

文章编号: 1000-7598-(2000)01-0084-04

用 BP 网络求解土体的导热系数

何发祥

(四川大学 水利系, 四川 成都 610065)

黄 英

(云南工业大学电力工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 以人工神经网络为基本工具, 利用其强大的非线性映射能力, 综合考虑土体的物理性质指标对其导热性能的影响, 为求解土体的工程参数提供了一条新的途径。结果表明, BP 网络能够充分体现土体物理指标之间的非线性关系和隐含关系, 具有较高的求解能力, 所求出的土体的导热系数与实测值接近, 其精度远高于线性回归, 且简单实用。

关 键 词: 人工神经网络, 非线性, 土体的物理性质指标, 土的导热系数

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

作者简介: 何发祥, 男, 34 岁, 工程师, 岩土工程专业博士生。

Solution of thermal conduction coefficient from BP network

He Faxiang

(Hydraulic Eng. Dep. of Sichuan University, Chengdu 610065)

Huang Ying

(Power School of Yunnan Polytechnic University, Kunming 650051)

Abstract In order to calculate the thermal conduction coefficient of earths, neural network technique is used to map the non-linearity among the physical indexes of earth and an expected result is obtained. It is shown that a BP-network is useful to map the non-linear relationship among the coefficient and other indexes and this technique is more accurate than linear regression and further applications are expected.

Key Words artificial neural networks, non-linearity, physical index of earth, thermal conduction coefficient of earth

1 引 言

近年来, 由于科学技术的迅猛发展, 核能技术的利用越来越普遍, 而核废料的存放也就颇受关注, 通常是将其深埋于地下专门的处置库中。由于核废料具有放射性, 其衰变产生的热能要向周围介质传递, 为了保障处置库及周围环境和生命财产的安全, 通常采用高性能的高压实(压力达 100 MPa)膨润土作为缓冲层, 将核废料固化体与基岩隔离开。因此, 膨润土缓冲层的物理力学性能直接关系到核废料存放的安全问题, 研究膨润土的导热性能对保持填埋区的地质环境和人为环境的原有平衡具有重要的实际意义。

目前, 土体的导热性能一般采用仪器设备测量试样的导热系数来确定^[1]。由于土体具有较强的非线性, 其物理性质指标之间的关系非常复杂, 因此难以完全用公式表达出来, 关于土体的导热系数也还没有一个被普遍接受的理论或经验公式。虽然也有一些关于土体的总导热系数及其三相导热系数(固相、液相和气相)之间的关系的经验公式, 可以根据测定的总导热系数确定固相导热系数, 但由于其考虑的因素有限, 并不能充分反映出土体的各项物理性能指标对其导热性能的影响, 所以仅根据经验来确定工程中土体的导热性能是不够的。应该寻求新的方法, 更准确、更有效地确

定土体的导热系数。为此, 本文借助广泛应用于各学科领域的人工神经网络(ANN: Artificial Neural Network)理论, 初步探讨用 BP 网络模型来确定土体的导热系数, 为在工程中应用最新科技成果, 确定土体的物理力学性能提供了一条新的途径。

2 土体的导热系数与物理性质指标的关系

为了分析土体各项物理性质指标对导热性能的影响程度, 本文根据文献[1]所提供的资料, 就反映土体密实程度、含水情况、饱和程度及孔隙情况的湿密度、饱和度、含水量、干密度及孔隙度五项物理性质指标与导热系数之间的关系进行单因素的线性相关性分析, 结果如表 1 所示。由表 1 中可以得出如下结论。

(1) 导热系数与湿密度、饱和度和含水量的相关性高于与干密度和孔隙度的相关性, 说明三相中液相对土体的导热性能影响最大(相关系数较大), 而气相和固相对导热性能的影响则相对较小(相关系数较小)。而根据分析研究, 土体的三相对其导热性能都有影响。

收稿日期: 1999-02-08。

表 1 土体的导热系数与物理性质
指标之间的相关关系

Table 1 The relationship between thermal conduction
coefficient and physical index of soilmass

物理指标	回归方程	相关系数 (R^2)
湿密度 $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\lambda = -5.066\,1 + 3.065\{\rho\} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.900 1
饱和度 $S_r/\%$	$\lambda = 0.790\,6 + 0.615\,4S_r$	0.776 8
含水量 $\omega/\%$	$\lambda = 0.809\,7 + 0.030\,7\omega$	0.757 4
干密度 $\rho_d/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\lambda = 4.582\,8 - 1.893\,1\{\rho_d\} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.280 4
孔隙度 n	$\lambda = 0.655\,1 + 5.264\,7n$	0.283 4

