线传感器网络技术在我国中长期科技发展规划(2006—2020)中已被列为重要发展方向之一。可以预见，无线传感器网络将会给人类生活相关的各个领域带来深远的影响。在未来的 15 年中，我国学术界和工业界必将掀起对无线传感器网络研究和应用的热潮。

无线传感器网络具有极其广泛的应用，如感知战场状态(军事应用)、环境监控(如气候、地理、污染变化的监控)、物理安全(如建筑和结构的)监控、城市道路交通监控、安全场所的视频监控等。在水利领域中，无线传感器网络的独特优势也将在水信息获取中发挥重要的作用[19]。

2.3 多源水信息处理

水信息获取与处理需要解决源于多光谱遥感、雷达、GPS、地面自动化监测等手段的多源多尺度信息获取、融合、存储与处理等关键技术。因此，将多源信息融合技术[20]引入水信息处理是必然趋势。

多源信息融合(multi-source information fusion)[20]是 20 世纪 70 年代提出来的。军事应用是该技术诞生的源泉。近年来，随着计算机技术和网络通信技术的飞速发展，以及两者之间日趋紧密的相互促进，加之军事应用领域的迫切需要，多源信息融合技术取得了惊人的发展。同时，多源信息融合技术的应用领域不断扩展，从军事领域逐渐向其他领域渗透，如医学图像处理与诊断、气象预报、地球科学、农业应用等领域。此外，多源信息融合技术应用范围日趋广泛，同时在一些实际应用中也取得了显著成效。

早期多源信息融合的定义大多是从军事角度给出的。随着多源信息融合应用领域的不断扩展，多源信息融合的定义也更为宽泛。文献[21]指出，多源数据融合实质上是一种形式框架，其过程是用数学方法和技术工具综合多源信息，以达到信息补齐和信息去冗余的目的，即得到高品质的有用信息。多源数据融合之所以能得到高品质的有用信息，其根源是单信息源的非完整性，以及信息源之间的互补性和冗余性。多源信息融合是在几个层次上完成对多源信息处理的过程，其中每一个层次反映对原始观测数据不同级别的抽象。按照融合系统中数据抽象的层次，多源信息融合可划分为 3 个级别：数据级融合、特征级融合以及决策级融合。数据级融合是直接对传感器的观测数据进行融合处理，然后基于融合后的结果进行特征提取和判断决策。特征级融合是根据每个传感器抽象出自己的特征向量，融合中心完成的是特征向量的融合处理。决策级融合先由每个传感器基于自身的数据作出决策，然后在融合中心完成局部决策的融合处理。数据融合是最底层的融合，多用于信息获取阶段，特别是对一些处理能力不强的信息获取手段获得的信息进行处理；特征级融合是为了得到目标的状态信息或目标的特征信息；决策级融合则是为了对目标的当前状态或根据目标特征作出相关的决策。因此，在水信息处理阶段，主要是运用特征级融合和决策级融合的信息处理技术。图 6 是信息融合的一般框架。

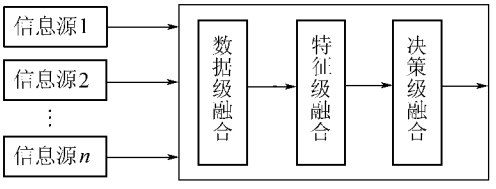

图 6 信息融合的一般框架

水信息具有不同来源、不同模式、不同媒质、不同时间、不同地点、不同表示形式的特征。可见，多源信息融合技术适合用于水信息处理。通过对多源水信息的融合，水信息系统能够获得被感知对象的全局信息，进而得到对被感知对象更加精确的描述[22-23]。

由于多源信息融合涉及理论众多，且用途广泛，本文拟采用文献[22]为例，以阐述多源信息融合在水信息处理中的应用。该文献在已有工作的基础上，提出了一种基于神经网络-证据理论的遥感图像数据融合处理方法(图 7)，并将其用于湖泊水质状况识别。该方法先对不同的遥感输入图像采用各自相应的神经网络进行处理，并实现神经网络从各自输入的遥感图像到输出水质状况的映射；然后对各自遥感图像的神经网络输出的结果做归一化处理，再利用证据理论进行融合，最终给出水质的状况。

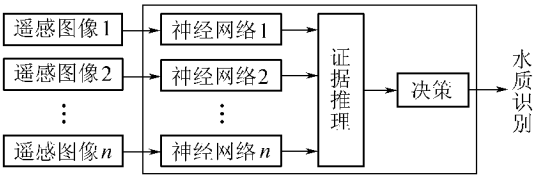

图 7 水质状况识别方法的系统结构

实践表明，采用基于神经网络-证据理论的遥感图像数据融合处理方法来进行湖泊水质状况识别可以增加水质识别的容错性，并且融合了多源水质的信息，使水质评价更加可靠。

3 值得注意的问题及设想

一些信息获取和处理技术已经成功应用于水信息系统中,但在理论研究和实际应用中仍有大量的问题有待解决。本文试图对水信息系统瓶颈——水信息获取和处理的实现和设计给出几个基本的原则。但值得注意的是,目前并不存在一套完善的原则。同时在系统设计过程中,前期和基础的系统分析(包括体系分析、算法分析、需求分析等)是不可少的。

