

改进动量 BP 算法计算围岩风流不稳定传热系数

程卫民, 诸葛福民, 周刚, 王刚

(山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要: 针对围岩与风流之间不稳定传热系数 A_T 的理论值解法的计算过程繁杂、容易出错等缺点, 提出了基于改进动量 BP 算法的不稳定传热系数 A_T 的预测计算模型, 并以淄博矿业集团唐口煤矿的实测数据为例对网络进行了训练和学习, 结果表明, 该方法的使用可从多个方面改善网络的总体收敛性, 具有较高的预测精度。

关键词: 动量 BP 算法; 不稳定传热系数; 预测计算

中图分类号: TD727.3 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336 (2009) 12-0035-03

Improved Momentum BP Algorithm to Calculate Air Flow Unstable Heat Conducted Coefficient of Surrounding Rocks

CHENG Weimin, ZHUGE Fumin, ZHOU Gang, WANG Gang

(School of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510 China)

Abstract According to the complication, easy making mistake and other shortages of the theoretical value solution for the unstable heat conducted coefficient A_T between surrounding rock and air flow, the paper provided the prediction calculation model of the unstable heat conducted coefficient A_T based on the improved momentum BP algorithm. And taking the site measured data of Tangkou Mine, Zibo Coal Mining Group as an example a training and learning of the network was conducted. The results showed the application of the method could improve general convergence of the network from many aspects and could have high prediction accuracy.

Key words momentum BP algorithm; unstable heat conducted coefficient; prediction calculation

围岩与风流之间不稳定传热系数 A_T 是指巷道围岩深部未冷却岩体与空气间温差为 1°C 时, 每小时从 1m^2 巷道壁面向 (从) 空气放出 (吸收) 的热量, 它是围岩的热物理性质、巷道形状尺寸、通风强度及通风时间等的函数, 是围岩与风流热湿交换的重要热力参数之一, 同时也是计算高温矿井围岩散热的必备参数之一。因此, A_T 取值的正确与否直接影响高温矿井热力计算的精确度。从而进一步影响井下空凋制冷降温的设计方案和措施。解算傅里叶热传导微分方程是求解 A_T 的通用方法, 该法虽计算结果精确, 但存在计算过程繁杂、容易出错等缺点。本文采用改进的动量 BP 算法对不稳定传热系数 A_T 进行了模拟计算预测。

1 动量 BP 算法

图 1 为 3 层 BP 网络拓扑结构示意图。它由输入

层、隐含层和输出层组成, 各层之间实行全连接。网络训练通过不断调整权系数及阈值来实现^[1]。

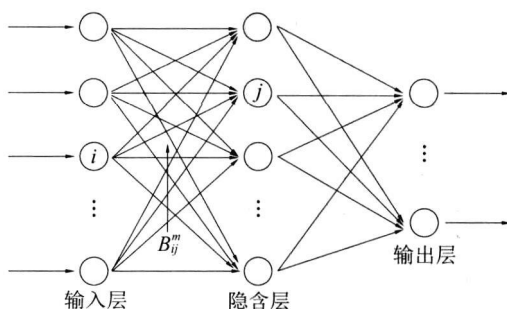


图 1 BP 神经网络拓扑结构示意图

设网络具有 m 层, 令 y_j^m 表示第 m 层中第 j 个结点的输出, 而 y_j^0 为第 j 个结点的输入。令 B_{ij}^m 表示从 y_i^{m-1} 到 y_j^m 间的连接加权, θ_j^m 表示第 m 层第 j 个结点的阈值。首先将各权值和阈值赋予 $(-1, 1)$ 的随机数。计算隐含层和输出层内每个结点 j 的输出 y_j^m 。

$$y_j^m = F(S_j^m) = F\left(\sum_i B_{ij}^m y_i^{m-1} + \theta_j^m\right) \quad (1)$$

