

DOI: 10.7652/xjtuxb201904023

考虑性能退化的飞机典型部件灵敏度分析

唐成虎¹, 周长聪², 侯伟¹, 彭玉海¹, 董彦非¹

(1. 西安航空学院飞行器学院, 710077, 西安; 2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 710129, 西安)

摘要: 为了研究发生性能退化的飞机典型部件对缝翼机构运动精度的影响,以缝翼机构滚轮为典型部件,选取飞机在起降阶段缝翼转过的角度作为系统输出响应,建立多体运动学模型。考虑滚轮的不同磨损情况,基于 Archard 磨损模型结合随机参数与人工神经网络法,得到缝翼机构的功能函数表达式。使用基于方差重要性测度与基于矩独立重要性测度两种灵敏度分析方法对飞机典型部件进行灵敏度分析,研究了随滚轮磨损量与磨损量变异系数的变化对缝翼机构运动精度的影响。研究表明,在飞机机构的设计、使用和检修维护不同阶段采用相应的灵敏度分析方法可以精确识别出系统中随机变量的重要性排序,对系统中灵敏度指标排序较高的变量进行优化设计和重点关注可以有效提高系统的可靠性和稳健性,同时也有效地提高了机构灵敏度分析效率。本文分析方法还可为其他机构系统的设计、使用和检修提供参考指导。

关键词: 缝翼; Archard 磨损模型; 神经网络; 灵敏度分析

中图分类号: V19; TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)04-0158-09

Sensitivity Analysis of Typical Aircraft Components Considering Performance Degradation

TANG Chenghu¹, ZHOU Changcong², HOU Wei¹, PENG Yuhai¹, DONG Yanfei¹

(1. School of Aircraft, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China; 2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: To study the impacts of typical aircraft components with performance degradation on the motion accuracy of slat mechanism, a multi-body kinematics model for the slat mechanism is constructed. Rollers of the slat mechanism are selected as the typical parts, and the angle of the slat mechanism is considered as the system output response. The roller wheel wear in different circumstances is taken into account, and a performance function with explicit expression of the slat mechanism is established based on Archard wear model and combination of stochastic parameters and an artificial neural network method. The variance-based importance measure and the moment-independent importance measure are used to analyze the sensitivity of typical aircraft components, and the influences of variation coefficient and extent of wheel wear on the motion accuracy of the slat mechanism are studied. The calculation and analysis results show that the proposed method can accurately identify the importance ranking of the random variables during the stages of design, use and maintenance of aircraft mechanisms, and optimizing and emphasizing the variables with higher sensitivity in the system can effectively improve the

收稿日期: 2018-07-18。 作者简介: 唐成虎(1991—),男,助教。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608446);陕西省自然科学基金资助项目(2016JM1014);通用航空工程技术中心建设基金资助项目(XHY-2016084)。

网络出版时间: 2019-01-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190128.0859.002.html>

reliability and robustness of the system; and can increase the efficiency of mechanism sensitivity analysis. The proposed method may also be a theoretical guidance for the design, use and maintenance of other mechanism systems.

Keywords: slat mechanism; Archard wear model; artificial neural network; sensitivity analysis

缝翼机构是飞机的重要增升装置,维持其正常运行对于飞机的安全飞行至关重要^[1]。飞机缝翼机构主要由翼面、齿轮齿条传动机构、滚轮限位装置等组成,运动学关系较复杂。飞机在日常服役过程中需要进行频繁的起降,使得缝翼机构的组成部件承受载荷的作用,造成以磨损或疲劳为代表的性能退化,进而影响缝翼机构的正常运行。研究飞机服役过程中部件性能退化对缝翼机构运行的影响程度,从而有针对性地采取预防措施,具有重要意义。

灵敏度分析包含局部灵敏度分析和全局灵敏度分析。局部灵敏度分析指失效概率对随机变量分布参数的偏导数,表示随机变量的波动对失效概率的影响程度^[2];全局灵敏度分析又称重要性测度^[3],旨在研究系统输入参数对输出响应影响程度的重要理论工具,近年来得到了迅速的发展。Sobol 和 Iman 等假设变量的方差能够充分描述模型输出的不确定性指标,提出了基于方差的重要性测度^[4-5]。Bor-gonovo 提出了矩独立重要性测度指标来反映基本变量的重要性差别^[6]。Cui 等研究了随机激励作用下基于方差、矩独立的重要性测度,并将其应用于牛头刨床轨迹研究中^[7]。周长聪提出基于动力学响应参数的灵敏度分析,研究了处于随机激励下的结构系统随机不确定性输入参数对结构动力响应的影响^[2]。孙中超等研究了铰链间隙分布参数的变化对舱门连杆机构运动精度重要性的影响^[8]。张屹尚等在复合随机振动系统中利用条件概率密度函数解析变换,给出了衡量基本随机变量对动力可靠性影响的矩独立重要性测度指标^[9]。吕召燕等利用基于方差的重要性测度指标有效降低了含有高维参数的航

空齿轮振动优化问题的复杂度^[10]。这些学者的研究促进了重要性测度分析在机械系统输入—输出关系研究中的应用。

本文通过灵敏度分析方法中的全局灵敏度分析指标即重要性测度,研究了缝翼典型部件磨损性能退化后对机构运动精度的影响程度。首先建立了缝翼机构多体动力学仿真模型,其次基于 Archard 磨损公式使用神经网络法拟合出缝翼机构的功能函数表达式,最后基于重要性测度分析了飞机缝翼机构中滚轮发生磨损后对机构运动性能的影响程度。本文分析方法可为工程应用提供理论依据,可以推广至其他机械系统的分析研究中。

