

文章编号:1001-5078(2007)12-1274-04

BP 神经网络在比色法测温系统标定中的应用

孙志远^{1,2}, 李孟华³, 乔彦峰¹, 朱 玮¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 中国人民解放军驻第一汽车集团公司军代室, 吉林 长春 130022)

摘 要: 红外辐射特性测量是导弹预警和识别的主要手段, 相关研究具有较大的军事应用价值。目标的表面温度测量是红外辐射特性测量的基础。简要介绍了基于比色法测量目标表面温度系统的原理和结构, 推导了表面温度测量模型并详细介绍了测温过程。分别使用最小二乘法和 BP 神经网络方法对测量数据进行处理, 与最小二乘法相比, BP 神经网络具有精度高、通用性好等特点。

关键词: 比色法; 标定曲线; BP 神经网络

中图分类号: TN219; TH811

文献标识码: A

The Application of BP Neural Network on the Temperature Measurement System Based on Colorimetry and Blackbody Demarcation

SUN Zhi-yuan^{1,2}, LI Meng-hua³, QIAO Yan-feng¹, ZHU Wei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. The PLA in the Automobile Group Co. Military Deputy Room, Changchun 130022, China)

Abstract: Infrared radiation characteristics measurement is the main method for the precaution and discrimination of missiles, relevant research is worthy in military application. The measurement of target's surface temperature is the base of infrared radiation characteristics measurement. The principle and configuration of target's surface temperature measurement system based on colorimetry was introduced in brief, the measurement model is deduced and the processes of temperature measurement are presented particularly. Least-square method and back-propagation neural network method were both used to deal with the measurement data. Compared with the least-square method, back-propagation neural network has more advantages, such as high precision, good applicability and so on.

Key words: colorimetry; demarcating curve; back-propagation neural network

1 前 言

目标与环境的红外辐射特性, 已越来越多地应用于现代战争中。20 世纪 60 年代, 美国在侵越战争中, 其大量的直升机和低速固定翼飞机被毁于萨姆型红外制导导弹, 平均击毁率达 12%。后来, 美方采取了红外抑制措施, 使其击毁率下降到 3%。80 年代的以色列与叙利亚之间的中东战争和英阿马岛海战, 也是目标与环境特性的巧妙使用的实战演习的实例^[1]。同时红外辐射特性测量在空间武

器研究、空间目标跟踪与实时监控等领域有着越来越重要的地位。目标的红外辐射特性包括目标的表面温度、目标的辐射强度和目标的辐射亮度等。本文主要介绍目标表面温度的测量方法。

2 比色测温的原理与系统组成

比色式测温法是根据物体在两个相近波段上辐

作者简介: 孙志远(1982 -), 男, 博士研究生, 主要从事红外辐射特性测量研究。E-mail: zhiyuansun1982@tom.com

收稿日期: 2007-06-06

射能之比来计算物体表面温度的。比色测温法可在一定程度上消除发射率不同引入的误差,只要发射率在两段有效波长范围内变化缓慢,则双波段辐射的比值主要取决于被测物体的表面温度。

红外辐射特性测量系统由红外光学系统、光谱滤光片(我们选择 $3 \sim 4\mu\text{m}$, $4 \sim 5\mu\text{m}$ 两个波段)、红外相机、信号处理、显示输出和标准黑体辐射源等部分组成(表面温度测量过程框图如图1所示)。目标表面的辐射能经过光学系统和滤光片聚焦在红外相机上转变为相应的电信号,形成红外图像。对红外图像进行处理以提取红外相机各像元实际响应的灰度值,根据系统内定的算法计算得到目标的辐射特性。

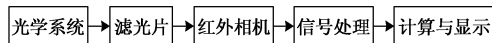


图1 表面温度测量过程框图

Fig.1 surface temperature measurement process frame

3 红外辐射特性测量过程

辐射能量为 $M(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}))$ 的目标通过光学系统在相机像面上形成的照度为^[2]:

$$E = \frac{1}{4} \tau_{\text{air}} \cdot \tau_{\text{opt}} \cdot M \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (1)$$

