

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.02.013

疾病费用预测的建模分析

张菁芳^a, 李佳承^b, 任家顺^a

(中国人民解放军第三军医大学 a.第二附属医院,重庆 400037;b.学员旅十一营,重庆 400038)

摘要:根据重庆市某三级甲等医院 2012 年 1 月至 2014 年 12 月 5 种常见疾病(糖尿病、甲状腺功能亢进、顺产、肠息肉、脑梗死)的月人均治疗费用数据,采用 BP 神经网络模型、广义回归神经网络模型、灰色 GM(1,1)模型以及非线性回归模型,分别预测 2015 年 1 月至 8 月 5 种疾病的月人均治疗费用的变化情况,并与真实费用数据进行对比,判断 4 种模型预测的准确程度。结果表明:BP 神经网络模型、广义回归神经网络模型、灰色 GM(1,1)模型、非线性回归模型预测 5 种疾病的可决系数 R^2 最小分别为 0.278、0.565、0.048 和 0.097,最大分别为 0.826、0.901、0.600 和 0.747;与 2015 年 1 月至 8 月的真实费用数据比较,4 种模型预测的相对误差最小分别为 9.845%、3.507%、5.897%和 3.642%,最大分别为 15.450%、13.940%、30.518%和 17.204%。其中广义回归神经网络在疾病费用的预测结果相对于其他模型更准确。

关键词:BP 神经网络;广义回归神经网络;灰色 GM(1,1)预测;非线性回归分析;数学建模

中图分类号:R195.4

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)02-099-08

Modeling analysis on the prediction of the cost of diseases

ZHANG Jingfang^a, LI Jiacheng^b, REN Jiashun^a

(a. Xinqiao Hospital; b. Battalion 11, College of Medicine, Third Military Medical University, Chongqing 400038, P. R. China)

Abstract: On the basis of the per capita treatment cost per month of five common diseases, i.e. diabetes, intestinal polyp, hyperthyroidism, eutocia and cerebral infarction, in a 3-A-grade hospital in Chongqing from January, 2012 to December, 2014, we used BP neural network, generalized regression neural network (GRNN), grey system GM (1, 1) and non-linear regression analysis to predict the change of per capita treatment costs per month of these five diseases from January 2015 to August 2015. And the accuracy of these four models was judged by comparing the prediction results with real data. The results show that the minimum coefficients of determination (R^2) of the four models are 0.278, 0.565, 0.048 and 0.097, respectively, while their maximum coefficients of determination(R^2) are 0.826, 0.901, 0.600 and 0.747, respectively. The minimum prediction errors of the four models are 9.845%, 3.507%, 5.897% and 3.642%, respectively, while their maximum prediction errors are 15.450%, 13.940%, 30.518% and 17.204%, respectively. Compared with the other three models, the GRNN model can predict the cost of diseases more accurately.

Keywords: BP neural network; GRNN; grey system GM (1, 1); non-linear regression analysis; mathematical modeling

收稿日期:2015-11-23

基金项目:重庆市科技计划项目资助(cstc2013jccx A10012)。

Supported by Chongqing Key Technologies R & D Program(cstc2013jccx A10012).

作者简介:张菁芳(1979-),女,博士,主要从事社会医学等研究,(E-mail)556222@qq.com。

医疗质量的提升和医疗改革的顺利进行其前提是足够的医疗费用,医疗费用预算的关键在于疾病费用预测标准制定得是否科学、合理^[1-2]。因此,能够根据现有搜集得到的医疗费用数据,借助合理有效的数学模型预测并制定医疗费用的预算方案是促进医改顺利进行的关键。根据前期调研结果,社会物价的波动、医疗成本的改变均能引发医疗费用的改变。准确的疾病费用预测对医疗政策的制定能提供有益的参考。尽管有不少医疗费用的相关研究^[3-5],但仍存在定性研究多,缺乏用数学方法进行精确研究等问题,笔者拟通过运用 BP 神经网络模型、广义回归神经网络模型、灰色 GM(1,1)模型以及非线性回归模型对医疗费用进行预测,并对 4 种模型的预测效果进行比较分析,以期获得预测精度高、方法科学的数学模型,方便后续研究的顺利进行。

