

应用 BP 神经网络改进熏煮香肠质构的 感官评定预测

董庆利¹, 罗欣², 李保国¹, 李红梅¹, 李代禧¹

(1.上海理工大学食品与生物技术研究所, 上海 200093; 2.山东农业大学食品学院, 山东泰安 271018)

摘要:应用 BP 神经网络对熏煮香肠质构的感官评定预测进行了改进。数学检验结果表明, 建立的 BP 神经网络模型平方根误差(RMSE)和标准预测误差(%SEP)较低, 显著低于多元回归模型, 而偏差因子(B_f)和准确性因子(A_f)都在可接受范围。BP 神经网络可以作为较好的预测模型用于实际肉类工业中肉制品的质构感官评价, 实现机械测定全部或部分代替感官评定的快速性、实时性、便捷性检测。

关键词:BP 神经网络; 熏煮香肠; 质构; 预测

Improvement of Prediction of Sensory Texture Evaluation of Smoked-and-cooked Sausage by BP Neural Network

DONG Qing-li¹, LUO Xin², LI Bao-guo¹, LI Hong-mei¹, LI Dai-xi¹

(1.Institute of Food and Biological Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2.College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: Prediction of sensory texture evaluation of smoked-and-cooked sausage was obtained and improved with back propagation neural network (BPNN), which had been analyzed on the basis of multiple regressions by Dong and Luo previously. It was found that the accuracy and goodness-of-fit of BPNN are higher significantly than those of multiple regressions with lower root-mean-squares error (RMSE) and standard error of prediction (SEP), and accuracy factor (A_f) and bias factor (B_f) in acceptable range. Therefore, BPNN provides a useful and accurate method for predicting sensory texture evaluation in meat industry, and is meaningful for the fast, on-time and convenient detection of instrumental texture measurement instead of sensory evaluation.

Key words: BPNN; smoked-and-cooked sausage; texture; prediction

中图分类号: TS 251.65

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2008)12-0074-05

食品工业中对各种食品质构的评定通常有感官评定和机械测定两种, 为减少主观评定的嗜好倾向性, 感官评定结果可以通过仪器测定的准确量值来实现预测, 并实现机械测定全部或部分代替感官评定的快速性、实时性、便捷性检测, 是食品工业的发展方向之一。董庆利和罗欣^[1]应用多元回归方程建立了感官评定指标以机械测定为变量的预测模型, 并通过实验中的数据对建立的预测模型进行了验证。从验证的相对误差来看, 预测模型的准确性较低, 特别是硬度、弹性和总体接受性(相对误差分别为 9.33%、5.56% 和 4.54%)。为提高预测精度, 可选用神经网络的方法。人工神经网络(artificial neural network, ANN)是一种模拟人的神经系统而建立的信息处理系统, 它具有自组织、自学习、

自适应等特性^[2]。反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)是目前应用最广泛的神经网络, 其网络结构简单, 使用方便, 可以解决大多数神经网络所面临的问题, 尤其适合于变化复杂的预测^[3-5]。将 BP 神经网络应用于肉制品中质构感官评定未见研究报道。

对预测模型的数学检验, 仅用相对误差缺乏说服力, 近年来平方根误差(root-mean-squares error, RMSE)、准确性因子(accuracy factor, A_f)、偏差因子(bias factor, B_f)、标准预测误差(standard error of prediction, SEP)等已广泛应用于模型的检验评价^[6-7]。因此, 本实验拟用 BP 神经网络方法改进熏煮香肠质构的感官评定预测, 并应用不同的数学检验参数对多元回归和 BP 神经网络两种方法建立的预测模型进行比较和评价, 选择拟

收稿日期: 2007-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(30800864); 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金项目(slg-07049)

作者简介: 董庆利(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事畜产品安全和质量控制研究。E-mail: dongqingli@126.com