(2) 导热系数随湿密度、饱和度、含水量和孔隙度的增大而增大, 随干密度的增大而减小。这一方面说明土体越密实, 对降低土体的导热性能越有利; 另一方面说明在土体的三相中, 液相和气相的导热性比固相的导热性强。因此, 在工程中碾压密实可以提高土体的干密度, 降低孔隙度, 从而降低土的导热性, 提高其绝热能力。有利于保护核废料填埋区的生态环境。

(3) 虽然导热系数与干密度和孔隙度的相关性很小, 但并不表示干密度和孔隙度对导热系数的影响最小。因为干密度反映了土体的密实程度对导热性能的影响, 孔隙度反映了三相中气相的导热性能对土体导热性能的贡献, 只是它们之间的关系并不能以线性关系体现出来, 而是呈非线性的、隐含的。相关性分析不能全面综合地反映土体的物理性质指标对导热系数的影响。

3 人工神经网络(ANN 模型)

近年来在非线性领域广泛应用的人工神经网络方法因其强大的处理非线性问题的能力(可以逼近任意的非线性函数), 为我们解决此类问题提供了一条有效途径。

人工神经网络的最大特点是具有较强的学习能力, 并通过学习来实现非线性映射, 其中以 BP 网络的应用最为广泛。本文将以前文[1]中所提供的资料为样本, 通过一个 BP 网络模型来实现对土体导热性能的非线性拟合。

3.1 BP 网络模型

BP 网络是通过将网络输出误差反馈回传(Back Propagation)来对网络参数进行修正, 从而实现网络的映射能力。1989 年, Robert Hecht-Nielson 证明了具有一个隐层的三层 BP 网络可以有效地逼近任意连续函数^[2], 这个三层 BP 网络包括输入层、隐层和输出层(图 1)。考虑到实际应用的要求, 网络设计时应坚持的一个原则是尽可能地减小系统的规模和复杂性。本文采用一个三层 BP 网络模型, 如图 1 所示。

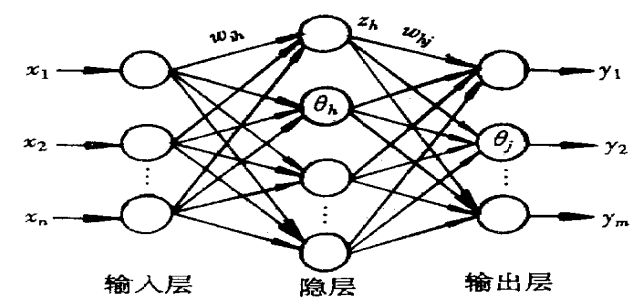


图 1 BP 网络结构图
Fig. 1 ANN topology

在这个 BP 网络模型中, 输入层和输出层的神经单元数目是确定的。输入层可有 5 个单元, 即影响土体导热性能的 5 个物理性能指标(湿密度、饱和度、含水量、干密度、孔隙度), 但在这 5 个参数中, 湿密度和饱和度均与其他 3 个参数相关, 独立的参数只有 3 个, 即含水量、干密度和孔隙度。因此, 输入层单元数目确定为 3 个; 输出层仅 1 个单元, 即导热系数; 需要确定的是隐层的单元数目。研究表明, 系统的非线性程度随隐层单元数目的增加而增加, 但并非单元数目越多越好, 应视问题的复杂性而定。目前对于确定隐层单元数目一般通过试算法确定。本文在试算过程中, 以拟合误差和训练误差都很小为原则, 通过多次试算, 最后发现当隐层有 3 个或 4 个单元时, 训练误差和拟合误差均较小(如表 2), 因此本文确定为 3 个单元。

表 2 导热系数的训练及拟合均方差($10^{-3}\text{w} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}$)

Table 2 Mean square errors of training and fitting
of thermal conduction coefficient ($10^{-3}\text{w} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}$)

隐层 单元数	1-2	3	4	5	6	7	9
训练误差	不收敛	2.214	2.085	2.022	1.975	1.633	1.729
拟合误差		5.644	6.640	33.395	32.664	10.554	23.844

3.2 模型的训练

学习过程也叫训练过程。在图 1 中, 输入向量 $X^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)$; 输出向量 $Y^k = (y_1^k, y_2^k, \dots, y_m^k)$, 期望输出向量(教师值) $T^k = (t_1^k, t_2^k, \dots, t_m^k)$; 中间隐层单元的输出向量 $Z^k = (z_1^k, z_2^k, \dots, z_q^k)$ 。设 BP 网络有 p 个样本, 对第 k 个样本有

$$z_h^k = f\left[\sum_{i=1}^n \omega_{hi}x_i^k - \theta_h\right]$$

($h = 1, 2, \dots, q; k = 1, 2, \dots, p$) (1)

$$y_j^k = f\left[\sum_{h=1}^q \omega_{hj}z_h^k - \theta_j\right]$$

($j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$) (2)

