

基于电参数与神经网络的奶牛乳腺炎检测方法*

崔传金¹ 古少鹏² 左月明¹

(1. 山西农业大学工学院, 太谷 030801; 2. 山西农业大学动物科技学院, 太谷 030801)

【摘要】 通过准确测量奶牛新鲜乳汁的温度、电导率、电容和乳汁中的体细胞含量,建立了温度、电导率、电容为输入,体细胞数为输出的四层BP神经网络模型。并将结果与没有电容参数的网络模型结果进行比较。结果表明:电容参数的加入使检测精度有显著提高,验证集奶牛乳腺炎等级的正确检出率达到100%。

关键词: 奶牛 乳腺炎 电参数 神经网络 检测

中图分类号: S126; S858.237.2⁺6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0193-05

Cow Mastitis Detection Based on Electrical Parameters and Neural Networks

Cui Chuanjin¹ Gu Shaopeng² Zuo Yueming¹

(1. College of Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

2. College of Animal Science and Veterinary Medicine, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract

The temperatures, electrical conductivities, capacitances and somatic cell counts of cow fresh milk were measured accurately, and a four-layer BP neural networks regression model was established. The temperatures, electrical conductivities and capacitances were used as the model input data, and somatic cell was counted as output data. The model results were compared with those of the model without the capacitances parameters. It showed that the detection accuracy had been significantly improved with the capacitances parameters, the correct cow mastitis detection rate for validation sample set was 100%.

Key words Cows, Mastitis, Electrical parameters, Neural networks, Detection

引言

乳腺炎是一种非常复杂,给全世界乳制品行业带来巨大经济损失的疾病,表现为降低了牛奶的产量和质量。美国每年因奶牛乳腺炎造成的经济损失约为20亿美元^[1-2]。控制这种疾病的关键方法之一,是对其实现快速准确的检测,以确保有效实施预防和治疗措施。

在乳腺炎的检测问题上,一类很重要的方法是直接或间接检测乳汁中的体细胞含量,用每毫升乳汁中的体细胞数来判定奶牛是否患有乳腺炎。这类方法检测结果较准确,应用很普遍。但是这类方法还有不足之处。比如,检测的灵敏度低,检测仪器和

设备价格昂贵,操作复杂等^[2]。电导率检测方法有简便、迅速、可在线监测和现场使用的优点,目前被国内外普遍采用,很多国家已把电导率测试装置集成到挤奶器上。但有很多因素影响这种检测方法的准确性,其正确识别率还不够理想(尤其对隐性乳腺炎)而且存在检测限低的问题^[3-6]。如何完善这种电检测技术,是一个具有重要实用价值的问题。

许多研究表明,患病牛乳中不仅导电离子数量发生变化,而且体细胞含量和病原菌微生物的数量也发生变化^[7]。这种变化必然会改变乳汁的结构,因此有极大可能会导致乳汁介电常数的显著变化,进而可能使电容发生变化。Xiong Z Q等研究了发酵过程中,生物量与电容之间的关系,并发现两者之

收稿日期: 2010-03-30 修回日期: 2010-04-09

* 国家自然科学基金资助项目(30871445)和2010年山西省研究生创新资助项目(20103047)

作者简介: 崔传金,博士生,主要从事智能检测与传感器技术研究,E-mail: ccj2006sx@yahoo.com.cn

通讯作者: 左月明,教授,博士生导师,主要从事传感器与测控技术研究,E-mail: ZYueming88@yahoo.com.cn

间存在线性关系^[8]。Patel P M 等比较研究了不同情况死亡的细胞与电容和介电电泳之间的关系,发现细胞膜变化会导致电容等参数的较大变化^[9]。已有研究表明,在电导率参数基础上加入电容参数有可能克服仅以电导率单参数测试的不足,提高隐性乳腺炎测试的精度,从而实现对乳腺炎的快速准确检测。本文建立乳汁的温度、电导率和电容3个参数与乳汁体细胞含量的BP人工神经网络模型,并用该模型对实际采集到的奶样进行验证,与没有电容参数的网络模型结果进行比较,以确定电容参数在提高检测精度中的作用。