很多人都认为多个低档的信息获取手段可以替代一个精确的信息获取手段。但是实际上如果不经过特殊的处理,多种低劣的信息获取手段的协同获取结果往往比单种信息获取手段还要差。当然,不同手段获得的信息所反映的被测对象的特征面是不同的,这些手段存在各自的优势和弱势。为此,必须选择互补的信息获取手段同相适应的信息处理手段进行搭配。在信息获取过程中,一般认为一种获取手段的性能是静态的、高斯的和零均值概率分布。然而在现实中,信息获取手段的性能是动态的和非高斯的。环境条件(比如地形的影响、大气条件、局部环境等)能够使获得的信息质量得不到保证,很难获得理想效果。因此,在水信息系统信息获取手段的选择过程中,就需根据不同的水信息获取技术的特点适当选择水信息获取技术组,并兼顾系统的操作简便性和可靠性,以保证系统的精度和实时性。另外,还应考虑局部动态环境的影响及其对策,小心地对各水信息获取手段动态性能进行建模和校准。

虽然多源信息融合技术在水信息处理中被广泛应用,但是还有一些制约该技术在水信息处理中更深入应用的因素,如:信息类型的高度相异性和内容的模糊属性;多源信息和多任务引入的固有复杂性;目前尚没有数学工具用来统一描述和处理此类复杂的问题。

另外,在水信息系统中,各种获取技术和处理技术得到的结果如何被有效地系统评估是当前水信息学中一个重要方面。

总之,水信息学是传统水利科学与现代信息技术等多科学交叉、综合、延拓产生的新的系统科学,在水利领域中扮演重要角色,受到国内外众多学者和水利部门的高度关注。而水信息获取与处理技术则是信息获取与处理科学在水信息获取与处理中的应用,是信息获取与处理科学的一个分支,是水信息学中至关重要的一环。在水信息获取、处理、传输和应用的信息链中,信息获取的手段和方式发展较信息处理、传输和应用落后;信息获取和处理技术的不断发展将带动水信息获取和处理技术的发展,使其获取客观、精确和可靠的水信息,并准确分析和真实描述水信息,从而为水信息学应用、决策提供辅助支持。

参考文献:

[1] 国家自然科学基金委员会.水利科学[M]//自然科学学科发展战略调研报告.北京:科学出版社,1994.

[2] ABBOTT M B. Hyroinformatics: information technology and the aquatic environment [M]. UK: Aldershot, Avebury Technical, 1991.

[3] ABBOTT M B. Introducing hydroinformatics [J]. Journal of Hydroinformatics, 1999(1): 3-19.

[4] ABBOTT M B, REFSGAARD J C. Distributed hydrological modeling [M]. Netherland: Kluwer Academic Publishers, 1996.

[5] ABBOTT M B. Towards the hydraulics of hydroinformatics era [J]. Journal of Hydraulic Research, 2001(4): 339-349.

[6] 李纪人,王连祥.水利信息学应用简述[C]//高季章.第八届海峡两岸水利科技交流研讨会论文集.北京:[出版者不详],2004.

[7] THE-STOWA Project Report. Use of Artificial neural networks and Fuzzy logic for integrated water management: Review of applications [EB/OL]. [2006-10-01]. http://www.stowa-nn.ihe.nl/index.html, 2000.

[8] 顾正华,唐洪武,李云,等.水信息学与智能水力学[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(5): 518-521.

[9] 代君,纪昌明.面向共享需求的"数字流域"中信息资源的组织[J].情报杂志,2006,4: 26-28.

[10] 梅涛,葛运建,汪增福,等.信息获取的理论基础与学科体系初探[C]//梅涛,葛运建,汪增福.中国科学院信息获取学术研讨会论文集.北京:中国科大出版社,2003.

[11] 葛运建,吴仲城,刘东,等.信息获取科学与力学信息获取的若干问题研究[C]//葛运建,吴仲城,刘东.中国科学院信息获取学术研讨会论文集.北京:中国科大出版社,2003.

[12] 魏文秋,张利平.水文信息技术[M].武汉:武汉大学出版社,2003.

[13] 中华人民共和国水利部国际合作与科技司.当代水利科技前沿[M].北京:中国水利水电出版社,2006.

[14] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.

[15] 李建中,李金宝.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J].软件学报,2003,14(10): 1717-1727.

[16] MAINWARING A, POLASTRE J, SZEWCZYK R, et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring [J]. Proc of ACM WSNA'02, 2002, 47(6): 88-97.

[17] POLASTRE J, SZEWCZYK R. Analysis of wireless sensor networks for habitat monitoring [J]. Wireless Sensor Networks, 2004, 47(6): 399-423.

