

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.030

# 基于电参数和支持向量回归的牛奶体细胞数定量检测<sup>\*</sup>

吴海云<sup>1</sup> 左月明<sup>1</sup> 崔传金<sup>2</sup> 马海利<sup>3</sup> 宋海燕<sup>1</sup>

(1. 山西农业大学工学院, 太谷 030801; 2. 河北联合大学电气工程学院, 唐山 063009;

3. 山西农业大学动物科技学院, 太谷 030801)

**【摘要】** 首先用碘酞染色显微镜体细胞计数法确定了100头不同患病程度的奶牛奶样的体细胞数,然后采用叉指电极在0.01~100 kHz频率范围对奶样进行了交流阻抗测试。在提出该测试系统等效电路的基础上用Zview软件获得了奶样电阻 $R_s$ 、电双层电容 $C_{dl-T}$ 、 $C_{dl-P}$ 等电参数,并分析了不同患病程度奶牛奶样的电参数特点。最后以镜检体细胞计数结果为标准,用电参数作为输入,建立了牛奶体细胞数的支持向量回归(SVR)预测模型,研究了体细胞数定量检测的可行性。结果表明,随着体细胞数的增加(即患病程度的增加),参数 $R_s$ 减小,而参数 $C_{dl-T}$ 、 $C_{dl-P}$ 呈非线性变化趋势。该定量预测模型对除N级以外所有奶样的体细胞数都有较高的预测精度,平均相对误差为29.40%。1级(隐性)、2级(较严重)和3级(严重)乳腺炎的检出正确率均达到100%。

**关键词:** 奶牛 牛奶体细胞数 电参数 支持向量回归 定量检测 乳腺炎

**中图分类号:** S126; TS252.7; S858.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0164-06

## Quantitative Detection of Somatic Cell Count in Milk Based on Electrical Parameters and Support Vector Regression

Wu Haiyun<sup>1</sup> Zuo Yueming<sup>1</sup> Cui Chuanjin<sup>2</sup> Ma Haili<sup>3</sup> Song Haiyan<sup>1</sup>

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

2. College of Electrical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China

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

### Abstract

A method based on electrical parameters and support vector regression for quantitative detection of somatic cell count (SCC) was explored. Firstly, the SCC of 100 raw milk samples was confirmed by the standard microscope counting with iodine staining. And then, an interdigitated microelectrode was used in impedance measurements of milk samples in the frequency range from 0.01 Hz to 100 kHz. An equivalent electrical circuit of the milk samples was deduced for the measured impedance data. By using of Zview software, the electrical parameters of the equivalent electrical circuit were extracted and the relationships between these electrical parameters and the degree of mastitis were analyzed. At last, based on these electrical parameters and support vector regression (SVR), a quantitative detection model of SCC was established and its feasibility was studied. It was showed that one of the electrical parameters of  $R_s$  was decreased with increasing of SCC, while other electrical parameters such as  $C_{dl-T}$  and  $C_{dl-P}$  presented a nonlinear trend. The SVR model was good for prediction of SCC with high precision except the negative samples. The average relative error was 29.40%, and the bovine mastitis detection rate for 1 (sub-clinical), 2 (relative serious infection), and 3 (serious infection) level of samples were 100%.

**Key words** Dairy cows, Milk somatic cell count, Electrical parameters, Support vector regression, Quantitative detection, Mastitis

收稿日期: 2012-03-01 修回日期: 2012-04-05

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(30871445)

作者简介: 吴海云, 博士生, 主要从事智能检测与传感器技术研究, E-mail: wuhaiyun0403@yahoo.com.cn

通讯作者: 左月明, 教授, 博士生导师, 主要从事智能检测、传感器与测控技术研究, E-mail: zyueming88@yahoo.com.cn

## 引言

牛乳中的体细胞数量 (somatic cell count, 简称 SCC) 与奶牛乳腺炎患病程度和牛奶质量密切相关<sup>[1]</sup>。体细胞计数判别已被许多国家当作监控乳腺炎及乳汁质量的标准方法<sup>[2-3]</sup>。因此, 快速准确地检测牛奶体细胞数对奶牛乳腺炎的及时防治、避免巨额损失以及保证优质奶的供应具有重要意义。

