

文章编号:1674-8190(2020)04-524-08

# 飞机舱门锁机构多失效模式可靠性分析方法

贾洁羽, 崔卫民, 张玉刚, 吴翰, 秦大顺

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 如何提高飞机舱门锁机构关闭系统的可靠性计算效率, 减少计算时间, 降低舱门故障率是亟待解决的问题。选取某型飞机舱门锁机构为研究对象, 通过 LMS 建立飞机舱门锁机构仿真模型, 研究锁机构关闭过程中最大液压力失效和关锁时间失效模式的影响因素, 考虑两种失效模式之间的相关性, 基于重要抽样法和 B-P 神经网络方法, 计算飞机舱门锁机构多失效模式下的可靠性; 将这两种方法仿真计算结果与传统蒙特卡罗方法计算结果进行对比, 结果表明: 以上两种计算飞机舱门锁机构可靠性的方法是合理的, 其误差范围均在 3% 以内, 且两种方法的计算效率相较于传统方法均有所提高; 其中, B-P 神经网络方法比重要抽样法计算精度和效率更高, 更适用于研究飞机舱门锁机构的可靠性问题。

**关键词:** 飞机舱门锁机构; 多失效模式; 机构可靠性; 重要抽样法; B-P 神经网络法

中图分类号: V215.7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Reliability Analysis Method of Aircraft Hatch Lock Mechanism with Multi-failure Modes

JIA Jieyu, CUI Weimin, ZHANG Yugang, WU Han, QIN Dashun

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** How to improve the reliability calculation efficiency of the aircraft cabin door lock mechanism closing system, reduce the calculation time and reduce the failure rate of the cabin door is an urgent problem to be solved. An aircraft hatch lock mechanism is chosen as an example, the simulation model of the mechanism is established through LMS, and the maximum hydraulic pressure failure and the time-failure modes are studied during the closing process of the lock mechanism. Considering the correlation between the two failure modes, based on the important sampling method and B-P neural network method, the reliability of the aircraft hatch lock mechanism with multiple failure modes is calculated. Comparing the simulation results of these two methods with the results of the traditional Monte Carlo method, it is concluded that the above two methods for calculating the reliability of the aircraft door lock mechanism are reasonable, and the error range is within 3%. The computational efficiency of the two methods is improved compared with the traditional methods. Among them, the B-P neural network method is more accurate and efficient than the important sampling method, and is more suitable for studying the reliability of the aircraft door lock mechanism.

**Key words:** lock mechanism of aircraft hatch door; multiple failure modes; mechanism reliability; important sampling method; B-P neural network method

收稿日期:2019-09-04; 修回日期:2019-10-12

基金项目:国家自然科学基金(51675428)

通信作者:贾洁羽, jiajieyu@mail.nwpu.edu.cn

引用格式:贾洁羽, 崔卫民, 张玉刚, 等. 飞机舱门锁机构多失效模式可靠性分析方法[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 524-531.

JIA Jieyu, CUI Weimin, ZHANG Yugang, et al. Reliability analysis method of aircraft hatch lock mechanism with multi-failure modes[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 524-531. (in Chinese)

## 0 引言

飞机舱门锁机构是飞机的重要组成部分之一。在飞机飞行过程中,若出现由于舱门锁机构前期可靠性分析不足而导致其非正常开启或关闭,无法按照预期完成开关锁功能,将严重影响飞行任务的进行。因此,关于飞机舱门锁机构的可靠性研究<sup>[1]</sup>具有重要意义。刘志群等<sup>[2]</sup>针对飞机舱门锁机构,考虑锁钩与锁环不同间隙的影响,采用蒙特卡罗法计算舱门锁机构的可靠性;郭媛媛等<sup>[3]</sup>、B. S. Mohamed el Amine 等<sup>[4]</sup>分别针对某型发动机涡轮盘榫齿裂纹和管道腐蚀问题,通过蒙特卡罗方法模拟计算其故障时间和失效率;Zhuang Xinchun 等<sup>[5]</sup>针对飞机锁机构的磨损问题,通过 Copula 函数构造概率密度函数来计算失效相关类可靠性问题;Sun Zhongchao 等<sup>[6]</sup>针对飞机齿轮门锁机构,提出了一种基于小样本多因素的可靠性测试方法。上述研究在计算机构可靠性时,难以同时保证计算精度和计算效率,尤其是传统的蒙特卡罗法存在计算时间过长、计算效率较低的问题。

