

中空纤维膜分离性能实验与预测

邵 垒¹, 刘卫华¹, 孙 兵^{1,2}, 赵宏韬², 冯诗愚¹

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 合肥江航飞机装备有限公司, 合肥 230051)

摘 要: 利用机载中空纤维膜分离性能测量台架, 针对分离性能随引气压力、引气温度、飞行高度等因素的变化规律开展了实验研究; 并采用所获得的实验数据作为训练及验证样本, 应用人工神经网络预测技术分析了该型膜的性能。研究结果显示: ①所建立的数学模型可实现对中空纤维膜分离性能的有效预测; ②制氮体积分数与量纲一制氮量成反比, 当要求制氮体积分数较高时, 其量纲一制氮量下降, 制氮效率降低; ③在一定制氮体积分数下, 制氮量随引气温度、引气压力的增加而增加; 制氮效率随引气压力的增加而增加, 但随引气温度的增加而减小; ④在飞行高度增加的情况下, 量纲一制氮量和制氮效率都增加, 而制氮体积分数的影响随飞行高度增加而减小。

关 键 词: 机载惰化系统; 中空纤维膜; 人工神经网络; 分离性能; 引气

中图分类号: V228; TQ021.4

文献标志码: A

Experiment and prediction of separation performance of hollow fiber membrane

SHAO Lei¹, LIU Wei-hua¹, SUN Bing^{1,2},
ZHAO Hong-tao², FENG Shi-yu¹

(1. College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Hefei Jianghang Aircraft Equipment Company Limited,

Aviation Industry Corporation of China, Hefei 230051, China)

Abstract: Based on a test apparatus of the on-board hollow fiber membrane separation performance, the separation performance was experimentally investigated with variation of the bleed air pressure, bleed air temperature, flight altitude and other factors; the experimental data were applied into the artificial neural network prediction technology as the training and validation samples, so as to predict the performance of this membrane. The results show that: (1) the established mathematical model can effectively predict the separation performance of hollow fiber membrane; (2) the volume fraction of nitrogen-enriched air is inversely proportional to non-dimensional flow rate; so when the volume fraction of nitrogen-enriched air increases, the flow rate and efficiency of nitrogen-enriched air decrease; (3) under a given volume fraction of nitrogen-enriched air, non-dimensional flow rate of nitrogen-enriched air increases with bleed air temperature and bleed air pressure increasing; the efficiency of nitrogen-enriched air increases with the bleed air pressure increasing, but decreases with bleed air temperature increasing; (4) when the flight altitude increases, the non-dimensional flow rate and efficiency of nitrogen-enriched air increase, and the influence of volume

收稿日期: 2013-11-08

基金项目: 航空科学基金(20122852038, 20132852040); 国家自然科学基金(50906066); 江苏高校优势学科建设工程

作者简介: 邵垒(1989—), 男, 重庆人, 博士生, 主要从事飞机燃油箱惰化研究。

fraction of nitrogen-enriched air decreases with the growing flight altitude.

Key words: on-board inerting system; hollow fiber membrane; artificial neural network; separation performance; bleed air

为避免雷电或火花点燃油箱内可燃气体,必须考虑采用有效的技术措施减少油箱燃爆发生的概率,并尽可能降低其危害程度.最新的研究成果表明,机载油箱惰化技术是目前实用的、最为理想的油箱燃爆抑制技术.

所谓油箱惰化就是采用技术措施控制飞机油箱上部气相空间的氧体积分数,使之在飞行的过程中,始终保持低于支持燃油燃烧所需要的氧体积分数水平.总体而言,油箱惰化技术是由引气及其处理、机载空气分离和油箱上部空间氧体积分数控制3部分组成,其中机载空气分离是其核心,主要有分子筛变压吸附分离和中空纤维膜分离两类技术,随着膜制备技术的进步,中空纤维膜分离已成为油箱惰化技术中的首选方案.