传统体细胞数的检测是通过一些物理、化学方法直接或间接进行计数实现的<sup>[4]</sup>。这些方法检测结果准确, 但存在检测时间长、操作复杂、成本高及不能在线测量的问题<sup>[4-5]</sup>。电检测方法是一种容易实现自动化的快速检测方法。国内外学者就奶牛乳腺炎的患病程度与乳汁电导率、pH 值的关系作了许多研究, 很多国家已把电导率测试装置集成到挤奶器上从而实现乳腺炎的实时在线监测<sup>[6-8]</sup>。但这种局限于电导率单参数测试的方法对乳腺炎的正确识别率还不够理想 (尤其对隐性乳腺炎)<sup>[4]</sup>。崔传金等以 PortaSCC 检测结果为基准, 发现在电导率参数的基础上加入电容参数, 能有效提高乳腺炎等级检出正确率<sup>[9]</sup>。

许多研究表明, 生物体系对交流电场具有较高的灵敏性<sup>[10-11]</sup>。电化学阻抗技术是一种良好的生物传感技术。近年来许多学者积极开展了利用该技术检测细菌浓度的试验研究, 取得了一定的进展<sup>[12-13]</sup>。乳汁是由尺寸不同的脂肪、蛋白质、乳糖颗粒、体细胞、病原微生物和  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{H}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等离子以悬浮的状态存在于乳浆中的一种生物非均匀体系<sup>[14]</sup>。奶牛患病后, 乳汁成分将发生变化, 而且随着患病程度加重, 体细胞数将显著增加<sup>[1]</sup>, 不同体细胞数的乳汁在一定电压激励下, 会表现出不同的电响应。因此采用具有良好特性的测试电极并利用交流阻抗法测试, 通过 Zview 阻抗分析软件拟合并提取被测奶样的有关电参数, 这些参数含有体细胞数的信息。

因此, 本文应用交流阻抗测试获取乳汁的电参数, 以标准的碘酊染色显微镜体细胞计数结果为基准, 利用更加丰富的电参数信息, 结合支持向量回归的建模方法, 对体细胞数定量检测问题加以研究。旨在对奶牛乳汁中的体细胞进行快速准确计数, 为乳腺炎的快速准确在线诊断建立更加有效的方法。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料、仪器设备与分析处理软件

试验材料来源于山西农业大学牧站和太谷县北

张村的 100 头同一品种黑白花奶牛。主要试验仪器有: CHI760C 电化学工作站; 美国 PortaSCC 体细胞测定仪 (根据试纸条颜色的变化来判断体细胞数, 体细胞的检测上限为 300 万个/mL, 下限为 5 万个/mL); 海尔 BCD-219SKDE 型冰箱; 30 支 50 mL 的玻璃采样瓶, 冰袋, 隔热盒; 自制叉指电极; 高精度温度计 (精度为  $0.01^\circ\text{C}$ ); 培英 THZ-C 型恒温振荡器; 奥林巴斯 CX21 型生物光学显微镜; 定量移液器; 细胞计数板; 载玻片、盖玻片及细胞碘酊染液等。主要数据分析处理软件有 Matlab 7.3、LIB-SVM 2.89 软件包、Zview 阻抗分析软件及 CHI760C 电化学工作站系统自带的数据处理软件。

### 1.2 奶样阻抗测试系统

图 1 是奶样阻抗测试系统图。测试电极采用灵敏度较高的叉指式两电极, 电极材料为 99% 的高纯度铂金, 厚度为 0.1 mm, 购于天津艾达恒晟科技发展有限公司。电极固定在检测池池底并通过导线与 CHI760C 电化学工作站连接。进行阻抗测量时采用两电极体系, CHI760C 的工作电极引线与电极一端连接, 而对电极和参比电极引线一起连接到电极的另一端。CHI760C 通过设定, 内部将产生一个幅值、频率可调的正弦信号作用于检测奶样, 最后通过串口将奶样的实部、虚部及相位角等电信息传送给计算机, 由此实现整个阻抗测量过程。