1 资料与方法

1.1 临床资料

本研究选用的是重庆市某三级甲等医院在 2012 年 1 月至 2015 年 8 月之间 5 类疾病每月治疗病例数和人均治疗费用的统计数据,其中 5 类疾病包括糖尿病 9 208 例、甲状腺功能亢进 1 888 例、顺产 2 997 例、肠息肉 1 911 例、脑梗死 6 731 例(见表 1)。所选出每月人均疾病治疗费用数据样本共 230 个,构成矩阵 $A = (a_{ij})_{44 \times 5}$,数据矩阵的维度为 44×5 ,其中以月份为时间序列,共 44 个月的人均疾病费用。

表 1 2012 年 1 月至 2015 年 8 月 5 类疾病每月治疗病例数和人均治疗费用(万元)

Table 1 The number of patients and mean cost from Jan.2012 to Aug.2015

月份	糖尿病		甲状腺机能亢进		顺产		肠息肉		脑梗死	
	例数	治疗费用	例数	治疗费用	例数	治疗费用	例数	治疗费用	例数	治疗费用
2012-01	115	1.375	39	0.676	46	0.408	15	0.821	97	2.330
2012-02	176	1.426	46	0.759	35	0.371	49	0.868	107	2.650
2012-03	254	1.470	48	0.904	62	0.391	40	0.914	120	2.424
2012-04	220	1.521	54	0.791	55	0.412	39	0.812	115	2.115
2012-05	212	1.739	58	0.757	59	0.427	40	0.812	123	2.459
2012-06	202	1.511	54	0.979	58	0.426	41	0.970	142	2.713
2012-07	241	1.517	53	0.899	62	0.385	40	0.779	122	3.212
2012-08	185	1.488	60	0.652	73	0.369	47	0.985	134	3.006
2012-09	206	1.280	55	0.541	59	0.424	34	0.853	152	2.403
2012-10	137	1.328	32	0.502	62	0.399	40	0.790	81	3.236
2012-11	172	1.756	63	0.915	62	0.471	54	0.979	143	3.486
2012-12	235	1.961	46	0.984	59	0.444	46	1.166	156	3.620
2013-01	183	1.961	42	0.931	49	0.470	37	0.811	145	4.316
2013-02	114	1.566	20	0.945	34	0.508	24	0.831	94	2.971
2013-03	261	1.730	2	1.145	43	0.491	47	0.947	121	3.155
2013-04	228	1.842	1	0.484	44	0.493	57	1.177	134	2.562
2013-05	226	1.568	28	1.000	47	0.469	60	0.930	148	2.811
2013-06	185	1.576	43	0.782	40	0.498	38	0.921	171	3.260
2013-07	206	1.659	57	1.013	39	0.486	33	0.911	182	3.352
2013-08	183	1.675	64	0.924	59	0.499	45	0.897	150	4.016
2013-09	228	1.604	59	0.933	50	0.523	49	0.998	146	3.260
2013-10	204	1.649	51	1.102	49	0.457	39	0.867	140	3.660
2013-11	245	1.783	2	1.883	42	0.508	43	1.017	162	4.526