合性和准确性较高的预测模型指导实际生产。

1 材料与方法

1.1 熏煮香肠质构的评定

熏煮香肠质构的感官评定与机械测定参照文献[1]中的数据。

1.2 BP神经网络的构建

BP神经网络是由输入层、隐含层和输出层及各神经元相互连接组成。一个3层BP神经网络是由输入层、隐含层和输出层组成,各层神经元个数分别为 m_1 、 m_2 和 m_3 ,组成所谓 $m_1 - m_2 - m_3$ 结构。本实验中输入层为9个不同机械测定指标(剪切力值 x_1 、压缩I硬度 x_2 、压缩I弹性 x_3 、压缩I黏聚性 x_4 、压缩I咀嚼性 x_5 、压缩II硬度 x_6 、压缩II弹性 x_7 、压缩II黏聚性 x_8 、压缩II咀嚼性 x_9),隐层神经元数经数值实验确定为7个,输出层包括用来预测的6个感官评定参数(感官硬度 y_1 、感官弹性 y_2 、感官黏聚性 y_3 、感官多汁性 y_4 、感官咀嚼性 y_5 、感官总体接受性 y_6),因此构建BP神经网络为 $9 - 7 - 6$ 结构(图1)。

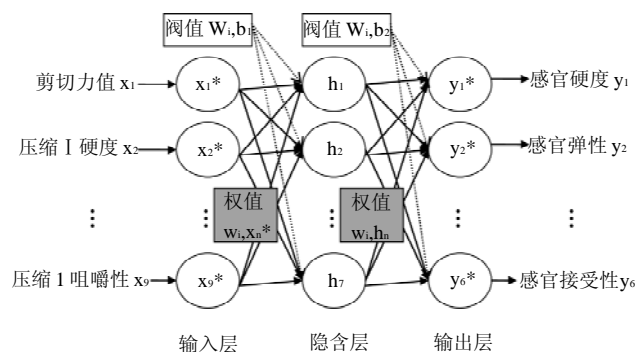


图1 熏煮香肠质构的BP神经网络结构

Fig.1 Structure of BP neural network for texture of smoked-and-cooked sausage

应用美国MatWorks公司开发的Matlab (V.7.0)软件完成多层前向神经网络的构建。首先为解决神经网络输入变量单位以及数量级不一致问题,采用线性变换函数premnmx将输入层变量作[-1, +1]之间的归一化处理,公式如下:

$$P^* = 2 \times \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} - 1 \quad (1)$$

式中, P^* 为输入变量 x_1 、 x_2 、...、 x_9 的归一化值 x_1^* 、 x_2^* 、...、 x_9^* 。 P_{\min} 和 P_{\max} 分别为相应变量的最小值和最大值。

从输入层到隐含层的传递函数为正切S型函数(tansig)如下:

$$h_i = \frac{2}{1 + \exp[(-2) \times (W_{i,b_1} + W_{i,x_1} x_1^* + W_{i,x_2} x_2^* + \dots + W_{i,x_9} x_9^*)]} - 1 \quad (2)$$

其中, h_i 为隐含层变量($i=1 \sim 7$), W_{i,x_n} 为输入层到隐含层之间的权值($n=1 \sim 9$), b_1 为偏置向量1, w_{i,b_1} 为阈值, x_1^* 、 x_2^* 、...、 x_9^* 为输入变量的归一化值。

从隐含层到输出层的线性函数(purelin)如下:

$$y_i^* = W_{i,b_2} + W_{i,h_1} \cdot h_1 + W_{i,h_2} \cdot h_2 + \dots + W_{i,h_7} \cdot h_7 \quad (3)$$

其中, y_i^* 为感官评定参数归一化的输出值($i=1 \sim 7$),为隐含层到输出层之间的权值($n=1 \sim 7$), b_2 为偏置向量2, w_{i,b_2} 为阈值, h_i 为隐含层变量。

得到输出值后应用postmn函数作反归一化处理,公式如下:

$$P = 0.5 \times (P^* + 1) \times (P_{\max} - P_{\min}) + P_{\min} \quad (4)$$

其中, P^* 为输出变量 x_1 、 x_2 、...、 x_6 的归一化值 x_1^* 、 x_2^* 、...、 x_6^* 。 P_{\min} 和 P_{\max} 分别为相应变量的最小值和最大值。