针对中空纤维膜国内外已开展了大量的理论与实验研究工作,并取得了较为丰硕的成果.刘猛等^[1]对中空纤维膜组件的温度特性进行了分析;贺高红等^[2]对中空纤维膜丝内压降规律进行了研究;刘小芳、冯诗愚等^[3-4]对中空纤维膜分离性能进行了实验;Pabby, Sirkar 等^[5-6]综述分析了中空纤维膜技术以及萃取过程;Moradi, Ahmad 等^[7-8]对中空纤维膜 CO₂ 吸收性能以及温度、压力特性进行了分析;Futselaar 等^[9]对不同类型中空纤维膜的经济性进行了分析比较;Katoh, Rezakazemi, Miramini 等^[10-12]进行了中空纤维膜分离过程的仿真分析;Shirazian, Atchariyawut 等^[13-14]对中空纤维膜接触器的传质过程进行了研究.

理论上,中空纤维膜的分离性能可采用膜分离系数来描述,但上述研究均显示,中空纤维膜的非理想化现象极其严重,理论描述与实际情况差距较大,实验测试仍是获取其性能的最主要方式.

中空纤维膜分离性能除了与膜材料本身有关以外,还极大程度上受到操作参数的影响,例如引气压力、引气温度和量纲一制氮量等,特别是机载情况下,分离性能还与飞行高度变化所造成的膜外侧背压变化有关.由于变量多,若单纯依靠实验获取每个工作状态下的分离性能,则实验周期长、成本高.

基于实验结果,降低实验成本的一种方法是

采用常规数学拟合方式获取相应的经验公式,但由于中空纤维膜影响因素多,很难确定方程的形式,因此拟合过程烦琐复杂,且精度难以保证.

人工神经网络是20世纪发展起来的、处理多变量十分有效的数学方法,由于不需考虑方程的具体形式,仅通过调整权值与阈值,即可较好地拟合中空纤维膜的分离性能.有鉴于此,本文将采用人工神经网络来建立中空纤维膜分离性能模型.

本文通过构建实验台架,以某型国产机载中空纤维膜为研究对象,通过实验获取在一定工况下中空纤维膜的分离性能实验数据;在此基础上,采用部分实验数据作为训练样本,部分数据作为正确性验证的依据,在人工神经网络模型正确性获得验证的基础上,模拟分析了中空纤维膜的性能变化规律与影响因素,获得了对于实际工作具有一定指导意义的研究结论.

1 实验系统

所采用的实验系统结构如图1所示,它是由大气环境舱,机载中空纤维膜分离装置(以下简称膜装置),气源设备及相关的测量、调节与控制仪器仪表组成.采用真空泵控制大气环境舱压力,实现对飞行高度的模拟;采用气源设备来模拟发动机不同的引气状态;采用氧分析仪,压力、温度和流量传感器来测试制氮体积分数、流量等参数.

输入膜装置的压缩空气气源是由压缩机储气罐、调节阀、孔板流量计、第1级冷却器、水分离器、过滤器、第2级冷却器、加热器等部件组成.供气流量由调节阀F1和F2控制,由孔板流量计测出每次实验所需的供气流量,气体经第1级冷却后,由水分离器分离出水,再经过主路过滤器(AFF8B-06D)、油雾分离器(AM350-06D)和微雾分离器(AMD350-06D)3级过滤后才能进入被试膜装置.输入空气需要加温时打开调节阀F3,需要冷却时打开调节阀F4.开动真空泵后,可用调节阀F5调节舱内飞行高度.环境温度由调节阀F8、F9、F10调节.加热时打开F8,冷却时打开F9和F10经两级冷却后供给大气环境舱.膜装置输出产品气流量控制是经减压阀稳压后,通过调节阀F7实现的,输出产品气流量由转子流量计测出.打开调节阀F6使少量输出产品气流过氮气

