

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.02.010

# 基于小波变换和神经网络的直升机旋翼不平衡故障诊断方法

徐永勤 高亚东 李清龙

(南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室,南京,210016)

**摘要:**依据直升机旋翼不平衡故障空间与多点机体振动空间存在一对一映射关系的理论,采用某旋翼试验台设置桨距不平衡、质量不平衡以及后缘调整片不平衡的方法获取试验数据。利用小波变换和神经网络处理直升机机体振动信号,并对直升机旋翼单故障和复合故障进行诊断。最终实现了一种利用小波变换处理机体振动信号诊断旋翼不平衡故障的方法。

**关键词:**直升机;旋翼;故障诊断;小波变换;神经网络

**中图分类号:**V212.4;V214.3;V219

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2615(2017)02-0212-07

## Imbalance Fault Diagnosis of Helicopter Rotor Based on Wavelet Transform and Neural Network

XU Yongqin, GAO Yadong, LI Qinglong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** According to the theory that there is an injection of the rotor imbalance fault space into rotor induced fuselage vibration space, the experimental data are obtained through the imbalance settings of mass and aerodynamic parameters (pitch and trim tab) on a helicopter rotor test rig. Based on wavelet transform and neural network, the diagnosis of helicopter rotor single and compound imbalance faults is carried out by using the fuselage vibration signal. The method is given for diagnosing rotor imbalance fault by processing fuselage vibration signal with wavelet transform.

**Key words:** helicopter; rotor; fault diagnosis; wavelet transform; neural network

旋翼是直升机的主要振源,桨叶质量不平衡、桨距不平衡和后缘调整片不平衡是引起直升机机体振动的常见原因,而在直升机的使用过程中,旋翼平衡的调节是一项耗时耗资比较大的工作,目前直升机常用的调锥调平衡通过测量桨尖轨迹和机体振动的  $1\Omega$  分量来实现质量不平衡和桨距不平衡的校正。但是从旋翼不平衡故障空间到桨尖轨迹和机体振动  $1\Omega$  分量空间不满足一一映射的关系,桨尖轨迹正常的旋翼不一定就是平衡的<sup>[1]</sup>。由于现代直升机机体加装了越来越多的各种传感器

可用于机体状态监测,其中就包括各个位置的振动传感器用于监测机体振动水平<sup>[2-4]</sup>,根据直升机旋翼不平衡故障空间与多点机体振动频谱幅值空间存在一对一映射关系的理论,可利用机身振动传感器采集的振动数据通过小波变换和神经网络来预测 3 种不平衡故障,此项方法应用于直升机的状态监测与故障诊断系统,将更加便捷地在地面维护中判断故障问题,并能够在飞行过程中对直升机旋翼的平衡状态进行监测。

国内外直升机旋翼故障诊断方面已有很多研

**基金项目:**航空科学基金(20145752036)资助项目。

**收稿日期:**2016-12-15;**修订日期:**2017-03-01

**通信作者:**高亚东,男,副教授,E-mail:gydae@nuaa.edu.cn。

**引用格式:**徐永勤,高亚东,李清龙.基于小波变换和神经网络的直升机旋翼不平衡故障诊断方法[J].南京航空航天大学学报,2017,49(2):212-218. XU Yongqin, Gao Yadong, Li Qinglong. Helicopter rotor imbalance fault diagnosis based on wavelet transform and neural network[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017,49(2):212-218.

究:Ganguli 等人建立了直升机有限元模型,对直升机旋翼模拟单故障和复合故障使用反向传播神经网络(BPNN)进行了诊断<sup>[5-6]</sup>。高亚东等人在旋翼试验台上利用 3 片桨叶的旋翼模拟单一故障和复合故障,通过测量旋翼试验台台体振动响应信号,分析其频谱特征,利用 BP 神经网络进行了故障分类和程度识别<sup>[7-8]</sup>。谢习华等人提出了一种基于粒子群算法和广义回归神经网络模型(PSO-GRNN)的故障诊断方法<sup>[9]</sup>。

