

基于腐蚀损伤表征因子的疲劳寿命衰减影响研究

邢玮, 穆志韬, 周立建

(海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041)

摘要: 应用 MIT (Mean Impact Value) 方法对 LY12CZ 铝合金试件疲劳寿命产生影响的腐蚀损伤表征因子进行筛选, 得到了对疲劳寿命衰减影响较大的 5 个腐蚀损伤表征因子。定义了腐蚀疲劳寿命累积衰减函数与疲劳寿命衰减速率函数, 建立了寿命累积衰减模型, 验证了该模型的准确性, 并以腐蚀损伤表征因子和腐蚀累积衰减函数为数据样本, 用 BP 神经网络、自适应滤波的 LMS 算法分别预测了不同年限下的疲劳寿命。与实验测得的疲劳寿命数据对比后得出, BP 神经网络、LMS 方法计算产生的误差在工程上可以接受。

关键词: 疲劳寿命累积衰减模型; MIT; 疲劳寿命累积衰减速率; LMS; 神经网络

中图分类号: V216.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)04-0049-05

Research on Influence on Fatigue Life Attenuation Based Corrosion Damage Characterization Factors

XING Wei, MU Zhi-tao, ZHOU Li-jian

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China)

Abstract: Corrosion damage characterization factors of LY12CZ aluminum alloy were filtrated using MIT (Mean Impact Value) method. Five corrosion damage characterization factors were obtained, which has significant influence on fatigue life attenuation. The functions of cumulative corrosion fatigue life and cumulative fatigue life attenuation rate were defined. The cumulative corrosion fatigue life model was established and its accuracy was verified. Corrosion damage characterization factors and the cumulative fatigue life attenuation function were taken as specimen. The fatigue lives of LY12CZ aluminum alloy of different service time were predicted with BP neural network and LMS algorithm. The results were than compared with experimentation results. It was proved that the error generated by BP neural network and LMS algorithm can be accepted in engineering.

Key words: cumulative corrosion fatigue life model; MIT; LMS; cumulative fatigue life attenuation rate; neural network

飞机在腐蚀环境下服役时, 腐蚀会大大降低结构的疲劳寿命, 根据现有的腐蚀疲劳机理进行精确

理论计算来确定飞机结构在腐蚀环境下的疲劳寿命是很困难的。笔者通过对 LY12CZ 铝合金试件进行

收稿日期: 2011-02-26

作者简介: 邢玮(1986—), 男, 江苏高淳人, 硕士研究生, 主要研究方向为腐蚀疲劳以及可靠性。

加速腐蚀试验和疲劳试验,得到不同腐蚀年限下 LY12CZ 铝合金试件腐蚀损伤表征因子的相关数据,建立了点蚀阶段腐蚀损伤表征因子与腐蚀疲劳寿命累积衰减的函数模型,通过不同的方法对疲劳寿命进行预测。

1 腐蚀与疲劳试验

试验件材料为 LY12CZ 铝合金,试样形状如图 1 所示;加速腐蚀试验溶液为 5%(质量分数,后同)的 NaCl 溶液,添加适量的稀 H_2SO_4 使溶液的 pH 值为 4~4.5;试验设备为周期浸润箱。试件在配置溶液中浸泡 3.8 min,在溶液外烘烤 17.5 min,为 1 个周期。试验时试验箱温度设为 40 °C,相对湿度为 90%。加速腐蚀试验 325 个周期相当于外场暴露试验 1 a。对试验件分别进行了当量 1~10 a 的实验室加速腐蚀试验,试件经不同的预腐蚀年限后,在 Material Test System 810 电液伺服疲劳试验机上进行疲劳试验。试验在室温下进行,加载波形为正弦波,波形采用 PVC 补偿,采取轴向等幅加载方式,应力比为 0.06,加载频率为 10 Hz,最大应力为 308 MPa。

