

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.10.024

基于BP神经网络的果蔬热导率预测模型^{*}

张敏¹ 钟志友¹ 杨乐¹ 赵惠忠² 陈健华¹ 车贞花¹
(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093)

【摘要】 通过微热探针法测试装置研究了30个品种的果蔬热导率与可溶性固形物含量、含水率、密度和硬度等因素的变化关系,提出了一种基于BP神经网络的果蔬热导率预测模型,并根据误差比较分析进行了模型优化。结果表明,该优化网络模型具有较好的热导率预测效果,平均相对误差为1.11%,平均绝对误差为0.005 7 W/(m·K),可以用于果蔬贮藏加工业中果蔬热传递过程的计算。

关键词: 果蔬 热导率 BP神经网络 预测模型
中图分类号: TS201 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)10-0117-05

Prediction Model of Thermal Conductivities of Fruits and Vegetables Based on BP Neural Networks

Zhang Min¹ Zhong Zhiyou¹ Yang Le¹ Zhao Huizhong² Chen Jianhua¹ Che Zhenhua¹
(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China
2. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract

The relationships between thermal conductivities and soluble solid contents, water contents, temperature, density and hardness of 30 types fruits and vegetables were studied by the tepid probe test system. A BP artificial neural network model was presented and optimized for the prediction of thermal conductivities of fruits and vegetables according to the error analysis. The result showed that the optimal model was able to predict thermal conductivity with a mean relative error of 1.11%, a mean absolute error of 0.005 7 W/(m·K). The model can be incorporated in heat transfer calculations during fruits and vegetables processing.

Key words Fruits and vegetables, Thermal conductivity, BP neural network, Prediction model

引言

果蔬的加工和贮藏过程中,均伴有热量的交换和传递,对果蔬加工工艺和设备的优化选择,都需要深入了解果蔬的热物性参数,其中果蔬的热导率正是反映了果蔬热传递能力的重要指标,是采后果蔬贮藏制冷装置设计的重要参数,也是确定果蔬冷藏、冻结和干燥加工时间的重要依据^[1]。

目前,果蔬热导率的获取主要还是依赖于实测^[2],Liang^[3]和 Cheng^[4]等对果蔬热导率的测试方

法进行了研究,张忠进^[5]和张敏^[6]等建立了果蔬材料热导率的试验测试装置。在实际测试的基础上,许多学者就果蔬热导率的预测模型也进行了大量的研究,Rahman^[7]和 Shyam^[8]等研究了含水率、温度和密度对果蔬热导率的影响,并建立了相关的关系式和预测模型,但是仅研究了10种果蔬热导率,而且数据的获取仅是从不同的文献中搜集得到的,其测试条件差异较大,因而所获得模型的平均相对误差也较大,大约为12.6%;Sweat^[9]等通过测试含水率参数对其热导率的影响,提出了果蔬热导率关于

收稿日期: 2009-11-26 修回日期: 2009-12-12
^{*} 国家自然科学基金资助项目(30771245)和上海市教委重点学科建设项目(J50704)
作者简介: 张敏,教授,博士,主要从事果蔬热物性研究,E-mail: zhangm@shou.edu.cn

间无连接^[14]。输入层和输出层的神经元由实际问题的输入参数和输出参数而定,隐层的神经元是根据具体训练过程中误差下降情况而定。学习过程由信号的正向传播与误差的反向传播两个过程组成,输入的信息流从输入层经过隐层到达输出层,逐层处理并计算出实际输出值,若输出层的实际输出与期望的输出不符,则转入误差的反向传播阶段。根据误差确定各层单元的误差信号,修正各单元权值,直到网络输出的误差减少到预定的范围之内。

对于隐层

$$N_{ij} = \sum_{i=1}^5 w_{ij} x_i$$

(2)

$$y_j = f(N_{ij})$$

(3)

对于输出层

$$N_{hj} = \sum_{j=1}^n o_j y_j$$

(4)

$$k = f(N_{hj}) = \frac{1}{1 + \exp(-N_{hj})}$$

(5)