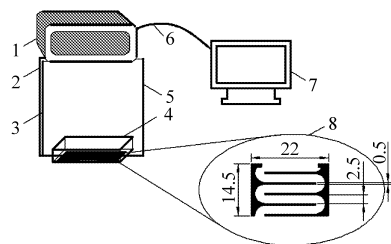


图 1 奶样阻抗测试系统

Fig. 1 Diagram of impedance measurement setup

1. CHI760C 电化学工作站
2. 对电极引线
3. 参比电极引线
4. 样品检测池 (23 mm × 15 mm × 3 mm)
5. 工作电极引线
6. RS232 数据传输线
7. 计算机
8. 叉指电极

### 1.3 样品采集与体细胞计数

奶样的采集在 2011 年的 6~7 月间进行, 每次采样时间为早上 5:30~6:30。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。因为这个时期奶牛乳汁的体细胞数会生理性地升高而非乳腺炎所致, 所以这部分奶样不应在采集范围之内<sup>[7]</sup>。每头奶牛只采一个乳区, 每天采集 5 个奶样。采样时先用温水清洗乳房, 继用 75% 的酒精棉球擦拭乳头。每个乳头弃去头 2~3 把乳汁后进行有效奶样采集。每个乳区收集奶样 50 mL, 并注明牛号、乳区及日期后送回实验室测试。来不及马上测试的

奶样放入冰箱,4℃下恒温保存(但在体细胞数检测时要回温到19~21℃)。

采集回的新鲜奶首先通过碘酊染液染色法进行细胞学检测,以确定牛奶中的体细胞数<sup>[15]</sup>。碘酊染色液的配置:每毫升生理盐水中滴加质量分数为2%的碘酊3滴,混匀即可,现配现用。体细胞计数步骤为:先用定量移液器取一定量混合均匀的奶样于干净试管中(本试验取0.1 mL奶样),再往试管中加入1.9 mL碘酊染色液,混合均匀后使奶样中的体细胞被染色。取少量染色后的奶样悬液(约半滴)轻轻接触盖玻片和计数板的结合处,任其自动流入并充满计数室。将计数板在显微镜载物台上固定好,静置3~5 min进行镜检计数并记录。每个奶样重复计数5次,取平均值作为所测奶样的有效体细胞数。在细胞学检测的同时,还用PortaSCC测定仪,按照该仪器的标准操作程序及要求测量奶样的体细胞数,以便作对照比较。

采样工作完成后,将所有奶样数据汇总成表,并根据上述两种方法所得的体细胞数分别进行分类,以便后续分析。其中分类标准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数将奶牛所患乳腺炎的程度分为5个等级,如表1所示<sup>[16]</sup>。

表 1 CMT 法检测奶牛乳腺炎的标准

Tab.1 Standard of CMT method for bovine mastitis detection

CMT 等级	SCC/万个·mL <sup>-1</sup>	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

1.4 样品阻抗测试

由于温度对牛奶的电参数影响很大,所以阻抗测试前先使测试奶样和测试环境温度均稳定至19~21℃。奶样摇匀后,用定量移液器取其500 μL滴加到样品池中,在CHI760C电化学仪上用交流阻抗法(A.C. Impedance,简称IMP)进行测试。IMP测试条件为:交流微扰信号幅度1 mV,初始电压为0 mV,频率范围为0.01~100 kHz。测完一个奶样后(测量下一个奶样前),电极和样品池都必须用蒸馏水冲洗干净,并用一定量的下一个待测奶样冲洗2次。所有的样品必须在采样后的8 h内全部测试完毕。

2 结果与分析

2.1 奶样的等效电路及电参数分析

在弱电场作用下,奶样的等效电路可以用图2a来表示<sup>[17]</sup>。图中,R<sub>s</sub>表示奶样的电阻,C<sub>s</sub>表示奶样的介电电容,C<sub>dl</sub>表示电双层电容(用常相位角元件表示)。其中C<sub>dl</sub>的阻抗由两个参数来定义,即C<sub>dl-T</sub>、C<sub>dl-P</sub>,表达式为<sup>[18]</sup>

$$Z_{C_{dl}} = \frac{1}{C_{dl-T}(j\omega)^{C_{dl-P}}}$$

式中 Z<sub>C<sub>dl</sub></sub>——等效元件C<sub>dl</sub>的阻抗,Ω

C<sub>dl-T</sub>——等效元件C<sub>dl</sub>的参数,μS·s<sup>C<sub>dl-P</sub></sup>

C<sub>dl-P</sub>——无量纲指数,0 ≤ C<sub>dl-P</sub> ≤ 1,当C<sub>dl-P</sub>为1时,常相位角元件相当于一个纯电容