(下转第 94 页)

性分析有何影响，选择不同的弹性阶数来描述压力管道内水体的水力特性，对系统稳定性的敏感性分析等，需要进行进一步的分析。

4.2 水力系统部分复杂边界条件的处理

采用弹性模型Ⅳ描述压力管道内水体的水力特性，易于处理一些诸如调压室节点和机组节点等典型的边界条件。而对于简单分岔点和环形管路等边界条件的处理则比较复杂，需要引入部分代数方程，包括节点处的流量平衡条件等，有待分析和完善。

4.3 弹性模型Ⅳ在优化控制领域的应用

弹性模型Ⅳ不论是微分方程的形式还是传递函数的形式，均可广泛应用于水电站稳定性分析、自动控制等方面的研究中。在优化控制领域，若水力系统采用弹性模型Ⅳ描述，对相应控制规律的影响以及控制方式的建立可开展更细致的研究和比较分析工作。

5 结 语

综述了国内外在水力-机械系统特性分析中常用的基于泰勒展开的多种形式的压力管道内水体弹性模型和相关研究的最新进展，通过算例结合压力管道内水体的精确模型比较分析了其他各模型的特点和应用条件。常用的弹性模型表现形式为多项式或连乘式，不易解耦，弹性阶数受到一定限制。基于变分理论和 Ritz-Galerkin 近似法得到的弹性模型Ⅳ是一种易于解耦、便于广泛应用的模型，若采用合理的弹性模型阶数，能够较直观精确地描述压力管道内水体的高阶水力特性，据此提出了有待进一步深入研究和分析的主要问题。

参考文献：

[1] WYLIE E B，STREETER V L，SUO Li-sheng. Fluid transients in systems [M]. New Jersey：Prentice Hall Englewood Cliffs，1993.

[2] 周建旭，张健，刘德有. 双机共变顶高尾水洞系统水力干扰计算研究 [J]. 河海大学学报：自然科学版，2004，32(6)：661-664.

[3] IEEE Working Group. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems，1992，7(1)：167-179.

[4] VOURNAS C D，ZAHARAKIS A. Hydro turbine transfer functions with hydraulic coupling [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion，1993，8(3)：527-531.

[5] JAEGER E D，JANSSENS N. Hydro turbine model for system dynamic studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems，1994，9(4)：1709-1715.

[6] HANNETT L N，FELTES J W. Field tests to validate hydro turbine-governor model structure and parameters [J]. IEEE Transactions on Power Systems，1994，9(4)：1744-1751.

[7] SOUZA O H，Jr，BARBIERI N. Study of hydraulic transients in hydropower plants through simulation of nonlinear model of penstock and hydraulic turbine model [J]. IEEE Transactions on Power Systems，1999，14(4)：1269-1272.

[8] PHILIPP B L，HSU C S. Discrete system dominance index for model reduction [J]. App Math Modeling，1996，20(6)：429-439.

[9] 陈乃祥. 水利水电工程中的水力瞬变仿真与控制 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2005.

[10] SMITH J R，ROBBIE J F. Assessment of hydroturbine models for power-systems studies [J]. IEEE Proc，1983，130(1)：1-7.

[11] MARGOLIS D L，YANG W C. Bond graph models for fluid networks using model approximation [J]. J of Dynamic Systems，Measurement，and Control，1985，107(9)：169-175.

[12] 沈祖诒，田树棠，支培法. 水力机械优化设计和计算机辅助分析 [M]. 南京：河海大学出版社，1995.

[13] 谷口治人，长尾待士，木通笠博正. 安定度解析のための扬水发电所モデルの开发 [J]. 电气学会论文：B，1991，111(2)：197-203.

[14] 周建旭. 水电站水机电系统振动特性和稳定性研究 [D]. 南京：河海大学，2006.

[15] 梁宏柱，叶鲁卿，孟安波. 一种基于精确模型的水电站弹性水击计算新方法 [J]. 大电机技术，2004(5)：49-52.

(收稿日期：2007-04-06 编辑：方宇彤)

(上接第 90 页)

[18] SHEPHERD R. Monitoring chemical plumes in an environmental sensing chamber with a wireless chemical sensor network [J]. Sensors and Actuators B：chemical，2007，121(1)：142-149.

[19] 俞弦，徐立中. 基于移动通信公网和无线传感器网络的水情遥测系统层次设计 [J]. 水利水文自动化，2006(3)：6-11.

[20] 韩崇昭，朱洪艳，段战胜，等. 多源信息融合 [M]. 北京：清华大学出版社，2006.

[21] 潘泉，于昕，程咏梅，等. 信息融合理论的基本方法与进展 [J]. 自动化学报，2003，29(14)：599-615.

[22] 石爱业，徐立中，杨先一. 基于神经网络-证据理论的遥感图像数据融合与湖泊水质状况识别 [J]. 中国图像图形学报，2005，10(3)：372-377.

[23] 徐立中，黄凤辰，林志贵. 基于信息融合的水质自动监测系统体系结构 [J]. 河海大学学报：自然科学版，2003，31(6)：694-697.

(收稿日期：2007-03-02 编辑：方宇彤)