式中 N_{ij} ——输入层各节点的输入加权和
 w_{ij} ——输入层神经元 i 到隐层神经元 j 的突触连接系数
 x_i ——第 i 个输入层神经元的输出值
 N_{hj} ——来自隐层各节点的输入加权和
 o_j ——隐层神经元 j 到输出神经元的突触连接系数
 y_j ——第 j 个隐层神经元的输出值
 k ——输出层神经元的输出值

采用果蔬热导率的平均绝对误差 E_a 、平均相对误差 E_r 、标准偏差 E_s 和相关系数 R 等指标对选取的网

络型式的性能进行判断,从而优化神经网络模型^[8]。

$$E_a = \frac{1}{N} \sum_{c=1}^N |k_m - k_p|$$

(6)

$$E_r = \frac{1}{N} \sum_{c=1}^N \frac{|k_m - k_p|}{k_m}$$

(7)

$$E_s = \sqrt{\frac{\sum_{c=1}^N (k_m - k_p)^2}{N - 1}}$$

(8)

式中 N ——训练样本的数量
 k_m 、 k_p ——果蔬热导率实际测试值和神经网络拟合计算得到的热导率值

3 结果与讨论

3.1 热探针仪器常数的标定与检验

采用体积分数大于或等于 99% 的分析纯丙三醇对热探针进行标定,根据丙三醇已知的标准热导率,由式(1)计算出热探针的仪器常数。同一条件下测试 8 次,且每次偏差小于 $\pm 2\%$,然后求其平均值,得到仪器常数 C 值。对 20℃ 条件下丙三醇的测试分析数据如表 1 所示,从表中可看出,整个测试过程加热时间短(小于 20 s),系统输出最大电压差 ΔV 较小(小于 2 mV),由此可得到试样的温升较小(小于 2℃),这样就有效地克服了自然对流对测试造成的影响,较准确地反映了试样所处实际状态的物性值^[12]。 $d(\Delta V)/d(\ln t)$ 线性相关度 $R > 0.999\,9$,相对偏差小于 2%,可见测量结果复现性好。已知 20℃ 时丙三醇的热导率为 $0.287\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[15],表中求得 $d(\Delta V)/d(\ln t)$ 平均值后,代入式(1)得到热探针的仪器常数标定值 $C = 0.031\,4\text{ }\Omega/(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{s})$ 。

表 1 丙三醇测试数据(20℃)

Tab.1 Experimental data of glycerin at 20℃

测试编号	测试时间/s	最大电压差 $\Delta V_{\max}/\text{mV}$	试样最大温升/℃	$d(\Delta V)/d(\ln t)/\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$	相对偏差/%	线性相关度 R
1	18	2.938	1.19	0.000 598	1.69	0.999 946 1 **
2	20	2.599	1.05	0.000 595	0.68	0.999 932 5 **
3	19	2.469	1.00	0.000 593	0.46	0.999 973 2 **
4	21	2.331	0.94	0.000 585	-0.89	0.999 918 5 **
5	20	2.337	0.95	0.000 591	0.00	0.999 932 9 **
6	20	2.150	0.87	0.000 588	-0.74	0.999 967 8 **
7	20	2.134	0.86	0.000 596	0.49	0.999 909 9 **
8	20	2.390	0.97	0.000 597	-1.02	0.999 992 3 **

为了检验热探针测试的可靠性和测量精度,利用上述标定得到的热探针仪器常数值,测得 20℃ 条件下,分析纯乙二醇、无水乙醇以及高纯水的热导率分别为 $0.256\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $0.170\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $0.593\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,与文献[15]数值比较,相对误差

