

文章编号: 1004-2474(2004) 02-0092-03

医用体内光纤温度传感器探头神经网络设计

李九生, 鲍振武

(天津大学 电信学院, 天津 300072)

**摘要:** 利用误差反向传播算法(BP)和径向基函数(RBF)神经网络法, 分别对医用体内光纤温度传感器探头进行设计, 训练神经网络的数据通过实验和插值得到。该方法具有准确、可靠和知识辅助设计的特点。结果证明, 此方法可以节省设计成本, 缩短设计周期, 有很高的实用价值。  
**关键词:** 光纤; 温度传感器; 建模; 神经网络  
**中图分类号:** TN 27      **文献标识码:** A

Application Research of Neural Network on the Design of Optical Fiber Temperature Sensor Probe Used in Medical Treatment

L I Jiu-sheng, BAO Zhen-wu

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** BP and RBF neural network method has been used to design optical fiber temperature sensor probe using in medical treatment. Datum trained for neural network is gained from experiment and interpolation. This method has the characteristic of accuracy, credibility and knowledge-aid design. It can save the cost of device design and decrease period of design. This method has a good prospect of application.  
**Key words** optical fiber; temperature sensor; modeling; neural network

1 引言

医学中发现, 人的正常细胞与癌细胞的成长过程有着差别, 使得癌细胞没有正常细胞耐热, 在温度达 42℃ 时, 癌细胞会迅速失去活性, 而正常的细胞损失不大, 这就为热疗提供了可能性。加热肿瘤方便且有效的途径是采用微波加热技术, 由于其测量环境中有着强烈的电磁干扰, 医疗上的癌症微波热疗中难以用传统的传感器测温。常规的热敏电阻、热电偶等会拾取噪声, 本身发热无法监测热场, 而光纤温度传感器具有抗电磁干扰, 体积极小等优点, 使其非常适用于医学上微波的癌症治疗中测温<sup>[1~4]</sup>。  
本文讨论了用人工神经网络设计一种新型的光纤温度传感器探头, 其体积小(易插入人体组织中), 精度高(0.1℃), 测量范围为 30~50℃。

2 光纤温度传感器工作原理

光纤温度传感器系统工作原理如图 1 所示。LD 作为输入光源, 输入光功率  $P$  为 1 mW, 工作波长为 0.85  $\mu\text{m}$ 。为了防止背景光干扰, 光源采用调制光

源。为了产生足够多的高次模, 调制后的光需经过一个扰模器。从图 1 可知光由 1 端进入方向耦合器, 然后分为两部分, 一部分由 3 端进入探头, 从探头返回的光可由 2 端探测, 作为参考用; 而另一部分作为参考光, 由 4 端探测。利用参考光的目的是消除背景光引起的测量误差。利用窄带滤波进一步消除背景光干扰及高低频噪声。

