

基于 BP 神经网络的热舒适性指标计算

张川燕, 王子介

(南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 人的舒适性与其影响因子之间存在着复杂的非线性关系, 由于人工神经网络能够反映非线性的映射关系, 因此利用神经网络可实现对舒适性指标的计算. 首先对 BP 神经网络做了一个简要介绍, 并建立了一个用于训练计算舒适性 PMV 指标的 3 层网络. 以 Fanger 公式计算了输入样本的期望输出值, 利用输入样本与期望输出值对网络进行训练. 神经网络达到误差要求后计算 PMV 指标, 其中未经网络训练的样本计算结果与 Fanger 公式计算结果平均偏差为 0.026, 最大偏差为 0.113, 计算误差均在工程应用的允许范围之内.

[关键词] 热舒适, PMV 指标, 神经网络

[中图分类号] TU 832 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009)01-0044-05

Thermal Comfort Index Computing Based on BP Neural Networks

Zhang Chuanyan, Wang Zijie

(School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract Human's comfort has a complicated non-linear relation with its influencing factors. Since the artificial neural networks can reflect the non-linear mapping relation, the neural networks can be used to compute the comfort index. The BP neural networks are simply introduced in this paper and a 3-layers BP neural network is established to compute the comfort PMV index. The Fanger formula is used to calculate the expected output values of the input samples and the network is trained by the input samples and the expected output values. The trained neural networks that have achieved the requested error are used to compute the PMV index. The average deviation between the result from the non-trained samples and the result from the Fanger formula is 0.026 and the maximum deviation is 0.113. All the computing errors are within the requested scope of engineering application.

Key words thermal comfort, PMV index, neural networks

目前, 大多数舒适性空调都是基于空气温度和湿度进行控制的, 而舒适性空调的最终目的就是为人的工作和生活提供舒适的空间环境^[1]. 因此, 长期以来许多暖通空调的研究人员都产生了基于舒适性指标控制空调系统的想法, 即直接以舒适性指标作为被控参数对空调系统进行控制, 并对此进行了研究^[1-4]. 文献[5-6]通过计算机模拟的方法表明热舒适指标控制比传统温湿度控制更能满足舒适性, 而且更节能. 然而, 人的舒适性影响因素众多, 舒适性 PMV 指标与各影响因素之间存在着复杂的非线性关系, 在计算过程中需进行多次迭代计算, 不仅计算速度慢而且存储数据多, 不适于现场实时控制^[7].

近年来, 人工神经网络(Artificial Neural Networks)得到越来越多的学者研究和关注. 人工神经网络是采用物理可实现的器件或采用现有的计算机来模拟生物体中神经网络的某些功能和结构, 并反过来用于工程或其他领域^[8]. 因其具有强大的学习功能, 在众多领域的应用都获得了成功^[9, 10]. 将其应用于人体舒适性指标计算, 可实现对舒适性指标的实时控制, 也使得这种基于舒适性指标控制的空调系统成为可能^[11]. 人工神经网络通过对样本的学习, 可得到输入变量与输出变量的连接权值和连接的结构, 达到预测计算的目标. 本文在建立 BP(Back-Propagation)神经网络的基础上, 通过 Fanger 计算公式获取人体热舒适性影响因子的输入样本及输出期望值, 利用 BP 神经网络对样本进行学习训练, 使输出误差足够小, 以达

收稿日期: 2007-11-30

基金项目: 南京师范大学“211”工程(K11330CY75)资助项目.

通讯联系人: 王子介, 教授, 研究方向: 建筑节能. E-mail: wzj@njnu.edu.cn

到利用该 BP神经网络计算人体热舒适性指标的目的。

1 BP神经网络

在人工神经网络的实际应用中, 绝大部分的神经网络模型是采用 BP网络和它的变化形式, 它也是前向网络的核心部分, 体现了人工神经网络的最精华的部分. BP网络是一种单向传播的多层前向网络, 是一种具有 3层或 3层以上的神经网络, 包括输入层、中间层(隐层)和输出层, 上下层之间实现全连接, 而每层神经元之间无连接^[8]. 它的网络模型结构如图 1所示。