在对飞机舱门锁机构进行可靠性分析时,由于其功能函数<sup>[7]</sup>为隐性且较为复杂,通过建模仿真求取可靠性需要大量的数据样本进行计算,如何提高工作效率、减少计算时间是必须要考虑的一个问题。此外,飞机舱门锁机构的关锁功能主要包括两种失效模式,且这两种失效模式之间具有共同的影响因素,即两种失效模式存在相关性<sup>[8]</sup>,如何有效地解决此类失效模式相关的可靠性问题<sup>[9]</sup>值得研究。

为了解决上述问题,提高飞机舱门锁机构可靠性计算的效率,本文分别采用重要抽样法和 B-P 神经网络法对飞机舱门锁机构的可靠性进行分析。基本过程为:首先在仿真软件 LMS Virtual Lab 中建立飞机舱门锁机构动力学仿真模型并施加环境载荷,研究锁机构关锁过程,分析其失效模式及影响因素,按照影响因素选取随机变量并赋值,依据许用应力建立失效判据;其次,基于重要抽样法和 B-P 神经网络方法计算舱门锁机构多失效模式下的可靠性,通过 MATLAB 软件控制随机变量的值以模拟不同条件,再调用 LMS Virtual Lab 获得相应的仿真结果;最后,将这两种方法的计算结果与传统蒙特卡罗方法进行对比,来探究这两种方法的

适用性和优劣性。

## 1 锁机构模型及故障原因分析

LMS Virtual Lab 是一款强大的参数化三维建模软件,其运动学和动力学分析模块可用于模拟各种机械系统的实际运动和载荷,并能快速地分析机械系统的运动规律。因此,本文在 LMS Virtual Lab 中建立飞机舱门锁机构的动力学仿真模型,并按照锁机构实际工作环境分别设定载荷、接触、运动等影响因素,通过动力学分析获得相应的仿真结果。

### 1.1 仿真模型建立

假设锁内活塞部分连为一体,不考虑活塞内部弹簧。简化处理之后,锁机构由作动筒、活塞、锁钩以及三个连杆构成,如图 1 所示。作动筒带动各个构件按照既定规律运动,完成锁机构功能。锁机构有两个基本功能:一是关锁功能,二是开锁功能,本文着重研究其关锁功能。

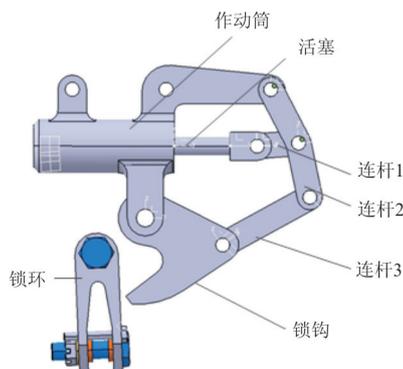


图1 飞机舱门锁机构模型

Fig. 1 Lock mechanism model of aircraft hatch door

### 1.2 关锁过程分析

为了计算舱门锁机构关锁功能的可靠性,必须通过研究关锁过程来确定其失效模式。通过分析,将关锁过程分为三个阶段:第一阶段是在液压力的驱动下,锁钩从初始位置运动到接触锁环;第二阶段是锁钩从开始接触锁环继续旋转运动到上锁位置,并在惯性作用下转到最大角度位置;第三阶段是锁钩在重力作用下,从最大旋转角度回复到锁死位置。锁机构的关闭功能失效,一方面指锁机构在整个工作周期中都不曾关闭;另一方面指锁机构虽

然能关闭,但需要的时间较长,不能在规定的时间内关闭。因此,只要在规定时间内液压提供的驱动力能大于各种阻力之和,锁机构就能关闭,反之则关锁失效。

### 1.3 失效判据

结合舱门锁机构的组成和关锁过程的工作原理,分析得到锁机构关锁失败的故障原因,将故障原因按照失效模式的不同分为两类:最大液压力失效和关锁时间失效。从而得到锁机构关闭功能失效的两个判据:①锁机构关闭所需的液压力不能超过许用液压力;②锁机构关闭时间不能超过规定的锁机构关闭时间上限。本文中,锁机构许用液压力为 2 100 N,关闭时间上限为 0.38 s。

### 1.4 失效影响因素

#### 1.4.1 影响因素分析

通过对锁机构关闭过程的运动分析,可以得到其关闭功能失效受多方面因素影响。第一种失效模式——最大液压力失效,主要受液压的变换率、液压油阻尼系数和锁钩处最大接触力的影响。第二种失效模式——关锁时间失效,主要受液压的变换率、液压油阻尼系数、关节处摩擦力、锁钩与锁环发生接触的角度影响。可见,液压的变换率和液压油阻尼系数这两个因素同时影响最大液压力失效和关锁时间失效,因此,两种失效模式之间具有不可忽略的相关性,后文的方法及具体应用中将对这一问题进行研究。

