人工神经网络在水文水资源中的应用

胡铁松 袁 鹏 丁 晶

(四川联合大学水利系 成都 610065)

提 要 人工神经网络理论被广泛地应用于水文水资源领域中各种问题的研究,依问题性质不同将其划分为4大类:(1)分类和识别问题;(2)预测预报问题;(3)优化计算问题;(4)基于神经网络的专家系统研制与开发问题,对人工神经网络在水文水资源中的应用现状作了较全面的介绍。还指出了目前应用中存在的主要问题以及今后的研究方向。

关键词 人工神经网络 水文学 水资源

分类号 TV213.4; TP18

1 引 言

人工神经网络(Artificial Neural Network—ANN)是一门新兴的交叉科学,也是目前国际上研究异常活跃的前沿领域之一,它以其大规模并行处理、分布式存储、自适应性、容错性、冗余性等许多优良特性引起了众多领域科学家的广泛关注。自从1986年美国物理学会在Snowbirds召开国际神经网络学术会议以来,各国对神经网络理论和应用的研究迅速地发展起来,神经网络理论的应用已渗透到各个领域,并在智能控制、模式识别、知识处理、非线性优化、传感技术与机器人研制、生物医学工程等方面取得了重大进展。

据日本《产经新闻》1993年5月31日报道,九州大学平野教授利用神经网络技术预测泥石流准确率达到71%。近年来,国内外专家学者将神经网络技术应用于降雨预报、径流预报、水质与水量预测、水库优化调度、地下水管理、水土资源利用规划等方面的研究,本文将这些问题划分为四大类(分类和识别问题;预测预报问题;优化计算问题;基于神经网络的专家系统研制与开发问题),介绍了人工神经网络在水文水资源领域中的研究现状,指出存在的问题以及今后的研究方向。

2 神经网络在水文水资源中的应用

2.1 分类和识别问题

分类和识别问题的研究是人工神经网络应用领域的一个重要分支,如图像识别、语音处理、故障诊断、水文水资源领域中的水文分类预报、水文代表年的选取、灾变预测、水资源评价等。应用于这类问题研究的神经网络模型常有BP模型、Kohonen模型、Hopfield模型、

Hamming 网、CPN 模型和 ART 模型，其中 BP 模型、Hopfield 模型、Hamming 网、CPN 模型适用于有导师分类，Kohonen 模型和 ART 模型则可实现无导师分类；BP 模型、Kohonen 模型、ART2 模型、CPN 模型适用于连续值输入，Hopfield 模型、Hamming 网和 ART1 模型适用于二值输入。在这些模型中，以 BP 模型为最常用，该模型是一种多层前馈型非线性映射网，其基本方法是：首先分析出影响分类和识别问题的“影响因子”或“特征量”，并将其作为 BP 网络的输入，每一个影响因子对应于 BP 网络输入层的一个节点，将分类和识别问题的结果作为 BP 网络的输出，输入层和输出层节点数目依问题的性质而定，当 BP 网络的结构确定之后，用该网络对样本系列进行监督学习，从而识别出模式或类别与影响因子之间的复杂非线性映射关系。

文献 [1] 采用多层前馈网络研究了暴雨的分类和识别问题，更具体地说是识别在现有气象条件下将会发生何种类型的暴雨。暴雨是许多因子适当配合下产生的，而暴雨与这些因子之间关系极其复杂，从而使得这个问题的研究十分困难。文献 [1] 中提出了从决策树到人工神经网络的映射方法来构造多层神经网络，将有利于暴雨形成的 27 个气象因子（如水汽、温、湿能量、低值系统等）作为网络的输入，有无暴雨发生作为网络的输出（仅分两类：1——有暴雨，0——无暴雨），从暴雨历史个例库中获取历史暴雨资料作为该网络的训练样本。文中利用训练之后的网络对暴雨的识别问题进行了一系列实验，得到了一些结果，表明了用神经网络进行暴雨预报的前景，但文中指出该方法离实际应用还有一定的距离。

文献 [2] 采用 Kohonen 自组织神经网络模型研究了鄱阳湖年最高水位的分类预报问题，文中通过对前期水文气象因子的普查筛选，选择了 6 个与年最高水位有较好相关关系的前期水文气象因子，将历年最高水位划分成三个等级，利用 1963 年~1987 年共 25 年间的水文资料作为训练样本，采用 1988 年的实测水文资料进行检验，结果表明：预报结果与实际情况完全相符。