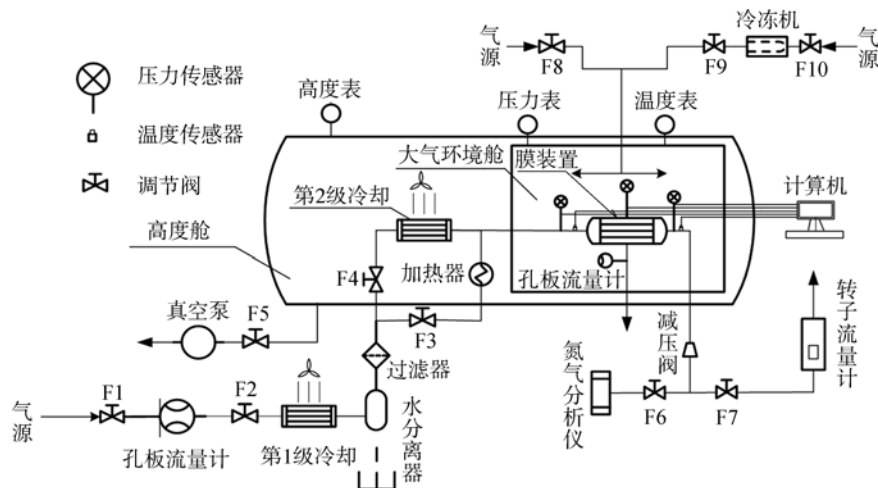


图1 实验系统结构

Fig. 1 Experimental system structure

分析仪以测量输出产品气中的氮体积分数。

通过温度传感器和压力传感器与计算机配合工作,可对每次实验的引气温度、输出产品气温度、大气环境舱温度、引气压力、输出产品气压力以及装置中减压阀出口压力自动进行测量和记录。在对膜装置的输出产品气中的氮体积分数测试时,应使其预定的输入输出参数、工作环境条件稳定并保持状态条件 2~3 min,观察输出产品气中的氮体积分数读数,应待其读数基本稳定后,才能记录结果。

在实验中,引气压力分别控制为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 MPa,制氮体积分数分别控制为 98%, 95%, 91%, 88% 和 85%,引气温度分别控制为 50, 70, 80, 100, 115 °C,飞行高度控制为 0, 5, 10, 12 km。

2 中空纤维膜分离性能模型

2.1 建模方法

本文构造一个 3 层 back propagation(BP)人工神经网络(以下简称网络),采用贝叶斯正则化方法对网络进行训练,以提高网络的泛化能力。

本文通过贝叶斯式导出正则化方法的 α 和 β 变量^[15],采用方均误差作为性能函数^[16]。方均目标误差修正函数为

$$F(W) = \alpha A + \beta W \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W_k^2 \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N (y_p - t_p)^2 \quad (3)$$

式中 W 为网络中所有权值的方均值, W_k 为网络

中的权值, A 为方均差, N 为网络的实际权值总个数, y_p 和 t_p 为网络输出和目标输出。

α 与 β 为性能参数,在网络训练中通过 Levenberg-Marquardt(L-M)优化理论自适应调节其大小,使其达到最优。若 $\alpha \gg \beta$,则训练算法使网络误差降低;反之,则训练强调权值的减小,使得网络误差相应减小,最终使得网络的输出平滑。

2.2 训练样本选择

训练样本的选择在网络学习中占有重要的地位,其蕴含的信息直接影响着网络的性能。即:训练样本集的代表性不仅决定了网络的学习效果,而且影响了其训练的周期^[17]。

实验中,所获得的完整实验数据有 600 组。因此,在训练样本的选择中,为了突出其代表性,防止数据在某些区间过于集中或分散,影响网络质量和学习,本文按引气压力、制氮体积分数、飞行高度均匀分布,引气温度随机分布,选择了共 120 组实验数据作为训练样本。这不仅保证了数据良好的均匀性,同时也较好地反映了实验结果的特征。验证样本则由其 480 组数据中随机抽取出的 24 组数据组成。

2.3 参数预处理

本文中网络采用的传递函数为 Log-Sigmoid 函数

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4)$$

根据 Sigmoid 函数的特点,在输入层需要将输入量进行归一化后才能作为网络的输入量,为此,本文用式(5)进行数据的归一化^[18]。

$$x_i = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

式中 x_i 为归一化参数, x 为原始参数, $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 为归一化前参数的最小和最大值.