1.3 预测模型的数学检验

数学检验应用平方根误差(root-mean-squares error, RMSE)、准确性因子(accuracy factor, A_f)和偏差因子(bias factor, B_f)^[8-9],标准预测误差(standard error of prediction, SEP)^[3],表达式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\text{obs} - \text{pred})^2}{n}}$$

$$B_f = 10^{\left(\frac{\sum \log \left(\frac{\text{pred}}{\text{obs}} \right)}{n} \right)}$$

$$A_f = 10^{\left(\frac{\sum \left| \log \left(\frac{\text{pred}}{\text{obs}} \right) \right|}{n} \right)}$$

$$\%SEP = \frac{100}{\text{meanobs}} \sqrt{\frac{\sum (\text{obs} - \text{pred})^2}{n}}$$

其中,obs为用熏煮香肠质构的感官评定观测值;meanobs为感官评定观测值的平均值;pred为用建立的预测模型对质构感官评定的预测值。

2 结果与分析

2.1 BP神经网络对质构感官评定的预测

模型建立过程中经过不断调节,最终选定的相关参数为:初始学习速率0.35,动量常数为0.9,最大训练步数为10000,网络性能目标误差为0.0001,最后按此参数调用TRAINGDM (gradient descent with momentum backpropagation)算法来建立网络,网络迭代38次后收敛,网络自动结束训练。训练误差变化曲线如图2所示。熏煮香肠质构的感官评定观测值与BP神经网络的预测值见表1。

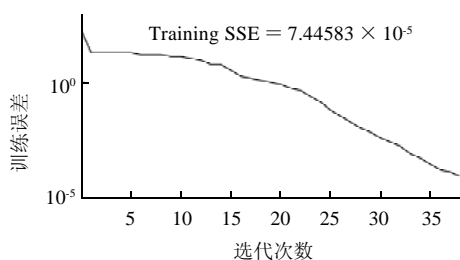


图2 BP神经网络训练误差变化曲线

Fig.2 Curve of training error for BP neural network

构建BP神经网络过程中，隐含层变量的转换方程如下：

$$h_1 = \frac{2}{1 + \exp(-2) \times (0.1549 - 0.1094x_1^* + 0.1633x_2^* + 0.0237x_3^* - 0.0832x_4^* + 0.1176x_5^* + 0.3935x_6^* - 0.0432x_7^* + 0.0485x_8^* - 0.5398x_9^*)} - 1$$

$$h_2 = \frac{2}{1 + \exp(-2) \times (-0.0657 - 0.0822x_1^* - 0.1040x_2^* + 0.5091x_3^* + 0.1090x_4^* + 0.1666x_5^* - 0.2591x_6^* - 0.3484x_7^* - 0.2441x_8^* + 0.5770x_9^*)} - 1$$

$$h_3 = \frac{2}{1 + \exp(-2) \times (0.0046 + 0.1937x_1^* + 0.5104x_2^* - 0.1747x_3^* + 0.1707x_4^* + 0.4568x_5^* + 0.2874x_6^* + 0.2576x_7^* + 0.0078x_8^* - 0.2783x_9^*)} - 1$$

$$h_4 = \frac{2}{1 + \exp(-2) \times (-0.3592 - 0.3368x_1^* - 0.2277x_2^* + 0.3176x_3^* - 0.0669x_4^* - 0.2559x_5^* + 0.4177x_6^* + 0.4514x_7^* - 0.0874x_8^* + 0.4666x_9^*)} - 1$$

$$h_5 = \frac{2}{1 + \exp(-2) \times (0.4648 + 0.4922x_1^* + 0.0951x_2^* + 0.5488x_3^* - 0.0060x_4^* + 0.3197x_5^* + 0.7204x_6^* + 0.5798x_7^* + 0.1323x_8^* + 0.6279x_9^*)} - 1$$