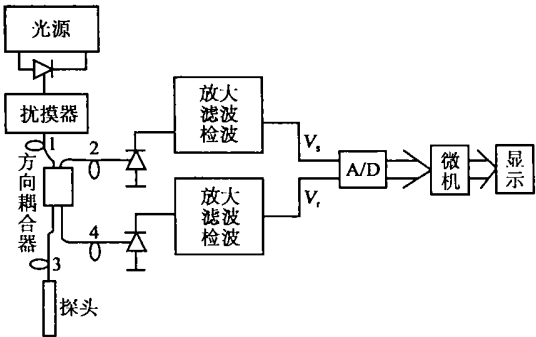


图 1 光纤温度传感器系统工作原理

探头部分如图 2 所示。图中  $n_1$  为光纤纤芯折射率,  $n_2$  为光纤包层折射率,  $n_3$  感温材料的折射率, 且

收稿日期: 2002-12-11  
作者简介: 李九生(1976-), 男, 广西桂林人, 博士, 主要从事光纤通信、传感器、光通信网、神经网络等的研究。

$n_1 > n_2 > n_3$ 。其测温工作原理是将探头设计成在辐射模状态下工作, 辐射能量的多少与折射率  $n_3$  的数值有关,  $n_3$  的数值与温度有关。当温度上升时,  $n_3$  下降, 导波模能量增加, 辐射能量变小, 反之导波模能量减小, 辐射能量增加。  $n_3$  的设计必须精确, 使探头处于最优工作状态。但由于没有折射率为  $n_3$  的感温材料可供直接选用, 必须用两种已知折射率的材料调配成满足要求的  $n_3$ 。本文利用神经网络技术对  $n_3$  及配比进行了优化设计。光纤温度传感器探头具体制作工艺是将光纤的一端包层剥掉, 端面上镀一层全反射膜, 然后将感温材料涂于去掉包层的光纤纤芯上, 并且加热固化。这样由于探头感温材料为非金属材料构成, 所以不受电磁干扰, 又由于其直接涂于光纤纤芯上, 因此可做得很小。

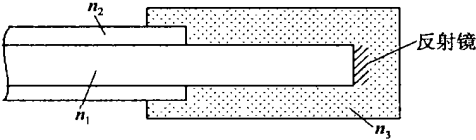


图 2 探头的内部结构及材料折射率分布

3 理论分析与计算

定量分析所选择方案的工作原理。在阶跃式光纤中, 传播模式近似由下式确定<sup>[1,5,6]</sup>:

M = \frac{v^2}{2} = \frac{1}{2} a^2 k\_0^2 (n\_1^2 - n\_3^2) \tag{1}

式中  $M$  为模式数量;  $a$  为光纤纤芯直径;  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$

由式(1)可知, 当  $n_1$  一定, 而  $n_3$  变化时, 将引起光纤中传输模式数量的变化。即随  $n_3$  增加时, 模式数量减少, 引起传输光功率下降; 当  $n_3$  下降时, 传输模式数量增加, 引起传输功率增加。  $n_3$  依温度变化, 则光纤中的光功率变化反映温度变化。

