

# GA-WNN在飞机引气系统故障预测的研究

宋 剑,雷景波,刘宇辉

(中国南方航空股份有限公司机务工程部,广东 广州 510470)

**摘要:**飞机的引气系统的正常运行对飞机的安全起着至关重要的作用,而引气系统的关键参数变化表现为非线性特性,提高了引气系统故障预测的难度。首先建立故障监控模型,然后根据故障预测的非线性特性,提出一种基于遗传算法的小波神经网络故障预测模型。模型结合遗传算法全局优化搜索能力和小波神经网络良好局部特性,避免BP神经网络缺陷。最后通过MATLAB仿真,验证故障预测模型的准确性。上述模型对飞机引气系统故障预测提高预测精度具有重要意义。

**关键词:**引气系统;遗传算法;小波神经网络;故障预测

**中图分类号:**TP183 **文献标识码:**B

## Research of Wavelet Neural Network Based on Genetic Algorithm in Aircraft Bleed System Fault Prediction

SONG Jian, LEI Jing-bo, LIU Yu-hui

(Maintenance and Engineering Division, China Southern Airlines, Guangzhou Guangdong 510470, China)

**ABSTRACT:** The normal operation of aircraft bleed system plays an important role in the safety of the aircraft. And the key parameters of bleed system are nonlinear characteristics. Firstly, this paper built a fault monitoring model, and then built the fault prediction model of wavelet neural network (WNN) based on Genetic Algorithm (GA) for the nonlinear characteristics of the bleed system fault prediction. The model combines the global optimization searching performance of GA and the partial character of WNN to avoid the defects of BP WNN. Finally a simulation model was set up to verify the accuracy of fault prediction model with MATLAB. The model is vital significance for improving the accuracy for the bleed system fault prediction of civil aviation aircraft.

**KEYWORDS:** Bleed system; GA; WNN; Fault prediction

### 1 引言

引气系统为民航飞机各用户系统提供压缩空气,包括发动机起动系统,空调和增压系统等。由于飞机发动机引气系统的故障的发生率高、重复率高、排故难度大时间长,经常影响飞机的航班正常运行。如果出现双发引气系统的故障,则会影响到航空安全。从而导致飞机返航事件的发生。因此引气系统的正常运行对飞机的安全起着至关重要的作用。

本文对目前民航客机主力机型 B737NG 的引气系统进行研究,根据波音发布的 SL-737-36-024<sup>[1]</sup>,使用飞机状态管理系统(ACMS)来监控引气系统。通过客户化 ACMS 软件,监控左右引气系统的管道压力和温度。设定预警阈值,当超限时,通过飞机通信报文寻址系统 ACARS 下发报文至

地面来实现监控。可是一旦收到报文警告就立马安排飞机停场排故,则会导致过度维修,不利于提高飞机的日利用率 and 造成维修资源和航材的浪费。因引气系统的管道压力和温度变化是非线性。本文首先建立故障监控模型,然后针对引气系统参数的非线性特性,提出了一种基于遗传算法的小波神经网络故障预测模型。该模型结合遗传算法全局优化搜索能力和小波神经网络良好局部特性,避免BP神经网络缺陷。

### 2 引气系统简介

#### 2.1 引气系统工作原理

B737NG 飞机引气来自发动机第5级和第9级高压压气机,当发动机低转速时,使用第9级引气,由高压级调节器和高压级活门控制引气压力。发动机高转速时,气源系统使用第5级引气,高压级活门关闭,第5级单向活门打开,向压力调节和关断活门(PRSOV)提供引气。此时由引气调节器