式中, D/f 为相对孔径;光在大气和光学系统中传播时,存在能量损失, τ_{air} 为大气透过率; τ_{opt} 为光学系统的透过率。

由于我们从红外图像上能得到灰度值,即亮度值,而亮度和目标在像面上的辐射照度是对应的,照度越大的地方表现为图像越亮,反之则越暗。但由于相机光敏面的输出电流不仅与光敏面上的照度 E 相关,也和两次取样的积分时间间隔 t 有关^[3]。若以 I 代表相机光敏面输出电流信号,则:

$$I = \mu \cdot E \cdot t \quad (2)$$

式中, μ 为光电转换系数。

假设红外相机探测器在 $[\lambda_1 \sim \lambda_2]$ 波段范围内的光谱响应函数为 $R(\lambda)$,则目标通过红外相机形成的红外图像灰度值表示公式如下:

$$\begin{aligned} h &= A \cdot \mu \cdot t \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E \cdot R(\lambda) \cdot \cos\theta \cdot d\lambda \\ &= \frac{1}{4} A \cdot \cos\theta \cdot \mu \cdot t \cdot \tau_{\text{opt}} \cdot \tau_{\text{air}} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

其中, A 为灰度值与红外相机光敏面输出电流之间的转换系数; $\cos\theta$ 为被测表面与观测方向的夹角; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为红外滤光片的通带范围。

测量主要包括标定过程和测量过程。

3.1 标定过程

将黑体放置在红外相机前,使黑体充满红外相机的视场。设定黑体温度,待稳定后开始标定,使用电控装置将滤光片分别调到 $3 \sim 4\mu\text{m}$ 处和 $4 \sim 5\mu\text{m}$ 处,得到该温度黑体在两个波段的灰度图像,这里有一个问题我们必须考虑,由于红外相机的各像元对辐射的响应率不同,所以红外相机在采集红外图像前都有一个非均匀校正的过程,而我们需要的是未经校正的相机的真实响应,所以必须利用判读软件对得到的红外图像进行反推处理,以得到相机各像元对该温度下黑体辐射出能量的响应大小;改变黑体的温度值,重复上述工作,这样对于红外相机的每一个像元,我们都可以拟合得到 $3 \sim 4\mu\text{m}$ 处和 $4 \sim 5\mu\text{m}$ 两波段灰度比值与黑体温度的关系曲线。

假设黑体的温度为 T ,黑体分别通过两个滤光片所成红外图像的灰度值的比值大小可表示为:

$$\frac{h_{b1}}{h_{b2}} = \frac{\int_3^4 \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_4^5 \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (4)$$

式中, $R(\lambda)$ 是红外相机探测器的光谱响应函数,对于我们来说是未知量。如果我们将 $R(\lambda)$ 当作常量化约简掉,则灰度比值就只与黑体的温度相关了,下面我们分析一下将 $R(\lambda)$ 约减掉引入的误差。

假设红外相机的光谱响应函数 $R(\lambda)$ 为 $y = -0.8 \times (x - 4.3)^2 + 0.9$,如图2所示。通过分析知道, $R(\lambda)$ 的曲线越平坦,即约接近于常数,约掉 $R(\lambda)$ 引起的误差越小;而 $R(\lambda)$ 的曲线越陡,约掉 $R(\lambda)$ 引起的误差越大。我们假设的光谱响应函数具有一定的代表性,下面我们分析约掉 $R(\lambda)$ 对测量精度的影响。

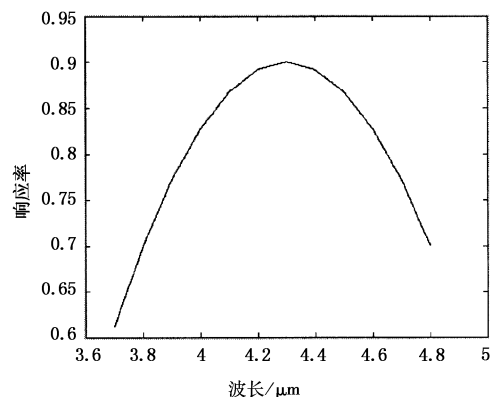


图2 模拟的红外相机的光谱响应曲线 $R(\lambda)$

Fig.2 simulant spectrum response curve $R(\lambda)$ of infrared camera

图3中,a线为考虑上述 $R(\lambda)$ 公式时,代入求得的两波段灰度比值与温度之间的关系曲线,b线为约减 $R(\lambda)$ 后求得的灰度比值与温度之间的关系曲线。将a线平移一段距离,得到图4,从图中可以看出,随着温度的升高,由约掉 $R(\lambda)$ 引起的误差会增加,由于我们测量的靶标温度范围大约为10~50K,而10K时引入的误差为2.82%,50K时引入的误差为3.96%。