1 基于 Archard 理论的机构磨损模型

本文所研究的某型飞机前缘缝翼结构如图 1 所示,该机构由缝翼翼面、翼肋、弧形滑轨、滚轮、齿轮齿条等部件构成。缝翼能否在规定时间内和条件下精确收放至规定角度,对飞机的安全性具有重要作用。缝翼收放动作由固定在翼面上的弧形滑轨与滚轮来限位,位于翼肋中心的齿轮齿条啮合传动提供动力来完成,其中位于缝翼两端的滑轨与齿条处于固定状态,滚轮位于支架上,而分布在 3 根弧形滑轨上下的 12 组定位滚轮通过限定滑轨的运动轨迹来控制翼面转至规定的位置。

在缝翼机构完成收放动作过程中,位于支架上的滚轮通过滑轨的接触产生运动,对于滚轮与滑轨运动机构而言,由于滑轨材料为钛合金 TC4,名义成分 Ti6Al4V,滚轮外表面为渗碳 431 不锈钢,成分为 1Cr17Ni2,前者具有更高的刚度和硬度,因此

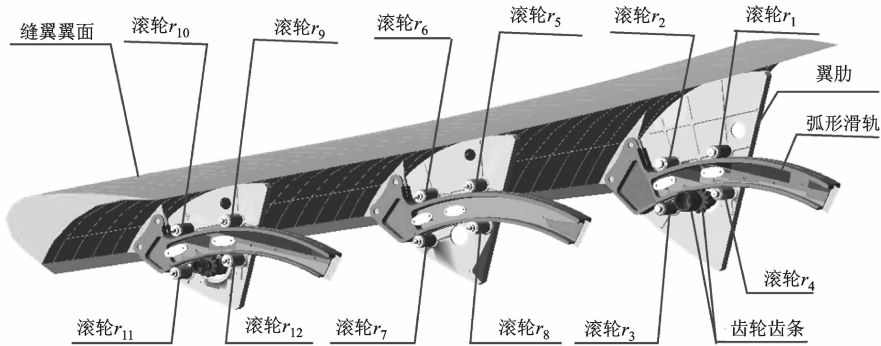


图 1 飞机前缘缝翼机构的简化模型

滚轮外表面易发生复杂的磨损作用。

构件间的磨损是错综复杂的多因素共同作用导致的结果,按磨损机理的不同可以分为黏着磨损、磨料磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、冲蚀磨损、微动磨损等^[11]。1953 年,英国学者 Archard 通过对两构件表面之间发生黏着磨损进行研究提出了黏着磨损模型,称为 Archard 磨损模型公式^[12],该磨损模型被研究人员广泛应用于工程中^[13-15]。因此,本文使用 Archard 黏着磨损模型公式对缝翼滚轮滑轨机构的接触磨损量进行分析计算,表达式如下

$$V = \frac{KPL}{H} \quad (1)$$

式中: V 为磨损体积; P 为接触面的法向压力; L 为相对滑动距离; H 为材料布氏硬度; K 为磨损因数。由缝翼滚轮滑轨机构的几何关系,得出一次磨损过程中滚轮相对滑动距离和滚轮的磨损体积分别为

$$L = \frac{2n\pi r_0 \varphi}{360} \quad (2)$$

$$V = [\pi(r + \Delta r)^2 - \pi r^2]b = 2\pi r b \Delta r \quad (3)$$

式中: b 为滚轮的高; r 为滚轮的半径; Δr 为滚轮半径磨损量; r_0 为与滚轮接触的滑轨半径; φ 为滚轮相对滑轨转过的角度; n 为滚轮的磨损次数。

联立式(1)(2)(3),可求得滚轮半径的磨损量

$$\Delta r = \frac{KP\varphi r_0}{360Hbr}n \quad (4)$$

式中: H 为布氏硬度,通常取 $H \approx 3\sigma_s$ ^[16]; σ_s 为材料屈服强度。

2 基于神经网络的缝翼机构功能函数的建立

人工智能神经网络简称神经网络^[17],是一种模仿动物神经网络行为特征进行分布式并行信息处理的数学算法模型,具有非线性、非局限性、非常定性、非凸性等特点,具备自适应、自组织和实时学习的优势,可对系统的输入与输出数据进行拟合训练,得到系统的输入与输出函数关系显性表达式。

本文在 MSC. Adams 软件中建立缝翼机构多体动力学仿真模型进行分析,由于该模型的仿真计算时间为 1 200 s/次(其仿真计算时间与仿真次数的关系如图 2 所示),因此,通过调用该模型进行滚轮重要性测度分析的时间成本将是难以接受的。为了克服缝翼机构多体动力学模型在仿真计算中的耗时性问题,通过随机参数结合神经网络法进行有限次的仿真建立缝翼机构响应和输入参数之间的函数