分别为 0.39%、1.19% 和 0.84%,具有较高的精度。

3.2 果蔬热导率及物性参数测试数据

利用标定好的热探针系统,测得每个样品的热导率、含水率、密度、硬度和可溶性固形物含量构成一组数据,共计 216 组数据,如表 2 所示。

表 2 果蔬参数测试值

Tab.2 Determinated data of fruits and vegetables

名称	数据样本/组	含水率/%	密度/ $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$	硬度/ $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$	可溶性固形物含量/%	热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
黄瓜	7	90.50 ~ 96.58	0.962 ~ 1.187	5.8 ~ 7.8	3.00 ~ 4.25	0.522 ~ 0.587
苹果	19	88.14 ~ 88.79	0.577 ~ 0.962	2.8 ~ 12.4	9.80 ~ 14.50	0.340 ~ 0.504
番茄	20	89.93 ~ 97.16	0.842 ~ 1.173	0.4 ~ 4.6	4.20 ~ 8.60	0.537 ~ 0.580
梨	20	70.20 ~ 89.42	0.898 ~ 1.182	3.1 ~ 11.4	9.70 ~ 14.30	0.376 ~ 0.571
桃	37	86.96 ~ 91.54	0.792 ~ 1.239	0.2 ~ 12.2	8.50 ~ 15.25	0.393 ~ 0.573
油桃	2	84.90 ~ 93.07	0.900 ~ 0.968	0.8 ~ 8.4	8.10 ~ 12.99	0.555 ~ 0.560
香蕉	10	77.08 ~ 81.18	0.857 ~ 1.188	0.4 ~ 6.8	13.57 ~ 20.25	0.402 ~ 0.507
青桔	2	92.20 ~ 92.40	0.800 ~ 0.851	7.7 ~ 8.1	7.30 ~ 7.75	0.432 ~ 0.439
杏	3	89.50 ~ 90.70	1.020 ~ 1.022	0.6 ~ 6.2	11.40 ~ 11.90	0.410 ~ 0.581
马铃薯	20	76.24 ~ 88.65	1.027 ~ 1.546	15.2 ~ 19.8	4.10 ~ 6.77	0.512 ~ 0.546
洋葱	11	85.63 ~ 93.80	0.828 ~ 1.082	7.4 ~ 18.4	5.51 ~ 11.50	0.497 ~ 0.558
茄子	1	94.86	0.549	9.8	3.26	0.228
白萝卜	6	92.73 ~ 95.02	0.970 ~ 1.380	11.8 ~ 20.0	3.85 ~ 5.50	0.389 ~ 0.503
胡萝卜	3	87.25 ~ 87.93	0.502 ~ 0.974	15.6 ~ 19.9	7.50 ~ 9.20	0.477 ~ 0.534
布琳	5	86.18 ~ 87.86	0.997 ~ 1.040	6.6 ~ 13.6	11.30 ~ 14.00	0.543 ~ 0.567
冬瓜	2	96.10 ~ 96.40	1.045 ~ 1.051	15.9 ~ 19.2	2.30 ~ 3.50	0.530 ~ 0.562
甜瓜	16	86.24 ~ 96.34	0.746 ~ 1.954	5.2 ~ 20.0	3.60 ~ 14.80	0.434 ~ 0.558
西瓜	1	92.56	2.313	19.6	8.00	0.540
香瓜	1	88.17	0.956	8.0	11.20	0.472
佛手瓜	2	93.11 ~ 93.63	0.926 ~ 0.954	15.6 ~ 16.2	3.30 ~ 5.20	0.491 ~ 0.561
珍珠瓜	1	94.31	1.013	16.3	5.30	0.555
哈密瓜	1	90.56	0.579	10.6	9.80	0.471
苦瓜	3	94.38 ~ 96.68	0.864 ~ 0.784	8.8 ~ 14.6	3.00 ~ 3.50	0.405 ~ 0.467
丝瓜	4	93.20 ~ 95.34	0.805 ~ 1.090	4.3 ~ 6.6	3.75 ~ 5.50	0.431 ~ 0.492
芒果	3	85.30 ~ 86.87	0.962 ~ 1.014	1.1 ~ 2.8	12.50 ~ 15.50	0.427 ~ 0.526
红橙	2	85.20 ~ 88.60	0.900 ~ 0.920	14.3 ~ 15.6	11.00 ~ 15.72	0.432 ~ 0.448
猕猴桃	8	86.74 ~ 92.96	0.798 ~ 0.996	0.1 ~ 14.8	6.50 ~ 14.75	0.502 ~ 0.575
柠檬	2	90.10 ~ 90.80	0.945 ~ 0.977	2.8 ~ 3.8	7.75 ~ 7.76	0.434 ~ 0.459
人参果	2	92.90 ~ 94.10	0.820 ~ 0.845	10.9 ~ 11.4	5.10 ~ 5.50	0.495 ~ 0.522
西葫芦	2	94.35 ~ 95.77	0.811 ~ 0.984	17.0 ~ 19.8	3.25 ~ 3.75	0.551 ~ 0.605

