

文章编号:1006-396X(2012)05-0071-05

# 基于神经网络的沥青路面实际老化预测系统的研究

张海涛<sup>1</sup>, 姜海洋<sup>2</sup>

(1. 东北林业大学土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘 要:** 在实验室测定沥青短期老化数据基础上, 利用 MATLAB 建立 BP 神经网络系统, 通过沥青路面实际老化数据调查与处理, 用国内几个地区不同使用年限的沥青路面实际老化 25 °C 针入度数据训练, 预测得到寒区沥青路面不同使用年限的沥青 25 °C 针入度等沥青路面实际老化数据, 为建立沥青模拟老化与实际老化的关系提供理论依据。

**关键词:** 沥青路面; 沥青老化; BP 神经网络; 针入度

**中图分类号:** TE968; U416.216 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1006-396X.2012.05.018

## Predicting System of Asphalt Aging in Field Based on the Neural Network

ZHANG Hai-tao<sup>1</sup>, JIANG Hai-yang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang 150040, P. R. China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China)

Received 9 April 2012; revised 8 July 2012; accepted 10 August 2012

**Abstract:** Based on the data of the asphalt aging simulated in lab, through the data collection of the asphalt aging in the field, the BP neural network system was established by MATLAB to train the data of the asphalt 25 °C penetration in the different using time asphalt pavement from different regions in China, and predicted the 25 °C penetration of the different using time asphalt pavement aging in the field in cold zone. The theoretical method for the relationships between asphalt aging simulated in lab and aging in field has been put forward.

**Key words:** Asphalt pavement; Asphalt aging; BP neural network; Penetration

Corresponding author. Tel. : +86-451-82125671; e-mail: zht3810@yahoo.com.cn

沥青路面在行车荷载及自然因素的长期作用下, 沥青发生老化, 使路面性能下降。沥青老化分为短期老化与长期老化, 沥青短期老化可以较方便地在室内模拟测定, 但沥青长期老化需要数年, 因而不能及时测定其指标。测定不同使用年限沥青路面沥青老化技术指标对沥青路面建设及养护具有理论与实用价值, 因此, 快速预测沥青路面长期老化, 通过沥青短期模拟老化建立与沥青路面长期老化的关系具有重要的意义。

美国 SHRP 技术沥青胶结料旋转式薄膜加热试验(RTFOT)或薄膜加热试验(TFOT)是模拟热拌及施工过程中的沥青短期老化, 快速加压老化试

验(PAV)是模拟沥青路面使用 5~10 a 后的老化状态, 可以看出, 只有 PAV 可以模拟沥青路面长期老化, 但模拟不够全面, 尚不能准确模拟不同地区不同使用年限的沥青路面长期老化状况, 因此, PAV 不能很好地满足沥青路面建设及养护要求。另一方面, 观测不同使用年限沥青路面老化状况需要较长时间数据积累, 而沥青路面实际老化研究相对较少。本研究基于神经网络技术通过一定沥青路面老化数据预测更多不同地区不同使用年限沥青路面老化数据, 建立沥青路面实际老化预测系统及沥青模拟老化与实际老化的关系<sup>[1-2]</sup>。

## 1 沥青路面老化数据调查与处理

通过调查国内几条主要沥青路面实际老化状况, 得到了 5 组不同地区不同使用年限沥青路面老化 25 °C 针入度数据, 通过对数据处理, 得到不同地区不同使用年限沥青针入度及残留针入度比数据,

收稿日期:2012-04-09

作者简介:张海涛(1963-), 男, 黑龙江哈尔滨市, 教授, 博士。

基金项目:黑龙江省交通厅重点项目(T1102)。

即当年针入度与原样沥青针入度的比值,同时去掉一些不合理数据,最终数据如表 1 及图 1 所示<sup>[3-4]</sup>。

表 1 不同地区不同使用年限沥青路面实际老化针入度及残留针入度比

**Table 1 The penetration and ratio of remaining penetration of asphalt aging in field in the pavement**

使用年 限/a	25 °C 针入度/(0.1 mm)					25 °C 沥青残留针入度比				
	西安	深圳	沈阳	乌鲁木齐	扬州	西安	深圳	沈阳	乌鲁木齐	扬州
0	91	68	128	80	86	1	1	1	1	1
2	54		82	57		0.593		0.641	0.713	
3	48					0.527				
6	35					0.385				
7	29		85	53	53				0.663	0.616
8				41						
9		23	55		30		0.338	0.430		0.349
10	32		54	48		0.352		0.422	0.600	
11					24					0.279
12		20		41	20		0.294		0.513	0.233
13			57							
14	30					0.330				