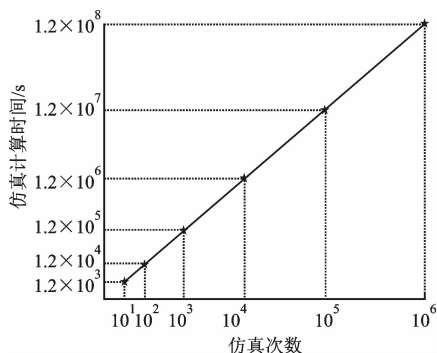


图 2 缝翼机构多体动力学模型仿真时间与次数的关系

关系,用于对系统中输入参数进行重要性测度分析。记缝翼机构的响应值 σ 关于输入参数 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的函数为

$$\sigma = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5)$$

本文采取两个措施来提高建立缝翼机构功能函数的效率。首先,在样本抽取过程中,采用 Sobol 随机序列抽样法得到一组合适的随机样本^[18];其次,在缝翼系统遍历计算中,采用 3 层神经网络分层拓扑连接形式(如图 3 所示)来处理缝翼系统内部机构间传递的复杂多样性问题,这 3 层分别为输入层、隐藏层、输出层,其中输入层含有 p 个节点,隐藏层含有 q 个节点,输出层含有 r 个节点。各传递层之间的函数关系如下

$$h_k = f_1\left(\alpha_k + \sum_{i=1}^p w_{ik}x_i\right) \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, q$$

$$y_j = f_2\left(\beta_j + \sum_{k=1}^q v_{kj}h_k\right), j = 1, 2, \dots, r \quad (7)$$

式中: w_{ik} 为输入层节点 x_i 与隐藏层节点 h_k 间的网络权值; v_{kj} 为隐藏层节点 h_k 与输出层节点 y_j 间的网络权值; α_k 是隐藏层节点的阈值; β_j 是输出层节点的阈值; $f_1(\cdot)$ 为 S 型非线性函数; $f_2(\cdot)$ 是线性函数。

通过式(6)(7)所示神经网络映射关系函数,采用 BP 神经网络的信号正向传播和误差反向传播算

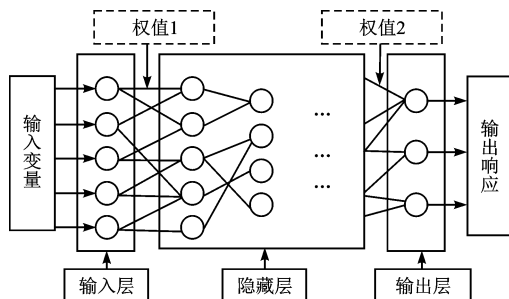


图 3 神经网络拓扑连接形式

法,反复调整各层权值和阈值,直至网络输出误差减小到可接受范围,最后得到样本点的系统动态响应拟合函数。那么,式(5)的拟合表达式为

$$\sigma = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_2\left(\beta_j + \sum_{k=1}^q v_{kj} f_1\left(\alpha_k + \sum_{i=1}^p w_{ik} x_i\right)\right) \quad (8)$$

3 基于输入变量的两种重要性测度

3.1 基于方差的缝翼机构典型部件重要性测度

方差通常用来反映随机变量的变异特征, Sobol 使用方差矩来评估输入变量对输出响应量的不确定性影响,并定义该方法为基于方差的重要性测度分析^[4]。文献[4]方法基于 Sobol 提出的功能函数 $g(\mathbf{X})$ 分解求和公式

$$g(\mathbf{X}) = g_0 + \sum_{i=1}^n g_i(X_i) + \sum_{i < j} g_{i,j}(X_i, X_j) + \dots + g_{1,2,\dots,n}(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (9)$$

再将响应量的方差 $V(Y)$ 分解为多项方差之和

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i=1, j>i}^n V_{ij} + \dots + V_{1,2,\dots,n} \quad (10)$$

式中: V_{ij} 和 $V_{1,2,\dots,n}$ 反映了输入变量由于功能函数的分解形式对响应量方差产生的交叉贡献; V_i 是输入变量 X_i 对响应量的一阶方差贡献,其表达式如下^[18]

$$V_i = V_{X_i}(E_{X_{-i}}(Y | X_i)) = V(Y) - E_{X_i}(V_{X_{-i}}(Y | X_i)) \quad (11)$$

其中 X_{-i} 表示输入变量除 X_i 以外的其余变量, $X_{-i} = (X_1, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_n)$ 。由此可知,通过 V_i 可以衡量出在 X_i 固定后响应量方差的平均变化情况, V_i 越大,说明 X_i 对响应量变异性的影响越大,反之越小。通常一阶方差贡献 V_i 被认为是变量 X_i 对输出响应量方差的主影响,能够客观地反映出输入变量对响应量方差的贡献。因此,主要考虑输入变量的一阶方差贡献时,响应量方差可简化为

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i \quad (12)$$

为了规范地量化输入变量对响应量方差的贡献,将 X_i 的方差重要性测度重新表示为以下形式

$$\delta_i = \frac{V_i}{V(Y)} = \frac{V(Y) - E_{X_i}(V_{X_{-i}}(Y | X_i))}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (13)$$

式中: X_i 为缝翼机构中第 i 个滚轮参数; Y 为缝翼机构转动角度; δ_i 表示第 i 个滚轮对缝翼转动角度的方差重要性测度指标。

3.2 基于矩独立的缝翼机构典型部件重要性测度

矩独立重要性测度指标反映出了缝翼机构的典

型部件对于系统输出响应概率分布的影响程度。将缝翼机构响应量 Y 的无条件概率密度函数记作 $f_Y(y)$, $f_{Y|X_i}(y)$ 是在输入变量 X_i 取定值时 Y 的条件概率密度函数。当 Y 从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 取值时,则输入变量取实现值 X_i 时对响应量概率密度函数的累积影响的表示如下^[6]

$$s(X_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} |f_Y(y) - f_{Y|X_i}(y)| dy \quad (14)$$

考虑到输入变量的实现值由概率密度函数 $f_{x_i}(x_i)$ 确定,则 X_i 对响应量分布密度累积影响的平均值为 $E_{x_i}(s(X_i))$,从而定义输入变量 X_i 基于响应量概率密度分布的矩独立重要性测度指标 η_i 为

$$\eta_i = \frac{1}{2} E_{x_i}(s(X_i)) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} f_{x_i}(x_i) s(X_i) dx_i \quad (15)$$