续表 1

月份	糖尿病		甲状腺机能亢进		顺产		肠息肉		脑梗死	
	例数	治疗费用	例数	治疗费用	例数	治疗费用	例数	治疗费用	例数	治疗费用
2013-12	228	1,820	45	1,034	51	0.482	32	1,064	183	4,611
2014-01	208	1,661	63	0,968	41	0.534	40	0,976	204	4,490
2014-02	181	1,641	2	0,569	59	0.514	37	1,085	127	4,096
2014-03	253	1,790	54	1,063	71	0.517	53	1,167	173	4,883
2014-04	251	1,857	47	1,022	72	0.543	44	1,148	180	3,787
2014-05	246	1,794	66	1,013	56	0.502	64	1,019	177	4,485
2014-06	252	1,665	53	1,032	49	0.496	56	1,068	165	4,199
2014-07	252	1,768	1	0,287	71	0.534	45	1,107	203	4,239
2014-08	209	1,450	62	0,891	76	0.501	48	0,902	190	3,684
2014-09	215	1,434	62	0,939	77	0.550	56	0,900	220	3,414
2014-10	199	1,537	46	1,013	84	0.469	48	0,898	166	3,824
2014-11	250	1,509	37	0,842	101	0.479	61	1,096	155	4,051
2014-12	256	1,729	44	0,890	127	0.500	30	1,162	188	4,715
2015-01	204	1,671	46	0,865	134	0.504	51	1,136	204	3,647
2015-02	156	1,860	40	0,917	132	0.544	31	1,253	152	3,587
2015-03	231	1,789	45	0,875	101	0.521	55	1,073	208	4,215
2015-04	243	1,725	39	0,940	70	0.503	53	1,078	169	4,661
2015-05	222	1,593	50	0,762	121	0.485	50	1,077	168	4,519
2015-06	216	1,454	46	0,701	116	0.480	38	1,201	150	3,307
2015-07	222	1,617	39	0,753	128	0.506	38	1,044	173	3,127
2015-08	96	1,563	24	0,660	72	0.499	24	1,049	91	3,295
总计	9208	71,909	1888	38,536	2997	20,991	1911	43,559	6731	156,379

1.2 方法

根据大量学者研究^[6-10]提示, BP神经网络模型、广义回归神经网络、灰色 GM(1,1)预测模型以及非线性回归模型是目前应用最为广泛的预测模型,其应用范围涉及天文预测、人口预测、财政预测等方面,但在临床疾病费用预测方面的应用相对较少。笔者选择以上 4 种模型对 5 种临床常见疾病的治疗费用进行预测,并且为判断预测模型的准确程度,本研究选用可决系数 R^2 ^[11] 作为统计学拟合程度评价指标,其统计学意义在于反映预测模型预测结果与样本观测值之间的偏离程度。 R^2 越大,则预测偏离程度越小,反之,预测偏离程度越大。因此,研究以 2012 年 1 月至 2014 年 12 月的疾病治疗费用为基础,预测 2015 年 1 月至 8 月内的疾病治疗费用,并根据预测模型的可决系数 R^2 和 2015 年 1 月至 8 月的真实值和预测值之间的相对误差 E 判断预测模型的准确程度。

1.2.1 神经网络模型

神经网络模型是按照生物神经元的结构和工作原理构建一个人工神经网络,其中人工神经元作为一种简单的处理器,可以将输入的信号进行加权求和。

本研究采用了两种神经网络模型:BP神经网络模型和广义回归神经网络模型(generalized regression neural network, GRNN)。两种模型的结构大致相同,通常由输入层、输出层及若干隐含层构成,每层有若干个神经元,上层神经元与下层神经元通过权重进行连接,层与层之间都是所有神经元互联构成复杂的连接网络(图 1)。BP

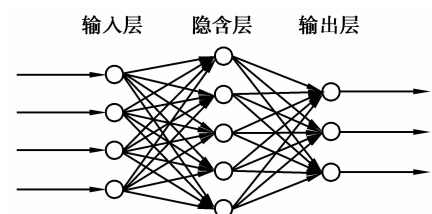


图 1 神经网络模型模式图

Fig.1 Neural network model

神经网络是一种多层神经网络,采用误差反向传播的学习算法进行权值和阈值调整,而广义回归神经网络建立在非参数回归分析的基础上,以样本数据为后验条件进行参数估计,根据最大概率原则进行网络输出^[6]。关于两种神经网络模型的数学原理,详见参考文献[7-9]。

