

基于灰色预测的直升机齿轮箱状态预测方法

林泽力¹, 王景霖^{1,2}, 郑 国², 沈 勇², 何 泳²

(1. 故障诊断与健康管理技术航空科技重点实验室, 上海 201601; 2. 上海航空测控技术研究所, 上海 201601)

摘要: 作为直升机上重要的关键部件, 直升机齿轮箱能够将动力转换为动力输出形式, 从而满足不同形式下动力的需要; 针对直升机齿轮箱状态无法准确预测的技术难题, 将灰色系统理论中的灰色预测方法运用到直升机齿轮箱中, 有效解决了齿轮箱使用状态难以准确预测的技术难题; 首先对采集到的直升机齿轮箱的不同的振动信号进行特征提取, 然后采用信息融合技术, 将不同振动信号的特征值进行融合, 最后运用灰色预测方法对直升机齿轮箱的使用状态进行预测; 文中对所提出的方法进行了试验验证, 结果表明, 所提出的基于灰色预测的直升机齿轮箱状态预测方法能够实现对于直升机齿轮箱的状态准确预测的效能, 并对其他航空设备以及机械设备的状态预测具有一定的借鉴意义。

关键词: 灰色预测; 齿轮箱; 状态预测; 信息融合

State Prediction of Helicopter Gearbox Based on Grey Prediction Method

Lin Zeli¹, Wang Jinglin^{1,2}, Zheng Guo², Shen Yong², He Yong²

(1. Shanghai Aero Measurement & Control Technology Research Institute, Shanghai 201601, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Fault Diagnosis and Health Management, Shanghai 201601, China)

Abstract: As a key part of the helicopter, the helicopter gearbox can convert power into the power output, so as to meet the need of different forms. Aiming at the technical problem of helicopter gearbox condition can not be accurately forecast, the grey prediction method is applied to the helicopter gearbox, so effectively solve the difficult technical problem of the accurately predict to the status gearbox. Firstly, the vibration signal of helicopter gearbox which have been collected, and the feature were picked up. Then, the paper used the information fusion technology for the characteristics of different values vibration signal to fusion. Finally, the paper used the grey prediction method for helicopter gearbox to state prediction. In this paper, the proposed method is verified by experiment. The results show that the proposed state grey prediction method can achieve the accurate prediction of helicopter gearbox state performance, and the state prediction method has a certain significance for other aviation equipment and machinery equipment.

Keywords: grey prediction; gearbox; state prediction; information fusion

0 引言

直升机齿轮箱作为直升机上的一种连接和传递动力的关键部件, 其不仅能够连接动力输出系统与动力接收系统, 而且还负责动力传递, 因此, 在直升机上其具有重要的作用^[1-2]。齿轮箱的健康状态将直接影响直升机运行的安全性和可靠性, 据统计, 在直升机旋转部件出现的故障中, 有大约 60% 的故障是由齿轮箱出现故障而造成的^[3]。及时、准确掌握齿轮箱运行过程中的健康状态, 及早发现齿轮箱潜在故障, 准确预测直升机齿轮箱在运行中的工作状态, 对于提高直升机的飞行安全、降低直升机停机时间以及制定科学、高效的维修策略都具有重要的现实意义^[4-5]。

近年来, 人们在大量方法进行研究的基础上, 获得了部分的应用效果, 如将神经网络、支持向量机等智能学习方法应用到直升机齿轮箱的状态预测上, 虽然得到了一定的状态预测效果, 然而这些方法均有其优缺点, 无法满足日益增长的航空技术发展的需要^[6-7]。在通过对大量的预测方法的研究中, 灰色系统理论中的灰色预测方法在对小样本数据上的预测, 具有重要的优势^[8], 因此, 本文采用基于灰色预测的状态预测方

法, 对直升机齿轮箱进行状态预测, 得到较好的预测结果。

1 灰色预测模型

1.1 灰色系统理论

灰色系统理论是 1982 年由著名学者邓聚龙教授提出, 其仅通过某些已知信息, 来获取其中的有用部分, 便能得到研究对象内在的变化规律^[9]。因此一经提出, 立即受到了国内外各界的关注, 广泛应用于经济管理、军事科技、医药等众多科学研究领域, 并一直处于改进发展当中。