3.3 神经网络的训练与优化

从表 2 的 216 组数据中任选 172 组(80%)数据作为训练集,余下的 44 组(20%)数据作为检验集。输入层与隐层采用的传递函数为 sigmoid 变换函数,输出层采用的传递函数为 purelin 函数。为了提高预测精度,将试验结果进行归一化处理。在模型建立的过程中,选用 Matlab 神经网络工具箱中的 Newff 函数初始化网络,所训练的模型参数设定为:最大学习次数 10 000,网络性能目标误差 10^{-4} ,学习率 0.02,动量常数 0.9。训练过程达到设定参数时,自动停止训练。

对第 2 节建立的神经网络进行训练,根据式(6)~(8)对每种网络型式的拟合计算结果误差进行分析,如表 3 所示。可以看出,当神经网络的隐层为 2,每个隐层具有 12 个神经元时,网络具有最小的误差,即具有最好的预测效果,其平均相对误差 E_r

表 3 神经网络训练模型预测果蔬热导率误差分析

Tab.3 Error parameters in the prediction of thermal conductivity with different neural network configurations

隐层数	隐层神经元数	E_r /%	E_a $/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	E_s $/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	R^2
1	12	2.04	0.010 4	0.016 4	0.914
1	14	1.79	0.009 1	0.013 6	0.941
1	16	1.28	0.006 5	0.010 0	0.968
1	18	1.16	0.006 0	0.010 0	0.968
1	20	1.27	0.006 6	0.010 0	0.968
2	8	1.20	0.006 0	0.010 0	0.968
2	10	1.14	0.005 9	0.010 0	0.968
2	12	1.11	0.005 7	0.010 0	0.968
2	14	1.35	0.006 8	0.010 0	0.968

为 1.11%,平均绝对误差 E_a 为 0.005 7 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,平均标准偏差 E_s 为 0.010 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,线性关系 R^2 为 0.968。其输出值与测试值的关系如图 2 所示。

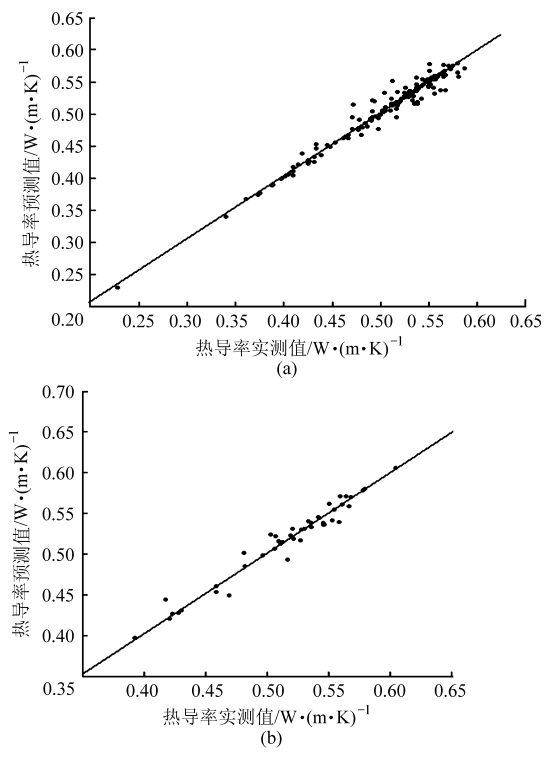


图 2 果蔬热导率预测值与试验值的关系

Fig.2 Correlaton of predicted values and experimental values of thermal conductivity of fruits and vegetables