1.2.2 灰色 GM(1,1)预测模型

灰色 GM(1,1)模型是灰色系统理论中应用最广泛的灰色动态预测模型,也称单序列一阶线性动态预测模型。该模型是将时间序列 $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$ 累加生成新序列 $X^{(1)}(t)$, t 为时间序列,如 $t=1$,即表示 2012 年 1 月; $t=12$,即表示 2012 年 12 月。 $X^{(1)}(t)$ 且满足微分方程:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + \alpha X^{(1)} = \mu, \quad (1)$$

式中:参数 α, μ 可以通过最小二乘法求得。得到累加预测值 $X^{(1)}(t+1)$, 满足:

$$X^{(1)}(t+1) = \left(X^{(0)}(1) - \frac{\mu}{\alpha} \right) e^{-\alpha t} + \frac{\mu}{\alpha}, \quad (2)$$

最后,将累加的预测值还原得到目标预测值 $X^{(0)}(t+1)$ 。详细原理参考文献[10]。

1.2.3 非线性回归模型

根据选用数据的分布情况,本研究采用二次函数进行线性拟合,即根据 n 组原始数据点 (x, y) 的分布,寻找函数 $\hat{y} = Ax^2 + bx + c$ 使得 $\sum_{i=1}^n (\hat{y} - y)^2$ 最小,则在函数 \hat{y} 为该组数据拟合函数,则可以根据拟合函数 \hat{y} 对随后的疾病费用进行预测^[11]。

2 结果与分析

2.1 预测模型

本研究使用 2012 年 1 月至 2014 年 12 月的疾病人月均治疗费用数据,分别采用 BP 神经网络模型、广义回归神经网络模型、灰色 GM(1,1)模型以及非线性回归模型,构建了 5 种疾病的月人均治疗费用模型。其中,为确保 BP 神经网络模型输出结果的准确性,隐含层神经元间的传递函数选用 log-sigmoid 型函数 logsig,输出层神经元的传递函数选用纯线性函数 purelin。广义回归神经网络模型的基函数选用的是格林(Green)函数^[13-15]。灰色 GM(1,1)模型中累加函数方程以及非线性回归模型^[16-17]的模型方程如下所示。

1) 糖尿病预测模型。

灰色 GM(1,1)模型: $X_1^{(1)}(t+1) = [X_1^{(1)}(t+1) + 725.026]e^{0.002t} - 725.026$;

非线性回归模型: $y_1 = -7.558 \times 10^{-4}t^2 + 0.033t + 1.367$ 。

2) 甲状腺功能亢进预测模型。

灰色 GM(1,1)模型: $X_2^{(1)}(t+1) = [X_2^{(1)}(t+1) + 174.480]e^{0.005t} - 174.480$;

非线性回归模型: $y_2 = -6.136 \times 10^{-4}t^2 + 0.028t + 0.652$ 。

3) 顺产预测模型。

灰色 GM(1,1)模型: $X_3^{(1)}(t+1) = [X_3^{(1)}(t+1) + 52.406]e^{0.008t} - 52.406$;

非线性回归模型: $y_3 = -1.775 \times 10^{-4}t^2 + 0.010t + 0.358$ 。

4) 肠息肉预测模型。

灰色 GM(1,1)模型: $X_4^{(1)}(t+1) = [X_4^{(1)}(t+1) + 137.045]e^{0.006t} - 137.045$;

非线性回归模型: $y_4 = -1.094 \times 10^{-4}t^2 + 0.010t + 0.821$ 。

5) 脑梗死预测模型。

灰色 GM(1,1)模型: $X_5^{(1)}(t+1) = [X_5^{(1)}(t+1) + 175.625]e^{0.015t} - 175.625$;