高亚东<sup>[10]</sup>等人通过理论计算证明了旋翼不平衡故障空间与桨毂中心六力素空间存在一对一对映射关系,从桨毂中心六力素空间到多点机体振动频谱幅值空间存在一对一对映射关系,由此证明了旋翼不平衡故障空间到多点机体振动频谱空间存在着的一对一对映射关系,构成了仅使用机体振动信号就可以诊断单一旋翼不平衡故障的理论基础。文献[8]证明了从复合故障空间到桨毂中心六力素空间存在一对一对映射关系,构成仅依靠机体振动就可以诊断旋翼复合不平衡故障的理论基础。

## 1 试验简述

直升机前飞时,旋翼周围的气动环境是周期变化的,桨叶上产生  $1\Omega, 2\Omega, 3\Omega, \dots$  周期交变载荷,引起桨叶挥舞、摆振和扭转的周期运动。各片桨叶气动力及质量在桨毂中心沿固定坐标系合成为周期变化的 3 个力和 3 个力矩,即桨毂六力素,其频率成分为桨叶片数  $k$  整数倍乘以转速  $\Omega$  的整数倍  $1k\Omega, 2k\Omega, 3k\Omega, \dots$ 。故障类型不同,六力素频谱各不相同,相应机体振动频谱也不相同,所以本试验需要测量的是机体的振动值。

### 1.1 试验设备

试验台如图 1 所示。台体顶层安装一过渡板,主要用来安装电机以及加速度传感器等。电机设计成为双向出轴,一端连接旋翼桨毂,另一端连接测速转盘,通过光电传感器测量旋翼转速及确定桨叶相位,桨毂中心距离地面 2.7 m。

桨叶片数为 3 片,翼型为 NACA0015,外形无负扭转,矩形平面;旋翼直径 2 m,桨叶片数为 3 片,桨叶弦长 60 mm,叶展 800 mm。风洞为 3.2 m 低速风洞,最大风速可达 50 m/s。变频调速器,调速范围 0~1 000 r/min。振动信号采集系统 LMS。

4 个加速度传感器安放位置如图 2 所示。图 2 中,1,2 两个传感器布置在垂直方向,负责测量台体的垂直振动信号;3,4 号传感器布置在水平面内,分别负责测量台体的横向和纵向振动信号。在

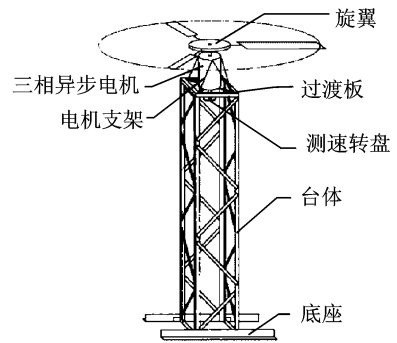


图 1 试验台

Fig. 1 Test bed

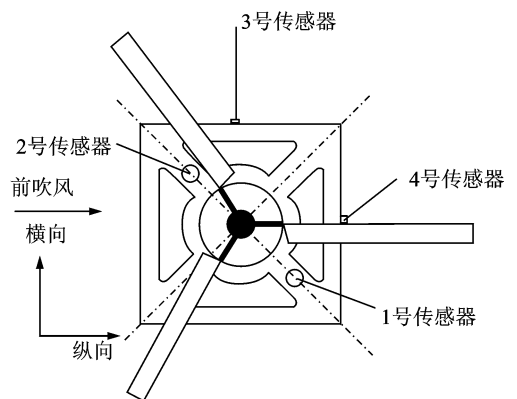


图 2 加速度传感器位置示意

Fig. 2 Accelerometer sensor position

LMS 通道连接中,一通道接光电转速计,为旋翼转速信号触发;二通道采集台体横向振动信号;三通道和四通道采集台体的垂直振动信号;五通道采集纵向振动信号。

### 1.2 故障设置

旋翼试验台模拟旋翼平衡无故障状态,质量不平衡故障(C 桨叶)、桨距不平衡故障( $8^\circ$ 为基准桨距,A 桨叶)和后缘调整片不平衡故障(A 桨叶)几种情况,旋翼设定转速  $\Omega$  为 960 r/min。旋翼 3 种单故障的故障程度设置如表 1 所示,根据正交化法则设计的 9 种复合故障设置如表 2 所示。