灰色系统理论主要内容之一是灰色序列的生成, 构建灰色序列是灰色预测的关键, 其生成方式有多种, 包括累加生成、累减生成、插值生成等^[10]。

1.2 灰色系统模型

灰色预测模型 (GM (1, n) 模型) 的建模过程如下^[11]:

对原始数列 $X_i^0 = \{x_i^0(k), k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n\}$, 经过一次累加生成, 弱化原始数据的随机性, 即有:

$$X_i^{(1)} = \{x_i^{(1)}(1), x_i^{(1)}(2), \dots, x_i^{(1)}(m)\} = \left\{ \sum_{j=1}^1 x_i^0(j), \sum_{j=1}^2 x_i^0(j), \dots, \sum_{j=1}^m x_i^0(j), \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

根据上式可以建立 n 元一阶线性微分方程:

$$\frac{dx_i^{(1)}}{dt} + ax_i^{(1)} = b_1 x_2^{(1)} + b_2 x_3^{(1)} + \dots + b_{n-1} x_n^{(1)} \quad (2)$$

收稿日期: 2015-11-16; 修回日期: 2015-12-22。

基金项目: 航空科学基金(2014ZD3301)。

作者简介: 林泽力(1987-), 男, 河南商丘人, 硕士研究生, 主要从事飞机故障诊断与健康管理的方向的研究。

设 $\hat{a} = (a, b_1, b_2, \dots, b_n)^T$, 记:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix}$$

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T \quad (3)$$

$$L = \begin{pmatrix} (x_1^{(1)}(1) + x_1^{(1)}(2))/2 & (x_2^{(1)}(1) + x_2^{(1)}(2))/2 & \cdots & (x_m^{(1)}(1) + x_m^{(1)}(2))/2 & 1 \\ (x_1^{(1)}(2) + x_1^{(1)}(3))/2 & (x_2^{(1)}(2) + x_2^{(1)}(3))/2 & \cdots & (x_m^{(1)}(2) + x_m^{(1)}(3))/2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (x_1^{(1)}(n-1) + x_1^{(1)}(n))/2 & (x_2^{(1)}(n-1) + x_2^{(1)}(n))/2 & \cdots & (x_m^{(1)}(n-1) + x_m^{(1)}(n))/2 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$Y = \begin{pmatrix} x_1^{(0)}(2) & x_2^{(0)}(2) & \cdots & x_m^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) & x_2^{(0)}(3) & \cdots & x_m^{(0)}(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{(0)}(n) & x_2^{(0)}(n) & \cdots & x_m^{(0)}(n) \end{pmatrix} \quad (7)$$

把上述 (6) 和 (7) 两式带入 (5) 式中, 求出 \hat{a} , 从而可以得到参数矩阵的辨识值 \hat{A} 和 \hat{B} , 最后求解微分方程, 由积分生成变换原理, 与 $e^{-\lambda t}$ 相乘, 积分后整理得到多变量灰色预测模型的时间响应函数为:

$$X^{(1)}(t) = e^{\lambda t} (X^{(1)}(0) + A^{-1}B) - A^{-1}B \quad (8)$$

将时间响应函数离散化做累减还原得到:

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k) \quad (9)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

因此, 即可构建灰色预测模型^[12-13]。

2 振动信号特征提取

通过在实验室状态下模拟直升机齿轮箱的实际工作状态, 采集齿轮箱的振动信号。本文运用 3 个振动传感器采集齿轮箱上不同的振动信号, 获得齿轮箱状态预测的原始数据。采用基于小波分析的特征提取方法对原始信号进行特征提取^[14], 结果如表 1 所示。

表 1 直升机齿轮箱的振动信号特征值

	一阶轴频	二阶轴频	三阶轴频
1	0.481	0.928	0.386
2	1.008	0.392	0.887
3	0.524	0.526	0.594
4	1.888	0.207	0.603
5	1.251	0.349	0.337
⋮	⋮	⋮	⋮
m	0.814	0.141	0.924

3 振动信号特征层融合

在实验室状态下采集到的直升机齿轮箱的数据, 进行特征提取, 提取能够表征直升机齿轮箱状态的特征值。为了更好的实现对直升机齿轮箱进行状态预测, 需要对直升机齿轮箱振动信号的特征值进行信息融合, 剔除不同的特征值之间的杂质信息, 从而方便运用灰色预测方法对直升机齿轮箱进行状态预测。运用基于加权融合算法的特征层融合方法进行信息融合^[15], 结果如表 2 所示。