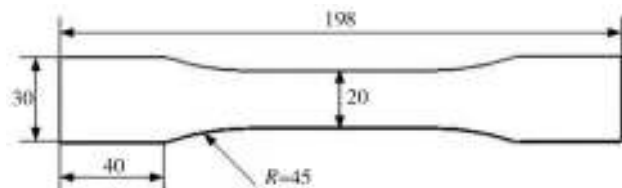


图1 LY12CZ 铝合金试件形状

Fig. 1 Shape of LY12CZ aluminum alloy specimens

2 腐蚀损伤的表征

腐蚀损伤的表征在工程上一般是指腐蚀等级。结构腐蚀是一个渐变的过程,腐蚀损伤表征因子多种多样,所以腐蚀损伤的量化评估十分困难^[1]。现有的腐蚀损伤评价标准一般采用描述性的语言。

在实验室的条件下,定义下面 10 个腐蚀损伤表征因子。

1) 腐蚀坑最大深度($d_{\max}$):试验件上所测腐蚀坑的深度的最大值;

2) 腐蚀坑平均深度(d):试验件上所测腐蚀坑的深度的平均值;

3) 腐蚀坑平均宽度(b):垂直于载荷方向的所测腐蚀坑宽度的平均值;

4) 腐蚀坑最大宽度($b_{\max}$):垂直于载荷方向的所测腐蚀坑宽度的最大值;

5) 腐蚀最大面积($S_{\max}$):所测腐蚀区域的面积的最大值;

6) 腐蚀平均面积(S):所测腐蚀区域的面积的平均值;

7) 腐蚀坑最大体积($V_{\max}$):所测腐蚀坑体积的最大值;

8) 腐蚀坑平均体积(V):所测腐蚀坑体积的平均值;

9) 腐蚀点蚀率(r ,用分维数^[2]表示):试验件腐蚀部分的面积占试验件表面积的比值;

10) 质量损失率(w):试验件经过腐蚀之后,质量的减少量占实验前试验件质量的比值。用柯氏达显微镜分别对腐蚀当量年限下腐蚀损伤因子进行测量,试验件当量腐蚀 3 a 后的腐蚀坑三维形貌、腐蚀区域面积、腐蚀坑的深度、宽度、面积的测量如图 2—5 所示。

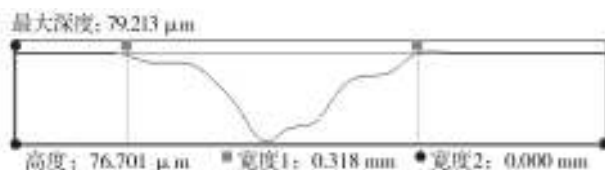


图2 腐蚀坑宽度与深度

Fig. 2 Width and depth of corrosion pit



图3 腐蚀坑三维形貌

Fig. 3 3D photographic map of corrosion pit



图4 腐蚀坑面积示意

Fig. 4 Schematic of corrosion pit area

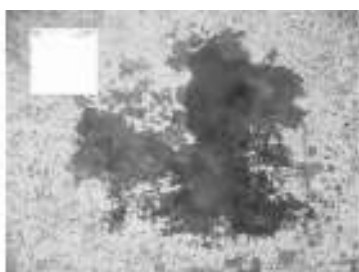


图5 腐蚀区域面积测量

Fig. 5 Corrosion area measurement

工程上计算腐蚀疲劳寿命需要对疲劳断裂相关参数进行修正,用疲劳断裂和损伤理论计算寿命。这样做有2个缺点:1)需要考虑的因素多,修正过程中误差比较大,较难实现寿命的最大利用;2)修正过程中需要大量的工程数据,试验的经济效益不好。

直接研究腐蚀损伤表征因子对疲劳寿命的衰减作用,可以避免上述缺点。定义如下:

$$M_t = |N_{t-1} - N_t| / N \quad (1)$$

$$F = |N - N_t| / N \quad (2)$$

式中: M_t 为第 t 年腐蚀疲劳寿命衰减速率; N_{t-1} 为腐蚀 $t-1$ 年的疲劳寿命; N_t 为腐蚀 t 年的疲劳寿命; N 为试件无腐蚀影响的疲劳寿命; F 为腐蚀 t 年试件的疲劳寿命累积衰减率。

实验结果如图6—7所示,可以看出随着腐蚀年限增加,疲劳寿命逐渐衰减,衰减的速度越来越小,在第7年之后趋于稳定。疲劳寿命的累积衰减率曲线斜率逐渐减小,即腐蚀后期,腐蚀对疲劳的累积衰减越来越小。