$$h_6 = \frac{2}{1 + \exp(-2) \times (0.0899 - 0.3153x_1^* - 0.3208x_2^* + 0.1736x_3^* - 0.1664x_4^* - 0.3276x_5^* - 0.3406x_6^* - 0.2558x_7^* - 0.3128x_8^* + 0.3422x_9^*)} - 1$$

$$h_7 = \frac{2}{1 + \exp(-2) \times (-0.1539 + 0.0346x_1^* + 0.3882x_2^* - 0.0540x_3^* - 0.1571x_4^* + 0.0744x_5^* - 0.1230x_6^* - 0.5016x_7^* + 0.0459x_8^* + 0.3159x_9^*)} - 1$$

输出变量(感官硬度 y_1 、感官弹性 y_2 、感官黏聚性 y_3 、感官多汁性 y_4 、感官咀嚼性 y_5 、感官总体接受性 y_6)的转换方程如下：

$$y_1^* = -0.1204 + 0.0598h_1 - 0.3316h_2 + 0.2764h_3 - 0.4738h_4 + 0.3831h_5 - 0.5521h_6 + 0.1860h_7$$

$$y_2^* = -0.0079 + 0.3753h_1 + 0.1018h_2 + 0.6107h_3 - 0.1589h_4 + 0.1853h_5 - 0.2595h_6 + 0.4412h_7$$

$$y_3^* = 0.0459 + 0.0748h_1 - 0.1807h_2 + 0.6165h_3 + 0.0567h_4 - 0.3538h_5 - 0.7048h_6 - 0.2963h_7$$

$$y_4^* = 0.3294 + 0.4082h_1 - 0.4482h_2 + 0.0719h_3 + 0.6911h_4 - 0.9339h_5 - 0.2265h_6 + 0.2112h_7$$

$$y_5^* = 0.1530 + 0.5649h_1 - 0.5300h_2 + 0.2048h_3 - 0.0860h_4 - 0.3725h_5 - 0.2119h_6 - 0.5568h_7$$

$$y_6^* = 0.0551 + 0.1051h_1 - 0.6757h_2 + 0.3428h_3 + 0.1453h_4 - 0.5484h_5 - 0.2168h_6 - 0.0515h_7$$

反归一化的表达式如下：

$$y_1 = 0.5 \times (y_1^* + 1) \times (5.4298 - 2.5710) + 2.5710$$

$$y_2 = 0.5 \times (y_2^* + 1) \times (4.8997 - 3.1007) + 3.1007$$

$$y_3 = 0.5 \times (y_3^* + 1) \times (4.4993 - 3.0699) + 3.0699$$

$$y_4 = 0.5 \times (y_4^* + 1) \times (4.4996 - 3.3005) + 3.3005$$

$$y_5 = 0.5 \times (y_5^* + 1) \times (4.7001 - 3.3307) + 3.3307$$

$$y_6 = 0.5 \times (y_6^* + 1) \times (5.2990 - 3.1702) + 3.1702$$

表1 熏煮香肠质构的感官评定观测值与BP神经网络的预测值
Table 1 Observed and predicted values with BP neural networks for texture of smoked-and-cooked sausage

