

## 神经网络在 PMV 指标控制中的应用研究

李成利, 黄存柱, 常 军

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266042)

**摘要:** 人们对室内热舒适度的关注涉及到与其有关的 6 个输入因素及 PMV 控制输出。神经网络具有很强的适应性和在线自学能力, 可以逼近任意非线性映射。用神经网络来训练, 可得到空调控制系统的输入输出模型, 实现空调的智能控制。

**关键词:** 热舒适度; PMV 指标; 神经网络

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Application research of neural network in the PMV control

LI Cheng Li, HUANG Cun Zhu, CHANG Jun

(College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** In the pursuit of indoor thermal comfort, people need six factors as input and PMV as control output. Neural network has highly adaptive and on-line self-learning ability. It can approximate any nonlinear mapping. By using neural network, an input-output model of air-conditioning control system can be got and realize the intelligent control of air-conditioning.

**Key words:** thermal comfort; predicted mean vote; neural network

随着我国居民生活水平的持续提高, 空调已进入千家万户。人们对空调的要求, 已经不仅仅满足于合适的温度, 而是要求房间整体环境具有舒适性, 对空调控制理论提出了更高的要求。而我国能源匮乏且消耗巨大, 故对空调的要求为舒适度和节能并重。

## 1 热舒适性和 PMV 指标理论

根据人体工程学和微生物学的理论, 人体在新陈代谢过程中产生热量, 人体散热和体内新陈代谢产热相平衡时, 热感觉良好, 体温保持在 36.5℃ 左右, 否则就觉得不舒服。在稳定状态下, 大多数人体的冷热感觉可以由 6 大因素决定; (1) 平均辐射温度; (2) 室内空气温度; (3) 室内空气相对湿度; (4) 室内空气流速; (5) 人的活动量; (6) 衣着<sup>[1]</sup>。平均辐射温度可以用房间四周的平均表面温度代表, 人的活动量用人体的新陈代谢和机械功来表示, 而衣着保温程度则以服装热阻值和身体与穿衣的面积比来作为指标。

热舒适指标研究人体热舒适感与热湿环境构成因素之间的关系, 将它们用固定的计算公式或计算方法相关联。其中的平均预测投票 PMV(Predicted Mean Vote) 关联了以上提到的 6 大因素与人体感觉之间的关系, 是对

人体热感觉的近似模拟, Fanger 教授进一步发展了热舒适方程, 并用公式表示一个可预测任何给定环境变量的参数组合所产生的热感觉的指标并以此作为控制指标, 这个指标就是 PMV。

Fanger 认为要满足人最基本的 3 个条件, 才能在某一热环境中感到舒适。条件如下: (1) 人与环境达到热平衡, 也就是人体蓄热率  $S=0$ ; (2) 皮肤平均温度应在与舒适相适应的水平; (3) 人体排汗率应最佳, 排汗率是新陈代谢的函数。综合以上, 可以获得热舒适方程的表达式<sup>[1]</sup>:

$$M(1-\eta)-3.054(P_{sk}^*-P_a)-0.42(H-58.15)-0.0173M(5.87-P_a)-0.0014M(34-C)=3.9\times 10^{-8}f_{cl}(T_{cl}^4-T_{mrt}^4)+f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)$$

$$t_{cl}=35.7-0.0275H-0.155I_{cl}[M(1-\eta)]-3.054(P_{sk}^*-P_a)-0.42(H-58.15)-0.0173M(5.87-P_a)-0.0014M(34-t_a)$$

式中  $I_{cl}$  为服装的基本热阻;  $f_{cl}$  为服装的面积系数;  $M$  为人体的新陈代谢率 ( $W/m^2$ );  $\eta$  为人体的机械效率;  $V$  为空气流速 ( $m/s$ );  $P_a$  为空气水蒸气压力 ( $kp_a$ );  $t_a$  为空气温度 ( $^{\circ}C$ )。

## 技术与方法 Technique and Method

PMV 指标与 6 个因素关系式如下:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \{M - W - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl}, & \text{当 } I_{cl} \leq 0.078 \\ 1.05 + 0.645I_{cl}, & \text{当 } I_{cl} > 0.078 \end{cases}$$

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

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25}, & \text{当 } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V_a} \\ 12.1\sqrt{V_a}, & \text{当 } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{V_a} \end{cases}$$

$W$  为外部活动量,多数活动情况该值为零( $W/m^2$ );  $I_a$  为衣服热阻,  $1Clo = 0.155(m^2 \cdot ^\circ C)/W$ ;  $t_r$  为平均辐射温度( $^\circ C$ );  $h_c$  为对流换热系数  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $t_{cl}$  为衣服的表面温度( $^\circ C$ )<sup>[3]</sup>。