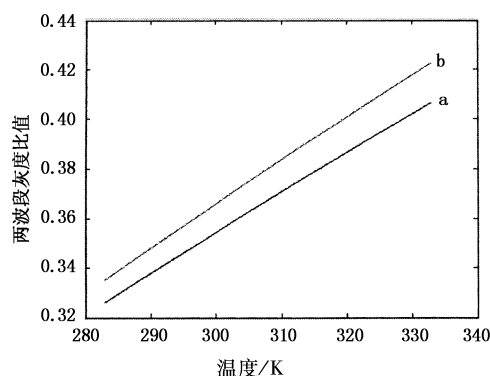


图3 灰度比值与温度之间的关系曲线

Fig. 3 relation curve between gray-degree and temperature

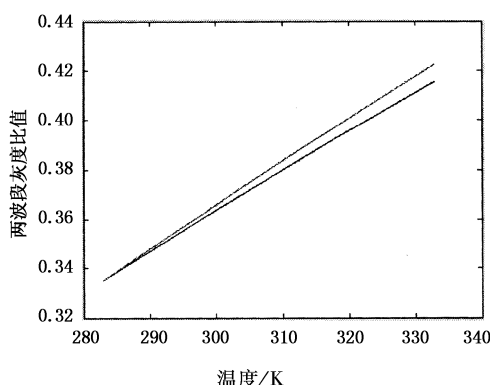


图4 平移后图像

Fig. 4 the image after parallel-shifting

由化简后的公式可以看出,黑体图像某一点(或某一区域)在两个波段下的灰度比值只与黑体温度相关,这样我们可以得到红外相机上每个像元的标定曲线——两波段灰度比值与黑体温度之间的关系曲线。

3.2 测量过程

使用红外系统测量目标的温度时,目标在红外相机的靶面上成像,我们在两个波段可得到两幅红外图像,对红外图像进行反推处理和各项修正(大气衰减等)处理得到相机对被测目标能量的真实响应,并根据目标在相机的靶面上成像的位置查询相应的标定曲线,可计算目标的表面温度值。

4 实验数据处理

BP网络是利用非线性可微分函数进行权值训

练的多层网络。在函数逼近、模式识别、信息分类及数据压缩等领域得到了广泛的应用。BP网络是一种具有三层或三层以上的神经网络,包括输入层、中间层(隐层)和输出层。上下层之间实现全连接,而每层神经元之间无连接。当一对学习样本提供给网络后,神经元的激活值从输入层经过中间层向输出层传播,在输出层的各神经元获得网络的输入响应。接下来,按照减小目标输出与实际误差的方向,从输出层经过各中间层逐步修正各连接权值,最后回到输入层,这种算法称为“误差逆传播算法”,即BP算法。随着这种误差逆的传播修正不断进行,网络对输入模式响应的正确率也不断上升^[4]。

表1为标定过程中测量的一组数据,其中黑体的温度范围选取为20~44℃,其中3、4波段的灰度值为我们使用判读软件反推得到的红外相机对黑体能量的真实的响应对应的灰度值。

表1 两个波段的灰度比值与温度之间的关系

Tab. 1 relation between gray-degree ratio and temperature

温度 /K	3 波段 灰度值	4 波段 灰度值	3 波段和 4 波段 灰度值的比值
293	9723	9880	0.984109312
294	9751	9912	0.983757062
295	9776	9952	0.982315113
296	9798	9989	0.980878967
297	9826	10022	0.980443025
298	9853	10068	0.978645213
299	9878	10109	0.977149075
300	9907	10144	0.976636435
301	9935	10186	0.975358335
302	9963	10229	0.973995503
303	9993	10270	0.973028238
304	10023	10318	0.971409188
305	10052	10361	0.970176624
306	10084	10411	0.968590913
307	10118	10458	0.967489004
308	10147	10505	0.96592099
309	10182	10552	0.964935557
310	10220	10605	0.96369637
311	10246	10655	0.961614266
312	10284	10707	0.960493135
313	10322	10766	0.958759056
314	10356	10827	0.956497645
315	10397	10875	0.956045977
316	10436	10938	0.954104955
317	10474	11000	0.952181818