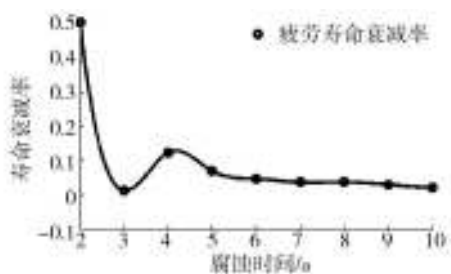


图6 疲劳寿命衰减速率

Fig. 6 Fatigue life attenuation rate

3 腐蚀损伤表征因子筛选以及腐蚀对疲劳寿命影响模型的建立

上述10个腐蚀损伤表征因子对疲劳寿命的影

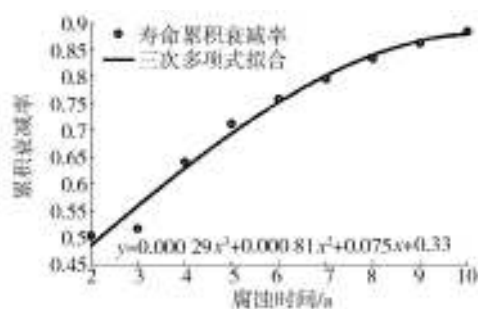


图7 疲劳寿命累积衰减率

Fig. 7 Fatigue life cumulative attenuation

响不同,在选择腐蚀损伤表征因子的时候没有清晰的理论依据。如果将一些不重要的腐蚀损伤表征因子引入腐蚀计算模型,会增加系统的复杂性,不利于模型的简化,而且计算过程中会大大降低模型的精度,因此需要对腐蚀损伤表征因子进行筛选。

Dombi等人提出用MIT(Mean Impact Value)来反映神经网络中的权重矩阵的变化情况,MIT被认为是在神经网络中评价变量相关性最好的指标之一。它是用于确定输入神经元对输出神经元影响大小的指标,其符号代表相关的方向,绝对值代表影响的相对重要性。其具体的计算过程为:在网络训练终止后,将训练样本中的自变量特征在其原值的基础上增加或减少10%构成2组新的训练样本,用已经建成的网络进行训练得到2个仿真结果,并计算与真实结果之间的差值,即变动自变量后对输出产生的影响变化值(IV, Impact Value),最后将IV按观测例数平均得出该自变量对于网络输出的MIT。根据MIT绝对值大小为各自变量排序,得到各自变量对网络输出影响相对重要性的位次表,从而判断输入特征对网络结果的影响程度,即实现了变量的筛选^[3]。

将10个腐蚀损伤表征因子作为神经网络的输入变量,输出为腐蚀对寿命的累积衰减率,MIT绝对值反映了腐蚀损伤表征因子对疲劳寿命的影响大小。对实验取得的9组数据进行训练,将样本数据矩阵在原值的基础上增加或减少10%,得到2组新的训练样本,再次输入网络,得到10个腐蚀损伤表征因子的MIT值的绝对值,见表1。

根据表1,可以得出对疲劳寿命累积衰减率影响的腐蚀损伤表征因子排序为:最大腐蚀坑深度>平均腐蚀坑深度>点蚀率>腐蚀坑平均宽度>腐蚀坑最大宽度>最大腐蚀面积>最大腐蚀坑体积>平均腐蚀坑

表1 腐蚀损伤表征因子对应的MIT绝对值

Table 1 Corrosion damage characterization factor corresponding MIT absolute value

腐蚀损伤表征因子	$d_{\max}/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$S_{\max}/\text{mm}^2$	S/mm^2	$V_{\max}/\mu\text{m}^3$	$r/\%$	$w/\%$	b/mm	$b_{\max}/\text{mm}$	$V/\mu\text{m}^3$
MIT绝对值	3.45	3.45	1.82	0.45	1.65	2.81	0.44	1.94	1.87	0.58