非线性回归模型: $y_5 = -1.403 \times 10^{-3}t^2 + 0.108t + 2.127$ 。

4 种预测模型在 5 种疾病治疗费用预测中的可决系数 R^2 见表 2,可见 5 种疾病广义回归网络模型的可决系数 R^2 均高于其他模型。

表 2 5 种疾病四种预测模型的可决系数 R^2

Table 2 Coefficients of determination of four models for five diseases

模型	糖尿病	甲状腺功能亢进	顺产	肠息肉	脑梗死
BP 神经网络模型	0.553	0.278	0.664	0.457	0.826
广义回归神经网络模型	0.804	0.565	0.898	0.689	0.901
灰色 GM(1,1)模型	0.110	0.048	0.600	0.298	0.565
非线性回归模型	0.269	0.097	0.747	0.308	0.624

2.2 预测结果的验证

分别对 5 种疾病 2015 年 1 月至 8 月的月人均住院费用进行预测,并与实际值进行比较,表 2 至表 6 给出 2015 年 1 月至 8 月的预测误差 E 。对糖尿病,广义回归神经网络模型和灰色 GM(1,1)模型的相对误差较小;对甲状腺功能亢进、顺产,广义回归神经网络模型和非线性回归模型的相对误差较小;对肠息肉,广义回归神经网络模型和灰色 GM(1,1)模型、非线性回归模型的相对误差较小;对甲状腺功能亢进,非线性回归模型和广义回归神经网络模型的相对误差较小;对脑梗死,广义回归神经网络模型和 BP 神经网络模型的相对误差较小。广义回归神经网络模型在疾病费用的预测方面效果较好。

表 3 4 种模型关于糖尿病治疗费用预测结果的验证(万元)

Table 3 The results of four models to predict the cost of diabetes

月份	真实值	BP 神经网络模型		广义回归神经网络模型		灰色 GM(1,1)模型		非线性回归模型	
		预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%
2015-01	1.671	1.524	8.793	1.704	1.953	1.701	1.762	1.536	8.096
2015-02	1.860	1.524	18.061	1.677	9.845	1.704	8.377	1.512	18.731
2015-03	1.789	1.524	14.820	1.839	2.771	1.708	4.536	1.486	16.942
2015-04	1.725	1.524	11.675	1.797	4.160	1.712	0.762	1.459	15.422
2015-05	1.593	1.522	4.461	1.733	8.779	1.716	7.710	1.430	10.201
2015-06	1.454	1.515	4.208	1.608	10.605	1.719	18.254	1.400	3.703
2015-07	1.617	1.492	7.677	1.470	9.052	1.723	6.587	1.368	15.354
2015-08	1.563	1.421	9.068	1.599	2.292	1.727	10.502	1.335	14.561
平均相对误差/%		9.845±4.822		6.182±3.717		7.311±5.518		12.876±5.077	

表 4 4 种模型关于甲状腺功能亢进治疗费用预测结果的验证(万元)

Table 4 The result of four models to predict the cost of hyperthyroidism

月份	真实值	BP 神经网络模型		广义回归神经网络模型		灰色 GM(1,1)模型		非线性回归模型	
		预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%
2015-01	0.865	0.924	6.797	0.885	2.362	0.975	12.733	0.841	2.736
2015-02	0.917	0.922	0.555	0.868	5.362	0.980	6.855	0.823	10.226
2015-03	0.875	0.915	4.552	0.911	4.077	0.984	12.452	0.804	8.188
2015-04	0.940	0.901	4.047	0.880	6.335	0.989	5.277	0.783	16.649
2015-05	0.762	0.889	16.734	0.932	22.363	0.994	30.424	0.761	0.098
2015-06	0.701	0.885	26.210	0.782	11.578	0.998	42.462	0.738	5.311
2015-07	0.753	0.883	17.303	0.708	5.906	1.003	33.237	0.714	5.204
2015-08	0.660	0.883	33.849	0.747	13.280	1.008	52.806	0.688	4.331
平均相对误差/%		13.756±11.844		8.908±6.565		24.531±17.727		6.593±5.108	