其中 $F(S)$ 为 Sigmoid 函数。设输出层第 j 个神经元在时刻 t 的实际输出为 $y_j(t)$, 希望输出为 $d_j(t)$, 则时刻 t 网络的误差函数 $E(t)$ 定义为

$$E(t) = \frac{1}{2} \sum_j [y_j(t) - d_j(t)]^2 \quad (2)$$

为了提高网络的性能, 减少其陷入局部极小值的可能性, 提高收敛速度, 采用动量 BP 算法来训练网络, 反向逐层修正权值和阈值, 即^[12]:

$$B(k+1) =$$

$$B(k) + \alpha[(1-\eta)D(k) + \eta D(k-1)] \quad (3)$$

$$\theta(k+1) =$$

$$\theta(k) + \alpha[(1-\eta)H(k) + \eta H(k-1)] \quad (4)$$

其中: $D(k) = -\partial E / [\partial B(k)]$, k 为迭代次数, $H(k) = -\partial E / [\partial \theta(k)]$ 表示 k 时刻沿着误差函数负方向的下降负梯度。 η 为学习率, $\eta > 0$, α 为动量因子, $0 \leq \alpha < 1$ 。其中, 学习率 η 的调整方法如下:

$$B(k+1) = B(k) + \eta(k)D(k) \quad (5)$$

$$\eta(k) = 2^{-\lambda} \eta(k-1) \quad (6)$$

$$\lambda = \text{sign}[D(k)D(k-1)] \quad (7)$$

重复以上各步, 直至网络全局误差 $E = \sum_l \sum_j (T_j^l - y_j^m)^2 / 2$ 达到预测的精度为止。其中, l 为训练样本数量, T_j^l 为样本目标值。

神经网络训练结束后, 其权值和阈值就已确定, 此时即可进行分析计算。

2 动量 BP 算法的改进

为解决标准动量 BP 算法易产生网络饱和难于收敛、学习过程中振荡等问题, 在设计网络训练过程中, 必须采用改进的动量 BP 算法才能取得较好的效果, 为此, 采用双动量项法来预测计算围岩与风流之间不稳定传热系数 A_τ 。

2.1 隐含层节点数的确定

采用下式可合理确定隐含层的节点数^[13]:

$$e = \begin{cases} q + 0.618(q-p) & (q \geq p) \\ p - 0.618(p-q) & (q < p) \end{cases} \quad (8)$$

其中 e , q , p 分别为隐含层、输入层和输出层神经元数。

2.2 权值和阈值的双动量调整法

双动量调整法的具体实施如下^[14]:

$$B(k+1) = B(k) - \eta(1-\alpha) \frac{\partial E}{\partial B(k)} -$$

$$\alpha \frac{\partial E}{\partial B(k-1)} + \beta[B(k) - B(k-1)] \quad (9)$$

$$\theta(k+1) = \theta(k) - \eta(1-\alpha) \frac{\partial E}{\partial \theta(k)} - \alpha \frac{\partial E}{\partial \theta(k-1)} + \beta[\theta(k) - \theta(k-1)] \quad (10)$$

式中 α 和 β 均为动量因子, 可采用半恢复法实现动量因子的自适应调整。第 3 项可视为前一次的学习经验, 当它与本次的梯度方向相同时, 起到加速作用, 若不同, 则相当于阻尼项, 可减小学习过程的振荡趋势, 提高网络的稳定性; 第 4 项可起到平滑学习过程、跳过局部极小的作用, 此 2 项的联合使用可大幅提高网络的性能。

3 应用改进的动量 BP 算法确定 A_τ

根据 A_τ 的理论解析式, 确定 6 个输入单元, 即: 巷道断面积 G 、巷道断面周长 M 、围岩 (煤体) 比热容 c 、围岩 (煤体) 导热系数 λ 、风量 Q 、巷道通风时间 δ 。输出层单元只有 1 个, 即围岩 (煤体) 与风流之间不稳定传热系数 A_τ 。其中, G , M 和 Q 采取现场测定法得出, 而 c 和 λ 则分别采用实验室直接测试和分棒法测量获得。根据 2.1 节中确定隐含层节点数的原则, 经计算知, 隐含层神经单元数应为 10 个。至此, 建立了用以计算不稳定传热系数 A_τ 的神经网络拓扑结构为 (6-10-1)。

目前, 淄博矿业集团唐口煤矿的开采水平均在 -1000 m 以下, 矿井热害较为严重, 采掘工作面风温一般高达 30~32 °C, 矿井原始岩 (煤) 温度接近 37 °C。根据 2006 年对该矿矿井空气热力参数的测定数据, 共整理出 20 组样本。选取其中的 17 组样本对不稳定传热系数 A_τ 的预测神经网络进行学习和训练, 取学习率 η 为 0.80, 动量因子 α 和 β 分别为 0.3 η 和 0.2 η , 迭代次数为 27190 次, 网络全局误差 $E = 0.1$, 学习完成后就建立辨识模型。