式中: X_i 为缝翼机构的第 i 个滚轮参数; Y 为缝翼机构转动角度; η_i 表示第 i 个滚轮对缝翼转动角度的矩独立重要性测度指标。

针对性能退化的缝翼机构典型部件的重要性测度分析,本文通过人工智能神经网络技术结合随机参数法得出缝翼机构输入参数与输出响应的函数关系,通过重要性测度分析,得到缝翼输入变量对响应量的重要性排序,基本分析流程如下。

(1) 确定缝翼机构典型部件的随机参数。结合随机参数法确定缝翼系统多体动力学仿真模型的输入参数,进行输入参数灵敏度分析,得到对系统响应影响较大的滚轮 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

(2) 确定缝翼机构输入变量的样本。通过 Sobol 随机序列抽样得到一组高效、随机、均匀的样本点,再将这组均匀样本变换成满足滚轮参数分布的样本,进而得到缝翼机构输入变量的样本。

(3) 基于虚拟样机软件仿真分析。通过在 MSC. Adams 虚拟样机软件中对缝翼机构多体动力学模型进行输入变量的参数化处理,仿真分析得到系统输出响应,得出缝翼机构输出响应量的样本。

(4) BP 神经网络模型的建立。对于 3 层 BP 神经网络模型而言:输入层节点数代表缝翼机构的典型部件个数;输出层节点数代表缝翼机构的响应量数目;隐含层节点数是根据网络模拟精度和训练步数进行调节,一般选取缺省值。通过神经网络利用所选样本进行训练学习,最终得到缝翼机构的输入参数与输出响应的函数关系式。

(5) 重要性测度分析。通过上述步骤 1~4 的分析,可以求出缝翼机构输入变量与输出响应的神经网络拟合函数表达式,再结合式(13)和(15)分别计算

出滚轮基于方差与基于矩独立的重要性测度指标。

4 缝翼典型部件重要性测度分析

飞机在服役过程中,缝翼机构根据机翼升力系数需求进行多次收放动作来满足其升力要求,在滚轮发生磨损后,缝翼机构的运动形式将受到一定的影响,甚至使缝翼不能收放至指定位置,进而影响机翼的升力系数。如图 1 所示,缝翼的 3 根弧形滑轨从右向左依次记为 1~3 号滑轨,各滑轨上下的限位滚轮组依次记为 $r_1 \sim r_{12}$,则滚轮磨损量记为 $\Delta r_1 \sim \Delta r_{12}$ 。本文以滚轮作为缝翼机构的输入变量,缝翼在规定时间内转动的角度作为输出响应量,研究滚轮发生以磨损为主要形式的性能退化后对缝翼机构输出响应的影响。

通过文献[19]可知滚轮布氏硬度 H 的分布参数,由文献[20]可知磨损系数 $K=1.0\times10^{-4}$ 。弧形滑轨半径 r_0 、滚轮半径 r 及高度 b 均服从正态分布,由 3σ 准则(3 倍标准差准则)可知,当样本服从正态分析时,其样本落在 $\pm 3\sigma$ 范围内的概率为 99.74%,由此可通过 3σ 准则抽样得出 r_0 、 r 、 b 的样本。因此,缝翼机构的随机变量参数及分布类型如表 1 所示。通过 MSC. Adams 软件进行多体动力学仿真分析得出滚轮与弧形滑轨间接触压力 $p_i(i=1,2,\cdots,6)$ 的样本,利用一元线性回归分析^[21]得到接触压力的线性函数表达式,如表 2 所示。分别研究滚轮经过 10 000、20 000、 $\cdots$ 、60 000 次磨损后,由式(4)中自变量服从正态分布(如表 1 所示)可得,在给

表 1 缝翼机构的随机变量参数及分布类型

随机变量	分布类型	均值	变异系数
H/Pa	正态	2.69×10^9	0.10
r/mm	正态	15.875	0.05
d/mm	正态	67	0.05
r_0/mm	正态	592.4	0.05

表 2 接触压力的线性回归函数表达式

滚轮滑轨间的接触正压力	线性回归函数
p_1	$4\,011.8-0.040\,95n_j$
p_2	$1\,376.7$
p_3	$1\,903+0.038\,903n_j$
p_4	$266.11+0.010\,007n_j$
p_5	$829.9+0.013\,89n_j$
p_6	$478.05+0.013\,873n_j$

注: $n_j(j=1,2,\cdots,6)$ 为滚轮磨损次数($n_j=10\,000,20\,000,\cdots,60\,000$)。

定磨损次数后滚轮的磨损量经过自变量的特征传递也具有正态分布特性,即 Δr 服从正态分布。因此,得出滚轮发生性能退化后其磨损量随磨损次数的变化关系如图 4 所示。

本文在滚轮的许用磨损量范围内进行重要性分析,选取滚轮的最大磨损量为滚轮半径的 10%,则试验点设计区间可取 $[14.375,15.875]$,通过 Sobol 随机序列抽取 10^3 样本点,构造一个 6×10^3 阶矩阵作为输入变量,通过缝翼机构多体动力学模型仿真得到 2×10^3 阶矩阵作为输出响应向量。采用归一化函数对输入变量和输出响应量进行归一化处理,作为 BP 神经网络的训练及预测样本,通过随机参数结合 3 层 BP 神经网络法,得出缝翼在不同收放次数后滚轮磨损量与缝翼转过角度的函数关系。