(BAR) 和 PRSOV 控制引气压力。在正常巡航阶段时使用第 5 级引气, 引气压力调节为  $42 \pm 8 \text{ psi}$ 。

PRSOV 和预冷器控制活门 (PCCV) 一起控制引气温度, 当引气温度达到  $390^\circ\text{F}$  时, 从而导致 PCCV 打开。如引气温度达到  $450^\circ\text{F}$  时, 则  $450^\circ\text{F}$  传感器将打开, 使 PRSOV 移向关闭位置, 从而减少 PRSOV 的控制空气, 如果温度持续上升至  $490^\circ\text{F}$ , 此时  $490^\circ\text{F}$  过温开关将关闭 PRSOV。而且驾驶舱会出现引气跳开关灯亮起。引气系统工作原理图如图 1。

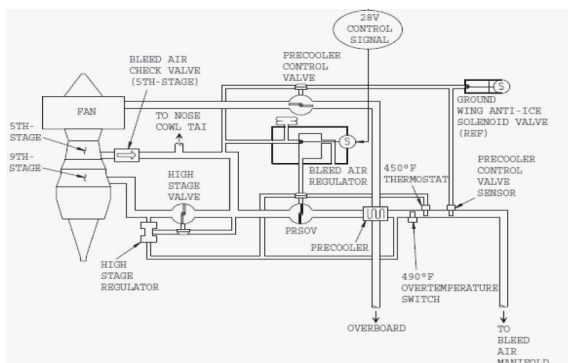


图 1 引气系统工作原理图

## 2.2 常见系统故障及其分析

### 1) 空中无引气压力, 引气跳开关灯亮

这种现象由于温度过热或者超压引起的。首先要判断引气是由第 9 级还是第 5 级引气提供空气。然后判断其相关部件, 这是引气排故的基本思路。

### 2) 引气压力低

对于引气压力低, 首先判断是不是指示故障, 然后判断系统故障, 判断系统部件故障时, 同样需要先确实引气是处于第几级引气。然后检查相关部件。

## 2.3 排故方案与维修方案

引气系统排故, 通常在地面使用气源系统功能测试来进行排故。但是这种方案是事后维修排故, 不能起到预防维修的作用。因此航空公司修改维修方案, 增加引气系统的健康检查项目。这种方案效果也不是很好, 不仅浪费大量维修资源, 而且不能有效地起到预防维修的作用。

## 3 ACMS 监控软件

### 3.1 ACMS 监控逻辑

由于维修方案增加引气系统的健康检查项目不能很好地起到预防维修的作用, 波音发布了 SL-737-36-024, 推荐航空公司采用 ACMS 软件来监控引气系统, 通过监控引气系统的压力和温度, 设置预警阈值, 当超过限制时, 采集更多地参数, 并触发 ACARS 报文下传至地面。

#### 3.1.1 压力监控

引气系统的压力调节是通过机械的操作实现的。当发动机 N1 增加, 第 9 级和第 5 级的核心压力都会增加。当第 9

级压力随 N1 增加, 高压级活门和高压级调节器调节第 9 级引气的压力, 控制在  $32 \pm 6 \text{ psi}$  范围内。当不调节的第 5 级压力超过调节的第 9 级压力时, 高压级活门将关闭。随着压力继续增加。引气调节器 (BAR) 和 PRSOV 控制引气压力。引气压力调节为  $42 \pm 8 \text{ psi}$ 。

SL-737-36-024 提供两种方法监控引气压力, 第一种方法监控不够精确。推荐采用第二种方法。方法二压力监控只监控第 9 级和第 5 级调节的压力状态。图 2 压力与引擎 N1 通用图展示调节压力监控区域。监控区域由压力转换点 P9(32), P5(25), P5(32), P5(42), 边界 M 组成。当 N1 增加, 发动机使用第 9 级调节引气时, 监控区域为 P9(32) + M 至 P5(32) - M。N1 持续上升, 发动机使用第 5 级调节引气时, 监控区域为 P5(42) + M。当 N1 下降, 发动机使用第 9 级引气时, 监控区域为 P5(25) - M 至 P9(32) + M。