1 材料与方法

1.1 仪器设备与分析处理软件

实验的主要仪器装置有:日本 HIOKI3532-50 型 LCR 测试仪,频率范围为 42 Hz ~ 5 MHz,阻抗测量范围 0.1 Ω ~ 200 MΩ;4℃ 恒温冷藏柜;30 支 50 mL 玻璃采样瓶;自制的铂金测量电极;高精度的温度计(精度 0.01℃);美国的 PortaSCC 牛奶体细胞电子测定仪,体细胞的检测上限为 300 万个/mL,下限为 5 万个/mL,温度要求为 7 ~ 35℃,进口试纸、试剂、标准滴管、注射器等。主要数据分析处理软件采用 Matlab 软件。

1.2 样品来源与乳腺炎的判定方法

本文的 80 个奶样来源分别为山西农业大学牧站和太谷县奶牛厂的 80 多头同一品种黑白花奶牛。采集过程中,将分娩后一个月内的奶牛和泌乳后期的奶牛除去^[3],且每头奶牛只采一个乳区。考虑到时间的限制,每天只采 5 个样,采样时先用温开水擦洗乳头,后用 75% 的酒精对乳头进行消毒,并用干净的纸巾擦干,再弃去前两次挤出的奶样,然后进行有效奶样采集。把奶样挤入 50 mL 的干净玻璃瓶内密封,最后将当天采集的奶样带回实验室测试。

目前世界上普遍用单位体积新鲜乳汁中的体细胞数作为乳腺炎的判断标准,各国乳腺炎等级的具体判别标准有较大的差异。为了统一起见,本文采用目前较常用的加利福尼亚 CMT 标准,即根据每毫升乳汁中体细胞的含量将乳腺炎分为 5 个等级,见表 1^[10]。

1.3 电极设计

两电极材料采用 99.99% 的高纯度铂金材料,购于天津艾达恒晟科技发展有限公司。电极体材料采用透明、绝缘性能好的聚四氟乙烯塑料板。两测试电极周围附加了屏蔽电极,电极引线采用铜质屏蔽线。为了突出容抗的作用,要求所测乳汁的容抗值较大,根据

表 1 CMT 法检测奶牛乳腺炎的标准

Tab.1 Standard of CMT method for cow mastitis detection

CMT 等级	体细胞含量/万个·mL ⁻¹	奶牛得病情况
N	0 ~ 20	健康(阴性)
T	20 ~ 40	可疑
1	40 ~ 120	隐性乳腺炎
2	120 ~ 500	较严重感染
3	>500	严重感染

$$X_c = 1/(\omega c) = 1/(2\pi f c) \quad (1)$$

式中 X_c ——容抗 c ——电容
 ω ——电极两端激励源信号角频率
 f ——激励源信号频率

在激励源信号频率一定的情况下,要想得到较高的容抗,只能减小测试电极的电容,又根据

$$c = \epsilon A/L \quad (2)$$

式中 ϵ ——介电常数 L ——电极间距离
 A ——电极横截面积

在电极片的面积 A 确定为 5 mm × 5 mm 时,要想得到很小的电容, L 的取值应当稍大,为了同时兼顾电导率的测量,作了大量的模拟实验。通过实验选取 L 为 10 cm,制作了电极片面积为 5 mm × 5 mm,长度为 10 cm 的平板铂金电极。

1.4 数据获取

体细胞含量测定采用美国 PortaSCC 牛奶体细胞电子测定仪。为了保证数据准确可靠,进一步提高了操作要求。测试的奶样温度和环境室温控制在 19 ~ 21℃ (PortaSCC 要求温度范围为 7 ~ 35℃),并且采样后 1 h 内必须完成全部所采奶样体细胞含量的测定 (PortaSCC 要求 8 h 内的新鲜奶样)。

因为温度对牛奶电导率的影响很大^[3],所以采用以下测量方法:首先将测完体细胞含量后的奶样摇匀并测量和记录温度。再将奶样注入电极池内。最后用 LCR 测试仪测量记录奶样的电阻、电容。另外为了防止奶样之间的相互污染以及奶样变质影响结果的准确性,所以测完一个奶样后(测下一个奶样前),注射器和电极都必须用蒸馏水洗净,并用一定量的下一个奶样冲洗 2 次。对不能及时测量的奶样要放入 4℃ 恒温冷藏柜中保存,并保证所有的样品都在采样后的 8 h 内全部测试完毕(一般要求是 24 h 内的新鲜乳汁)。

温度一定时,电导率^[6]由电阻计算得到。欧姆定律公式为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3)$$