将两种失效模式的影响因素合并整理,共有五个影响因素对锁机构能否正常关闭起着决定性的作用:液压的变换率、液压油阻尼系数、锁钩处最大接触力、关节处摩擦力以及锁钩与锁环发生接触的角度。因此,通过控制这五个因素的数值,可以模拟不同的锁机构关锁过程的实验环境,利用 LMS Virtual Lab 进行动力学分析获得对应的实验结果:关锁成功或者失败。最后通过不同的方法统计其失效次数,计算锁机构关锁过程的可靠性。

#### 1.4.2 影响因素取值

依据实验环境条件查阅资料<sup>[10]</sup>,对影响锁机构关闭功能失效的上述五个因素,即五个随机变量进行赋值,具体分布类型以及相关参数如表 1 所示。

表 1 锁机构的随机变量分布类型及参数取值  
Table 1 Random variable distribution type and parameter value of lock mechanism

变量	含义	分布	均值	标准差
$X_1/(\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$	液压的变换率	正态	10	0.67
$X_2$	液压油阻尼系数	正态	1 000	67
$X_3/\text{N}$	锁钩处最大接触力	正态	5 000	30
$X_4$	关节处摩擦系数	正态	0.15	0.01
$X_5/(\text{°})$	锁钩与舱门发生接触的角度	正态	45	1.5

## 2 锁机构多失效模式可靠性分析方法介绍

### 2.1 重要抽样法

重要抽样法<sup>[11]</sup>的核心思想是,通过改变随机抽样的中心,使样本点有较多机会落入失效域,增加使功能函数  $Z < 0$  的机会。一般选取由一次二阶矩方法<sup>[12]</sup>计算的设计点作为重要抽样法的抽样中心。

本文与文献<sup>[11]</sup>中研究对象的不同点在于锁机构具有多个相关的失效模式,考虑其相关性影响,当采用重要抽样法计算多失效模式结构体系时,由于具有多个功能函数,导致重要抽样区域存在多个。

以具有两个失效模式的串联系统为例,假设其具有两个基本随机变量  $X_1$  和  $X_2$ ,将  $X_1$ 、 $X_2$  作为影响因素,功能函数分别为  $Z_1$  和  $Z_2$ , $Z_1 = 0$  和  $Z_2 = 0$  分别为两种失效模式的失效边界<sup>[13]</sup>。则该串联系统对应的二维空间失效域如图 2 所示。

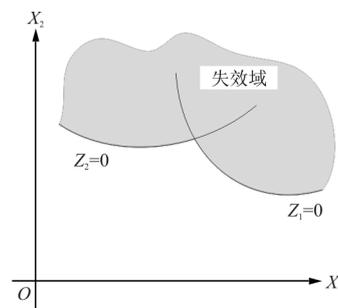


图 2 串联结构体系的失效域

Fig. 2 Failure domain of tandem structure

从图 2 可以看出:两种失效模式的两个功能函数对应两个设计点及重要抽样区域,即抽样中心有

两个。考虑到各失效模式对系统失效情况的影响占比不同,抽样时也应按其比例进行抽样次数的分配<sup>[14]</sup>。

假设一个串联系统有  $m$  个失效模式,  $n$  个随机变量  $\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ , 随机变量  $\mathbf{X}$  的概率密度函数为  $f_X(x)$ ; 第  $i$  个失效模式的功能函数为  $Z_i = g_{x_i}(\mathbf{X})$ , 对应的失效概率和可靠性指标<sup>[15]</sup> 分别为  $p_{f_i}$  和  $\beta_i$ 。该失效模式以其设计点  $v_i^*$  为抽样中心的抽样次数应为

$$N_i = \left\lceil \frac{p_{f_i} N}{\sum_{i=1}^m p_{f_i}} \right\rceil = \left\lceil \frac{\Phi(-\beta_i) N}{\sum_{i=1}^m \Phi(-\beta_i)} \right\rceil \quad (1)$$

式中:  $\lceil * \rceil$  为向上取整函数;  $N$  为抽样总次数。

设第  $i$  个失效模式的抽样中心  $v_i^*$  对应的概率密度函数为  $p_{V_i}(v)$ , 则重要抽样概率密度函数为  $p_V(v)$  为

$$p_V(v) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_{V_i}(v) \quad (2)$$

系统失效概率的表达式为

$$p_f = \sum_{i=1}^m \int_{R^n} \frac{I[g_X(v)] f_X(v)}{\sum_{k=1}^m p_{V_k}(v)} p_{V_i}(v) dv \quad (3)$$