针对水文预报中水文样本系列长、训练量大，而其多层前馈网络的结构往往不是很庞大的特点，文献 [3] 给出了前馈网络梯度法和共轭梯度法相结合的联合梯度算法。大伙房水库的汛期平均流量预报结果表明：联合梯度学习算法与误差反传算法相比，前者大大提高了多层前馈网络的训练效率，为解决多层前馈网络在水文预报中存在的学习速度慢的问题提供了一条有效的途径。另一方面，在 1972 年~1982 年的汛期平均流量预报检验中可以看出，径流长期分级预报的神经网络方法是行之有效的，且神经网络模型可进行离线训练和在线应用，这就大大提高了神经网络模型的实用性。

文献 [4] 采用 BP 网络研究了地下水优化管理问题。由于多孔介质透水性的空间变化及其资料的缺乏，很多研究人员采用随机的地下水管理模型，他们使用很多的试验区域，从而使得地下水优化管理模型求解时维数高，计算量大。实质上对方案设计起关键作用的试验区域并不多，文中采用包含一个隐含层的 BP 网络（其中输入节点 102 个，隐含节点 36 个、输出节点 1 个）进行研究，取得了较好的识别效果，在不影响地下水回灌方案的可靠性水平的前提下，大大减少了地下水优化管理的机遇约束混合整数规划模型的约束条件，从而节约了大量的计算资源。

2.2 预测预报问题

神经网络应用于水文水资源中预测预报问题的研究主要有：降水预报、径流预报、水质

预测、水量预测、电力负荷需求预测等,所采用的神经网络模型有 BP 模型、Adaline 模型等。

文献 [5] 探讨了 BP 网络在降水预报中的应用,它主要包括 3 个模块:(1) 数据分析模块;(2) 训练模块;(3) 预报模块。模型的结构与有关参数为输入层、输出层节点数均为 20、输出节点数为 1,训练之后的网络用美国 Memphis 市 1982 年~1989 年的年降雨资料进行预报检验,结果表明误差在 30% 以内,同时文中的几点结论值得我们在以后的预报实践中考虑:(1) 一个可靠的神经网络模型取决于恰当地选择输入层、隐含层和输出层;(2) 输入层和隐含层节点数目相等时, BP 网络的性能较好;(3) 网络的训练时间较短时,网络的识别与预报能力较好。

文献 [6] 研究了 BP 网络在洪水预报中的应用,文中采用了 3 种方式进行预报:离线预报、在线预报和区间预报。离线预报实践表明:神经网络的性能取决于训练样本,更具体地说是看预报洪水是训练样本的内插还是外延,即强调训练样本的代表性,在线预报结果令人鼓舞,纽约州 Butternut 河 1976 年 10 月 20 日、1977 年 9 月 26 日和 1977 年 10 月 16 日 3 场洪水预报取得了较好的效果,预报精度较他们以前使用的模糊推理法为好;最后通过预报洪水的上、下限的办法亦取得了较好的效果。

文献 [7] 研究了神经网络方法进行需水预测,文中还是应用的 BP 网络,与其他研究方法不同的是他们对部分 BP 网络的输入量进行了离散化,它们是气候、降水、日期特征,如对应气候情况是晴天、多云和下雨, BP 网络输入层第 3 个节点的输入分别取 0.0、0.5、1.0。1990 年 4 月~1991 年 3 月的预报实践结果表明:相对误差 < 5% 的达到 339d,相对误差 > 10% 的 5d 是圣诞、新年和台风袭击的日子。文中将其预报效果与多元回归分析模型、ARIMA 模型、基于 Kalman 滤波的模型进行了对比,结果神经网络模型预报结果(3 个指标是:平均相对误差 *MRE*, 相关系数 *CC*, 相对均方误差 *RRMSE*) 均较其他模型优越。最后文中指出:神经网络模型与其他统计模型的区别在于神经网络模型处理非线性问题的能力。