体积>平均腐蚀面积>质量损失率。

由表1可以看出 $d_{\max}, d, b, b_{\max}, r, V_{\max}, S_{\max}$ 的MIT值相对比较大。所以选择上述7个腐蚀损伤表征因子为主要影响因子。腐蚀坑深度服从正态分布,并且有^[4]:

$$d_{\max}=c\sigma+d \quad (3)$$

$$b_{\max}=c\sigma+b \quad (4)$$

式中: c 为常数^[4]。所以选择 $d_{\max}, b_{\max}, r, V_{\max}, S_{\max}$ 作为衡量腐蚀损伤的5个指标。

基于上述结论,假设:

$$F=f_1(d_{\max}, r, b_{\max}, V_{\max}, S_{\max})+f_2(R) \quad (5)$$

式中: f_1 是非线性函数; $f_2(R)$ 是其它腐蚀损伤表征因子对疲劳寿命累积衰减函数影响的总和,表达式为:

$$f_2(R)=\alpha f_1(d_{\max}, r, b_{\max}, V_{\max}, S_{\max}) \quad (6)$$

式中: $\alpha=n/m$, m 为 $d_{\max}, b_{\max}, r, V_{\max}, S_{\max}, d, b$ 的MIT值之和, n 为剩余的腐蚀损伤表征因子的MIT值之和。经计算可得到 $\alpha=0.088$ 。最终得到疲劳寿命累积衰减函数表达式为:

$$F=(1+\alpha)f_1(d_{\max}, r, b_{\max}, V_{\max}, S_{\max}) \quad (7)$$

4 疲劳寿命累积衰减函数的线性模型

假设: $f_1(d_{\max}, r, b_{\max}, V_{\max}, S_{\max})$ 是一个线性的函数,不考虑 $d_{\max}, b_{\max}, r, V_{\max}, S_{\max}$ 之间的相关性。最终得到腐蚀寿命累积衰减率函数表达式:

$$F=(1+\alpha)f_1(d_{\max}, r, b_{\max}, V_{\max}, S_{\max}) \quad (8)$$

线性网络是Widrow和Hoff于1960年提出的一种网络模型。它的训练算法是自适应滤波的LMS算法,所以线性网络是一个自适应可调网络,适用于对线性系统的预测分析^[5]。将 $d_{\max}, r, b_{\max}, V_{\max}, S_{\max}$ 作为线性网络的5个输入, $F/(1+\alpha)$ 作为网络输出,权值与阈值采用网络默认值。对4组数据样本训练,再用训练好的网络对另外4组样本进行预测,采用LMS对此线性系统分析计算结果如表2、图8、9所示。

由表2、图8、9可以看出,用自适应滤波的LMS

表2 LMS预测与实验结果

Table 2 LMS forecast and experimental results

年限/a	4	6	8	10
实验寿命值/个周期	45 244	30 489	21 140	14 679
预测寿命值/个周期	46 744	33 193	21 119	13 585
相对当年的实验寿命误差	3.3%	8.9%	0.1%	14.2%
相对无腐蚀总寿命的误差	1.2%	2.1%	0.02%	1.7%

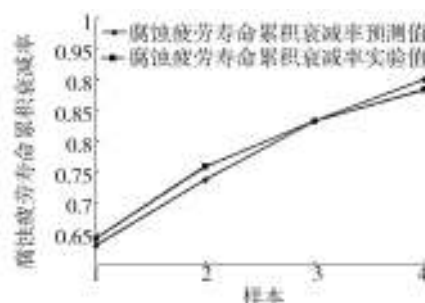


图8 LMS预测与实验值对比曲线

Fig. 8 Contrast curves of LMS forecast and experimental value

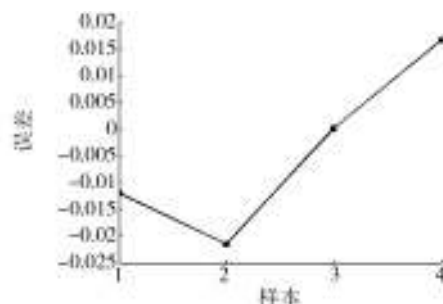


图9 LMS预测与实验值误差

Fig. 9 Error of LMS forecast and experimental value

算法对疲劳寿命累积衰减率函数的线性模型的求解在工程上是可以接受的。

5 疲劳寿命累积衰减函数的非线性求解

假设函数是非线性函数,采用误差逆传播(BP)算法对疲劳寿命累积衰减函数进行预测。神经网络的输入层由5个神经元输入,即 $d_{\max}, b_{\max}, r, V_{\max}, S_{\max}$ 。网络输出为疲劳寿命的累积衰减率。样本数据见表3。