式中:  $I[*]$  为示性函数,  $g_X(v) < 0$  时,  $I[g_X(v)] = 1$ , 反之为 0;  $R^n$  为积分域。

以概率密度函数  $p_{V_i}(v)$  抽样  $N_i$  次, 其中, 第  $j$  个样本为  $\mathbf{v}_j^{(i)} = (v_{j1}^{(i)}, v_{j2}^{(i)}, \dots, v_{jn}^{(i)})^T$ , 则系统失效概

率  $p_f$  的无偏估计值<sup>[16]</sup> 为

$$\hat{p}_f = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{I[g_X(\mathbf{v}_j^{(i)})] f_X(\mathbf{v}_j^{(i)})}{\sum_{k=1}^m p_{V_k}(\mathbf{v}_j^{(i)})} \quad (4)$$

### 2.2 B-P 神经网络法

对于本文中飞机舱门锁机构这类功能函数未知且较为复杂的情况, B-P 神经网络<sup>[17]</sup> 的核心思想在于通过神经网络学习模拟出一个较为简单的近似表达式来替代功能函数。在功能函数显性且较为简单的情况下, 再用蒙特卡罗法计算飞机舱门锁机构开锁功能的可靠性就简单有效多了。其中, 近似替代过程也解决了本文中两种失效模式互为相关的影响, 省去了这方面的计算, 降低了工作难度。

假设一个典型的  $M$  层 B-P 神经网络, 第 0 层和第  $M$  层分别为输入层和输出层, 1 层 ~ ( $M-1$ ) 层为隐层, 每层单元数量为  $n_i (i=1, 2, \dots, M)$ 。初始输入向量  $\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ , 连接权向量  $\mathbf{W}=(W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ , 则第一层获得的向量  $\mathbf{Z}_1 = \mathbf{W}_1^T \mathbf{X}$ ; 第  $i$  层的第  $j$  个神经元的传递函数为  $f_j^i(*)$ ,  $M$  层输出向量  $\mathbf{Y}_1 = (Y_1^1, Y_2^1, \dots, Y_n^1)^T$ , 其中,  $Y_j^i = f_j^i(Z_j^i)$ ,  $j=1, 2, \dots, n_i; i=1, 2, \dots, M$ 。B-P 神经网络结构图<sup>[18]</sup> 如图 3 所示。

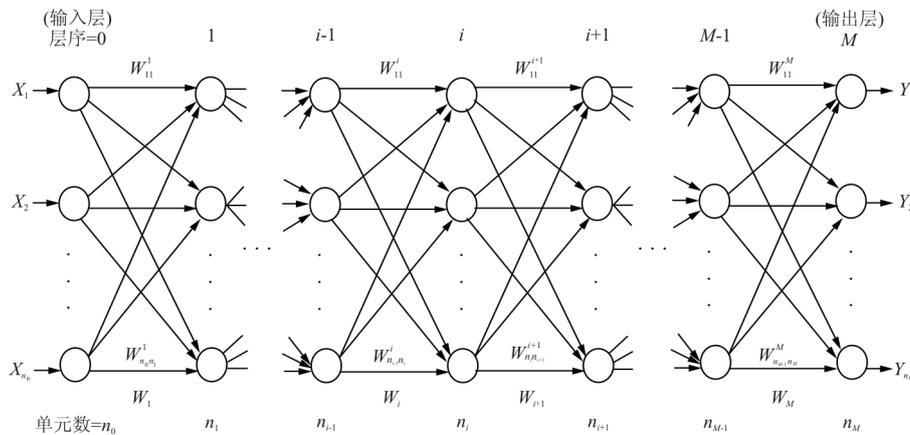


图 3 B-P 神经网络结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of B-P neural network structure

神经网络训练完毕, 用软件 MATLAB 对随机向量  $\mathbf{X}$  进行随机抽样, 将抽取的随机样本值  $x$  代

入神经网络模拟的锁机构功能函数  $g(\mathbf{X})$ , 若  $g(\mathbf{X}) < 0$ , 则代表结构失效一次, 反之正常。若模

拟的总次数为  $N$ , 功能函数  $g(\mathbf{X}) < 0$  的次数为  $N_f$ , 则结构体系失效概率  $P_f$  的估计值  $\hat{p}_f$  为

$$\hat{p}_f = \frac{N_f}{N} \quad (5)$$

基于 B-P 神经网络的蒙特卡罗法应用步骤为:

(1) 通过数值模拟确定用于网络学习的  $L$  个样本  $\{\mathbf{X}^{(r)}, g(\mathbf{X}^{(r)})\} (r=1, 2, \dots, L)$ ;