训练样本、神经网络输出值与解算傅里叶热传导微分方程实际计算值误差比较见表 1。不稳定传热系数 A_τ 与无因次不稳定传热系数 A 的关系式为 $A_\tau = \lambda A / R_0$, $R_0 = 0.564 \sqrt{G}$ 。其中: R_0 为巷道当量半径, m ; A 可以通过无因次温度表示, 即:

$$A = \frac{R_0 (\partial T / \partial r)_{r=R_0}}{T_y - T_k} = f(N_s, U_0) \quad (11)$$

式中 T ——冷却的围岩温度, K;

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R_0}$$

——巷壁的围岩温度梯度，K /m

T_y ——原始岩温，K;

T_k ——风温，K;

N_i ——毕欧维数;

U_0 ——傅里叶维数;

r ——巷道当量半径。

$$\frac{\partial T}{\partial \delta} = \varepsilon \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \tag{12}$$

其中： ε 为导热系数，J/（m²· s· K）。

又因冷却围岩的温度分布服从傅里叶热传导微分方程，即：

表 1 训练样本、神经网络输出值与解算微分方程实际计算值误差比较

训练样本序号	G / m^2	M / m	$c / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\times / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$Q / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	δ / h	$A_{\tau} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$		相对误差 /%
							微分方程解	神经网络	
1	10.0	10.6	1.27	1.30	15.1	24 744	5.501	5.302	- 3.62
2	11.2	11.6	1.17	1.70	23.4	35 808	4.675	4.574	- 2.16
3	7.8	7.3	1.45	0.26	7.1	6 024	6.778	6.823	0.66
4	14.5	15.1	0.87	2.60	47.2	70 440	2.883	2.917	1.18
5	17.2	17.0	0.80	3.20	62.6	97 440	1.666	1.683	1.02
6	12.2	12.9	1.01	2.30	30.7	55 224	3.779	3.667	- 2.96
7	9.8	10.2	1.31	0.91	13.1	19 464	5.733	5.802	1.20
8	16.3	16.6	0.83	3.10	61.7	91 080	1.980	1.908	- 3.64
9	13.1	13.9	0.93	2.30	37.7	61 560	3.458	3.299	- 4.60
10	18.0	17.7	0.75	3.50	65.4	114 120	1.225	1.201	- 1.96
11	15.5	15.7	0.85	2.80	52.2	82 488	2.550	2.612	2.43
12	10.5	11.0	1.23	1.50	19.7	28 680	4.901	4.781	- 2.45
13	14.0	14.2	0.91	2.50	40.2	66 432	3.013	2.986	- 0.90
14	20.3	19.3	0.70	4.00	73.6	149 760	0.511	0.525	2.74
15	8.3	8.7	1.40	0.45	7.5	8 160	6.451	6.770	4.94
16	11.9	12.5	1.08	2.10	27.4	50 712	4.001	4.201	5.00
17	18.7	18.3	0.73	3.60	67.9	131 472	0.969	0.965	- 0.41

表 2 不稳定传热系数 A_{τ} 的预测结果

训练样本序号	G / m^2	M / m	$c / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\times / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$Q / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	δ / h	$A_{\tau} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$		相对误差 /%
							微分方程解	神经网络	
1	9.6	9.9	1.36	0.66	10.8	11 472	5.891	6.033	- 2.35
2	15.8	16.2	0.85	2.90	58.8	86 040	2.351	2.311	1.73
3	19.6	18.6	0.71	3.80	71.2	140 928	0.664	0.693	- 4.18

从表 2 可以看出，不稳定传热系数 A_{τ} 的预测精度较高，能满足高温矿井热力计算的要求。

4 结 论

1) 改进的动量 BP 算法不仅具有自学习、自组织、自适应和容错性等一系列优点，同时它还具备了普通 BP 算法所不具有的优点：收敛速度得到较大提高，网络处于饱和区，难以收敛的现象大为改

善、有效减少了学习过程中的局部极小和振荡问题、整个网络具有较好的总体收敛性等。

2) 利用改进的动量 BP 算法计算不稳定传热系数 A_{τ} ，理论简明，计算简单，算法易于实现，便于现场人员掌握，改变了解算傅里叶热传导微分方程存在的计算繁琐、容易出错等不足之处。

3) 把改进的动量 BP 算法和模糊数学、灰色理

(下转第 53 页)