2.4 隐藏层神经元数确定

假定隐藏层神经元数为 S , 输入层参数为 4, 输出层参数为 2, $N=7 \times S+2$.

在训练网络时, 对于特定的隐藏层神经元数, 当网络经过若干次迭代以后, 有效权值个数、 A 和 W 三个参数处于恒值或变化较小时, 说明网络训

练收敛. 因此, 实际操作中可根据样本数据的不同, 从一个相对较小的隐藏层神经元数 S 开始训练, 如果网络训练不收敛则停止训练; 然后, 逐步增加 S 值, 直到从某个 S 值开始有效权值个数、 A 和 W 基本保持不变, 那么这个 S 值就可以作为最终的隐藏层神经元数.

表 1 是本文针对隐藏层神经元数的训练结果, 从表中可以看出当 S 大于 40 以后, 有效权值个数、 A 和 W 基本保持不变, 因此本文所确定的隐藏层神经元数目为 40.

表 1 隐藏层神经元数训练结果
Table 1 Training results of number of hidden layer neurons

S	有效权值个数	N	A	W	S	有效权值个数	N	A	W
2	12	16	28.0	4.9379	28	126	198	1.12×10^{-5}	7.2535
5	28	37	6.85	5.4563	30	135	212	6.66×10^{-6}	6.8176
7	39	51	1.53	6.7358	32	146	226	5.25×10^{-6}	6.8258
10	58	72	0.224	16.491	35	155	247	4.99×10^{-6}	6.9599
15	86	107	0.085	9.0168	40	176	282	4.62×10^{-6}	6.9321
20	109	142	0.0236	8.6008	45	176	317	4.61×10^{-6}	6.9223
25	118	157	2.66×10^{-5}	8.8618	50	176	352	4.61×10^{-6}	6.9120

3 模型验证

本文将实验所获取的中空纤维膜分离性能数据采用制氮效率和量纲一制氮量随引气压力、引气温度、制氮体积分数、飞行高度变化规律来反映, 其中制氮效率定义为

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{nea}}}{\dot{m}_{\text{air}}} \quad (6)$$

式中 $\dot{m}_{\text{nea}}$ 为富氮气体流量, $\dot{m}_{\text{air}}$ 为引气流量.

量纲一制氮量定义为

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_{\text{nea}}}{\dot{m}_{\text{max}}} \quad (7)$$

式中 $\dot{m}$ 为量纲一制氮流量 (以下简称制氮量), $\dot{m}_{\text{max}}$ 为富氮气体最大流量.

3.1 模型计算结果与训练样本的比较

表 2 给出了模型计算结果与训练样本的比较, 模型计算结果与训练样本值基本一致. 其整体方均误差仅为 4.62×10^{-6} , 可以反映出该模型已训练充分.

3.2 模型计算结果与验证样本的比较

模型计算结果与验证样本的比较如表 3 所示, 从表中可以看出, 制氮量的平均误差为 1.75%, 制氮效率的平均误差为 1.38%, 这反映了该模型具有很好的预测准确性.

表 2 模型计算结果与训练样本比较
Table 2 Comparison of calculation results of model and training samples

引气压力/ MPa	制氮体积 分数/%	引气温度/ ℃	飞行高度/ km	训练样本 制氮量/ 10^{-3}	模型计算结果 制氮量/ 10^{-3}	训练样本制氮 效率/%	模型计算结果 制氮效率/%
0.3	85	50	10	44.157	44.043	62.3	63.365
0.3	88	70	10	48.442	48.398	55.1	55.641
0.4	85	50	5	71.274	71.322	63.7	64.256