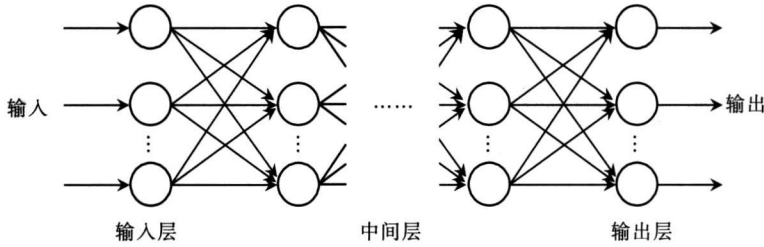


图 1 BP 网络模型

Fig.1 Model of BP neural networks

BP网络的学习过程包括正向传播和反向传播两部分. 正向传播时, 输入学习样本为从输入层经各中间层处理后向输出层传播, 在输出层的各神经元获得输出. 如果在输出层未得到希望的输出, 则按照减小目标输出与实际误差的方向, 从输出层经过各中间层逐层修正各连接权值, 最后回到输入层. 学习算法是通过网络的实际输出与期望值的误差来修改其连接权和阈值. 这种不断的迭代使最后实际输出与期望值尽可能地接近. 采用有一定阈值特性的连续可微的 Sigmoid型函数作为神经元的激发函数, 函数表示为^[12]:

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

对第 P 个样本的误差计算式表示为:

$$E_P = \frac{\sum_i (t_{pi} - y_{pi})^2}{2}, \quad (2)$$

(2) 式中 t_{pi} , y_{pi} 分别表示对第 P 个样本的期望输出和网络的计算输出.

BP神经网络的算法步骤如下: ① 初始化, 给每一个连接权值和阈值赋予 0~1 的随机数[→] ② 将输入样本及期望输出值提供给网络[→] ③ 用输入样本和连接权值及传递函数计算各中间层及输出层的网络输出[→] ④ 根据期望输出及实际网络输出计算误差, 修正权值和阈值, 从输出层开始往后递推, 直到输入层[→] ⑤再转到 ②, 直到误差小于给定时结束计算.

2 热舒适性 PMV 指标在 BP网络中的设计计算

2.1 热舒适性指标 PMV

热舒适在 ASHRAE 标准中的定义为对热环境表示满意的意识状态^[13], 其影响因素主要有人的新陈代谢率、衣服热阻、空气温度、空气湿度、平均辐射温度、空气流速. 最流行的热舒适性评价指标是 PMV 指标, 它是丹麦教授 Fanger 在建立人体两节点热平衡模型的基础上, 通过收集受试者的冷热感觉反映之后, 利用回归公式使其量化, 将 PMV 具体分成 -3~+3 共 7 个指标^[14]. PMV 指标的计算公式为^[14]:

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] \times [M - W - 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - P_a] - \\ & 0.42(M - W - 58.15) - 1.73 \times 10^{-2}M(5.867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - \\ & 3.96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)], \end{aligned} \quad (3)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl}\{3.96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\}, \quad (4)$$

$$f_{cl} = 1.0 + 0.3I_{cl} \quad (5)$$

$$h_c = 8.3v^{0.5}, \quad (6)$$

$$P_a = 10^{-5} \phi \exp [(- 5\,800.220\,6) / T_a + 1.391\,499\,3 + (- 0.048\,602\,39) T_a + 0.000\,041\,764\,768 T_a^2 + (- 0.000\,000\,014\,452\,093) T_a^3 + 6.545\,967\,3 \ln(T_a)] . \tag{7}$$

在 (3) ~ (7) 各公式中, M 为人体新陈代谢产热量 $/(W/m^2)$; W 为人体作功量 $/(W/m^2)$; P_a 为人体周围空气的水蒸气分压力 $/kPa$; t_a 为空气干球温度 $/^{\circ}C$; $T_a = t_a + 273.15 K$; f_{cl} 为服装面积系数; I_{cl} 为服装热阻 $/(m^2 \cdot K) / W$; t_{cl} 为着衣人体外表面温度 $/^{\circ}C$; h_c 为表面换热系数 $/(W/(m^2 \cdot K))$; v 为空气流速 $/(m/s)$; ϕ 为空气相对湿度 $\%$.

从公式中可以看出 PMV 是关于人的新陈代谢率、衣服热阻、空气温度、空气湿度、平均辐射温度、空气流速的一个复杂的函数, 可表示为 $PMV = f(M, I_{cl}, t_a, \phi, t_e, v)$. 在测得上述 6 个人体舒适性的影响因子后, 可采用公式 (3) ~ (7) 进行计算, 求得 PMV 值. 利用公式求解着衣人体外表面温度 t_{cl} 的过程中, 需进行多次迭代求解. 从 Fanger 公式中可以看出其计算过程不适用于对舒适性指标 PMV 的实时控制.