(a) 训练组 (b) 检验组

为了进一步验证该优化网络的性能,将未参与训练的 44 组测试数据组作为校核样本对网络进行测试,其预测值与目标值的关系如图 2b 所示。测试结果为:平均相对误差为 0.34%,平均绝对误差为 0.001 7 W/(m·K),平均标准偏差为 0.005 W/(m·K), $R^2=0.960$,进一步说明了利用该神经网络进行预测的可靠性。

4 结束语

应用 BP 人工神经网络建立了可以通过含水率、密度、可溶性固形物含量、硬度等参数对果蔬热导率进行预测的模型。预测结果表明,该模型具有较高的精度,预测热导率值平均相对误差为 1.11%,平均绝对误差为 0.005 7 W/(m·K),平均标准偏差为 0.010 W/(m·K), R^2 为 0.968。在实际应用中,由于含水率、密度、可溶性固形物含量、硬度等参数较易测得,可根据优化的 BP 神经网络模型预测得到果蔬的热导率值,且预测速度快,操作简便,从而可为食品贮藏加工业等提供可靠的理论和数据参考。

参 考 文 献

- 1 Maria A, Stefano C, Vincenza C. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process[J]. Journal of Food Engineering,2007,78(3):922~932.
- 2 华泽钊,李里特,丹阳,等. 食品冷冻冷藏原理与设备[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- 3 Liang Xingang, Zhang Yinping, Ge Xinshi. The measurement of thermal conductivities of solid fruits and vegetables[J]. Measurement Science and Technology,1999(10):82~86.
- 4 Cheng S X, Jiang Y F, Liang X G. A tiny probe for measuring the thermal conductivities of non-rigid materials[J]. Measurement Science and Technology,1994,5(11):1 339~1 344.
- 5 张忠进,金文桂. 果蔬导热系数的测试[J]. 农业工程学报,1996,12(1):192~195.
Zhang Zhongjin, Jin Wengui. Measuring thermal conductivity of fruit and vegetable[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,1996,12(1):192~195. (in Chinese)
- 6 张敏,赵惠忠,谢晶,等. 果蔬热导率测试系统设计和试验[J]. 农业机械学报,2006,37(1):90~93.
Zhang Min, Zhao Huizhong, Xie Jing, et al. Study on measurement system of thermal conductivity of vegetables and fruits [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(1):90~93. (in Chinese)
- 7 Rahman M S, Chen X D, Perera C O. An improved thermal conductivity prediction model for fruits and vegetables as a function of temperature, water content and porosity[J]. Journal of Food Engineering,1997,31(2):163~170.
- 8 Shyam S S, Rahman M S. Using neural networks to predict thermal conductivity of food as a function of moisture content, temperature and apparent porosity[J]. Food Research International,2003,36(6):617~623.
- 9 Sweat V E. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables[J]. Journal of Food Science,1974, 39(6):1 080~1 083.
- 10 Lisowa H, Wujec M, Lis T. Influence of temperature and variety on the thermal properties[J]. Int. Agrophysics, 2002, 16(1):43~52.
- 11 张敏,张杰,孙治强,等. 生鲜食品导热系数影响因素的试验与分析[J]. 河南农业大学学报,2007,41(6):680~683.
Zhang Min, Zhang Jie, Sun Zhiqiang, et al. Experimental study on factors influencing fresh food thermal conductivity[J]. Journal of Henan Agricultural University,2007,41(6):680~683. (in Chinese)