其中: A 、 B 为模型参数矩阵, 其辨识值 \hat{A} 和 \hat{B} 可以由最小二乘法确定。即:

$$\hat{A} = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})^T; \hat{B} = (b_i)^T \quad (4)$$

$$\hat{a}_i = (L^T L)^{-1} L^T Y \quad (5)$$

其中:

表 2 直升机齿轮箱的振动信号特征值

	一阶轴频	二阶轴频	三阶轴频	融合结果
1	0.481	0.928	0.386	0.480 9
2	1.008	0.392	0.887	0.841 9
3	0.524	0.526	0.594	0.570 4
4	1.888	0.207	0.603	0.804 5
5	1.251	0.349	0.337	0.521 5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
m	0.814	0.141	0.924	0.749 3

4 基于灰色预测的直升机齿轮箱状态预测

4.1 基于灰色预测的状态预测方法实现步骤

通过对灰色预测方法的深入研究与分析, 将灰色预测方法应用到直升机齿轮箱状态预测中, 得到较好的预测效果。主要实现步骤如下^[16]:

步骤 1: 在实验室状态下模拟直升机齿轮箱的实际工作状态, 采集齿轮箱的三路振动信号;

步骤 2: 运用小波分析方法对所采集到的三路振动信号进行特征提取, 提取振动信号中的特征值;

步骤 3: 运用加权融合算法对所提取到的特征值进行信息融合, 得到融合特征值;

步骤 4: 运用灰色预测算法对直升机齿轮箱进行状态预测, 得到预测结果;

步骤 5: 将预测结果与实际结果进行对比, 求取预测误差。

4.2 基于灰色预测的直升机齿轮箱状态预测案例

依据所研究的灰色理论中的灰色预测方法对直升机齿轮箱进行状态预测, 以预测 10 组数据为例, 得到预测结果值如表 3 所示, 并计算得到百分比误差为 0.187 96%, 与实际数据进行相比, 结果在可接受范围之内, 从而可得到运用基于灰色预测的直升机齿轮箱的状态预测方法能够实现对直升机齿轮箱的状态预测, 能够得到很好的预测效果。

5 结论

本文首先采用直升机齿轮箱专用试验平台采集能够表征直升机齿轮箱状态特征的三组振动信号, 然后依据采集到的振动信号, 运用特征提取技术, 提取振动信号中的特征成分, 从而发掘出振动信号中的有用成分, 其次, 依据提取的特征成分, 运用信息融合技术, 将提取到的特征信息进行信息融合, 方便

表 3 直升机齿轮箱灰色预测 10 组数据结果与实际对比

序号	预测数据	实际监测数据
1	0.724 4	0.698 4
2	0.724 8	0.716 8
3	0.725 3	0.735 9
4	0.725 7	0.741 2
5	0.726 1	0.663 3
6	0.726 6	0.723 3
7	0.727 0	0.730 8
8	0.727 5	0.731 0
9	0.727 9	0.715 8
10	0.728 4	0.731 6

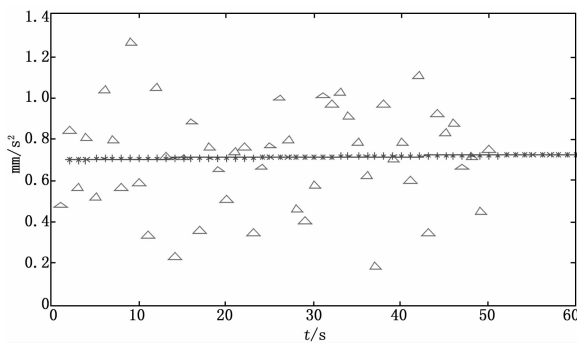


图 1 直升机齿轮箱状态预测结果图

运用灰色预测方法对直升机齿轮箱进行状态预测，最后，通过对灰色系统理论的深入分析与研究，将灰色系统理论中的灰色预测方法运用到直升机齿轮箱状态预测中，从而得到直升机齿轮箱状态预测结果，解决直升机齿轮箱状态难以准确预测的技术难题。