表 5 4 种模型关于顺产治疗费用预测结果的验证(万元)
Table 5 The result of four models to predict the cost of eutocia

月份	真实值	BP 神经网络模型		广义回归神经网络模型		灰色 GM(1,1)模型		非线性回归模型	
		预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%
2015-01	0.504	0.446	11.462	0.497	1.242	0.542	7.626	0.500	0.836
2015-02	0.544	0.446	18.101	0.503	7.568	0.546	0.361	0.497	8.787
2015-03	0.521	0.446	14.413	0.540	3.604	0.551	5.695	0.493	5.317
2015-04	0.503	0.446	11.306	0.524	4.132	0.555	10.386	0.490	2.608
2015-05	0.485	0.446	8.113	0.505	4.045	0.559	15.252	0.486	0.071
2015-06	0.480	0.446	7.161	0.487	1.465	0.564	17.357	0.481	0.201
2015-07	0.506	0.446	11.938	0.481	5.022	0.568	12.188	0.477	5.887
2015-08	0.499	0.446	10.556	0.503	0.976	0.573	14.840	0.472	5.427
平均相对误差/%		11.631±3.451		3.507±2.242		10.463±5.675		3.642±3.186	

表 6 4 种模型关于肠息肉治疗费用预测结果的验证(万元)
Table 6 The result of four models to predict the cost of intestinal polyp

月份	真实值	BP 神经网络模型		广义回归神经网络模型		灰色 GM(1,1)模型		非线性回归模型	
		预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%
2015-01	1.136	1.011	11.044	1.154	1.567	1.080	4.940	1.053	7.305
2015-02	1.253	1.009	19.457	1.139	9.093	1.087	13.249	1.055	15.767
2015-03	1.073	1.004	6.473	1.239	15.502	1.093	1.906	1.057	1.493
2015-04	1.078	0.993	7.823	1.093	1.427	1.100	2.097	1.059	1.768
2015-05	1.077	0.985	8.499	1.078	0.101	1.107	2.836	1.060	1.540
2015-06	1.201	0.982	18.213	1.077	10.319	1.114	7.205	1.061	11.605
2015-07	1.044	0.981	5.990	1.187	13.689	1.121	7.429	1.062	1.794
2015-08	1.049	0.981	6.523	1.061	1.122	1.128	7.515	1.063	1.316
平均相对误差/%		10.503±5.393		6.603±6.255		5.897±3.806		5.324±5.639	

表 7 4 种模型关于脑梗死治疗费用预测结果的验证(万元)
Table 7 The result of four models to predict the cost of cerebral infarction

月份	真实值	BP 神经网络模型		广义回归神经网络模型		灰色 GM(1,1)模型		非线性回归模型	
		预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%	预测值	相对误差/%
2015-01	3.647	4.029	10.484	4.638	27.183	4.590	25.860	4.216	15.599
2015-02	3.587	4.029	12.316	3.767	4.994	4.660	29.893	4.219	17.603
2015-03	4.215	4.029	4.411	3.598	14.642	4.731	12.232	4.219	0.097
2015-04	4.661	4.029	13.550	4.144	11.091	4.803	3.048	4.217	9.524
2015-05	4.519	4.029	10.853	4.608	1.960	4.876	7.894	4.211	6.806
2015-06	3.307	4.027	21.760	4.534	37.087	4.950	49.675	4.203	27.101
2015-07	3.127	4.021	28.596	3.446	10.209	5.025	60.714	4.192	34.082
2015-08	3.295	4.008	21.629	3.152	4.352	5.102	54.829	4.179	26.820
平均相对误差/%		15.450±7.855		13.940±12.243		30.518±22.337		17.204±11.574	