针对 BP 网络的结构难以确定的问题, Macher、Fuller 等人提出了 Box-Jenkins 方法与启发式方法确定输入层和隐含层节点数目^[8]。他们首先通过 ARMA 模型中自回归的项数确定 BP 网络输入层的节点数目,隐含层节点数目依照输入层节点数和训练样本数按 Weigend 等人^[9]提出的启发式规则近似确定。他们采用 4 条河流的资料进行神经网络模型与其它模型(ARMA、FGN、FDIFF、Markov、Nonparametric)的预报效果比较研究,结果表明,在提前一个时段的预报中,神经网络模型综合性能最好,在提前多个时段预报中,神经网络模型与 ARMA 模型相近。文中还指出在提前一个时段的预报中网络的性能随输入层、隐含层节点数目的增加而变差,尤其是输入层节点的数目。

电力系统负荷预测问题是水能规划、电力系统规划的基础,文献 [10] 研究了采用不同结构的 BP 网络进行电力负荷需求预测问题,第一种是采用所谓“静态方法”确定的结构,其数学表达式为

$$y(i) = F(W_i, Y(i-1)) \quad (1)$$

式中 $y(i) = \{y(i, t); t=1, 2, \dots, 24\}$ 表示第 i 天实际负荷分量, $y(i, t)$ 表示第 i 天 t 时段的负荷, W_i 为权向量, F 表示 BP 网络映射的非线性函数, $Y(i-1) = [y(i-1), y(i-2), \dots, y(i-k)]^T$ 。另一种“动态方法”确定的结构,其数学表达式为

$$\begin{cases} y(i, t) = F\{w(i, t), y(i, t-1), y(i, t-2), \dots, y(i, t-m), \\ y(i-1, t), y(i-1, t-1), \dots, y(i-1, t-m), \\ \vdots \\ y(i-n, t), y(i-n, t-1), \dots, y(i-n, t-m)\} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)和式(3)可以看出,用BP网络识别非线性关系F时,静态方法所采用的BP网络结构较动态方法的庞大,在实际研究中,静态方法采用包含两个隐含层BP网络,输入层和输出层节点数分别为48和24,动态方法采用包含一个隐含层的BP网络,输入层、隐含层和输出层节点数分别为8、17和1。研究表明:在预报精度相近的情况下、动态方法网络小、训练快、预报白天负荷准确(特别是峰荷)。

2.3 优化计算问题

优化理论与方法是研究水资源规划与管理问题的一种重要手段,目前主要采用的优化技术包括(非)线性规划、动态规划、大系统理论、多目标决策技术等,但对于实际中的大规模的水资源规划及管理问题而言,上述方法在目前串行计算机上模拟求解时存在着不同程度上的“维数障碍”,亟待新的理论、方法的出现。神经网络是一种由大量简单非线性单元广泛连接而成的可以高速并行处理的系统,它具有快速收敛于状态空间中一稳定平衡点的优点,因此作为优化算法模型而被应用到许多优化问题的求解中,为优化理论与算法的研究提供了一条新的途径。目前有关神经网络应用于水资源规划及管理优化问题的研究报道尚不多见,可以预见:随着神经网络优化理论和硬件实现研究的发展,水资源规划及管理问题的研究将获得飞速发展,特别是大规模水库群的联合调度将取得突破性的进展。

文献[11]研究了神经网络理论在梯级水电厂短期优化调度中的应用。文中基于Hopfield模型提出了短期经济调度的神经网络方法,依据水电厂短期优化运行数学模型的目标函数和约束条件建立了能量函数及相应的运动方程。最后文中还指出由于神经网络方法所得到的未必是全局最优解,如何与模拟退火技术结合起来以求得全局最优解有待进一步研究。

文献①研究了Hopfield网络在水库群优化调度中的应用,以Hopfield连续模型为基础,建立了一般意义下混联水库群优化调度的神经网络模型,以此模型为基础,文中研究了PK地区3个并联供水水库群的调度问题,研究结果表明:水库群优化调度的Hopfield网络方法是可行的,计算结果是合理的,该方法能有效地克服用动态规划法求解水库群优化调度问题存在的“维数灾”障碍,而且水库群优化调度问题神经网络模型的硬件实现或在并行计算机上模拟对于求解大规模水库群优化调度问题具有十分重大的理论与现实意义,但该方法存在较强的初值与参数的不稳健性问题和存在局部最优解问题。