2.2 BP 网络设计计算

2.2.1 训练样本与期望输出向量的建立

在利用神经网络计算舒适性指标的过程中, 首先需要一定数量的已知样本对该神经网络进行训练, 使该神经网络能够以一定精度逼近舒适性指标与其影响因子之间的映射关系, 然后再利用训练达到要求的神经网络去预测计算未知的数据. 由于网络训练需要一定量的样本, 对各变量进行现场测试受到环境的制约, 为了能得到各种环境条件下的舒适性, 使神经网络的计算更具普遍性, 需要改变 6 个变量的取值. 各个变量的取值按如下方法选取: 人的新陈代谢率 M 取一般室内的劳动强度, 休息 (青年人) 时为 $46 W/m^2$, 休息 (静坐) 时为 $58 W/m^2$, 轻度活动时为 $70 W/m^2$. 衣服热阻按一般夏季服装分别取 $0.5 \sim 0.7 clq$, 步长取 $0.1 clq$ 即衣服热阻取值为 $0.077\,5(m^2 \cdot K) / W$ 、 $0.093(m^2 \cdot K) / W$ 和 $0.108\,5(m^2 \cdot K) / W$. 空气温度和空气相对湿度按设计规范要求的夏季参数取其下限与上限值, 分别为 $22 \sim 28^{\circ}C$ 和 $40\% \sim 65\%$. 平均辐射温度按一般空调房间室内情况取其下限与上限值, 取为 $24 \sim 30^{\circ}C$. 为避免产生的样本数过多, 同时考虑精度要求, 温度步长取 $1^{\circ}C$, 相对湿度步长取为 5% . 空气流速按设计规范要求的夏季参数 $\leq 0.3 m/s$ 的要求, 考虑一般室内条件, 分别取 $0.1 m/s$ 、 $0.2 m/s$ 和 $0.3 m/s$. 各个变量的取值见表 1. 产生出各种条件下的影响因子组合共 $3 \times 3 \times 7 \times 6 \times 7 \times 3 = 793\,8$ 组学习样本. 对于每组样本, 采用 Fanger 公式编程计算得到其期望输出值.

2.2.2 BP 网络设计及计算程序

由于一个 3 层 BP 网络能够以任意精度去逼近任意的映射关系^[8], 因此本文采用 3 层 BP 网络. 由于热舒适性的影响因子有 6 个, 输入样本是 6 维的输入向量, 因此输入层一共有 6 个神经元. 中间层的神经元数目影响着网络的非线性预测性能, 根据 Kolmogorov 定理^[8], 设定中间层神经元个数为 13. 输出向量仅有一个 PMV 指标, 因此输出层神经元个数设定为 1. 采用 Matlab 7.0 进行编程求解, 中间层的传递函数设为 S 型正切函数 `tansig`, 输出层的传递函数设为 S 型对数函数 `logsig`.

3 结果分析与讨论

3.1 神经网络的训练与测试

将网络训练次数设定为 500 次, 经过 500 次训练之后网络的误差已达到 $1.546\,67 \times 10^{-6}$, 达到了误差要求, 图 2 为训练过程中的网络误差变化情况.

为了评价该网络的计算准确性, 从训练样本中选取了 100 组样本数据对该 BP 神经网络进行测试, 图 3 为测试结果. 利用 BP 网络计算数据“0”与 Fanger 公式

表 1 输入变量取值
Table 1 Data of input variable

变量	取值
人的新陈代谢率 $/(W/m^2)$	46 58 70
衣服热阻 $/(m^2 \cdot K) / W$	0.077 5 0.093 0.108 5
空气温度 $/^{\circ}C$	22 23 24 25 26 27 28
空气相对湿度 $\%$	40 45 50 55 60 65
平均辐射温度 $/^{\circ}C$	24 25 26 27 28 29 30
空气流速 $/(m/s)$	0.1 0.2 0.3