通过本文所提出直升机齿轮箱状态预测方法的研究，得到直升机齿轮箱状态预测结果，且预测结果与实际值进行对比，误差范围在可接受的范围之内，从而表明该方法能够实现对直升机齿轮箱进行状态预测，且对于其他旋转机械的状态预测，具有一定的借鉴意义。

(上接第 20 页)

看出，电压测试达到了 0.1 mV，完全满足 1 mV 的技术要求，电流测试达到了 0.01 mA，完全满足 0.1 mA 的技术要求，噪声的测试精度在 6 μV 之内，也满足 30 μV 的技术要求。通过对系统的校准，充分说明的系统的测试精度高。

6 结语

应用实践证明该测试系统不仅性能稳定、测试精度高、测试速度快，自动化程度高，而且还能够实现对系统内部的噪声，盲元等干扰因素进行补偿和消除，使测试系统得到进一步的完善。

参考文献:

[1] 方丹. 红外焦平面器件的信息获取电路技术 [J]. 红外, 2003 (3): 1-8.
 [2] 摆卫兵. 某型低空导弹红外位标器自动测试仪设计 [J]. 计算机测

参考文献:

[1] 张志禹, 吕延军, 张九龙, 等. 航空发动机转子磨擦故障瞬态率率诊断方法 [J]. 交通运输工程学报, 2007, 7 (4): 21-23.
 [2] Wilkinson C. Prognostic and health management for avionics [A]. 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. 2004: 3435-3447.
 [3] 王莹玉. 航空发电机健康状态预测技术人员研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2010.
 [4] Azam M, Ghoshal S, et al. Prognostics and health management (PHM) of electromechanical actuation (EMA) systems for next-generation aircraft [J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013.
 [5] 侯新国, 等. 基于 D-S 证据理论的感应电动机转子故障诊断方法研究 [J]. 电工技术学报, 2004, 19 (6): 36-38.
 [6] 杨存祥, 朱琛, 全战营. 基于 EMD-神经网络的电动机转子故障诊断方法研究 [J]. 电工文摘, 2011 (4): 36-39.
 [7] 石爱东. 基于多源信息融合的机电系统监控方法研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
 [8] 相江. 基于多子波支持向量机航电设备健康管理关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
 [9] 吴立军. 基于分层信息融合技术的航空发动机故障诊断方法研究 [D]. 天津: 中国民用航空飞行学院, 2009.
 [10] 郭显新, 郭小军, 龙海跃. 直升机传动系统健康管理技术 [J]. 机械传动, 2011, 35 (11): 86-89.
 [11] 李军星. 基于信息融合组合算法的复杂装备传动关键部件寿命预测 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
 [12] Guillen A J, Gomez J F, Crespo A, et al. Advances in PHM application frameworks: processing methods, prognosis models, decision making [J]. The Italian Association of Chemical Engineering, 2013, 33: 391-396.
 [13] Simon D L, et al. Aircraft engine gas path diagnostic methods: public benchmarking results [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136: 1-10.
 [14] Nickerson B, Ulv R. Development of a Smart Wireless Networkable Sensor for Aircraft Engine Health Management [J]. IEEE, 2001, 7: 3255-3262.
 [15] 汪平平, 张歆, 刘深. 基于线性最小方差和递归最小二乘的融合算法 [J]. 探测与控制学报, 2013, 35 (2): 33-36.
 [16] 闫建波. 基于 BP 神经网络的灰色预测模型 [D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
 [1] 唐勋, 赵刻. LVDS 远程高速红外图像采集卡设计 [J]. 电子测量技术, 2009 (08): 24-27.
 [2] 谢燕武. 红外成像寻的导弹非实物仿真系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 394-395.
 [3] 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范 [S]. 1998.
 [4] 李航. 红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
 [5] 吴传玺. 基于 TMS320DM6437 的红外成像系统非均匀性校正算法研究与实现 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2011.
 [6] 刘收. 红外成像系统噪声等效温差参数测试算法及应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (3): 975-978.
 [7] 郑可旺. 基于 PCI 总线的红外探测器图像数据采集系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (6): 1915-1917.
 [8] 徐良卿. 红外导引系统高低温跟踪性能测试技术 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (4): 1587-1589.