表3 神经网络训练样本数据

Table 3 Neural network training sample data

分维数	$d_{\max}/\mu\text{m}$	$b_{\max}/\text{mm}$	$S_{\max}/\text{mm}^2$	$V_{\max}/\mu\text{m}^3$	实验平均疲劳寿命值/个周期
0	0	0	0	0	126 076
0.851 2	73.968	0.233	0.262	129 473	60 873
0.969 9	101.014	0.317	0.328	158 475	45 244
1.088 6	111.969	0.337	0.393	199 023	36 418
1.207 4	128.309	0.403	0.461	211 393	30 489
1.268 2	146.441	0.450	0.503	243 103	25 869
1.327 4	157.320	0.502	0.590	250 333	21 140
1.386 5	168.982	0.585	0.672	253 185	17 349
1.894 1	174.377	0.628	0.748	262 468	14 679

由于神经网络输入端的数据量级相差较大,所以为了模型能更精确,对表3的数据进行归一化。每一列数据归一化公式:

$$y_i = (Y - Y_{\min}) / (Y_{\max} - Y_{\min}) \quad (9)$$

对样本数据进行神经网络训练,运用训练好的网络进行预测,其预测结果如图10—11所示。从图10—11中可以看出,预测值与实验值比较吻合。

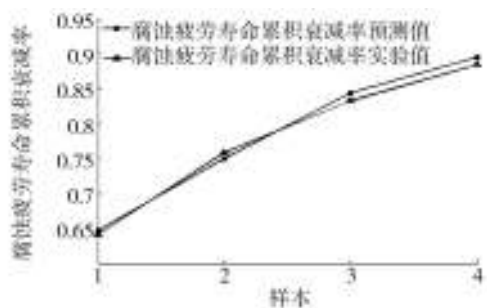


图10 神经网络预测与实验值对比曲线

Fig. 10 Contrast curves of neural network forecast and experimental value

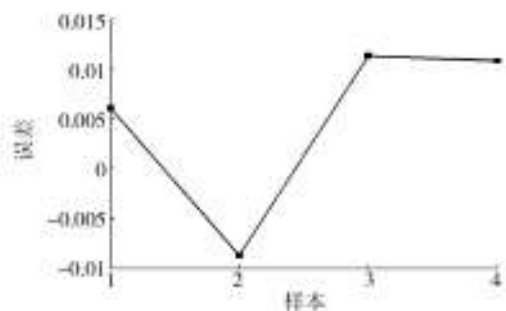


图11 预测值与实验值误差

Fig. 11 Error of forecast and experimental value

根据式(10)将预测的疲劳寿命累积衰减率转换

成当年的疲劳寿命预测值:

$$N = N_0 - \beta \times N_0 / (1 + \alpha) \quad (10)$$

式中: N_0 为无腐蚀的试验件疲劳寿命; β 为神经网络预测的疲劳寿命累计衰减率。预测结果见表4,由表4可以看出其相对误差最大不超过10%,在工程接受范围之内。利用非线性方法得到的结果要比线性方法计算结果更理想。

表4 神经网络预测与实验结果以及误差

Table 4 Results and error of neural network forecast and experiment

年限/a	4	6	8	10
实验寿命值/个周期	45 244	30 489	21 140	14 679
预测寿命值/个周期	44 480	31 588	19 715	13 314
相对当年的实验寿命误差	1.7%	3.6%	6.7%	9.3%
相对无腐蚀总寿命的误差	0.6%	0.9%	1.2%	1.1%

6 结论

1) 应用MIT方法对LY12CZ铝合金试件疲劳寿命产生影响的腐蚀损伤表征因子进行了筛选,得到了点蚀阶段对疲劳寿命衰减影响较大的腐蚀损伤表征因子为:最大腐蚀坑深度、最大腐蚀坑宽度、点蚀率、最大腐蚀坑体积、最大腐蚀面积。