式中 R ——电阻 ρ ——电阻率

对于一个电极而言, 电极间距与面积都是固定不变的, 故 L/A 是一个常数, 以 Q 表示, 故式(3)可写成

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{Q} \quad (4)$$

式中 Q ——电极常数

$1/\rho$ 以 K 表示, 由式(4)得到

$$K = \frac{Q}{R} \quad (5)$$

式中 K ——电导率

实际测试中的电极常数 Q 由氯化钾标准液标定而得。

2 基于 BP 神经网络的乳腺炎检测模型

2.1 网络模型的建立

将试验中所得的 80 组数据, 按照 CMT 标准分为 4 个等级, 每个等级的奶样数见表 2。为保证网络建模集和验证集数据都含有 4 个等级的奶样, 随机抽取每个等级 90% 的数据作为建模集, 每个等级剩余的 10% 为验证集。每组数据中包括牛奶的温度、电导率、电容和体细胞数 4 个分量, 这些分量将用来建立 BP 神经网络。

BP(back propagation) 算法是目前应用最为广泛的神经网络学习算法, 可以实现输入和输出间的任意非线性映射, 且具有一定的泛化功能^[11]。本文建立了两个 BP 网络模型。模型 1 考虑了乳汁电容指标, 它以乳汁的温度、电导率和电容 3 个向量作为网络的输入, 输入层神经元数为 3。网络的输出向量为体细胞数, 输出层神经元数为 1。该网络采用了 2 个隐层。模型 2 不考虑乳汁的电容指标, 仅以温度和电导率 2 个向量作为网络的输入, 输入层神经元数为 2, 输出层神经元数仍为 1, 网络同样采用了 2 个隐层。另外两个网络都使用相同的传递函数和训练函数。两隐层之间传递函数为 tansig, 输出层函数为 Purelin, 训练函数也都选用 trainlm。在网络训练前, 将数据用 mapstd() 标准化函数进行了标准化预处理, 以避免数据饱和并加速网络的收敛。

2.2 网络模型的训练

通过调整隐层的节点数和相关的训练参数对网络结构进行了优化实验。经过多次的训练仿真, 发现当最大迭代次数为 10 000, 误差性能目标值为 0.01, 网络模型 1 两隐层神经元数为 7 和 4, 模型 2 的两隐层神经元数为 6 和 4 时结果较为满意, 这时网络模型 1 的拓扑结构为 3-7-4-1(图 1), 网络模型 2 的拓扑结构为 2-6-4-1(图 2), 故将它们作为 2 种情况的最优网络。

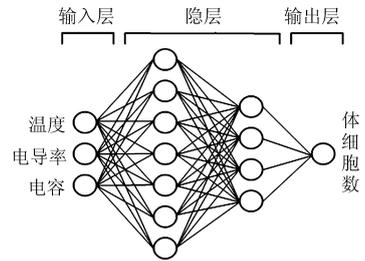


图 1 模型 1 网络结构

Fig. 1 Network structure of model 1

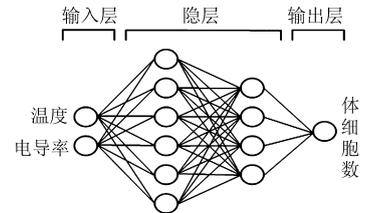


图 2 模型 2 网络结构

Fig. 2 Network structure of model 2

3 结果与分析

3.1 模型分析

两模型的评价指标和验证结果见表 2、表 3 和图 3~6。由表 3 可知, 两个模型的相关性很高, 相关系数 R 分别达到了 0.994 7 和 0.991 6; 验证集的验证相关系数 R_v 也达到了 0.996 3 和 0.919 2。均方根误差较小, 两模型均方根误差 RMSE 分别为 4.982 7 和 6.309 4; 验证均方根误差 $RMSE_v$ 分别为 5.308 3 和 10.291 6。由图 3、4 可以看出, 两模型的决定系数也较高, R^2 分别为 0.989 6 和 0.983 3, 以上说明两模型是较为满意的。

表 2 各级正确检出率

Tab. 2 Detection rate at different levels

患病等级	奶样总数	模型 1 正确 检出率/%	模型 2 正确 检出率/%
N	30	93.33	90.00
T	18	88.88	83.33
1	20	100	90.00
2	12	100	83.33
预测	9	100	77.77
总体	80	95.00	87.50

表 3 模型评价参数

Tab. 3 Model evaluation parameters

BP 模型	R	RMSE	R_v	$RMSE_v$
模型 1	0.994 7	4.982 7	0.996 3	5.308 3
模型 2	0.991 6	6.309 4	0.919 2	10.291 6