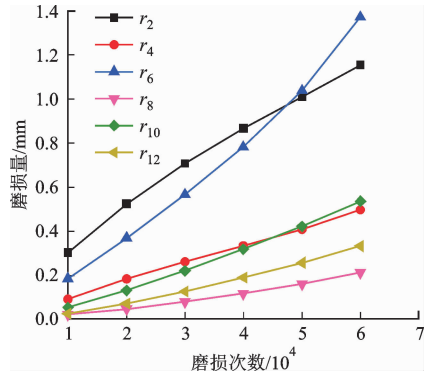


图 4 滚轮磨损量随磨损次数的变化关系

BP 神经网络模型中输入层节点为 6,表示 6 组滚轮磨损后半径值 $x_i(i=1,2,\cdots,6)$,隐藏层节点取 15 个,输出层节点为 2,表示系统的两个输出响应量,指飞机在起飞和降落两个阶段缝翼相对机翼翼面位置所转过的角度,分别记为 $A_1(x_i)$ 、 $A_2(x_i)$ 。在神经网络中经过 36 步迭代训练,网络达到设定误差值 10^{-4} ,网络收敛迭代训练过程终止,样本的神经网络误差曲线如图 5 所示,则缝翼机构输出响应 $\sigma=[A_1(x),A_2(x)]$ 与随机输入变量 $x_i(i=1,2,\cdots,6)$ 的神经网络模型由式(8)得出

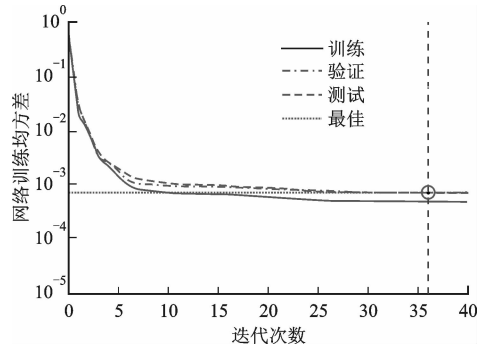
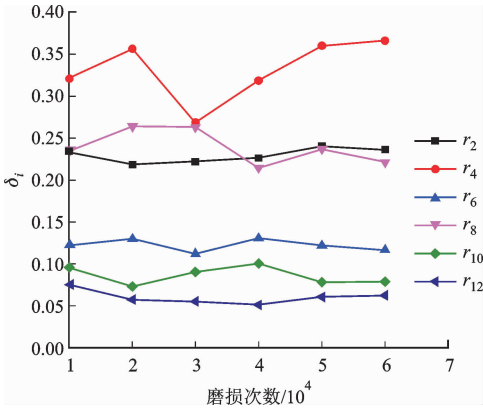


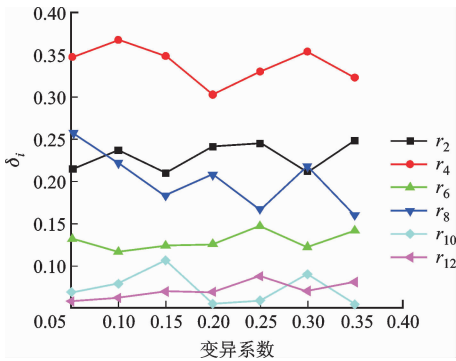
图 5 神经网络训练误差曲线图像

$$\sigma = f_z\left(\beta_j + \sum_{k=1}^{15} v_{kj} f_1\left(\alpha_k + \sum_{i=1}^6 w_{ik} x_i\right)\right)$$
$$i=1,2,\cdots,6; j=1,2; k=1,2,\cdots,15 \quad (16)$$

缝翼机构滚轮经过 10 000~60 000 次磨损,在起飞阶段,求得第 i 个滚轮的一阶方差贡献 V_i 与系统方差 V ,再利用基于方差的缝翼机构典型部件重要性方法求得各滚轮的重要性,如图 6a 所示,在既定磨损次数下,磨损量变异系数在 0.05~0.35 区间变化,滚轮基于方差的重要性测度指标如图 6b 所示。在飞机降落阶段,其方差重要性测度排序如图 7 所示。



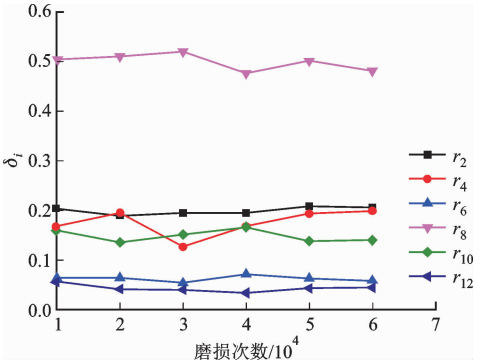
(a)随滚轮磨损次数的变化



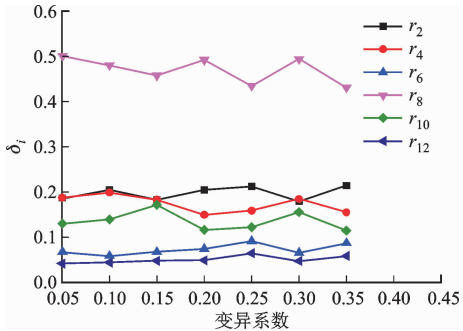
(b)随滚轮变异系数的变化

图 6 起飞阶段 δ_i 随滚轮磨损次数和变异系数的变化关系

从图 6 可以得出,飞机在起飞阶段,滚轮在不同磨损情况下重要性排序为(本文均指从大到小的顺序) r_4 、 r_2 、 r_8 、 r_6 、 r_{10} 、 r_{12} ,变异系数取不同值时,其重要性排序为 r_4 、 r_2 、 r_8 、 r_6 、 r_{10} 、 r_{12} ,虽然滚轮的磨损量以不同形式变化,但在重要性排序中滚轮 r_4 的重要性最高, r_{12} 的重要性最低。从图 7 可以得出,飞机在降落阶段,滚轮经过不同次数的磨损后,基于方差的重要性测度排序为 r_8 、 r_2 、 r_4 、 r_{10} 、 r_6 、 r_{12} ,变异系数取不同值,滚轮的重要性排序为 r_8 、 r_2 、 r_4 、 r_{10} 、 r_6 、