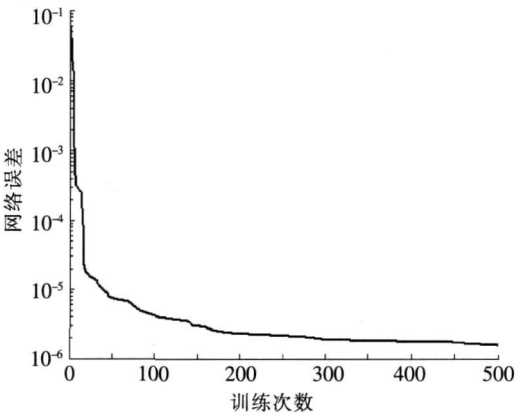


图 2 训练结果
Fig.2 Result of training

计算数据“+”重合度越高,说明 BP网络的计算准确度越高.从图 3中可以看出,由于网络的训练误差较小,用 Fanger公式和 BP神经网络计算的结果已经非常吻合.然而,若要更加准确地测试该网络的性能,必须从训练样本以外的样本数据中选取测试样本,以此评价网络的适应性能.为此选取了 100组训练样本以外的测试样本数据,图 4为 100组未经训练的样本数据的测试结果.从图 4中可以看出,利用 BP网络计算未经网络训练的样本数据,其准确度也较高.

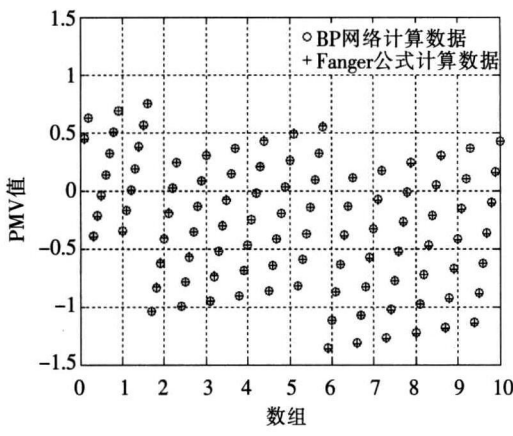


图 3 部分经训练的样本数据测试结果

Fig.3 Testing result of some trained sample data

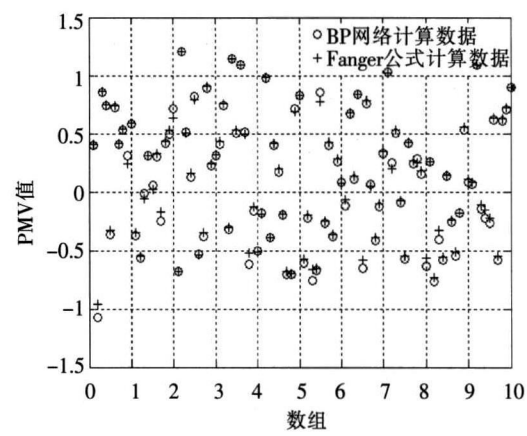


图 4 未经训练的样本数据测试结果

Fig.4 Testing result of not trained sample data

3.2 误差分析

分别对 100组训练及未经训练的样本数据的计算结果进行误差分析, 设定 PMV 指标的 BP网络计算值与 Fanger公式计算值的绝对误差为 ε | ε |表示的是 PMV 指标的神经网络计算值与 Fanger公式计算值的偏差大小, 偏差越小说明准确度越高, ε 计算式表示为:

$$\varepsilon_i = PMV_{i-BP网络} - PMV_{i-Fanger} \quad (8)$$

样本均方差 σ 计算式表示为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}} \quad (9)$$

(8) 式中 i 表示第 i 组计算样本数据; $PMV_{i-BP网络}$ 指利用 BP神经网络计算的 PMV 值; $PMV_{i-Fanger}$ 指利用 Fanger公式计算的 PMV 值.

经训练的样本数据中 | ε |的平均值为 0.003 | ε |最大值为 0.008 | ε |最小值为 4.451×10^{-5} ; 未经训练的样本数据中 | ε |平均值为 0.026 | ε |最大值为 0.113 | ε |最小值为 5.714×10^{-4} . 经训练的样本数据的均方差 $\sigma = 0.004$ 未经训练的样本数据的均方差 $\sigma = 0.035$ 误差均在工程应用允许的范围之内.