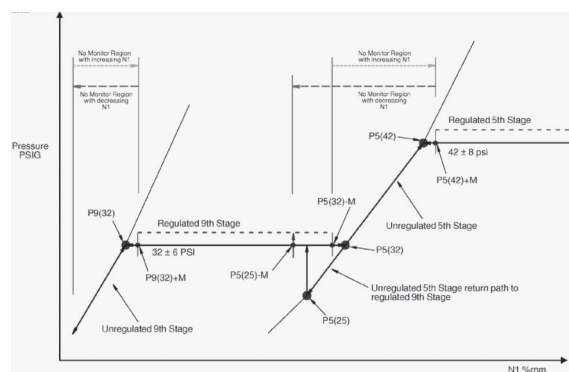


图 2 通用管道压力 VS N1 图

转换点 P9(32), P5(25), P5(32), P5(42) 是通过高度 (A)、马赫 (B)、静温 (C)、N1 (D)、N2 (E) 经过公式计算得出。边界 M 取经验值 3。每个点通用公式、指定公式及系数 a - f 详见 SL-737-36-024, 具体步骤如下:

#### 1) 计算第 9 级压力公式 P9G

$$P9G = \exp(a * (A + 2000)^{1.091} + b * B^{2.05} + c * (C + 273.15)^{0.59} + d * (D)^{0.128} + e * (E)^{2.5} + f) \quad (1)$$

#### 2) 计算第 5 级压力公式 P5G

$$P5G = \exp(a * (A + 2000)^{1.094} + b * (B)^{2.029} + c * (C + 273.15)^{0.565} + d * (D)^{0.225} + e * (E)^{0.27} + f) \quad (2)$$

#### 3) 计算 P9(32) 点 N1 值 N1(32)9

如果  $\text{abs}(P9G - 32) > 10$ , 使用通用公式, 否则使用指定公式。

#### 4) 计算 P5(25) 点 N1 值 N1(25)5

如果  $\text{abs}(P5G - 25) > 10$ , 使用通用公式, 否则使用指定公式。

#### 5) 计算 P5(32) 点 N1 值 N1(32)5

如果  $\text{abs}(P5G - 32) > 10$ , 使用通用公式, 否则使用指定公式。

6) 计算 P5(42) 点 N1 值 N1(42)5

如果  $\text{abs}(P5G - 42) > 10$ , 使用通用公式, 否则使用指定公式。

7) 比较实际 N1 与 N1(32)9, N1(25)5, N1(32)5, N1(42)5, 确定 N1 区间。

如果  $N1 > N1(42)5 + M$ , 飞机处于第 5 级 42PSI 压力监控区域。监控管道压力持续 60 秒少于 28PSI, 等级高; 监控管道压力持续 60 秒少于 34PSI 或者大于 50PSI, 等级中。

如果 N1 上升时,  $N1(32)9 + M < N1 < N1(32)5 - M$ , 或者 N1 下降时,  $N1(32)9 + M < N1 < N1(25)5 - M$ 。飞机处于第 9 级 32PSI 压力监控区域, 监控管道压力持续 60 秒少于 22PSI; 监控管道压力持续 60 秒少于 26PSI 或者大于 38PSI, 等级中。

### 3.1.2 温度监控

预冷器出口温度(PCOT)监控发生在整个航段, 如果管道温度持续 60 秒超过 465°F 触发逻辑, 并收集当前的高度、压力、温度、N1 时, 以便维护排查。温度监控在以下条件下应当被抑制:

- 1) 飞机在地面
- 2) 大翼防冰活门和整流罩防冰活门打开
- 3) 左右引气、空调开关闭
- 4) 距离上一次警告 10 分钟以内

### 3.2 ACMS 监控分析

航空公司通过客户化机载 ACMS 软件实现压力监控和温度监控。当满足触发逻辑, 收集当前的高度、压力、N1 等值, 通过 ACARS 下传至地面。这种方式可以实时获取飞机的引气健康状态报文, 但是不能准确地对性能衰退和故障严重情况定性。只能起到预防维修, 不能实现故障预测。