表 1 单故障的故障程度设置

Tab. 1 Degree of single fault

故障名称	故障程度									
桨距不平衡/ $^\circ$	3	4	5	6	8	10	11	12	13	14
配重不平衡/g	0	12.6	19.3	26.2	30.7	35.2	39.7			
调整片不平衡/ $^\circ$	-5	-2	0	1	3	5				

表2 复合故障的故障程度设置

Tab.2 Degree of compound fault

故障名称	故障程度								
桨距不平衡/(°)	3	3	3	10	10	10	14	14	14
配重不平衡/g	12.6	26.2	39.7	12.6	26.2	39.7	12.6	26.2	39.7
调整片不平衡/(°)	-5	3	5	5	-5	3	3	5	-5

## 2 故障特征提取

小波变换是一种窗口大小固定但形状可改变,时间窗和频率窗都可以改变的时频局域化分析方法,即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,即多尺度分析<sup>[11]</sup>。

小波包分析方法是多分辨率小波分析的推广,它提供了更为丰富的信号分析方法,可以对信号的高频部分做更加细致的刻画,对信号的分析能力更强<sup>[11]</sup>。

本文利用小波包变换对试验中4个传感器获得的直升机机体振动信号进行分析。小波包提取特征值包含以下步骤<sup>[12-13]</sup>:

(1)对振动信号进行 $n$ 层小波包分解,分解系数为 $(X_n^0, X_n^1, \dots, X_n^{2^n-1})$ 。

(2)小波分解系数重构各个子频带范围内的信号记作 $S_n^i (i=0, 1, \dots, 2^n-1)$ 。

(3)各个子频带的能量表示为

$$E_n^i = \int |S_n^i|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{ik}|^2$$

其中 $x_{ik} (k=1, 2, \dots, m)$ 为信号 $S_n^i$ 的所有离散点的幅值。

(4)当旋翼不平衡故障发生时,各阶振动所在频带内的能量发生变化,因此,可以提取其能量构建出特征向量用于故障诊断。

### 2.1 振动分量幅值的获取

直升机机体 $k\Omega$ 振动幅值的大小可通过小波包分解后 $k\Omega$ 所在频带的能量来反映,即利用小波包分解进行能量分析。表3为无故障时,各通道对应频带的能量,表4为3种单故障时,各通道对应频带能量。表5为两种复合故障组合时,各通道对应频带能量。

### 2.2 振动分量相位的获取

在本试验中,使用机体 $1\Omega$ 振动分量的初相位判断旋翼故障发生的方位<sup>[8]</sup>,本文采用小波(db4)变换进行五层分解,重构第4层(32~16 Hz)和第5层(16~8 Hz)信号后进行快速傅里叶变换,求出 $1\Omega$ 分量的相位。利用小波工具箱处理单故障(桨

表3 无故障频带能量

Tab.3 Frequency band energy of normal condition

通道号	横向	垂向	纵向
$1\Omega$	0.249 5	0.031 7	0.320 5
$2\Omega$	0.014 2	0.074 6	0.028 0
$3\Omega$	0.636 9	5.851 6	5.138 3
$4\Omega$	0.043 6	0.912 3	0.070 8
$5\Omega$	0.794 1	1.506 2	0.394 0
$6\Omega$	0.275 4	0.010 9	0.137 3

表4 单故障频带能量

Tab.4 Frequency band energy of single fault

单故障	通道号	横向	垂向	纵向
桨距不平衡(14°)	$1\Omega$	27.881 9	9.157 1	43.200 7
	$2\Omega$	0.237 2	0.373 5	0.152 9
	$3\Omega$	0.440 8	1.629 0	1.167 0
	$4\Omega$	0.008 0	0.124 3	0.023 3
	$5\Omega$	0.088 1	0.574 1	0.065 1
	$6\Omega$	0.061 7	0.023 6	0.069 8
质量不平衡(26.2 g)	$1\Omega$	11.510 2	8.260 8	12.513 3
	$2\Omega$	0.026 1	0.180 1	0.104 9
	$3\Omega$	0.044 8	4.683 4	0.193 5
	$4\Omega$	0.019 7	0.412 2	0.009 7
	$5\Omega$	0.027 0	0.413 3	0.006 9
	$6\Omega$	0.659 7	0.056 5	0.081 1
调整片不平衡(+5°)	$1\Omega$	1.663 2	0.886 3	1.041 4
	$2\Omega$	0.201 6	0.305 7	0.348 8
	$3\Omega$	0.074 0	2.639 9	0.332 2
	$4\Omega$	0.166 0	0.243 4	0.029 2
	$5\Omega$	0.048 3	0.864 9	0.043 0
	$6\Omega$	1.763 4	0.109 3	0.433 1