下面我们分别通过 BP 神经网络和最小二乘法两种实验方法对表 1 中实验数据进行曲线拟合并比较两种方法拟合曲线的精度。我们把灰度比值设定为自变量,温度 T 为变量(K)。

首先我们使用最小二乘法进行曲线拟合^[5],设拟合曲线的公式为 $T = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$,使用 Matlab 可计算出 $a = -454.6670, b = 132.6480, c = 603.8170$,拟合曲线如图 5 所示。利用最小二乘法计算得到的残差为 5.2563,计算得到均方误差为 0.21。

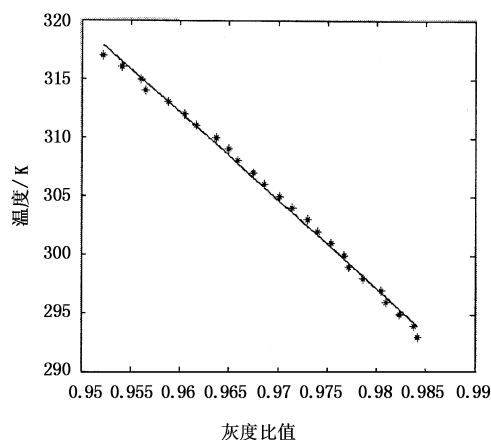


图 5 最小二乘拟合的曲线

Fig. 5 curve draft by least square method

下面我们利用 BP 神经网络拟合实验数据,所采用的网络结构为 1:5:1,第一层采用双曲正切 S 型传递函数,第二层采用线性神经元,利用自己编写的 BP 程序计算最后得到的残差为 1.899。均方差为 0.07596。拟合曲线如图 6 所示。

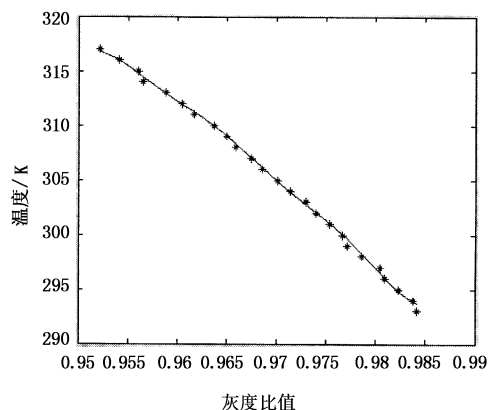


图 6 BP 神经网络拟合的曲线

Fig. 6 curve draft by BP neural network

通过以上实验我们可以发现,BP 神经网络方法拟合的曲线精度很高。与最小二乘算法拟合相比,BP 神经网络方法不需要预先知道待拟合曲线的方程形式,只需给出输入和输出的数据,就可以进行拟合,尤其当变量间的非线性关系复杂时,神经网络拟合实验曲线的优越性就更加突出了。

5 结 论

将 BP 神经网络应用于温度测量的数据处理,得到了很好的效果,对标定过程进行了精度分析,得到标定误差小于 4%,为测温的数据的处理提供了一种新方法。但采集大量的实验数据是使用 BP 神经网络的前提,用于神经网络训练的数据越多,温度测量的精度越高。

测量过程中,影响精度的因素较多,例如目标反射的太阳能量,目标反射的周围高温物体的辐射能量等照射到相机像面都将引起测量误差,而这些因素对测量精度的影响大小和相关抑制方法都有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Zhu Liang-Long, Fan Qi-Song. Flight test of infrared radiation characteristic measurement on army using dynamic targets and environmen [J]. Flight Test, 1990, 34 (1): 20 - 23. (in Chinese)
- [2] Yu Dao-yin, Tan Heng-ying. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1999:131.
- [3] Li Han-zhou, Pan Quan, Zhang Hong-cai, et al. A study of algorithms of temperature measurement based on digital image processing [J]. China electrical engineering transaction, 2003, 23 (6): 195 - 199. (in Chinese)
- [4] Fei Shi science and technology product's research and explore center. Neural network theory and the realization of MATLAB7 [M]. Beijing: Publishing house of delectronics industry, 2006:99 - 102. (in Chinese)
- [5] Edward B Magrab, et al. Theory and engineering application of MATLAB [M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2002:438 - 441. (in Chinese)