根据表2~7中的数据,可以得出以下结论:①根据可决系数 R^2 的大小关系,4种模型拟合程度排序分别为:广义回归神经网络模型($R_{\min}^2=0.565, R_{\max}^2=0.901$)、BP神经网络模型($R_{\min}^2=0.278, R_{\max}^2=0.826$)、非线性回归模型($R_{\min}^2=0.097, R_{\max}^2=0.747$)、灰色GM(1,1)模型($R_{\min}^2=0.048, R_{\max}^2=0.600$)。②根据预测相对误差 E 的大小关系,4种模型预测结果可靠性排序分别为:广义回归神经网络模型($E_{\min}=3.507\%, E_{\max}=13.940\%$)、非线性回归模型($E_{\min}=3.642\%, E_{\max}=17.204\%$)、BP神经网络模型($E_{\min}=9.845\%, E_{\max}=15.450\%$)、灰色GM(1,1)模型($E_{\min}=5.897\%, E_{\max}=30.518\%$)。

3 结 论

1)广义回归神经网络模型预测效果更接近临床数据,并且预测结果较其他模型更加稳定,是4种模型中最适宜应用于临床疾病费用预测工作的数学模型。

2)BP神经网络模型的预测效果较广义回归神经网络模型略差一点,主要原因可能在于其缺乏选择学习速率的方式以及确定隐含层神经元数目的有效方法,这些不足在文献中都有较为详尽的记录。

3)非线性回归模型的预测效果波动较大,主要原因在于该模型对于数据的要求较高,在数据波动较大,特别是在临床病情复杂,单一病种相对罕见的情况下,应用受到较大限制。

4)灰色GM(1,1)模型的预测效果是4种模型中最差的,主要原因在于灰色GM(1,1)模型是基于第一个初始值 $X^{(0)}(1)$,并采用外推法进行拟合预测的过程,按照最小二乘法的原理也必将经过第一个数据点,因此,初始点的选取会显著影响预测的效果和精度。

5)对于文中提到的以时间序列为依据的预测模型,广义回归神经网络模型可以进行的自适应、自学习以及容错功能,克服了其他3种模型的缺点,可以不受数据模型参数、结构以及动态特性的影响,对于数据的要求也不高,是可以应用于临床疾病治疗费用预测的重要模型。

参考文献:

- [1] Tacettin Ornek. Clinical factors affecting the direct cost of patients hospitalized with acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease[J]. International Journal of Medical Sciences, 2012, 9(4): 285-290.
- [2] Joel Segal. Cost of illness studies[M]. RTI International Center of Excellence in Health Promotion Economics, 2006: 2.
- [3] Kappelman M D, Rifas-Shiman S L, Porter C Q, et al. Direct Health Care Costs of Crohn's Disease and Ulcerative Colitis in US Children and Adults[J]. Gastroenterology, 2008, 135: 1907-1913.
- [4] Usa C, Petcharat P, Nathorn C, et al. Factors affecting health-care costs and hospitalizations among diabetic patients in Thai public hospitals.[J]. Value in Health, 2008, 11(s1): 69-74.
- [5] Mehta S, Moore R D, Graham N M. Potential factors affecting adherence with HIV therapy[J]. Aids, 1997, 11(14): 1665-1670.
- [6] 陈明. MATLAB神经网络原理与实例精解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
CHEN Ming. MATLAB neural network principle and example[M]. Beijing: Tsinghua university press, 2013. (in Chinese)
- [7] Asoodeh M, Shadizadeh S R, Zargar G. The estimation of stoneley wave velocity from conventional well log data: using an integration of artificial neural networks[J]. Energy Sources Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects, 2015, 37(3): 309-317.
- [8] Zhang J, Tan Z, Li C. A novel hybrid forecasting method using GRNN combined with wavelet transform and a GARCH model[J]. Energy Sources Part B: Economics Planning and Policy, 2015, 10(4): 418-426.
- [9] Liu X Y, Peng H Q, Bai Y, et al. Tourism flows prediction based on an improved grey GM(1,1) model[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014, 138: 767-775.
- [10] Khataee A, Vahid B, Behjati B, et al. Kinetic modeling of a triarylmethane dye decolorization by photoelectron-Fenton processs in a recirculateing system; Nonlinear regression analysis[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 92(2): 362-367.
- [11] 张良均, 曹晶, 蒋世忠. 神经网络实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 22-31.