3.2 模型处理结果分析

由图 5、6 可以看出, 两模型的验证决定系数 R^2

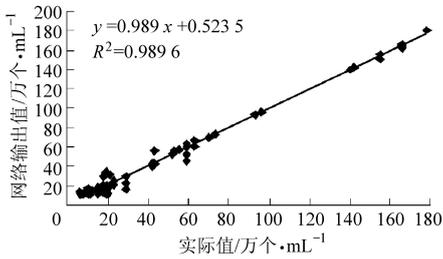


图3 模型1输出值与实际值线性回归曲线

Fig. 3 Chart of linear regression between output values of model 1 and actual values

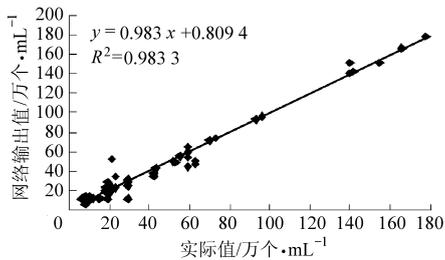


图4 模型2输出值与实际值线性回归曲线

Fig. 4 Chart of linear regression between output values of model 2 and actual values

分别为 0.992 6 和 0.845, 模型 1 优于模型 2。表 2 中, 模型对 9 个建模后预测的奶样(每级 10% 的和)进行了验证, 正确验证检出率分别为 100% 和 77.77%; 80 个奶样的总体正确检出率(建模集数据和预测集数据)分别为 95.00% 和 87.50%; 各级奶样总数(各级建模数据和预测数据的和)的正确检出率上, 模型 1 都高于模型 2。以上可以看出: 模型 1 有更好的预测能力, 电导率参数具有明显的局限性, 电容参数有着不可忽视的重要作用, BP 神经网络在数据处理方面也有独到的优势。

首先, 仅电导率和温度作为检测乳腺炎的指标还不能够达到令人满意的程度, 检出率普遍较低, 文中模型 2 的验证正确率仅为 77.77%。该结论与 2007 年山东农业大学用电导率法测得的隐性乳腺炎的正确检出率为 67%^[6]的结果基本相吻合。只有电导率和温度指标的模型精度较低, 其原因是影响电导率的因素较多(如奶牛的不同品种、不同地区、不同泌乳期、不同胎次以及不同致病菌感染), 这些都会导致奶牛乳汁电导率的不同^[3-4]。这样仅用温度和乳汁的电导率指标就不可能准确反映奶牛的患病程度。

其次, 电容在提高检测的精度上有较大的贡献率, 可以被用来作为一个反映乳腺炎的指标。这一指标的加入必然能使检测的精度进一步提高。这是因为感染了乳腺炎的乳汁中存在着大量的体细胞与各种病原微生物。这些体细胞和微生物的表层是原生质膜, 而原生质膜是一种不导电的物质^[9], 乳汁

中大量散布的体细胞及细菌、真菌、病毒等病原微生物, 在一定程度上导致了乳汁结构的变化, 必然使乳汁的介电常数发生变化, 进而改变乳汁的容抗(乳汁的电容发生了变化)。加入电容这个参数后, 在很大程度上能够弥补仅考虑电导率参数的不足。比如, 乳房链球菌或凝固酶阴性葡萄球菌感染为主的乳汁电导率基本不会变化, 电导率法就不能成功地检出^[12]。而在这种情况下, 体细胞数和病原菌数会必然增多, 加入电容参数就会提高乳腺炎的检出率。一般来说, 乳腺炎程度越高, 乳汁中的体细胞和病原菌微生物就越多, 电容的作用就会越显著, 对准确检出乳腺炎就越有贡献。表 2 中模型 1 的检出率由 T 级到 2 级有逐渐升高的趋势, 而模型 2 趋势则不明显, 这些都充分说明了这一点。2 个模型在 T 级的检出率都较低, 可能是由于这一级体细胞的含量范围较小, 实验样本数不多以及测试过程中的随机误差共同造成的。加大样本容量并进一步改进测试电极有可能提高这一级的正确检出率。这些还有待更进一步的研究。

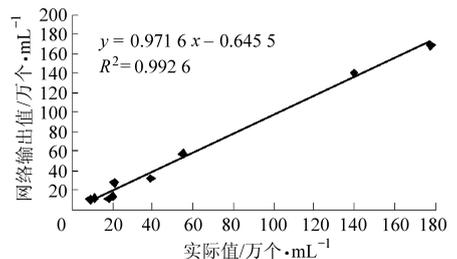


图5 模型1验证输出值与实际值线性回归曲线

Fig. 5 Chart of linear regression between output validation values of model 1 and actual values