样品	硬度		黏聚性		弹性		多汁性		咀嚼性		总体接受性	
	观测值	预测值	观测值	预测值	观测值	预测值	观测值	预测值	观测值	预测值	观测值	预测值
1	3.33 ± 0.99	3.3293	3.43 ± 1.14	3.4325	3.77 ± 1.28	3.7678	4.03 ± 1.19	4.0290	4.40 ± 1.30	4.3995	4.23 ± 0.90	4.2299
2	3.53 ± 1.14	3.5308	3.63 ± 1.16	3.6281	3.63 ± 1.33	3.6315	3.73 ± 1.11	3.7305	4.20 ± 1.06	4.2001	3.80 ± 1.06	3.8011
3	2.57 ± 1.01	2.5710	3.07 ± 1.17	3.0699	3.60 ± 1.22	3.6010	4.50 ± 0.94	4.4996	4.53 ± 1.31	4.5298	4.47 ± 1.14	4.4692
4	5.40 ± 1.10	5.4007	4.50 ± 1.14	4.4993	4.90 ± 1.52	4.8997	4.60 ± 1.00	4.5984	4.70 ± 1.15	4.6999	5.30 ± 1.09	5.2990
5	3.83 ± 1.12	3.8304	3.80 ± 0.92	3.7996	4.30 ± 0.92	4.2996	3.90 ± 0.84	3.9005	4.47 ± 0.78	4.4699	4.23 ± 0.97	4.2295
6	5.17 ± 0.99	5.1675	4.10 ± 0.96	4.1002	4.33 ± 1.03	4.3311	3.80 ± 1.00	3.8014	4.47 ± 1.01	4.4694	4.37 ± 1.25	4.3714
7	3.90 ± 1.13	3.8998	3.67 ± 1.27	3.6700	3.10 ± 0.99	3.1007	3.30 ± 0.75	3.3005	3.33 ± 1.15	3.3307	3.17 ± 1.05	3.1702
8	4.73 ± 0.91	4.7305	4.03 ± 1.16	4.0306	4.47 ± 1.25	4.4677	4.03 ± 0.89	4.0285	4.37 ± 0.96	4.3699	4.40 ± 1.10	4.3999
9	5.43 ± 1.07	5.4298	4.17 ± 1.32	4.1699	4.70 ± 1.18	4.7001	4.00 ± 1.36	4.0007	4.70 ± 1.15	4.7001	4.93 ± 1.05	4.9288

注：观测值表示形式为平均值±标准差。

2.2 预测模型的数学检验

模型的适用性和可靠性需要经过数学评价才能推广到实际应用，对多元回归与BP神经网络预测模型的数学检验如表2所示。其中，平方根误差(RMSE)表征的是所用数据对模型的适用性，由表2可知，对熏煮香肠质构的感官评定预测，建立的BP神经网络(0.001)显著地低于多元回归(0.199~0.475)，表明BP神经网络预测的准确性较高。表2中的偏差因子(B_f)和准确性因子(A_f)分别表示表示模型的结构偏差(structural deviations)和参数估计的平均准确性(average accuracy of estimates)^[6]，结果表明两种预测方法都在1.000左右，尤其BP神经网络，对感官硬度、弹性、多汁性、咀嚼性及总体接受性都得到了观测值与预测值完全吻合的理想数值。

Ross^[11]曾提出对病原菌B_f值的划分标准：0.90<B_f值<1.05，模型为最好；0.70<B_f值<0.90或1.06<B_f值<1.15，模型为可接受；B_f值<0.70或B_f值>1.15，模型为不可接受。依据此标准，本实验建立的BP神经网络，及多元回归模型都为最好模型。

García-Gimeno等^[12]研究认为B_f和A_f值只能检验评价数据的表面差异，不能衡量预测模型的绝对误差(absolute measures of performance)，因此建议应用不依赖测定数量的标准预测误(%SEP)作为检验预测方程好坏的标准。从表2结果看，多元回归的%SEP值是明显高于BP神经网络的结果，特别是对感官硬度和弹性，标准预测误分别达到了11.291%和8.195%，相对而言，BP神经网络的标准预测误低于0.04%，其适用性和可靠性是可以接受的，可以推广使用。

另外需要说明的是，本文预测模型的数学检验属于建模数据的固有检验(internal validation)，为全面检验模型的拟合性，还可重新选取实验数据带入预测模型进行扩展检验(external validation)^[12]。虽然没有一个广被认可和接受的数学检验结果范围，提高预测模型的预测精度，减少预测误差应用于实际生产是很有必要的。

表2 多元回归与BP神经网络预测模型的数学检验

Table 2 Mathematical testing of prediction models of multiple regressions and BP neural networks