一般认为在高频(大于1 MHz)时,测试液的介电电容C<sub>s</sub>在阻抗贡献中占据主导作用<sup>[17,19]</sup>,因此对于本试验0.01~100 kHz的测试频段,C<sub>s</sub>支路可认为断路,等效电路可以进一步简化为图2b所示。

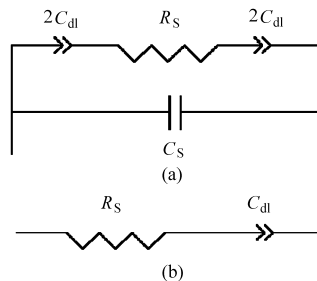


图 2 奶样等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit for measured milk samples

(a) 一般等效电路 (b) 简化等效电路

该等效电路的合理性可通过Zview软件拟合每个样品的阻抗数据进行验证。验证结果如图3、表2和表3所示。其中图3及表2分别为体细胞数为84万个/mL奶样的测试、拟合的阻抗Bode图及参数拟合结果,表3为阻抗模、相位角拟合的均方根误差。可以看出,测量阻抗谱图和拟合谱图基本一致,误差较小,说明等效电路是合理可行的。

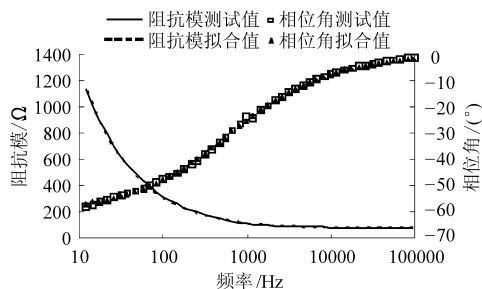


图 3 测试及拟合的阻抗谱 Bode 图

Fig.3 Measured and fitted Bode plots for impedance

表 2 等效电路拟合参数

Tab. 2 Parameters gained by fitting equivalent circuit

参数	$R_s/\Omega$	$C_{dl-T}/\mu S \cdot s^{C_{dl-P}}$	$C_{dl-P}$
数值	79.61	50.10	0.66
相对误差/%	1.16	0.73	0.22

表 3 阻抗模和相位角拟合的均方根误差

Tab. 3 RMSE between measured and fitted impedance modulus and phase

参数	均方根误差	
	阻抗模	相位角
SCC 为 84 万个/mL	5.06	0.53
所有奶样中最大值	11.37	2.02
所有奶样中最小值	2.49	0.51

为了进一步研究不同患病等级奶牛所产奶样的电参数特性,将所采集的 100 个奶样按照镜检体细胞数进行分级(N、T、1、2、3 等级的样品数分别为 30、15、27、17、11)。同一等级奶样的相同电参数(即  $R_s$ 、 $C_{dl-T}$ 、 $C_{dl-P}$ ,通过 Zview 软件拟合测量的阻抗数据得到)取平均值,得到各个参数随奶牛患病程度变化曲线,如图 4 所示。经 Duncan's 检验 ( $P < 0.05$ ),对于参数  $R_s$ ,T 级和 1 级奶样间无显著差异,其他等级奶样间差异显著;对于  $C_{dl-T}$ ,3 级与 N、T、1、2 级奶样差异显著;对于  $C_{dl-P}$ ,3 级与 T、1、2 级奶样差异显著。

由图 4 可以看出,就患病等级平均趋势而言,随着患病程度的增加(即体细胞数增加), $R_s$  减小,同

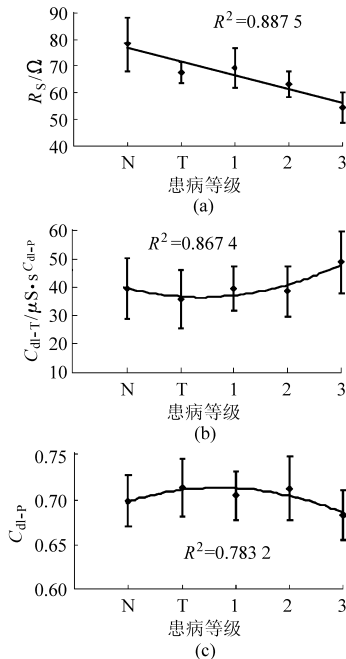


图 4 等效电路参数与牛奶乳腺炎患病等级的关系  
Fig. 4 Relationship between electrical parameters and grade of bovine mastitis