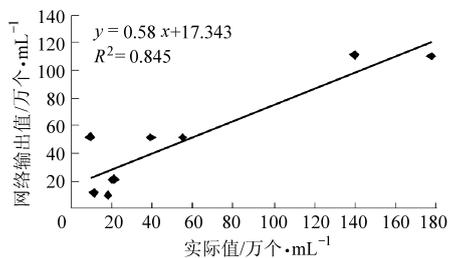


图6 模型2验证输出值与实际值线性回归曲线

Fig. 6 Chart of linear regression between output validation values of model 2 and actual values

最后, BP 神经网络一般能实现多参数的非线性回归, 并具有较好的泛化性。本实验结果也较好地说明了这一点。BP 神经网络的应用, 很大程度上提高了检测的精度。网络模型 1 达到了 100% 的正确验证率, 比相应的电导率阈值法有显著的提高。多电参数(指标)的神经网络模型的进一步研究(比如更好的测试电极, 更大的样本容量)是一个有价值的研究课题。

4 结论

(1)将乳汁的电导率、电容、及温度参数综合作为BP神经网络的输入能够较大地提高奶牛乳腺炎的正确检出率。本文中验证集奶牛而言,乳腺炎等级的验证正确率达到了100%,全部奶牛的等级

正确检出率达到了95.00%。

(2)乳汁的电容作为预测乳腺炎的新型参数是完全可行的。在提高正确检测率上有显著的贡献。它的利用对奶牛乳腺炎的电检测技术是一个很好的补充。

参 考 文 献

- 1 Mungube E O, Tenhagen B A, Regassa F, et al. Reduced milk production in udder quarters with subclinical mastitis and associated economic losses in crossbred dairy cows in Ethiopia [J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2005, 37(6): 503 ~ 512.
- 2 Viguier C, Arora S, Gilmartin N, et al. Mastitis detection: current trends and future perspectives [J]. *Trends in Biotechnology*, 2009, 27(8): 486 ~ 493.
- 3 Norberg E, Hogeveen H, Korsgaard I R, et al. Electrical conductivity of milk: ability to predict mastitis status [J]. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87(4): 1 099 ~ 1 107.
- 4 Janzekovic M, Brus M, Mursec B, et al. Mastitis detection based on electric conductivity of milk [J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2009, 34(1): 39 ~ 46.
- 5 Ahmed W M, Sherein I E, Ghada M N. Observations on sub-clinical mastitis in buffalo-cows with emphasis on measuring of milk electrical resistance for its early detection [J]. *Global Veterinaria*, 2008, 2(1): 41 ~ 45.
- 6 李晋阳,田富洋,李法德,等.奶牛乳腺炎智能检测仪的设计与研究[J].*仪器仪表学报*, 2007, 28(2): 264 ~ 267.
Li Jinyang, Tian Fuyang, Li Fade, et al. Design and study of intelligent detection gauge for cow mastitis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(2): 264 ~ 267. (in Chinese)
- 7 Park Y K, Koo H C, Kim S H, et al. The analysis of milk components and pathogenic bacteria isolated from bovine raw milk in Korea [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(12): 5 405 ~ 5 414.
- 8 Xiong Z Q, Guo M J, Guo Y X, et al. Real-time viable-cell mass monitoring in high-cell-density fed-batch glutathione fermentation by *saccharomyces cerevisiae* T65 in industrial complex medium [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2008, 105(4): 409 ~ 413.
- 9 Patel P M, Bhat A, Markx G H. A comparative study of cell death using electrical capacitance measurements and dielectrophoresis [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2008, 43(7): 523 ~ 530.
- 10 刘峰,迟玉杰.乳房炎乳的检测方法[J].*现代食品科技*, 2005, 21(1): 129 ~ 131.
Liu Feng, Chi Yujie. Determination methods of bovine mastitis milk [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2005, 21(1): 129 ~ 131. (in Chinese)
- 11 Cavero D, Tölle K H, Henze C, et al. Mastitis detection in dairy cows by application of neural networks [J]. *Livestock Science*, 2008, 114(2 ~ 3): 280 ~ 286.
- 12 Norberg E. Electrical conductivity of milk as a phenotypic and genetic indicator of bovine mastitis: a review [J]. *Livestock Production Science*, 2005, 96(2 ~ 3): 129 ~ 139.