- ZHANG Liangjun, CAO Jin, JIANG Shizhong. Neural network practical tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 2009:22-31.(in Chinese)
- [12] 颜虹.医学统计学[M].2 版.北京:人民卫生出版社,2010:215.
YAN Hong. Medical statistics[M]. 2th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2010: 215. (in Chinese)
- [13] 张德丰.MATLAB 神经网络编程[M].北京:化学工业出版社,2011.
ZHANG Defeng. MATLAB neural network programming[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2011.(in Chinese)
- [14] 陈芳,楼文高.基于广义回归神经网络的蔬菜市场日价格预测[J].浙江农业学报,2015,27(7):1253-1258.
CHEN Fang, LOU Wengao. Vegetable market day price forecasting based on generalized regression neural network[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2015,27(7):1253-1258.(in Chinese)
- [15] Liu B, Zhao L, Zhai Z J, et al. Optimum model of GM(1,1) and its suitable range[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2003,35(4):451-454.
- [16] 陈永胜.基于 MATLAB 和 SPSS 的非线性回归分析[J].牡丹江大学学报,2009,18(5):101-103.
CHEN Yongsheng. Nonlinear regression analysis based on MATLAB and SPSS[J]. Journal of Mudanjiang University, 2009,18(5):101-104.(in Chinese)
- [17] 杨华龙,刘金霞,郑斌.灰色预测 GM(1,1)模型的改进及应用[J].数学的实践与认识,2011,41(23):39-46.
YANG Hualong, LIU Jinxia, ZHENG Bin. Improvement and application of grey prediction GM (1,1) model[J]. Mathematics in Practice and Theory,2011,41(23):39-46.(in Chinese)

(编辑 王维朗)

(上接第 64 页)

- [13] 方鸿发,贾继钧.电器测试技术[M].北京:机械工业出版社,1994:131.
FANG Hongfa, JIA Jijun. Electrical Appliances Testing Technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1994: 131.(in Chinese)
- [14] 徐国政,张节荣,钱家骊,等.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2000:176.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and Application of High-voltage Circuit Breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2000:176.(in Chinese)
- [15] International Electrotechnical Commission. IEC62271-100 High-voltage alternating-current circuit-breakers[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission,2006:165-204.(in Chinese)
- [16] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB1984 高压交流断路器[S].北京:中国标准出版社,2014:53-69.
General Administration of Quality Supervision and Inspection and Quarantine, National Standardization Management Committee. GB1984 High-voltage alternating current circuit-breakers[S]. Beijing: China Standard Press,2014:53-69.(in Chinese)
- [17] 张海峰,黄实,赵庆斌,等.短路发电机的强励系统[J].高压电器,2014,50(8):32-35.
ZHANG Haifeng HUANG Shi, ZHAO Qingbin, et al. Strong Excitation System for Short Circuit Generator[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(8):32-35.(in Chinese)
- [18] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB1094.5—2008 电力变压器承受短路的能力[S].北京:中国标准出版社,2008:3-5.
General Administration of Quality Supervision and Inspection and Quarantine, National Standardization Management Committee. GB1094.5—2008 Power transformer to withstand the ability to short-circuit[S]. Beijing: China Standard Press,2008:3-5.(in Chinese)
- [19] 顾霓鸿,王学军.高压交流断路器电寿命试验方法探讨[J].高压电器,2005,41(1):62-64.
GU Nihong, WANG Xuejun. Discussion on Testing Method of Electrical Endurance for High Voltage Alternating-current Circuit Breakers[J]. High Voltage Apparatus,2005,41(1):62-64.(in Chinese)

(编辑 王维朗)