(a)随滚轮磨损次数的变化



(b)随滚轮变异系数的变化

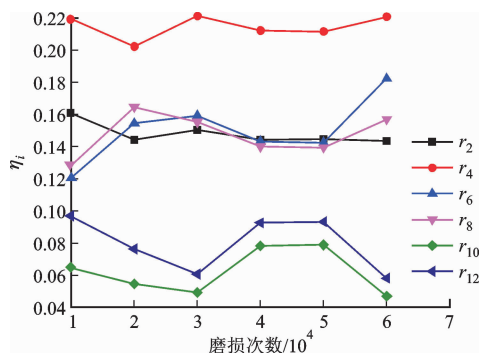
图 7 降落阶段 δ_i 随滚轮磨损次数和变异系数的变化关系

r_{12} ,在以上两种排序方式中 r_8 的重要性为最高,而 r_{12} 的重要性最低。

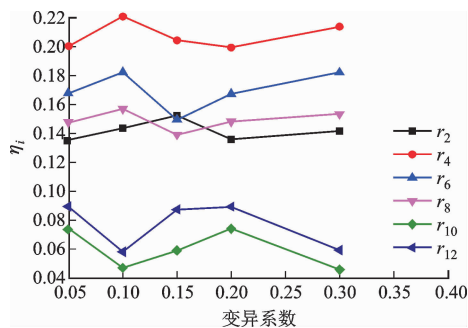
滚轮经过 10 000~60 000 次磨损,在飞机起飞阶段,采用核密度函数估计法对缝翼转过角度的条件分布进行拟合,通过数值积分方法计算出第 i 个滚轮的重要性中间变量 $s(X_i)$,再使用数值积分法计算出 η_i ,即滚轮基于矩独立的重要性测度,如图 8a 所示;在不同变异系数下,基于矩独立的重要性测度如图 8b 所示。飞机在降落阶段,滚轮基于矩独立的重要性测度如图 9 所示。

从图 8 中基于矩独立重要性测度指标的分析结果可以看出,飞机在起飞阶段,各个滚轮随磨损次数变化后重要性排序为 r_4 、 r_6 、 r_8 、 r_2 、 r_{12} 、 r_{10} ,随磨损量变异系数的变化,重要性测度排序为 r_4 、 r_6 、 r_8 、 r_2 、 r_{12} 、 r_{10} 。从图 9 中重要性指标分析结果得出,飞机在降落阶段,随磨损次数变化滚轮的重要性排序为 r_8 、 r_2 、 r_4 、 r_6 、 r_{10} 、 r_{12} ,随磨损量变异系数变化的重要性排序为 r_8 、 r_2 、 r_4 、 r_6 、 r_{10} 、 r_{12} 。在飞机起飞与降落各阶段中,滚轮磨损量以不同方式变化,基于矩独立的重要性指标在数值上存在差异,但重要性排序是一致的。