表5 复合故障频带能量

Tab.5 Frequency band energy of compound fault

复合故障	通道号	横向	垂向	纵向
桨距3° 质量39.7 g 调整片5°	$1\Omega$	15.773 2	3.034 3	15.628 1
	$2\Omega$	0.172 3	0.144 0	0.159 3
	$3\Omega$	0.023 9	2.660 8	0.065 5
	$4\Omega$	0.106 6	0.425 3	0.015 1
	$5\Omega$	0.032 7	0.304 9	0.003 1
	$6\Omega$	0.539 5	0.037 7	0.019 0
桨距14° 质量39.7 g 调整片-5°	$1\Omega$	21.989 8	18.365 5	22.205 3
	$2\Omega$	0.014 0	0.122 0	0.087 7
	$3\Omega$	0.037 3	3.864 2	0.081 3
	$4\Omega$	0.053 9	0.116 1	0.002 1
	$5\Omega$	0.006 5	0.390 2	0.001 8
	$6\Omega$	0.144 9	0.061 2	0.012 8

距3°)悬停状态下2通道的信号,如图3所示。图中纵坐标表示源加速度信号(s)和各层分解信号的幅值。

对d4和d5相加后进行傅里叶变换,可以得到 $1\Omega$ 分量(16.23 Hz)的相位信息(-43.64°),如图4所示。对于大量的信号的一阶相位信息则

编程进行计算,表 6 所示为前述几种故障的  $1\Omega$  分量的相位信息。

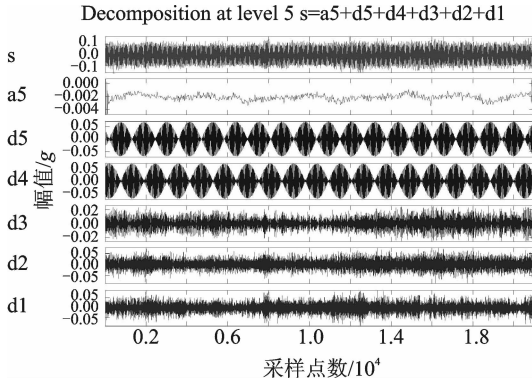


图 3 小波工具箱对信号进行 5 层分解

Fig. 3 Five-layer decomposition of signal by wavelet package toolbox

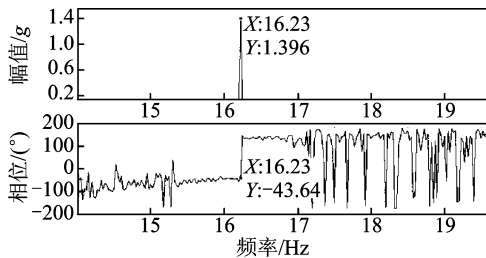


图 4 获取相位信息

Fig. 4 Phase information acquisition

表 6 各通道一阶分量的相位

Tab. 6 Phase of first order component of each channel

故障	各通道 $1\Omega$ 分量相位/(°)		
	横向	垂向	纵向
桨距 $14^\circ$	105.9	167.1	57.4
质量 26.2 g	81.1	145.6	32.7
调整片 $+5^\circ$	85.4	155.4	36.1
桨距 $3^\circ$ , 质量 39.7 g, 调整片 $5^\circ$	73.1	146.2	26.3
桨距 $14^\circ$ , 质量 39.7 g, 调整片 $-5^\circ$	-94.1	-37.9	-146.1

### 3 神经网络故障诊断

人工神经网络是一种应用类似于大脑神经突触连接结构并进行信息处理的数学模型,人工神经网络具有学习和自适应的能力,可以通过预先提供的一批相互对应的输入、输出数据,分析掌握两者之间潜在的规律,最终根据这些规律,用新的输入数据来推算输出结果<sup>[14]</sup>。