2) 在寿命累积衰减模型中,应用MIT理论,把除了最大腐蚀深度、最大腐蚀宽度、点蚀率、平均腐蚀体积、最大腐蚀面积之外的腐蚀损伤表征因子对疲劳寿命的影响等效成最大腐蚀坑深度、最大腐蚀坑宽度、点蚀率、最大腐蚀坑体积、最大腐蚀面积的影响。

(下转第58页)

及临界裂纹长度都偏保守。

参考文献:

- [1] 张九渊. 孔蚀统计规律的对比研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1994, 8(2): 102—108.
- [2] 曹楚南. 腐蚀试验数据的统计分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.
- [3] 牟致忠. 腐蚀可靠性分析模型及应用[C]//中国航空协会, 中国航空可靠性工程学会论文集. 青岛, 1999.
- [4] 任和. 运7飞机腐蚀模型及可靠性分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1998, 10(4): 87—92.
- [5] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [6] 郝献超, 李晓刚, 董超芳. 不同暴露时间下不锈钢在典型地区大气腐蚀的灰色分析[J]. 北京科技大学学报, 2008: 30(5): 503—504.
- [7] 裴和中, 雍歧龙, 金蕾. 金属材料大气腐蚀与环境因素的灰色关联分析[J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(4): 53—54.
- [8] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2008: 50—96.
- [9] ZHU Zuo-tao, MU Zhi-tao, CHEN Ding-hai. Research on Evaluation of Corrosion Grade Based on Image Processing Technique[C]//2009 international Conference on Manufact-

- uring Science and Engineering. 2009: 178—184. (余不详)
- [10] MANNING S D, YANG J N. Guidelines for Analysis and Design of Durable Aircraft Structures[K]. 1984. (余不详)
- [11] MEDVED J J, BRETON M, IRVING P E. Corrosion Pit Size Distributions and Fatigue Lives—a Study of the EIFS Technique for Fatigue Design in the Presence of Corrosion [J]. International Journal of fatigue, 2004: (26): 71—80.
- [12] OSAMA M. Corrosion and Corrosion Fatigue of Aluminum Alloys[D]. Lehigh: Lehigh University, 2002.
- [13] DOLLEY E J, LEE B, WEI R P. The Effect of Pitting Corrosion on Fatigue Life[J]. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2000: (23)555—560
- [14] 朱青云, 李曙林, 薛军, 等. 某机中央翼下壁板疲劳寿命扩展寿命估算[J]. 机械强度. 2004, 26(3): 234—236
- [15] JAMES A. Comparison of contemporary FCG life prediction tools international of fatigue[J]. International Journal of Fatigue. 1999: 12(5)181—185
- [16] ITZHAK D, DINSTEIN I, ZILBERBERG T. Pitting Corrosion Evaluation by Computer Image Processing [J]. Corrosion Science, 1981, 21(1): 17—22.
- [17] WANHILL R J H, LUCEIA J J, RUSSLM T. The Fatigue in Aircraft Corrosion Testing Programme[R]. 1989, 2.

(上接第53页)

3) 将复杂的腐蚀系统进行简化, 定义了腐蚀疲劳寿命累积衰减函数与疲劳寿命衰减速率函数, 建立了寿命累积衰减模型, 在应力比、加载频率一定的情况下, 直接研究腐蚀对疲劳寿命的影响。

4) 用非线性神经网络与线性LMS的方法进行预测, 通过与实验结果对比, 误差满足工程上的要求, 非线性求解的结果更理想。

参考文献:

- [1] 穆志韬. 直升机结构疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社,

2003: 371—372.

- [2] ZHU Zuo-tao, MU Zhi-tao, CHEN Ding-hai. Research on Evaluation of Corrosion Grade Based on Image Processing Technique[C]//2009 International Conference on Manufacturing Science and Engineering. 2009: 178—184.
- [3] 史峰, 王小川. 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: 183—187.
- [4] 谢伟杰, 李获. LY12CZ和7075T7351铝合金在EXCO溶液中腐蚀动力学的统计研究[J]. 航空学报, 1999, 20(1): 34—38.
- [5] 张德丰. MATLAB神经网络应用与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 134—156.