时  $C_{dl-T}$ 、 $C_{dl-P}$  呈现非线性变化趋势。这些参数的变化为体细胞数定量模型的建立提供了有用的信息,同时也反映了乳汁结构成分的变化。结合奶牛乳腺炎的发病机理可知,奶牛患病后乳汁中的病原微生物首先增加,由于奶牛自身免疫系统的防御作用,乳汁中的体细胞会随之增多。同时病菌对细胞的损坏导致  $Na^+$  和  $Cl^-$  泄漏,进入上皮细胞的官腔之中, $K^+$  和乳糖则从官腔中移出,原来维持的平衡被打破,最终导致乳汁中导电离子浓度(如  $Na^+$ 、 $Cl^-$ )显著升高<sup>[4,20]</sup>。

图 4a 中参数  $R_s$  的减小主要是由于导电离子浓度的增大而引起电导率的增大,现在采用的电导率测试法正是基于这个原理<sup>[21]</sup>。然而由图中误差线可知,相邻各个等级的  $R_s$  值有一定的交叉,尤其是隐性乳腺炎(1 级与 N 级有较大重叠),且 T 级和 1 级奶样间无显著差异,这说明奶牛乳腺炎仅靠电导率这一单一因素并不能完全准确检测,这与前人研究结果吻合<sup>[8-9,21]</sup>。

一般来说影响电双层电容  $C_{dl}$  的因素很多,例如电极电压、测试温度、离子浓度和种类等<sup>[17]</sup>。但由于本实验中电极电压、测试温度是固定的,因此这两项影响可以忽略。乳汁内导电离子及体细胞数的变化,导致了电双层的介电特性及电双层厚度改变,从而导致  $C_{dl-T}$ 、 $C_{dl-P}$  也随着患病程度的增加而变化(图 4b、4c)。

## 2.2 基于支持向量回归的体细胞数定量预测模型

### 2.2.1 预测模型的建立

通过上述分析可知,乳汁参数  $R_s$  及  $C_{dl-T}$ 、 $C_{dl-P}$  与奶牛的患病程度(即体细胞数)分别存在线性和非线性关系。因此本文将每个奶样的  $R_s$ 、 $C_{dl-T}$  和  $C_{dl-P}$  数值作为支持向量回归模型的输入,镜检体细胞数作为模型的输出,建立体细胞数的支持向量回归(SVR)模型。从试验的 100 个样品中随机选取 79 个(取每个等级 80% 的样品)作为训练样本,剩余 21 个作为预测样本。采用 LIB-SVM 2.89 软件包,首先利用 Mapminmax 函数将上述样本在  $[0, 25]$  区间进行标准化;再依据均方误差最小原则,通过交叉验证自动搜索最优参数(包括惩罚参数  $c$  和核函数参数  $g$ );然后根据搜索计算返回的参数,用 LIB-SVM 2.89 包中函数 svm-train 建模和 svm-predict 预测。计算发现按照这样的方法搜索出的最优参数往往并非实际需要的参数,通常均方误差比较大。因此采用先调整核函数类型  $t$ ,以及支持向量机类型  $s$ ,筛选出相对较好的类型组合。然后在优异  $t$ 、 $s$  组合条件下,利用深度优先策略<sup>[22]</sup>,并逐步改变不敏感损失函数的参数  $p$  及允许计算终止的判据  $e$ ,不断

搜索最优组合,直到得到误差最小的模型为止。最后将这一模型作为最优预测模型。本研究最终选取了径向基核函数和  $\varepsilon$ -SVR 型的支持向量回归,其参数  $c$ 、 $g$ 、 $p$ 、 $e$  分别为 32、0.062 5、0.025、0.010 6。

## 2.2.2 模型预测结果的分析讨论

采取统计学中常用的两种指标:均方根误差及决定系数评价牛奶体细胞数回归模型<sup>[23]</sup>。在最优组合参数下,该模型训练集的决定系数可达到 0.998 5,预测集的决定系数也达到了 0.955 1。训练集和预测集的均方根误差较小,分别为 0.135 1 和 0.402 4。说明牛奶体细胞数的支持向量回归预测可达到较高的精度。结果如表 4 所示。