## 2 神经网络在 PMV 值中的应用

综上所述,PMV 与各个参数之间的联系复杂,计算繁琐,寻找简便方法十分困难。在此选用神经网络的方法计算如下。

### (1) 输入层与输出层的设计

因 PMV 值与 6 个参数有关,故输入层即为这 6 个参数,分别为平均辐射温度、室内空气温度、湿度、室内空气流速、人体活动量及衣着。对于输出层,只有 1 个值 PMV,所以选择神经网络的输出层的神经元只有 1 个。故输入层维数为 6 维,输出层为 1 维。

### (2) 网络隐层数的选择

具有输入层和至少 1 个隐含层加上 1 个线性输出层的网络,能够逼近任何有理函数。如果增加隐层数,主要目的是进一步降低误差、提高精度,但也使网络复杂化,增加了网络权值的训练时间。在兼顾准确性与效率的前提下,最终确定此处为 3 层网络。

### (3) 隐层神经元数的选择

对于要建立的神经网络,随意选取神经元个数,根据实验结果再作出调整,最终得到适合的每层神经元个数为 6, 21, 1。

### (4) 初始权值的选取

PMV 指标是个复杂的非线性关系,初始权值对于学习是否能够收敛、训练时间的长短以及是否达到局部最小关系很大。希望初始权值在输入累加时,能使每个神经元的状态值接近零,以保证在学习开始时,输出不至落在平坦区内。因此,初始权值一般是随机产生的,而且值要求比较小,如果一个神经元的输入数为  $q$ ,则初始权值可在  $[-2/q, 2/q]$  之间。这样就可以保证每个神经元从一开始就在它们激励函数变换最大的地方进行学习。

### (5) 学习步长的选择

学习步长选择较小值,可使网络总误差函数  $E$  达到最小值。但如果步长过小,延长了网络学习时间,将使得学习过程变得很慢;如果误差函数有许多局部极小值时,会使网络陷入局部最小值或进入平稳停滞状态。学习步长如果选择较大值,则使权值更新加快,同时加快了收敛速度;但学习步长如果选择过大,有可能造成算法的不稳定,甚至无法收敛。所以根据 PMV 模型和此问题的性质,选择初始步长为 0.75<sup>[4]</sup>。

综上所述,PMV 指标的神经网络预测模型如图 1 所示。

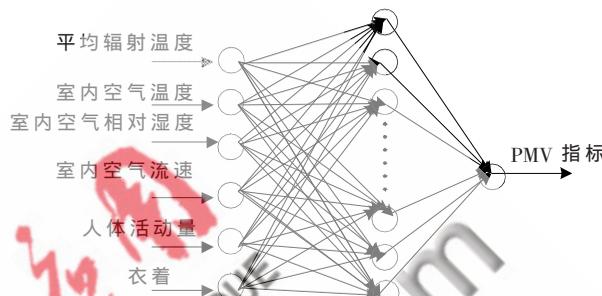


图 1 PMV 指标的神经网络预测模型

## 3 BP 神经网络的构建和仿真

### (1) 网络模型的构建与初始化

构建 BP 网络模型的第 1 步是建立网络对象并初始化,可用 MATLAB 神经网络工具箱函数 newff 建立一个可训练的单隐层 BP 网络,其语法为:

```
net=newff(PR,[S1, ..., Sn],{TF1, ..., TFn},BTF, BLF,PF)
```

其中  $PR$  是  $R \times 2$  的矩阵,用来定义  $R$  个输入向量的最小值和最大值;  $[S1, \dots, Sn]$  是包含每层神经元个数的数组,此处 BP 网络每层神经元的个数为 6, 21, 1, 故  $S1=6, S2=21, S3=1$ ; 网络每层的加权函数为 dotprod; 输入函数为 netsum;  $\{TF1, \dots, TFn\}$  用于指定各层神经元的传递函数,此处取“tansig”函数,它的作用是将神经元的输入范围  $(-\infty, +\infty)$  映射到  $(0, +1)$ ;  $BTF$  用于指定网络的训练函数的名称,此处用 trainlm;  $BLF$  为权值和阈值的训练函数的名称,此处采用 learnngdm, 该函数为带动量项的 BP 学习规则;  $PF$  为网络运行性能表征方式,此处采用最小误差平方和可微函数 mse<sup>[5]</sup>。

### (2) 网络模型的训练

在 MATLAB 神经网络工具箱中有很多训练 BP 神经网络的函数,本课题采用 trainlm 函数,它的语法是  $[net, tr]=trainlm(net, Pd, TL)$ 。其中,  $net$  为初始化之后的网络;  $tr$  为训练过程中每一步长的网络性能记录;  $Pd$  为训练网络的输入样本;  $TL$  为训练用的输出样本。

### (3) 网络模型的仿真

BP 网络每次训练结束后,都要验证网络性能。验证时,使用 sim 函数模拟训练后的网络,其中新的网络输入 pnew, 网络对象 net, 返回网络输出 anew, 其语法为

```
[anew]=sim(net, pnew)
```