设光纤中传输光功率为  $P$ , 模式数量为  $M$ , 各模式之间能量相同且光纤纤芯折射率为定值, 则每一模式功率为

N = \frac{P}{M} = \frac{2P}{a^2 k\_0^2 (n\_1^2 - n\_3^2)} \tag{2}

当温度发生变化, 感温材料折射率由  $n_3$  变到  $n_3'$  时传输模式数量为

M = \frac{1}{2} a^2 k\_0^2 (n\_1^2 - n\_3'^2) \tag{3}

其传输率变为

P = NM = P \frac{n\_1^2 - n\_3^2}{n\_1^2 - n\_3'^2} \tag{4}

当  $n_3$  变化时,  $P$  变化。设  $n_3$  相对于温度变化为

$\frac{dn_3}{dt} = k$ , 在温度范围不太大时,  $k$  视为常数。则

dP = - \frac{2P}{n\_1^2 - n\_3^2} n\_3 k dt \tag{5}

当温度从 0 变化到  $t$  时,  $P$  变化为

\Delta P = - \frac{2Pk}{n\_1^2 - n\_3^2} \int\_0^t n\_3 dt \tag{6}

由式(6)得

\Delta P = - \frac{2Pk}{n\_1^2 - n\_3^2} (n\_3 t + \frac{1}{2} k t^2) \tag{7}

由于  $k$  很小, 在温度变化范围不大时, 后项可以忽略。则

\Delta P = - \frac{2Pkn\_3}{n\_1^2 - n\_3^2} t \tag{8}

由式(8)知, 光纤传输功率的变化基本上与温度变化成线性关系。但是, 由于各个模式之间的功率分配可能不均及温度变化范围大时将导致温度功率关系的非线性。

4 BP 和 RBF 神经网络设计

本文采用的多模光纤参数: 内径为  $\varnothing 300 \mu\text{m}$ , 外径为  $\varnothing 350 \mu\text{m}$ , 折射率  $n_1 = 1.46$ ,  $n_2 = 1.41$ , 用硅胶作为感温材料。实验得知, 如果采用与折射率为 1.41 的硅胶作感温材料制作探头, 它所能辐射掉的高次模由于没有被完全激励起来, 能量很小, 这样灵敏度很低, 且测温范围受到限制。为了克服上述问题, 需要一种折射率在 1.41~ 1.46 之间的感温材料, 这样调整折射率数值, 可使温度变化影响光纤中能量较大的模式传输, 从而提高灵敏度。

硅胶有 1.41 和 1.51 折射率两种, 将其按不同比例混合来获得不同折射率的硅胶, 从而达到我们的要求最优比例混合。不同混合比在相应温度下对应的光纤输出功率如表 1 所示。同时求得不同混合比例下温度变化  $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 平均输出功率的变化  $\Delta P$  (为斜率) 如表 2 所示。

表 1 不同混合比对应温度下输出光功率

比例	温 度/ $^\circ\text{C}$							
	30	35	40	45	50	55	60	65
输出功率/ $\mu\text{W}$								
1: 1	2.32	2.58	2.87	3.17	3.47	3.76	4.02	4.23
1: 1.5	5.26	5.82	6.37	6.89	7.35	7.82	8.23	8.40
1: 2	5.82	6.08	6.68	7.27	7.70	8.17	8.64	9.06
1: 3	6.76	7.14	7.60	8.00	8.32	8.71	9.01	9.16
1: 4	8.07	8.37	8.71	8.99	9.29	9.60	9.95	10.19

表 2 温度变化  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  引起平均输出功率变化

比 例	1: 1	1: 1.5	1: 2	1: 3	1: 4
$\Delta P / \mu\text{W}$	0.542 5	0.887 5	0.927 5	0.675 0	0.617 5

由表 2 可知, 变化相同的温度, 对应输出光功率变化越大, 灵敏度越高。由于用实验的方法不易得到

$\Delta p$  的最优值, 因而用 BP 或 RBF 神经网络方法进行寻优设计。为了得到训练神经网络的数据, 对得到的实验数据进行插值计算。

BP 网络是一种多层前馈神经网络, 其神经元的变换函数是 S 型函数, 因此输出量为 0~1 之间的连续量, 它可实现从输入到输出的任意的非线性映射, 故对本文采用的 BP 神经网络进行仿真设计。其模型如图 3 所示<sup>[7]</sup>, 是用一个两层神经网络, 带有一个隐层, 隐层有 15 个神经元, 传递函数为  $f(x) = \frac{2}{(1 + e^{-2x})} - 1$ , 输出层的神经元采用纯线性变换函数。图中  $W_1, W_2$  为权值,  $b_1, b_2$  为偏置值,  $F_1, F_2, G_1, G_2$  为传输函数,  $P$  为标量输入,  $a_1, a_2$  为标量输出, 输入矢量为折射率 1.51 与 1.41 的硅胶比例 (其中 1.51 折射率硅胶比例为 1; 1.41 折射率硅胶比例为横坐标上显示的比例)。实验与插值计算得到的  $\Delta p$  作为目标矢量, 进行 BP 神经网络的训练。