此外,为了与现有体细胞测定仪结果比较,计算得到了 PortaSCC 测定仪对随机抽取的 21 个预测样品的相对误差(表 4),以及模型方法与 PortaSCC 方法对乳腺炎等级检出正确率的对比(表 5)。

表 4 SVR 预测模型及 PortaSCC 测定结果相对误差

Tab.4 Comparison of relative errors between SVR predicting model and PortaSCC measurement

序号	患病等级	体细胞数/万个·mL <sup>-1</sup>			相对误差/%	
		显微镜计数	模型预测	PortaSCC	模型预测	PortaSCC
1	N	9.38	56.68	8	504.59	14.67
2	N	11.25	1.26	28	88.84	148.89
3	N	13.13	78.74	40	499.91	204.76
4	N	14.06	7.37	11	47.57	21.78
5	N	16.88	58.30	17	245.49	0.74
6	N	8.75	64.54	<5	637.65	-
7	T	20.63	43.72	94	111.95	355.76
8	T	22.50	28.90	12	28.45	46.67
9	T	24.38	30.07	46	23.38	88.72
10	1	55.38	42.16	35	23.87	36.79
11	1	56.25	51.19	119	8.99	111.56
12	1	60.00	71.75	91	19.59	51.67
13	1	64.69	68.56	132	5.98	104.06
14	1	90.00	102.54	78	13.93	13.33
15	1	96.56	109.31	233	13.20	141.29
16	2	134.06	137.79	150	2.78	11.89
17	2	137.50	306.08	124	122.60	9.82
18	2	187.00	195.42	201	4.50	7.49
19	2	400.00	396.14	>300	0.96	-
20	3	556.88	583.70	>300	4.82	-
21	3	1 100.00	1 715.48	>300	55.95	-

注:“-”表示超出了 PortaSCC 测量范围,确切数量未知,相对误差无法计算。

表 5 SVR 预测模型与 PortaSCC 测定的乳腺炎级别检出正确率比较

Tab.5 Comparison of detection rate between SVR predicting model and PortaSCC measurement

患病等级	样品总数	检出正确率/%	
		模型预测	PortaSCC
N	6	33	67
T	3	67	0
1	6	100	67
2	4	100	100
3	2	100	-

注:“-”表示超出了 PortaSCC 测量范围,确切数量未知,检出正确率无法计算。

由表 4 可知,SVR 模型除了对 N 级样品(体细胞数小于 20 万个/mL,即健康奶样)的体细胞数预测相对误差普遍较高外(平均相对误差为 337.34%),对其他样品的预测相对误差普遍较低(平均相对误差为 29.40%)。也就是说该模型对健康牛奶体细胞数的预测较差。PortaSCC 测定仪结果对 N 级样品的相对误差普遍较小(平均误差为 74.17%),优于 SVR 模型;而对其他样品测试结果的相对误差均高于 SVR 模型的预测误差(除了 17 号样品),结果劣于 SVR 模型。其中 17 号样品与体细胞数相近的其他奶牛的奶样相比,低频阻抗虚部偏小,参数  $C_{dl-T}$  偏大,最终导致 17 号样品的模型预测值偏高,这可能与奶牛自身的差异有关。

SVR 模型对 1 级、2 级、3 级的奶牛乳腺炎检出正确率均达到 100%(表 5),检测范围和检测精度优于 PortaSCC 测定仪。但是对 N 级检出正确率却不如 PortaSCC 测定仪,出现了 4 例假阳性的误诊。

从上述比较看出,SVR 模型对患病等级 N 级以上,即可疑、隐性、较严重、严重乳腺炎感染奶牛奶样的体细胞数预测较准确,尤其是对患隐性乳腺炎的预测精度与前人相比有了较大的提高<sup>[8]</sup>。但该模型不适合 N 级奶样的预测。另外可以看出,虽然 SVR 预测模型对 N 级奶样的体细胞数存在预测值偏高(约 60%,表 4),误判为隐性乳腺炎的问题,但从快速检测角度讲,作为奶牛饲养管理过程中的初筛技术(先用 SVR 模型初筛,再用标准生物学方法确诊的技术),对有效解决奶牛乳腺炎诊断不失为一种较好的方法。