本文采用 BP 神经网络进行故障分类和故障程度识别。BP 神经网络是目前故障诊断领域应用十分广泛和成功的一种人工神经网络,其网络结构如图 5 所示。

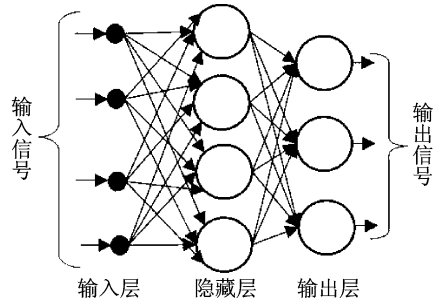


图 5 BP 神经网络结构

Fig. 5 BP neural network structure

对于 BP 神经网络,输入输出层的神经元个数可根据输入输出数据的维数进行确定。本文中输入变量定义如表 7 所示,输入数据的维数由所需机体振动分量的阶数决定。输出变量定义如表 8 所示。

表 7 输入变量定义

Tab. 7 Input parameters

输入变量	输入变量名称
$E_n$	小波包分解后某方向 $n$ 阶振动分量所在频带的能量
$\varphi_n$	某方向 $n$ 阶振动分量的相位

表 8 输出变量定义

Tab. 8 Output parameters

输出变量	输出变量含义
$O_1$	+0.5 A 桨叶桨距不平衡故障
	-0.5 无上述故障
$O_2$	+0.5 C 桨叶质量不平衡故障
	-0.5 无上述故障
$O_3$	+0.5 A 桨叶调整片不平衡故障
	-0.5 无上述故障
$P$	A 桨叶桨距不平衡故障程度
$M$	C 桨叶质量不平衡故障程度
$T$	A 桨叶调整片不平衡故障程度

隐层设计中,对于任何闭区间内的连续函数都可以用单隐层的 BP 网络逼近,因而一个三层 BP 网络就可以完成任意的  $n$  维到  $m$  维的映射。本文隐层神经元数目为

$$n_1 = \sqrt{n + m} + a \quad (1)$$

式中: $m$  为输出神经元数; $n$  为输入单元数; $a$  为  $(1, 10)$  之间的常数<sup>[15]</sup>。

#### 3.1 单故障识别

取包含 3 种单故障以及无故障的测量数据总量的 3/4(总共有 115 组数据)用于训练神经网络,未参加训练的数据用于测试网络。

单故障使用两种神经网络进行故障诊断。利用神经网络 A 进行故障分类测试,包含一个隐层,神经元数目为 15,隐层和输出层分别采用 logsig 和 tansig 传递函数,训练方法为 trainlm,A 网络采

用3个方向前五阶(故障正确分类所需机体振动分量最少阶数<sup>[1]</sup>)振动分量的  $E_n$  作为输入样本,输出向量为  $[O_1, O_2, O_3]^T$ , 其含义如表8所示。部分故障测试数据样本如表9所示。

故障分类测试样本的故障设置和测试结果如表10所示,采取了未参与训练的数据样本进行测试。由测试结果可知,利用小波变换处理的数据可以实现对旋翼不平衡单故障的正确分类。