2.4 基于ANN的专家系统研制与开发问题

与医疗诊断、化学结构分析、石油勘探等领域相比,专家系统在水文水资源中的研究与应用相对落后^[12],其原因是多方面的,主要有:知识获取的瓶颈问题、知识的显式表达、知识推理中的“组合爆炸”、“无穷递归”问题、自学习能力差及数值程序的嵌入困难。而神经网络系统的知识的分布式存贮、信息的大规模并行处理以及其自学习功能、联想记忆功能为解决专家系统中的知识获取和表示、并行推理等问题提供了有效的途径。神经网络专家系统

① 胡铁松. 水库调度智能决策支持系统理论及应用研究. 武汉水利电力大学博士论文. 1993

方法模拟了人类的形象思维, 具有高度的容错性和鲁棒性, 且可以用大规模集成电路技术加以实现, 是一种非逻辑、非语言、非静态、非局域、非线性信息处理方法, 因此神经网络技术和专家系统技术的结合, 必将大大地推进水文水资源中专家系统的研制和开发进程。

文献^①在我国南水北调东线工程运行管理中研究了基于神经网络的调度咨询专家系统, 该系统包括自动知识获取模块、推理机、数据库、人机接口、解释系统、知识库等 6 个主要模块, 其中的自动知识获取模块就是采用 BP 网络, 从调度知识的搜集仿真试验结果数据库中获取专家知识。利用该系统进行洪泽湖 1980 年 10 月调度过程咨询, 取得了满意的结果。

文献 [13] 采用神经网络技术对加拿大 British Columbia 地区 Peace 流域的土地多目标利用问题进行了初步探索, 文中利用 BP 网络来获取有关专家对土地多目标利用知识, 采用包含一个隐含层的 BP 网络探讨了一个双目标土地利用规划问题, BP 网络的结构是输入层 22 个节点、隐含层 4 个节点、输出层 2 个节点, 初步研究表明该方法是可行的, 他们还计划在下一阶段的研究工作中探讨含多个土地利用目标和更多影响因素的土地利用规划问题, 为土地多目标规划提供智能决策支持。该模块是他们开发的决策支持系统中的一部分。

3 结 语

综上所述, 神经网络的大规模并行处理、信息的分布式存储、连续时间非线性动力学、全局集体作用、高度的容错性和鲁棒性、冗余性、自学习及实时处理等许多优良特性是水文水资源中许多传统研究方法所不具备和无法比拟的, 它奠定了神经网络理论在水文水资源中的应用基础, 同时也为一些复杂的水文水资源问题的研究提供了一条崭新而有效的途径, 而且随着神经网络硬件实现技术的发展, 神经计算机研究的进步, 神经网络理论在水文水资源中的应用将会取得突破性的进展。

神经网络在水文水资源中的应用是近年来开展的。就目前的情况看, 这些研究是初步的, 还存在不少问题, 如:

(1) BP 网络的结构、训练、推广性 (Generalization Capacity) 问题 一般来讲, 水文水资源研究中应用的 BP 网络输入层、输出层节点数目可依据实际情况加以确定, 而有关隐含层的层数、隐含层节点数目的研究尚无公认的理论, BP 网络训练时存在速度慢和陷于局部极小点的缺陷, 其推广能力与样本特性 (样本系列的长度、代表性、正态性、平稳性)、网络的结构、节点作用函数、学习算法、数据归一化方式等等因素有关, 所有这些问题虽已有一般性的大量研究论文^[14~17], 但对适合于水文水资源问题特征的方法尚需进一步探讨。

(2) Hopfield 网络的局部最优解与参数的不稳健性问题 Hopfield 网络优化过程是一个局部优化过程, 而且存在参数的不稳健问题, 这对水文水资源的应用研究是一个严重的理论障碍。因此, 有必要进一步研究该方法与遗传算法 (Genetic Algorithm)、模拟退火算法 (Simulated Annealing method) 等其它一些算法的结合。

(3) 新的神经模型与学习算法研究问题 目前水文水资源领域中神经网络模型应用较多的是 Hopfield 模型、多层前馈网络模型、Kohonen 模型, 但这只是众多已提出神经网络模型

① 水利部南京水文水资源研究所, 基于知识的调度决策支持系统研究, 1992

极小的一部分，根据水文水资源问题的具体特征，研究与提出一些适合于水文水资源问题的神经网络模型和与其相适应的学习算法具有重要意义。

(4) 基于 ANN 专家系统的透明性问题 基于 ANN 的专家系统较好地解决了逻辑推理为基础的专家系统的知识获取、知识表达、知识推理等问题，但由于其知识表达的非显式形式，造成了这种专家系统的透明性差、解释困难的新问题。