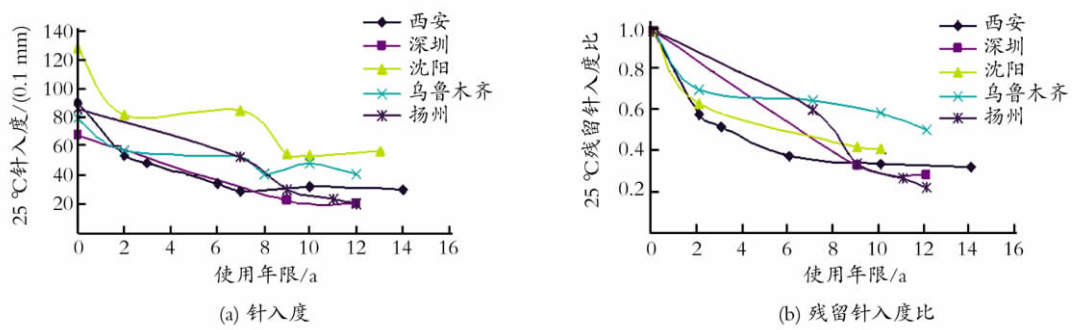


Fig. 1 The curve of asphalt aging in field in different using time pavement in different zone

图 1 不同地区不同使用年限沥青路面实际老化数据变化

## 2 BP 神经网络原理

BP 神经网络是一种模仿生物神经网络行为特征进行信息处理的数学模型<sup>[5-6]</sup>,它由大量神经元和相互间的连接组成,一般结构为输入层、隐含层、输出层,每个神经元是一个特殊的函数,称为“激励函数”,两个相邻神经元的连接值表征了相互的连接强度,称为“权值”,网络输出取决于神经元的连接方式、激励函数和相应权值。

BP 神经网络是一种多层前馈神经网络,可应用于用数学方法难以准确建模的非线性系统,利用已有输入、输出数据训练网络,使其能表达未知函数,并利用该网络预测系统输出,其结构如图 2 所示。

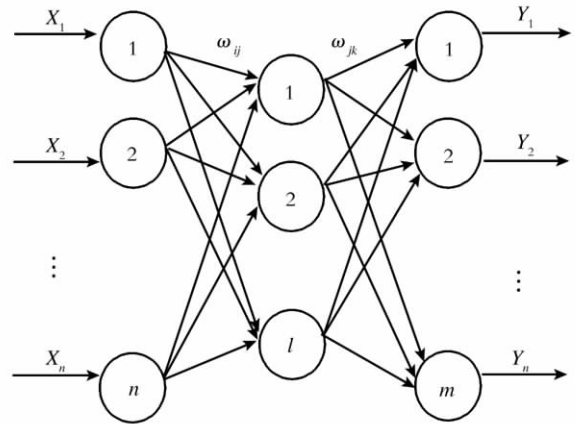


Fig. 2 Structure of BP neural network

图 2 BP 神经网络拓扑结构

BP 神经网络算法流程如图 3 所示,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  是神经网络的输入值,  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  是输出值 (预测值),  $\omega_{ij}, \omega_{jk}$  分别为输入层与隐含层、隐含层与输出层的连接权值, 输入层、隐含层、输出层分别有  $n, l, m$  个神经元, 即网络结构为  $n-l-m$ 。

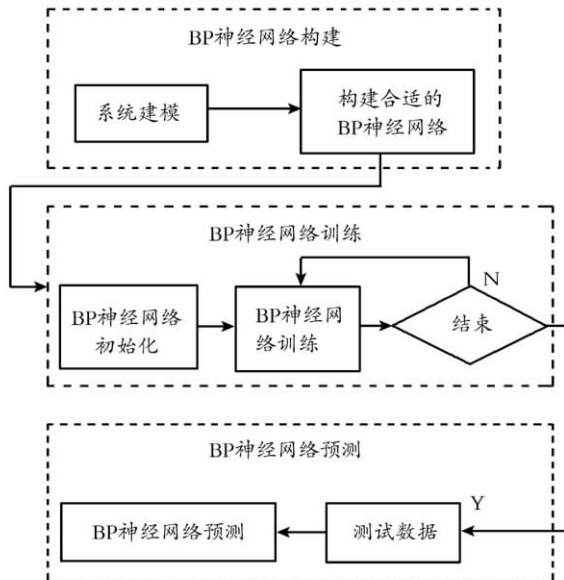


Fig. 3 Calculating procedure of BP neural network

图 3 BP 神经网络算法流程

BP 神经网络的训练过程如下:

(1) 网络初始化

输入输出数据 ( $X, Y$ ) 确定网络输入层节点数  $n$ , 隐含层节点数  $l$ , 输出层节点数  $m$ , 神经元激励函数后, 初始化连接权值  $\omega_{ij}, \omega_{jk}$ , 初始化隐含层及输出层阈值  $a, b$ , 设定学习速率、神经元激励函数。

(2) 计算隐含层输出  $H$

$$H_j = f\left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij}x_i - a_j\right) \quad j = 1, 2, \dots, l$$

式中,  $f$  为隐含层激励函数,  $n$  为输入层节点数,  $l$  为隐含层节点数。

(3) 计算输出层输出  $O$

$$O_k = \sum_{j=1}^l H_j \omega_{jk} - b_k \quad k = 1, 2, \dots, m$$

式中,  $m$  为输出层节点数。

(4) 计算网络预测误差  $e$

$$e_k = Y_k - O_k \quad k = 1, 2, \dots, m$$

式中,  $Y$  为期望输出,  $O$  为预测输出。

(5) 更新网络连接权值  $\omega_{ij}, \omega_{jk}$

$$\omega_{ij} = \omega_{ij} + \eta H_j (1 - H_j) x(i) \sum_{k=1}^m \omega_{jk} e_k$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, l$$

$$\omega_{jk} = \omega_{jk} + \eta H_j e_k$$

$$j = 1, 2, \dots, l; k = 1, 2, \dots, m$$

式中,  $\eta$  为学习速率。

(6) 更新阈值  $a, b$

$$a_j = a_j + \eta H_j (1 - H_j) \sum_{k=1}^m \omega_{jk} e_k \quad j = 1, 2, \dots, l;$$

$$b_k = b_k + e_k \quad k = 1, 2, \dots, m$$

(7) 判断算法迭代是否结束

若未结束, 则返回(2)。

### 3 沥青路面实际老化数据预测

#### 3.1 BP 神经网络的建立及训练

MATLAB 软件将矩阵作为数据处理的基本单位, MATLAB 神经网络工具箱以神经网络理论为基础, 用 MATLAB 语言构造出多种神经网络及典型的激活函数、网络学习规则, 本文的 BP 神经网络就是利用 MATLAB 神经网络工具箱实现的。

##### 3.1.1 训练数据

###### (1) 输入数据

已有沥青路面实际老化数据来自国内 5 个不同地区 (如表 1 所示), 利用 BP 神经网络预测哈尔滨地区的不同使用年限沥青路面实际老化数据, 影响沥青老化的环境因素主要有温度 (高温)、光照 (以紫外线为主)、与空气的接触 (以氧气、臭氧为主) 等, 因此, 收集相关地区高温、纬度等数据, 此外, 也将收集降水量、低温及高低温循环等数据 (如表 2 所示), 输入数据采用道路使用年限、高温、低温、多年平均冻结指数、年平均降水量等 5 个变量。

表 2 各地区 1960~2000 年气温数据

Table 2 Data of different zone (1960~2000)

城市	最低气温/ ℃	最高气温/ ℃	年平均降 水量/mm	冻结指数
西安	-11	36	613.8	46
深圳	3	35	1701.3	0
沈阳	-27	31	683.8	882
乌鲁木齐	-27	34	326.9	1082
扬州	-10	35	1153.7	15
哈尔滨	-34	31	494.7	1623

###### (2) 输出数据

输出数据为 1 个变量, 即 25 °C 针入度。

###### (3) 数据归一化

各维数据数量级不同, 易造成较大的网络预测数据误差, 因此需要将输入、输出数据转化为  $[0, 1]$  间的数, 即数据归一化, 采用极值法, MATLAB 数据归一化函数形式如下:  $x_k = \frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$ , 式中,  $x_{\max}, x_{\min}$  分别为数据序列中的最大值和最小值。