表9 部分故障测试数据样本

Tab.9 Part of input samples of fault test

	桨距不平衡/(°)				质量不平衡/g				调整片不平衡/(°)			
	3	5	10	14	12.6	19.3	26.2	39.7	1	3	5	-5
输入样本	10.78	15.73	10.79	27.88	4.73	9.04	11.51	11.66	0.06	0.56	1.66	0.08
	0.01	0.01	0.01	0.24	0.06	0.04	0.03	0.02	0.21	0.16	0.20	0.22
	0.05	0.09	0.10	0.44	0.07	0.05	0.04	0.02	0.15	0.12	0.07	0.13
	0.05	0.04	0.03	0.01	0.05	0.03	0.02	0.05	0.20	0.16	0.17	0.20
	0.10	0.33	0.51	0.09	0.07	0.03	0.03	0.04	0.16	0.10	0.05	0.29
	0.04	0.02	0.02	0.10	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.01	0.04	0.00
	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.05	0.02
	1.27	2.11	4.01	1.58	3.10	3.25	2.93	2.75	2.19	2.77	1.54	2.85
	1.94	1.47	0.42	0.23	0.04	0.06	0.19	0.08	0.06	0.32	0.10	0.42
	0.12	0.56	0.12	0.74	0.24	0.23	0.16	0.12	0.15	0.25	0.29	0.40
	20.16	21.70	15.45	43.20	5.71	10.73	12.51	17.01	0.11	0.53	1.04	0.11
	0.01	0.03	0.01	0.15	0.16	0.14	0.10	0.05	0.43	0.39	0.35	0.32
	0.57	0.82	0.88	1.17	0.32	0.28	0.19	0.07	0.67	0.57	0.33	0.57
	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.06	0.03	0.09
	0.04	0.20	0.18	0.07	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.04	0.03
输出样本	0.50	0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50
	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50
	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

表10 单故障分类测试的测试结果

Tab.10 Part of test result of single fault classification

故障	桨距不平衡/(°)				质量不平衡/g				调整片不平衡/(°)			
	4	6	11	13	12.6	19.3	26.2	39.7	1	3	5	-5
输出样本	0.50	0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50
	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50
	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

B网络用于故障程度检测,包含1个含有10个神经元的隐层,单输出层(表8中的P,M或T),分别采用logsig和tansig传递函数,训练方法为trainlm,B网络的输入数据为3个方向一阶振动分量及其相位值,在此直接给出神经网络对3种单故障的故障程度识别的误差,分别如图6~8所示。

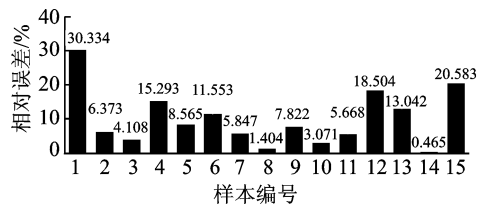


图7 B网络中质量不平衡程度相对误差

Fig.7 Relative error of mass imbalance in network B

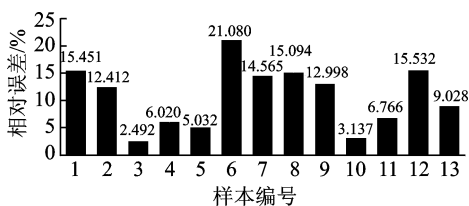


图6 B网络中桨距不平衡程度相对误差

Fig.6 Relative error of pitch imbalance in network B

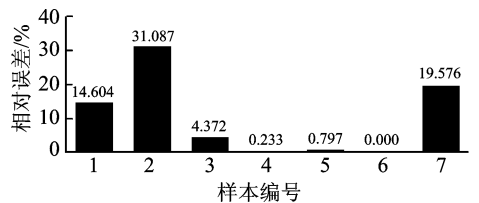


图8 B网络中调整片不平衡程度相对误差

Fig.8 Relative error of trim tab imbalance in network B

### 3.2 复合故障

复合故障使用两种神经网络进行故障诊断。复合故障神经网络 C 包含一个隐层,神经元数目为 15,隐层和输出层分别采用 logsig 和 tansig 传递函数,训练方法为 trainlm,采用和网络 A 同样的数据输入输出形式,复合故障的训练样本中加入了无故障样本用于训练,输出向量为  $[O_1, O_2, O_3]^T$ ,其含义如表 8 所示。部分故障测试结果如表 11 所示(表中  $P, M, T$  后括号内的数值代表故障程度)。