## 4 故障监控模型

由于机载 ACMS 软件不能准确地对性能衰退和故障严重程度定性, 本文采用 MATLAB 在地面实现 3.1.1 小节压力监控模型和 3.1.2 小节温度监控模型。输入使用飞机真实快速访问记录器 QAR 数据。QAR 数据需要使用译码软件进行译码, 然后输出可供 MATLAB 访问的 CSV 格式。目前国内大多民航飞机改装 WQAR, 飞机航后就会有 QAR 数据下传至航空公司地面监控。由于引气的管道压力和出口温度的性能衰退时间周期比较长。使用 QAR 数据完成满足监控的实时性。

图 3 为监控左右管道压力图, 当触发高等级管道压力警告时, 标志为红色星, 触发中等级管道压力警告时, 标志为粉色星。从图中所示: 1 号管道压力明显低于 2 号管道压力, 但是 2 号管道的事件触发多。因为 2 号管道压力低, 满足触发逻辑后, 管道压力又上升恢复正常, 当管道压力又下降时, 此时又触发逻辑。所以 2 号的事件触发多。

图 4 为预冷器出口温度图, 当温度高于 465°F, 触发事件, 标志为红色星。1 号出口温度明显高于 2 号出口温度, 性

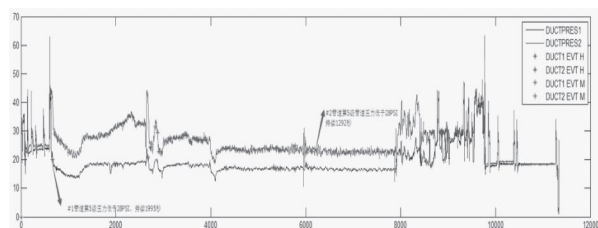


图3 管道压力监控图

能衰退与故障程序更严重。但是单从事件触发量, 是区分不出来。因为刚开始性能衰退没有那么严重时, 反而触发事件多, 等性能衰退严重时, 只触发一个事件。

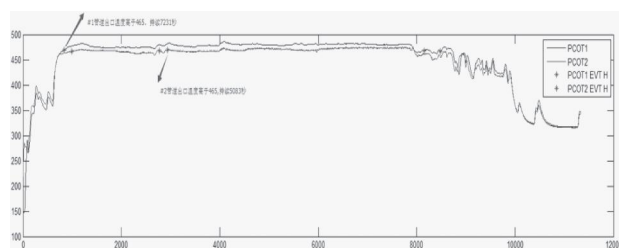


图4 温度监控图

因此, ACMS 监控, 不能以 ACARS 的报文量来定性故障。故障监控模型可以对引气的性能衰退和故障情况进行定性, 且满足预防维修能力。

## 5 故障预测模型

故障监控模型不能实现预测功能, 如果一旦收到触发事件, 就进行维修排查。则会浪费维修资源和航材, 因为引气系统的性能衰退和故障严重程度的周期比较长, 可达几个月。这样造成过度维修。为此, 本文建立故障预测模型, 用来准确预测故障。

### 5.1 预测模型算法选择

因为引气跳开关灯亮故障比较严重, 而引起这个故障的原因大多由于预冷器出口温度 PCOT 高引起的。本文以 PCOT 的性能衰退趋势来研究, 建立预测模型。

图 5 展示 PCOT 随着飞行航班的性能衰退变化, PCOT 可持续将近 1000 个航班, 才达到 490°F, 从而出现驾驶舱效应, 导致引气跳开关灯亮故障。在刚开始大于 465°F 时, 下个航段会低于 465°F, 也会高达 485°F, 显现为非线性特性。

针对引气系统性能参数表现为非线性特性, 本文采用基于遗传算法的小波神经网络算法。这样结合遗传算法全局优化搜索能力和小波神经网络良好局部特性, 避免 BP 神经网络缺陷。