续表

引气压力/ MPa	制氮体积 分数/%	引气温度/ ℃	飞行高度/ km	训练样本 制氮量/ 10^{-3}	模型计算结果 制氮量/ 10^{-3}	训练样本制氮 效率/%	模型计算结果 制氮效率/%
0.5	98	100	5	48.303	48.337	20.2	19.203
0.6	98	100	0	57.105	57.111	16.8	17.657
0.6	98	115	12	98.606	98.574	23.2	23.845
0.7	98	50	12	54.619	54.632	43.2	41.456
0.8	91	70	0	161.92	161.93	46.8	47.050
0.4	88	100	0	111.31	111.29	47.9	48.621
0.5	95	50	10	35.393	35.274	43.8	45.447
0.6	85	70	10	319.45	319.49	68.9	68.447
0.7	91	70	10	197.76	197.70	57.5	58.633
0.8	85	50	10	293.51	293.42	73.4	71.498
0.8	88	80	5	343.87	343.84	63.4	63.714
0.6	85	115	10	634.24	634.34	64.5	65.840

表 3 模型计算结果与验证样本的比较

Table 3 Comparison of calculation results of model and validation samples

引气压力/ MPa	制氮体积 分数/%	引气温度/ ℃	飞行高度/ km	验证样本 制氮量/ 10^{-3}	模型计算结果 制氮量/ 10^{-3}	验证样本制氮 效率/%	模型计算结果 制氮效率/%
0.3	85	115	12	163.35	168.98	55.9	58.39
0.3	88	80	10	59.04	61.11	54.4	54.41
0.3	85	50	5	37.03	36.96	59.5	61.00
0.4	91	100	10	100.74	100.89	44.0	43.93
0.4	95	100	5	46.94	48.69	25.9	26.17
0.4	98	80	5	21.34	23.34	16.7	17.39
0.5	85	70	0	165.84	165.89	61.2	60.76
0.5	88	100	12	255.05	264.80	61.4	61.55
0.5	91	70	12	106.37	112.24	55.3	54.95
0.5	95	100	10	97.55	101.51	35.5	35.56
0.5	98	100	10	61.45	61.40	22.5	23.20
0.6	85	80	5	327.65	331.36	65.4	65.69
0.6	88	70	0	154.72	154.81	56.8	56.62
0.6	91	115	0	178.59	180.51	37.1	36.80
0.6	95	70	12	93.05	93.07	47.0	46.76
0.6	85	50	5	156.96	156.95	66.9	67.03
0.7	85	100	10	681.48	686.55	67.7	67.56
0.7	88	100	5	374.00	374.10	59.3	59.52
0.7	91	70	5	160.89	162.82	53.9	53.47
0.7	95	100	0	123.25	123.32	29.0	29.06
0.8	85	80	12	615.70	621.77	70.8	69.51
0.8	88	80	10	415.94	421.63	67.5	66.22
0.8	95	80	5	141.57	143.45	39.6	41.43
0.8	98	70	0	65.44	65.50	25.2	24.22

4 中空纤维膜分离性能与影响因素分析

4.1 引气温度对制氮量、制氮体积分数和制氮效率的影响

以引气压力为 0.3 MPa, 飞行高度为 0 km 为例, 引气温度对制氮量、制氮体积分数和制氮效率的影响如图 2 所示。

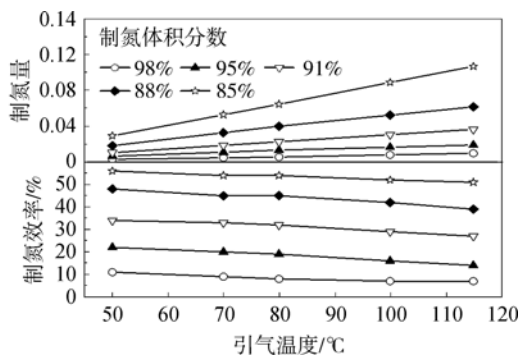


图 2 引气温度与制氮量、制氮体积分数、制氮效率关系
Fig. 2 Relations between flow rate, volume fraction, efficiency of nitrogen-enriched air and bleed air temperature

由图 2 可见, 制氮量随着引气温度的增加而增加, 而制氮效率随引气温度增加而减少。在一定引气温度下, 制氮体积分数越低, 制氮量和制氮效率越高; 当制氮体积分数低时, 引气温度对制氮量的影响越明显。这是由于: 随着引气温度上升, 中空纤维膜工作温度相应上升, 使得分子链运动加剧, 渗透系数增加, 其结果自然是更多的氧气渗透出来。