(2) 设计  $M$  层 B-P 神经网络结构, 选取传递函数  $f_j^i(\ast)$ ,  $j=1, 2, \dots, n_i$ ;  $i=1, 2, \dots, M$ , 以及初始权矩阵  $\mathbf{W}_i^{(0)}$  ( $i=1, 2, \dots, M$ );

(3) 利用  $L$  个训练样本训练神经网络;

(4) 随机抽取样本  $\mathbf{X}^{(k)}$  ( $k=1, 2, \dots, N; N > L$ );

(5) 利用步骤(3)得到的神经网络模拟计算  $g(\mathbf{X}^{(k)})$  ( $k=1, 2, \dots, N$ );

(6) 统计  $g(\mathbf{X}^{(k)}) < 0$  的次数, 利用式(4)估算系统失效概率。

### 3 飞机舱门锁机构可靠性计算与分析

#### 3.1 传统蒙特卡罗法的应用

采用传统蒙特卡罗法<sup>[19]</sup>计算飞机舱门锁机构关闭功能的多失效模式可靠性, 对变量随机抽样 10 000 次, 调用软件 LMS 仿真计算, 每次用时 5 s, 总共用时约 13.9 h, 最后得到锁机构失效的概率为

$$p_{f1} = 0.007 0$$

#### 3.2 重要抽样法的应用

(1) 通过一次二阶矩法求得设计点如表 2 所示。

表 2 失效模式设计点计算结果

Table 2 Calculation results of failure mode design points

基本变量	最大液压力失效	关锁时间失效
液压的变换率/(MPa · s <sup>-1</sup> )	10 139 885.0	9 076 283.8
阻尼系数	1 014.060 3	1 000.0
锁钩处最大接触力/N	5 008.501 4	5 000.0
关节处摩擦系数/10 <sup>-3</sup>	154.402 96	150.0
接触角度/(°)	73.529 086	75.832 719

(2) 根据式(1)计算出最大液压力失效模式和关锁时间失效模式按比例分别需要抽取样本数 526 次和 1 000 次, 仿真总次数为 1 526 次。每次仿真计算时间约为 5 s, 总计算时间约为 2.1 h。

(3) 以两个失效模式各自的设计点为重要抽样中心, 利用软件 MATLAB, 按照分布类型对随机变量进行随机抽样; 调用 LMS Virtual Lab 中的仿真模型获取不同随机变量值模拟下的响应值, 得到的响应值分布如图 4~图 5 所示。

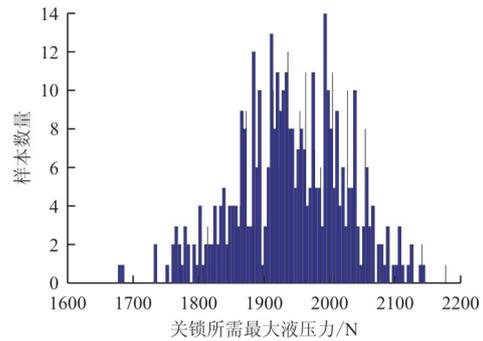


图 4 最大液压力失效重要抽样结果

Fig. 4 Important sampling result of maximum hydraulic pressure failure

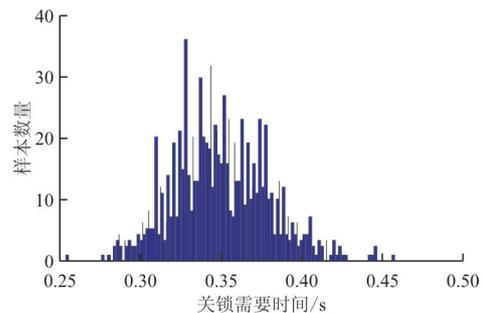


图 5 关锁时间失效重要抽样结果

Fig. 5 Important sampling result of lock time expired

从图 4~图 5 可以看出: 由于是在设计点附近抽样, 抽取的样本点落入失效域的约占一半, 保证了抽样的有效性; 所需最大液压力最少仅需 1 679.634 N, 最大需要 2 180.1 N, 有 80% 的样本量集中分布在 1 850~2 050 N 之间; 所需关锁时间最快仅需 0.254 s, 最慢需要 0.458 s, 有 80% 的样本量集中分布在 0.32~0.38 s 之间。

(4) 根据式(3), 通过 MATLAB 编程计算多失效模式失效概率, 结果为

$$p_{f2} = 0.0068$$

### 3.3 B-P 神经网络方法的应用

(1) 对五个输入变量在  $\pm 6\sigma$  范围内均匀抽取 375 个样本点。调用 LMS Virtual Lab 进行可靠性仿真计算获得相应响应值。每次仿真计算时间约为 5 s, 总计算时间约为 0.52 h。