式中 ω 为相邻两层之间的联结权; θ 为隐层和输出层单元的阈值; f 为映射函数, 在本文中取 S 型函数作

为映射函数,其值域在 0 ~ 1 之间:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3)$$

训练时的总误差函数定义为

$$E(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m (y_j^k - t_j^k) \quad (4)$$

BP 网络的训练方法很多,本文采用梯度下降法来降低网络的训练误差。根据式(4),若总误差满足要求 ($E < \epsilon$),则训练完成;否则应将误差 ($t_j^k - y_j^k$) 反向回馈至各神经单元并修正联接权和阈值,然后进行下一次的训练,直到满足误差要求为止。权值的修正见文献[2]。

3.3 选择训练样本和拟合样本

训练样本应具有广泛的代表性,保证训练好的网络可以预测各种情况,使其具有普遍性。通常应按所提供样本的数据结构对原始样本进行聚类分析,从各类样本中随机选取一定数量具有代表性的样本作为训练样本,以提高拟合的精度。

本文根据文献[1]所提供的信息,将原始样本分为 3 类,其中 1~5 号为一类,6~9 号为一类,10~15 号为一类。由于 11 号、14 号样本分别与 10 号和 13 号样本为平行样本,出现多值,故弃用。选择 1, 5, 7 和 10 号作为拟合样本,其余作为训练样本。

3.4 网络参数

为了保证网络具有足够的非线性,在映射函数式(3)中增加一个非线性调节系数 μ :

$$f(x) = \frac{1}{\left(1 + e^{-\frac{x}{\mu}}\right)} \quad (5)$$

式中 对隐层 μ 取 0.8; 对输出层 μ 取 0.4。

输入层的输入向量和输出层的期望输出向量按下式进行归一化处理:

$$x_i = \frac{c_i - c_{\min} + 0.01}{c_{\max} - c_{\min} + 0.01} \quad (6)$$

式中 $c_{\max}$, $c_{\min}$ 分别为样本中各项可能出现的最大值和最小值,而 0.01 则是为了避免零输入而附加的修正值。

为了防止网络出现麻痹现象,对网络输出层的权值调节项中的映射函数的一阶导数附加一个修正系数 0.01,即

$$\delta_j = [f'(x) + 0.01] (t_j^k - y_j^k) \quad (7)$$

4 训练和拟合成果

本文选取 3 个输入单元、3 个隐层单元和 1 个输出单元的网络,利用上面的 BP 网络模型进行训练,训练时以绝对误差小于 0.08 作为控制条件。

计算采用自编程序进行,BP 网络采用梯度下降法降低训练误差,程序语言为 FORTRAN90。计算流程如图 2 所示,程序在联想 LX-P5/75 计算机上实现。经过 68 732 次训练取得了满意的结果,见表 3 所示。

从表 3 可知,不论是训练样本还是拟合样本,通过输入 3 个参数(含水量、干密度、孔隙度)经过 BP 网络的训练和拟合,得到输出层的导热系数与实测值接近。训练结果的均方差为 0.006 64,拟合均方差为 0.005 64,最大绝对误差为 0.137,说明拟合精度较高,训练结果和拟合结果令人满意。证明利用人工神经网络求解土体的物理参数的方法是可行的。

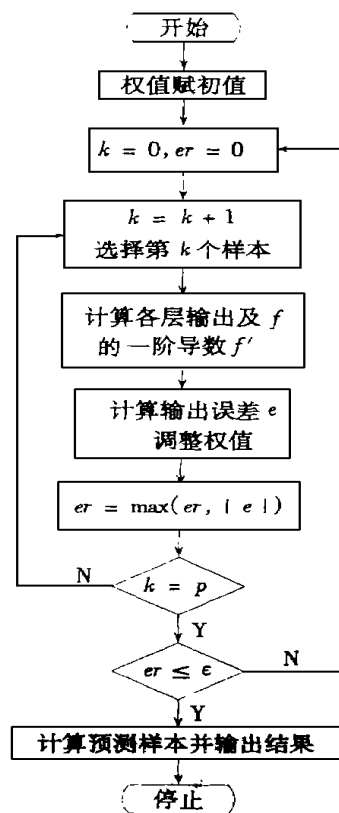


图 2 程序流程图

Fig 2 Block diagram of the program

5 结 论

(1) 在土体的三相物质中,液相和气相的导热性比固相导热性高。土体的密实度对其导热性能影响大。降低含水量和孔隙度,提高密实度可以有效地降低土体的导热性能。

(2) 人工神经网络具有良好的非线性映射能力。考虑的参数较多,比其他方法如线性相关法、经验公式法等具有较大的优越性。它通过优化运行策略的自学习,自动识别因变量和自变量之间复杂的非线性关系,全面综合地考虑土体各物理性质之间的相互影响,对解决土体的非线性问题具有良好的应用前景。