4.2 引气压力对制氮量、制氮体积分数和制氮效率的影响

引气温度为 50 °C, 飞行高度为 0 km 时, 引气压力对制氮量、制氮体积分数和制氮效率影响如图 3 所示。由图 3 可见: 引气压力增加, 制氮量和制氮效率均增加; 当引气压力一定, 制氮体积分数越高, 其制氮量和制氮效率越低。同时, 当制氮体积分数越低时, 引气压力对制氮量的影响越明显。这是由于: 当飞行高度一定时, 随着引气压力的增加, 中空纤维膜两侧压力差增大, 使得更多氧气渗透出去, 提高了制氮体积分数。

4.3 飞行高度对制氮量、制氮体积分数和制氮效率的影响

当引气温度为 50 °C、引气压力为 0.3 MPa

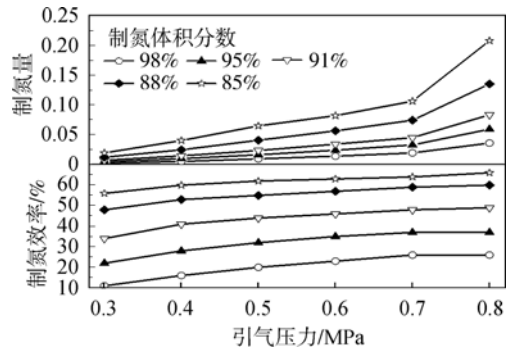


图 3 引气压力与制氮量、制氮体积分数、制氮效率关系
Fig. 3 Relations between flow rate, volume fraction, efficiency of nitrogen-enriched air and bleed air pressure

时, 飞行高度对制氮量、制氮体积分数和制氮效率的影响可见图 4。由图 4 可见, 随飞行高度增加时, 制氮量和制氮效率均增加; 飞行高度一定时, 则随制氮体积分数降低, 制氮量增加。由于引气压力随飞行高度增加的变化量越来越小, 因此飞行高度变化对于制氮体积分数的影响也越来越小。

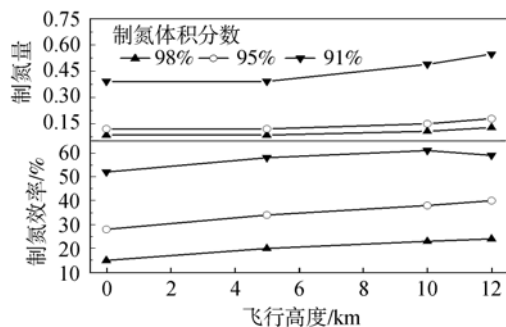


图 4 飞行高度与制氮量、制氮体积分数、制氮效率关系
Fig. 4 Relations between flow rate, volume fraction, efficiency of nitrogen-enriched air and flight altitude

5 结 论

本文利用机载中空纤维膜分离性能测量台架, 针对某型国产机载中空纤维膜的分离性能随引气压力、引气温度、飞行高度等因素的变化规律开展了实验研究; 并采用所获得的实验数据作为训练及验证样本, 应用网络预测技术全面分析与掌握了该型膜的性能变化规律。研究结果表明:

1) 本文采用贝叶斯正则化 BP 网络所建立的机载中空纤维膜性能模型, 可以实现非线性条件下的分离性能的有效预测。

2) 制氮体积分数与制氮量成反比, 当要求制氮体积分数较高时, 其制氮量下降, 制氮效率

降低。

3) 当制氮体积分数一定时,制氮量随引气温度的、引气压力的增加而增加,制氮效率随引气压力的增加而增加,但随引气温度的增加而减小。

4) 当飞行高度增加时,制氮量和制氮效率均增加,但对于制氮体积分数的影响随飞行高度增加而变小。

参考文献:

- [1] 刘猛,王浚.一种富氧中空纤维膜组件的温度特性[J].北京航空航天大学学报,2004,30(3):280-282.
LIU Meng, WANG Jun. Temperature characteristic of a kind of hollow-fiber membrane module used for oxygen enrichment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(3): 280-282. (in Chinese)
- [2] 贺高红,邹越,徐仁贤,等.中空纤维气体分离膜丝内压降规律的研究[J].膜科学与技术,1993,13(2):22-28.
HE Gaohong, ZOU Yue, XU Renxian, et al. A study on pressure drop in hollow-fiber membrane for gas separation[J]. Membrane Science and Technology, 1993, 13(2): 22-28. (in Chinese)
- [3] 刘小芳,刘卫华,钱国诚,等.机载中空纤维膜富氮性能实验[J].航空动力学报,2012,27(5):976-980.
LIU Xiaofang, LIU Weihua, QIAN Guocheng, et al. Experimentation on nitrogen-enriched characteristics of on-board hollow fibre membrane[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 976-980. (in Chinese)
- [4] 冯诗愚,卢吉,刘卫华,等.机载制氮系统中空纤维膜分离特性[J].航空动力学报,2012,27(6):1332-1339.
FENG Shiyu, LU Ji, LIU Weihua, et al. Separation performance of hollow fiber membrane for on-board inerting gas generating system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1132-1339. (in Chinese)
- [5] Pabby A K, Sastre A M. State-of-the-art review on hollow fibre contactor technology and membrane-based extraction processes[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 430: 263-303.
- [6] Sirkar K K. Membranes, phase interfaces, and separations: novel techniques and membranes-an overview[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2008, 47(15): 5250-5266.
- [7] Moradi S. Investigation of CO₂ absorption in hollow fiber membrane with experimental and simulation methods[J]. World Applied Sciences Journal, 2010, 9(8): 834-847.
- [8] Ahmad F, Lau K K, Shariff A M, et al. Temperature and pressure dependence of membrane permeance and its effect on process economics of hollow fiber gas separation system[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 430: 44-55.
- [9] Futselaar T, Zoontjes R J C. Economic comparison of transverse and longitudinal flow hollow fiber membrane modules for reverse osmosis and ultrafiltration[J]. University of Twente Publications, 1993, 90(1): 345-361.
- [10] Katoh T, Tokumura M, Yoshikawa H, et al. Dynamic simulation of multicomponent gas separation by hollow-fiber membrane module; nonideal mixing flows in permeate and residue sides using the tanks-in-series model[J]. Separation and Purification Technology, 2011, 76(3): 362-372.
- [11] Rezakazemi M, Niazi Z, Mirfendereski M, et al. CFD simulation of natural gas sweetening in a gas-liquid hollow-fiber membrane contactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 168(3): 1217-1226.
- [12] Miramini S A, Razavi S M R, Ghadiri M, et al. CFD simulation of acetone separation from an aqueous solution using supercritical fluid in a hollow-fiber membrane contactor[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2013, 72: 130-136.
- [13] Shirazian S, Moghadassi A, Moradi S. Numerical simulation of mass transfer in gas-liquid hollow fiber membrane contactors for laminar flow conditions[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, 17(4): 708-718.
- [14] Atcharyawut S, Feng C, Wang R, et al. Effect of membrane structure on mass-transfer in the membrane gas-liquid contacting process using microporous PVDF hollow fibers[J]. Journal of Membrane Science, 2006, 285(1/2): 272-281.
- [15] 陈希,徐庆增,张汉良,等.贝叶斯正则化BP网络在热轧管控制中的应用[R].上海:2005亚洲国际过程自动化技术与装备展览会,2005.
- [16] Hagan M T, Demuth H B, Beale M. Neural network design[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [17] 郝红卫,蒋蓉蓉.基于最近邻规则的神经网络训练样本选择方法[J].自动化学报,2007,33(12):1248-1251.
HAO Hongwei, JIANG Rongrong. Training sample selection method for neural networks based on nearest neighbor rule[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(12): 1248-1251. (in Chinese)
- [18] 柳小桐. BP神经网络输入层数据归一化研究[J].机械工程与自动化,2010(3):122-123.
LIU Xiaotong. Study on data normalization in BP neural-network[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2010(3): 122-123. (in Chinese)