(2) 经过预先模拟计算, 当设定隐层单元数为 8, 传递函数设为 sigmoid 函数<sup>[20]</sup>, 初始权矩阵为系统生成的随机小量, 其余设置均为软件 MATLAB 中系统默认值, B-P 神经网络训练情况最好, 设计参数如图 6 所示。

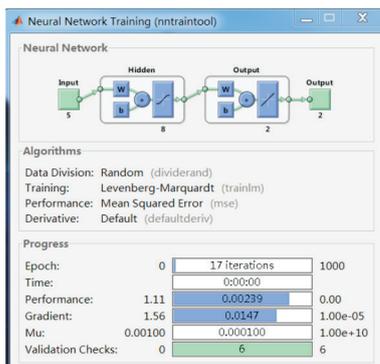


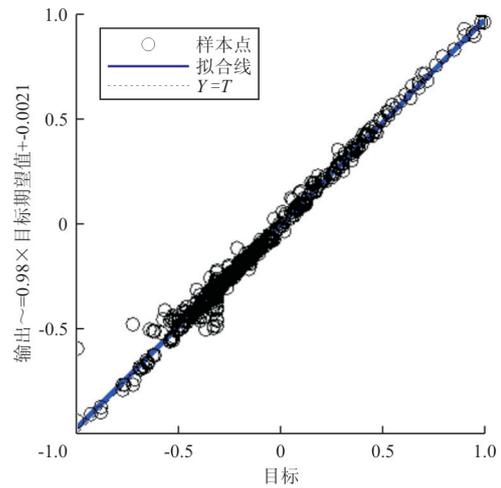
图 6 B-P 神经网络参数设置

Fig. 6 B-P neural network parameter setting

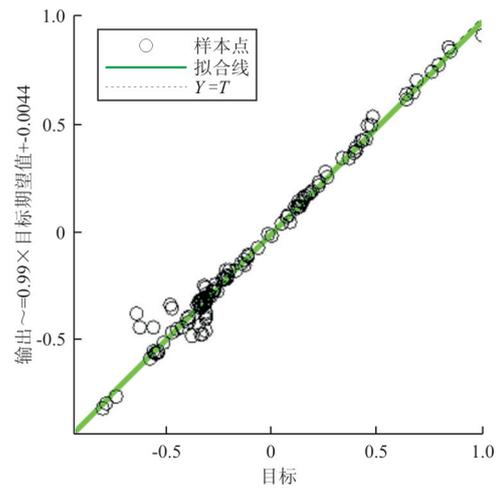
从图 6 可以看出: 样本进行训练后, 系统总共迭代训练 17 次, 训练时间低于 1 s, 网络输出误差为 0.002 39, 迭代梯度为 0.014 7。

(3) 为了防止神经网络对训练数据过拟合<sup>[21]</sup>, 而偏离其他未参加训练的数据, MATLAB 系统自动将输入样本分为三份: training(训练)、validation(检验)和 test(测试)。只有 training 数据参加训练, 其余两部分数据只用于检验。训练和检验结果的网络输出与目标值的回归图如图 7 所示。

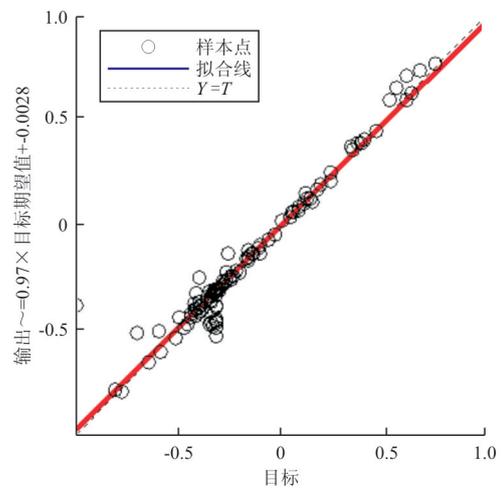
R 值表示网络输出与目标期望值的相关程度,  $R=1$  表示完全相关, 即拟合情况最好。从图 7 可以看出: 神经网络总体拟合程度为 0.989 39, 表明 B-P 神经网络学习情况良好, 足以模拟锁机构功能函数。