### 5.2 故障预测模型构建

构建故障预测模型, 不能完全使用故障监控模型里面的温度监控模型, 需要对 PCOT 参数的获取进行筛选与处理。

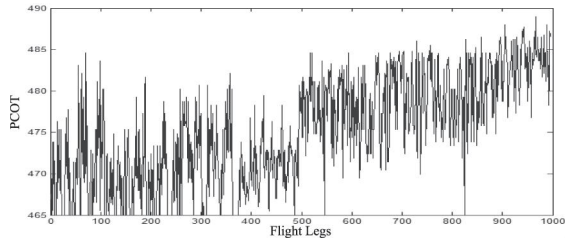


图5 PCOT 与飞行航班图

### 5.2.1 参数采集

图6所示PCOT参数与N1参数的关系图,从图中所示,PCOT与N1是有正相关性的。PCOT会随着N1的变化而正相关变化。

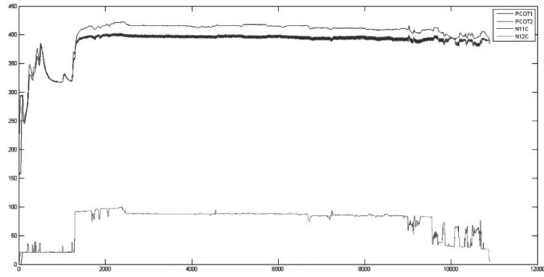


图6 PCOT 与N1图

对于PCOT参数,需要消除N1的影响,获取稳态条件下的PCOT参数最大值。具体步骤如下:

- 1) 首先判断飞机处于巡航阶段,这样消除爬升和下降阶段N1的变化影响。
- 2) 使用故障监控模型中的压力监控模型的步骤2、步骤6。判断飞机处于第5级引气压力状态。
- 3) 获取持续60秒大于465°F的最高温度。

### 5.2.2 小波神经网络建立

小波神经网络,是一种基于小波变换理论构造的前馈神经网络,采用小波函数作为神经网络中隐含层的激励函数。充分利用小波变换良好的局部特性和神经网络的大数据处理、自学习能力。因此具有较强的逼近能力和收敛速度快。图7所示为三层小波神经网络结构图。图7中, $x_1, x_i, \dots, x_m$ 为小波神经网络的输入参数; $y_n$ 为小波神经网络的预测输出; $W_{ik}$ 为输入层节点*i*与隐含层节点*k*之间的连接权值; $W_{ks}$ 为隐含层*k*与输出层节点*s*的连接权值。

目前小波神经网络的设计,基本上依靠经验公式进行试凑。设三层小波神经元数分别为*m*、*j*、*n*,隐含层神经元激发函数为 $\psi_{a,b}(x)$ ,隐含节点的伸缩平移系数分别为 $a_k, b_k$ 。则网络输出层第*s*个节点输出表达式为

$$y_s(x) = \sum_{k=1}^j W_{ks} \varphi\left(\frac{\sum_{i=1}^m w_{ik} x(i) - b_k}{a_k}\right) \quad (3)$$

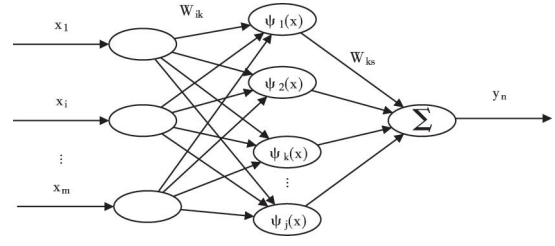


图7 小波神经网络结构图

隐含小波神经元采用 Morlet 小波函数,表达式为

$$\psi(x) = \cos(1.75x) \exp(-0.5x^2) \quad (4)$$

网络参数 $W_{ik}, W_{ks}, a_k, b_k$ 可通过误差能量函数调整,误差能量函数表达式为

$$E = 0.5(y(x_i) - y_i)^2 \quad (5)$$

对于网络结构的设计,只要确定了输入节点、隐层节点和输出节点后,关键在于网络参数 $W_{ik}, W_{ks}, a_k, b_k$ 的选取和优化。小波神经网络是根据误差能量函数*E*采用梯度下降法调整网络参数。但此法容易陷入局部极小和引起震荡效应。