制度化、信息化的运行保障机制, 由于各认证体系的构成要素及结构特点不同, 运行机制也不尽相同。安标管理建立的议事机制、协商机制、监督机制和技术探索机制保障了安标管理的有效实施。

5) 产品认证管理方式上各有特点。安标管理采取矿用产品分级管理、单元管理、差异性管理、大型设备特殊管理、主要零(元)部件分层次管理、有效期证书按无有效期管理、对企业及产品连贯管理、溯源管理、跟踪管理等诸多管理理念和方法, 把延换证与监督检查工作结合起来, 以适应新形势对安全标志工作的要求。在管理方式上大力推行精细化管理, 并起到重要作用。

CCC 认证强调产品必须符合相关国家或行业标准, 对无标产品不予认证。特种设备监察管理按设备发生事故后果的严重程度分为不同级别, 由国家质检总局和省级质量技术监督局及相关检验检测机构按照有关规定依法实施行政许可。

4 安标管理体系健康发展的对策及建议

安标管理体系经过 20 a 的发展, 已经形成一套适合自身作用特点的体制和机制, 在安全生产中发挥着十分重要的作用。通过与国内其他产品认证体系的比较, 有利于进一步明确安标管理体系健康发展的方向和途径, 为安全生产提供更有力的服务和支撑。安全标志管理今后的发展, 可从以下 5 个方面采取措施。

1) 努力践行科学发展观, 解放思想、创新探索, 根据安全生产的客观需要和变化的国际国内形势, 进一步完善安标管理的体制、机制, 优化工作程序, 提高安标工作的科学性、规范性。

2) 以服务矿山安全生产、服务生产企业为出

发点和落脚点, 以信息化为基本手段, 科学管理、规范行为、强化责任、阳光操作, 打造阳光安标、服务安标。

3) 借鉴其他产品认证管理体系的先进做法, 加强科学技术和标准规范的研究、建设, 夯实安标管理的法制基础, 适应新产品不断繁衍、新的安全生产要求不断提高的客观现实, 堵住可能导致事故隐患的各种漏洞, 提高安全把关能力, 为安全发展保驾护航。

4) 坚持以人为本, 加强安全标志的队伍建设、作风建设和廉政建设, 提高支撑服务的能力和水平, 成为国家安全生产支撑保障的重要力量。

5) 在安全标准建设、产品安全设计、矿山用户安全使用、设备安全监察及事故调查分析中, 进一步发挥安标管理的重要作用。

参考文献:

- [1] 袁庆国. 谈煤矿矿用产品安全标志在安全管理中的作用 [J]. 中国煤炭, 2004 (2).
- [2] 冯 道. 中国强制性产品 CCC 体系认证标准与质量执法检查实施手册 [M]. 合肥: 安徽文化音像出版社, 2005.
- [3] 王建新. 3C 认证简述 [J]. 中国设备工程, 2004 (4).
- [4] 宋继红. 我国特种设备安全规范标准体系现状与发展 [J]. 劳动保护, 2005 (10).
- [5] 王严军. 特种设备事故与防范 [J]. 安全与环境学报, 2003 (6).

作者简介: 姚 源 (1984-), 女, 湖北宜昌人, 博士研究生, 研究方向为安全技术及工程。Tel 15210098727, E-mail yugege_521@163.com

收稿日期: 2009-07-02 责任编辑: 王宗禹

(上接第 37 页)

论、遗传算法等其他数学方法结合起来应用, 可进一步改善网络性能, 提高预测精度。

参考文献:

- [1] 王 伟. 人工神经网络原理—入门与应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.
- [2] 楼顺天, 施 阳. 基于 MATLAB 的系统分析与设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [3] 戚德虎, 康继昌. BP 神经网络的设计 [J]. 计算机工程与设计, 1998 (2).

- [4] 徐永群, 陈年友, 朱怡权, 等. BP 神经网络计算法及共价键长计算的研究 [J]. 计算机与应用化学, 2000 (6).
- [5] 岑衍强, 侯祺棕. 矿内热环境工程 [M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1989.

作者简介: 程卫民 (1966-), 男, 山东曹县人, 教授, 博士, 主要从事矿井通风与防尘、高温矿井热害治理等矿山灾害防治技术科研与教学工作。Tel 0532-86057013 E-mail chengwm@163.com

收稿日期: 2009-07-18 责任编辑: 王晓珍