(a) 训练:  $R=0.99284$



(b) 检验:  $R=0.99130$



(c) 测试:  $R=0.97042$

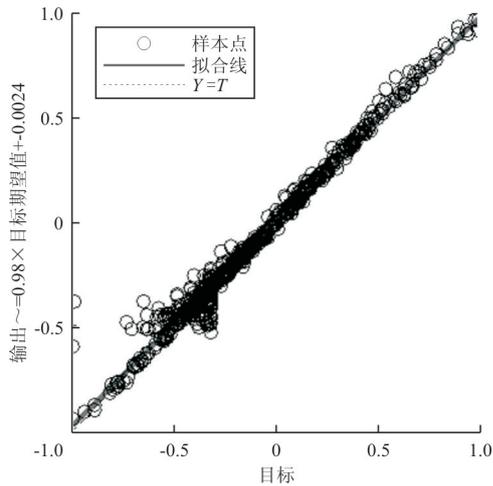
(d) 总计:  $R=0.98939$ 

图 7 B-P 神经网络样本训练结果

Fig. 7 B-P neural network sample training results

(4) 在 B-P 神经网络训练完毕后,抽取  $10^6$  个样本点计算联合失效概率,结果为

$$p_{f3} = 0.0069$$

(5) 由于神经网络的计算结果具有一定的随机性,采取计算五次求取平均值的方法来减小误差。五次计算结果如表 3 所示,可以看出:其保留四位小数后的均值为 0.0069。

表 3 五次计算结果

Table 3 Five times calculation results

序号	失效概率	序号	失效概率
1	0.0069	4	0.0067
2	0.0071	5	0.0069
3	0.0070		

### 3.4 结果对比与分析

以传统蒙特卡罗法计算结果为参照,对比三种方法计算的飞机舱门锁机构多失效模式失效概率和计算效率,结果如表 4 所示。

表 4 三种方法计算结果对比

Table 4 Comparison of calculation results

计算方法	失效概率	计算次数	计算时间/h	误差/%
蒙特卡罗法	0.0070	100 000	13.90	—
重要抽样法	0.0068	1 526	2.10	2.8
B-P 神经网络法	0.0069	375	0.52	1.4

从表 4 可以看出:计算飞机舱门锁机构多失效模式的可靠性,相比传统蒙特卡罗法,重要抽样法

的计算误差为 2.8%,B-P 神经网络法的计算误差仅为 1.4%,误差均不超过 3%,表明两种方法都是合理的;本文蒙特卡罗法仿真 10 000 次,计算时间为 13.9 h;重要抽样法需要仿真 1 526 次,用时 2.1 h;B-P 神经网络法仅需仿真 375 次,用时 0.52 h。可见本文采用重要抽样法和 B-P 神经网络法在计算飞机舱门锁机构可靠性问题上比蒙特卡罗法计算效率高,且 B-P 神经网络法的计算精度和效率相较重要抽样法更高。

## 4 结论

(1) 重要抽样法和 B-P 神经网络法均可合理地应用于飞机舱门锁机构多失效模式可靠性的分析。

(2) 针对相同的飞机舱门锁机构可靠性分析,重要抽样法的抽样次数为 1 526 次,计算时间为 2.1 h;B-P 神经网络法的抽样次数为 375 次,计算时间为 0.52 h。两种方法相较于传统蒙特卡罗法计算效率均有所提高,且 B-P 神经网络法的计算效率更高,其在未来更适用于锁机构可靠性问题的分析。

(3) 关于飞机舱门锁机构可靠性的研究,后续可以基于深度神经网络法,采用少量的实验数据作为样本集,建立更为精确的飞机舱门锁机构可靠性模型,以方便飞机舱门锁机构的设计与分析。

## 参考文献

- [1] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. Condition assessment for the performance degradation of bearing based on a combinatorial feature extraction method[J]. Digital Signal Processing, 2014, 27: 159-166.
- [2] 刘志群,周红,刘伟,等.某型飞机舱门锁机构卡滞可靠性分析[J].机械设计,2012,29(12):39-42.  
LIU Zhiqun, ZHOU Hong, LIU Wei, et al. Seizure reliability analysis of lock machine for aircraft hatch door[J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(12): 39-42. (in Chinese)
- [3] 郭媛媛,孙有朝,李龙彪.基于蒙特卡罗方法的民用飞机故障风险评估方法[J].航空学报,2017,38(10):155-163.  
GUO Yuanyuan, SUN Youchao, LI Longbiao. Failure risk assessment method of civil aircraft based on Monte Carlo method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(10): 155-163. (in Chinese)
- [4] MOHAMED el AMINE B S, MOURAD B, CORREIA J, et al. Structural reliability of corroded pipeline using the so-called Separable Monte Carlo method[J]. The Journal of Strain