表 11 部分复合故障测试结果

Tab. 11 Part of test results of compound fault classification

故障	$P(8^\circ)$	$P(8^\circ)$	$P(3^\circ)$	$P(3^\circ)$	$P(3^\circ)$	$P(10^\circ)$	$P(10^\circ)$	$P(10^\circ)$	$P(14^\circ)$	$P(14^\circ)$	$P(14^\circ)$
	$M(0\text{ g})$	$M(0\text{ g})$	$M(1\text{ g})$	$M(3\text{ g})$	$M(6\text{ g})$	$M(1\text{ g})$	$M(3\text{ g})$	$M(6\text{ g})$	$M(1\text{ g})$	$M(3\text{ g})$	$M(6\text{ g})$
	$T(0^\circ)$	$T(0^\circ)$	$T(-5^\circ)$	$T(3^\circ)$	$T(5^\circ)$	$T(5^\circ)$	$T(-5^\circ)$	$T(3^\circ)$	$T(3^\circ)$	$T(5^\circ)$	$T(-5^\circ)$
$O_1$	-0.487	-0.485	0.484	0.492	0.495	0.493	0.495	0.495	0.496	0.495	0.497
$O_2$	-0.486	-0.494	0.494	0.499	0.499	0.499	0.497	0.498	0.485	0.499	0.498
$O_3$	-0.492	-0.488	0.476	0.487	0.482	0.482	0.468	0.478	0.411	0.474	0.484

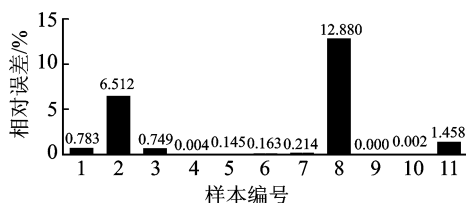


图 9 D 网络中桨距不平衡程度相对误差

Fig. 9 Relative error of pitch imbalance in network D

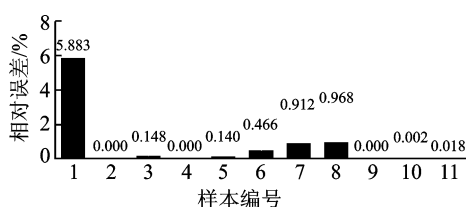


图 10 D 网络中质量不平衡程度相对误差

Fig. 10 Relative error of mass imbalance in network D

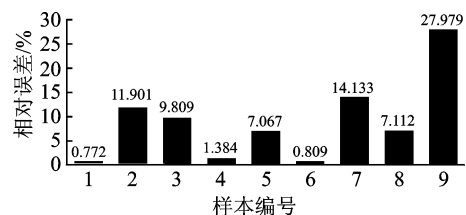


图 11 D 网络中调整片不平衡程度相对误差

Fig. 11 Relative error of trim tab imbalance in network D

## 4 结 论

本文利用小波和小波包对直升机旋翼模型单故障和复合故障试验的机体振动数据进行分析,并提取特征参数。同时利用 BP 神经网络进行故

障分类和故障程度识别,可实现正确的单故障和复合故障分类,验证了小波(包)分析在利用机体振动信号进行直升机旋翼不平衡故障诊断上的可行性。

对于故障程度的识别,相对误差偏高,这是由于个别数据测量误差或噪声造成的。但平均值在 10% 左右,具有一定的参考意义,可通过网络优化进一步降低相对误差;也有部分测试样本相对误差比较大,达到了 20% 以上,需要进一步提升信号测试和分析过程中的信噪比。

表 11 部分复合故障测试结果

Tab. 11 Part of test results of compound fault classification

故障	$P(8^\circ)$	$P(8^\circ)$	$P(3^\circ)$	$P(3^\circ)$	$P(3^\circ)$	$P(10^\circ)$	$P(10^\circ)$	$P(10^\circ)$	$P(14^\circ)$	$P(14^\circ)$	$P(14^\circ)$
	$M(0\text{ g})$	$M(0\text{ g})$	$M(1\text{ g})$	$M(3\text{ g})$	$M(6\text{ g})$	$M(1\text{ g})$	$M(3\text{ g})$	$M(6\text{ g})$	$M(1\text{ g})$	$M(3\text{ g})$	$M(6\text{ g})$
	$T(0^\circ)$	$T(0^\circ)$	$T(-5^\circ)$	$T(3^\circ)$	$T(5^\circ)$	$T(5^\circ)$	$T(-5^\circ)$	$T(3^\circ)$	$T(3^\circ)$	$T(5^\circ)$	$T(-5^\circ)$
$O_1$	-0.487	-0.485	0.484	0.492	0.495	0.493	0.495	0.495	0.496	0.495	0.497
$O_2$	-0.486	-0.494	0.494	0.499	0.499	0.499	0.497	0.498	0.485	0.499	0.498
$O_3$	-0.492	-0.488	0.476	0.487	0.482	0.482	0.468	0.478	0.411	0.474	0.484