### 5.2.3 遗传算法优化小波神经网络

为了避免小波神经网络陷入局部极小和引起震荡效应,本文采用遗传算法对小波神经网络进行优化。遗传算法是基于全局选择的优化算法,通过模拟自然界优胜劣汰原则,迭代优化种群个体,逐步逼近最优结果。图8列出遗传算法优化小波神经网络的流程图。

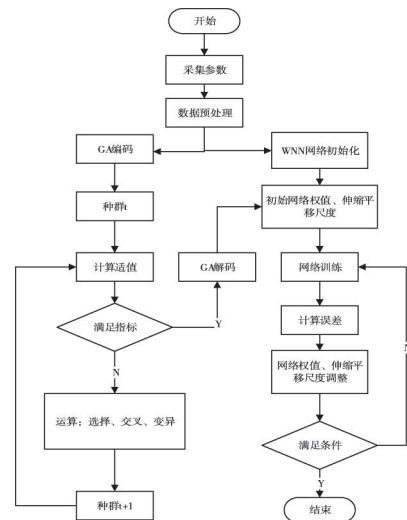


图8 WNN - GA 模型流程图

其具体步骤如下:

- 1) 依照5.2.1章节进行参数采集,得到一维航班序列PCOT参数。
- 2) 数据预处理。首先将一维航班序列的PCOT参数,嵌



入到  $m$  维数组中。 $m$  为小波神经网络输入层节点数。然后将  $m$  维数组减去最后一组数据作为输入训练样本。最后将第  $m$  维参数中的第 2 个参数至最后一个参数作为输出训练样本。为了加快网络训练速度将输入、输出数据归一化处理。归一化公式为

$$x' = x'_{\min} + \left( \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \right) (X'_{\max} - X'_{\min}) \quad (6)$$

3) 种群初始化。本文采用 Sheffield 大学 Matlab 遗传算法工具箱, 首先将  $j$  个网络权值  $W_{ik}$ 、 $W_{ks}$ , 伸缩平移尺度系数  $a_k$ 、 $b_k$  编码。编码长度为  $m \times j + j + j + j \times n$ 。

4) 计算适应度。首先对编码后的初始群体进行网络训练, 即使用训练样本训练小波网络, 然后根据训练的结果来计算个体的适应度。个体适应度为预测输出与期望输出的误差之和。

5) 判断满足指标。如果达到进化迭代的次数或适应度达到规定值, 则解码。然后将网络权值  $W_{ik}$ 、 $W_{ks}$ , 伸缩平移尺度系数  $a_k$ 、 $b_k$  赋值给 WNN。

6) 如果条件不满足, 对种群进行选择、交叉、变异。然后产生下一代种群。最后跳转至步骤 4)。

## 6 实例仿真验证

小波神经网络的预测仿真, 对数据样本依赖比较大<sup>[6]</sup>, 因此本文选取真实飞机 PCOT 数据, 其中 990 组作为训练数据, 124 组作为仿真测试数据。遗传算法优化的小波神经网络结构为 6-7-1。