- Ana-lysis for Engineering Design, 2018, 53(8): 730-737.
- [5] ZHUANG Xinchun, YU Tianxiang, SHEN Linjie, et al. Time-varying dependence research on wear of revolute joints and reliability evaluation of a lock mechanism[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 96: 543-561.
- [6] SUN Zhongchao, YU Tianxiang, CUI Weimin, et al. Research on reliability test and assess method for gear door lock considering multi factors[C]// International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. Chengdu, China: IEEE, 2013: 817-820.
- [7] 边晓亚, 陈旭勇, 陈谦, 等. 非概率响应面界限法在桥梁可靠性评估中的应用[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(4): 107-111.
- BIAN Xiaoya, CHEN Xuyong, CHEN Qian, et al. Application of non-probabilistic response surface limit method in bridge reliability evaluation[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(4): 107-111. (in Chinese)
- [8] 李猛, 王剑, 智鹏鹏. 考虑应力-强度相关性的转向架构架可靠性分析[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(6): 9-14.
- LI Meng, WANG Jian, ZHI Pengpeng. Reliability analysis on the bogie frame with the stress-trength correlation[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2019, 48(6): 9-14. (in Chinese)
- [9] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. An adaptive method for health trend prediction of rotating bearings [J]. Digital Signal Processing, 2014, 35: 117-123.
- [10] FERREIRA R O, GALVANI G B, TERTULIANO I S, et al. Characterization and evolution of the coefficient of friction during pin on disc tribotest: comparison between C10200 Cu, AA6082-T6 Al and C36000 brass pins under varying normal loads[J]. Tribology International, 2019, 138: 403-414.
- [11] 邓诗圆, 辛健强, 张琨, 等. 基于重要抽样法的热防护系统热可靠性评估方法[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(2): 63-71.
- DENG Shiyuan, XIN Jianqiang, ZHANG Kun, et al. Assessment of thermal reliability of thermal protection systems by importance sampling method [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(2): 63-71. (in Chinese)
- [12] 杨晨, 钟武焯. 运用一次二阶矩法计算焊接结构可靠性[J]. 科技创新导报, 2016, 13(2): 48-49.
- YANG Chen, ZHONG Wuyue. Reliability of welded structure calculated by using FOSM[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(2): 48-49. (in Chinese)
- [13] GONZÁLEZ-ESTRADA O A, LEÓN J S, PERTUZ A. Influence of the boundary condition on the first ply failure and stress distribution on a multilayer composite pipe by the finite element method[J]. Journal of Physics A: Conference Series, 2019(1): 12-13.
- [14] CAI Jilin, XU Qingshan, CAO Minjian, et al. A novel importance sampling method of power system reliability assessment considering multi-state units and correlation between wind speed and load[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 109(9): 217-226.
- [15] ZHANG Zhenhao, ZHOU Mingliao, HU Chaoxiong, et al. Research on reasonable value of target reliability index for steel main girder of cable-stayed bridge considering durability[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(10): 1382-1391.
- [16] JIA Xiang, XI Guoguo, SARALEES N. Correction factor for unbiased estimation of weibull modulus by the linear least squares method [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2019, 50(6): 1-11.
- [17] 陈松坤, 王德禹. 基于神经网络的蒙特卡罗可靠性分析方法[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(6): 687-692.
- CHEN Songkun, WANG Deyu. An improved Monte Carlo reliability analysis method based on neural network [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(6): 687-692. (in Chinese)
- [18] HONG Sheng, ZHU Juxing, LIDIA A B, et al. Cascading failure and recovery of spatially interdependent networks [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2017(10): 103-208.
- [19] 张晓, 晏庆, 崔浩贵, 等. 基于蒙特卡罗法的水下恒流远供系统可靠性分析[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2018(5): 32-38.
- ZHANG Xiao, YAN Qing, CUI Haogui, et al. Reliability analysis of the underwater constant current remote power supply system based on Monte-Carlo method[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2018(5): 32-38. (in Chinese)
- [20] 张晓文, 杨煜普, 许晓鸣. 神经网络传递函数的功能分析与仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005(10): 183-185.
- ZHANG Xiaowen, YANG Yupu, XU Xiaoming. Genetic optimization for neural network evolving with function based coding [J]. Computer Simulation, 2005(10): 183-185. (in Chinese)
- [21] 卢鑫. 基于模糊神经网络的防空导弹武器系统可靠性评估[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(3): 122-125.
- LU Xin. Evaluation of reliability of air defense missile system based on fuzzy neural network[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(3): 122-125. (in Chinese)

### 作者简介:

贾洁羽(1996—),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行器总体设计,机械可靠性,机器学习。

崔卫民(1969—),男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器结构/机构可靠性分析、设计与试验技术。

张玉刚(1980—),男,博士,副教授。主要研究方向:人机与环境工程、机械可靠性。

吴翰(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器总体设计,多体动力学建模与控制,机器学习。

秦大顺(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:可靠性实验方案设计,实验装置设计,可靠性大数据分析。

(编辑:马文静)