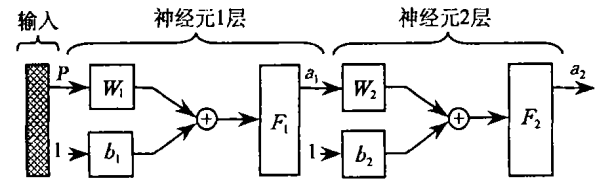


图 3 BP 网络结构模型

为了验证仿真结果以及对比仿真速度快慢, 本文还进行了径向基(RBF)网络训练, 其网络模型如图 4 所示<sup>[7]</sup>。隐层的传递函数为高斯函数  $g(x) = e^{-x^2}$ ; 输出层的神经元采用纯线性变换函数。与 BP 网络采用相同的输入矢量和目标矢量, 进行 RBF 网络训练。仿真结果曲线分别如图 5、6 所示。通过对训练好的 BP 和 RBF 神经网络进行仿真设计, 可以得到两种硅胶 (折射率为 1.51 与 1.41 的硅胶) 的最佳比例 1:1.8 (质量比), 此时的  $n_3 = 1.446$ , 两种网络得到的最佳值是一致的。应用这样一个比例来配制探头的感温材料, 可得温度变化  $\Delta t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,  $\Delta p = 0.9364\text{ }\mu\text{W}$ 。即变化相同的温度, 用 1:1.8 混合比的感温材料, 探头输出的光功率变化最大, 即探头的灵敏度最高, 实验中采用这个比例的硅胶作为感温材料的探头, 结果令人满意。

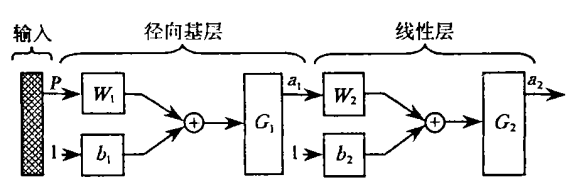


图 4 RBF 网络结构模型

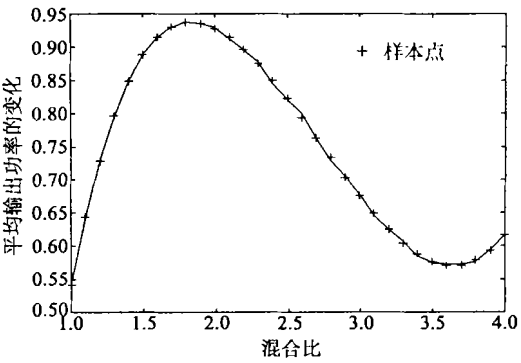


图 5 BP 神经网络方法进行仿真的结果

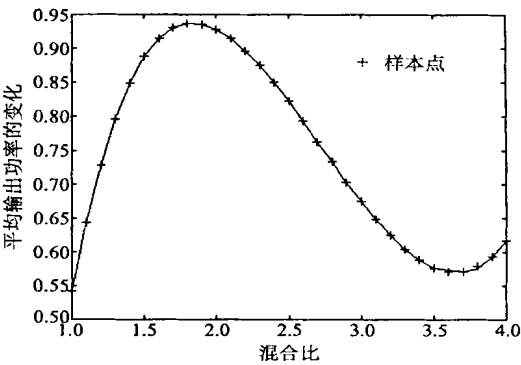


图 6 RBF 神经网络方法进行仿真的结果

5 结束语

本文分别应用 BP 和 RBF 神经网络对医用光纤温度传感器的探头建模及优化设计, 制出了具有最佳灵敏度的新型光纤温度传感探头, 实验证明所选的设计方案是可行的, 其分辨率可达 0.1  $^{\circ}\text{C}$ 。该探头具有抗电磁干扰, 探头体积小的特点, 非常适合用于临床医学上用于微波热疗中测温度。

参考文献:

[1] 邱立存. 医用体内光纤温度传感器及测量系统的研究 [D]. 天津: 天津大学, 1990.

[2] HO J M, SHU M T. Optical fiber temperature sensor based on phase shift by aluminum thermal expansion [C]. China: Beijing, 1993: 500-504.

[3] GALLORENZIT, BUCARO J, DANDRIDGE A, et al. Optical fiber sensor technology [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(4): 626-665.

[4] KYUMA K, SHUCHIT, SAWADA T, et al. Fiber optic instrument for temperature measurement [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(4): 676-679.

[5] 楼顺天, 施 阳. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——神经网络 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.