### 6.1 结果与分析

#### 6.1.1 仿真结果

将 PCOT 数据输入 GA-WNN 仿真模型, 输出 PCOT 预测值与真实值对比如图 9。由图可知, 预测结果和实际期望值的变化趋势一致。

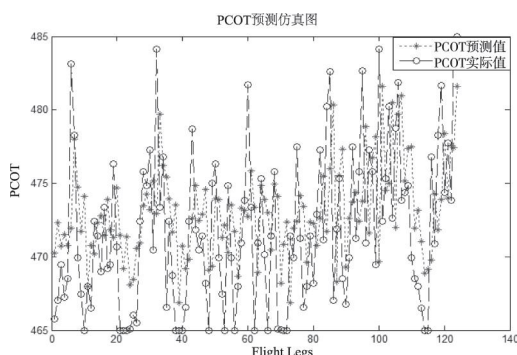


图9 PCOT 预测仿真图

#### 6.1.2 结果分析

图 10 为 GA 算法优化迭代图, 由图可知, 遗传算法在小波神经网络的优化过程比较快, 寻找最优解后, 迭代过程趋于稳定。

图 11 为 124 组预测数据的均方根误差, 由图可知, 误差

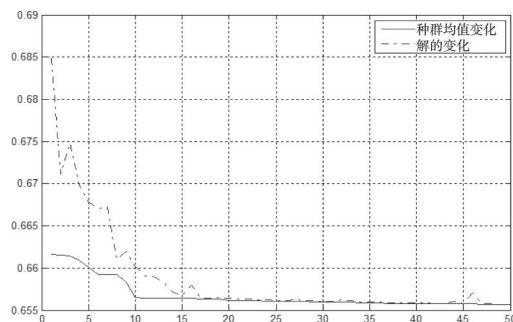


图10 GA 优化迭代图

量低于 3%。说明大多数误差值与期望值的误差值比较小的, 仿真模型满足预测结果。

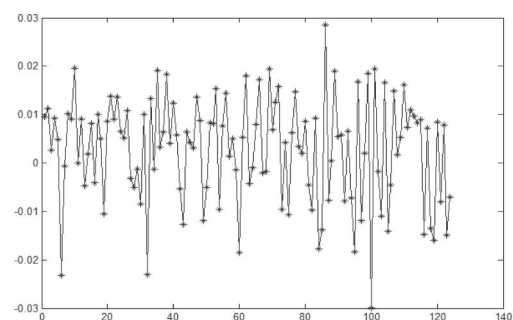


图11 PCOT 误差分析图

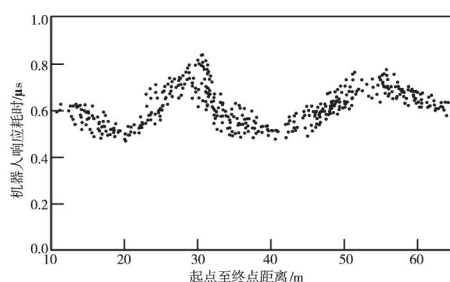
## 7 结语

本文提出了一种基于遗传算法的小波神经网络故障预测模型。该模型收敛速度快, 预测仿真精度比较高。充分发挥了小波神经网络的遗传算法全局优化搜索能力和小波神经网络良好局部特性。仿真模型满足预测结果。此模型对民航客机引气系统故障预测提高预测精度具有重要意义。

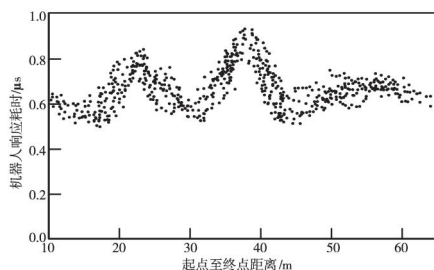
### 参考文献:

- [1] Boeing. ACMS User Guide for Enhanced ECS Troubleshooting and Health management [S]. 737-SL-36-024, 2013.
- [2] Zhang Haibo, Huang Qing, Li Fangwei, Zhu Jiang. A network security situation prediction model based on wavelet neural network with optimized parameters [J]. Digital Communications and Networks, 2016, 2(3): 139-144.
- [3] Yang Hong-jun, Hu Xu. Wavelet neural network with improved genetic algorithm for traffic flow time series prediction [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(19): 8103-8110.
- [4] 杨超, 王志伟. 经 GA 优化的 WNN 在交通流预测中的应用. 计算机工程 [J]. 2011, 37(14): 149-151.
- [5] 谢春, 宋国明, 姜书艳, 王厚军. 自适应 GA 优化 WNN 的模拟电路软故障诊断方法 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(1): 75-78.