表 3 样本训练及拟合结果

Table 3 Sample training and fitting results

分组	样本号	输 入 层			输出层(导热系数 / W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)			
		含水量 / %	孔隙度	干密度 / g·cm ⁻³	实 测	网络输出	误 差	均方差
训	2	10.660	0.337	1.830	1.105	1.182	-0.077	
	3	6.810	0.327	1.857	1.081	1.000	0.081	
	4	1.970	0.305	1.918	0.870	0.926	-0.056	
	6	18.730	0.364	1.755	1.297	1.282	0.015	
练	8	7.520	0.323	1.869	1.033	1.077	-0.044	0.006 64
	9	2.890	0.312	1.899	0.968	0.929	0.039	
	12	0.000	0.280	1.987	0.970	0.947	0.023	
	13	8.180	0.337	1.829	0.867	0.877	-0.010	
组	15	0.000	0.325	1.863	0.629	0.629	0.000	
	10	13.560	0.324	1.867	1.355	1.378	-0.023	
	7	11.780	0.334	1.838	1.165	1.302	-0.137	
	5	14.980	0.352	1.788	1.277	1.285	-0.008	
拟	1	15.090	0.352	1.788	1.357	1.301	0.056	0.005 64

(3) 用 BP 网络模型可以综合考虑土体的物理性质指标对导热性能的影响, 得出的导热系数值与实测值接近, 训练精度和拟合精度较高。

艰苦的探索后才能找到。为了提高工作效率, 还应进行进一步的探索。

(4) 如何选择训练样本对降低训练成本和提高网络精度有较大的影响。训练样本除了要有足够的数量外, 还应涵盖各种可能出现的样本类型, 才能满足各种样本组合和拟合精度要求;

(5) 选择适当的网络模型和网络参数对提高网络精度也是很重要的。而网络模型和参数的确定要经过

参 考 文 献

1 沈珍瑶, 李国鼎, 李书绅. 高压实膨润土的导热性能[J]. 大坝观测与土工测试, 1998 22(3): 39~40.

2 周继成, 周青山, 韩飘扬. 人工神经网络[M]. 北京: 科学普及出版社, 1992.

国际软土工程学术会议(Shanghai '2001)会议通知

近年来, 我国沿海软土地区大规模的经济建设带动了软土工程学科的迅速发展, 取得了许多创造性的成果和成功经验, 引起了世界同行的关注。国际土力学与岩土工程协会(ISSMGE)主席日本东京大学 K. Ishihara 教授与 ISSMGE 软土工程委员会(TC28)主席英国剑桥大学 Robert Mair 教授共同倡议于 2001 年在上海召开一次软土工程国际学术会议。经 ISSMGE 批准, “国际软土工程学术会议”(Shanghai2001)将于 2001 年 4 月 16 日至 18 日在同济大学召开。本次会议由 TC28 主办, 同济大学、上海市地铁总公司、上海城市轨道交通建设有限公司共同承办, 上海时空软土工程研究咨询中心负责具体实施。

本次会议的主要议题: 软土隧道工程设计与施工新技术; 软土深基坑工程设计与施工新技术; 变形控制设计理论与技术实施; 桩基础设计与施工技术; 地下工程数值计算模型及其计算参数的研究; 现场测试及室内试验模拟; 地基处理新技术与应用; 地下空间的规划、法规及开发利用; 地下工程施工机械及投资分析等。

会期三天, 期间将安排大会报告、学术交流、工地现场参观及新技术展览。

本次大会由上海市建设委员会张惠民主任担任组织委员会主席; 同济大学侯学渊教授等担任副主席; 由刘建航院士担任大会学术委员会主席; 由 K. Ishihara 教授担任大会顾问委员会主席, Robert Mair 教授, ISSMGE 秘书长 Neil Taylor 教授及同济大学副校长吴世明教授担任副主席。

欢迎从事岩土工程尤其是软土工程技术研究的专家、学者, 工程技术人员和管理人员参加, 欲参加会议或递交学术论文者可向大会组委会索取简章及相关资料。

欲向本次大会提交论文者, 请在 2000 年 6 月 30 日前通过邮寄, 传真或 E-mail 方式提交论文摘要, 所有录用的论文将编排成集正式出版。