(5) 神经网络的硬件实现问题 神经网络在目前串行计算机上模拟求解，并不能充分体现其大规模并行处理的优点，作为神经网络在水文水资源领域中的应用研究来说，它的硬件实现具有更为重要的实用价值，也是研究水文水资源问题神经网络方法的最终目的。如目前水库群联合调度 Hopfield 网络的电路实现是一个值得探讨的课题。

笔者认为在今后的水文水资源问题的研究中，应开展以下几个方面的工作：①神经全局优化理论的研究；②模糊系统的建模、识别与控制的神经网络方法研究；③灰色神经网络预测与控制的研究；④混沌（分维）神经网络研究；⑤大系统理论、多目标决策理论同神经网络理论的结合研究；⑥神经网络硬件实现的研制；⑦新的神经网络模型与学习算法的研究。

参 考 文 献

- 1 吴 骁. 人工神经网络在暴雨预报中的应用. 智能控制与智能自动化. 北京: 科学出版社, 1993. 817~822
- 2 蔡煜东, 许伟杰. 自组织人工神经网络在鄱阳湖年最高水位长期预报中的应用. 水文科技情报. 1993, 10 (2): 27~29
- 3 胡铁松, 丁 晶. 径流分级预报的人工神经网络方法研究, 全国首届水文水资源与水环境科学不确定性研究新理论新方法学术讨论会论文集. 成都: 成都科技大学出版社, 1994. 150~156
- 4 S Ranjithan, J W Eheart and J H Garrett Jr. Neural network-based screening for ground water reclamation under uncertainty. Water Resources Research. 1993, 29 (3): 563~574
- 5 Hsiang-Te Kung, L Yulin, S Malasri. Precipitation pattern study using artificial neural networks. Proceedings of international symposium, on impact of climatic change global warming on hydrology and water resources, China, 1993. 72~82
- 6 M L Zhu, M Fujita, and N. Hashimoto. Application of neural networks to runoff prediction. International conference on stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering. Ontario. Canada. 1993, 205~216
- 7 S P Zhang, H Watanabe and R Yamada. Prediction of daily water demands by neural networks. International conference on stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering. Ontario. Canada. 1993, 217~227
- 8 G L Macher and J D Fuller. Backpropagation in hydrological time series forecasting. International conference on stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering. Ontario. Canada. 1993, 229~242
- 9 A S Weigend, D E Rumelhart and B A Huberman. Predicting of the future: a connectionist approach. International Journal of Neural Systems, 1990, 1 (3): 193~290
- 10 K Y Lee, Y T Cha and J H Park. Short-term load forecasting using an artificial neural networks. IEEE Transactions on Power System, 1992, 7 (1): 124~132

- 11 韦柳涛, 梁年生, 虞锦江. 神经网络理论在梯级水电厂短期优化调度中的应用. 水电能源科学, 1992, 10 (3): 145~151
- 12 Palmer R N and K J Holems. Operational guidance during droughts: expert system. Journal of Water Resources Planning and Management. 1988, 114 (6): 647~665
- 13 Y Y Yin and X M Xu, Applying neural networks technology for multiobjective land use planning. Journal of Environmental Management. 1991, 32: 349~356
- 14 Tiesong Hu etc. Multireservoir operations using an artificial neural network. International symposium on medium and small sized hydropower stations. China, 1993. 114~117
- 15 Hirose Y, K Yamashite and S Hijiya. Back-propagation algorithm which varies the number of hidden units. Neural Networks. 1991, 4 (1): 61~66
- 16 Karnina. E. D. A simple procedure for pruning back-propagation trained neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks. 1990, 1 (2): 239~242

Applications of Artificial Neural Network to Hydrology and Water Resources

Hu Tiesong, Yuan Pong, and Din Jin

(Sichuan Union University, Chengdu 610065)

Abstract: Many application researches of artificial neural networks (ANN) have been made in hydrology and water resources. The state-of-the-art of ANN as applied to hydrology and water resources has been examined and evaluated through four classified problems, those are (1) pattern recognition, (2) prediction, (3) optimization, and (4) ANN-based expert system. The major problems and directions for the future studies are presented in this paper.

Key words: Artificial neural network; hydrology; water resources.