		RMSE	B _f	A _f	%SEP
硬度	MR	0.475	1.005	1.009	11.291
	BPNN	0.001	1.000	1.000	0.024
黏聚性	MR	0.034	1.000	1.001	0.902
	BPNN	0.001	0.999	1.000	0.029
弹性	MR	0.335	0.998	1.013	8.195
	BPNN	0.001	1.000	1.000	0.032
多汁性	MR	0.249	0.989	1.001	6.256
	BPNN	0.001	1.000	1.000	0.025
咀嚼性	MR	0.297	0.999	1.002	6.814
	BPNN	0.001	1.000	1.000	0.008
总体接受性	MR	0.199	0.993	1.007	4.601
	BPNN	0.001	1.000	1.000	0.020

注：MR为多元回归；BPNN为BP神经网络；RMSE为平方根误差；B_f为偏差因子；A_f为准确性因子；%SEP为标准预测误。

3 结论

应用BP神经网络建立了熏煮香肠质构的感官评定预测模型，数学检验结果表明，准确度和拟合性较高，预测误差显著低于多元回归模型的预测误差。BP神经网络改进的质构指标硬度、黏聚性、弹性、多汁性、咀嚼性等预测结果，可推广应用于实际肉类生产，实现质构量值化的快速品质评价。

参考文献：

- [1] 董庆利, 罗欣. 熏煮香肠质构的感官评定与机械测定之间的相关分析研究[J]. 食品科学, 2004, 25(9): 49-55.
- [2] 许东. 基于MATLAB6.X的系统分析和设计——神经网络[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003:19-152.
- [3] 张兵, 袁寿其, 成立, 等. 基于L-M优化算法的BP神经网络的作物需水量预测模型[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 1-2.
- [4] 侯立微, 孙立城, 穆维松, 等. 苹果产量的神经网络预测模型[J]. 中

- 国农业大学学报: 社会科学版, 2001, 42(1): 1-2.
- [5] 李宏文, 董庆利, 杨佳丽, 等. 基于BP神经网络对苹果呼吸强度的预测[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(4): 335-339.
- [6] WILSON P D G, BROCKLEHURST T F, ARINO S, et al. Modelling microbial growth in structured foods: towards a unified approach [J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 73:275-289.
- [7] DONG Q T, TU K, GUO L Y, et al. Response surface model for prediction of growth parameters from spores of *Clostridium sporogenes* under different experimental conditions [J]. Food Microbiology, 2007, 24(6): 642-632.
- [8] ROSS T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology[J]. Journal Applied of Bacteriology, 1996, 81(5): 501-508.
- [9] BARANYI J, PIN C, ROSS T. Validating and comparing predictive models [J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 48(3): 159-166.
- [10] HERVAS C, ZURERA G, GARCIA R M, et al. Optimization of computational neural network for its application to the prediction of microbial growth in foods [J]. Food Sciences and Technology International, 2001, 7(2): 159-163.
- [11] ROSS T. Predictive food microbiology models in the meat industry (MSRC.003) [M]. Sydney: Meat and Livestock, 1999.
- [12] GARCIA-GIMENO R M, HERVAS-MARTINEZ C, BARCO-ALCALA E, et al. An artificial neural network approach to *Escherichia coli* O157: H7 growth estimation [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(2): 639-645.

各门功课都辅导 提高成绩有诀窍



少年文摘报

高中系列版

课程同步 考试必备 中考冲刺 名校名师

期数	内容	定价	邮费	合计
第1期	语文	1.50	0.20	1.70
第2期	数学	1.50	0.20	1.70
第3期	英语	1.50	0.20	1.70
第4期	物理	1.50	0.20	1.70
第5期	化学	1.50	0.20	1.70
第6期	生物	1.50	0.20	1.70
第7期	历史	1.50	0.20	1.70
第8期	地理	1.50	0.20	1.70
第9期	政治	1.50	0.20	1.70
第10期	综合	1.50	0.20	1.70

中国出版集团 人民教育出版社

总发行代理 批发零售 邮发