4 结 论

人的舒适性 PMV 指标与 6个影响因子之间存在着复杂的非线性关系,采用 Fanger公式计算不利于对舒适性指标的现场实时控制.神经网络能够反映非线性映射的特性,本文建立了一个 3层 BP神经网络,输入层为 6个神经元,表示人体舒适性指标的 6个影响因子,根据 Kolmogorov 定理设定中间层为 13层,输出层为 1层,表示的是 PMV 指标.通过对 7938组输入样本及期望输出值进行训练,经过 500次训练之后,网络误差已达到 1.54667×10^{-6} .对训练和未训练的输入样本数据各 100组进行测试,测试结果表明网络的计算准确度较高,对数据的适应性能也较强,其中对经训练的数据适应性能更强.经训练的 100组数据计算结果平均偏差为 0.003 最大偏差为 0.008 未经训练的 100组数据计算结果平均偏差为 0.026 最大偏差为 0.113 其计算误差均在工程应用允许的范围之内.因此,基于神经网络的 PMV 指标计算,计算方法简单,将其应用于空调系统的控制器中,可实现空调系统对人体舒适性 PMV 指标的实时控制.

[参考文献] (References)

- [1] S Aththaripiyakul, T Leehakpreeda. Neural computing thermal comfort index for HVAC systems[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(15/16): 2553-2565
- [2] Kristl Z, Mitja K, Mateja Trober Lah, et al. Fuzzy control system for thermal and visual comfort in building[J]. Renewable Energy, 2008, 33(4): 694-702
- [3] Francesco Calvino, Maria LaGennusa, Gianfranco Rizzo, et al. The control of indoor thermal comfort conditions introducing a fuzzy adaptive controller[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(2): 97-102
- [4] Liu Weiwei, Lian Zhijie, Zhao Bo. A neural network evaluation model for individual thermal comfort[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(10): 1115-1122
- [5] 戴朝华, 朱云芳, 余南阳, 等. 基于变频空调器的舒适性指标与室内空气质量智能控制研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(4): 57-60
Dai Chaohua, Zhu Yunfang, Yu Nanyang, et al. Intelligent control for comfort indexes and indoor air quality based on variable-frequency air conditioners[J]. HV and AC, 2006, 36(4): 57-60 (in Chinese)
- [6] 戴朝华, 朱云芳, 冯涛. CI 控制的舒适性研究与节能性研究[J]. 制冷学报, 2005, 26(3): 57-60
Dai Chaohua, Zhu Yunfang, Feng Tao. Study on comfort and energy conservation of CI control[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(3): 57-60 (in Chinese)
- [7] 魏东, 潘兴华, 张明廉. 舒适性指标在暖通空调控制中的应用[J]. 北京建筑工程学院学报, 2004, 20(1): 52-56
Wei Dong, Pan Xinghua, Zhang Minglian. Application of PMV comfort index to HVAC system control[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Eng and Architecture, 2004, 20(1): 52-56 (in Chinese)
- [8] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006
Production Research Centre of Feisi Science and Technology. Theory of Neural Networks and MATLAB7 Application[M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2006 (in Chinese)
- [9] 彭新民, 刘明军, 黄财元. 人工神经网络应用于大坝变形观测[J]. 中国农村水利水电, 2006(11): 99-101
Peng Xinming, Liu Mingjun, Huang Caiyuan. Application of artificial neural network model in dam deformation observation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(11): 99-101 (in Chinese)
- [10] 丁国良, 张春路, 刘浩. 结合人工神经网络的翅片管式冷凝器快速仿真模型[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(1): 75-78
Ding Guoliang, Zhang Chunlu, Liu Hao. Fast simulation model combining with artificial neural networks for tube-in-fin condenser[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(1): 75-78 (in Chinese)
- [11] 石磊, 赵蕾, 潘利辉. 应用人工神经网络预测 PMV 指标[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2002, 34(1): 80-83
Shi Lei, Zhao Lei, Pan Lihui. PMV comfort index predicted with artificial neural network[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Nature Science Edition, 2002, 34(1): 80-83 (in Chinese)
- [12] 文新, 周露, 王丹力, 等. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 207-208
Wen Xin, Zhou Lu, Wang Danli, et al. MATLAB Neural Networks Application Design[M]. Beijing: Science Press, 2000, 207-208 (in Chinese)
- [13] ANSI/ASHRAE Standard 55-1992. Thermal environment conditions for human occupancy[S]. Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 1992
- [14] 王子介. 低温辐射供暖与辐射供冷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004, 127-130
Wang Zijie. Low Temperature Radiation Heating and Radiation Cooling[M]. Beijing: China Machine Press, 2004, 127-130 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]