参 考 文 献

- 1 张宇昊,王颀,张伟,等. 半纤维素发酵生产燃料乙醇的研究进展[J]. 酿酒科技,2004(5):72~74.
Zhang Yuhao, Wang Jie, Zhang Wei, et al. Research progress of hemicellulose fermentation to produce fuel alcohol[J]. Liquor-making Science & Technology,2004(5):72~74. (in Chinese)
- 2 柴梅,颜涌捷. 生物质生产燃料乙醇技术的研究[J]. 上海节能,2006(6):71~74.
Chai Mei, Yan Yongjie. Reserch on fuel ethanol from biomass[J]. Shanghai Energy Conservation,2006(6):71~74. (in Chinese)
- 3 杨喜爱,彭源德. 木糖乙醇发酵技术研究进展与前景[J]. 中国麻业科学,2006,32(5):262~266.
Yang Xiai, Peng Yuande. Progress and prospect of xylose—fermentation study[J]. Plant Fiber Sciences in China,2006, 32(5):262~266. (in Chinese)
- 4 张祖立,朱永文,刘晓峰,等. 螺杆挤压膨化机加工农作物秸秆的试验研究[J]. 农业工程学报,2001,17(6):97~101.
Zhang Zuli, Zhu Yongwen, Liu Xiaofeng, et al. Experimental study on extruding crop straw by screw extruder[J]. Transactions of the CSAE, 2001,17(6):97~101. (in Chinese)
- 5 Ismail F A, Zahran G H. Studies on extrusion conditions of some cereals and legumes[J]. Egyptian Journal of Food Science, 2002, 30(1): 59~76.
- 6 Bruno de Cindio, Gabriele D, Pollini C M, et al. Filled snack production by co-extrusion-cooking effect of processing on cereal mixtures[J]. Journal of Food Engineering,2002, 54(1): 63~73.
- 7 赵凤芹,申德超,刘远洋,等. 挤压系统参数对秸秆挤压膨化机度电产量的影响[J]. 农机化研究,2006(6):160~163.
Zhao Fengqin, Shen Dechao, Liu Yuanyang, et al. The experimental study on influence regularity of extrusion parameter on per kW·h yield of extruder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2006(6):160~163. (in Chinese)
- 8 赵凤芹,申德超,刘远洋,等. 挤压膨化对玉米秸秆中粗纤维含量的影响[J]. 东北农业大学学报,2008, 39(3):105~109.
Zhao Fengqin, Shen Dechao, Liu Yuanyang, et al. The experimental study on the influence regularity of extruding-expanding on crude fibre content of corn straw[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2008, 39(3):105~109. (in Chinese)
- 9 申德超,奚可畏,马成业. 低温挤压加酶脱胚玉米粉生产糖浆糖化试验[J]. 农业机械学报,2010,41(8):140~145.
Shen Dechao, Xi Kewei, Ma Chengye. Saccharifying experiment of degermed corn with added enzyme extruded at low temperature for production of corn syrup[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8): 140~145. (in Chinese)
- 10 徐中儒. 农业试验最优回归设计[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1988.
- 11 张志涌. 精通 MATLAB6.5[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.

(上接第 121 页)

- 12 张海峰,程曙霞,何立群. 微探针法测量低温下生物材料导热系数研究[J]. 仪器仪表学报,2004, 25(2):53~56.
Zhang Haifeng, Cheng Shuxia, He Liqun. Study on a tiny probe for determining thermal conductivity of biomaterials in low temperature[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2004,25(2):53~56. (in Chinese)
- 13 袁巧霞. 温度和含水率对土壤比热容影响的神经网络预测[J]. 农业机械学报,2008, 39(5):108~111.
Yuan Qiaoxia. Prediction for the effect of temperature and water content on the soil specific heat by BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(5):108~111. (in Chinese)
- 14 徐旭,俞自涛,胡亚才,等. 木材导热系数非线性拟合的神经网络模型[J]. 浙江大学学报,2007, 41(7):1 201~1 204.
Xu Xu, Yu Zitao, Hu Yacai, et al. Nonlinear fitting calculation of wood thermal conductivity using neural networks[J]. Journal of Zhejiang University,2007, 41(7):1 201~1 204. (in Chinese)
- 15 陈则韶,葛新石,顾沁. 量热技术和热物性测量[M]. 北京:中国科学技术出版社,1990.