障分类和故障程度识别,可实现正确的单故障和复合故障分类,验证了小波(包)分析在利用机体振动信号进行直升机旋翼不平衡故障诊断上的可行性。

对于故障程度的识别,相对误差偏高,这是由于个别数据测量误差或噪声造成的。但平均值在 10% 左右,具有一定的参考意义,可通过网络优化进一步降低相对误差;也有部分测试样本相对误差比较大,达到了 20% 以上,需要进一步提升信号测试和分析过程中的信噪比。

### 参考文献:

- [1] 高亚东,张曾锴. 直升机旋翼不平衡故障诊断试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(2):214-217. GAO Yadong, ZHANG Zengchang. Experimental study on unbalance fault diagnosis of helicopter rotor [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(2):214-217.
- [2] 左丽华. 国外直升机 HUMS 系统的应用[J]. 直升机技术, 2000(3):48-53.
- [3] PAWAR P M, GANGULI R. Helicopter rotor health monitoring—A review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 2007, 221(5):631-647.
- [4] LAND J E. HUMS—The benefits—past, present and future [C]// Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings. [S. l.]: IEEE, 2001:3083-3094.
- [5] GANGULI R, CHOPRA I, HAAS D J. A physics based model for rotor system health monitoring[C]// the 22nd European Rotorcraft Forum. Brighton, UK: [s. n.], 1996:98-1-98-22.

- [6] GANGULI R, CHOPRA I, HAAS D J. Helicopter rotor system health monitoring using numerical simulation and neural networks[C]//The 53rd AHS Annual Forum. [S.l.]:The American Helicopter Society Inc,1997:1285-1296.
- [7] 高亚东,张曾鋈,余建航. 用机体振动诊断旋翼失衡故障方法研究[J]. 振动工程学报, 2002, 15(4):395-398.  
GAO Yadong, ZHANG Zengchang, YU Jianhang. Novel helicopter rotor imbalance fault diagnosis using only information from fuselage vibration[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(4):395-398.
- [8] 高亚东,张曾鋈,余建航. 用机体振动诊断直升机旋翼复合不平衡故障研究[J]. 航空学报, 2004, 25(1):26-30.  
GAO Yadong, ZHANG Zengchang, YU Jianhang. Novel method for diagnosis of helicopter rotor compound imbalance fault by using fuselage vibrations [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(1):26-30.
- [9] 谢习华,徐雷,谭耀,等. 基于 PSO-GRNN 的直升机旋翼不平衡故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(2):175-179.  
XIE Xihua, XU Lei, TAN Yao, et al. Fault diagnosis of helicopter rotor's unbalance based on PSO-GRNN algorithms[J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(2):175-179.
- [10] 高亚东,张曾鋈. 用机体振动信号诊断旋翼不平衡故障的理论基础[J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(4):279-282.  
GAO Yadong, ZHANG Zengchang. A theoretical basis for diagnosis of helicopter rotor imbalance fault using only information from fuselage vibrations[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2003, 23(4):279-282.
- [11] 葛哲学. 小波分析理论与 MATLAB R2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2007.  
GE Zhexue. Wavelet analysis theory and MATLAB R2007 implementation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [12] 许小刚,王松岭,刘锦廉. 基于小波包能量分析及改进支持向量机的风机机械故障诊断[J]. 动力工程学报, 2013, 33(8):606-612.  
XU Xiaogang, WANG Songling, LIU Jinlian. Mechanical fault diagnosis of fan based on wavelet packet energy analysis and improved support vector machine[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(8):606-612.
- [13] 王腾蛟. 基于小波神经网络的异步电机故障诊断研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.  
WANG Tengjiao. Research of the asynchronous motor fault diagnosis based on the wavelet neural network[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [14] HAYKIN S. 神经网络与机器学习[M]. 申富饶译. 北京:机械工业出版社,2011.  
HAYKIN S. Neural networks and learning machines [M]. Trans by SHEN Furao. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [15] 葛哲学. 神经网络理论与 MATLAB R2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2007.  
GE Zhexue. Neural network theory and MATLAB R2007 implementation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.