## 3 结论

(1)奶样的交流阻抗电参数与奶牛乳腺炎患病程度存在一定的相关关系。随着患病程度的增加

(即体细胞数的增加),  $R_s$  减小, 而  $C_{dl-T}$ 、 $C_{dl-P}$  呈现非线性变化趋势。

(2) 利用交流阻抗电参数与支持向量回归技术建立牛奶体细胞数定量预测的方法是可行的(除 N 级的奶样外)。SVR 定量模型对除 N 级以外的其

他奶样的体细胞数有较高的预测精度, 平均相对误差为 29.40%。

(3) SVR 定量模型对 1 级、2 级、3 级的乳腺炎检出正确率均达到 100%, 但对 N 级奶样的体细胞预测精度及检出正确率还有待进一步研究与提高。

#### 参 考 文 献

- Moroni P, Sgoifo R C, Pisoni G, et al. Relationships between somatic cell count and intramammary infection in buffaloes [J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89(3): 998 ~ 1 003.
- Moon J S, Koo H C, Joo Y S, et al. Application of a new portable microscopic somatic cell counter with disposable plastic chip for milk analysis [J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(5): 2 253 ~ 2 259.
- Pyörälä S. Indicators of inflammation in the diagnosis of mastitis [J]. *Veterinary Research*, 2003, 34(5): 565 ~ 578.
- Viguiet C, Arora S, Glimartin N, et al. Mastitis detection: current trends and future perspectives [J]. *Trends in Biotechnology*, 2009, 27(8): 486 ~ 493.
- 史慧茹, 姜瞻梅, 田波. 牛乳体细胞数的检测方法 [J]. *畜牧与饲料科学*, 2008, 29(2): 86 ~ 88.
- 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.
- 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.
- 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)
- 崔传金, 古少鹏, 左月明. 基于电参数与神经网络的奶牛乳腺炎检测方法 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 193 ~ 197.  
Cui Chuanjin, Gu Shaopeng, Zuo Yueming. Cow mastitis detection based on electrical parameters and neural networks [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1): 193 ~ 197. (in Chinese)
- 黄卡玛, 李颖, 刘宁, 等. 近年来弱电磁场(波)生物效应机理研究的进展 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2000, 17(1): 36 ~ 40.
- 赵孔双. 介电谱方法及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- Yang Lijiu, Ruan C, Li Yanbin. Detection of viable *Salmonella typhimurium* by impedance measurement of electrode capacitance and medium resistance [J]. *Biosensors and bioelectronics*, 2003, 19(5): 495 ~ 502.
- Yang Lijiu, Li Yanbin, Erf G F. Interdigitated array microelectrode-based electrochemical impedance immunosensor for detection of *Escherichia coli* O157:H7 [J]. *Analytical Chemistry*, 2004, 76(4): 1 107 ~ 1 113.
- 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.
- 范开, 赵德明, 常建宇. 牛奶中体细胞数显微镜计数法的改进 [J]. *中国兽医杂志*, 2005, 41(3): 51 ~ 52.
- 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.
- Yang Lijiu, Li Yanbin, Griffis C L, et al. Interdigitated microelectrode (IME) impedance sensor for the detection of viable *Salmonella typhimurium* [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2004, 19(10): 1 139 ~ 1 147.
- Tan Fei, Leung P H M, Liu Zongbin, et al. A PDMS microfluidic impedance immunosensor for *E. coli* O157:H7 and *Staphylococcus aureus* detection via antibody-immobilized nanoporous membrane [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 159(1): 328 ~ 335.
- Radke S M, Alcocilija E C. A high density microelectrode array biosensor for detection of *E. coli* O157:H7 [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2005, 20(8): 1 662 ~ 1 667.
- Kitchen B J, Middleton G, Durward I G, et al. Mastitis diagnostic tests to estimate mammary gland epithelial cell damage [J]. *Journal of Dairy Science*, 1980, 63(6): 978 ~ 983.
- Nielen M, Deluyker H, Schukken Y H. Electrical conductivity of milk: measurement, modifiers, and meta analysis of mastitis detection performance [J]. *Journal of Dairy Science*, 1992, 75(2): 606 ~ 614.
- 李立红, 许元飞. 深度优先搜索的支持向量机参数优化算法 [J]. *计算机仿真*, 2011, 28(7): 216 ~ 219.  
Li Lihong, Xu Yuanfei. Study on parameters optimization of support vector machines based on DFS [J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(7): 216 ~ 219. (in Chinese)
- 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.