## 技术与方法 Technique and Method

## (4) 程序实现及结果分析

```

A=[25.7, 25.8, 25.9, 26.2, 26.6, 26.9, 27, 27, 26.9, 26.8,
26.5, 26.2, 25.9, 25.6, 25.5, 26.2, 26.3, 26, 26.4, 26.9];
B=[25.5, 25.7, 25.6, 25.2, 24.9, 24.8, 24.7, 24.9, 25,
25.5, 25, 25.5, 25.8, 25.9, 25.4, 25, 24.9, 24.7, 24.8, 24];
C=[0.64, 0.6, 0.67, 0.69, 0.7, 0.65, 0.64, 0.62, 0.63,
0.66, 0.65, 0.66, 0.67, 0.65, 0.62, 0.63, 0.64, 0.62, 0.63, 0.69];
D=[0.2, 0.24, 0.29, 0.28, 0.26, 0.27, 0.3, 0.26, 0.27,
0.29, 0.28, 0.27, 0.26, 0.27, 0.26, 0.24, 0.23, 0.25, 0.26, 0.23];
E=[12, 11.5, 11, 10.5, 10, 9.5, 9.8, 7.5, 6.5, 5.5, 6, 6.5,
6.8, 7, 7.1, 6.9, 7.2, 7.5, 7.8, 7.9];
F=[5, 5.5, 4.5, 4, 3, 2.5, 2, 1.5, 1, 0, -0.5, -1, 5.5, 6,
6.5, 7, 7.5, 8, 9, 9.5];
P=[A; B; C; D; E; F];
T=[0.16, 0.17, 0.2, 0.22, 0.29, 0.32, 0.35, 0.36, 0.34,
0.32, 0.29, 0.28, 0.27, 0.28, 0.25, 0.23, 0.24, 0.26, 0.27, 0.26];
net=newff(minmax(P), [6, 12, 1], {'tansig', 'tansig',
'tansig'}, 'trainlm'); //创建一个前向BP神经网络
net.trainParam.show=25; //显示训练结果的间隔步数
net.trainParam.lr=0.75; //设置训练步长
net.trainParam.epochs=500; //设置总的训练步数
net.trainParam.goal=0.0001; //训练目标误差
net=train(net, P, T); //调用trainlm算法训练BP网络
y=sim(net, P); //用仿真样本对网络进行仿真
error=y-T; //计算仿真误差

```

其中 A 为平均辐射温度、B 为室内空气温度、C 为室内空气相对湿度、D 为室内空气流速、E 为人体活动量、F 为衣着情况<sup>[6]</sup>。程序数据参阅参考文献[3]、参考文献[4]。

根据以上程序, 训练结果为:

```

TRAINLM, Epoch 0/500, MSE 1.10637/0.0001, Gradient
128.394/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/500, MSE 0.000790584/0.0001,
Gradient 0.67388/1e-010
TRAINLM, Epoch 36/500, MSE 8.7715e-005/0.0001,
Gradient 0.0171647/1e-010

```

TRAINLM, Performance goal met. TRAINLM, Performance goal met.

训练的误差收敛变化曲线如图 2 所示, 在训练到 36 步时, 网络性能达到预期目标, 可以计算出比较准确的数据。

根据以上训练得到的神经网络预测模型, 可以应用到空调的控制系统中, 根据 PMV 指标的变化情况调整空调的控制系数, 使房间尽快达到最舒适的状态。

参考文献

- [1] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 广西: 广西科学技术出版社, 2004.
- [2] 申欢迎. 基于 PMV 指标的舒适空调模糊控制系统仿真研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2004.
- [3] 郭永吉. 中央空调温度控制系统研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
- [4] 刘谨. 基于 PMV 指标的空调系统舒适控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2003.
- [5] 李翔. 从复杂到有序: 神经网络智能控制理论新进展[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006.
- [6] 董长虹. Matlab 神经网络与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

(收稿日期: 2009-07-12)

作者简介:

李成利, 男, 1957 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 复杂系统建模与自适应控制。

黄存柱, 男, 1982 年生, 硕士, 主要研究方向: 工业建模与控制。

常军, 男, 1984 年生, 硕士, 主要研究方向: 运动控制与智能控制。

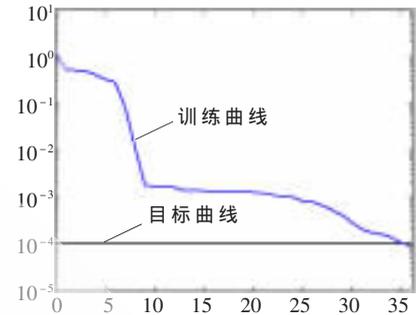


图 2 误差收敛变化曲线