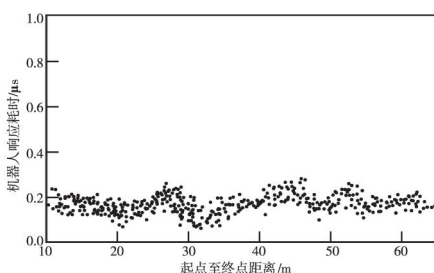
(下转第 311 页)



(a) 文献[5]方法下机器人响应时间



(b) 文献[6]方法下机器人响应时间



(c) 基于EFSA算法的机器人步态控制方法下机器人响应时间

图9 不同方法机器人响应时间对比

利用机器人运动模式分析和运动环境检测,为机器人斜坡步态控制奠定基础,采用EFSA算法求解全方向蠕动机器人斜坡步态规律,完成整体研究。通过实验证明了所提方法具有避障高效性和响应高效性等优势。对于未来发展提出的建议为:

- 1) 应着重考虑机器人自由度,使步态控制更加精确。

2) 上述仅针对机器人移动地形的宽阔性与平坦性进行了检测,未对其它环境进行感知。为了进一步提升机器人运动的平稳定与安全性,接下来可将无线通信技术和视觉传达技术应用至机器人步态控制中。

#### 参考文献:

- [1] 赵玉婷,韩宝玲,罗庆生. 基于DeepQNetwork的双足机器人非平整地面行走稳定性控制方法[J]. 计算机应用, 2018,38(9):2459-2463.
- [2] 徐蔚青,陶志远,王石刚,等. 基于动量控制的猎豹机器人疾驰步态分析[J]. 机械设计与研究, 2018,34(2):25-30.
- [3] 徐超立,林科,杨晨,等. 基于小腿表面肌电的智能机器人协同控制方法[J]. 中国生物医学工程学报, 2016,35(4):385-393.
- [4] 郎琳,许佳奇,张献鹏,等. 液压驱动型四足机器人对角小跑步态本体水平位置控制方法[J]. 国防科技大学学报, 2017,39(1):142-147.
- [5] 杜玉红,李兴,赵地,等. 仿人机器人越障步态控制研究[J]. 中国工程机械学报, 2017,15(1):10-14.
- [6] 孙志远,杨思源. 四足机器人步态规划[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2017,34(6):111-115.
- [7] 尹贵,张小栋,江城,等. 下肢康复机器人按需辅助自适应控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2017,51(10):39-46.
- [8] 郝仁剑,王军政,史大威,等. 基于速度矢量的四足机器人间歇步态规划方法[J]. 机器人, 2016,38(5):540-549.
- [9] 张世俊,邢琰,胡勇. 基于能耗最优的多足机器人综合步态优化方法[J]. 中国空间科学技术, 2018,38(2):36-43.
- [10] 冯春成,刘满禄,张华,等. 工业机器人机械臂加工目标定位控制研究[J]. 计算机仿真, 2017,34(6):319-324.

#### [作者简介]



林荣霞(1978-),女(汉族),广东阳春人,讲师,研究方向:嵌入式技术,机器人控制系统及算法,算法研究。

#### [作者简介]



宋剑(1984-),男(汉族),广西桂林人,硕士研究生,研究方向为飞行大数据应用与飞机健康管理。

雷景波(1972-),男(汉族),陕西渭南人,研究方向为适航与维修。

刘宇辉(1973-),男(汉族),河南荥阳人,硕士研究生,研究方向为飞机远程诊断。

(上接第53页)

- [6] 潘玉民,邓永红,张全柱. 小波神经网络模型的不确定性预测及应用[J]. 计算机应用, 2013,33(4):1001-1005.