3.1.2 建立 BP 神经网络 根据输入数据与输出数据,确定神经网络输入、输出层节点数分别为 5, 1,隐含层层数和节点数根据训练效果确定,考虑到训练数据数量及精度,确定隐含层、输出层节点传递函数分别为正切 S 型传递函数 tansig 与线性传递函数 purelin,训练函数为 trainlm,网络学习函数为 learnlstm。

网络训练时,设定迭代次数为100,学习率为 0.1,训练误差目标 0.000 04。数据储存在 data.mat 文件中,input 为训练输入数据,output 为训练输出数据,inputpre 为预测输入数据,训练输入输出数据为 18 组。

为比较训练效果,采用输出训练均方误差 MSE、平均相对误差  $e_r$ 、网络预测输出与期望输出

对比图、网络预测数据图像,相关函数如下:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n} \quad e_r = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - y'_i|}{y_i}}{n}$$

式中, $n$  为训练数据组数, $y$  为期望输出数据, $y'$  为预测输出数据。

根据实际训练效果,并加以比较,确定采用 2 个隐含层,各 8 个节点,因此 BP 神经网络结构为 5—8 与 8—1。

3.2 预测结果

根据均方误差 MSE、平均相对误差  $e_r$  与实际数据的比较,预测结果选择  $r_1, r_2$  两组数据作为哈尔滨地区沥青路面实际老化数据,相关训练效果如图 4 所示,预测结果如表 3 及图 5 所示。

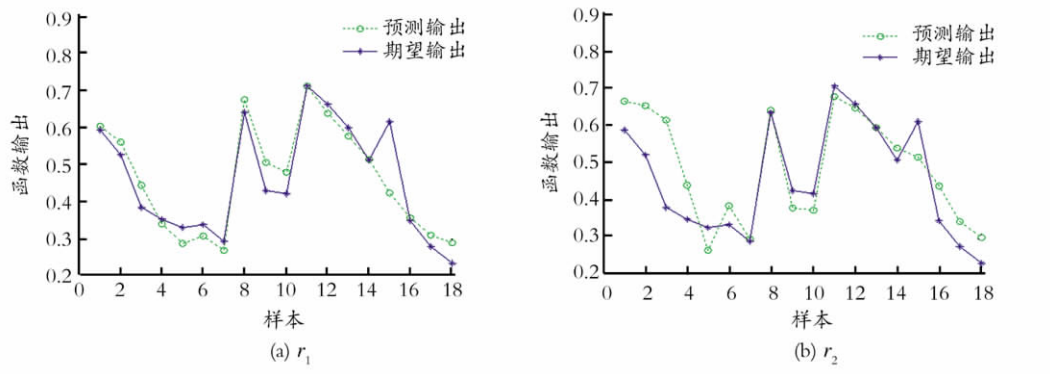


Fig. 4 The network prediction and output ( $r_1$  and  $r_2$ )

图 4 网络预测与期望输出 ( $r_1$  与  $r_2$ )

表 3 预测结果  $r_1$  与  $r_2$

Table 3 The predicting results  $r_1$  and  $r_2$

使用年 限/a	$r_1$		$r_2$		使用年 限/a	$r_1$		$r_2$	
	25 °C 残留 针入度比	25 °C 针入度/ (0.1 mm)	25 °C 残留 针入度比	25 °C 针入度/ (0.1 mm)		25 °C 残留 针入度比	25 °C 针入度/ (0.1 mm)	25 °C 残留 针入度比	25 °C 针入度/ (0.1 mm)
0	1	78	1	78	8	0.57	44.12	0.32	24.90
1	0.69	53.57	0.54	42.47	9	0.55	42.62	0.31	23.96
2	0.68	53.04	0.48	37.72	10	0.53	41.50	0.30	23.15
3	0.67	52.04	0.44	33.98	11	0.52	40.77	0.29	22.47
4	0.65	50.60	0.40	31.15	12	0.52	40.31	0.28	21.94
5	0.63	48.94	0.37	29.01	13	0.51	40.01	0.28	21.60
6	0.61	47.33	0.35	27.35	14	0.51	39.78	0.28	21.49
7	0.59	45.76	0.33	26.02	15	0.51	39.55	0.28	21.63
Note	MSE=0.029 8 $e_r=0.079 7$		MSE=0.174 0 $e_r=0.116 9$		MSE=0.029 8 $e_r=0.079 7$		MSE=0.174 0 $e_r=0.116 9$		