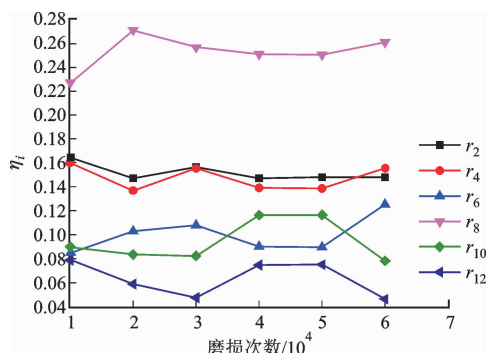
由图 6~图 9 可知,滚轮经过不同次数磨损后,



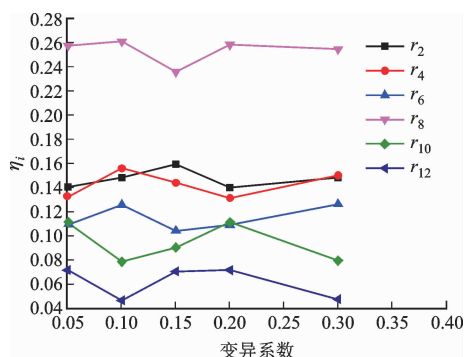
(a) 随滚轮磨损次数的变化



(b) 随滚轮变异系数的变化

图 8 起飞阶段 η_i 随不同滚轮磨损次数和变异系数变化的关系

(a) 随滚轮磨损次数的变化



(b) 随滚轮变异系数的变化

图 9 降落阶段 η_i 随不同滚轮磨损次数和变异系数的变化关系

出现了有些滚轮重要性增加,而有些滚轮重要性降低的情况。其原因是滚轮经过一定的磨损后重要性指标的计算与滚轮几何参数、磨损次数、接触正压力等随机参数有关,这些参数随着滚轮磨损状况的改变,将随之改变进而导致滚轮重要的计算结果发生一定的变化。在图 6a 中由滚轮 r_4 可得,经过 10 000~60 000 次的磨损后其重要性指标依次呈现出:先增加,再减小,再增加,最后趋于平稳的变化趋势,其重要性的变化量均值为 0.029,该值与滚轮 r_4 的重要性均值 0.332 相比较小,因此对于滚轮 r_4 在整个系统中的重要性排序结果影响较小。由滚轮 r_2 和 r_8 可知,当磨损次数在 10 000~30 000 之间,滚轮 r_2 的重要性呈减小趋势,其重要性变化量均为 0.006,远小于重要性均值 0.235。滚轮 r_8 的重要性呈增加趋势,其重要性变化量均值为 0.013,相比重要性均值 0.224 较小。当磨损次数从 30 000~60 000 时,滚轮 r_2 的重要性呈增大趋势,其重要性变化量均值为 0.007 远小于重要性均值 0.235。滚轮 r_8 的重要性呈减小趋势,其重要性变化量均值为 0.008,相比重要性均值 0.224 较小。此外,滚轮 r_6 、 r_{10} 、 r_{12} 的重要性变化量均值分别为 0.005、0.009、0.006 均远小于其重要性均值分别为 0.122、0.086、

0.060 的结果。

由此可知,随着磨损次数的增加,各个滚轮的重要性变化量(增加量或减少量)仅是各自重要性的 3%~10%,且重要性排序最大的滚轮与其他滚轮的重要性结果相差较大。因此,滚轮重要性的变化量相对各自的重要性结果较小,对滚轮的重要性排序不会产生的较大的影响,即滚轮的重要性排序结果始终保持在相对稳定的状态。

从图 6a、图 7a、图 8a、图 9a 可以得出,飞机在起飞阶段,缝翼在收放过程中滚轮与弧形滑轨之间经过不同磨损次数后,基于缝翼转过角度方差的重要性排序与基于矩独立的重要性排序结果并不完全一致,这种不一致的现象是合理的且有普遍性和重要意义。

合理性与普遍性在于基于方差重要性测度 δ_i 从方差的角度反映滚轮尺寸参数分布特性对缝翼机构输出响应量变异性(波动性)的影响,该指标含有缝翼输出响应的方差信息,能够较好地反映输入变量对输出响应波动的贡献度,为调整缝翼机构典型部件以控制系统输出响应波动性提供理论依据,从而提高机构的稳健度。基于矩独立的重要性测度 η_i 反映了滚轮对缝翼转过角度整个概率分布的影响程

度,该指标较 δ_i 可以全面地衡量输入变量对系统输出响应的影响程度,由式(14)可知需计算出滚轮对响应量概率密度函数的累积影响,该指标包含了输入变量对系统输出响应整个概率分布信息的影响,但未包含工程中所关心的输入变量对系统输出响应量数字特征的影响。由于这两种不同的重要性指标所研究的输入变量对输出响应的影响形式不同,因此他们的排序结果不一致。

重要意义在于,基于方差重要性测度 δ_i 的优点是只需得出系统输出响应的数字特征(方差信息)进而评估出系统输入变量的重要性大小,该优点可用于在缝翼机构检验维修阶段,通过飞机在飞行过程中缝翼收放位置的有限个信息监测点,得出缝翼实际收放过程中输出响应变异特征规律,求出系统中重要性测度排序较高的输入变量精准定位重要部件并对其进行检修、维护,从而提高机构的功能稳健度。基于矩独立的重要性测度 η_i 具备全面地衡量输入变量对系统输出响应整个概率分布的影响,在缝翼机构设计阶段根据飞机设计大纲要求易得出缝翼输出响应的概率分布表征,求出系统中重要性测度排序较高的输入变量进行优化设计,因此在缝翼机构设计阶段可使用该指标对设计工作提供理论指导。

5 结 论

本文以某型飞机的一段典型缝翼机构为对象,研究了滚轮磨损后对缝翼机构运动性能的影响。基于 Archard 磨损模型求得了滚轮的磨损量,为了提高机构灵敏度分析效率,通过 BP 神经网络方法结合有限次缝翼机构多体动力学模型的仿真计算,求得缝翼机构功能函数的表达式。通过基于方差重要性测度与矩独立重要性测度,分别计算了滚轮在不同磨损情况下的灵敏度指标,得出了滚轮在飞机不同运行工况下的重要性测度排序。研究表明:缝翼机构在设计论证阶段宜使用基于矩独立的重要性测度指标,根据飞机设计大纲要求得出缝翼输出响应的概率分布表征,求出系统中重要性测度排序较高的输入变量对其进行优化设计;在缝翼机构检验维修阶段可采用基于方差的重要性测度指标,通过飞机在飞行过程中缝翼收放位置的有限信息监测点,得出缝翼在收放过程中的输出响应变异特征曲线,求出系统中重要性测度排序较高(即灵敏度高)的随机变量,对其进行检修、维护。

本文方法亦可推广至其他系统中,根据研究变

量对输出响应的具体影响方式选择合适的灵敏度分析方法,求出系统中灵敏度较高的随机变量,在设计阶段对其优化设计,在使用过程中对其重点关注,在维修阶段可以精确定位系统的易损部件。

参考文献:

- [1] 晏瀛. 前缘缝翼自适应调整装配技术研究 [J]. 科技视界, 2016(10): 86-87.
YAN Ying. Study on adaptive adjustment and assembly technology of leading edge slat [J]. Science & Technology Vision, 2016(10): 86-87.
- [2] 周长聪, 张峰, 王文选, 等. 随机激励下的随机结构全局灵敏度分析 [J]. 高技术通讯, 2015, 25(10): 956-963.
ZHOU Changcong, ZHANG Feng, WANG Wenxuan, et al. Global sensitivity analysis for stochastic structures under random excitation [J]. High Technology Letters, 2015, 25(10): 956-963.
- [3] 吕震宙, 李璐祎, 宋述芳, 等. 不确定性结构系统的重要性分析理论与求解方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 8-13.
- [4] SOBOL I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2001, 55(1): 271-280.
- [5] IMAN R L, HORA S C. A robust measure of uncertainty importance for use in fault tree system analysis [J]. Risk Analysis, 1990, 10(3): 401-406.
- [6] BORGONOVO E. A new uncertainty importance measure [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(6): 771-784.
- [7] CUI L J, LU Z Z, ZHOU C C. The trajectory importance measure of the shaping machine under stochastic excitation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2012, 266(3): 808-815.
- [8] 孙中超, 喻天翔, 崔卫民, 等. 铰链间隙对连杆机构运动精度的重要性测度分析 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(21): 2874-2879.
SUN Zhongchao, YU Tianxiang, CUI Weimin, et al. Importance measure of revolute joint clearance about motion accuracy of linkage mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(21): 2874-2879.
- [9] 张屹尚, 刘永寿, 赵彬, 等. 复合随机振动系统的动力可靠性矩独立重要性测度及态相关参数解法 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(16): 110-114.
ZHANG Yishang, LIU Yongshou, ZHAO Bin, et al. Moment-independent importance measure of dynamic

- reliability for double random vibration systems and its state dependent parameter solution [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(16): 110-114.
- [10] 吕召燕, 吕震宙, 唐樟春, 等. 航空齿轮振动的重要性测度分析 [J]. *机械传动*, 2013(4): 80-85.
- LÜ Zhaoyan, LÜ Zhengzhou, TANG Zhangchun, et al. Analysis of importance of aeronautic gear vibration [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2013(4): 80-85.
- [11] 朱昆鹏. 民机襟翼运动机构可靠性试验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011: 27-38.
- [12] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24(8): 981-988.
- [13] 季佳佳, 冯蕴雯, 冯元生. 滚轮滑轨运动机构磨损可靠性分析 [J]. *机械强度*, 2010, 32(4): 591-595.
- Ji Jiajia, FENG Yunwen, FENG Yuansheng. Study on wear reliability of roller wheel and its track [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2010, 32(4): 591-595.
- [14] 王超, 胡亚辉, 谭雁清, 等. 基于 Archard 磨损理论的滑动导轨磨损率预测模型研究 [J]. *润滑与密封*, 2014, 39(8): 73-76.
- WANG Chao, HU Yahui, TAN Yanqing, et al. Study on wear rate prediction model of slide guides based on Archard wear model [J]. *Lubrication Engineering*, 2014, 39(8): 73-76.
- [15] HU Yanhui, WANG Chao, YANG Rui, et al. The attenuation model of sliding guides wear theory based on Archard wear model [C]// *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1570-1574.
- [16] ZHANG S, SUN D, FU Y, et al. Toughening of hard nanostructural thin films: a critical review [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 198(1/2/3): 2-8.
- [17] AKERKAR R, SAJJA P S. Artificial neural network [M]// *Intelligent Techniques for Data Science*. Berlin, Germany: Springer, 2016: 125-155.
- [18] WEI Pengfei, WANG Yanyan, TANG Chenghu. Time-variant global reliability sensitivity analysis of structures with both input random variables and stochastic processes [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, 55(5): 1883-1898.
- [19] 张瑞雪, 张锦, 孙安, 等. ZG06Cr13Ni4Mo 不锈钢材料抗拉强度与布氏硬度的关系 [J]. *理化检验(物理分册)*, 2011(4): 209-211.
- ZHANG Ruixue, ZHANG Jin, SUN An, et al. Relationship between ultimate strength and Brinell hardness of ZG06Cr13Ni4Mo stainless steel [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)*, 2011(4): 209-211.
- [20] 宿月文, 陈渭, 朱爱斌, 等. 分形特征表面接触磨损模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(7): 52-56.
- SU Yuewen, CHEN Wei, ZHU Aibin, et al. Contact and wear simulation between fractal surfaces [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(7): 52-56.
- [21] VON M R. Mathematical theory of probability and statistics [M]. Pittsburgh, PA, USA: Academic Press, 2014: 189-201.

(编辑 刘杨 葛赵青)

(上接第 135 页)

- ZHU Junyu, HUANG Chuanhe, FAN Xiyang, et al. RSU deployment planning based on approximation algorithm in urban VANET [J]. *Journal on Communications*, 2018, 39(1): 78-89.
- [13] CHI J, JO Y, PARK H, et al. Intersection-priority based optimal RSU allocation for VANET [C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Ubiquitous & Future Networks*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 350-355.
- [14] 刘辉, 李晖. 采用群组密钥管理的分布式车联网信息认证方案 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(2): 58-62.
- LIU Hui, LI Hui. A distributed authentication protocol for VANET [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(2): 58-62.
- [15] DING Yong, XIAO Li. SADV: static-node-assisted adaptive data dissemination in vehicular networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2445-2455.
- [16] CAPRARA A, TOTH P, FISCHETTI M. Algorithms for the set covering problem [J]. *Annals of Operations Research*, 2000, 98(1/2/3/4): 353-371.
- [17] OWAIS M, OSMAN M K, MOUSSA G. Multi-objective transit route network design as set covering problem [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(3): 670-679.

(编辑 武红江)