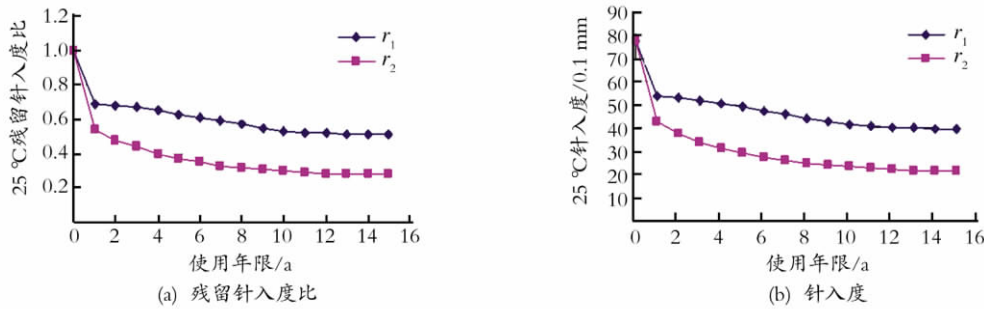


Fig. 5 The predicting results of ratio of remaining penetration and penetration ( $r_1$  and  $r_2$ )

图 5 残留针入度比及针入度预测结果  $r_1$  与  $r_2$

#### 4 沥青模拟老化与实际老化关系

采用盘锦 AH-90 沥青做试样,用普通烘箱在 165 °C 及通风状态下经 5,12,24,48,72,120 h 进行

沥青老化实验,然后测定不同老化时间沥青 15,25,30 °C 针入度和 10 °C 延度,实验结果如表 4 所示<sup>[7-8]</sup>。

表 4 实验室沥青老化试验结果  
Table 4 Results of asphalt aging in lab

老化时间/h	0	5	12	24	48	72	120
针入度/ (0.1 mm)	15 °C	32	25	15	14	12	11
	25 °C	78	61	53	41	31	17
	30 °C	144	100	83	69	56	28
10 °C 延度/cm	46	40	26	13	12	1.1	0.8

基于上述沥青路面实际老化预测系统数据,通过实验室沥青老化模拟数据可以与实际预测数据建立相关关系,通过数学回归分析,发现数据有较好的相关性,得到了沥青模拟老化与实际老化时间的对应关系式:

$$y_{r_1} = -0.000\ 09\ x^3 + 0.024\ x^2 - 0.060\ 7\ x$$

$$y_{r_2} = -0.000\ 1\ x^3 - 0.006\ 8\ x^2 + 0.144\ 4\ x$$

#### 5 结束语

(1) 建立了利用神经网络技术预测不同地区不同使用年限沥青路面实际老化预测系统,通过具体

沥青路面老化数据预测结果,证明了方案的可行性,为相关研究提供了方法。

(2) 利用神经网络预测的哈尔滨地区沥青路面实际老化数据,建立了沥青模拟老化与沥青路面实际老化的时间关系。

(3) 预测数据表明,沥青路面实际老化速率在第 1 a 最大,沥青路面使用 10 a 左右老化基本不再进行(即沥青达到极限老化状态)。

(4) 实现了沥青模拟与实际老化时间的换算,在实验室快速得到沥青路面不同时间老化数据成为可能,为相关研究提供参考。

#### 参 考 文 献

[1] 交通运输部. 公路沥青路面设计规范(JTG D50-2006) [S]. 北京:人民交通出版,2006.  
 [2] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社,2001.  
 [3] 伍育钧. 沥青老化模拟方法与验证研究[J]. 公路交通科技,2007,36(4): 36-38.  
 [4] 张倩. 自然因素作用下沥青老化化学机理分析[J]. 西安建筑科技大学学报,2004,36(4): 457-460.  
 [5] 史峰. MATLAB 神经网络 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010.  
 [6] 袁曾任. 人工神经网络及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1999.  
 [7] 刘军. 辽河 AH-90 沥青老化组分变化研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报,2004,20(2): 127-129.  
 [8] 交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTG E20-2011) [S]. 北京:人民交通出版社,2011.

(Ed. : WYX, CP)